

DOI: 10.20103/j.stxb.202312122708

杨筠慧, 史文娇, 周伟奇, 王江浩, 钱雨果, 王伟民. 城市景观格局演变驱动因子及其特征研究综述. 生态学报, 2024, 44(22): 10486-10498.

Yang J H, Shi W J, Zhou W Q, Wang J H, Qian Y G, Wang W M. A review on the driving factors and their characteristics in urban landscape pattern changes. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10486-10498.

城市景观格局演变驱动因子及其特征研究综述

杨筠慧^{1,4}, 史文娇^{1,4,*}, 周伟奇^{2,4}, 王江浩^{3,4}, 钱雨果^{2,4}, 王伟民⁵

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

4 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

5 广东省深圳生态环境监测中心站, 深圳 518049

摘要: 识别城市景观格局演变的驱动因子, 是更好地理解城市景观动态格局、过程及其影响的关键, 对于城市景观格局优化与预测、城市空间规划和政策制定等均至关重要。系统梳理了城市景观格局演变的驱动因子; 归纳了城市景观格局变化驱动因子定量分析模型, 包括基于经验的统计模型和基于过程的动态模型; 阐明了全球、国家、城市群和城市等不同尺度下城市景观格局演变驱动因子的时空和尺度异质性特征, 以及不同驱动因子的直接和间接效应。提出了城市景观格局演变驱动因子的未来研究方向。

关键词: 城市景观格局; 时空异质性; 多尺度; 主控因子; 驱动力

A review on the driving factors and their characteristics in urban landscape pattern changes

YANG Junhui^{1,4}, SHI Wenjiao^{1,4,*}, ZHOU Weiqi^{2,4}, WANG Jianghao^{3,4}, QIAN Yuguo^{2,4}, WANG Weimin⁵

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 Shenzhen Ecological Environment Monitoring Center of Guangdong Province, Shenzhen 518049, China

Abstract: Identifying the driving factors of urban landscape pattern changes is key to better understanding the dynamic patterns, processes and influences of urban landscapes, which is crucial for optimizing and predicting of urban landscape patterns and for formulation of urban spatial planning and policies. We systematically reviewed the drivers of changes in urban landscape patterns, generally divided into human activities and natural factors. Human activities, especially population change, economic development, and policies, are the primary driving forces of urban landscape pattern changes, particularly over shorter time scales. Natural factors, such as topography, climate, and water resources, provide the material foundation and environmental conditions shaping urban landscape patterns, primarily determining the spatial pattern of cities over long periods. In addition, we summarized the quantitative analysis models of the drivers of urban landscape pattern

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1301101); 国家自然科学基金项目(42330707)

收稿日期: 2023-12-12; **网络出版日期:** 2024-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shiwj@lreis.ac.cn

changes, including empirically based statistical models and process-based dynamic models. Statistical models dominate in the quantitative analysis of driving factors of urban landscape changes and are classified according to their correlation relationships into linear, non-linear relationship, spatial relationship and causality models. Process-based dynamic models, including the system dynamics model, cellular automata model, and multi-agent system model, effectively simulate the operation of systems by deeply understanding various driving forces and analyzing interactions among the internal components of the system. Furthermore, we clarified the spatio-temporal and scaling heterogeneity patterns of driving factors of urban landscape pattern changes at different scales, including global, national, agglomeration and city levels, as well as the direct and indirect effects of different driving factors. The degree and direction of influence of drivers of urban landscape pattern changes vary regularly over time, differ between regions, and change with the spatial scale of the study unit. Moreover, these drivers are not isolated from each other, and there are complex interactions between them. Changes in these drivers can directly affect the spatial configuration of urban landscapes, and the interactions between different factors can also have indirect effects. Finally, we identified future research directions for the study of driving factors of urban landscape pattern changes, including temporal attribution analysis of urban landscape pattern changes, spatial effects and feedback mechanisms of urban social-ecological landscape patterns and their driving factors, and cross-scale interaction analysis of driving factors influencing urban landscape pattern changes.

Key Words: urban landscape pattern; spatiotemporal heterogeneity; multi-scales; dominant influence factor; driving forces

城市景观格局是指大小和形状各异的建筑、绿地、道路等景观要素在空间上的排列方式^[1]。其中,城市扩张是城市景观格局演变最直观的表现形式,过度城市化对城市生态和资源环境造成严重威胁;另外,城市绿地格局改变,也是城市景观演变时空分析的主要内容^[2]。城市作为人类活动的中心,在不同时空尺度上受到景观内外各种因素的相互作用,使得城市景观格局一直处于变化之中^[3-4]。深入探究城市景观格局变化的驱动因素和原因,揭示人类活动、自然环境以及城市发展之间复杂相互关系,对于全面理解城市发展的动态过程和内在机制、优化城市空间规划和管理,以及实现可持续城市发展具有重要意义^[5-7]。

近几十年来,在全球、国家、城市群和城市等不同尺度下,城市景观格局演变表现出明显的多样性特征^[8-10]。比如,在全球尺度,2001—2018年,北美、亚洲和南美的城市建成区面积增幅较大;城市绿化主要发生在北美和欧洲,而东南亚、非洲和南美洲的大部分城市植被正逐渐减少^[8, 11]。在国家尺度,亚洲和非洲的发展中国家城市建成区面积增长率最高^[12]。以上城市景观格局演变的驱动因子非常复杂,在全球、国家、区域、城市群和城市等多个尺度上,城市景观格局演变的驱动机制存在分异性规律^[13];在不同时间上,城市景观格局演变的驱动机制高度动态^[6, 14];在不同空间上,由于地理和政治背景的差异,使得城市景观格局的驱动机制存在明显的空间异质性^[7, 14-16]。因此,深入分析不同尺度城市景观格局变化的驱动机制,对城市规划决策中制定最优的城市发展战略至关重要,是促进城市可持续发展的重要前提^[5-7]。

目前,已有综述研究侧重于城市景观格局的演变及方法分析^[17-18],缺乏对城市扩张和绿地变化等多方面城市景观格局变化驱动因子的归纳,也较少进行跨时空对比,对主导驱动力的时间尺度和空间尺度效应的关注不足。因此,本文在系统梳理国内外相关研究的基础上,分析城市景观格局变化驱动因子的定量研究方法,揭示不同尺度下城市景观格局演变驱动因子的时空和尺度异质性特征,并提出未来可能的研究方向,以期为城市用地布局合理规划和优化调控,实现城市可持续发展目标和新型城镇化提供借鉴。

1 城市景观格局演变驱动因子

城市景观格局演变的驱动因子通常分为人类活动和自然因素。自然因素包括地形、水和气候等,人类活动包括社会经济发展、政策和区位等。图1总结了文献中城市扩张和城市绿化的主控因子。

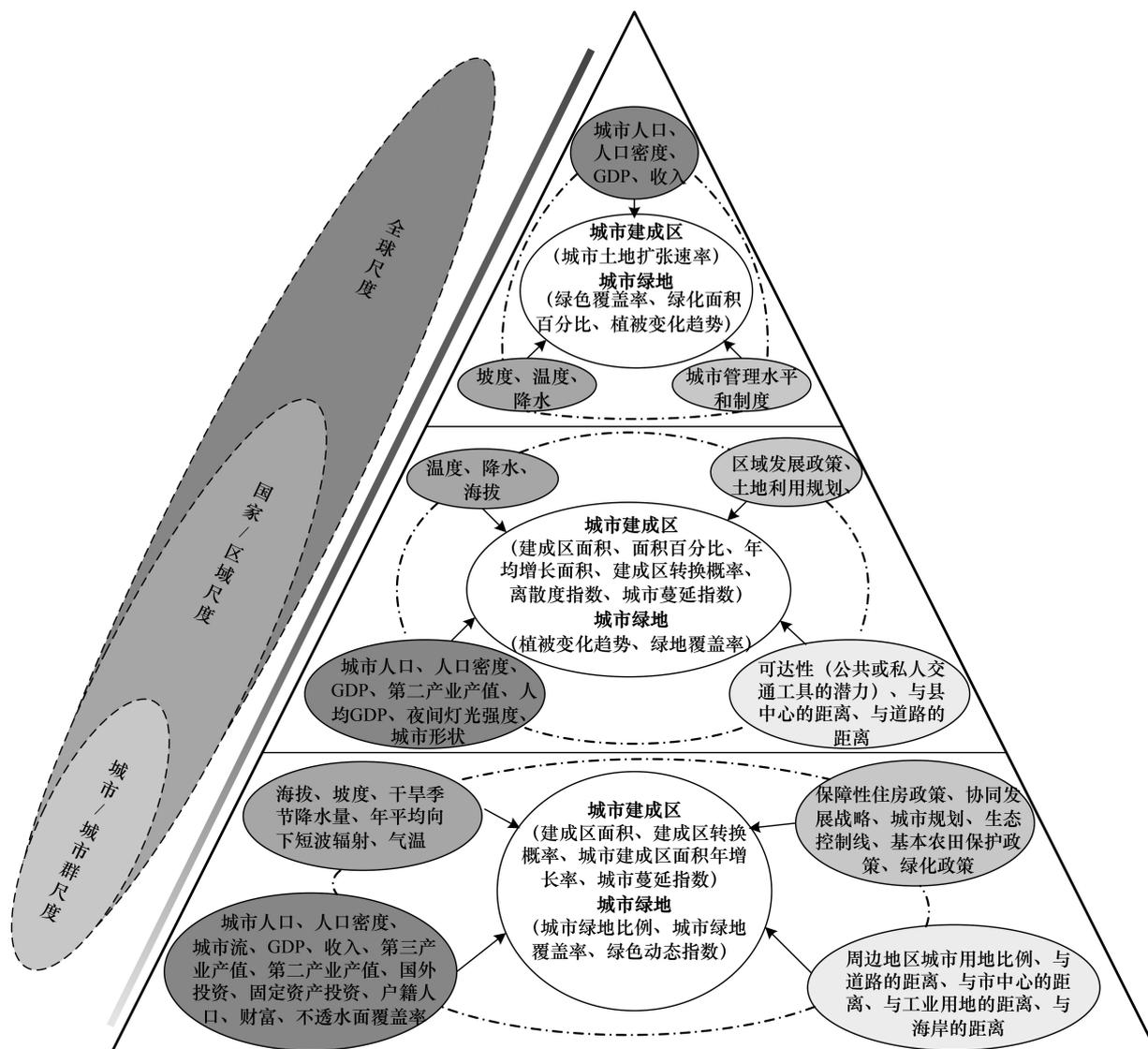


图1 城市扩张和城市绿化的驱动因子

Fig.1 The driving factors of urban expansion and greening

1.1 人类活动

人类活动是城市景观格局变化的主要驱动因素^[19-21],尤其是在较短的时间尺度内,人口变化、经济发展和政策等通常是驱动城市景观格局变化的主要力量。

人口因素,特别是城市总人口和人口密度的增长,被认为是城市扩张^[14, 19, 22]和绿地覆盖率减少^[23-24]的关键驱动因素之一。城市人口增加必定会带来更高的居住、公共设施和交通需求^[6, 25]。不同人口结构(劳动人口、单身人口、退休人口、户籍人口和高素质创意阶层人口等)也会影响城市扩张^[21, 26]。例如,中国和伊朗等地区创意阶层人数和户籍人口增加会抑制城市建成区扩张^[7, 27]。此外,城市之间的人口、信息和物质的流动,在空间上也会影响城市扩张的规模、速度和方向^[28]。

经济发展通过增加城市土地和建设需求来推动城市扩张^[19, 26],包括GDP^[19]和人均GDP^[14]、生活水平(平均收入和消费品零售总额)^[26]、产业结构转型^[19]、国外投资和固定资产投资^[26, 29]等。经济增长对城市绿地产生的影响较为复杂。GDP增长和夜间灯光强度对城市绿化具有负向影响^[11, 30],相反,人均GDP、人均收入、固定资产投资和房价等代表财富的指标与城市绿地覆盖率呈正相关,即经济发达的城市,绿地覆盖率

更高^[13, 31-33]。

政策与规划因素是影响城市景观形态与功能的关键驱动力^[34-35]。区域发展政策^[29]、协同发展战略^[36]和保障性住房政策^[27]等促进城市社会经济发展的政策,对中小城市扩张具有显著的影响^[29, 36]。土地利用规划政策可以有效控制城市的无序增长,如在我国实施的《全国土地利用总体规划纲要》中,当对建设用地总量的控制力度加大 1%时,各市建设用地增量平均每年将减少 44.27hm²^[37]。基本农田和生态控制线的划定对建设用地扩张也具有显著负影响^[38-39],如在深圳市每单位生态控制线范围的增加将使建筑用地景观扩张的机会比率减少到原来 0.8168 倍^[39]。

此外,社会因素、文化活动和经济区位也会影响城市景观格局演变^[40]。例如,在拉美和加勒比地区,社会不平等加剧以及民主水平的下降,导致城市植被覆盖减少,破碎化程度增加^[41]。奥运会这样的大型活动则会促进城市绿化。据统计,与奥运会相关的城市改造直接增加了 3.41%的城市绿地覆盖率,且奥运会后城市绿地景观普遍变得更加不规则和分散^[42]。经济区位因素,如到道路的距离^[38, 43]、到市中心或行政中心的距离^[19]、周边地区城市用地比例^[6]和可供开发用地量^[5]等,对城市扩张具有空间导向作用,促使新增城市用地主要集中在靠近大都市、道路网络等地理优势区域。

1.2 自然因素

自然因素是塑造城市景观格局的物质基础和环境条件,主要包括地形(海拔和坡度)、气候和水等。这些因素相对稳定,通常在长时间尺度下主导城市的空间格局。海拔和坡度是限制城市扩张^[19, 44]和斑块规模^[44]的两个最主要的地形因素,特别是对于自然条件差和经济发展水平较低的地区^[19, 45]。城市绿地分布也受到地形的强烈影响,海拔较高的城市往往市中心植被更多,这可能是因为山谷底部的城市绿地更容易被占用^[23]。适宜的气候条件有助于城市的发展,城市土地占比将更高^[46]。气候要素对城市绿地产生的影响较大,特别是气温、降水和太阳辐射对城市植被生长具有促进作用^[30, 47]。此外,到河流或海洋的距离主要以两种方式影响城市扩张,一是城市扩张受到水域的限制^[19];二是河流或海洋具有水资源和水上运输优势,有利于周边地区的城市发展^[48]。

2 城市景观格局演变的驱动因子定量分析模型

城市景观格局变化驱动因子定量分析可以揭示景观格局变化的内在机制,有助于预测未来的变化方向。按照模型方法,可分为基于经验的统计模型和基于过程的动态模型,各模型优势和限制如表 1 所示。

2.1 基于经验的统计模型

统计模型在城市景观格局演变的驱动因子定量分析中占主导地位,按照其相关关系可以分为线性关系模型、非线性关系模型、空间关系模型和因果关系模型(图 2)。

(1) 线性关系模型

城市景观格局变化与各种驱动因子之间的线性相关关系常用普通最小二乘法(Ordinary Least Square, OLS)^[49]、多元线性回归模型(Multiple Linear Regression, MLR)^[32, 48]和 Logistic 回归模型(Logistic Regression, LR)^[51]等线性回归模型。其中 OLS 模型和 MLR 模型是分析连续的定量因变量和多个自变量之间简单线性关系的通用方法,具有解释性强等优点。Logistic 回归模型适用于研究二分类因变量(建成区和其它区域)与多个影响因子之间的关系,该方法通过逐步回归对每个栅格上城市土地利用变化的概率进行诊断^[5],筛选出对城市景观格局变化具有显著影响的因素^[50]。

(2) 非线性关系模型

城市景观格局演变是一个复杂的过程,其与驱动因素之间的相互作用和反馈通常具有复杂性和非线性特征。在这种背景下,通常利用基于决策树的集成学习方法,如增强回归树(Boosted Regression Trees, BRT)、分类回归树(Classification and Regression Trees, CART)和随机森林(Random Forests, RF)^[11, 26, 38, 44]等,来解析城市景观格局变化与其驱动因素之间的复杂非线性关系。但是,线性和非线性回归模型容易忽略引起城市景

观格局变化的驱动力(如气温、降水、人口、经济和政策等)在空间上存在高度异质性,不能得出驱动因素贡献程度的空间分布差异,导致难以客观准确地揭示城市景观格局变化的原因。

表 1 城市景观格局演变驱动力定量分析模型的优势和限制

Table 1 Advantages and limitations of quantitative analysis models of the driving factors of urban landscape pattern changes

方法 Method	模型 Model	主要优势 Main advantage	主要限制 Main limitation
基于经验的统计模型 Empirical-based statistical models	最小二乘回归 ^[14, 49] 、多元线性回归模型 ^[16, 27, 32, 48]	操作简单,解释性强	难以解决多模态数据和非线性关系,只能反映全局信息,缺乏解释局部关系的能力
	逻辑回归模型 ^[5, 6, 50-52]	分析对建设用地变化概率等具有显著影响的因素	自变量为分类变量时需要引入哑变量,使得结果难以理解
	集成树 ^[11, 26, 38, 44]	量化驱动因子的相对重要性,可分析复杂的非线性关系,避免过拟合	对数据中的噪声比较敏感,结果较难解释
	地理加权回归模型 ^[33, 49, 53-54]	有效识别城市景观格局变化驱动因素的空间异质性	对数据的空间分布非常敏感,空间权重矩阵的选取对模型参数估计具有显著影响
	空间经济计量模型 ^[3, 7, 15, 19]	考虑空间自相关性,可分析邻近城市的空间溢出效应	
	双重差分模型 ^[42, 55]	可揭示政策或活动与城市景观格局变化的因果关系及其定量作用	只能揭示两个变量之间的因果关系
	工具变量模型 ^[56]	解决内生性问题	选择有效的工具变量较为困难
	向量自回归模型 ^[57]	通过时序数据捕捉变量间的动态关系,揭示政策与事件对城市景观格局演变的因果影响	需要大量时间序列数据
基于过程的动态模型 Process-based dynamic models	结构方程模型 ^[25]	量化影响因素对城市景观变化的直接、间接和综合影响	依赖于使用者的专业知识,需要合理的先验假设来构建概念模型
	系统动力学模型 ^[58]	对于数据不足的区域也具有很好的可行性	缺乏空间因素的处理能力
	元胞自动机模型 ^[59]	微观机制分析,刻画了邻里作用	不考虑宏观因素,单元状态的变化主要由其自身状态以及周围邻近单元格的状态决定
	多智能体模型 ^[60]	将人类行为与城市土地利用方式联系起来	对数据需求高、结果难以泛化到其他区域和情境

(3) 空间关系模型

由于地理过程的复杂性,城市景观格局演变和驱动因子通常存在显著的空间依赖性和空间异质性,使得空间回归模型的拟合效果明显好于线性回归模型^[15, 40, 53]。因此,在研究过程中考虑到空间效应的存在,常采用空间误差模型(Spatial Error Model, SEM)^[3, 19]、空间滞后模型(Spatial Lag Model, SLM)^[3]和空间杜宾模型(Spatial Durbin Model, SDM)^[7]等空间经济计量模型来处理空间相关性,地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression, GWR)^[53]则用来处理空间异质性问题。同时,考虑到空间非平稳关系中的尺度效应,常利用时空地理加权回归(Geographically and Temporally Weighted Regression, GTWR)模型来捕捉不同时空条件下自变量对城市景观格局演变的影响^[61],多尺度地理加权回归(Multiscale Geographically Weighted Regression, MGWR)模型来分析城市景观格局演变和不同驱动因子在不同空间尺度上的关系^[62]。

(4) 因果关系模型

以上模型只能确定多个驱动因素与城市景观格局演变之间的相关性,无法证明因果关系。双重差分模型

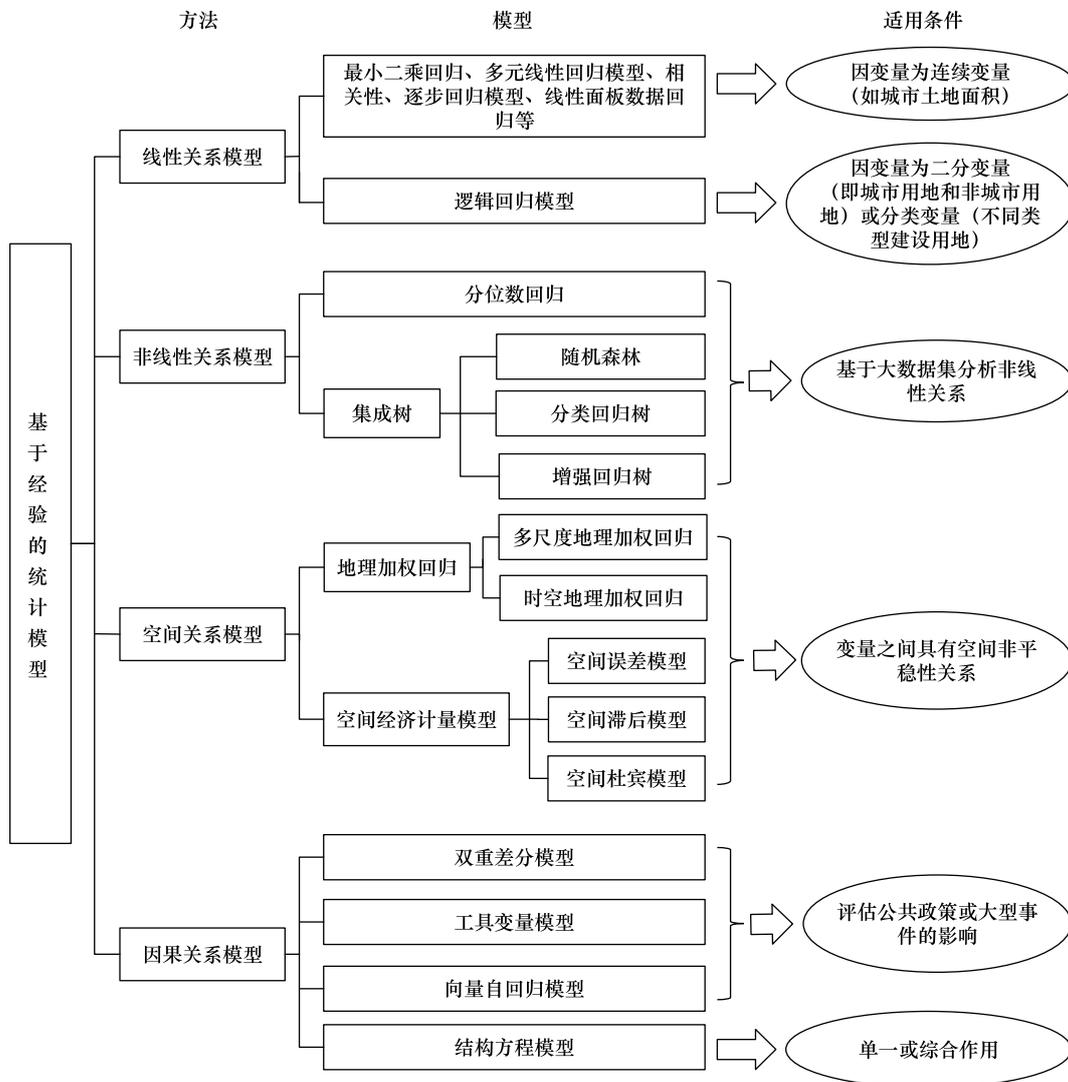


图 2 基于经验的城市景观格局演变驱动因子定量分析统计模型

Fig.2 Empirical statistical models for quantitative analysis of driving factors of urban landscapes pattern changes

(Differences-in-Differences, DID)、工具变量模型 (Instrumental Variable Model, IV) 和结构方程模型 (Structural Equation Model, SEM) 等因果关系模型可用于解决此类问题。DID 是一种准实验设计, 利用实验组和对照组的纵向数据作为反事实来推断因果关系, 可以评估公共政策或项目实施与城市景观格局变化之间的因果关系^[42, 55]。由于城市景观格局演变与驱动因子之前可能存在双向因果关系, DID 会因为自变量内生性问题产生计量偏误, 而 VI 模型可以通过引入一个与内生解释变量密切相关, 但是与城市景观格局演变不相关的工具变量, 来有效解决内生性问题^[56]。然而, DID 和 VI 模型仅有利于提取两个变量之间的定量因果关系, 无法有效量化多个影响因素对目标变量的整体影响^[42, 55]。SEM 综合了方差分析、回归分析、路径分析和因子分析, 可以通过考虑自变量之间的相互作用有效量化多个影响因素对城市景观格局演变的直接效应、间接效应和总效应^[63-64]。此外, 向量自回归模型 (VAR) 也可以基于一个先行关系 (格兰杰因果性) 来研究公共政策和重大变化或事件对城市景观格局空间分布的因果影响^[57], 如高速公路建设和大型工厂关闭等对社会经济活动空间分布的影响^[57]。

2.2 基于过程的动态模型

(1) 系统动力学模型

系统动力学模型(System Dynamics, SD)是一种模拟城市系统内部关系的方法,一般是基于微分方程的形式,从宏观上分析政策、气候变化、自然资源约束、人口和经济等因素之间复杂的相互作用及其对居住区、工业区、商业区等城市土地利用变化的直接或间接影响^[58]。但是,SD模型主要通过建立社会经济等宏观驱动因素与城市空间增长之间的相互关系来推断城市空间格局的变化,缺乏空间因素的处理能力,在反映城市内部空间格局特征方面还存在明显不足。

(2) 元胞自动机模型

元胞自动机模型(Cellular Automata, CA)是一种考虑局部相互作用的动态模型,能够在精细尺度上分析道路网络、地理位置、地形条件、邻里效应等空间因素对城市景观的影响及其相对重要性随时间的变化^[59]。CA模型因其简单、灵活和直观的特征,被广泛应用于城市领域^[59]。基于CA的优化模型,根据其单元状态变化时所依赖的转换规则,可进一步细分为基于概率统计分析来描述城市土地利用单元状态变化的概率模型(如logistic-CA、ANN-CA和SD-CA),以及根据专家知识、理论假设或经验等预定规则直接确定状态变化的规则模型(如SLEUTH)^[60]。作为一种自下而上的建模方法,CA模型侧重于分析城市网格的局部相互作用,其中地块状态的变化主要由其自身状态(如用地性质)以及周围邻近地块的状态决定^[65],使得CA模型在直接模拟宏观因素(如社会经济条件、政策因素等)方面具有一定的局限性。

(3) 多智能体模型

多智能体模型(Multi-Agent System Model, MAS)通过将人类行为与城市土地利用方式联系起来,强调城市景观格局演变中人类选择与决策行为的重要性^[60]。MAS能模拟城市参与者(如居民、开发商、政府)的个体行为、决策过程及其相互作用,分析行为偏好、人口结构、政策条件等人类活动对城市景观格局变化的影响^[65]。MAS模型的优势在于能够模拟代理的移动性^[60]。比如,政府机构在模型中通常被视为固定代理,而开发商和居民的行为决策则可以跨越不同地点发生,反映了现实世界中的流动性。虽然MAS在城市土地规划和政策分析评价方面具有明显优势,但模型对数据需求高、结果难以泛化到其他情境,并且模型的解释和验证也较为复杂^[66]。

3 城市景观格局演变驱动因子特征

城市景观格局演变是一个跨越时间和空间的非线性复杂过程^[4, 26],其动态变化时空异质性强,尺度依赖性明显(图3)。

3.1 时间演变特征

在城市发展的不同时期,随着经济结构、人口组成和生活方式等的转变,社会经济、自然环境和政策等驱动力对城市景观格局演变的作用呈现出动态变化特征^[19, 67]。在城市化初期,人口增长和经济发展是推动中国城市景观格局变化的主要因素。然而,随着城市化水平的提高,城市扩张逐渐受到更为严格的规划和管理制约,社会经济因素的影响也随之发生变化^[68-69]。例如,2000—2015年,GDP对中国城市扩张的正向效应逐渐减弱,在东部地区,GDP与城市扩张之间的关系甚至由正相关转变为负相关^[15]。与城市扩张类似,经济发展对城市绿地的影响也具有时间异质性。在经济发展初期,城市绿地面积与GDP高度负相关,但在经济发展到一定阶段,GDP又与绿地面积正相关,即经济越发达,城市绿化程度越高^[30]。此外,随着技术的进步和生活方式的改变,海拔^[68]和坡度^[26]等自然约束对城市扩张的影响程度逐渐减弱^[19, 44],在城市化后期阶段甚至由负相关转变为正相关。这可能是由于在耕地、基本农田及生态保护等刚性约束下,导致大规模的山坡城市化^[70],使得作为生态价值带的山区发展压力越来越大^[59]。

3.2 区域异质性特征

由于自然环境和经济发展水平的差异,城市扩张和绿化等景观格局演变的驱动因子存在空间异质性。对于城市扩张,在低收入和高收入国家,人口增长是城市扩张的重要驱动因子^[14, 48];在发展中国家,经济因素的相对重要性高于人口、社会和自然因素^[14],并且在经济因素中收入对城市扩张的影响最大^[26]。对于城市绿

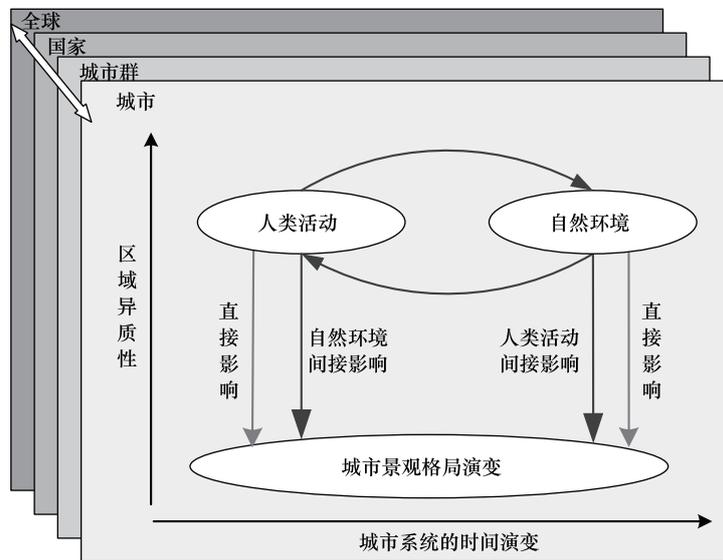


图3 城市景观格局演变驱动因子特征示意图

Fig.3 Characteristics of driving factors in urban landscape pattern changes

地,在低收入地区,人口密度与城市绿地的关系最为密切;在中低收入和中高收入地区,气候因素的影响相对高于人口因素;在高收入地区,人口因素与气候因素具有相似的影响程度^[13]。

以中国的四大经济区为例,每个区域都对应着独特的气候、地形和社会经济特征,它们都直接或间接地影响着人口、GDP、降水、海拔与城市景观格局演变之间的关系,甚至会出现完全相反的情况^[16, 49]。人口对城市扩张的影响呈现由东向西递增的趋势,越往西部地区人口对城市扩张的促进作用越强^[49]。经济增长对城市化的影响东西差异明显,在城市化水平相对较低的西部地区,GDP与城市建成区发展呈正相关关系;但在东部地区,由于国家和地方政策的影响,在经济快速发展的同时,城市扩张速度却在逐步放缓,GDP甚至产生了显著的负面影响^[15, 20]。另外,由于区域环境条件的差异,海拔、坡度和降水对城市景观格局变化的影响也呈现出区域差异。在中国西部地区,海拔和坡度对城市建成区的发展具有显著负影响,而中国东部、东北和华中地区,海拔与城市扩张呈正相关关系,而坡度对城市扩张的影响不显著^[19, 49]。西部地区水资源相对匮乏,降水对城市植被的影响更大,而东部地区城市化水平和收入水平较高,社会经济活动对城市植被的影响更为显著^[47]。

3.3 空间尺度异质性特征

在全球、国家/地区、城市群和城市不同尺度上,社会经济、地理环境和制度等要素各有其特征,使得城市景观格局演变的主控因子类型及其作用强度随空间尺度升降而发生变化。

在全球尺度上,人口增长是全球城市扩张^[14]和绿地减少的主要影响因子^[11, 13, 23]。在国家层面,城市人口^[20, 71-72]、经济增长^[73]、区位因素(如与城市中心及主要交通干道的距离)^[21, 52]以及国家政策^[74]等社会经济因素在大多数国家的城市增长中发挥着重要作用。对于治理效率和法治水平更高的国家,如中国、韩国和沙特阿拉伯,经济增长对城市扩张的影响可能超过人口增长^[14]。由于不同国家在经济发展水平、政策制定以及执行力度等方面的差异,城市景观格局变化的主要驱动因子存在分异。

城市群是高度发达的空间一体化的城市形态,各城市之间空间互动频繁^[75],使得城市景观格局变化除了受到本地驱动因素(如人口、海拔、坡度和邻域内建设用地比例等)的影响外,还受到远程驱动因素(如与地级市和特大城市中心的距离)^[51]以及城市群内部各城市之间空间相互作用(如人口和信息流动)^[28, 61]的影响,并且其作用强度随着时间的推移呈现出增强的趋势。

在不同的城市规模下,城市扩张和绿化与人口、经济相关驱动因素之间的关系存在显著差异。城市人口、

GDP 和固定资产投资对城市扩张的影响随着城市规模的减小而增加^[71],例如,在意大利的大城市,每增加 1000 名居民,城市化面积将增加 10hm²;而中小城市增加的面积是它的 3—6 倍^[22]。而第三产业的发展、国外投资和大学生人数的增加仅对特大城市扩张具有显著的影响,在中小城市中相关性非常弱^[7]。对于城市绿地,城市化和气候变化对不同规模城市植被的影响也各不相同。对中国 3000 多个城市研究发现,夜间灯光强度对大城市植被产生了严重的负面影响,而气温、降水和太阳辐射等气候因子对规模较小的城市影响更大^[47]。

3.4 直接和间接效应

城市景观格局变化受到社会经济、地理环境和政策等多种因素的影响,各驱动因子之间并非是相互孤立的,它们之间存在很复杂的相互作用。驱动因子的变化能够直接影响城市景观的空间格局,同时各因素之间的相互作用也会产生间接效应。气候变化和人类活动是影响城市植被的关键因素,气候变化对植被生长仅有直接影响,但人类活动不仅对植被变化产生直接影响,气候因素(温度和降水)与人口密度相互作用后对城市绿地还具有显著的非线性增强作用,这也能解释为什么气候宜人的大城市不一定拥有充足的城市绿地,比如日本的大阪都会区和中国的香港^[13, 64]。城市化对城市植被生长也具有直接和间接效应^[76]。直接负向影响主要是由不透水表面的增加导致城市植被覆盖面积减少^[77],间接正向影响通常是由于城市环境和人类可持续管理(例如,灌溉施肥、在道路沿线种植树木、在公园中建立草坪等)引起的^[11]。

城市人口增长、工业化以及交通网络发展等因素不仅直接促进城市扩张^[27, 78-79],它们之间的相互作用还可能产生更为显著的间接影响。例如,在伊朗,工业化通过促进人口增长对城市扩张产生的间接影响比直接影响更为重要^[27]。研究显示,流动人口本身对城市土地扩张没有直接影响,而是通过从事生产或生活过程产生间接影响来促进城市扩张^[25]。因此,忽略驱动因素之间的直接和间接作用,可能会导致在分析特定因素对城市景观格局变化的影响时出现偏差。

4 未来研究方向

(1) 城市景观格局演变的时序归因分析

城市景观格局演变是一个复杂的时空变化过程,其不仅具有长期的趋势性变化^[19],在较短时间尺度上也展现出显著的波动特征^[80]。然而,先前的研究在分析城市景观格局变化时,通常选取单一年份、首末年或采用定性方法来划分研究时间段^[19, 51],忽略了城市景观格局在不同时间尺度上的动态演化特征和趋势。因此,今后在长时间尺度上应加强城市景观格局变化的长期趋势性和突变特征分析,通过引入突变点检测技术,识别城市景观格局演变过程中的关键转折点。同时,在短时间尺度上加强对微观变化的分析,通过量化不同城市景观类型的变化速率和模式,明确变化速度最快的城市景观类型,并进一步探讨该变化主要是关于景观组成的变动还是景观配置的调整。通过全面理解景观变化的整体特征与局部差异,可以更有效地识别出城市景观格局变化的关键驱动因素。

(2) 城市社会-生态景观格局与驱动因素的空间作用和反馈机制

城市空间格局演变是一个具有反馈机制的动态过程。城市的社会经济发展、居民生活方式和城市规划等因素促使城市景观格局不断演变,从而改变城市空间要素之间人流、物质流、能量流和信息流的交换和空间分布,进而影响城市的自然和人文过程^[81]。然而,现有研究主要基于统计模型,分析驱动因素对城市景观格局演变的单一影响^[6, 71]或叠加效果^[82],缺乏对城市景观格局演变影响因素之间空间相互作用及其反馈关系的量化研究。此外,城市景观的高度破碎和动态性,涉及社会、生态和经济多个系统的高度耦合特征。目前的城市景观格局信息提取主要基于土地利用/土地覆盖分类和不透水表面数据,或是基于高分辨率影像绘制的城市特定景观特征^[1],这种粗尺度的分类数据通常只关注城市特征的某一方面,将人为和自然成分分开,限制了其在城市社会-生态耦合系统中的应用。

未来研究需要加强对城市空间动态交互作用的分析,通过引入空间动力学模型和方法,以更准确地模拟

城市系统要素的空间相互作用和反馈机制。同时,综合利用遥感影像、社交媒体数据、地面建筑数据和社会经济等数据,从空间分布、地理位置、地理边界和属性特征四个维度出发,提取城市斑块的社会属性和生态属性,精细表征城市社会格局和生态格局。此外,利用地理空间大数据、遥感技术和其他新兴技术手段,可以提高对城市变化动态的捕捉能力,为揭示城市景观格局变化的内在机制提供更丰富、更精细的数据支持^[83]。在此基础上,进一步分析城市社会-生态景观格局变化的影响因素,以及不同景观类型转变的机制研究,为未来城市精细化管理和规划提供理论基础和科学支撑。

(3) 城市景观格局演变驱动因子跨尺度相互作用分析

城市系统是复杂的生物物理和社会经济系统的耦合,又具有全球、国家、区域、城市群和城市等多个层次。然而,现有研究多侧重于从单一尺度分析城市景观格局演变的主控因子和驱动机制,忽视了驱动因子间的多层次跨尺度相互作用^[14, 21, 29]。因此,未来还需加强城市景观格局演变的跨尺度驱动机制研究,基于理论知识建立跨尺度关系的概念模型,明确不同尺度间驱动因子的相互作用,并结合适用于处理多主题和多尺度数据的方法(如贝叶斯分层模型)构建城市景观格局演变的跨尺度驱动机制模型,揭示不同尺度间的上行或下行反馈机制,从而更深入地探讨城市景观格局演变与其驱动因子之间的复杂因果关系。

参考文献(References):

- [1] Qian Y G, Zhou W Q, Pickett S T A, Yu W J, Xiong D P, Wang W M, Jing C B. Integrating structure and function: mapping the hierarchical spatial heterogeneity of urban landscapes. *Ecological Processes*, 2020, 9(1): 1-11.
- [2] 张甜,王仰麟,刘焱序,彭建. 1987—2015年深圳市主城区景观演变过程多时相识别. *地理学报*, 2016, 71(12): 2170-2184.
- [3] Fang C L, Li G D, Wang S J. Changing and differentiated urban landscape in China: spatiotemporal patterns and driving forces. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(5): 2217-2227.
- [4] Tan X R, Han L J, Li G D, Zhou W Q, Li W F, Qian Y G. A quantifiable architecture for urban social-ecological complex landscape pattern. *Landscape Ecology*, 2022, 37(3): 663-672.
- [5] 熊昌盛,谭荣,岳文泽. 快速城市化背景下不同建设用地扩张的驱动差异探讨:以浙江省义乌市为例. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2124-2135.
- [6] Li C, Li J X, Wu J G. What drives urban growth in China? A multi-scale comparative analysis. *Applied Geography*, 2018, 98: 43-51.
- [7] Feng Y C, Wang X H, Du W C, Liu J, Li Y X. Spatiotemporal characteristics and driving forces of urban sprawl in China during 2003—2017. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118061.
- [8] Sun L Q, Chen J, Li Q L, Huang D. Dramatic uneven urbanization of large cities throughout the world in recent decades. *Nature Communications*, 2020, 11: 5366.
- [9] 郭砾,杜世宏,孙皓铭,丁超. 珠海市城区景观空间格局特征分析. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 307-313.
- [10] 张丽芳,方创琳,高倩. 天山北坡城市群城市景观时空扩张过程及多情景模拟. *生态学报*, 2021, 41(4): 1267-1279.
- [11] Zhang W M, Randall M, Jensen M B, Brandt M, Wang Q, Fensholt R. Socio-economic and climatic changes lead to contrasting global urban vegetation trends. *Global Environmental Change*, 2021, 71: 102385.
- [12] Huang X, Huang J Y, Wen D W, Li J Y. An updated MODIS global urban extent product (MGUP) from 2001 to 2018 based on an automated mapping approach. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 2021, 95: 102255.
- [13] Han Y, He J H, Liu D F, Zhao H Z, Huang J L. Inequality in urban green provision: a comparative study of large cities throughout the world. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 89: 104229.
- [14] Mahtta R, Fragkias M, Güneralp B, Mahendra A, Reba M, Wentz E A, Seto K C. Urban land expansion: the role of population and economic growth for 300+ cities. *NPJ Urban Sustainability*, 2022, 2: 5.
- [15] Deng Y, Qi W, Fu B J, Wang K. Geographical transformations of urban sprawl: exploring the spatial heterogeneity across cities in China 1992—2015. *Cities*, 2020, 105: 102415.
- [16] Deng L Y, Zhang Q, Cheng Y, Cao Q, Wang Z Y, Wu Q Y, Qiao J M. Underlying the influencing factors behind the heterogeneous change of urban landscape patterns since 1990: a multiple dimension analysis. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 108967.
- [17] 吴健生,王政,张理卿,宋静. 景观格局变化驱动力研究进展. *地理科学进展*, 2012, 31(12): 1739-1746.
- [18] 付红艳. 城市景观格局演变研究现状综述. *测绘与空间地理信息*, 2014, 37(4): 73-74, 77.
- [19] Li G D, Sun S A, Fang C L. The varying driving forces of urban expansion in China: insights from a spatial-temporal analysis. *Landscape and*

- Urban Planning, 2018, 174: 63-77.
- [20] Kuang W H. National urban land-use/cover change since the beginning of the 21st century and its policy implications in China. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104747.
- [21] Weilenmann B, Seidl I, Schulz T. The socio-economic determinants of urban sprawl between 1980 and 2010 in Switzerland. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 157: 468-482.
- [22] Guastella G, Pareglio S, Sekokai P. A spatial econometric analysis of land use efficiency in large and small municipalities. *Land Use Policy*, 2017, 63: 288-297.
- [23] Dobbs C, Nitschke C, Kendal D. Assessing the drivers shaping global patterns of urban vegetation landscape structure. *The Science of the Total Environment*, 2017, 592: 171-177.
- [24] Wu Z, Chen R S, Meadows M E, Sengupta D, Xu D. Changing urban green spaces in Shanghai: trends, drivers and policy implications. *Land Use Policy*, 2019, 87: 104080.
- [25] Luo J J, Zhang X L, Wu Y Z, Shen J H, Shen L Y, Xing X S. Urban land expansion and the floating population in China: for production or for living? *Cities*, 2018, 74: 219-228.
- [26] You H Y, Yang X F. Urban expansion in 30 megacities of China: categorizing the driving force profiles to inform the urbanization policy. *Land Use Policy*, 2017, 68: 531-551.
- [27] Bagheri B, Tousi S N. An explanation of urban sprawl phenomenon in Shiraz Metropolitan Area (SMA). *Cities*, 2018, 73: 71-90.
- [28] Xia C, Zhang A Q, Wang H J, Zhang B E, Zhang Y. Bidirectional urban flows in rapidly urbanizing metropolitan areas and their macro and micro impacts on urban growth: a case study of the Yangtze River middle reaches megalopolis, China. *Land Use Policy*, 2019, 82: 158-168.
- [29] Jia M Y, Liu Y, Lieske S N, Chen T. Public policy change and its impact on urban expansion: an evaluation of 265 cities in China. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104754.
- [30] Wu W B, Ma J, Meadows M E, Banzhaf E, Huang T Y, Liu Y F, Zhao B. Spatio-temporal changes in urban green space in 107 Chinese cities (1990—2019): the role of economic drivers and policy. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 2021, 103: 102525.
- [31] Richards D R, Passy P, Oh R R Y. Impacts of population density and wealth on the quantity and structure of urban green space in tropical Southeast Asia. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 157: 553-560.
- [32] Zhang H L, Padullés Cubino J, Nizamani M M, Harris A J, Cheng X L, Da L J, Sun Z C, Wang H F. Wealth and land use drive the distribution of urban green space in the tropical coastal city of Haikou, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 71: 127554.
- [33] Xu Z, Zhang Z F, Li C. Exploring urban green spaces in China: spatial patterns, driving factors and policy implications. *Land Use Policy*, 2019, 89: 104249.
- [34] Long Y, Gu Y Z, Han H Y. Spatiotemporal heterogeneity of urban planning implementation effectiveness: evidence from five urban master plans of Beijing. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 108(2/3/4): 103-111.
- [35] Lei Y Y, Flacke J, Schwarz N. Does Urban planning affect urban growth pattern? A case study of Shenzhen, China. *Land Use Policy*, 2021, 101: 105100.
- [36] Jia M Y, Zhang H R, Yang Z. Compactness or sprawl: multi-dimensional approach to understanding the urban growth patterns in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108816.
- [37] Zhou Y, Huang X J, Chen Y, Zhong T Y, Xu G L, He J L, Xu Y T, Meng H. The effect of land use planning (2006—2020) on construction land growth in China. *Cities*, 2017, 68: 37-47.
- [38] Wu R, Wang J Y, Zhang D C, Wang S J. Identifying different types of urban land use dynamics using Point-of-interest (POI) and Random Forest algorithm: the case of Huizhou, China. *Cities*, 2021, 114: 103202.
- [39] 吴健生, 罗可雨, 赵宇豪. 深圳市近 20 年城市景观格局演变及其驱动因素. *地理研究*, 2020, 39(8): 1725-1738.
- [40] Azhdari A, Ali Sasani M, Soltani A. Exploring the relationship between spatial driving forces of urban expansion and socioeconomic segregation: the case of Shiraz. *Habitat International*, 2018, 81: 33-44.
- [41] Dobbs C, Eleuterio A A, Vázquez A, Cifuentes-Ibarra M, da Silva D, Devisscher T, Baptista M D, Hernández-Moreno Á, Meléndez-Ackerman E, Navarro N M. Are we promoting green cities in Latin America and the Caribbean? Exploring the patterns and drivers of change for urban vegetation. *Land Use Policy*, 2023, 134: 106912.
- [42] Tu Y, Chen B, Yang J, Xu B. Olympic effects on reshaping urban greenspace of host cities. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 230: 104615.
- [43] Dadashpoor H, Azizi P, Moghadasi M. Analyzing spatial patterns, driving forces and predicting future growth scenarios for supporting sustainable urban growth: evidence from Tabriz metropolitan area, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 47: 101502.
- [44] Jia L Y, Ma Q, Du C L, Hu G, Shang C W. Rapid urbanization in a mountainous landscape: patterns, drivers, and planning implications. *Landscape Ecology*, 2020, 35(11): 2449-2469.

- [45] Zhang Z M, Wang B, Buyantuev A, He X, Gao W, Wang Y J, Dawazhaxi, Yang Z J. Urban agglomeration of Kunming and Yuxi cities in Yunnan, China: the relative importance of government policy drivers and environmental constraints. *Landscape Ecology*, 2019, 34(3): 663-679.
- [46] Oueslati W, Alvanides S, Garrod G. Determinants of urban sprawl in European cities. *Urban Studies*, 2015, 52(9): 1594-1614.
- [47] Liang Z, Wang Y Y, Sun F Y, Jiang H, Huang J, Shen J S, Wei F L, Li S C. Exploring the combined effect of urbanization and climate variability on urban vegetation: a multi-perspective study based on more than 3000 cities in China. *Remote Sensing*, 2020, 12(8): 1328.
- [48] Al Rifat S A, Liu W B. Quantifying spatiotemporal patterns and major explanatory factors of urban expansion in Miami metropolitan area during 1992—2016. *Remote Sensing*, 2019, 11(21): 2493.
- [49] 高金龙, 包菁薇, 刘彦随, 陈江龙. 中国县域土地城镇化的区域差异及其影响因素. *地理学报*, 2018, 73(12): 2329-2344.
- [50] Tong D, Wang X G, Wu L J, Zhao N Q. Land ownership and the likelihood of land development at the urban fringe: the case of Shenzhen, China. *Habitat International*, 2018, 73: 43-52.
- [51] Wang K, Zhou W Q. Do local factors or teleconnections control urbanization? The shifting balance in a Chinese megaregion. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180: 179-186.
- [52] 李宇, 孟丹, 叶海鹏, 张宁, 郑吉, 李飞, 董锁成. 俄罗斯典型城市扩张时空格局与驱动机制——基于遥感决策融合与多元离散回归模型. *地理研究*, 2021, 40(11): 2967-2985.
- [53] Li H L, Jian P, Liu Y X, Hu Y N. Urbanization impact on landscape patterns in Beijing City, China: a spatial heterogeneity perspective. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 50-60.
- [54] Tian Y S, Mao Q H. The effect of regional integration on urban sprawl in urban agglomeration areas: a case study of the Yangtze River Delta, China. *Habitat International*, 2022, 130: 102695.
- [55] He Z C, Ling Y H, Fürst C, Hersperger A M. Does zoning contain built-up land expansion? Causal evidence from Zhangzhou City, China. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 220: 104339.
- [56] Pratama A P, Yudhistira M. Highway expansion and urban sprawl in the Jakarta Metropolitan Area. *Land Use Policy*, 2022, 112: 105856.
- [57] Dubé J, Dieng O, Lévesque M, Racine A, Roberge O, Trapé T. How public policies and other events can shape spatial distribution of local activities over time? An investigation based on spatial micro-data. *Land Use Policy*, 2023, 125: 106498.
- [58] Liang X, Liu X P, Li X, Chen Y M, Tian H, Yao Y. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 177: 47-63.
- [59] Li C, Zhao J, Xu Y. Examining spatiotemporally varying effects of urban expansion and the underlying driving factors. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 28: 307-320.
- [60] Li X C, Gong P. Urban growth models: progress and perspective. *Science Bulletin*, 2016, 61(21): 1637-1650.
- [61] 王海军, 张彬, 刘耀林, 刘艳芳, 徐姗, 邓羽, 赵雲泰, 陈宇琛, 洪松. 基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析. *地理学报*, 2018, 73(6): 1076-1092.
- [62] Zhang M M, Tan S K, Zhang X S. How do varying socio-economic factors affect the scale of land transfer? Evidence from 287 cities in China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(27): 40865-40877.
- [63] Luo Y, Lü Y H, Liu L, Liang H B, Li T, Ren Y J. Spatiotemporal scale and integrative methods matter for quantifying the driving forces of land cover change. *The Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139622.
- [64] Yang L, Shen F X, Zhang L, Cai Y Y, Yi F X, Zhou C H. Quantifying influences of natural and anthropogenic factors on vegetation changes using structural equation modeling: a case study in Jiangsu Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 280(10): 124330.
- [65] Tsagkis P, Bakogiannis E, Nikitas A. Analysing urban growth using machine learning and open data: an artificial neural network modelled case study of five Greek cities. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 89: 104337.
- [66] Sun S P, Parker D C, Brown D G. From an agent-based laboratory to the real world: effects of “neighborhood” size on urban sprawl. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2023, 99: 101889.
- [67] Zewdie M, Worku H, Bantider A. Temporal dynamics of the driving factors of urban landscape change of Addis Ababa during the past three decades. *Environmental Management*, 2018, 61(1): 132-146.
- [68] 车通, 李成, 罗云建. 城市扩张过程中建设用地景观格局演变特征及其驱动力. *生态学报*, 2020, 40(10): 3283-3294.
- [69] 鞠洪润, 张生瑞, 闫逸晨. 1980—2020 年粤港澳大湾区城镇用地空间格局类型演变及其驱动力多维探测. *地理学报*, 2022, 77(5): 1086-1101.
- [70] Yang C, Guo W H, Zhang C C, Cui A H, Li X C, Zhao T H, Liu H Z, Shi T Z, Xu G, Fang X, Liu X, Zhang K Y, Gong P, Li Q Q, Wu G F. Characteristics and trends of hillside urbanization in China from 2007 to 2017. *Habitat International*, 2022, 120: 102502.
- [71] Li G D, Li F. Urban sprawl in China: differences and socioeconomic drivers. *The Science of the Total Environment*, 2019, 673: 367-377.
- [72] Kassouri Y, Okunlola O A. Analysis of spatio-temporal drivers and convergence characteristics of urban development in Africa. *Land Use Policy*,

- 2022, 112: 105868.
- [73] Venanzoni G, Carlucci M, Salvati L. Latent sprawl patterns and the spatial distribution of businesses in a southern European city. *Cities*, 2017, 62: 50-61.
- [74] Riad P, Graefe S, Hussein H, Buerkert A. Landscape transformation processes in two large and two small cities in Egypt and Jordan over the last five decades using remote sensing data. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 197: 103766.
- [75] 方创琳, 王振波, 马海涛. 中国城市群形成发育规律的理论认知与地理学贡献. *地理学报*, 2018, 73(4): 651-665.
- [76] Zhang L, Yang L, Zohner C M, Crowther T W, Li M C, Shen F X, Guo M, Qin J, Yao L, Zhou C H. Direct and indirect impacts of urbanization on vegetation growth across the world's cities. *Science Advances*, 2022, 8(27): eabo0095.
- [77] Liu X P, Pei F S, Wen Y Y, Li X, Wang S J, Wu C J, Cai Y L, Wu J G, Chen J, Feng K S, Liu J G, Hubacek K, Davis S J, Yuan W P, Yu L, Liu Z. Global urban expansion offsets climate-driven increases in terrestrial net primary productivity. *Nature Communications*, 2019, 10: 5558.
- [78] Wu R, Li Y C, Wang S J. Will the construction of high-speed rail accelerate urban land expansion? Evidences from Chinese cities. *Land Use Policy*, 2022, 114: 105920.
- [79] Park H, Fan P L, John R, Chen J Q. Urbanization on the Mongolian Plateau after economic reform: changes and causes. *Applied Geography*, 2017, 86: 118-127.
- [80] Katna A, Thaker M, Vanak A T. How fast do landscapes change? A workflow to analyze temporal changes in human-dominated landscapes. *Landscape Ecology*, 2023, 38(8): 2145-2155.
- [81] 张伟, 冯微微, 毛小岗, 钟永生. 基于反馈机制的城市扩张模拟研究进展. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(2): 70-75.
- [82] Liu J, Xu Q L, Yi J H, Huang X. Analysis of the heterogeneity of urban expansion landscape patterns and driving factors based on a combined Multi-Order Adjacency Index and Geodetector model. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108655.
- [83] 杨军. 大数据与城市生态学的未来: 从概念到结果. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(10): 1339-1353.