景观格局指数相关性的幅度效应*

王艳芳 沈永明** 陈寿军 吴德力
(南京师范大学地理科学学院, 南京 210046)

摘 要 以TM遥感图像为数据源,选择江苏盐城大丰地区一块1764 km²的研究区,运用地理信息系统技术处理得到该研究区的景观类型图,选取景观水平上4种类型的32个景观指数进行计算,分析了不同幅度对景观指数间相关关系的影响。结果表明:随着研究幅度由0.5 km到14 km的逐渐增加,同类型景观指数间相关性幅度效应最为显著的为面积、周长、密度指数,其次是蔓延度、指数和形状指数,最后是多样性指数;不同类型景观指数间相关关系的幅度效应中,面积、周长、密度指数与其他类型指数间的相关关系较好,形状指数与多样性指数间的相关性则较差;且大部分景观指数间相关关系发生质变的空间幅度为3 km×3 km后,且随着研究幅度的增加,大部分发生质变的指数逐渐表现出不相关。该研究为不同幅度下景观指数的选取提供了参考。

关键词 景观格局指数; 相关关系; 幅度效应; 景观生态
中图分类号 Q149 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)8-2091-07

Range effect of the correlations among landscape metrics. WANG Yan-fang, SHEN Yong-ming**, CHEN Shou-jun, WU De-li (*College of Geography Science*, *Nanjing Normal University*, *Nanjing* 210046, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(8): 2091-2097.

Abstract: Taking Landsat TM image as the data source, an area with a size of 1764 km² in the Dafeng District of Yancheng City, Jiangsu Province of East China was selected as the study area, and a landscape type map was generated with the help of GIS technology. At landscape level, 32 landscape metrics of 4 types were selected and calculated, and the range effect of the correlations among the landscape metrics was analyzed. With the range increased from 0.5 km to 14 km, the range effect of the correlations among the landscape metrics of the same types was most significant for area, perimeter, and density metrics, followed by contagion metrics, shape metrics, and diversity metrics. In the range effect of the correlations among the landscape metrics of different types, the area, perimeter, and density metrics had significant correlations with other metrics, while the shape metrics had a poor correlation with diversity metrics. An obvious qualitative change of the correlations among the landscape metrics occurred when the range increased to 3 km × 3 km, and, with the further increase of the range, the majority of the metrics would be uncorrelated. This study provided reference for the selection of landscape metrics at different ranges.

Key words: landscape metrics; correlation; range effect; landscape ecology.

20世纪80年代开始,为了测定景观格局对生态过程的影响,须用简单数字描述复杂的景观格局,因而产生了景观格局指数(O'Neill & Hunsaker, 1996;Tischendorf, 2001)。随着描述景观格局的景观格局指数日益丰富,我国不少研究者就开始了对景观格局指数之间相关性进行了研究(布仁仓等, 2005;甄霖等, 2005),并且取得了一系列成果。与此同时,研究者也开始意识到尺度问题在生态学研究中的重要性(Delcourt *et al.*, 1983; Turner, 1989; Levin, 1992),提出尺度和格局问题是生态学中的核心问题,于是尺度问题的研究开始成为热点(Bourgeron *et al.*, 1999; Smits & Annoni, 1999;申卫军等, 2003)。

尺度效应是空间数据因聚合而改变其或栅格像

* 国家自然科学基金项目(40401059, 40973053)资助。
** 通讯作者 E-mail: yongmsh@163.com
收稿日期: 2012-03-08 接受日期: 2012-05-14

元大小时,分析结果也随之改变的现象(Jelinski & Wu,1996;邬建国,2000)。景观生态学中,尺度往往以粒度和幅度来表达,针对景观格局指数相关性的粒度效应的研究也已取得一定的成果(赵文武,2003;孟陈等,2007;李明杰等,2008),而对景观格局指数相关性的空间幅度效应研究还有待于深入。由于景观指数具有幅度效应,在某一幅度下景观指数间的相关性并不一定能推广到其他的幅度,因此对景观格局指数相关性的幅度效应进行研究也很必要。

本文以大丰市为例,按景观格局指数的生态学意义(McGarigal *et al.*,2002)分类,运用 Fragstats 3.3 和 SPSS 分析软件,计算分析同类指数间的相关关系幅度效应以及不同类型指数间相关关系的幅度效应,旨在为更好地进行景观格局指数以及生态系统特征、健康等研究提供帮助。

1 研究方法

1.1 数据来源及遥感解译处理

本文以2008年大丰市的TM影像为数据源,在该影像上裁剪出一块1400行×1400列的面积为1764 km^2(42 km×42 km)的正方形研究区。首先利用ENVI对该影像进行几何校正等预处理,再根据各种土地类型遥感图像的色调、形状、纹理,建立各土地利用类型的解译标志(王晶晶等,2005),确定了居民地、耕地、林地、裸地、河流、草地、养殖地7种景观组分,利用ENVI软件,采用最大似然法进行监督分类;然后在GIS支持下,分别用边长为0.5、1、2、3、6、7、10.5和14 km的规则的正方形网格对研究区分类图进行等面积切割,空间幅度效应就是通过改变网格的大小而体现的。

1.2 景观格局指数的计算与相关性分析处理

首先将各幅度下的样本分别导入Fragstats 3.3中计算出其景观水平上的4种类型32个指数(表1),然后导入SPSS中进行双变量分析,计算出相关系数。本文在进行相关性分析时,认为相关系数绝对值大于0.75,并且在 $P=0.01$ 水平上显著,则指数间存在显著的相关关系(徐克学,2001);相关系数绝对值小于0.75,但在 $P=0.01$ 水平上显著,则此相关系数只能预测指数变化趋势,即一个指数的变化预示另一个指数的变化趋势;相关系数绝对值小于0.75,并且在 $P=0.01$ 水平不显著,则指数之间不存在任何意义的相关关系。分析结果分为两类,且将由 $P=0.01$ 水平上显著变为不显著称为质变:第一大类,指数间相关性随着幅度的改变发生了质变,即两个指数随着幅度的变化从不相关变成在 $P=0.01$ 水平显著相关或是从 $P=0.01$ 水平显著相关变成不相关,幅度效应明显;第二大类,相关性随着幅度的改变没有发生质的变化,即 $P=0.01$ 水平上显著相关不变和不相关不变(布仁仓等,2005)。

2 结果与分析

2.1 面积、周长、密度指数相关性幅度效应

面积、周长、密度指数间的相关性最好,指数间

表1 景观指数名称
Table 1 Name of landscape metrics

类型	指数名称	英文简称	类型	指数名称	英文简称
面积周长	总面积	TA	蔓延度指数	面积周长比变异系数	PARA_CV
密度指数	斑块个数	NP		周长面积分维数	PAFRAC
	斑块密度	PD		蔓延度	CONTAG
	最大斑块指数	LPI		类相邻百分比	PLADJ
	边界密度	ED		分散指数	IJI
	总边界长度	TE		景观分离度	DIVISION
	景观形状指数	LSI		有效网格面积	MESH
	平均斑块面积	AREA_MN		分割指数	SPLIT
	斑块面积变异系数	AREA_CV		聚集度	AI
	平均回旋半径	GYRATE_MN	多样性指数	斑块丰富度	PR
	回旋半径变异系数	GYRATE_CV		类型密度	PRD
形状指数	形状指数变异系数	SHAPE_CV		相对斑块丰富度	RPR
	面积加权平均分维数	FRAC_AM		Shannon多样性	SHDI
	分维数变异系数	FRAC_CV		Simpson多样性	SIDI
	面积加权平均周长面积比	PARA_AM		Shannon均匀度	SHEI
	面积加权平均形状指数	SHAPE_AM		Simpson均匀度	SIEI

具有很强的自相似性。其指数相关性幅度效应最为显著(表2),其中还有22个指数对的相关性都随着幅度的增大而发生质的改变,且大部分指数对均在空间幅度为3 km×3 km后呈现质变,由$P=0.01$水平上显著变为不相关,幅度效应显著,这类指数在某一幅度下的相关分析结果进行尺度延伸时则要特别注意幅度效应。经计算发现,当研究区面积大于3 km×3 km后,除了斑块个数和斑块密度的相关性以及总边界长度、边界密度、景观形状指数三者之间呈现显著相关外,其余大部分指数对均呈现出不相关,独立性增强。

在研究幅度范围内有23个指数对相关性没有发生质的改变(图1),一直呈现$P=0.01$水平上显著相关不变或不相关不变,总体来说,此类指数对相关性比较稳定,幅度效应不显著,这类指数在某一幅度下相关分析结果可以推广到其他幅度。在用景观指数对景观格局研究时,为避免信息重复,对于相关性一直处于显著状态的指数对,取其中一个指数进行计算,对于一直不相关的指数对,说明各个指数均呈现不同的生态学意义,研究计算时要分别考虑。

2.2 形状指数间的相关性幅度效应

形状指数之间的相关性最差,即指数之间的独立性最强。与其余3类景观指数相比,形状指数间的相关性随幅度的变化是最复杂的。形状指数对的相关性幅度效应的显著性次于面积、周长、密度指数,随着研究幅度的增加,除了面积加权平均形状指数、面积加权平均分维数和分维数变异系数之间相关性增强外,大部分指数之间的独立性增加,逐渐呈现出不相关(表3)。

形状指数中,呈现显著相关不变的有4个指数对(图2),其中面积加权平均形状指数与面积加权平均分维数的相关系数响应曲线近于直线,相关关

表2 发生质变的面积/周长/密度指数对的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of qualitative change in area, perimeter and density metrics

景观指数对	空间幅度(km^2)							
	0.5×0.5	1×1	2×2	3×3	6×6	7×7	10.5×10.5	14×14
NP\PD-LPI	-0.736	-0.789	-0.706	-0.641*	-0.237	-0.282	-0.151	-0.050
NP\PD-AREA_CV	-0.486	-0.744	-0.662	-0.661*	-0.111	-0.106	0.029	0.175
NP\PD-GYRATE_MN	-0.580	-0.378	-0.010	0.301	-0.249	-0.334	0.615	0.725
TE\ED\LSI-GYRATE_CV	-0.738	-0.756	-0.865	-0.535*	-0.346	-0.507	-0.595	-0.615
LPI-TE\ED\LSI	-0.919	-0.808	-0.636	-0.512*	-0.285	-0.400	-0.346	-0.311
LPI-AREA_MN	0.738	0.801	0.665	0.653*	0.158	0.287	0.168	0.112
LPI-GYRATE_MN	-0.016	-0.110	-0.529*	-0.662	-0.599	-0.461	0.344	0.302
LPI-GYRATE_CV	0.729	0.688	0.637	0.552*	0.202	0.207	0.038	0.230
TE\ED\LSI-AREA_CV	-0.804	-0.764	-0.609	-0.549*	-0.167	-0.214	-0.162	-0.104
AREA_MN-AREA_CV	0.458	0.684	0.597	0.652*	0.027	0.095	0.028	0.133
AREA_MN-GYRATE_MN	0.608*	0.366	0.047	-0.276	0.359	0.402	0.667	0.750
AREA_CV-GYRATE_CV	0.754	0.743	0.624	0.580*	0.168	0.172	0.025	0.198
AREA_CV-GYRATE_MN	-0.359	-0.250	-0.599*	-0.700	-0.697	-0.648	-0.573	-0.586

数据后加*代表突变点,划横线表示在$P=0.01$水平上显著。

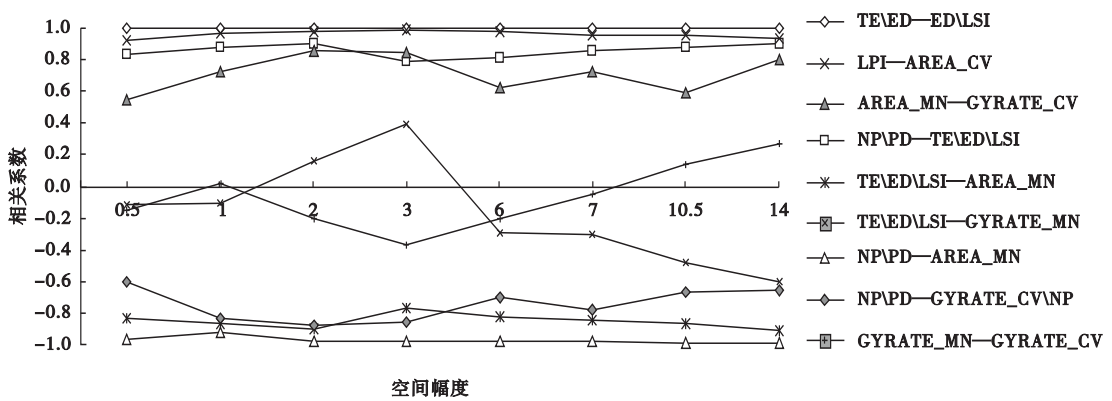


图1 未发生质变的面积/周长/密度指数间的相关系数响应曲线

Fig. 1 Correlation coefficient response of qualitative unchange in area, perimeter and density metrics

表3 发生质变的形状指数对的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of qualitative change in shape metrics

景观指数对	空间幅度(km^2)							
	0.5×0.5	1×1	2×2	3×3	6×6	7×7	10.5×10.5	14×14
SHAPE_AM-FRAC_CV	0.308	0.073	-0.231	-0.269*	-0.665	-0.678	-0.687	-0.732
SHAPE_CV-FRAC_CV	0.669*	0.347	0.220	0.143	-0.537	-0.325	-0.293	-0.315
SHAPE_CV-PARA_AM	0.344	0.230	0.227	0.224	0.447	0.523*	0.651	0.766
SHAPE_CV-PAFRAC	0.596	0.466	0.429	0.506*	0.020	0.191	0.321	0.539
FRAC_AM-FRAC_CV	0.573	0.226	0.028	-0.052*	-0.660	-0.637	-0.648	-0.807
FRAC_AM-PAFRAC	0.535*	0.355	0.402	0.386	0.245	0.122	0.079	0.219
FRAC_CV-PARA_AM	0.593	0.353	0.615	0.747*	-0.106	0.146	-0.096	-0.236
FRAC_CV-PAFRAC	0.822	0.666	0.796	0.846*	0.310	0.418	0.305	0.120

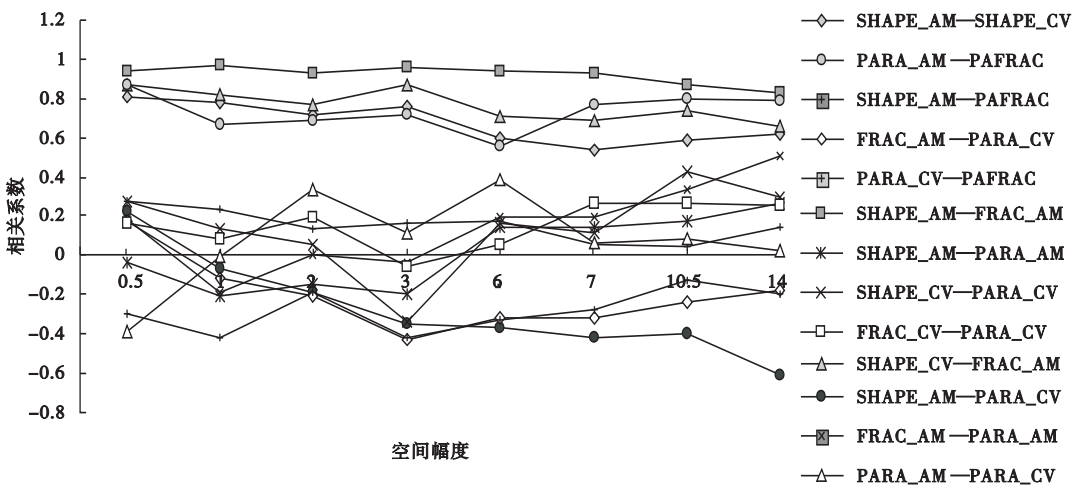


图2 未发生质变的形状指数间的相关系数响应曲线

Fig. 2 Correlation coefficient response of qualitative unchange in shape metrics

系尤为稳定,在用指数进行景观格局研究时,要注意避免选取指数信息的重复性。其余的指数之间则表现出不存在任何意义的相关关系,其中尤为典型的是面积加权平均形状指数与周长面积分维数的关系,其响应曲线随着空间幅度的变化几乎没有变化,接近直线,可预测性极强。

2.3 蔓延度指数间的相关性幅度效应

蔓延度指数间的相关性次于面积、周长、密度指数,其指数间相关性幅度效应的显著性与形状指数相当。随着空间幅度的增加,大部分指数对呈现出的相关性由 $P=0.01$ 水平上显著的相关转变成不相关(表4),且均在空间幅度为3 km×3 km后表现出质变。从一定程度上说明,用蔓延度指数对大幅度范围景观格局进行研究时,大部分指数间独立性很强,信息重复率低。

在研究幅度范围内,相关性都很稳定的指数对

表4 发生质变的蔓延度指数间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of qualitative change in contagion metrics

景观指数对	空间幅度(km^2)							
	0.5×0.5	1×1	2×2	3×3	6×6	7×7	10.5×10.5	14×14
CONTAG-PLADJ\AI	0.922	0.839	0.670	0.360	0.359	0.361	0.237	0.394
CONTAG-IJI	-0.756	-0.741	-0.507	-0.630	-0.516*	-0.422	-0.401	-0.452
CONTAG-SPLIT	-0.801	-0.737	-0.638	-0.539*	-0.295	-0.272	-0.361	-0.285
PLADJ\AI-IJI	-0.540	-0.343	0.258	0.462*	0.544	0.639	0.694	0.762
PLADJ\AI-DIVISION\MESH	-0.918	-0.848	-0.652	-0.554*	-0.393	-0.417	-0.335	-0.222
PLADJ\AI-SPLIT	-0.869	-0.726	-0.733	-0.666*	-0.253	-0.351	-0.517	-0.461
IJI-DIVISION\MESH	0.500*	0.458	0.313	0.190	0.063	0.005	-0.072	-0.201
IJI-SPLIT	0.551	0.518*	0.078	0.025	0.046	-0.094	-0.254	-0.253

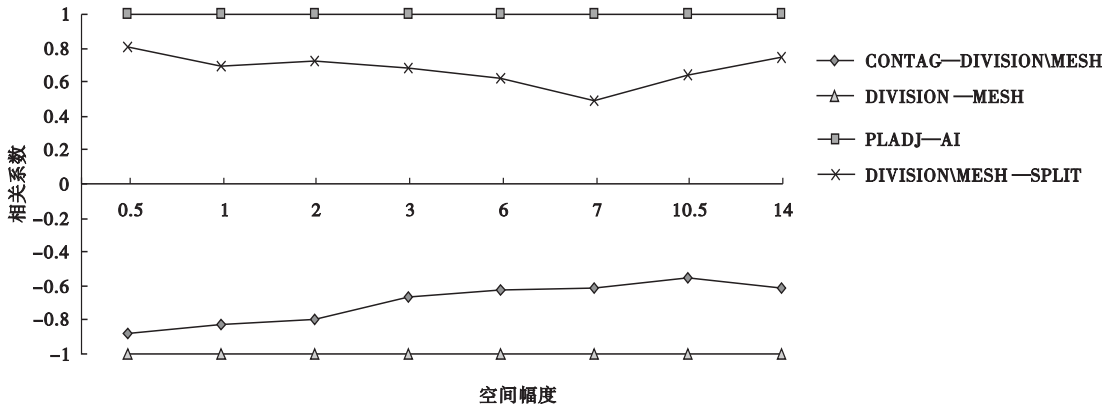


图 3 未发生质变的蔓延度指数间的相关系数响应曲线
Fig. 3 Correlation coefficient response of qualitative unchange in contagion metrics

有 6 个(图 3),随着空间幅度的增加,该 6 对指数一直在 $P=0.01$ 水平上显著相关,幅度效应不明显,相关性极其稳定,指数间的信息重复率极高。蔓延度指数中聚集度、类相邻百分比、蔓延度是像元为计算单元的指数对象元大小特敏感,如果像元面积减少,景观聚集度增加。在计算的过程中,它们考虑的不是像元大小及单位而是像元数量,因此受像元大小或空间分辨率的影响(布仁仓等,2003)。所以在具体案例研究中,尤其观动态变化研究中,必须保证每期遥感数据的空间分辨率一致。

2.4 多样性指数间的相关性幅度效应

多样性指数间的相关性与蔓延度指数相当,其相关性幅度效应的显著性最弱。在研究幅度范围内,多样性指数中发生质变的指数对分别是斑块丰富度、类型密度、相对斑块丰富度与 Shannon 均匀度组成的指数对的相关性,在空间幅度为 3 km×3 km 后呈现出由不相关到相关到不相关的过程,幅度效应显著,相关性极不稳定,可预测性极差(图 4)。其余的指数对均未发生质变,对于研究的几个多样性指数来说,其生态学意义基本相同,只是所采用的计算公式不同,因此,任何两个指数之间基本上都存在显著的相关关系,说明它们之间信息的重复量大;斑块丰富度、类型密度、相对斑块丰富度这 3 个指数相互之间也一直是显著相关的,其相关系数一直是 1,稳定性极强;斑块丰富度、类型密度、相对斑块丰富度分别与 Shannon 多样性指数、Simpson 多样性指数、Simpson 均匀度组成的指数对在研究范围内一直表现出不存在任何意义的相关关系,但其相关系数有增大的趋势,随着空间研究幅度的继续增大,极有可能转变成相关的状态。Shannon 多样性指数与 Simpson 多样性指数之间具有显著的相关关系,而且研究表明,Shannon 指数对景观中的非优势类型的变化敏感,而 Simpson 指数对优势类型的变化敏感(Wickham & Riitters,1995)。

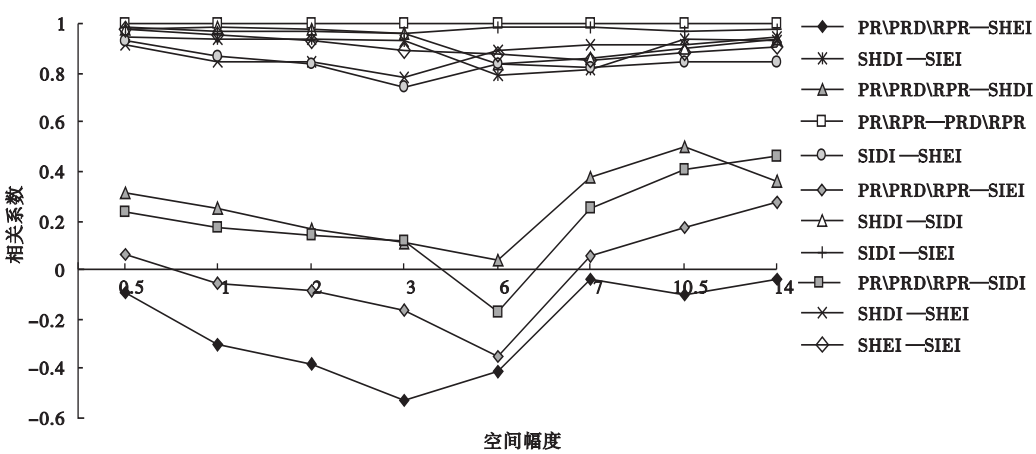


图 4 多样性指数间的相关系数响应曲线
Fig. 4 Correlation coefficient response of diversity metrics

2.5 不同类型指数间相关性幅度效应

面积、周长、密度指数与其他3种类型指数的相关性幅度效应中,在空间幅度为3 km×3 km后呈现质变的指数对是:最大斑块指数与面积周长比变异系数、回旋半径变异系数与形状指数变异系数、平均回旋半径指数分别与Shannon多样性、Simpson多样性、Simpson均匀度、Shannon均匀度组成的指数对均由$P=0.01$水平上不显著转变为显著状态,而最大斑块指数与面积加权平均周长面积比组成的指数对以及蔓延度分别与边界总长度、边界密度、景观形状指数、斑块面积变异系数组成的指数对则相反。相关性没有发生质变的指数对是:面积加权平均周长面积比与所有面积、周长、密度指数一直呈现显著相关,Shannon多样性、Simpson多样性、Simpson均匀度、Shannon均匀度与除最大斑块指数、斑块面积变异系数、回旋半径变异系数之外的面积、周长、密度指数一直保持显著相关,形状指数变异系数、分散指数、斑块丰富度、类型密度、相对斑块丰富度与面积、周长、密度指数均表现出不存在任何意义的相关关系。

形状指数与蔓延度指数、多样性指数相关性幅度效应中,随着研究幅度的增加,在空间幅度为3 km×3 km后呈现质变的指数对是:分散指数与面积加权平均周长面积比组成的指数对、蔓延度分别与面积加权平均形状指数、面积加权平均分维数组成的指数对均由$P=0.01$水平上不显著转变为显著状态。蔓延度、Shannon多样性、Simpson多样性、Simpson均匀度、Shannon均匀度分别与面积加权平均周长面积比的相关关系则呈现出相反状态。相关性没有发生质变的指数对是:分散指数分别与面积加权平均形状指数、形状指数变异系数、面积加权平均分维数组成的指数对一直呈现显著相关关系,类相邻百分比与面积加权平均周长面积比、周长面积分维数一直呈现显著负相关。而分散指数分别与面积周长比变异系数、分维数变异系数组成的指数对以及斑块丰富度、类型密度、相对斑块丰富度分别与各形状指数组成的指数对均表现出不存在任何意义的相关关系。

蔓延度指数与多样性指数的相关性幅度效应中,Shannon多样性、Simpson多样性、Simpson均匀度、Shannon均匀度分别与蔓延度、景观分离度、有效网格面积的关系在研究幅度内一直呈现显著相关,与聚集度、类相邻百分比的关系在3 km×3 km处由$P=0.01$水平上显著转变为不显著状态;斑块丰富度、类型密度、相对斑块丰富度与除分散指数外的其余蔓延度/分散指数间一直表现出不存在任何意义的相关关系,与分散指数的关系则仅在空间幅度为2 km×2 km和3 km×3 km处呈现显著相关。

3 讨 论

首先,本文采用的研究方法是同一幅度下的等面积切割法,无法计算出总面积TA与其他指数的相关系数,从而无法验证总面积TA与其他指数相关性的幅度效应。面积、周长、密度指数间的相关性最强,这与该组指数本身的计算公式和生态学意义有很大的关系,指数组内生态学意义相近,并且该组指数所采用的参数基本相同,所以该组指数间的相关性最强(布仁仓等,2005)。其次,景观格局指数在不同景观条件下行为的一致性具有很大的不确定性,所以针对不同的研究区,指数的变化行为还需要有待于进一步验证。在研究景观指数相关性的变化特点和规律时,应该结合具体的研究区和景观条件来进行,通过研究对比大量具备不同区域特性以及不同景观条件下各类不同景观指数之间相关性的变化特点和规律,才能更好地揭示各类景观指数在各种情况下的相关性的变化情况。

所选幅度的变化范围、分析景观类型的多少,甚至景观指数本身算法的差异都有可能造成景观指数相关性幅度效应分析结果的差异。由于本文所选的研究区的幅度范围有限,很多景观指数的相关性幅度效应明显,在研究范围内发生了质变,且大部分景观指数的相关性发生质变的幅度范围在3 km×3 km后,若进一步细化研究幅度,则可以更明确地找出各指数对相关性突变点;若进一步扩大研究幅度,相关性没有质变的指数对也可能发生质变。可以结合具体地区的景观条件以及所采用数据自身的特点通过拓宽幅度的变化范围,改变幅度的变化步长或者改变景观分类系统等来探讨景观指数相关性的幅度效应在某个地区景观条件下的具体变化特点和规律。

4 结 论

同类型景观格局指数间的相关关系的幅度效应最为显著的为面积、周长、密度指数,其次是蔓延度指数和形状指数,多样性指数间的相关性的幅度效应最不显著。

不同类型景观格局指数间相关关系的幅度效应

中,面积、周长、密度指数与其余指数间的相关关系比较显著;形状指数与多样性指数间的相关性较弱,研究幅度内大部分指数间一直表现出不存在任何意义的相关状态。

不同类型景观格局指数间信息重复率一直较高的是,面积加权平均周长面积比与总边界长度、边界密度、景观形状指数、斑块个数、斑块密度、平均斑块面积之间,聚集度与总边界长度、边界密度、景观形状指数之间,斑块个数、斑块密度与类相邻百分比之间,最大斑块指数、斑块面积变异系数与景观分离度、有效网格面积之间,蔓延度、有效网格面积与Simpson多样性、Simpson均匀度之间。

大部分景观指数间相关关系发生质变的空间幅度在3 km×3 km后,且随着研究幅度的增加,大部分发生质变的指数对逐渐表现出不相关,信息重复率降低。

参考文献

布仁仓, 胡远满, 常 禹, 等. 2005. 景观指数间的相关分析. 生态学报, **25**(10): 2764-2775.

布仁仓, 李秀珍, 胡远满, 等. 2003. 尺度分析对景观格局指标的影响. 应用生态学报, **14**(12): 2181-2186.

李明杰, 钱乐祥, 夏丽华, 等. 2008. 汕头市土地利用景观指数粒度效应初探. 地理与地理信息科学, **6**(24): 93-96.

孟 陈, 李俊祥, 朱 颖, 等. 2007. 粒度变化对上海市景观格局分析的影响. 生态学杂志, **26**(7): 1138-1142.

申卫军, 邬建国, 林永标, 等. 2003. 空间粒度变化对景观格局分析的影响. 生态学报, **3**(12): 2506-2519.

王晶晶, 张 鹰, 陶 菲. 2005. 盐田水体遥感分类方法研究. 海洋技术, **24**(1): 67-71.

邬建国. 2000. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京:高等教育出版社.

徐克学. 2001. 生物数学. 北京: 科学出版社.

赵文武, 傅伯杰, 陈利顶. 2003. 景观指数的粒度变化效应. 第四纪研究, **23**(3): 326-333.

甄 霖, 谢高地, 杨 丽, 等. 2005. 径河流域分县景观格局特征及相关性. 生态学报, **25**(12): 3343-3353.

Bourgeron PS, Hope C, Humphries HC, *et al*. 1999. Impact of broad and fine scale patterns on regional landscape characterization using AVHRR derived land cover data. *Ecosystem Health*, **5**: 235-238.

Delcourt HR, Delcourt PA, Webb T. 1983. Dynamic plant ecology: The spectrum of vegetation change in space and time. *Quaternary Science Review*, **1**: 153-175.

Jelinski DE, Wu J. 1996. The modifiable areal unit problem and implications for landscape ecology. *Landscape Ecology*, **11**: 129-140.

Levin SA. 1992. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, **73**: 1943-1967.

McGarigal K, Cushman SA, Neel MCM, *et al*. 2002. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps[EB/OL]. [2011-12-20]. http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html.

O'Neill RV, Hunsaker CT. 1996. Scale problems in reporting landscape pattern at the Regional scale. *Landscape Ecology*, **11**: 169-180.

Smits PC, Annoni A. 1999. Spatial analysis of land use changes as knowledge tools in support of European spatial policies and ecosystem Health. *Ecosystem Health*, **5**: 276-284.

Tischendorf L. 2001. Can landscape indices predict ecological processes consistently. *Landscape Ecology*, **16**: 235-254.

Turner MG. 1989. Landscape ecology: The effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **20**: 171-197.

Wickham JD, Riitters KH. 1995. Sensitivity of landscape metrics to pixel size. *International Journal of Remote Sensing*, **16**: 3585-3594.

作者简介 王艳芳, 女, 1987年生, 硕士, 主要从事海岸带湿地景观生态学研究。E-mail: wangyanfang1222@126.com

责任编辑 刘丽娟