

DOI: 10.5846/stxb201906101228

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.

Wang W J, Han B L, Zheng H, Ouyang Z Y. Evolution and simulation of ecosystem patterns in Guangdong-Hong Kong-Macau Bay Area. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3364-3374.

粤港澳大湾区生态系统格局变化与模拟

王文静^{1,2}, 韩宝龙^{1,*}, 郑 华¹, 欧阳志云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

摘要:快速城市化是导致粤港澳大湾区生态系统时空格局变化的主要驱动力之一, 模拟生态系统变化趋势对于优化区域土地利用格局、防控城市化的生态风险具有重要意义。以 2000、2005、2010、2015、2018 年 5 期土地利用数据, 分析该区域生态系统格局演变, 并运用 CA-Markov 模型模拟 2025 年的生态系统格局。研究结果表明: (1) 2018 年大湾区的森林、农田和城镇为主要生态系统类型, 分别占区域总面积的 53.99%、22.67% 和 14.51%。(2) 2000—2018 年农田、森林、湿地面积分别下降了 1983、740、278 km², 城镇和草地面积分别上升了 2896、103 km², 城镇面积增长的主要途径是对周围农田、林地和湿地的侵占, 草地面积增长是因为管理经营不善导致部分林地退化为草地。(3) 大湾区的景观多样性和均匀度下降, 景观正在向小斑块趋势发展, 空间连通性下降, 破碎度增加。(4) 模拟 2025 年的生态系统格局发现, 与 2018 年相比, 城镇面积增长了 609 km², 农田和森林分别减少了 309 km² 和 316 km²。基于大湾区生态系统格局变化与模拟发现, 快速城市化区域中, 落实耕地保护红线和生态保护红线制度、保护重要生态空间完整性, 对于降低城市化的生态风险具有重要作用。

关键词: 粤港澳大湾区; 城市群; 生态系统; 景观格局演变

Evolution and simulation of ecosystem patterns in Guangdong-Hong Kong-Macau Bay Area

WANG Wenjing^{1,2}, HAN Baolong^{1,*}, ZHENG Hua¹, OUYANG Zhiyun¹

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

Abstract: Rapid urbanization has been one of the primary drivers of ecosystems change in the Guangdong-Hong Kong-Macau Bay Area (the Great Bay Area). To understand these spatio-temporal dynamics, it is important to simulate ecosystem trend and patterns during regional land use optimization, preventing and controlling the ecological risks of urbanization. Based on land use-land cover (LULC) data for the years 2000, 2005, 2010, 2015 and 2018, this paper analyzed the evolution of ecosystem types and landscape patterns in this region. A CA-Markov model was used to simulate ecosystem pattern in 2025. The results showed that: (1) the forests, farmland and urban land were the main ecosystem types in the Greater Bay Area in 2018, accounting for 53.99%, 22.67% and 14.51% of the total area, respectively. (2) From 2000 to 2018, the area of farmland, forest, and wetland decreased by 1983 km², 740 km² and 278 km² respectively, and the area of urban and grassland increased by 2896 km² and 103 km², respectively. The growth in urban areas came from the conversion of surrounding farmland, woodland and wetland. Due to poor management, portions of woodland degraded to grassland, leading to the growth of the latter. The change rate of ecosystem types in the Greater Bay Area had obvious

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (71804180)

收稿日期: 2019-06-10; 网络出版日期: 2020-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: blhan@rcees.ac.cn

periodical characteristics. The fastest period of urban expansion was from 2000 to 2005, leading to a rapid decline in farmland. The rate of urban expansion and farmland reduction slowed after 2005. The speed of forest reduction accelerated in 2000—2015 and slowed down in 2015—2018. The grassland area increased from 2000 to 2015, with a slow growth rate from 2000 to 2010 and a rapid growth rate from 2010 to 2015, then decreased from 2015 to 2018. From 2000 to 2018, the wetland area continued declining with the same speed. (3) Under the effects of demographic urbanization and LULC urbanization, the landscape pattern changed significantly. Fragmentation and separation increased, and the diversity and evenness of the landscape decreased. The Contagion index (CONTAG) increased and the Division index (DIVISION) increased, indicating that the fragmentation and heterogeneity of the landscape increased. The largest patches of farmland and forestland were destroyed, and the Number of Patches index (NP) increased. Urban patches showed a spreading growth, while the urban landscape's degree of fragmentation and separation fell. (4) The ecosystem pattern in 2025 was simulated based on a CA-Markov model, and the accuracy test was carried out by comparison with the actual data in 2015; the Kappa coefficient was 0.94. Compared with 2018, the urban area is projected to increase by 609 km², extending outward along the larger urban patches, mainly in Guangzhou, Dongguan and Foshan prefectures. The area of farmland and forest ecosystem is projected to decrease by 309 km² and 316 km², respectively. The areas of grassland ecosystem and wetland ecosystem are projected to remain unchanged. Based on the change and simulation of ecosystem patterns in the Greater Bay Area, it was found that the farmland protection red line, ecological protection red line and the protection of important ecological space integrity (all national policies) played important roles in reducing the ecological risk of urbanization in a rapidly urbanizing region.

Key Words: Guangdong-Hong Kong-Macau Bay Area; urban agglomeration; ecosystems; evolution of landscape pattern

生态系统格局直接影响生物地球化学循环、水文循环、生物多样性及生态系统服务,并对社会经济产生深远影响^[1-4]。近二十年来由于城市化带来的经济增长和人口聚集,我国生态系统格局发生了巨大变化,以东部沿海地区的变化最为剧烈^[5-7]。粤港澳大湾区(以下简称“大湾区”)范围包括珠三角城市群的9个城市和中国香港、中国澳门两个特别行政区,是我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,在国家发展大局中具有重要战略地位。在快速城市化的驱动下,大湾区城镇用地需求不断增加,农田和自然生态系统面积下降,生态环境保护与经济发展之间矛盾突出。2019年2月发布了《粤港澳大湾区发展规划纲要》,目标是将大湾区打造成一个充满活力、国际领先、宜居宜业的世界级城市群,鉴于地方规划统一并服从整体协调原则,大湾区内各城市将相继出台新的城市空间发展规划以满足经济发展和生态文明建设的需要,大湾区的生态系统会呈现新的空间格局。因此,深入分析大湾区的生态系统格局变化,模拟未来的发展趋势,对厘清生态系统变化规律和揭示城市化的生态效益具有重要意义^[8-9],也是进行区域规划和制定可持续发展策略的必要条件。

生态系统格局演变是全球气候变化和环境变化等研究关注的重要内容^[10]。生态系统格局演变的研究聚集在生态系统格局变化^[11]、驱动力分析^[12]、生态环境效应^[13-14]及生态系统格局预测模拟^[15]等方面,研究方法上多采用景观格局指数^[11]、土地利用转移矩阵和主成分分析法^[16]等方法。国内外已成功开展了全球、国家和城市群尺度的生态系统监测和演变研究。在全球和国家尺度上,Nowosad等^[17]进行了全球1992—2015年生态系统景观变化评估和制图的研究,Yu^[18]研究了不同情景需求下全球生态系统演变趋势,Chen等^[19]研究了中国1995—2015年的生态系统格局变化。在城市群尺度上,Sun和Zhao^[20]研究了1987—2015年京津冀城市群生态系统时空演变,Yang等^[21]开展了1987—2017年旧金山湾区、纽约湾区、东京湾区和粤港澳大湾区4个湾区城市群的城市扩张过程,发现不同湾区的城市扩张速度和扩张方式不同。针对大湾区的研究包括对大湾区不透水地表景观格局时空变化的研究^[22]、大湾区内5个城市(广州、深圳、珠海、香港和澳门)建成区扩展特征和驱动力^[23]、珠三角城市群土地利用对热岛效应的影响^[24]、珠三角城市群土地利用对生态系统服务的影响^[25]及土地利用效率演变^[26]等。

综上,当前国内有关城市群生态系统演变的研究主要集中在京津冀城市群,而针对大湾区的研究侧重于建成区的格局演变和土地利用的生态效益,缺乏对大湾区城市群整体生态系统空间格局演变的探索。

本研究以大湾区为研究对象,选取 2000、2005、2010、2015、2018 年 5 期土地利用数据,基于 ArcGIS 软件核算生态系统变化、转移矩阵、动态度等指标,揭示大湾区生态系统时空格局演变特征。同时,运用 IDRISI 17.0 软件中的 CA-Markov 模块,基于 2000—2015 年生态系统变化趋势和地形数据,模拟预测 2025 年的生态系统结构,揭示大湾区生态系统的变化趋势,为大湾区生态格局构建和区域总体规划提供决策支持。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

大湾区($111^{\circ}21'—114^{\circ}53' E, 21^{\circ}28'—24^{\circ}29' N$)总面积约 5.6 万 km^2 ,是由广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆 9 个城市,以及中国香港、中国澳门两个特别行政区组成的城市群(图 1)。2017 年大湾区常住人口约 7000 万人,经济规模占广东省 85%,占全国 13%,Hui 等^[27]在 2018 年的研究中预测大湾区经济规模:2030 年大湾区的 GDP 将达到 30.4 万亿元,超过了东京湾区(21.3 万亿)和纽约湾区(14.4 万亿)。大湾区属亚热带季风气候,多年平均年降雨量达 1800 mm,年日照量为 2000 h,年平均气温 $21.4—22.4^{\circ}\text{C}$ 。山地主要分布在大湾区北部的肇庆、广州和惠州及江门南部,大部分地区坐落于珠江三角洲冲积平原上。

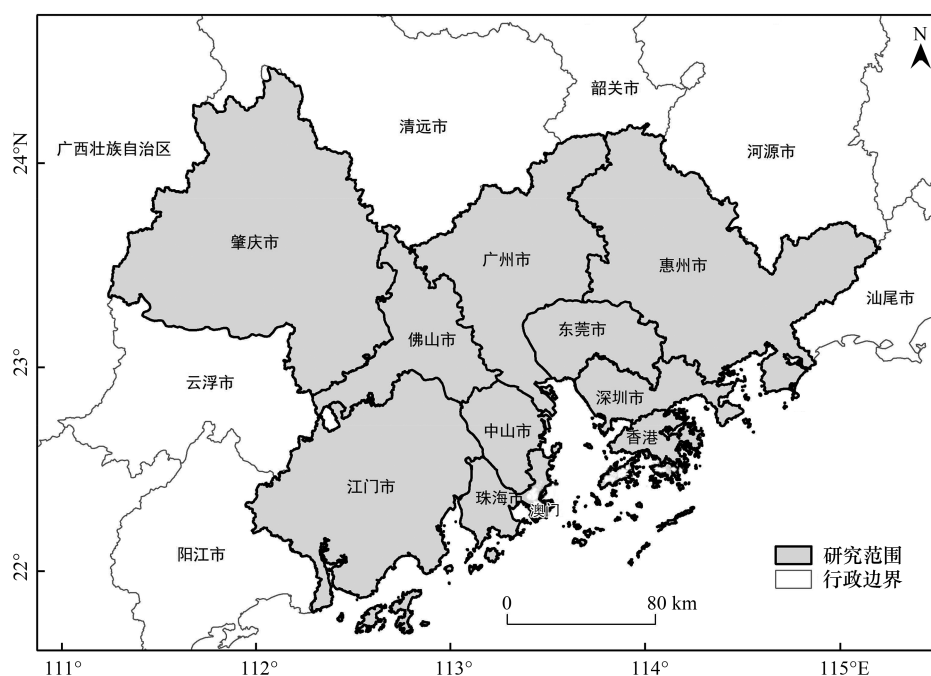


图 1 大湾区地理位置和边界

Fig.1 Geographical location and scope of Guangdong-Hong Kong-Macau Bay Area

1.2 数据来源

本研究所用数据包括:(1)2000、2005、2010、2015、2018 年大湾区遥感影像解译数据来源于中国科学院资源环境数据中心,分辨率为 30 m。本文基于大湾区生态系统组成特征,将其重分类为 6 类生态系统:森林、草地、湿地、农田、城镇、裸地,包括 20 类土地利用类型(表 1)。(2)30 m 分辨率的 DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),坡度数据基于 DEM 数据在 ArcGIS 空间分析模块中计算得到。

表 1 大湾区生态系统类型

Table 1 Ecosystem type of the Guangdong-Hong Kong-Macau Bay Area

生态系统类型	土地利用类型	生态系统类型	土地利用类型
Ecosystem types	Land use types	Ecosystem types	Land use types
农田 Agriculture	水田、旱地	草地 Grassland	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地
城镇 Urban	城镇用地、农村居民点、其他建设用地	湿地 Wetland	河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂、滩地
森林 Forest	有林地、灌木林、疏林地、其他林地	裸地 Bare land	沙地、裸土地、其他用地

2 研究方法

2.1 生态系统结构变化

生态系统结构变化从变化数量、变化速度和来源结构 3 个方面进行分析。首先,运用 ArcGIS 统计 2000—2018 年生态系统类型数量变化;然后采用刘纪远等^[28]提出的土地利用动态度模型,计算 2000—2018 年大湾区各类生态系统的动态度,用来反映大湾区生态系统变化速度和强度,详见公式(1);最后运用 ArcGIS 空间分析模块中的 Tabulate Area 工具计算各生态系统类型的转移矩阵,用来反映生态系统的来源结构。

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

式中, K 为研究时段某一生态系统类型动态度; U_a 和 U_b 分别为研究初期和末期某一生态系统类型的数量(单位: km^2); T 为研究时长(单位:a)。

2.2 生态系统格局变化

景观格局指数能够高度浓缩景观格局信息,反映生态系统的构成和空间配置特征^[29],定量描绘斑块相对位置、大小和形状等特征^[30-31]。本文基于研究目的和研究区特色,共选取了 8 个景观格局指数(表 2)。从类型水平上选取了 4 个景观指数:斑块个数(Number of patches, NP)、最大斑块指数(Landscape shape index, LPI)、景观形状指数(Landscape shape index, LSI)、分离度指数(Split index, SPLIT),用来分析 6 类生态系统的格局变化;从景观水平上也选择了 4 个景观指数:香农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)、香农均匀度指数(Shannon's evenness index, SHEI)、蔓延度指数(Contagion index, CONTAG)、分割度指数(Division index, DIVISION),用来分析全局景观变化。景观格局指数由 Fragstats 4.2 软件计算得出。

表 2 景观格局指数及意义

Table 2 Landscape indexes and significances

景观指数	类别	含义
Landscape indexes	Classes	Significance
斑块个数 NP Number of patches	斑块类型水平	反映景观的空间格局,是对整个景观破碎度的描述,值越大,景观破碎度越高
最大斑块指数 LPI Largest patch index	斑块类型水平	指景观最大斑块占据的程度,是对景观类型优势度的描述,反映人类活动的方向和强度
景观形状指数 LSI Landscape shape index	斑块类型水平	反映斑块边界的形状特征、复杂程度和斑块边缘效应,当只有一个正方形斑块时指标值为 1,值越大,斑块越不规则,斑块类型越复杂
分离度指数 SPLIT Split index	斑块类型水平	分离度指数随景观分化成较小的斑块,分离度指数值逐渐增大,当景观达到最大程度的细化,指标值最大
香农多样性指数 SHDI Shannon's diversity index	景观水平	反映景观系统结构组成的丰富度、复杂度和异质性,值越大,表明景观结构组成丰富和复杂、破碎化程度高,或各斑块类型面积比例更均衡
香农均匀性指数 SHEI Shannon's evenness index	景观水平	反映景观结构的要素比和均匀度,值趋近 1 时优势度低,说明景观中没有明显的优势类型且各斑块类型在景观中均匀分布,值较小时优势度一般较高,可以反映出景观受到一种或少数几种优势斑块类型所支配
蔓延度指数 CONTAG Contagion index	景观水平	反映景观里不同斑块类型的团聚程度或延展趋势,值越高,景观连通性越高
分割度指数 DIVISION Division index	景观水平	反映景观的破碎化程度

2.3 生态系统变化模拟

本文采用 IDRISI 软件的 CA-Markov 模型模拟大湾区 2025 年的生态系统格局特征。CA-Markov 模型综合了 CA 模型的空间模拟能力和 Markov 模型的数量变化预测优势,对空间和数量的变化都有较好的模拟效果^[32]。本研究在不考虑社会经济发展和城市规划控制,仅考虑坡度和高程两个地形因素的前提下,模拟自然条件下大湾区的生态系统变化趋势。首先,将 2005、2010、2015 年的生态系统数据、坡度和高程数据均转化为 ASCII 码文本,导入软件并进行预处理;其次,运行 Markov 模块,计算 2005—2010 和 2010—2015 的转移概率矩阵和转移面积矩阵;然后,基于 2010 年的生态系统结构、坡度和高程数据,模拟 2015 年的生态系统结构,并与 2015 年的实际数据对比,计算 Kappa 系数验证模拟精度;最后,基于 2015 年现状生态系统,以 10 年为步长,预测 2025 年的生态系统结构。Kappa 系数的值域为 $[-1, 1]$, $Kappa > 0.6$ 说明模拟结果与现状具有显著一致性, $Kappa > 0.8$ 则几乎与现状完全一致^[33]。

3 结果与分析

3.1 生态系统面积变化

3.1.1 生态系统组成和结构变化

2000—2018 年大湾区的城镇和草地面积增长,农田、森林和湿地面积下降(图 2)。大湾区的城镇生态系统面积变化最大,增长了 2596 km²;农田生态系统缩减最多,减少了 1983 km²;森林生态系统和湿地生态系统也呈下降趋势,分别减少 740 km²和 278 km²;草地生态系统呈缓慢上升趋势,共增加 103 km²;裸地增长了 2 km²。

从图 2 中可以看出,11 个行政区的城镇扩张趋势不同。广州、佛山和东莞的城镇增长速度最快,增长面积分别为 521、500、495 km²,其中广州和东莞城镇面积增长主要来源于农田,佛山市主要来源于农田和湿地;惠州、深圳和中山的城镇增速也较快,主要来源是农田,还有部分来源于森林;江门、肇庆和珠海的城镇扩张缓慢,江门和珠海的城市扩张主要侵占森林,肇庆的城镇面积增长来源于农田和森林。

表 3 2000—2018 年生态系统面积变化

Table 3 Changes of ecosystem area from 2000 to 2018

生态系统类型 Ecosystem types	2000		2018		变化量 Change/km ²
	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%	
农田 Agriculture	14452	26.28	12469	22.67	-1983
森林 Forest	30422	55.33	29682	53.99	-740
草地 Grassland	1113	2.02	1216	2.21	103
湿地 Wetland	3904	7.10	3626	6.60	-278
城镇 Urban	5083	9.24	7979	14.51	2896
裸地 Bare land	8	0.01	10	0.02	2

3.1.2 生态系统动态变化

2000—2018 年大湾区各类生态系统变化速度的阶段性特征明显(表 4),2000—2005 年生态系统变化速度最快,2005 年后生态系统变化速度降低。2000—2005 年农田面积下降速度最快,约减少 1373 km²,动态度达 -1.9%,从 2005 年开始,农田面积缩减速度降低。2000—2015 年森林下降速度不断加快,2015—2018 年下降速度减缓。草地面积在 2000—2010 年缓慢上升,2010—2015 年迅速增加,动态度达 1.93%,但 2015—2018 年草地面积转而呈现下降趋势。2000—2018 年湿地面积持续下降,速度几乎保持不变。2000—2005 年城镇的增长速度最快,动态度高达 6.46%,2005 年开始,城镇扩张速度趋缓。裸地在 2010—2015 年动态度最高,增加了 2.7 km²,其他时间面积变化较小。

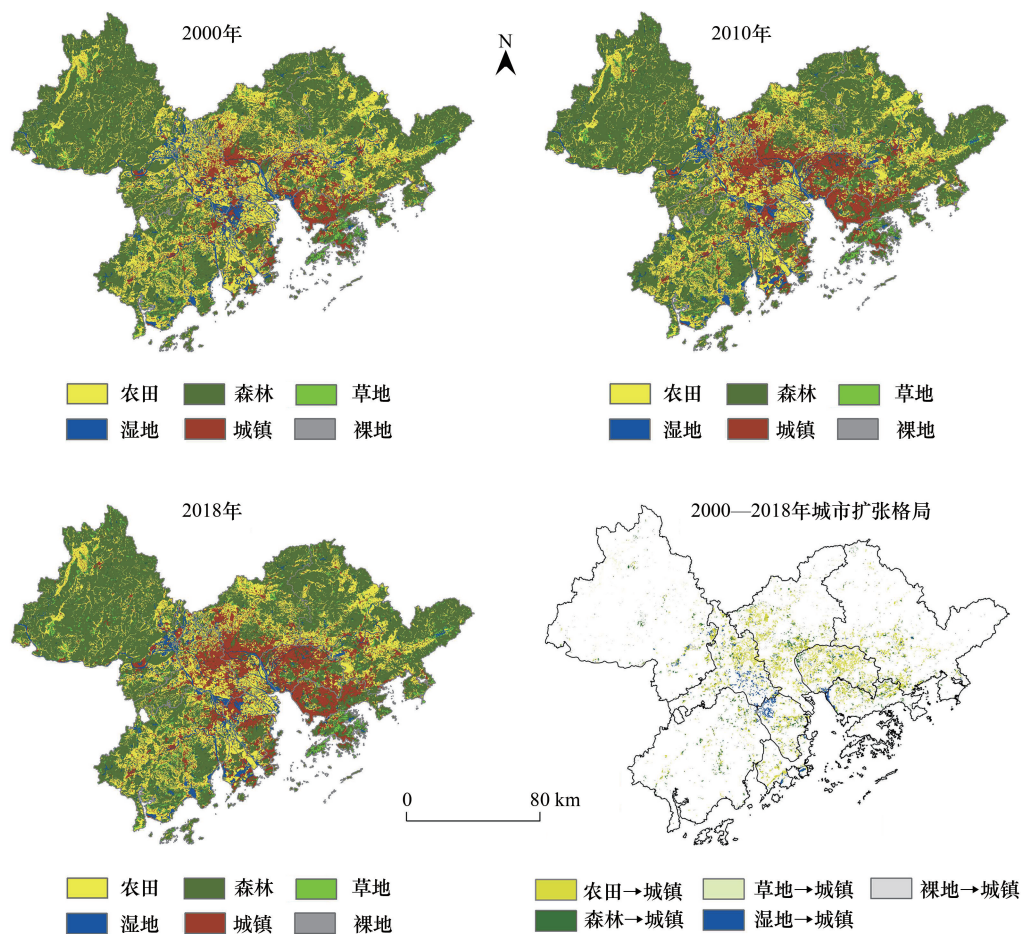


图 2 2000—2018 年生态系统变化

Fig.2 Changes of ecosystem from 2000 to 2018

表 4 生态系统面积与动态度变化

生态系统类型 Ecosystem types	2000—2005		2005—2010		2010—2015		2015—2018	
	面积 Area/km ²	动态度 Dynamic degree/%	面积 Area/km ²	动态度 Dynamic degree/%	面积 Area/km ²	动态度 Dynamic degree/%	面积 Area/km ²	动态度 Dynamic degree/%
农田 Agriculture	-1372.69	-1.90	-290.89	-0.44	-242.88	-0.38	-84.44	-0.22
森林 Forest	-207.38	-0.14	-226.87	-0.15	-273.26	-0.18	-38.66	-0.04
草地 Grassland	6.77	0.12	6.91	0.12	108.56	1.93	-18.94	-0.51
湿地 Wetland	-77.82	-0.38	-89.27	-0.42	-77.05	-0.41	-33.51	-0.31
城镇 Urban	1642.20	6.46	595.47	1.77	481.83	1.32	176.42	0.75
裸地 Bare land	0.32	0.82	-0.22	-0.54	2.70	6.77	-0.29	-0.91

3.1.3 生态系统转移矩阵

大湾区城镇面积增长主要来源于农田、林地和湿地,草地的增长主要来源于林地(表 5)。城镇生态系统以转入为主,18 年共转入 3034 km²,有 1877 km²来源于农田,663 km²来源于森林,459 km²来源于湿地;森林、湿地以转出为主,除大部分转为城镇,还有部分转出为农田和草地。草地以转入为主,主要来源是森林。

3.2 生态系统格局变化

3.2.1 类型尺度的变化

类型尺度上的景观指数表明(表 6),森林的最大斑块指数(LPI)远大于其他生态系统类型,聚集程度高,其次是湿地;2000—2018 年农田和森林的斑块个数(NP)上升,最大斑块指数下降,形状指数下降,整体斑块的破碎化程度增加,分离度增加;湿地斑块虽然斑块个数下降,破碎度降低,最大斑块指数下降,分离度增加;城镇和草地的形状指数下降,受人为影响大,形状趋于规则化,斑块个数下降,破碎化程度和分离度降低,呈填充式或蔓延式发展。

表 5 2000—2018 生态系统类型转移矩阵/km²
Table 5 Ecosystem type transfer matrix from 2000 to 2018

生态系统类型 Ecosystem types		2018 年						总面积 Total area
		农田 Agriculture	森林 Forest	草地 Grassland	湿地 Wetland	城镇 Urban	裸地 Bare land	
2000 年	农田 Agriculture	—	272	15	249	1877	0	2413
	森林 Forest	256	—	171	56	663	0	1146
	草地 Grassland	11	48	—	4	34	0	97
	湿地 Wetland	90	39	9	—	459	3	600
	城镇 Urban	68	42	6	20	—	0	136
	裸地 Bare land	0	0	0	0	1	—	1
	总面积 Total area	425	401	201	329	3034	4	4393

表 6 斑块类型水平的景观指数变化
Table 6 Changes in landscape index of class level

生态系统类型 Ecosystem types	斑块个数 NP		最大斑块指数 LPI		形状指数 LSI		分离度指数 SPLIT	
	2000	2018	2000	2018	2000	2018	2000	2018
农田 Agriculture	6055	6274	1.71	0.91	197.89	192.04	1050.76	1826.48
森林 Forest	5253	5524	16.14	15.94	118.22	117.77	25.06	25.71
草地 Grassland	4673	2830	0.05	0.05	99.23	97.36	1105.98	1035.31
湿地 Wetland	6567	4988	3.48	3.33	140.05	134.84	821.14	899.56
城镇 Urban	30261	8791	1.22	2.03	155.94	120.11	5377.96	1339.02

3.2.2 景观尺度的变化

景观尺度的景观指数表明(表 7),2000—2018 年多样性指数、均匀度指数和蔓延度指数呈下降趋势,分割度指数上升,说明斑块的聚集程度降低,景观斑块向小斑块趋势发展,破碎化程度增加。

表 7 景观水平的景观指数变化
Table 7 Changes of landscape index of landscape level

年份 Year	香农多样性指数 SHDI	香农均匀度指数 SHEI	蔓延度指数 CONTAG	分割度指数 DIVISION
2000	1.168	0.6004	65.12	0.9577
2005	1.195	0.6140	64.56	0.9575
2010	1.202	0.6178	64.43	0.9580
2015	1.214	0.6240	64.11	0.9586
2018	1.215	0.6242	64.11	0.9587

3.3 生态系统变化预测

基于 IDRISI 软件中 CA-Markov 模块模拟了 2015 年生态系统结构,并与 2015 年实际数据对比进行精度检验,Kappa 系数高达 0.94,模拟结果与现状具有较高的一致性。基于 2010—2015 年生态系统变化趋势、2015

年生态系统现状、坡度和高程数据,模拟 2025 年大湾区的生态系统格局(图 3)。结果发现:与 2018 年数据相比,城镇生态系统面积增长了 609 km^2 ,农田和森林生态系统面积均呈下降趋势,分别减少了 309 km^2 和 316 km^2 ,草地生态系统、湿地生态系统面积变化不大。

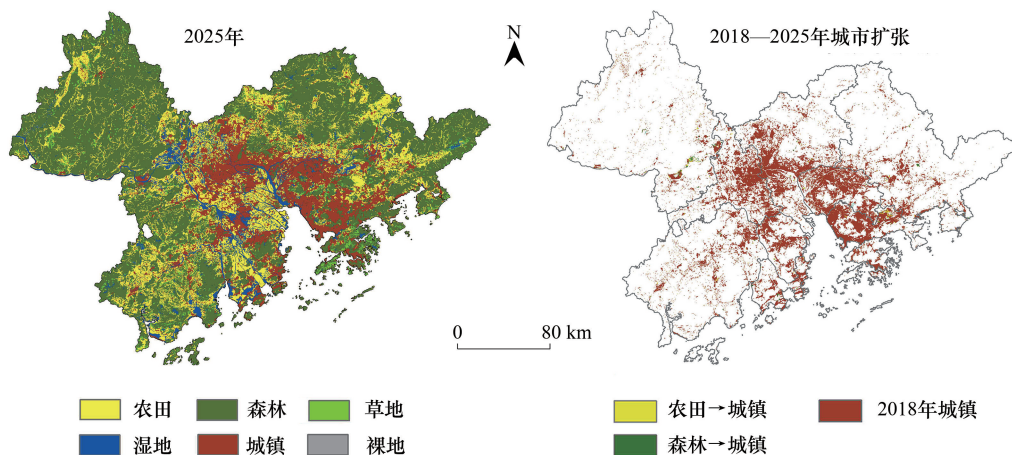


图 3 2025 年生态系统格局与城市扩张

Fig.3 Comparison of ecosystem structure between 2018 and 2025

4 讨论

4.1 自然生态系统面积下降,斑块破碎度和分离度增加为主要变化特征

大湾区城镇生态系统面积的增长主要来源于农田生态系统和森林生态系统,区域景观破碎度和分离度上升。大湾区发展过程中,农田面积下降速度最快,最大斑块指数降低了一半,说明最大的农田斑块一半被城镇侵占,农田完整性被破坏;森林是大湾区主要的生态系统类型,城市化发展过程中面积不断下降,大型斑块被破坏,斑块间的连通度大幅下降;城镇和草地的斑块个数下降,最大斑块指数上升,逐渐由小斑块聚集成大斑块,斑块的破碎度和分离度下降。

大湾区 2000—2018 年城镇生态系统增长 5.27%,农田和森林分别减少 3.61%和 1.34%。与我国长三角城市群和京津冀城市群相比,大湾区生态系统变化较小。2000—2015 年长三角城市群的城镇增长 7.59%,农田减少了 8.01%^[34];1998—2018 年京津冀城市群的城镇增长了 16.67%,草地和森林分别减少了 13.73%、3.22%^[35]。

4.2 土地城市化和人口城市化是大湾区生态系统变化的重要原因

人口城市化和土地城市化促使大湾区城镇生态系统面积大幅增长,农田、林地和湿地生态系统面积下降。

①土地城市化带来城镇生态系统面积的大幅增长,人口城市化的发展必然伴随着配套基础设施面积的增长,城镇生态系统面积增长中约 40%是机场和交通用地等基础设施的增加。

②大湾区的城镇生态系统主要分布中部平原区,大多被农田包围,土地城市化的主要来源是农田生态系统,2000—2005 年是土地城市化最快的一个阶段,农田面积缩减速度最快,随着《关于进一步加强和改进耕地占补平衡工作的通知》和《广东省基本农田保护区管理条例》等农田保护条例的发布,城镇生态系统增长速度趋缓,大大缓和了农田生态系统大幅减少的现象。

③土地城市化导致大量森林生态系统转化为城镇生态系统,森林面积大幅下降,2010—2015 年间,由于管理不当和乱砍滥伐,部分林地退化为草地,带来了森林面积的下降和草地面积的增长。

④大湾区湿地生态系统面积下降有以下两个原因:快速城市化导致土地开发强度增加,大量湿地转化为建设用地;人口城市化快速发展,农村劳动力外出务工,大量迁移到城市,使基塘疏于管理,出现废弃和富营养化的情况,加速了基塘向经济效益更高的建设用地转化的趋势。湿地生态系统面积下降主要以桑基鱼塘农业类型中的基塘水

域下降最为显著, Sun 等人通过遥感解译发现, 佛山和中山的桑基鱼塘从 2000 年的 1528.36 km² 减少至 2015 年的 1064.03 km², 主要大量转化为建设用地^[36-37], 与本文的研究结果一致。

土地城市化造成了大湾区的景观破碎化和分离度上升。景观的破碎化与城市化有直接联系, 城市扩张导致景观的多样性和均匀度降低, 造成景观的破碎化和异质性^[38-40]。Jiao 等人研究了珠江三角洲 9 个城市在 1985—2015 年间生态系统格局变化, 发现珠三角的景观多样性指数上升, 破碎化程度增加, 空间连通度下降^[41], 该结果与大湾区 2000—2015 年生态系统格局变化趋势一致。

4.3 2025 年大湾区森林生态系统仍呈下降趋势, 区域生态风险增加

大湾区的生态系统变化趋势为城镇生态系统面积上升, 农田生态系统和自然生态系统面积下降, 模拟 2025 年的生态系统格局发现, 森林生态系统和农田生态系统仍存在下降风险。Liu 等人在对珠三角生态系统格局研究中发现农田、森林和湿地生态系统面积下降^[25], 本文与其得到一致的结论。森林具有高的生态系统服务价值, 其面积的下降导致整个大湾区的生态系统服务下降, 并带来一系列的生态环境问题, 增加生态风险。大湾区未来发展趋势与 2019 年印发的《粤港澳大湾区发展规划纲要》中生态环境坚持节约优先和保护优先的方针不符, 会影响大湾区发展战略的实施。

4.4 大湾区未来发展建议

(1) 通过生态保护红线等措施加强自然生态系统保护和修复

大湾区农田生态系统和森林生态系统面积下降会带来一系列生态风险, 在控制城镇生态系统扩张的同时, 应严格落实耕地保护红线和生态保护红线的划定工作, 针对不同发展趋势的城市实施差异化策略。深圳、中国香港和中国澳门 3 个城市基本实现 100% 的城市化, 城市内没有农田或面积极小, 这 3 个城市绿地面积增长空间小, 可以通过改善绿地质量、增加立体绿化等方式来提升城市生态系统服务供给水平。东莞、中山、珠海和佛山这 4 个城市城镇扩张速度快, 绿地面积较小, 可以通过合理增加绿地面积和优化绿地网络结构等方式提升生态系统服务。广州、江门、肇庆和惠州 4 个城市面积大, 森林覆盖度高, 应严格控制城市扩张, 并通过生态修复和红线划定等方式加强森林生态系统的保护, 构建生态屏障, 打造高质量的生态腹地。

(2) 构建生态廊道, 保护和增强重要生态空间的完整性

生态廊道可以增强重要生态源地之间的联系, 保护重要生态源地的连通性和完整性^[42]。可以通过构建生态廊道连通大湾区主要的生态斑块, 不仅可以保障重要生态源地生态系统服务的长期稳定供给, 还可以优化整个地区的生态网络, 强化生态源地之间的连通性, 加强生态系统服务的流动和野生动物的基因交流。

5 结论

2000—2018 年, 大湾区的城镇面积增加, 主要来源是农田、森林和湿地, 部分林地由于管理不善转化为草地, 草地生态系统面积增长; 2000—2005 年是城镇扩张速度最快的一个阶段, 2005 年开始, 城镇扩张速度放缓。城镇扩张带来了大湾区景观破碎化和分离度增加, 斑块间的连通性降低。大湾区的生态系统格局变化, 主要是受到土地城镇化和人口城镇化的影响。同时, 模拟 2025 年的生态系统发现, 城镇生态系统沿着较大的斑块向外扩展, 农田和森林面积均呈下降趋势, 生态风险将会升高。

控制城镇扩张规模、增加绿地覆盖率是未来区域可持续发展的主要任务。未来大湾区的发展规划中, 应通过划定生态红线控制城镇生态系统扩张, 并通过增加绿地面积、改善绿地质量、增加立体绿化、加强森林的保护和修复以及构建生态廊道增加生态斑块之间的连通度等方式提高区域生态系统服务。

参考文献 (References):

- [1] Hao R F, Yu D Y, Liu Y P, Liu Y, Qiao J M, Wang X, Du J S. Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 718-728.
- [2] Lausch A, Blaschke T, Haase D, Herzog F, Syrbe R U, Tischendorf L, Walz U. Understanding and quantifying landscape structure-A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics. *Ecological Modelling*, 2015, 295: 31-41.

- [3] Sterling S M, Ducharme A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 385-390.
- [4] Yang G X, Bowling L C, Cherkauer K A, Pijanowski B C. The impact of urban development on hydrologic regime from catchment to basin scales. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(2): 237-247.
- [5] Liu J Y, Li J, Qin K Y, Zhou Z X, Yang X N, Li T. Changes in land-uses and ecosystem services under multi-scenarios simulation. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 522-526.
- [6] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, Ding J Y, Wang S. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 1250-1263.
- [7] Zhu E Y, Deng J S, Zhou M M, Gan M Y, Jiang R W, Wang K, Shahtahmassebi A. Carbon emissions induced by land-use and land-cover change from 1970 to 2010 in Zhejiang, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 930-939.
- [8] 匡文慧, 刘纪远, 邵全琴, 何剑锋, 孙朝阳, 田汉勤, 班艺舫. 区域尺度城市增长时空动态模型及其应用. *地理学报*, 2011, 66(2): 178-188.
- [9] Li X M, Zhou W Q, Ouyang Z Y. Forty years of urban expansion in Beijing: what is the relative importance of physical, socioeconomic, and neighborhood factors? *Applied Geography*, 2013, 38(1): 1-10.
- [10] Mooney H A, Duraipah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(S1): 3665-3672.
- [11] 徐晓然, 谢跟踪, 邱彭华. 1964—2015 年海南省八门湾红树林湿地及其周边土地景观动态分析. *生态学报*, 2018, 38(20): 7458-7468.
- [12] 胡昕利, 易扬, 康宏樟, 王彬, 史明昌, 刘春江. 近 25 年长江中游地区土地利用时空变化格局与驱动因素. *生态学报*, 2019, 39(6): 1877-1886.
- [13] 汪翡翠, 汪东川, 张利辉, 刘金雅, 胡炳旭, 孙志超, 陈俊合. 京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析. *生态学报*, 2018, 38(12): 4307-4316.
- [14] 李守娟, 杨磊, 陈利顶, 赵方凯, 孙龙. 长三角典型城郊土地利用变化及其土壤碳氮响应. *生态学报*, 2018, 38(20): 7178-7188.
- [15] 吕乐婷, 张杰, 彭秋志, 江源. 东江流域景观格局演变分析及变化预测. *生态学报*, 2019, 39(18): 6850-6859.
- [16] 李丽国, 王宇欣, 邱硕, 王平智. 乌鲁木齐市土地利用和覆被生态变化及其驱动力分析. *中国农业大学学报*, 2017, 22(6): 177-188.
- [17] Nowosad J, Stepinski T F, Netzel P. Global assessment and mapping of changes in mesoscale landscapes: 1992-2015. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 78: 332-340.
- [18] Yu G M, Li M X, Tu Z F, Yu Q W, Jie Y, Xu L L, Dang Y F, Chen X X. Conjugated evolution of regional social-ecological system driven by land use and land cover change. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 213-226.
- [19] Chen W X, Chi G Q, Li J F. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995-2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 459-470.
- [20] Sun Y, Zhao S Q. Spatiotemporal dynamics of urban expansion in 13 cities across the Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration from 1978 to 2015. *Ecological Indicators*, 2018, 87: 302-313.
- [21] Yang C, Li Q Q, Hu Z W, Chen J Y, Shi T Z, Ding K, Wu G F. Spatiotemporal evolution of urban agglomerations in four major bay areas of US, China and Japan from 1987 to 2017: evidence from remote sensing images. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 232-247.
- [22] 冯珊珊, 樊风雷. 基于不透水面的粤港澳大湾区景观格局时空变化. *应用生态学报*, 2018, 29(9): 2907-2914.
- [23] 徐进勇, 张增祥, 赵晓丽, 刘斌, 易玲. 近 40 年珠江三角洲主要城市时空扩展特征及驱动力分析. *北京大学学报: 自然科学版*, 2015, 51(6): 1119-1131.
- [24] 牟雪洁, 赵昕奕. 珠三角地区地表温度与土地利用类型关系. *地理研究*, 2012, 31(9): 1589-1597.
- [25] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, Yan H M, Zhang F, Wei X Q. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: a case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 228-238.
- [26] 朱孟珏, 傅晓婷. 粤港澳大湾区土地利用效率的时空特征及其影响机制. *热带地理*, 2017, 37(6): 814-823.
- [27] Hui E C M, Li X, Chen T T, Lang W. Deciphering the spatial structure of China's megacity region: a new bay area—the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in the making. *Cities*, 2018, doi: 10.1016/j.cities.2018.10.011.
- [28] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.
- [29] Fennessy S, Craft C. Agricultural conservation practices increase wetland ecosystem services in the glaciated interior plains. *Ecological Applications*, 2011, 21(sp1): S49-S64.
- [30] 陈希, 王克林, 祁向坤, 李洪斌. 湘江流域景观格局变化及生态服务价值响应. *经济地理*, 2016, 36(5): 175-181.
- [31] 刘怡娜, 孔令桥, 肖焱, 郑华. 长江流域景观格局变化对生态系统水质净化服务的影响. *环境保护科学*, 2018, 44(4): 6-13.

- [32] 王文静, 段忠诚, 韩宝龙. 面向生态系统服务功能优化的建设用地扩张模拟——以徐州市为例. 现代城市研究, 2018, (11): 73-78, 106-106.
- [33] 胡碧松, 张涵玥. 基于 CA-Markov 模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1207-1219.
- [34] Gao J, Wang L C. Embedding spatiotemporal changes in carbon storage into urban agglomeration ecosystem management — A case study of the Yangtze River Delta, China. Journal of Cleaner Production, 2019, 237: 117764.
- [35] 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元. 基于 GEE 的 1998—2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 环境科学, 2019, 40(12): 5473-5483.
- [36] Sun C G, Zhong K W, Ge R B, Zhao Y, Liu X L, Lin T. Landscape pattern changes of coastal wetland in Nansha district of Guangzhou City in recent 20 years//Bian F L, Xie Y C, eds. Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016: 408-416.
- [37] 刘通, 程炯, 苏少青, 郭月婷, 陈旭飞, 徐秋婷. 珠江三角洲桑基鱼塘现状及创新发展研究. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1814-1820.
- [38] Li H L, Peng J, Liu Y X, Hu Y N. Urbanization impact on landscape patterns in Beijing City, China: a spatial heterogeneity perspective. Ecological Indicators, 2017, 82: 50-60.
- [39] Abdullah S A, Nakagoshi N. Changes in landscape spatial pattern in the highly developing state of Selangor, peninsular Malaysia. Landscape and Urban Planning, 2006, 77(3): 263-275.
- [40] Herold M, Goldstein N C, Clarke K C. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 286-302.
- [41] Jiao M Y, Hu M M, Xia B C. Spatiotemporal dynamic simulation of land-use and landscape-pattern in the Pearl River Delta, China. Sustainable Cities and Society, 2019, 49: 101581.
- [42] Fábos J G. Greenway planning in the United States: its origins and recent case studies. Landscape and Urban Planning, 2004, 68(2/3): 321-342.