

深圳市近20年城市景观格局演变及其驱动因素

吴健生^{1,2}, 罗可雨¹, 赵宇豪^{1,2}

(1. 北京大学城市规划与设计学院/城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055;

2. 北京大学城市与环境学院/地表过程与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 基于深圳市1996—2015年土地利用数据, 利用景观指数、景观转移矩阵和景观扩张指数等方法探究了深圳市近20年景观格局时空变化、主要景观类型转移和建筑用地扩张模式, 最后使用Binary Logit模型考察了市级和区级建筑用地景观扩张的主要驱动因素。结果表明: ① 1996—2015年, 深圳市建筑用地景观优势性逐步增强, 面积增加15.81%, 以蔓延式(61.9%)和填充式(36.27%)扩张为主; ② 1996—2006年为城市化快速扩张期, 建筑用地扩张呈集中开发形态, 景观多样性和均匀性增加, 城市扩张中心略微向北部和东部移动, 2006—2015为城市化低速过渡期, 景观破碎化加剧, 城市扩张重心向北部和西部偏移; ③ 在市级尺度上, GDP密度和人口密度对建筑用地景观扩张有显著正影响, 生态控制线、高程、坡度和至道路的距离有着显著负影响。每单位生态控制线范围、坡度的增加分别将使建筑用地景观扩张的机会比率将平均减少到原来0.8168倍、0.8841倍。各驱动因素表现出区域和尺度差异性, GDP对宝安区、南山区和坪山区, 人口增长对宝安区、龙华区, 以及交通可达性对大鹏新区、龙岗区驱动分别最为突出。研究结果可以为中国城市快速扩张过程中的景观格局变化提供科学实践。

关键词: 景观格局; 景观转移; 景观扩张指数; 驱动因素; 城市化

DOI: 10.11821/dlyj020190539

1 引言

景观格局是指不同大小和形状的各种景观元素的空间布局^[1]。1981—2017年期间, 中国城市建成区面积增长了7.6倍, 与此同时景观格局的改变对城市的生态、社会和经济功能产生了深远的影响^[2,3]。由于城市扩张是人类活动强烈干扰下的土地利用景观格局演变的重要内容, 且城市区域规划亟需对城市景观格局的剧烈演变及其驱动因素相关研究^[4], 因此快速城镇化背景下与景观格局变化相关的现象、过程及原因引起了广泛关注^[5,6]。在城市景观格局及其变化的相关研究中, 基于景观几何特征的空间格局指数分析是众多学者定量研究景观格局的常用方法^[7-9]。尽管静态景观指数繁多, 但对主要景观类型的转移和景观格局演变的过程描述却不够清晰, 针对这个问题, 有部分学者提出了景观扩张指数LEI^[10]和景观演化规模指数LECI^[11]等过程测度方法。城市景观格局演变过程通常以建筑用地景观扩张为主导, 引入LEI、LECI等景观指数可以揭示静态景观指数不能直接观察到的系统属性^[12]。

由于城市作为一种人地耦合系统的特殊性, 城市景观格局演变受到地理条件、人口、社会经济、国家政策等多方面的影响^[13]。相关学者在西北地区^[7]、长株潭地区^[14]、京

收稿日期: 2019-07-02; 修订日期: 2020-05-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2102000); 国家自然科学基金项目(41671180)

作者简介: 吴健生(1965-), 男, 湖南新化人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为景观生态与GIS。

E-mail: wujs@szpku.edu.cn

津冀地区^[15]以及东部城市群地区^[16]等区域的景观演变驱动力研究中,表明中国景观格局变化与区域经济、人口、交通、产业和政策等多种因素存在一定的关系。同时,驱动因素在不同时空尺度上表现的多样性使得研究具有复杂性和挑战性^[17]。以往的研究多集中在城市群或区域尺度,而市级和区级尺度上景观变化驱动力研究较为少见,而驱动因素的尺度差异和区域差异值得进一步探究。此外,现有研究中的空间统计分析、地理探测器、主成分分析、多元回归模型等方法,难以将政策规划等驱动因素量化并纳入模型,使得关于政策规划的驱动因素研究停留在定性层面。因此,可以借鉴元胞自动机模型中的邻域转换规则的思想^[18],空间量化生态保护红线政策因素对于城市建筑用地景观扩张的限制作用,以本地化小尺度城市景观格局变化的驱动力分析模型。

深圳市的快速城市化是中国城市化过程的缩影,对其市区尺度下的景观变化驱动力探究对其他城市具有借鉴意义。因此,本文分别利用景观格局指数表征近20年来深圳市景观格局特征,利用景观转移矩阵和景观扩张指数表征景观格局演变过程;同时,将基本生态控制线政策作为邻域驱动条件之一,使用Binary Logit模型分析市级和区级尺度上建筑用地景观扩张的驱动因素及其差异。以期为中国城市快速扩张过程中的景观格局演变提供科学实践。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

深圳市(113°45'44"E~114°37'21"E、22°26'59"N~22°51'49"N)位于广东省南部,总面积1997.47 km²,地处珠江三角洲东岸,南与香港隔水相望,北部毗邻东莞、惠州(图1)。下辖南山区、福田区、罗湖区、盐田区、宝安区、光明区、龙华区、龙岗区、坪山区和大鹏新区。1978年,深圳成为中国最早设立的经济特区之一;经过40年的发展,创造了“深圳速度”城市化奇迹,完成了从传统农业地区向完全城市化区域的转变。

2.2 数据来源与数据处理

本研究采用深圳市1996年、2000年、2006年、2010年和2015年5期的土地利用数

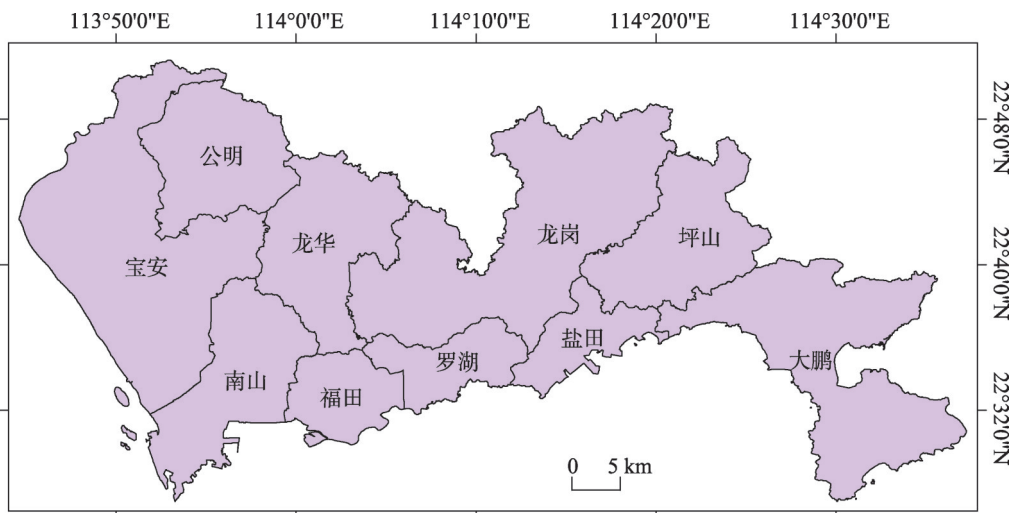


图1 深圳市行政区划

Fig. 1 Administrative division of Shenzhen

据,划分为耕地、园地、林地、草地、城市建筑用地、交通用地、水域和其他未利用地等八种景观类型,景观类别时序图如图2所示。30 m分辨率数字高程数据来自地理空间数据云,GDP和人口公里网格数据来自中科院资源环境科学数据中心,生态控制线来自《深圳市基本生态控制线管理规定》,其他基础地理信息要素数据来自1:100万全国基础地理数据库。

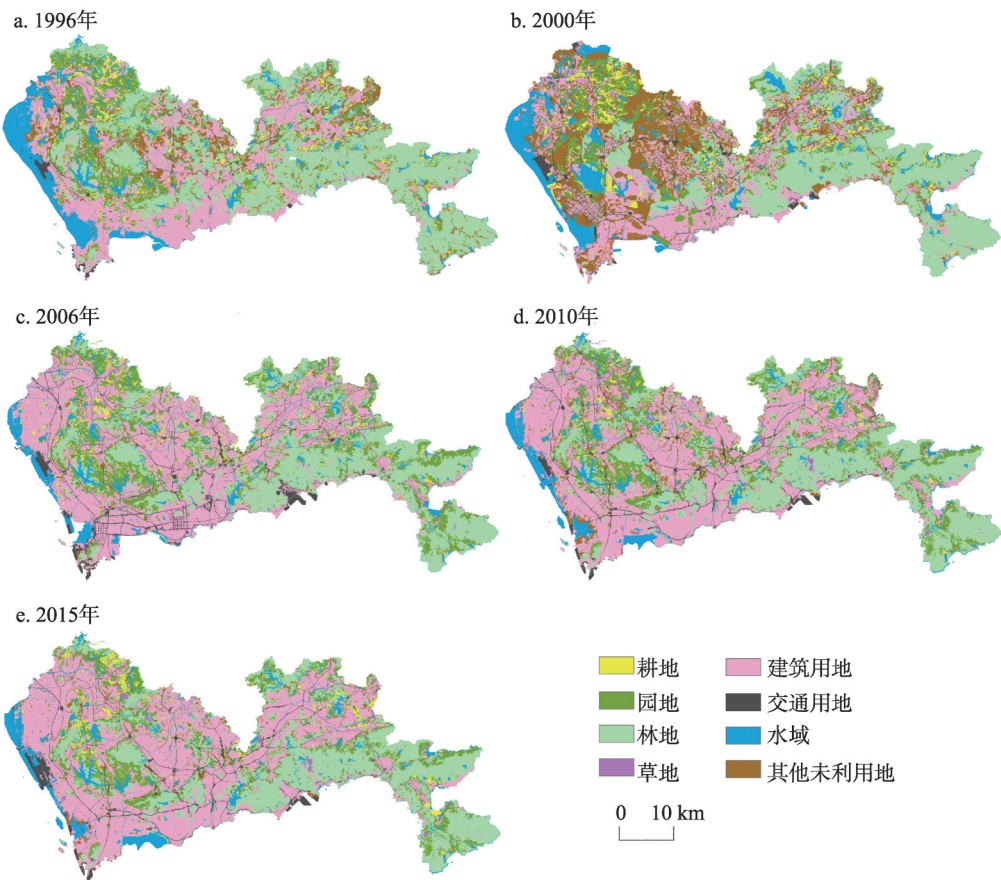


图2 1996—2015年深圳市景观类型分布图

Fig. 2 Landscape of Shenzhen during 1996-2015

2.3 景观格局指数

景观指数^[9]是能够量化描述景观格局的一系列指标。将土地利用变化分类数据转化为tiff格式,在Fragstat 4.2中计算类型水平和景观水平下的景观格局指数(表1)。

2.4 转移矩阵法

转移矩阵(transition matrix)可以表达研究区域在一段时间内各种景观类型之间数量上的相互转移变动情况,其数学表达式如下:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1j} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P_{i1} & P_{i2} & \cdots & P_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

表1 景观格局指数

Tab. 1 Landscape pattern index

景观格局指数	指标名称	指标意义
CA	斑块类型面积, 单位: hm^2	反映景观中优势斑块类型。
PLAND	斑块类型所占景观面积的比例, 单位: %	反映景观面积的比例
NP	斑块个数, 单位: 个	反映景观异质性和破碎度。
PD	斑块密度, 单位: 个/ 100 hm^2	斑块数量特征, 反映景观异质性和破碎度。PD值越大, 表明景观斑块破碎度越大。
ED	边缘密度, 单位: m/hm^2	表征景观被边界分割的程度, ED值越大, 表明斑块形状越复杂, 景观被边界分割的程度越高。
AREA_MN	平均斑块面积, 单位: hm^2	表征景观的破碎化程度, 值减小说明景观的破碎化程度上升, 反之则下降。
AI	聚集度指数	反映景观要素的聚集程度。AI的取值范围为[0, 100]。当AI接近于100时, 斑块聚集越紧密, 景观内部以少量大斑块为主或者斑块高度相连; 当AI趋近于0时, 景观中斑块离散程度越大, 该类型景观由越多离散的小斑块组成。
PAFRAC	周长面积分维数	反映形状的复杂性, 其值范围为[1, 2], PAFRAC接近于1表明景观边界形状非常简单, 如正方形, 接近于2表明边界形状非常复杂。
SHDI	香农多样性指数	体现景观水平复杂程度, 斑块丰富度越大或不同斑块面积分布越均匀时, SHDI值越大。
SHEI	香农均匀度指数	表征城市土地利用的均质性的强弱。SHEI取值范围为[0, 1], SHEI越接近1表明斑块类型分布越均匀, 多样性越强; SHEI趋于0时, 景观分布极不均匀, 优势斑块控制度强。

式中: P_{ij} 表示景观类型 i 转化为景观类型 j 的面积。

2.5 景观扩张指数

与传统的仅能反映单一时间点空间特征的景观指数相比, 景观扩张指数 (landscape expansion index, LEI) 能够捕捉景观格局的时空动态变化信息^[10]。表达式为:

$$LEI = \begin{cases} 100 \times \frac{A_o}{A_E - A_p} & \text{新增斑块不为矩形} \\ 100 \times \frac{A_o}{A_{LE} - A_p} & \text{新增斑块为矩形} \end{cases} \quad (2)$$

式中: A_E 为斑块最小包围盒面积; A_p 为新增斑块本身面积; A_o 为最小包围盒中原有景观面积; A_{LE} 为斑块的放大包围盒面积; A_{Lo} 为放大包围盒里原有景观的面积。LEI能够判定三种景观扩张的模式, 当 $0 \leq LEI < 2$ 时, 为飞地式 (outlying) 扩张; $2 \leq LEI \leq 50$ 时为边缘式 (edge-expansion) 扩张; 当 $50 < LEI \leq 100$ 时为填充式 (infilling) 扩张。该指数通过刘小平等^[11]开发的 ArcGIS LEITool 插件计算得出。

2.6 Binary Logit 回归模型及驱动因素

Binary Logit 回归模型中, 因变量是二分类变量, 通过线性回归模型的预测值的结果进一步接近真实标记的对数几率。Logit 变换借助对数变换转换为线性方程, 如下:

$$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_i + \varepsilon \quad \varepsilon \sim N\left[0, \frac{1}{N_i P_i (1-P_i)}\right] \quad (3)$$

式中: P_i 是发生城市化景观类型转变的概率; $P_i/(1-P_i)$ 表征第 i 种景观类型转变的机会比率; X_i 为第 i 个驱动因子; β_i 为其对应的系数值; 当样本数很大时残差 ε 符合正态分布。使用 Eviews 进行回归, 使用似然比对数检验模型整体拟合效果, 使用 Z 统计量检验回归系数的显著性, 使用 ROC 检验模型预测效果。

尽管景观与城市变化驱动力分析受到了广泛的关注^[8,20],但影响城市景观变化的因素具有多样性和复杂性。Li等总结了现有研究中常用驱动力因素,包括GDP、人口等社会经济因素,坡度和高程、洪泛区等自然因素,距离社会经济中心等邻近距离因素,周边区域用地类型比例、土壤质量、土地覆被等邻域因素,和限制开发区、自然保护区、城市规划和指针等土地利用政策和城市规划因素^[21]。据此,本文选取了常用的五种驱动因子类型(表2)。

其一,人口与GDP是最常用的社会经济驱动因素,其中人口与生活物质需求、住房用地和市场有关,国民经济的增长往往导致工商服务业的发展和土地的需求激增,人口和GDP采用1995年和2015年的公里格网均值。其二,土地相关的规划政策对景观格局的形成具有强制制约性,也是元胞自动机模型应用在城市扩张模拟中常用的条件之一。其三,地形和水系等自然条件也对景观格局的产生限制作用,比如城镇一般起源于有河流交汇的平原。其四,道路可以提高区域运输能力和人口流动速率,带动沿线区域城市化。其五,距离区域内行政管理中心是一种局地邻近因素,通常距离当地行政管理中心越近,则可以更便捷地获得社会经济资源。本文使用ArcGIS的领域统计工具得到各栅格邻域的生态控制线栅格数量,由欧氏距离工具计算各距离因素,最后生成7000个随机点用于回归。

3 结果分析

3.1 深圳市景观格局变化特征

3.1.1 景观总体构成 1996—2015年间,研究区内主要景观类型是林地和建筑用地,变化最大的景观类型依次为林地、建筑用地和其他未利用地(表3),这与相关的研究类似^[14,22]。虽然林地总量减少156.59 km²,但其景观比例保持在28%以上,说明深圳在发展

表2 深圳市城市景观变化驱动因素

Tab. 2 Driving forces of urban landscape change in Shenzhen

变量类别	变量	单位
社会经济	GDP密度	万元/km ²
	人口密度	万人/km ²
土地政策	基本生态控制线	-
自然条件	高程	m
	坡度	°
	至水库、湖泊的距离	m
可达性	至河流水系的距离	m
	至铁路、轻轨的距离	m
	至公路的距离	m
局地邻近	距离居街道居委会距离	m

表3 1996—2015年深圳市景观类型面积及其占比变化

Tab. 3 Changes of landscape area and proportion in Shenzhen during 1996-2015

景观类型	CA(km ²)					PLAND(%)				
	1996年	2000年	2006年	2010年	2015年	1996年	2000年	2006年	2010年	2015年
耕地	70.68	90.75	50.39	43.85	50.41	3.61	4.63	2.54	2.20	2.51
园地	221.19	185.22	269.73	236.83	207.86	11.28	9.44	13.76	11.87	10.39
林地	736.02	571.96	581.57	586.62	578.43	37.52	29.03	29.68	29.41	28.92
草地	4.16	5.33	10.26	32.88	25.03	0.21	0.27	0.52	1.65	1.25
建筑用地	502.55	461.54	774.37	752.35	828.70	25.62	23.48	39.51	37.72	41.43
交通用地	27.17	78.97	91.83	88.29	100.44	1.39	4.02	4.69	4.43	5.02
水域	230.64	226.82	172.56	167.56	157.64	11.76	11.56	8.80	8.40	7.88
其他未利用地	169.08	334	9.06	86.09	51.60	8.62	17.02	0.46	4.32	2.58

过程中尽量做到了注重绿化和生态环境保护。非自然景观优势性逐步增强, 建筑用地景观比例共增加 15.81%, 交通用地增长 2.7 倍; 但其在 2006 年后增速放缓, 说明在 2006 年后城市的可开发利用土地存量已逐渐达到饱和。未利用土地为过渡土地利用类型, 变化最显著, 在研究期内出现两次波动, 首先随着建设进程的推进先大幅增加, 而后在城市建设基本完成后减小到 2.58%。草地面积增加 20.86 km², 说明对城市公共绿地需求与重视程度的提高。

3.1.2 景观个体变化特征 从图 3 可知, 林地和建筑用地的平均斑块面积、聚集度维持着相对较高的水平。但建筑用地的平均斑块面积净增加, 表明建筑用地的景观破碎化程度降低、团聚程度增加。林地平均斑块面积减少、斑块密度增加, 说明绿地景观空间分布的景观破碎化程度上升、规模逐步减小。交通用地的周长面积分维数值最大、边缘密度增长最为迅速, 景观聚合度相对较低, 这与其形状特征呈线状有关。研究期内景观变化转折点出现在 2000—2006 年, 周长面积分维数基本达到最小值, 总体景观复杂性程度达到最强, 这是由于人类活动干扰由集中建设转向抢占其他零碎用地。

3.1.3 景观水平景观格局变化特征 由图 4 可知, 景观变化的转折点在 2005 年左右, 总体特征是: 景观聚集度和连通性先增加后减小, 破碎化程度先减小后增加, 多样性指数先增加后减小。表明建设到一定阶段, 城市的景观多样性增强; 而土地资源趋于饱和后自然景观的空间受到压缩, 景观结构多样性变差, 建筑用地成为优势景观类型。

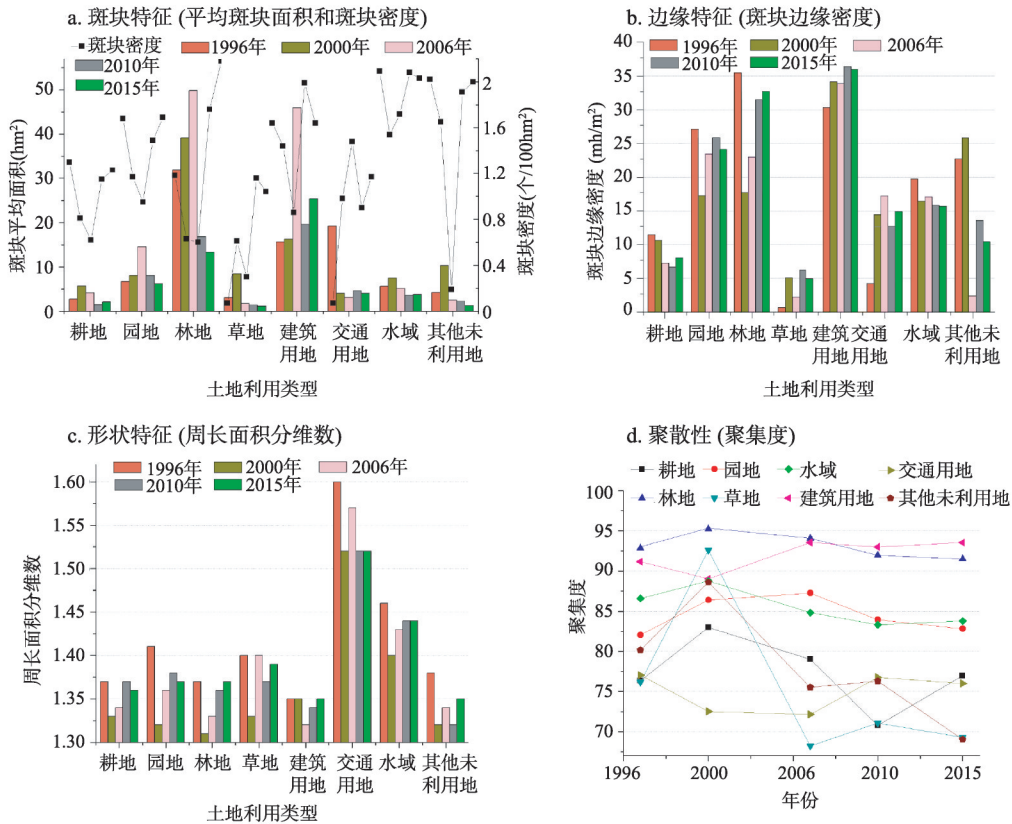


图 3 1996—2015 年深圳市景观类型水平指数变化

Fig. 3 Changes of landscape metrics in class level of Shenzhen during 1996-2015

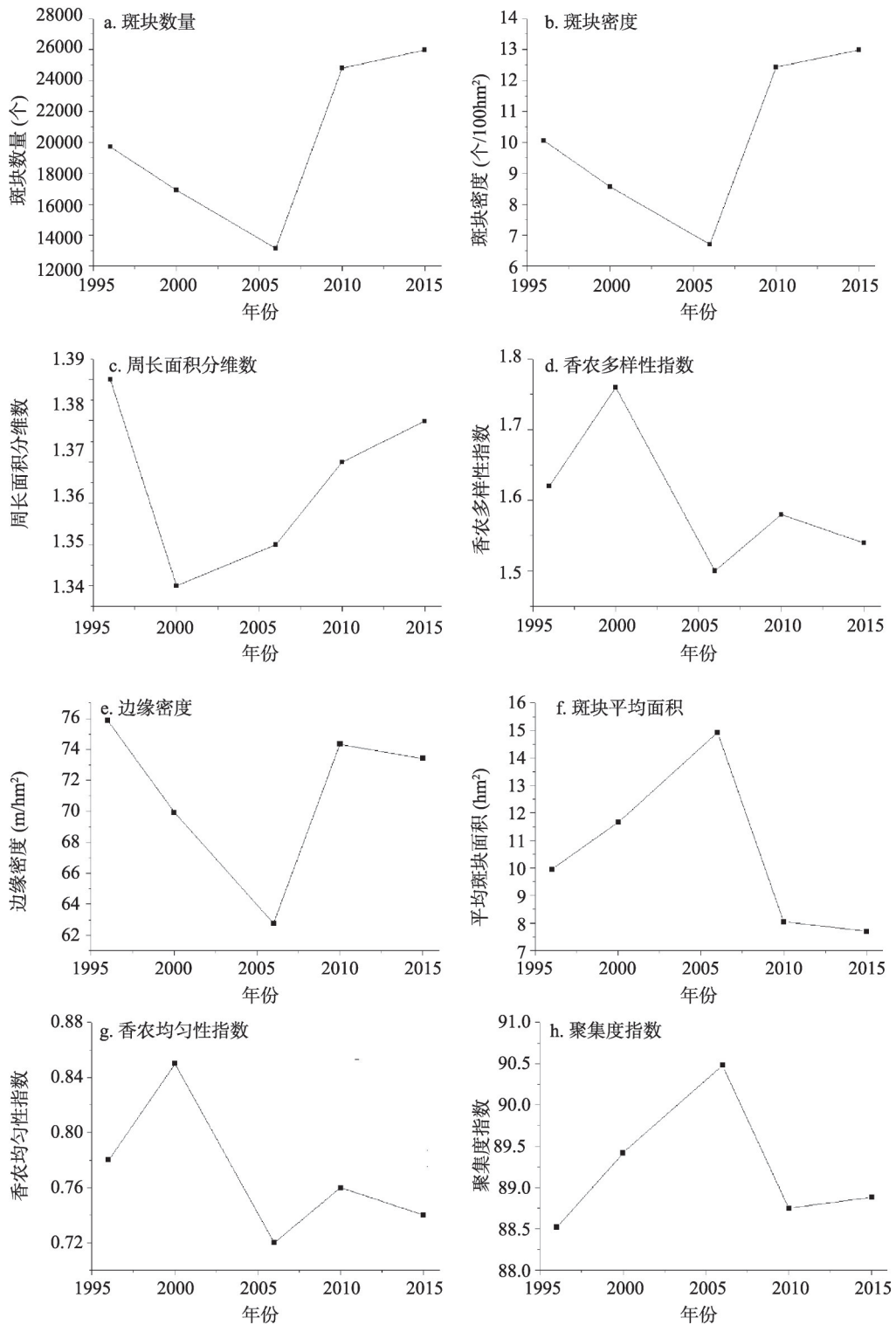


图4 1996—2015年深圳市景观尺度指数变化

Fig. 4 Changes of landscape metrics in landscape level of Shenzhen during 1996-2015

3.2 深圳市景观变化的过程测度

3.2.1 主要景观类型内部转移特征 从图5可知,在研究期内,园地、林地、耕地为主要的转出类型,建筑用地为主要的转入类型,其他未利用地为主要的过渡土地利用类型。与王仰麟等研究结果^[9]相似,变化的主线分为两个阶段:① 1996—2006年,园地转移到建筑用地和其他未利用地、其他未利用地转移到建筑用地分别为前后5年期间间隔的最主要的变化转移;② 2006—2015年景观格局趋于相对稳定,景观转移变化程度减弱,生态控制线以内发生着林地和园地之间的相互转移,建筑用地的扩张主要来自水域(福田区和大鹏新区的沿海区域)。

3.2.2 城市扩张模式 从表4知,研究期内深圳市城镇以蔓延式和填充式扩张为主,分别占新增城镇建设化用地的61.19%和36.27%。2000—2006年之间城镇化扩张最为迅速,总扩张面积为426km²,占研究时段扩张总面积的49.7%。从图6可知,1996—2006年是城市扩张最为明显的阶段,罗湖区蔓延式城市扩张,宝安区北部飞地式扩张,南山、福田、盐田则主要为填充式扩张。城市扩张的重心偏北,新城区的城镇化用地迅速增加。2006—2010年期间,南山区和福田区围海造陆分别以填充式和蔓延式的方式在湾区扩张城镇建筑用地。扩张重心大幅西移,主要体现在宝安区、光明区、龙华区、南山区等西部区域的发展,纵向上中心小幅北移。

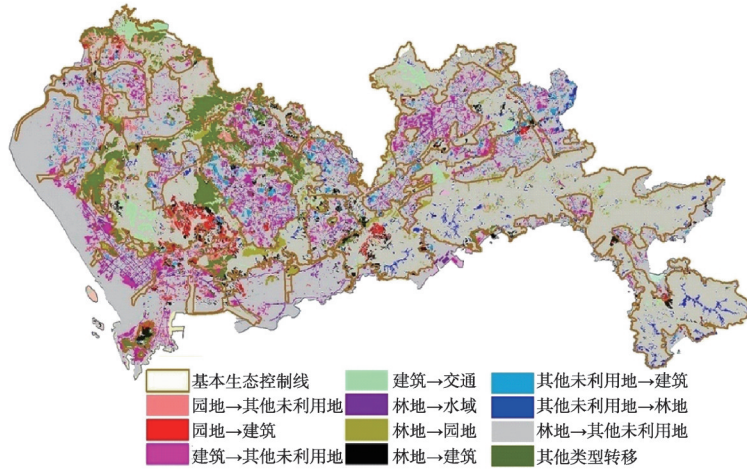
3.3 深圳景观格局演变的驱动力因素

研究期内,深圳市建筑用地景观扩张是景观格局演变的重要内容。建筑用地景观扩张的驱动力分析有助于理解人类活动干扰对深圳城市景观格局变化的作用与影响^[9]。经共线性诊断,方差膨胀因子VIF在1.123~3.348之间,一般经验要求VIF小于10,说明所选因子不具备共线性。表5中,模型LR检验P值均小于0.05,模型整体上是显著的;各模型的ROC均大于80%,模型预测效果较优。表6中,在市级尺度上,GDP密度和人口密度对建筑用地景观扩张有显著正相关关系,生态控制线、高程、坡度和交通可达性(至铁路、轻轨和公路的距离)有着显著负相关关系。但是,这些因素在不同区域和不同尺度上的驱动作用均存在差异。

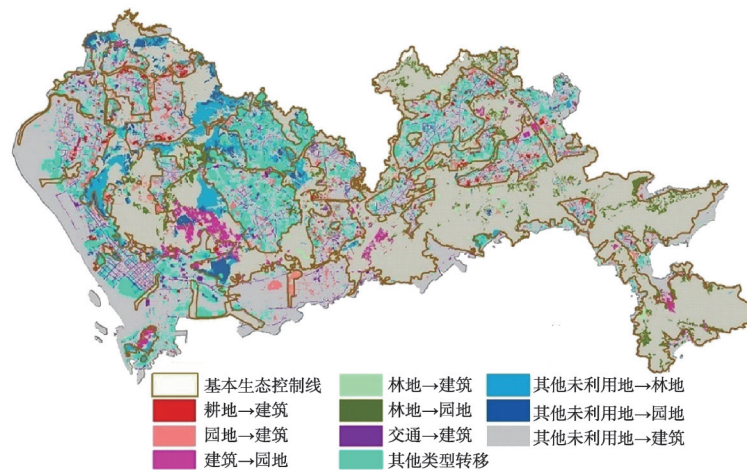
从表6可知,GDP密度和人口密度是促进深圳建筑用地景观扩张的主要驱动因素,当其他变量不变时,GDP密度和人口密度每增长1个单位时,建筑用地景观扩张的机会比率将平均增加到原来的 $e^{0.000049}$ 和 $e^{0.000652}$ 倍,即1.00005倍和1.00065倍(表5)。经济方面,2015年末全市的GDP达到了17503亿元,约为1996年的17倍。宝安区、南山区和坪山区GDP驱动作用较为突出,由于政策扶持和税收优惠等优势,房地产、服务业、工商企业等各种产业竞相开发土地,使得原有景观类型随着土地经营使用的改变而改变。人口方面,1996—2015年间平均每年增长约21.83万人。由于人口增加,对粮食、住房、基础设施等物质需求增加,引起土地需求激增。降尺度视角下,人口增长对建筑用地景观扩张的驱动作用主要集中在宝安区和龙华区;在南山区则成负相关关系,这与南山区退让生态控制线内部分违章建筑用地同时人口局部减少有关(图5c);而在大鹏新区、坪山区、福田区、罗湖区、盐田区、光明区和龙岗区,则没有显著的影响。

生态控制线对深圳市土地扩张起到明显的制约作用,当其他变量不变时,生态控制线范围每增加1个单位,建筑用地景观扩张的机会比率将平均减少到原来的 $e^{-0.202301}$ 倍,即0.816倍(表5)。2005年《基本生态控制线管理规定》出台,基本限定了城市扩张的可利用土地资源,确保了城市生态环境的基本水平。生态控制线内违章建筑逐渐拆迁并还原为自然景观。2010年《深圳市城市总体规划(2010—2020)》要求严格控制新增用地规模,实现用地模式由增量扩张为主向存量改造优化为主的根本性转变。受土地政策和

a. 1996—2000年主要景观类型转移



b. 2000—2006年主要景观类型转移



c. 2006—2010年主要景观类型转移

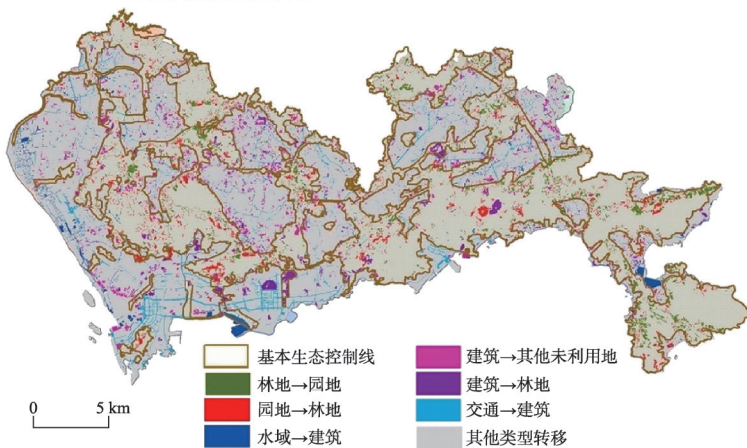


图5 1996—2010年深圳市主要景观类型转移

Fig. 5 The map of main landscape type transfer by stage during 1996-2010

注：由于2010—2015年建筑用地景观扩张规模极小、景观类型之间转移量无明显特征，且因篇幅所限，故略。

表4 1996—2015年深圳市不同城市扩张模式面积与占比

Tab. 4 The area and proportion of different urban expansion modes during 1996-2015

时期	飞地式(km ²)	蔓延式(km ²)	填充式(km ²)	总计(km ²)	占比(%)
1996—2000年	8.29	139.23	51.05	198.57	23.18
2000—2006年	7.24	252.57	166.58	426.39	49.78
2006—2010年	4.45	76.37	53.69	134.51	15.71
2010—2015年	1.78	55.90	39.37	97.05	11.33
总计	21.76	524.07	310.69	856.52	100.00
占比(%)	2.54	61.19	36.27	100.00	

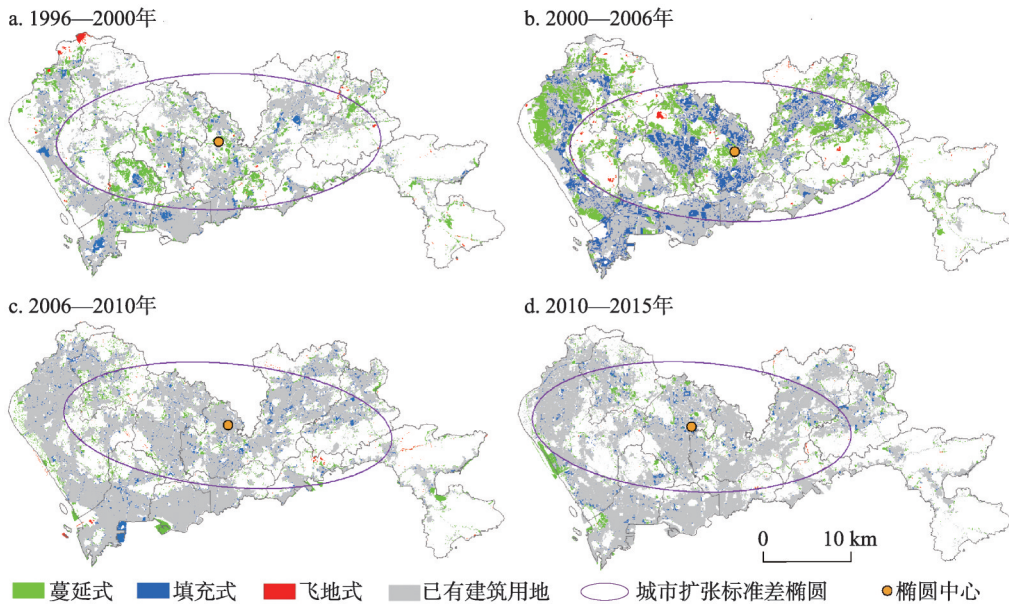


图6 1996—2015年深圳市城市扩张过程

Fig. 6 The process of urban expansion in Shenzhen during 1996-2015

生态保护控制线的影响,城镇建筑用地的可扩张区域变得有限,因而扩张速度减缓、扩张模式以蔓延式为主。空间差异上,罗湖区、盐田区和大鹏新区内可用土地资源趋于饱和,而宝安区、光明区、龙华区、龙岗区、坪山区可建设土地资源相对较多,故而城市扩张中心略微向北部和西部移动。

高程和坡度与深圳市建筑用地景观扩张有显著负相关关系,这符合低海拔、低地势适合发展的规律;同时,高海拔、高地势区域生态系统丰富,多被划为生态控制线而受到保护。坡度的制约作用强于高程,控制其他变量不变时,坡度、高程分别每增加1个单位,建筑用地景观扩张的机会比率将平均减少到原来的0.8841倍和0.9924倍(表5)。

尽管至湖泊、河流的距离对深圳市的建筑用地景观扩张驱动作用不显著,但是对部分行政区具有显著的影响。具体来说,大鹏新区和光明区有趋近湖泊水系区域开发的偏好,而宝安、龙华和罗湖趋于远离。这是因为,其一,自然条件上前者对河流湖泊可达性优于后者;其二,研究期内建筑用地扩张规模上,前者的空间选择性优于后者。

路网可以显著影响深圳市建筑用地景观扩张的方向和速率,距离铁路、轻轨和公路的距离越近,即交通可达性越好地方转化为建筑用地的可能性越高,大鹏新区和龙岗区

表5 Binary Logit 回归模型参数与检验
Tab. 5 Parameters and tests of Binary Logit regression models

	深圳区		宝安区		大鹏新区		福田区		光明区		龙岗区		龙华区		罗湖区		南山区		坪山区		盐田区	
	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值
常数项	1.715262	0.000	-1.164249	0.143	4.261677	0.051	-10.056060	0.262	2.886854	0.010	4.261600	0.000	0.500071	0.677	1.631017	0.551	4.987378	0.001	-2.166807	0.244	1.079330	0.864
GDP密度	0.000049	0.000	0.000128	0.000	0.000035	0.643	-0.000276	0.258	0.000006	0.903	0.000006	0.722	0.000001	0.969	0.000030	0.827	0.000143	0.031	0.000091	0.024	-0.000150	0.452
人口密度	0.000652	0.096	0.002423	0.019	0.002319	0.446	0.021365	0.125	0.000822	0.671	-0.001277	0.121	0.003953	0.002	-0.005364	0.165	-0.012242	0.000	0.002201	0.275	0.012548	0.075
生态控制线	-0.202301	0.000	-0.139287	0.004	0.155235	0.201	-0.592863	0.065	-0.154320	0.006	-0.265578	0.000	-0.295552	0.000	0.187390	0.383	-0.383631	0.001	-0.134058	0.055	-0.329009	0.481
高程	-0.007599	0.000	-0.005788	0.007	-0.023706	0.000	-0.026796	0.204	-0.006354	0.250	-0.013953	0.000	-0.011181	0.002	-0.013120	0.003	-0.020943	0.000	-0.017451	0.000	-0.025301	0.001
坡度	-0.123176	0.000	-0.142193	0.000	-0.059052	0.038	-0.133312	0.171	-0.157702	0.000	-0.142611	0.000	-0.093219	0.000	-0.053011	0.108	-0.097448	0.002	-0.079402	0.003	-0.134423	0.010
至水库、湖泊距离	0.000002	0.769	0.000005	0.789	-0.000304	0.001	0.000339	0.330	-0.000099	0.005	-0.000003	0.859	-0.000019	0.663	0.000153	0.398	0.000194	0.046	0.000133	0.165	0.000527	0.074
至河流、水系距离	-0.000018	0.392	0.000144	0.018	-0.000416	0.001	-0.000330	0.483	-0.000126	0.155	-0.000048	0.478	0.000241	0.025	0.001081	0.041	-0.000068	0.641	-0.000138	0.114	-0.000285	0.563
至铁路、轻轨距离	-0.000053	0.000	0.000085	0.106	-0.000090	0.021	0.001789	0.248	-0.000095	0.187	-0.000251	0.000	-0.000031	0.613	-0.001013	0.004	-0.000033	0.851	0.000307	0.000	-0.000375	0.359
至公路距离	-0.000151	0.000	0.000095	0.276	-0.001015	0.001	-0.001584	0.097	-0.000449	0.000	-0.000251	0.010	-0.000239	0.217	0.000386	0.486	-0.000024	0.880	0.000066	0.671	0.000696	0.219
至街道、居委会距离	-0.031493	0.180	0.036157	0.507	0.253103	0.196	-0.215321	0.622	0.077001	0.442	-0.013348	0.801	-0.073638	0.232	0.085024	0.735	0.107835	0.386	0.050566	0.613	-1.060136	0.096
LRstatistic	2449		696		310		63		257		695		328		53		241		375		88	
P值(LR-statistic)	0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000	
ROC	0.8449		0.8481		0.8472		0.9135		0.8438		0.8253		0.8091		0.8114		0.8590		8.8612		0.8664	

表6 深圳及各区的景观演变驱动力

Tab. 6 Driving forces of landscape evolution in Shenzhen and its districts

变量	深圳区	宝安区	大鹏新区	福田区	光明区	龙岗区	龙华区	罗湖区	南山区	坪山区	盐田区
GDP密度	★	★	○	○	○	○	○	○	★	★	○
人口密度	★	★	○	○	○	○	★	○	☆	○	○
生态控制线	☆	☆	○	☆	☆	☆	☆	○	☆	☆	★
高程	☆	☆	☆	○	○	☆	☆	☆	☆	☆	☆
坡度	☆	☆	☆	○	☆	☆	☆	○	☆	☆	☆
至水库、湖泊距离	○	○	☆	○	☆	○	○	○	★	○	★
至河流水系距离	○	★	☆	○	○	○	★	★	○	○	○
至铁路、轻轨距离	☆	○	☆	○	○	☆	○	☆	○	★	○
至公路距离	☆	○	☆	☆	☆	☆	○	○	○	○	○
至街道居委会距离	○	○	☆	○	○	○	★	○	★	○	☆

注：★代表显著正影响 ($P<0.1$)；☆代表显著负影响 ($P<0.1$)；○代表无显著影响 ($P<0.1$)。

的建筑用地景观扩张受日益便利的公共交通驱动最为突出。罗湖区受铁路和轻轨的驱动作用大于公路，而福田区和光明区则反之。尽管至街道居委会的距离对深圳市建筑用地景观扩张的整体驱动作用不显著，但仍对大鹏新区和盐田区的建筑用地景观扩张具有显著驱动作用，这与两区的开发相对较晚，靠近街区居委会将更易接近人流、市场和社会资源有关。

4 结论

本文描绘了深圳市近20年的景观格局变化和市、区级尺度城市驱动因素，结论如下：

(1) 研究期内，深圳市非自然景观优势性逐步增强，建筑用地在研究期内增加15.81%，以蔓延式(61.19%)和填充式(36.27%)扩张为主；2006—2010年扩张最为迅速，占研究时段扩张总面积的49.7%。林地和建筑用地成为团聚程度较高、破碎性较弱的景观斑块。

(2) 1996—2006年为快速扩张期，林地减少约8.49%，总体景观破碎化降低、景观多样性和均匀性增加。建筑用地景观扩张以蔓延式和填充式扩张为主，扩张中心位于深圳市中北部。2006—2015为低速过渡期，建筑用地景观优势度增加但增速变缓，总体景观破碎度和复杂度上升。扩张模式以蔓延式为主，扩张中心向西北方向移动。

(3) GDP密度、人口密度和交通可达性显著驱动着深圳市建筑用地景观格局扩张。生态控制线和高程、坡度分别是限制和制约建筑用地景观扩张的政策因素和自然条件因素；当其他变量不变时，生态控制线范围、坡度每增加1个单位，建筑用地景观扩张的机会比率将平均减少到原来0.8168倍、0.8841倍。各驱动因素表现出区域差异性，GDP对宝安区、南山区和坪山区，人口增长对宝安区、龙华区，以及交通可达性对大鹏新区、龙岗区驱动分别最为突出。

基于此研究，认为城市化进程中应尽量维护生态区及城市绿地的景观多样性和均匀性，围绕主要驱动因素提高土地利用效率，以期通过维护城市景观格局实现人与生态和谐发展。尽管本文模型残差Moran's I 约为0.2，表明残差空间自相关弱，但驱动因素的空间效应等仍值得进一步探究。

致谢: 真诚感谢匿名评审专家对本文引言梳理、驱动力分析部分的研究思路和科研论文措辞的修改意见, 使本文获益匪浅。

参考文献(References)

- [1] Liu Xiaoping, Li Xia, Chen Yiming, et al. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 2010, 25(5): 671-682.
- [2] Hashem D, Parviz A, Mahdis M. Land use change, urbanization, and change in landscape pattern in a metropolitan area. *Science of The Total Environment*, 2019, 665: 707-719.
- [3] Hao R, Yu D, Liu Y, et al. Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 2017, 579: 718-728.
- [4] Zhou Weiqi, Jiao Min, Yu Wenjuan, et al. Urban sprawl in a megaregion: A multiple spatial and temporal perspective. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 54-66.
- [5] 谢启姣, 刘进华, 胡道华. 武汉城市扩张对热场时空演变的影响. *地理研究*, 2016, 35(7): 1259-1272. [Xie Qijiao, Liu Jinhua, Hu Daohua. Urban expansion and its impact on spatio-temporal variation of urban thermal characteristics: A case study of Wuhan. *Geographical Research*, 2016, 35(7): 1259-1272.]
- [6] Feng Y, Liu Y, Tong X. Comparison of metaheuristic cellular automata models: A case study of dynamic land use simulation in the Yangtze River Delta. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2018: S0198971517305987.
- [7] 陈喜东, 石培基, 王川, 等. 不同情景下河谷型城市建设用地扩张的景观生态格局响应: 以兰州市为例. *生态学杂志*, 2018, 37(11): 3381-3389. [Chen Xidong, Shi Peiji, Wang Chuan, et al. Response of landscape ecological pattern to the expansion of urban construction land in river valley city under different scenarios: A case study of Lanzhou. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(11): 3381-3389.]
- [8] 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. [Yang Wenrui. Spatiotemporal change and driving forces of urban landscape pattern in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(13): 4357-4366.]
- [9] 谢苗苗, 王仰麟, 李贵才, 等. 不同城市化阶段景观演变的热环境效应动态: 以深圳西部地区为例. *地理研究*, 2009, 28(4): 1085-1094. [Xie Miaomiao, Wang Yangling, Li Guicai. Thermal environment effect dynamic of landscape changes in different urbanization phases: A case study of western Shenzhen. *Geographical Research*, 2009, 28(4): 1085-1094.]
- [10] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用. *地理学报*, 2009, 64(12): 1430-1438. [Liu Xiaoping, Li Xia, Chen Yiming, et al. Landscape expansion index and its applications to quantitative analysis of urban expansion. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(12): 1430-1438.]
- [11] 张安琪, 夏畅, 林坚, 等. 景观演化特征指数及其应用. *地理科学进展*, 2018, 37(6): 811-822. [Zhang Anqi, Xia Chang, Lin Jian, et al. Landscape evolution characteristic index and application. *Progress in Geography*, 2018, 37(6): 811-822.]
- [12] Antrop M, Van Eetvelde. Holistic aspects of suburban landscapes: Visual image interpretation and landscape metrics. *Landscape Urban Plan*, 2000, 50(1-3): 43-58.
- [13] Kovács, Zoltán, Farkas, et al. Urban sprawl and land conversion in post-socialist cities: The case of metropolitan Budapest. *Cities*, 2019, 92: 71-81.
- [14] 林目轩, 师迎春, 陈秧分, 等. 长沙市区建设用地扩张的时空特征. *地理研究*, 2007, 26(2): 265-274, 426. [Lin Muxuan, Shi Yingchun, Chen Yangfen, et al. A study on spatial-temporal features of construction land expansion in Changsha urban area. *Geographical Research*, 2007, 26(2): 265-274, 426.]
- [15] 别小娟, 孙涛, 孙然好, 等. 京津冀城市群空间扩张及其经济溢出效应. *生态学报*, 2018, 38(12): 4276-4285. [Bie Xiaojuan, Sun Tao, Sun Ranhao, et al. Urban expansion and its spillover effects on economic growth in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4276-4285.]
- [16] 陈江龙, 高金龙, 徐梦月, 等. 南京大都市区建设用地扩张特征与机理. *地理研究*, 2014, 33(3): 427-438. [Chen Jianglong, Gao Jinlong, Xu Mengyue, et al. Characteristics and mechanism of construction land expansion in Nanjing metropolitan area. *Geographical Research*, 2014, 33(3): 427-438.]
- [17] Li Guangdong, Siao Sun, Chuanglin Fang. The varying driving forces of urban expansion in China: Insights from a spatial-temporal analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 174: 63-77.
- [18] 黎夏, 刘小平. 基于案例推理的元胞自动机及大区域城市演变模拟. *地理学报*, 2007, 62(10): 1097-1109. [Li Xia, Liu Xiaping. Case-based Cellular Automaton for simulating urban development in a large complex region. *Acta Geographica Sinica*, 2007(10): 1097-1109.]
- [19] McGarigal K, Marks B, et al. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. U.S: General Technical Report PNW, 1995: 22-52.

- [20] 潘竟虎, 苏有才, 黄永生, 等. 近30年玉门市土地利用与景观格局变化及其驱动力. 地理研究, 2012, 31(9): 1631-1639. [Pan Jinghu, Su Youcai, Huang Yongsheng, et al. Land use & landscape pattern change and its driving forces in Yumen city. Geographical Research, 2012, 31(9): 1631-1639.]
- [21] Li G, Sun S, Fang C. The varying driving forces of urban expansion in China: Insights from a spatial-temporal analysis. Landscape & Urban Planning, 2018, 174: 63-77.
- [22] 高金龙, 陈江龙, 袁丰, 等. 南京市建设用地区域扩张模式、功能演化与机理. 地理研究, 2014, 33(10): 1892-1907. [Gao Jinlong, Chen Jianglong, Yuan feng, et al. Patterns, functions and underlying mechanisms of urban land expansion in Nanjing. Geographical Research, 2014, 33(10): 1892-1907.]

The evolution of urban landscape pattern and its driving forces of Shenzhen from 1996 to 2015

WU Jiansheng^{1,2}, LUO Keyu¹, ZHAO Yuhao^{1,2}

(1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 2. Key Laboratory for Earth Surface Processes of Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Since China's reform and opening up, Shenzhen has experienced rapid urbanization and dramatic changes in landscape patterns. On the basis of the land use dataset of Shenzhen city from 1996 to 2015, this study utilized landscape metrics, transition matrix and, expansion index to detect the spatiotemporal changes of urban landscape pattern, which analyzed the trend of landscape transfer and urban expansion. Also the major driving forces for landscape pattern changes on municipal and district scales were identified through the Binary Logit regression model. The results showed that: (1) the dominance of construction land landscape in Shenzhen gradually increased during the study period, with the construction land increasing by 15.81%, which occupied a large area of woodland (157.59 km²). The edge-expansion and infilling are the two main growth types of newly developed urban land, accounting for 61.19% and 36.27% respectively. (2) The rapid urbanization occurred from 1996 to 2006, during which landscape diversity and uniformity increased. (3) There was a low-speed urbanization transition from 2006 to 2015, during which landscape fragmentation intensified. The boundaries of the built-up areas became complex. However, due to the influence of land policy and red line of ecological protection, the rate of urban expansion slowed down. The pattern of urban expansion was mainly west-oriented, with the center continuing to shift northwards. (4) On the municipal scale, the GDP density and population density had a significant positive impact on the evolution of landscape pattern, while the ecological control line, elevation, slope and the distance to the road had a significant negative impact. The driving factors had the difference in scale and region, with GDP in Baoan, Nanshan and Pingshan districts, population growth in Baoan and Longhua districts, and traffic accessibility in Dapeng and Longgang districts being the most prominent drivers, respectively. This study can provide scientific practice for landscape pattern change in the process of rapid urban expansion in China.

Keywords: landscape pattern; landscape transition; landscape expansion index; driving forces; urbanization