

DOI: 10.5846/stxb202106081511

华琳, 黄志霖, 马良, 黄嘉元, 周高峪. 三峡库区低山丘陵区多尺度景观指数响应及适宜粒度. 生态学报, 2022, 42(11): 4703-4717.

Hua L., Huang Z. L., Ma L., Huang J. Y., Zhou G. Y. Suitable granularity and response of multi-scale landscape in low mountain and hilly area of the Three Gorges Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4703-4717.

三峡库区低山丘陵区多尺度景观指数响应及适宜粒度

华 琳¹, 黄志霖^{1,*}, 马 良¹, 黄嘉元¹, 周高峪²

1 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

2 秭归县林业局, 宜昌 443631

摘要: 景观格局具有典型的空异质性和尺度依赖性。在对景观格局进行分析研究时需跨越多个尺度, 空间粒度大小在尺度聚合分析中至关重要。三峡库区低山丘陵区斑块破碎、景观格局复杂性显著、景观格局特征及尺度变异规律仍待明确, 本文以三峡库区秭归县为研究区, 设定 1—400m 内 23 个粒度梯度水平, 定量评估县域、乡镇以及小流域不同幅度上的景观格局指数以及拟合函数, 探讨多空间幅度景观格局指数随粒度大小的变化特征。基于景观指数的粒度效应特征和拟合函数的曲线特征(最大曲率点、极值点), 明确适宜不同幅度的山地景观格局指数研究的粒度阈值, 以揭示库区低山丘陵区景观结构的复杂性和变异性。结果表明: 不同景观指数对空间粒度变化和空间幅度变化的响应存在差异, 不同景观指数的空间粒度响应主要呈现增加、降低、波动和无明显规律变化的趋势, 其中斑块密度、最大斑块面积等指数对斑块形状和大小的变化敏感, 而多样性指数的粒度变化敏感度较低; 部分指数如斑块密度、边缘密度、周长面积分维数等对空间幅度的变化并不敏感, 而最大斑块面积、景观形状指数、散布与并列指数、分离度等指数对空间幅度的变化敏感, 适合进行不同幅度适宜粒度阈值的推定; 边缘密度、平均斑块大小、景观形状指数、蔓延度、相似邻接比例等多个景观指数可高度拟合曲线函数, 通过拟合函数的曲线特征分析确定景观指数的变化转折点, 降低人工判断的差异性; 基于 251 个小流域、12 个乡镇和秭归县的 6072 幅栅格数据的各景观指数变化趋势和变化转折点, 综合各景观指数的转折变化点, 得出小流域、乡镇、秭归县景观格局分析的第一尺度粒度阈值分别为 3m、4m、7m, 第二尺度粒度阈值分别为 50m、100m、100m, 空间幅度越小则景观格局分析所需要的适宜粒度越小。

关键词: 景观格局; 景观指数; 尺度; 阈值

Suitable granularity and response of multi-scale landscape in low mountain and hilly area of the Three Gorges Reservoir

HUA Lin¹, HUANG Zhilin^{1,*}, MA Liang¹, HUANG Jiayuan¹, ZHOU Gaoyu²

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Nature Conservation, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Forestry Bureau of Zigui County, Yichang 443631, China

Abstract: Landscape patterns have typically spatial heterogeneity and scale dependence; thus it needs to span multiple scales in landscape pattern analysis. Therefore, the spatial granularity is crucial in scale aggregation. In the hilly area of the Three Gorges Reservoir area, patches are fragmented, landscape complexity is significant, and landscape pattern characteristics and scale variation are still to be clarified. In this study, we focused on Zigui County in the Three Gorges Reservoir, set 23 grain size gradient levels within 1—400 m, quantitatively evaluated the landscape pattern index and fitting function of the county, towns, and small basins at different amplitudes to explore more margin space landscape pattern index characteristics associated with the change in particle size. Based on the grain size effect characteristics of the landscape

基金项目: 三峡库区农林复合小流域土壤氮磷流失与径流侵蚀耦合机制研究(32171877)

收稿日期: 2021-06-08; **网络出版日期:** 2022-02-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hzlin66@163.com

index and the curve characteristics (maximum curvature point and extreme value point) of the fitting function, a suitable grain size threshold of the mountain landscape pattern index with different amplitudes was determined, so as to reveal the complexity and variability of mountain landscape structure in the hilly region of the Three Gorges Reservoir. The responses of different landscape indices to the changes in spatial granularity and spatial amplitude differed. The responses of different landscape indices to the changes in spatial granularity can be summarized as four trends: increase, decrease, fluctuation, and no obvious regular change. Patch Density and the Largest Shape Index are sensitive to changes in patch shape and size, whereas the sensitivity of Diversity Index to the change in grain size is inapparent. Patch Density, Edge Density, and Perimeter-Area Fractal Dimension are not sensitive to the change in spatial amplitude, whereas the Largest Patch Index, Landscape Shape Index, Interspersion and Juxtaposition Index, and Splitting Index are sensitive to the change in spatial amplitude and are suitable for prediction of the threshold of appropriate grain size for different amplitudes. Landscape indices such as Edge Density, Mean Patch Size, Landscape Shape Index, Contagion Index, and Percentage of Like Adjacency can be highly fitted to the curve function, and the curve characteristics of the fitting function can be used to identify the turning point of the change in the landscape index and reduce the difference in artificial judgment. Based on the changing trends and turning points of the landscape indices of 6072 raster data of 251 small basins, 12 townships, and Zigui County, the first-scale granularity threshold for landscape pattern analysis of small basins, towns, and Zigui County is 3 m, 4 m, and 7 m, while the second-scale particle size threshold is 50 m, 100 m, and 100 m, respectively, integrating the turning points of each landscape index. Thus, the smaller the spatial amplitude, the smaller the suitable grain size for landscape pattern analysis.

Key Words: landscape pattern; landscape index; scale; threshold

景观格局是指大小和形状不一的景观斑块在空间上的排列镶嵌,具有典型的空间异质性和尺度依赖性^[1-2]。明确景观格局的尺度效应是揭示景观格局及其变化的重要前提,合适的尺度是生态学研究中的起点和基础,影响生态系统格局和过程规律分析的准确程度,最终影响到研究成果的科学性和实用性^[3-5]。而进行生态系统和生态过程的大尺度生态问题研究时,需进行小尺度景观数据信息的跨尺度传递,最大程度的保留原生态过程的景观格局特征,因此探讨中小尺度下的景观格局特征以及在各尺度之间的信息传递变化规律则是研究景观格局尺度效应的基础。

景观格局的尺度效应主要涉及空间粒度、空间幅度和同时考虑空间粒度和空间幅度三个方面。已有的研究案例多聚焦某一固定空间幅度中的空间粒度变化对景观格局的影响。例如,市级行政区^[6-10]、县级行政区^[11-13]、小流域^[14-16]及三峡库区^[17-20]、青海湖流域^[21]等特定区域^[22]。在不同空间幅度对景观格局的影响方面研究较少,主要以不同空间幅度大小的移动窗口^[23-25]和从研究区域中心向外扩展^[26-29]进行景观格局分析。空间尺度的幅度和粒度不是割裂的,当前研究多只针对空间幅度和空间粒度的单方面进行分析,少有同时兼顾空间幅度和粒度的景观格局分析^[30],且同一水平尺度域内的景观格局特征推演比较容易,垂直跨越多个尺度域的景观格局分析较复杂^[4]。因此,亟待明确景观在不同空间幅度研究区的粒度响应特征。

用景观指数描述景观格局及其变化,是景观生态学最常用的定量化研究方法。目前大多通过景观指数在不同粒度下的变化趋势分析景观整体格局和各景观类型的响应,现有研究显示景观指数对尺度变化的响应具有一定的线性或非线性特征。近年来,景观指数响应曲线进行拟合函数分析的研究开始受到关注,主要包括幂函数、二次多项式函数、对数函数、线性函数、分段阶梯函数等函数拟合^[21,31-37],但目前仍以响应曲线的粗略转折点位置为依据,较少根据拟合函数的特征进行适宜粒度阈值的分析,而利用拟合函数的顶点、最大曲率点等特殊点进行阈值推算精确且具有普适性。

秭归县是三峡库区重要的低山丘陵地貌区,是三峡库区的坝上第一县,是我国退耕还林示范县和国家林草局退耕还林科技支撑示范点,正开展建设“山水林田湖草”生命共同体综合治理示范模式。三峡库区是《全

国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》中的水土保持国家重点生态功能区。随着生态环境治理的进行,三峡库区的植被覆盖率逐年提升、生态环境有所改善,但仍然存在林草植被质量整体不高,水土流失、生物多样性受损严重等问题,总体水平仍较为脆弱,生态承载力和环境容量仍有不足,经济发展带来的生态保护压力依然较大。多尺度景观格局的变化特征和分析粒度阈值在三峡库区这一地形复杂和入地关系较为紧张的区域需进一步明确。本文以湖北省秭归县为研究区域,基于高分辨率影像的解译数据,选取主要的景观格局指数,在县域、乡镇和小流域尺度上进行景观格局的粒度效应分析,并进行拟合函数分析以探讨多尺度上景观格局的粒度响应特征,分析垂直尺度上不同尺度之间景观格局特征的变化以及推演各空间幅度上的适宜粒度阈值,为后续景观格局、生态系统功能分析与森林景观恢复和生态修复等提供研究基础和空间粒度大小选择的参考。

1 研究区概况

秭归县($110^{\circ}59'34''\text{E}$ — $110^{\circ}20'26''\text{E}$, $30^{\circ}38'22''\text{N}$ — $31^{\circ}11'28''\text{N}$)位于三峡库区库首(图 1),面积为 2427km^2 。秭归县下辖 8 镇 4 乡,乡镇的平均面积为 189km^2 ,分布有 251 个小流域,平均面积为 9.03km^2 。总体地势南高北低,最高点在西南部,地形地貌主要以山地丘陵为主。

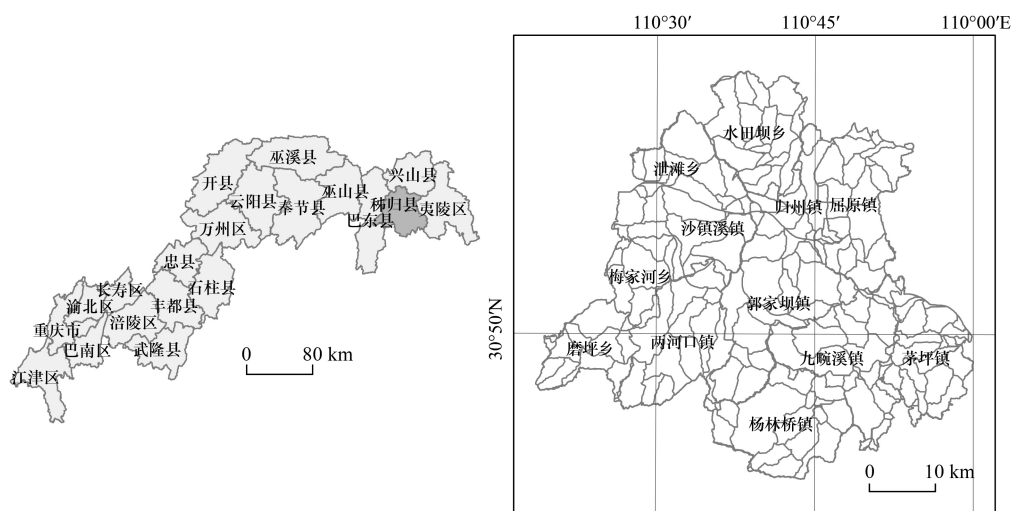


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文所采用的数据主要包括秭归县土地利用矢量数据、空间分辨率为 10m 的高程数据、行政区划数据和小流域边界数据。土地利用数据以秭归县 2018 年 0.2m 空间分辨率的航空摄影影像数据为基础,结合实地调查进行目视解译获得。根据《土地利用现状分类标准 GB/T21010—2017》并结合实际地域特征,将秭归县的土地利用数据分为九类,包括耕地、园地、林地、草地、工矿用地、住宅用地、交通运输用地、水域、其它用地。小流域的边界数据由数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据以流量 10000cell 为阈值进行水文分析得到,共 251 个小流域。

2.2 空间尺度的选择

空间幅度方面选取垂直等级上面积大小不同的县域、乡镇、小流域三个幅度,面积逐步扩大,分别呈 21、13 倍的递增关系。空间粒度方面,将土地利用现状图矢量数据转化为栅格数据,栅格像元的大小即为空间粒

度的大小。矢量数据转换栅格数据主要有三种属性分配原则,如图 2 所示:(1)中心要素分配属性值原则,位于栅格单元中心位置的面要素 a 决定像元的属性。(2)最大面积要素分配属性值原则,栅格单元内最大面积的单个要素 b 决定像元的属性。(3)最大合并面积要素分配属性值原则,栅格单元内多个相同属性的要素合并后,具有最大面积的要素 c 决定像元的值。借鉴前人的研究和数据计算的数量将土地利用矢量数据分别按照三种属性分配原则转换成粒度大小为 1、2、3、4、5、7、9、10、12、15、20、25、30、40、50、90、100、120、150、180、200、300、400m 的栅格数据以进行最佳属性分配原则的选择和景观指数分析。

2.3 景观指数的选择

景观指数的选择对景观格局的分析至关重要,景观指数包括斑块、类型和景观 3 种水平。本文以景观水平分析为主,在综合国内外研究和避免冗余分析的基础上^[38-41],选取如下指数:组成特征方面选取斑块密度(Patch Density, PD)、边缘密度(Edge Density, ED)、最大斑块面积指数(Largest Patch Index, LPI)、平均斑块大小(Mean Patch Size, AREA_MN),形状特征方面选取景观形状指数(Landscape Shape Index, LSI)、平均形状指数(Mean Patch Shape Index, SHAPE_MN)、周长面积分维数(Perimeter-Area Fractal Dimension, PAFRAC)、平均分维数(Mean Patch Fractal Dimension, FRAC_MN),聚散性方面选取蔓延度指数(Contagion Index, CONTAG)、相似邻接比例指数(Percentage of Like Adjacency, PLADJ)、散布与并列指数(Interspersion and Juxtaposition Index, IJI)、分离度指数(Splitting Index, SPLIT)、景观分割度指数(Landscape Division Index, DIVISION)、凝聚度指数(Patch Cohesion Index, COHESION)、斑块连接度指数(Connectance Index, CONNECT)、聚合度(Aggregation Index, AI),多样性特征方面选取香农多样性指数(Shannon's Diversity Index, SHDI)和辛普森多样性指数(Simpson's Diversity Index, SIDI)。

2.4 研究方法

在 ArcGIS10.4 软件中,按照最大面积要素分配原则、最大合并面积要素分配原则、中间要素分配原则三种属性分配原则,将秭归县土地利用类型的矢量数据以 1、2、3、4、5、7、9、10、12、15、20、25、30、40、50、90、100、120、150、180、200、300、400m 为空间粒度进行栅格化,根据实际面积与各属性分配原则生成的面积相比,分析三种属性分配原则的优劣,从中挑选最适合的属性分配原则,继而进行 12 个乡镇和 251 个小流域矢量数据不同空间粒度的栅格化,共计 6072 幅栅格数据。通过 Fragstats4.2 软件进行景观指数计算,分别统计 12 个乡镇和 251 个小流域的景观指数平均值代表乡镇幅度和小流域幅度的景观指数,并以空间粒度大小为 x 轴,景观指数数值为 Y 轴绘制折线图,分析景观格局指数的粒度响应变化。选择线性函数、指数函数和幂函数等拟合景观指数对粒度变化的响应曲线,选择拟合度最高的函数,根据其拟合函数的特性(最大曲率点、极值点)选取景观分析的适宜粒度范围。其中最大曲率点公式如下^[42]:

$$k = \frac{d\theta}{ds} = \frac{y''(x)}{(1 + (y'(x))^2)^{3/2}}$$

式中, $y''(x)$ 为二阶导数, $y'(x)$ 为一阶导数。

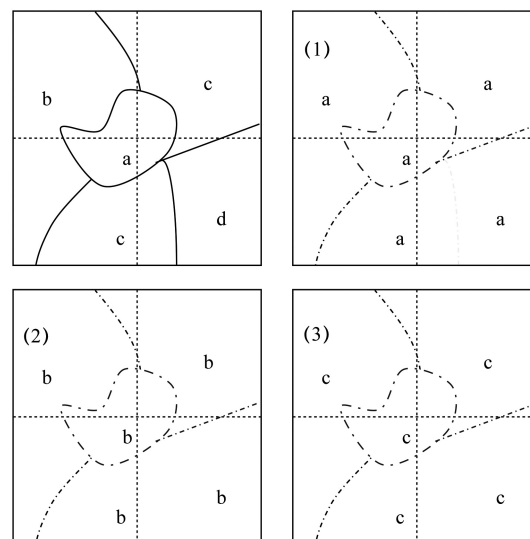


图 2 中心、最大面积、最大合并面积属性分配原则

Fig.2 The principle of distribution of attributes of center, maximum area, and maximum combined area

a、b、c、d; 对应要素的属性

3 结果与分析

3.1 不同属性分配原则对景观指数的影响

不同属性分配原则产生了景观面积与实际面积的差异,影响景观指数的粒度响应变化。图3中左图为不同分配原则下各粒度的景观总面积,最大面积要素分配原则和最大合并面积要素分配原则下不同粒度的景观面积变化相似,两者之间差异较小。中间要素分配原则的景观面积变化程度较小,在粒度增加的过程中有所波动,总体上升。图3中右图为各粒度下景观面积与真实面积之差,三种属性分配原则下的景观面积与实际面积的差异较为明显,中心要素分配原则与实际面积差异最小更适合用于景观分析。

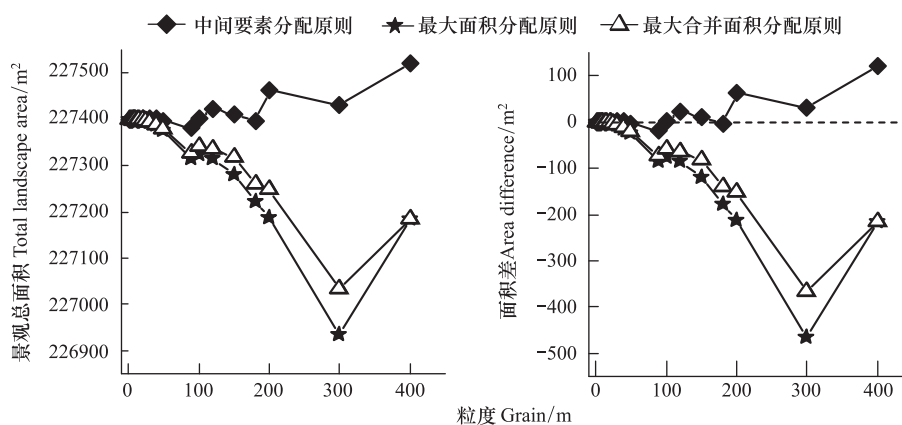


图3 三种分配原则下不同粒度景观总面积与真实景观面积差异

Fig.3 The difference between the total landscape area and the real landscape area of different granularities under the three allocation principles

3.2 景观指数的粒度响应

3.2.1 县域幅度景观指数的粒度响应

县域斑块密度指数的第一处变化发生在5m处,5—50m呈现急剧降低的状态;边缘密度、景观形状指数、周长面积分维数、蔓延度、相似邻接比例、散布与并列指数和聚合度指数均在1—100m粒度范围内变化显著;最大斑块面积指数在1—30m粒度范围内增加显著;平均斑块大小指数在小于50m的范围内变化和缓,50—400m粒度范围内增加显著;平均形状指数和平均分维数指数在小于50m的粒度范围内急剧降低;分离度指数和景观分割度指数分别在1—7m和1—30m的粒度范围内急剧降低,继而波动下降;凝聚度指数整体呈现直线式下降趋势;斑块连接度指数在1—10m粒度范围内下降后在10—300m粒度范围内呈现增加的趋势;多样性指数均在1—100m粒度范围内变化稳定,100—400m粒度范围内上下波动大(图4)。

3.2.2 乡镇幅度景观指数的粒度响应

在乡镇幅度层次,斑块密度指数的增加状态同样也在5m处发生转折;边缘密度指数、相似邻接比例、聚合度指数均在1—100m粒度范围内变化显著;最大斑块面积指数在1—20m粒度范围内增加显著;平均斑块大小指数在1—50m范围内变化和缓;景观形状指数、周长面积分维数、蔓延度在2m和100m处有所转折,且在100m范围内变化显著;平均形状指数在30m粒度处有转折;平均分维数指数在3m和50m粒度处有转折;散布与并列指数在1—100m粒度范围内下降之后又呈现增加状态,但在1—5m粒度范围内较稳定;分离度指数和景观分割度指数均分别在1—5m和1—20m粒度范围内下降显著后变化和缓;凝聚度指数整体呈现直线式下降趋势;斑块连接度指数在1—10m迅速下降,在10—120m粒度范围内呈现增加的趋势,120—400m粒度范围波动增大;多样性指数均在1—2m内下降显著,2—200m粒度范围内较稳定,200—400m范围内波动增加(图5)。

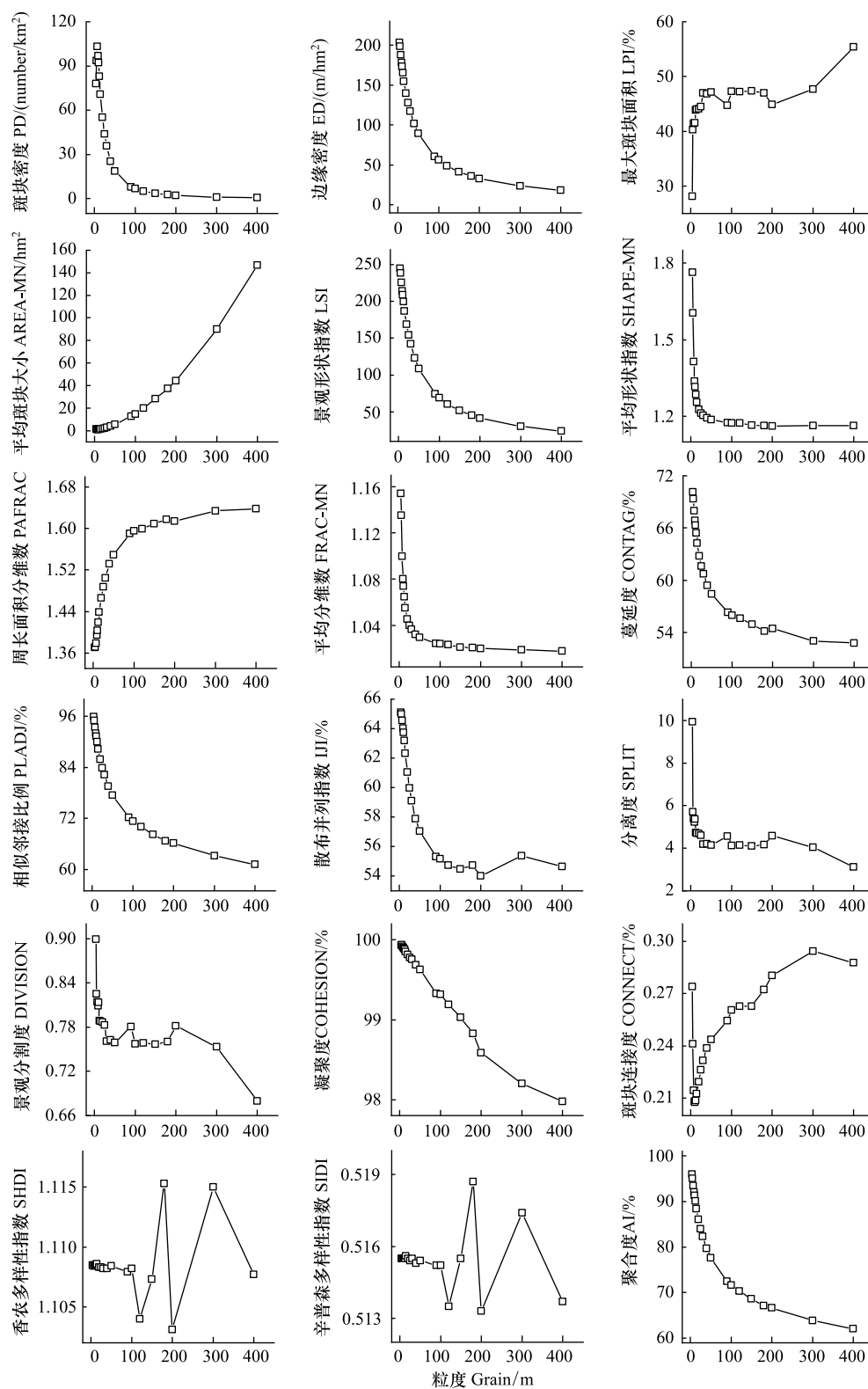


图4 县域的景观指数曲线

Fig.4 The landscape index curve of the county

3.2.3 小流域幅度景观指数的粒度响应

小流域幅度上的景观格局指数变化与乡镇幅度的变化趋势相似,部分区域存在差异。斑块密度指数先在

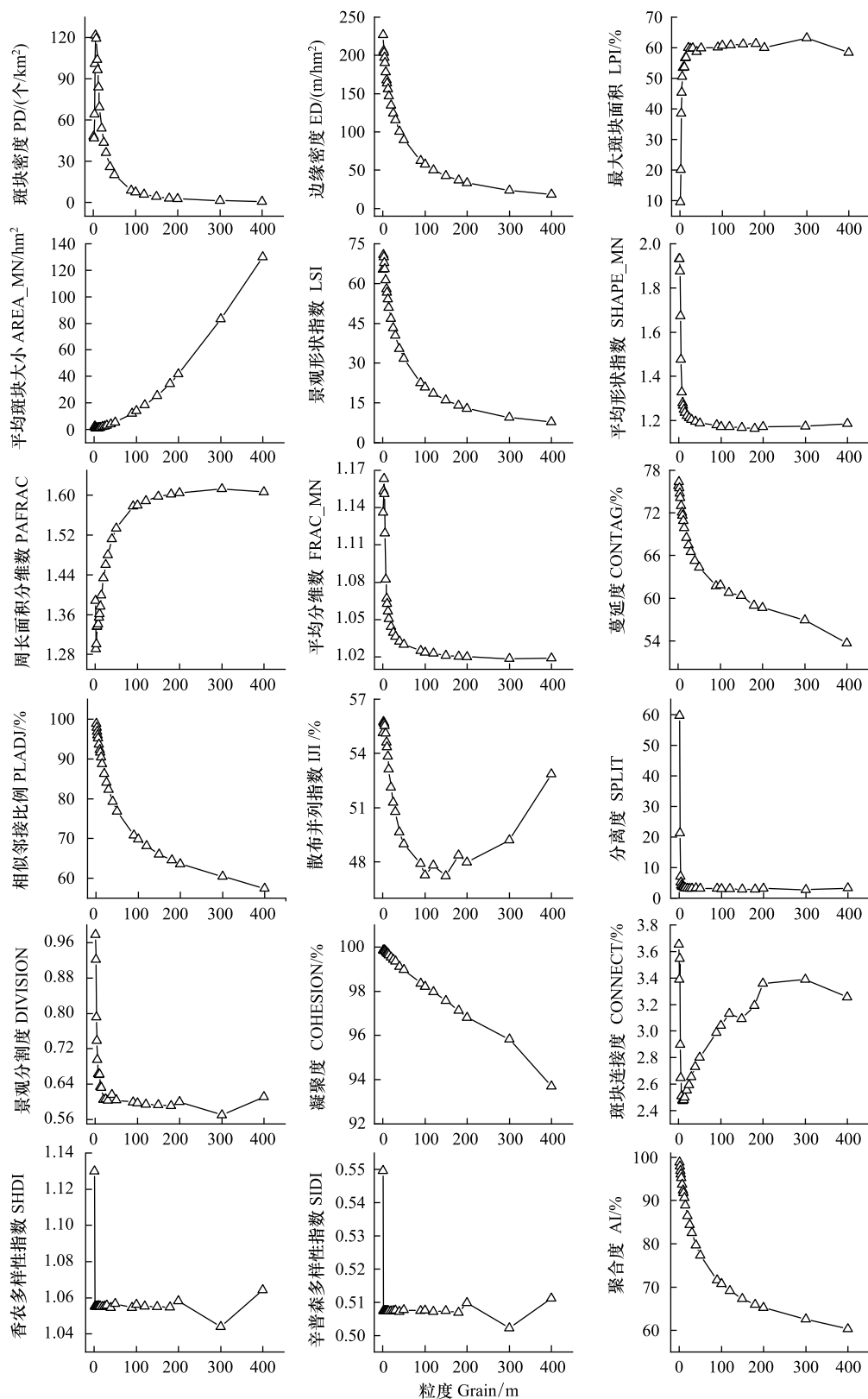


图5 乡镇的景观指数曲线

Fig.5 The landscape index curve of the township

1—5m 粒度范围内增加后到 100m 范围内显著降低;边缘密度指数、景观形状指数、蔓延度、相似邻接比例指数、聚合度指数在 1—100m 粒度范围内降低变化显著;最大斑块面积指数在 1—20m 粒度范围内增加显著, 20—400m 粒度范围内变化和缓;平均斑块大小指数在 1—50m 范围内变化和缓;平均形状指数在 25m 粒度处发生转折;周长面积分维数在 3m 和 100m 粒度处转折显著;平均分维数指数在 3m 和 50m 粒度处有转折;散布与并列指数在 50m 粒度范围内下降后不断增加;分离度指数在 1—4m 粒度范围内下降迅速后变化和缓;景观分割度指数在 1—20m 粒度范围内下降显著;凝聚度指数整体呈现直线式下降趋势;斑块连接度指数在 1—3m 内增加, 3—15m 粒度范围内呈现下降的趋势, 15—120m 内波动增大, 200—400m 范围内不断降低;多样性指数中, 1—50m 粒度范围内稳定, 50—400m 粒度范围内波动增加(图 6)。

3.3 各尺度景观指数的拟合函数

斑块密度、边缘密度、景观形状指数等景观指数随粒度变化响应的曲线可以高度拟合函数,且不同空间幅度上的拟合函数参数有所不同(表 1、表 2、表 3)。部分景观指数的响应曲线可以拟合多个函数,从中选取 R^2 最大的函数进行分析。拟合函数主要为三种:幂函数及其组合、指数函数及其组合和线性函数。对拟合函数求取极值点和最大曲率点,得出小流域、乡镇、县域三个幅度斑块密度的极值点分别位于为 5.65m、5.73m、5.78m 处,最大曲率点均为 34m;边缘密度的最大曲率点分别为 48m、46m、46m;最大斑块指数的最大曲率点分别为 7m、9m、9m;平均斑块面积、平均形状指数、平均分维数、蔓延度指数的最大曲率点均为 3m;景观形状指数的最大曲率点分别为 3m、10m 和 53m;三个幅度的周长面积分维数最大曲率点均为 400m;分离度指数的最大曲率点分别为 5m、5m、7m;景观分割度指数的最大曲率点分别为 4m、4m、7m;相似邻接比例指数和聚合度的最大曲率点均位于 10m 处;散布与并列指数的最大曲率点分别为 400m、35m、25m。

表 1 县域景观指数的拟合函数
Table 1 Fitting function of landscape index of the County

景观格局指数 Landscape index	拟合函数 Fitting function	县域拟合函数 County fitting function	拟合度 R^2
斑块密度 PD	幂函数	$y = 0.49586x^{8.44853x-0.56824}$	0.9974
边缘密度 ED	幂函数	$y = \frac{1}{(0.00454 + 0.000208169x^{0.90335})}$	0.9995
最大斑块面积 LPI	指数函数	$y = -4.48609E6 - 212.64913e^{(-\frac{x}{1.5621})} + 4.48613E6e^{(-\frac{x}{1.96983E8})}$	0.99746
平均斑块大小 AREA-MN	幂函数	$y = 0.00528x^{1.69673}$	0.9991
景观形状指数 LSI	幂函数	$y = \frac{1}{(0.00375 + 0.000182377x^{0.88478})}$	0.99957
平均形状指数 SHAPE-MN	指数函数	$y = 1.14994 + 0.1321e^{(-\frac{x}{34.56316})} + 4.84893e^{(-\frac{x}{1.55613})}$	0.99812
周长面积分维数 PAFRAC	指数函数	$y = 1.61623 - 0.32609e^{(-\frac{x}{35.99401})}$	0.9944
平均分维数 FRAC-MN	指数函数	$y = 1.01906 + 0.49141e^{(-\frac{x}{2.34272})} + 0.04641e^{(-\frac{x}{33.33754})}$	0.94785
蔓延度 CONTAG	指数函数	$y = 58.22596 + 8.57243e^{(-\frac{x}{87.77363})} + 9.56998e^{(-\frac{x}{14.51561})}$	0.99979
分离度 SPLIT	指数函数	$y = 0.36223 + 4.85328e^{(-\frac{x}{1012.21547})} + 171.22998e^{(-\frac{x}{1.24859})}$	0.97706
景观分割度 DIVISION	指数函数	$y = -6189.14016 + 6189.94851e^{(-\frac{x}{3.02328E7})} - 0.91879e^{(-\frac{x}{1.90446})}$	0.90898
相似邻接比例 PLADJ	幂函数	$y = 59.90164 + 17.79376e^{(-\frac{x}{25.08465})} + 21.52168e^{(-\frac{x}{155.38401})}$	0.99995
凝聚度 COHESION	线性函数	$y = 99.8937 - 0.00586x$	0.98476
聚合度 AI	幂函数	$y = 61.03238 + 17.4659e^{(-\frac{x}{24.78262})} - 20.73367e^{(-\frac{x}{146.2718})}$	0.99995
散布并列指数 IJI	指数函数	$y = 48.33625 + 10.76631e^{(-\frac{x}{34.02075})}$	0.99671

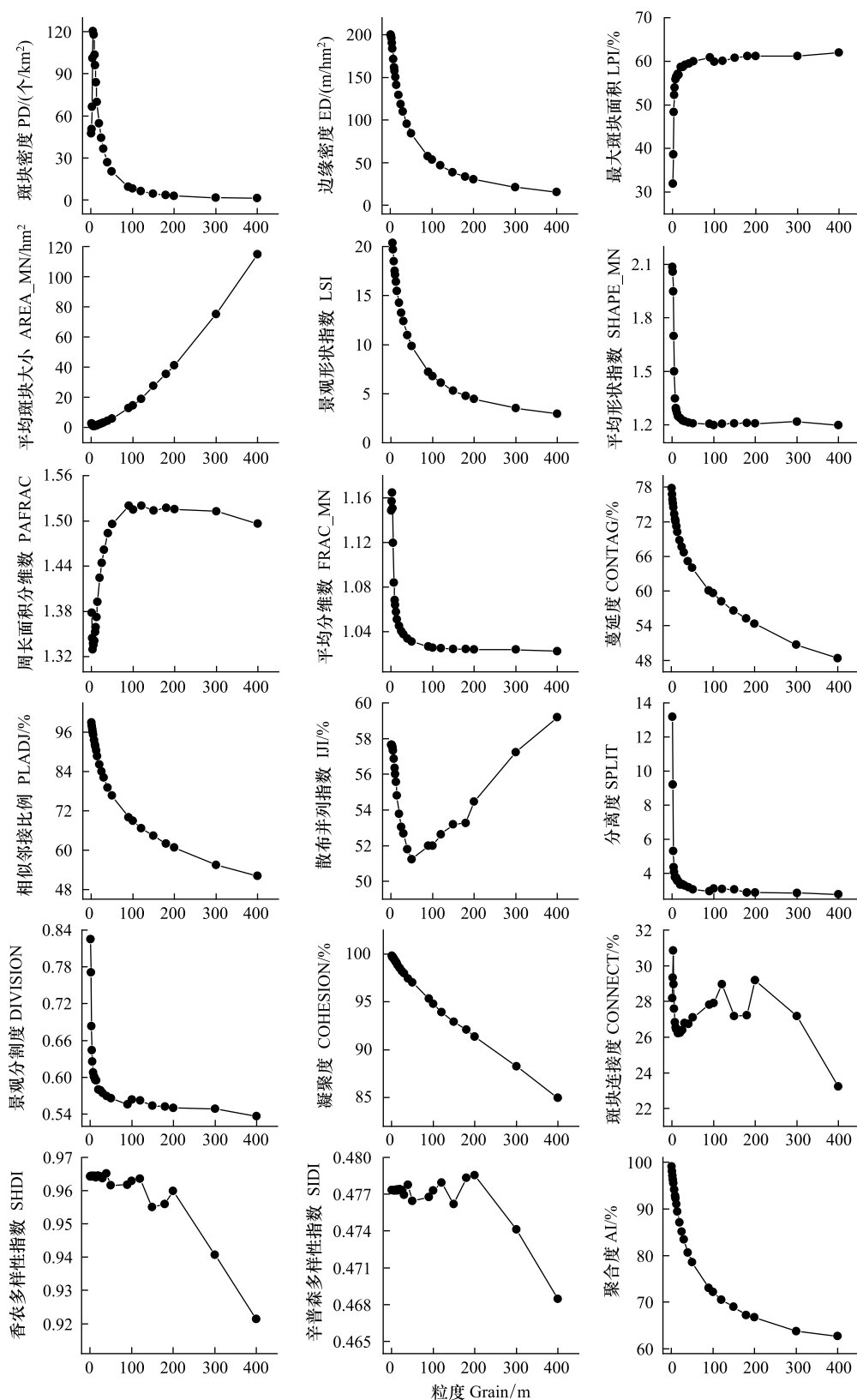


图6 小流域的景观指数曲线

Fig.6 Landscape Index Curve of Small Watershed

表 2 乡镇景观指数的拟合函数

Table 2 Fitting function of landscape index of township

景观格局指数 Landscape index	拟合函数 Fitting function	乡镇拟合函数 Township fitting function	拟合度 R^2
斑块密度 PD	幂函数	$y = 0.7897x^{7.78439x - 0.57114}$	0.9785
边缘密度 ED	幂函数	$y = \frac{1}{(0.00431 + 0.000227786 x^{0.87952})}$	0.99873
最大斑块面积 LPI	指数函数	$y = 60.72976 - 74.40891e^{(-\frac{x}{2.07935})} - 7.48999e^{(-\frac{x}{18.0321})}$	0.9785
平均斑块大小 AREA-MN	幂函数	$y = 0.0078x^{1.62287}$	0.99868
景观形状指数 LSI	幂函数	$y = \frac{1}{(0.01364 + 0.000439874 x^{0.9448})}$	0.99423
平均形状指数 SHAPE-MN	指数函数	$y = 1.17963 + 1.0751e^{(-\frac{x}{4.5315})}$	0.95841
周长面积分维数 PAFRAC	指数函数	$y = 1.60621 - 0.30369e^{(-\frac{x}{37.41018})}$	0.96792
平均分维数 FRAC-MN	指数函数	$y = 1.02349 + 0.15896^{(-\frac{x}{8.79944})}$	0.93329
蔓延度 CONTAG	指数函数	$y = 27.92931 + 36.64759e^{(-\frac{x}{1166.28283})} + 12.43101 e^{(-\frac{x}{20.15017})}$	0.99781
分离度 SPLIT	指数函数	$y = 3.22777 + 183.74702e^{(-\frac{x}{0.84739})}$	0.99844
景观分割度 DIVISION	指数函数	$y = 0.59471 + 0.50755e^{(-\frac{x}{2.48031})} + 0.0646e^{(-\frac{x}{20.33717})}$	0.97719
相似邻接比例 PLADJ	幂函数	$y = 54.11853 + 24.74572e^{(-\frac{x}{207.94759})} + 20.57953 e^{(-\frac{x}{26.4199})}$	0.99981
凝聚度 COHESION	线性函数	$y = 99.83602 - 0.01488x$	0.9936
聚合度 AI	幂函数	$y = 58.48779 + 19.70347e^{(-\frac{x}{25.72111})} + 21.27909e^{(-\frac{x}{172.02327})}$	0.99981
散布并列指数 IJI	指数函数	$y = 60.2334 - 12.71277 \left(\frac{1}{1 + e^{(-\frac{x}{217.00284 + \frac{410.04498}{2}}) / 16.623}} \right)$ $\left(1 - \frac{1}{1 + e^{(-\frac{x}{217.00284 + \frac{410.04498}{2}}) / 66.98161}} \right)$	0.98897

表 3 小流域景观指数的拟合函数

Table 3 Fitting function of small watershed landscape index

景观格局指数 Landscape index	拟合函数 Fitting function	小流域拟合函数 Small watershed fitting function	拟合度 R^2
斑块密度 PD	幂函数	$y = 1.0101x^{7.44948x - 0.57585}$	0.91775
边缘密度 ED	幂函数	$y = \frac{1}{(0.00472 + 0.000167632 x^{0.96354})}$	0.99904
最大斑块面积 LPI	指数函数	$y = 61.2051 - 42.2048e^{(-\frac{x}{1.97914})} - 4.84363e^{(-\frac{x}{44.33881})}$	0.98626
平均斑块大小 AREA-MN	幂函数	$y = 0.01772x^{1.46454}$	0.99849
景观形状指数 LSI	幂函数	$y = \frac{1}{(0.04329 + 0.00215 x^{0.83954})}$	0.99864
平均形状指数 SHAPE-MN	指数函数	$y = 1.20543 + 1.27344e^{(-\frac{x}{3.98371})}$	0.96272
周长面积分维数 PAFRAC	指数函数	$y = 1.51753 - 0.20023e^{(-\frac{x}{28.10931})}$	0.94722

续表

景观格局指数 Landscape index	拟合函数 Fitting function	小流域拟合函数 Small watershed fitting function	拟合度 R^2
平均分维数 FRAC-MN	指数函数	$y = 1.02647 + 0.16572e^{(-\frac{x}{8.05565})}$	0.95091
蔓延度 CONTAG	指数函数	$y = 44.98703 + 23.89107e^{(-\frac{x}{207.61415})} + 9.37642e^{(-\frac{x}{12.83821})}$	0.99957
分离度 SPLIT	指数函数	$y = 3.20906 + 19.41961e^{(-\frac{x}{1.54061})}$	0.97692
景观分割度 DIVISION	指数函数	$y = 0.54567 + 0.05108e^{(-\frac{x}{69.45608})} - 0.3756e^{(-\frac{x}{2.19507})}$	0.98538
相似邻接比例 PLADJ	幂函数	$y = 45.95328 + 18.38036e^{(-\frac{x}{23.80074})} + 35.24052e^{(-\frac{x}{228.53463})}$	0.99991
凝聚度 COHESION	线性函数	$y = 99.3284 - 0.03819x$	0.98571
聚合度 AI	幂函数	$y = 61.60988 + 22.45863e^{(-\frac{x}{131.48363})} - 15.58876e^{(-\frac{x}{21.48274})}$	0.99988
散布并列指数 IJI	指数函数	$y = 60.38524 - 9.973 \left(\frac{1}{1 + e^{(- (x - 124.16382 + \frac{225.33272}{2}) / 10.05057)}} \right)$ $\left(1 - \frac{1}{1 + e^{(- (x - 124.16382 - \frac{225.33272}{2}) / 83.13429)}} \right)$	0.99261

3.4 不同幅度下景观格局粒度响应的差异特征

县域、乡镇和小流域三个幅度随着粒度的增加,各景观指数呈现出不同的变化趋势,主要为三种变化趋势:总体上升、总体下降和波动变化。边缘密度、景观形状指数、平均形状指数、平均分维数、蔓延度、相似邻接比例、分离度、景观分割度、凝聚度、聚合度均呈现总体下降的趋势,最大斑块面积指数、平均斑块大小指数、周长面积分维数则呈现总体上升的趋势。斑块密度、散布与并列指数、斑块连接度指数、多样性指数均呈现波动变化(图7)。

三个幅度水平上斑块密度、边缘密度、聚合度指数的景观指数数值与变化相近,区别不明显;最大斑块指数中,乡镇和小流域数值相近且大于县域;平均斑块大小指数中,1—200m 范围内三个幅度的数值相近,200—400m 范围内差异增加且呈现县域>乡镇>小流域的状态;平均形状指数、平均分维数中 1—50m 范围内数值相近,50—400m 范围内的差异有所增加,呈现小流域>乡镇>县域的状态。景观形状指数、景观分割度、凝聚度指数和多样性指数数值总体上县域>乡镇>小流域;周长面积分维数中,乡镇和县域的数值相近且大于小流域的数值;在蔓延度指数中,50m—150m 范围内三个幅度水平的数值交叉,1—50m 内小流域>县域>乡镇,150—400m 内县域>乡镇>小流域;相似邻接比例指数中,1—50m 范围内三个幅度的指数数值相近,50—400m 范围内的差异增加且呈现县域>乡镇>小流域的状态。散布与并列指数中,1—50m 范围内小流域和县域的数值相近且大于乡镇,50m—400m 范围内小流域数值最大,乡镇数值增加且超过县域;分离度指数中,总体上县域>乡镇和小流域,小流域和乡镇数值相近;连接度指数中小流域>乡镇>县域。

综合三个幅度的景观指数转折变化点和拟合函数的最大曲率点、极值点,县域、乡镇、小流域三个幅度的景观指数适宜粒度见表4。部分指数如斑块密度、边缘密度、平均斑块大小、周长面积分维数、平均分维数、蔓延度、相似邻接比例、聚合度、凝聚度指数对空间幅度的变化并不敏感,不适合进行适宜粒度阈值的推定。综合最大斑块面积指数、景观形状指数、平均形状指数、散布与并列指数、分离度、景观分割度、斑块连接度指数的最大曲率点和转折点,去掉不敏感的粒度值,选取剩余粒度数值中最小和最大的粒度作为第一尺度阈值和第二尺度阈值,得出小流域、乡镇、县域的第一尺度阈值分别为 3m、4m、7m,第二尺度阈值分别为 50m、100m、100m。

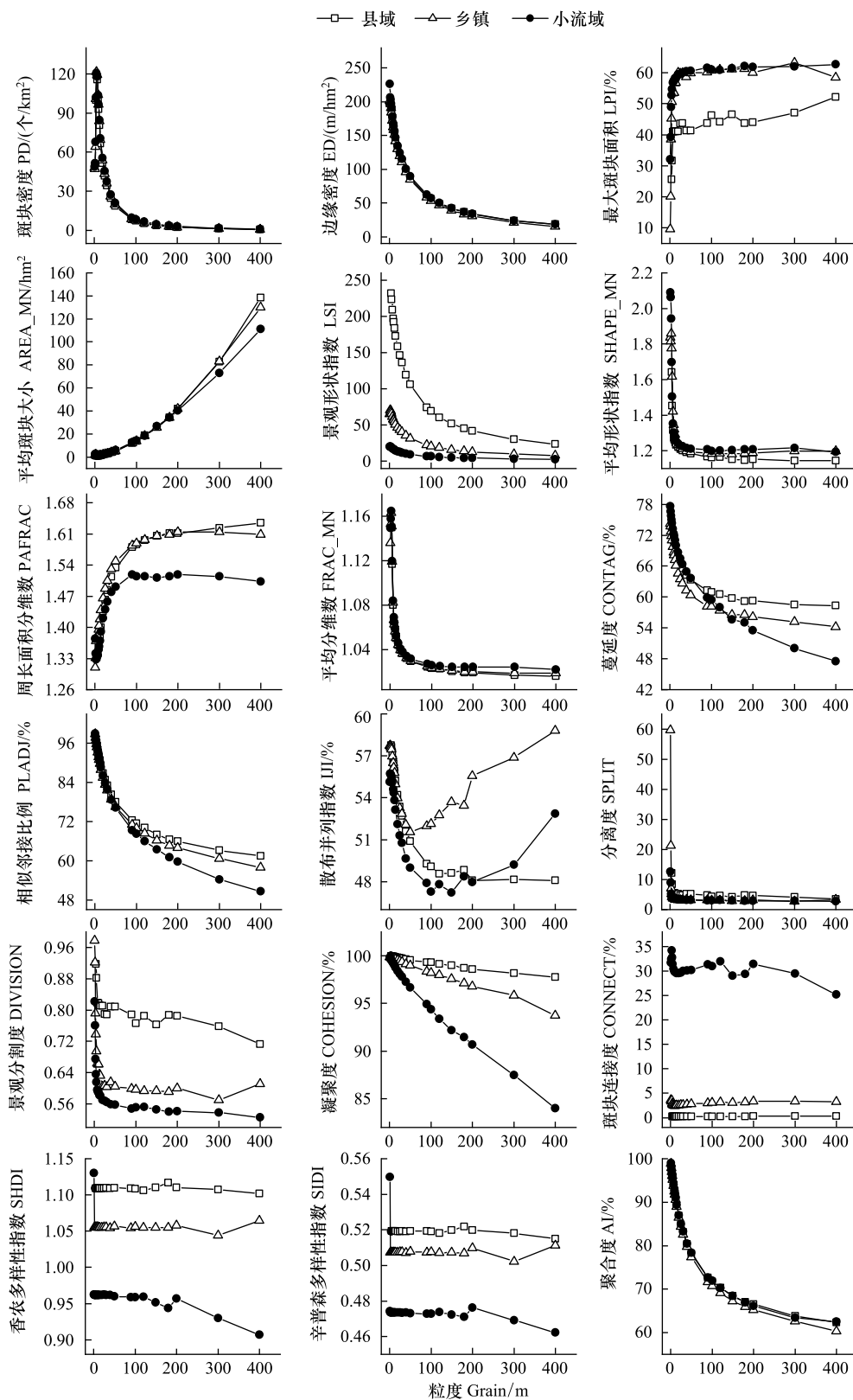


图7 三个幅度的景观指数曲线对比

Fig.7 Comparison of landscape index curves of three ranges

表 4 县域、乡镇、小流域的景观指数最大曲率点、转折点

Table 4 Maximum curvature point and turning point of landscape index in county, township and small watershed			
景观指数 Landscape index	小流域/m Small watershed	乡镇/m Township	县域/m County
斑块密度 Patch density	6,34	6,34	6,34
边缘密度 Edge density	48,100	46,100	46,100
最大斑块面积 Largest patch index	7,20	9,30	9,30
平均斑块大小 Mean patch size	3,50	3,50	3,50
景观形状指数 Landscape shape index	3,100	10,100	53,100
平均形状指数 Mean patch shape index	3,25	3,30	3,50
平均分维数 Mean patch fractal dimension	3,50	3,50	3,50
周长面积分维数 Perimeter-area fractal dimension	400,100	400,100	400,100
蔓延度 Contagion index	3,100	3,100	3,100
相似邻接比例 Percentage of like adjacency	10,100	10,100	10,100
散布与并列 Interspersion and juxtaposition index	25,50	35,100	400,100
分离度 Splitting index	5,4	5,5	7,7
景观分割度 Landscape division index	4,4,20	4,5,20	7,7,30
斑块连接度 Connectance index	3,15	10	10
聚合度 Aggregation index	10,100	10,100	10,100
多样性 Diversity index	50	200	100
凝聚度 Landscape cohesion index	—	—	—

4 结论与讨论

4.1 结论

空间数据属性分配聚合原则的差异影响景观指数的结果,其中心分配属性原则下的面积差异较小,更为适合景观格局分析。通过分析拟合函数的特征,利用极值点、最大曲率点特征能够解决人工判断指数转折点的不统一问题,更合理的找出景观分析的适宜粒度,如斑块密度的拟合函数极值点位于 5.8m 处,精度高于目测的 7m。

不同景观指数对空间粒度变化的响应不同,大部分有明显转折变化,而凝聚度指数随着粒度变化呈现直线式变化。部分景观指数如斑块密度、最大斑块面积等对斑块形状和大小的变化非常敏感,部分指数如多样性指数则敏感度较低。不同景观指数对空间幅度大小变化的响应也不同,景观形状指数、凝聚度、多样性指数和连接度指数的幅度变化敏感性高,前三者的空间幅度越小,景观指数越小,而连通度空间幅度越小,景观指数越大;斑块密度、边缘密度、聚合度的空间幅度敏感性低,无明显变化;其他指数空间幅度的变化与空间粒度关系密切,空间粒度越大,变化越明显。

斑块密度、边缘密度、平均斑块大小、周长面积分维数、蔓延度、相似邻接比例等指数对空间幅度的变化并不敏感,不适合进行粒度阈值的推定;最大斑块面积、景观形状指数、平均形状指数、散布与并列指数、分离度、景观分割度、聚合度指数对空间幅度的变化敏感,适合推定不同幅度上的适宜粒度。小流域、乡镇、县域的第一尺度阈值分别为 3m、4m、7m,第二尺度阈值分别为 50m、100m、100m,幅度越小的研究区景观分析的适宜粒度越小,所需要的空间信息越详细。随着粒度的增加,空间信息和景观信息丧失度增加,在一定的粒度达到稳定,所以在不影响计算的基础上粒度的选择越小越好。

4.2 讨论

目前在三峡库区的景观格局粒度响应研究较少,且已有的研究仅从库区整个幅度上进行分析^[17-18],本文对三峡库区低山丘陵区垂直等级上县域、乡镇、小流域不同幅度进行了粒度响应分析,较前人的研究分析更为全面和深入。研究结果适合在今后的三峡库区生态修复、森林景观恢复等工程中进行应用,并在应用中验证

和推广。

多数研究者基于 30m 及以上分辨率的数据进行分析,而 30m 分辨率的数据已经压缩了景观格局信息,致使景观适宜粒度的远远大于 30m,而无人机航测等高分辨率数据源产生的矢量数据更好的保留了原有景观格局信息,所得适宜粒度结果小于前者,这与李佳佳^[43]、汪桂芳^[44]等人的研究结果相符。

在数据处理过程中,不同属性分配原则下矢栅转换导致的误差容易被忽略,多数研究未考虑该误差^[18,35,43],影响结果的可靠性,本文研究发现中心要素分配属性原则的景观面积与实际面积误差相较于其他原则小,最适宜景观格局的分析。此外通过栅格数据直接进行聚合也有不同的规则,适宜原则也需进行下一步探讨。由于栅格化,各斑块的边界由连续变化的曲线变得平直,部分反应斑块形状特征的指数,如景观形状指数、边缘密度等,对边界的变化更加敏感,需要区别与其他景观指数进行分析。目前关于栅格化对景观指数影响的定量分析较少,接下来可进行深入探讨,对比栅格和矢量数据的景观指数变化。最大斑块面积、景观形状指数、平均形状指数、散布与并列指数、分离度、景观分割度、聚合度指数对空间幅度的变化敏感度高,与前人的研究分析基本一致,代表性强且函数拟合效果较好,适合推定不同幅度上的适宜粒度,今后的研究中可通过这些指数进行粒度推定,减少数据处理量。已有的研究分析大多通过目视判断指数曲线的趋势变化以确定转折点进而确定适宜粒度,适宜粒度的推定缺乏统一标准和精准度,而通过景观指数曲线拟合函数的极值点、最大曲率点推断适宜粒度更为精准,具有一定的普适性。

不同土地利用类型结构和景观基质、斑块、廊道的空间格局分布密切关系景观格局,也影响景观指数的变化和适宜粒度阈值的选择,如道路对景观格局的分割、生物廊道连接景观斑块,前人对不同土地利用类型的景观指数变化研究较多,基质、廊道的景观结构还需进行深入研究,且不同的分析方向需重点选择相对应的类型和结构进行探讨以选择适宜的粒度。

参考文献 (References):

- [1] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. 生态学报, 2000, 19(001): 42-52.
- [2] 布仁仓, 胡远满, 常禹, 李秀珍, 贺红土. 景观指数之间的相关分析. 生态学报, 2005, 25(10): 2764-2775.
- [3] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. 生态学报, 2001(12): 2096-2105.
- [4] Wu J G, Shen W J, Sun W Z, Tueller P T. Empirical patterns of the effects of changing scale on landscape metrics. Landscape Ecology, 2002, 17(8): 761-782.
- [5] Fu B J, Liang D, Nan L U. Landscape Ecology: Coupling of Pattern, Process, and Scale. Chinese Geographical Science, 2011, 21(4): 385-391.
- [6] 吴未, 许丽萍, 张敏, 欧名豪, 符海月. 不同斑块类型的景观指数粒度效应响应——以无锡市为例. 生态学报, 2016, 36(09): 2740-2749.
- [7] 龚建周, 夏北成, 李楠, 郭冻. 快速城市化地区土地覆盖景观特征的粒度效应. 生态学报, 2006(07): 2198-2206.
- [8] 李明杰, 钱乐祥, 夏丽华, 彭军超, 赵宇. 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, 2008(06): 93-96.
- [9] Tang J, Wang L, Yao Z. Analyses of urban landscape dynamics using multi-temporal satellite images: A comparison of two petroleum-oriented cities. Landscape & Urban Planning, 2008, 87(4): 269-278.
- [10] 孟楠, 韩宝龙, 王海洋, 逯非, 许超, 欧阳志云. 澳门城市生态系统格局变化研究. 生态学报, 2018, 38(18): 87-96.
- [11] Yue P, Lu X, D Yu, Huang J, Sun X, Xu Z. Quantitative relationships between soil landscape index and classification grain. Journal of Soils and Sediments, 2018: 1-14.
- [12] Fan Q, Ding S. Landscape pattern changes at a county scale: A case study in Fengqiu, Henan Province, China from 1990 to 2013. Catena, 2016, 137: 152-160.
- [13] 时嘉凯, 陈东辉, 陈亮. 上海市青浦区景观格局的粒度效应分析. 长江流域资源与环境, 2007, 16(A02): 26-32.
- [14] 张庆印, 樊军. 高精度遥感影像下农牧交错带小流域景观特征的粒度效应. 生态学报, 2013, 33(24): 7739-7747.
- [15] 刘源鑫, 焦峰. 黄土高原丘陵区景观特征与景观指数粒度效应研究. 水土保持研究, 2013, 20(3): 23-27+31.
- [16] Lu Y H, Feng X M, Chen L D, Fu B J. Scaling effects of landscape metrics: a comparison of two methods. Physical Geography, 2013, 34(1): 40-49.
- [17] 陈雅如, 肖文发, 滕明君, 冯源. 三峡库区景观格局粒度效应及其对土地利用变化过程的响应. 自然资源学报, 2018, 33(04): 588-599.
- [18] 曹银贵, 周伟, 王静, 袁春. 三峡库区 30a 间土地利用景观特征的粒度效应. 农业工程学报, 2010, 26(006): 315-321.

- [19] Zhang Q, Chen C, Wang J, Yang D, Gao M. The spatial granularity effect, changing landscape patterns, and suitable landscape metrics in the Three Gorges Reservoir Area, 1995—2015. *Ecological Indicators*, 2020, 114(12): 106259.
- [20] Teng M J, Zeng L X, Zhou Z X, Wang P C, Xiao W F, Dian Y Y. Responses of landscape metrics to altering grain size in the Three Gorges Reservoir landscape in China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(13): 1055.
- [21] 翟俊, 侯鹏, 赵志平, 肖如林, 颜长珍, 聂学敏. 青海湖流域景观格局空间粒度效应分析. *国土资源遥感*, 2018, 30(03): 159-166.
- [22] Alhamad M N, Alrababah M A, Feagin R A, Gharaibeh A. Mediterranean drylands: The effect of grain size and domain of scale on landscape metrics. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 611-621.
- [23] 申卫军, 邬建国, 任海, 林永标, 李明辉. 空间幅度变化对景观格局分析的影响. *生态学报*, 2003, 23(11): 2219-2231.
- [24] 朱明, 徐建刚, 李建龙, 徐胜, 宋量刚. 上海市景观格局梯度分析的空间幅度效应. *生态学杂志*, 2006(10): 1214-1217.
- [25] 唐玲, 谭丽, 何兴元, 李小玉, 陈玮, 张国友. 基于 Quickbird 卫星影像的沈阳市绿地景观格局的空间幅度效应. *资源科学*, 2008(09): 1415-1420.
- [26] 王艳芳, 沈永明, 陈寿军, 吴德力. 景观格局指数相关性的幅度效应. *生态学杂志*, 2012, 31(8): 2091-2097.
- [27] 刘媛媛, 刘学录. 甘肃永登县土地利用景观格局的空间尺度效应. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1221-1228.
- [28] 张韧瓔, 刘学录. 天水市土地利用景观格局的幅度效应研究. *生态科学*, 2019, 38(3): 80-89.
- [29] 闫苗苗, 李家存, 康孝岩. 基于长时相数据的同类型景观指数相关性幅度效应分析——以石家庄为例. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(05): 79-85+127.
- [30] 汪桂芳, 穆博, 宋培豪, 金牧青, 何瑞珍, 田国行. 基于无人机航测的漯河市土地利用景观格局尺度效应. *生态学报*, 2018, 38(14): 5158-5169.
- [31] 申卫军, 邬建国, 林永标, 任海, 李勤奋. 空间粒度变化对景观格局分析的影响. *生态学报*, 2003(12): 2506-2519.
- [32] 冉建波, 陈兴伟. 闽东南沿海地区景观指数粒度效应的高分辨率遥感分析. *地球信息科学学报*, 2016, 18(06): 824-832.
- [33] 易海杰, 张丽, 罗维, 王瑶, 杨剑, 李红举, 周同, 冯兆忠. 1990—2013 年洋河流域土地利用景观格局的粒度效应. *中国农学通报*, 2018, 34(19): 83-95.
- [34] 杨丽, 甄霖, 谢高地, 陈操操. 泾河流域景观指数的粒度效应分析. *资源科学*, 2007(2): 183-187.
- [35] 任梅, 王志杰, 王志泰, 曾雨静, 何立影. 黔中喀斯特山地城市景观格局指数粒度效应——以安顺市为例. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 3137-3145.
- [36] 崔杨林, 董斌, 位慧敏, 徐文瑞, 杨斐, 彭亮. 县域尺度下景观指数的粒度效应. *浙江农林大学学报*, 2020, 37(04): 778-786.
- [37] 徐雯雯, 董雪婷, 张志东, 黄选瑞. 塞罕坝地区植被景观格局时空尺度效应. *东北林业大学学报*, 2021, v.49(01): 108-113+118.
- [38] Lustig A, Stouffer D B, Roige M, Worner S P. Towards more predictable and consistent landscape metrics across spatial scales. *Ecological Indicators*, 2015, 57(oct.): 11-21.
- [39] Shu F, Zhao Y, Lei H, Ma C. Analysis of Landscape Patterns of Arid Valleys in China, Based on Grain Size Effect. *Sustainability*, 2017, 9(12): 2263.
- [40] Buyantuyev A, Wu J, Gries C. Multiscale analysis of the urbanization pattern of the Phoenix metropolitan landscape of USA: Time, space and thematic resolution. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 94(3-4): 206-217.
- [41] Fan C, Myint S. A comparison of spatial autocorrelation indices and landscape metrics in measuring urban landscape fragmentation. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 121(1): 117-128.
- [42] 同济大学应用数学系. 高等数学.上册.第 5 版. 高等教育出版社, 2002.
- [43] 李佳佳, 王志泰. 湄潭县城规划区景观指数的粒度效应分析. *浙江农林大学学报*, 2012(03): 18-26.
- [44] 汪桂芳, 穆博, 宋培豪, 金牧青, 何瑞珍, 田国行. 基于无人机航测的漯河市土地利用景观格局尺度效应. *生态学报*, 2018, v.38(14): 5158-5169.