北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

2000—2020年中国主要城市景观连通性演化及驱动因素

李豪 郑至恺 段维玥 黄心言 刘志成

Evolution of landscape connectivity and driving factors in major Chinese cities from 2000 to 2020

Li Hao, Zheng Zhikai, Duan Weiyue, Huang Xinyan, Liu Zhicheng

引用本文:
李豪, 郑至恺, 段维玥, 黄心言, 刘志成. 2000—2020年中国主要城市景观连通性演化及驱动因素[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(2):198-208. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250091
Li Hao, Zheng Zhikai, Duan Weiyue, Huang Xinyan, Liu Zhicheng. Evolution of landscape connectivity and driving factors in major Chinese cities from 2000 to 2020[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2):198-208. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250091

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250091

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

耦合Graphab-PLUS模型的生态网络动态评估框架

A dynamic assessment framework of ecological networks coupled with Graphab-PLUS model: a case study in the central area of Beijing

北京林业大学学报, 2025, 47(1): 95-105. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230222

基于MSPA模型的北京市延庆区城乡生态网络构建

Construction of urban and rural ecological network in Yanqing District of Beijing based on MSPA model

北京林业大学学报, 2020, 42(7): 113-121. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20190271

滦河流域水文连通性

Hydrological connectivity of the Luanhe River Basin in northern China

北京林业大学学报, 2023, 45(11): 119-127. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220485

基于GTWR模型的济南都市圈生态系统服务价值对城市扩张时空响应

Spatiotemporal response of ecosystem service value in Jinan metropolitan area to urban expansion based on GTWR model

北京林业大学学报, 2024, 46(1): 104-118. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220489

基于生态系统服务的永定河流域北京段生态网络构建与优化

Construction and optimization of ecological network in Beijing section of Yongding River Basin based on ecosystem services

北京林业大学学报, 2022, 44(3): 106-118. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200272

基于复杂网络理论的生态空间优化

Ecological spatial optimization based on complex network theory: a case study of Songhua River Basin of northeastern China

北京林业大学学报, 2022, 44(9): 91-103. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210475

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250091

2000—2020 年中国主要城市景观连通性演化及驱动因素

李 豪 郑至恺 段维玥 黄心言 刘志成
（北京林业大学园林学院，北京 100083）

摘要:【目的】厘清我国主要城市景观连通性的时空演化特征及其差异化驱动机制，为城市生态网络构建与生物多样性保护提供科学依据。**【方法】**基于 2000—2020 年全国 31 个城市的土地利用数据，采用 Graphab 模型计算连通概率指数（PC），揭示其时空变化规律，结合相关性分析与主成分分析识别景观连通性的关键驱动因素。**【结果】**(1)31 个城市的景观连通性水平呈现“西高东低”空间格局，整体呈下降趋势，降幅为 4.8%；城市扩张与景观连通性呈显著负相关，不同城市类型表现出多样的耦合路径。(2)蓝绿空间占比是影响景观连通性的首要正向因子，相关系数达 0.69，对生态网络结构起到关键支撑作用且与 PC 呈非线性响应关系；建设用地、人口密度、气温等城市化指标均与景观连通性呈负相关。(3)城市在二维主成分空间的分布呈现鲜明的区域聚集性，西南、西北地区城市普遍生态基础良好，而华东、华南、华北城市集中于高城市化水平区域。**【结论】**在全国尺度上量化了城市景观连通性的长期演化趋势，揭示了景观连通性演化受自然地理条件与城市发展模式的双重驱动。同时，为优化城市生态网络与区域分类施策提供了新的见解和理论参考。

关键词：景观连通性；生态网络；图论；城市扩张；蓝绿空间
中图分类号：P901 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)02−0198−11
引文格式：李豪，郑至恺，段维玥，等. 2000—2020 年中国主要城市景观连通性演化及驱动因素［J］. 北京林业大学学报，2026，48(2)：198−208. Li Hao, Zheng Zhikai, Duan Weiyue, et al. Evolution of landscape connectivity and driving factors in major Chinese cities from 2000 to 2020［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2): 198−208.

Evolution of landscape connectivity and driving factors in major Chinese cities from 2000 to 2020

Li Hao Zheng Zhikai Duan Weiyue Huang Xinyan Liu Zhicheng
(School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］ To clarify the temporal and spatial evolution characteristics of landscape connectivity in major cities in China and its differential driving mechanism, so as to provide a scientific basis for the construction of urban ecological network and biodiversity conservation. ［**Method**］ Based on the land use data of 31 cities in China from 2000 to 2020, the probability of connectivity index (PC) was calculated by using the Graphab model to reveal its temporal and spatial variation. Key drivers of landscape connectivity were identified by correlation analysis and principal component analysis. ［**Result**］ (1) The landscape connectivity level of 31 cities exhibited a spatial pattern of “high in the West and low in the East”, and the overall trend was downward, with a decrease of 4.8%. Urban expansion was significantly negatively correlated with landscape connectivity, and different city types displayed diverse coupling pathways. (2) The proportion of blue-green space was the primary positive factor affecting landscape connectivity, with the highest correlation (r = 0.69), which played a key role in supporting the ecological network structure, and exhibited a nonlinear relationship with PC. Urbanization indicators such as construction land area,

收稿日期: 2025−03−17 **修回日期:** 2025−07−07
基金项目: 国家重大科技专项独立课题(2018ZX07101005)，北京市共建项目专项“城乡生态环境北京实验室”(BLUREE02)。
第一作者: 李豪，博士生。主要研究方向：风景园林规划与设计。Email：lihao_la@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。
责任作者: 刘志成，博士生导师，教授。主要研究方向：风景园林规划与设计。Email：780256337@qq.com 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

population density and temperature showed negative correlations. (3) The distribution of cities in the two-dimensional principal component space displayed distinct regional clustering. Cities in the southwest and northwest generally possessed a favorable ecological foundation, while those in East China, South China, and North China were concentrated in areas with high urbanization levels. [**Conclusion**] The long-term evolution trend of urban landscape connectivity has been quantified at the national scale, revealing that the evolution of landscape connectivity is driven by both natural geographical conditions and urban development patterns. The results provide a theoretical basis for optimizing ecological networks and guiding region-specific strategies.

Key words: landscape connectivity; ecological network; graph theory; urban expansion; green-blue space

城市建设用地的快速扩张导致蓝绿空间破碎化，削弱了景观连通性，进而影响生态系统稳定性及生物多样性水平[1]。全球生物多样性保护已成为可持续发展议程中的核心议题，2022 年《昆明−蒙特利尔全球生物多样性框架》的发布，进一步强调了生态网络完整性与连通性的重要性[2]。景观连通性（landscape connectivity）作为衡量生态网络空间连通程度的关键指标，深刻影响着物种迁移、基因流动及生态过程[3−4]。因此，作为开展生物多样性保护行动的基础，景观连通性的科学评估已成为学界关注的热点话题[5−6]。

国内外景观连通性的研究主要围绕生态网络建模、景观格局分析及其对城市扩张、气候变化等因素的响应展开[7−8]。其中，图论（graph theory）是景观连通性评估的重要方法，被广泛应用于连通性分析与生态网络优化[9]。魏雯等[10]基于 InVEST-图论复合模型为亚洲象国家公园的建设提供支撑；张利等[11]则运用图论方法，构建了雄安新区两栖类生物栖息地网络。

近年来，景观连通性逐渐与生态系统服务[12]、城市热环境[13]、碳汇功能[14]等热点议题相结合，拓展了研究内容的外延与应用深度。同时，景观连通性研究在时间和空间维度上均取得了显著进展。在时间维度上，研究范式由单一时间节点分析，逐步转向长时序的动态演化研究，这有助于更系统地识别生态网络在城市化进程中面临的结构性断裂、功能退化及空间重构等问题，提升了对连通性变化过程的理解与预测能力。朱希希等[15]基于 1990—2020 年 7 期南京市土地利用数据，综合分析了南京市景观连通性与用地结构的关系。在空间尺度上，研究对象也逐渐由市域县域为主的城市单元扩展至更宏观的城市群甚至全国尺度，Mu 等[16]量化了中国自然保护区的景观连通性，发现栖息地质量和景观连通性之间存在指数关系。

目前，国内关于城市景观连通性的研究多聚焦于单个区域，缺乏跨区域对比研究，针对全国尺度的系统性评估也较为有限。此外，城市景观连通性受自然和人为因素的共同影响，不同地区在城市扩张模式、自然地理条件和社会经济发展水平上的差异，显著塑造了景观连通性的演变特征[17−18]。然而，全国范围内各区域的关键驱动机制尚未得到深入探讨，有待进一步研究。

鉴于此，本研究基于 2000—2020 年 31 个主要城市的土地利用数据，使用 Graphab 图论模型构建城市生态网络，量化景观连通性水平，并结合相关性分析与主成分分析，识别景观连通性演化的关键驱动因素。旨在系统揭示我国主要城市景观连通性的时空演化特征及其驱动机制，探讨城市扩张与景观连通性之间的耦合关系，为城市生态网络优化与生物多样性保护提供科学依据与决策支持。

1　研究区域概况与数据来源

1.1　研究区域概况

选取我国 4 个直辖市和 27 个省会城市共 31 个主要城市为研究对象，行政区边界覆盖华北、华中、华东、华南、东北、西北和西南 7 个地理分区（图 1）。研究区涵盖多种气候类型，自然环境及社会经济发展水平差异显著，能够全面反映不同发展格局和城市扩张模式下景观连通性的空间差异及演化趋势。

1.2　数据来源

土地利用数据来源于中国年度土地利用分类数据（annual China land cover dataset，CLCD）[19]。该数据基于 Google Earth Engine 平台，利用 Landsat 卫星影像反演得到，总体精度达 79.31%，包含耕地、林地、灌木林地、草地、水体、冰雪、裸地、建设用地和湿地 9 类用地类型。基于土地利用数据计算了相应年份的蓝绿空间（林地、灌木林地、草地、水体和湿地）占比和建设用地占比。研究时段内的气温、降水量、夜间灯光强度、国内生产总值（GDP）、人口密度、归一化植被指数（NDVI）的数据均来自中国科学院资源环境科学数据平台（表 1）。为平衡精度与时间跨度，选取 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年共 5 个时间节点，以 5 年为周期分析景观连通性演化特征。

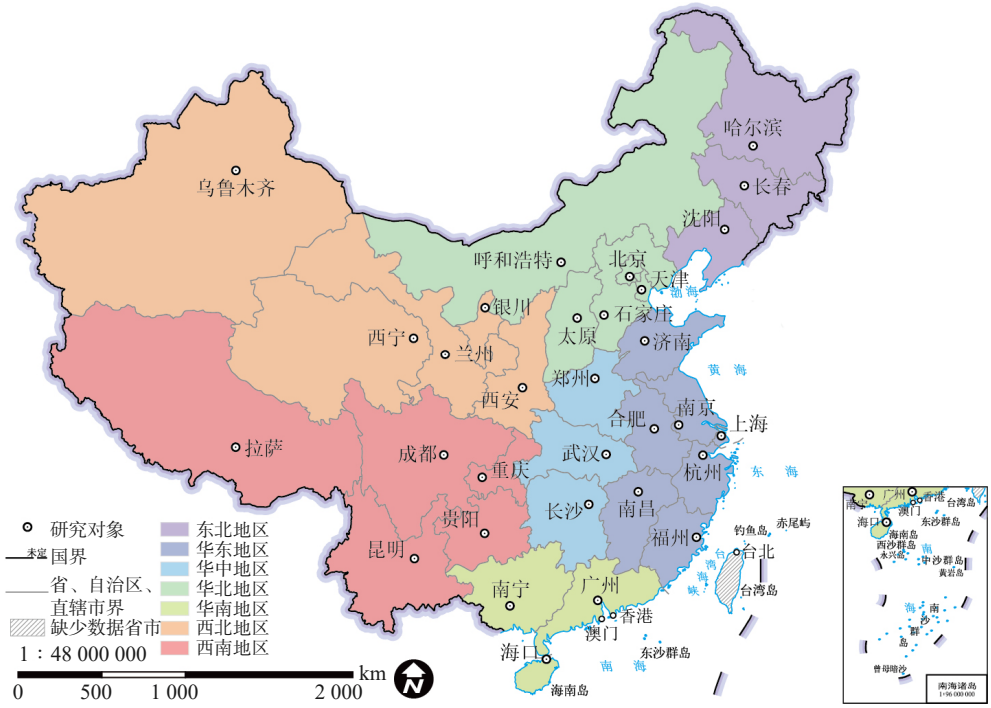


图 1 研究对象的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of study area

2 研究方法

2.1 景观连通性评估

2.1.1 连通性指标

本研究采用 Graphab 2.6 模型进行生态网络建模与可视化，基于图论原理计算景观连通性指数。该模型由 Foltête 等[20]开发，专用于生态网络优化、连通性评估及生物多样性保护。由于其高效计算能力、友好的数据处理方式及广泛的生态应用，Graphab 模型已成为景观连通性研究的重要工具[21]。

本研究选取连通概率指数（probability of connectivity，PC）[22]作为城市生态网络的连通性评估指标。PC 指数是目前生态网络分析中较为全面的连通性指标，结合了结构和功能连通性，适用于多尺度生态网络分析[23]。PC 表示在研究区域内随机选取两个点分别位于相互可达的斑块中的概率，取值范围在 0～1 之间，其数值越高表明生态网络的整体水平连通性越强，其计算公式如式（1）所示。

$$PC = \frac{1}{A^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_i a_j e^{-\alpha d_{ij}} \quad (1)$$

式中：A为研究区域的总面积，n为斑块数量，a_i和a_j分别为斑块 i 和 j 的面积，$e^{-\alpha d_{ij}}$为斑块 i 和 j 间的移动概率，α为移动概率随距离的衰减系数，d_{ij}指斑块 i 和 j 之间的距离。

2.1.2 模型参数

图论模型将网络抽象为由斑块（节点）和廊道（边）构成的结构。基于最小成本路径算法，综合生态源地分布、基质阻力和距离阈值等因素，识别连接两个斑块的最小成本廊道。研究将蓝绿空间定义为生态源地斑块，并参考相关研究文献 [24−25] 与 Graphab 模型指导手册，依据栖息地适宜性将土地利用的阻

表 1 研究数据

Tab. 1 Research data

类别	数据	时间	类型	分辨率	数据来源
土地利用	CLCD	2000—2020	年度	30 m	中国年度土地利用分类数据（https://zenodo.org/record/5816591）
驱动因子	气温	2000—2020	年均	1 km	中国科学院资源环境科学数据平台（https://www.resdc.cn）
	降水量	2000—2020	年均	1 km	中国科学院资源环境科学数据平台
	夜间灯光强度	2000—2010	年度	0.008°	中国科学院资源环境科学数据平台
		2015—2020	年度	0.004°	中国科学院资源环境科学数据平台
	GDP	2000—2020	年度	1 km	中国科学院资源环境科学数据平台
	人口密度	2000—2020	年度	1 km	中国科学院资源环境科学数据平台
	NDVI	2000—2020	年度	30 m	中国科学院资源环境科学数据平台

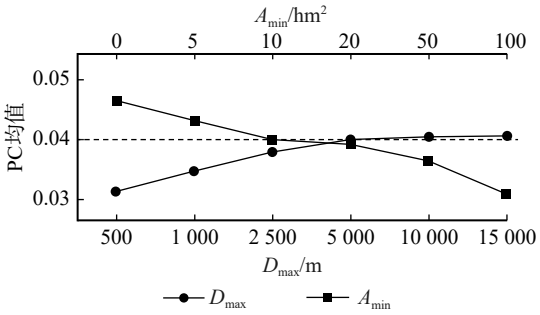
力值划分为 5 个等级（表 2）。高对比的阻力值有利于体现不同景观类型生态特征的差异[26]。

表 2　土地利用分类及阻力值

Tab. 2　Land use classification and resistance values

阻力值	土地利用类型
1	林地、水体
10	灌木林地、草地、湿地
100	耕地
500	冰雪、裸地
1 000	建设用地

鉴于本研究对象数量较多，地域跨度广，且生态基底与城市扩张模式差异显著，模型参数的适用性在不同区域存在一定的不确定性。为确保所设定的距离阈值与最小源地面积具有良好的泛化能力，使用敏感性分析评估不同参数对连通性指标的影响程度（图 2）。结果表明，过大的距离阈值可能导致连通性趋于饱和，而过高的最小源地面积阈值可能排除关键的踏脚石斑块，从而影响分析结果的准确性[27–28]。最终设定了距离阈值（D_{max} = 5 000 m）和最小源地面积（A_{min} = 10 hm^2），以确保结果在多样化空间背景下的稳定性与可比性。



D_{max}为最大距离，A_{min}为最小源地面积，PC为连通概率指数。下同。

图 2　参数敏感性分析

Fig. 2　Parameter sensitivity analysis

2.2　相关性分析与主成分分析方法

为识别影响城市景观连通性演化的关键驱动因子，本研究采用 Pearson 相关性分析与主成分分析（principal component analysis，PCA）两种方法，可在充分保留变量信息的前提下，提升分析结果的科学性与可靠性。所选 8 项驱动因子包括气温、降水量、NDVI、夜间灯光强度、GDP、人口密度、蓝绿空间占比和建设用地占比，用于代表气候环境、社会经济水平及生态系统状态，表征影响景观连通性的潜在因素。

在数据经过归一化的预处理后，使用 Pearson 相关分析计算连通概率指数（PC）与各驱动因子间的相关系数，从而衡量各因子的影响强度及显著性。该分析有助于揭示各单一因子对景观连通性变化的直接影响。在此基础上，进一步引入 PCA 对上述因子进行降维处理，提取能解释大部分方差的复合指标。PCA 不仅可以缓解变量间共线性对结果稳定性的干扰，还能揭示影响景观连通性的主要因子结构与聚合特征。通过构建主成分空间，旨在对不同城市在“城市化—生态”多维轴线上的空间分布进行识别，探讨区域差异化的驱动机制。

3　结果与分析

3.1　景观连通性演化特征

基于 Graphab 模型计算得到全国 31 个城市的连通概率指数（PC），使用自然断点分级法分为高、较高、中、较低和低 5 个等级，分析景观连通性水平和变化率在分区和城市尺度的特征。

不同城市的 PC 年均值在空间上呈现出显著的地域分异特征，总体呈现“西高东低”的格局（图 3a）。在分区尺度上（图 3b），西北和西南地区的景观连通性水平最高，均值分别为 0.082 和 0.066。其中西北地区的 PC 值分布离散，表现出较强的空间异质性；西南地区的 PC 值分布较为集中，可能与该区域自然生态环境较为完整、城市扩张相对缓慢有关；东北地区的 PC 指数最低（0.005），可能由于气候寒冷、降水量较低，且城市扩张模式以大规模基础设施建设为主，导致生态廊道受阻；东南沿海地区（华东、华南）连通性水平略高于内陆地区（华北、华中）。

在城市尺度上（图 3c），31 个城市的整体的景观连通性水平较低，均值约为 0.04。其中，仅 12 个城市高于均值（占比 38.7%）。西宁市的景观连通性均值最高（0.17），兰州次之（0.14），城市的生态网络相对完整，与周边生态资源的保护及较低的城市规模密切相关。天津、武汉、南京、长春、沈阳的 PC 值均小于 0.01，生态网络破碎化程度最高，亟需开展景观连通性修复。

2000—2020 年全国 31 个城市的整体平均景观连通性呈现下降趋势，降幅为 4.8%，总体分布呈“西高东低”的格局（图 4a）。PC 年均变化率存在着显著的区域差异（图 4b）。其中西南地区的年均变化率最高（4.9%），表明该地区在城市发展过程中仍维持了较好的生态连通性；东北和华北地区的年均变化率为负增长，分别为−1.3% 和−1.0%，景观连通性退化较为严重；西北地区的变化幅度相对稳定。

在城市尺度上（图 4c），20 年间在 31 个城市中 PC 年均正增长的仅有 12 个，占比 38.7%。郑州的 PC 年均变化率最高，为 10.5%，长春次之，表明其在近年实施了较强的生态保护或绿地空间规划策略，取得了一定成效。而如海口、长沙、乌鲁木齐、呼和

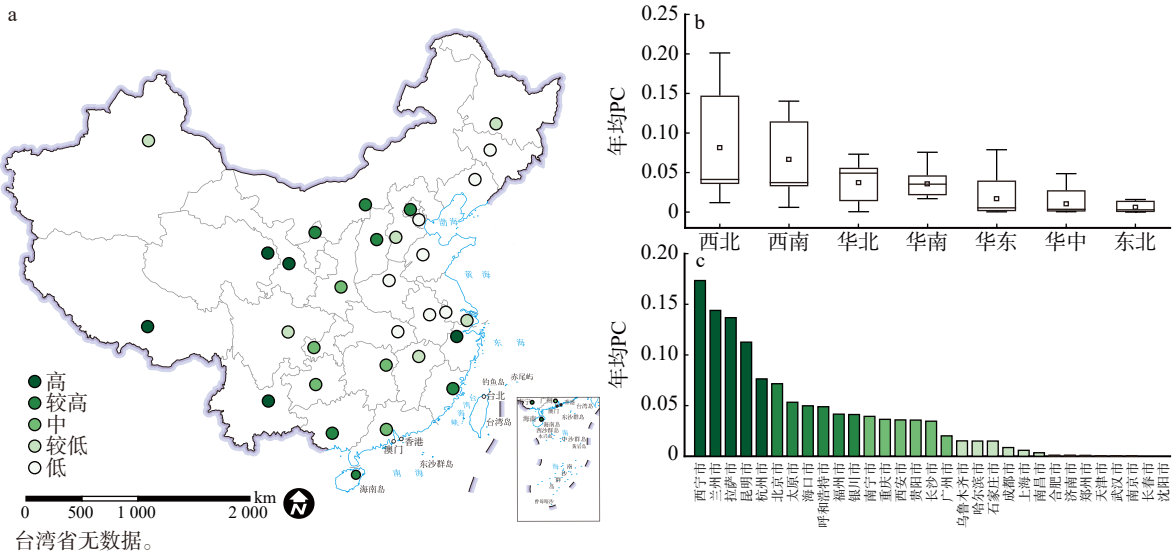


图 3 年均 PC 的空间分布(a)、分区尺度(b)及城市尺度(c)统计

Fig. 3 Spatial distribution (a), regional scale (b) and urban scale (c) statistics of average annual PC

浩特则处于连通性退化的第一梯队，需警惕城市扩张对生态空间造成的持续侵蚀，其中海口的 PC 年均损失率高达−10.6%。

3.2 景观连通性和城市扩张的关系

运用象限图来探讨各个分区景观连通性与城市扩张的具体关系，并使用全国的平均水平作为 4 象限划分的原点。图 5a 显示了主要城市的年均 PC 与建设用地面积间的分布关系。整体来看，随着城市建设用地面积的增大，其景观连通性普遍降低，二者存在负相关关系。西北和西南地区整体处于第二象限区域，表明西部地区整体自然资源丰富，城镇化率低，仍然保有较高比例的蓝绿空间，生态网络尚未受到严重破坏。位于第四象限的分区数量最多，包括华东、华北和东北地区。

为进一步揭示城市规模与景观连通性水平的耦合状态，图 5b 和 5c 选取了各象限中的典型城市，展示了其在 2000—2020 年间的用地比例变化趋势与生态网络结构演化过程。处于第一象限的北京虽然建设规模较大，但在建设用地增长的同时仍维持 50% 以上的绿色空间，体现了较强的生态韧性基础，PC 值处于中等偏上水平，说明其城市快速发展过程中通过生态网络规划等策略对景观连通性起到一定补偿作用。西宁是典型的“低建设用地量−高连通性水平”的第二象限城市，蓝绿空间占比 7 成以上，并呈现上升趋势，20 年间生态斑块整体分布未发生显著破碎，网络结构稳定。相比之下，武汉的建设用地持续侵占原有生态基底，尤其在城市边缘区域呈现出明显的生态网络破碎化趋势，斑块数量大幅减少。

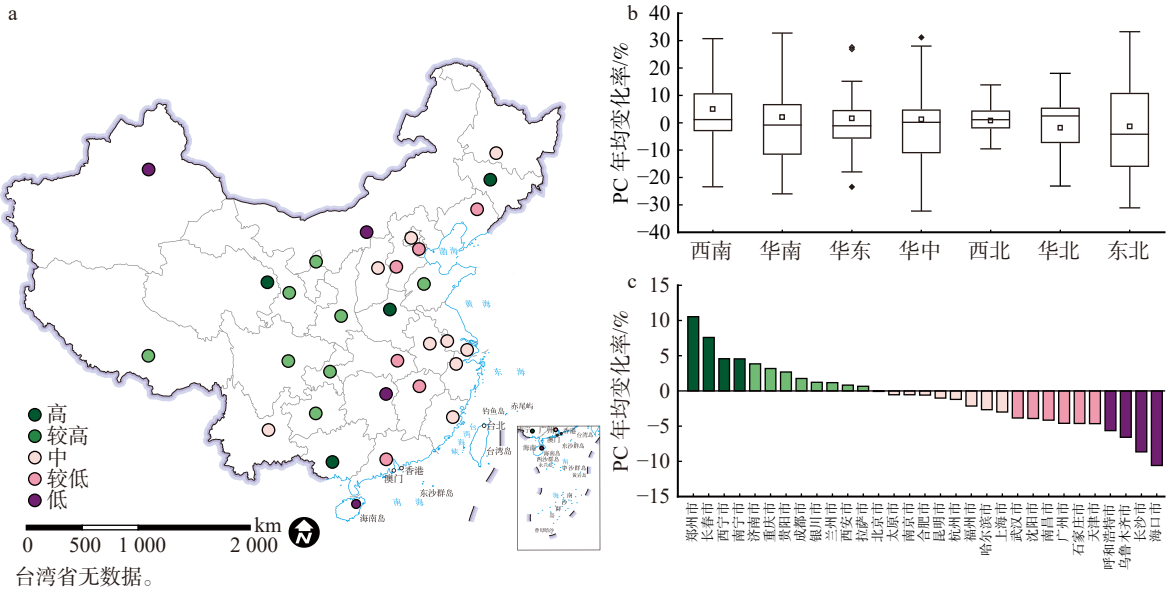
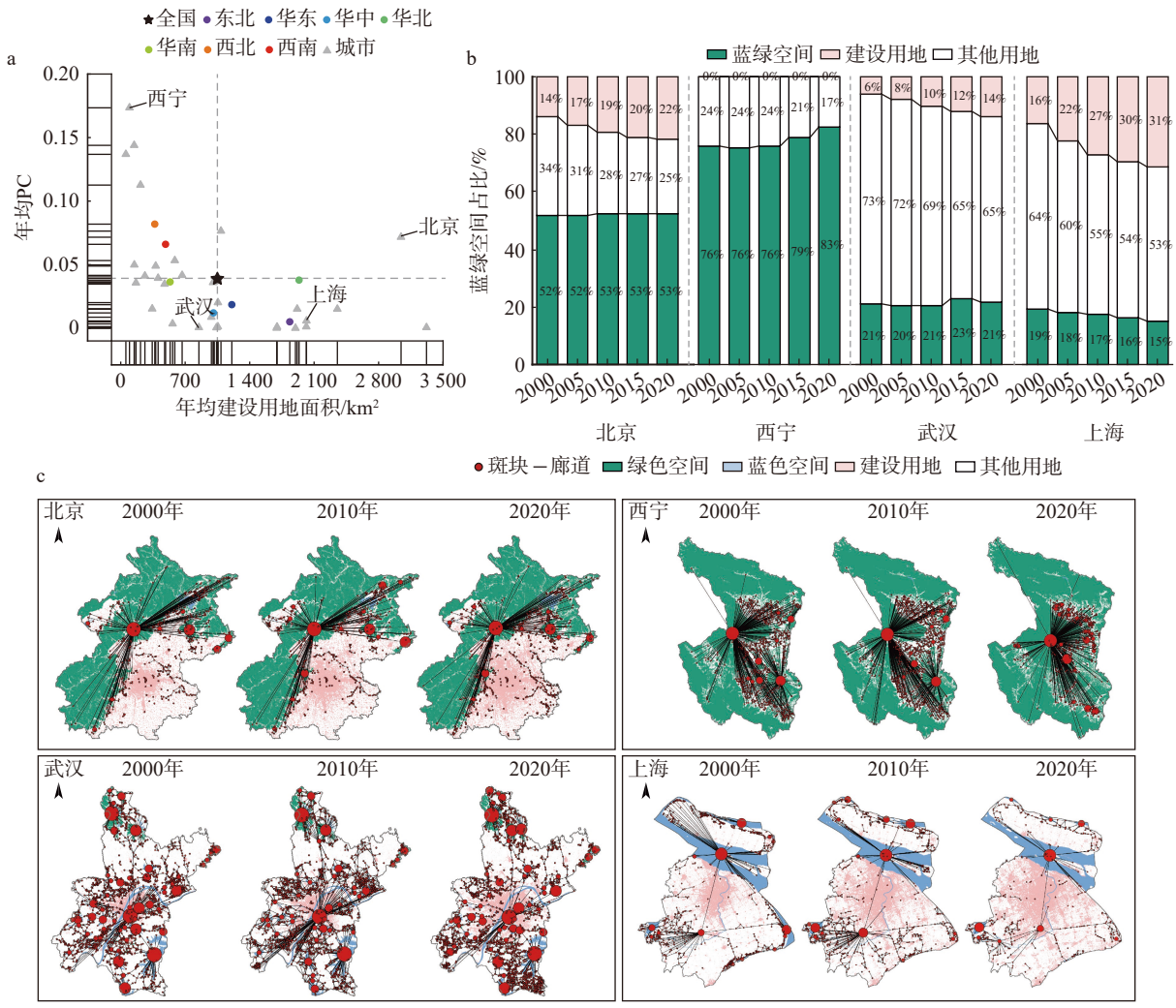


图 4 PC 年均变化率的空间分布(a)、分区尺度(b)及城市尺度(c)统计

Fig. 4 Spatial distribution (a), regional scale (b) and urban scale (c) statistics of PC annual average change rate



a. 整体耦合关系；b. 典型城市的用地比例变化；c. 生态网络结构演化

图 5　PC 与城市建设用地规模的关系

Fig. 5　Relationship between PC and built-up land scale

上海受制于生态空间总量不足，建设用地规模较大，景观连通性长期处于较低水平。

图 6 分析了 PC 变化率与城市建设用地扩张速率的关系，揭示城市动态发展过程中的生态响应特征。图 6a 展示了 PC 年均变化率与建设用地年均增长率的关系。其中第一象限特征为“高建设用地增长率–高景观连通性提升率”，表明西北、西南地区的部分城市能够在快速扩张的同时，积极推进绿色空间整合，改善生态连通性。部分城市（如海口）则处于第三象限（扩张慢但连通性下降显著），说明即使城市扩张速度较缓，若缺乏有效的生态网络管理，连通性仍可能持续退化。

图 6b 和 6c 进一步显示了 4 个象限中的典型城市的用地比例变化和生态网络结构演化。重庆、长春等城市在城市建设扩张过程中兼顾了生态空间的保护，维系了生态网络的稳定性。相对而言，海口、长沙虽蓝绿空间占比具有优势，但生态空间的缩减速率较快。在 2010—2020 年，海口的生态网络结构受到显著的破坏，导致核心区域破碎，分化形成了多个分散的斑块。而长沙生态网络的退化主要源于建设用地扩张对大量小型生态斑块的侵蚀，阻断了核心生态源地向城市内部的延伸与渗透，从而导致景观连通性急剧下降。

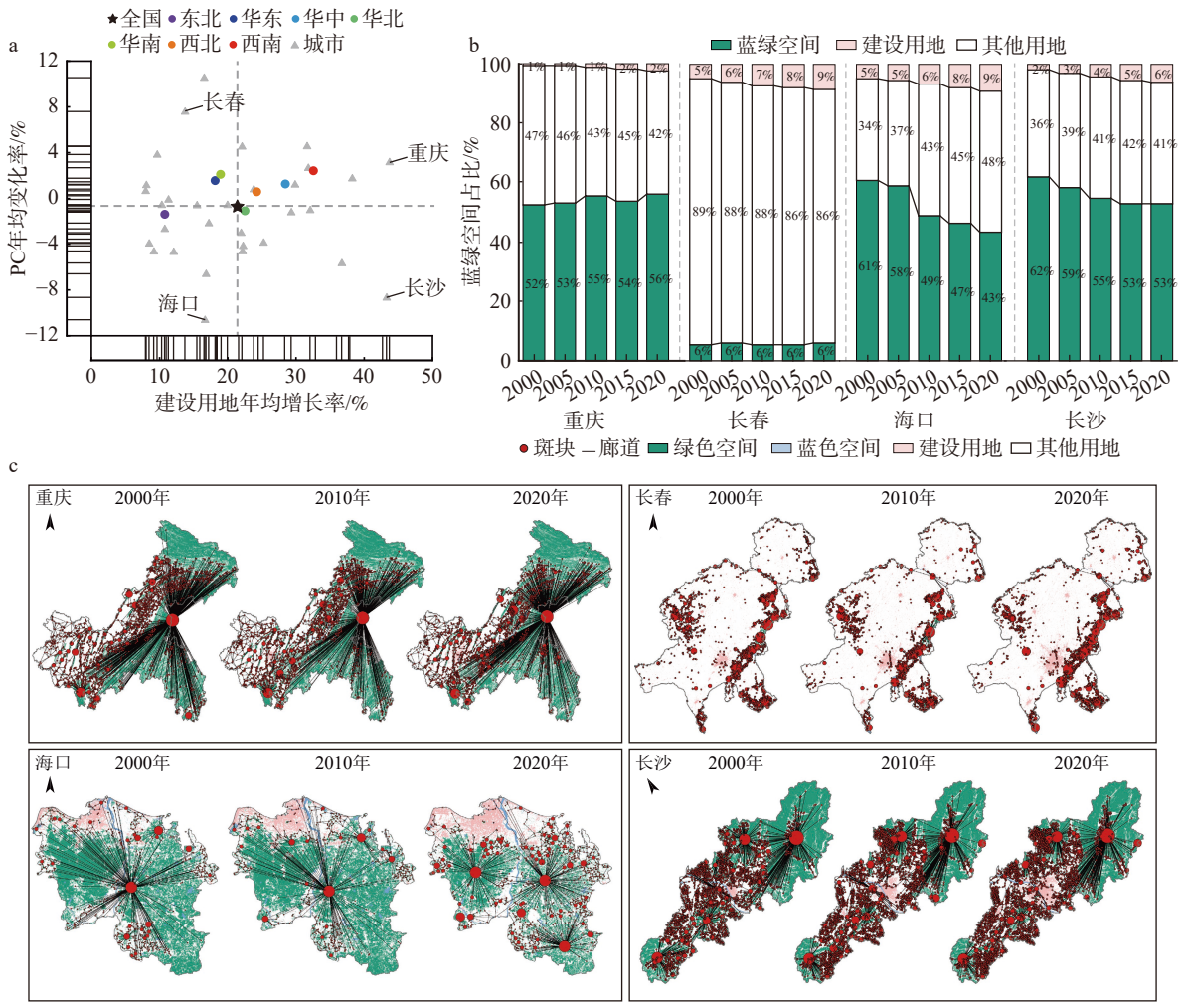
综合图 5 和图 6 来看，景观连通性与城市扩张之间并非线性或单向关系。不同城市的发展模式和生态空间规划策略共同驱动着景观连通性的演化。

3.3　驱动机制分析

3.3.1　相关性分析

图 7 综合呈现了 PC 与驱动因子间的相关性关系。从整体相关性特征来看（图 7a），PC 值与大多数城市化指标呈负相关关系，其中与建设用地占比、人口密度和夜间灯光强度之间的相关性尤为显著（$p < 0.001$），表明随着城市化强度的增强，景观破碎化趋势明显，导致生态网络整体连通性下降。

在所有驱动因子中，蓝绿空间占比与 PC 的相关性最强（$r = 0.69$，$p < 0.001$），表现出显著的正向作用。



a. 整体耦合关系；b. 典型城市的用地比例变化；c. 生态网络结构演化

图 6 PC 变化率与城市建设用地扩张速率的关系

Fig. 6 Relationship between PC change rate and urban construction land expansion rate

图 7b 进一步通过多项式拟合揭示了蓝绿空间占比与 PC 值的非线性响应关系，拟合效果良好（R^2_{adj} = 0.775）。当蓝绿空间比例较低时，连通性变化不明显；而在 40%~80% 区间内，连通性随蓝绿空间增加而迅速提升，表现出明显的非线性增强效应。综合 NDVI 的弱正相关特征（r = 0.18），说明在城市生态规划中应避免片面追求绿量累积，仍需结合生态网络整体结构优化。

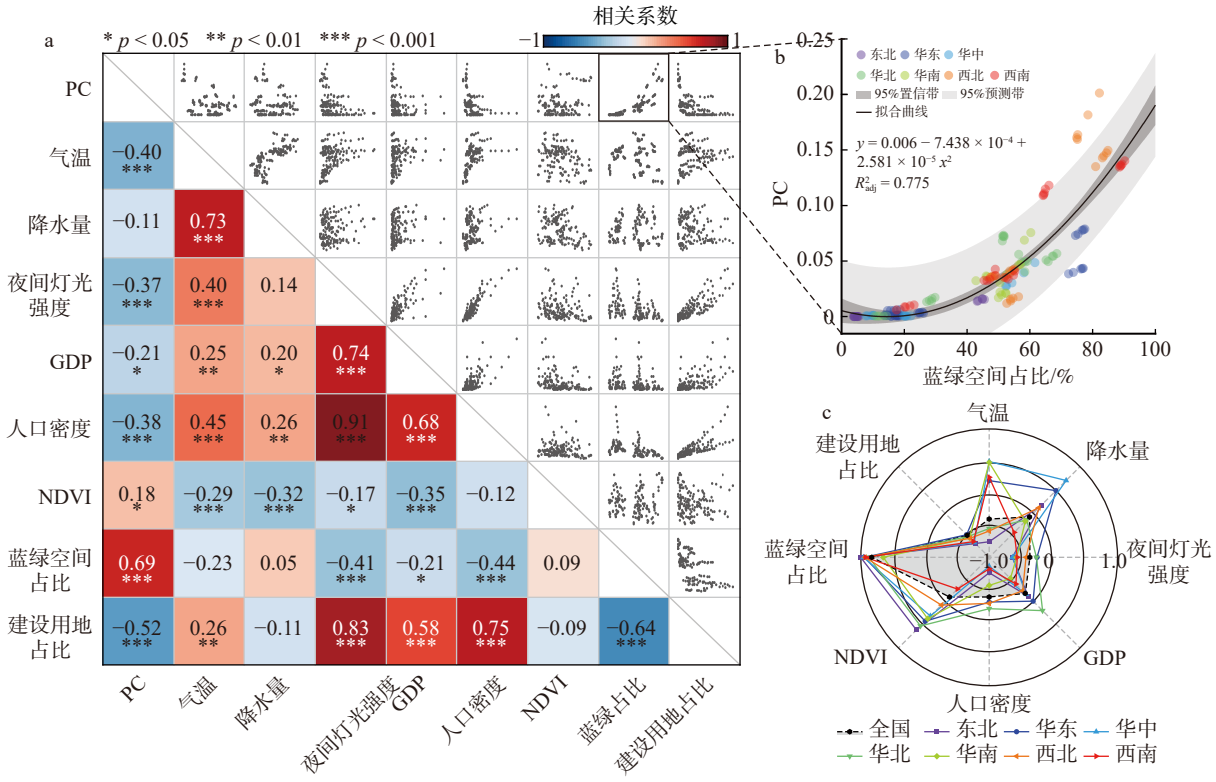
不同区域在驱动力因子的相关性关系中存在着显著的差异（图 7c）。气温因素分化为两个主要方向，华东、华中、华南和西南地区为正相关，表明较高的气温可能有助于植被生长，进而提高景观连通性。而在东北、华北和西北地区，气温与 PC 指数呈负相关，可能由于这些区域水分条件受限，气温升高反而加剧干旱和水资源紧张，削弱了植被生长的生态基础。

尽管降水量在全局尺度上没有显著性，但在区域尺度上，除东北地区外，降水与景观连通性的关系均具有显著性。这种现象可能由不同区域降水条件对生态过程的响应差异所致。在整体样本中这些异向趋势被抵消，导致统计相关性不显著。而分区尺度的分析使得降水的实际效应得以显现，具体表现为在华东、华中等区域的适度降水有助于植被生长与生态基底稳定，而在西南、华南等高降水地区则可能带来扰动性影响。

3.3.2 主成分分析

图 8 展示了基于 8 项驱动因子的主成分分析结果，其中主成分 1 和主成分 2 的解释率分别为 58.3% 和 21.5%，累计解释了 79.8% 的变量方差，能够较为充分地反映城市景观连通性驱动因子的主导维度。在主成分轴线上，主成分 1 主要由建设用地占比、人口密度、夜间灯光强度和 GDP 等城市化因子构成，体现了城市扩张与社会经济发展强度的梯度；而主成分 2 则主要受蓝绿空间占比、NDVI、气温和降水量等生态环境变量影响，代表自然生态基础的差异。从变量载荷方向来看，蓝绿空间占比与建设用地、人口密度呈明显对向关系，反映了在当前城市发展进程中，生态保护与土地开发之间面临的矛盾和对立关系。

各个城市在二维主成分空间中的分布特征，揭



a. 整体尺度；b. 蓝绿空间占比与PC的拟合曲线；c. 分区尺度

图 7　PC 与驱动因子的相关性分析

Fig. 7　Correlation analysis between PC and driving factors

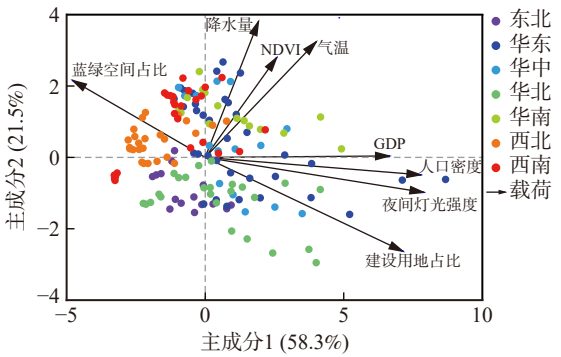


图 8　PC 驱动因子主成分分析

Fig. 8　PCA of PC driving factors

示了不同区域在自然与人为因子驱动下，景观连通性演化轨迹的差异性。华东、华南、华北等地区城市多分布在城市化程度较大的区段。而西南、西北等区域城市多集中于城市化强度较低、生态基底较好的象限。结果验证了生态要素与城市扩张之间的耦合关系，表明景观连通性的演化过程受到区域自然地理条件与城市发展模式的双重驱动。

4　讨论与结论

4.1　讨　论

4.1.1　连通性格局特征与规划策略

不同区域景观连通性呈现出显著的空间差异性，这种格局特征与自然地理背景、城市扩张模式以及生态保护政策的落实情况密切相关。西北、西南地区连通性较高，主要得益于城市化水平相对较低、生态斑块较为完整，特别是在青藏高原、云贵高原等地，森林、草地等天然生态系统保存良好，为生态网络提供了稳定基底。东北地区连通性最低，可能受传统工业扩张、生境破碎化以及寒冷气候对植被恢复的限制等多重因素影响[29−30]。

在整体上，31 个城市的景观连通性呈现下降趋势，反映出城市建设下蓝绿空间网络持续承压。这一趋势看似与近年来国家持续推动的生态政策形成反差，但实质上与政策方向并不矛盾，而是多种因素共同作用下的阶段性表现。一方面，前期城市的快速扩张对生态网络结构造成了显著干扰，而生态文明相关政策多在 2012 年后逐步推进[31]，在落地实施中存在一定时间滞后，短期内尚难以彻底扭转既有格局。另一方面，政策的区域实施也存在明显不均衡，在试点城市已取得积极进展，而部分城市在治理投入、规划执行等方面仍存在不足，政策成效受到一定制约[32−33]。因此，连通性的整体下降更多反映了宏观层面的平均趋势，实际演化路径呈现出明显的区域差异。

具体来看，部分城市在生态治理中已表现出积极变化。长春市 PC 增长率位于前列，生态发展态势较为积极。华北、华东、华南和华中地区整体连通性

水平较低，且变化趋势存在区域差异。这些地区城市建设用地规模大，占用了大量生态空间，但如北京、杭州等城市在扩张强度较高的背景下仍保持了较高的连通性，表明合理的生态空间规划与补偿机制有助于缓解扩张带来的负面影响[30]。其中，北京通过楔形绿地深入城市内部，沿河带状绿地串联生态斑块，沿路绿带构建生态廊道，有效支撑了城市生态网络结构的延续与完整性。

基于本文研究结果，建议在未来国土空间规划中强化蓝绿空间的结构性配置：在城市扩张边缘区优先嵌入楔形绿地，以建立城市内部与外围自然生态基底之间的有效连接；在河流与交通走廊两侧布局连续带状绿地，增强生态斑块间的纵向贯通；同时在建成区内部通过口袋公园、小微绿地等方式修补生态节点断裂，构建“点–线–面”协同的多尺度生态网络体系，提升整体景观连通性与生态系统韧性。

城市建设与景观连通性之间虽存在矛盾，但并非不可调和，应通过科学规划实现二者的协同发展。在宏观层面，将城市生态网络纳入国土空间规划体系，强化蓝绿基础设施的空间统筹。并将景观连通性作为空间规划中的重要生态指标，明确重要生态源地、生态廊道和缓冲带的管控边界，避免关键生态节点被城市用地侵占。在区域层面，因地制宜制定具有针对性的生态策略。西南、西北等生态基底良好的城市，应以“预防保护”为主，划定生态红线并控制城市开发边界的无序蔓延；对于东北等生态基底较弱的区域，应重点加强蓝绿空间建设，增加绿色基础设施总量，逐步构建支撑性生态网络体系；而华北、华东等高强度城市化地区，则应聚焦“生态修复”，通过增设绿色廊道、生态缓冲带及小微绿地网络，提升被割裂生态斑块间的功能连接。

4.1.2 关键驱动机制及区域分化

本研究通过驱动因子分析，探讨了景观连通性驱动机制的共性和差异性。首先，在城市空间格局因素上，蓝绿空间占比对景观连通性具有最显著的正向影响，建设用地占比与景观连通性呈显著负相关。表明良好的生态基底是建设城市生态网络和维持景观连通性的基础，这与学界的普遍研究结论相一致[34]。研究进一步揭示了蓝绿空间占比与 PC 值的非线性响应关系，并强调在城市生态规划中应避免片面追求绿量累积，需要重视生态网络结构的完整性和质量。

其次，在气候因素上，气温在东北、西北、华北地区对 PC 指数的影响呈负相关，可能是由于在水分条件受限的背景下，高温加剧生态系统脆弱性，进一步加剧干旱和水资源紧张问题，影响植被生长，使得原本较为完整的生态网络破碎化。在高温敏感地区（如西北），应采取适应性绿地设计，提高城市绿地的耐热能力，减少气温升高对连通性的负面影响。降水量对华东、华中地区的景观连通性影响较强，但在华南、西南地区的影响较弱甚至为负，可能由于降水量增加导致湿地水位波动大，影响生境稳定性。针对降水量对连通性的不同影响，应制定区域适应性生态管理策略。在构建生态网络的过程中纳入气候韧性框架，考虑气候变化对生境适宜性和极端天气事件的影响，确保生态廊道和关键生境斑块在未来仍能保持功能性和适应性。

最后，GDP 和人口密度对景观连通性的影响强度在不同地区有所差异。在华东、华南等城市化程度较高的地区，其负向影响更显著，而在西北地区的影响较小。城市生态网络规划中应进一步考虑社会经济因素的环境影响[35]，通过合理的城市用地布局，减少人口密度增长带来的生态破碎化问题。

4.1.3 研究局限与展望

研究基于 Graphab 模型量化了城市景观连通性，并结合相关性分析探讨了其主要驱动机制，但仍存在一定局限性。首先，研究主要聚焦于景观结构层面的空间格局分析，未能直接纳入物种迁移的实际过程。建议今后结合物种分布数据[36]与生境适宜性模型，更全面地评估景观连通性对生物多样性的支撑作用，增强指标解释力与生态学意义。

再者，本文采用的土地利用数据空间分辨率为 30 m，虽适用于区域尺度分析，但在高密度建成区内，可能难以准确反映小尺度绿地系统的连通结构。未来可引入更高精度的遥感影像或城市绿地 GIS 数据，加强模型对微尺度生态斑块和廊道的识别能力。此外，本研究采用历史时序数据开展静态演化分析，尚未涵盖城市未来发展情景下的动态预测能力。建议后续结合机器学习方法或土地利用情景模拟技术，探索不同发展路径下景观连通性的变化趋势与敏感因子响应机制，为生态网络规划提供更具前瞻性的科学支撑。

4.2 结 论

本研究基于 Graphab 模型，分析了 2000—2020 年中国 31 个主要城市的景观连通性演化特征，探讨了城市扩张对景观连通性的影响及其驱动机制。本研究为优化城市生态网络，提升景观连通性提供了科学依据，并建议采取针对性的区域生态保护与规划策略，以促进城市可持续发展。主要结论如下。

（1）31 个主要城市的景观连通性水平呈现“西高东低”的空间格局，整体呈下降趋势，降幅为 4.8%，区域间差异显著。西部地区自然生态环境较为完整，

城市建设发展对生态网络影响较小；而东北、华北、华东等地连通性普遍较低，生态空间破碎化明显，需加强生态补偿和修复措施。

（2）整体而言，城市扩张与景观连通性呈显著负相关关系，但不同城市类型表现出多样的耦合路径。多数城市建设用地扩张导致连通性下降，但亦有部分如郑州、长春等城市，通过生态规划和网络优化措施，实现了“扩张中提升”的空间协调特征。

（3）蓝绿空间占比是影响景观连通性的首要正向因子，相关性最高（$r = 0.69$），对生态网络结构起到关键支撑作用。与之相对，建设用地、人口密度、气温等城市化指标均表现为负向影响，且区域间的作用强度存在显著差异，体现了景观连通性演化机制的空间异质性。

（4）主成分分析进一步揭示了景观连通性演化受自然地理条件与城市发展模式的双重驱动模式，同时体现了城市蓝绿空间与城市化间的结构性矛盾。主成分 1 和 2 分别反映了城市建设强度和生态基底条件。城市在二维主成分空间中的分布展现出鲜明的区域聚集性，西南、西北城市普遍生态基础良好，而华东、华南、华北城市集中于高城市化水平区域。

审图号：GS 京（2026）0319 号

参　考　文　献

［1］ 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京城市扩张的生态底线: 基本生态系统服务及其安全格局 [J]. 城市规划, 2010, 34(2): 19−24.
Yu K J, Wang S S, Li D H, et al. Ecological baseline for Beijing’s urban sprawl: basic ecosystem services and their security patterns[J]. City Planning Review, 2010, 34(2): 19−24.

［2］ 马克平.《昆明−蒙特利尔全球生物多样性框架》是重要的全球生物多样性保护议程 [J]. 生物多样性, 2023, 31(4): 5−6.
Ma K P. Kunming-montreal global biodiversity framework: an important global agenda for biodiversity conservation[J]. Biodiversity Science, 2023, 31(4): 5−6.

［3］ 熊春妮, 魏虹, 兰明娟. 重庆市都市区绿地景观的连通性 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2237−2244.
Xiong C N, Wei H, Lan M J. Analysis of connectivity on greenland landscape in metropolitan region of Chongqing City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2237−2244.

［4］ 岳天祥, 叶庆华. 景观连通性模型及其应用沿海地区景观 [J]. 地理学报, 2002, 57(1): 67−75.
Yue T X, Ye Q H. Model for landscape connectivity and their applications[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(1): 67−75.

［5］ 高娜, 姜雪, 郑曦. 基于生态系统服务的永定河流域北京段生态网络构建与优化 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 106−118.
Gao N, Jiang X, Zheng X. Construction and optimization of ecological network in Beijing section of Yongding River Basin based on ecosystem services[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3): 106−118.

［6］ 蒋榕, 张鑫, 李冠衡, 等. 西双版纳州生态廊道构建 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(11): 113−123.
Jiang R, Zhang X, Li G H, et al. Construction of ecological corridor in Xishuangbanna Prefecture, Yunnan Province of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(11): 113−123.

［7］ 王博娅, 刘志成. 城市更新背景下北京市中心城区生态网络的优化策略 [J]. 城市发展研究, 2022, 29(1): 113−120.
Wang B Y, Liu Z C. Study on the optimization strategy of ecological network in Beijing central area under the background of urban renewal[J]. Urban Development Studies, 2022, 29(1): 113−120.

［8］ Tarabon S, Calvet C, Delbar V, et al. Integrating a landscape connectivity approach into mitigation hierarchy planning by anticipating urban dynamics[J]. Landscape and Urban Planning, 2020, 202: 103871.

［9］ 韩凌云, 徐振, 阮宏华, 等. 基于景观图论和生物能学的景观演变分析方法 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1597−1604.
Han L Y, Xu Z, Ruan H H, et al. An approach for tracing landscape change based on landscape graph and bioenergetics[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(6): 1597−1604.

［10］ 魏雯, 唐安琪. 基于 InVEST-图论模型的西双版纳州亚洲象生境网络评价 [J]. 生态学报, 2024, 44(12): 5206−5218.
Wei W, Tang A Q. Evaluation of Asian elephant habitat network in Xishuangbanna based on InVEST-Graph Theory model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5206−5218.

［11］ 张利, 何玲, 闫丰, 等. 基于图论的两栖类生物栖息地网络规划: 以黑斑侧褶蛙为例 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 1054−1060.
Zhang L, He L, Yan F, et al. Amphibian habitat network planning based on the graph theory: a case study of Pelophylax nigromaculata[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 1054−1060.

［12］ 丁金华, 孙琦, 钱晶. 基于 MSPA-InVEST 模型的水网乡村绿色基础设施网络构建研究: 以吴江东北片区为例 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(06): 183−191.
Ding J H, Sun Q, Qian J. Research on the construction of green infrastructure network in the water net countryside based on MSPA-InVEST model: a case study of the northeast area of Wujiang[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(06): 183−191.

［13］ 林佳怡, 董寅, 戴嘉腾, 等. 景观连通性与环境公平性视域下城市冷岛网络构建及优化: 以福州市中心城区为例 [J]. 生态学报, 2025, 45(11): 5582−5594.
Lin J Y, Dong Y, Dai J T, et al. Construction and optimization of urban cold island network from the perspective of landscape connectivity and environmental equity: a case study of the central city of Fuzhou City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5582−5594.

［14］ 韩萌薇, 张帅普, 徐勤学, 等. 基于碳汇和景观连通性的跨流域生态安全格局构建 [J]. 环境科学, 2024, 45(10): 5844−5852.
Han M W, Zhang S P, Xu Q X, et al. Construction of cross-basin ecological security patterns based on carbon sinks and landscape connectivity[J]. Environmental Science, 2024, 45(10): 5844−5852.

［15］ 朱希希, 侯玉婧, 王甜甜, 等. 南京市生态空间结构及连通性动态变化分析 [J]. 中国环境监测, 2025, 41(3): 136−144.
Zhu X X, Hou Y J, Wang T T, et al. Dynamic changes of

ecological spatial structure and connectivity in Nanjing[J]. Environmental Monitoring in China, 2025, 41(3): 136−144.

[16] Mu H W, Guo S H, Li X C, et al. Quantifying landscape connectivity gaps between protected area and natural habitat[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 437: 140729.

[17] 熊斌彬, 张建军, 李宝群, 等. 人类强扰动活动对矿业城镇景观连通性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(22): 291−296.
Xiong B B, Zhang J J, Li B Q, et al. Impact of human strong disturbance on landscape connectivity of mining towns[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(22): 291−296.

[18] 孙贤斌, 刘红玉. 土地利用变化对湿地景观连通性的影响及连通性优化效应: 以江苏盐城海滨湿地为例 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(6): 892−903.
Sun X B, Liu H Y. Effects of land use change on wetland landscape connectivity and optimization assessment of connectivity-a case study of wetlands in the coastal zone of Yancheng, Jiangsu[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(6): 892−903.

[19] Yang J , Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907−3925.

[20] Foltête J C, Clauzel C, Vuidel G. A software tool dedicated to the modelling of landscape networks[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 38: 316−27.

[21] 宋利利, 秦明周, 张鹏岩, 等. 基于图论的景观图表达、分析及应用 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3579−3588.
Song L L, Qin M Z, Zhang P Y, et al. Representation, analysis and application of landscape graph based on graph theory[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(10): 3579−3588.

[22] Saura S, Pascual-Hortal L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study[J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 83(2): 91−103.

[23] Foltête J C, Girardet X, Clauzel C. A methodological framework for the use of landscape graphs in land-use planning[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 124: 140−50.

[24] 李豪, 吴明豪, 詹芳芷, 等. 耦合 Graphab-PLUS 模型的生态网络动态评估框架: 以北京市中心城区为例 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 95−105.
Li H, Wu M H, Zhang F Z, et al. A dynamic assessment framework of ecological networks coupled with Graphab-PLUS model: a case study in the central area of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 95−105.

[25] 周燕, 刘梦瑶, 王丽娜, 等. 基于生态网络优化对比的国土空间生态修复策略研究 [J]. 中国园林, 2024, 40(9): 43−49.
Zhou Y, Liu M Y, Wang L N, et al. Research on ecological restoration strategy of territorial space based on ecological network optimization and comparison[J]. Chinese Landscape Architecture, 2024, 40(9): 43−49.

[26] 陈泓宇, 李雄. 基于 MSPA-InVEST 模型的北京中心城区绿色空间生境网络优化 [J]. 风景园林, 2021, 28(2): 16−21.
Chen H Y, Li X. Optimization of green space habitat network of central Beijing based on MSPA-InVEST model[J]. Landscape Architecture, 2021, 28(2): 16−21.

[27] 蒙吉军, 王晓东, 尤南山, 等. 黑河中游生态用地景观连接性动态变化及距离阈值 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1715−1726.
Meng J J, Wang X D, You N S, et al. Dynamic changes of landscape connectivity for ecological lands and distance thresholds in the middle reaches of the Heihe River, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(6): 1715−1726.

[28] 杜志博, 李洪远, 孟伟庆. 天津滨海新区湿地景观连接度距离阈值研究 [J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6534−6544.
Du Z B, Li H Y, Meng Q Y. Distance thresholds of wetland landscape connectivity in Tianjin Binhai New Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6534−6544.

[29] 孙明, 陆明. 寒地城镇生态规划策略研究 [J]. 规划师, 2005, 21(10): 11−14.
Sun M, Lu M. The strategic research on town eco-planning in cold regions[J]. Planners, 2005, 21(10): 11−14.

[30] 赵秋叶, 施晓清. 城市产业生态网络特征与演进规律: 以北京市为例 [J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4873−4882.
Zhao Q Y, Shi X Q. Characteristics and evolution of an urban industrial ecological network: a case study of Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(14): 4873−4882.

[31] 冯丹阳, 孟晓杰, 张惠远. 生态文明建设成效评估研究进展与路径展望 [J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(6): 1916−1930.
Feng D Y, Meng X J, Zhang H Y. Research progress and path prospect of effectiveness evaluation of ecological civilization construction[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(6): 1916−1930.

[32] 雷钰, 陈国兰, 苗笑笑, 等. 云南省生态文明排头兵建设成效、不足及对策 [J]. 南方农业, 2023, 17(16): 233−235.
Lei Y, Chen G L, Miao X X, et al. Effectiveness, shortcomings, and countermeasures of Yunnan ecological civilization vanguard construction[J]. South China Agriculture, 2023, 17(16): 233−235.

[33] 孙钰, 武占云, 姜宁宁, 等. 京津冀生态文明建设的时空溢出效应及驱动因素 [J]. 城市问题, 2022(7): 43−53.
Sun Y, Wu Z Y, Jiang N N, et al. The spatiotemporal spillover effects and driving factors of ecological civilization construction in the Beijing Tianjin Hebei region[J]. Urban Problems, 2022(7): 43−53.

[34] 张妍, 郑宏媚, 陆韩静. 城市生态网络分析研究进展 [J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4258−4267.
Zhang Y, Zheng H M, Lu H J. A review of ecological network analysis in urban ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(12): 4258−4267.

[35] 张萌萌, 王帅, 傅伯杰, 等. 社会−生态网络方法研究进展 [J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8309−8319.
Zhang M M, Wang S, Fu B J, et al. Study on social-ecological network method: progress and prospect[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8309−8319.

[36] 阳文锐, 李婧, 闻丞, 等. 基于物种分布的北京平原生态网络构建 [J]. 生态学报, 2022, 42(20): 8213−8222.
Yang W R, Li J, Weng C, et al. Building ecological networks in Beijing Plain based on local species distribution[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8213−8222.

（责任编辑 范 娟
责任编委 李 雄）