

DOI: 10.5846/stxb202004210957

虞文娟, 任田, 周伟奇, 李伟峰. 区域城市扩张对森林景观破碎化的影响——以粤港澳大湾区为例. 生态学报, 2020, 40(23): 8474-8481.

Yu W J, Ren T, Zhou W Q, Li W F. Forest fragmentation and its relationship with urban expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao Great Bay Area, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8474-8481.

区域城市扩张对森林景观破碎化的影响 ——以粤港澳大湾区为例

虞文娟¹, 任田^{1,2}, 周伟奇^{1,2,3,*}, 李伟峰¹

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

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京城市生态系统研究站, 北京 100085

摘要: 森林生境丧失与景观破碎化是引起生物多样性下降, 生态系统功能降低的重要原因。量化森林景观破碎化的时空特征及其与城市扩张格局的关系是开展区域生态修复与功能提升的重要基础。本文以快速城市化的典型区域——粤港澳大湾区为研究对象, 基于遥感解译的 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2018 年土地覆盖/利用专题图, 通过多尺度的景观格局分析和统计分析, 定量解析森林景观破碎化的时空演变特征及其与城市扩张格局间的关系。研究结果显示: 1) 1980—2018 年, 大湾区林地覆盖面积缩减 1,274 km², 林地转变为建设用地的面积占林地丧失总面积的比例从 1980—1990 年的 11% 增长至 2010—2018 年的 42%, 表明城市扩张已成为林地丧失的主导因素; 2) 森林景观破碎化程度加剧, 表现为林地斑块密度提高, 平均斑块面积减小, 但破碎类型与程度具有地域差异; 3) 城市扩张幅度与空间格局显著影响林地破碎化, 其中, 城市扩张幅度对林地破碎化的影响更为重要。基于森林景观破碎化与城市扩张的现状, 落实城市增长边界划定、关键斑块-廊道识别与生态网络构建等措施, 有助于保护与连通重要生态空间, 保障和提升生态功能。

关键词: 城市群; 景观格局; 森林景观破碎化; 林地丧失; 多尺度分析; 斑块密度

Forest fragmentation and its relationship with urban expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao Great Bay Area, China

YU Wenjuan¹, REN Tian^{1,2}, ZHOU Weiqi^{1,2,3,*}, LI Weifeng¹

1 State Key laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Beijing Urban Ecosystem Research Station, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Urban expansion is fragmenting the forest landscape, with the consequence of biodiversity loss and ecosystem degradation. Characterizing the forest loss and fragmentation over time and examining its relationship with the urban expansion is crucial for regional ecological restoration. Previously, several studies have focused on how the urban expansion impacts the forest loss and fragmentation by land cover change and landscape dynamics along the urban-rural gradient or in the entire study area over time in an individual city or a region. Results from these studies usually neglected the spatial pattern relationships between forest fragmentation and urban expansion. Since the urban megaregion has become the major form of urbanization in China, the conclusions from a single scale analysis, such as city or regional level, concealed the spatial differences of forest fragmentation change in the regional processes. Here, Guangdong-Hong Kong-Macao Great Bay Area, a rapidly urbanized region in southern China, was selected as a study area and the relationships between forest

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (XDA23030102); 国家自然科学基金面上项目 (41771203)

收稿日期: 2020-04-21; **网络出版日期:** 2020-10-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzhou@cees.ac.cn

fragmentation and urban expansion at multiple scales were explored. Firstly, the spatio-temporal dynamics of forest loss and fragmentation were characterized at the region- and city-level by the landscape metrics based on the land cover and land use maps derived from the remotely sensed imagery in 1980, 1990, 2000, 2010, and 2018. The relationships between the forest fragmentation and the urban expansion at the county-level were then quantified by Pearson correlation analysis. Results showed that 1) The forest area decreased from 33,304 km² in 1980 to 32,030 km² in 2018, with a decrease of 1,274 km² in the past four decades. The percentage of forest being converted to developed land increased from 11% in 1980—1990 to 42% in 2010—2018, suggesting the urban expansion has become the major factor of the forest loss. 2) Forest landscape became fragmented shown by the increment of the patch density and decrement of the mean patch size at the regional level. The landscape metrics change at the city level revealed the type and degree of forest fragmentation varied from different regions. 3) Both the cover percentage of developed land and its spatial pattern, including patch density and mean patch size, had significant impacts on the forest fragmentation. But compared to the spatial pattern, the area increment of the developed land was the major factor. The results from this study suggest that the measures, including delimiting urban growth boundary and constructing ecological network via patch-corridor-matrix paradigm, will help connect the fragmented habitat and restore the ecosystem function.

Key Words: urban megaregion; landscape pattern; forest fragmentation; forest loss; multi-scale analysis; patch density

森林提供着多种重要的生态系统服务,在全球碳循环、水循环、生物多样性保护等方面发挥着重要作用^[1-2]。森林面积缩减和破碎化趋势提高会导致生物多样性下降,外来物种入侵风险增加,以及生态系统质量降低^[3-5]。近二十年来,伴随着快速城市化,在我国的诸多城市和城市群,城市扩张逐渐成为森林面积减少和破碎化的主导因子。因此,研究城市化对森林景观破碎化的影响是开展森林生态系统保护与修复的重要前提。

现有的大量城市化对森林景观破碎化影响的研究,主要聚焦于城市扩张幅度(即城市面积增长)对森林面积减少和破碎化程度的影响。研究主要以林业调查图鉴、遥感解译的土地覆盖数据为基础,通过移动窗口法和景观格局分析法刻画林地破碎类型、破碎程度及其在不同时间段上的变化特征^[6-10]。在此基础上,通过林地与建设用地间的面积转换^[11-13],城-乡梯度上林地景观格局的分异规律^[14-16],以及林地破碎化与社会经济要素间的统计关系^[17-19]揭示城市扩张加剧森林景观破碎化的现象。城市扩张的特征不仅包括城市面积的增长,还包括城市景观格局的变化,如各要素的斑块大小,斑块聚集度,边缘密度等的改变。在给定范围中,各景观要素的面积此消彼长,其配置间的彼此关系也会随时间发生变化^[20-21]。已有研究中,从建设用地格局与林地格局相互关系在长时间序列上变化的角度,探讨城市扩张对森林景观破碎化的影响还较为缺乏。另一方面,以城市群为组织方式推进城市化已成为我国新型城镇化战略的主导方向之一^[22]。由于城市群包含各类生态功能供给区和高度城市化区域,地域差异大。已有相关研究仅从单个城市或区域整体两个尺度开展分析,较难全面反映区域城市化过程中森林景观破碎特征的变化。因此,有必要开展多尺度的区域城市扩张对森林景观破碎化的影响研究。

粤港澳大湾区是我国快速城市化的典型区域,其组成包括:珠三角城市群、香港和澳门特别行政区,人口城市化率在 2018 年已超过 80%,城市扩张幅度大,速度快^[23]。该区位于我国南方林区,森林资源丰富,是水源涵养与生物多样性保护重要区^[24,25]。2016 年,珠三角地区被正式复批为“国家森林城市群建设示范区”。同年,广东省政府启动了森林城市群规划与建设工作^[26]。2017 年,国务院正式提出建设粤港澳大湾区,确立生态优先,绿色发展的原则。因此,研究粤港澳大湾区区域城市扩张与森林景观破碎化之间的定量关系,将有助于区域生境修复与生态功能提升。本文以遥感解译的 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2018 年土地覆盖/利用专题图为基础,通过定量分析区域、城市和县尺度上林地格局与建设用地格局间的关系,探讨区域城市扩张对森林景观破碎化的影响。

1 研究区概况

粤港澳大湾区位于我国东南沿海的珠江三角洲区域,包括广东省 9 个城市(广州、东莞、深圳、佛山、中山、珠海、惠州、江门和肇庆)和香港、澳门 2 个特别行政区,行政范围总面积为 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。湾区地势北高南低,西、北、东三面丘陵山地环绕,中部及东南部以冲击平原为主。由于湾区地处北回归线以南,充沛的光、热、水资源使境内丘陵山地区域分布着丰富的森林资源,植被覆盖占比超过 50%,动植物生物多样性高。2000 年以来,湾区经济发展迅速,城市化水平也相应迅速提高。至 2017 年,全区 GDP 总量超过 10 万亿元,常住人口约为 6900 万人。粤港澳大湾区发展潜力广阔,但目前面临着生态空间萎缩、生态环境功能退化、空气二次污染加剧、以及生活与工业水污染加重等生态环境问题,生态建设处于压力叠加时期。

2 研究方法

2.1 数据来源

本文所用的土地覆盖/利用专题数据包括六种典型类型:林地、草地、水体、耕地、建设用地和其他。该数据基于 30m 空间分辨率的美国陆地卫星 Landsat MSS/TM/ETM+/OLI 影像,采用结合回溯和面向对象的影像分析方法获取 1980—2018 年土地覆盖/利用专题数据^[27]。该方法首先利用面向对象的图像分析方法提取 2018 年土地覆盖/利用信息,并结合高空间分辨率遥感影像进行目视解译,获取高精度的专题数据。基于 2018 年数据,分别提取 2010 年、2000 年、1990 年和 1980 年发生变化的斑块,进一步开展遥感解译工作。未变化斑块的类型属性则与 2018 年保持一致。分层随机抽样的精度验证显示,1980—2018 年共 5 期专题数据的总体精度分别为 79.6%,81.33%,83.00%,85.67%和 88.67%。

2.2 景观格局分析方法

景观格局分析法是定量刻画景观破碎化特征的有效手段。本文选用三个典型指标:斑块类型面积比(Percentage of landscape, PLAND)、斑块密度(Patch density, PD)和平均斑块大小(Mean patch size, MPS),从区域、地市、区县三个尺度,首先分析 1980—2018 年粤港澳大湾区森林景观破碎化的时空特征。为探讨城市扩张格局的影响,本文通过相同指标度量建设用地空间格局的特征。

表 1 景观格局指数及其生态学含义

Table 1 Landscape metrics and description

景观格局指数 Landscape metrics	计算公式 Equation	描述 Description
斑块类型百分比 Percentage of landscape (PLAND)	$\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100\%$	a_{ij} 第 i 类斑块的第 j 个斑块面积, A : 景观总面积; $0 < \text{PLAND} \leq 100\%$ 。 PLAND 度量景观的组分,是某斑块类型占整个景观面积的比例。
斑块密度 Patch density (PD)	$\frac{N_i}{A}$	N_i : 第 i 类景观组成的斑块总数; A : 景观总面积。PD 越大,破碎化程度越大。
平均斑块大小 Mean patch size (MPS)	$\frac{\sum_{i=1}^n a_i}{N}$	a_i 景观中某类斑块的第 i 个斑块面积; N : 该类斑块总数。MPS 反映了一种平均状况,可指示景观的破碎化程度

本研究仅讨论林地与建设用地景观格局特征,因此在类型尺度上计算景观格局指数

2.3 相关分析方法

本研究通过 Pearson 相关分析和偏相关分析定量解析林地格局与建设用地格局间的关系。涉及的变量为六个景观格局指数,分别是:林地比例(X1)、林地斑块密度(X2)、林地平均斑块大小(X3)、建设用地比例(X4)、建设用地斑块密度(X5)和建设用地平均斑块大小(X6)。

3 研究结果

3.1 森林景观格局及其演变特征

1980—2018 年,粤港澳大湾区森林面积从 1980 年的 33304 km² 缩减至 2018 年的 32,030 km², 净变化 1274 km² (图 1)。空间上,林地丧失具有明显地域差异,东南部林地丧失较其余区域明显(图 2)。近 40 年来,2000—2010 年林地丧失幅度明显高于其他时段,消失面积达 1853 km²。进一步的变化分析显示,建设用地逐渐成为林地流转的主要类型。1980—1990 年,林地转变为建设用地的面积占林地丧失面积的比例仅为 11%。1990—2018 年,每 10 年的占比分别为 35%、43% 和 42% (图 3)。林地丧失的区域主要位于广州、东莞、深圳等城市大幅扩张的区域,呈大面积斑块消失的特征(图 4)。位于两翼的肇庆、江门和惠州,林地转变为建设用地的斑块则呈小面积的线状特征(图 4)。

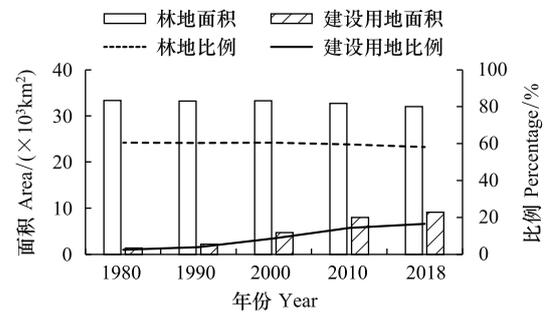


图 1 1980—2018 年林地和建设用地面积及其占国土面积比

Fig.1 Area and percentage of forest land and developed land in 1980 to 2018

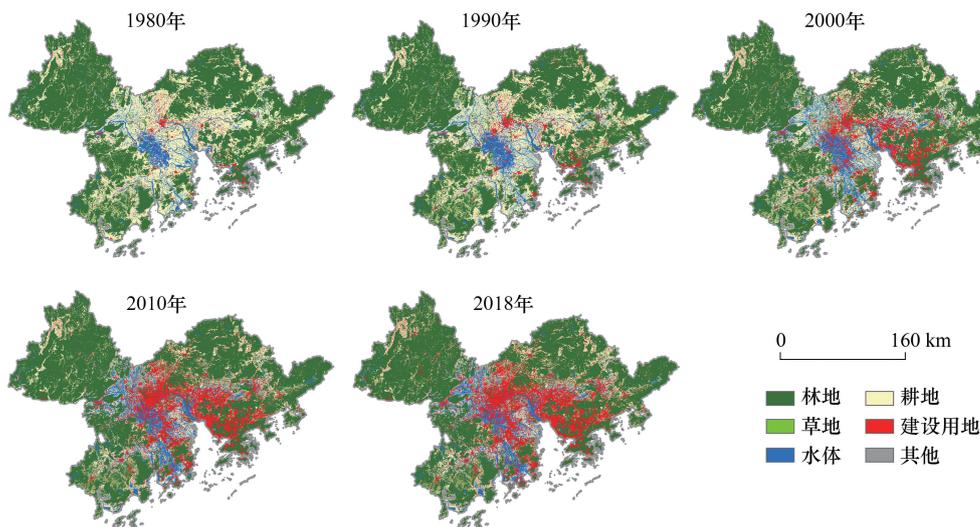


图 2 1980—2018 年土地覆盖/利用空间分布

Fig.2 Spatial pattern of land cover and land use in 1980 to 2018

景观格局分析结果显示,1980—2018 年,全区林地斑块密度从 0.25 个/km² 增长至 0.53 个/km², 平均斑块大小则从 2.37 km² 下降至 1.09 km², 表明大湾区森林景观呈破碎趋势。比较区域内各城市,斑块密度与平均斑块大小变化差异明显。城市快速扩张的东莞与深圳,斑块密度增长明显,其值分别提高了 0.92 个/km² 和 0.79 个/km², 远高于全区变化值,即 0.28 个/km²。平均斑块大小也表现出明显缩减的特点,两市平均斑块面积分别从 1980 年的 2.21 km² 和 2.56 km² 下降至 2018 年的 0.26 km² 和 0.45 km²。而肇庆和惠州两市,林地斑块密度增长程度虽低于全区变化水平,但其平均斑块大小缩减明显。两市平均斑块面积分别从 1980 年的 5.72 km² 和 2.96 km² 下降至 2018 年的 3.65 km² 和 1.57 km², 面积缩减量均高于湾区总体水平(表 2)。

3.2 城市扩张对林地破碎化的影响

区县尺度上,Pearson 相关分析显示,林地斑块密度与建设用地比例显著正相关,而林地平均斑块大小与建设用地比例显著负相关。格局方面,林地斑块密与建设用地斑块密度(除 2018 年外)、建设用地平均斑块大小(除 2000 年和 2010 年)呈显著正相关关系。林地平均斑块大小则与建设用地斑块密度、建设用地平均斑

块大小(仅 1990 年和 2018 年)显著负相关(表 3)。

Pearson 相关分析还显示,建设用地比例与其斑块密度、平均斑块大小也存在显著的相关性。因此,本文利用偏相关分析方法,控制建设用地比例,进一步分析林地格局与建设用地斑块密度间的关系。结果显示,林地斑块密度与建设用地斑块密度主要正相关,林地平均斑块大小与建设用地斑块密度负相关,但两种关系都不显著。

4 讨论

4.1 林地破碎类型及其成因

近 40 年来,粤港澳大湾区林地面积总体下降。不同时期中,林地转变为各类土地覆盖/利用的面积占林地变化总面积比例上升,反映了城市扩张逐渐成为林地丧失的主要原因。早期,坐落在珠江三角洲上的核心城市(广州-佛山)最先得到发展。基于建设成本的考虑,

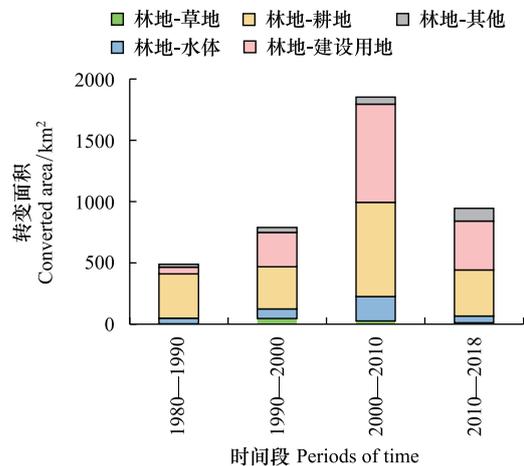


图 3 1980—2018 年林地转换为其他土地覆盖/利用类型的面积
Fig.3 The loss of forest to each land cover/use type in 1980 to 2018

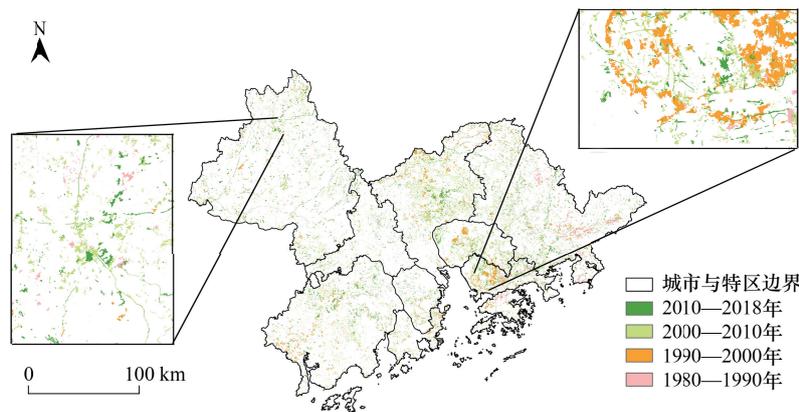


图 4 1980—2018 年林地丧失的空间分布
Fig.4 Spatial pattern of the forest loss in 1980—2018

城市扩张主要侵占周边耕地(图 2)。1990—2018 年,生活与生产空间需求的日益增长使城市进一步向外边缘扩张,侵占农田周边的林地(图 2)。尤其是在早期林地覆盖比例高,城市扩张快速的区域,如深圳和东莞,林地转变为建设用地对林地丧失的贡献更为显著^[28-29]。

林地格局分析结果显示,大湾区森林景观趋于破碎,内部林地破碎化特征区域差异明显。如图 4 和表 2 所示,建设用地占比高的城市,如广州、东莞和深圳,森林景观的破碎化主要受大规模城市扩张的影响。这些区域的林地斑块遭到大幅侵占,残存大量小面积的林地斑块分布在城市 and 周边区域。而林地占比高的城市,如肇庆、惠州和江门三市,林地斑块密度变化并不剧烈,但平均斑块面积显著缩减。这些区域城市扩张规模小,但因处于核心城市与湾区外部的连接区域,路网十分密集,人类干扰活动也较为强烈^[30]。原有连片且大面积的林地斑块除遭到小规模城市扩张的侵占外,还受到日益加密路网的切割,进而形成孔洞的、破碎的林地斑块。结果表明,多尺度分析较好地刻画了湾区内部林地破碎化的类型,反映了不同强度的人类活动对森林景观破碎化的影响。

表 2 1980—2018 年粤港澳大湾区及各地市与特区林地斑块密度和平均斑块大小

Table 2 Patch density and mean patch size of forest land at regional and city level in 1980—2018

城市 Area	斑块密度 Patch density/(个/km ²)					平均斑块大小 Mean patch size/(km ²)				
	1980	1990	2000	2010	2018	1980	1990	2000	2010	2018
大湾区	0.25	0.29	0.37	0.51	0.53	2.37	2.07	1.63	1.16	1.09
广州	0.15	0.15	0.31	0.57	0.67	3.29	3.24	1.66	0.87	0.71
东莞	0.14	0.16	0.21	1.04	1.06	2.21	2.02	1.58	0.29	0.26
深圳	0.24	0.35	0.41	0.85	1.03	2.56	1.62	1.27	0.58	0.45
佛山	0.32	0.42	0.74	0.84	0.81	0.66	0.52	0.33	0.29	0.28
中山	0.26	0.29	0.65	0.78	0.76	0.84	0.74	0.35	0.29	0.29
珠海	0.45	0.48	0.61	0.54	0.56	0.82	0.77	0.58	0.61	0.59
肇庆	0.14	0.14	0.15	0.19	0.21	5.72	5.50	5.16	4.16	3.65
江门	0.51	0.54	0.61	0.62	0.64	1.11	1.08	0.95	0.93	0.88
惠州	0.25	0.31	0.34	0.45	0.44	2.96	2.26	2.11	1.58	1.57
香港	0.23	0.26	0.31	0.35	0.58	3.45	2.94	2.42	2.14	1.27
澳门	0.71	0.83	1.03	0.51	0.59	0.39	0.30	0.26	0.41	0.36

表 3 1980—2018 年林地格局与建设用地格局的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients between forest pattern and developed land pattern in 1980—2018

城市 Area		林地比例	林地斑块密度	林地平均	建设用地比例	建设用地	建设用地
		Forest PLAND X1	Forest PD X2	斑块大小 Forest MPS X3	Developed land PLAND X4	斑块密度 Developed land PD X5	平均斑块大小 Developed land MPS X6
1980	X1	1	-0.32 **	0.46 **	-0.41 **	-0.21	-0.29 *
	X2		1	-0.40 **	0.64 **	0.49 **	0.49 **
	X3			1	-0.23	-0.25 *	-0.17
	X4				1	0.54 **	0.77 **
	X5					1	0.11
	X6						1
1990	X1	1	-0.35 **	0.69 **	-0.48 **	-0.19	-0.30 *
	X2		1	-0.65 **	0.59 **	0.44 **	0.39 **
	X3			1	-0.43 **	-0.39 **	-0.28 *
	X4				1	0.35 **	0.75 **
	X5					1	-0.10
	X6						1
2000	X1	1	-0.64 **	0.68 **	-0.61 **	-0.17	-0.41 *
	X2		1	-0.77 **	0.50 **	0.48 **	0.12
	X3			1	-0.45 **	-0.42 **	-0.18
	X4				1	0.22	0.72 **
	X5					1	-0.31 *
	X6						1
2010	X1	1	-0.59 **	0.68 **	-0.74 **	-0.24	-0.31 *
	X2		1	-0.70 **	0.60 **	0.26 *	0.19
	X3			1	-0.53 **	-0.48 **	-0.07
	X4				1	0.14	0.59 **
	X5					1	-0.41 **
	X6						1
2018	X1	1	-0.43 **	0.70 **	-0.78 **	-0.14	-0.43 *
	X2		1	-0.56 **	0.57 **	-0.01	0.40 **
	X3			1	-0.61 **	-0.28 *	-0.35 **
	X4				1	0.04	0.69 **
	X5					1	-0.46 **
	X6						1

* 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

表 4 控制建设用地面积的林地格局与建设用地斑块密度偏相关分析

城市 Area	林地斑块密度 Forest PD	林地平均斑块大小 Forest MPS	林地斑块密度 Forest PD	林地平均斑块大小 Forest MPS
1980	0.23	-0.15	2010	-0.49
1990	0.30	-0.28	2018	-0.32
2000	0.44	-0.36		

* 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

4.2 森林景观空间管理与功能修复

林地格局与建设用地面积在各时段中的显著关系,即林斑块密度与建设用地面积显著正相关和林地平均斑块大小与建设用地面积显著负相关,表明城市面积的增长加剧了森林景观破碎化。林地斑块密度与建设用地斑块密度、平均斑块大小的显著正相关关系显示了城市扩张的空间形态也对森林景观的破碎化产生影响。但偏相关分析显示,控制建设用地面积比后,林地格局与建设用地格局的关系不显著,表明较之于建设用地空间形态,其面积增长对森林景观破碎化的影响更为重要。

基于遥感解译的土地覆盖/利用专题图显示,大湾区林地覆盖比例高,城镇聚合程度高,形成了以林地为基底,镶嵌水体、农田和城镇的格局。本研究显示,大湾区内部森林景观破碎类型与程度存在明显地域特征,形成原因也不尽相同。差异化的格局将引起不同的生态效应,需针对性地开展生态管理与修复^[4]。在区域规划与管理中,划定城市增长边界能有效控制城市规模,减缓林地的丧失^[31]。另一方面,在开展区域生境修复与功能提升时,需综合考虑不同地域的景观特征,如林地与建设用地在空间上的结构搭配所发挥的作用。在以林地为基础的区城,结合生物活动范围,建构功能性廊道,连通大面积林地斑块,有助于提升生物多样性保护功能。在高度城市化区域,识别关键斑块与廊道,重构生态网络有助于恢复生境的景观连通性,保障生态系统功能的持续发挥^[32-34]。

5 结论

本文以 1980—2018 年的土地覆盖/利用专题数据为基础,利用景观格局分析和统计分析,从区域、城市和区县三个尺度定量刻画了粤港澳大湾区森林景观破碎化的时空特征及其与城市扩张格局间的关系。主要结论如下:

- (1) 1980—2018 年,大湾区森林覆盖面积缩减,城市扩张逐渐已成为林地丧失的主导因素;
- (2) 森林景观破碎化程度加剧,但破碎类型及程度具有地域差异;
- (3) 城市扩张幅度与空间格局显著影响林地破碎化程度,其中,城市扩张幅度对林地破碎化的影响更为重要。

参考文献 (References):

- [1] Gamfeldt L, Snäll T, Bagchi R, Jonsson M, Gustafsson L, Kjellander P, Ruiz-Jaen M, Fröberg M, Stendahl J, Philipson C D, Mikusiński G, Andersson E, Westerlund B, Andrén B, Moberg F, Moen J, Bengtsson J. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature Communications*, 2013, 4: 1340.
- [2] Fernández-Martínez M, Vicca S, Janssens I A, Sardans J, Luyssaert S, Campioli M, Chapin III F S, Ciais P, Malhi Y, Obersteiner M, Papale D, Piao S L, Reichstein M, Rodà F, Peñuelas J. Nutrient availability as the key regulator of global forest carbon balance. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 471-476.
- [3] 李瑶,肖向明,李香萍,马俊,陈帮乾,秦元伟,董金玮,赵斌. 中国森林破碎化多尺度评价. *生物多样性*, 2017, 25(4): 372-381.
- [4] Liu J J, Coomes D A, Gibson L, Hu G, Liu J L, Luo Y Q, Wu C P, Yu M J. Forest fragmentation in China and its effect on biodiversity. *Biological Reviews*, 2019, 94(5): 1636-1657.
- [5] Ma L, Shen C Y, Luo D, Fu S L, Guan D S. Ecosystem carbon storage in forest fragments of differing patch size. *Scientific Reports*, 2017, 7: 13173.

- [6] Riitters K H, Wickham J, O'neill R V, Jones B, Smith E. Global-scale patterns of forest fragmentation. *Conservation Ecology*, 2000, 4(2): 3.
- [7] Li M S, Mao L J, Zhou C G, Vogelmann J E, Zhu Z L. Comparing forest fragmentation and its drivers in China and the USA with Globcover v2.2. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(12): 2572-2580.
- [8] 沈文娟, 徐婷, 李明诗. 中国三大林区森林破碎化及干扰模式变动分析. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(4): 75-79.
- [9] Ren X Y, Lv Y Y, Li M S. Evaluating differences in forest fragmentation and restoration between western natural forests and southeastern plantation forests in the United States. *Journal of Environmental Management*, 2017, 188: 268-277.
- [10] Qian Y G, Zhou W Q, Li W F, Han L J. Understanding the dynamic of greenspace in the urbanized area of Beijing based on high resolution satellite images. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(1): 39-47.
- [11] 李慧颖, 李晓燕, 于皓, 王宗明, 任春颖, 毛德华. 基于多源遥感信息的过去 40 年间吉林省长吉示范区森林面积损失与景观破碎化研究. *干旱区资源与环境*. 2018, 32(2): 128-135.
- [12] 王文静, 韩宝龙, 郑华, 欧阳志云. 粤港澳大湾区生态系统格局变化与模拟. *生态学报*, 2020, 40(10): 3364-3374.
- [13] Zhang Y L, Shen W J, Li M S, Lv Y Y. Assessing spatio-temporal changes in forest cover and fragmentation under urban expansion in Nanjing, eastern China, from long-term Landsat observations (1987-2017). *Applied Geography*, 2020, 117: 102190.
- [14] 杨沅志, 薛冬冬, 张浩, 徐正春. 快速城市化地区城市森林景观破碎化的动态演变分析. *华南农业大学学报*, 2016, 37(4): 97-104.
- [15] 杜文杰, 龚建周, 胡月明, 赵冠伟. 珠江三角洲林地结构现状及景观梯度分异特征. *生态科学*, 2019, 38(2): 67-76.
- [16] Zhou W Q, Huang G L, Pickett S T A, Cadenasso M L. 90 years of forest cover change in an urbanizing watershed: spatial and temporal dynamics. *Landscape Ecology*, 2011, 26(5): 645.
- [17] Gong C F, Yu S X, Joesting H, Chen J Q. Determining socioeconomic drivers of urban forest fragmentation with historical remote sensing images. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 117: 57-65.
- [18] 李明诗, 刘图强, 潘洁. 森林破碎化的社会经济驱动力分析——以美国阿拉巴马州为例. *东北林业大学学报*, 2010, 38(6): 57-59.
- [19] Radeloff V C, Hammer R B, Stewart S I. Rural and suburban sprawl in the U.S. Midwest from 1940 to 2000 and its relation to forest fragmentation. *Conservation Biology*, 2005, 19(3): 793-805.
- [20] Zhou W Q, Zhang S, Yu W J, Wang J, Wang W M. Effects of urban expansion on forest loss and fragmentation in six megaregions, China. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 991.
- [21] 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.
- [22] Fang C L. Important progress and future direction of studies on China's urban agglomerations. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(8): 1003-1024.
- [23] 广东省统计局, 国家统计局广东调查总队. 2019 广东统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [24] 环境保护部, 中国科学院. 全国生态功能区划(修编版). 2015. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126_317777.htm.
- [25] 韩秋萍, 张修玉, 许振成, 郑翔, 谈可可, 邹洁. 珠三角生态屏障区森林生态系统服务功能价值核算——以韶关市为例. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(S2): 430-434.
- [26] 广东省林业局. 建设珠三角国家森林城市群 构建粤港澳大湾区生态安全新格局. *国土绿化*, 2019, (1): 18-23.
- [27] Yu W J, Zhou W Q, Qian Y G, Yan J L. A new approach for land cover classification and change analysis: integrating backdating and an object-based method. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 177: 37-47.
- [28] Yu W J, Zhang Y J, Zhou W Q, Wang W M, Tang R. Urban expansion in Shenzhen since 1970s: a retrospect of change from a village to a megacity from the space. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2019, 110: 21-30.
- [29] Chen J F, Chang K T, Karacsonyi D, Zhang X L. Comparing urban land expansion and its driving factors in Shenzhen and Dongguan, China. *Habitat International*, 2014, 43: 61-71.
- [30] 黄梦娜, 马廷. 中国道路网引起的景观破碎格局及其对保护区的影响. *地球信息科学学报*, 2019, 21(8): 1183-1195.
- [31] 吴欣昕, 刘小平, 梁迅, 陈广亮. FLUS-UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定. *地球信息科学学报*, 2018, 20(4): 532-542.
- [32] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419.
- [33] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 王红扬, 周艳妮, 秦正茂. 湖南省城市群生态网络构建与优化. *生态学报*, 2011, 31(10): 2863-2874.
- [34] 邓金杰, 陈柳新, 杨成韞, 徐志博. 高度城市化地区生态廊道重要性评价探索——以深圳为例. *地理研究*, 2017, 36(3): 573-582.