

DOI: 10.5846/stxb201903260568

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.

Che T, Li C, Luo Y J. Changes in landscape pattern of built-up land and its driving factors during urban sprawl. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3283-3294.

城市扩张过程中建设用地景观格局演变特征及其驱动力

车 通¹, 李 成¹, 罗云建^{1, 2, *}

1 扬州大学园艺与植物保护学院 / 生物科学与技术学院, 扬州 225009

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

摘要:剖析城市扩张过程中建设用地景观格局演变特征及其驱动力, 不仅有助于城市生态环境问题的解决, 而且为城市用地结构优化、城市景观规划等工作提供科学依据。以快速城市化的中型城市—扬州市为例, 利用多期(1995、2000、2005、2010 年和 2015 年) Landsat 卫星影像、乡镇水平的扬州统计年鉴等数据, 运用景观格局分析、增强回归树(Boosted regression trees)等方法, 研究建设用地的扩张模式、形态及景观格局, 定量探究地理、社会和经济因子对景观格局的影响机制, 从而明晰景观格局演变特征及其驱动力。结果表明, 1995—2015 年, 建设用地面积持续增加, 填充式(Infilling)、边缘式(Edge-expansion)和跳跃式(Leapfrog)3 种扩张模式在各时段均有出现, 但其优势度随着城市发展而改变。建设用地的形态在城市扩张的过程中经历着“集聚”和“扩散”的交替变化过程, 景观格局则出现了同质化倾向, 景观破碎化下降、聚合度增加。地理因子(海拔和到县市中心的距离)对景观格局的综合影响虽然高于社会经济, 但它的影响力却随着城市发展呈现出下降趋势, 社会经济的作用则逐渐增强。海拔和人口密度的增加会促进景观的破碎化、抑制景观的集聚; 人口数量的增加会促进景观的集聚、降低景观的破碎化; 其余因子(到县市中心的距离、人均 GDP 和第二产业占比)的作用则随城市的发展而发生转变, 如人均 GDP 对景观破碎化的作用表现为“促进→抑制”的转变, 第二产业则为“抑制→促进”。

关键词:城市扩张; 景观格局; 时空演变; 驱动力; 扬州

Changes in landscape pattern of built-up land and its driving factors during urban sprawl

CHE Tong¹, LI Cheng¹, LUO Yunjian^{1, 2, *}

1 College of Horticulture and Plant Protection / College of Bioscience and Biotechnology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

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

Abstract: Understanding changes in the landscape pattern of built-up land its driving factors not only helps to solve the eco-environmental problems in cities but also provides a scientific basis for urban land use optimization and landscape planning. In this study, we used multi-source data (e.g., 30 m resolution Landsat images and statistical yearbooks) to analyze changes in sprawl mode, morphology and landscape pattern of built-up land in a rapidly urbanized medium-sized city—Yangzhou City, Jiangsu Province, China. Furthermore, we employed the boosted regression tree method to quantify the effects of geographic and socioeconomic factors on landscape patterns of the built-up land, which revealed changes in the driving factors with the built-up land sprawl. The results showed that the area of the built-up land gradually increased from

基金项目:国家自然科学基金项目(31500388); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金(SKLURE2016-2-3); 中国博士后科学基金(2016M601144); 大运河文化带建设研究院专项(DYH18YB04)

收稿日期:2019-03-26; **网络出版日期:**2020-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yjluo@yzu.edu.cn

1995 to 2015. All of the three sprawl modes (infilling, edge-expansion and leapfrog) appeared in each period, but their relative dominances varied with the built-up land sprawl. The morphology of the built-up land underwent an alternating process of “diffusion” and “coalescence”, while the landscape pattern tended to homogenize (i.e., decreased fragmentation and increased aggregation of the built-up landscape). Geographical factors (altitude and distance from the geographical center of a county) played more important roles in shaping landscape pattern than socioeconomic factors. Moreover, the combined effects of geographical factors decreased with the built-up land sprawl, while socioeconomic effects became more significant. Landscape fragmentation of the built-up land increased with increasing altitude and population density and decreasing total population; meanwhile, the landscape aggregation was inhibited. However, effects of other factors (i.e., distance from the center of a county, GDP per capita, and the proportion of secondary industry) on landscape pattern varied with the built-up land sprawl. For example, the promoting effect of GDP per capita on landscape fragmentation turned to an inhibiting effect, while the inhibiting effect of secondary industry turned to a promoting one.

Key Words: urban sprawl; landscape pattern; spatiotemporal evolution; driving mechanism; Yangzhou City

城市化是全球社会经济发展的必然趋势,城市更被视为人类的未来^[1-2]。快速城市化带来了城市热岛效应加剧、生物多样性下降、生态系统退化、环境污染加重等诸多城市病,直接影响了城市人居环境质量和城市可持续发展^[3]。这些问题的出现均与区域土地利用结构和景观格局的改变密切相关^[4]。因此,剖析城市扩张过程中城市景观格局演变特征及其驱动力,不仅是解决这些城市病的基础,而且为城市用地结构优化、城市景观规划等工作提供科学依据。其中,建设用地扩张是城市扩张最直观的表现,也是衡量城市生态环境压力的重要指标^[5]。

围绕着城市景观格局,国内外学者开展了大量研究,涵盖了国家^[6]、城市群^[7-9]、省级区域^[10]、单个城市(如市、县和区)^[11]等不同尺度,呈现出从静态研究到动态分析^[12]、从过程认知到机制探索^[9]、从定性描述到定量解析^[13]的发展。不少研究表明,城市扩张会阶段性地增加城市景观的多样性、破碎化和结构复杂性,在一定程度上支持集聚-扩散假说^[14-15],但也有研究发现城市化也能造成城市中心的景观多样性和破碎化程度降低,符合景观同质化假说^[16]。不断积累的研究表明,城市景观格局受到地理、社会、经济、政策等多重因子的共同制约^[17],但是一些学者认为地理因子(如到道路的距离和到县市中心的距离)对景观格局的影响最大^[18],也有学者认为社会因子^[19]或经济因子^[12,20]更为重要。由此可见,目前尚未明晰城市化过程中建设用地景观格局的演化特征及驱动机制。此外,有关驱动机制的研究大多采用相关分析、回归分析等传统统计方法^[8-9,12]。由于受到数据类型(如分类数据和连续数据)、数量关系(线性和非线性关系)、数据分布(如正态分布)等假设前提的限制,这类方法一定程度上影响了对驱动机制的认知。近年来,基于决策树的集成学习方法(Tree-based ensemble learning),如增强回归树(Boosted regression trees)和随机森林(Random forest),突破了传统统计方法的局限性^[21],成功应用于多重因子影响的定量研究^[22-23],为深入剖析景观格局的驱动机制提供了有力工具。

随着我国经济社会的不断深化及发展重点的逐渐转移,中小城市已成为促进国民经济增长、推进城市化进程的中坚力量^[24]。由于受城市发展规模、经济水平、交通条件、资源环境等因素的影响,中小城市的城市化过程可能会呈现一些不同于大型城市的特征^[25]。但是,目前的研究相对集中于北京、上海、广州等大型城市,对快速城市化的中小城市缺乏足够的关注。扬州,地处江苏中部,是承接苏南经济转移、辐射苏北的过渡区,还是长三角城市群、大运河文化带和南京都市圈的节点城市。在江苏乃至长三角城市群全面推进城市化的关键期,开展扬州建设用地扩张研究,不仅可以增强中小城市扩张规律和机制的理解,而且对类似区域中小城市建设用地的调控具有指导意义。因此,本文以扬州市为例,利用多期(1995、2000、2005、2010年和2015年)Landsat卫星影像、乡镇水平的扬州统计年鉴等数据,运用景观格局分析、增强回归树等方法,研究建设用地的扩张模式、形态及景观格局,定量探究地理、社会、经济多重因子对景观格局的影响机制,从而揭示建设用地景

观格局及其驱动力的演变特征。

1 数据与方法

扬州市(32°15'—33°25' N、119°01'—119°54' E), 现辖3个市辖区(邗江、广陵和江都)、2个县级市(高邮和仪征)和1个县(宝应)(图1),共77个乡镇、14个街道、1125个行政村。全市总面积6591.21 km²,常住人口450.82万(2017年)。地处北亚热带湿润气候区的北缘,气候温和,四季分明,年均气温16℃左右,年均降水量1046 mm,全年日照时数平均为2176.7 h,土壤主要为水稻土、潮土、沼泽土和黄棕壤。

1.1 数据来源

卫星影像为空间分辨率30 m的1995、2000、2005、2010年和2015年扬州市Landsat数据(2015年为Landsat 8 OLI影像,其余年份为Landsat 5 TM影像),影像级别为经过辐射校正和几何校正的L1T级。选用的影像数据成像质量较好,研究区内晴朗无云,大气可见度高。在对影像进行预处理的基础上,使用监督分类(最大似然法)和目视解译,将土地利用分为建设用地、林地、耕地、草地和水体五类。采用扬州市土地利用现状图和GPS实测数据,随机设立200个解译标志,利用误差矩阵进行精度评价。1995、2000、2005、2010年和2015年的总体分类精度分别为88.4%、81.6%、86.7%、85.2%和90.0%,能够满足研究的精度要求。

本文从地理、社会、经济方面,探究城市化过程中建设用地景观格局的驱动力及其演变特征。地理因子选用海拔和到县市中心的距离,用于反映物理空间的影响,社会因子选用人口数量和人口密度,用于反映人类活动的强度;经济因子选用人均GDP和第二产业占比,用于反映经济发展的规模和质量。社会经济数据来自于扬州市历年统计年鉴(乡镇水平),地理因子数据从DEM数字高程数据(空间分辨率30 m)和各时期土地利用图中提取。

1.2 研究方法

1.2.1 建设用地的空间扩张

为定量描述建设用地的空间扩张过程,选用景观扩张指数(Landscape expansion index, LEI)来识别建设用地的扩张模式;使用面积加权扩张指数(Area-weighted mean expansion index, AWMEI)来描述建设用地的形态^[14]。

$$LEI = 100 \times \frac{A_0}{A_0 + A_v}$$

式中, A_0 是新增建设用地斑块的缓冲区(本文缓冲距离设为1 m)与原建设用地的交点, A_v 是该缓冲区与非建设用地的交点。根据LEI值,建设用地的扩张模式分为3种类型:跳跃式(Leapfrog, $LEI = 0$)、边缘式(Edge-expansion, $0 < LEI \leq 50$)和填充式(Infilling, $50 < LEI \leq 100$)。

$$AWMEI = \sum_{i=1}^N LEI \times \left(\frac{A_i}{A} \right)$$

式中, A_i 是新增建设用地斑块*i*的面积, A 是新增建设用地斑块的总面积。AWMEI值越大,建设用地景观越紧

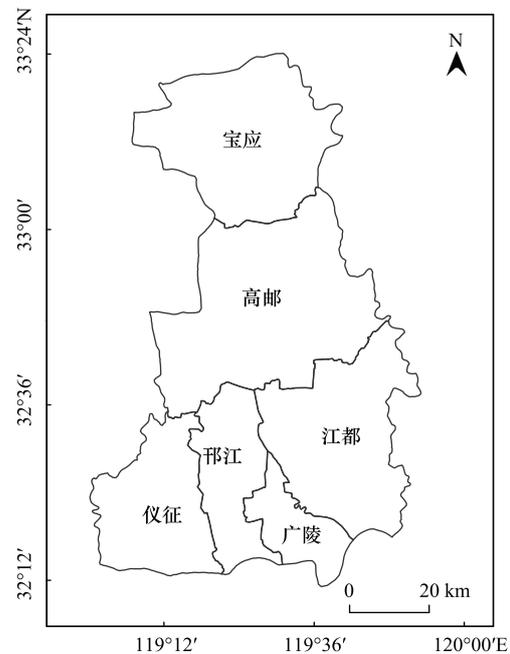


图1 扬州市区位和行政区划图

Fig.1 Location and administrative divisions of Yangzhou City in China

凑;AWMEI 值越小,建设用地景观越分散。

1.2.2 建设用地的景观格局

借鉴现有的城市景观研究^[12,26],本文选取斑块密度(Patch density, PD)、边缘密度(Edge density, ED)、景观形状指数(Landscape shape index, LSI)和聚合度(Aggregation index, AI)(表 1)来刻画建设用地的景观格局。

表 1 选取的景观格局指数
Table 1 List of landscape metrics used in this study

序号 No.	景观格局指数* Landscape metrics	单位 Unit	取值范围 Range	涵义 Meaning
1	斑块密度	个/km ²	(0, +∞)	值越大,斑块的数量越多
2	边缘密度	m/hm ²	[0, +∞)	值越大,斑块的边缘长度越大
3	景观形状指数	—	[1, +∞)	值越大,景观形状越不规则,越复杂
4	聚合度	—	[0, 100]	值越大,斑块越来越集聚

* 计算公式详见 McGarigal 等^[27-28]

1.2.3 驱动力分析

选取大小为 1、2、3 km 和 4 km 的移动窗口,在 FRAGSTATS 4.2 中分别计算不同窗口大小的各景观指数值,进行比较,从而筛选出最佳的景观分析尺度。经多次试验,景观分析尺度设定为 2 km,既可以消除一定的噪声,又能保留足够的空间信息。运用大小为 2 km 的移动窗口,获得各景观指数的栅格图。为实现社会经济数据与景观格局信息在空间上的匹配,本文以乡镇(含街道)为统计单元,计算每个乡镇各景观指数的平均值,以便在乡镇水平上探究建设用地的景观格局及其驱动力。

增强回归树方法是一种基于分类回归树算法(Classification and regression trees)的自学习方法,整合了分类回归树算法和增强算法(Boosting),显著提高了结果的稳定性和预测精度^[21]。在运算过程中,利用重抽样方法从训练数据集里随机抽取数据,得到一系列新的训练数据集,对每个新训练数据集构建一个分类回归树,分析自变量对因变量的影响程度,剩余的数据则对结果进行交叉验证,最后对生成的多重回归树取均值并输出。与传统统计方法相比,增强回归树方法具有同时处理多种数据类型(如分类数据和连续数据)、复杂的非线性关系、缺失数据、变量之间的相互关系等诸多优势,可以通过两种方式量化多重因子的影响:①各自变量对因变量的相对影响(各自变量对因变量可解释变异的贡献,所有自变量的相对影响之和为 100%);②在其他自变量不变(或者取均值)的情况下,某一特定自变量与因变量的相互关系(通过加权树遍历法(Weighted tree traversal)整合其他自变量对因变量的影响,利用生成的多重回归树取均值,获得某一特定自变量对因变量的边际效应)。因此,本文利用增强回归树方法,运用 R 语言(3.5.0)的“gbm”包,分析地理、社会、经济多重因子对建设用地景观格局的影响。根据 Elith 等^[29]的建议,学习速率(Learning rate)设置为 0.01,树的复杂性(Tree complexity)为 4。

2 结果与分析

2.1 建设用地的空间扩张

建设用地面积从 1995 年的 725.4 km²持续增加到 2015 年的 1076.5 km²。3 种扩张模式(跳跃式、边缘式和填充式)在 4 个研究时段(1995—2000、2000—2005、2005—2010 年和 2010—2015 年)均有出现(图 2),但是它们的优势度呈现较大差异(图 3)。从斑块数量的比例来看,边缘式扩张一直处于主导地位,其优势度远大于其他扩张模式。除 2005—2010 年外,填充式的优势度均高于跳跃式(图 3)。3 种扩张模式在不同县市间的优势度基本相同,与全市的情况相一致。然而,从斑块面积的比例来看,边缘式扩张在初期(1995—2000 年)和后期(2010—2015 年)处于主导地位,填充式在中期(2000—2010 年)处于主导地位,跳跃式则始终最低(图 3)。3 种扩张模式在不同县市间的优势度呈现较大差异,与全市的情况并不吻合,尤其是 2000—2005 年。

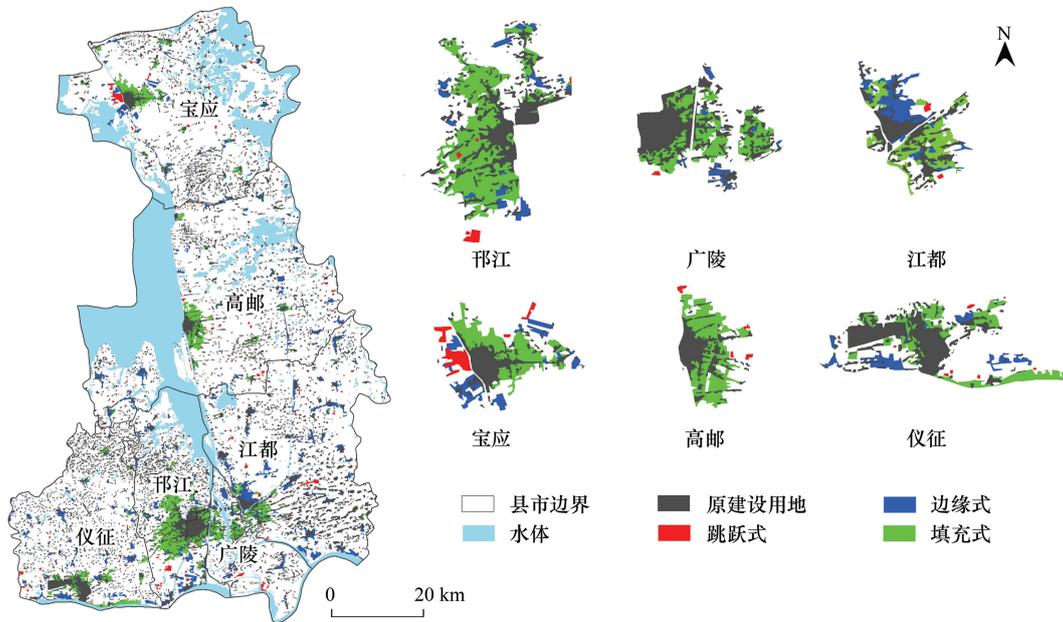


图 2 1995—2015 年扬州建设用地扩张模式的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of sprawl modes of built-up land in Yangzhou City from 1995 to 2015

从 1995 年到 2015 年,全市建设用地的面积加权扩张指数(AWMEI)呈现先增加、后减小、再增加的变化,意味着城市化过程中建设用地景观出现了“集聚→扩散→集聚”的现象(图 4)。与全市的变化趋势相同,邗江区、广陵区、仪征市和高邮县的建设用地景观也出现了“集聚→扩散→集聚”的变化特征。然而,江都区和宝应县的变化存在较大不同,即江都区呈现“扩散→集聚”的变化,宝应县则为“扩散→集聚→扩散”的变化。

2.2 建设用地的景观格局演变

从 1995 年到 2015 年,建设用地的斑块密度(PD)和景观形状指数(LSI)呈减少之势,边缘密度(ED)和聚合度(AI)增加(图 5),这表明斑块数量增加、景观形状趋向简单,但斑块的边缘长度更大,分布更集聚。除老城区(邗江和广陵)的 ED 出现减小之外,各县市区的景观格局指数随着城市的发展都呈现类似于全市的变化规律。各乡镇的景观格局从县市行政中心到县市边界,整体上呈现破碎化上升、聚合度下降的变化特征,即 PD、ED 和 LSI 均呈增加之势,AI 呈减小趋势(图 6)。

2.3 驱动力分析

运用增强回归树方法,探究了不同时期(1995、2000、2005、2010 年和 2015)地理、社会、经济等多重因子对景观格局的影响。结果发现,地理(海拔和到县市中心的距离)、社会(人口数量和人口密度)和经济因子(人均 GDP 和第二产业占比)能够解释不同景观指数变异的 34%—67% ($R^2 = 0.34—0.67$),但是这些因子在不同时期和对不同指数的综合影响存在很大差异(表 2)。

表 2 景观格局指数与地理、社会和经济因子的分析结果*

Table 2 Results of landscape pattern indices with geographic, social and economic factors

景观格局指数 Landscape indices	1995 年		2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	R^2	RMSE								
PD	0.44	0.36	0.46	0.36	0.43	0.37	0.64	0.26	0.59	0.28
ED	0.51	5.29	0.57	4.94	0.52	5.22	0.49	4.98	0.47	5.07
LSI	0.40	0.49	0.42	0.49	0.34	0.52	0.50	0.43	0.42	0.46
AI	0.35	1.47	0.39	1.41	0.34	1.68	0.67	1.28	0.61	1.39

* R^2 : 决定系数, coefficient of determination; RMSE: 均方根误差, root mean squared error; PD: 斑块密度, patch density; ED: 边缘密度, edge density; LSI: 景观形状指数, landscape shape index; AI: 聚合度, aggregation index

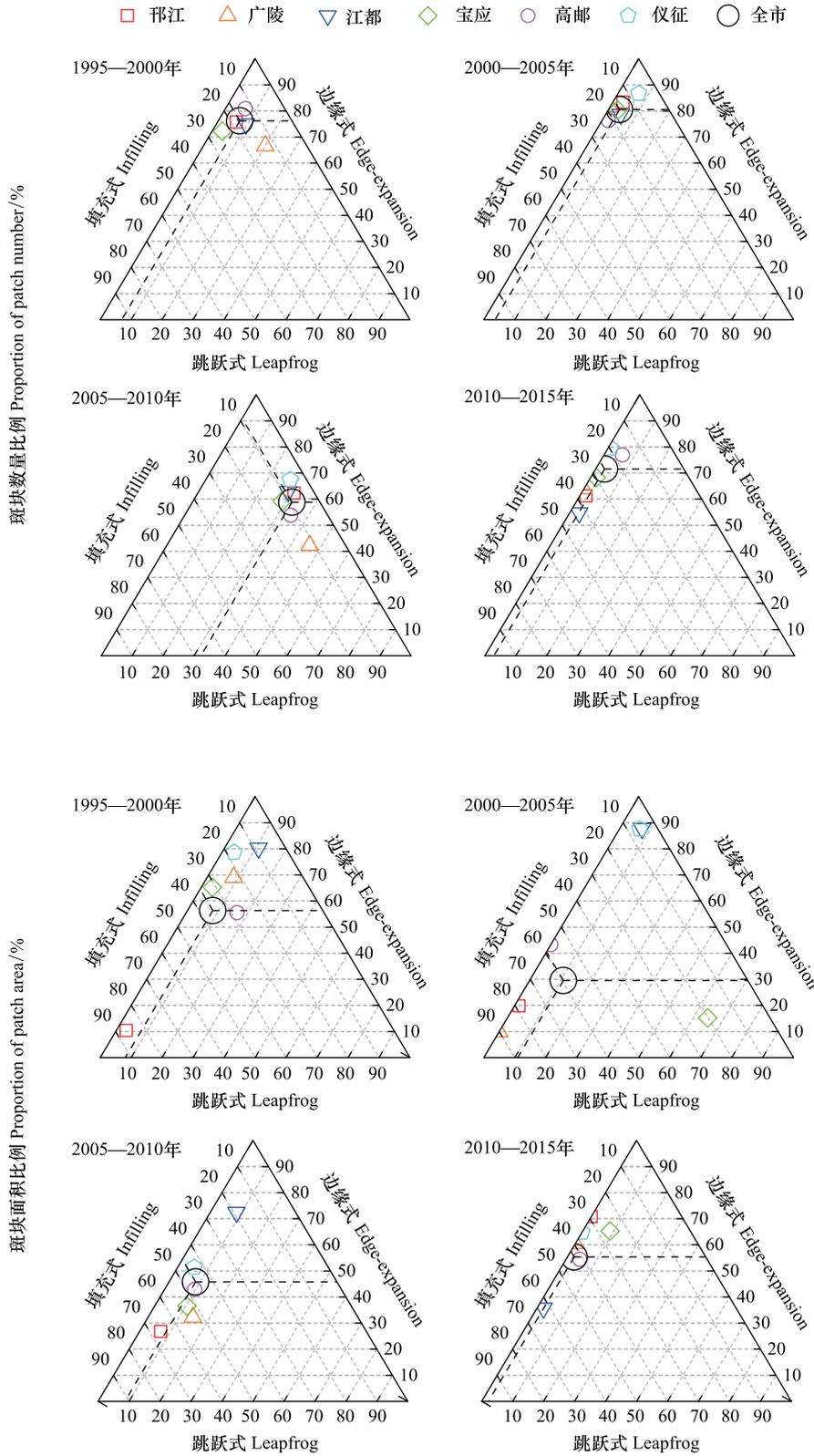


图3 1995—2015年扬州建设用地扩张模式的相对优势度

Fig.3 Relative dominance of sprawl modes of built-up land in Yangzhou City from 1995 to 2015

随着城市的发展,地理因子(海拔和到县市中心的距离)对景观格局的综合影响呈现下降趋势(图7)。地理因子中,海拔的影响(11.4%—27.7%)通常高于到县市中心距离(14.2%—18.2%)。随着城市的发展,海

海拔对景观格局的影响整体呈现削弱之势,而且到县市中心距离的影响也具有明显的时间特征。海拔对景观破碎化(PD、ED 和 LSI)的影响(19.2%—27.7%)高于对聚合度(AI)的影响(11.4%—16.6%)。海拔的增加对 PD、ED 和 LSI 表现为促进作用,对 AI 则表现为抑制作用(图 8)。在 1995—2005 年,随着到县市中心距离的增加,其对 PD、ED 和 LSI 的作用表现为先抑制后促进,对 AI 却没有明显的影响;在 2010—2015 年,到县市中心距离对 PD、ED 和 LSI 的影响转变为促进作用或无明显作用,而对 AI 开始表现为抑制(图 8)。

与地理因子相比,社会经济的影响较为复杂。从 1995 年到 2015 年,社会因子(人口数量和人口密度)对景观破碎化(PD、ED 和 LSI)的影响相对稳定,但对聚

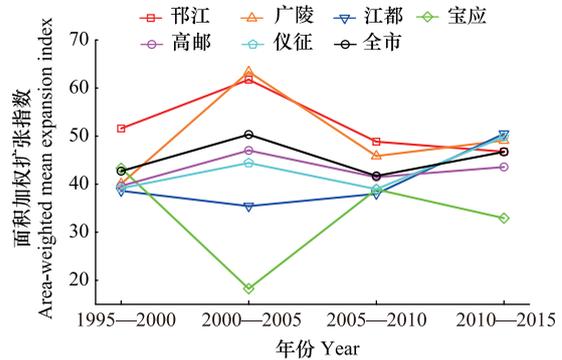


图 4 1995—2015 年扬州市建设用地面积加权扩张指数的变化
Fig. 4 Changes in the area-weighted mean expansion index of built-up land in Yangzhou City from 1995 to 2015

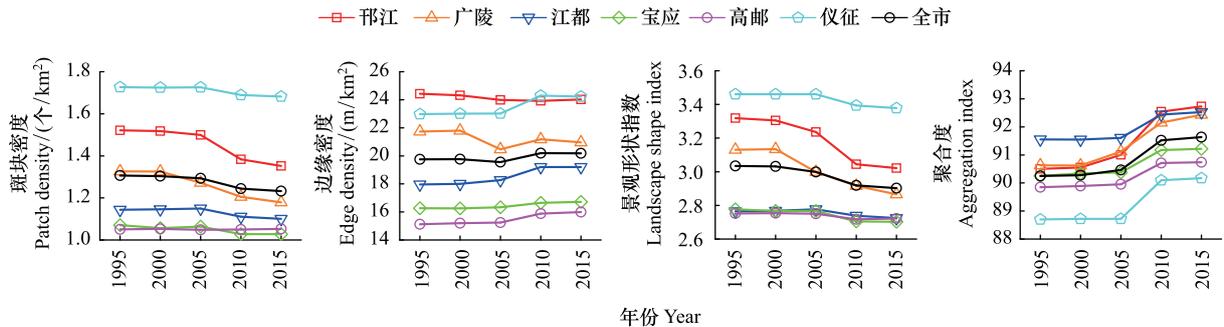


图 5 1995—2015 年扬州市建设用地景观格局指数的变化
Fig. 5 Changes in landscape metrics of the built-up land in Yangzhou City from 1995 to 2015

合度(AI)的影响整体呈增加态势;经济因子(人均 GDP 和第二产业占比)对景观破碎化(PD、ED 和 LSI)的影响呈现增加之势,但对 AI 的影响呈减小态势。在社会因子中,人口数量和人口密度的相对影响基本相同(图 7)。随着城市的发展,人口数量的影响呈现先减小后增强的特点;人口密度对 PD、ED 和 LSI 的影响呈削弱之势,但对 AI 的影响却逐渐增强。人口数量的增加对 PD、ED 和 LSI 有抑制作用,对 AI 表现为促进作用(图 8)。然而,人口密度的增加对 PD、ED、LSI 和 AI 整体表现为促进作用,虽然在个别年份(如 2015 年)对 PD 和 LSI 出现了一定的抑制(图 8)。对经济因子而言,人均 GDP 的影响(10.0%—18.3%)通常小于第二产业占比(11.9%—24.4%)(图 7)。随着城市的发展,人均 GDP 的影响呈现先减小后增强的特征;第二产业对 ED 和 LSI 的影响呈增加之势,但其对 PD 和 AI 的影响却表现为先增强后减小。与地理和社会因子相比,人均 GDP 和第二产业占比对景观格局的影响可分为两个阶段。①1995—2005 年,人均 GDP 的增加对 PD、ED 和 LSI 整体表现出一定的促进作用,但其对 AI 的影响很小;第二产业的发展抑制了 PD、ED 和 LSI,却促进了景观聚合度 AI。②2010—2015 年,人均 GDP 的增加对 PD、ED 和 LSI 有抑制作用,第二产业的发展却起到了促进作用,但它们对 AI 的作用并不一致,即人均 GDP 的增加对 AI 有促进作用,但第二产业的发展对 AI 没有明显作用。

某一特定自变量与景观指数的相互关系是指通过加权树遍历法(Weighted tree traversal)来整合其他自变量对景观指数的影响(即其他自变量的影响保持不变的情况下),利用生成的多重回归树取均值,获得此特定自变量对景观指数的边际效应。

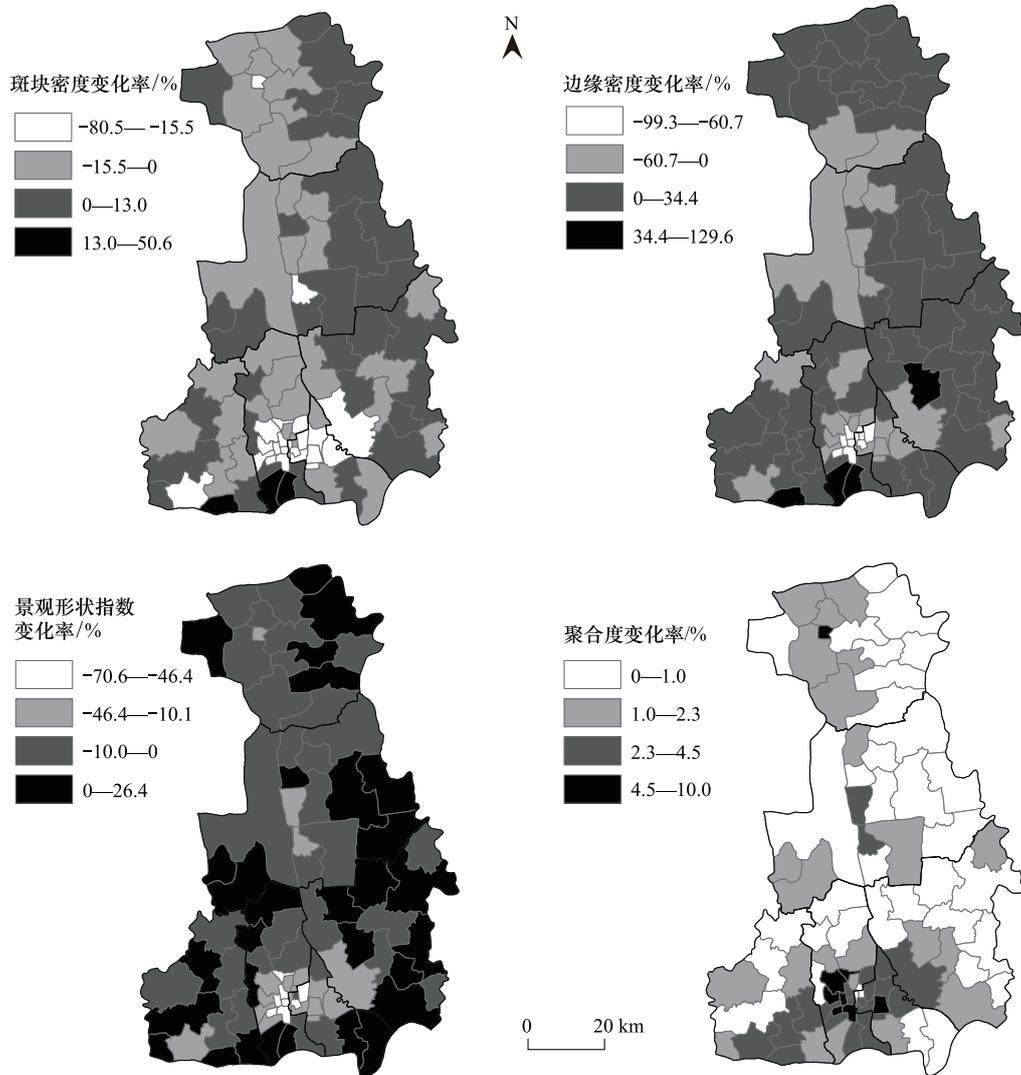


图 6 1995—2015 年扬州各乡镇建设用地景观格局指数的变化

Fig.6 Changes in landscape metrics of built-up land per town in Yangzhou City from 1995 to 2015

PD: 斑块密度, patch density; ED: 边缘密度, edge density; LSI: 景观形状指数, landscape shape index; AI: 聚合度, aggregation index

3 讨论

本文运用景观扩张指数 (LEI) 和面积加权扩张指数 (AWMEI) 对建设用地的扩张模式及形态进行了研究。从 LEI 来看, 跳跃式、边缘式和填充式 3 种扩张模式在各时段内均有出现, 但它们的优势度随着城市发展而改变 (图 3)。从 AWMEI 来看, 扬州的建设用地景观出现了“集聚”和“扩散”交替现象 (图 4)。扬州下辖县市区的 LEI 和 AWMEI 也出现了类似的交替变化。集聚-扩散交替出现的现象在东莞市^[14]、南京市^[7]、湖北省黄陂区^[15]等城市也有出现。然而, 从景观格局的角度来看, 建设用地的景观格局随着城市的发展出现了破碎化程度较低的情况, 这又在一定程度上支持景观同质化假说。

通过深入研究景观格局演变的驱动力, 我们发现地理因子的相对影响通常最大 (27.6%—43.7%), 社会因子 (29.3%—43.7%) 略高于经济因子 (23.9%—38.9%), 而且这些因子的重要性随着城市的发展而变化, 如地理因子对景观格局的影响呈现下降趋势 (图 7)。随着海拔的增加, 建设用地的分布受到地形的制约, 斑块在较平坦地区更加分散, PD、ED 和 LSI 的增大、AI 的减小, 就说明了这一点。建设用地的景观格局还受到城市

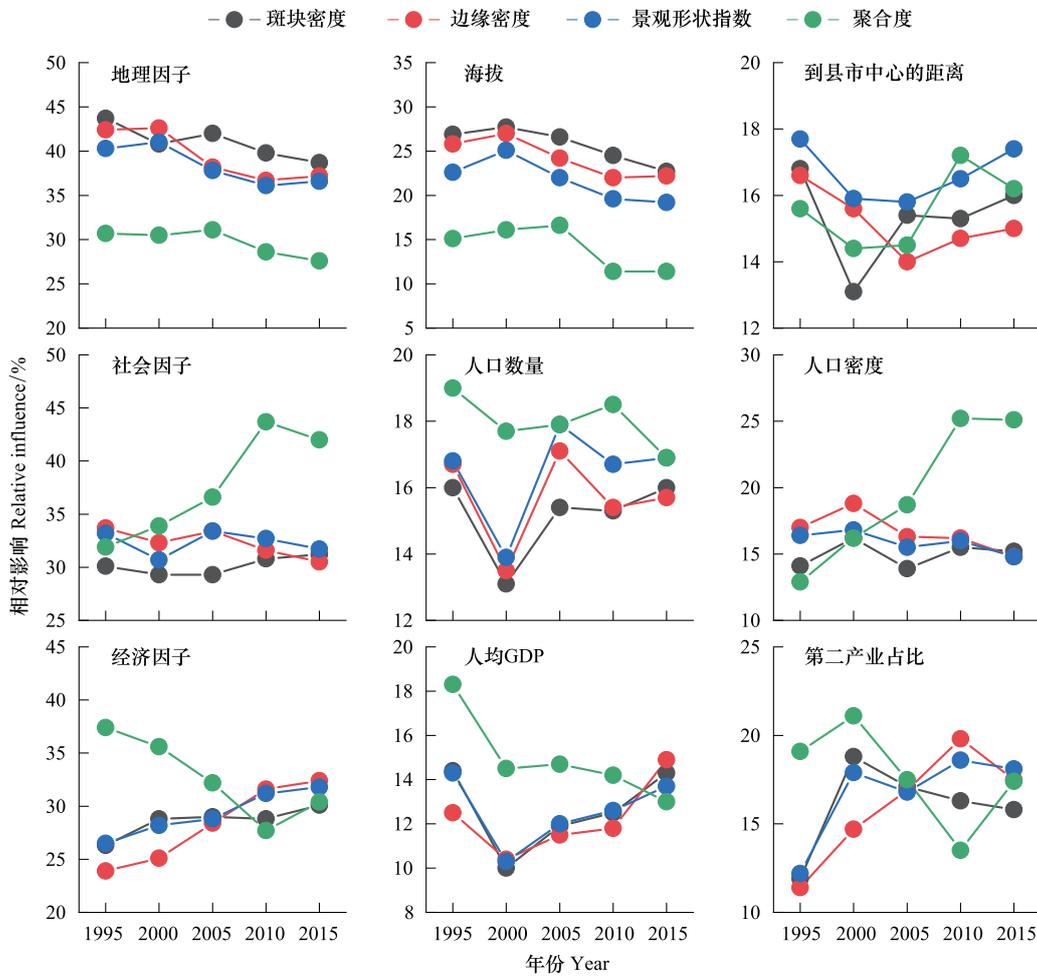


图7 地理、社会和经济因子对不同景观指数的相对影响

Fig.7 Relative influence of geographic, social and economic factors on landscape metrics of the built-up land

相对影响是指各因子对不同景观指数可解释变异的贡献率,所有因子的相对影响之和为 100%。地理因子的影响是指海拔和到县市中心距离的综合影响;社会因子的影响是指人口数量和人口密度的综合影响;经济因子的影响是指人均 GDP 和第二产业占比的综合影响

中心的辐射作用,整体表现为到县市中心的距离越近,受到城市中心的辐射作用越大,建设用地斑块越趋于集聚,破碎化开始下降。然而,Feng 等^[18]对上海的研究发现,到市中心的距离对景观破碎化的作用表现为先促进后抑制。一个可能的原因是城市的发展差异,扬州尚处于快速城市化阶段,而上海已基本完成了快速城市化过程,更多地表现为景观的重组。

与地理因子相比,社会经济对景观格局的影响较为复杂。我们发现人口数量的增加会降低建设用地的景观破碎化,增强景观的集聚。究其原因可能与扬州的人口分布特征和城市发展历史有关^[30]。由于城市发展历史的原因,扬州生活聚居区大多建在老城区(特别是邗江和广陵两区),建设用地面积较大,可开发利用的土地很少,加之城市规划部门处于对老城区的保护,限制这些地方的建设用地继续扩张,从而出现人口数量越多的乡镇越难产生新的建设用地。与人口数量的影响不同,在人口数量保持不变的情况下,人口密度的增大也能够促进建设用地斑块的形成和景观聚合度的增强,这与 Feng 等^[18]的研究结果相同。此外,一些大城市(如北京、上海)的研究表明,经济的快速增长显著改变了城市景观格局^[12,19]。我们的研究不仅证实了这一点,还发现经济的作用具有明显的阶段性。随着城市的发展,人均 GDP 和第二产业也随之增长,城市扩张速度加快,从而引起了建设用地的扩张和重组。城市化早期,人均 GDP 的增长促进了城市扩张,使得景观破碎化程度加剧(PD、ED 和 LSI 增加),而到了城市化中期,城市扩张受到严格的规划与控制,人均 GDP 更多的是

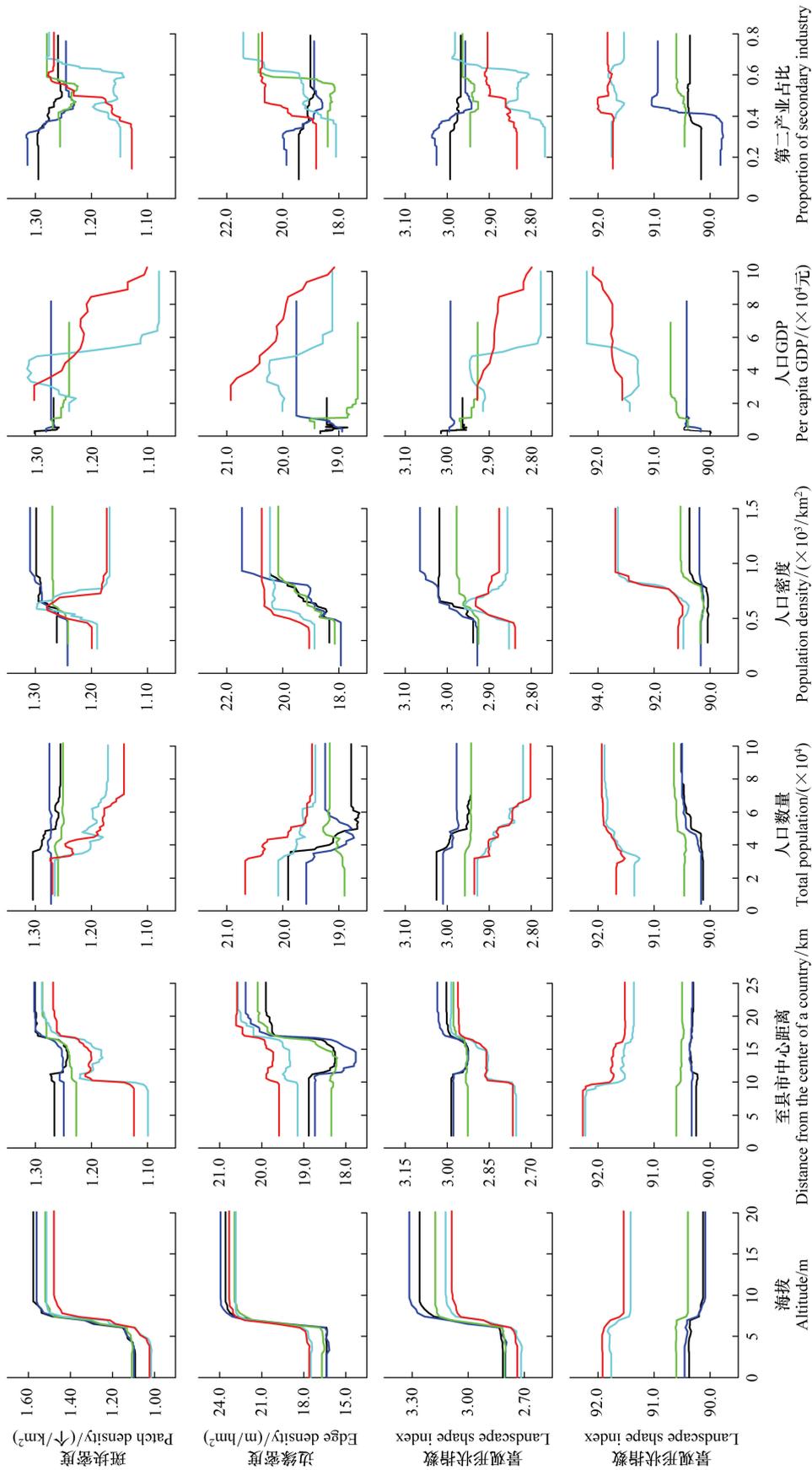


图 8 地理、社会和经济因子与不同景观指标的相互关系
 Fig. 8 Partial dependences of geographic, social and economic factors to landscape metrics of the built-up land

某一特定自变量与景观指标的相互关系是指通过加权树遍历法(Weighted tree traversal)来整合其他自变量对景观指标的影响(即其他自变量的影响保持不变的情况下), 利用生成的多重回归树取均值, 获得此特定自变量对景观指标的边际效应

发挥建设用地的重组,促进了斑块的集聚和破碎化的下降。第二产业增加值占比处于低位时,产业多为劳动密集型,资金相对匮乏,扩大再生产的能力弱,对建设用地扩张的促进作用很小,在出现亏损和困境后甚至会抑制新建设用地的形成,更多地表现为景观的重组^[30]。随着第二产业的继续发展,其扩大再生产的能力增强,生产规模也逐渐扩大,促进了“工业区”、“开发区”的形成,从而对建设用地扩张表现为明显的促进作用,使得景观破碎化有所增加。考虑到社会经济活动的复杂性,本研究选取的因子之间可能存在复杂的交互作用,其作用强度及机理仍需进一步探索。

4 结论

综合考虑地理、社会和经济因子,本文通过研究 1995—2015 年扬州建设用地的扩张模式、形态及景观格局,深入探究了景观破碎化及其驱动力的演变特征。从 1995 年到 2015 年,填充式、边缘式和跳跃式 3 种扩张模式均有出现,但其优势度随着城市发展而改变。建设用地的形态在城市扩张的过程中经历着“集聚”和“扩散”的交替变化,景观格局则出现了景观破碎化下降、聚合度增加的现象,即景观有同质化的倾向。随着城市的发展,地理因子(海拔和到县市中心的距离)对景观格局的综合影响呈现下降趋势,社会经济的作用逐渐增强。海拔和人口密度的增加会促进景观的破碎化(PD、ED 和 LSI 增加)、抑制景观的集聚(AI 下降);人口数量的增加会促进景观的集聚(AI 增加)、降低景观的破碎化;其余因子(到县市中心的距离、人均 GDP 和第二产业占比)的作用则随城市的发展而发生转变。此外,研究还表明,增强回归树方法不仅可以直观地辨识出景观格局的关键驱动力及其演变特征,而且可以明确某一驱动因子与景观格局的相互关系以及这种关系的演变过程。

参考文献(References):

- [1] McDonnell M J, MacGregor-Fors I. The ecological future of cities. *Science*, 2016, 352(6288): 936-938.
- [2] 何春阳, 黄庆旭, 刘志峰, 马群, 鄢建国. 城市景观生态学—过程、影响和可持续性. 北京: 科学出版社, 2018.
- [3] Reynolds R, Liang L, Li X C, Dennis J. Monitoring annual urban changes in a rapidly growing portion of northwest Arkansas with a 20-year Landsat record. *Remote Sensing*, 2017, 9(1): 71.
- [4] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [5] El Garouani A, Mulla D J, El Garouani S, Knight J. Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data: case of Fez, Morocco. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2017, 6(1): 160-169.
- [6] Bettencourt L M A. The origins of scaling in cities. *Science*, 2013, 340(6139): 1438-1441.
- [7] Xu C, Liu M S, Zhang C, An S Q, Yu W, Chen J M. The spatiotemporal dynamics of rapid urban growth in the Nanjing metropolitan region of China. *Landscape Ecology*, 2007, 22(6): 925-937.
- [8] Li C, Li J X, Wu J G. Quantifying the speed, growth modes, and landscape pattern changes of urbanization: a hierarchical patch dynamics approach. *Landscape Ecology*, 2013, 28(10): 1875-1888.
- [9] 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.
- [10] Haas J, Ban Y F. Urban growth and environmental impacts in Jing-Jin-Ji, the Yangtze, River Delta and the Pearl River Delta. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 30: 42-55.
- [11] Hegazy I R, Kaloop M R. Monitoring urban growth and land use change detection with GIS and remote sensing techniques in Daqahlia governorate Egypt. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2015, 4(1): 117-124.
- [12] 阳文锐. 北京城市景观格局时空变化及驱动力. *生态学报*, 2015, 35(13): 4357-4366.
- [13] Megahed Y, Cabral P, Silva J, Caetano M. Land cover mapping analysis and urban growth modelling using remote sensing techniques in greater Cairo region-Egypt. *International Journal of Geo-Information*, 2015, 4(3): 1750-1769.
- [14] Liu X P, Li X, Chen Y M, Tan Z Z, Li S Y, Ai B. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 2010, 25(5): 671-682.
- [15] Liu Y L, He Q S, Tan R H, Liu Y F, Yin C H. Modeling different urban growth patterns based on the evolution of urban form: a case study from Huangpi, Central China. *Applied Geography*, 2015, 66: 109-118.
- [16] 吴金玲. 上海城市增长模式与景观格局动态[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.

- [17] Plieninger T, Draux H, Fagerholm N, Bieling C, Bürgi M, Kizos T, Kuemmerle T, Primdahl J, Verburg P H. The driving forces of landscape change in Europe: a systematic review of the evidence. *Land Use Policy*, 2016, 57: 204-214.
- [18] Feng Y J, Liu Y, Tong X H. Spatiotemporal variation of landscape patterns and their spatial determinants in Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2018, 87: 22-32.
- [19] 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.
- [20] Su S L, Ma X Y, Xiao R. Agricultural landscape pattern changes in response to urbanization at ecoregional scale. *Ecological Indicators*, 2014, 40: 10-18.
- [21] Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*. New York: Springer, 2009.
- [22] Müller D, Leitão P J, Sikor T. Comparing the determinants of cropland abandonment in Albania and Romania using boosted regression trees. *Agricultural Systems*, 2013, 117: 66-77.
- [23] 闫晶, 罗云建, 郑德福, 王水城. 桉树生物量估算差异的源解析. *林业科学*, 2014, 50(2): 92-98.
- [24] Dong G L, Xu E Q, Zhang H Q. Spatiotemporal variation of driving forces for settlement expansion in different types of counties. *Sustainability*, 2016, 8(1): 39.
- [25] 韦薇, 张银龙, 赵兵, 王浩. 快速城市化进程中城市扩张对景观格局分异特征的影响. *生态环境学报*, 2011, 20(1): 7-12.
- [26] Weng Y C. Spatiotemporal changes of landscape pattern in response to urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(4): 341-353.
- [27] McGarigal K, Marks B J. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure (General Technical Report PNW-GTR-351). Oregon: USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995: 122.
- [28] McGarigal K, Cushman S A, Ene E. FRAGSTATS v4: spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps. [2019-03-01]. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- [29] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802-813.
- [30] 车通, 罗云建, 李成. 扬州城市建设用地扩张的时空演变特征及其驱动机制. *生态学杂志*, 2019, 38(6): 1872-1880.