

DOI: 10.5846/stxb202105271390

吴健生, 易腾云, 王晗. 2000—2030 年深港景观格局演变时空分异与趋势对比分析. 生态学报, 2021, 41(22): 8718-8731.

Wu J S, Yi T Y, Wang H. Comparative analysis of spatial and temporal variation and trend of landscape pattern evolution between Shenzhen and Hong Kong from 2000 to 2030. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8718-8731.

2000—2030 年深港景观格局演变时空分异与趋势对比分析

吴健生^{1,2,*}, 易腾云¹, 王 晗^{1,2}

1 北京大学深圳研究生院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: 自然气候条件相近但社会经济制度差异显著的深圳与香港为我国制度探索与经济建设提供了重要窗口, 两地的景观格局演变规律与发展趋势将深刻影响粤港澳大湾区的生态文明建设进程。以深港两地三期历史土地覆被数据为依据, 应用 CA-Markov 模型预测了 2030 年景观类型, 采用地学信息图谱、景观格局指数等方法对比了深港景观格局的时空分异特征, 并通过地理探测器模型、logistic 回归模型等方法, 探讨了深圳与香港景观格局变化的驱动机制的异同。结果表明: (1) 研究期内, 深港两地景观格局变化显著, 各景观类型之间互相转移频繁。深圳人造地表景观面积将持续增加, 而香港则呈现先减少后增加的趋势; (2) 深港两地的优势景观类型仍然是人造地表与林地。两地景观形状将趋于简单, 相比于香港, 深圳景观在呈现较高多样性的同时具有更为破碎化的特点; (3) 夜间灯光所表征的经济发展水平对两地人造地表的扩张影响很大。在政策规划、社会经济水平、自然地理条件等多种因素的综合作用下, 两地未来景观发展趋同存异。

关键词: 景观格局演变; 驱动机制; 比较研究; 深圳; 香港

Comparative analysis of spatial and temporal variation and trend of landscape pattern evolution between Shenzhen and Hong Kong from 2000 to 2030

WU Jiansheng^{1,2,*}, YI Tengyun¹, WANG Han^{1,2}

1 Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, China

2 Laboratory of Earth Surface Processes of Ministry of Education, College of Urban and Environment Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Shenzhen and Hong Kong, with similar natural and climatic conditions but significantly different socio-economic systems, provide an important window for the institutional exploration and economic construction in China. The evolution pattern and development trend of the landscape pattern of the two cities will profoundly influence the ecological civilization construction process in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Based on three phases of historical land cover data of Shenzhen and Hong Kong in the past 20 years, this study applied CA-Markov model to predict the landscape types in 2030, compared the spatial and temporal divergence characteristics of landscape patterns in Shenzhen and Hong Kong by using geographic information mapping and landscape pattern index, and explored the similarities and differences of driving mechanisms of landscape pattern changes in Shenzhen and Hong Kong by using Geodetector and logistic regression model. The results showed that: 1) From 2000 to 2030, the landscape patterns of Shenzhen and Hong Kong would significantly change with frequent transitions in each landscape type. The area of artificial landscapes in Shenzhen would increase

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2019A1515110896)

收稿日期: 2021-05-27; 接收日期: 2021-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wujs@pkusz.edu.cn

continuously while that of Hong Kong showed a trend of first decreasing and then increasing. 2) The artificial landscapes and forestland would be the dominant landscape types in Shenzhen and Hong Kong. The shape of the landscape would tend to be simpler, with a higher diversity and a more fragmented character in Shenzhen than in Hong Kong. 3) The level of economic development characterized by nighttime lighting had a strong influence on the expansion of artificial surface in both locations. Under the combined effect of various factors such as policy, socio-economic level and naturally geographical conditions, the future landscape development of the two cities tends to be similar while reserving differences.

Key Words: landscape pattern change; driving mechanism; comparative study; Shenzhen; Hong Kong

在自然与经济社会因素的交互作用下,城市景观演变呈现复杂的发展趋势。我国深圳和香港均是粤港澳大湾区(Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area,缩写:the Greater Bay Area(GBA))的重要中心城市和国际化都市,两地仅以一河为界,自然环境相似,对比研究两地城市景观格局的演变规律对于全面提升大湾区生态文明建设水平具有重要科学价值。目前,国内外对于城市景观格局的研究主要通过分析形态和大小各异的景观要素在空间上的分布组合^[1],来探讨城市景观格局的时空异质性。基于景观要素的空间特征计算景观格局指数^[2-3],进而理解和量化评价某地区的景观格局现状,成为分析景观格局的常用方式;同时,应用 Logistic 回归模型^[4]、地理探测器^[5]、增强回归树^[6]等模型探究经济、政策、文化、自然和科技等^[7]诸多因素在内的景观格局演变的驱动机制,也成为协调景观格局发展方向和目标的常用方法;此外,相关学者通过 CA-Markov^[8]、ANN-CA^[9]、CLUE-S^[10]等模型进行未来景观格局的预测成为城市景观格局研究的重要内容。

深港两地区位相邻,具有自然禀赋相似、经济发达、人口稠密的共同特点,但是社会与经济制度存在差异。深港两地的城市发展进程也有所不同,发展模式、制度政策和生态观念迥异^[11-12]。自粤港澳大湾区的概念提出以来,以深圳或香港为研究区的城市热岛^[13]、生态修复^[14]、景观破碎化^[15]、生态系统服务^[16]等城市景观生态问题的研究日渐深入,但是针对两地的景观格局演变规律与趋势系统对比的基础研究还有待进一步加强。城市景观格局的变化能反映出经济发展与城市化水平^[17-18],也是对城市发展政策的折射^[19-20]。在此背景下,本研究基于深港两地的多期历史土地覆被数据,描述了 2000—2030 年深圳和香港的景观格局变化;从两地景观格局演变的时空分异特征入手,试图探讨相同类型的驱动因素在两地景观格局演变过程中的不同作用,旨在挖掘两地在城市发展过程中景观格局演变差异化的直接原因与背景政策,将景观格局融入城市规划与环境管理,为协调和指导两地生态文明建设提供参考。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

深圳与香港位于珠江三角洲地区东南部(北纬 22°8′—22°52′,东经 113°44′—114°38′)(图 1),处于亚热带季风气候区,两地以深圳河为界,水热条件相似。深圳全境地势东南高,西北低,大部分地区地形为低山、平缓台地和阶地丘陵,而香港三面环海,山地多平地少。2020 年,人造地表景观约占深圳国土面积的 46%,林地景观占 28%;香港主要的景观类型则为林地景观,占其国土面积的 54%,人造地表景观排第二,占境域面积的 18%。

1980 年,深圳被设立为我国第一个经济特区,经过 40 余年飞速发展,成为全国 4 个超大城市之一;香港在“一国两制”的基本国策下,于 20 世纪 70 年实现了由

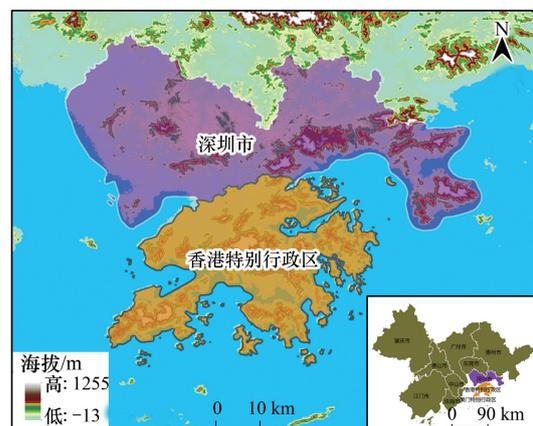


图 1 深港在粤港澳大湾区中的地理区位

Fig. 1 Location map of Shenzhen and Hong Kong in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA)

制造业向服务业的转型,经济长期保持高度繁荣发展。近年来香港经济发展有所放缓,深圳 GDP 增长规模及速度遥遥领先。尽管目前香港人均 GDP 依然远超深圳,但二者差距在不断缩小。2018 年,深圳 GDP 首次超过香港,跃居粤港澳大湾区龙头。2000 年以来深港人均 GDP 变化如图 2 所示,经济数据来源于国家统计局、深圳统计局以及香港特别行政区政府统计处。

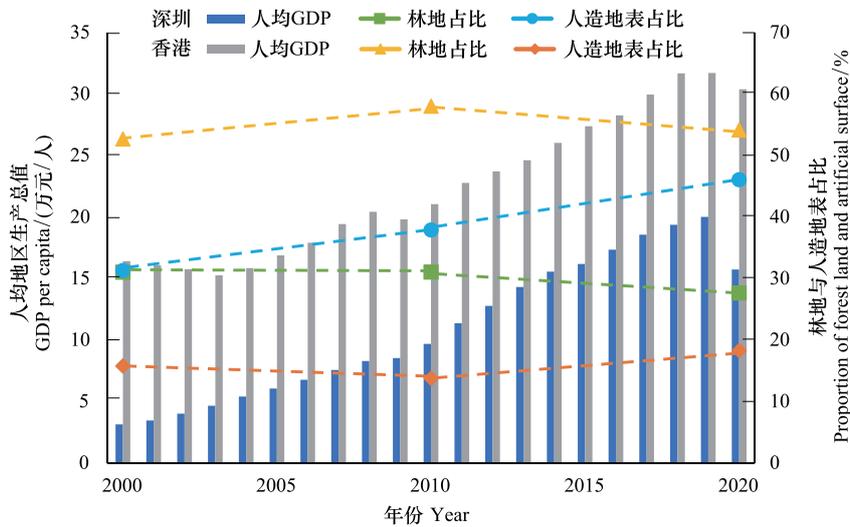


图 2 2000 年以来深港人均 GDP、林地占比、人造地表占比变化趋势

Fig.2 Change trend of per capita GDP, proportion of forest land and artificial surface in Shenzhen and Hong Kong since 2000

1.2 数据来源

研究选用 GlobeLand30(30m 全球地表覆盖数据)2000 年、2010 年、2020 年 3 期土地覆被产品,数据总体精度超过 80%^[21-22],该数据产品将深港地表覆被划分为耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、人造地表、裸地、其它等九类景观。

结合深圳与香港的实际情况,参考现有文献研究进展^[23-25],分析总结社会经济因素、自然因素、气候条件与区位因素四类驱动因素,选取了包括人口密度(X_1)、经济水平(X_2)、高程(DEM)(X_3)、坡度(X_4)、年平均气温(X_5)、年平均降水(X_6)、距主要铁路距离(X_7)、距主要公路距离(X_8)、距三级以上水系距离(X_9)在内的 9 个驱动因子。目前已有许多文献证明了夜间灯光数据核算国内生产总值的可行性^[26-28],本文选择夜间灯光数据代替 GDP 统计数据,能够较好表征经济发展的空间异质性。研究中涉及到的相关数据来源见表 1。

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据类型 Data type	数据/因子 Data/Parameters	年份 Year	分辨率 Resolution	来源 Source
基础数据 Basic data	土地覆盖数据	2000/2010/2020	30m	http://www.globallandcover.com/
	行政区划数据	2015	—	http://www.resdc.cn/
社会经济因素 Socio-economic factors	人口密度(X_1)	2015	1km	https://www.satpalda.com/product/landscan/
	夜间灯光数据(X_2)	2015	1km	https://doi.org/10.7910/DVN/YGIVCD
自然因素 Natural factors	DEM(X_3)	2009	30m	ASTERGDEM2
	坡度(X_4)	2009	30m	由 DEM 计算得来
气候因素 Climate factors	年平均气温(X_5)	2015	1km	https://www.resdc.cn/
	年平均降水(X_6)	2015	1km	https://www.resdc.cn/
区位因素 Locational factors	距主要铁路距离(X_7)	2015	—	https://www.webmap.cn
	距主要公路距离(X_8)	2015	—	https://www.webmap.cn
	距三级以上水系距离(X_9)	2015	—	https://www.webmap.cn

2 研究方法

2.1 地学信息图谱

土地覆盖的变化影响了景观斑块类型和时空配置,进而引起景观格局的整体改变^[29]。地学信息图谱是一种以多维符号与动态可视化技术,通过抽象概括特征表述区域自然过程或社会经济发展时态演进和空间分异的方法^[30],也常用于景观类型的转移特征分析^[31-33]。景观类型的转移包含转入和转出两个过程,本研究中将景观类型的转入定义为涨势图谱,转出定义为落势图谱,分别表示该类型景观的增加与减少。针对 GlobeLand30 数据集,利用式(1)在 ArcGIS 进行地图代数运算,可以得到景观图谱栅格单元。

$$C = A \times 100 + B \quad (1)$$

式中, C 为研究时段新的景观图谱栅格单元; A 为前一时刻景观图谱栅格单元属性值; B 为后一时刻景观图谱栅格单元属性值。图谱空间单元统一按照土地覆被数据集设定为 30m,时间单元上分别分析 2000—2010 年、2010—2020 年、2020—2030 年 3 个时间段内的景观转移特征。

2.2 景观格局指数分析

景观格局指数能够量化表示景观格局特征^[34],参考相关研究^[2, 35-38],从斑块组成、连通性、形状复杂性、聚集与碎裂化程度四个维度选取指标刻画深圳和香港的城市土地覆盖景观格局特征。在斑块类型水平上选取斑块所占景观面积比例、斑块类型面积、平均最近距离 3 个指标,在景观水平上选取边缘密度、斑块密度、面积加权平均斑块分形、蔓延度、聚集度、Shannon 多样性、Shannon 均匀度 7 个指标。相关指数的具体含义见表 2。

表 2 景观格局指数说明表

Table 2 Description of landscape pattern index

维度 Dimension	景观格局指数 Landscape Metrics	缩写/单位 Abbreviate/Unit	生态学含义 Ecological meaning
组成 Composition	斑块所占景观面积比例	PLAND/%	表示某一斑块类型的总面积占整个景观面积的百分比。比例大则表明该类型为优势景观类型。
	斑块类型面积	CA/(hm ²)	表示景观中同一类型的所有斑块的总面积。
	Shannon 多样性	SHDI	各斑块类型的面积比乘以其值的自然对数之后的和的负值,SHDI 增大表明斑块类型增加或者各斑块类型在景观中均衡化分布。
	Shannon 均匀度	SHEI	Shannon 多样性是指给定景观丰度下的最大可能多样性;SHEI=0 表明景观仅有一中斑块组成,无多样性;SHEI=1 表明有最大多样性。
连通性 Connectivity	平均最近距离	ENN_MN/m	同类型的斑块的最短直线距离之和除以具有最近距离的斑块总数。值越大,表明同类型斑块间隔距离远,分布较离散;反之表明同类斑块呈团聚分布。
形状复杂性 Complexity	面积加权的平均斑块分形数	AWMPFD	表征景观格局总体特征的重要指标。范围[1,2],AWMPFD=1 表示形状最简单的正方形或圆形;AWMPFD=2 代表周长最复杂的斑块类型,通常值的上限为 1.5。
	边缘密度	ED/(m/hm ²)	表征景观被边界的分割程度。值越大,表明景观被分割程度越高;反之景观被分割的程度越低。
聚集和碎裂化 Aggregation and fragmentation	蔓延度	CONTAG/%	表征景观里不同斑块类型的团聚程度或延展趋势。值越大,表明景观连通性越强;反之景观连通性越低。
	聚集度指数	AI/%	表征斑块的聚集程度。值越大,表明斑块聚集越紧密;反之表明斑块聚集越稀疏。
	斑块密度	PD/(个/100hm ²)	表示单位面积给定类型的斑块数目。值越大,表明斑块破碎度越大;反之表明斑块破碎度越低小。

PLAND: Percentage of landscape; CA: Total class area; SHDI: Shannon's diversity index; SHEI: Shannon's evenness index; ENN_MN: Mean Euclidean nearest neighbor distance; AWMPFD: Area-weighted patch fractal dimension; ED: Edge density; CONTAG: Contagion index; AI: Aggregation index; PD: Patch density

2.3 地理探测器

王劲峰等^[39]提出的地理探测器能够用于量化地理要素分层异质性,探究空间上分异地理现象的驱动因

子及其作用大小,包含生态探测器、因子探测器、交互作用探测器和风险探测器 4 个探测器模块。

利用因子探测器可以分析影响深圳与香港整体景观格局变化的各驱动因子的作用大小,而该模型要求输入的自变量 X 为离散的类型变量。为此,本文基于自然断点法将连续变化的自变量因子进行离散化分为 9 类。随后,基于 q 统计量判断 2000—2020 年时间段内,各驱动因子 X 对景观类型 Y 空间变化的解释力度。 q 的值域为 $[0,1]$,其值越大表示驱动因子 X 对景观类型 Y 发生空间变化的解释力度越强,其公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中, L 表示驱动因子 X 的分层或分类; N_h 和 N 分别表示层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别表示层 h 和全区的 Y 值的方差。

2.4 Logistic 回归模型

Logistic 回归模型目前已广泛应用于探究景观变化的驱动力研究中^[40]。本研究中,以 2000—2020 年为研究时段,应用 Logistic 回归模型探究各驱动因子对单一景观类型变化的影响,将各驱动因子连续值作为自变量 X ,标准化后代入计算公式。针对每一类景观,将发生类型变化的栅格值重设为 1,未发生变化的栅格值重设为 0,求解特定景观类型发生转化的概率值作为因变量。随后基于最大似然法,分析深圳与香港景观变化过程的依据和因果关系。景观类型 i 发生转化的概率计算公式如下:

$$\log\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (3)$$

式中, P_i 表示其他景观转化为景观类型 i 的概率; X_m 表示驱动因子; β_n 为对应回归系数值; α 是常数。 β_n 的正负表示该驱动因子能增大或减少转变为景观 i 的概率的贡献; β_n 的绝对值越大,则说明该驱动因子对转化为景观类型 i 的概率贡献越大;反之越小。样本量越大,残差 ε 越接近于正态分布。使用 SPSS 进行 Logistic 回归,采用 Omnibus 检验 P 值进行模型系数的综合诊断, $P < 0.05$ 表示模型总体有意义;以驱动力系数判断其解释力度;利用变量 P 值判断变量留在模型中是否合适,一般而言 $P < 0.05$ 说明变量显著,具有统计学意义;使用 ROC 值检验模型预测效果,其范围在 $[0,1]$ 内,越接近于 1 表示模型预测效果越好。

2.5 CA-Markov 模型

元胞自动机-马尔科夫模型(CA-Markov Model)结合了马尔科夫链(Markov Chain, MC)和元胞自动机(Cellular Automata, CA)^[41]的特点,能够基于历史景观格局演变数据对未来情景的景观格局进行数量模拟和空间分配^[42-44]。本研究中,分别基于深港 2010—2020 年的景观类型转移矩阵,计算深圳和香港两个区域内各景观类型的转移概率 P_{ij} ,应用马尔科夫链对未来各类型景观的数量进行预测,然后在分别分析两个区域各景观类型驱动因子作用大小的基础上,设置 CA 模型迭代次数为 10,每年迭代一次,对预测的景观数量进行空间分配。

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}, 0 \leq P_{ij} < 1 \text{ 且 } \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$S_{(t+1)} = P_{ij} \times S_{(t)} \quad (5)$$

式中, P_{ij} 为景观类型 i 转变为类型 j 的概率矩阵; $S_{(t)}$ 、 $S_{(t+1)}$ 为 t 、 $t+1$ 时期的景观现状图。

依据元胞自动机模型,对 $t+1$ 时刻的各景观类型数量进行空间分配得到其空间分布, S 为元胞有限、离散状态的集合, N 为元胞的邻域, f 为局部空间的元胞转化规则,其公式如下:

$$S(t, t+1) = f(S(t), N) \quad (6)$$

模型精度验证利用 IDRISI 软件中的 CROSSTAB 模块进行。以 2010 年为起始时刻,分别预测得到 2020 年深港两地的景观类型,与 2020 年的实际景观类型进行交叉验证。结果显示,深港两地的预测景观类型图的

Kappa 系数分别为 0.8148、0.8530,模型精度较高,能够反映未来时期的景观格局。故研究以 2020 年为起始时刻,利用通过验证的 CA-Markov 模型,模拟自然增长情境下 2030 年深港景观格局。

3 结果与分析

3.1 深港两地景观类型时空演化特征

裸地景观数量太少不便分析,将其合并至其它用地景观类型,故本研究依据地表覆被类型将研究区分为 8 种景观。根据 GlobeLand30 土地覆盖数据集以及 CA-Markov 模型预测结果,得到 2000—2030 年 4 期深港景观格局分布图(图 3)。

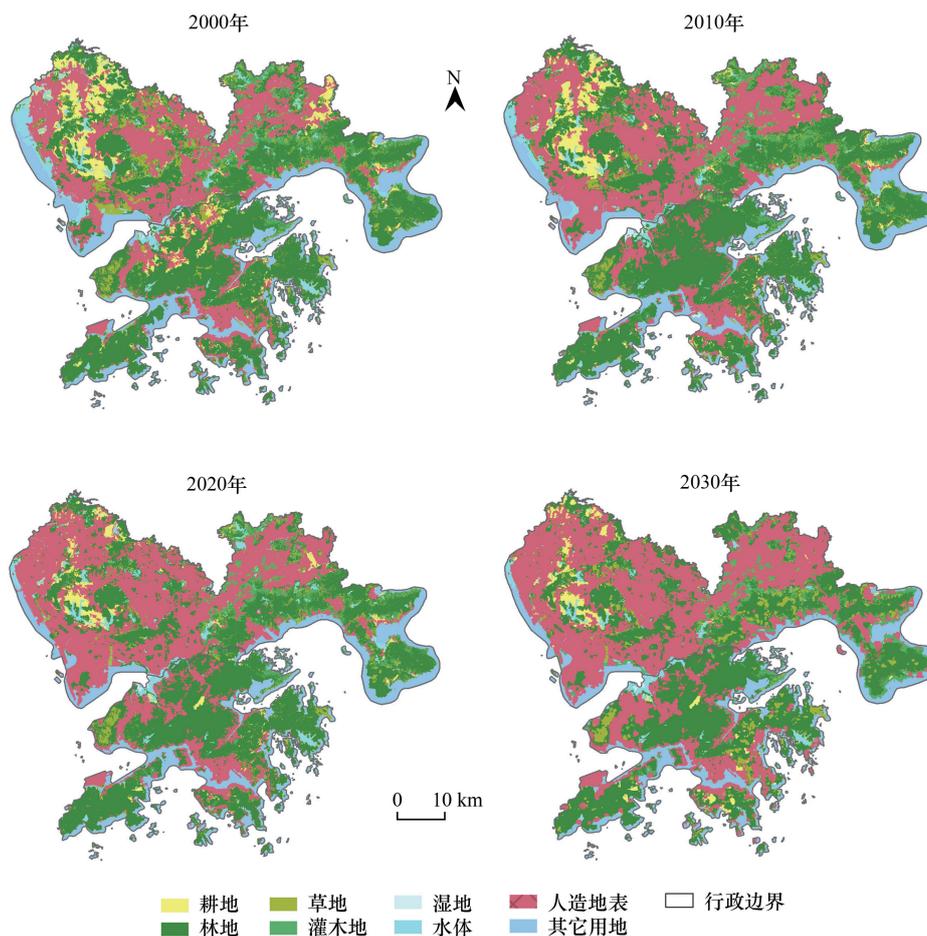


图 3 2000—2030 年深港土地覆被分类图

Fig.3 Landcover map of Shenzhen and Hong Kong from 2000 to 2030

根据 4 期景观格局分布图,计算得到深港土地利用转移矩阵、制作景观类型转移弦图(图 4)与涨落势图谱(图 5),分析深圳与香港 2000—2010 年、2010—2020 年两个时间段内景观类型发生的实际演变特征与 2020—2030 年景观类型的预测变化趋势特征。结果显示,各个时段内深港各类景观面积都发生了程度不一的变化。

2000—2010 年期间,深港两地景观类型演变特征各异。深圳境内人造地表面积迅速扩张,主要集中在宝安区、南山区、龙华新区、坪山新区等地区。具体来看,水域和湿地面积大幅度减少,分别约减少至原来面积的 59%、49%,主要缩减区域分布在宝安区;草地面积减少至原来的 67%左右,主要转变为人工地表和灌木地;耕地面积约减少 22%,多转变为人工地表;林地总面积变化不大。由于人为活动的影响,这个时期的深圳人造

地表面积大幅增加,经济社会活动逐渐活跃。从涨落势图谱来看,深圳市围湖造田、占用耕地现象仍有发生,但已经初步具有退耕还林的意识。而同时期的香港,景观演变特征有所不同。香港人造地表反而呈斑块收缩的趋势,面积有小幅减少,分别转变为林地、灌木地等景观类型,分散在各个区内;湿地面积明显增加,集中在天水围;草地、水域、耕地面积均有不同幅度的减少,主要转变为林地;林地的增加集中在香港与深圳接壤的北区以及元朗区。

2010—2020 年期间,深圳和香港景观类型演变特征相似,均呈现出人造地表面积大幅度增长,草地、林地、灌木地、湿地等自然景观不同程度的缩减,转出强度大于转入强度的现象。其中,深圳市林地的转移面积最大,其次为耕地,转出比例占原耕地面积的 43%左右;人造地表的转入主要集中在宝安区、光明新区、南山区和龙华新区,这些地区的工业化和城市化迅猛发展。香港的人造地表扩张主要发生在香港北部平原地区,林地转入的贡献率最大,占人造地表总转入面积的 63%左右。两地景观变化亦存在差异性,具体表现在香港耕地和水体景观面积均有小幅度增加,而深圳则恰恰相反,尤其是耕地,存在大面积缩减的现象。

2020—2030 年的预测转变结果表明,深港两地未来十年的景观类型转移依然很活跃。人造地表和林地将依然是深圳的主要景观类型,分别占据总面积的 51%和 26%左右,在以人口和夜间灯光为表征的社会经济因子驱动下,人造地表的景观优势得到进一步加强。到 2030 年,深圳市的草地、灌木地等自然景观总面积有所增加,而林地、湿地、水体等景观面积减少。至于香港,尽管其林地面积占比依然超过国土面积的 48%,但是其林地面积总量呈现减少趋势,人造地表和耕地景观的数量增加趋势明显,草地、灌木地、水体等低植被覆盖的生态用地面积也将持续扩大。

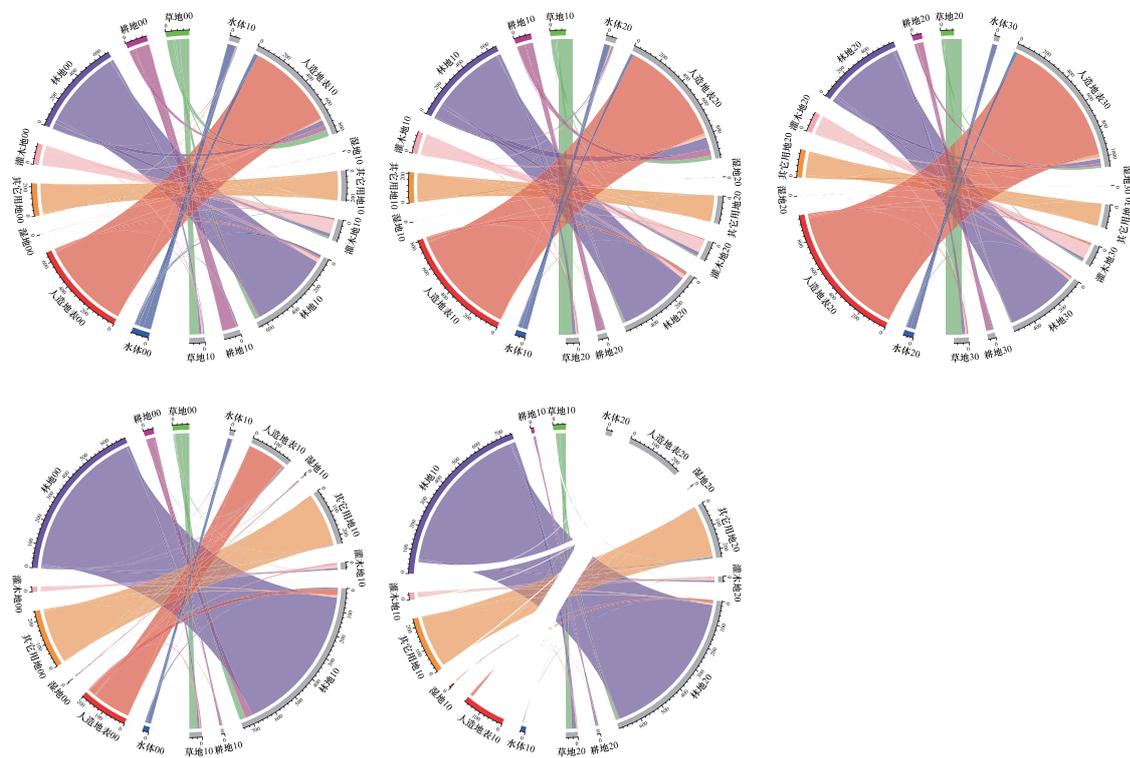


图 4 2000—2030 年深港景观类型转移弦图

Fig.4 Chord diagram of landscape type transfer in Shenzhen and Hong Kong from 2000 to 2030

SZ: 深圳 Shenzhen; HK: 香港 Hong Kong

3.2 深港两地景观格局时空分异特征

从斑块类型水平来看(图 6),在研究期内,人造地表和林地均是深港两地的优势景观类型,两地人造地表

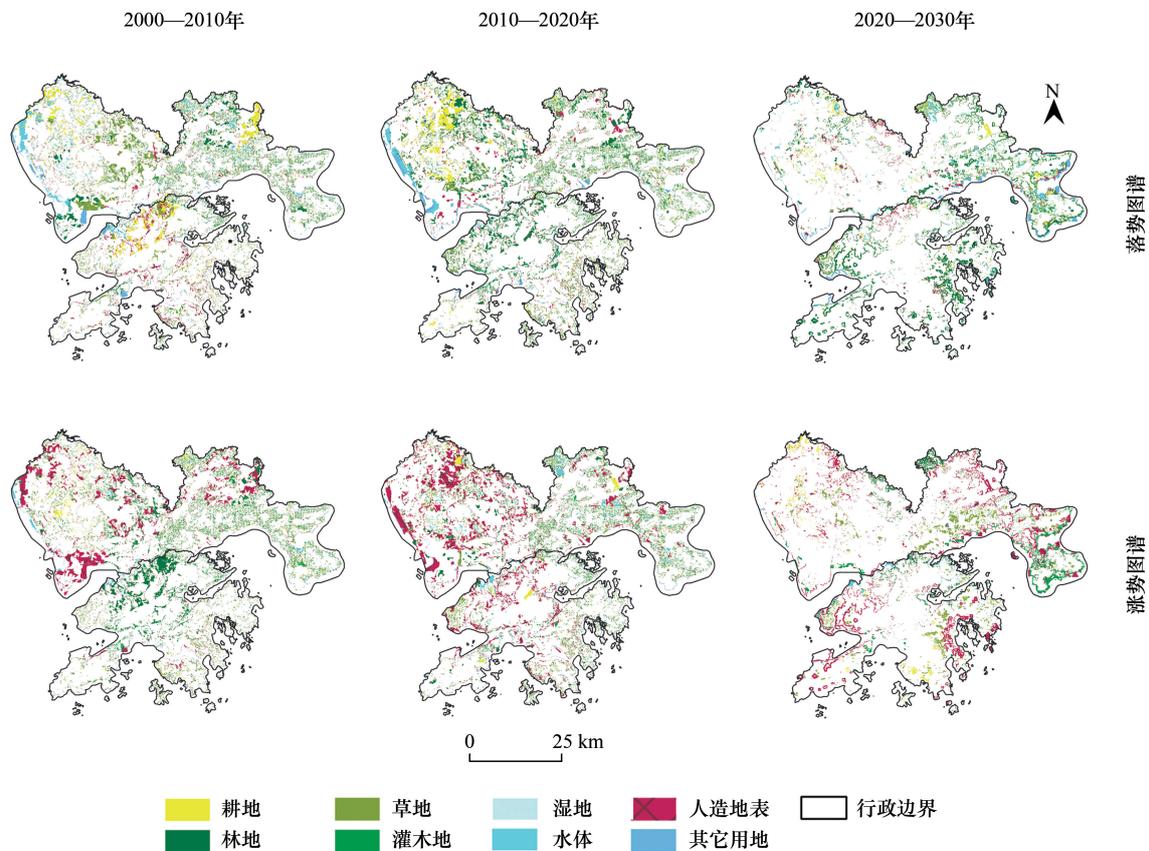


图 5 2000—2030 年深港涨落势图谱

Fig.5 Fluctuation map of Shenzhen and Hong Kong from 2000 to 2030

和林地的 CA 和 PLAND 指数一直远高于其他景观类型,处于高水平状态。深圳人造地表的 CA 和 PLAND 指数持续增加,而香港人造地表的指数则呈现先降低、后上升的趋势,表明深圳人为活动对地表景观的影响不断扩大,香港则存在阶段性变化的特点。同时,深港两地林地的 CA 和 PLAND 指数表现出先小幅度上升而后下降的趋势,表明两地的林地景观均是先扩张后减少。深圳人造地表的 ENN_MN 指数降低,其人造地表景观趋向于团聚分布;而香港则没有明显的变化趋势,但是其平均值略高于深圳,表明香港的人为建设用地相比深圳更加分散。深圳湿地景观的 EMM_MN 指数明显高于其他景观,说明其湿地斑块相隔较远,深圳市湿地数量少且呈零散分布,而深港两地的灌木地、林地、草地该指数值始终较低,表明两地这三类景观分布密集。

从景观水平来看(图 7),研究期内深港两地 PD 和 ED 指数均呈现不断下降的趋势,说明两地景观的破碎化程度将会降低,形状趋于简单。与此同时,两地的 CONTAG 指数和 AI 指数均不断攀升,说明其景观连通性进一步增强,斑块聚集得更加紧密。同时期深圳的 PD 和 ED 指数均高于香港,CONTAG 指数和 AI 指数均低于香港,表明深圳斑块破碎化程度相较于香港更高,斑块分布更加分散,景观蔓延度和延展性能较弱。研究时段内,深港两地景观 AWMPFD 指数均维持在 1.2 左右,没有明显的波动趋势,景观整体形状较简单。SHDI 指数强调稀有斑块类型对信息的贡献,能反映景观的异质性。深圳市的 SHDI 指数逐年下降,SHEI 指数亦由 0.82 左右下降至 0.67 左右,说明深圳市的景观非均衡化分布趋势愈发明显,优势景观愈加突出;而香港的 SHDI 和 SHEI 指数均先下降后上升,且数值均略低于深圳。SHDI 指数的变化趋势说明香港各斑块景观分布从非均衡向均衡性发展,而 SHEI 指数的变化则说明景观中斑块优势度先增加后减少,结合上文对面积变化的分析,可以发现是由于林地作为香港的优势景观类型,其面积先增后减,影响了香港 SHEI 指数的变化。在香港有众多岛屿的前提下,尽管深圳斑块密度与边缘密度逐年降低,但是其景观斑块密度与边缘密度仍然始

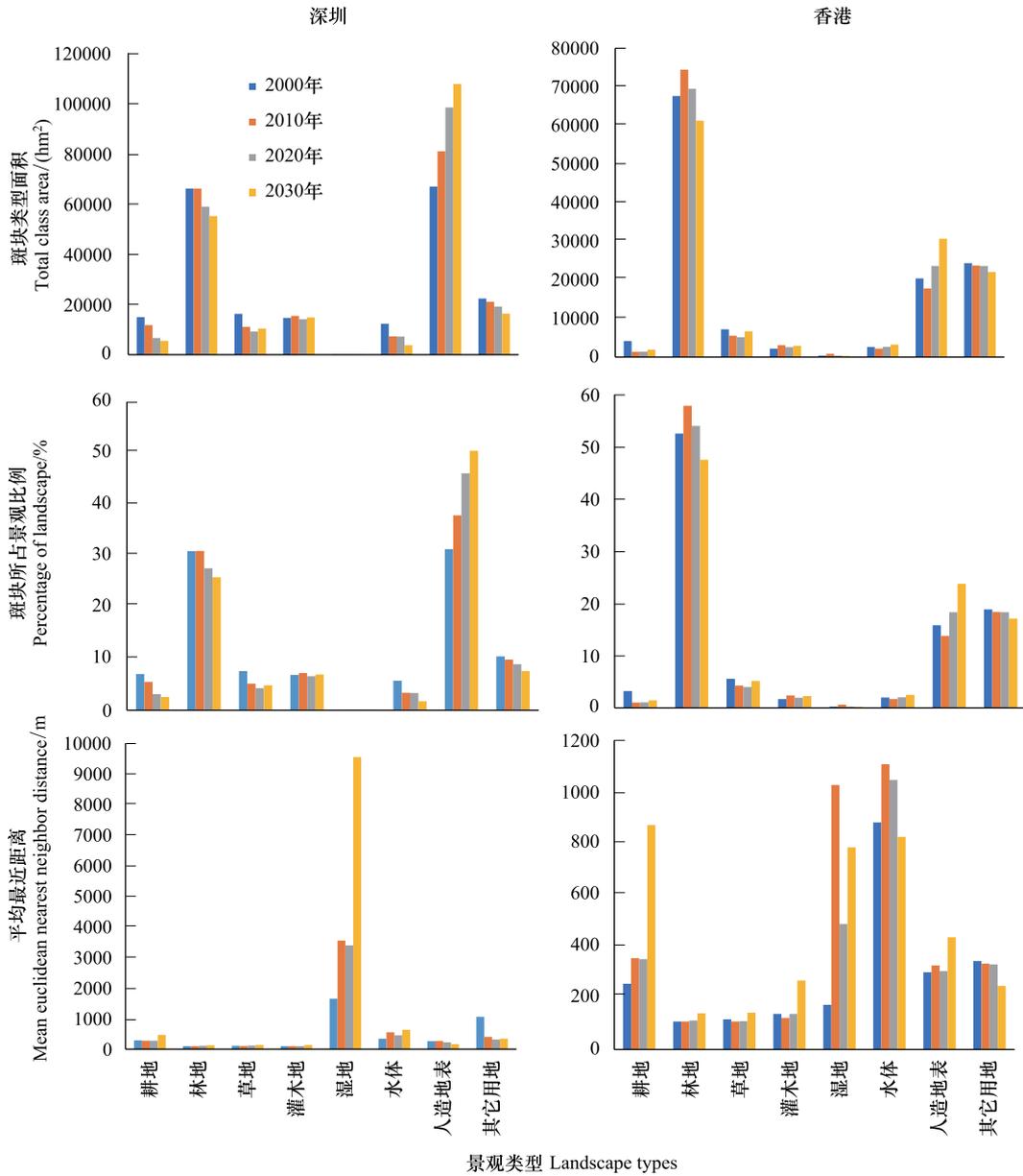


图6 2000—2030年深港斑块类型水平的景观格局指数

Fig.6 Landscape pattern index for the level of patch types in Shenzhen and Hong Kong from 2000 to 2030

终高于香港,景观破碎相对较严重。

3.3 深港两地景观格局演变驱动力

①因子探测器

应用 q 值判断解释各驱动因子对深港整体景观类型发生变化的驱动力, q 值大小代表各因子对景观类型变化的解释度强弱,如图 8 所示。结果发现,深圳和香港景观格局演变的驱动因子解释力排序依次为: $X_2 > X_4 > X_3 > X_1 > X_9 > X_5 > X_6 > X_8 > X_7$, $X_3 > X_2 > X_9 > X_4 > X_8 > X_7 > X_6 > X_1 > X_5$ 。反映地表形态的 DEM(X_3)数据和反映经济发展状况的夜间灯光(X_2)数据所表征的驱动因子,对两地景观格局改变的影响都很大。该结果表明,除了地表自身条件高程本身会对景观格局的变化起重要作用外,人类活动干扰程度也对其有显著影响,而年平均气温(X_5)和降水(X_6)对景观格局变化的解释力度都一般。

从 2000 年到 2020 年,深港两地处于城市化高速发展时期,人均 GDP 显著提升,两地景观受到了大范围

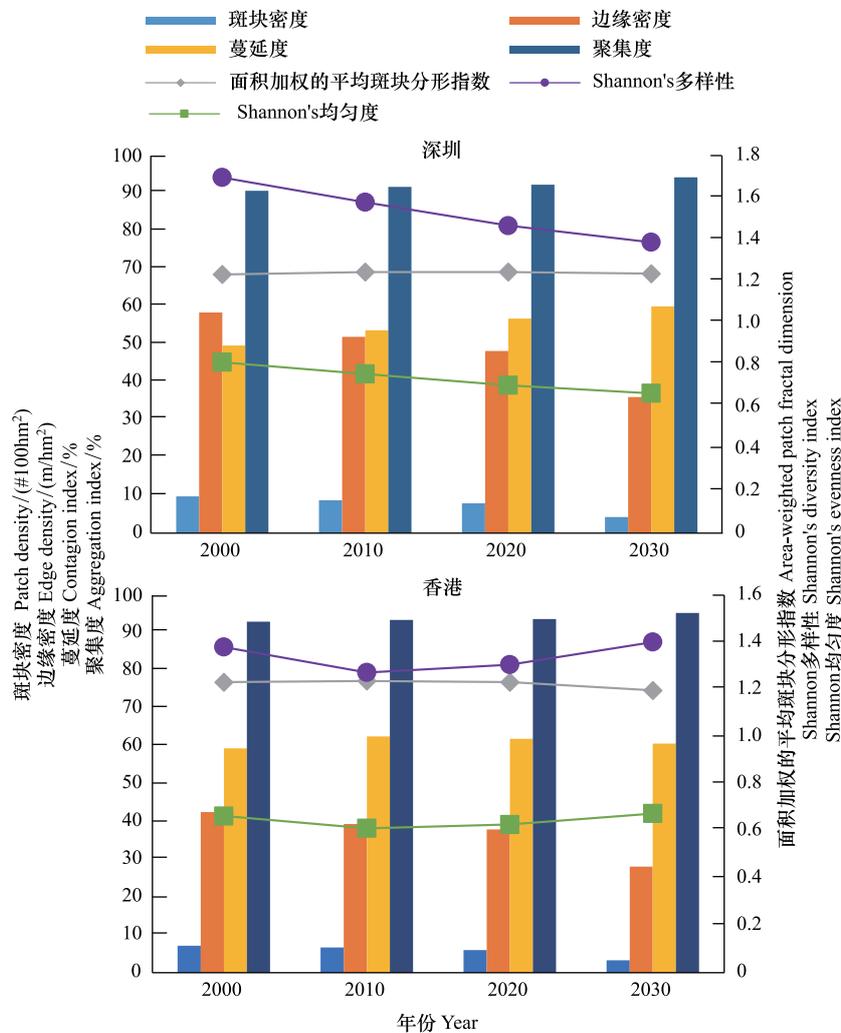


图 7 2000—2030 年深港景观水平的景观格局指数

Fig.7 Landscape pattern index for landscape levels in Shenzhen and Hong Kong from 2000 to 2030

的人为活动干扰,人造地表斑块面积不断增加,对两地景观格局产生了影响。比较而言,深圳和香港景观类型整体变化均受到自然因素和人为因素的交互影响,但因子作用解释力排序有所差别。深圳景观类型变化受到夜间灯光(X_2)、坡度(X_4)、DEM(X_5)、人口密度(X_1)等人为与自然因素的综合影响更多,与此相比,距主要水系的距离(X_6)等地理区位因素也对香港景观类型变化的解释力也很大。

② Logistic 回归模型

针对各景观类型分别建立 Logit 回归变换模型,得到 2000—2020 年各景观类型变化的解释变量及其重要性(表 3)。根据 P 值判断模型整体拟合效果,所有模型整体均通过拟合优度检验,故有 95% 的可能性认为该模型是有效的。

根据 ROC 曲线评价结果,多数模型 ROC 值 >0.8 有较高准确性,其余模型 ROC 处于 $[0.6, 0.8]$ 区间内,表明利用 Logistic 回归模型对深港单个景观格局变化驱动因子的分析准确可信。由于深圳转换为湿地的景观数量太少,无法采样,故在此不进行分析。

2000—2020 年,相同驱动因子对深港两地景观变化的作用力存在共性。如影响两地耕地扩张较为重要的相同解释变量是人口密度(X_1)、夜间灯光(X_2)和坡度(X_4)。人口密度和夜间灯光所表征的人为活动造成对耕地资源的占用,因而对两地耕地扩张均具有显著的负面影响。坡度作为相对重要的解释变量,坡度值增

表 3 深港主要景观类型演变驱动力解释力度大小

Table 3 Driving forces of evolution of main landscape types in Shenzhen and Hong Kong

地区 Prefecture	因子 Factors	耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	灌木地 Shrubland	湿地 Wetland	水体 Water bodies	人造地表 Artificial surface	其它用地 Other land
深圳	X_1	-0.53 **	-0.04	-0.48 ***	0.00	—	-0.16	0.14 ***	0.24
	X_2	-2.00 ***	-0.25 ***	-0.37 ***	-0.97 ***	—	-0.83 ***	0.84 ***	-0.93
	X_3	-0.47	0.22 ***	-0.02	0.05	—	-0.42 ***	-0.58 ***	-1.00
	X_4	-0.33 *	0.28 ***	0.14 ***	0.31 ***	—	-0.91 ***	-0.33 ***	-0.20
	X_5	1.09 ***	0.37 ***	0.02	-0.05	—	-0.70 ***	-0.56 ***	1.30
	X_6	-0.83 *	-0.13	-0.80 ***	-0.45	—	-0.07	1.06 ***	-0.48
	X_7	-0.07	-0.09	-0.09	-1.03 ***	—	-0.47 ***	0.08	2.33 ***
	X_8	-0.60 ***	-0.03	0.06	1.03 ***	—	0.31 **	-0.06	-2.08 *
	X_9	-0.31	0.34 *	-0.71 ***	0.15	—	-0.43	0.26'	2.39
	常量	-4.52 ***	-1.73 ***	-2.52 ***	-3.55 ***	—	-3.60 ***	0.36 ***	-9.10 ***
	P 值	0.00	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.00	0.00
ROC 值	0.84	0.69	0.68	0.87	—	0.75	0.80	0.97	
香港	X_1	-0.51 *	0.00	0.03	-0.76 **	-2.98	-0.46'	0.06	0.77 ***
	X_2	-0.46 *	-0.05	-0.03	-0.31	-10.25'	-0.09	0.27 ***	-1.46 ***
	X_3	-0.14	0.27 ***	0.38 ***	0.30'	-61.12	-0.31	-0.74 ***	-16.93 ***
	X_4	-0.41 **	0.12 *	0.33 ***	0.60 ***	-9.56	-0.67 *	-0.35 ***	0.81 *
	X_5	-0.36	-0.02	0.16	1.13 ***	1.39	0.79'	-0.38 ***	-0.83 **
	X_6	3.67 **	-0.61	-4.42 ***	8.07 ***	-9.03	4.71 **	-3.26 ***	3.73 **
	X_7	-2.75 ***	0.13	1.90 ***	-3.10 ***	3.08	-3.17 ***	0.00	0.24
	X_8	5.44 ***	-1.18 *	-4.02 ***	8.85 ***	-13.99	6.75 ***	-2.26 ***	2.69 *
	X_9	-1.11 *	0.15	-0.33	0.37	2.54	-2.13 **	-1.67 ***	2.09 ***
	常量	-3.80 ***	-0.27 ***	-2.52 ***	-3.52 ***	-60.02'	-4.66 ***	-1.11 ***	-12.79 ***
	P 值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ROC 值	0.81	0.65	0.80	0.84	1.00	0.81	0.73	0.96	

*** 表示变量 $P < 0.000$; ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$; ' 表示 $P < 0.1$

加会抑制影响耕地的产生分布。影响深港两地人造地表变化的共同解释变量为夜间灯光所表征的经济水平 (X_2), 其与两地人造地表的转入概率均具有显著的正相关关系。DEM (X_3)、坡度 (X_4) 与年平均气温 (X_5) 等自然因素对深港两地人造地表景观的产生均具有负向作用。除此之外, 两地人造地表的景观还受到距主要公路的距离 (X_8) 的影响, 从路网分布上可以看出, 该因子影响了建设用地景观扩张的方向和速率。

针对林地、草地、灌木地、水体等生态景观, 两地景观扩张的部分驱动因子作用方向上存在一致性。结果显示: 坡度 (X_4) 对深港两地草地、灌木地、林地等景观的扩张具有积极影响。距主要铁路的距离 (X_6) 与坡度 (X_4) 是制约两地水体的扩张的最重要因子, 其值与水体的扩张分布具有显著的负相关关系。

部分驱动因子在两地的景观扩张的作用效果上又存在明显的异质性。年平均降水 (X_6) 对香港耕地的分布具有显著地促进作用, 但在深圳则表现为抑制耕地的产生。研究时段内, 深圳年平均降水为 1293mm, 香港为 911mm。降水对耕地的影响是多方面的, 一方面降

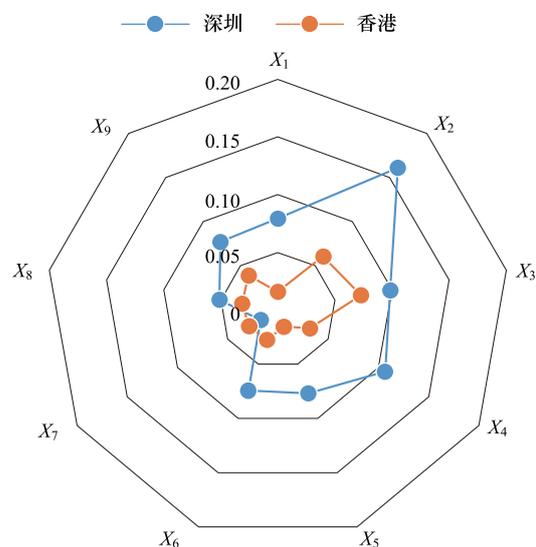


图 8 深港景观格局演变驱动力 q 值雷达图

Fig.8 q -value radar map of driving forces of landscape pattern evolution in Shenzhen and Hong Kong

X_1 : 人口密度; X_2 : 经济水平; X_3 : 高程 (DEM); X_4 : 坡度; X_5 : 年平均气温; X_6 : 年平均降水; X_7 : 距主要铁路距离; X_8 : 距主要公路距离; X_9 : 距三级以上水系距离

水是土地不可或缺的一个因素,充足的水源供应是发展耕地的重要条件,另一方面降水过量会导致水土流失,对农业生产具有负面影响^[45]。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 景观格局的形成及驱动分析

景观类型划分的差异对景观格局指数具有显著影响^[46],本研究中采用同一个景观类型分类系统,能较好地避免由于分类系统导致的深圳与香港两地的分析误差。2000年后,深圳建设用地大范围扩张,而香港建设用地增长速率缓慢,这与当前许多研究结果一致^[17, 47-48]。本文的结果发现两地人造地表的扩张的阶段性特征与两地的人均 GDP 增长趋势具有耦合关系(图 2)。2000—2010 年,深圳进入城市化高速发展时期,人均 GDP 由人均 3 万增长到 10 万,新增人造地表面积为 140km²,同比增长 21%。而同时期的香港城市化进程远超深圳,人均 GDP 同比增长 28%,增长速度放缓,人造地表面积不减反增。2010—2020 年,深圳人造地表面积持续扩张,面积同比增长 22%,人均 GDP 增长速率增大。此时香港人造地表面积增加 58km²,人均 GDP 相较于 2010 年增长 44%,增长速率远高于前一阶段。两地人造地表景观与人均 GDP 的阶段性变化一致,是经济发展的折射表现之一。

城市的扩张特征反映了城市化与经济发展水平,同时也受到社会经济与自然条件的共同驱动。深港两地自然地理条件相似,自然因素如 DEM、坡度等共同限定了人造地表扩张的方向与总体格局,而一国两制、改革开放等制度政策因素,主要公路及铁路等基础设施建设情况,则决定了景观的变化细节。随着《粤港澳大湾区发展规划纲要》的颁布印发,两地加强合作,共同推进经济发展与生态文明建设,景观变化在多种因素的作用下具有趋同趋势。

4.1.2 景观格局变化的政策启示

一方面,从两地已有的规划政策来看,虽然深圳市在 1998 年编制法定图则政策的过程中借鉴了香港的经验^[12, 49],但两地发展程度不一,制度引领有所区别,实际景观所呈现的政策落地效果存在差异。2000 年以来,深圳仍处于经济建设高速发展时期,早期 GDP 的迅速增长需要大量的土地资源的支撑,人造地表面积的不断增加是当前社会经济发展需求下的必然结果。而同一时期的香港,城市化发展阶段快于深圳,公众的环利益诉求不断增加^[50],GDP 增长与发展速度放缓,人造地表面积扩张速度也随之减缓。

另一方面,从两地未来的发展来看,作为沿海城市与岛屿城市,土地资源紧张,如何发展存量、合理利用土地,在较长时间内都将是两个城市未来发展面临的共同挑战。香港人造地表面积在 2000—2020 年内先降后升,无明显变化趋势,而深圳则处于持续增长的态势。香港作为一个拥有诸多岛屿的岛城,预测未来的景观整体的蔓延度(CONTAG)和聚集度(AI)仍高于深圳,景观连通性和聚集程度较高,城市发展紧凑。而 2020 年深圳人造地表斑块面积指数(CA)约为 2000 年的 1.5 倍,城市仍处于快速扩张状态。建成区的快速扩张造成了巨大的土地资源压力^[51],适合发展的土地不断缩减。借鉴香港经验建设发展紧凑城市^[11],是深圳未来城市建设一种可能的方式。此外,在进行存量优化时,两地都应同时保证质量与数量^[52],通过控制景观格局的有序变化,保持城市景观的多样性与均衡性,促进人与生态和谐发展。

4.2 结论

2020—2030 年,深圳和香港景观类型的变化会持续受到自然因素和人为因素的交互影响,但是影响两地景观类型整体发生转变的主要驱动因素及其作用机制不尽相同:(1)夜间灯光表征的经济水平是驱动两地人造地表景观扩张的重要因子;(2)深圳景观类型变化受到夜间灯光、坡度、DEM、人口密度等人为与自然因素的共同驱动;(3)香港景观类型变化的驱动力中距主要水系的距离等地理区位因素占比较大。在上述因素的作用下,深港两地的景观格局演变呈现如下规律:

(1)深港两地的优势景观类型将保持不变。深港两地优势景观人造地表的面积将会持续增加,林地依旧

是两地的相对优势景观之一。深港两地景观类型的转移十分频繁,深圳人造地表面积逐年增加,而香港的林地景观则会呈现先增加后减少的趋势,整体上两地林地景观面积均减少,但深港多山多丘陵,除人造地表外,林地仍会保持相对优势。

(2)深港两地的景观格局演变将趋同存异。从景观尺度看,在不同的驱动因子作用下,两地的景观的形态都将保持较低的复杂度,破碎度也进一步降低,但是深圳的景观破碎度仍然大于香港。深圳景观多样性进一步增强,人造地表景观将会进一步呈团聚状分布,而这一景观在香港则不会呈现明显的变化趋势。从政策指引的角度看,在粤港澳大湾区规划建设的引领下,两地景观变化偏向趋同发展。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Li Y, Liu M L, Liu X N, Yang W F, Wang W W. Characterising three decades of evolution of forest spatial pattern in a major coal-energy province in northern China using annual Landsat time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 95: 102254.
- [3] Kim M, Song K, Chon J. Key coastal landscape patterns for reducing flood vulnerability. *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 143454.
- [4] 陈铸,傅伟聪,黄钰麟,阙晨曦,郑祈全,董建文.福州市土地利用景观格局变化及驱动力研究.西南师范大学学报:自然科学版,2020,45(1):99-107.
- [5] 高祖桥,白永平,周亮,乔富伟,宋龙军,陈小宁.宁夏沿黄城市带湿地景观格局演变特征及驱动力.应用生态学报,2020,31(10):3499-3508.
- [6] 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.
- [7] Hersperger A M, Bürgi M. Driving forces of landscape change in the urbanizing limmat valley, Switzerland//Koomen E, Stillwell J, Bakema A, Scholten H J, eds. *Modelling Land-Use Change*. Dordrecht: Springer, 2007: 45-60.
- [8] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [9] Li X, Yeh A G O. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(4): 323-343.
- [10] Verburg P H, Overmars K P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology*, 2009, 24(9): 1167-1181.
- [11] Xu C, Jiang W Y, Hang Q Y, Wang Y T. Ecosystem services response to rural-urban transitions in coastal and island cities: a comparison between Shenzhen and Hong Kong, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 260: 121033.
- [12] 林强,兰帆.“有限理性”与“完全理性”:香港与深圳的法定图则比较研究.规划师,2014,30(3):77-82.
- [13] Li W F, Cao Q W, Lang K, Wu J S. Linking potential heat source and sink to urban heat island: heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 457-465.
- [14] 孙晓萌,吕晨曦,张雪琦,董仁才.粤港澳大湾区海岸带生态修复工程中的景观生态学应用分析.生态学报,2020,40(22):8044-8052.
- [15] 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.
- [16] 曹君,张正栋,陈宋佳,杨阳,匡腾飞,陈裕婵,李青圃,毛源远,董剑彬.1996—2015年粤港澳大湾区生态系统服务对景观格局变化的响应.华南师范大学学报:自然科学版,2020,52(5):93-105.
- [17] 胡盼盼,李锋,胡聃,孙晓,刘雅莉,陈新闻.1980—2015年珠三角城市群城市扩张的时空特征分析.生态学报,2021,41(17):7063-7072.
- [18] 王志春,张怡楠,辛岩,吕明芯,苑俐.近35年来老哈河流域湿地关键区景观格局演变及其驱动力.干旱区资源与环境,2021,35(11):143-148.
- [19] 李明珍,李阳兵,冉彩虹.土地利用转型背景下的乡村景观格局演变响应——基于草堂流域的样带分析.自然资源学报,2020,35(9):2283-2298.
- [20] 杨锦瑶,黄璐,严力蛟,霍思高.城市化下的民族乡镇景观格局变化——以内蒙古莫力达瓦达斡尔自治旗阿尔拉镇为例.应用生态学报,2016,27(8):2598-2604.
- [21] Xie H, Tong X H, Meng W, Liang D, Wang Z H, Shi W Z. A multilevel stratified spatial sampling approach for the quality assessment of remote-sensing-derived products. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(10): 4699-4713.

- [22] Chen J, Zhu X L, Imura H, Chen X H. Consistency of accuracy assessment indices for soft classification; simulation analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(2): 156-164.
- [23] 吴健生, 罗可雨, 赵宇豪. 深圳市近 20 年城市景观格局演变及其驱动因素. *地理研究*, 2020, 39(8): 1725-1738.
- [24] Li G D, Sun S A, Fang C L. The varying driving forces of urban expansion in China; insights from a spatial-temporal analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 174: 63-77.
- [25] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 李朝霞, 蔡崇法. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4106-4118.
- [26] 李峰, 张晓博, 廖顺宝, 钱安. DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS 夜间灯光数据测算统计指标能力评估——以京津冀地区县域 GDP、人口及能源消耗为例. *测绘通报*, 2020, (9): 89-93, 118-118.
- [27] 卢秀, 李佳, 段平, 程峰, 王金亮. 基于夜间灯光和土地利用数据的 GDP 空间化及预测——以云南沿边地区为例. *地域研究与开发*, 2020, 39(2): 36-39, 81-81.
- [28] 李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘. *测绘学报*, 2015, 44(6): 591-601.
- [29] 黄隆杨, 刘胜华, 李健. 城市生态用地时空动态及其相关驱动力——以武汉市为例. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1059-1069.
- [30] 测绘学名词审定委员会. *测绘学名词(第三版)*. 北京: 科学出版社, 2010.
- [31] 张文慧, 吕晓, 史洋洋, 孙丕苓, 张宇硕. 黄河流域土地利用转型图谱特征. *中国土地科学*, 2020, 34(8): 80-88.
- [32] 唐常春, 李亚平. 多中心城市群土地利用/覆被变化地学信息图谱研究——以长株潭城市群为例. *地理研究*, 2020, 39(11): 2626-2641.
- [33] Du C, Liu Y Y, Guo X F, Xu C L. Analysis and research on the temporal and spatial changes of land use in Zhaozhou county based on geo-information TUPU. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 510: 062022.
- [34] 申卫军, 邹建国, 任海, 林永标, 李明辉. 空间幅度变化对景观格局分析的影响. *生态学报*, 2003, 23(11): 2219-2231.
- [35] Masoudi M, Tan P Y. Multi-year comparison of the effects of spatial pattern of urban green spaces on urban land surface temperature. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 184: 44-58.
- [36] Chen A L, Zhao X F, Yao L, Chen L D. Application of a new integrated landscape index to predict potential urban heat islands. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 828-835.
- [37] 张晨星, 徐晶晶, 温静, 杨新兵, 王佳欢, 赵波. 基于 CA-Markov 模型和 MCE 约束的白洋淀流域景观动态研究. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(4): 655-664.
- [38] 崔王平, 李阳兵, 李潇然. 重庆市主城区景观格局演变的样带响应与驱动机制差异. *自然资源学报*, 2017, 32(4): 553-567.
- [39] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [40] 张剑, 许鑫, 隋艳晖. 海洋经济驱动下的海岸带土地利用景观格局演变研究——基于 CA-Markov 模型的模拟预测. *经济问题*, 2020, (3): 100-104.
- [41] 张新长, 康停军, 张青年. *城市地理信息系统(第二版)*. 北京: 科学出版社, 2014.
- [42] Da Cunha E R, Santos C A G, Da Silva R M, Bacani V M, Pott A. Future scenarios based on a CA-Markov land use and land cover simulation model for a tropical humid basin in the Cerrado/Atlantic forest ecotone of Brazil. *Land Use Policy*, 2020, 101: 105141.
- [43] Khwarahm N R, Qader S, Ararat K, Al-Quraishi A M F. Predicting and mapping land cover/land use changes in Erbil/Iraq using CA-Markov synergy model. *Earth Science Informatics*, 2021, 14(1): 393-406.
- [44] 罗紫薇, 胡希军, 韦宝婧, 曹盼, 曹诗怡, 杜心宇. 基于多准则 CA-Markov 模型的城市景观格局演变与预测——以上杭县城区为例. *经济地理*, 2020, 40(10): 58-66.
- [45] 陈维杰. 降水变化对不同下垫面的水土流失之分异影响. *水土保持通报*, 2008, 28(1): 73-75.
- [46] 彭建, 王仰麟, 张源, 叶敏婷, 吴健生. 土地利用分类对景观格局指数的影响. *地理学报*, 2006, 61(2): 157-168.
- [47] 王宏亮, 高艺宁, 吴健生, 王娜, 赵宇豪, 彭子凤, 王仰麟. 高度城市化地区建设用地扩展及其驱动力分析——以深圳市为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2021, 57(4): 707-715.
- [48] 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.
- [49] 孙骅声, 周劲, 陈宏军. 深圳市法定图则的探索与实践. *城市规划*, 1998, (3): 29-30.
- [50] 陈林, 黄家成, 周立宏. 香港环境保护政策的实施、机制与启示. *亚太经济*, 2021, (4): 137-141.
- [51] 刘志佳, 黄河清. 土地资源对珠三角地区人口增长的约束分析. *生态环境学报*, 2014, 23(12): 2003-2009.
- [52] 李志强, 钱雨果, 周伟奇, 王静. 从“增量扩张”到“存量优化”: 深圳市景观格局内部动态与优化. *生态学报*, 2021, 41(5): 1738-1746.