

毋亭, 张勇, 侯西勇. 基于半变异函数的环渤海地区 NDVI 空间格局特征研究[J]. 生态科学, 2014, 33(2): 313–320.  
WU Ting, ZHANG Yong, HOU Xiyong. Analysis of spatial patterns of NDVI over the Circum-Bohai Sea region based on semi-variogram[J]. Ecological Science, 2014, 33(2): 313–320.

# 基于半变异函数的环渤海地区 NDVI 空间格局特征研究

毋亭<sup>1,2</sup>, 张勇<sup>3</sup>, 侯西勇<sup>1</sup>

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003
2. 中国科学院大学, 北京 10049
3. 山东省土地勘测规划院, 济南 250014

**【摘要】**基于环渤海地区 1999—2009 期间年尺度的 NDVI 序列数据和半变异函数分析方法, 定量研究植被覆盖分布的空间格局特征及其时间变化特征, 结论如下: 1)辽宁省地形对植被分布的影响强于气候, 植被分布整体的连续性最好; 而在山东和京津冀区域, 温度对植被覆盖空间格局的影响强于水分, 且山东植被分布的斑块化最为显著; 2)结构性因子对辽宁、京津冀、山东三个分区植被覆盖的影响作用占主导, 但均呈减弱趋势; 3)辽宁、京津冀、山东三个分区植被覆盖空间变异最小、空间连续性最大的方向分别为东北—西南(30°)、西北—东南(150°)和西北—东南(135°), 该方向的差异体现了影响因子类型及其作用的差异性。

**关键词:** 半变异函数; 空间自相关; 空间变异; NDVI; 环渤海

doi:10.3969/j.issn. 1008-8873.2014.02.018 中图分类号: K903 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2014)02-313-08

## Analysis of spatial patterns of NDVI over the Circum-Bohai Sea region based on semi-variogram

WU Ting<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong<sup>3</sup>, HOU Xiyong<sup>1</sup>

1. Yantai Institute of Coastal Zone Research (YIC), Chinese Academy of Sciences (CAS), Yantai 264003, China
2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China
3. Shandong Provincial Land Surveying and Planning Institute, Jinan 250014, China

**Abstract:** The spatial-temporal characteristics of vegetation cover in the Circum-Bohai Sea Region from 1999 to 2009 were studied based on annual NDVI data and semi-variogram. Main conclusions are as follows. 1) The vegetation cover of Liaoning exhibited the highest continuity, while the fragmentization of the vegetation cover in Shandong Province was outstanding; impacts of terrain on the spatial distribution of vegetation cover were stronger than those of climate factors in Liaoning Province, while in Shandong Province and the Beijing-Tianjin-Hebei region, impacts of temperature were stronger than those of moisture; 2) Structural factors are dominating factors that impact on spatial patterns of vegetation cover in Liaoning Province, Shandong Province and Beijing-Tianjin-Hebei region, however, their impacts showed a weakening trend; 3) Directions in which the spatial patterns of vegetation cover were most continuous in Liaoning province, Shandong province and Beijing-Tianjin-Hebei region were northeast-southwest (30°), northwest-southeast (150°) and northwest-southeast (135°), respectively, indicating the variability of impact factors' distribution and their roles in influencing the spatial patterns of vegetation cover.

**Key words:** semi-variogram; spatial autocorrelation; spatial variation; NDVI; Circum-Bohai Sea region

---

收稿日期: 2012-10-29; 修订日期: 2013-06-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-224), 中国科学院战略性先导科技专项—应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05130703)

作者简介: 毋亭(1988—), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要从事海岸带环境与生态遥感监测、海岸带土地资源监测评估方面的研究, E-mail: wuting438891@sina.com

\*通信作者: 侯西勇, E-mail: xyhou@yic.ac.cn

## 1 前言

国际土地利用/覆盖变化(LUCC)研究计划的重要内容之一是分析土地覆盖及其变化的过程和格局<sup>[1]</sup>, 因而, 刻画土地利用/覆盖时空变化的方法体系在其研究区域与全球土地利用/覆盖变化中发挥着越来越重要的作用<sup>[2]</sup>, 近年来, GIS 与遥感技术的快速发展使得该领域的研究方法处于不断扩充、完善与优化的过程中。植被分布及其变化特征的描述是土地利用/覆盖变化研究的核心内容之一; 植被的空间格局及其变化是多种因子, 如, 气候<sup>[3]</sup>、地形<sup>[4]</sup>、土壤<sup>[5]</sup>、水文<sup>[6]</sup>以及人文过程<sup>[7]</sup>等相互作用的结果, 监测并定量化分析植被覆盖的空间格局特征有助于理解植被演替的内部作用机制, 以及为生态系统的保护与管理提供决策支持。植被覆盖格局特征的定性描述很容易, 但将其定量化则一直是生态学等学科研究的热点和难点。

近年来兴起的地统计学方法为区域化变量空间格局特征的定量研究提供了有效的模型工具, 如, 半变异函数、Moran's I 指数、分维数等。目前, 地统计学的方法已被广泛应用于众多问题的研究, 如, 探测土壤水分的空间分布<sup>[8]</sup>、土地利用的空间自相关分析<sup>[9]</sup>、城市地表温度的空间变异<sup>[10]</sup>、水生植物群落的格局特征<sup>[11]</sup>、沿海平原沉淀物耗氧量的空间结构特征<sup>[12]</sup>、土壤碳的空间格局与生态景观变量的关系<sup>[13]</sup>、淤积沉积物的水相模拟<sup>[14]</sup>等。对于植被分布的空间格局特征, 近年来国内外的相关研究也日益增多, 例如, Michael 运用半变异函数探讨针叶林退化的空间分布特征<sup>[15]</sup>; Luiz 等基于遥感数据, 利用无偏估计描述亚马逊热带雨林叶面积指数的空间分布特点<sup>[16]</sup>; Chu 等综合超级立方体、连续高斯拟合模型以及空间分析模型与指数, 监测年际干扰因素对植被空间格局的变异性的影响作用<sup>[17]</sup>; Zhu 等利用 GIMMS/NDVI 遥感数据集, 结合降水、地形、河流系统、土地利用等信息分析了柴达木盆地植被的空间分布及其影响因素<sup>[18]</sup>; 柳锦宝等基于变异函数计算分维数, 描述不同尺度植被空间格局的性状和自相似性, 很好的揭示了植被的空间异质性<sup>[19]</sup>; 郭锦等基于 3S 技术对北京市高、中、低不同等级植被斑块的聚集分布格局进行了分析<sup>[20]</sup>; 张雪艳等研究了蒙古高原植被覆盖的空间变异特征<sup>[21-22]</sup>; Sandi 等利用半变异函数计算的高草草原中指示植

被的聚集尺度分析植被的空间分布与地形以及土壤多种属性的相关关系<sup>[23]</sup>; Nancy 等采用为环境变量的空间结构与树苗群落相关变量的空间结构匹配半变异函数图的方法验证二者之间的相关关系<sup>[24]</sup>等。

环渤海地区地处华北、东北和华东的结合部, 属于暖温带大陆性季风气候, 地貌类型复杂多样, 植被类型丰富<sup>[25]</sup>, 近几十年来, 该区域经济社会发展迅速, 已成为继长江与珠江三角洲之后中国经济增长的第三极, 但是, 广泛而深刻的人类活动, 如, 城市化和土地利用变化、水资源开发利用、农业技术创新及推广、生态系统管理措施等, 对这一区域的植被覆盖产生了极为深刻的影响, 并与气候因素的作用相叠加, 使得植被覆盖的空间格局发生了一定的变化。因此, 本文利用环渤海 NDVI 数据和半变异函数分析方法, 定量分析环渤海地区植被覆盖的空间格局特征及其演变态势, 并基于半变异函数的地学意义, 推断宏观空间植被覆盖空间格局及其演变的主要影响因素。研究旨在为优化和促进区域生态系统管理提供决策支持。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

使用 1999—2009 年间的 SPOT VGT-S10 产品, 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为旬, 该数据由法国、欧盟、比利时、意大利和瑞典共同开发, 经过了大气校正、辐射校正与几何校正, 可通过网站免费获取。在 ArcGIS 中基于研究区行政边界矢量数据建立掩膜, 提取出覆盖研究区的数据, 所得数据采用 Albers 等积圆锥投影, 数据的栅格属性值为 0—255 之间的 DN 值, 需要将其转换为真实值<sup>[26]</sup>, 公式如下:

$$\text{NDVI} = 0.004 \times \text{DN} - 0.1 \quad (1)$$

### 2.2 时间尺度转换

采用通用的最大值合成法(MVC, Maximum value composite)进行时间尺度变换, 得到年尺度 NDVI 值, 该过程可同时进一步去除云、大气和太阳高度等的影响<sup>[27]</sup>, 公式如下:

$$\text{NDVI}_i = \text{Max}(\text{NDVI}_{ij}) \quad (2)$$

式中,  $\text{NDVI}_i$  是第  $i$  年的 NDVI 值,  $\text{NDVI}_{ij}$  是第  $i$  年第  $j$  旬的 NDVI 值。

### 2.3 变异系数 C.V.

计算时间序列植被指数数据的变异系数, 用于

评价植被覆盖的稳定性及地统计方法的适用性。具体而言, 在像元尺度计算 1999—2009 年间年尺度 NDVI 时间序列的变异系数, 以便于评价其稳定性, 计算公式如下<sup>[23]</sup>:

$$C.V. = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

式中,  $C.V.$  表示变异系数,  $\sigma$  表示 NDVI 时间序列的标准差,  $\bar{x}$  表示时间序列的均值。 $C.V.$  值越大, 表明数据分布越离散, 时间序列数据波动较大; 反之则表明数据分布较为紧凑, 时间序列数据较为稳定。

## 2.4 半变异函数

半变异函数是通过测算两点空间属性的变异程度与两点的间距的关系来描述要素的分布特征。在满足二阶平稳或本征假设条件下<sup>[28]</sup>, 半变异函数的计算公式为<sup>[24]</sup>:

$$\gamma(h) = (1/2N(h)) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

式中,  $Z(x)$  为区域化随机变量, 即 NDVI 值;  $h$  为两样本点空间分隔距离,  $N(h)$  为空间距离为  $h$  的样本点的对数;  $Z(x_i)$  和  $Z(x_i + h)$  分别是区域化变量  $Z(x)$  在空间位置  $x_i$  和  $x_i + h$  上的数值 ( $i=1, 2, \dots, N(h)$ );  $\gamma(h)$  为距离  $h$  的所有样本点对的变异值的平均值。用上述公式可以计算出任意给定距离  $h$  内样本的半变异值, 绘出基于  $h-\gamma(h)$  的半变异函数曲线图。

半变异函数的基本特点是拟合一个数学函数模型用于估计任何给定距离的半方差。一般区分指数模型(Exponential model)、球面模型(Spherical model)、高斯模型(Gaussian model)和线性模型(Linear model)四种拟合模型, 并用残差平方和(RSS)衡量模型与数据的匹配程度, 值越小匹配度越高, 同时用标准差( $r^2$ )指示模型显著程度, 值越大越显著。对区域化变量, 变异函数  $\gamma(h)$  不仅与间隔  $h$  有关, 而且与方向有关。当变异函数不考虑方向影响而在区域全局构造时, 称为各向同性变异函数; 当变异函数在某一特殊方向构造, 即同时考虑间隔与方向时, 称为各向异性变异函数<sup>[29]</sup>。无论是各向同性还是各向异性变异函数, 描述空间异质性程度的参数主要包括半方差基台值  $sill(C_0+C)$ 、块金方差( $C_0$ )和变程( $a$ )。如图 1 所示:

基台值  $sill(C_0+C)$  为区域化变量的总体变异, 其

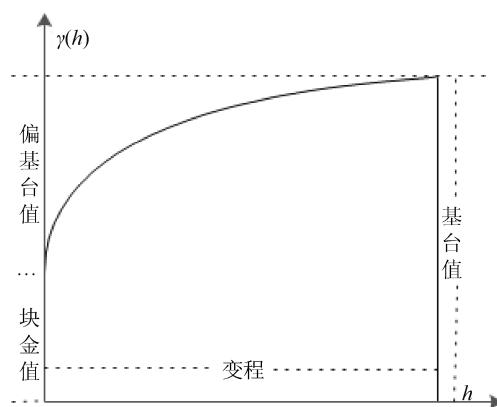


图 1 变异函数

Fig. 1 Semi-variogram

中: 块金值( $C_0$ )表示区域变量的方差, 满足一阶平稳性, 即不随位置的改变而改变; 偏基台值( $C$ )则表示由区域的宏观因子所引起的总体变异, 称为结构性变异。变程( $a$ )为区域化变量自相关的有效范围, 一般认为在该值范围之内区域化变量有自相关关系, 即离得越近, 相似程度越高, 而在该值范围之外区域化变量无自相关关系, 称为空间异质。

在地学应用中, 一方面可以通过计算块金值与基台值的比值( $C/C_0+C$ )来判断随机因子对区域化变量的空间总变异的影响程度: 如果该值较高, 说明随机成分引起的区域化变量的空间变异起主导作用(如局地气候、气象条件以及局地的微地貌等因素); 如果该值较低, 则说明结构性成分引起的区域化变量的空间变异起主导作用(如宏观的水热分布和地质构造等)。另一方面, 还可以通过计算变程来估测相似区域化变量聚集形成斑块的大小, 即区域化变量空间自相关的有效距离<sup>[24]</sup>。

## 3 结果分析

### 3.1 年尺度 NDVI 序列的稳定性

在像元尺度计算植被指数时间序列的变异系数  $C.V.$ , 分级、分区统计得表 1。三个时间段内三个分区变异系数小于 15% 的像元数占各自区域总像元数的比例均超过 95%, 且均值都小于 7.5%, 表明环渤海地区 NDVI 及其指示的植被覆盖状况在 1999—2009 年间、1999—2003 年间以及 2004—2009 年间均比较稳定, 年尺度 NDVI 时间序列具有很好的代表性, 由此时间序列获得的多年平均数据集可用于进一步分析各时间段内各地区植被覆盖分布的空间变异和空间相关性规律。

表 1 各区域不同时段变异系数统计

Tab. 1 Statistical characterization of C.V. of different districts

| 分区  | 时段        | (0,15) | (15,30) | (30,100) | %<br>均值 |
|-----|-----------|--------|---------|----------|---------|
| 辽宁  | 1999—2009 | 98.91  | 0.96    | 0.13     | 5.77    |
| 京津冀 | 1999—2009 | 95.30  | 4.62    | 0.09     | 6.90    |
| 山东  | 1999—2009 | 96.75  | 2.87    | 0.38     | 7.22    |
| 辽宁  | 1999—2003 | 99.45  | 0.48    | 0.07     | 4.47    |
| 京津冀 | 1999—2003 | 96.55  | 3.41    | 0.04     | 5.64    |
| 山东  | 1999—2003 | 98.40  | 1.52    | 0.08     | 5.74    |
| 辽宁  | 2004—2009 | 99.82  | 0.17    | 0.01     | 3.21    |
| 京津冀 | 2004—2009 | 97.98  | 1.98    | 0.04     | 4.02    |
| 山东  | 2004—2009 | 99.35  | 0.54    | 0.11     | 3.97    |

### 3.2 植被覆盖的空间格局特征

利用最大值合成法在像元尺度计算历年 NDVI, 进而计算 11 a 的均值(图 2), 反映多年平均的植被覆盖空间格局。可见: 大城市、面积较大的水域、沿海滩涂等区域 NDVI 值总体偏低, 多年均值小于 0.37, 可看作常年无植被区; 冀西北和冀东北的农牧交错带以及冀鲁交界的沿黄滩区等植被覆盖较低, NDVI 值多介于 0.38—0.62 之间; 华北平原大部及山东半岛、鲁中南山地和辽东半岛南部等区域的植被覆盖较高, NDVI 值普遍介于 0.63—0.79 之间; 辽宁的东部和北部以及河北的北部 NDVI 多年均值高于 0.80, 属于高植被覆盖区。

#### 3.2.1 植被覆盖分布的全局空间变异与自相关特征

GS+7.0 中计算的最终模型与真实数据的匹配度、最初所设相关参数以及计算迭代次数有关, 所以, 经过反复修改参数与多次计算得到各区域各向同性变异函数的最佳模型(表 2)。辽宁和山东拟合模型均为指数模型(Exponential), 残差较小, 数量级仅为  $10^{-7}$ , 拟合度很高; 京津冀拟合模型为球面模型(Spherical), 残差较以上两分区高一个数量级, 拟合度较高。三个分区拟合模型显著程度都高于 0.95, 京津冀和山东甚至高于 0.99, 表明拟合模型都具有极强的代表性, 能够恰当的说明植被覆盖分布的空间

特性。拟合结果如图 3:

辽宁植被覆盖的各向同性空间变异尺度最大, 自相关距离为 503 km, 即, 具有相似 NDVI 值的栅格最大的聚集范围为 503 km, 在此范围内植被类型最为接近, 空间依赖性比较明显; 山东植被覆盖的自相关距离最小, 仅为 168 km, 表明具有相似 NDVI

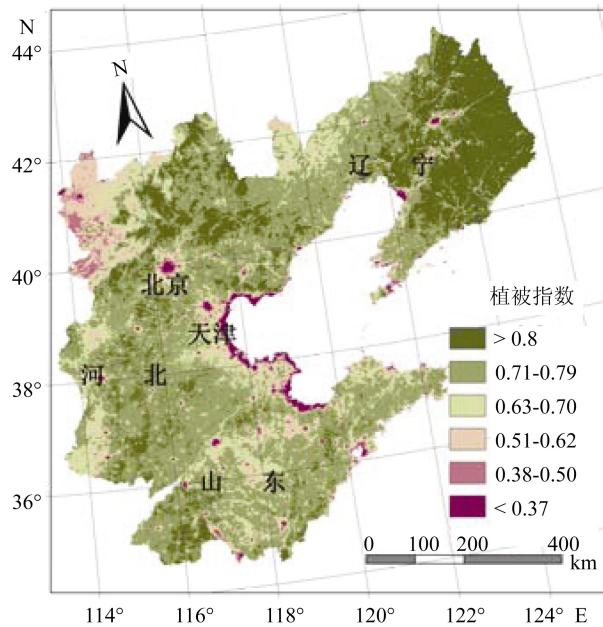


图 2 多年平均 NDVI, 1999—2009

Fig. 2 Average annual NDVI from 1999 to 2009

表 2 区域植被覆盖各向同性半变异函数模型参数

Tab. 2 Model parameters of isotropic variogram for regional vegetation cover

|     | 拟合模型 | 残差/ $10^{-6}$ | 显著度   | 结构变异  | 变程/km |
|-----|------|---------------|-------|-------|-------|
| 辽宁  | 指数   | 87.47         | 0.975 | 0.659 | 503.0 |
| 京津冀 | 球面   | 1.75          | 0.995 | 0.704 | 337.0 |
| 山东  | 指数   | 32.00         | 0.993 | 0.550 | 168.0 |

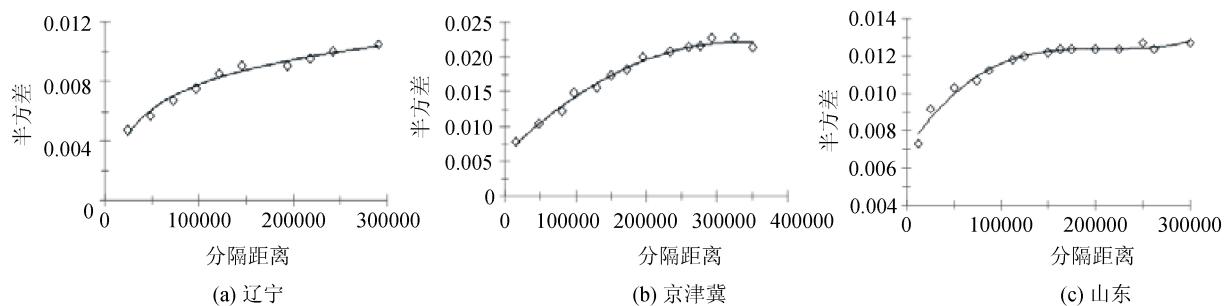


图 3 植被覆盖各向同性半变异函数图

Fig. 3 Isotropic variogram of vegetation cover

表 3 各区域主轴方向半变异函数模型参数

Tab. 3 Model parameters of the principal axis

|     | 主轴方向/° | 拟合模型 | 残差/ $10^{-5}$ | 显著度   | 结构变异  | 平均半方差  |
|-----|--------|------|---------------|-------|-------|--------|
| 辽宁  | 30     | 指数   | 3.30          | 0.869 | 0.733 | 0.0087 |
| 京津冀 | 150    | 线性   | 245.10        | 0.772 | 0.886 | 0.0114 |
| 山东  | 135    | 线性   | 993.00        | 0.571 | 0.646 | 0.0122 |

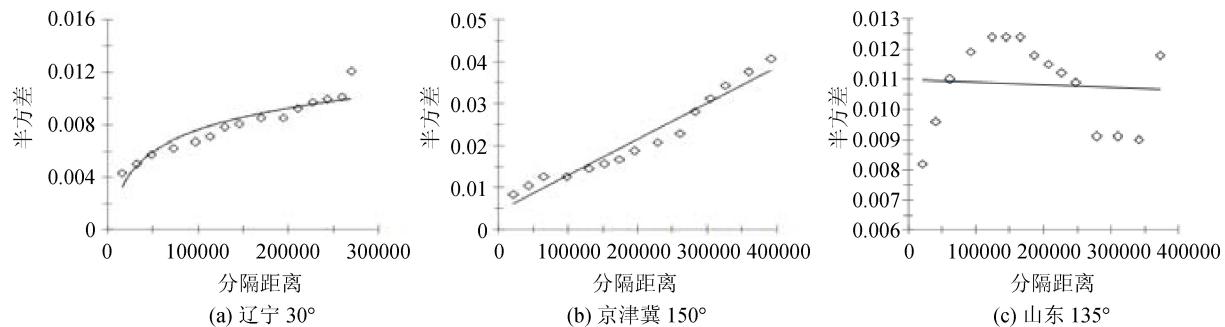


图 4 植被覆盖各向异性半变异函数图

Fig. 4 Anisotropic variogram of vegetation cover

值的空间范围较小, 相似植被形成的斑块最远距离仅为 168 km; 京津冀植被覆盖的自相关距离为 337 km, 介于两者之间。而结构性变异参数 [ $C/(C+C_0)$ ] 表明, 总体上: 京津冀植被分布的空间变异受结构性因子, 如, 大的水热组合、地貌地形等的影响最强, 由其引起的空间变异占该区域系统植被空间分布总变异的 70.4%; 辽宁植被空间分布总变异中由结构性因子引起的结构性变异较京津冀地区略低, 为 65.9%; 山东植被空间分布的结构性变异占区域系统总变异的百分数超过了 50%, 但由随机因子如局地气候、局域地形地貌和局域人类活动干扰等引起的植被分布的变异也不容忽视。

### 3.2.2 植被覆盖分布的各向异性空间变异特征

计算任意一方向上 NDVI 的平均半方差并绘制出半变异函数图, 以此为依据可用于分析任意方向上植被覆盖分布的空间变异, 在这些方向中存在植被变异最小、空间连续性最大的方向, 即, 相似植被

聚集形成的斑块长度最大的方向(或称为植被分布的主轴方向, 即, 区域植被分布的大致走向)。选择不同方向分别进行计算, 并对比各方向的平均半变异值, 即, 各方向 NDVI 值的平均半方差, 最终分析出三个分区的主轴方向  $\theta$ , 具体的选择条件为: 正北方向顺时针旋转角度,  $\theta$  方向上平均半变异值最小,  $\theta+90^\circ$  方向上平均半变异值最大。结果如表 3、图 4 所示:

辽宁主轴方向为正北方向顺时针旋转  $30^\circ$ , 约为北东-西南方向, 拟合模型为指数模型(Exponential), 拟合度在三个地区中为最高, 残差数量级为  $10^{-5}$ , 模型显著程度 0.869 也为最大; 京津冀主轴方向为正北方向顺时针旋转  $150^\circ$ , 山东的主轴方向则为正北方向顺时针旋转  $135^\circ$ , 二者大致都为西北—东南方向, 且拟合模型均为线性模型(Linear), 残差数量级  $10^{-3}$ , 拟合度较高, 但京津冀模型显著程度要高于山东地区。

由此可见,辽宁、京津冀和山东植被分布变异最小、空间连续性最大、植被斑块长度最大的方向分别为东北—西南方向、西北—东南方向和西北—东南方向。三个主轴方向植被空间分布的结构性变异参数 [ $C/(C+C_0)$ ] 均大于各区域各向同性即全局结构性变异参数,其中,京津冀主轴方向的结构性因子为植被空间分布产生变异的主导影响力,由其产生的结构性变异占区域此方向总变异的 88.6%,山东主轴方向由随机因子引起的植被空间分布的变异仍然较大,占此方向系统总变异的 35.4%,辽宁主轴方向植被空间分布的结构性变异则处于两者之间。

### 3.3 植被覆盖空间格局的时间变化特征

利用各地区 1999—2003 年间和 2004—2009 年间两个时段的多年平均 NDVI 数据,分别计算各地区的植被覆盖的全局格局特征以及各向异性的变异特征,以比较各地区植被覆盖空间结构特征的时间变化特征。

#### 3.3.1 1999—2003 年间植被覆盖空间格局特征

1999—2003 年间各地区植被覆盖的各向同性变异的最佳匹配模型与参数如表 4 所示。辽宁与山东的拟合模型均为指数模型,京津冀地区为球面模型,三者残差数量级均为  $10^{-6}$ ,拟合度都很高;三个拟合模型的显著程度都超过 0.97,拟合模型的代表性都很强。

三个地区的结构变异参数均高于 72%且大于 11 年平均下的系数值,说明结构性因子对三个地区前 5 年平均植被覆盖分布空间变异的影响仍占绝对主导地位。其中:山东地区植被分布的结构性变异在 5 年平均与 11 年平均状况间的变化幅度最大,为

18.5%;辽宁地区变化幅度最小,仅为 6.2%,结构性因子对植被分布的变异的影响作用较为稳定;京津冀地区居中,但植被空间分布变异受结构性因子的影响在三地区中仍然为最大,结构性变异高于 87%。

辽宁、京津冀地区前 5 年的平均植被覆盖的自相关距离,即,相似植被聚集的斑块长度分别为 411.9 km 和 281.2 km,较 11 年平均都偏小;而山东地区自相关距离在三者中为最大,较 11 年平均则显著偏大。

#### 3.3.2 2004—2009 年间植被覆盖空间格局特征

2004—2009 年间各地区植被覆盖的各向同性变异的最佳匹配模型与参数如表 5 所示。辽宁、京津冀以及山东地区匹配模型均为指数模型;除辽宁残差数量级为  $10^{-7}$  外,京津冀地区与山东残差数量级均为  $10^{-6}$ ,拟合度都很高;三个拟合模型的显著程度都超过 0.98,拟合模型的代表性都很强。

三个地区的植被空间分布变异中结构性变异参数均高于 64%,且均高于 11 年平均情况时的参数值但又都小于前 5 年平均,可据此推断,大的气候组合、地貌地形等结构性因子对后 6 年平均植被覆盖的空间分布变异的影响也占优势地位。与 11 年平均相比:山东地区植被分布的结构性变异较 11 年的变化幅度仍为最大,为 9.5%;辽宁地区仍为最小,变化幅度为 5%;京津冀地区的变化幅度居中,但结构性因子引起的植被分布的变异在三者中仍是最大,为 78.2%。而与前 5 年平均相比:三个地区植被空间分布变异中的结构性变异均变小,其中,京津冀地区与山东结构性变异参数变化幅度均为 9%,而辽宁变化幅度仅为 0.2%,非常微小。

表 4 1999—2003 年间区域植被覆盖各向同性半变异函数模型参数

Tab. 4 Model parameters of isotropic variogram for regional vegetation cover in 1999-2003

|     | 拟合模型 | 残差/ $10^{-6}$ | 显著度   | 结构变异  | 变程/km |
|-----|------|---------------|-------|-------|-------|
| 辽宁  | 指数   | 1.03          | 0.978 | 0.721 | 411.9 |
| 京津冀 | 球面   | 4.19          | 0.983 | 0.872 | 281.2 |
| 山东  | 指数   | 5.19          | 0.975 | 0.735 | 504.3 |

表 5 2004—2009 年间区域植被覆盖各向同性半变异函数模型参数

Tab. 5 Model parameters of isotropic variogram for regional vegetation cover in 2004-2009

|     | 拟合模型 | 残差/ $10^{-7}$ | 显著度   | 结构变异  | 变程/km |
|-----|------|---------------|-------|-------|-------|
| 辽宁  | 指数   | 5.58          | 0.982 | 0.709 | 206.1 |
| 京津冀 | 指数   | 41.05         | 0.983 | 0.782 | 391.5 |
| 山东  | 指数   | 12.70         | 0.987 | 0.645 | 383.7 |

辽宁、京津冀地区的自相关距离—相似植被聚集形成的斑块长度分别为 206.1 km 与 391.5 km, 较 11 年平均偏小, 而山东自相关距离变为 383.7 km, 较 11 年平均也是显著增大, 但增加幅度小于前 5 年平均。与前 5 年平均相比: 辽宁、山东自相关距离减小, 而京津冀地区变大。

### 3.3.3 植被覆盖空间格局特征的演变态势

前 5 年与后 6 年三地区植被覆盖的空间分布的变异中结构性变异均大于 11 年平均状况, 说明结构因子在短时间尺度内对植被覆盖分布的影响要强于在长时间尺度内的, 也可以说明随着时间的推移, 随机因素对植被覆盖的影响作用在增加; 而其中, 辽宁植被空间格局在两个小时尺度上的结构性变异较 11 年平均的变化幅度都是最小的, 山东都是最大的, 表明辽宁地区的结构性因子的影响作用较为稳定, 而山东地区的结构性因子对植被分布的影响相对不太稳固, 不确定性因子较多, 随机因素干扰较为强烈。

后 6 年与前 5 年相比: 三个地区植被空间格局变异中的结构性变异减小, 说明结构性因子对植被覆盖空间分布的影响强度呈减弱态势, 随机因素的影响在增强; 辽宁、山东植被的自相关距离, 即, 相似植被的聚集斑块减小, 植被的破碎程度有所增加, 而京津冀地区的自相关距离变大, 植被的破碎程度有所改善。

## 4 结论与讨论

本研究基于 1999—2009 年间环渤海区域 NDVI 数据, 利用地统计学方法, 定量研究植被覆盖分布的空间格局、空间变异和空间自相关特征及其阶段性变化特征, 基本结论如下:

1) 辽宁植被覆盖分布各向同性的空间自相关距离最大, 为 503 km, 山东各向同性的空间自相关距离最小, 仅为 168 km, 京津冀地区居中, 为 337 km, 这表明, 山东同类植被聚集形成的斑块最小, 植被覆盖分布最为破碎。

2) 三个地区主轴方向的结构性变异均大于各自区域各向同性的结构性变异, 且无论是在主轴方向还是全局比较, 京津冀地区的结构性变异都最为显著, 而山东地区虽然结构性变异仍占主导, 但由于随机性因子引起的变异也很显著, 辽宁地区则均介于二者之间。

3) 辽宁、京津冀和山东植被分布空间变异最小、连续性最大的方向分别为东北—西南方向、西北—东南方向和西北—东南方向, 但是, 结构性因子对植被的影响强度具有随时间推移而减弱的趋势, 局地气候、微地形地貌与局域人类活动等的影响强度则趋于增强, 这种消长变化态势在山东尤为显著; 京津冀地区植被覆盖状况有所改善, 植被覆盖的破碎程度表现为减弱的发展态势, 但在辽宁与山东破碎程度则明显增加, 植被覆盖受到进一步的破坏。

从半变异函数的地学意义出发, 推断宏观空间植被覆盖格局特征及其演变的主要影响因素, 不难发现: 山东为农业大省, 农业植被覆盖面积较广, 短期气候的微小波动和人类活动的变化都会对其植被分布的空间格局产生剧烈影响, 因此, 山东植被覆盖分布较破碎, 且随机性因子引起的变异较为显著; 辽宁多林地, 其植被的聚集特征和斑块化特征最为显著, 且辽宁山脉多为东北—西南走向, 气温、水分配合这种空间格局导致省内植被覆盖沿东北—西南方向延伸; 京津冀和山东温度自西南向东北降低, 降水自东南向西北递减, 植被分布走向均为西北—东南方向, 温度对植被分布的影响要强于水分; 2000 年北京遭受严重的沙尘暴袭击, 直接促使京津冀过去 10 余年来采取了多种行之有效的措施保护植被和防治风沙, 因而植被覆盖状况有所改善, 破碎化程度亦呈减弱态势, 表现出了明显不同于辽宁和山东的变化态势。

## 参考文献

- [1] 张学珍, 王维强, 方修琦, 等. 中国东北地区 17 世纪后期的自然植被格局[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 184—189.
- [2] LIU Jiyuan, DENG Xiangzheng. Progress of the research methodologies on the temporal and spatial process of LUCC[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(14): 1354—1362.
- [3] ZHAO Junfang, YAN Xiaodong, JIA Gensuo. Simulation net Carbon budget of forest ecosystems and its response to climate change in northeastern China using improved FORCCHN[J]. Chinese Geographical Science, 2012, 22(1): 29—41.
- [4] BRANDT J S, TOWNSEND P A. Land use – land cover conversion, regeneration and degradation in the high[J]. Landscape Ecology, 2006, 21(4): 607—623.
- [5] VASIL'EVSKAYA V D, GRIGOR'EV V Y. Biological indices of degradation and self-recovery of soil-vegetation covers in tundra[J]. Contemporary Problems of Ecology,

- 2011, 4(6): 672–683.
- [6] GANN T T, CHILDERS D L. Relationships between hydrology and soils describe vegetation patterns in seasonal flooded tree islands of the southern Everglades, Florida[J]. *Plant and Soil*, 2006, 279(1/2): 271–286.
- [7] EVETOUSIGNANT M, PELLERIN S, BRISSON J. The relative impact of human disturbances on the vegetation of a large wetland complex[J]. *Wetlands*, 2010, 30(2): 333–344.
- [8] BUTTAFUOCO G, CASTRIGNANO A, BUSONI E, et al. Studying the spatial structure evolution of soil water[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 311(1): 202–218.
- [9] OVERMARS K P, KONING G H J DE, VELDKAMP A. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 164(2): 257–270.
- [10] 陈公德, 徐建华, 戴晓燕, 等. 运用遥感数据挖掘解析城市地表温度的空间变异规律[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(4): 405–409.
- [11] 潘文斌, 邓红兵, 唐涛, 等. 地统计学在水生植物群落格局研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1692–1696.
- [12] TODD M J, LOWRANCE R R, GOOVAERTS P, et al. Geostatistical modeling of the spatial distribution of sediment oxygen demand within a coastal plain blackwater watershed[J]. *Geoderma*, 2010, 159(1): 53–62.
- [13] VASQUES G M, GRUNWALD S, MYERS D B. Associations between soil carbon and ecological landscape variables at escalating spatial scales in Florida, USA[J]. *Landscape Ecology*, 2012, 27(3): 355–367.
- [14] DELL'ARCIPRETE D, BERSEZIO R, FELLETTI F, et al. Comparison of three geostatistical methods for hydrofacies simulation: a test on alluvial sediments[J]. *Hydrogeology journal*, 2011, 20(2): 299–311.
- [15] KOHL M, GERTNER G. Geostatistics in evaluating forest damage surveys considerations on methods for describing spatial distributions[J]. *Forest Ecology and Management*, 1997, 95(2): 131–140.
- [16] ARAGAO L E O C, SHIMABUKURO Y E, SANTO F D B E, et al. Landscape pattern and spatial variability of leaf area index in Eastern Amazonia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 211(3): 240–256.
- [17] CHU Hongjay, LIN Yupin, HUANG Yulong, et al. Detecting the landcover changes induced by large-physical disturbances using landscape metrics, spatial sampling, simulation and spatial analysis[J]. *Sensors*, 2009, 9(9): 6670–6700.
- [18] ZHU Wenbin, LV Aifeng, JIA Shaofeng. Spatial distribution of vegetation and the influencing factors in Qaidam Basin based on NDVI[J]. *Journal of Arid Land*, 2011, 3(2): 85–93.
- [19] 柳锦宝, 姚云军, 张永福. 基于分维的多尺度植被空间格局分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 155–158.
- [20] 郭锦, 张晓丽, 赵丽琼, 等. 基于 3S 技术的北京市植被覆盖空间格局变化研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(17): 8264–8266, 8277.
- [21] ZHANG Xueyan, HU Yunfeng, ZHUANG Dafang, et al. NDVI spatial pattern and its differentiation on the Mongolian Plateau[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(4): 403–415.
- [22] 张雪艳, 胡云峰, 庄大方, 等. 蒙古高原 NDVI 的空间格局及空间分异[J]. 地理研究, 2009, 28(1): 10–18.
- [23] FABER S, MARKHAM J. Temporal and spatial dynamics in a northern tallgrass prairie[J]. *Plant Ecology*, 2011, 212(10): 1577–1588.
- [24] MEJIA-DOMINGUEZ N R, MEAVE J A, DIAZ-AVALOS C. Spatial structure of the abiotic environment and its association with sapling community structure and dynamics in a cloud forest[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(2): 305–318.
- [25] 卢亚灵, 颜磊, 许学工. 环渤海地区生态脆弱性评价及其空间自相关分析[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 303–308.
- [26] 杜灵通, 李国旗. 利用 SPOT 数据进行干旱监测的应用研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 153–156; 172.
- [27] 张月丛, 赵志强, 李双成, 等. 基于 SPOT NDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 745–754.
- [28] BACHMAIER M, BACKES M. Variogram or semivariogram? Variance or semivariance? Allan variance or introducing a new term?[J]. *Mathematical Geosciences*, 2011, 43(6): 735–740.
- [29] 李哈滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651–656.