

# 基于圈层结构的游客活动空间边界提取新方法

吴朝宁<sup>1</sup>, 李仁杰<sup>1,2</sup>, 郭风华<sup>3,4</sup>

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院, 石家庄 050024; 2. 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024; 3. 河北省科学院地理科学研究所, 石家庄 050011; 4. 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 石家庄 050011)

**摘要:** 准确刻画游客活动空间边界对于优化景区结构、实施界限管控、提高资源利用效益均有重要意义。由于游客行为的复杂性与边界模糊性, 利用传统地理边界提取方法难以有效识别游客活动空间边界。基于层次聚类算法优化后的Delaunay三角网进行核密度估计, 解决了多尺度下点核密度对空间边界拟合不精确的问题, 同时借鉴圈层结构理论, 依据游客空间集聚特征建立景区层次结构, 利用大量游客长时间签到蕴含的时空信息, 分析游客空间分布扩张规律, 挖掘地理要素关系, 建立“Hie-Density”模型, 提出基于圈层结构理论的游客活动空间边界定量提取新方法。本文通过微观视角下圈层子系统的协同作用探究主体系统的宏观演化, 证明了“Hie-Density”模型支持对多种游客分布模式进行描述, 同时能够依据模型变化曲线定量识别游客活动最佳边界、空间集散状态、中心分裂特征及边界演化方向。多案例实证表明, 本方法适用于各类景区的多尺度复杂游客活动空间边界提取, 为地理时空数据挖掘提供了新视角和新方法。

**关键词:** 游客活动空间; 边界提取; 圈层结构理论; Hie-Density模型; 核密度

DOI: 10.11821/dlxb202106015

## 1 引言

旅游行为是旅游地理学研究的重要事象, 深入挖掘旅游行为特征, 不仅能有效揭示旅游者与环境交互的特征和机理, 还可作为旅游资源评价和开发的重要依据<sup>[1]</sup>。根据涉及空间大小, 旅游行为分为大、中、小三个尺度, 以往研究多集中在中、大尺度上注重旅游者在目的地间的旅游活动。例如探究国家、城市间旅游者行为特征<sup>[2]</sup>、旅游空间格局<sup>[3]</sup>、空间模式<sup>[4-5]</sup>、决策动力机制<sup>[6]</sup>等, 并将旅游空间行为概括为单旅游目的地、旅游集散地、环形、轮毂与辐辏等模式<sup>[7]</sup>。在宏观视角下基于统计假设建立的旅游复杂系统模型<sup>[8]</sup>、旅游功能系统模型<sup>[9]</sup>、旅游地理系统模型<sup>[10]</sup>等理论模型, 有助于深化旅游空间行为认知, 但对运动模式的复杂性、行为空间多样性的关注不足。近年来, 高精度时空数据与精细化模型支撑下的小尺度旅游空间行为研究逐渐增多, 更关注游客在景区内部的空间行为动态性和随机性分析。相关成果已成为划定旅游发展红线<sup>[11]</sup>、旅游服务建设<sup>[12]</sup>、旅游生态评价<sup>[13]</sup>、文化遗产保护<sup>[14]</sup>等问题的重要支撑。基于位置服务 (Location Based Service,

收稿日期: 2019-07-27; 修订日期: 2020-10-03

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41471127, 41171105); 河北省杰出青年基金培育项目(D2015205208); 河北省高层次人才资助项目(A2016001130) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41471127, No.41171105; Hebei Science Fund of Distinguished Yong Scholars, No.D2015205208; Foundation for Talent Training Project in Hebei Province, No.A2016001130]

**作者简介:** 吴朝宁(1993-), 男, 河北石家庄人, 硕士生, 主要从事地理信息建模研究。E-mail: wzn19930319@163.com

**通讯作者:** 李仁杰(1975-), 男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 主要从事GIS与旅游地理研究。E-mail: lrjgis@hebtu.edu.cn  
1537-1552 页

LBS) 的新数据源, 为旅游空间行为研究提供了新机遇。Girardin 等提出“旅游数字足迹”概念, 并基于定位数据分析旅游者密度和景点吸引力<sup>[15]</sup>。Shoval 等综合问卷调查和 GPS 手段分析认知空间与行为空间的相关性<sup>[16]</sup>。Meijles 等分析了景区旅游空间行为特征与地理要素关系<sup>[17]</sup>。一些研究利用微博签到<sup>[18]</sup>、地理标记照片<sup>[19]</sup>、网络游记<sup>[20]</sup>等多源数据, 通过引力模型<sup>[21]</sup>、马尔科夫链模型<sup>[22]</sup>、离散选择模型<sup>[23]</sup>、路径选择模型<sup>[24]</sup>、机器学习<sup>[25]</sup>等, 揭示旅游空间行为规律和机理。

地理学的活动空间描述一定时空约束下人的空间移动与可达性特征及其度量<sup>[26]</sup>。景区具有明确的物理边界和特定空间尺度<sup>[27]</sup>, 但不同功能结构的景区对游客活动空间导引机制不同, 游客活动空间边界与景区物理边界往往存在明显差异, 游客活动空间边界也成为旅游者与环境交互关系的重要表征。准确、定量提取游客活动空间边界, 可以为旅游活动空间测度提供新指标, 协调多因素作用导致的景区边界冲突和边界压力, 对于揭示景区旅游者行为特征、空间认知及其演变过程等具有重要意义, 对智慧旅游和精细化景区建设具有潜在应用价值。

当前关于人的活动边界识别研究中, 主要围绕小尺度粗略空间计算展开, 采用的方法包括缓冲区、标准差椭圆、最小多边形<sup>[28-30]</sup>等, 对活动空间范围准确性描述不够, 而手动划定边界的主观性较强, 导致游客活动规律研究存在较大误差和局限性。许泽宁等提出综合 LBS 多源时空数据识别城市建成区边界的“Densi-Graph”方法<sup>[31]</sup>, 基于兴趣点(Point of Interest, POI) 的核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE) 等值线理论半径与密度值变化曲线拐点, 识别临界值并定义边界。“Densi-Graph”方法对游客活动空间边界提取提供了很好思路, 但仍存在两个问题: 核密度估计没有考虑空间可达性, 造成局部边界地理意义缺失; 描述复杂多核心游客活动将出现曲线剧烈波动, 边界阈值识别困难。

受地理要素影响, 旅游活动具有核心极化、边缘扩散、动态均衡等演变特征<sup>[32]</sup>, 活动强度随距离衰减存在梯度变化规律, 形成不同结构的圈层系统。圈层结构理论可以描述旅游空间规律性、向心性的层次变化特征, 刻画旅游活动的同心性<sup>[33]</sup>。Miossec 综合多空间行为因素提出了旅游活动功能圈层特征<sup>[34]</sup>; David 依据旅游活动距离衰减规律划分旅游地圈层带<sup>[35]</sup>; Fennell 通过核心与边缘差异总结了旅游活动层次性规律<sup>[36]</sup>; 吴必虎提出了环城游憩带理论<sup>[37]</sup>。相关研究主要是对宏观特征和整体格局的刻画, 较少关注旅游系统微观结构和旅游行为相互作用。

旅游地内部空间结构表现为旅游者在距离约束下相互作用形成的空间聚集状态, 是游客行为在地理空间上的投影<sup>[38]</sup>。本文引入圈层结构理论思想, 构建了“Hie-Density”模型, 在模型基础上提出了利用 LBS 数据提取游客活动空间边界的新方法。实际应用中, 基于优化的三角网核密度估计结果建立旅游活动圈层结构, 减小密度累积对空间可达性影响; “Hie-Density”模型则考虑旅游地内部结构和空间尺度, 通过各圈层边界面积与包含游客量的变化关系, 引入熵值描述游客时空分布曲线变异规律, 确定最优活动空间边界, 解决多尺度下空间边界拟合不精确、缺乏地理意义的问题。本文为定量描述游客活动空间边界及其模式提供了新方法, 也为旅游地研究提供了新视角。

## 2 理论和研究方法

### 2.1 旅游地圈层结构

圈层结构理论注重系统内不同层次活动的空间分化, 揭示区域发展的空间层次性、

向心性特征,多基于地理要素的集聚现象进行圈层划分,不同划分方式基于不同指标阈值划分层级,如基于距离<sup>[39-40]</sup>、密度梯度<sup>[41]</sup>等。

Wolfe将圈层结构理论引入旅游研究,以“距离衰减法则”为基础,通过旅游活动流向和规模描述旅游地圈层特征<sup>[42]</sup>。旅游圈层系统围绕特定聚集中心以一定梯度向外扩展,以单一或多个集散区为核心组成具有一定范围的空间协作组织<sup>[43]</sup>,旅游地内部各聚集体的相互作用推动宏观系统演化发展。众多学者探索了环境影响下旅游圈层结构的分异规律<sup>[44-45]</sup>,并纳入诸多影响因素建立和扩展旅游空间模型<sup>[46]</sup>,总结了旅游圈层的辐射特征及旅游空间分布模式<sup>[47]</sup>。圈层系统随旅游地环境变化不断调整,通常发展较成熟的旅游地具有完备、均衡的功能体系,拥有多个旅游热区,外部环境约束下的边界发展速度缓慢;成长型旅游地的空间组织较简单,内部结构变化显著,边界发展速度快、周期短。

游客时空行为与旅游地结构具有高耦合性,不同景观类型旅游地的圈层分异明显,由密度高值向密度低值区域扩散,形成具有一定间隔层次的密度梯度。微观尺度下游客活动空间集聚模式不同于传统研究,游客活动受POI影响具有明显的多核心圈层特征,各圈层子系统有机联系和相互制约,引导宏观主体圈层不断演化,并决定系统的发展方向。本文基于各地理要素分析旅游圈层扩张特征,定量描述圈层系统的演化机制,为准确刻画旅游空间行为提供可行参考。

## 2.2 游客分布信息熵

熵反映系统混乱程度,可以有效测度系统结构复杂性和均衡性,信息熵作为平均信息量的量度,是对事件随机概率分布的定量计算<sup>[48]</sup>。熵也可以作为表现特定区域地理时序现象的方法,描述系统发展是分散还是紧凑<sup>[49]</sup>。人口是定义熵模型的重要指标,假设整个系统划分为 $n$ 个区域, $p_i$ 为子区域 $i$ 的人口数量占人口总量的比例,熵模型定义为:

$$H_n = -\sum_{i=1}^n p_i \log(p_i) \quad (1)$$

由熵模型可知,区域内人口密度增大意味着人口集中程度增高,进而导致熵值减小,因此人口集聚特征应与熵值成反相关关系<sup>[50]</sup>。在特定情况下,人口空间分布呈现单一中心聚集时,整个系统归为一体,熵值为0;当各子区域人口数量相等,即 $p_1 = p_2 = \dots = p_i = 1/n$ 时,表明整个系统人口分布达到了均衡状态,熵值达到最大。本文使用信息熵描述旅游地游客分布均衡性,并作为构建游客活动空间边界识别模型的重要标量,是影响阈值的关键系数,对于探究游客活动空间结构至关重要。

核密度估计呈现的局部区域密度峰值,代表了该区域游客联系最紧密、聚集度最高的位置,形成游客分布中心,其识别方法可参考Chen等的研究<sup>[51]</sup>。Voronoi图是目前地理空间区域划分的主要手段<sup>[52]</sup>,本文利用Voronoi图特性,以游客分布中心为起点实现景区空间区域划分,通过各子区域内游客分布情况计算熵值。

## 2.3 ASCDT层次空间聚类

基于Delaunay三角网的自适应层次空间聚类算法(Adaptive Spatial Clustering Algorithm based on Delaunay Triangulation, ASCDT)利用整体边长特征与各点位邻接的局部边长特征识别阈值<sup>[53]</sup>,通过删除局部过长边来聚合点簇。采用Delaunay三角网构建游客邻近关系,并基于ASCDT对三角网进行优化,使用优化三角网代替点要素进行核密度估计,可解决点核密度估计用于游客活动空间表征方面存在的游客聚集处密度形态扩张、忽视离散分布区域的问题,更准确地拟合游客分布空间。

对游客签到数据建立Delaunay三角网,游客间的联系强度会随距离增加而减小,其活动范围内表现出整体三角网分布过于扩张的特点,因此需要从Delaunay三角网中删除



过长边,即删除与游客签到点的空间分布拟合较差的边缘。若以游客签到点集 $P$ 中的某签到点 $p_i$ 为起点,则 $p_i$ 邻接边删除阈值定义为:

$$Cut\_Value(p_i) = \mu \left( \frac{Mean(P)}{Mean(p_i)} Std(P) + Mean(P) \right) \quad (2)$$

式中:三角网内所有边长的平均值记作 $Mean(P)$ ,标准差为 $Std(P)$ ;与 $p_i$ 直接连接的三角网边长平均值记作 $Mean(p_i)$ ;为更灵活地实现对游客活动范围合理覆盖,引入尺度因子 $\mu$ ,以适应不同空间尺度和提取结果精度,一般取值范围是0.5~3.5,本文设定标准尺度因子 $\mu$ 值为1.0。若与 $p_i$ 直接连接的某条边长超过删除阈值,则这条边属于全局过长边并进行删除。

## 2.4 基于优化三角网的核密度估计

KDE是求解给定样本集合分布密度的方法,考虑了空间距离衰减作用,可以有效表征空间实体的集聚分布特征,其特点是与核心要素距离越近的核密度值越大<sup>[54]</sup>,核密度值随中心辐射距离的增大逐渐减小,通过衰减带宽范围内的局部空间表征地理现象的空间影响域,属于非参数检验方法。密度函数表示为:

$$f_h(p) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{nh^2} k\left(\frac{p-p_i}{h}\right) \quad (3)$$

式中: $f_h(p)$ 为空间位置 $p$ 处的核密度计算函数; $h$ 为带宽(又称为窗宽或平滑参数); $n$ 为与位置 $p$ 的距离小于或等于 $h$ 的实体数目; $k(\cdot)$ 函数表示核概率密度函数,通常选用方差为 $\sigma^2$ 的标准 Gaussian 核函数,带宽 $h$ 的选择对核密度分析结果有关键影响,带宽值在一定范围内对数据空间聚集的表达是较为合理的<sup>[55]</sup>。

KDE可以有效表征空间实体的集聚分布特征,但由于点密度聚类是通过定义搜索区域内包含实体的数量来判断密度连通性以融合点簇<sup>[56]</sup>,忽略了各种地理空间约束的可达性差异,因此难以对线性结构、多中心结构或空间聚集尺度分异较大的游客活动空间进行合适的带宽选择。带宽过小,导致结果碎化,带宽过大,导致高密度区域形态扩张,使划定的游客空间边界范围扭曲(图1a)。

研究旅游活动分布的空间形态特征,首先是解决基础要素的拟合性问题,因此有必要对核密度估计进行优化。本文以 ASCDT 优化后的三角网为基础要素进行核密度估计,弱化了空间集聚和带宽累积对边界扩张的影响,对游客活动空间的耦合性表达要优于传统点核密度;同时优化后的核密度注重游客在空间上的相互联系和形态分布,也弱化了传统点要素核密度估计的密度极化现象(图1b)。游客分布集散度多受景观类型、地形等因素影响,为实现核密度估计对不同研究空间的适用性,本文核密度估计带宽采用 ArcGIS 10.5 平台的最优

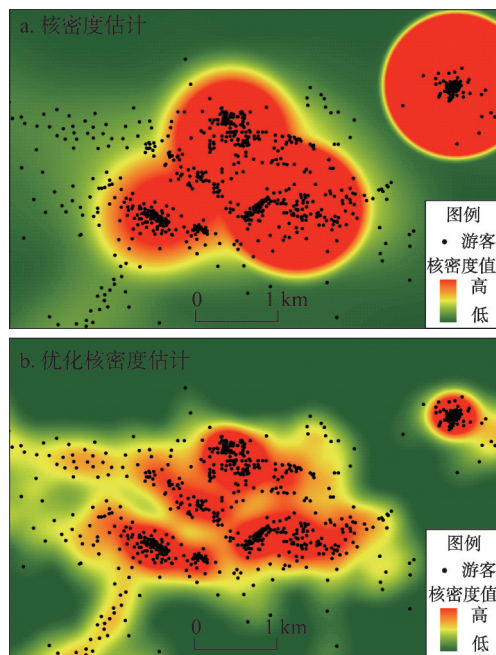


图1 传统点要素核密度估计(a)与优化核密度估计(b)对比

Fig. 1 Comparison of kernel density estimation based on traditional method (a) and optimized triangulation (b)

搜索带宽策略进行自适应：

$$h_{adapt} = 0.9 \min \left( L_m \sqrt{\frac{1}{\ln(2)}}, D \right) \left( \frac{1}{n} \right)^{0.2} \quad (4)$$

式中： $D$ 代表平均中心与数据点之间距离的标准差，其中平均中心的坐标是所有数据点坐标的平均值； $L_m$ 是平均中心与所有数据点之间的距离中值； $\min(a, b)$ 代表取 $a$ 、 $b$ 两者的较小值； $n$ 是数据总量。

## 2.5 “Hie-Density”模型定义

**2.5.1 游客活动空间圈层划分** 圈层结构理论通过圈层划分把握宏观系统格局，利用系统的中心性和距离衰减规律探究地理空间特征。游客活动空间由核心向外围呈一定聚集的向心空间层次，圈层划分精度与研究尺度密切相关。本文为实现游客活动空间边界精确提取，构建与LBS数据空间分布具有高拟合性的圈层结构。核密度等值线是以核密度峰值为中心，沿密度梯度向四周扩展的闭合曲线，其空间形态与游客密度分布特征联系紧密。在游客集聚程度较高的区域附近，等值线距离相对密集，随着与游客聚集地带距离不断增加，等值线围成的闭合曲线范围不断扩大，核密度等值线反映了签到数据密度分布形态随密度值变化的规律，因此使用核密度等值线划分游客活动空间圈层。

本文使用自然间断点分级法对优化后的核密度估计结果分级，选取与每级栅格像元集合距离最近的等值线作为该级圈层边界，以达到类间差异最大化效果。具体做法是：根据自然间断点分级的核密度栅格，计算第 $E$ 级栅格值阈范围 $[\min_E, \max_E)$ 内每个像元中心与核密度等值线间的欧式距离，提取出与第 $E$ 级栅格象元中心平均欧式距离最近的核密度等值线要素集合 $L(E)$ ， $L(E)$ 则作为游客活动空间的第 $E$ 级圈层边界，以此建立圈层边界与圈层内游客数目间的关系。

**2.5.2 “Hie-Density”模型** 游客的空间分布受旅游景观类型和结构影响，形成不同集聚分布模式的旅游圈层系统。如图2a所示，系统1代表均匀扩张的圈层系统，系统2和系统3具有一定向心集中性，其中系统3的集聚程度大于系统2。本文基于旅游地的集聚演化过程，对圈层扩张时的地理要素分布特征进行分析：

(1) 圈层边界扩张特征（图2b）：定义第 $E$ 级圈层边界 $L(E)$ 的面积为 $S_E$ ， $\sqrt{S_E}$ 代表第 $E$ 级边界扩张半径，随着圈层边界由核心向外围不断扩散，扩张半径逐渐增大，若游客在空间上均匀扩张， $\sqrt{S_E}$ 增长率为定值，整个圈层系统呈现等距离间隔的同心圆结构，此时扩张半径曲线表现为一条直线 $l_1$ ；实际情况圈层系统多呈现“核心密集—外围稀疏”的辐射特征，扩张半径增长率随圈层扩张不断增大，呈“洛伦兹曲线”式增长，且

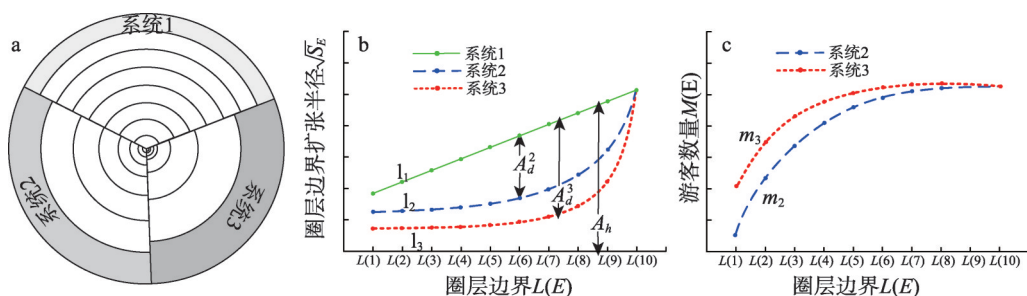


图2 各地理要素随不同集聚模式的圈层系统变化曲线

Fig. 2 Curve of geographical factors for circle systems in different agglomeration modes (expansion radius of circle structure (b) and number of tourists (c))

增长趋势不可逆。同时在整个系统规模不变的情况下,若游客继续向核心地带聚集,圈层系统整体向内收敛,即系统2向系统3演化,扩张半径变化曲线在二维坐标轴上会逐渐向右下方突出,曲线整体更靠近坐标横轴( $l_2$ 至 $l_3$ )。令圈层系统均匀扩张时的 $\sqrt{S_E}$ 曲线 $l_1$ 与坐标横轴围成的面积为 $A_h$ , $l_1$ 与实际情况的 $\sqrt{S_E}$ 曲线之间围成的面积为 $A_d$ ,则 $A_d/A_h$ 的值随系统集聚度的升高而增加。

(2) 圈层包含游客数量特征(图2c):各圈层范围内包含游客数量 $M(E)$ 随圈层扩张持续增加,但增长速度越来越慢,游客量增长率明显降低,曲线具有显著拐点;整个系统集聚度的增加会导致游客数量曲线向坐标平面左上方迁移( $m_2$ 至 $m_3$ ),当所有游客集中于圈层核心时,系统集聚度达到最大。

根据上述两种曲线形态特征,随着游客分布与核心区距离增加,圈层内包含游客量的增长率与圈层扩张半径增长率的变化趋势相反,游客量增长率不断降低,扩张半径增长率持续升高,使第 $E$ 级圈层边界 $L(E)$ 内的游客量与扩张半径基于某种关系的熵量存在理论最大值,代表最大空间利用程度,以此作为识别游客活动空间边界的阈值(图3),进而构建游客量与扩张半径变化关系模型。游客的集聚程度或空间集散结构,决定了游客量与扩张半径熵值关系极值的出现时机。

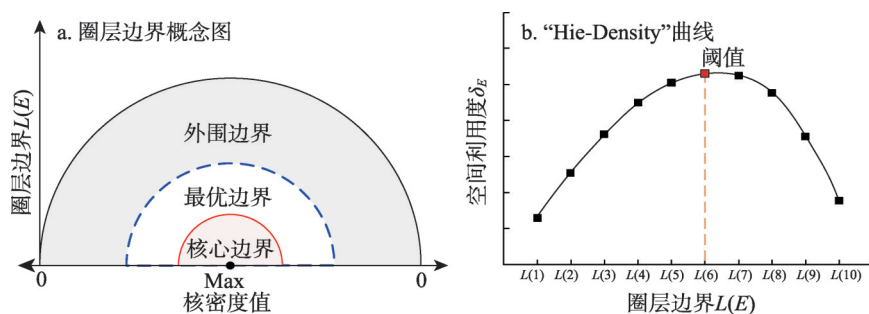


图3 圈层边界概念图和“Hie-Density”曲线

Fig. 3 Conceptual map of circle boundary and curve of “Hie-Density” model

基于上述分析,本文提出了游客活动空间边界提取新方法“Hie-Density”,基本思路是:定义空间利用度描述各级圈层范围内游客分布表征的空间利用程度,指示圈层内游客聚集水平,各级圈层中的最大空间利用度作为识别阈值,对应的圈层边界即是游客活动的最佳空间边界。由于各景区规模不同,存在游客数量级和量纲差异,因此需要对各参数进行无量纲化处理,即 $M_E$ 代表第 $E$ 级圈层内游客数量 $M(E)$ 占总游客量的比例, $R_E$ 为第 $E$ 级圈层扩张半径 $\sqrt{S_E}$ 占最大半径的比例。地理学重力模型指出,地理空间中人口和各类活动空间分布呈现由中心向外围区域逐渐降低的规律,人口密度与距离呈负指数函数相关关系( $1/\exp(\cdot)$ )<sup>[57]</sup>,由此构建第 $E$ 级边界空间利用度计算公式:

$$\delta_E = \lambda \left( \frac{M_E}{\exp(R_E)} \right) \quad (5)$$

式中: $\lambda$ 代表集聚系数,用来识别游客分布模式和集聚状态, $\lambda$ 定义为:

$$\lambda = \frac{c}{(H_n + 1)} \quad (6)$$

式中: $H_n$ 代表游客分布熵值,用于描述游客空间分布均衡度; $c$ 为前文描述的 $A_d/A_h$ 。经计算可知圈层系统均匀扩张时 $\lambda$ 值为0,游客空间分布越均衡, $\lambda$ 值越小;游客分布越聚集, $\lambda$ 值越大。



**2.5.3 基于“Hie-Density”的多圈层结构演变模式分析** 不同旅游地游客活动空间会因其聚集特征差异表现出不同的空间模式，旅游圈层系统宏观上围绕主体核心向外扩张，是多个子系统相互作用的复杂圈层体。圈层系统的动态性体现在不断适应旅游地环境的变化，通过提升旅游要素品质、增加旅游聚集体数量、促进旅游结构更新来推动系统重组和发展。游客活动特征与旅游地发展阶段有关，旅游地系统演化可分为空间聚集体形成、空间聚集体增长和空间聚集体涌现3个阶段<sup>[58]</sup>。为验证“Hie-Density”模型，分别基于不同视角讨论圈层系统演化过程中的“Hie-Density”曲线变化特征（图4，表1）。

（1）单核心圈层结构集聚程度演变模式（图4a）：游客活动空间只有一个聚集中心，圈层边界由密度高值区域向密度低值区域扩散，圈层系统均匀扩张时的集聚系数 $\lambda$ 值为0，此时“Hie-Density”曲线是恒等于0的直线（Case1）；在系统规模不变前提下，随着游客分布集聚程度增加（Case2至Case3）， $\lambda$ 值升高，“Hie-Density”曲线峰值升高，阈值点左移，最优边界更靠近核心区域。

（2）多核心圈层结构集聚程度演变模式（图4b）：实际的游客活动空间往往有多个聚集中心，每个中心形成一个圈层子系统，中心数量增多使原有系统向更均衡方向演化，熵值随系统均衡度升高而增大，集聚系数 $\lambda$ 值随之减小，“Hie-Density”曲线整体降低，峰值下降。若系统衍生更多子系统，整体空间利用度将继续下降，曲线峰值对应的阈值可能右移，最优边界更靠近外围区域。

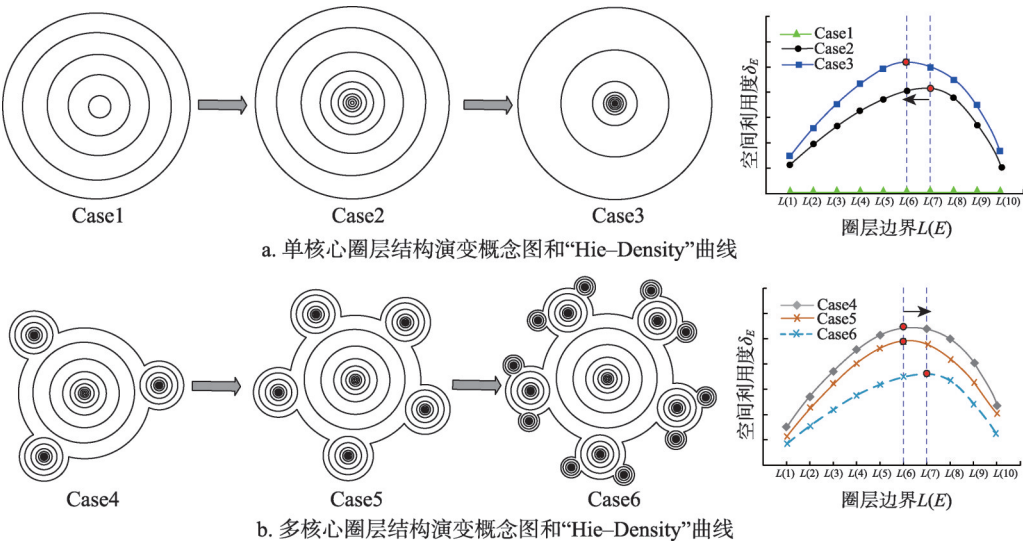


图4 基于“Hie-Density”模型描述的不同圈层结构演变模式分析  
Fig. 4 Analysis of evolution patterns in different structures for circle systems by the "Hie-Density"

表1 不同系统演变模式下各模型参数对比  
Tab. 1 Comparison of parameters for each system in different evolution modes

演变模式	$H_n$	$\lambda$	$\text{Max}(\delta_E)$
匀质结构	$H_n^{\text{Case1}} = 0$	$\lambda^{\text{Case1}} = 0$	$\delta_E^{\text{Case1}} = 0$
单核心结构	$H_n^{\text{Case2}} = H_n^{\text{Case3}} = 0$	$\lambda^{\text{Case2}} < \lambda^{\text{Case3}}$	$\delta_E^{\text{Case2}} < \delta_E^{\text{Case3}}$
多核心结构	$H_n^{\text{Case4}} < H_n^{\text{Case5}} < H_n^{\text{Case6}}$	$\lambda^{\text{Case4}} > \lambda^{\text{Case5}} > \lambda^{\text{Case6}}$	$\delta_E^{\text{Case4}} > \delta_E^{\text{Case5}} > \delta_E^{\text{Case6}}$

注：Max( $\delta_E$ )代表最大空间利用度。

圈层子系统的发展推动整体圈层系统演化,系统中心数量增多,说明游客分布更分散,形成空间结构更复杂、分布更均衡的旅游聚集体;系统中心数量减少,说明游客分布更集中,圈层系统聚集度更强,空间结构更简单。通常在景区核心景点处游客密度值较高,随着空间距离的增加密度值不断衰减,这种密度变化规律会因为旅游地内某个热点区游客数目增加而进一步极化,从而弱化了周边子区域对整体的影响,即宏观上圈层系统向集聚程度更高方向演化,“Hie-Density”峰值升高,阈值点左移。在宏观集聚效应和微观空间分异的共同作用下,“Hie-Density”曲线会依据这些演变特征进行偏移。

### 3 实证分析及方法验证

#### 3.1 案例样本特征与数据来源

理论上,“Hie-Density”对LBS数据具有良好适应性,对数据规模、空间形态等均无要求,在数据分布较稀疏或数据规模较小的环境下,也具备高拟合性和边界表达性。但由于LBS数据在时间、空间等多重因素共同作用下存在数据代表性问题<sup>[59]</sup>,本文对全国32个景区进行了初步的实证和模拟研究,发现签到数量与景区客流量变化趋势耦合性较高、时间跨度较长的签到数据空间表达性较好。因此,微博签到数据可以反映游客分布特征<sup>[60]</sup>,签到数据量越大,越能支撑旅游行为特征的精细刻画;较短时间序列签到数据受旅游季、天气等影响,存在部分时段数据稀疏,只能反映局部游客行为特征,尤其在客流规模较小的景区,可能导致签到表征的游客活动空间与实际活动空间产生偏斜。

为验证“Hie-Density”模型在不同类型和不同规模景区游客活动空间边界提取的适用性,本文从景观类型、景区规模、客流量度、路线形态和游览模式等视角,选取五台山、三清山、九寨沟、凤凰古城、大理古城5个不同类型案例进行实证分析。五台山、三清山、九寨沟是规模较大的山岳型风景区,以线性游览路线为主,总面积均在500 km<sup>2</sup>以上,涉及地貌、森林、河流、湖泊、建筑等景观。其中三清山地势高差较大,多峰林、悬崖,游览形式以登山、索道为主;五台山山峦绵亘,地貌复杂,游客活动范围较广,以徒步为主;九寨沟景观组合多样,观光车与徒步结合为主导游览模式。凤凰古城、大理古城是规模较小的人文景区,呈现网状游览路线,核心城区分别占地约1 km<sup>2</sup>和3 km<sup>2</sup>,以特色建筑、民俗风情等景观为主。其中大理古城布局规则,游客集中于城内街道;凤凰古城地形复杂,沱江穿城,地表切割破碎,多陡坡和高丘。通常自然风景区范围大,聚集中心数目较少,空间格局连续性较强,游客分布状态较为单一;而人文景区空间范围小,内部结构复杂,游客活动沿路网分布,POI对游客具有较强引力,可能出现大量聚集中心,局部可呈现密度极化态势,整体表现为聚集中心较多。

本文利用新浪微博商业接口获取5个旅游地的游客签到数据,时间跨度为2012年1月—2018年12月共7年,包括51万个用户,共计66万条微博,涉及用户ID、发布时间、经度、纬度、微博内容等信息。对所有微博签到数据的WGS84地理坐标转换成墨卡托投影坐标,以便后续的空间计算。

#### 3.2 各景区游客数量和边界扩张特征

由于不同景区各地理要素存在数量级的差异,因此使用 $R_E$ 和 $M_E$ 对各景区的圈层边界扩张半径和游客签到量的变化趋势进行比较。 $R_E$ 和 $M_E$ 能将不同景区要素的扩张情况反映至同一水平,消除景区规模和签到量对数据分析的影响。

对比各景区圈层边界扩张半径变化特征(图5a),由核心至外围扩张过程中,扩张半径增长率持续增加。五台山、三清山、九寨沟3个自然风景区的平均集聚系数 $\lambda$ 达到



0.1184, 而人文景区 $\lambda$ 平均值仅为0.0627, 前者明显高于后者。同时自然风景区 $R_E$ 表征的扩张半径曲线整体位于两个人文景区下方, 曲线向坐标系右下方突出, 说明自然风景区游客分布整体比人文景区聚集性更高。5个景区中, 五台山曲线处于最下方, 曲线弯曲程度最高, 说明其游客活动形成的圈层系统最为聚集; 大理古城曲线则整体位于最上方, 圈层系统呈现更均衡的扩张态势, 主要受景区内大量POI影响, 游客活动重心围绕大量旅游吸引节点均衡分布。

观察各景区内的游客数量沿圈层结构的扩张情况(图5b), 整体游客数量增长速度越来越慢, 五台山的曲线变化拐点最突出, 表明其游客数量变化梯度明显, 分布集中性强的特点; 三清山游客数量变化特征相对平缓, 而九寨沟、凤凰古城、大理古城的景点较多, 且基础设施完善, POI和旅游特色观光较多, 景区内各旅游集聚体相互竞争、协调发展, 侧面反映出其空间分异较复杂的景区结构。

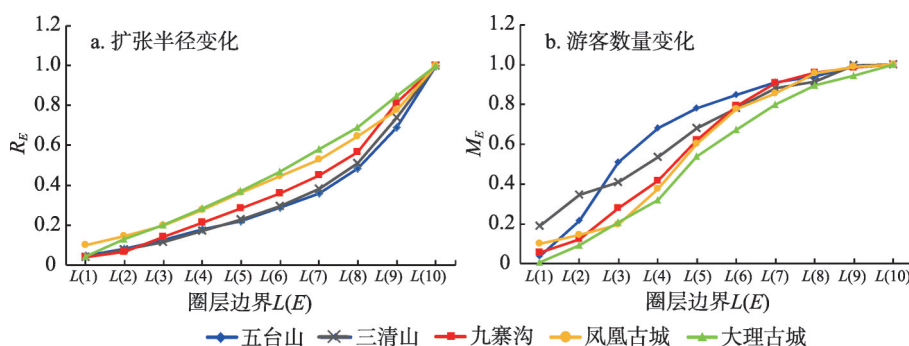


图5 各景区圈层边界扩张半径(a)和游客数量(b)变化特征分析

Fig. 5 Analysis of expansion radius(a) and number of tourists(b) in different scenic spots

### 3.3 游客活动空间边界提取实例

对微博签到数据进行“Hie-Density”分析, 获得游客活动空间最佳边界提取结果和“Hie-Density”分析曲线(图6)。游客分布集聚特征决定“Hie-Density”曲线阈值和形态, 不同景区游客活动空间存在明显差异:

(1) 不同类型景区差异显著。从表2可以看出, 3个山岳型风景区熵值整体小于两个人文景观类古城景区, 说明总体上古城景区游客活动分布较均衡, 多元化的签到模式受景区商铺、客栈等大量POI影响, 形成比山岳型风景区更多聚集中心的复杂空间结构; 山岳型景区的集聚系数整体比古城类景区高, 表明其整体向心集中性更强, 山岳型景区游览路线相对单一, 直接约束旅游者活动空间, 因此签到数据聚集中心较少、活动区块单元较大。山岳型风景区“Hie-Density”曲线整体位于古城景区上方, 空间利用度等级分布明显, 且曲线峰值均位于古城景区左侧, 因此山岳型景区最优边界更收敛, 靠近核心区域, 而古城景区“Hie-Density”曲线平缓, 最优边界更接近外围边界, 这与理论模型描述的多圈层结构演变分析吻合。

五台山、三清山、九寨沟的游客活动空间分别占景区总面积的2.55%、2.26%、1.29%, 古城景区的游客活动空间均占古城面积70%以上, 其中大理古城高达97.39%, 说明游客的活动可达性受景区结构和景观类型影响存在明显差异。山岳型风景区多为不可达或较难抵达的自然景观, 游客活动受地形地貌等因素约束, 仅沿划定的线路游览, 活动空间十分有限; 古城类景区游客可达性较强, 观光产业主要沿路网分布, 易抵达各古城类人文景观进行观赏。

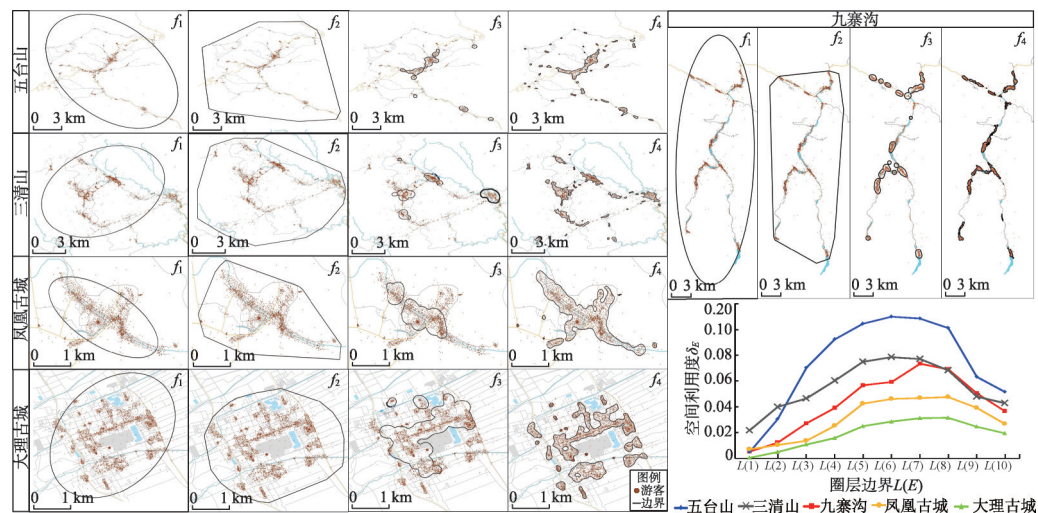


图6 不同景区的“Hie-Density”分析和游客活动空间边界提取结果( $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ 分别代表标准差椭圆、最小多边形、传统点核密度和优化核密度的“Hie-Density”4种方法的边界提取结果)

Fig. 6 Analysis of the "Hie-Density" and results of extracting the spatial boundary of tourist activity in different scenic spots ( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  and  $f_4$  represent standard deviation ellipse, minimum bounding, the "Hie-Density" based on kernel density by traditional method and optimized triangulation, respectively)

表2 各景区模型指数和验证结果

Tab. 2 Calculation of each parameter and validation in different scenic spots

景区	Hie-Density 计算结果						$\varepsilon$			
	$H_n$	$\lambda$	最优边界	$\text{Max}(\delta_E)$	$S(\text{km}^2)$	$m$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
五台山	2.0363	0.1404	L(6)	0.1097	15.1561	94488	0.0027	0.0024	0.0601	0.0613
三清山	2.5548	0.1158	L(6)	0.0785	11.8848	94087	0.0080	0.0062	0.0689	0.0781
九寨沟	2.8255	0.0991	L(7)	0.0733	8.2919	105632	0.0057	0.0041	0.0827	0.1092
凤凰古城	2.9485	0.0724	L(8)	0.0476	0.7880	67984	0.2959	0.3432	1.1016	1.2114
大理古城	3.8099	0.0529	L(8)	0.0314	2.8137	256529	0.1243	0.1527	0.2145	0.3360

注:  $S$ 代表最优边界表征的游客活动面积;  $m$ 代表最优边界内的游客签到量;  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ 分别代表标准差椭圆、最小多边形、基于传统点核密度和优化核密度的“Hie-Density”。

(2) 同类型景区存在一定差异。山岳型景区中,五台山、三清山最优边界为 $L(6)$ ,九寨沟则为 $L(7)$ ,且九寨沟“Hie-Density”曲线表现的整体空间利用度较低,主要原因是九寨沟峡谷型“人”字游览路线结构,景点丰富且拥有庞大客流量,因此熵值较高,游客活动空间分布格局最复杂,集聚系数在三者中最低,最优边界更靠近外层;大理古城和凤凰古城景区结构相对复杂,最优边界均为 $L(8)$ ,但大理古城的POI类型更丰富、数量更多,景区内路网交错复杂,因此空间分异性较强,整体空间利用度较低。可以推测,如果继续增加大理古城内基础设施和旅游吸引物,利用区位优势 and 景区特色扩展旅游观光、休憩点位,那么理论上圈层系统内包含更多圈层子系统,最优边界点可能会继续向外围扩展。

由表3可知,五台山、三清山、九寨沟、凤凰古城的游客活动空间边界周长随圈层扩张不断增长,圈层面积和周长具有明显正相关关系;而大理古城游客活动的圈层边界周长在 $L(9)$ 处突然缩减,且 $L(9)$ 、 $L(10)$ 的周长均小于 $L(7)$ 和 $L(8)$ ,主要因为古城内区域

表3 各级圈层指标计算结果统计

Tab. 3 Statistics of indicators for the circle structure in each level

景区	指标	圈层边界 $L(E)$									
		$L(1)$	$L(2)$	$L(3)$	$L(4)$	$L(5)$	$L(6)$	$L(7)$	$L(8)$	$L(9)$	$L(10)$
五台山	$M(E)$	3976	24104	56512	75616	86840	94488	97432	99864	100852	101636
	$S_E(\text{km}^2)$	0.2660	0.7894	2.0331	4.0321	6.1121	15.1561	26.1561	39.0209	61.8705	124.0058
	$L_E(\text{km})$	1.8717	5.2597	12.5726	18.6100	23.2639	34.2122	55.1183	96.6506	207.0941	277.3274
	$\delta_E$	0.0050	0.0302	0.0701	0.0923	0.1043	0.1097	0.1083	0.1011	0.0632	0.0517
三清山	$M(E)$	22722	41629	49112	64736	82243	94087	97288	100411	101013	101408
	$S_E(\text{km}^2)$	0.1228	0.4978	1.0364	2.3064	4.1805	11.8848	16.5817	23.7126	45.2132	79.4242
	$L_E(\text{km})$	1.7012	5.2421	6.8862	13.7824	20.5110	32.6023	50.9373	74.7902	94.9487	131.8905
	$\delta_E$	0.0218	0.0397	0.0465	0.0603	0.0749	0.0785	0.0771	0.0685	0.0480	0.0426
九寨沟	$M(E)$	6328	14304	32416	48320	72264	84168	105632	111928	115024	116624
	$S_E(\text{km}^2)$	0.0612	0.1881	0.8112	1.8200	3.3180	5.2619	8.2919	13.0529	27.0477	40.7900
	$L_E(\text{km})$	1.2622	2.8100	11.1525	20.0080	29.3798	38.5817	51.5698	64.7361	93.5963	123.8845
	$\delta_E$	0.0054	0.0121	0.0270	0.0393	0.0566	0.0593	0.0733	0.0691	0.0504	0.0365
凤凰古城	$M(E)$	7112	10318	14000	26684	42749	55286	60823	67984	70329	71218
	$S_E(\text{km}^2)$	0.0189	0.0409	0.0743	0.1440	0.2502	0.3737	0.5263	0.7880	1.1461	1.8956
	$L_E(\text{km})$	0.9885	1.5527	2.3144	3.9672	4.8379	7.0516	9.5709	10.6762	12.8117	20.3016
	$\delta_E$	0.0072	0.0103	0.0137	0.0252	0.0423	0.0462	0.0467	0.0476	0.0391	0.0266
大理古城	$M(E)$	1813	26257	59794	91483	154602	193081	228445	256529	265466	271349
	$S_E(\text{km}^2)$	0.0108	0.1012	0.2410	0.4715	0.8154	1.2913	2.0011	2.8137	4.2232	5.8869
	$L_E(\text{km})$	0.3816	3.2068	6.2567	11.1658	15.9691	18.6702	20.6469	23.1153	17.3341	19.6943
	$\delta_E$	0.0003	0.0048	0.0106	0.0156	0.0249	0.0287	0.0312	0.0314	0.0244	0.0195

注： $M(E)$ 、 $S_E$ 、 $L_E$ 、 $\delta_E$ 分别代表第 $E$ 级圈层边界包含游客签到量、面积、周长、空间利用度。

分化明显，综合道路交通和旅游吸引物的影响，核心圈层边界顾及古城结构向景区内部延伸，而外围圈层仅覆盖宏观活动范围。

### 3.4 方法验证分析

本文将“Hie-Density”与标准差椭圆、最小多边形两种描述游客活动空间的方法进行对比，同时对比传统点核密度和优化核密度分级形成的“Hie-Density”边界提取结果，计算各方法的边界提取精度。如果在更小的边界范围内能容纳更大比例的游客签到数据，说明提取结果越精确，因此使用如下公式评估各边界提取方法的精度：

$$\varepsilon = \frac{m}{M \times S} \quad (7)$$

式中： $M$ 代表游客总签到数； $m$ 是最优边界内包含的签到数； $S$ 是最优边界包括的总面积。 $\varepsilon$ 值越大，边界提取精度和拟合性越高。由表2可以看出，“Hie-Density”边界提取精度远优于标准差椭圆、最小多边形两种方法。凤凰古城、大理古城这类空间范围较小的人文景区，传统方法与“Hie-Density”模型的 $\varepsilon$ 值差距在10倍以内；而五台山、三清山、九寨沟这类自然风景区的分布范围较大，传统方法与本文方法提取精度的差距更明显；对比基于传统点核密度和优化核密度的“Hie-Density”提取结果， $\varepsilon$ 值差距较小，但前者忽视密度低值区域，密度高值处过于扩张。虽然游客分布离散区域的平均密度值在整体密度水平上已达到可以忽略的状态，但部分密度低值区游客量大于密度高值区，因此游客量占优的密度低值区是绝不能忽略的，因此基于优化核密度的“Hie-Density”对边界



描述更准确。从边界提取结果形态对游客分布形态的拟合易看出,无论是分布空间范围较大、结构相对简单的自然景观类景区,还是规模较小、结构复杂的人文景观类景区,基于优化核密度的“Hie-Density”模型对游客活动空间描述的准确性远优于其他方法。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文使用优化后的核密度等值线划分游客活动空间圈层,基于游客活动空间分布的梯度变化规律建立“Hie-Density”模型,提出了一种基于定位数据进行游客活动空间边界定量识别的新方法。通过微观视角下系统内部结构探究其宏观圈层演化过程,解析不同圈层结构演变模式下旅游活动空间的分异和扩张特性,揭示旅游系统发展状态与趋势。旅游地的系统结构与景观类型等影响旅游者的活动空间,导致旅游活动圈层的空间异质性,进而决定“Hie-Density”曲线阈值出现的时机、阈值大小及曲线形态。模型曲线作为整个系统空间结构的平面映射,可以有效表征游客分布聚集状态和演化方向,易于针对时序变化或结构特征进行比较。

使用该方法对五台山、三清山、九寨沟、凤凰古城、大理古城5个不同类型景区进行案例分析,验证了“Hie-Density”模型曲线迁移特征对不同景区游客空间格局分异表达的适用性。人文景观类景区的最优边界比自然景观类景区更接近最外围边界,且“Hie-Density”曲线整体位于较低处,宏观上直接反映了人文景区受大量聚集中心影响,游客分布集中性低、空间离散化的分布状况;自然风景区的游客聚集中心较少,系统的集聚性更高,因此空间利用度整体较高,最佳边界更接近核心区域。

相比传统空间范围划分方法,“Hie-Density”模型用于游客活动空间边界提取具有以下特点:以优化后的三角网为基础要素进行核密度估计,解决了点要素核密度对于分布空间表征存在可达性扭曲的问题;边界提取结果更客观、精度更高,对游客活动分布模式的描述更细致;适用于多尺度空间单元的边界识别研究,模型灵活且可扩展性高;基于统一的标准化“Hie-Density”模型曲线,可以用于不同景区空间边界的模式对比,有效反映游客行为空间格局的分异特征及其演化方向,对游客活动空间结构及其形成机理的描述具有一定的支撑作用,为地理时空数据挖掘研究提供可行的参考。

### 4.2 讨论

目前,旅游地发展中面临着应对客流高峰,景区突发性环境安全问题,景区设施配置不平衡、规划不合理造成资源浪费和隐患,以及旅游者更注重游览体验感与新旅游模式等挑战。特别需要精确把握旅游者时空行为规律,以适应旅游发展环境评价和综合分析景区环境承载力等客观需求。游客活动空间边界准确识别可以为旅游容量管控、景区安全保障及旅游效应评价提供支撑和参考。因此,本文提出“Hie-Density”模型,可以快速准确地对不同时序的游客活动边界进行定量提取,进而以人地交互作用为主导筛选空间统计样本,助力空间行为预测、运动模式挖掘等研究。边界提取结果可以帮助管理者与规划人员实现与景区物理边界的比较分析,充分发挥边界控制作用和干预效果,精准制定规划方案,准确评估开发程度与生态效应,及时调整旅游发展政策,协调优化各组织职能,促进景区可持续发展。

对于一些旅游热度较低、基础设施不完善、信息化程度低、签到数据量较少的景区,数据本身代表性不强,不适于应用“Hie-Density”模型。另外,由于部分景区的游览区和食宿区域界线不明确,签到数据可能主要分布于餐饮和酒店等区域,导致游客行

为边界意义需要进一步解释和分析。因此,使用该模型时应注意研究区域的不同特征及研究目的,在考虑社交媒体系统对签到数据约束和引导模式基础上,合理解释模型分析结果。本文进行三角网优化时设置的标准尺度系数 $\mu$ 值为1.0,核密度估计带宽选择采用自适应算法,而针对不同研究尺度,两个参数的确定有待进一步深入讨论。例如,在更微观尺度下,人文景区的研究单元可精确至路网,尺度因子和核密度估计带宽需要调参至更小,此时的空间边界识别结果更为精细。因此,明确特定的研究尺度是使用本方法进行数据挖掘和专题研究的前提。

“Hie-Density”模型不仅适于签到数据,也可用于位置照片、轨迹点、POI等多类型移动定位数据。研究专题不仅可以针对旅游空间,也可用于城市、人口、经济等空间形态与演化模式研究,具有潜在应用价值和可扩展性。模型研究尺度可扩大至流域、城市、各类跨区域经济区或整个国家等较宏观的自然与社会经济单元,也可小至城市内部空间、社区空间、商圈、甚至商业综合体内部空间等。本文为进一步挖掘景区游客空间行为、开展资源优化配置等提供了空间边界计算的定量方法,也为多时空尺度下的游客空间行为研究提供了基础。在未来研究中将不断完善模型,纳入多源异构数据,特别是针对不同数据来源和研究领域的适用性、多源数据集成的路径和模式等方面,开展进一步模型验证和调整,并针对不同研究尺度对模型参数设定进行合理讨论。

## 参考文献(References)

- [1] Chen Jianchang, Bao Jigang. A study of tourist behavior and its practical significance. *Geographical Research*, 1988, 7(3): 44-51. [陈健昌, 保继刚. 旅游者的行为研究及其实践意义. *地理研究*, 1988, 7(3): 44-51.]
- [2] Murphy P E, Rosenblood L. Tourism: An exercise in spatial search. *The Canadian Geographer*, 1974, 18(3): 201-210.
- [3] Wang Shaobo, Luo Xiaolong, Guo Jianke, et al. Dynamic evolution of tourism spatial structure under the improvement of the high speed rail network in northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(4): 568-577. [王绍博, 罗小龙, 郭建科, 等. 高铁网络化下东北地区旅游空间结构动态演变分析. *地理科学*, 2019, 39(4): 568-577.]
- [4] Lau G, Mckercher B. Understanding tourist movement patterns in a destination: A GIS approach. *Tourism and Hospitality Research*, 2006, 7(1): 39-49.
- [5] Lu Lin, Tang Yunyun. Spatial behavior patterns of domestic tourists of the Zhujiang River Delta metropolitan area. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(1): 10-18. [陆林, 汤云云. 珠江三角洲都市圈内旅游者空间行为模式研究. *地理科学*, 2014, 34(1): 10-18.]
- [6] Sirakaya E, Woodside A G. Building and testing theories of decision making by travellers. *Tourism Management*, 2005, 26(6): 815-832.
- [7] Mckercher B, Zoltan J. Tourist flows and spatial behavior//Lew A A, Hall C M, Williams A M. *Companion to Tourism*. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2014: 33-44.
- [8] Mckercher B. A chaos approach to tourism. *Tourism Management*, 1999, 20(4): 425-434.
- [9] Gunn C A, Var T. *Tourism Planning: Basics, Concepts, Cases*. New York: Routledge, 2002: 33-35.
- [10] Leiper N. *Tourism Management*. Collingwood, VIC: TAFE Publications, 1995: 35-37.
- [11] Wu Chengzhao. Tourism development redline and tourism planning standards. *Tourism Tribune*, 2014, 29(5): 5-7. [吴承照. 旅游发展红线与旅游规划标准. *旅游学刊*, 2014, 29(5): 5-7.]
- [12] Huang Yi, Ma Yaofeng, Xue Huaju. Spatio-temporal-situational evolution and regional influencing factors of the inbound tourism service quality in China. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(12): 1689-1701. [黄毅, 马耀峰, 薛华菊. 中国入境旅游服务质量时空态势演变与区域影响因素. *地理学报*, 2013, 68(12): 1689-1701.]
- [13] Wei Min, Feng Yongjun, Li Fen, et al. Emergy analysis of tourism ecological system of Tai'an City. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1181-1189. [魏敏, 冯永军, 李芬, 等. 泰安市旅游生态能值分析. *地理学报*, 2012, 67(9): 1181-1189.]
- [14] Zhong Shi'en, Zhang Jinhe, Sun Jinkun. The diversified development of historic towns based on the integrated evaluation system of heritage conservation and tourism development in Jiangsu. *Geographical Research*, 2015, 34(7): 1380-1393. [钟士恩, 章锦河, 孙晋坤. 基于遗产保护与旅游发展综合评价的古镇型旅游目的地差异化发展路径研究: 以江苏省为例. *地理研究*, 2015, 34(7): 1380-1393.]

- [15] Girardin F, Calabrese F, Fiore F D, et al. Digital footprinting: Uncovering tourists with user-generated content. *IEEE Pervasive Computing*, 2008, 7(4): 36-43.
- [16] Raanan M G, Shoval N. Mental maps compared to actual spatial behavior using GPS data: A new method for investigating segregation in cities. *Cities*, 2014, 36: 28-40.
- [17] Meijles E W, de Bakker M, Groote P D, et al. Analysing hiker movement patterns using GPS data: Implications for park management. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2014, 47: 44-57.
- [18] Zhang Ziang, Huang Zhenfang, Jin Cheng, et al. Research on spatial-temporal characteristics of scenic tourist activity based on Sina Microblog: A case study of Nanjing Zhongshan Mountain National Park. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(4): 121-126. [张子昂, 黄震方, 靳诚, 等. 基于微博签到数据的景区旅游活动时空行为特征研究: 以南京钟山风景名胜区为例. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(4): 121-126.]
- [19] Qin Jing, Li Langping, Tang Mingdi, et al. Exploring the spatial characteristics of Beijing inbound tourist flow based on geotagged photos. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(8): 1556-1570. [秦静, 李郎平, 唐鸣镝, 等. 基于地理标记照片的北京市入境旅游流空间特征. *地理学报*, 2018, 73(8): 1556-1570.]
- [20] Zhang Xianxian, Li Jinghan, Zuo Ying, et al. Study on spatial-temporal characteristics of tourist behavior based on digital footprints: Taking Nanjing for example. *Economic Geography*, 2018, 38(12): 226-233. [张鲜鲜, 李婧晗, 左颖, 等. 基于数字足迹的游客时空行为特征分析: 以南京市为例. *经济地理*, 2018, 38(12): 226-233.]
- [21] Zhang Lingyun. Review on the study of tourism gravity models and its future. *Geographical Research*, 1989, 8(1): 76-87. [张凌云. 旅游地引力模型研究的回顾与前瞻. *地理研究*, 1989, 8(1): 76-87.]
- [22] Borgers A, Timmermans H. A model of pedestrian route choice and demand for retail facilities within inner-city shopping areas. *Geographical Analysis*, 1986, 18(2): 115-128.
- [23] Wang Can, Wang De, Zhu Wei, et al. Research progress of discrete choice models. *Progress in Geography*, 2015, 34(10): 1275-1287. [王灿, 王德, 朱玮, 等. 离散选择模型研究进展. *地理科学进展*, 2015, 34(10): 1275-1287.]
- [24] Alivand M, Hochmair H, Srinivasan S. Analyzing how travelers choose scenic routes using route choice models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015, 50: 41-52.
- [25] Gong L, Morikawa T, Yamamoto T, et al. Deriving personal trip data from GPS data: A literature review on the existing methodologies. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2014, 138: 557-565.
- [26] Kwan M P. Gender and individual access to urban opportunities: A study using space-time measures. *The Professional Geographer*, 1999, 51(2): 210-227.
- [27] Zhang Lingyun. *Management of Scenic Area*. Beijing: Tourism Education Press, 2009. [张凌云. 旅游景区管理. 北京: 旅游教育出版社, 2009.]
- [28] Smith L, Foley L, Panter J. Activity spaces in studies of the environment and physical activity: A review and synthesis of implications for causality. *Health & Place*, 2019, 58: 102113. DOI: 10.1016/j.healthplace.2019.04.003.
- [29] Šimon M, Vašát P, Poláková M, et al. Activity spaces of homeless men and women measured by GPS tracking data: A comparative analysis of Prague and Pilsen. *Cities*, 2019, 86: 145-153.
- [30] Shen Yue, Chai Yanwei. Daily activity space of suburban mega-community residents in Beijing based on GPS data. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(4): 506-516. [申悦, 柴彦威. 基于GPS数据的北京市郊区巨型社区居民日常活动空间. *地理学报*, 2013, 68(4): 506-516.]
- [31] Xu Zening, Gao Xiaolu. A novel method for identifying the boundary of urban built-up areas with POI data. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(6): 928-939. [许泽宁, 高晓路. 基于电子地图兴趣点的城市建成区边界识别方法. *地理学报*, 2016, 71(6): 928-939.]
- [32] Shi Chunyun, Zhang Jie, You Haimei, et al. Core-periphery spatial structure and its evolution of tourism region in Sichuan Province. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(6): 631-639. [史春云, 张捷, 尤海梅, 等. 四川省旅游区域核心—边缘空间格局演变. *地理学报*, 2007, 62(6): 631-639.]
- [33] Zhong Shi'en, Zhang Jie, Ren Lixiu, et al. Concentration on problems within spatial pattern of tourist flow in the way of critical thinking. *Progress in Geography*, 2009, 28(5): 705-712. [钟士恩, 张捷, 任黎秀, 等. 旅游流空间模式的基本理论及问题辨析. *地理科学进展*, 2009, 28(5): 705-712.]
- [34] Miossec J M. *Elements Pour une Theorie de l'Escape Touristique*. Aix-en-Provence: Les Cahiers Du Tourisme, C-3, CHET, 1976.
- [35] Weaver D B. Model of urban tourism for small Caribbean islands. *Geographical Review*, 1993, 83(2): 134.
- [36] Fennell D A. A tourist space-time budget in the Shetland Islands. *Annals of Tourism Research*, 1996, 23(4): 811-829.
- [37] Wu Bihu. A study on recreational belt around metropolis(ReBAM): Shanghai case. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(4): 354-359. [吴必虎. 大城市环城游憩带(ReBAM)研究: 以上海市为例. *地理科学*, 2001, 21(4): 354-359.]



- [38] Huang Jinhua, Wu Bihu. The spatial structure of regional tourism system: Its model and optimization: A case study of Xi'an. *Progress in Geography*, 2005, 24(1): 116-126. [黄金火, 吴必虎. 区域旅游系统空间结构的模式与优化: 以西安地区为例. *地理科学进展*, 2005, 24(1): 116-126.]
- [39] Feng Jian, Chen Xiuxin, Lan Zongmin. The evolution of spatial structure of shopping behaviors of Beijing's residents. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(10): 1083-1096. [冯健, 陈秀欣, 兰宗敏. 北京市居民购物行为空间结构演变. *地理学报*, 2007, 62(10): 1083-1096.]
- [40] Jiao Limin, Li Zehui, Xu Gang, et al. The characteristics and patterns of spatially aggregated elements in urban areas of Wuhan. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1432-1443. [焦利民, 李泽慧, 许刚, 等. 武汉市城市空间集聚要素的分布特征与模式. *地理学报*, 2017, 72(8): 1432-1443.]
- [41] Xue Bing, Xiao Xiao, Li Jingzhong, et al. POI-based spatial correlation of the residences and retail industry in Shenyang City. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(3): 442-449. [薛冰, 肖骁, 李京忠, 等. 基于POI大数据的沈阳市住宅与零售业空间关联分析. *地理科学*, 2019, 39(3): 442-449.]
- [42] Wolfe R I. Summer cottagers in Ontario. *Economic Geography*, 1951, 27(1): 10-32.
- [43] Li Shan, Wang Zheng. Computable models on the temporal and spatial scale of an optimum tourism destination circle. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(10): 1255-1266. [李山, 王铮. 适度旅游圈时空规模的可计算模型. *地理学报*, 2009, 64(10): 1255-1266.]
- [44] Weaver D B. Peripheries of the periphery: Tourism in Tobago and Barbuda. *Annals of Tourism Research*, 1998, 25(2): 292-313.
- [45] Dai Xuejun, Ding Dengshan, Lin Lan. Spatial structure aggregation fractal of tourism attraction systems in travel circles in Yangtze River Delta. *Geographical Research*, 2010, 29(12): 2189-2200. [戴学军, 丁登山, 林岚. 长三角地区旅游圈吸引物体系空间结构聚集分形特征. *地理研究*, 2010, 29(12): 2189-2200.]
- [46] Deasy G F, Griess P R. Impact of a tourist facility on its hinterland. *Annals of the Association of American Geographers*, 1966, 56(2): 290-306.
- [47] Ma Yong, Dong Guanzhi. Study on building and development pattern of Wuhan grand tour ring. *Economic Geography*, 1996, 16(2): 99-104. [马勇, 董观志. 武汉大旅游圈的构建与发展模式研究. *经济地理*, 1996, 16(2): 99-104.]
- [48] Shannon C E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [49] Pooler J. Information theoretic methods of spatial model building: A guide to the unbiased estimation of the form of probability distributions. *Socio-Economic Planning Sciences*, 1983, 17(4): 153-164.
- [50] Li Jihong, Qiu R X, Xiong Le, et al. A gravity-spatial entropy model for the measurement of urban sprawl. *Science China Earth Sciences*, 2016, 46(2): 229-236. [李继红, Qiu R X, 熊乐, 等. 城市扩张度量中的重力—空间熵模型. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(2): 229-236.]
- [51] Chen Z Q, Yu B L, Song W, et al. A new approach for detecting urban centers and their spatial structure with nighttime light remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(11): 6305-6319.
- [52] Gahegan M, Lee I. Data structures and algorithms to support interactive spatial analysis using dynamic Voronoi diagrams. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(6): 509-537.
- [53] Deng M, Liu Q, Cheng T, et al. An adaptive spatial clustering algorithm based on delaunay triangulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2011, 35(4): 320-332.
- [54] Borruoso G. Network density estimation: A GIS approach for analysing point patterns in a network space. *Transactions in GIS*, 2008, 12(3): 377-402.
- [55] Pham Ngoc T M. Adaptive optimal kernel density estimation for directional data. *Journal of Multivariate Analysis*, 2019, 173: 248-267.
- [56] Parker J K, Downs J A. Footprint generation using fuzzy-neighborhood clustering. *GeoInformatica*, 2013, 17(2): 285-299.
- [57] Mills E S. Urban density functions. *Urban Studies*, 1970, 7(1): 5-20.
- [58] Yang Zhongyuan, Xu Jiangang, Lin Wei. Spatial evolution progress of tourism destination based on theory of complex adaptive system: A case of southern Anhui. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(6): 1059-1074. [杨仲元, 徐建刚, 林蔚. 基于复杂适应系统理论的旅游地空间演化模式: 以皖南旅游区为例. *地理学报*, 2016, 71(6): 1059-1074.]
- [59] Wu Zhifeng, Chai Yanwei, Dang Anrong, et al. Geography interact with big data: Dialogue and reflection. *Geographical Research*, 2015, 34(12): 2207-2221. [吴志峰, 柴彦威, 党安荣, 等. 地理学碰上“大数据”: 热反应与冷思考. *地理研究*, 2015, 34(12): 2207-2221.]
- [60] Gao K, Zhou E L, Grover S. Applied methods and techniques for modeling and control on micro-blog data crawler. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 2014, 452: 171-188.

## A novel method for extracting spatial boundary of tourist activity based on circle structure

WU Zhaoning<sup>1</sup>, LI Renjie<sup>1,2</sup>, GUO Fenghua<sup>3,4</sup>

(1. College of Resources and Environment Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;

2. Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China;

3. Hebei Institute of Geographical Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 4. Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Shijiazhuang 050011, China)

**Abstract:** It is of great significance for tourism research to extract the spatial boundary of tourist activity, especially for optimizing the spatial structure of scenic spots, implementing boundary control and improving the utilization efficiency. Due to the complexity of tourist activity, it is difficult to identify the spatial boundary of tourist activity by using traditional method effectively. The study uses optimized Delaunay triangulation based on hierarchical clustering algorithm (ASCDT), instead of the points feature, which is dedicated to solving the problem of inaccurate spatial fitting in kernel density estimation at multi-scale. We analyze the spatial aggregation characteristic of tourist activity, and build the hierarchy based on concentric zone theory. Then we analyze the relations in geographic factors by using lots of spatiotemporal sign-in data, and propose a novel method for extracting the boundary of tourist activity, which is called "Hie- Density". "Hie- Density" is based on the spatial law of the expanding distribution. The study explores the macroscopic system evolution by the interaction of circle subsystems, and proves that "Hie- Density" can be used to discuss the multiple distribution patterns of spatial activity. According to the law of deviation in curve, it is easy to identify the optimal spatial boundary of tourist activity, the state of spatial aggregation, the characteristic of central splitting and the evolution direction of the spatial boundary. The cases show that the method is applicable to the complex spatial distribution structure. The study involves different kinds of scenic spots at multi-scales, so as to provide a new perspective and a novel method for geographical spatiotemporal data mining.

**Keywords:** space of tourist activity; boundary extraction; concentric zone theory; Hie-Density; kernel density