

基于空间统计学方法的广州市生态安全空间异质性研究

龚建周^{1,2,*}, 夏北成³, 刘彦随²

(1. 广州大学地理科学院, 广州 510006; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275)

摘要:系统往往在空间上具有复杂性或变异性,即空间异质性;同时还是由多个层次组成的有序等级整体系统。对此进行的研究与分析是进一步理解生态过程的基础,也是正确认识生态过程及其驱动机制的前提。基于广州市生态安全的数字评价图,对生态安全进行空间统计学分析,包括空间自相关系数及其对不同分级数的效应、生态安全半方差的空间异质性、时间动态以及方向分异特征等,有利于识别其形成与发生变化机制,多层次探讨区域生态安全的主要影响因子。广州市生态安全空间异质性的主要特征为:区域生态安全的空间差异明显;中心城区生态安全程度最低;增城生态安全程度最高,但时间变异最大。空间自相关系数对分级数具有明显的响应;这种响应特征还表现为时间分异。半方差分析表明广州市生态安全空间结构具有区域、时间与方向分异性,且以区域空间异质性最为重要,揭示出广州市发展经济与保护环境的双重特性。

关键词:城市生态安全;时空异质性;自相关;半方差;广州市

Study on spatial-temporal heterogeneities of urban ecological security of Guangzhou based on spatial statistics

GONG Jianzhou^{1,2,*}, XIA Beicheng³, LIU Yansui²

1 School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Based on digital figures of Guangzhou ecological security assessment which were contributed by the authors, the spatial-temporal heterogeneities of ecological security characteristics were analyzed by geo-statistic methods, including analysis of spatial self-relations and scale effectiveness, spatial heterogeneity and temporal dynamics of semi-variation of ecological security, and directional difference of ecological security characteristics. The paper had got the following important results: Spatial heterogeneity of regional ecological security of Guangzhou was great. The ecological security was lowest in the city center, and highest in Zengcheng. But the temporal variation was biggest in Zengcheng. A scale effectiveness of self-relations of ecological security was revealed, and the classification number 3 was sensitive scale. It's obvious that the scale effectiveness of classification number was also temporal difference. The analysis of self-relations for Guangzhou ecological security heterogeneity revealed that spatial heterogeneity, temporal difference and directional difference were simultaneously representative. In those above, spatial heterogeneity was most important. It showed that ecological protection and economical development had been progressed in the period of 1990—2005 in Guangzhou.

Key Words: urban eco-security; temporal-spatial heterogeneity; self-relation; semi-variance; Guangzhou

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40635029);中国博士后基金重点项目及面上项目(20080440511, 200902132);广州市科技计划项目(08C027)

收稿日期:2009-09-21; 修订日期:2009-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gongzh66@126.com

空间异质性是指所研究的系统特性在空间上的复杂性或变异性^[1-2]。景观的系统组成构成了系统的基本异质性格局,其资源环境因子等也表现出异质性,并与系统相互作用,成为系统异质性的制约因子^[3]。景观生态学研究就是对异质性的研究^[4],而尺度是空间异质性的度量单位,空间异质性的程度往往依赖于测量所用的尺度,依其所属的尺度等级不同而异,这种多尺度格局是从内在本质上揭示生态系统的等级特征^[3]。研究系统的尺度有利于更好地认识景观异质性并理解其等级结构功能,因为复杂系统本身是由多个层次组成的有序等级整体系统^[5],在自然界表现为各种格局与过程往往有其特定的时空尺度^[6-8]。因此,生态过程及其驱动机制的研究,首先需要进行多尺度、等级分析^[9],这将是进一步理解生态过程的基础,也是正确认识生态过程及其驱动机制的前提。

具有空间分异特性的城市生态系统及其空间地域范围内的人类、经济等活动一起决定城市生态安全的空间异质性^[10-15]。肖笃宁等^[16]研究认为,在人为活动占优势的景观内,不同土地利用方式对区域生态的影响具有区域性和累积性,并直观地体现在生态系统的结构和组成上。基于土地利用/覆盖而进行的城市生态安全指数评价结果,无疑具有区域性和空间特性。从空间结构及异质性方面研究城市生态安全,有利于识别其形成与发生变化机制^[17],有利于识别区域生态安全的主要影响因子。有关的研究报道并不多见。

半方差是空间统计学中进行空间异质性分析的有效方法之一。它是以区域化变化理论为基础,研究变量在空间分布上的结构和随机特性^[18]。半方差分析是地统计学中的重要组成部分,是优于传统统计学方法的空间分析方法,它不仅能够有效地揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特征,而且可以将空间格局与生态过程联系起来,有效地解释空间格局对生态过程与功能的影响^[19]。

广州是中国南方的重要城市,是中国走向世界的重要进出口岸。20多年来,经济得以迅速发展,城市以惊人的速度扩展。同时给城市生态环境带来了巨大的压力,产生了大量的城市环境问题,严重影响了人们的生活质量,影响到区域中心城市的形象。因此,对广州市生态安全的研究显得十分必须。基于作者已经完成的广州市生态安全模糊评价数字成果,以及用半方差空间统计学方法进行的有关分析^[20-21],本文进一步从空间、时间和方向等方面对研究区生态安全的空间分异特征进行分析,以期能够更清楚地认识广州城市生态安全水平的特征、空间异质性特征、动态变化以及影响机制。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

广州市位于珠江三角洲的中心腹地,地处 $112^{\circ}57'—114^{\circ}3'E$, $22^{\circ}26'—23^{\circ}56'N$,行政区域调整前后都包括10区2市,考虑历史资料一致性问题,本文仍采用旧的行政区划方案。即芳村、荔湾、越秀、东山、海珠、天河、黄埔、白云、番禺、花都等10区和从化、增城2个市,这种区域的划分并不影响到广州市生态安全空间异质性结果的分析。研究区总面积 7434.4 km^2 ,地势东北高,西南低,北部和东北部是山区,中部是丘陵、盆地,南部是珠江三角洲沿海冲积平原。

1.2 数据来源与生态安全分布图的生成

1.2.1 数据来源

研究所用的基础数据包括:覆盖广州市域的Landsat TM遥感影像数据(1990-10-13、1995-12-30、2000-10-14、2005-10-22),为研究的主要图件数据,遥感卫星轨道号为122/04385(122/44上移15%),以此为基础生成许多衍生数据;辅助图件数据包括广州市行政区划图(2000年区划图);还有源于《中国统计年鉴》、《广东省统计年鉴》的人文社会经济统计数据,以及源于各行政区域的环境监测数据。

1.2.2 生态安全指数分布图的生成

用模糊评价方法对研究区生态安全进行评价,评价指标体系、模糊评价方法及生态安全评价结果与指数分布图参见作者研究成果^[20-22]。评价最小单元为像元($30\text{ m} \times 30\text{ m}$)。在Arc/Info平台,借助其强大的图像处理与空间分析功能,进行市域生态安全的格网综合评价。

1.3 空间统计学分析

空间自相关性是指在空间上越靠近的事物或现象就越相似。景观特征或变量在邻近范围内的变化往往

表现出对空间位置的依赖关系。进行空间自相关分析的目的是确定变量是否在空间上相关,以及相关程度如何。空间自相关系数和半方差分析法是两种常用的空间相关分析的方法,同时可以用于分析景观的空间结构特征。本文分别用这 2 种方法,探讨研究区生态安全的空间相关性以及空间的结构特征。

1.3.1 空间自相关性对分类数的响应

Qi 等研究认为,空间自相关系数随观察尺度的改变而变化^[23]。目前已有的生态安全评价研究,无论是常规的基于统计方法的评价,还是基于 GIS 数字环境的评价,其结果往往重新被分成 4 到 5 个等级,形成分类等级数据,再进行其空间格局分析。有研究显示,分类数 4 和 5 往往是景观格局的敏感分类数^[24-25]。为此,基于原始的生态安全评价指数分布图,分别生成分类数 2、3、4、5、7、13 的分类图,拟揭示城市生态安全的空间自相关性、相关程度随分析尺度的变化规律,以及是否存在敏感分类对空间自相关的影响。分类数 2、3、4、5、7、13 分别对应的生态安全指数区间如表 1 所示。

表 1 生态安全指数等级分类标准

Table 1 Table of classification criterion for eco-security index

分类数 Number of types	指数值区间 Range of index value					
2	[30,70)	>70				
3	[30,60)	[60,90)	>90			
4	[30,50)	[50,70)	[70,90)	>90		
5	[30,45)	[45,60)	[60,75)	[75,90)	>90	
7	[30,40)	[40,50)	[50,60)	[60,70)	[70,80)	[80,90)
13	以 30 为起始值,步长为 5,在值域 30—95 之间,共形成 13 个等级分类数					

按照表 1 划分的分类标准,分别生成不同分类等级数的生态安全等级分类图,计算 Moran 的 I 系数和 Geary 的 C 系数,绘制成自相关图。两个系数的计算公式参见相关文献^[18-19]。

1.3.2 半方差分析

半方差函数也叫变异函数,是地统计学中研究空间变异性关键函数,反映了不同距离观测之间的变化。以半方差为纵坐标,观察距离为横坐标绘制曲线,就是半方差图,根据对半方差图的分析,可以差别分析变量的空间相关性、程度与距离范围。此外,空间自相关性往往具有方向性。从不同方向上计算半方差,研究空间变量的结构特征,十分必要。比如,沿某一方向上存在高度自相关可能预示着某一生态学过程起重要作用。

基于半方差函数原理,本文进行了以下 3 个方面的半方差函数计算与绘图:一是以 2005 年生态安全评价指数分布图为数据源,按广州市域、中心城区、从化、花都、增城和番禺共 6 个区域范围,计算半方差;二是以中心城区为典型区域,计算分析其半方差的动态特征;三是以中心城区 2005 年为代表时相,分 0°、45°、90°、135° 共四个方向,研究其半方差的方向分异已有许多报道,详见参考文献^[18-19]。

由于研究区域较大,所用的生态安全评价指数分布图的基本栅格单元大小 30m × 30m 的格网。数据量超过了软硬件的容量,需先进行重采样,生成粗化的格网数据。已有研究显示,研究区景观的幅度 20(格网 600m)为景观分析的敏感幅度^[21]。重采样数据的原则是:粗化的格网避开敏感幅度,力求最大程度地保持原始数据信息,也能达到软硬件设施的要求。为此,此处以 900m 的格网大小为重采样的基本单元,生成粗化的生态安全指数分布图。再进行半方差分析。

图层数据统计及空间自相关系数的计算在 Arc/Info 的 grid 模块下完成,半方差计算在 GS+ 中完成。

2 结果与分析

2.1 广州市生态安全水平分析

数据源为广州市生态安全综合评价指数图,在 grid 下,按照广州市域、中心城区、花都、番禺、从化和增城等区域范围,分别统计生态安全指数的平均数、标准偏差,计算变异系数,有关结果如表 2 所示。

表2 研究区生态安全水平统计表

Table 2 Statistics characteristics of eco-security value in the study area

年份 Year	全市 Study area		中心城区 City center		花都 Huadu district		番禺 Panyu district		从化 Conghua district		增城 Zengcheng district	
	平均 Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV
1990	64.5	0.052	53.2	0.058	62.5	0.046	62.0	0.044	68.3	0.044	72.6	0.0412
1995	59.8	0.06	46.8	0.065	63.6	0.048	53.8	0.054	65.3	0.05	66.7	0.0512
2000	60.2	0.056	48.1	0.063	63.4	0.043	57.7	0.048	68.2	0.045	61.2	0.052
2005	63.8	0.06	47.2	0.065	62.4	0.05	52.2	0.052	72.6	0.039	77.1	0.0378
变幅 Range	0.073	0.140	0.120	0.108	0.020	0.131	0.159	0.185	0.100	0.203	0.206	0.273

注: Mean 表示均值; CV 为变异系数; 变幅是指同一区域不同时间内的最大值减其最小值, 其差除以同区域的最大值

(1) 生态安全的平均状况

从表2可以看出, 生态安全综合评价指数最小的是中心城区, 表明其生态安全问题较其余区域严重。而中心城区是广州市的人口、政治与经济的中心地带, 生态安全的这种状态值得引起相关部门足够的重视, 应该成为未来广州生态城市建设中重点考虑的区域。

生态安全水平相对较高的是增城和从化2个离中心城区相对较远的行政区。其生态安全的最大与最小值分别为77.1、61.2和72.6、65.3。反映从平均状况来看, 这2个行政辖区内生态安全状况较好。然后是花都区, 其值在62—63之间波动。在1990年时, 番禺区内生态安全指数值为62, 随后的研究时间里, 其值都小于60。番禺区是受中心城区影响较大的毗邻行政区, 受人类活动及城市化进程的影响, 其生态安全也出现较低的值。

(2) 时间动态特征

表2还显示, 从时间动态来看, 增城生态安全的变化最大, 最大变幅达20.6%; 其次是番禺, 值为15.9%; 然后是中心城区和从化。花都区生态安全保持相对较稳定, 随时间变迁其生态安全水平波动幅度约2%。表明从生态安全受到的威胁程度来看, 增城境内的生态安全遭遇大的人类破坏, 然后是番禺。并且出现这种动态特征的存在区位与时间差异, 自1990年起, 增城的生态安全持续下降, 至2000年达到其最低值, 之后, 其值大大增加至最大值。番禺区内生态安全呈起伏波动变化特征, 最低值出现在2000年。

中心城区生态安全的变化特征类似于番禺区的变化特征。从化区生态安全具有独特之处, 除其指数一直比较大外, 只在1995年有下降趋势, 其余研究时间里, 从化的生态安全指数一直增大。反映出从化市生态安全相对较好。

(3) 变异程度

表2生态安全变异系数显示, 中心城区生态安全的空间变幅增大, 反映城区生态安全分布极不均匀。但是变异系数的变幅显示这种状况的动态变化则不然, 变异系数变幅最大的增城区, 其值为27.3%。

2.2 生态安全的空间自相关及其对分类数的响应

不同分类数下 Moran *I* 系数和 Geary *C* 系数的自相关图如图1所示。据系数的含义, *I* 系数的取值在0—2之间: 大于1表示负相关, 等于1表示不相关, 而小于1则表示正相关; *C* 系数的取值在-1—1之间: 小于0表示负相关, 等于0表示不相关, 大于0表示正相关^[2]。

(1) 空间自相关

从图1可以看出, 研究区生态安全在空间上呈较强的正相关, 表现为*C*系数的值在0—1之间, 并且靠近0; *I*系数在0—1之间, 并且靠近1。但是这种相关程度大小存在时间分异: 2005年, 研究区生态安全的空间自相关程度最高, 2000年最低, 1990和1995年居中。表明2005年研究区生态安全水平空间预测性较强, 2000年则不然, 受人类活动的影响其生态安全水平的空间预测性最弱。

(2) 空间自相关对分类数的响应

从图中还可以显示, 2个系数的自相关系数都表现出对分类数的响应。表现为随着分类数增大, *C*系数

值减小, I 系数值增大, 生态安全的空间自相关程度增强。两个系数的自相关曲线都在分类 3 时出现拐点, 表明研究区生态安全空间自相关存在明显的敏感尺度。而且与已有文献研究报道相近^[23]。尽管如此, 图 1 显示, 生态安全空间自相关的尺度效应以及敏感尺度具有时间差异。可以看出 1990 年和 2000 年生态安全的空间自相关敏感分类数明显为 3; 其余 2 个年份里, 生态安全的空间自相关敏感性分类数不存在或很弱。

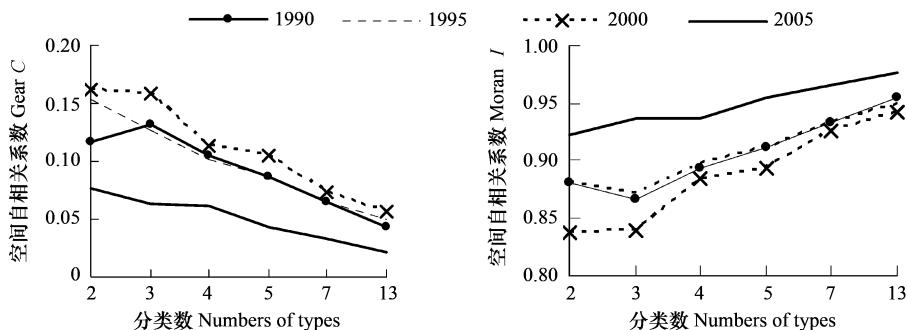


图 1 空间自相关系数 Geary 的 C 系数和 Moran 的 I 系数图

Fig. 1 Correlogram of two coefficients, Moran I and Geary C

(3) 空间自相关对分类数响应的强度

将相邻分类数的系数值之差除以分类间距数, 得到两个系数对分类数化的变化强度(表 3)。

表 3 不同年份 Moran C 和 Geary I 系数对分类数变化的响应幅度

Table 3 Response extent of two coefficients, Geary C and Moran I , with changing classes

	Geary C 系数的变幅 Range of Geary C value				Moran I 系数的变幅 Range of Moran I value			
	1990	1995	2000	2005	1990	1995	2000	2005
$\Delta 3-2$	0.0146	-0.0269	-0.0027	-0.0133	-0.0143	-0.0091	0.0034	0.0133
$\Delta 4-3$	-0.0267	-0.0252	-0.0454	-0.0011	0.0265	0.0252	0.0451	0.0013
$\Delta 5-4$	-0.0183	-0.0142	-0.0091	-0.0179	0.0182	0.0141	0.0090	0.0178
$\Delta 7-5$	-0.0105	-0.0111	-0.0156	-0.0049	0.0105	0.0111	0.0156	0.0049
$\Delta 13-7$	-0.0036	-0.0025	-0.0028	-0.0019	0.0036	0.0025	0.0028	0.0019

注: $\Delta 3-2$ 等符号表示分类间距数, 其余数字为对应系数差值与分类间距数的比值

从表 3 可以看出, 除分类数 3 为系数响应强度的拐点外, 随分类数增大, Moran C 呈单调减小之势, 表明空间自相关程度随分类数增大而加强, 而减幅较小。Geary I 系数的变化也揭示出相似的空间自相关变化规律, 表现为系数单调增加, 但增幅不大。另外, 2 个系数之间的变幅一致性较好, 表现为都呈单调变化, 并且变幅几乎相等。表明虽然这两个系数具有不同的函数模型, 但在揭示空间变量自相关特征时具有重叠, 指数之间存在相关关系。

2.3 生态安全空间分异及半方差分析

2.3.1 空间分异的半方差分析

以不同区域 2005 年的生态安全指数图为数据, 计算半方差并绘制成如图 2 的曲线。从图中可以看出, 生态安全空间分异因区域而异, 表现为各行政区范围内, 计算所得的半方差图不同, 拟合的理论模型也各异: 中心城区和从化的半方差理论模型为指数模型, 番禺和增城的半方差则拟合为线性模型, 花都的半方差拟合为球体模型, 而整个研究区域的半方差计算结果又可拟合为球体模型。

图 2 显示, 即使是拟合为相同的理论半方差模型类型, 其模型参数也因区域而各异, 表明生态安全的空间分异以及程度明显存在。另外, 番禺区的半方差图几乎没有变程存在, 并且在某一大距离以后, 曲线突然上扬, 表现出“漂移”的特点, 漂移是空间分布具有明显趋势造成的^[26], 据同区域生态安全评价指数图知^[21-22], 番禺区生态安全水平具有由北向南增大的地趋势。

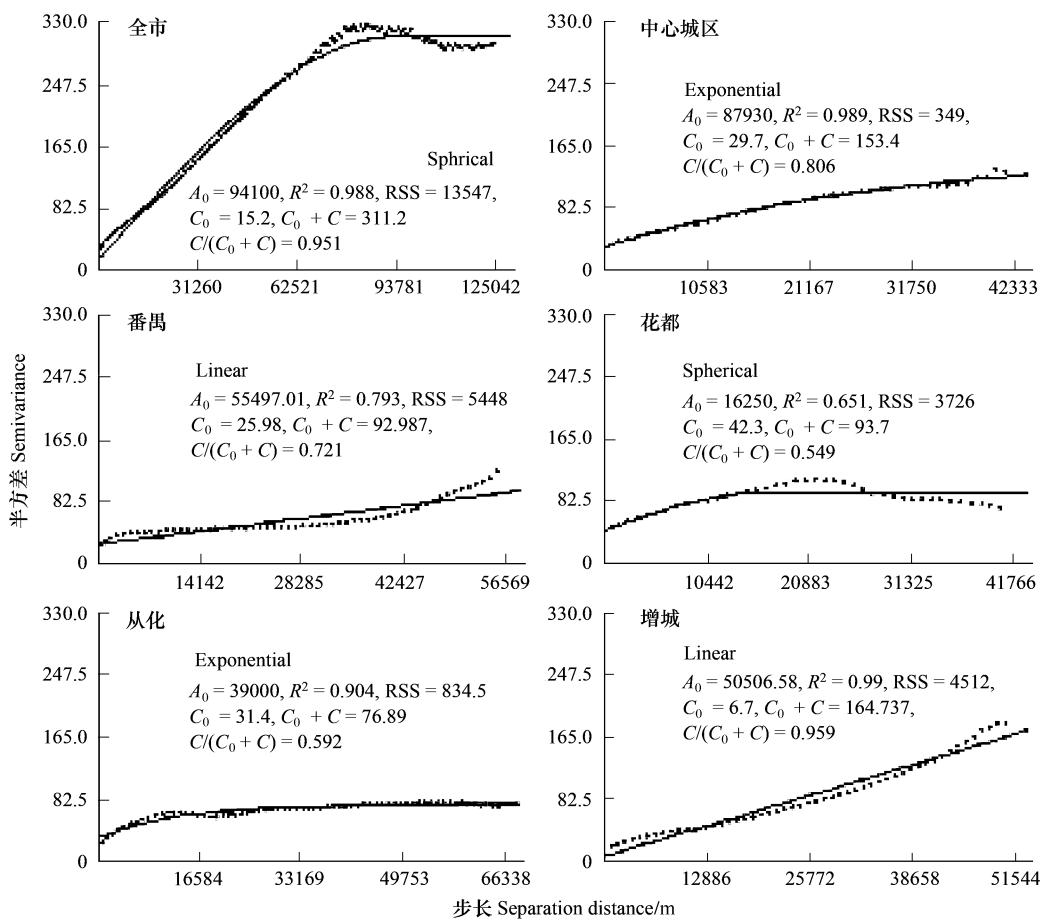


图2 广州市各区市生态安全评价指数的半方差分析(2005年)

Fig. 2 Semivariance curve of eco-security assessment index through different districts, 2005

根据半方差图, C 是系统的结构方差, C_0 是系统的随机方差, $C + C_0$ 则为系统的总方差, $C/(C + C_0)$ 是结构方差与系统总方差的比值, 是对变量在空间可预测性的量度。因此成为半方差分析的重要参数。基于 $C/(C + C_0)$ 这一参数, 由图 2 可以看出, 生态安全可预测性最高的区域是增城, 其次是中心城区, 然后是番禺, 预测性最低的是花都和从化, 但是, $C/(C + C_0)$ 值仍然大于 0.5, 表明其生态安全的可预测程度超过 50%。而从整个广州来看, 预测程度很高, $C/(C + C_0)$ 值达到 0.951。

2.3.2 时间分异的半方差分析

中心城区生态安全半方差的动态如图 3 所示。可见, 中心城区生态安全空间分异的动态特点总体上表明不明显, 拟合为球体模型。但是, 据半方差图及模型的参数值可以看出, 半方差的时间分异仍然明显: 2005 年, 中心城区生态安全空间的总变异程度最大 ($C + C_0 = 311.2$), 表明控制生态安全的系统因子或某些因子存在较大的空间变异性; 其次是 1995 年和 2000 年, 最小的是 1990 年 ($C + C_0 = 139.7$)。

另外, 在 2005 年, $C/(C + C_0)$ 的值高达 0.951, 表明生态安全的可预测程度高, 系统结构方差大, 表明各影响因子空间相关性比较强。其余 3 个时间里, 可预测程度比较接近, 都大于 0.7。

2.3.3 方向分异的半方差分析

图 4 是中心城区生态安全的各向异性半方差图(2005 年)。图中从小到大的 4 个角度数分别对应 N-S、NE-SW、S-N、NW-SE 共 4 个方向。可见, 生态安全方向特性明显。在约 11km 范围内各方向变异函数曲线基本重合, 表明该尺度范围内各种生态过程同等重要^[27]; 样点距离超过 11km 后, 各方向的变异函数分异, 说明影响或控制生态安全水平的多种或所有生态过程在小于和大于 11km 范围内的作用强度是不一样的: N-S、

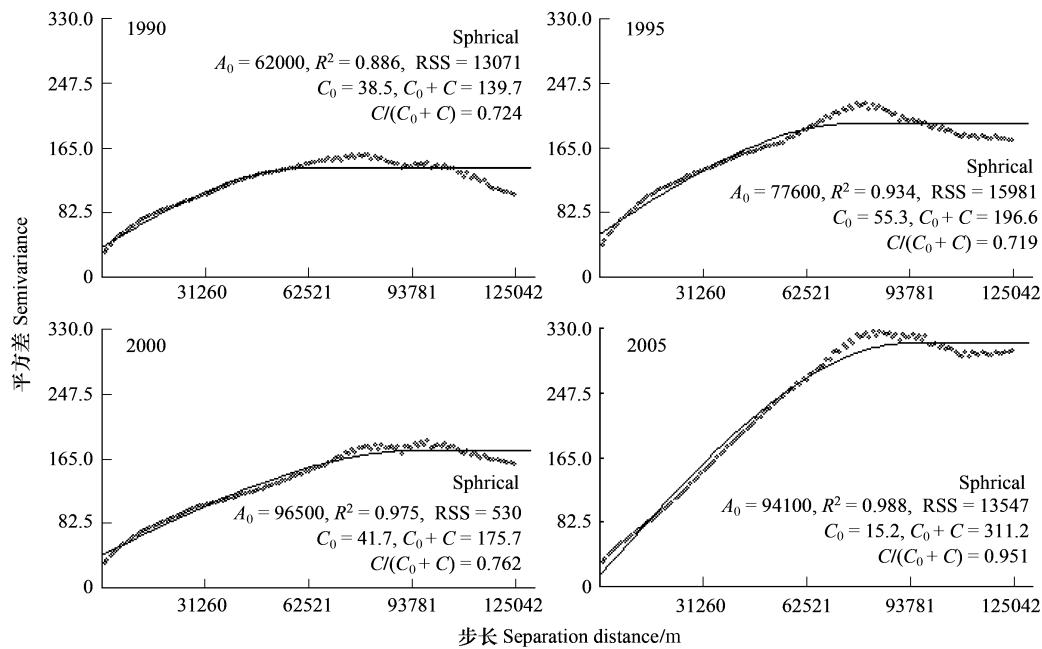


图3 中心城区生态安全半方差的动态特征

Fig.3 Dynamics curve of semivariance of eco-security assessment index of the city center

NW-SE 方向的曲线达到某一个距离值后开始下降,不再表现出空间自相关性;NE-SW 方向的曲线一直上扬,并且在大于 11km 距离值后曲线增幅变大,S-N 方向上曲线则一直表现出线性增势,表明这两个方向上生态安全空间相关程度随距离增大,控制生态安全的生态过程起着较重要的作用。

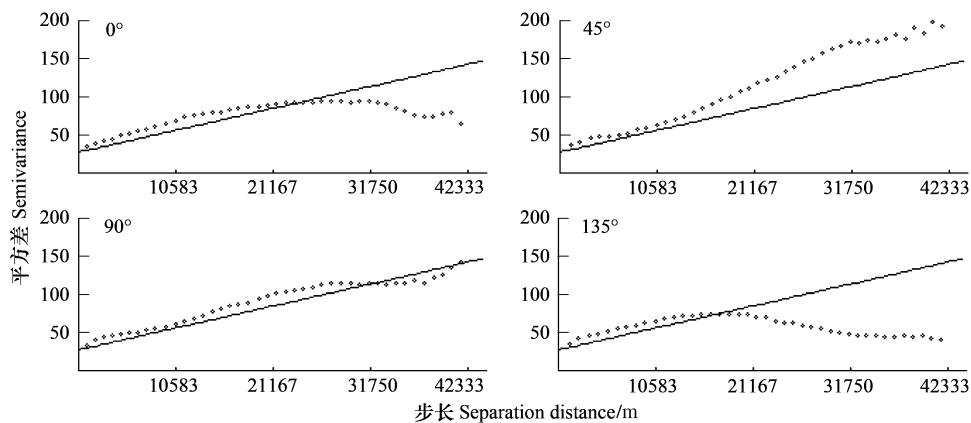


图4 生态安全空间异质性的方向分异模型(2005 中心城区)

Fig.4 Anisotropic variogram model model of the center city, 2005

线性模型参数: $R^2 = 0.621$, RSS = 180498, $C_0 = 27.5$, $C_0 + C = 226.289$, $C/(C_0 + C) = 0.878$

生态安全半方差的方向性还表明从不同方向来看,中心城区不同生态安全的斑块边界明显,过渡骤然,而且变化的距离具有一定规则。这也是高强度人类干预形条块分割城市土地利用/覆盖景观格局在景观模型计算结果中的反映。

3 结论与讨论

基于作者研究已经完成的生态安全数字评价图^[20-21],运用空间自相关系数和半方差分析法,本文重点对生态安全进行了空间统计学分析。包括空间自相关系数及其对分类数响应的分析,生态安全半方差的空间异质性、时间动态以及方向分异特征。得出以下主要结论:

广州市生态安全的空间分异明显。生态安全综合评价指数最小的是中心城区,表明其生态安全问题较其余区域严重。而中心城区是广州市的人口、政治与经济的中心地带,生态安全的这种状态值得引起相关部门足够的重视。生态安全水平相对较高的是增城和从化两个离中心城区相对较远的行政区。番禺区是受中心城区影响较大的毗邻行政区,也是城市扩展的新中心区,受人类活动及城市化进程的影响,其生态安全仅略高于中心城区。从时间动态来看,增城生态安全的变化最大,然后依次是番禺、中心城区、从化,花都区生态安全相对较稳定。这种动态变化的格局正好与广州市实施东进南拓的城市发展战略格局吻合,映证城市化进程对城市生态安全的影响。

Moran 的 I 系数和 Geary 的 C 系数值分别趋于 0 和 1, 表明整个研究区生态安全在空间上呈较强的正相关。这种相关程度的大小因时间而异:2005 年,研究区生态安全的空间自相关程度最高,2000 年最低。半方差曲线、半方差理论模型以及参数的分析结果表明,广州市生态安全的空间结构具有区域、时间与方向分异性,并以区域分异最明显。比如,从 45° 观察中心城区的生态安全时,可能存在漂移,暗示此方向上生态安全可能存在空间结构上的某种趋势。从生态安全评价图^[20]可知,在广州西北至东南和中心城区至东北的方向上,生态安全水平变化具有明显的梯度规律。如果进一步的展开更深入的研究可能将是一项有意义的工作。可见,区域化变量的空间结构是复杂的,对于其空间异质性的研究也应该是多角度的,不同视角的探讨与研究,可能有利于全方位地挖掘其内在本质或特征。

References:

- [1] Li H, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, 1995, 73: 280-284.
- [2] Wu J G. *Landscape Ecology-Pattern, Process, Scale And Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000: 13: 121-123.
- [3] Cheng Y F, Dong M. Spatial heterogeneity in ecological systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 346-352.
- [4] Qiu Y, Zhang J T, Zheng F Y. The kernel of landscape ecology: spatial and temporal heterogeneity in ecological systems. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(20): 42-49.
- [5] Naveh Z, Lieberman AS. *Landscape Ecology: Theory and Application*. New York: Springer-Verlag, 1984: 3-5.
- [6] Yue W Z, Xu J L, Tan W Q, Zhao J, Su F L. Spatial scale analysis of the diversities of urban landscape: a case study within the external circle highway of Shanghai City. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 122-128.
- [7] Jiang W W, Liu T, Ding L X, Wen G S, Zhang W R, Zhong T L. Progress in spatial heterogeneity research in landscape ecology. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2003, 20(3): 311-314.
- [8] Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6): 651-657.
- [9] Kronert R, Steinhardt U, Volk M. *Landscape Balance and Landscape Assessment*. Germany: Springer, 2001: 1-10.
- [10] Matthew L, Wu J G. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA. *Landscape Ecology*, 2002, 17: 327-339.
- [11] Philippe C, Jukka J, Robbert S. Using hierarchical levels for urban ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 2006, 21(12): 660-661.
- [12] Wang G, Wu W. Assessment on ecological security spatial differences of west areas of Liaohe River based on GIS. *Environmental Science*, 2005, 26(5): 28-33.
- [13] Wu J G, Jelinski D E, Luck M, Paul T T. Multiscale analysis of landscape heterogeneity: scale variance and pattern metrics. *Geographic Information Science*, 2000, (61): 6-19.
- [14] Zhang L Q, Wu J P, Zhen Y, Shu H. A Gis-based gradient analysis of urban landscape pattern of Shanghai metropolitan area, China. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 69(1): 1-16.
- [15] Christopher H Y, Peter J J. Measuring urban habitat fragmentation: an example from the black Country, UK. *Landscape Ecology*, 2001, 16: 643-658.
- [16] Xiao D N, Chen W B, Guo F L. On the basic concepts and contents of ecological security. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(3): 354-358.
- [17] André B L, Jack A. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 59: 65-93.
- [18] Yuan Z M, Zhang Z F, Hu X Y. Geostatistical analysis on the temporal patterns of the Yellow Rice Borer, *Tryporyza incertulas*. *Chinese Journal of*

- Rice Science, 2005, 19(4): 366-370.
- [19] Zhao J, Zhang J M, Meng K. Spatial heterogeneity of soil nutrients in black soil, China — a case study at Hailun County. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(6): 53-57.
- [20] Gong J Z, Xia B C. Study on Urban Landscape Ecology and Eco-Security; a Case Study in Guangzhou. Beijing: Science Press, 2008: 190-209.
- [21] Gong J Z, Xia B C, Chen J F, Lin M Z. Dynamic analysis of the Guangzhou landscape eco-security pattern based on 3S technology. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4323-4333.
- [22] Gong J Z, Xia B C. The extent response of landscape characteristics to regional land-cover and its variation. Resource Sciences, 2007, 29(4): 97-102.
- [23] Qi Y, Wu J. Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using spatial autocorrelation indices. Landscape Ecology, 1996, 11: 39-49.
- [24] Baldwin D J B, Weaver K, Schnekenburger F, Perera A H. Sensitivity of landscape pattern indices to input data characteristics on real landscapes: implications for their use in natural disturbance emulation. Landscape Ecology, 2004, 19: 255-271.
- [25] Gong J Z, Xia B C. Response to classification numbers of vegetation types on correlative coefficients among landscape metrics. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4075-4085.
- [26] Zhang C S, Zhang S, He J B. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang River system-geostatistics method. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(2): 184-191.
- [27] Guo X D, Fu B J, Ma K M, Chen LD. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS — A case study in Zunghua City of Hebei Province. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 557-563.

参考文献:

- [2] 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: 13, 121-123.
- [3] 陈玉福, 董鸣. 生态学系统的空间异质性. 生态学报, 2003, 23(2): 346-352.
- [4] 邱扬, 张金屯, 郑凤英. 景观生态学的核心: 生态系统的时空异质性. 生态学杂志, 2000, 19(20): 42-49.
- [6] 岳文泽, 徐建华, 谈文琦, 赵晶 苏方林. 城市景观多样性的空间尺度分析: 以上海市外环线以内区域为例. 生态学报, 2005, 25(1): 122-128.
- [7] 蒋文伟, 刘彤, 丁丽霞, 温国胜, 张万荣, 钟泰林. 景观生态空间异质性的研究进展. 浙江林学院学报, 2003, 20(3): 311-314.
- [8] 李哈滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651-657.
- [12] 王耕, 吴伟. 基于 GIS 的西辽流域生态安全空间分异特征. 环境科学, 2005, 26(5): 28-33.
- [16] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.
- [18] 袁哲明, 张中霏, 胡湘粤. 基于地统计学的三化螟种群时间格局分析. 中国水稻科学, 2005, 19(4): 366-370.
- [19] 赵军, 张久明, 孟凯. 地统计学及 GIS 在黑土区域土壤养分空间异质性分析中的应用——以海伦市为例. 水土保持通报, 2004, 24(6): 53-57.
- [20] 龚建周, 夏北成. 城市景观生态学与生态安全——以广州市为例. 北京: 科学出版社, 2008: 190-209.
- [21] 龚建周, 夏北成, 陈健飞, 林媚珍. 基于 3S 技术的广州市生态安全景观格局分析. 生态学报, 2008, 28(9): 4323-4333.
- [22] 龚建周, 夏北成. 区域土地覆被景观特征的幅度效应及其变异规律. 资源科学, 2007, 29(4): 97-102.
- [25] 龚建周, 夏北成. 景观格局指数间相关关系对植被覆盖度等级分类数的响应. 生态学报, 2007, 27(10): 4075-4085.
- [26] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计学方法. 地理学报, 1997, 52(2): 184-191.
- [27] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 陈利顶. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557-563.