

基于空间句法和园林景观格局的城市演化研究

姚海龙¹, 王雪飞², 童小康³

¹浙江同浩建设有限公司, 浙江 衢州

²浙江中樑门窗科技有限公司, 浙江 衢州

³浙江丰茂盛业建设有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2024年1月10日; 录用日期: 2024年2月6日; 发布日期: 2024年3月31日

摘要

本研究通过空间句法理论, 对某市城市化与城市绿地碎片化进行了深入探讨。首先, 利用空间句法计算了2000、2010和2021年某市中心区域的整合度, 揭示了城市化的空间演变。其次, 通过景观格局分析, 对城市绿地的碎片化程度进行了量化评估。最后, 应用地理加权回归模型, 评估了城市化对城市绿地碎片化的影响。研究发现, 某市中心绿地面积减少, 碎片化和空间格局日益复杂, 这与快速的城市化进程和规划政策问题有关。整体而言, 该研究有助于深入了解城市化对城市绿地碎片化的影响, 为城市绿地规划提供了有益的参考。在未来的城市规划中, 应更加注重绿地的保护和合理规划, 以实现城市的可持续发展。

关键词

空间句法, 景观格局, 城市化, 城市规划

Research on Urban Evolution of Space Syntax and Garden Landscape Pattern

Hailong Yao¹, Xuefei Wang², Xiaokang Tong³

¹Zhejiang Tonghao Construction Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

²Zhejiang Zhongliang Door & Window Technology Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

³Zhejiang Fengmao Shengye Construction Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: Jan. 10th, 2024; accepted: Feb. 6th, 2024; published: Mar. 31st, 2024

Abstract

This study used space syntax theory to conduct an in-depth exploration of urbanization and fragmentation of urban green space in a certain city. Firstly, the study calculated the integration degree

文章引用: 姚海龙, 王雪飞, 童小康. 基于空间句法和园林景观格局的城市演化研究[J]. 城镇化与集约用地, 2024, 12(1): 53-65. DOI: 10.12677/ulu.2024.121007

of the central area of the city in 2000, 2010, and 2021 using space syntax, revealing the spatial evolution of urbanization. Secondly, through landscape pattern analysis, the fragmentation of urban green space was quantitatively evaluated. Finally, the study applied a geographically weighted regression model to assess the impact of urbanization on the fragmentation of urban green space. The study found that the area of central green space decreased, fragmentation and spatial patterns became increasingly complex, which was related to rapid urbanization processes and planning policy issues. Overall, this study contributes to a deeper understanding of the impact of urbanization on the fragmentation of urban green space, providing useful references for urban green space planning. In future urban planning, more attention should be paid to the protection and rational planning of green space to achieve sustainable urban development.

Keywords

Space Syntax, Landscape Pattern, Urbanization, Urban Planning

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分，为城市居民提供了丰富的生态系统服务，如空气净化、降温增湿、休闲游憩等。然而，随着城市化进程的加速，城市绿地的保护和规划面临诸多挑战，其中最为突出的问题就是绿地的碎片化。这种碎片化现象不仅影响了绿地功能的正常发挥，也给城市居民的生活质量带来了负面影响。因此，探讨城市化与城市绿地碎片化之间的关系，对于保护城市生态环境、提升居民生活质量具有重要的现实意义[1]。某市作为我国东南沿海的重要城市，其城市化进程快速，伴随着城市规模的不断扩大，城市绿地的碎片化问题也日益严重。本研究以某市为例，从空间和时间的角度出发，深入探讨了城市化与城市绿地碎片化之间的关系。首先，利用空间句法理论对某市中心区域的道路资料进行了提取和分析，计算出2000年、2010年和2021年的区域整合度。其次，对某市的城市绿地进行了景观格局分析，并利用相关的景观指数对绿地碎片化程度进行了量化。最后，应用地理加权回归模型评估了城市化对绿地碎片化的影响。通过本研究，我们期望能够深入了解城市化对城市绿地碎片化的影响机制，并从促进城市永续发展的角度为城市绿地规划提供有价值的参考意见[2]。此外，鉴于绿色空间在城市地区的重要性，本研究将有助于对城市化进程作出更为科学、合理的决策，并制定出更加有效的绿色政策[3]。

2. 文献综述

2.1. 城市绿地的重要性

城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分，为城市居民提供了多种生态系统服务，如空气净化、水源涵养、气候调节、休闲游憩等。同时，城市绿地也是城市生物多样性的重要保障，有助于维持城市生态平衡。因此，城市绿地的保护和合理规划对于城市的可持续发展具有重要意义[4]。

2.2. 城市化对城市绿地的影响

在城市化进程中，由于土地开发和城市扩张，大量的人类行为导致栖息地丧失或质量下降，直接影响到城市绿地的保护和规划。城市化对城市绿地的负面影响主要体现在绿地数量的减少、绿地质量的下

降以及绿地分布的不均衡等方面。同时，城市化还可能导致城市绿地景观的破碎化和复杂化，进而影响到城市生态系统的稳定性和可持续性。

2.3. 空间句法与景观格局分析方法

空间句法是一种基于空间关系的理论和方法，通过研究空间结构的整合度和连通性，可以揭示空间结构对人类活动和生态过程的影响。景观格局分析则是对景观的空间结构和分布特征进行定量化描述的方法，常用的景观指数包括斑块数量、斑块面积、斑块形状等。将空间句法和景观格局分析相结合，可以更全面地揭示城市化对城市绿地的影响，为城市绿地的保护和规划提供科学依据[5]。

2.4. 空间句法的方法原理及与本文园林景观格局研究的关系

空间句法是一种研究空间关系的理论和方法。它通过将空间结构抽象为一系列的“句法”规则，来描述空间中物体之间的关系和组织结构。在城市规划和地理信息科学中，空间句法被广泛应用于分析空间布局、交通网络、区域发展等方面。空间句法的核心原理包括：

轴线分析：这种方法将空间关系简化为一系列的轴线，这些轴线代表了物体之间的连接路径。通过分析这些轴线的属性(如长度、方向、连接性等)，可以深入了解空间的组织结构和功能。

深度分析：这种方法衡量从一个位置到其他所有位置所需的最短路径长度，从而揭示空间的可达性和整合度。例如，如果一个区域的深度值较低，意味着从该区域出发可以快速到达其他许多区域，显示出较好的可达性和整合度。

全局分析：这种方法通过对整个空间系统的轴线或深度进行计算，揭示整体的空间结构特征。例如，全局整合度指数可以衡量整个城市或区域的通达性和整合度。

在本文中，空间句法方法被用于分析某市的城市绿地格局。具体来说，通过轴线分析和深度分析，可以深入了解绿地的分布、连通性和可达性。这对于理解绿地碎片化的形成机制和程度非常关键。例如，如果绿地的连通性较差，那么即使绿地面积较大，其生态功能也可能受到限制。此外，空间句法还可以与其他景观格局指数相结合，提供一个更全面的视角来评估城市绿地的状况和变化。

2.5. 以往研究的主要发现与不足

以往关于城市化对城市绿地影响的研究已经取得了一定的成果，主要集中在城市绿地的数量和质量变化、空间分布特征以及景观格局等方面。然而，现有的研究还存在一些不足之处，如研究方法单一、研究范围有限、缺乏对时间变化和空间差异的深入探讨等[6]。因此，需要进一步深化对城市化与城市绿地变化关系的认识，为城市绿地的保护和规划提供更有针对性的建议。

3. 某市城市化与城市绿地规划

从 20 世纪 80 年代开始，在大陆实施全国范围的改革背景下，中国城市经历了城市化的时间及空间压缩现象，伴随着人口变化、经济增长、城市中心区再开发和半城市化[7]，这种与城市化过程相关的时间、空间压缩也引发了景观空间格局的剧烈变化，包括绿地占用趋势、农田流失趋势和景观碎片化趋势。尽管一些城市在开发新的公共绿地和保护现有绿地方面做出了明显的努力，但对单一城市的各种实证研究显示，城市绿地覆盖率总体上则是呈下降的趋势。据统计至 2020 年底，某市绿地率为 45.39%，人均绿地面积 44.25 m²。某市中心城区 2000~2020 年各绿化指标变化情况详见表 1 (统计年鉴分享平台, 2021)。从 2000 年至 2021 年某市中心城区绿化取得了一定的成绩，尤其是人均公共绿地面积取得了较大的突破，分析其原因主要是城市的总体规划及政府对绿化的重视，因此绿化面积才能不断增加。2000 至 2021 年间，政府对城市绿地生态性做了两次详细的规划，具体如下。

Table 1. Overview of greening in a city from 2000 to 2020**表 1.** 2000~2020 年某市绿化概况

年份	绿地面积/km ²	公共绿地面积/km ²	绿化覆盖率/%	人均绿地面积/m ²	人均公共绿地面积/m ²
2000	4028	1120	33.3	20.31	6.28
2006	5322	1449	36.2	33.14	7.97
2011	8122	2288	40.31	44.34	12.58
2016	11,310	3273	43.42	56.56	16.36
2017	11,661	3507	43.92	57.44	17.27
2018	12,955	4193	44.36	46.43	15.03
2019	12,334	4552	44.93	43.28	15.97
2020	12,833	4804	45.39	44.25	16.57

在首次提出的“某城市总体规划(1995年至2010年)”中,城市绿地的规划采取了“圈、环、带”与“点、线、面”相结合的策略,旨在构建一种“内外渗透、纵横交错、重点突出、全面覆盖、亲近市民、福泽万代”的网络式园林绿地系统和生态环境体系。到规划末期,人均公共绿地将达到9平方米以上,城市绿地率超过35%,城市绿化覆盖率超过40%。

某地处“群山环抱,闽江穿城而过”的自然环境中,具备得天独厚的自然资源优势。鼓山、鼓岭、恩顶、北峰、旗山、五虎山等环城山脉实施封山育林,要求面向城市一重山的森林覆盖率达到85%以上。乌龙江和闽江两岸将分别形成宽度为50至100公尺的生态林带,构成城市生态圈。

市区、中心城及城市各组团均充分利用自然山水条件,建设周边生态环。中心城四周的环城市生态环境基本绿化宽度控制在50至500公尺。各周边组团生态环的基本绿化宽度控制在50公尺。中心城依托金鸡山、金牛山、光明港及入城道路、铁路等绿化走廊,使生态圈和生态环的绿化空间融入城市,提升城市环境质量。中心城内主要内河两岸、二环路和三环路两侧将形成宽度不小于10公尺的绿化带。

在历史文化名城的核心区域,即“三山两塔一湖”的周边,形成“绿链”,共同构成中心城绿地系统的基本网络。城市建设规划中,绿地率严格遵循旧城不小于25%、新区不小于30%的规定。住宅区建设中,人均公共绿地,旧城不低于1.0平方米,新区不低于1.5平方米。这些绿地是构成绿地系统的基础。

中心城区绿地面积将达到2280公顷,居住区公共绿地170公顷。规划扩建市级公园12个,新建市级公园9个,新建区级公园34个,扩建区级公园8个,公园面积总计1899公顷,其中,中心城1618公顷。由此,从表1中明显看出,2000~2010年,某市区的绿地面积和公共绿地面积逐年上升,分别从4028公顷上升至7621公顷和1120公顷至2149公顷;绿化覆盖率也从33.3%升至39.25%。虽然整体呈上升趋势,但部分年份仍出现下降,如2001、2004、2007年和2009年。人均绿地面积翻了近1倍,从20.31平方米上升至40.37平方米,但在2004年和2007年的值也出现了下降情况。

在第二次“某市城市总体规划(2011年~2020年)”中,某市政府对城市绿地的规划布局进行了深入的研究和策划。该规划以“两江润城、碧山环城、水链织城、青峰缀城”为设计理念,旨在构建一个“一环八楔、两带一网、十一山多园”的绿化体系,形成点、线、面相结合的绿化网络。

“一环八楔”是指以中心城区周边的青山为屏障,构成某中心城区周边的绿色生态环。八楔则是由周边绿色生态环向金牛山、莲花山、金鸡山、鼓山、清凉山、青芝山、旗山、五虎山延伸的八条绿化廊道,形成楔状绿地,渗透入中心城区内部,作为城市新城之间的绿带。

“两带一网”则是以闽江、乌龙江两岸滨江绿带形成贯穿中心城区的两条重要绿化廊道。同时,结合中心城区内丰富的河网水系,形成沿白马河、晋安省、凤阪河、光明港、大樟溪等河流构建的滨水绿

化网络。

“十一山多园”是指以中心城区内的乌山、于山、屏山、高盖山、金鸡山等作为城市主要的山林公园，以西湖公园、温泉公园、金山公园等三十一个主要城市综合性公园构成城市公园绿地主体，形成山园相连。

至 2020 年，全市规划布局城市公园绿地 615 个(处)，其中综合公园 54 个、社区公园 56 个、专类公园 57 个、带状绿地 317 处、街头绿地 131 处等；绿地率 42%，绿化覆盖率 48%，人均公园绿地面积 15 平方米，建设指标希冀达到“国家生态园林城市”的创建要求。

规划中还提出，要合理开发利用主城区近郊的鼓山风景名胜区、五虎山森林公园、旗山国家森林公园、十八重溪风景名胜区、北峰生态休闲区等城市重要的景观、生态绿化保育区。

表 1 展示了 2011~2020 年某市绿化各项指标的概况。数据显示，绿地面积和公共绿地面积逐年上升，分别从 8122 公顷上升至 12,833 公顷，以及 2288 公顷上升至 4804 公顷。绿化覆盖率也是逐年增加，从 40.31% 增至 45.39%。而人均绿地面积和人均公共绿地面积整体上也呈现上升趋势，尽管在部分年份有下降的情况出现。例如，人均绿地面积在 2018、2019 年出现了下降，其中 2018 年下降幅度较大。因此，人均公共绿地面积在 2018 年下降后则稳定上升。

总体来看，某市在城市绿地规划方面取得了显著的成果。通过一系列的规划措施，某市成功构建了点、线、面相结合的绿化网络，提高了城市绿化覆盖率，增加了人均公园绿地面积，为市民提供了更加宜居的生活环境。同时，合理开发利用风景名胜区和森林公园等生态资源，有助于保护生态环境，提升城市品质，朝着国家生态园林城市的目标迈进[8]。

基于以上问题，本研究的主要目的是：1) 利用 2000 年、2010 年和 2021 年的遥感影像时间序列和一组景观指数，探究某市中心城区绿地碎片化过程的空间格局；2) 运用空间句法理论，计算出街道整合度以确定某市中心不同区域的城市化过程；3) 探讨某市绿地碎片化与城市发展之间的关系，为城市绿地永续发展和相关政策的制定提供有价值的参考数据[9]。

4. 研究方法

4.1. 研究区域

某市位于欧亚大陆东南边缘，地处中国东南沿海、福建省中东部的闽江口。位于北纬 25°15'~26°39'，东经 118°08'~120°31'。根据统计资料显示，2017 年某市国内生产总值(GDP)为 1137.02 亿美元。截至 2018 年，全市下辖 6 个区、6 个县、和 1 个县级市，总面积 11,968 平方公里，建成区面积 357 平方公里，2019 年常住人口 780 万人，城镇化率 70.5%。某市由 5 个区及 8 个县组成，因此，本研究以某市中心区域为研究范围，总面积为 31,041 平方公里。

4.2. 空间句法

空间句法(Space Syntax)提供了一种测量街道连通性的替代方法。起源于建筑和城市设计，空间句法通常被理解作为一种使用拓扑学方法来表征和量化城市空间内建筑物或街道内封闭空间的空间布局的方法。其与交集密度不同，空间句法度量关注网络内的拓扑距离，即从一个位置到达另一位置所需的匝数。而计算空间句法测度的过程则在其他研究上进行了探讨[10]。由于城市空间与道路网络结构密切相关，因此空间句法在定量描述交通网络结构上具有其优势。过往的城市结构研究大多以抽象的拓扑网络展开，但这种方法只能反映纯粹的空间拓扑关系，并未从人对空间结构的感知出发研究城市空间，往往忽略了人在城市空间中的移动，因此缺乏对空间社会性认知的表达。而空间句法则是借助计算机进行定量化的研究，是具有社会学意义的空间构成关系的理论和方法，除了对物质性城市空间进行客观的拓扑分析外，又顾及人在运

动中对城市空间的主观感知,因此使得空间句法对道路网络结构的描述更为科学合理。简言之,街道整合度为一种关键的空间句法度量,它显示了从定义的区域(例如,距街道中心一定距离)来看,该街道段与其他所有街道段在拓扑上的“可访问性”。街道路段的整合度值越高,意味着从网络中其他街道到达路段所需的弯道就越少。图 1(a)显示了一个街道网络,图 1(b)显示了整合级别。



Figure 1. Street network
图 1. 街道网络

整合度(Integration)是空间句法的属性值之一,是以空间形态分析为基础对城市空间进行分析的方法,通过形态分析变量来定量描述位于城市自由空间中的交通线路的空间属性。连接值、选择度、控制度、深度值和整合度则是传统空间句法模型的主要形态分析变量,后又衍生出选择度指标。空间形态分析变量是通过构建线段地图,并借助计算机软件得到的。空间句法是依据“最少且最长”的原则,用很长轴线来描绘及抽象化城市道路网络,借以得到轴线地图,并可通过软体转译为线段地图。用轴线来描绘可通视的空间,表达人在空间中的主观感受,即一条有转折的道路会带给人多个空间层次感,人根据道路的邻接关系来识别行走而不是依据道路的实际距离。空间句法自出现以来,已被国内外学者广泛用于城市空间问题的分析,并在实证中得到不断的验证和完善,其合理性得到普遍认可。空间句法可以对城市空间结构进行量化,以往许多研究指出,空间句法的空间属性值对城市中许多活动具有很强的解释能力,例如街道可达性的高低、土地利用分布情况等。因此,使用空间句法可以量化出某市道路的可及性情况,为城市化提供可靠的数据[10]。

4.3. 地理加权回归

本研究采用普通最小二乘法(OLS)回归和地理加权回归(GWR)来量化某市城市绿地碎片化与城市化的关系。通过计算景观指标与城市化指标之间的相关系数,用以探讨它们之间可能存在的线性关系。

其计算公式如下所示:

OLS 模型表示为:

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

其中, x_i 表示自变量, y 表示因变量, β_0 是截距, β_i 表示 x_i 的系数, k 是自变量的个数, ε 表示误差项。

GWR 模型扩展了传统的 OLS 回归,通过生成一组适合于测量跨空间非平稳变化的局部特定系数,广泛用于确定空间变化关系。

GWR 模型可以表示为:

$$y_j = \beta_0(u_j, v_j) + \sum_{i=1}^k \beta_i(u_j, v_j) x_{ij} + \varepsilon_j \quad (2)$$

其中, u_j 和 v_j 表示位置 j 的空间位置, $\beta_0(u_j, v_j)$ 为截距, $\beta_i(u_j, v_j)$ 为 x_{ij} 自变量的局部估计系数。

参数 $\beta_i(u_j, v_j)$ 的估计采用以下方程式:

$$\hat{\beta}(u_i, v_i) = [X^T W(u_i, v_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y \quad (3)$$

其中, $W(u_j, v_j)$ 为 $n \times n$ 矩阵, 其中对角线元素为观测 i 观测资料的地理权重, 非对角线元素的值为 0。计算每个点 i 的权值矩阵, 估计其参数。

GWR 方法需要建立内核频宽以确定空间依赖性的程度。然后使用距离衰减函数对空间单元内的所有观测进行加权, 假设较近观测产生的影响比较远观测产生的影响更显著[11]。

本研究应用高斯距离衰减函数来表示地理权重:

$$W_{ij} = \exp(-d_{ij}^2/d^2) \quad (4)$$

其中, W_{ij} 为观测值 j 在观测值 i 的邻域内的权值, d_{ij} 为观测值 i 与 j 的距离, h 为核频宽。

4.4. 研究分析数据

4.4.1. 景观指数

景观指数是一种能够高度概括景观格局信息、体现其结构组成与空间配置特征的定量指标, 是开展景观格局分析的关键技术手段与方法。在城市绿地生态网络的结构特征和空间分布描述方面, 景观指数具有较好的解释力。然而, 近年来的研究揭示, 不同格局指数反映了格局的不同侧面, 单一的格局指数往往难以对生态过程进行全面、准确的解释。因此, 通过联合应用景观指数, 挖掘景观指数集合对生态过程的解释能力, 成为景观空间格局分析的有效途径。在本研究中, 我们选择最大斑块指数(LPI)和景观形状指数(LSI)进行评估, 主要原因是这两个指标的数值范围大于其他指标, 故将其作为因变量进行深入分析。最大斑块指数(LPI)描述了某一类型最大斑块占据整个景观面积的比例, 其值大小决定了景观中的优势种、内部种的丰富度等生态特征, 同时也影响着干扰的强度和频率, 反映人类活动的方向和强度。景观形状指数(LSI)则用于确定景观的复杂性, 其值越高, 景观越分散和复杂(表 2)。这两个指标可以根据 LANDSAT 影像进行计算。本研究依托地理空间资料云, 基于 LANDSAT 卫星获取 2000 年、2010 年、2021 年某市遥感影像资料集, 并运用 ENVI 软件(5.1)进行处理, 以获取某市中心绿地信息。首先对地物进行样本选择, 然后采用最大似然监督分类器进行分类, 最后利用混淆矩阵进行精度验证。分类结果将影像划分为六类: 林地、水体、建设用地、农田、草地、荒地(图 2)。随后, 将分类数据导入 FRAGSTATS, 计算出某市绿地的最大斑块指数(LPI)和景观形状指数(LSI)。最后, 在 ArcGIS 中使用“创建鱼网(fishnet)”工具, 将计算出的土地利用图划分为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 网格。

Table 2. Landscape index used in this study

表 2. 本研究使用的景观指数

景观指数	解释	公式	范围
LPI	LPI 的计算方法是最大斑块面积除以总景观面积, 再乘以 100。	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} \times 100$	$0 < LPI \leq 100$
LSI	所有缀块 E 边界总长度(km)除以 A 区域面积(km ²)的平方根, 再乘以正方形校正常数, 反映区域建成区缀块的不规则或复杂程度, LSI 值越大, 说明景观中缀块形状越破碎或越偏离正方形。LSI ≥ 1 , 无上限; 当景观中只有一个正方形缀块时, LSI = 1; 但景观中缀块形状不规则或偏离正方形时, LSI 值增大。	$LSI = \frac{0.25\sqrt{E}}{A}$	LSI ≥ 1

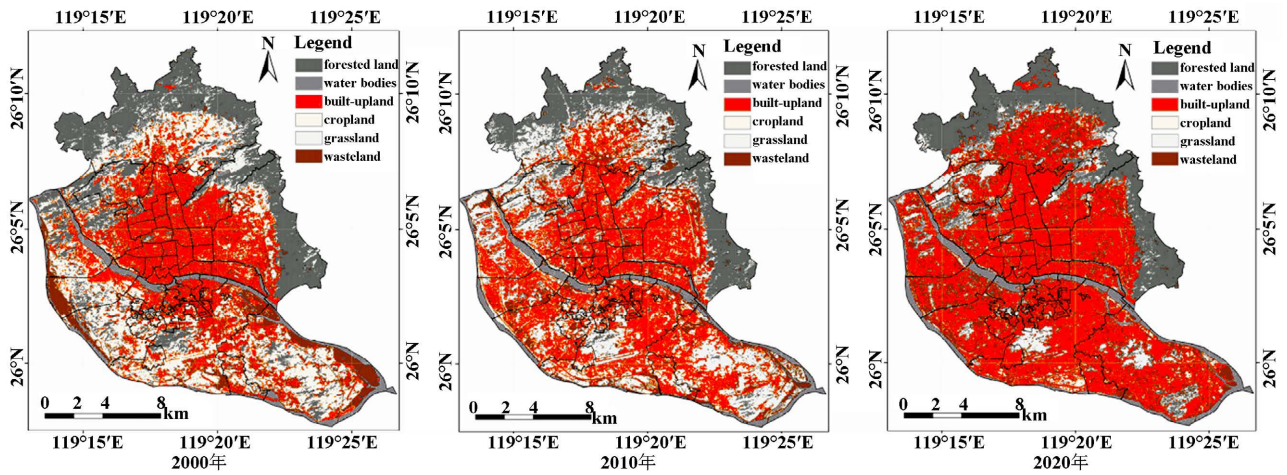


Figure 2. Land use situation in a city center in 2000, 2010, and 2021

图 2. 2000、2010、2021 年某市中心土地利用情况

4.4.2. 整合度

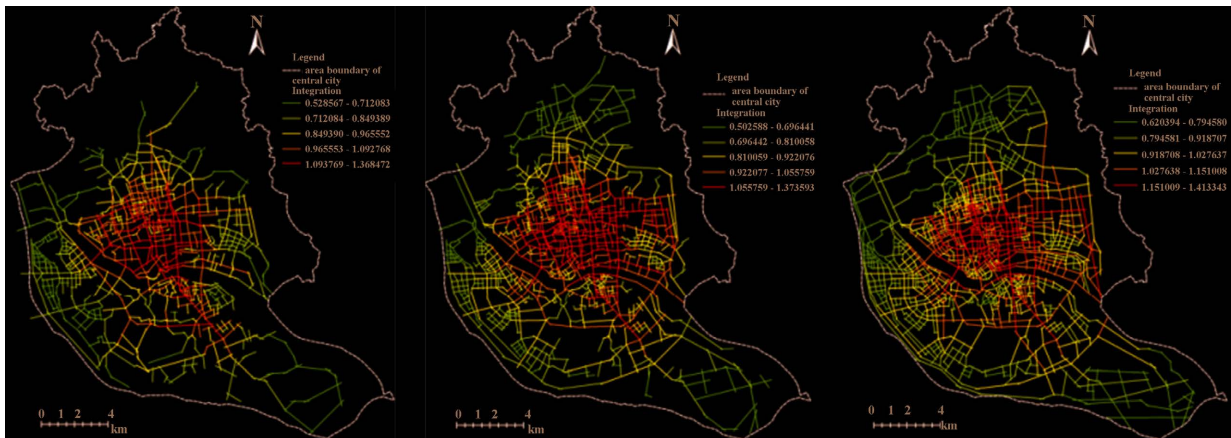


Figure 3. Overall integration degree of streets in a central urban area (2000~2021)

图 3. 某市中心城区街道全域整合度(2000~2021)

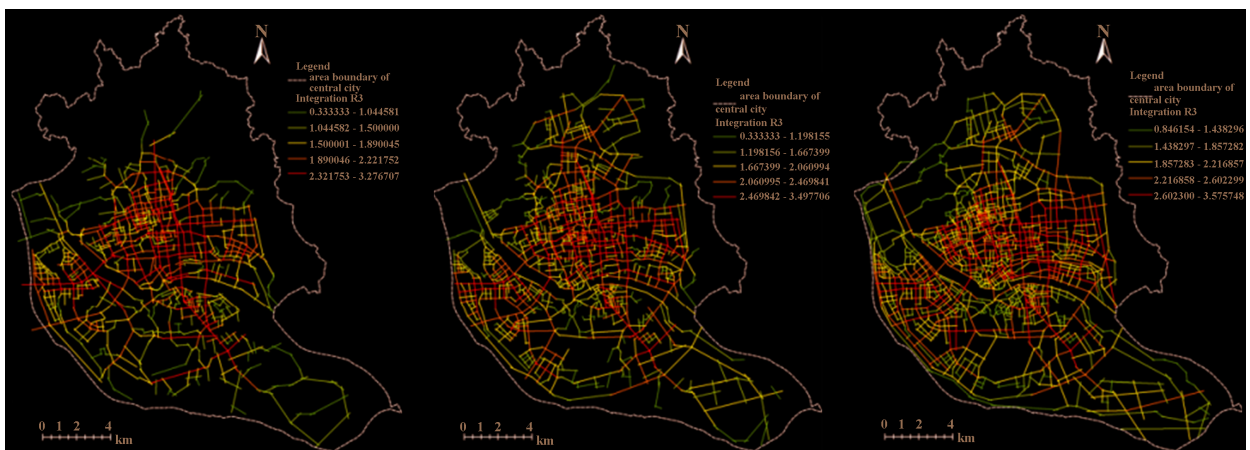


Figure 4. Local integration degree of streets in a central urban area (R = 3) (2000~2021)

图 4. 2000~2021 年某市中心城区街道局部整合度(R = 3) (2000~2021)

空间句法属性值整合度可以由 Depth Map X software 计算。本研究把空间属性中的整合度作为独立变量, 该值作为空间深浅的表现, 高的整合度可以表现为人员集中活动区域。整合度区分为全域整合度及局部整合度($R = 3$); 全域整合度计算每条街道到其它所有街道的拓扑深度, 而局部整合度则仅计算每条街道距离 3 个拓扑深度距离的街道的平均深度。空间句法研究认为, 全域整合度可以反映出全城市的主要中心; 局部整合度可以避免边界作用的影响, 并且可以反映出城市的次中心。本研究分别计算出某市 2000、2010、2021 年的道路全域整合度和局部整合度(如图 3、图 4 所示)。

5. 研究结果

5.1. 某市中心城区城市化演变分析

5.1.1. 道路全局整合度

本研究针对道路全域整合度进行描述性统计(表 3), 从资料中可以清晰地看出, 除了街道的数量不断提升外, 还可以看到街道整合度平均值呈现上升的趋势。其次, 本研究将整合度图转换为栅格图形。运用 ArcMap 中的“创建鱼网(fishnet)”工具, 将附有整合度的轴线图划分为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 网格。从图 5 中可以看到城市街道全域整合度的变化, 即城市化强度的演变。红色表示最高的整合度, 绿色为最低的整合度。从 2000 年的街道整合度看出, 高的整合度主要集中在市中心的位置, 该位置为鼓楼区、晋安区和仓山区的中心区域。这两个区域为城市的老城区, 可以看到该时期, 城市化主要还是集中在这两个城区, 红色区域显示出该范围。到了 2010 年, 道路整合度发生了变化, 红色部分减少, 白色部分和黄色部分有所增加, 由此表明老城仓山区的中心逐渐被弱化, 城市化主要以鼓楼区和晋安区为中心向四周扩展, 但该时期的重心还是集中在城市中心位置, 并以鼓楼区为主。2021 年的整合度同样发生了变化, 从图 5 中看到, 黄色部分有所减少, 红色的部分也相应有所减少, 而白色部分则变大。其结果表明城市中心的位置不断被弱化, 城市化强度重心则向四周扩展。

Table 3. Descriptive statistics of overall integration degree of roads in a central urban area in 2000, 2010, and 2021
表 3. 2000、2010、2021 年某市中心城区道路全域整合度描述性统计

	2000 年	2010 年	2021 年
数量	798	1112	1243
平均值	0.729	0.889	0.962
最大值	1.368	1.374	1.413
最小值	0.529	0.503	0.62
标准差	0.165	0.163	0.149

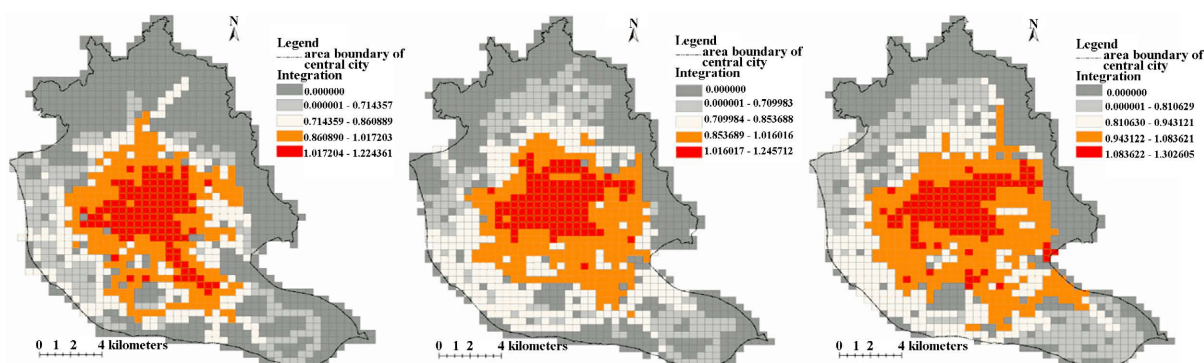


Figure 5. Urbanization intensity in 2000, 2010 and 2021

图 5. 2000、2010、2021 年城市化强度

5.1.2. 道路局部整合度

运用相同的方法，计算出某市道路局部整合度($R = 3$)。表 4 是 2000~2021 年某市中心城区街道局部整合度($R = 3$)的统计分析，局部整合度可以体现城市的次要中心区域。从中可以看出，街道局部整合度同样呈现上升趋势，说明街道次要中心不断地在发展。图 6 为城市道路局部整合度($R = 3$)演变，即城市化强度演变；2000~2010 年，西边和南边的红色部分有所增加，同时北边的白色和红色向北扩展，这表明了道路的结构在发生变化，城市次中心亦有所发展。2010~2021 年，中心的红色部分有所减少，东南边的黄色和白色部分呈上升趋势，此现象说明了市中心的发展有所饱和，道路向外延伸，城市的发展重心继续向外扩展，城市的次中心得到进一步的加强[12]。

Table 4. Descriptive statistics of local integration degree of roads in a central urban area in 2000, 2010 and 2021
表 4. 2000、2010、2021 年某市中心城区道路局部整合度描述性统计

	2000 年	2010 年	2021 年
数量	798	1112	1243
平均值	1.706	1.845	1.996
最大值	3.277	3.498	3.576
最小值	0.333	0.333	0.846
标准差	0.514	0.497	0.452

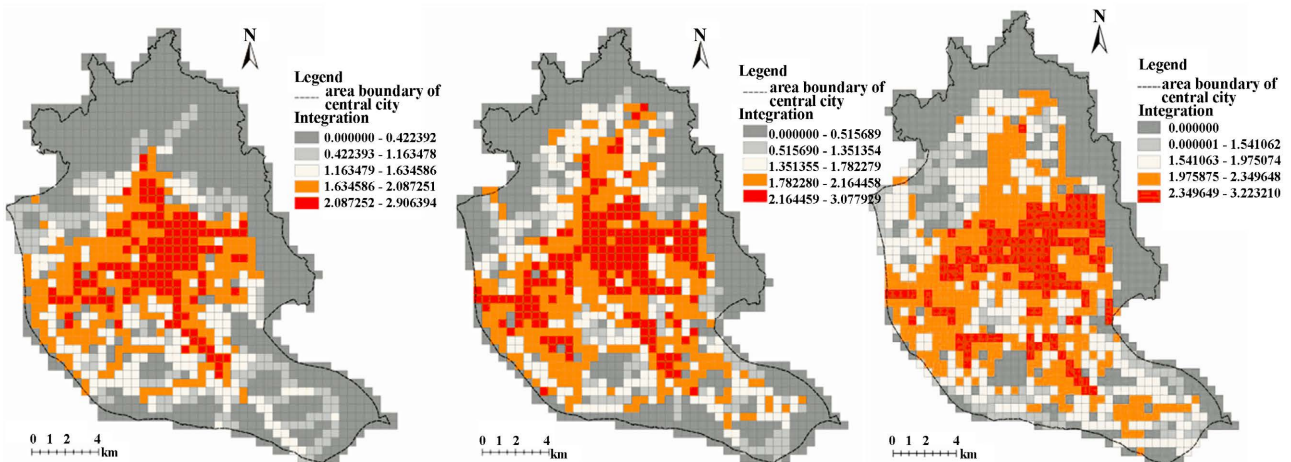


Figure 6. Urbanization intensity of local integration degree of roads in 2000, 2010 and 2021

图 6. 2000、2010、2021 年城市化道路局部整合度强度

5.2. 城市绿地碎片化的演变分析

5.2.1. 最大斑块指数

如表 5 所示，研究期间的 LPI 发生了改变，其中，林地、水体、耕地的值出现下降，而草地的值则呈上升趋势。农田 LPI 值下降幅度最大，从 2000 年的 7.97 下降到 2021 年的 0.17。水体的 LPI 值从原先的 1.43 降至 0.42。这一发现说明，某市中心区以前以农田为主导的地位逐渐减弱。总体而言，研究期间城市所有绿地 LPI 从 41.36 下降到 12.76，这说明了受到人类活动的影响，城市的大量绿地转化为建设用地。

Table 5. Maximum patch index of green space in a central urban area from 2000 to 2021
表 5. 2000~2021 年某市中心城区绿地最大斑块指数

土地利用	2000 年	2010 年	2021 年
林地	13.56	10.36	8.59
水体	1.43	0.92	0.42
耕地	7.97	0.53	0.17
草地	1.06	1.62	2.83
城市总绿地	41.36	29.40	12.76

为了探讨 2000~2021 年期间某市城区绿地的 LPI 演变情况,本研究进一步使用 ArcGIS 软件计算空间度量(图 7)。2000~2021 年期间,在某市中心城区西边的区域, LPI 值总体出现的下降的趋势,而在中心的位置, LPI 值则呈现上升。这一现象表明,从 2000 年到 2010 年,该地区发生了较大的改变,大部分的农田变成了建设用地,中心城区的绿地空间也进行了人工干预。从 2010 到 2021 年,城市化进一步发展,西边区域的 LPI 值出现上升,主要是由于绿地面积的提升以及中心区域向西边及南面的扩散,说明了城市绿地空间碎片化不断加剧。

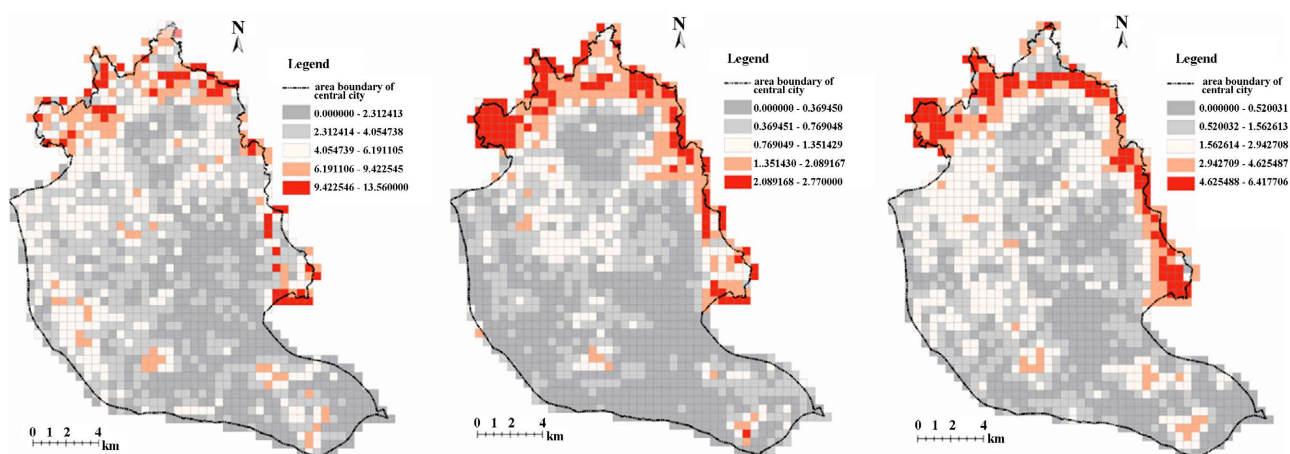


Figure 7. Change map of the maximum patch index of urban green space in a central urban area (2000~2021)

图 7. 某市中心城区城市绿地最大斑块指数变化图(2000~2021)

5.2.2. 景观形状指数

Table 6. Green space landscape shape index in a central urban area from 2000 to 2021

表 6. 2000~2021 年某市中心城区绿地景观形状指数

土地利用	2000 年	2010 年	2021 年
林地	62.95	51.37	36.05
水体	18.40	17.04	16.58
耕地	72.21	59.25	42.21
草地	73.81	61.31	41.48
城市总绿地	79.53	84.11	111.69

LSI 指出(表 6), 在研究期间内, 某市中心地区林地、水体、耕地、草地均呈现下降趋势, 而总绿地的 LSI 值则呈上升趋势, 从 2000 年 79.53 上升到 2021 年的 111.69。具体而言, 林地和农田的 LSI 值显示 2000 至 2021 年期间的下降趋势较为明显, 林地从 62.95 下降到 36.05, 而农田从 72.21 降至 42.21。水体 LSI 值也有较小的下降, 从 18.40 降至 16.58。草地的 LSI 则从原来的 73.81 下降至 41.48。这些结果表明, 由于人类的干预导致了林地和水体形状的简化, 相反地却增加了绿色景观形状的复杂性。

2000 年至 2021 年某市中心城区城市绿地 LSI 值的变迁过程如图 8 所示。城区西部区域的 LSI 值呈现下降趋势, 表明这些地区城市绿地碎片化程度相对较低。然而, 中心城区的 LSI 值有所上升, 说明这些区域的城市绿地形态更为复杂且分散。在 2010 年至 2021 年期间, 大部分地区 LSI 值发生变化, 北部、中心和东部区域的 LSI 呈下降趋势, 而西部和南部地区 LSI 值则有所上升。据此, 研究期间内城市绿地形状的复杂性和破碎性得以揭示。

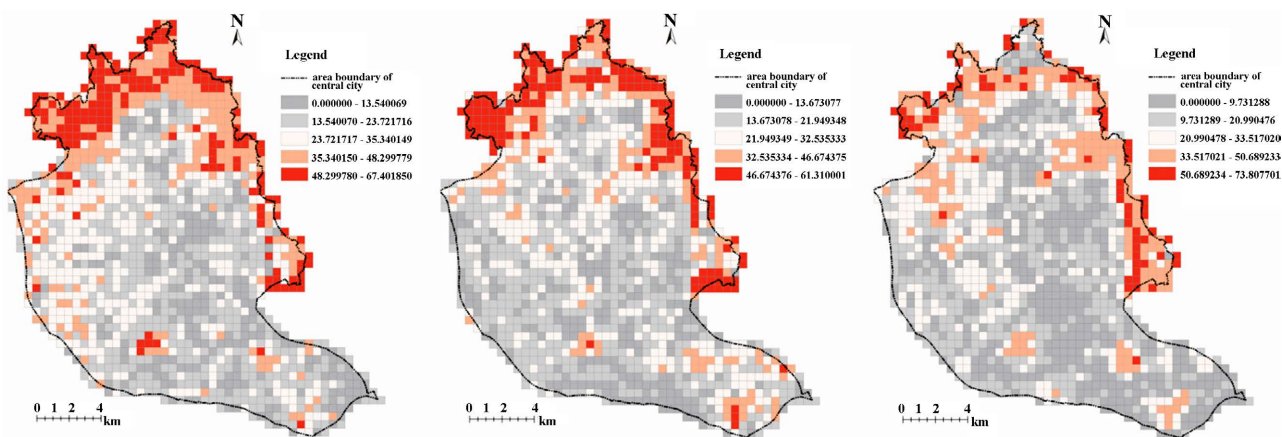


Figure 8. Change map of green space landscape shape index in a city center (2000~2021)

图 8. 某市中心城市绿地景观形状指数变化图(2000~2021)

5.3. 城市化对城市绿地碎片化的影响

本研究采用 SAM 4.0 进行统计空间分析, 获得了 GWR 模型的类比结果。为进一步验证 GWR 模型的可靠性, 本研究运用 sigma 模型, 计算了 OLS 和 GWR 模型的 Akaike Information Criterion (AIC) (参见表 7)。结果显示, GWR 模型生成的 LPI 和 LSI 指数变异 sigma 值低于 OLS 模型生成的相应值。同时, 采用 GWR 模型获得的 AIC 值均低于 OLS 模型, 表明 GWR 模型更贴近实际情况。在不同时期, GWR 模型所获得的 sigma 和 AIC 值均低于 OLS 模型, 这说明 GWR 模型在揭示城市绿地碎片化与城市化关系方面具有更优异的性能。

Table 7. Analog results of GWR and OLS models in 2000

表 7. 2000 年 GWR 和 OLS 模型的类比结果

	GWR Model		OLS Model	
	LPI	LSI	LPI	LSI
Sigma	1.298	9.658	1.988	13.202
AIC	5600.536	9998.893	6105.948	11043.345
R^2	0.556	0.799	0.1677	0.071
Adj- R^2	0.519	0.778	0.1670	0.070

6. 结论

本研究首先通过计算城市绿地空间的景观指数和道路整合度,将所得数值输入地理加权回归(GWR)模型,以探究城市化对某市中心城区绿地碎片化在不同时空的影响。这一研究视角的时空特性有助于全面揭示城市绿地格局与城市化之间的时空异质性,这在过去的文献中鲜有讨论。此外,通过 GWR 模型的结果,我们得以呈现城市化进程对城市绿地格局不同时期的影响。研究结果显示,城市化过程中大量绿地被占用,直接导致了城市绿地的高度碎片化。城市化初期主要集中在西部和北部地区,但由于发展空间有限,城市化进程逐渐向西南区域扩展,尤其在 2010 年,发展更为迅速。综上,研究期间城市绿地的空间格局发生了显著变化。然而,政府在保护绿色空间和建设新绿色区域方面推出的各种政策,多数并未取得预期效果。本研究还发现,城市绿地的空间格局变化与街道空间结构具有密切关联。某市政府的相关政策对快速城市化产生了重大影响,尤其是城市的政策和总体规划对绿地发展具有关键作用。因此,从可持续性和生态性的角度出发,有必要采取有效措施保护现有自然绿地,同时规划高质量的城市绿地。绿地空间规划也应充分考虑使用者的需求,以确保物理规划与实际需求相结合。最后,对城市绿地进行持续评估,以审视规划和实施效果。为提高研究的可靠性和扩展性,本研究采用了丰富多样的数据和多种分析方法进行深入探讨。然而,研究仍存在一定局限性。首先,城市化与景观空间格局和规模具有一定相关性,本研究选取的土地利用网格尺寸为 $500 \times 500 \text{ m}$,可能导致一些对某市整体绿地有较小贡献的新绿地被忽略。其次,仅从整合度变量评价城市化过程,难以全面解释城市绿地碎片化现象。因此,后续研究可结合更多变量进行比较研究,如人口密度、国内生产总值等,以揭示绿地碎片化与城市化之间的内在关系,并利用高分辨率卫星影像探讨景观空间格局的演变。

综上所述,本研究通过丰富多样的数据和分析方法,揭示了城市化对某市中心城区绿地碎片化影响的时空异质性。研究发现,城市化进程中的绿地占用、政策实施和空间格局变化等因素对绿地发展具有重要影响。为了实现可持续发展和生态友好型城市,政府和社会各界应共同努力,保护现有自然绿地,规划高质量城市绿地,充分考虑使用者需求,并对城市绿地进行持续评估。通过这些措施,有望实现城市绿色空间的优化和发展。

参考文献

- [1] 宁小卓. 莆田元妙观的评估与保护利用策略研究[J]. 华中建筑, 2015, 33(3): 166-171.
- [2] 丁传标, 赵永琪, 陶伟. 城市化进程中家屋空间重构的过程、内容与逻辑——以广州珠村为例[J]. 地理科学, 2017, 37(9): 1326-1336.
- [3] 陶伟, 陈红叶, 林杰勇. 句法视角下广州传统村落空间形态及认知研究[J]. 地理学报, 2013, 68(2): 209-218.
- [4] 古恒宇, 黄铎, 沈体雁, 覃小玲. 多源城市数据驱动下城市设计中的空间句法模型校核及应用研究[J]. 规划师, 2019, 35(5): 67-73.
- [5] 张元龙, 张袁, 王方. 基于空间句法的合肥市轨道交通网络特征研究[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(3): 130-137.
- [6] 胡潇. 空间意象经营的文化机理与“句法”[J]. 江海学刊, 2016(6): 18-25.
- [7] 张潇, 蒋子韬. 山西省传统村落空间特性研究[J]. 地理信息世界, 2019, 26(3): 43-49.
- [8] 张生瑞, 王英杰, 张桐艳, 曹瑞昌. 基于跨界界自然地理实体地名空间格局的行政管理优化[J]. 地理学报, 2019, 74(4): 797-813.
- [9] 李玉婷, 钱云. 基于空间句法的京西古道沿线传统村落特征研究[J]. 中外建筑, 2021(2): 12-18.
- [10] 李卓, 刘星辰, 邵务兵, 黄慧. 基于空间句法和相关分析的邮轮空间规划设计研究[J]. 装饰, 2023(4): 136-138.
- [11] 刘安乐, 明庆忠, 杨承玥, 谈思. 滇黔桂传统村落空间分布特征及其与旅游发展关系[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(9): 166-177.
- [12] 秦川, 陈晓健. 基于空间句法的安康城市形态发展研究[J]. 规划师, 2010, 26(S2): 56-59.