DOI:10.14188/j.2095-6045.20260087

文章编号:2095-6045(2026)05-0138-08

1990—2020年粤港澳大湾区生态用地时空动态及其驱动力分析

钟秀雯[1]　邵振峰[1]

1 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079

Analysis of Spatio Temporal Dynamics and Their Driving Forces of Ecological Land in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1990 to 2020

ZHONG Xiuwen[1]　*SHAO Zhenfeng*[1]

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

摘　要:针对粤港澳大湾区生态用地面积减少问题,本研究基于多维特征集,实现大湾区1990、2000、2010年和2020年土地利用分类,分析其土地利用时空变化规律,并结合地理探测器、生态综合指数和二元逻辑回归模型,揭示生态用地转化的驱动力及其转化概率。结果表明:粤港澳大湾区林地、耕地、草地以及水域面积不断下降,而建筑用地持续扩张,其中耕地为最大的转出类型,建设用地的转入面积最多;高程、距建设用地距离、生态控制线、GDP密度、人口密度以及道路密度是大湾区生态用地转化的主要驱动因素,其中距建设用地距离以及生态控制线对生态用地转化的影响最大;东莞市、佛山市、广州市以及香港特别行政区北部生态用地面临着较高的转化风险。

关键词:生态用地变化;驱动力;GEE;地理探测器;二元逻辑回归;粤港澳大湾区

中图分类号:P237;F301

文献标志码:A

Abstract: In recent years, ecological land in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) has continuously declined, leading to increased ecological risks. Analyzing driving forces and simulating ecological land conversion probabilities are essential for the sustainable development of the GBA. This study develops a multidimensional feature set to classify land use in the GBA for 1990, 2000, 2010, and 2020, analyzes spatiotemporal land use dynamics, and integrates the geological detector model, an integrated ecological index, and binary logistic regression to identify the driving forces and conversion probability of ecological land. Results indicate: forest, farmland, grassland, and water areas in the GBA have continuously decreased, while construction land has expanded persistently. Farmland represents the largest outflow category, with construction land receiving the most inflow; Elevation, minimum distance to construction land, ecological control lines, GDP density, population density, and road density are the primary drivers of ecological land conversion in the GBA, with minimum distance to construction land and ecological control lines exerting the strongest influence; Ecological land in Dongguan City, Foshan City, Guangzhou City, and the northern part of the Hong Kong Special Administrative Region faces high conversion risks.

Key words: ecological land change; driving force; GEE; geological detector; binary logistic regression; Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area (GBA)

随着全球人口持续的增长和人类经济活动的快速发展,城市化进程不断加快,引发了环境污染、水土流失、生物多样性减少等诸多生态方面的问题[1,2],严重威胁生态安全和社会可持续发展。城市生态系统服务涵盖水资源保护、气候调节、生物多样性保护和碳固存等多种功能,在缓解快速的城市扩张影响和促进可持续发展方面发挥着至关重要的作

引用格式:钟秀雯,邵振峰. 1990—2020年粤港澳大湾区生态用地时空动态及其驱动力分析[J]. 测绘地理信息,2026,51(5):138-145(ZHONG Xiuwen, SHAO Zhenfeng. Analysis of Spatio Temporal Dynamics and Their Driving Forces of Ecological Land in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1990 to 2020[J]. Journal of Geomatics, 2026,51(5):138-145)

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3906105);四川省科技计划(2023YFN0022);云南省重大科技专项(202403ZC380001)。

用[3,4]，有助于增强城市韧性。而城市生态用地作为城市生存的自然基础，能够提供多种必要的生态系统服务，对生态可持续性有着深远的影响[5]。然而，在快速城市化和经济发展的背景下，城市用地扩张常常侵占城市生态用地，使得城市生态脆弱性增强，严重阻碍城市的可持续发展[6]。因此，监测城市生态用地时空动态变化并探究其驱动因素对于优化土地利用结构、促进城市可持续发展具有重要意义。

目前，诸多学者对不同区域的城市土地利用变化进行了解析。如鲍文楷等[7]基于土地利用数据利用logistic模型对京津冀地区的土地利用变化驱动力进行分析，为优化区域资源配置提供依据。张瑞等[8]结合地理探测器和地理加权回归模型对太原市的建设用地变化的驱动力因子进行研究，为城市的可持续发展提供新思路。吴健生等[9]基于土地利用数据，结合景观指数探究深圳市景观演变及驱动因子，为城市快速扩张下的景观格局变化提供科学参考。Yao等[10]基于土地利用动态度分析长江下游城市生态用地的时空变化特征，并结合地理探测器方法识别驱动因素，为生态空间恢复提供重要参考。

随着港珠澳大桥等交通骨架搭建的推进，粤港澳大湾区的“9＋2”格局也将实现互联互通，城市化发展对粤港澳大湾区的生态环境建设和维护提出了更高的要求[11]。但近年来，粤港澳大湾区自然生态系统面积下降，城镇生态面积不断上升，区域生态风险增加，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，缺乏对大湾区城市群自然生态系统空间格局演变的探索[12]。因此，本研究尝试基于Google Earth Engine（GEE）平台，利用Landsat影像以及数字高程模型（digital elevation model，DEM）数据构建多维特征集，实现粤港澳大湾区1990年、2000年、2010年以及2020年土地利用分类，提取各年份生态用地数据，利用地理探测器分析粤港澳大湾区生态用地变化的驱动机制，并结合生态综合指数构建生态安全格局，使用二元逻辑回归来模拟未来生态用地转化概率，为粤港澳大湾区的城市景观规划和可持续发展提供重要数据支撑。

1　研究区及数据处理

1.1　研究区

粤港澳大湾区位于广东省中南部，总面积约为5.6万km^2。其总体地势北高南低，中部地势低平，以平原为主，东北部以及西北部为丘陵，南部濒临南海。该区域属于亚热带季风气候，年均气温21～22 ℃，降水主要集中在春夏季，秋冬季降水较少。粤港澳大湾区包括广州、深圳、东莞、珠海、中山、惠州、佛山、肇庆、江门等9市和香港、澳门2个特别行政区，人口密度高，保持着快速增长和领先的城镇化水平，截至2023年，大湾区生产总值（gross domestic product，GDP）突破14万亿元，在全国整体发展中占据重要战略地位。近年来，随着经济的快速发展，粤港澳大湾区的城镇用地不断扩张，生态用地面积下降，使得生态系统服务价值下降明显，大湾区生态风险增加。

1.2　数据来源及处理

本研究主要包括地表反射率、DEM、道路数据和统计数据。利用GEE平台收集了四个时段（1989—1991年、1999—2001年、2009—2011年和2019—2021年）秋冬季（9～12月）降水相对较少时期的Landsat地表反射率影像。共选取12幅影像，其中2019—2021年影像为Landsat 8 OLI数据，其余年份影像为Landsat 5 TM数据，空间分辨率均为30 m。完成去云处理后，对各时段影像进行融合，生成四幅最少云量合成影像，用于后续的土地利用分类。

DEM数据来源于地理空间数据云，并进一步计算坡度和坡向数据，空间分辨率为30 m。道路数据来源于OpenStreetMap。GDP密度和人口密度分布数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心，空间分辨率为1 000 m；生态控制线来源于各地市政策文件。具体数据来源见表1。

2　研究方法

本研究首先基于Landsat影像和地形数据构建多维特征集，采用随机森林算法对粤港澳大湾区1990年、2000年、2010年以及2020年土地利用进行分类。随后，在此基础上提取各时期生态用地，利用地理探测器分析粤港澳大湾区生态用地变化的驱动机制。最后，构建生态综合指数识别生态安全格局，并采用二元逻辑回归来模拟未来大湾区生态用地转化概率。

2.1　土地利用分类特征选择与分类算法

本研究基于Landsat影像以及地形数据构建了多维特征集[13]，包括光谱特征、地形特征以及纹理特征。其中纹理特征包括角二阶矩、熵、对比度和相关性，这4个纹理特征之间不相关，且具有很好的分辨能力[14]。具体特征见表2。

表 1 数据来源表

Tab. 1 Data Source Table

数据名称	数据来源	时间	分辨率/ m
Landsat5 TM	Google Earth Engine	1989－2011 年	30
Landsat8 OLI	Google Earth Engine	2019－2021 年	30
高程	地理空间数据云	2000 年	30
坡度	地理空间数据云	2000 年	30
坡向	地理空间数据云	2000 年	30
道路	OpenStreetMap	2010－2020 年	－
GDP 密度	资源环境科学与数据中心	2000－2019 年	1 000
人口密度	资源环境科学与数据中心	2000－2019 年	1 000
生态控制线	各地市政策文件	2010－2020 年	－

表 2 土地利用分类特征

Tab. 2 Characteristics of Land Use Classification

特征类型	特征描述	简称
光谱特征	波段反射率	Landsat5：B1-B7 Landsat8：B1-B11
	归一化植被指数	NDVI
	改进的归一化植被指数	MNDVI
	增强型植被指数	EVI
	归一化建筑指数	NDBI
	归一化水体指数	NDWI
	陆表水分指数	LSWI
地形特征	高程	Elevation
	坡度	Slope
	坡向	Aspect
纹理特征	角二阶矩	ASM
	熵	Entropy
	对比度	Contrast
	相关性	Correlation

基于中国科学院土地利用分类体系，本研究将粤港澳大湾区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地 6 类。通过人工目视解译，并结合现有土地利用产品和 Google Earth 历史影像选取各地类样本点。本研究时间点分别为 1990 年、2000 年、2010 年以及 2020 年，每年分别选取 490 个样本点。

本研究使用随机森林方法（random forest，RF）进行土地利用分类[15]。随机森林分类主要包含两个参数：决策树的数目和节点特征数。本研究以步长为 5 进行实验，确定最佳决策树个数为 30。由于分类精度对于节点数并不敏感[16]，采用默认值。在分类过程中，选取 70% 样本作为训练样本，30% 的样本作为验证样本，并使用总体分类精度和 Kappa 系数这两个指标对土地利用的分类精度进行评价。

2.2 土地利用变化情况分析

土地利用转移矩阵能够反映土地利用的结构特征和各类型之间的转换情况和方向，揭示各类型转入转出信息，适用于定量研究土地利用类型间相互转化的数量，其数学表达式如下[17]：

$$\boldsymbol{S}_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \cdots & S_{2n} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \cdots & S_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix}, \quad i,j=1,2,3,\cdots,n \tag{1}$$

式中，n 为土地利用类型个数；$\boldsymbol{S}_{ij}$ 为 i 类转化为 j 类的面积；i 和 j 分别为转移前后的土地利用类型，采用 ArcGIS 10.2 平台的面积制表功能获得 1990—2020 年土地利用转移矩阵。

土地利用动态度是指区域一定时间内某一类型土地变化量与变化前总量的比例，反映该类土地变化的剧烈程度，数学表达式如下[18]：

$$K=\frac{b-a}{a}\times\frac{1}{T}\times 100\% \tag{2}$$

式中，K 为某地类土地利用动态度；a、b 分别为某土地利用类型变化前后的面积（km^2）；T 为研究时长。

2.3 生态用地变化驱动机制分析方法

在以往研究的基础上[19,20]，本研究从自然、社会经济、人类活动影响以及政策条件四个方面来探究土地利用变化驱动机制，结合研究区实际情况和数据的可获取性，选取以下因子作为研究区生态安全的约束因子：高程、GDP 密度、人口密度、道路密度、到建设用地距离以及生态控制线。

其中，道路密度通过在 ArcGIS 10.2 创建 1 km×1 km 格网并计算单位面积道路长度得到；到建设用地的距离采用欧氏距离功能计算得到。地理探测器仅支持离散变量，因此对连续型因子进行了离散化处理。

地理探测器是一种用于探究地理空间要素分布空间异质性分布及其影响因素的分析方法[21]，已广泛应用于土地利用驱动机制分析。本研究采用其中的因子探测识别关键驱动因素，其度量作用力大小

的数学表达式如下[22]:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h N_h^{\ 2}}{N\sigma^2} \tag{3}$$

式中,q为自变量解释力的度量;L为因变量或自变量的分层;N_h和$N_h^{\ 2}$分别为层h的单元数和方差;N和σ^2分别为研究区整体的单元数和方差。

基于因子探测结果,提取关键性生态约束因子的作用力大小作为权重,通过对各因子进行加权求和构建生态安全综合指数,以此开展生态安全评价。其数学表达式如下[23]:

$$\mathrm{ESI}=\sum_{j=1}^{m}p_{ij}w_j \tag{4}$$

式中,ESI为栅格i所对应的生态安全综合指数;p_{ij}为栅格i在j因子上所对应的值;w_j为j因子的权重。

2.4　二元逻辑回归

逻辑回归模型(Logistic Regression Model)是广义线性模型的一种特殊形式,能够借助对数变换将因变量与自变量的非线性关系转换为线性方程。在二元逻辑回归中,因变量为0、1的二分变量,模型能够计算每个自变量的回归系数来估算各自变量的贡献,进而计算土地利用类别发生变化的概率,被广泛应用于土地利用变化分析[24, 25]。

本研究将耕地、草地、林地和水域划分为生态用地,分别提取2010年以及2020年生态用地指标。在2010年的生态用地上创建了10 000个随机点作为地理探测器以及逻辑回归的样本,使用ArcGIS 10.2的栅格计算器获取2010—2020年生态用地变化情况:若生态用地转化为非生态用地,则赋值为0,若生态用地没有发生转换,则赋值为1。

逻辑回归模型一般表示形式如下[5]:

$$P_i=F(\alpha+\sum_{j=1}^{m}\beta_j X_{ij})=\frac{1}{1+\exp\left(-\alpha+\sum_{j=1}^{m}X_{ij}\right)} \tag{5}$$

$$P=\ln\frac{P}{1-P}=\alpha+\sum_{j=1}^{m}\beta_i X_{ij} \tag{6}$$

式中,P_i表示事件发生变化的概率;i表示样本量;α是回归截距;β是回归系数;m为影响因素的数量;X_{ij}表示自变量。

3　结果与分析

3.1　粤港澳大湾区土地利用变化

基于验证结果的混淆矩阵,得到粤港澳大湾区1990年、2000年、2010年以及2020年各年份分类结果的总体精度及Kappa系数,具体结果如表3所示。各年份的精度均达到了90%以上,分类结果质量较好。

表3　各年份土地利用分类精度及Kappa系数

Tab. 3　Land Use Classification Accuracy and Kappa Coefficient for Each Year

年份	影像	总体分类精度/%	Kappa系数
1990	Landsat 5TM影像	95.30	0.94
2000	Landsat 5TM影像	93.21	0.91
2010	Landsat 5TM影像	92.92	0.91
2020	Landsat 8OLI影像	93.46	0.91

基于粤港澳大湾区的多维特征集进行土地利用分类,得到四期土地利用分类分布图(见图1)。结果表明,大湾区以林地和耕地为主,约占大湾区总面积的80%。1990—2020年间,以广州、佛山、东莞为核心的中部地区土地利用变化最为明显,耕地面积显著减少,水体面积部分减少,而建设用地面积逐年增加;南部的中山、珠海以及深圳的建筑用地亦显著扩张,而以林地和耕地为主的西北部以及东北部土地利用变化并不明显,生态环境保持较好。

大湾区的土地利用动态度如图2(a)所示,从单一土地利用动态度来看,建设用地的动态度最大,1990—2000年,2000—2010年以及2010—2020年分别为5.73%、6.43%以及2.22%,呈先升后降趋势,2000—2010年达到峰值。从3个时期的动态变化趋势来看,1990—2000年建设用地的扩张较为突出,动态度最大,其次为林地,面积显著减少;2000—2010年整体动态度水平显著上升,建设用地的动态度进一步增加至6.43%,耕地和草地的动态度亦有所增加,而林地减少速率大幅减缓;2010—2020年建设用地动态度大幅回落、林地动态度进一步减缓,耕地动态度亦开始收窄,但水体的动态度减少速率持续加快,草地则转为小幅增加。总体来看,耕地、林地及水体动态度在三个时期持续为负,表明粤港澳大湾区耕地、林地、水体等生态用地面积持续减少,城市面积不断扩张。

土地利用转移矩阵如图2(b)所示。1990—2020年间,耕地转出面积最大,以转为建设用地为主,占其总转出面积的61.1%,此外有1 294.21 km^{2}转为水体,791.50 km^{2}转为林地;林地同样以转为建设用地为主;水体共转出1 560.27 km^2,其中801.49 km^{2}转为建设用地。

从转入来看,建设用地转入面积最大,共5 699.91 km^2,来源以耕地、林地和水体为主,三者合

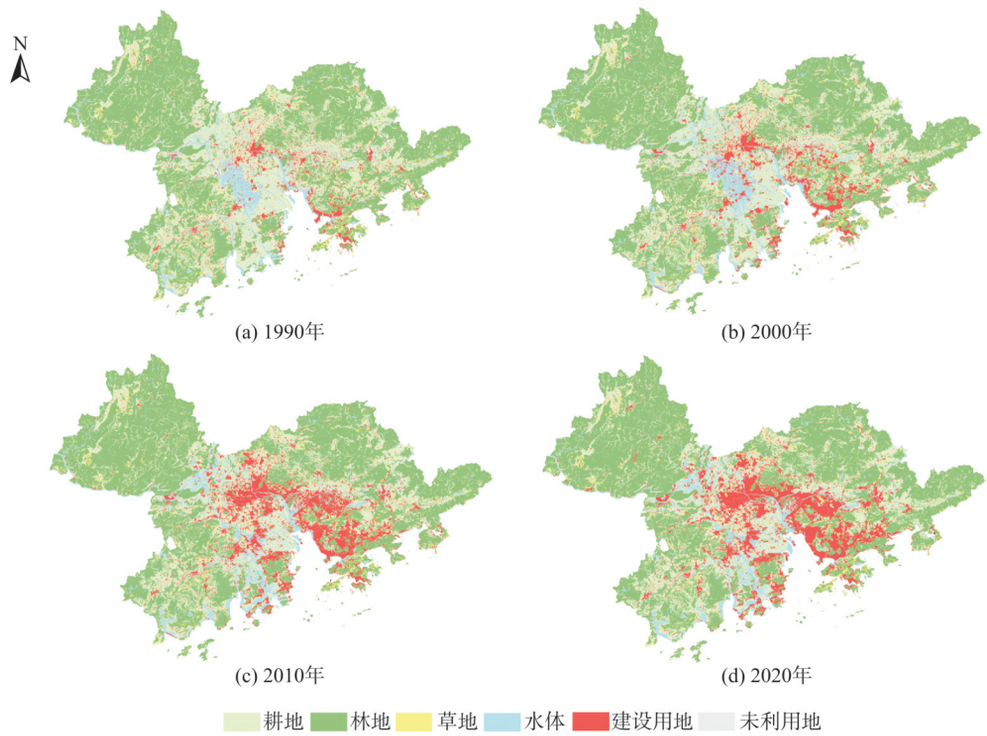
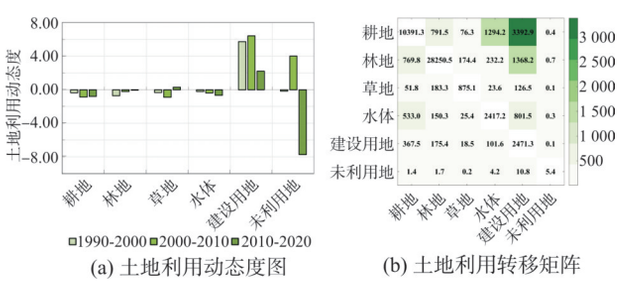


图 1　1990-2020 年粤港澳大湾区土地利用分类图

Fig. 1　Land Use Classification Map of the GBA from 1990 to 2020

计占建设用地总转入面积的 96.5%。总体来看，耕地、林地和水体是建设用地扩张的主要来源，生态用地在城镇化进程中持续受到侵占。



(a) 土地利用动态度图　(b) 土地利用转移矩阵

图 2　土地利用变化分析

Fig. 2　Analysis of Land Use Change Patterns

3.2　粤港澳大湾区生态安全格局

地理探测器的因子探测结果（见表 4）表明除坡度因子未通过 0.05 水平的显著性检验外，其余因子均通过了显著性检验，各因子对粤港澳大湾区生态用地转化的解释力从大到小依次为：距建设用地距离（0.33）＞生态控制线（0.26）＞GDP 密度（0.20）＞高程（0.13）＞人口密度（0.10）＞道路密度（0.08），表明距建设用地距离以及生态控制线是生态用地转化中的主导因子。另外，GDP 和高程的解释力分别为 0.20 和 0.13，反映社会经济因子和自然因子也是推动生态用地转化的重要驱动因子。结合前文土地利用动态度分析，可对不同阶段的驱动机制作进一步推断：1990—2000 年及 2000—2010 年建设用地动态度持续增加，表明该时期经济及城市扩张是推动生态用地转化的核心驱动力；2010 年后随着生态控制线政策的正式实施[26-30]，生态用地转化受到明显约束，建设用地动态度大幅下降，这与因子探测结果中生态控制线的高解释力（q=0.26）相吻合，说明 2010 年后驱动机制逐步由经济扩张主导向政策约束与空间邻近共同主导转变。考虑到道路密度以及人口密度的解释力较低，最终选择生态控制线、距建设用地距离、高程、GDP 密度这 4 个因子作为关键生态因子，并基于以上因子构建生态安全格局。

基于生态安全综合指数得到的生态安全等级空间分布如图 3 所示。总的来说，粤港澳大湾区的整体生态环境质量处于中等水平。其中，以林地为主的西北部以及东北部的生态环境质量较好，大部分区域属于高度安全或中度安全等级；以平原为主的中南部的生态环境质量相对较差，较大面积为较低安全或临界危险，生态风险较高。

表 4　因子探测结果

Tab. 4　Factor Detection Results

参数	高程	建设用地距离	道路密度	生态控制线	GDP 密度	人口密度
q	0.13	0.33	0.08	0.26	0.20	0.10
p	***	***	***	***	***	***

注：*** 为 p＜0.001。

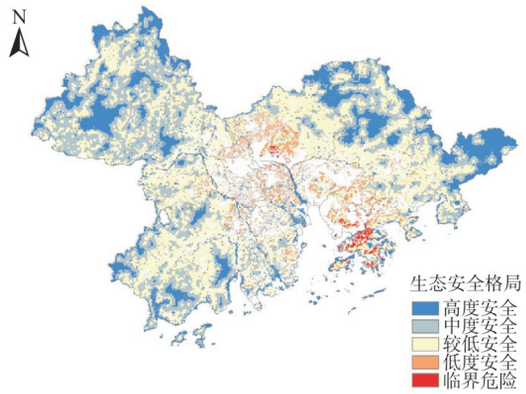


图 3　粤港澳大湾区生态安全格局

Fig. 3　Ecological Security Pattern of the GBA

低度安全和临界危险的区域主要分布在中南部的较发达城市周边，受人类活动干扰强烈且地势平坦，易成为城市扩张的优先区域，需要限制开发，加强生态安全防护。较低安全的区域主要分布在低度安全区域的外围，受到人类活动影响相对较小，但也遭受到了一定的破坏。

3.3　粤港澳大湾区生态用地转化概率

选取高程、生态控制线、到建设用地距离、GDP 密度、人口密度、道路密度等 6 个因子作为自变量，2010—2020 年生态用地转化的结果作为因变量，得到的二元逻辑回归结果如表 5 所示。6 个因子均通过了 0.05 水平的显著性检验。

基于 Wald 统计量[25]来表示每个因子的相对权重，结果表明，距建设用地的距离以及生态控制线的影响最大。其中，距建设用地的距离与转换概率呈负相关，即距离越小，转化概率越高，而生态控制线内区域则呈负相关，即位于生态控制线内的区域转换概率较低。道路密度、GDP 密度以及人口密度与生态用地转化的概率呈正相关。

基于上述结果，得到粤港澳大湾区生态用地转化的概率方程为：

$$P=1-\frac{1}{1+e^{(-1.07\times X1+0.20\times X2+0.22\times X3+0.64\times X4-1.41\times X5-1.09\times X6-0.39)}} \tag{7}$$

式中，$X1$ 为生态控制线；$X2$ 为道路密度；$X3$ 为 GDP 密度；$X4$ 为人口密度；$X5$ 为距建设用地距离；$X6$ 为高程。

表 5　二元逻辑回归结果

Tab. 5　Binary Logistic Regression Results

参数	估计值	标准误差	Wald 统计量	p 值
常量	−0.39	0.06	−6.05	***
生态控制线	−1.07	0.07	−15.39	***
道路密度	0.20	0.03	6.08	***
GDP 密度	0.22	0.05	4.13	***
人口密度	0.64	0.09	7.27	***
建设用地距离	−1.41	0.10	−14.53	***
高程	−1.09	0.09	−12.06	***

注：*** 为 $p<0.001$。

基于概率方程模拟得到的生态用地转化概率分布如图 4 所示。总体上，粤港澳大湾区生态用地转化概率较低，生态用地转化概率平均值为 0.07，最大值为 0.95。从地域上看，江门市、肇庆市、惠州市以及珠海市的平均生态用地转化概率较低，而东莞市、佛山市、广州市以及香港特别行政区的平均生态用地转化概率较高。

生态用地转化概率与生态安全格局在空间上有较好的一致性，生态安全等级高的生态用地转化概率较低，临界危险区域转化概率较高。若保持现有发展速度以及土地政策，东莞市、佛山市、广州市以及香港特别行政区北部生态用地面临着较高的转化风险。

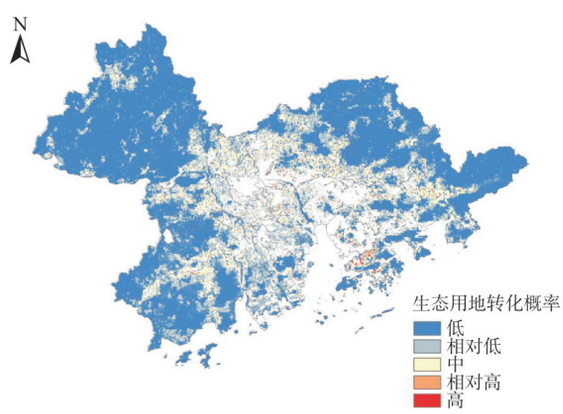


图 4　粤港澳大湾区生态用地转化概率

Fig. 4　Probability of Ecological Land Conversion in the GBA

4　讨论

4.1　粤港澳大湾区市级尺度生态用地转化驱动机制

考虑到不同区域的政策强度、发展速度等条件不同，本研究进一步结合地理探测器从市级尺度来探究各驱动因子的影响（注：澳门特别行政区生态用地面积过小，故不参与分析），得到的结果如表 6 所示。

结果表明，驱动因子在不同区域的影响有着较大的差异。距建设用地距离在广州、东莞、惠州、肇庆及香港特别行政区均为影响最大的因子；生态控制线在深圳、珠海、中山及江门的解释力最强。总体来看，距建设用地距离以及生态控制线是大湾区生

态用地转化的主导因子,高程也对各区域生态用地转化有显著影响,但在各区域解释力差异较大。

表 6 不同区域驱动力分析结果

Tab. 6 Analysis of Driving Forces Across Different Regions

区域	参数	高程	建设用地距离	道路密度	生态控制线	GDP密度	人口密度
广州	q	0.17	0.22	0.05	0.13	0.15	0.03
	p	***	***	***	***	***	**
深圳	q	0.14	0.20	0.08	0.26	0.10	0.05
	p	***	***	***	***	***	0.08
珠海	q	0.04	0.12	0.07	0.20	0.05	0.01
	p	*	***	0.10	***	0.08	0.44
东莞	q	0.08	0.30	0.08	0.03	0.18	0.06
	p	***	***	***	***	***	***
佛山	q	0.02	0.12	0.02	0.07	0.11	0.04
	p	***	***	0.10	***	***	*
惠州	q	0.18	0.44	0.11	0.35	0.12	0.11
	p	***	***	***	***	***	***
中山	q	0.03	0.24	0.05	0.32	0.18	0.07
	p	**	***	0.30	***	***	*
肇庆	q	0.08	0.30	0.10	0.19	0.04	0.08
	p	***	***	***	***	***	***
江门	q	0.05	0.16	0.06	0.26	0.07	0.10
	p	***	***	***	***	***	***
香港	q	0.06	0.20	0.05	0.14	0.11	0.11
	p	*	***	0.31	***	*	0.39

注:* 为 $p<0.05$,** 为 $p<0.01$,*** 为 $p<0.001$。

最后,探讨各区域土地政策因子对生态用地转化的影响,进而了解各区域土地政策执行的具体效果。由表6驱动力分析结果中可以看到,惠州市和中山市的生态控制线的解释力最高,其次是深圳市以及江门市,表明土地政策对上述城市建设用地扩张约束效果较为显著;而东莞市及佛山市的解释力相对较低,生态控制区内存在部分生态用地转化为非生态用地的现象,生态系统服务功能受到一定破坏。因此,这些区域需要进一步划定科学合理的生态控制线,进而有力保护城市生态环境。

4.2 研究局限性及展望

本研究仅基于Landsat遥感影像进行土地利用分类,对于城市内部破碎化的小型生态绿地(如城市绿地、小型水体等)存在一定的识别限制,可能低估了粤港澳大湾区城市建成区内部生态用地的实际面积。其次,30 m分辨率下,一个像元内往往包含多种地物类型(如建筑物、植被与道路),导致城乡交界带、水体边缘等过渡区域分类误差较大,可能会影响转移矩阵的精度。在分类体系方面,本研究采用耕地、林地、草地、水体、建设用地及未利用地六大类,该体系能够较好地反映区域尺度上生态用地整体格局与动态趋势,但对湿地、滩涂等细化生态类型以及公园、苗圃、防护绿地、附属绿地等人为规划建设的城市内部绿地识别有所不足。因此,本研究更适用于区域尺度的自然生态格局分析,对城市建成区内部精细化生态用地管理的指导意义有待结合高分辨率遥感影像进一步验证。

5 结束语

本研究基于GEE平台,构建多维特征集,完成粤港澳大湾区1990—2020年的土地利用制图,使用单一土地利用动态度以及土地利用转移矩阵分析土地利用变化情况,借助地理探测器分析大湾区生态用地变化的驱动力机制,结合生态安全综合指数构建生态安全格局,并使用二元逻辑回归模拟大湾区生态用地转化概率。结果表明:

1) 1990—2020年,粤港澳大湾区经历了快速城市化进程,林地、耕地、草地以及水体等4类生态用地面积持续下降;建设用地持续扩张,面积不断扩大;1990—2020年,粤港澳大湾区的土地利用变化明显,耕地为最大的转出类型,林地次之,而建设用地为最大的转入类型。

2)总体来说,高程、距建设用地距离、生态控制线、GDP密度、人口密度以及道路密度是粤港澳大湾区的生态用地转化的主要驱动因素,其中距建设用地距离以及生态控制线对大湾区生态用地转化影响最大。

3)离建设用地近且地势平坦的生态用地转化概率更高,若保持当前发展速度以及生态控制线,东莞市、佛山市、广州市以及香港特别行政区北部生态用地将面临较高的转化风险。

参 考 文 献

[1] Powers R P, Jetz W. Global Habitat Loss and Extinction Risk of Terrestrial Vertebrates Under Future Land-Use-Change Scenarios[J]. Nature Climate Change, 2019, 9(4): 323-329

[2] 肖红克, 李洪忠, 王莉, 等. 粤港澳大湾区土地利用及生态系统服务价值的变化——以广佛肇为例[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 290-297

[3] Deng Guangyi, Jiang Haibo, Zhu Shiying, et al. Projecting the Response of Ecological Risk to Land Use/Land Cover Change in Ecologically Fragile Regions[J]. Science of the Total Environment, 2024, 914: 169908

[4] Cook E M, Kim Y, Grimm N B, et al. Nature-Based

Solutions for Urban Sustainability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2025, 122(29): e2315909122

[5] Peng Jian, Zhao Mingyue, Guo Xiaonan, et al. Spatial-Temporal Dynamics and Associated Driving Forces of Urban Ecological Land: A Case Study in Shenzhen City, China[J]. Habitat International, 2017, 60: 81-90

[6] Guo Song, Zhang Qingtai, Ling Yuansheng, et al. Identifying Ecological Priority Protection and Restoration Areas Based on the Changing Characteristics of 'Past-Future' Ecological Security Patterns: A Case Study of Nanning[J]. Ecological Indicators, 2026, 182: 114617

[7] 鲍文楷, 杨园园, 邹利林. 快速城镇化地区土地利用变化强度及驱动力新特征——以京津冀地区为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(10): 124-134

[8] 张瑞, 李朝奎, 姚思妤, 等. 融合地理探测器和地理加权回归的太原市建设用地变化因素研究[J]. 测绘通报, 2022(5): 106-109

[9] 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[J]. 地理研究, 2020, 39(8): 1 725-1 738

[10] Yao Guohui, Li Haidong, Wang Nan, et al. Spatiotemporal Variations and Driving Factors of Ecological Land During Urbanization—A Case Study in the Yangtze River's Lower Reaches[J]. Sustainability, 2022, 14(7): 4256

[11] Ye Ying, Chen Caixia, Yu Chunxue, et al. Identifying Stepping-Stones Within Small Wetlands in Highly Urbanized Areas and Under Network Construction: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. Ecological Indicators, 2025, 176: 113622

[12] 王文静, 韩宝龙, 郑华, 等. 粤港澳大湾区生态系统格局变化与模拟[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3 364-3 374

[13] 祖立辉, 杨静, 苗世源. 基于遥感影像的临湘市土地利用/覆盖时空变化研究[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(2): 30-35

[14] Kupidura P. The Comparison of Different Methods of Texture Analysis for Their Efficacy for Land Use Classification in Satellite Imagery[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1233

[15] 顾晶晶, 冶运涛, 何毅, 等. 面向西北内陆复杂地形地貌区域的土地利用分类方法[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(5): 73-77

[16] Nadi A, Moradi H. Increasing the Views and Reducing the Depth in Random Forest[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 138: 112801

[17] 任斐鹏, 江源, 熊兴, 等. 东江流域近20年土地利用变化的时空差异特征分析[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 143-152

[18] Huang Boqiang, Huang Jinliang, Gilmore P R J, et al. Comparison of Intensity Analysis and the Land Use Dynamic Degrees to Measure Land Changes Outside Versus Inside the Coastal Zone of Longhai, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 89: 336-347

[19] 孙平, 陈超, 赵朋, 等. 基于遥感智能解译技术的土地利用时空变化特征及驱动因素分析[J]. 测绘通报, 2025(S1): 138-142

[20] 周玉杰, 靳凤攒, 高玉荣, 等. 开封市城市空间扩展及其驱动力分析[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(4): 67-69

[21] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134

[22] 刘康, 李月娥, 吴群, 等. 基于Probit回归模型的经济发达地区土地利用变化驱动力分析——以南京市为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2 131-2 138

[23] 於冉, 余祺琪, 李雪, 等. 安徽省耕地生态安全评价及障碍因子分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2026, 34(3): 706-716

[24] Liu Shihao, Song Wei. Six Decades of Land Use Patterns on the Northern Slope of the Tianshan Mountains: Spatio-Temporal Dynamics, Driving Mechanisms, and Future Scenarios[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 535: 147101

[25] Druga M, Minár J. Cost Distance and Potential Accessibility as Alternative Spatial Approximators of Human Influence in LUCC Modelling[J]. Land Use Policy, 2023, 132(C): 106840

[26] 王权典. 我国生态保护红线立法理念及实践路径探讨[J]. 学术论坛, 2020, 43(5): 25-34

[27] 邓纲, 许恋天. 我国流域生态保护补偿的法治化路径——面向"合作与博弈"的横向府际治理[J]. 行政与法, 2018(4): 44-51

[28] 谢玲. 我国生态安全立法的路径选择[J]. 广东海洋大学学报, 2014, 34(2): 68-73

[29] 覃洁, 秦成, 周慧杰, 等. 基于生态承载力供需与生态服务价值的广西耕地生态补偿研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(3): 77-81

[30] 何可, 闫阿倩, 王璇, 等. 1996～2018年中国农业生态补偿研究进展——基于中国知网1582篇文献的分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020(4): 65-71

修回日期: 2026-05-08

第一作者: 钟秀雯, 硕士, 现主要从事生态和农业遥感等研究。E-mail: zhongxiuwen@whu.edu.cn

通信作者: 邵振峰, 博士, 教授, 现主要从事城市遥感与智慧城市等研究。E-mail: shaozhenfeng@whu.edu.cn