

基于BRT模型的合肥中心城区蓝绿空间时空演变及驱动因素研究

Spatiotemporal Dynamics and Driving Factors of Urban Blue-Green Space in Central Hefei Based on BRT Model

袁阳洋^{1,2*} 汤思琪¹ 郭蔚¹ 罗尚岑¹ 吕晓倩^{3*}
YUAN Yangyang^{1,2*} TANG Siqi¹ GUO Wei¹ LUO Shangcen¹ LYU Xiaolian^{3*}

(1.东南大学建筑学院, 南京 210096; 2.江苏省城乡与景观数字技术工程中心, 南京 210096; 3.合肥工业大学建筑与艺术学院, 合肥 230601)

(1. School of Architecture, Southeast University, Nanjing, Jiangsu, China, 210096; 2. Jiangsu Provincial Urban and Rural Digital Technology Engineering Center, Nanjing, Jiangsu, China, 210096; 3. College of Architecture and Art Hefei University of Technology, Hefei, Anhui, China, 230601)

文章编号: 1000-0283(2023)12-0038-11
DOI: 10. 12193/j. laing. 2023. 12. 0038. 005
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2023-08-22
修回日期: 2023-10-25

摘要

蓝绿空间是城市用地重要组成部分, 探究高速城市化进程下蓝绿空间的时空演变及驱动因素, 有助于揭示其演化规律, 为相关研究及政策制定提供基础。以合肥为例, 基于面积变化强度、土地转移矩阵、多阶邻接指数研究中心城区蓝绿空间的时空变化; 采用增强回归树模型探讨影响城市蓝绿空间扩张的驱动因子。结果表明: (1) 2000-2020年, 合肥中心城区蓝绿空间总体规模增长了14.8%, 呈现稳步增加的阶段性特征。(2) 研究时段内合肥中心城区蓝绿空间扩张模式均以边缘式为主、邻接式为辅; 新增蓝绿斑块沿大型自然蓝绿斑块集聚, 蓝绿空间扩张由城市边缘转向内部。(3) 自然要素因子对蓝绿空间扩张的影响(80.8%)大于社会经济因子(19.2%), 其中高程(32.1%)、坡度(26.9%)、坡向(21.8%)、人口密度(13%)、第三产业增加值(6.2%)是主要驱动因子。研究探明了近20年来合肥中心城区蓝绿空间的时空演变特征及驱动因子, 可为未来城市蓝绿空间规划管理及可持续发展提供支撑。

关键词

城市蓝绿空间; 时空演变; 驱动因子; 多阶邻接度指数; 增强回归树; 合肥市

Abstract

The blue-green space in Chinese cities is important for urban land use. Exploring the spatiotemporal dynamics and driving factors of blue-green spaces under rapid urbanization processes contributes to unveiling the evolutionary patterns of urban blue-green spaces, which provides a fundamental basis for related research and policy formulation. In this study, remote sensing imagery was used to calculate the extent of blue-green spaces from 2000 to 2020, and we analyzed the evolution using the intensity of area change, a land transfer matrix, the multi-order adjacency index, and a boosted regression tree model. This study revealed the spatiotemporal dynamics and driving factors of blue-green spaces in the central area of Hefei from 2000 to 2020, particularly: (1) Between 2000 and 2020, there was a 14.8% net increase in the total area of blue-green spaces in Hefei's central area. (2) Blue-green spaces primarily showed fringe-type expansion and proximity-type expansion. Spatially, new blue-green patches tended to cluster around large pre-existing natural blue-green patches. Furthermore, the expansion of blue-green spaces shifted from the urban periphery to the urban interior. (3) Natural factors exerted a greater influence (80.8%) on the expansion of blue-green spaces than did socioeconomic factors (19.2%). DEM (32.1%), slope (26.9%), aspect (21.8%), population density (PD) (13%), and value-added by the tertiary industry (VATI) (6.2%) were identified as the primary driving factors. The results contribute to understanding changes in urban blue-green spaces and the driving factors behind these changes, thereby providing support for future planning, protection, and sustainable development of urban blue-green spaces.

Keywords

urban blue-green space; spatiotemporal evolution; driving factor; Multi-order Adjacency Index, MAI; Boosted Regression Tree, BRT; Hefei City

袁阳洋

1987年生/女/江苏南京人/博士/副教授/
研究方向为风景园林规划设计及理论、数字
景观技术、城市蓝绿空间

汤思琪

1999年生/女/安徽宿州人/在读硕士研究生/
研究方向为园林规划与设计

吕晓倩

1987年生/女/安徽巢湖人/博士/副教授/
研究方向为风景园林规划设计及理论、绿地
生态规划

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: yyy@seu.edu.cn, eva_lyu@qq.com

基金项目:

国家自然科学基金重点项目“低影响开发下的城市绿地规划理论与方法”(编号: 51838003); 东南大学“至善青年学者”支持计划资助项目
“城市建成区蓝绿空间布局对碳汇效益的影响机制研究”(编号: 2242023R40002)

过去30年中国经历了高速的城市化进程,硬化地表面积迅速扩张,土地利用类型的变化特征明显,引发了城市热岛^[1]、空气污染^[2]、生物多样性锐减^[3]等一系列城市环境问题。城市蓝绿空间是城市发展过程中留存或新建的绿色空间、蓝色空间的总和,包括所有自然、半自然、人工的绿地以及水体,具有调节气候^[4]、减碳增汇^[5]、调节雨洪^[6]、维持生物多样性^[7]等多重功能,是城市生态系统的重要组成部分。城市的演进扩张客观上促进了城镇化水平提高的同时也导致大量蓝绿空间被建设用地侵占,破碎程度不断提高。然而,城市可持续发展需求对蓝绿空间的生态系统服务与社会福祉功能提出了更高要求。在此背景下,系统研究城市建设活动和蓝绿空间的相互作用,阐明城市蓝绿空间在面积规模、空间分布方面的动态演变规律与驱动因子,对揭示高密度城市蓝绿空间的演化规律,优化城市蓝绿斑块的空间布局有重要意义,不仅有助于为城市蓝绿空间规划和相关政策制定提供科学依据,且能够为类似城市蓝绿空间的优化和管理提供借鉴。

当前,针对城市土地利用的时空演变和驱动力的研究较为丰富,相关研究多从景观格局测度^[8]、景观连通性优化^[9]、演变机制定量分析^[10]、情景模拟等展开,聚焦城市群、都市区等大尺度上的区域空间^[11];另一方面,在研究驱动机制方面,相关性分析^[12]、主成分分析^[13]、多元回归分析^[14]、逻辑回归分析^[15]以及地理加权回归^[16]等被广泛运用,地理探测器^[17]也常被用于探究驱动因子之间的交互作用。城市蓝绿空间近年来成为研究热点^[18-19],在时空演变研究上,学者利用格局指数^[20]、动态变化模型^[21]等方法探究斑块规模、数量以及空间组成上的变化特点,这些研究多

基于土地利用的部分类型数据展开分析,或是利用土地转移矩阵^[22]、重心迁移法^[23]、梯度方向法^[24]、扇形分析^[25]等探究蓝绿空间变化强度和分布规律。总体看来,当前关于蓝绿空间的研究多集中于景观格局层面的探讨,但城市中心区内蓝绿空间演变模式及驱动机制的研究相对较少。城市蓝绿空间的演变过程极为复杂,其驱动因子的影响往往呈复杂的非线性关系,基于机器学习原理的增强回归树模型由于具有同时处理不同类型、数量关系以及数据缺失等情况的优势,可以直观展现出在不同阈值内各个驱动因子对于蓝绿空间变化的影响程度,能够弥补传统统计学方法的不足。

本研究以合肥中心城区为例,基于卫星遥感影像数据,结合土地转移矩阵、多阶邻接度指数、增强回归树等方法,旨在探讨2000-2020年间蓝绿空间的时空演变特征和驱动因子,以期揭示高密度城市蓝绿空间的演化规律,为优化城市蓝绿斑块的空间布局提供参考。

1 研究区概况

合肥市(30° 57′ - 32° 32′ N, 116° 41′ - 117° 58′ E)地处中国华东地区,长江三角西翼,是安徽省省会,属于亚热带季风气候,自然风貌良好,地貌类型丰富,水系发达。市域总面积为11 445 km²,城镇化建设水平较高,截至2022年末,城镇化率达84.64%,城市建成区绿化覆盖率46%。根据《合肥市国土空间总体规划(2021-2035年)》,市辖区为中心城区,包括蜀山、包河、瑶海、庐阳4个行政区,总面积为1 312.5 km²。

2002年合肥启动编制城市发展战略规划,自此开始了快速发展的黄金20年,城市快速扩张、人口增长迅速,2022年迈入了特

大城市行列。2000-2022年,合肥从传统的工业城市转向现代化城市,政府重视城市环境建设,积极响应生态文明建设战略,出台了一系列政策聚焦于城市环境的修复,蓝绿空间在发展中得到保护。这一时期的城市发展速度、格局转变具有鲜明的特点与典型性。据此,本文选择2000-2020年作为研究时段,以每5年为一个时间节点。

2 数据处理与研究方法

本研究技术框架如图1所示。

2.1 数据获取与处理

2.1.1 蓝绿空间数据

从地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>)采集2000年、2005年、2010年Landsat TM及2015年、2020年Landsat OLI共5期遥感影像,空间分辨率30 m。基于Google Earth Engine(GEE)平台,对影像进行辐射定标、大气几何校正、条带修复等处理。根据中国土地利用/土地覆盖遥感监测数据分类系统(LUCC)对处理后的影像进行遥感解译,将其划分为耕地、林地、草地、建设用地、水体、未利用地6类,得到各期合肥市土地利用分类数据。采用Kappa系数对分类后图像精度评估验证,总体的精确度达到85%,高于最低精度要求。利用ArcMap10.8软件将林地、草地重分类成绿色空间,水体重分类成蓝色空间,获得5期合肥中心城区蓝绿空间分布图(图2)。

2.1.2 潜在驱动因子数据

城市土地利用变化受到自然和人类活动的共同影响,自然要素对蓝绿空间的形成和变化具有重要约束作用,规划建设导向下的社会经济要素会在短期内对蓝绿空间格局变

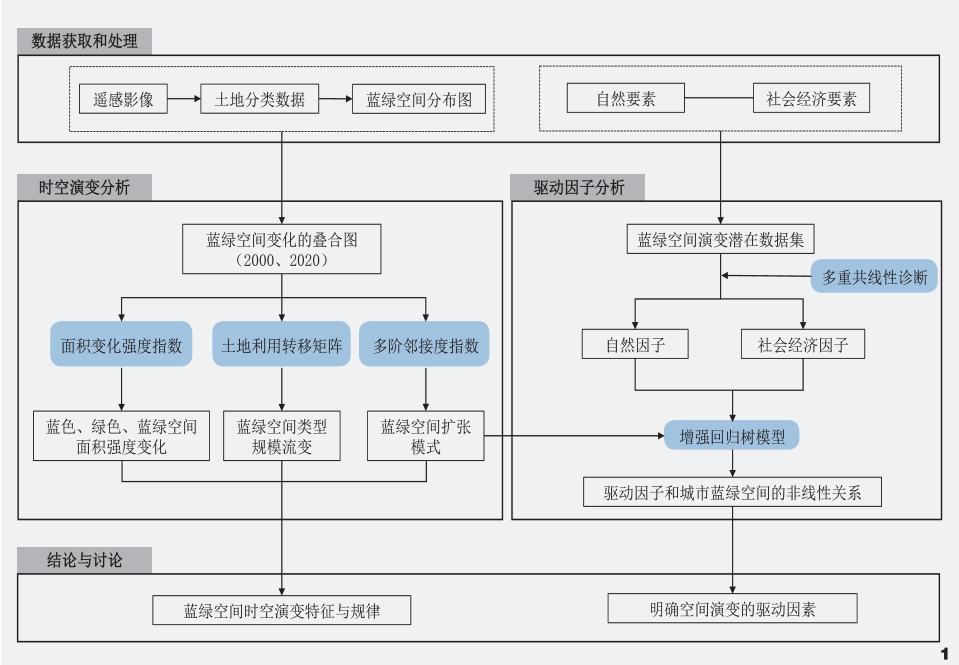


图1 技术框架
Fig. 1 Methodology framework

表1 潜在驱动因子数据集
Tab. 1 Dataset of potential blue-green space evolution drivers

类别 Factors Types	变量名称 Index	缩写 Abbreviation	单位 Unit	来源 Resource	分辨率 Resolution
自然要素	DEM	DEM	m	https://www.resdc.cn/	30 m
	地形数据	坡度	°	基于DEM数据采用GIS坡度分析工具处理	
		坡向	°	GIS坡向分析工具处理	
	气候因子数据	平均年气温	AAT	℃	
		平均年降水量	AAP	mm	
	平均日辐射量	AASR			
社会经济要素	人口数据	常住人口数量	RP	万人	合肥统计年鉴2000-2020年
		人口密度	PD	人/km ²	地区常住人口数量/行政区面积
	地区生产总值	GRP	亿元	合肥统计年鉴2000-2020年	
	经济因子数据	人均GDP	GDPpc	万元/人	地区生产总值/常住人口数据
		第三产业增加值	VATI	亿元	合肥统计年鉴2000-2020年
		社会消费品零售总额	TRSCG	亿元	

化起到较大影响作用。由此，选取自然要素和社会经济要素构建蓝绿空间演变潜在驱动因子，并构建数据集（表1）。

2.1.3 多重共线性诊断

利用多重共线性诊断对潜在蓝绿空间驱动因子数据集进行初筛，以避免自变量的自相关性影响。采用R studio进行斯皮尔曼相关性分析，通过对比分析剔除高度相关的驱动因子（IRI ≥ 0.7, P < 0.05）。根据计算结果，自然要素中保留DEM、坡度、坡向；社会经济要素保留PD和VATI。

2.2 研究方法

2.2.1 面积变化强度指数

面积变化强度指数（*K*）可以定量描述蓝绿空间的变化程度，用于比较不同发展阶段下的蓝绿空间演变差异，计算见公式（1）。式中：*U_a*和*U_b*分别为研究初期及末期某区域某种景观类型的面积；*T*表示研究时间范围。

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

2.2.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵反映城市蓝绿空间的变化特征以及不同土地利用类型之间的流向，并将相互转化状况定量化，计算见公式（2）。式中：*A^k_{ij}*和*A^{k+1}_{ij}*分别代表两期地类，*D_{ij}*是*k*时期到*k+1*时期的地类变化矩阵。

$$D_{i \times j} = A^k_{i \times j} \times 10 + A^{k+1}_{i \times j} \quad (2)$$

2.2.3 多阶邻接度指数

多阶邻接度指数（Multi-order adjacency index, MAI）由Liu等人^[16]提出，该指数可以详细展示出不同时间跨度和新旧斑块间的空间关系（图3），更加直观了解城市蓝绿空间演变的

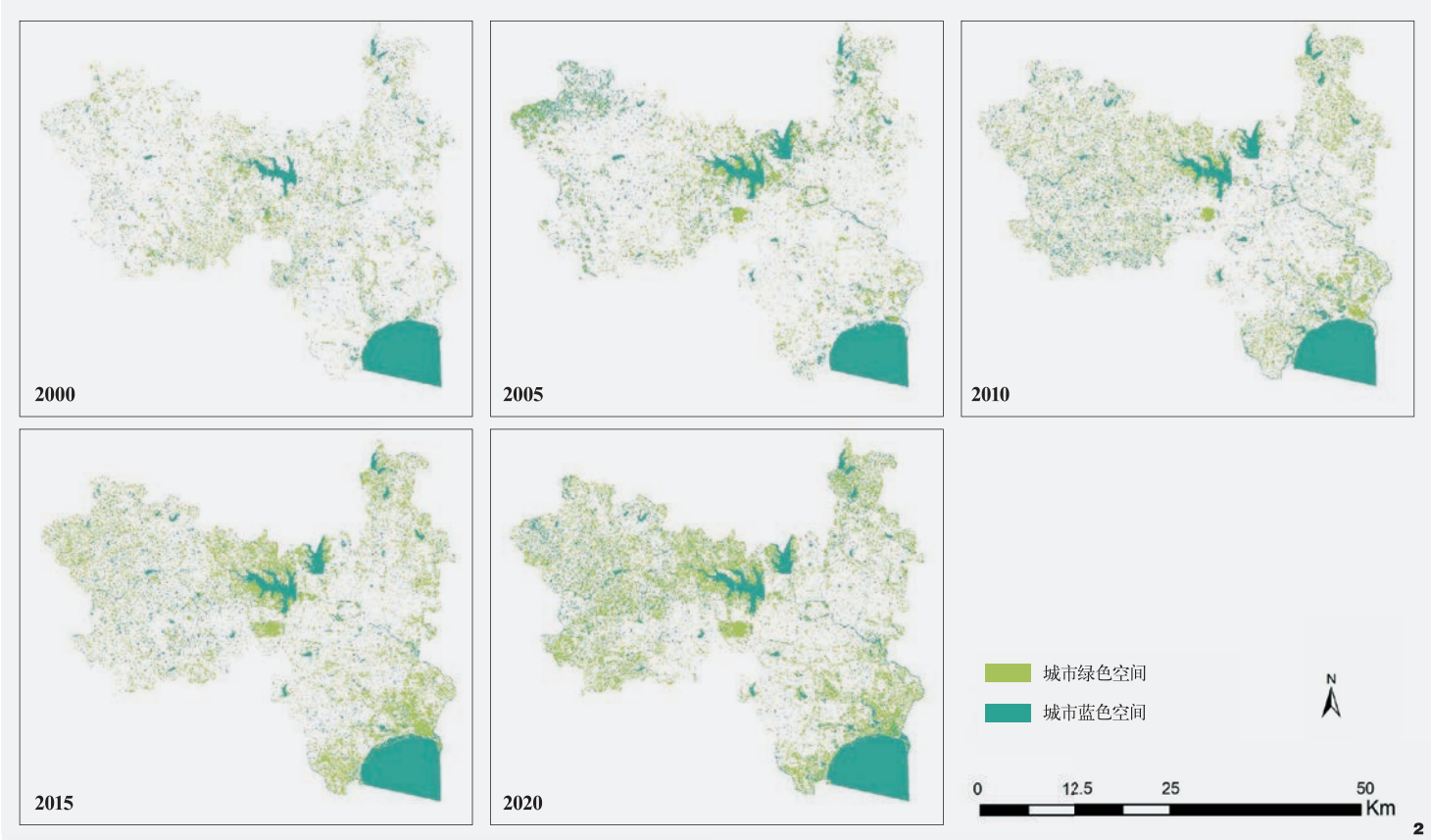


图2 合肥中心城区蓝绿空间分布图
Fig. 2 Spatial distribution map of blue-green spaces in central Hefei

模式特征。MAI扩展类型有内填、边缘、邻近、相间、分离和蔓延式6种(表2), 其中内填式刻画的是蓝绿空间在原有斑块内部新增; 边缘式则是紧邻着原有蓝绿斑块的扩张; 邻近式、相间式、分离式和蔓延式扩张是新

增斑块和原有斑块无物理接触下的跳跃式扩张, 程度依次加深, 体现了新增扩张斑块和原有斑块距离增加的程度。计算见公式(3)。

$$MAI = N - A_i/A_0 \quad (3)$$

式中: N 是以城市新增蓝绿斑块为中心

划定的缓冲区数量, A_0 指的是第 N 个缓冲区的面积, A_i 代表的是第 N 个缓冲区与原有斑块的交叉部分的面积。 MAI 值的大小反映了新增斑块和其相邻的原有斑块的空间关系, 值越小, 表明空间关系越紧密, 新增斑块的扩张程度越小; 反之, 值越大, 斑块的扩张程度越高。本研究中的缓冲区距离 D 与遥感影像分辨率保持一致为30 m, 缓冲区个数设为5, 根据公式(3), 利用ArcGIS Pro Python 3.9环境编写脚本, 分别计算4个时段研究区新增蓝绿斑块的 MAI 值。

2.2.4 增强回归树模型

增强回归树 (Boosted Regression Tree, BRT)

表2 MAI扩展的类型 Tab. 2 Types of MAI expansion			
扩展类型 Types	缓冲区 Buffer	距离范围 Distance	MAI值 MAI value
内填式	1	[0, D)	[0, 0.5)
边缘式	1	[0, D)	[0.5, 1)
邻近式	2	[D, 2D)	[1, 2)
相间式	3	[2D, 3D)	[2, 3)
分离式	4	[3D, 4D)	[3, 4)
蔓延式	[5, +∞)	≥4D	[4, +∞)

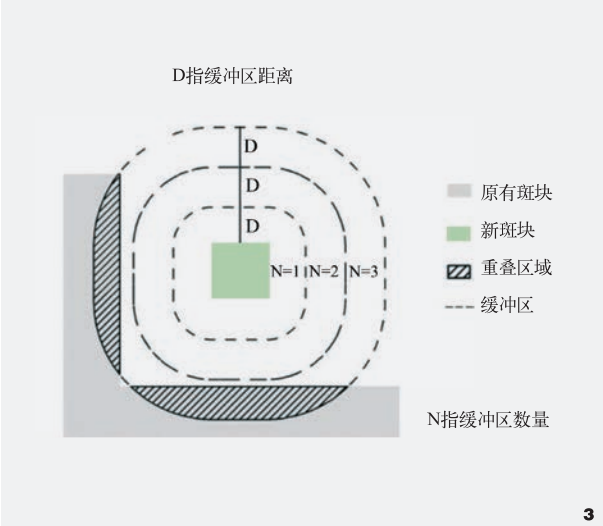


图3 多阶邻接度指数模型
Fig. 3 Multi-order adjacency index model.

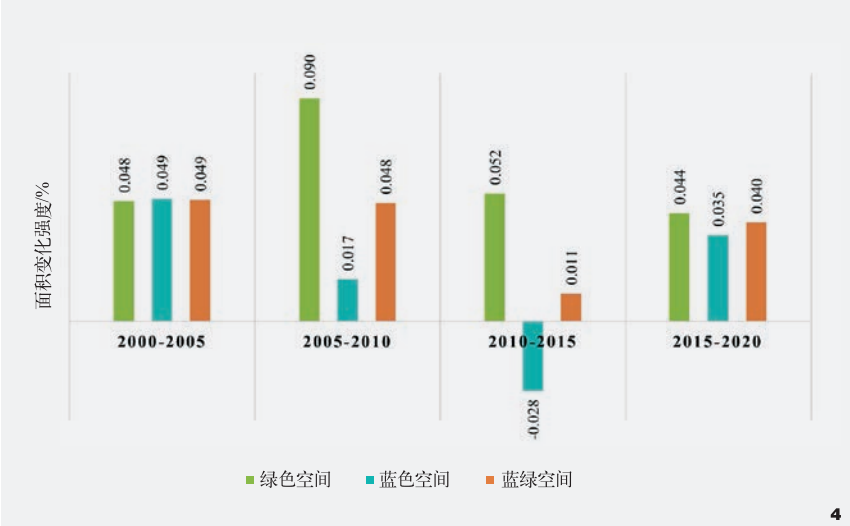


图4 合肥中心城区蓝色空间、绿色空间、蓝绿空间规模动态变化图^[27]
Fig. 4 Dynamic of blue spaces, green spaces, and blue-green spaces in central Hefei

是一种基于分类回归树算法 (Classification and Regression Tree, CART) 的自学习方法, 擅于处理不同类型的数据, 灵活性高。与传统的二元 Logistic、多元线性回归等方法相比, 其稳定性以及预测性更好, 且输出自变量对于因变量的贡献度和反应曲线较为直观^[26]。本研究以驱动因子为自变量, 以2000年、2020年合肥中心城区蓝绿空间分布图叠加处理后的数据作为因变量。为避免数据受空间自相关性影响, 选用随机取样点的方法进行采样, 样点个数为一个万个。利用 R studio 的中 “dismo” 和 “gbm” 函数包完成 BRT 模型搭建。学习速率设为 0.01, 复杂程度为 5, 分割比率为 0.5。选择 80% 的样本数据为训练集, 20% 的数据为测试集。为降低不确定性, BRT 模型运行了 100 次。在模型验证上, 采用 10 折交叉验证方法提高模拟精度, 利用曲线下面积 (Area Under Curve, AUC) 评价构建模型的精确度。本研究的 AUC 为 0.786, 表明构建的蓝绿空间演变驱动模型精度良好。

3 结果与分析

3.1 蓝绿空间规模演变分析

自 2000 年以来, 研究区蓝绿空间呈现三个阶段性变化特征。第一阶段, 2000-2005 年、2005-2010 年的两个时段内蓝绿空间规模显著增加, 增加强度分别达 4.9% 和 4.8%, 其中绿色空间规模增加强度显著高于蓝色空间; 第二阶段, 蓝绿空间规模保持平稳, 虽然 2010-2015 年蓝绿空间整体面积增幅达 1.1%, 但只有绿色空间面积增加显著, 蓝色空间缩减剧烈, 规模缩减 2.8%; 第三阶段, 蓝绿空间进入二次 “增长期”, 2015-2020 年蓝绿空间整体面积增加, 增幅达 4.4%, 绿色空间规模增加强度同样高于蓝色空间。

结合图 4、图 5, 可进一步发现董铺—大房郢水库、巢湖、大蜀山等大型自然蓝绿斑块规模变化幅度相对较小, 而南部蓝绿空间演变强度大, 蓝绿斑块显著增加, 建设用地内蓝绿斑块的空间分布更加均匀。除了 2000-2005 年间新修的大型水库之外, 蓝色

空间的变动范围主要分布于巢湖沿岸, 以及穿城而过的南淝河、十五里河等, 中心城区多为新建的湿地公园等蓝色斑块。

3.2 土地利用转移矩阵分析

合肥中心城区蓝绿空间类型流变存在差异性 (图 6)。2000-2005 年, 中心城区的林地、水体分别增加 97.19 km² 和 62.96 km²; 新增城市建设用地达到 216.30 km², 主要从林地和水体流变而来, 各占 21.3% 和 10.2%; 未利用地减少了 0.65 km², 向其他 5 种用地类型均有转变。2005-2010 年, 蓝绿空间规模继续增加, 绿色空间的增幅达到最高, 为 0.9%, 显著高于蓝色空间, 蓝色空间的增幅小于上一时段, 为 1.7%。其中草地增加了 33.12 km², 水体减少了 52.74 km²。该时期内, 草地剧烈萎缩是导致绿色空间变化的主要原因, 同时建设用地迅猛扩张, 增加了 215.08 km², 林地和草地是主要流入类型, 各占 29.3% 和 4.1%。未利用地增加了 17.79 km², 其他如林

地、草地、水体等均有不同程度的减少,反映出该时间段内研究区的城市化水平发展迅猛。在2010-2015年,蓝色空间开始减少,水体减少了52.74 km²;林地、草地增幅幅度较小;值得一提的是,尽管2010-2015年建设用地面积仍在增加,但是有106.96 km²和15.84 km²的建设用地开始向耕地和林地转变,各占建设用地减幅的46%和6.8%。在2015-2020年期间,建设用地增长速度放缓,5年间建设用地仅增加了193.65 km²,且有124.10 km²的建设用地向蓝绿空间流出;城市中林地显著增加了120.32 km²,主要来自于建设用地的有62.06 km²,占林地增幅的51.6%。这一时期城市蓝色空间面积得到恢复,增加了48.86 km²,主要由建设用地和耕地转化,与图5种所呈现的结果一致。

3.3 基于MAI的蓝绿空间演变模式分析

计算合肥中心城区在2000-2005年、2005-2010年、2010-2015年、2015-2020年新增蓝绿斑块的空间分布情况(图7)。计算结果显示,4个时段内研究区蓝绿空间扩张类型以边缘和邻近为主,数量占比均超过50%,这说明中心城区蓝绿空间的扩张主要是依靠原有蓝绿斑块实现。此外,内填式斑块多分布在大蜀山、巢湖、董铺一大房郢水库等自然斑块周边,呈组团状的聚集分布。相间、分离、蔓延式斑块则多集中在高密度城区附近,成点状零星式分布。

本研究计算了4个研究时段内6种扩张类型数量与比例(表3),以直方图表示(图8)。研究显示,2000-2020年间内填型蓝绿斑块数量先增后减;边缘型是4个时间段内最常见的类型,2015年和2020年边缘型占比最高;邻近型斑块相较边缘型,数量少,其中在2000-2015年间的邻近型斑块数量持续减少,

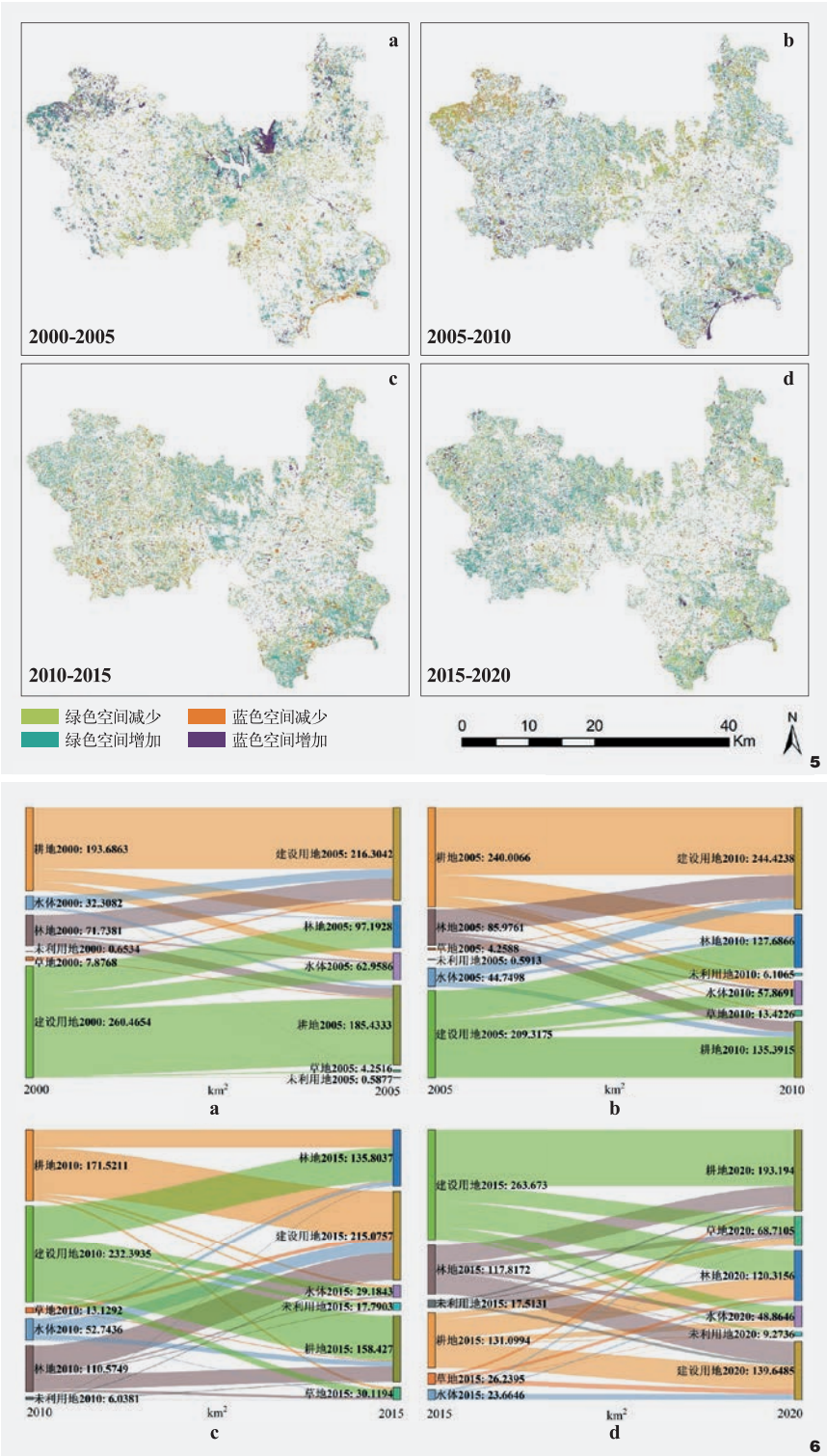


图5 合肥中心城区蓝绿空间分布动态变化图
Fig. 5 Temporal and spatial evolution of blue-green spaces in central Hefei

图6 合肥中心城区土地利用变化转移矩阵
Fig. 6 Land use change transition matrix in central Hefei

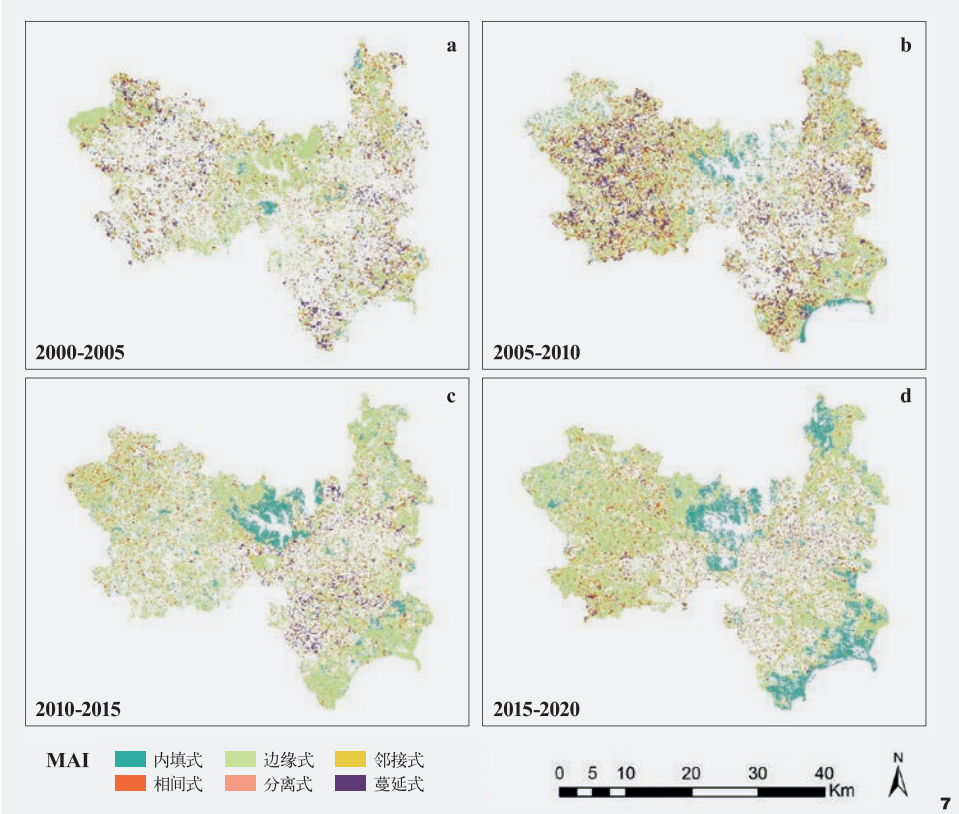


图7 4个时段的合肥中心城区MAI空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of MAI in central Hefei during four time periods

但在2015-2020年间数量显著增加。在4个时间段内，相间、分离和蔓延型的数量都相对较少，呈现稳中递减的特点，边缘、邻近型斑块的数量占比仍然较高。这表明合肥中心城区蓝绿斑块的向外扩张程度有所减缓，但

蓝绿空间的总量在继续扩大。

3.4 驱动因子影响分析

研究区蓝绿空间演变对自然要素和社会经济要素的非线性响应如图9所示。从结

果上看，自然要素是主要影响因素，社会经济要素的影响较弱。在自然要素中，DEM影响最大，为32.1%；其次是坡度(26.9%)、坡向(21.8%)。当DEM超过70 m时，其对城市蓝绿空间的增加作用变为0。这主要是由于合肥属于低山丘陵地带，研究区内高程大于70 m的区域都属于绿色斑块的核心区域，人工干扰较小。蓝绿空间演变对坡度的非线性响应主要发生在0 ~ 15° 的区间范围内，即在城市中随着地形坡度的升高，蓝绿空间面积增加越显著。坡向与蓝绿空间扩张的响应关系比较复杂，呈现出三个促进和三个抑制影响区段。在社会经济类要素中，影响蓝绿空间演变的因子贡献大小分别是：PD（13%）>VATl（6.2%）。随着PD的增加，蓝绿空间规模迅速增加，当超过2 000人/km²时，蓝绿空间非减却增，但保持一段时期的稳定后开始下降。这表明PD的增加一定程度上促进了蓝绿空间面积的扩大，但PD过高会阻碍城市蓝绿空间面积的增加。从蓝绿演变对VATl的非线性响应关系看，起初蓝绿空间的发展随着VATl的升高几乎没有变化，但蓝绿空间规模在820亿元左右迅速扩张，随后在VATl达到900亿元时保持稳定。表明随着VATl的发展，人们对于蓝绿空间的需求水平也逐渐增加。

表3 6种不同扩张类型数量及占比统计
Tab. 3 Statistics of the quantity and proportion of different expansion types

扩展类型 Types	MAI值 MAI value	2000-2005年		2005-2010年		2010-2015年		2015-2020年	
		数量 Quantity	占比/% Proportion	数量 Quantity	占比/% Proportion	数量 Quantity	占比/% Proportion	数量 Quantity	占比/% Proportion
内填式	[0, 0.5)	793	0.028	1 823	0.037	2 305	0.061	2 188	0.058
边缘式	[0.5, 1)	9 184	0.320	15 096	0.305	18 400	0.489	17 997	0.475
邻近式	[1, 2)	5 905	0.206	10 373	0.209	8 380	0.223	8 946	0.236
相间式	[2, 3)	4 185	0.146	7 611	0.154	4 031	0.107	4 700	0.124
分离式	[3, 4)	2 566	0.089	4 870	0.098	1 812	0.048	2 018	0.053
蔓延式	[4, +∞)	6 062	0.211	9 788	0.197	2 681	0.071	2 022	0.053

4 讨论

4.1 蓝绿空间变化的空间特征和规律

研究区近20年来蓝绿空间规模变化呈现出明显的阶段性特征(图10)。2000-2010年,蓝绿空间显著增加,该时期新增蓝绿斑块集中于分布于董铺一大房郢水库、大蜀山、巢湖等大型蓝绿斑块周围,合肥蓝绿空间主要呈现出“哑铃型”的城市结构性生态空间体系^[28]。2005-2015年城市中草地和林地开始被建设用地大量占用,建设面积增加。这一方面是由于《合肥市国土空间规划(2006-2020年)》中提出增大力度推进“滨湖新区”建设等城市发展背景,以满足人口激增带来的建设用地扩展需求;另一方面,城市经济水平不断升高也吸引劳动力人口的增加,刺激了合肥房地产行业的发展。这一时期,住房面积的扩大促进了城市建设用地快速扩增。此外,从产业结构上看,合肥中心城区产业构成主要分为第二和第三产业,发展第二产业需要大量建设用地,导致蓝绿空间减少。据上文,减少明显集中于巢湖沿岸,主要是沿岸养殖、围湖造田等活动侵占了蓝绿空间。

2015-2020年是城区内蓝绿空间的“二次增长期”,合肥蓝绿空间开始从过去环城绿地体系发展为面向外围山—水—林—田—湖的蓝绿空间格局。在《合肥市城市绿地系统规划(2014-2020年)》和《合肥市林业和园林发展规划大纲》规划引领下,合肥市新建了大量公园绿地、完善了绿道网络。同时,合肥政府重视巢湖区域生态环境发展,蓝绿空间得以大量修补和保护,城区内蓝绿斑块的分布更加均匀,其中绿色空间的增加幅度显著高于蓝色空间,多从未利用地、建设用地转变而来。得益于2016年出台的《安徽省湿地保护条例》,2015-2020年间研究区的蓝色空间得到明显恢复,围绕“退居还湿、退养

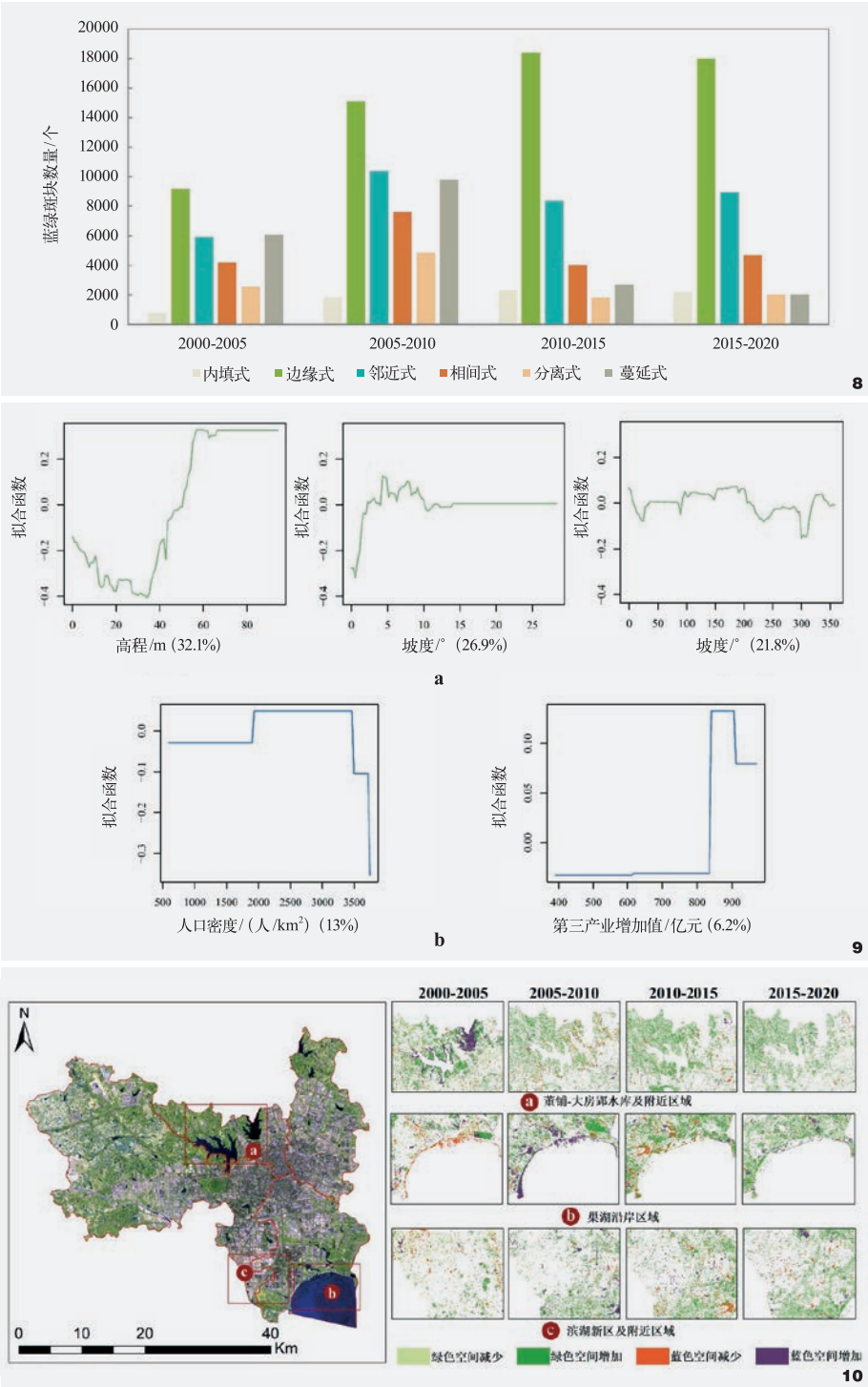


图8 6种不同扩张类型斑块数量直方图
Fig. 8 Histograms depicting the number of patches for expansion types

图9 蓝绿空间演变与自然要素和社会经济要素的非线性关系
Fig. 9 Nonlinear relationship of UGBS with natural factors and socio-economic factors

图10 蓝绿空间变化空间分布对比图
Fig. 10 Spatial distribution comparison of blue-green space changes

还湿”，一批村庄、房屋腾退土地复绿，湿地得到恢复和修复。

4.2 蓝绿空间演变模式的时空分异性

在时间跨度上，边缘、邻近式的蓝绿斑块数量增加，其中2000-2015年时段内蓝绿空间的分离式和蔓延式扩张数量较多，扩张强度明显比2015-2020年时段剧烈，研究认为这与城市建设发展活动的强度也存在一定关系。在空间上，基于M4的斑块扩展类型的分析结果可知，研究区蓝绿斑块演变扩张的空间分布存在差异，蓝绿空间扩张的发生由城市边缘转向城市内部。2000-2005年期间，研究区内城市建设用地面积较高，呈现“摊大饼”蔓延状，中心城区内部蓝绿斑块较少。2005-2020年，蓝绿空间开始逐渐向城市中心扩张，边缘式类型的斑块成主体，新增斑块依附原有蓝绿斑块向外扩张增长，内填式斑块数量占比较低，这可能是因为处在城市大型蓝绿斑块内部的非蓝绿空间数量较少，城市“补蓝增绿”等政策的颁布使得中心城区内现存的大型自然山体等蓝绿空间的保护得到更多关注，新增蓝绿斑块多聚集于其周围。此外，相间、分离和蔓延式斑块在同一时段内所占比例呈现递减的趋势，意味着蓝绿空间扩张在空间上的渐变性，距离原有蓝绿斑块位置较远的地方，新增的蓝绿斑块出现的频率越小。值得注意的是，呈蔓延型扩张的蓝绿斑块在2015-2020年间数量占比最少，且多零星分布于建设用地，周围大型自然蓝绿斑块资源少，多是独立的小微绿地，蓝绿网络连通性低。整体上看，近20年间研究区蓝绿空间呈紧凑扩展的趋势，新增斑块多依赖于原有蓝绿斑块呈现内填式和边缘式扩张，蓝绿空间扩张强度逐渐减弱，但整体蓝绿空间规模在增加。

4.3 影响城市蓝绿空间演变的驱动因子

城市建成区中的蓝绿空间是人工集约化建设的生态空间，能量流较多依赖于外界人工的输入，景观稳定性差、异质性高。正如本研究结果显示，相较于社会经济要素，自然要素对蓝绿空间演变的影响有限，其中气候因子中仅有AASR存在影响，地形因子对蓝绿空间演变影响主要体现在空间上的限制作用，这与前人的研究结果一致^[29]。此外，本研究发现，蓝绿空间扩张和DEM、坡度因子的响应变化关系中存在区间阈值，其中高程在38 ~ 60 m之间的蓝绿空间扩张概率高，坡度在0 ~ 15°之间的蓝绿空间增加概率更大。这主要是由于城市内蓝绿空间的建设和分布多由政策引导，在以上两类区间分布的蓝绿空间易受到人类活动的干扰。以往的研究认为快速城市化会导致城市自然空间减少。但本研究表明合肥中心区蓝绿空间在过去的20年间呈现规模增加，空间分布扩张。高速城市化后期，中国政府重视城市环境品质提升，鼓励、支持城市蓝绿空间恢复与发展，新增的城市蓝绿空间多从城市中未利用地转化而来，且在经济发展水平地方较高的地区尤甚。

社会经济要素对于城市绿地时空演变有重要影响作用，社会经济要素的时空变化往往会导致绿色空间生态服务的供需发生显著的变化。收入、受教育程度、地区财富水平等社会经济要素的水平较高时^[30]，人们对于绿地等生态空间的意愿和需求往往更高。本研究中VAT对蓝绿空间演变的响应也佐证了上述观点。高品质生活水平会导致人们对于蓝绿空间的需求加大。以往关于城市绿地演变的研究中，人均GDP被认为是贡献度最高的因子，绿地面积与城市二、三产增加值、GDP等呈正相关^[31]。但本研究发现PD是影响研究

区蓝绿空间演变贡献度最高的因子，当PD高于2 000人/km²的阈值时，研究区的蓝绿空间规模非减反增。这与前人的城市PD增长与城市绿色空间面积增加的相关研究结论相近^[19]。本研究认为这与城市高质量发展要求有关，其中人均绿化面积、绿地覆盖率等指标的制定促进了城市蓝绿空间规模上的提升。对于合肥这样一个经济发展水平较高的城市，市民对城市蓝绿空间的需求也更为强烈。此外，优越的地理位置、投资等资源也进一步促进蓝绿空间的保护和发展。经济欠发达的西北部地区城市可能更多地面临城市化压力和资源限制。相较于自然要素，社会经济要素对蓝绿空间演变的影响往往呈现内在作用。如区域经济总量的上升会导致一段时期内快速扩张的城市建设用地侵占蓝绿空间，但同时人口总量的增加和高质量环境需求又会促进蓝绿空间的增加，从而使城市蓝绿空间在不同城市发展阶段呈现不同的演化特征，体现了动态驱动作用，因子之间的反馈关联复杂。此外，城市蓝绿空间的演变也离不开国家政府层面规划政策的扶持。政府和城市规划者的决策会直接影响城市中蓝绿空间的存在发展、生态效益发挥等。

4.4 可持续发展理念下蓝绿空间保护与发展途径

长期以来，城市的扩张常与蓝绿空间保护相冲突。在经济发展和建设用地扩张的需求背景下，城市蓝绿空间被挤占现象较为常见。本研究表明，2000-2020年合肥中心城区增设了大量林地等绿色空间以提升城市蓝绿空间总量，未来城市蓝色空间的保护压力较大。蓝绿空间格局的快速变化主要发生在2005-2010年，社会经济要素的影响使得原有的自然蓝绿生态斑块受到侵蚀。在中国城

市转型发展的大背景下，环境政策及部门监管在城市环境问题的治理和改善上发挥重要作用，对于城市的经济转型及可持续发展十分重要。当前合肥政府强调城市景观风貌构建，这对于改善城市生态环境、促进绿色转型具有重要意义。

蓝绿空间是城市的生态本底，具有重要生态与社会效益。对于未来城市中心区的蓝绿空间发展，不仅要积极响应碳中和碳达峰、气候适应型城市等国家战略与政策，还需着眼于城市空间结构与蓝绿空间形态的耦合，力争蓝绿空间生态绩效的最大化。在城市蓝绿空间可持续发展途径上，首先要严守政府制定的生态保护红线，加强对大蜀山、紫蓬山、巢湖等自然林地和水体的保护，控制周围建设用地对蓝绿空间的侵占，保护蓝绿空间规模。其次，可以实施蓝绿空间分区保护的政策，一方面针对于沿湖沿河地区，加强岸线保护，增加边缘式斑块如滨江湿地、林地的建设，合理利用巢湖沿岸的蓝绿空间资源；另一方面，在建设用地密度较高的区域侧重内填式，增加点状绿地、人工湖泊、池塘等人工水体景观，并重视新增小微蓝绿斑块与城区内已有蓝绿斑块的联系。面对城市高质量发展和人居环境建设需求，蓝绿空间的保护发展应避免简单的绿量扩增，尽量减少蔓延式斑块的出现，而应促进蓝绿斑块的集聚，形成有机的蓝绿网络体系。此外，从管理政策上，需要合理调整引导中心城区内第二、第三产业结构的布局结构，限制中心城区内的建筑建设和人口密度，探究城市蓝绿空间建设和城市经济发展相结合的新模式、新政策；借助“政府—企业—个人”等多方合作，吸引城市管理者对蓝绿空间保护发展方面的固定资产投入；进一步完善蓝绿融合发展导向下城市蓝绿空

间规划和管理实施政策，推动跨部门之间的合作效率。

5 结论

本研究基于遥感数据系统，采用多种方法分析了2000-2020年合肥中心城区蓝绿空间的演变特点和规律，探讨了城市蓝绿空间的时空演变特征与模式，揭示了城市蓝绿空间演变与自然及社会经济驱动因子间的非线性响应关系，不仅有助于为合肥市蓝绿空间规划和相关政策的制定提供科学依据，而且能够为合理科学的城市蓝绿空间发展、保护政策制定提供参考。本文结论如下：

(1) 2000-2020年，合肥中心城区蓝绿空间演变和城市发展阶段关系密切，蓝绿规模变化呈现稳步增长阶段性特征，整体规模总量增加，变化幅度剧烈，绿色空间增幅显著高于蓝色空间，蓝色空间面积呈现先增后减再增的趋势。蓝绿空间演变方向由城区边缘向城区内部转移。

(2) 研究区蓝绿空间扩张模式以边缘式为主，邻接式次之。新增蓝绿空间多聚集于大型自然蓝绿斑块周围，2000-2020年边缘式蓝绿斑块数量占比为32%、30.5%、48.9%、47.5%。相间型、分离型和蔓延型斑块数量呈递减态势，蓝绿空间的扩张强度减弱。

(3) 研究区蓝绿空间演变受到多种因子的共同驱动，自然要素比社会经济要素对蓝绿空间演变驱动的解释力更大。其中DEM、坡度、坡向是主要自然驱动因子，PD、VAT是主要社会经济驱动因子。

受制于所选遥感数据的分辨率，本研究对于城市中心区尺度的蓝绿空间识别存在一定误差，未来研究可以结合高精度的遥感影像，更好地识别小微蓝绿空间。同时，优化潜在驱动因子类型或探究潜在驱动因子之

间的交互作用，有助于进一步揭示高密度城市蓝绿空间演化机制。此外，城市蓝绿空间与建设空间存在此消彼长、互相依存、协调发展等复杂关联，规划政策指导下的建设用地拓展模式对于蓝绿空间的演变存在重要影响，未来可结合蓝绿空间结构、形态进一步探究。本文的研究方法可为类似城市或其他国家及地区的蓝绿空间扩张模式和空间结构演化规律提供参考。由于不同的城市的自然本底具有独特性，城市发展水平与过程各异，在日后的研究中可以增加不同气候带、不同经济发展水平的城市蓝绿空间样本，开展对比性研究。

注：文中图4根据参考文献[27]改绘；其余图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] WANG Y, YAO Y, CHEN S, et al. Spatiotemporal Evolution of Urban Development and Surface Urban Heat Island in Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area of China from 2013 to 2019[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 179: 106063.
- [2] CHEN S, JIN H, LU Y. Impact of Urbanization on CO₂ Emissions and Energy Consumption Structure: A Panel Data Analysis for Chinese Prefecture-level Cities[J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2019, 49: 107-119.
- [3] SONG W, DENG X, YUAN Y, et al. Impacts of Land-use Change on Valued Ecosystem Service in Rapidly Urbanized North China Plain[J]. Ecological Modelling, 2015, 318: 245-253.
- [4] CHENG L D, GUAN D J, ZHOU L L, et al. Urban Cooling Island Effect of Main River on a Landscape Scale in Chongqing, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 47: 101501.
- [5] QIU S, FANG M, YU Q, et al. Study of Spatial Temporal Changes in Chinese Forest Eco-space and Optimization Strategies for Enhancing Carbon Sequestration Capacity Through Ecological Spatial

- Network Theory[J]. *Science of Total Environment*, 2023, 859: 160035.
- [6] SU M, ZHENG Y, HAO Y, et al. The Influence of Landscape Pattern on the Risk of Urban Water-logging and Flood Disaster[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 133-140.
- [7] DONATI G F A, BOLLIGER J, PSOMAS A, et al. Reconciling Cities with Nature: Identifying Local Blue-Green Infrastructure Interventions for Regional Biodiversity Enhancement[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316: 115254.
- [8] LI Y, CAO Z, LONG H, et al. Dynamic Analysis of Ecological Environment Combined with Land Cover and NDVI Changes and Implications for Sustainable Urban-rural Development: The Case of Mu Us Sandy Land, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 697-715.
- [9] SERRET H, RAYMOND R, FOLTÊTE J-C, et al. Potential Contributions of Green Spaces at Business Sites to the Ecological Network in an Urban Agglomeration: The Case of the Ile-de-France Region, France[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 131: 27-35.
- [10] PENG J, ZHAO M, GUO X, et al. Spatial-temporal Dynamics and Associated Driving Forces of Urban Ecological Land: A Case Study in Shenzhen City, China[J]. *Habitat International*, 2017, 60: 81-90.
- [11] ZHENG H, LI H. Spatial-temporal Evolution Characteristics of Land Use and Habitat Quality in Shandong Province, China[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 15422.
- [12] YANG J, ZENG C, CHENG Y. Spatial Influence of Ecological Networks on Land Use Intensity[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137151.
- [13] DU X, JIN X, YANG X, et al. Spatial Pattern of Land Use Change and Its Driving Force in Jiangsu Province[J]. 2014, 11(3): 3215-3232.
- [14] 李方正, 解爽, 李雄. 基于PLSR模型的北京市中心城绿色空间演变驱动机制研究(1992-2016年)[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(4): 116-126.
- [15] TIAN C, CHENG L L, YIN T T. Impacts of Anthropogenic and Biophysical Factors on Ecological Land Using Logistic Regression and Random Forest: A Case Study in Mentougou District, Beijing, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(2): 433-445.
- [16] LIU Y W, LIU C W, HE Z Y, et al. Spatial-temporal Evolution of Ecological Land and Influence Factors in Wuhan Urban Agglomeration Based on Geographically Weighted Regression Model[J]. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 2020, 31(3): 987-998.
- [17] FENG R, WANG F, WANG K, et al. Quantifying Influences of Anthropogenic-natural Factors on Ecological Land Evolution in Mega-urban Agglomeration: A Case Study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 283: 125304.
- [18] ABDULLAH S, ADNAN M S G, BARUA D, et al. Urban Green and Blue Space Changes: A Spatio-temporal Evaluation of Impacts on Ecosystem Service Value in Bangladesh[J]. *Ecological Informatics*, 2022, 70: 101730.
- [19] 宋莉芳, 江雪妮, 郭贞妮, 等. 城市蓝绿空间特征参数与地表温度的关联量化分析[J]. *中国城市林业*, 2023, 21(01): 20-26.
- [20] 许浩, 金婷, 刘伟. 苏锡常都市圈蓝绿空间规模与格局演变特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(01): 219-226.
- [21] ZHAO D, XIAO M, HUANG C, et al. Land Use Scenario Simulation and Ecosystem Service Management for Different Regional Development Models of the Beibu Gulf Area, China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3161.
- [22] CHEN X, ZHANG M, ZHANG W. Landscape Pattern Changes and Its Drivers Inferred from Salt Marsh Plant Variations in the Coastal Wetlands of the Liao River Estuary, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 145: 109719.
- [23] WU S, WANG D, YAN Z, et al. Spatiotemporal Dynamics of Urban Green Space in Changchun: Changes, Transformations, Landscape Patterns, and Drivers[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 109958.
- [24] LUCK M, WU J. A Gradient Analysis of Urban Landscape Pattern: A Case Study from the Phoenix Metropolitan Region, Arizona, USA[J]. *Landscape Ecology*, 2002, 17(4): 327-339.
- [25] WU J, YANG S, ZHANG X. Interaction Analysis of Urban Blue-Green Space and Built-Up Area Based on Coupling Model: A Case Study of Wuhan Central City[J]. *Water*, 2020, 12(8): 2185.
- [26] ELITH J, LEATHWICK J R, HASTIE T. A Working Guide to Boosted Regression Trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802-813.
- [27] 刘稼丰, 焦利民, 董婷, 等. 一种新的城市景观扩张过程测度方法:多阶邻接度指数[J]. *地理科学*, 2018, 38(11): 1741-1749.
- [28] 丁成呈, 张敏, 束学超, 等. 多尺度的城市生态网络构建方法——以合肥市主城区生态网络规划为例[J]. *规划师*, 2021, 37(03): 35-43.
- [29] LUO Y, YANG S, ZHAO C, et al. The Effect of Environmental Factors on Spatial Variability in Land Use Change in the High-sediment Region of China's Loess Plateau[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(5): 802-814.
- [30] PHAM T T H, APPARICIO P, SÉGUIN A M, et al. Spatial Distribution of Vegetation in Montreal: An Uneven Distribution or Environmental Inequity?[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 107(3): 214-224.
- [31] WANG X, LI Y, CHU B, et al. Spatiotemporal Dynamics and Driving Forces of Ecosystem Changes: A Case Study of the National Barrier Zone, China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(16): 6680.