北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

土地利用转型背景下海南岛景观格局演变与生态安全评价

赵丽敏 关颖慧 周金星

Landscape pattern evolution and ecological security evaluation of Hainan Island, southern China under background of land use transformation

Zhao Limin, Guan Yinghui, Zhou Jinxing

引用本文:
赵丽敏, 关颖慧, 周金星. 土地利用转型背景下海南岛景观格局演变与生态安全评价[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(6):43–54. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240408
Zhao Limin, Guan Yinghui, Zhou Jinxing. Landscape pattern evolution and ecological security evaluation of Hainan Island, southern China under background of land use transformation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6):43–54. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240408

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240408

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响

Impacts of land use change on ecosystem service value in Bashang Area of Hebei Province, northern China

北京林业大学学报, 2019, 41(8): 94–104. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180244

基于LUCC的承德市域生态系统服务价值演变分析与优化研究

Evolution analysis and optimization research of ecosystem service value in Chengde City, Hebei Province of northern China based on land use/land cover change (LUCC)

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 106–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190480

海南岛次生低地雨林天然更新棕榈藤种群动态

Population dynamics of natural regeneration of rattan in secondary lowland rain forest in Hainan Island, southern China

北京林业大学学报, 2018, 40(10): 86–94. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180213

海南不同林分地表径流特征分析

Characteristics analysis of surface runoff for three types of forests in Hainan Island, southern China

北京林业大学学报, 2019, 41(11): 22–30. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190275

基于生态红线的洱海流域生态安全格局构建

Construction of ecological security patterns based on ecological red line in Erhai Lake Basin of southwestern China

北京林业大学学报, 2018, 40(7): 85–95. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170074

基于ENVI技术的永定河段景观格局演变与优化研究

Evolution and optimization research on landscape pattern of Yongding River section of Beijing based on ENVI technology

北京林业大学学报, 2021, 43(6): 118–129. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200204

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240408

土地利用转型背景下海南岛景观格局演变与生态安全评价

赵丽敏[1,2]　关颖慧[1]　周金星[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 卓资县林业和草原局，内蒙古 卓资 012300）

摘要:【目的】研究海南岛景观生态安全格局演变，为优化当地土地利用结构和提升生态系统管理水平提供理论依据。**【方法】**基于海南岛 2000、2010 和 2020 年土地利用、造林及社会经济数据，结合土地利用转移矩阵与景观格局指数，探究海南岛景观生态安全格局的时空演变特征及其驱动机制。**【结果】**(1)林地和耕地是海南岛的优势景观地类，平均面积占比分别为 67.01% 和 24.76%。2000—2020 年，土地利用类型呈现总体稳定而局部变化剧烈的特点，其中建设用地的增加(1 241.82 km^2)和草地面积的减少(1 049.38 km^2)最为明显，变化率高达 232.45% 和 67.31%。(2)海南岛景观类型破碎化程度加剧，尤其是耕地和建设用地。但景观蔓延度和连通性有所提升，景观多样性和均匀度则表现出“先降后升”的阶段性变化特征。(3)海南岛景观生态安全水平整体呈恶化态势。20 年间，较低、低安全区面积增加了 10 824.10 km^2，安全、较安全区面积减少了 13 122.56 km^2；至 2020 年，安全、较安全区面积占比仅有 47.52%。空间上，海南岛中南部的景观生态安全水平逐步提高并趋于稳定，而沿海地区则逐渐恶化。(4)景观生态安全水平空间集聚性显著，聚集单元由“分散”逐步转变为“集中”。2020 年，高−高值集聚主要分布在研究区中南部，而低−低值集聚主要集中在沿海地区。**【结论】**城市化用地需求的急剧扩张和造林力度的下降可能是导致海南岛景观生态安全水平退化的重要因素。未来，应持续推动海南岛中南部地区的生态保护工作，以保障其生态屏障功能的发挥；同时，加强沿海地区的生态修复，以优化其景观生态安全格局，确保生态安全水平的长期稳定。

关键词：海南岛；土地利用；景观生态安全；空间自相关分析
中图分类号：S727；F301　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)06−0043−12
引文格式：赵丽敏，关颖慧，周金星. 土地利用转型背景下海南岛景观格局演变与生态安全评价 [J]. 北京林业大学学报，2025，47(6)：43−54. Zhao Limin, Guan Yinghui, Zhou Jinxing. Landscape pattern evolution and ecological security evaluation of Hainan Island, southern China under background of land use transformation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6): 43−54.

Landscape pattern evolution and ecological security evaluation of Hainan Island, southern China under background of land use transformation

Zhao Limin[1,2]　Guan Yinghui[1]　Zhou Jinxing[1]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Zhuozi County Forestry and Grass Bureau, Zhuozi 012300, Inner Mongolia, China)

Abstract: [**Objective**] This paper studies the spatio-temporal evolution of landscape ecological security pattern in Hainan Island of southern China to provide a theoretical basis for optimizing the local land use structure and enhancing ecosystem management. [**Method**] We explored the spatial-temporal evolution characteristics and driving mechanisms of Hainan Island's landscape ecological safety patterns based on land use, afforestation and socio-economic data during 2000−2020 by means of land use transition matrix

收稿日期: 2024−12−03　**修回日期:** 2025−06−03
基金项目: 海南省林业局本级项目(HNYZ-2022270)。
第一作者: 赵丽敏。主要研究方向：林草资源监测。Email：mengshan1818@163.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 关颖慧，副教授。主要研究方向：气候变化与植被恢复研究。Email：gyhdem@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

analysis and landscape ecological security index calculation. [**Result**] (1) Forest land and cultivated land were dominant landscape types in the past two decades, with an average area proportion of 67.01% and 24.76% of the study area, respectively. In general, the land use changes had exhibited overall stability with drastic variations, increase in built-up land (1 241.82 km^2) and decrease in grassland (1 049.38 km^2) were most notably, with changing rates of 232.45% and 67.31%, respectively. (2) The landscape fragmentation in Hainan Island had intensified, especially for cultivated and built-up land. However, landscape contagion and connectivity had improved, while landscape diversity and uniformity had shown a phase of "first decrease, then increase." (3) The overall landscape ecological safety level of Hainan Island had deteriorated. During the 20 years, the proportion of area with low and lower security level area increased by 10 824.10 km^2, and high and higher security level area decreased by 13 122.56 km^2. By 2020, the high and higher security level area only accounted for 47.52%. Spatially, the landscape ecological safety level in the central and southern parts of Hainan Island had gradually improved and stabilized, while the coastal areas had progressively deteriorated. (4) In addition, the landscape ecological security was featured by significantly spatial agglomeration. The aggregation unit gradually changed from "dispersed" to "centralized", with high-high value clustered in the south central and low-low value clustered in the coastal area in 2020. [**Conclusion**] The rapid expansion of urbanization land demand and the decrease of afforestation are main reasons for degradation of landscape ecological security in Hainan Island. In the future, ecological conservation efforts in the central and southern regions of Hainan Island should be continuously promoted to ensure the effectiveness of its ecological barrier function; at the same time, ecological restoration in coastal areas should be strengthened to optimize its landscape ecological safety pattern and ensure the long-term stability of ecological safety levels.

Key words: Hainan Island; land use; landscape ecological security; spatial autocorrelation analysis

生态安全是生态系统完整度与健康水平的综合体现[1]，对生态系统的自身稳定和人类社会可持续发展具有重要的支撑作用[2]。土地利用变化作为生态环境变化最直接的表现形式[3]，对生态系统的物质循环和能量流动具有深远影响[4−5]。近年来，随着经济发展和城市化进程的加快，土地利用发生剧烈变化，导致生态安全问题愈发突出。景观生态安全评价已成为生态学、环境科学和地理学的研究热点。

景观生态安全评价是一个复杂的研究领域，涉及多学科的知识和方法。目前，关于景观生态安全的研究主要分为三类。一是基于景观格局指数[6]，结合专家打分、层次分析等方法[7−8]确定各指标的权重，进而完成评价。该方法可操作性强，广泛应用于不同尺度土地利用变化下的生态安全评价。二是通过构建生态安全评价模型，如压力−状态−响应（pressure-state-response，PSR）模型[9−10]、生态足迹模型[11]等，基于相应的评价指标体系，系统评估生态安全格局的演变过程。该类模型逻辑清晰，但数据依赖性强，数据的准确性和可获得性对结果有很大影响。三是根据评价结果，进行生态安全格局的优化[12]，并制定有针对性的政策和措施，帮助决策者识别环境问题的根源。这些研究综合运用多种模型和分析工具，为深入理解景观生态安全格局的动态变化提供了新的视角和方法，促进了对景观生态系统复杂性和多样性的全面认识。

海南岛是我国第二大岛，也是我国热带雨林生态系统保存较为完好、生物多样性极为丰富且具有极高保护价值的区域之一[13]，陆地面积小、海洋面积大，土地资源有限。海南省自 1999 年开始建设“生态省”，2002 年实施退耕还林政策，2010 年开始建设国际旅游岛，2018 年开始建设自由贸易港。作为中国重要的生态屏障和旅游胜地，海南省的土地利用转型对景观格局和生态安全产生了深远影响。不少学者亦开展了相应研究，雷金睿等[14−15]针对海南岛湿地景观生态安全格局演变、生态系统服务评估、生态系统健康评价等方面进行了系统研究；亦有学者从生态脆弱性[16−17]、植物群落多样性[18]等方面入手，探究了海南岛部分地区的植被群落特征和景观脆弱度的变化。

然而，现有研究还存在以下不足。第一，以往研究多侧重于湿地这一土地利用类型的景观生态安全演变[14]，缺乏对所有土地利用类型的综合评估。这种局限性可能导致对生态系统的认识不够全面，进而影响生态保护和管理策略的制定。第二，现有研究主要集中在三亚市[17]、海口市[18]、热带国家森林公园[19]、尖峰岭[20]等热点地区。因此，有必要对海南岛全域所有土地利用类型的景观生态安全格局进行深入研究，以全面了解其生态系统的动态变化和潜在

风险，从而制定更加科学、有效的生态保护与管理策略。

鉴于此，本研究综合应用土地利用转移、景观格局指数计算、景观生态安全评价以及空间自相关分析等方法，对海南岛 2000—2020 年土地利用、景观格局指数与生态安全格局的演变特征进行系统研究，并剖析其驱动机制。研究结果将为该区进行合理的土地利用规划并开展生态建设提供科学指导。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

海南岛是海南省的陆地主体部分，面积为 3.39 × 10^4 km^2，海岸线长 1 823 km，其地理位置位于 108°37′～111°03′E，18°10′～20°10′N。海南岛地形中间高耸，四周低平，以五指山（1 867 m）、鹦哥岭（1 811 m）为高点，海拔向外围逐级下降，由山地、丘陵、台地和平原构成环形层状地貌类型。海南岛是典型的热带季风气候，年平均气温 22～27 ℃，年平均降水量为 1 639 mm，雨量充沛，有明显的多雨季和少雨季。海南岛水资源充沛，河流众多，水系呈辐射状分布，独流入海的河流有 154 条，其中 38 条河流的流域面积超过 100 km^2（图 1）。

1.2　数据来源

本文采用的海南岛土地利用数据（2000、2010 和 2020 年）来自于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn/data），空间分辨率 30 m，投影方式统一为 Krasovsky_1940 Albers。该数据集将地类划分为耕地、林地、草地、湿地、水体、建设用地、裸地及海域。造林、人口和 GDP 数据来自《海南统计年鉴》，其中造林面积包括荒山荒（沙）地造林、有林地造林和更新造林，并涵盖了退耕还林面积。

1.3　研究方法

1.3.1　土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵能够全面具体地表达任意时段内各种用地类型之间的相互转化关系[6]，从而揭示区域土地利用的时空演变特征。其表达式如下。

$$\boldsymbol{S}_{ab}=\begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{S}$ 表示面积，n 为研究区土地利用类型数，a、b 分别为研究期初与期末的土地利用类型。

1.3.2　景观格局指数

景观格局指数能够反映不同尺度上各种生态过程对区域的干扰作用，揭示景观空间的结构特征[21−22]。本文选取斑块密度（patch density，PD）、边缘密度（edge density，ED）、最大斑块面积占比（largest patch area proportion，LPI）和周长−面积分维数（perimeter-area fractal dimension，PAFRAC）4 个类型水平指数，以反映研究区内景观的破碎化、优势度和复杂性。同时选取蔓延度（contagion index，

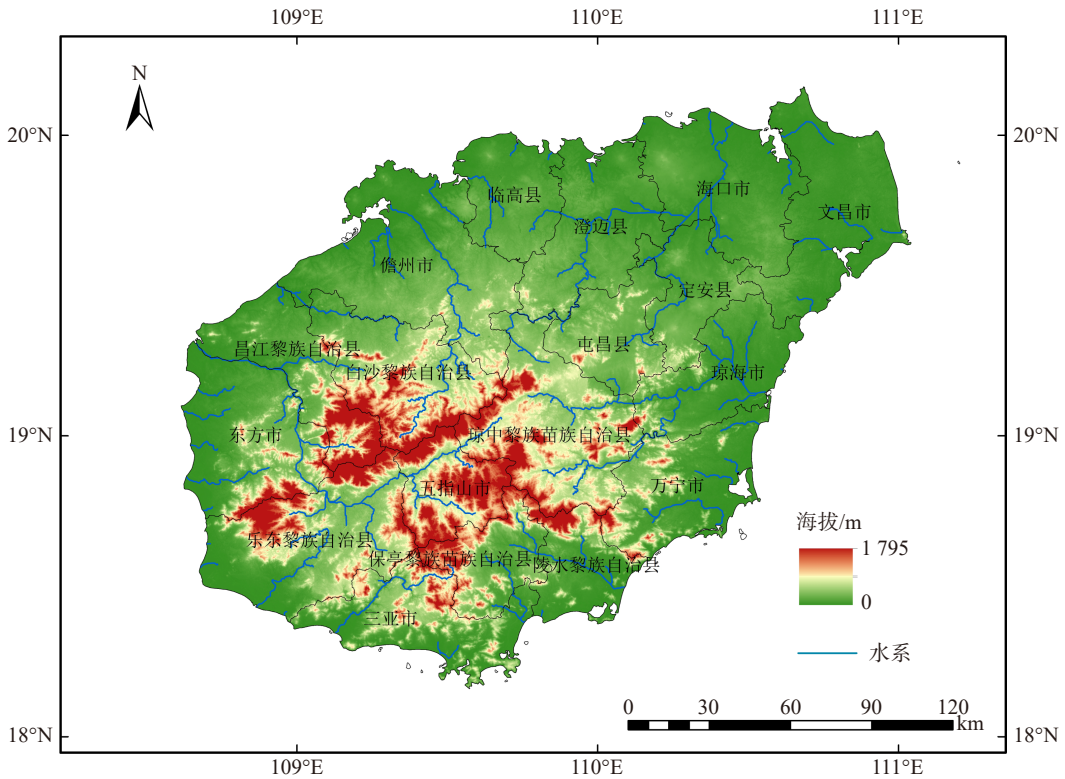


图 1　海南岛地理位置

Fig. 1　Geographical location of Hainan Island

CONTAG)、香农多样性指数(Shannon's diversity index，SHDI)和香农均匀度指数(Shannon's evenness index，SHEI)3 种景观水平指数，以表征研究区内景观的蔓延度、多样性和均匀度(表 1)。在 Fragstats 4.2 软件中计算上述指数，以对海南岛景观格局变化特征进行系统分析。

1.3.3 景观生态安全指数

景观生态安全指数可以定量化表达景观生态安全，基于景观干扰度和景观脆弱度来计算。景观干扰度通过加权计算景观破碎度、景观分离度和景观优势度得到，反映不同景观生态系统受到影响的程度。根据前人研究，这三者的权重分别设定为 0.5、0.3 和 0.2[7]。景观脆弱度表示景观生态系统在面对外部干扰或压力时的敏感性和易损性。根据已有研究并结合研究区实际情况对不同景观类型赋值[18]：裸地由于缺乏植被覆盖和保护，生态系统较为脆弱，因此赋值为 7；耕地易受到各种自然和人为因素的影响，赋值为 6；湿地和水体相比海域受人类干扰略大，且部分水域紧邻建设用地和耕地，脆弱度更高，因此湿地、水体赋值为 5，海域赋值为 4；林地和草地相对较为稳定，分别赋值为 2 和 3；建设用地最为稳定，赋值为 1，详见表 2。运用 ArcGIS10.8 软件，对研究区进行 5 km × 5 km 幅度的网格化采样，共采集评价单元 1 488 个，并对研究期的景观生态安全指数进行反距离加权法(inverse distance weighted，IDW)插值，生成景观生态安全格局分布。

1.3.4 景观生态安全评价标准

为突出海南岛景观生态安全的差异，参考现有研究成果[22]，并结合研究区景观生态安全指数实际情况，采用 Nature Break 法将结果划分为 5 个等级，并以 2000 年分类区间作为基准，统一 2010 和 2020 年分类区间(表 3)。

1.3.5 空间自相关分析

全局空间自相关分析可以判断研究区土地利用变化是否具有空间集聚性，局部空间自相关则能反映局部区域内的空间异质性和不稳定性。本研究采用莫兰指数(I)和 LISA 指数来分析海南岛景观生态安全指数的空间集聚性[7, 22]。

(1)全局空间自相关。

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(x_i-\bar{x})\left(x_j-\bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{2}$$

式中：n 为变量 x 的样点总数；x_i 和 x_j 为 i、j 样区上某属性的观测值；$\bar{x}$为 n 样区属性值的平均值；$\boldsymbol{W}_{ij}$ 为空间权重矩阵。Moran's $I\in[0, 1]$，值为正表示空间分布具有正的空间自相关性，值为负表示空间分布

表 1 研究区景观格局指数

Tab. 1 Landscape pattern index of study area

尺度	景观格局指数	指数意义
类型水平	斑块密度 PD/(个·km^{-2})	单位面积上某一类型斑块的个数
	边缘密度 ED/(m·km^{-2})	反映景观或类型被边界分割的程度
	最大斑块面积占比 LPI/%	某一类型中最大斑块的面积占总面积的比例
	周长−面积分维数 PAFRAC	反映各类型斑块形状的复杂性
景观水平	蔓延度 CONTAG/%	描述景观中不同斑块类型的团聚程度和蔓延趋势
	香农多样性指数	基于信息理论的测量指数，能反映景观多样性
	香农均匀度指数	反映景观中各斑块在面积上分布的均匀程度

表 2 景观生态安全指数的计算公式

Tab. 2 Calculation formula of landscape ecological security index

名称	计算公式	说明
景观破碎度 (C_i)	$C_i=N_i/A_i$	N_i和A_i为景观类型i的斑块数量和面积
景观分离度 (S_i)	$S_i=\frac{A}{2A_i}\sqrt{\frac{N_i}{A}}$	A为景观总面积，km^2
景观优势度 (D_i)	$D_i=\frac{2\ln(P_i/4)}{\ln A_i}$	P为景观类型i的周长，km
景观干扰度 (E_i)	$E_i=aC_i+bS_i+cD_i$	a，b，c为权重，分别赋值0.5，0.3和0.2
景观脆弱度 (F_i)	F_i：专家咨询法	按景观受干扰的敏感性进行赋值，具体为裸地7，耕地6，湿地、水体5，海域4，草地3，林地2，建设用地1
景观生态安全指数 (E_S)	$E_S=\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{A_{ki}}{A_k}\right)(1-10E_iF_i)$	m为景观类型数，A_{ki}代表第k个采样单元第i种景观类型的面积

表 3　景观生态安全评价等级

Tab. 3　Evaluation levels of landscape ecological security

景观生态安全指数(E_S)	景观生态安全水平	景观生态安全指数(E_S)	景观生态安全水平
$0.65 \leqslant E_S < 0.82$	低安全	$0.91 \leqslant E_S < 0.95$	较安全
$0.82 \leqslant E_S < 0.86$	较低安全	$0.95 \leqslant E_S < 1.00$	安全
$0.86 \leqslant E_S < 0.91$	一般安全		

具有负的空间自相关性，0 表示不存在空间自相关性。

（2）局部空间自相关。

$$\mathrm{LISA}_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} \sum_j W_{ij}(x_j - \bar{x}) \quad (i \neq j) \qquad (3)$$

$\mathrm{LISA}_i \in [0, 1]$，数值为正表示该区域单元周围相似值在空间上的集聚表现为高−高集聚或低−低集聚；数值为负表示非相似值在空间上的集聚表现为高−低集聚或低−高集聚，0 表示该区域与相邻区域无空间关联性。

2　结果与分析

2.1　土地利用动态变化

2.1.1　土地利用结构变化

2000—2020 年，海南岛的主要景观地类为林地和耕地，面积和占比超过 89%。20 年间，林地、湿地、水域、建设用地面积分别增加了 443.03、17.70、227.27、1 241.82 km^2。建设用地的扩张最为明显，2000—2010 年间增加了 14%，2010—2020 年间增加了 190%，用地面积扩大到 3 倍（表 4）。耕地、草地、海域分别减少了 827.26、1 049.37、25.02 km^2。草地面积减少幅度最大，总体减少了 67%。裸地相对较为稳定。从空间上看，林地主要集中在研究区的中部偏南；耕地主要沿海岸线与林地边缘交错分布；建设用地主要分布在沿海地区（图 2）。

2.1.2　土地利用类型转移

2000—2020 年，海南岛土地利用转换的主要方向为林地和耕地的相互转换、草地向林地的转换及耕地和林地向建设用地的转换（图 3a）。20 年间，总计 2 028.59 km^2 的耕地转为林地，1 657.94 km^2 林地转为耕地，1 074.70 km^2 草地转为林地。此外，建设用地的主要转入来源为耕地（510.24 km^2）和林地（727.50 km^2），主要位于海南岛的北部和东南部沿海地区，说明城镇化扩张给当地带来较大生态压力。

不同时期来看，2000—2010 年，海南岛土地利用类型主要由耕地和草地转为林地，转移面积分别为 1 645.63 km^2 和 1 182.23 km^2，而同期林地向耕地和草地的转换分别为 345.22 km^2 和 229.63 km^2，最终导致耕地和草地面积分别减少了 1 297.99、934.51 km^2。此外，该时期建设用地增加的主要来源为林地，共有 129.31 km^2 林地转化为建设用地（图 3b）。2010—2020 年，林地与耕地的相互转换更加激烈，林地向耕地转换 1 927.32 km^2，耕地向林地转换 1 027.32 km^2。同时建设用地扩张明显，耕地和林地向建设用地转换的面积达 1 137.02 km^2，相比 2000—2010 年增加了 5.68 倍（图 3c）。整体来看，2000—2020 年海南岛各用地类型面积的变化相对较小，但林地和耕地之间的相互转换及二者向建设用地转换较为明显，土地利用时空变化表现为整体稳定而局部变化剧烈的特征。

2.2　景观格局变化分析

2.2.1　土地利用类型水平

无论是斑块密度（PD）还是边缘密度（ED），耕地、林地和草地的 PD 和 ED 均较高（图 4），表明这

表 4　2000—2020 年海南岛土地利用类型面积及占比情况

Tab. 4　Area and proportions of landscape types in Hainan Island from 2000 to 2020

土地利用类型	2000年		2010年		2020年	
	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%
耕地	9 096.32	26.85	7 798.33	23.02	8 269.06	24.41
林地	21 772.32	64.26	24 125.99	71.21	22 215.35	65.57
草地	1 558.91	4.60	624.40	1.84	509.54	1.50
湿地	46.86	0.14	39.16	0.12	64.56	0.19
水体	808.98	2.39	592.85	1.75	1 036.25	3.06
建设用地	534.24	1.58	611.52	1.80	1 776.06	5.24
裸地	19.61	0.06	20.46	0.06	19.40	0.06
海域	44.31	0.13	7.98	0.02	19.29	0.06

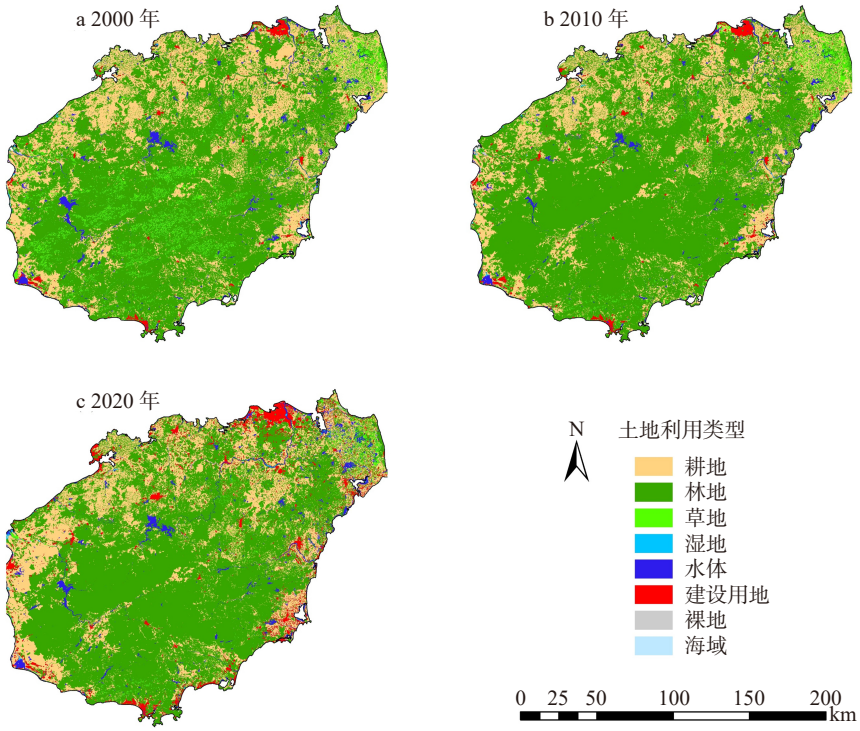
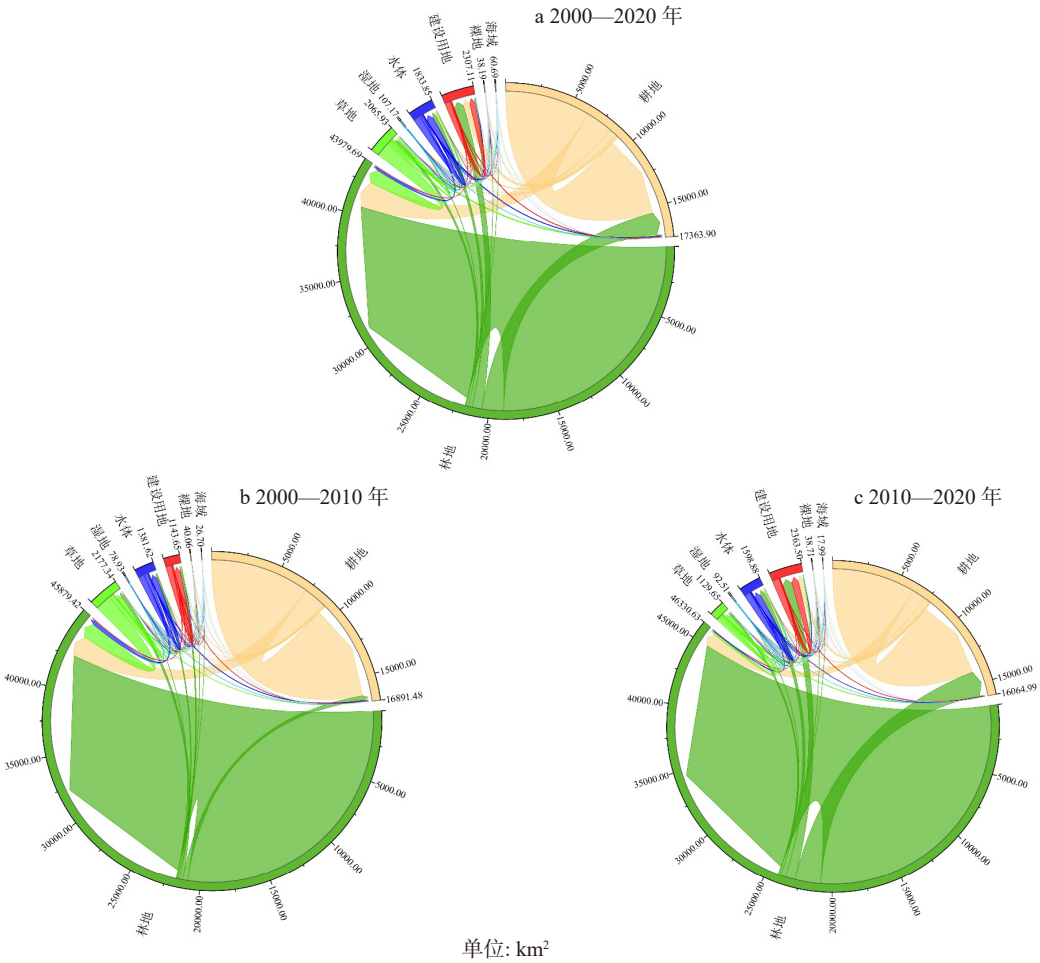


图 2 2000—2020 年海南岛土地利用类型空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use types in Hainan Island from 2000 to 2020



单位: km²

图 3 2000—2020 年海南岛土地利用转移格局

Fig. 3 Land use transition pattern of Hainan Island from 2000 to 2020

3 种土地利用类型的破碎化程度最为严重。这主要是由海南岛的土地利用类型分布特点决定，耕地主要沿海岸线与林地边缘交错分布，草地主要交错分布在中部五指山林区内，从而造成 3 种土地利用类型在空间分布上的破碎化。同时，耕地和建设用地的 PD 和 ED 均呈上升态势，说明耕地和建设用地更加趋于破碎化，其土地利用景观遭到了不同程度的扰动，在空间分布上变得更加分散和不连续。而林地和草地的 ED 为降低趋势，说明林地和草地的边界趋于规整。

最大斑块面积占比(LPI)的变化特征表明，2000—2020 年，海南岛的优势景观类型是林地。2000—2010 年，大面积的耕地和草地转为林地，导致林地面积增加了 2 353.67 km^2，LPI 高达 65.84%；2010—2020 年，林地 LPI 减小为 55.95%，这与该时期林地向建设用地、耕地转换有关。

耕地、湿地、水体、建设用地和裸地的周长−面积分维数(PAFRAC)呈下降趋势(图 4)，说明受人为干扰其形状趋于规整，意味着人类对土地利用的控制和优化正在逐步加强，土地利用类型变得更加集中和有序，一定程度上减少了破碎化和边界复杂性。

2.2.2　景观水平

在景观水平上，海南岛的景观蔓延度(CONTAG)整体有所增加，景观呈现较为集中和连片的状态，连通性增强。香农多样性指数(SHDI)和香农均匀度指数(SHEI)呈“先降后升”的阶段性变化特征，这主要是由于研究期间人类活动对景观的干扰程度不同。具体而言，2000—2010 年，随着城市化进程的加快，原始自然景观被大量开发和改造(草地和海域面积分别减少了 59.95%、81.98%)，导致生物栖息地破碎化和物种多样性下降，SHDI 和 SHEI 分别降低 15.63%、15.21%。2010 年以后，随着当地生态保护意识的增强和相关政策的实施，如自然保护区的建立以及生态修复工程的推进，景观格局逐渐得到改善，生态系统的连通性和稳定性逐步增强，物种多样性和均匀度逐步恢复，SHDI 和 SHEI 再次上升(表 5)。

2.3　景观生态安全格局时空演变

2.3.1　景观生态安全指数分析

2000—2020 年，研究区景观生态安全水平在经历一段时期的改善后出现明显下降(表 6，图 5)。2000 年，海南岛景观生态安全水平以较安全为主，较安全区面积为 29 092.66 km^2，占比高达 85.77%。2010 年，研究区景观生态安全水平明显提升，较安全区和安全区面积占比达到 97.58%，相比 2000 年增加了 3 858.09 km^2。空间上，研究区中南部的景观生态安全水平整体较高，这些区域是林地的集中分布区，并分布有海南热带雨林国家森林公园，生态系统较为稳定和健康[23]。

2010—2020 年，海南岛景观生态安全水平逐渐恶化(表 6，图 5)。较安全区和安全区面积占比仅有 47.52%，相比 2010 年下降了 16 980.65 km^2。较低和低安全区面积占比高达 33.27%，主要集中在北部和

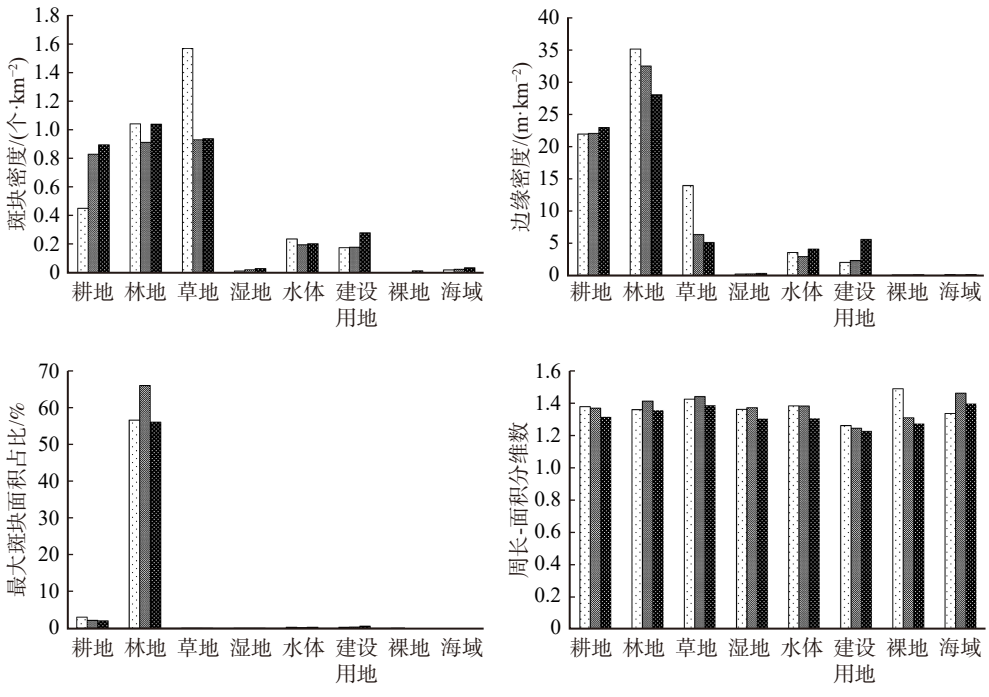


图 4　2000—2020 年海南岛不同土地利用类型景观格局指数

Fig. 4　Landscape pattern index of different land use types in Hainan Island from 2000 to 2020

表 5 2000—2020 年海南岛景观水平指数

Tab. 5 Landscape level index of Hainan Island from 2000 to 2020

年份	蔓延度/%	香农多样性指数	香农均匀度指数
2000年	70.77	0.96	0.46
2010年	74.87	0.81	0.39
2020年	72.30	0.97	0.44

表 6 2000—2020 年海南岛不同等级景观生态安全区面积及其占比变化

Tab. 6 Area and proportion change of landscape ecological security zone of different grades in Hainan Island from 2000 to 2020

景观生态安全区	2000年		2010年		2020年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
低安全区	130.51	0.38	0.00	0.00	6 305.86	18.59
较低安全区	331.93	0.98	0.00	0.00	4 980.68	14.68
一般安全区	4 214.90	12.43	819.25	2.42	6 513.36	19.20
较安全区	29 092.66	85.77	16 064.46	47.36	8 963.04	26.43
安全区	149.70	0.44	17 035.99	50.22	7 156.76	21.10

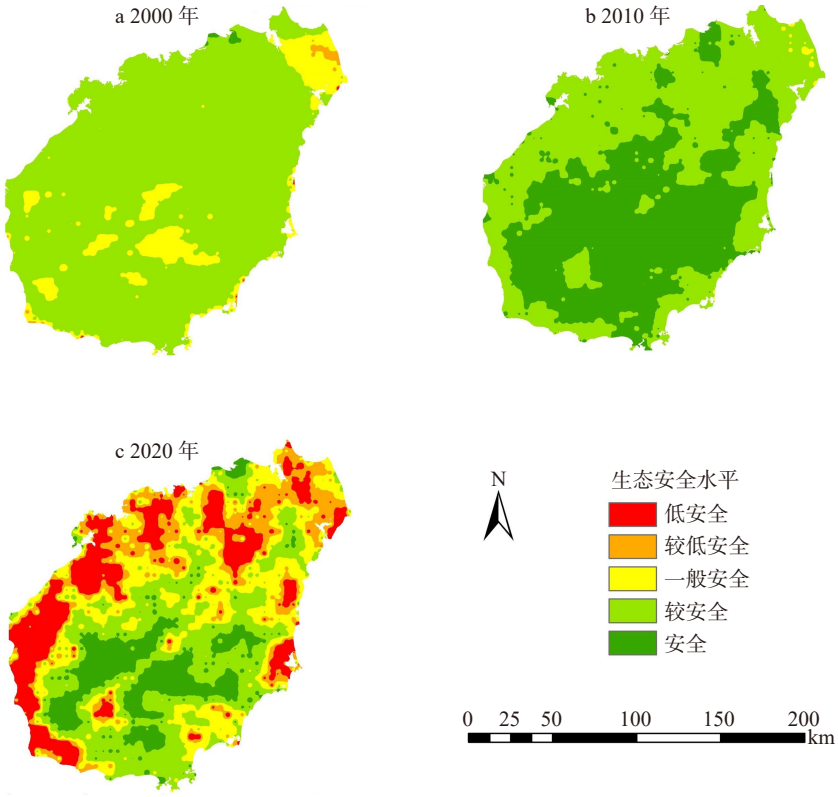


图 5 2000—2020 年海南岛景观生态安全格局时空变化

Fig. 5 Spatio-temporal changes of landscape ecological security pattern in Hainan Island from 2000 to 2020

西部人类活动频繁、开发力度较大的沿海地区。这进一步说明了海南岛城市化进程加快、建设用地迅速扩张对当地景观生态安全产生了较大影响。

2.3.2 景观生态安全空间自相关分析

2000、2010、2020 年的 Moran's *I* 值分别为 0.21、0.70、0.68，为空间正相关，且通过了显著性水平检验（$P = 0.05$），说明海南岛的景观生态安全指数在空间分布上具有明显的集聚性（图 6）。局部空间自相关结果表明，2000 年，聚集单元较为分散，整体以高–高集聚分布，低–低集聚主要分布在东北部。2010 年，生态安全指数聚集单元趋向集中，高–高集聚主要集中在研究区南部，而低–低集聚仍然主要分布在东北部，并且面积进一步扩大。这表明 2000—2010 年海南岛中南部生态安全水平逐渐提升，东北部生

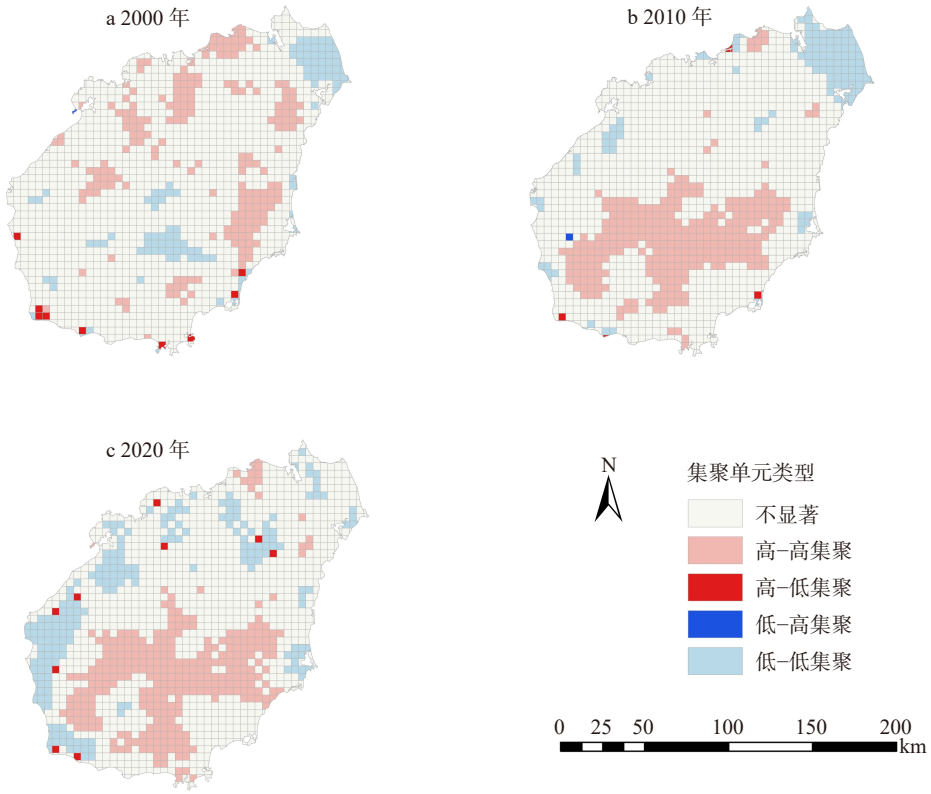


图 6　2000—2020 年海南岛景观生态安全局部空间自相关分析

Fig. 6　Local spatial autocorrelation analysis of landscape ecological security in Hainan Island from 2000 to 2020

态安全水平持续下降。2020 年，高−高集聚依然保持在中南部地区，说明中南部地区的生态安全水平逐步稳定，但低−低集聚趋于分散并且面积有所增加，东北部地区的低−低集聚分布缩小，但西南部沿海地区的低−低集聚明显增多。可见，海南岛东北部的生态安全水平虽然较低，但近年来通过一系列积极的治理措施，生态环境正逐步得到改善。

以上结果表明，海南岛中南部作为林地的集中分布区，发挥着关键的生态屏障功能，为了确保这一功能的持续发挥，未来需进一步提升林地的生态系统服务能力和抗干扰能力。与此同时，沿海地区由于耕地与各类用地交错分布，且是重点建设开发区域，生态系统尤为脆弱[23]。因此，沿海地区未来必须高度重视生态建设与保护，通过科学的土地利用规划、严格的环境监管以及生态修复工程，减缓人类活动对生态系统的负面影响，增强生态系统的韧性和可持续性，确保区域生态安全。

3　讨　　论

本文的研究结果表明，2000—2020 年间海南岛土地利用/覆被变化呈显著转型特征，其中建设用地扩张态势尤为突出（近十年增速更为显著），这一发现与 Wu 等[24]的研究结论相吻合。同时，海南岛景观生态安全格局演变呈现明显的阶段性特征：2000—2010 年期间整体有所提升，而 2010—2020 年间则出现明显退化且空间异质性增强。这种“先升后降”的演变轨迹可能与海南省不同时期实施的生态保护政策强度及区域社会经济发展节奏存在重要关联。海南省 2002 年实施退耕还林政策[25]，特别是 2003 年出台《关于加快林业发展 推进生态省建设的决定》政策，海南省开始进入林业快速发展阶段。2000—2010 年，当地开始大规模实施退耕还林工程、天然林保护工程、防护林工程等林业建设项目。据统计，2001—2010 年间海南岛累计造林面积达 2 901.29 km^2（图 7），林地面积增加了 2 353.67 km^2，耕地面积减少了 1 297.99 km^2（表 4），森林覆盖率提高了约 10%（图 7）。在这 10 年间，林地的优势度提高，斑块破碎化水平降低，景观多样性大幅度降低，但集聚程度增高（图 4、6 和表 5）。造林本质上是人类对自然环境的主动干预，使脆弱度更高的地类向脆弱度更低的林地转换[26]，从而提高植被盖度[27]，进一步改善土壤结构，减少土地受到的人为干扰[18]，增强涵养水源和水土保持等生态系统服务功能[26, 28]，最终提升景观生态安全水平。相比 2000 年，研究区 2010 年的生态安全水平大幅提升，其较安全区和安全区面积占比增加了 11.37%（图 5 和表 6）。此外，2010 年发布了《全国主体功能区规划》[29]，海南岛中部山区被划定为国家重点生态功能区，通过中央财

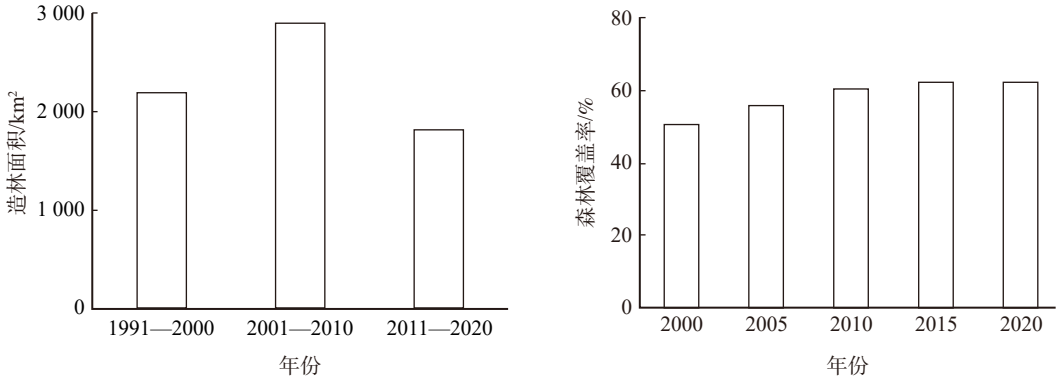


图 7 海南岛造林面积和森林覆盖率变化

Fig. 7 Changes of afforestation area and forest coverage in Hainan Island

政生态转移支付予以保护，使得功能区内部较外部的生态安全水平明显提升，进一步保证了海南岛中南部生态安全水平的长期稳定。

然而，不容忽视的是，自 1988 年海南设立经济特区，尤其是 2009 年海南国际旅游岛建设启动以来，区域社会经济发展迅速，城镇化进程加速推进。2010—2020 年，海南省总人口从 868.55 万人增至 1 012.34 万人，其中城镇人口增加了 41%，而乡村人口持续下降；人口密度从 246 人/km² 增加到 288 人/m²；GDP 由 2 020.53 亿元增加到 5 532.39 亿元（图 8）。经济和人口的增长促使土地利用结构迅速转型[18, 30]，通过改变原有景观格局和生态过程，对区域生态系统服务功能产生深远影响[14]，进而显著改变了景观生态安全格局[14, 31]。2010—2020 年，耕地和林地向建设用地转换的面积达 1 137.02 km²，最终导致建设用地由 2010 年的 611.52 km² 增加到 2020 年的 1 776.06 km²，面积净增加了 1 164.54 km²，扩大了 3 倍（表 4）。2011—2020 年间累计造林面积 1 817.71 km²，相比 2001—2010 年间减少了 1 083.53 km²，造林力度下降，林地面积减少了 1 910.64 km²。同时，林地向耕地转换 1 927.32 km²，耕地又向林地转换 1 027.32 km²，加上耕地向其他地类的转换，最终导致耕地净增加了 470.73 km²。《海南省统计年鉴》显示，2010—2020 年研究区耕地面积增加了 170.29 km²，尽管该数据与基于遥感解译的耕地数据变化有差异，但变化趋势一致。而耕地的增加更多的是与海南省的耕地保护政策有关。随着对耕地保护的加强，海南省出台了一系列鼓励农业发展的政策文件[32]，如土地流转、农业补贴、土地复垦等，增加了耕地面积并提升了耕地利用率。建设用地和耕地的增加导致研究区景观破碎化加剧、景观多样性提升，一定程度上影响了生态系统的结构与功能。可见，城市化用地需求的快速扩张和造林措施力度的相对减弱，可能是导致海南岛景观生态安全水平下降的重要因素。这一现象表明，社会经济等人为活动对生态环境的干扰在很大程度上影响着区域景观生态安全的演变过程[14, 24]。

研究区土地利用结构和景观生态安全水平的阶段性变化反映了人类活动对景观生态系统的双重影响：一方面，过度开发会对生态环境造成破坏[32–33]；另一方面，科学的生态修复和保护措施能够有效恢复和提升景观多样性，提升生态系统的弹性和抵抗力[15, 22]。未来，由于海南自贸区（港）建设对海陆生态空间的需求，海南岛景观生态安全将面临巨大的下行压力[14]。因此，海南省政府应统筹规划，平衡好经济建设与生态保护的关系，亟需加强对沿海地区生态保护与修复力度，推进海岸带生态修复工程，实施生态红线制度，严格控制沿海开发强度，强化对人类

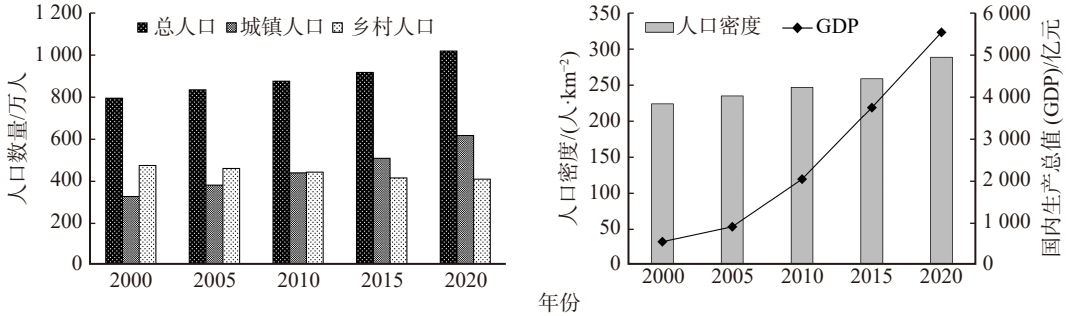


图 8 2000—2020 年海南岛人口社会经济发展变化

Fig. 8 Changes of population and socio-economic development in Hainan Island from 2000 to 2020

活动的规范和引导。同时，海南岛中南部需进一步加强生态保护，以发挥其生态屏障功能，确保生态系统的长期健康和稳定。

4 结　　论

本文以海南岛为研究对象，采用土地利用转移矩阵、景观格局指数计算、景观生态安全评价以及空间自相关分析等方法，系统分析了海南岛景观格局变化和景观生态安全的时空演变特征及其影响因素，主要结论如下。

（1）2000—2020 年，林地和耕地是海南岛的优势土地利用类型。土地利用转移表现出整体稳定局部变化剧烈的特点，其中林地和耕地之间的相互转换以及耕地和林地向建设用地的转换最为明显，建设用地面积扩大了 3 倍。

（2）林地、耕地和草地的破碎化程度最为严重，景观蔓延度和连通性增强。景观多样性和均匀度则呈“先降后升”的阶段性变化特征。

（3）20 年间，海南岛景观生态安全水平呈现先升后降的演变特征，整体呈退化趋势。空间集聚效应明显增强，主要表现为“高−高值集聚”和“低−低值集聚”的空间分异格局。其中，研究区中南部的景观生态安全水平逐步提高且趋于稳定，沿海地区下降明显。

（4）海南岛景观生态安全水平的变化与造林力度和社会经济发展的进程密切相关。未来，需加强对沿海地区生态保护与修复的强度，并合理统筹当地经济发展与生态保护间的关系，确保生态系统的长期健康与稳定。同时，持续推进中南部地区的生态保护工作，以发挥其生态屏障功能。

参　考　文　献

[1] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354−358.
Xiao D N, Chen W B, Guo F L. On the basic concepts and contents of ecological security[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 354−358.

[2] 应凌霄, 孔令桥, 肖燚, 等. 生态安全及其评价方法研究进展 [J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1679−1692.
Ying L X, Kong L Q, Xiao Y, et al. The research progress and prospect of ecological security and its assessing approaches[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1679−1692.

[3] Sun R, Wu Z X, Chen B O, et al. Effects of land-use change on eco-environmental quality in Hainan Island[J]. Ecological Indicators, 2020, 109: 105777.

[4] 谢花林. 土地利用生态安全格局研究进展 [J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6305−6311.
Xie H L. Review and the outlook of land use ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6305−6311.

[5] 乔治, 蒋玉颖, 贺疃, 等. 土地利用变化模拟研究进展 [J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5165−5176.
Qiao Z, Jiang Y Y, He T, et al. Land use change simulation: progress, challenges and prospects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5165−5176.

[6] 谢花林. 基于景观结构的土地利用生态风险空间特征分析—以江西兴国县为例 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(4): 688−695.
Xie H L. Spatial characteristic analysis of land use eco-risk based on landscape structure: a case study in the Xingguo County, Jiangxi Province[J]. China Environmental Science, 2011, 31(4): 688−695.

[7] 王权, 唐芳, 李阳兵, 等. 岩溶地区景观格局演变及其生态安全的时空分异—以贵州省东北部槽谷为例 [J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7273−7291.
Wang Q, Tang F, Li Y B, et al. Spatio-temporal differentiation of landscape pattern evolution and its ecological security in karst areas: a case study of trough valley in northeast Guizhou Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7273−7291.

[8] Zhang W, Chang W J, Zhu Z C, et al. Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change[J]. Applied Geography, 2020, 117: 102174.

[9] Ma L B, Bo J, Li X Y, et al. Identifying key landscape pattern indices influencing the ecological security of inland river basin: the middle and lower reaches of Shule River Basin as an example[J]. Science of the Total Environment, 2019, 674: 424−438.

[10] Malekmohammadi B, Jahanishakib F. Vulnerability assessment of wetland landscape ecosystem services using driver pressure-state-impact-response (DPSIR) model [J]. Ecological Indicators, 2017, 82: 293−303.

[11] 熊鹰, 艾赣雄, 周晨, 等. 基于改进三维生态足迹模型的洞庭湖区生态可持续时空演化研究 [J]. 生态学报, 2022, 42(3): 1165−1179.
Xiong Y, Ai G X, Zhou C, et al. Temporal and spatial evolution of ecological sustainability in Dongting Lake area based on the improved three-dimensional ecological footprint model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 1165−1179.

[12] Fu Y , Shi X , He J, et al. Identification and optimization strategy of County ecological security pattern: a case study in the Loess Plateau, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 112: 106030.

[13] 雷金睿, 陈毅青, 陈宗铸, 等. 基于 InVEST 模型的海南岛三大流域生境质量时空演变 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2511−2520.
Lei J R, Chen Y Q, Chen Z Z, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in three basins of Hainan Island based on InVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2511−2520.

[14] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 等. 1990—2018 年海南岛湿地景观生态安全格局演变 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 293−302.
Lei J R, Chen Z Z, Chen Y Q, et al. Dynamic analysis of wetland landscape ecological security pattern of Hainan Island in 1990−2018[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(2): 293−302.

[15] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 等. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化 [J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4760−4773.
Lei J R, Chen Z Z, Chen X H, et al. Spatio-temporal changes of

land use and ecosystem services value in Hainan Island from 1980 to 2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4760−4773.

[16] 邱彭华, 徐颂军, 谢跟踪, 等. 基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析 [J]. 生态学报, 2007(4): 1257−1264.
Qiu P H, Xu S J, Xie G Z, et al. Analysis on the ecological vulnerability of the western Hainan Island based on its landscape pattern and ecosystem sensitivity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007(4): 1257−1264.

[17] 董雅雯, 佘济云, 陈冬洋, 等. 基于景观格局及生态敏感性的三亚市景观脆弱度研究 [J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(4): 103−108.
Dong Y W, She J Y, Chen D Y, et al. Landscape vulnerability analysis of Sanya City based on the landscape pattern and ecological sensibility[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36(4): 103−108.

[18] 雷金睿, 宋希强, 陈宗铸. 海口城市公园植物群落多样性研究 [J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(1): 88−93,103.
Lei J R, Song X Q, Chen Z Z. Analysis on plant community diversity in Haikou City parks[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2017, 37(1): 88−93,103.

[19] 刘强, 周璋, 陈德祥, 等. 海南热带雨林国家公园森林生态系统碳储量及变化特征 [J]. 自然保护地, 2023, 3(4): 1−10.
Liu Q, Zhou Z, Chen D X, et al. Carbon storage and its change characteristics of forest ecosystems in National Park of Hainan Tropical Rainforest, China[J]. Natural Protected Areas, 2023, 3(4): 1−10.

[20] 陈圣天, 付晖, 付广, 等. 海南省 5 个国家级自然保护区景观格局时空变化比较研究 [J]. 西北林学院学报, 2023, 38(1): 181−189.
Chen S T, Fu H, Fu G, et al. Comparison of spatial-temporal dynamics of the landscape patterns of 5 national nature reserves in Hainan Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(1): 181−189.

[21] 沈润, 史正涛, 何光熊, 等. 基于景观破碎化指数的西双版纳生态安全格局构建与优化 [J]. 热带地理, 2022, 42(8): 1363−1375.
Shen R, Shi Z T, He G X, et al. Construction and optimization of the ecological security pattern of Xishuangbanna based on fragmentation index[J]. Tropical Geography, 2022, 42 (8): 1363−1375.

[22] 程研, 关颖慧, 吴秀芹. 基于土地利用变化的喀斯特断陷盆地景观格局演变与生态安全评价 [J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9471−9485.
Cheng Y, Guan Y H, Wu X Q. The spatial and temporal evolution of landscape pattern and landscape ecological security assessment in Karst Fault Basin based on land use change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9471−9485.

[23] Lei J R, Chen Y Q, Li L M, et al. Spatiotemporal change of habitat quality in Hainan Island of China based on changes in land use[J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109707.

[24] Wu W Y, Zhang J, Sun Z Y, et al. Attribution analysis of land degradation in Hainan Island based on geographical detector[J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 109−119.

[25] 海南省人民政府.《海南省人民政府关于实施退耕还林工程的若干意见》(琼府〔2003〕49 号) [EB/OL]. (2003−09−03) [2024−11−20]. https://www.hainan.gov.cn/zfgbhtml/detail.html?id=7263.
The People's Government of Hainan Province. Several Opinions of the People's Government of Hainan Province on the Implementation of the Project of Returning Farmland to Forest (No. 49 Qiong Mansion [2003]) [EB/OL]. (2003−09−03). [2024−11−20]. https://www.hainan.gov.cn/zfgbhtml/detail.html?id=7263.

[26] Tong X W, Wang K L, Yue Y M, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 54: 105−113.

[27] 何梦真, 张乐涛, 魏仪媛, 等. 黄河中游不同地貌分区景观格局脆弱性及其驱动力 [J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3363−3374.
He M Z, Zhang L T, Wei Y Y, et al. Landscape pattern vulnerability and its driving forces in different geomorphological divisions in the middle Yellow River[J]. Environmental Science, 2024, 45(6): 3363−3374.

[28] Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, et al. Effect of ecological engineering projects on ecosystem services in a karst region: a case study of northwest Guangxi, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 183: 831−842.

[29] 国务院.《国务院关于印发全国主体功能区规划的通知》(国发〔2010〕46 号) [EB/OL]. (2010−12−21) [2024−11−20]. https://www. gov.cn /gongbao/content/2011/content_1884884.htm.
The State Council. Notice of The State Council on Printing and Distributing the National Plan for Functional Zones (No. 46 Government [2010]) [EB/OL]. (2010−12−21). [2024−11−20]. https://www. gov.cn /gongbao/content/2011/content_1884884.htm.

[30] 左璐, 孙雷刚, 鲁军景, 等. 基于 MODIS 的京津冀地区生态质量综合评价及其时空变化监测 [J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 203−214.
Zuo L, Sun L G, Lu J J, et al. MODIS-based comprehensive assessment and spatial-temporal change monitoring of ecological quality in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2): 203−214.

[31] 武帅, 田冰, 顾世杰, 等. 基于 PSRM 模型的京津冀地区生态脆弱性时空演变 [J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5630−5640.
Wu S, Tian B, Gu S J, et al. Spatial-temporal evolution of ecological vulnerability in Beijing-Tianjin-Hebei region based on PSRM model[J]. Environmental Science, 2023, 44(10): 5630−5640.

[32] Jin Z H, Xiong C S, Luan Q L, et al. Dynamic evolutionary analysis of land use/cover and ecosystem service values on Hainan Island[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(1): 776.

[33] Lin T, Xue X Z, Shi L Y, et al. Urban spatial expansion and its impacts on island ecosystem services and landscape pattern: a case study of the island city of Xiamen, Southeast China[J]. Ocean & Coastal Management, 2013, 81: 90−96.

（责任编辑 孟 瑶 李 契
责任编委 臧润国）