

景观指数之间的相关分析

布仁仓^{1,2}, 胡远满¹, 常 禹¹, 李秀珍¹, 贺红士¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:应用辽宁省 1997~1998 年的 TM5 影像数据, 编制了景观类型图, 以 78 个县市区为单位, 分割成 78 个景观, 共计算 39 个景观格局指数, 对它们进行了相关分析。总面积是最基本的景观指数, 它决定景观总边界长度、斑块数、类型密度等基本指数, 同时与多个指数有显著的相关关系(相关系数绝对值大于 0.75)。形状指数的独立性强, 极少数指数与其它指数有显著的相关关系; 多样性指数和蔓延度指数之间信息重复量最多, 都表示景观的异质性, 但多样性指数以面积百分比表示景观异质性, 而蔓延度指数以类型之间相邻边界的百分比表示景观异质性。研究发现, 如果两个指数之间存在显著的相关关系, 而由它们两个构成的指数与它们之间没有显著的相关关系。如果指数平均值之间存在显著的相关关系, 则它们的变异系数之间不存在显著的相关关系。景观指数间的相关系数不仅与景观格局本身有关, 还与空间尺度, 分类系统、计算公式及其参数、计算单元和生态学意义关系密切。指数之间影响因子的相同之处越多, 它们之间存在显著相关关系的概率越大。

关键词:景观格局指数; 相关系数; 相关分析

文章编号:1000-0933(2005)10-2764-12 **中图分类号:**Q149 **文献标识码:**A

A correlation analysis on landscape metrics

BU Ren-Cang^{1,2}, HU Yuan-Man¹, CHANG Yu¹, LI Xiu-Zhen¹, Hong S. He¹ (1. *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China*; 2. *Gradute School of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2764~2775.

Abstract: Numerous landscape metrics have been developed during last three decades to describe and quantify complex landscape patterns and link landscape patterns and ecological processes. This generates a great deal correlated and redundant information if all of the indices were calculated. Thus, it is necessary to identify the correlated landscape metrics and to find out the relationships among them.

In our study, the 1999 Landsat imageries of Liaoning Province of China were classified into 16 cover types, the entire study area was clipped into 78 landscape maps according to the county or city boundaries. Thirty nine landscape metrics were calculated for each map, including area, perimeter and density, shape, diversity and contagion. *F*-Test showed that the correlation coefficient greater than 0.28 is significant at $p=0.01$ in while the empirical study showed that the correlations between indices exist when correlation coefficient is greater than 0.75. Thus, we considered strong correlations between the landscape indices exist only when the correlation coefficient is greater than 0.75.

The result showed that total area is the most basic index within landscape metrics. It correlated with many landscape metrics such as total edge and number of patches in the landscape. Shape metrics are more independent than other groups. Only fractal dimension (log) and mean shape index correlated significantly. Many diversity metrics correlated among themselves, especially the Shannon and Simpson indices. However, Shannon indices are more sensitive to the minor cover type and Simpson indices are more sensitive to common cover types in landscape. Furthermore, Simpson indices are more sensitive

基金项目:国家重点基金资助项目(40331008); 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2002CB111506)

收稿日期:2004-07-04; **修订日期:**2005-02-23

作者简介:布仁仓(1970~), 男, 蒙古族, 内蒙古人, 博士生, 副研究员, 从事景观生态学, 地理信息系统, 遥感, 景观模型和指数研究. E-mail: BuRC@iae. ac. cn

Foundation item: Key Project of NFNS (No. 40331008) and National 973 Project (No. 2002CB111506)

Received date: 2004-07-04; **Accepted date:** 2005-02-23

Biography: BU Ren-Cang, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in landscape ecology, GIS, RS and landscape modeling. E-mail: BuRC@iae. ac. cn

to patch density, edge density and average patch area than Shannon indices. Diversity metrics use the proportions of cover types and number of classes to describe the landscape diversity, and contagion metrics use the adjacency matrix to describe the landscape edge diversity, therefore diversity indices are often correlated with contagion indices. Diversity and contagion indices show different aspects of heterogeneity of the study landscape.

When an index correlates with another index, the coefficient of variation does not correlate with each other. For example, mean shape index correlates with mean fractal dimension, but their coefficients of variation are independent. Once two basic metrics are correlate with each other, the index consists of two of them are not correlated with the two basic metrics significantly. For example, the total area and number of patches correlate each other, but the patch density does not correlate with them strongly. Finally, the correlation coefficients among landscape metrics were influenced by the landscape patterns, spatial scales, classification systems, mathematical equations, units and ecological meanings. The more common influencing elements above mentioned are in two landscape metrics, the higher probability of strong correlation are among them.

Key words:landscape metrics; correlation coefficient; correlation analysis

20 世纪 80 年代开始,为了测定景观格局对生态过程的影响^[1,2],必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(Landscape indices or metrics)。以信息论为基础的优势度(Dominance)与蔓延度(Contagion)^[3]以及分形几何学为基础的分维数(Fractal dimension)^[4]等指数来描述描述景观格局,分析与生态过程之间的相关关系,认为优势度与分维数反映大尺度上的景观格局,而蔓延度反映小尺度上的格局,分维数还能反映人类活动的影响^[5]。后来,有人试图用一个指数表述景观格局,但发现一个指数无法代表一个景观格局的特殊性,无法完全与其它景观区分,因为不同的景观格局有相等的景观指数^[6,7]。后来的研究表明只能用几个指数的组合来描述景观格局^[8],但研究目的是为了描述景观格局某一个特性时可以采用一个指数^[9]。随着新学科和计算机技术的发展,提出了计算公式更复杂的孔隙度(Lacunarity)^[10~12]、聚合度(Aggregation index)^[13]等景观指数。近年来,应用在遥感领域,描述影像纹理特征的反差矩(Inverse difference moment)^[14]和角秒矩(Angular second moment)^[15]等越来越受到景观生态学家青睐,用来描述景观异质性^[16]。如今景观格局指数已经发展到了数量多,类型少,生态学意义模糊的程度。

在景观指数中,大部分指数之间景观格局信息重复^[5,17,18],因此采用因子分析法减少指数数量^[17,19],以避免信息重复。认为采用 6 种指数可以描述景观格局,但当时计算的指数大部分是平均值,而且大部分指数是斑块周长面积比值或分维数的变形,没有包括总面积和总边界长度等景观固有特性以及新兴的景观指数。

本文按景观格局指数的生态学意义(FRAGSTATS 的分类标准)^[20]把景观水平上的 39 个常用的指数分为 4 个类型,目的是分析同类指数间的相关关系以及不同类型指数间的相关关系,尤其景观固有属性如总面积、总边界长度、斑块数和类型数对格局指数的影响。认为如果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^[21,22];如果相关系数绝对值小于 0.75,但在 $p=0.01$ 水平上显著,则此相关系数只能表明指数变化趋势,即一个指数的变化预示另一个指数的变化趋势;如果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。从而,为今后景观格局与过程研究中指数的选用提供依据。

1 研究方法

1.1 研究区域

辽宁省地势,由北向南,自东西向中部倾斜。山地丘陵大致分布于东西两侧,约占总面积的 2/3,中部为东北向西南缓缓倾斜的平原,约占总面积的 1/3。根据地貌特点大致上可分为辽东山区、辽西山地丘陵区 and 辽河平原区。辽宁省属大陆性季风气候,具有中纬度西风带气候特点。由于受地形、地势、距海洋远近的影响,区内各地气候有所差异。其主要特点是:雨热同季,日照丰富,寒冷期长,春秋季短,东湿西干,平原风大。从植被条件看,东部山区植被属温带针阔混交林,南部和辽西植被属于暖温带落叶阔叶林,辽北植被属于温带草原,是多个植被类型的过渡带^[3]。

1.2 研究方法

本文利用遥感图像处理软件(ER Mapper 5.5),对辽宁省 1998 年陆地资源卫星 TM5 影像数据进行了景观分类,共分出 16 个类型,景观分类的精度为 30m×30m。在地理信息系统的支持下,根据省内 78 个县市区行政界线,把全省景观类型图分割成 78 个景观类型图,利用景观格局分析软件 APACK(2.2)^[23]和 FRAGSTATS(3.3)^[20],在景观水平上计算每个县市区 39 个景观格局指数。依据 FRAGSTATS 软件的指数分类,把格局指数分为 4 种类型:(1)面积、周长和密度指数(Area, perimeter and density metrics);(2)形状指数(Shape metrics);(3)蔓延度指数(Contagion metrics);(4)多样性指数(Diversity metrics)等。

首先,计算每个指数的自然对数值,计算指数间的原始值与指数值、原始值与自然对数值和自然对数值与自然对数值之间

的相关系数;其次,选择绝对值最大的相关系数作为指数之间的相关系数;最后,在 $p=0.01$ 的水平上,对相关系数进行 F 检验。

如果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^[21,22];如果相关系数绝对值小于 0.75,但在 $p=0.01$ 水平上显著,则此相关系数只能表明指数变化趋势,即一个指数的变化预示另一个指数的变化趋势;如果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。

2 结果

研究区的总面积为 14.68 万 km²,包含了 78 个行政区(县市区),其中最小的面积为 5582.16hm²,最大的为 626826.42hm²,平均面积为 188241.25hm²。景观类型数的变化范围为 6~17,平均每个行政区内有 10 个类型。

2.1 面积、周长和密度指数间的相关性

此类指数关系到斑块的面积、周长、斑块数以及由它们引申出来的总面积、总边界长度以及各类密度,是最基本的格局指数,也是其它指数的基础(此后叫作基本指数)。景观类型图的空间属性数据库能提供斑块类型、面积和周长等空间属性,经过简单的统计可以获得总面积、类型数、总边界长度和斑块数等格局指数。因此,总面积、总边界长度和斑块数是景观固有的特性,它们决定着其它与面积、周长和密度有关的指数。而且这些固有特性之间相互存在显著的相关关系(R 的绝对值大于 0.75),即如果总面积(TA)增加,景观总边界长度(TE)($R^2=92.50\%$)和斑块数(NP)($R^2=90.68\%$)显著增加,并且平均斑块面积变异系数(APA-CV)($R^2=72.08\%$)也显著增加。从这个意义上讲,总面积决定着景观边界长度和斑块数,甚至由它们引申出来的其它指数(APA-CV)。

景观格局指数中的两个密度指数,即斑块密度(PD)和边界密度(ED)呈现正相关关系($R^2=72.19\%$),即单位面积上斑块数的增加能引起 72.19%的单位面积上边界长度的增加。此外,PD 和 APA 所表示的生态学意义完全相同($R=1.000$),即景观破碎化。在计算过程中,只是分子和分母的颠倒而已。

表 1 面积、周长、密度指数(基本指数)间的相关分析
Table 1 The correlation analysis on area, perimeter and density metrics (base metrics)

基本指数 Base metrics	TA	TE	NP	LPI	ED	PD	NAPA	APP	APA	APA-CV
TA	1.00 lnR-lnC									
TE	<u>0.96</u> lnR-lnC	1.00 lnR-lnC								
NP	<u>0.95</u> lnR-lnC	0.99 lnR-lnC	1.00 lnR-lnC							
LPI	-0.06 lnR-lnC	-0.21 lnR-lnC	-0.21 lnR-lnC	1.00 lnR-lnC						
ED	0.24 lnR-lnC	(0.50) lnR-lnC	(0.49) lnR-lnC	(-0.63) lnR-C	1.00 lnR-lnC					
PD	-0.12 R-lnC	0.22 lnR-lnC	0.29 lnR-lnC	(-0.55) lnR-C	<u>0.86</u> lnR-C	1.00 lnR-lnC				
NAPA	-0.28 lnR-C	(-0.44) lnR-C	(-0.36) lnR-C	(0.46) lnR-lnC	(-0.68) R-C	(-0.35) R-lnC	1.00 lnR-lnC			
APP	(0.33) R-C	0.27 lnR-C	0.12 lnR-lnC	-0.01 R-C	-0.12 lnR-C	(-0.66) lnR-C	(-0.39) R-lnC	1.00 lnR-lnC		
APA	-0.09 R-lnC	(-0.34) R-lnC	(-0.38) R-lnC	(0.59) R-C	<u>-0.92</u> R-lnC	<u>-1.00</u> lnR-lnC	(0.35) lnR-C	(0.55) lnR-lnC	1.00 lnR-lnC	
APA-CV	<u>0.85</u> lnR-lnC	<u>0.78</u> lnR-lnC	<u>0.79</u> lnR-lnC	(0.51) R-C	0.07 lnR-lnC	-0.16 lnR-C	0.10 R-C	0.10 lnR-lnC	0.07 lnR-lnC	1.00 lnR-lnC

下划线表示相关系数既通过了 $F_{0.01}$ 检验又其值大于 0.75;括号表示其内的相关系数通过了 $F_{0.01}$ 检验,其值小于 0.75; $R-C$ 表示行和列的数值的相关关系; $R-lnC$ 表示行的数值和列的自然对数间的相关关系; $lnR-C$ 表示行的自然对数和列的数值间的相关关系; $lnR-lnC$ 表示行和列的自然对数间的相关关系 Where, $n=76$; absolute value >0.75 and passes the F -Test at $p=0.01$ are significant, and are underlined; they passed the F -Test at $p=0.01$ are bracketed; $R-C$ means the correlation between values in row and column; $R-lnC$ means the correlation between value in row and $\ln(\text{value in column})$; $lnR-C$ represents the correlation between $\ln(\text{value in row})$ and value in column; $lnR-lnC$ represents the correlation between $\ln(\text{value in row})$ and $\ln(\text{value in column})$;下同 the same below

TA 总面积 Total area;NP 斑块数 Number of patches;PD 斑块密度 Patch density;LPI 最大斑块指数 Largest patch index;TE 总边界长度 Total edge;ED 边界密度 Edge density;APA 平均斑块面积 Average patch area;APP 平均斑块周长 Average patch perimeter;NAPA 归一化平均斑块面积 Normalized average patch area 和 APA-CV 平均斑块面积变异系数 Average patch area coefficient of variation

在此类指数中,最多的和其它指数具有显著相关关系的指数为 TA、TE、NP 和 APA-CV。而与其它指数不存在显著相关关

系的指数为最大斑块指数(LPI)、归一化平均斑块面积(NAPA)和平均斑块周长(APP),相比之下,它们表明了景观的独特性。因此,在景观的对比研究中,应该重视这些指数,解释其生态学意义。

2.2 形状指数间的相关性

形状指数关系到斑块的周长和面积,表示构成景观的斑块形状复杂性。如果斑块形状复杂,景观结构应该复杂。形状指数关系到边缘效应以及廊道,根据形状指数可以区分廊道和一般的斑块^[24]。从研究结果(表2)看,只有平均形状指数(SI-MN)和平均分维数(FD-MN)之间存在显著的相关关系($R=0.96$),它们两个之间信息重复量达到92.54%。同样,作为平均值的平均周长面积比值(PAR-MN)与上述两个指数间不存在有意义的相关关系。可能是因为SI-MN与FD-MN对周长和面积进行了处理,然后进行计算,而PAR-MN则直接采用了周长和面积。

盒式分维数(FDB)与3个指数的平均值(FD-MN、SI-MN和PAR-MN)之间不存在有意义相关关系,是因为FDB关系不到一个完整斑块的周长和面积,因此,它是个值得计算的景观形状指数。从FDL的生态学意义看,如果其取值越大斑块的形状越复杂,斑块应该有大的周长面积比值,但这与研究结果似乎有些矛盾,即随FDL的增加,PAR-MN有减少的趋势。可能是因为FDL对周长和面积进行了处理,经过线性回归而得的,而PAR-MN则直接采用了周长和面积的缘故。

表2 形状指数的相关分析
Table 2 The correlation analysis on shape metrics

形状指数 Shape metrics	FDB	FDL	LSI	SI-MN	SI-CV	FD-MN	FD-CV	PAR-MN	PAR-CV
FDB	1.00								
FDL	0.18 <i>R-C</i>	1.00							
LSI	(0.38) <i>R-C</i>	(0.71) <i>R-C</i>	1.00						
SI-MN	0.14 <i>R-C</i>	(0.74) <i>R-C</i>	(0.31) <i>lnR-C</i>	1.00					
SI-CV	(0.38) <i>lnR-C</i>	(0.62) <i>R-C</i>	(0.67) <i>lnR-lnC</i>	(0.48) <i>R-C</i>	1.00				
FD-MN	0.12 <i>lnR-lnC</i>	(0.72) <i>lnR-lnC</i>	(0.35) <i>lnR-C</i>	0.96 <i>lnR-lnC</i>	(0.35) <i>lnR-C</i>	1.00			
FD-CV	-0.06 <i>lnR-lnC</i>	0.13 <i>lnR-C</i>	-0.21 <i>R-C</i>	(0.61) <i>lnR-C</i>	0.29 <i>lnR-C</i>	(0.51) <i>lnR-lnC</i>	1.00		
PAR-MN	-0.26 <i>lnR-C</i>	(-0.37) <i>lnR-lnC</i>	(-0.62) <i>lnR-lnC</i>	0.05 <i>lnR-lnC</i>	-0.25 <i>lnR-lnC</i>	0.07 <i>lnR-lnC</i>	(0.69) <i>lnR-C</i>	1.00	
PAR-CV	-0.03 <i>lnR-C</i>	(-0.73) <i>lnR-lnC</i>	(-0.68) <i>lnR-C</i>	(-0.31) <i>R-C</i>	(-0.36) <i>R-lnC</i>	(-0.41) <i>R-C</i>	0.06 <i>lnR-lnC</i>	0.18 <i>lnR-lnC</i>	1.00

2.3 蔓延度指数间的相关性

蔓延度指数表明景观类型在空间上的聚集程度或类型间镶嵌程度,一般以景观类型间相邻边界为计算参数,个别的指数还需要景观类型的面积百分比、景观总面积或总边界长度。虽然这些指数表示景观的聚集程度,但是它们的计算单元和公式、参数大不相同(表3)。

聚集度(AI)和相邻百分比(PLADJ)存在显著的相关关系($R=0.99$),决定系数为98.21%。表示如果景观类型内部象元的相邻程度越高,景观的聚集程度越高。分散指数(IJI)与其它指数间不存在显著的相关关系,只能预示相互变化趋势。CO与ASM之间存在显著的相关关系。DIVISION与SPLIT之间存在显著的相关关系($R=0.86$),决定系数为73.27%。如果从景观中随机采集的象元属于同一斑块的概率减少(DIVISION),景观被切割成多数斑块(SPLIT)。虽然MESH与其它两个指数没有显著的相关关系,但它能预示它们的变化趋势,即如果有效网格面积增加,其数量(SPLIT)减少,随机采集的象元属于同一斑块的概率(DIVISION)增加。

以景观类型内部的团聚程度为主的AI和PLADJ与以景观所有相邻程度为主的IDM间存在显著的相关关系,但认为这种关系是一种不稳定、不可靠的关系,因为IDM在计算过程中采用类型的代码,不同的代码会得到截然不同的结果。此外,用景观可能包含的斑块数和其面积表示景观聚集度的DIVISION与以景观所有相邻程度为主的ASM和CO呈现出显著的相关关系,信息重复量分别达到73.62%和56.25%。

2.4 多样性指数间的相关性

多样性指数关系到景观类型数以及类型的面积百分比,用来量化景观结构的组成。两大多样性指数类型,Shannon指数和Simpson指数间存在显著的相关关系,生态学意义相同,只是所采用的公式不同而已(表4)。多样性(SHDI和SIDI)与均匀度(SHEI和SIEI)之间存在显著的正相关关系,而与优势度(DO和RD)存在显著的负相关关系。如果景观类型数增加和面积百分

比相近,景观的多样性增加,类型之间面积差异减少,优势类型的面积百分比减少。虽然这些指数与景观类型数有关,但与类型数(PR)不存在显著的相关关系,这表明在真实景观中影响多样性(SHDI 和 SIDI)、均匀度 SHEI 和 SIEI)和优势度(DO 和 RD)的因子主要是景观类型的面积百分比,而不是类型数。SHEI 与 RD 显现出完全负相关关系,表示的生态学意义相同,从不同的角度解释景观均匀度。这些指数中,唯有类型密度(PRD)与类型面积百分比无关,而与类型数和总面积有关。

表 3 蔓延度指数间的相关分析
Table 3 The correlation analysis on contagion metrics

蔓延度指数 Contagion metrics	AI	PLADJ	CO	ASM	IDM	IJI	DIVISION	MESH	SPLIT
AI	1.00								
PLADJ	$\frac{0.99}{\ln R-\ln C}$	1.00							
CO	$\frac{(0.58)}{R-C}$	$\frac{(0.64)}{R-C}$	1.00						
ASM	$\frac{(0.63)}{R-C}$	$\frac{(0.66)}{R-C}$	$\frac{0.91}{\ln R-\ln C}$	1.00					
IDM	$\frac{0.90}{\ln R-C}$	$\frac{0.89}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(0.60)}{\ln R-C}$	$\frac{(0.69)}{R-C}$	1.00				
IJI	$\frac{0.12}{R-C}$	$\frac{0.05}{R-C}$	$\frac{(-0.53)}{R-\ln C}$	$\frac{(-0.36)}{\ln R-\ln C}$	$\frac{-0.08}{\ln R-\ln C}$	1.00			
DIVISION	$\frac{(-0.68)}{R-C}$	$\frac{(-0.68)}{R-C}$	$\frac{(-0.75)}{R-C}$	$\frac{-0.86}{\ln R-C}$	$\frac{(-0.61)}{R-C}$	$\frac{0.05}{R-C}$	1.00		
MESH	$\frac{0.26}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(0.36)}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(0.66)}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(0.53)}{\ln R-\ln C}$	$\frac{0.15}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(-0.46)}{\ln R-C}$	$\frac{(-0.54)}{R-C}$	1.00 ^C	
SPLIT	$\frac{(-0.71)}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(-0.70)}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(-0.57)}{\ln R-C}$	$\frac{(-0.65)}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(-0.58)}{\ln R-\ln C}$	$\frac{-0.11}{R-C}$	$\frac{0.86}{\ln R-C}$	$\frac{(-0.52)}{\ln R-C}$	1.00

AI 聚集度 Aggregation index;CO 蔓延度 Contagion;ASM 角秒矩 Angular second moment;IDM 反差矩 Inverse difference moment;PLADJ 类相邻百分比 Percentage of like adjacencies;IJI 分散指数 Interspersion & juxtaposition index;DIVISION 景观分离度 Landscape division index;SPLIT 分割指数 Splitting index;MESH=有效网格面积 Effective mesh size

表 4 多样性指数间的相关分析
Table 4 The correlation analysis on diversity metrics

多样性指数 Diversity metrics	PR	PRD	EDE	SHDI	SIDI	MSIDI	SHEI	SIEI	MSIEI	DO	RD
PR	1.00										
PRD	$\frac{-0.26}{\ln R-\ln C}$	1.00									
EDE	$\frac{-0.26}{R-C}$	$\frac{(0.57)}{R-\ln C}$	1.00								
SHDI	$\frac{0.28}{R-C}$	$\frac{0.23}{R-\ln C}$	$\frac{(0.45)}{R-\ln C}$	1.00							
SIDI	$\frac{0.06}{R-C}$	$\frac{0.13}{R-\ln C}$	$\frac{(0.33)}{R-\ln C}$	$\frac{0.95}{\ln R-\ln C}$	1.00						
MSIDI	$\frac{0.10}{R-C}$	$\frac{0.24}{R-\ln C}$	$\frac{(0.42)}{R-\ln C}$	$\frac{0.96}{\ln R-\ln C}$	$\frac{0.99}{\ln R-C}$	1.00					
SHEI	$\frac{-0.24}{R-\ln C}$	$\frac{(0.37)}{R-\ln C}$	$\frac{(0.58)}{R-C}$	$\frac{0.92}{\ln R-\ln C}$	$\frac{0.94}{\ln R-\ln C}$	$\frac{0.95}{\ln R-\ln C}$	1.00				
SIEI	$\frac{-0.10}{R-\ln C}$	$\frac{0.17}{R-\ln C}$	$\frac{(0.36)}{R-C}$	$\frac{0.92}{\ln R-\ln C}$	$\frac{0.99}{\ln R-\ln C}$	$\frac{0.98}{\ln R-\ln C}$	$\frac{0.96}{\ln R-\ln C}$	1.00			
MSIEI	$\frac{-0.27}{R-\ln C}$	$\frac{(0.33)}{R-\ln C}$	$\frac{(0.50)}{R-C}$	$\frac{0.89}{\ln R-\ln C}$	$\frac{0.96}{\ln R-\ln C}$	$\frac{0.97}{\ln R-\ln C}$	$\frac{0.98}{\ln R-\ln C}$	$\frac{0.98}{\ln R-C}$	1.00		
DO	$\frac{(0.48)}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(-0.49)}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(-0.66)}{\ln R-C}$	$\frac{-0.75}{R-\ln C}$	$\frac{-0.82}{R-C}$	$\frac{-0.81}{R-C}$	$\frac{-0.97}{R-C}$	$\frac{-0.88}{R-C}$	$\frac{-0.95}{R-C}$	1.00	
RD	$\frac{0.27}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(-0.48)}{\ln R-\ln C}$	$\frac{(-0.66)}{\ln R-C}$	$\frac{-0.87}{R-C}$	$\frac{-0.91}{R-C}$	$\frac{-0.91}{R-C}$	$\frac{-1.00}{R-C}$	$\frac{-0.94}{R-C}$	$\frac{-0.97}{R-C}$	$\frac{0.97}{\ln R-\ln C}$	1.00

PR 斑块丰富度 Patch richness;PRD 类型密度 Patch richness density;RPR 相对斑块丰富度 Relative patch richness;SHDI Shannon 多样性 Shannon's diversity index;SIDI Simpson 多样性 Simpson's diversity index;MSIDI 修改的 Simpson 多样性 Modified simpson's diversity index;SHEI Shannon 均匀度 Shannon's evenness index;SIEI Simpson 均匀度 Simpson's evenness index;MSIEI 修改的 Simpson 均匀度 Modified simpson's evenness index;DO 优势度 Dominance;RD 相对优势度 Relative dominance;EDE 边界均匀度 Edge Distribution evenness

大部分指数表示景观类型面积百分比的分配情况,只有边界均匀度(EDE)能说明类型之间边界分配的均匀程度,与其它指数间不存在显著的相关关系。不过可以根据相关系数的检验预示变化趋势,如果景观类型之间相邻边界长度相近,其面积百分比也趋于相近,优势类型的面积减少。

2.5 不同类型指数之间的相关性

基本指数是从景观空间属性数据库直接获取的,是形状指数的基础,成为形状指数的计算参数。在基本指数中,归一化平均斑块面积(NAPA)与形状指数 SI-MN、FDL 和 FD-MN 存在显著的负相关关系(表 5),NAPA 不仅表示平均斑块面积,还能表示斑块的形状。NAPA 是周长加权的指数,周长参与了其计算过程,因此 NAPA 应该是个形状指数。但是 NAPA 与 SI-MN 和 FD-MN 的相关性比 FDL 更显著,可能是它们都是平均值的缘故。

表 5 面积、周长、密度指数(基本指数)与形状指数间的相关分析

Table 5 The correlation analysis between area, edge, density metrics group (base metrics) and shape metrics group										
形状指数 Shape metrics	基本指数 Base metrics									
	TA	TE	NP	LPI	ED	PD	NAPA	APP	APA	APA-CV
FDB	(0.48)	(0.45)	(0.40)	0.14	0.09	(-0.37)	-0.19	(0.36)	0.20	(0.46)
	<i>R</i> -lnC	<i>R</i> -lnC	<i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	<i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	<i>R</i> -lnC
FDL	(0.53)	(0.66)	(0.57)	(-0.48)	(0.69)	(0.35)	<u>-0.78</u>	(0.46)	(-0.39)	0.18
	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	<i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC
LSI	0.90	0.98	0.98	(-0.31)	(0.62)	(0.38)	(-0.50)	0.21	(-0.48)	(0.70)
	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	<i>R</i> -lnC	<i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC
SI-MN	0.13	0.26	0.12	(-0.51)	(0.57)	0.19	<u>-0.88</u>	(0.57)	-0.23	(-0.30)
	<i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	<i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C
SI-CV	(0.61)	(0.67)	(0.60)	(-0.30)	(0.47)	-0.16	(-0.32)	(0.65)	-0.25	(0.40)
	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	<i>R</i> -C	<i>R</i> -lnC	<i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC
FD-MN	0.13	(0.30)	0.20	(-0.51)	(0.63)	(0.30)	<u>-0.94</u>	(0.38)	(-0.30)	-0.25
	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -C
FD-CV	-0.27	-0.23	(-0.33)	(-0.33)	0.08	-0.12	-0.21	(0.30)	0.10	(-0.46)
	ln <i>R</i> -C	<i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	<i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -C	<i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -C
APR-MN	(-0.62)	(-0.65)	(-0.62)	-0.04	(-0.40)	-0.15	(0.29)	-0.24	0.26	(-0.58)
	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -C	<i>R</i> -lnC	<i>R</i> -lnC	<i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	<i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC
APR-CV	(-0.54)	(-0.65)	(-0.67)	(0.31)	(-0.49)	(-0.36)	(0.43)	0.04	(0.34)	(-0.33)
	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	<i>R</i> -C	ln <i>R</i> -C	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	ln <i>R</i> -lnC	<i>R</i> -lnC

表中,下划线表示相关系数既通过了 $F_{0.01}$ 检验又其值大于 0.75;括号表示其内的相关系数通过了 $F_{0.01}$ 检验,其值小于 0.75;*R*-C 表示行和列的数值的相关关系;*R*-lnC 表示行的数值和列的自然对数间的相关关系;ln*R*-C 表示行的自然对数和列的数值间的相关关系;ln*R*-lnC 表示行和列的自然对数间的相关关系 Where, $n=76$; absolute value >0.75 and passes the F -Test at $p=0.01$ are significant, and are underlined; they passed the F -Test at $p=0.01$ are bracketed; *R*-C means the correlation between values in row and column; *R*-lnC means the correlation between value in row and ln(value in column); ln*R*-C represents the correlation between ln(value in row) and value in column; ln*R*-lnC represents the correlation between ln(value in row) and ln(value in column)

LSI 与 TA、NP 和 TE 存在显著的正相关关系(表 5),如果景观总面积增加,斑块数和总边界长度明显增加(表 1),景观轮廓(Landscape border)明显复杂化。由此可知,景观的固有属性与简单的景观形状指数有显著的相关关系(如 LSI,因为其参数为 TA 和 TE,而与斑块周长/面积无关),而与复杂的形状指数没有显著的关系(如 FDL)。不管怎样,固有属性还是能预示大部分形状指数的变化趋势(如 FDL)。

前面提到景观类型代码参与 IDM 的计算过程,因此今后文章中不考虑它与其它指数的相关性。景观固有属性 TA 与 MESH 之间存在显著的正相关关系(表 6),即如果总面积增加,总面积加权的平均斑块面积(MESH)明显地增加。但是总面积加权的斑块数(SPLIT)与 TA 没有任何意义的相关关系,完全是由计算公式引起的。

PD、ED 和 APP 与 AI、ASM 和 PLADJ 之间存在显著的相关关系(表 6),而与 TA 不存在有意义的相关关系,表明总面积无论怎么变,只要斑块密度减少,边界密度明显减少,而平均斑块面积明显增加(表 1),景观的聚集度增加(表 6)。

CO 和 IJI 对基本指数的变化不太敏感,因为它们是最大多样性加权的指数。反过来,同样 TA、NP、TE、NAPA 和 APP 对 CO 和 IJI 没有显著的影响。LPI 对 ASM、DIVISION 和 SPLIT 具有显著的影响,景观中的最大斑块面积越大,总面积加权的斑块数(SPLIT)减少,景观分离度明显减少,景观的聚集度增加,充分体现了 ASM 的特点。

在多样性指数中,PR 与基本指数之间没有显著的相关关系,而 PRD 与 TA、TE、NP 和 PAC-CV 之间有显著的负相关关系(表 7),即景观总面积增加,没能明显地影响景观类型数,而影响了单位面积上的类型数。LPI 与 Simpson 均匀度(SIEI 和 MSIEI)存在显著的负相关关系(表 7),如果景观中的最大斑块的面积越大,它所代表的类型在景观中的优势程度提高,景观类

型之间的面积差异增大,均匀度减少。Simpson 指数与最大斑块指数间相关系数比 Shannon 指数的大,表明 Simpson 指数对优势类型的变化敏感。

表 6 面积、周长、密度指数(基本指数)与蔓延度指数间的相关分析

Table 6 The correlation analysis between area, edge, density metrics (base metrics) and contagion metrics

蔓延度指数 Contagion metrics	基本指数 Base metrics									
	TA	TE	NP	LPI	ED	PD	NAPA	APP	APA	APA-CV
AI	−0.20	(−0.44)	(−0.46)	(0.63)	<u>−0.99</u>	<u>−0.88</u>	(0.65)	0.16	0.88	0.03
	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>
PLADJ	−0.09	(−0.33)	(−0.35)	(0.64)	<u>−0.98</u>	<u>−0.90</u>	(0.64)	0.20	<u>0.90</u>	0.12
	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>
CO	(0.39)	0.27	0.22	(0.68)	(−0.66)	(−0.68)	0.26	0.27	(0.71)	(0.50)
	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>
ASM	0.21	−0.18	−0.17	<u>0.76</u>	<u>−0.76</u>	(−0.69)	0.27	0.22	<u>0.78</u>	(0.39)
	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>
IDM	−0.22	(−0.45)	(−0.49)	(0.53)	<u>−0.91</u>	<u>−0.91</u>	(0.47)	(0.34)	<u>0.91</u>	−0.11
	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>
IJI	(−0.55)	(−0.53)	(−0.46)	−0.08	−0.13	(0.29)	(0.29)	(−0.66)	−0.23	(−0.43)
	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>
DIVISION	0.11	(0.31)	(0.29)	<u>−0.95</u>	(0.73)	(0.61)	(−0.40)	0.07	(−0.71)	(−0.40)
	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>
MESH	<u>0.80</u>	(0.67)	(0.66)	(0.60)	−0.24	(−0.41)	0.21	0.24	(0.35)	<u>0.96</u>
	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>
SPLIT	0.19	(0.34)	(0.32)	<u>−0.97</u>	(0.69)	(0.55)	(−0.53)	0.05	(−0.55)	(−0.45)
	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>

两类多样指数对 APA、PD、ED 和 APA-CV 的变化较敏感,如果景观的平均斑块面积大,景观类型之间的面积差异趋于减少,多样性和均匀度增加,而优势度减少。

表示类型面积分配均匀程度的多样性指数或多或少与基本指数有显著相关关系,而表示边界分配均匀程度的 EDE 与基本指数没有一个显著相关关系。但是它对 APP 的变化最敏感,其次为总面积(TA)、总边界长度(TE)和斑块数(NP)。如果景观平均斑块周长增加,景观类型之间相邻边界长度的差异增加,边界均匀度减少。

表 7 面积、周长、密度指数(基本指数)与多样性指数间的相关分析

Table 7 The correlation analysis between area, edge, density metrics (base metrics) and diversity metrics

多样性指数 Diversity metrics	基本指数 Base metrics									
	TA	TE	NP	LPI	ED	PD	NAPA	APP	APA	APA-CV
PR	(0.41)	(0.33)	(0.37)	0.20	−0.17	−0.12	(0.33)	−0.17	0.08	(0.47)
	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>
PRD	<u>−0.99</u>	<u>−0.96</u>	<u>−0.94</u>	0.09	−0.28	0.11	0.27	(−0.34)	0.11	<u>−0.82</u>
	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>
EDE	(−0.58)	(−0.55)	(−0.49)	−0.10	−0.11	(0.30)	0.23	(−0.62)	−0.24	(−0.47)
	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>
SHDI	−0.26	−0.21	−0.13	(−0.58)	(0.57)	(0.56)	0.05	(−0.31)	(−0.66)	−0.28
	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>
SIDI	−0.18	0.19	0.17	(−0.73)	(0.70)	(0.61)	−0.18	−0.16	(−0.73)	(−0.36)
	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>
MSIDI	−0.27	−0.18	−0.12	(−0.72)	(0.67)	(0.61)	−0.16	−0.24	(−0.71)	(−0.42)
	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>
SHEI	(−0.42)	(−0.33)	−0.28	(−0.67)	(0.63)	(0.60)	−0.13	−0.24	(−0.68)	(−0.50)
	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>
SIEI	−0.23	0.15	0.13	<u>−0.76</u>	(0.71)	(0.63)	−0.22	−0.14	(−0.73)	(−0.41)
	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>
MSIEI	(−0.38)	−0.26	−0.22	(−0.76)	(0.69)	(0.62)	−0.24	−0.18	(−0.71)	(−0.54)
	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>
DO	(0.55)	(0.42)	(0.39)	(0.64)	(−0.51)	(−0.53)	0.21	0.22	(0.55)	(0.62)
	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>
RD	(0.49)	(0.40)	(0.36)	(0.63)	(−0.53)	(−0.57)	0.13	(0.29)	(0.61)	(0.57)
	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>	<i>R</i> - <i>C</i>	ln <i>R</i> -ln <i>C</i>

如果景观在空间上聚集分布,构成景观的斑块形状趋于简单,但实际上形状指数与蔓延度指数之间不存在任何显著的相关

关系(表 8)。以斑块内部象元的相邻程度表示聚集度的 AI 和 PLADJ 对形状指数的变化最敏感,因为 AI 能表示景观的形状^[25]。在形状指数中,相比之下,FDL 与蔓延度指数之间相关系数为最大。

表 8 形状指数与蔓延度指数间的相关分析
Table 8 The correlation analysis between shape metrics and contagion metrics

蔓延度指数 Contagion metrics	形状指数 Shape metrics								
	FDB	FDL	LSI	SI-MN	SI-CV	FD-MN	FD-CV	PAR-MN	PAR-CV
AI	0.07	(-0.69)	(-0.59)	(-0.54)	(-0.38)	(-0.62)	-0.08	0.25	(0.52)
	lnR-lnC	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-C	lnR-C
PLADJ	0.12	(-0.65)	(-0.49)	(-0.54)	(-0.30)	(-0.61)	-0.10	0.20	(0.46)
	lnR-lnC	R-lnC	R-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	R-C	lnR-lnC
CO	0.12	-0.15	0.16	-0.27	-0.05	-0.27	-0.15	-0.16	-0.10
	lnR-C	R-lnC	lnR-C	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC
ASM	0.06	(-0.29)	-0.28	-0.24	-0.24	-0.22	-0.02	0.23	0.02
	lnR-lnC	R-lnC	R-lnC	R-lnC	R-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	R-C	R-C
IDM	-0.10	(-0.49)	(-0.58)	-0.27	-0.25	(-0.36)	0.17	(0.35)	(0.39)
	lnR-C	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC	lnR-C	R-C	lnR-C
IJI	-0.18	(-0.52)	(-0.50)	(-0.36)	(-0.65)	-0.25	-0.06	(0.43)	(0.29)
	lnR-C	lnR-C	R-lnC	lnR-C	lnR-C	lnR-C	lnR-lnC	R-lnC	lnR-C
DIVISION	-0.07	(0.53)	(0.40)	(0.48)	(0.41)	(0.42)	0.25	-0.17	-0.25
	R-C	R-lnC	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC	R-C	R-lnC	lnR-C	R-C
MESH	(0.48)	0.07	(0.55)	(-0.34)	(0.36)	(-0.31)	(-0.39)	(-0.51)	-0.21
	lnR-C	lnR-C	lnR-lnC	R-lnC	lnR-C	R-C	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC
SPLIT	-0.10	(0.57)	(0.43)	(0.56)	(0.30)	(0.56)	0.28	-0.11	(-0.38)
	lnR-lnC	lnR-lnC	R-C	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	R-C	R-lnC

在形状指数中,FDB 对蔓延度指数最为不敏感,只与 MESH 之间存在有一定意义的相关关系,由于它们都用特定面积的斑块测量形状和蔓延度。在蔓延度指数中,ASM 和 CO 与形状指数没有任何意义的相关关系,因为它只考虑类型之间的乡邻程度。与其它形状指数比,平均形状指数(FD-MN、SI-MN 和 PAR-MN)对 CO 比较敏感,而对经过回归得出的 FDL 和 FDB 对它不敏感。

在形状指数与多样性指数的相关分析中,PRD 与 LSI 之间存在显著的负相关关系($R=-0.91$)(表 9),这是总面积影响的结果,因为它们生态学意义完全不同,只有总面积参与了它们的计算过程。

表 9 形状指数与多样性指数间的相关分析
Table 9 The correlation analysis between shape metrics and diversity metrics

多样性指数 Diversity metrics	形状指数 Shape metrics								
	FDB	FDL	LSI	SI-MN	SI-CV	FD-MN	FD-CV	PAR-MN	PAR-CV
PR	0.15	-0.19	0.27	(-0.49)	0.01	(-0.48)	(-0.51)	(-0.41)	-0.04
	lnR-lnC	lnR-C	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	R-lnC	R-C
PRD	(-0.48)	(-0.53)	<u>-0.91</u>	-0.16	(-0.64)	-0.15	0.18	(0.58)	(0.50)
	lnR-C	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-C	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC
EDE	-0.19	(-0.48)	(-0.52)	-0.28	(-0.63)	-0.17	0.01	(0.46)	0.28
	lnR-C	lnR-C	R-lnC	lnR-C	lnR-C	lnR-lnC	lnR-C	R-lnC	lnR-C
SHDI	-0.07	-0.09	0.16	-0.09	0.11	-0.09	-0.15	-0.21	0.20
	R-C	R-C	lnR-lnC	R-C	lnR-lnC	R-C	R-C	lnR-C	R-lnC
SIDI	-0.07	0.24	0.27	0.16	0.26	0.12	-0.04	-0.25	0.07
	R-C	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	R-C	lnR-C	lnR-C	R-C
MSIDI	-0.08	0.19	0.21	0.16	0.20	0.11	-0.03	-0.20	0.11
	R-C	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	R-C	lnR-C	lnR-C	R-lnC
SHEI	-0.14	0.10	-0.23	0.17	0.11	0.14	0.12	0.14	0.21
	R-C	lnR-lnC	R-C	lnR-lnC	lnR-lnC	R-C	R-lnC	R-lnC	R-lnC
SIEI	-0.09	0.26	0.24	0.23	0.26	0.19	0.06	-0.21	0.07
	R-C	lnR-lnC	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC	R-C	R-lnC	lnR-C	R-C
MSIEI	-0.12	0.24	-0.15	0.28	0.19	0.26	0.18	0.15	0.12
	R-C	lnR-lnC	R-C	lnR-lnC	lnR-lnC	R-C	R-lnC	R-lnC	R-lnC
DO	0.17	-0.07	(0.36)	-0.28	0.14	-0.26	-0.26	(-0.34)	-0.22
	R-C	R-lnC	lnR-C	R-lnC	lnR-C	R-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC
RD	0.14	0.10	(0.34)	-0.16	0.15	-0.14	-0.15	-0.27	-0.24
	R-C	lnR-C	lnR-C	R-lnC	lnR-C	R-C	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC

两类多样性指数与形状指数之间不存在任何有意义的相关关系,多样性、均匀度和优势度关系到景观类型的面积百分比,与斑块周长等边界属性没有任何关系,它们描述的是截然不同的格局特点。

关系到景观边界的 EDE 与形状指数之间没有显著的相关关系,斑块形状的复杂程度不能显著地改变边界均匀度。因为 EDE 表示类型之间的边界分配情况,不关注斑块的周长和面积。但它们之间还是存在能指示变化趋势的能力,比如,景观边界均匀度增加,类型之间的相邻边界长度相近,斑块形状趋于简单有规则。

最重要的是 PR 与形状指数之间没有显著的相关关系,只与形状指数的平均值(SI-MN、FD-MN 和 PAR-MN)间存在有一定意义的相关关系。景观类型数的变化不影响斑块的形状,因为形状指数以斑块为计算单元,与景观类型没有任何关系,即使有影响那是其它基本指数的间接表现。

大多数形状指数所对应的最敏感的多样性指数为 PR 和 PRD,形状指数对用最简单的统计方法计算出来的多样性指数比较敏感,而对用复杂公式计算出来的多样性不敏感。换句话说,基本指数所代表的信息在最简单的指数中保留的较多,而在复杂的指数中保留的较少。

两类多样性指数与 ASM 和 CO 之间存在显著的负相关关系,而与 DIVISION 之间存在显著的正相关关系(表 10)。ASM 用景观类型之间相邻程度描述景观异质性,理所当然与多样性、均匀度和优势度的变化显著敏感,如果景观类型面积百分比差异小,景观多样性高,景观聚集程度减少,景观的异质性增加,随机选择的象元属于同一个斑块的概率增加。相比之下,Simpson 指数(SIDI 和 SIEI)对 AI、ASM、PLADJ、DIVISION、SPLIT 较敏感,而 Shannon 指数(SHDI 和 SHEI)对 IJI 较敏感。

PRD 仅仅与 MESH 有显著的负相关关系,是总面积的间接体现。EDE 只与 IJI 有显著的正相关关系,它们都表示景观类型之间边界分配的均匀程度。与多样性指相同,蔓延度指数与 PR 没有显著的相关关系,其原因相同。但比较起来 MESH 对它最敏感。

AI 和 PLADJ 与多样性指数没有显著的相关关系,因为它们表示斑块内象元的聚集程度,与景观类型的面积百分比和边界百分比没有关系。

表 10 蔓延度指数与多样性指数间的相关分析

Table 10 The correlation analysis between contagion metrics and diversity metrics									
多样性指数	蔓延度指数 Contagion metrics								
Diversity metrics	AI	PLADJ	CO	ASM	IDM	IJI	DIVISION	MESH	SPLIT
PR	0.19	0.23	(0.32)	−0.05	−0.06	−0.16	−0.17	(0.46)	−0.17
	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC	R-C	lnR-C	lnR-lnC	lnR-lnC
PRD	0.24	0.12	(−0.34)	−0.17	0.23	0.56	−0.14	−0.77	−0.22
	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-C	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-C
EDE	0.09	0.02	(−0.55)	(−0.35)	−0.07	0.99	0.08	(−0.51)	−0.10
	R-C	R-C	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-C	R-lnC	R-C
SHDI	(−0.40)	(−0.44)	−0.83	−0.93	(−0.55)	(0.48)	0.77	(−0.40)	(0.44)
	lnR-lnC	lnR-C	lnR-C	lnR-C	lnR-C	R-lnC	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC
SIDI	(−0.53)	(−0.56)	−0.90	−0.99	(−0.60)	(0.33)	0.91	(−0.46)	(0.60)
	lnR-C	R-C	R-C	R-C	lnR-C	R-C	lnR-lnC	R-lnC	R-lnC
MSIDI	(−0.52)	(−0.55)	−0.88	−0.99	(−0.60)	(0.43)	0.86	(−0.53)	(0.58)
	lnR-lnC	lnR-lnC	lnR-C	lnR-C	lnR-C	R-lnC	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC
SHEI	(−0.48)	(−0.53)	−0.98	−0.93	(−0.53)	(0.56)	0.82	(−0.63)	(0.51)
	lnR-lnC	lnR-lnC	R-C	lnR-C	lnR-C	R-C	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC
SIEI	(−0.55)	(−0.59)	−0.94	−0.98	(−0.59)	(0.35)	0.92	(−0.53)	(0.62)
	lnR-C	R-C	R-C	R-C	lnR-C	R-C	lnR-lnC	R-lnC	R-lnC
MSIEI	(−0.56)	(−0.60)	−0.97	−0.96	(−0.57)	(0.47)	0.87	(−0.67)	(0.62)
	lnR-C	lnR-lnC	R-C	lnR-C	lnR-C	R-C	lnR-lnC	R-lnC	lnR-lnC
DO	(0.44)	(0.51)	0.97	0.81	(0.42)	(−0.62)	−0.68	(0.72)	(−0.50)
	R-C	R-C	R-C	R-lnC	R-C	lnR-C	R-C	lnR-lnC	R-lnC
RD	(0.43)	(0.50)	0.98	0.90	(0.48)	(−0.64)	−0.68	(0.67)	(−0.48)
	R-C	R-C	R-C	R-lnC	R-C	lnR-C	R-C	lnR-lnC	R-lnC

3 结果讨论

本研究中在景观水平上,计算了总面积(TA)、总边界长度(TE)、斑块数(NP)和类型数(PR)等最基本的格局指数。由于类型数与景观多样性关系密切,因此划分到多样性指数中。除此之外,还有一重要的基本指数,相邻矩阵(Adjacency Matrix),用来测定景观中的景观类型之间相邻边界的长度。但是它的重点不在景观水平上,而在于类型水平上,因此被忽略。直接从以上基本指数中任意两个的组合构成的指数被列入到基本指数中。基本指数与其它指数之间的关系最密切,就显著相关关系而言,它们

与绝大多数指数具有显著的相关关系(表 1~10)。因此,在景观水平上,基本指数是其它指数的基础,决定其它指数。以总面积为计算参数的指数与总面积的显著相关关系表明总面积在计算过程中丢失的信息量较少,总面积是指数的主体,总面积直接作用于指数;而以景观总边界长度和斑块数等为参数的指数与总面积的显著相关关系表明总面积通过这些参数决定相关关系,总面积间接作用于指数。而且在景观研究中首先根据研究目的确定研究区范围,计算格局指数,总面积是基本指数中的基本指数,决定其它基本指数。当然景观分类系统也很重要,同一个研究区可以有不同的分类型系统,有不同的景观格局。

根据相关系数的显著性,指数的可预测性可以分为数值预测、趋势预测和不可预测等 3 个等级。数值预测是指根据一个指数的变化可以预测另一个指数数值变化,这类指数之间存在显著相关关系,如可以根据 TA 的变化预测 TE 的变化;趋势预测是指根据一个指数的变化可以预测另一个指数的变化趋势,无法预测其变化程度,这类指数之间的相关性较差,如根据 TE 可以预测 ED 的变化趋势;不可预测是指根据一个指数的变化无法预测另一个指数数值变化程度和趋势,如根据 TA 的变化很难预测 PD 的变化程度和趋势。

两个指数之间的最大相关系数一般不是对它们原数值间的直接相关分析而得的,而是其中一个或二者的自然对数之间的相关系数。例如,PD 和 APA 之间直接分析的相关系数为 -0.62 ,而它们的自然对数之间的相关系数为 -1.00 。因此,在相关分析中应该对数据进行各种处理,最后得出最大的相关系数才能说明指数间的相关关系。

如果两个指数之间存在显著的相关关系,而由它们两个构成的指数与它们之间没有显著的相关关系。比如,TA 和 NP 之间存在显著的相关关系($R=0.95$),但是由它们两个构成的 PD 和 APA 与它们(TA 和 NP)没有显著的相关关系,TA 与 PD 和 APA 的相关系数分别为 $R=-0.12$ 和 $R=-0.09$;NP 与 PD 和 APA 的相关系数分别为 $R=0.29$ 和 $R=0.12$ 。

如果表示平均值的指数之间存在显著的相关关系,则它们变异系数之间不存在显著的相关关系。例如 SI-MN 和 FD-MN 之间存在显著的相关关系,但是它们的变异系数之间不存在有意义的相关关系。如果一个指数与另一个指数的变异系数有显著的相关关系,则与其平均值之间不存在有意义的相关关系。比如 TA 和 APA-CV 之间存在显著的相关关系(表 1),但 TA 和 APA 之间不存在有意义的相关关系。如果两个指数间的变异系数存在显著的相关关系,但很难得出它们两个的平均值间不存在有意义的相关关系的结论,因为本研究中没有发现这种情况。还有一种是两个指数的平均值与其变异系数之间都不存在显著的相关关系,如平均分维数(FD-MN)与平均周长面积比值(PAR-MN)以及它们的变异系数。不过这种关系的稳定性如何还需要进一步的研究。

虽然形状指数以斑块周长、面积为计算参数,但其计算公式有很大差别,指数之间的相关关系最差,即指数之间的独立性最强。形状指数相关性差不仅表现在组内,同样表现在与其它组的指数之间(表 2~表 10)。而且除了分维数(FDL 和 FDB)以外其它都是一种平均值。如果数组内数值之间的差异较少时平均值具有统计意义,但如果它们的差异较大时平均值的意义不大,使平均值带偏向。而且数组内数值数量多时用平均值表述景观形状显然不是最好的选择。对数分维数(FDL)和盒式分维数(FDB)是经过线性回归计算出来的,正好弥补了平均值形状指数的不足之处。因此,如果景观中的斑块过少,达不到统计学的要求,就用平均形状指数;如果斑块数量满足统计学的要求,尽量使用分维数(FDL 和 FDB)。因此,建议在今后计算中,在景观或类型水平上用对数分维数而在斑块水平上用周长面积比值。

蔓延度指数间的相关性受它们所代表的深层生态学意义,根据此特点归纳为以下 4 个类型:①用景观类型内部的团聚程度来表示景观聚集度的指数包括聚集度(AI)和相邻百分比(PLADJ),以象元为计算单元;②用景观类型的相邻程度来表示景观聚集度的指数有分散指数(IJI),以景观类型为计算单元,在一定意义上表示景观边界分布的均匀程度;③用景观所有相邻程度来表示景观聚集度的指数有蔓延度(CO)、角秒矩(ASM)和反差矩(IDM),以象元为计算单元;④用景观可能包含的斑块数和其面积表示景观聚集度的指数有景观分离度(DIVISION)、分割指数(SPLIT)和有效网格面积(MESH),这些指数都以斑块作为计算单元。这 4 个类型内部的指数之间相关性较大,如 AI 与 PLADJ 存在显著的相关关系($R=0.99$),决定系数为 98.21%,类型之间的指数间相关性较差。

不论怎样,除了景观类型和斑块为计算单元的蔓延度指数外,以象元为计算单元的指数对象元大小特敏感,这类指数有聚集度(AI)、相邻百分比(PLADJ)、蔓延度(CO)、角秒矩(ASM)和反差矩(IDM),如果象元面积减少,景观聚集度增加^[26]。在计算过程中,它们考虑的不是象元大小及单位而是象元数量,因此受象元大小或空间分辨率的影响^[26]。因此,在具体案例研究中,尤其景观动态变化研究中必须保证每期数据的空间分辨率一致。应该特别注意蔓延度指数中的一个指数,反差矩(IDM),它在计算过程中采用类型的数字代码,如果采用不同的代码计算结果截然不同。因此,在景观动态变化分析中,类型代码相同的情况下,可以计算 IDM,在其余情况下,慎重考虑,再作决定。

虽然多样性指数与景观类型数有关,但与类型数(PR)不存在显著的相关关系,这表明在真实景观中影响多样性(SHDI 和 SIDI)、均匀度(SHEI 和 SIEI)和优势度(DO 和 RD)的因子主要是景观类型的面积百分比,而不是类型数。但是在特殊情况下,它们与 PR 存在显著的相关关系,如类型面积百分比被固定,类型数与 PR 会显现出显著的相关关系。多样性指数与形状、相邻

矩阵和空间位置没有任何关系,因此对它的争论也比较多。两类多样性指数之间具有显著的相关关系,而且前人研究表明,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^[27]。因此只能根据它们对景观基本指数或其它指数的敏感程度来理解内涵,在研究中根据研究目的进行筛选。相比之下,Simpson 指数对斑块密度(PD)、边界密度(ED)、平均斑块面积(APA)和最大斑块指数(LPI)的变化较敏感(表 7)。

表示景观异质性的指数有两种,即多样性和聚集度,但是它们所采用的参数和侧重点不同。多样性指数用景观类型面积百分比表示景观异质性,聚集度则用类型之间相邻矩阵表示景观异质性。毫无疑问,它们之间的相关关系比较好(表 10)。

根据本文的研究结果,可知影响景观指数间的相关系数的第 1 个主要因子是景观格局本身。景观的空间格局决定了景观类型的空间分布,类型之间的空间关系。在今后的研究中应该注意环境因子与景观格局指数间的相关性研究,这样才能更有力地揭示格局与指数间的相关性。影响景观指数间的相关性的第 2 因子应该是其生态学意义,因为,为了解释某个生态问题才提出景观指数,应用指数。不管指数的参数如何,生态学意义相近的指数之间相关性好,这种现象表现在指数组内和组之间,如多样性和蔓延度指数之间(表 10)。影响景观指数间的相关系数的第 3 个主要因子应该是指数的计算公式,如果两个指数所采用的参数相同,它们之间的相关性好,这种现象集中表现在指数组内。但计算过程中对参数的不同处理方式使得指数之间的相关系数大有不同。例如平均分维数和平斑块周长面积比值之间的相关系数为 0.071(表 2),Shannon 多样性(SHDI)与 Simpson 多样性(SIDI)之间相关系数为 0.949(表 4)。如果指数的计算公式越简单,基本指数与它的相关性较好,在其中保留的基本指数的信息越大。如果指数的计算公式越复杂,基本指数与它的相关性较差,在其中保留的基本指数的信息越少。影响景观指数间的相关系数的第 4 个主要因子应该是计算单元,如果两个指数的参数和单元相同,它们之间相关性好,这种现象同样表现在指数组内。例如聚集度(AI)和相邻百分比(PLADJ)都以象元为计算单元,其相关系数为 0.991。影响景观指数间的相关系数的第 5 个主要因子应该是空间分辨率,尤其是那些只考虑象元数量而不考虑其大小的指数^[5,25,28]。还有一个影响景观指数间相关系数的重要因素,景观分类系统,同一个景观可以有不同的分类系统。同一个景观,在不同的分类系统下计算出的指数间相关性是否相同,是个值得研究的课题,本研究中没有涉及到这方面的内容,因此不知分类系统的影响程度。总的来说,指数之间影响因子的相同之处越多,它们之间存在显著相关关系的概率越大。

References:

- [1] Milne B T. Lessons from applying fractal models to landscape patterns. In: *Quantitative methods in landscape ecology*. Editors: Turner M G. and Gardner R H. New York: Springer-Verlag, 1991. 199~235.
- [2] Tischendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape Ecology*, 2001, **16**:235~254.
- [3] Shannon C E. and Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana, 1962. IL. 125.
- [4] Mandelbrot B. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Co., New York, NY, 1983. 460.
- [5] O'Neill R V, Krumme J R, Gardner R H, *et al.* Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1988, **1**(3):153~162.
- [6] Forman R T T and Godron M. *Landscape ecology*, New York:Wiley,1986.
- [7] Baskett E Z and Jordan G A. Characterizing spatial structure of forest landscapes. *Canadian Journal of Forest Research*, 1995, **25**:1830~1849.
- [8] Hulshoff R M. Landscape indices describing a Dutch landscape. *Landscape Ecology*, 1995, **10**:101~111.
- [9] Musick H B and Grover H D. Image textural measures as indices of landscape pattern. In: *Quantitative methods in landscape ecology*. Editors: Turner M G and Gardner R H. New York: Springer-Verlag, 1991. 77~103.
- [10] Schumaker N H. Using landscape indices to predict habitat connectivity. *Ecology*, 1996, **7**: 1210~1225.
- [11] With K A and King A W King. Dispersal success on fractal landscapes: a consequence of lacunarity thresholds. *Landscape Ecology*, 1999, **14**:73~82.
- [12] Dong P. Test of a new lacunarity estimation method for image texture analysis, *INT. J. Remote Sensing*, 2000, **21**(17): 3369~3373.
- [13] He H S, DeZonia B and Mladenoff D J. An aggregation index (AI) to quantify spatial patterns of landscapes. *Landscape Ecology*, 2000, **15**(7): 591~601.
- [14] Haralick R M, Shanmugam K and Dinstein I. Textural Features for Image Classification, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973. 610~621.
- [15] Haralick R M. Statistical image texture analysis. In: T. Y. Young and K. S. Fu eds. *Handbook of Pattern Recognition and Image Processing*, New York: Academic, 1979. 247~280.
- [16] Herold M, Liu X H and Clarke K C. Spatial metrics and image texture for mapping urban land use. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, **69**(9):991~1001.
- [17] Riitters K H, O'Neill R V, Hunsaker C T, *et al.* A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology*, **10**

(1) :23~39.

[18] Traub B and Kleinn C. Measuring fragmentation and structural diversity. *Forstw Centralblatt*, 1999, **118**:39~50.

[19] Cain D H, Ritters K H and Orvis K. A multi-scale analysis of landscape statistics. *Landscape Ecology*, 1997, **12**:199~212.

[20] McGarigal K, Cushman S A, Neel M C M, *et al.* FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following Web site: www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html, 2002.

[21] Xu K X. *Biological Mathematics*. Beijing: Sciences Press, 2001. 35.

[22] MathsNet Web Site. Available at: <http://www.mathsnet.net/asa2/modules/s14pmcc.html>, 2004.

[23] Mladenoff D J and DeZonia B. APACK 2.0 user's guide. *Department of Forest Ecology and Management*. University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA.

[24] Bu R C, Wang X L and Xiao D N. Analysis on landscape elements and fragmentation of Yellow River delta. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(3):321~324.

[25] He H S, Stephen J V, Mladenoff D J, *et al.* Effects of spatial aggregation approaches on classified landsat TM satellite imagery. *International Journal of Geographical Information Sciences*, 2002, **16**(1): 93~109.

[26] Bu R C, Li X Z and Hu Y M, *et al.* Scaling effects on landscape pattern indices. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(12):2181~2186.

[27] Wickham J D and Riitters K H. Sensitivity of landscape metrics to pixel size. *Int. J. Remote Sensing*, 1995, **16**(18): 3585~3594.

[28] Turner M G, O'Neill R V, Gardner R H, *et al.* Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1989, **3**, 153~162.

参考文献:

[21] 徐克学. 生物数学. 北京:科学出版社, 2001,35.

[24] 布仁仓,王宪礼,肖笃宁. 黄河三角洲景观组分判定与景观破碎化分析. 应用生态学报,1999,**10**(3):321~324.

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