

# 基于多分形矩阵映射的城市中心区形态跨尺度研究

## Cross-scale Research on the Morphology of Urban Central District Based on Multifractal Matrix Mapping

张晨阳 杨俊宴 王暄晴 邵典

ZHANG Chenyang, YANG Junyan, WANG Xuanqing, SHAO Dian

**摘要：**城市中心区形态在长期发展中形成了没有特征尺度的整体系统。多分形方法虽有助于从维数和谱形方面揭示其形态系统复杂的密度特征，但也存在空间映射能力不足的问题。本文首先在跨尺度的整体视角下，梳理出多分形特征所对应的城市形态学关键议题；其次以南京老城范围的建筑平面形态为例，构建了基于广义关联维数（容量、信息、关联、谱形）的测度方法，以及基于尺度和矩阶的矩阵映射分析方法。研究结果显示：南京老城建筑形态呈现出集聚的扁平化组织结构，开放空间形态呈现出跨尺度断裂的孔隙状结构；宏观尺度下，低密度区域表现出结构消散特征，高密度区域表现出带状凝聚特征，过渡区域表现出边缘化退散特征。本研究拓展了城市形态学的研究工具，提升了多分形算法对具体空间区域的分析能力，有助于揭示城市形态在尺度和密度方面的复杂性特征。

**Abstract:** The morphology of urban district areas has developed into a comprehensive system without a characteristic scale over the long term. The multifractal method helps to reveal the complex density characteristics of morphology systems in terms of dimensionality and spectral shape. However, the multifractal method also faces challenges regarding its spatial mapping capabilities. From a cross-scale holistic perspective, this paper elucidates the key issues of urban morphology research corresponding to multifractal features. Using the architectural plan form of Nanjing old city area as an example, this paper develops measurement techniques grounded in the concepts of capacity, information, correlation, and spectral shape within the framework of generalized correlation dimension. Additionally, it employs matrix mapping analysis methods that integrate scale and statistical moments. The research results indicate that the architectural morphology of the Nanjing old city area exhibits an aggregated and flattened organizational structure, while the open space morphology presents a cross-scale fractured porous structure. At the macro scale, low-density areas exhibit structural dissipation characteristics, high-density areas exhibit strip-like aggregation characteristics, and transition areas exhibit marginal dispersion characteristics. This study expands the research tools of urban morphology and enhances the analytical capabilities of multifractal algorithms for specific spatial regions, helping to reveal the complexity of urban morphology in terms of scale and density.

**关键词：**城市形态；城市中心区；跨尺度；多分形；密度

**Keywords:** urban morphology; urban central district; cross-scale; multifractal; density

国家自然科学基金重大项目“高密度城市环境碳中和建筑技术原型构建”(52394422015)，国家自然科学基金青年基金“基于‘数—形’双通道图谱的高密度街区形态测度模型与交互转译方法研究”(52308051)

**作者：**张晨阳，东南大学建筑学院，博士研究生。zhangchenyang@tongji.edu.cn

杨俊宴（通信作者），博士，东南大学建筑学院，首席教授、博士生导师；东南大学智慧城市研究院，副院长。yangjy\_seu@163.com

王暄晴，东南大学建筑学院，硕士研究生。wangxq0122@163.com

邵典，东南大学建筑学院，博士后。101300274@seu.edu.cn

## 0 引言

城市中心区的形态系统是由各种不同尺度的形态要素有机组合而成<sup>[1]</sup>，呈现出尺度黏连的整体性特点<sup>[2]</sup>，难以提炼出形态系统的特征尺度或划分出清晰的结构层级<sup>[3]</sup>，进而给形态系统分割研究带来困难<sup>[4]</sup>。面积、大小、密度、强度等常规指标也难以充分表征形态的复杂性特征<sup>[5]</sup>。因此，应当构建一种跨尺度的整体测度方法。多分形（multifractal）理论的出现，即为此类跨尺度研究提供了一种数学框架<sup>[6]</sup>。

大量研究已经证实，自组织产生的城市边界和各子系统普遍具有分形（fractal）的形态特征<sup>[7]</sup>。近年来，城市形态的分形特征被认为在形态系统内部不同区域的表现差异显著，理论上的单分形（monofractal）只存在于数学模型中，而现实中的城市形态是具有多种分形维数（fractal dimension）的多分形结构<sup>[8]</sup>，这一观点在城市尺度<sup>[9]</sup>和城市群尺度<sup>[10]</sup>的测算结果中得到支持。然而，城市中心区作为城市结构中的一个局部，其边界往往是人为界定的，并非像整个城市的形态系统边界一样破碎<sup>[11]</sup>；且其内部形态较为致密，与非中心区域的城市形态差异显著。因此，既有研究对于城市中心区是否具有多分形特征仍存在争议<sup>[9,12]</sup>。例如：有研究认为，通过形态要素的密度将城市划分为中心区、边缘区和过渡区时，由于中心区缺少形态空

隙和过于均质，边缘区破碎和过于无序，二者均不具备明显的多分形特征，而只有过渡区处于秩序发展的阶段，多分形特征才较为显著<sup>[13]</sup>。

当前的多分形方法主要应用于城市地理学领域，多采用经济、业态、用地、灯光、人口等宏观的形态数据<sup>[5,10,14-16]</sup>，与传统的城市形态学研究关联性不强。这导致多分形方法中主要指标的形态学含义不够清晰，研究结论也与形态学认知存在部分差异。

更为关键的是，以往多数基于多分形方法的城市形态研究是根据测度数值和谱形进行分析的<sup>[17]</sup>，只能将测度出的城市形态特征定位到特定的尺度区间或密度区间，而难以定位到具体的空间坐标，进而限制了多分形方法在城市形态学领域的应用范围<sup>[18]</sup>。少量研究尝试通过引入局部参数<sup>[5]</sup>和希尔数（Hill's numbers）<sup>[19]</sup>来实现空间可视化，以及通过空间聚类将形态特征定位到特定类型的区域<sup>[15]</sup>，但城市形态系统中每个空间单元对于多分形测度数值的贡献机制并不清晰，尚缺乏一种更具体的跨尺度空间映射方法。

因此，基于多分形构建城市中心区形态的测度方法和空间映射分析方法，对于揭示其整体结构、区域分异和尺度变化具有积极意义。尤其是高密度开发、高填充性布局、扁平化组织的老城中心区，当前正面临着开放空间体系破碎、外部生态空间向城内渗透能力弱、边缘带区域封闭等现实问题。分析老城中心区的多分形数值特征、谱形特征和空间映射特征，有助于精确描绘这些问题背后的数理机制和空间范围，进而为城市更新实践提供科学依据。

### 1 城市形态的多分形特征与跨尺度量化原理

在多分形理论中，单分形的分形维数被拓展为广义关联维数（generalized correlation dimension），其中，广义关联维数的谱形和 3 种特定取值可以表征城市形态的多种跨尺度特征（图 1）。这 3 种特定取值又被称为容量维数（capacity dimension）、信息维数（information dimension）和关联维数（correlation dimension）。

#### 1.1 容量维数：形态分布对空间的填充

形态要素对空间的填充是一种跨尺度的形态特征，其复杂属性难以用密度、体积、面积等常规的跨尺度适用的形态指标进行描述<sup>[20]</sup>。例如：对于相同面积的要素，不同的形态组织结构使其对空间的占据有明显的差异，这种差异既可以从场所理论和格式塔心理学获得理论解释<sup>[21]</sup>，也可以在跨尺度视角下进行量化分析。

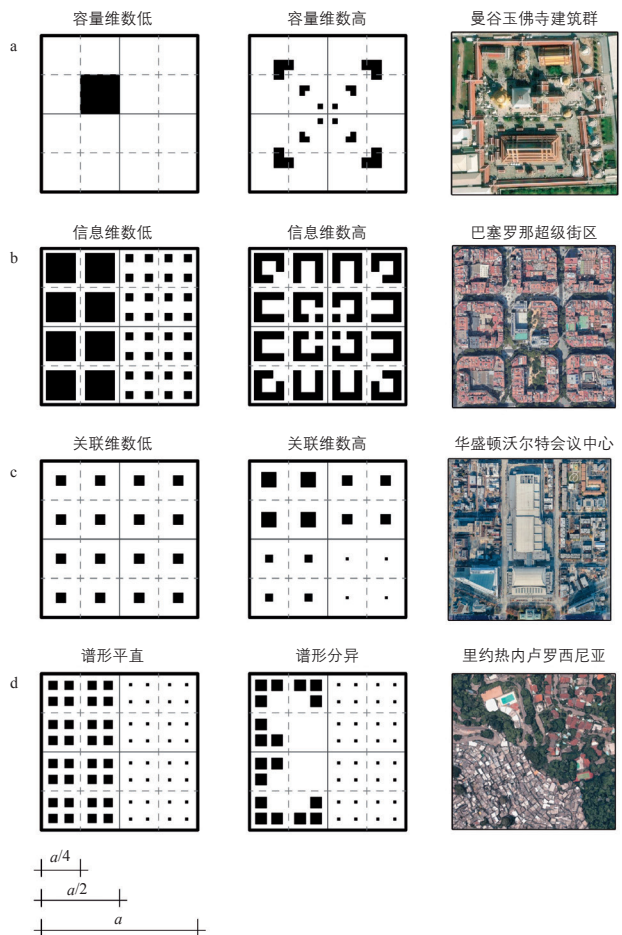
容量维数可以量化上述差异。如图 1a 左图所示，在  $a$ 、 $a/2$ 、 $a/4$  的研究尺度下，形态要素均只占据 1 个单元，而

图 1a 中图中占据的单元数量分别为 1、4、8。这意味着随着研究尺度缩小，中图表现出了比左图更高的跨尺度空间填充能力。

尽可能地利用和填充空间是城市形态组织的原则之一，通过围合、标志、阵列等方式可以实现丰富的形态效果和高效的空間使用。如图 1a 右图所示，曼谷的玉佛寺建筑群由连续的围廊式建筑占据边界空间，体量最大的大佛殿占据南侧空间，形态各异的中等体量建筑以东西轴向对齐的方式占据北侧和中部空间，更小的阁式、亭式、塔式建筑则以多种排列方式填充剩余空间，形成了多层次的空间效果。

#### 1.2 信息维数：形态系统的跨尺度多样性

即使具有相似空间占据能力的形态系统，其形态的信息量和多样性也有所不同<sup>[22]</sup>。通常来说，不同类型形态要素在空间上的混合越充分，越能够提供更多的交互机会和组合类



注： $a$  为无量纲数值，用于表达不同单元尺度之间的比例。

图 1 城市形态多分形特征图解

资料来源：作者根据谷歌地图绘制

型。既有研究多采用信息熵来测度要素的混合程度，但此方法只能测度形态系统整体的多样性特征，难以揭示不同要素的组织方式以及跨尺度的多样性特征。

信息维数是在信息熵的基础上进行尺度变换得来的。如图 1b 所示，随着研究精度的提高，中图比左图信息维数揭示出的信息量增长的倍数更大。

形态要素在最小单元内充分融合，能够有效促进形态系统的跨尺度多样性。例如：巴塞罗那超级街区作为一种信息维数很高的城市形态案例，其开放空间与各种功能的建筑在同一个街区单元中充分混合，9 个街区单元又以  $3 \times 3$  的组合形式与更大的街区公园、慢行网络构成一个超级街区（图 1b 右图）<sup>[23]</sup>。

### 1.3 关联维数：形态要素的空间集聚

对于给定的形态密度和容量维数，城市形态系统也可通过要素的密度组织来构建出不同的空间秩序<sup>[24]</sup>，以适应不同的功能需求，但这种秩序通常难以通过量化测度进行区分。在形态要素集聚度较高的城市区域，可能产生更多的形态关联<sup>[25]</sup>。因此，在量化研究中，要素更密集的区域应在描述形态关联特征的指标中得到更显著的表征。

关联维数通过对研究单元内的要素密度进行平方处理，可以有效区分不同集聚程度的城市形态系统。如图 1c 左图和中图所示，虽然二者整体密度相同，但关联维数能够揭示出他们在不同尺度下的要素密度变化差异。

长期的建设累积使得城市中心区大小体量形态要素的拼贴和嵌套现象非常普遍。如图 1c 右图所示，华盛顿沃尔特会议中心（ $>20$  万  $m^2$ ）能够容纳各种类型的会展活动，其周围环绕分布着一些相对规模较小的酒店、办公楼和住宅。针对此类形态系统，关联维数的测度能够将其与其他相近建筑密度的形态系统进行区分。

### 1.4 广义关联维数谱形：不同区域形态的发展分异

由于城市中心区形态具有复杂的嵌套特征<sup>[1]</sup>，其高密度区域与低密度区域高度交织，并存在结构复杂的密度过渡区，导致难以通过简单分区对不同密度区域的形态特征进行分别分析<sup>[26]</sup>。因此，测度城市形态系统不同密度区域的形态发展分异情况，需要一种既能分析极端情况又能揭示连续变化过程的量化方法。

为简要说明广义关联维数谱形的原理，假设系统中仅存在高密度和低密度两种极端情况的形态区域。例如：图 1d 左图中高密度区域与低密度区域的结构完整、广义关联维数相同，测度出的谱线是一条平直的横线；图 1d 中图的低密度区域的形态完整，表现出较高的广义关联维数，高

密度区域的形态在  $a/2$ 、 $a/4$  的研究尺度下均缺失  $1/4$  的区域，表现出较低的广义关联维数，因此其谱形表现出分异。

不同密度的城市形态区域在系统中承担着不同的功能。在里约热内卢的罗西尼亚，高密度贫民区和低密度富人区拼贴在一起：贫民区的建筑排布十分致密且完整，仅存在少量的“孔隙”用于打水、纳凉、集市等必要的公共行为；而富人区的建筑排布相对不规则，反而形成了由绿化和活动场地组成的完整的开放空间网络（图 1d 右图）。以上两种不同区域的特征会在同一条广义关联维数谱线中表现出显著的谱形分异。

## 2 基于多分形的跨尺度研究方法

### 2.1 研究案例与数据

研究以南京老城范围作为城市中心区研究样本，老城边界由明城墙、护城河、湖泊、带状城市公园等组成。区别于既有研究中自组织生长形成的褶皱状城市边界<sup>[5,10,19]</sup>，南京老城清晰的边界有助于消除位于边界附近的城市形态要素对研究结果的影响，从而使数据分析的结论聚焦于城市中心区内部结构<sup>[27]</sup>。

南京老城建设历史悠久，多个时期的建设叠加使得其城市形态具有跨尺度形态嵌套的复杂特征<sup>[1]</sup>（图 2）。研究以开放街区地图（OSM: OpenStreetMap）平台公开的数据集为基础，提取南京老城  $41.56$   $km^2$  范围内的建筑平面轮廓数据，并通过卫星影像、无人机航拍和现场踏勘等手段对 2021 年前的 OSM 数据进行了多轮修改和补充，共获得 20 069 个建筑数据。



图 2 南京老城局部形态

## 2.2 多分形的基本算法与原理

为更好地将测度结果与中心区的空间进行映射, 研究采用盒覆盖法对城市形态数据进行多分形测算<sup>[28]</sup>, 即通过单元边长为  $a$  的栅格网覆盖数据, 并缩放  $a$  的尺度, 计算各栅格单元内的城市形态数据, 从而实现跨尺度的整体分析和栅格单元的个体分析。

其中, 容量维数可以通过包含形态数据的栅格单元数量进行计算, 从而反映城市形态对空间的填充, 其公式为:

$$D_0 = -\lim_{a \rightarrow 0} \frac{\ln N_a}{\ln a} \quad (1)$$

公式 (1) 中,  $N_a$  为栅格单元边长为  $a$  时包含城市形态数据的栅格单元数量。

信息维数的计算思路与信息熵相同, 但引入了尺度缩放因素, 从而能够实现跨尺度的复杂性比较:

$$D_1 = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\sum_i^{N_a} P_i(a) \ln P_i(a)}{\ln a} \quad (2)$$

公式 (2) 中,  $P_i(a)$  是栅格单元  $i$  中的建筑基底面积占南京老城建筑基底面积总和的比例, 其含义为城市形态数据出现在栅格单元  $i$  时的概率。

关联维数需要放大形态集聚区域对维数计算的影响, 并相应缩小形态稀疏区域的影响, 因此研究对栅格单元形态数据出现的概率进行了平方处理, 如公式 (3):

$$D_2 = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_i^{N_a} P_i(a)^2}{\ln a} \quad (3)$$

为了能够更普遍地分析不同密度区域的分形维数, 并统一容量维数、信息维数和关联维数 3 种重要的维数, 广义关

联维数  $D_q$  被构建出来<sup>[8]</sup>, 如公式 (4):

$$D_q = \begin{cases} \frac{1}{q-1} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_i^{N_a} P_i(a)^q}{\ln a}, & (q \neq 1) \\ \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\sum_i^{N_a} P_i(a) \ln P_i(a)}{\ln a}, & (q = 1) \end{cases} \quad (4)$$

公式 (4) 中, 通过矩阶  $q$  控制不同密度区域对分形维数计算结果的影响。可知, 当  $q \rightarrow \infty$  时,  $D_q$  测度的是形态要素最密集区域的分形维数; 当  $q \rightarrow -\infty$  时,  $D_q$  测度的是除空地外形态要素最稀疏区域的分形维数; 而  $q$  值取两者之间时, 不同密度区域均会对  $D_q$  产生影响, 只是权重不同, 反映的是城市中心区不同密度区域相互嵌套特征的普遍情况。

## 2.3 跨尺度的测度过程和矩阵映射的分析方法

公式 (4) 在既有的多分形研究中得到了普遍应用, 但公式成立的条件是栅格单元尺寸接近 0, 隐含的前提是将所研究的对象进行无限分割后仍然具有分形的基本特征。本文通过分析南京老城不同密度区域的建筑平面数据发现, 上述前提显然不成立——南京老城多数建筑的短边长度约为 8~15 m, 在 <15 m 的多数栅格单元中, 城市形态不再具有分形特征。通过观察, 30 m 是较为合适的城市形态分形研究栅格单元最小尺寸, 即对于建筑平面轮廓数据而言, 其分形特征存在的尺度区间最小阈值约为 30 m (图 3)。

因此, 研究引入雷尼熵 (Renyi entropy) 指标对公式 (4) 进行变换<sup>[10]</sup>, 雷尼熵可以理解作为一种关于形态信息量的二阶矩阵指标。对于同一个城市形态系统而言, 选取越小的栅格尺寸  $a$ , 可以识别出越多的形态信息; 而调整矩阶  $q$ , 可以识别出不同密度区域的形态信息。其中, 雷尼熵的计算公式为:

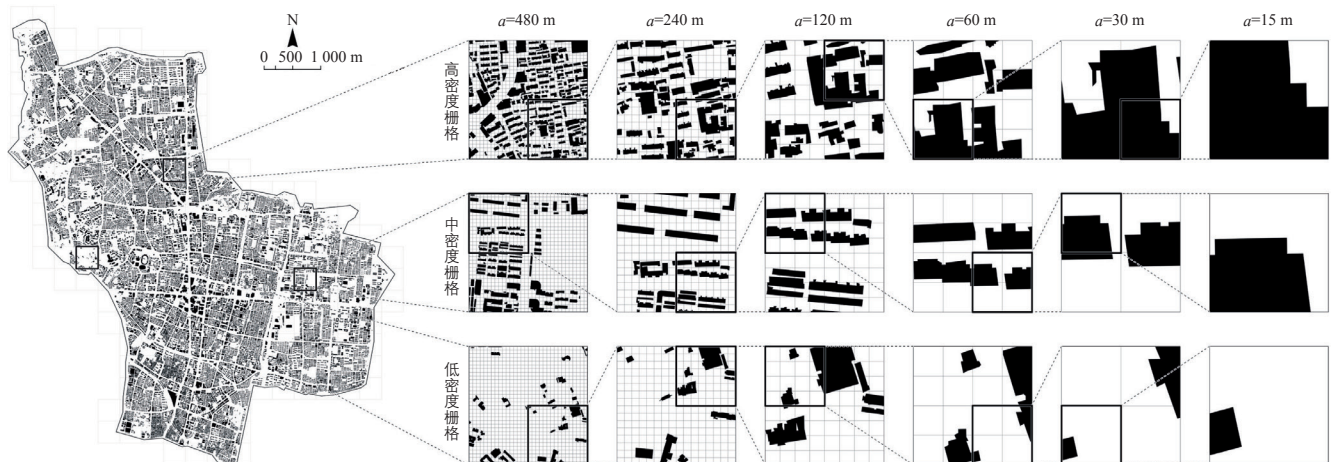


图 3 南京老城不同密度栅格的跨尺度形态特征

$$I_q(a) = \begin{cases} \frac{\ln \sum_i^{N_a} P_i(a)^q}{1-q}, (q \neq 1) \\ -\sum_i^{N_a} P_i(a) \ln P_i(a), (q = 1) \end{cases} \quad (5)$$

相应地，广义关联维数的计算公式转换为：

$$D_q = -\frac{\Delta I_q(a)}{\Delta \ln a} \quad (6)$$

需要注意的是，具有分形特征的城市形态系统，其形态信息量会随着研究精度的提高而增加，且这种变化应该符合幂律分布，这意味着形态复杂性在不同尺度下的一致性。由于  $I_q(a)$  和  $\ln a$  分别是对于形态信息量和研究单元尺寸的自然对数变换，因此公式 (6) 成立的前提是  $I_q(a)$  和  $\ln a$  具有较高的线性相关指数  $R^2$ 。既有研究认为，当  $R^2 > 0.996$  时，形态系统的分形特征较为显著<sup>[29]</sup>。因此，在计算  $D_q$  之前，还需对  $I_q(a)$  和  $\ln a$  进行线性拟合分析。

为了将多分形测度结果定位到特定的尺度区间、密度区间和空间位置，本文构建了基于栅格单元尺寸  $a$  和矩阶  $q$  的矩阵映射方法。矩阵的内容是栅格化的南京老城形态地图，根据雷尼熵的计算过程对每个栅格单元进行赋值，并用不同颜色表达值的大小，从而揭示各栅格单元对于多分形测度结果的贡献机制。其中，通过  $a$  的变化，可以观察多分形特征随尺度缩放的演化特征；矩阶  $q$  的变化，实际上是对形态密度的操控，能够分析出不同密度区域的发展分异。具体分析过程和分析结果见本文第 4 节。

### 3 南京老城中心区形态的多分形测度

#### 3.1 容量、信息和关联的维数分析

通过计算南京老城不同尺度下覆盖形态数据的栅格单元数量  $N_a$ ，发现其呈现出显著的幂律分布特征，雷尼熵  $I_q(a)$  的数值也呈现出单调下降的趋势（表 1）。

通过拟合分析发现，雷尼熵  $I_0(a)$ 、 $I_1(a)$ 、 $I_2(a)$  与

表 1 雷尼熵计算结果表

单元尺寸 a	30 m	60 m	120 m	240 m	480 m
$N_a$	36 978	10 734	2 905	774	209
$\ln a$	3.401	4.094	4.787	5.481	6.174
$I_0(a)$	10.518	9.281	7.974	6.652	5.342
$I_1(a)$	10.306	9.111	7.847	6.539	5.228
$I_2(a)$	10.188	9.014	7.776	6.483	5.176
$I_{30}(a)$	9.562	8.237	7.087	5.958	4.810
$I_{30}(a)$	24.592	21.631	20.374	15.347	12.815

$\ln a$  线性相关指数  $R^2$  均接近 1.000，表现出极其显著的分形特征（图 4a,4b,4c）。这种极高的拟合优度在以往研究中较为罕见<sup>[30]</sup>，一方面证明城市中心区的分形特征比整个城市更为显著，另一方面也可能是使用了比既有研究更高精度的数据造成的。

根据巴蒂等（Batty et al.）的计算，城市形态的容量维数  $D_0$  的理想区间为 1.676~1.726<sup>[31]</sup>。南京老城的容量维数  $D_0$  高达 1.873，表现出较为拥挤的空间布局（图 4a）。且相较于既有研究使用的建设用地边界数据<sup>[16]</sup>，本研究使用了建筑轮廓数据，因而有更多的空隙，实测出的  $D_0$  相对偏低。南京老城的信息维数  $D_1$  和关联维数  $D_2$  同样高达 1.8 以上，表明其城市形态对空间的占据相对均质且集聚（图 4b,4c）。

#### 3.2 广义关联维数的极限值分析

既有研究表明， $D_q$  通常在  $q = \pm 30$  之间发生收敛。因此，为分析广义关联维数  $D_q$  的极限值，本文分别对  $I_{30}(a)$  和  $I_{-30}(a)$  与  $\ln a$  进行线性拟合分析。结果显示： $I_{30}(a)$  与  $\ln a$  的相关指数为 0.999，说明形态要素最密集的区域同样表现出显著的分形特征； $D_{30}$  高达 1.700，反映出对空间的有效占据（表 1, 图 4d）。

$I_{-30}(a)$  与  $\ln a$  的相关指数仅为 0.971，说明形态要素最稀疏区域不具备分形特征，因此广义关联维数已经不再适用。 $D_{-30}$  高达 4.305，其含义在于：大的研究尺度下几乎不存在形态要素最稀疏区域；而随着研究尺度的缩小，形态要素最稀疏区域的数量暴涨。这意味着建筑与开放空间在大的研究尺度上充分混合，仅在小的研究尺度上存在低建筑密度的区域。此外，点线图在  $a=120$  m 时出现明显凸点，指示这一尺度上大量开放空间的出现（图 4e）。

$I_{30}(a)$  和  $I_{-30}(a)$  的分析结果与既有研究相比十分特殊。一般来说，城市低密度区域的形态分布较为连绵完整，而高密度区域较为分散破碎<sup>[18,32]</sup>。然而，南京老城中心区测度出完全相反的结果，这既是中心区局部区域与城市整体的差异，也是南京老城长期建设积累的结果。

#### 3.3 广义关联维数的谱形分析

综合南京老城不同密度栅格的跨尺度形态特征（图 3）以及拟合分析结果（图 4），本文选取 30~120 m 的尺度区间作为计算范围。该区间既接近南京老城分形特征的最小尺度，又包含开放空间出现的重要拐点尺度。根据公式 (6)，计算如下：

$$D_q = \frac{I_q(120) - I_q(130)}{\ln 120 - \ln 30} \quad (7)$$

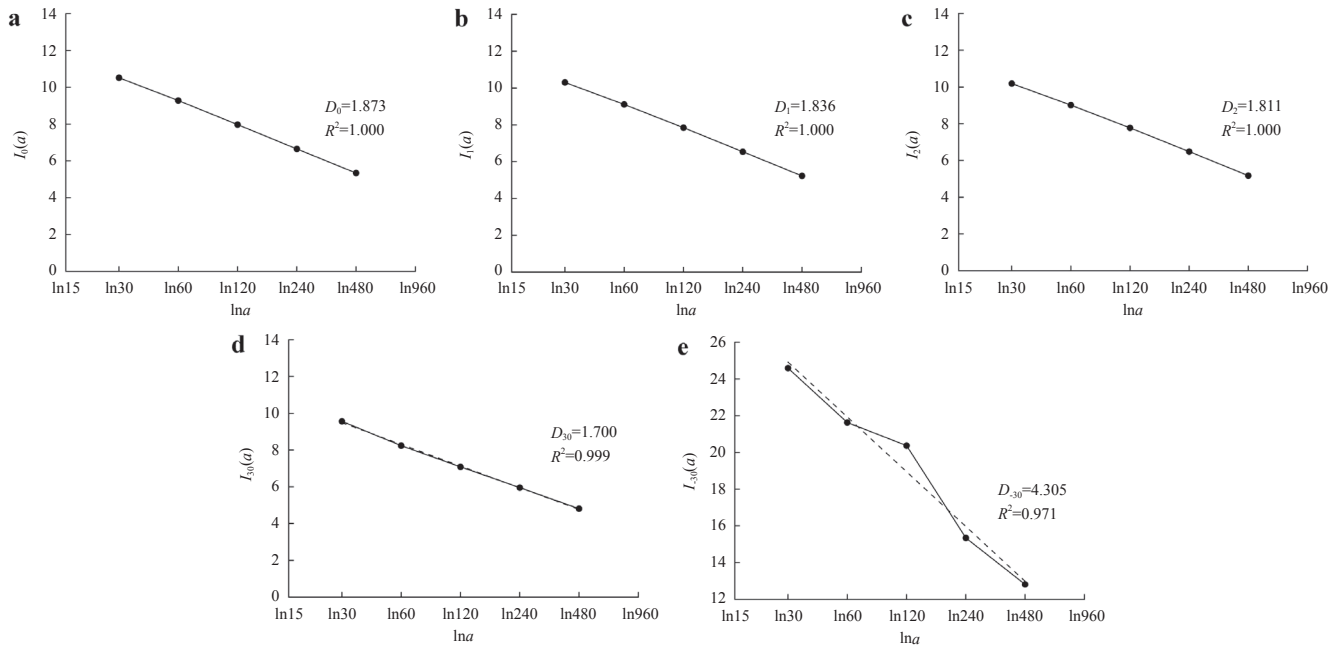


图4 雷尼熵与栅格单元尺度对数的拟合分析

广义关联维数的谱形显示出与既往研究显著不同的两处特征(图5)。一是在 $q > 7$ 后, $D_q$ 值反向上升,呈现出向上收敛的趋势,而既往研究均为向下收敛<sup>[10,28,33]</sup>,这证明了南京老城高密度区域跨尺度的结构完整性,其最密集区域比次密集区域的形态填充能力更强;二是在 $q < -1$ 后, $D_q$ 值迅速突破嵌入维度2,出现了分形的结构缺陷,这说明南京老城低密度区域发展不足,即使在120 m以下的相对较小尺度上,也缺乏连片的低密度区域。

## 4 南京老城中心区的跨尺度形态变化特征

### 4.1 容量：跨尺度断裂的孔隙状开放空间结构

根据建筑平面数据计算的容量维数 $D_0$ 与建筑密度的数学含义并不相同,高容量维数意味着宏观尺度下建筑占据的空间相对较少,而微观尺度下建筑占据的空间相对较多。因此,建筑的高容量维数并不一定指向开放空间体系的破碎。

图6第2列显示,南京老城的建筑对空间的占据相当充分,但与此同时,并没有留出足够的开放空间以形成有效的结构。微观尺度下,开放空间由环绕老城的湖泊、护城河、带状公园等向内多点渗透,但渗透深度较浅,未能连接形成体系;老城内部则形成了破碎的孔隙状开放空间结构,缺乏轴线或绿带进行串联,只在最小的30 m尺度下存在局部的绿道连接。随着研究尺度放大,开放空间数量迅速减少。当尺度放大到240 m时,老城内部仅剩一个完整的无建筑区域,且该区域为内环北线和内环西线的高架枢纽,不具备承载游憩活动的开放空间功能。

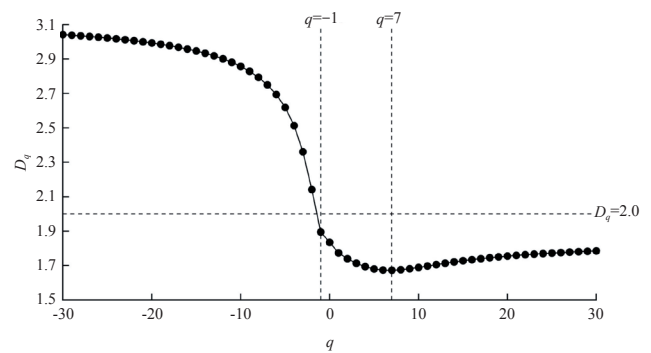


图5 广义关联维数谱

### 4.2 信息：过渡区域的宏观尺度边缘化退散特征

尽管南京老城的信息维数 $D_1$ 与容量维数 $D_0$ 测度值差异不大,两者对应的雷尼熵空间映射特征却有显著差异。

图6第3列表达的深色区域是建筑与开放空间充分混合的区域,也是高密度区域与低密度区域之间的过渡区域。由于建筑在全尺度上的充分分布,以及小尺度开放空间的普遍存在,过渡区域的总面积变化在全尺度范围内保持稳定。微观尺度下,过渡区域呈均质分散分布,未表现出特定的空间结构;随着研究尺度的放大,逐渐出现连绵的过渡区块,其中政府、高校、科技园等所在区域表现出更高的混合度;当研究尺度进一步放大,过渡区域整体向边缘退散,内部高建筑密度的低混合度孔洞逐渐融合贯通,形成了以狮子桥和常府街地铁站两处为低混合度核心的洼地结构。

总的来说，在大尺度开放空间缺乏的南京老城，公共管理与公共服务用地因包含更大面积的多类型开放空间，明显表现出更高的形态多样性，这一结果与康泽恩学派的城市边缘带理论相契合。与此同时，靠近南京老城边界的区域通过环城绿带的向内渗透，形成了中等建筑密度的多类型组合形态。

### 4.3 关联：形态要素集聚的扁平化组织结构

虽然南京老城的关联维数  $D_2$  比容量维数  $D_0$  和信息维数  $D_1$  都低，但其表征的城市形态要素集聚区域的跨尺度结构更加清晰。

图6第4列显示，在各个研究尺度下，形态要素集聚区

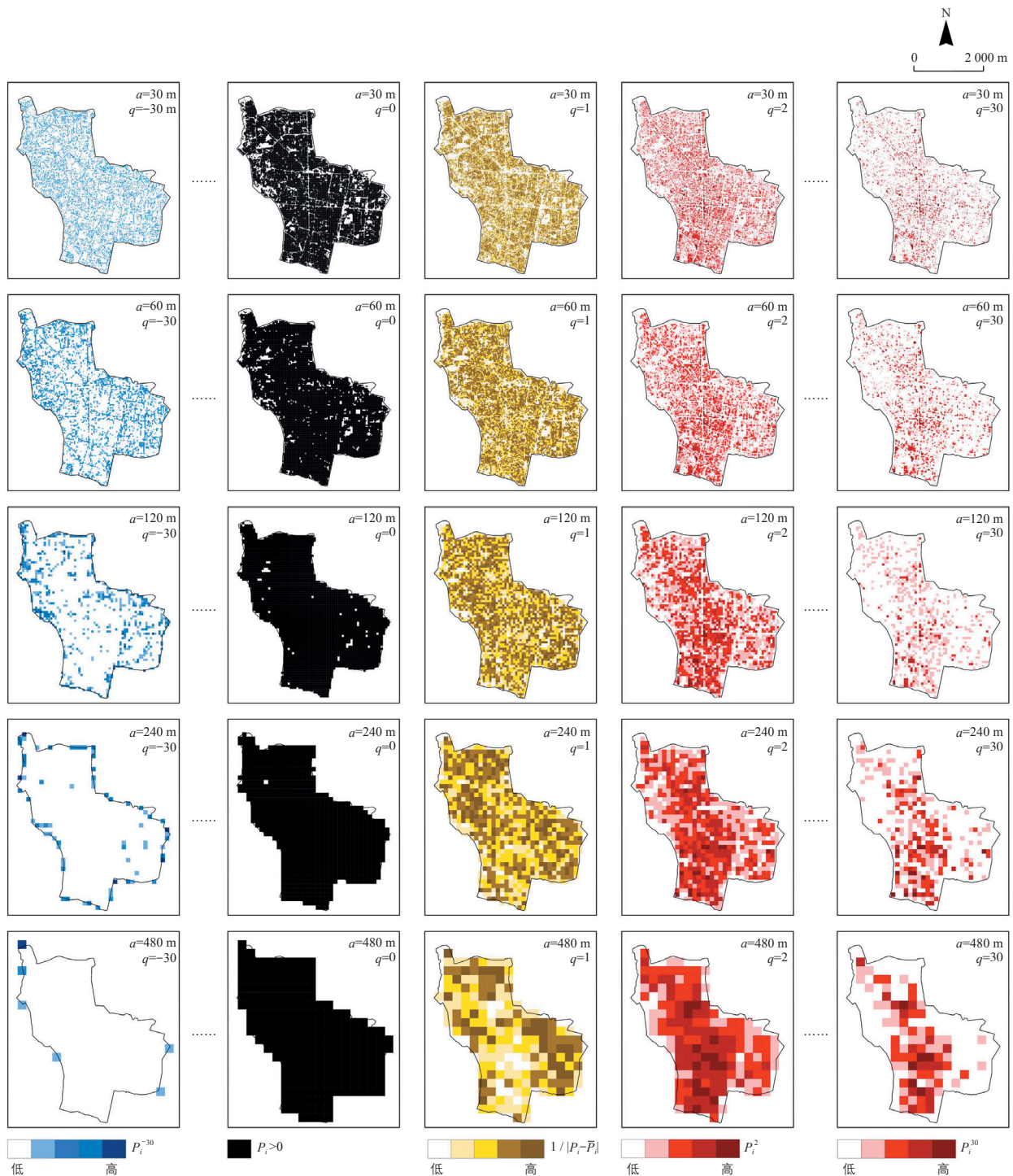


图6 南京老城市形态的多分形矩阵映射

域的分布均较为均衡,高集聚区域和低集聚区域的过渡都较为平缓,体现出扁平化、多中心、跨尺度自相似的关联组织结构。宏观尺度下,连片的历史街区和老旧小区显示出最高的关联集聚特征,但南京老城整体未表现出明显的异质性,高集聚区域分布均匀且与低集聚区域充分交融;随着研究尺度缩小,局部的集聚核心逐渐涌现,整体形态系统依旧保持完整;直到 30 m 的最小研究尺度,高集聚区域与低集聚区域的面积比例仍然与宏观尺度基本一致,集聚核心均匀散布在老城范围内的各个区位。

#### 4.4 谱形:宏观尺度的低密消散和高密凝聚特征

从整个矩阵来看,图 6 以第 3 列为中心,向左显示出南京老城低密度区域形态结构的跨尺度消散特征,向右则显示出高密度区域形态结构从边缘向内部的凝聚特征。

从谱形的极值来看,图 6 第 1 列显示出建筑最稀疏区域在全尺度下的结构缺失。微观尺度下,最稀疏区域在整个老城范围内均质分布,不存在显著的高值区或高值点,无法提炼出有效的形态结构信息;而随着研究尺度放大,最稀疏区域的总面积迅速均质缩减,且在缩减的过程中未显现出新的形态结构;从 120 m 到 240 m,最稀疏区域的总面积骤减,只剩零星散布在边缘的点状形态,在南京老城内部几乎已经消失。

图 6 第 5 列显示出建筑最密集区域从微观尺度到宏观尺度的凝聚过程。 $q=30$  的空间映射结构明显比  $q=2$  的更加清晰:微观尺度下,形成了许多密集核心以及围绕核心的相互独立的微观圈层;随着研究尺度放大,建筑最密集区域逐渐凝聚,最终形成一条清晰的沿中山南路和中山北路的弓形高密建筑带,且该高密建筑带仍占据南京老城范围内的很大面积,呈现出显著而鲜明的高强度形态特征。

## 5 讨论与结论

以南京老城为代表的具有长期发展历史的城市中心区以较大的建筑存量和较少的开放空间余量为主要特征:建筑存量表现为高填充性布局、均质连绵和扁平化集聚;开放空间余量表现为小尺度均布、大尺度破碎和向内渗透阻断。针对上述特征,笔者提出以下三点更新建议:(1)利用好连续、高贴线率的临街建筑资源,并串联均质分布的小微尺度开放空间,从而形成密集的步行网络,充分激发泛在的步行活力;

(2)街道与滨水空间是高密度建成环境下的“裂隙”,应结合中心区外部开放空间,通过拓宽裂隙或提升景观来串联内部散布的“孔隙”,优化开放空间体系;(3)以公共管理与公共服务用地为代表的城市边缘带区域,其开发强度较低、占据空间范围大且空间层次丰富,是中心区整体形态优化的关键存量,应尽可能开放其用地边界来融入整体形态结构之中。

本研究的创新主要包括两点:一是通过引入多分形方法,对城市形态的跨尺度整体性特征进行量化测度,赋予多分形方法关键指标的形态学含义,从而丰富城市形态学的研究工具,能够将城市形态的特征与问题定位到具体的尺度区间或密度区间;二是通过多分形的矩阵映射,提升多分形方法在空间方面的可解读性,改善了既有多分形方法主要通过数值和谱形分析的不足,实现了对具体空间区域的分析与诊断。

相比城市地理学领域的多分形应用研究,本研究通过提高数据精度、缩小研究范围,发现了极高的分形相关性、低密度区域形态破碎和高密度区域向上收敛等反常现象;与此同时,针对城市中心区是否存在多分形特征这一争议问题进行了验证,为中微观尺度的多分形研究提供了补充。城市形态学的内涵十分丰富,本研究仅从跨尺度的密度议题切入,未来还需要进一步结合高度、强度、类型等议题探讨城市形态的跨尺度特征。UPI

注:文中未注明资料来源的图表均为作者拍摄或绘制。

#### 参考文献

- [1] 宋亚程,张焯,韩冬青.基于“入径结构”的城市街区形态测度方法[J].城市规划,2024,48(3):98-106.
- [2] 彭坤焘,张雪.规划话语中空间尺度悬置现象的剖析与反思[J].国际城市规划,2021,36(4):10-16.
- [3] 金探花,杨俊宴,王德.从城市密度分区到空间形态分区:演进与实证[J].城市规划学刊,2018(4):34-40.
- [4] 刘鹏,丁凡.地块划分研究的源流、议题与展望[J].城市规划学刊,2022(4):43-50.
- [5] TAN X, HUANG B, BATTY M, et al. Urban spatial organization, multifractals, and evolutionary patterns in large cities[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2021, 111(5): 1539-1558.
- [6] VICSEK T. Fractal growth phenomena[M]. Singapore: World Scientific, 1992.
- [7] 田达睿,谭静斌.陕北黄土高原沟壑区城镇开敞空间分形秩序研究[J].城市规划,2020,44(7):38-45.
- [8] 陈彦光.城市地理研究中的单分形、多分形和自仿射分形[J].地理科学进展,2019,38(1):38-49.
- [9] SONG Z, JIN W, JIANG G, et al. Typical and atypical multifractal systems of urban spaces? using construction land in Zhengzhou from 1988 to 2015 as an example[J]. Chaos solitons & fractals, 2021, 145: 110732.
- [10] 郑文升,杜南乔,杨瑶,等.长江中游城市群空间结构的多分形特征[J].地理学报,2022,77(4):947-959.
- [11] 孙施文,冷方兴.上海城市边缘区空间形态演变研究:以闵行区莘庄镇为例[J].城市规划学刊,2017(6):16-24.
- [12] 尼科斯·塞灵格勒斯,刘洋.连接分形的城市[J].国际城市规划,2008,23(6):81-92.
- [13] CHEN Y, HUANG L. Modeling growth curve of fractal dimension of urban form of Beijing[J]. Physica a-statistical mechanics and its applications, 2019, 523: 1038-1056.
- [14] SONG Z J, CHEN Y, LI Y, et al. An analysis of the allometric and multifractal features of a development in the urban-rural area in the lower reaches of the Yangtze River: 2012 cross-sectional data of four provinces and one city[J]. Complexity, 2020, 2020: 6963827.

(下转第 112 页)

- human health[J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 518-22.
- [45] 刘伯初, 王兰. 城市食品环境对膳食行为及健康的影响: 研究综述与展望[J]. *国际城市规划*, 2024, 39(5): 1-10.
- [46] HAWKINS J L, THIRLAWAY, K J, BACKX K, et al. Allotment Gardening and other leisure activities for stress reduction and healthy aging[J]. *HortTechnology*, 2011, 21(5): 577-585.
- [47] JANUS E, SZEWCZYK-TARANEK B, SMROKOWSKA-REICHMANN A. Perceived functions of allotment gardens and their importance during the COVID-19 pandemic in Poland[J]. *Folia horticultrae*, 2022, 34(1): 51-63.
- [48] City Farmer, Canada's Office of Urban Agriculture. 44% of Vancouver households grow food, says city farmer[Z/OL]. (2002)[2024-10-29]. <https://www.cityfarmer.org/44percent.html>, 2002.
- [49] PRETTY J. How nature contributes to mental and physical health[J]. *Spirituality and health international*, 2004, 5(2): 68-78.
- [50] COLLINS C C, O'CALLAGHAN A M. The impact of horticultural responsibility on health indicators and quality of life in assisted living[J]. *HortTechnology*, 2008, 18(4): 611-618.
- [51] 王硕. 西藏城市老年人社会交往评价及其结构的研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2011.
- [52] 李志刚, 刘晔. 中国城市“新移民”社会网络与空间分异[J]. *地理学报*, 2011, 66(6): 785-795.
- [53] SHINEW K J, GLOVER T D, PARRY D C. Leisure spaces as potential sites for interracial interaction: community gardens in urban areas[J]. *Journal of leisure research*, 2004, 36(3): 336-355.
- [54] GEBHARD E, HAGEMANN N, HENSLER L, et al. Agriculture and food 2050: visions to promote transformation driven by science and society[J]. *Journal of agricultural and environmental ethics*, 2015, 28: 497-516.
- [55] HEAD L, MUIR P, HAMPEL E. Australian backyard gardens and the journey of migration[J]. *Geographical review*, 2004, 94(3): 326-347.
- [56] KLINDIENST P. The earth knows my name: food, culture, and sustainability in the gardens of ethnic Americans[M]. Boston: Beacon Press, 2006.
- [57] SOMMERFELD A J, WALICZEK T M, ZAJICEK J M. Growing minds: evaluating the effect of gardening on quality of life and physical activity level of older adults[J]. *HortTechnology*, 2010, 20(4): 705-710.
- [58] DOBSON M C, REYNOLDS C, WARREN P H, et al. “My little piece of the planet”: the multiplicity of well-being benefits from allotment gardening[J]. *British food journal*, 2020, 123(3): 1012-1023.
- [59] MOURÃO I, MOREIRA M C, ALMEIDA T C, et al. Perceived changes in well-being and happiness with gardening in urban organic allotments in Portugal[J]. *International journal of sustainable development & world ecology*, 2019, 26(1): 79-89.
- [60] TEI F, BENINCASA P, FARNESELLI M, et al. Allotment gardens for senior citizens in Italy: current status and technical proposals[J]. *Acta horticultrae*, 2010(881): 91-96.
- [61] A survey of allotment waiting lists in England[R]. Transition Town West Kirby with National Society of Allotment and Leisure Gardeners Ltd, 2009.
- [62] KUC O, JAKOWLEW A. Ustawa o rodzinnych ogrodach działkowych: komentarz[M]. Warszawa: LexisNexis Polska, 2014.
- (上接第 94 页)
- [15] FRANKHAUSER P, TANNIER C, VUIDEL G, et al. An integrated multifractal modelling to urban and regional planning[J]. *Computers environment and urban systems*, 2018, 67: 132-146.
- [16] CHEN Y, WANG J. Multifractal characterization of urban form and growth: the case of Beijing[J]. *Environment and planning b: planning & design*, 2013, 40(5): 884-904.
- [17] SALAT H, MURCIO R, ARCAUTE E. Multifractal methodology[J]. *Physica a: statistical mechanics and its applications*, 2017, 473: 467-487.
- [18] WANG J, LU F, LIU S. A classification-based multifractal analysis method for identifying urban multifractal structures considering geographic mapping[J]. *Computers, environment and urban systems*, 2023, 101: 101952.
- [19] SAEEDIMOGHADDAM M, STEPINSKI T F, DMOWSKA A. Rényi's spectra of urban form for different modalities of input data[J]. *Chaos, solitons & fractals*, 2020, 139: 109995.
- [20] SALINGAROS N A. Fractals in the new architecture[J]. *Archimagazine*, 2001: 1-6.
- [21] 章屹, 郭佳寅. 超越经验性描述: 以凸空间分布特征解析城市建设艺术中的尺度法则[J]. *国际城市规划*, 2023, 38(3): 1-13.
- [22] 段进, 姜莹, 李伊格, 等. 空间基因的内涵与作用机制[J]. *城市规划*, 2022, 46(3): 7-14, 80.
- [23] ZOGRAFOS C, KLAUSE K A, CONNOLLY J, et al. The everyday politics of urban transformational adaptation: struggles for authority and the Barcelona superblock project[J]. *Cities*, 2020, 99: 102613.
- [24] 杨俊宴, 史宜. 城市规划语境下密度研究的源流演化与展望[J]. *国际城市规划*, 2023, 38(2): 1-7.
- [25] 沈尧, 徐怡怡, 刘乐峰. 网络渗流视角下的城市肌理识别与测度研究[J]. *城市规划学刊*, 2021(5): 40-48.
- [26] 吴志强, 周咪咪, 刘琦, 等. “跨代孪生”: 映射城市生命特征[J]. *城市规划学刊*, 2024(1): 9-17.
- [27] LAGARIAS A, PRASTACOS P. Comparing the urban form of South European cities using fractal dimensions[J]. *Environment and planning b: urban analytics and city science*, 2020, 47(7): 1149-1166.
- [28] ZHAO F X, LIU J L, ZHOU Y. Sandbox edge-based algorithm for multifractal analysis of complex networks[J]. *Chaos, solitons & fractals*, 2023, 173: 113719.
- [29] 张宸铭, 李灵军, 高尚, 等. 交通土地一体化的开封市多中心结构分形研究[J]. *城市规划*, 2022, 46(3): 63-73.
- [30] THOMAS I, FRANKHAUSER P, BADARIOTTI D. Comparing the fractality of European urban neighbourhoods: do national contexts matter?[J]. *Journal of geographical systems*, 2012, 14(2): 189-208.
- [31] BATTY M, LONGLEY P A. *Fractal cities: a geometry of form and function*[M]. London: Academic Press, Harcourt Brace & Company, Publishers, 1994.
- [32] LONG Y, CHEN Y. Multifractal scaling analyses of urban street network structure: the cases of twelve megacities in China[J]. *PLoS One*, 2021, 16(2): e0246925.
- [33] PAVON-DOMINGUEZ P, ARIZA-VILLAVARDE A B, RINCON-CASADO A, et al. Fractal and multifractal characterization of the scaling geometry of an urban bus-transport network[J]. *Computers environment and urban systems*, 2017, 64: 229-238.

(本文编辑: 高淑敏)

(本文编辑: 高淑敏)