

基于PLUS模型的海口市生态系统服务价值时空变化与情景模拟分析

Spatial-temporal Analysis and Multi-scenario Simulation of Ecosystem Service Value in Haikou Based on PLUS Model

付晖 陈杰 黎淑翎

FU Hui, CHEN Jie, LI Shuling

基金项目: 海南省自然科学基金项目 (编号: 722QN288); 海南省高等学校教育教学改革研究资助项目 (编号: Hnjg2024-10); 海南大学教育教学改革研究项目 (编号: hdjy2420); 海南大学课程思政教育专项 (编号: hdsz2205); 海南大学校级完全学分制改革研究项目 (编号: hdxzfz2204)

摘要

以海口市为研究对象, 分析 2010—2020 年土地利用 / 土地覆盖 (LULC) 数据和生态系统服务价值的变化, 采用 PLUS 模型和当量因子法模拟 2035 年自然发展 (BAU)、生态保护 (EC) 和经济发展 (ED) 3 种情景下生态系统服务价值的时空变化特征, 探究不同土地利用模式对生态系统服务价值的影响。结果表明: 海口市土地利用类型以林地和旱地占比最高, 生态系统服务结构相对稳定; 受建设用地增加影响, 水文调节和水资源供给服务功能下降幅度最大, 表明 LULC 变化与生态系统服务价值变化密切相关; EC 情景下, 各项生态系统服务均得到改善, LULC 的结构调整尤其是提高湿地占比, 显著改善区域整体生态系统服务。

Abstract

Using Haikou City as the research object, this paper analyzed the changes in land use and ecosystem service value from 2010 to 2020, and employed the PLUS model and the equivalent factor method to simulate the spatial and temporal characteristics of ecosystem service value under three scenarios of natural development (BAU), ecological conservation (EC), and economic development (ED) in 2035, and explored the impacts of different land use patterns on ecosystem service value. The results showed that land use types in Haikou City had the highest proportion of forested land and dry land, and the structure of ecosystem services was relatively stable. Hydrological regulation and water resource provisioning services declined the most under the influence of the increase of construction land, indicating that the change of LULC was closely related to the change of ecosystem service value. All ecosystem services improved under the EC scenario, and the structural adjustments of LULC, especially the increase of wetland proportion, significantly improved the overall ecosystem services in the region.

文章亮点

1) 利用多情景模拟探究未来生态系统服务价值; 2) 区域 LULC 的结构调整尤其是提高湿地占比, 显著改善区域整体生态系统服务; 3) 生态保护情景对未来城市生态规划具有重要参考意义。

关键词

土地利用模式; 生态系统服务价值; 多情景模拟; PLUS 模型

Keywords

Land use pattern; Ecosystem service value; Multiple scenarios simulation; PLUS model

收稿日期: 2023-10-19

修回日期: 2024-02-05

生态系统服务评估是关于生态系统结构、功能与人类福祉之间关联的研究领域。由于 Robert Costanza 等学者的引领作用^[1-2], 国内外开展大量对生态系统服务价值 (Ecosystem service value) 相关的评估工作, 早期主要

是针对全球和国家等大的空间尺度^[3-4]。随着研究的推进, 对湿地、森林、草原和湖泊等中小尺度的研究也在逐渐增多^[5-6]。近年来, 学者们从土地利用变化角度对生态系统服务开展评估和动态分析, 包括基于土地利用的生态系统服务

价值评估、对土地利用与生态系统服务的复杂相互影响的分析^[7-10]，由此来探讨不同生态系统服务的形成机理、驱动机制及土地利用优化配置的策略。

科学政策的制定必须建立在对生态系统服务价值变化深层次原因的分析之上，不仅要厘清土地利用变化对生态系统服务的影响机制，更要分析土地利用变化的驱动机制，即这些变化是如何受到复杂的自然、经济和社会等因素的影响。从而揭示影响生态系统服务价值的关键指标，建立从土地利用变化驱动因素到生态系统服务价值的关联系统，把生态系统服务价值的评估切实纳入土地利用策略、经济、社会与环境方面的政策方案的制定中来。

海口市是海南省的省会，也是政治、经济、文化和生态文明建设的的前沿阵地。自2009年国际旅游岛建设开始，海口进入了城市发展的高速阶段，短期内城市的急速扩张加剧了土地结构的变化，同时也影响了城市的生态系统结构与功能。研究基于2010、2015及2020年海口市土地利用/土地覆盖(LULC)数据，识别海口市LULC及生态系统服务价值的时空变化特征，并运用PLUS模型模拟2035年3种情景下海口市生态系统服务的变化发展，分析不同LULC变化对生态系统服务价值的影响，以期为海口市城镇建设开发

和生态保护协调发展提供方法论指导和实践依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 研究区概况

海口市位于海南省北部沿海区域，国土面积2 296.82 km²，属热带季风气候。海口拥有丰富的地表水和地下水资源，水资源总量达到11.08亿m³。截至2021年末，海口市下辖秀英、龙华、琼山和美兰4个区，下设21个街道、22个镇^[11]（图1）。

1.1.2 数据来源

本文LULC数据采用中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>)2010、2015和2020年全国土地利用类型遥感监测空间分布数据，空间分辨率为30 m。参考2021年付杰的海南省生态系统类型分类^[12]，将用地划分为水田、旱地、林地、灌木林、草地、水域、湿地、建设用地和未利用地9类。数字高程模型(DEM)数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)；气温和降雨数据来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/wa>)；城市市政和公共服务设施分布来自百度在线地图API接口获取的兴趣点(POI)数据；路网数据来

海口市地图



图1 研究区位图

Fig.1 Location of study area

源于 OpenStreetMap (OSM) 数据集; 人口密度和国内生产总值 (GDP) 数据由海南省各市县统计公报、统计年鉴及中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和社会经济数据等汇总得出; 生态系统服务价值当量计算所需的主要粮食平均价格、播种面积和平均粮食产量数据来自 2010—2020 年的《中国农产品价格调查年鉴》《海南省统计年鉴》及《中国统计年鉴》。

1.2 研究方法

1.2.1 土地利用单一动态度分析

土地利用单一动态度分析指不同土地利用类型的年均变化速度, 即土地利用年变化率, 该指标能够反映土地利用变化的整体强度。公式如下:

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

式中, K 表示土地利用年变化率, U_a 和 U_b 分别表示某土地利用类型在研究阶段初期和末期的面积, T 表示初期和末期间的年份数。

1.2.2 PLUS 模型

PLUS 模型是综合了土地利用扩展分析策略和多类型随机斑块种子的新型土地利用模拟模型, 通过结合随机种子生成和阈值降低机制, 实现对土地利用的精确模拟^[13]。首先, 根据海口市实际情况和数据的可获取性, 选取社会和自然 2 方面的 10 个影响因子, 包括高程、坡度、坡向、降雨、温度、GDP、人口密度、城市道路、公共设施和市政设施, 并进行标准化处理。其次, 通过用地扩张分析 (LEAS) 模块整合土地利用数据和影响因子数据, 获得各土地利用类型的发展概率。基于 2015—2020 年的土地利用类型转移概率矩阵, 通过 Markov-chain 对 2035 年的不同情景下的土地需求进行数量预测。最后, 将数量预测结果导入 PLUS 模型进行预测模拟。

1) 转换成本矩阵设置

转移成本矩阵表示 2 种地类间相互转换的可能性, 1 表示可以相互转化, 0 则表示不能转化。基于海口市实际情况和相关研究经验^[7, 9], 当前的社会生产力基本可以实现任意地类间的转换, 但考虑到各地类尤其是建设用地向水域的转变成本较高且极少发生, 因此主要对建设用地向水域和湿地的转入进行限制, 其余各地类在空间上均可进行交换 (表 1)。

2) 领域权重设置

领域权重表示不同用地类型的扩张强度, 取值范围为 0~1, 越接近 1, 扩张能力越强, 反之越弱。以 2015 年和 2020 年数据为基础, 对各土地利用的扩张能力进行计算。根据下式对扩张强度进行无量纲处理, 所得参数如表 2 所示。

$$Xi^* = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (2)$$

式中, Xi^* 表示权重值, X_i 为土地利用类型面积, X_{max} 、 X_{min} , 分别代表面积最大和最小的土地利用类型的数量。

表 1 转移成本矩阵

Tab.1 Transition cost matrix

类型	水田	旱地	林地	灌木林	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地
水田	1	1	1	1	1	1	1	1	1
旱地	1	1	1	1	1	1	1	1	1
林地	1	1	1	1	1	1	1	1	1
灌木林	1	1	1	1	1	1	1	1	1
草地	1	1	1	1	1	1	1	1	1
水域	1	1	1	1	1	1	1	1	1
湿地	1	1	1	1	1	1	1	1	1
建设用地	1	1	1	1	1	0	0	1	1
未利用地	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表 2 领域因子参数

Tab.2 Neighborhood factor parameters

水田	旱地	林地	灌木林	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地
0.21	0.21	0.20	0.07	0.18	0.01	0.08	1	0

3) 模型精度验证

为验证 PLUS 模型模拟的准确性, 以 2010 年和 2015 年土地利用数据为基础对 2020 年土地利用进行模拟, 将模拟结果与 2020 年实际土地利用数据进行精度校验。结果显示, Kappa 系数为 0.87, 总体精度为 0.92, 表明模拟结果科学可靠。

1.2.3 生态系统服务价值计算方法

本文采用改进的中国陆地单位面积生态服务基础当量表进行生态系统服务价值评估, 并根据研究区实际情况进行调整。1) 参照过往研究经验^[12, 14-15], 对建设用地当量进行补充; 2) 依据 2010—2020 年海口市平均粮食产量 (4 110.73 kg/hm²)、中国平均粮食产量 (5 430.74 kg/hm²) 修正区域粮食产量。研究表明, 1 个标准当量的价值量等于该区域单位面积粮食市场价值的 1/7。海口市 2010—2020 年平均粮食收购价格为 2.65 元/kg, 由此计算得出海口市单位当量因子的经济价值为 1 183.11 元, 并由此得到海口市单位面积生态系统服务价值系数表 (表 3)。海口市各用地类型的生态系统服务计算基于 Robert Costanza 的生态系统服务价值模型^[1-2]进行计算, 公式如下:

$$ESV = \sum(A_{\{i\}} \times VC_{\{i\}}) \quad (3)$$

$$ESV_{\{j\}} = \sum(A_{\{i\}} \times VC_{\{i,j\}}) \quad (4)$$

式中, ESV 为生态系统服务的总价值; $ESV_{\{j\}}$ 为研究区第 j 项生态系统服务功能价值; $A_{\{i\}}$ 为研究区第 i 种类型的土地面积; $VC_{\{i\}}$ 为第 i 种类型土地的单位 ESV 系数; $VC_{\{i,j\}}$ 为第 i 种土地利用类型的第 j 项生态系统服务功能价值系数^[16]。

表 3 海口市单位面积生态系统服务价值

Tab.3 The ecosystem service value per unit area of Haikou City

单位: 元 /hm²

类型	粮食生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
旱地	1 005.64	473.24	23.66	792.68	425.92	118.31	319.44	1 218.6	141.97	153.8	70.99
水田	1 609.03	106.48	-3 111.58	1 313.25	674.37	201.13	3 218.06	11.83	224.79	248.45	106.48
林地	343.1	780.85	402.26	2 567.35	7 690.22	2 283.4	5 607.95	3 135.24	236.62	2 851.3	1 254.1
灌木林	224.79	508.74	260.28	1 668.19	5 004.56	1 514.38	3 963.42	2 034.95	153.8	1 857.48	816.35
草地	449.58	662.54	366.76	2 330.73	6 164.01	2 034.95	4 519.48	2 839.47	212.96	2 579.18	1 135.79
湿地	603.39	591.56	3 064.26	2 247.91	4 259.2	4 259.2	28 666.78	2 732.99	212.96	9 311.08	5 596.12
水域	946.49	272.12	9 807.99	911	2 709.32	6 566.27	12 0961.27	1 100.29	82.82	3 016.93	2 236.08
建设用地	11.83	0	-8 885.16	-2 863.13	0	-2 910.45	0	23.66	0	402.26	11.83
未利用地	0	0	0	23.66	0	118.31	35.49	23.66	0	23.66	11.83

为了探究海口市生态系统服务价值在空间上的分异特性, 采用 Arcgis 渔网工具建立 500 m×500 m 的方形网格, 计算每个网格内的 *ESV*, 按照 ArcGIS 标准分类中的几何分隔法将海口市 *ESV* 划分为 7 个等级, I ~ VII 级取值区间依次为 [-37.0, 7.7)、[7.7, 29.5)、[29.5, 40.1)、[40.1, 61.8)、[61.8, 106.5)、[106.5, 198.2)、[198.2, 386.5]。

2 结果分析

2.1 海口市土地利用类型时空变化特征

从海口市 2010—2020 年各地类的面积变化及空间分布情况 (表 4 及图 2) 可知, 海口市用地类型主要为林地, 广泛分布于海口市的东部和南部区域, 其次为旱地, 多呈块状分散分布。2010—2020 年海口市土地利用变化特征主要表现为建设用地扩张导致农业和生态用地大幅缩减。10 年间建设用地面积占比快速上升, 由 8.26% 增长至 13.22%, 增

表 4 2010—2020 年海口市土地利用面积及年变化率

Tab.4 Land use area and annual change rate in Haikou city from 2010 to 2020

类型	面积 /hm ²			年变化率 /%	
	2010 年	2015 年	2020 年	2010—2015 年	2015—2020 年
水田	28 920.96	28 043.19	27 464.31	-0.51	-0.34
旱地	44 600.85	42 536.07	40 836.42	-0.77	-0.67
林地	83 036.25	81 296.19	79 280.37	-0.35	-0.41
灌木林	34 827.75	33 882.21	32 337.36	-0.45	-0.76
草地	1 768.05	1 709.1	3 090.78	-0.56	13.47
水域	2 789.28	2 828.7	2 804.31	0.24	-0.14
湿地	13 134.15	12 714.3	12 018.33	-0.53	-0.91
建设用地	18 839.52	24 931.44	30 141.54	5.39	3.48
未利用地	152.1	127.71	95.49	-2.67	-4.20

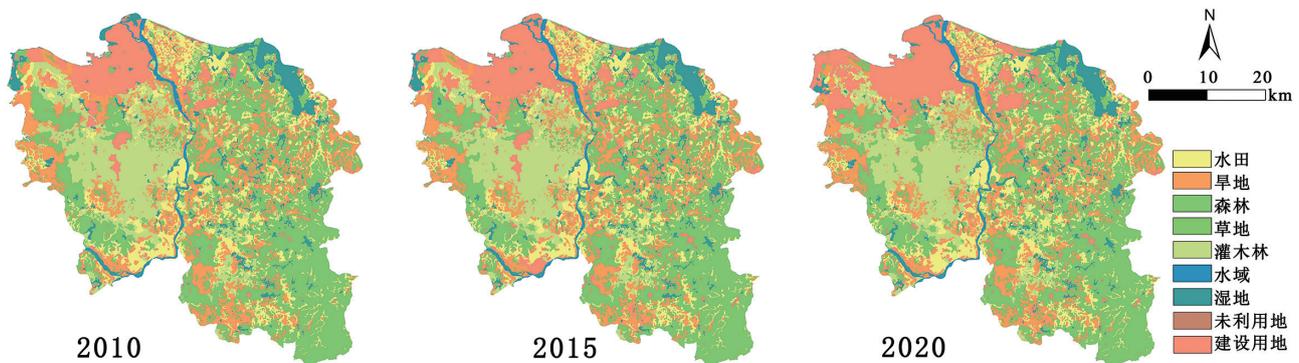


图 2 2010—2020 年海口市生态系统类型空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem types in Haikou city from 2010 to 2020

长主要发生在北部城市建成区南侧，2015年后建设用地逐渐向东西两侧延伸。在年变化率方面，2015年后建设用地扩张得到一定控制，增速明显放缓。水田和旱地受严格的基本农田政策影响，在2015年后减速开始下降，但也使林地和灌木林成为建设用地扩张的主要来源，年减少速率有所加快。此外，湿地受到主城区西侧沿海地带港口建设的影响，年减少速率开始上升。

2.2 多情景下的海口市土地利用类型时空变化特征

结合相关研究经验^[6, 17]，根据海口市未来发展规划和土地变化特征，设定自然发展情景(BAU)、生态保护情景(EC)和经济发展情景(ED)。

1) 自然发展情景：不考虑任何规划政策对土地利用变化的约束性影响，利用 Markov 模型以 2015—2020 年土地利用转移概率为基础，预测 2035 年的土地利用数量需求。2) 生态保护情景：依据《海口市生态保护第十四个五年规划》，严格控制城市扩张和人为开发活动对自然生态的影响，因此降低林地、灌木林、草地、水域和湿地转化为建设用地和耕地的概率，并通过退耕还林、还湖的方式恢复城市主要生态用地，提高水田和旱地转林地、灌木林和湿地的概率。同时，根据海口市生态廊道规划，将区域内的水域及湿地设置为不可转化区域。3) 经济发展情景：在平衡经济与生态过程中，优先满足城市居民的生产、住房和娱乐需求。海口市以第三产业作为主要经济支柱，与城市建设用地开发密切相关，因此根据往年转换情况，提高作为建设用地主要来源的水田、旱地、林地、灌木林、湿地和未利用地转为建设用地的概率。

结果表明(表 5)，BAU 情景延续了当前城市发展的趋势，建设用地持续扩张，面积增加 10 953.09 hm²，但年增速进一步下降。该情景下农田生态系统得到较好的保护，旱地以 0.25% 的年增速实现正向增长，与当前《海南自由贸易港建设总体方案》提出的补充耕地指标储备库和保障粮食安全的耕地保护政策相一致。其余地类面积均保持不同程度的下降，年减速介于 EC 和 ED 之间，且较 2015—2020 年有所下降。

EC 情景下建设用地增速得到控制，面积增量最小，仅

为 9 366.75 hm²，同时林地、灌木林和水域等重要生态用地的减少幅度明显小于其余 2 个情景，并且湿地实现正向增长，涨幅达 5.26%。该情景下，除由于退耕还林等生态措施推进而面积减少明显的旱地外，其余地类虽然面积仍有不同程度的减少，但退化速度明显放缓，远低于其余 2 种情景。

ED 情景下建设用地扩张规模远高于其余 2 种情景，面积增加 114 271.93 hm²，但年增速仍低于 2010—2020 年水平，这表明未来城市空间开发将趋于饱和。同时，该情景下更大规模的建设用地扩张也导致各地类的萎缩程度高于其余 2 个情景，其中林地、旱地和灌木林的减量最高，未利用地、湿地和草地则由于基数较小而损失速率更高，尤其是未利用地以每年 3.4% 的速度消失，相关生态系统将受到严重破坏。

3 种情景下的海口市生态系统类型空间的变化模式整体相同(图 3)，建设用地的扩张均集中于西北沿海地带，符合“以港口为中心，沿海岸线进行建设”的滨海城市发展特征。但区别于 2010—2020 年城市空间主要由沿海向内陆扩张的模

表 5 不同发展情景下土地利用类型面积及年变化率
Tab.5 Area of different land use types and annual change rate under different development scenarios

类型	面积 /hm ²			年变化率 /%		
	2035BAU	2035EC	2035ED	2020—2035BAU	2020—2035EC	2020—2035ED
水田	26 641.17	26 777.34	26 071.65	-0.19	-0.16	-0.32
旱地	42 447.96	37 085.49	41 049.09	0.25	-0.57	0.03
林地	73 817.37	77 674.59	73 685.79	-0.43	-0.13	-0.44
灌木	28 249.65	28 748.43	27 578.25	-0.79	-0.69	-0.92
草地	2 630.52	2 571.3	2 517.3	-0.93	-1.05	-1.16
水域	2 753.73	2 803.68	2 741.4	-0.11	0.00	-0.14
湿地	10 187.37	12 650.94	9 787.23	-0.95	0.33	-1.16
建设用地	41 094.63	39 508.29	44 413.47	2.27	1.94	2.96
未利用地	65.34	67.68	43.56	-1.97	-1.82	-3.40

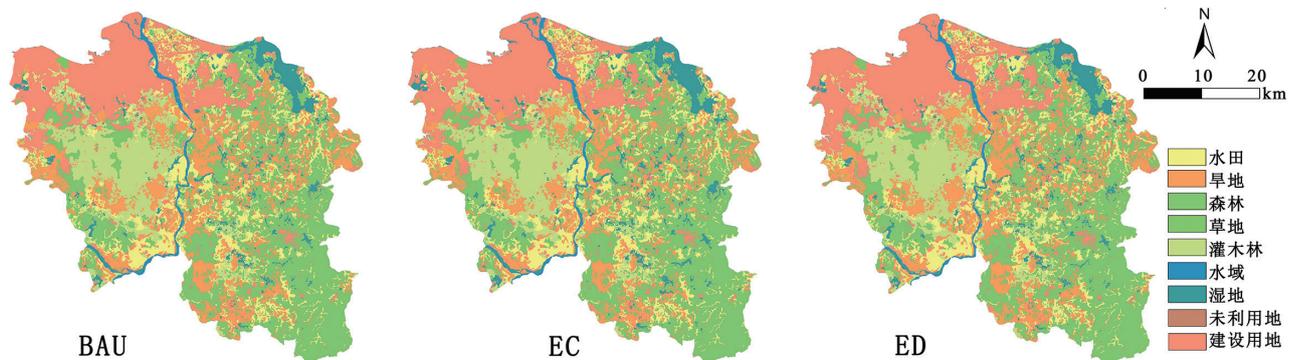


图 3 不同发展情景下海口市生态系统类型空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem types under different development scenarios

式，至 2035 年，海口市建设用地开发呈现出向东西两翼延展的趋势，其中主城区西侧的长流片区和东侧的江东新区最为明显，因此未来这些区域周边的土地利用结构变化也更为剧烈。

2.3 海口市生态系统服务价值时空变化特征

2.3.1 生态系统服务价值数量结构变化

海口市的生态系统服务结构相对稳定，其中水文调节和气候调节因海口市大面积的林地和湿地资源，成为最主要的生态系统服务类型，二者占比超过价值总量的 70%。从总量变化上看，生态系统服务的损耗逐年加重，但 2015 年后生态系统服务的损耗速度明显放缓，这得益于 2016 年开始落实的生态文明试验区政策，对生态环境指标进行了细化和严格管控，降低了城市建设用地对其他地类的转换。各类生态系统服务中以水资源供给的损耗最为剧烈，其次是净化环境和气体调节，三者的年损失率远高于其余生态系统服务，表现出更高的敏感性和不稳定性（图 4）。

预测数据显示（图 5），BAU 情景下各项 *ESV* 均持续下降，水文调节和水资源供给损失最高，约占损失总量的 59%。除粮食生产、水资源供给、气体调节和维持养分循环的 *ESV* 减速低于 2010—2020 年，其余 *ESV* 都表现出进一步下降的趋势。

EC 情景下，各项生态系统服务均得到改善，以水文调节和水资源供给改善最为明显。水文调节实现正向增长，而水资源供给的损失则大幅下降，年损失率由 2015—2020 年的 5.5% 缩小至 2%，这是该情景 *ESV* 高于其他情景的主要原因。由于退耕还林、还湖等生态修复工程主要依赖耕地资源，因此该情景下旱地的损失量高于其余 2 种情景，但仍高于海口市 2035 年总体规划的耕地保有量指标。

ED 情景下，除粮食生产外，各项 *ESV* 较其余 2 种情景大幅下降，其中水文调节减少占总损失量的 41%。除粮食生产、水资源供给和维持养分循环的 *ESV* 减速低于 2010—2020 年外，其余损失速率大幅上升。一方面是由于建设用地的扩张强化了建设用地的溢出效应，另一方面是削弱了自然生态系统尤其是草地和湿地生态系统，导致其提供的服务下降。

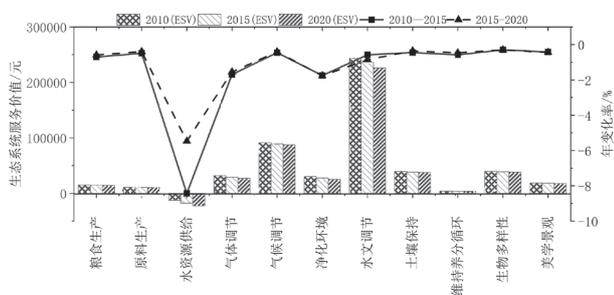


图 4 2010—2020 年海口市 *ESV* 量及年变化率
Fig.4 *ESV* volume and annual change rate in Haikou city from 2010—2020

2.3.2 生态系统服务价值空间分布变化

在空间分布上，海口市 *ESV* 以中部南渡江为分界，大致呈现出西低东高的格局（图 6）。低值区在城市建成区，高值区在北部东寨港自然保护区以及东南部的农林生产保障区。研究周期内低值区不断扩大，其变化范围与建设用地高度吻合，主要集中在新海港临港片区和江东新区。区别于 BAU 和 ED 情景，EC 情景下 *ESV* 的增长主要集中在南渡江以东、大城镇以北的区域。该区域森林和湿地增加，因此区域生态服务改善显著。

3 结论

近年来“国际旅游岛”和“海南自贸港”政策的相继发布，带动了海口市经济进入高速发展时期，同时也加剧了生态环境和经济发展的矛盾冲突。本文对 2010—2020 年海口市 LULC 和 *ESV* 的时空变化特征进行研究，并运用 PLUS 模型与当量因子法模拟 2035 年 3 种情景下海口市生态系统服务的变化发展，分析了 *ESV* 与 LULC 变化的关系，得到结果如下：

1) 海口市土地利用类型以生态用地为主，林地和旱地占比最高。2010—2020 年，海口市土地利用变化以建设用地增加和林地、旱地的减少最为显著，2015 年前建设用地增速最快，空间上集中于主城区周边，2015 年后有所放缓，向西北部长流片区扩张。2020 年主城区东西两侧均形成城市扩张热点，在建设用地扩张下生态用地类型的面积大幅下降。

2) 海口市生态系统服务结构相对稳定，水文调节和气候调节占据主导地位，林地和湿地是调节服务的主要来源，对维持海口的生态稳定性具有重要意义。研究期间，海口市的 *ESV* 呈持续下降趋势，但损失速率逐渐放缓，这与 LULC 变化速率一致。受建设用地增加影响，水文调节和水资源供给服务功能下降最高，表明 LULC 变化与 *ESV* 变化密切相关。空间上，*ESV* 低值区扩散范围也与建设用地扩张范围有很高的一致性。

3) 在 BAU 情景下，各项 *ESV* 均持续下降。在 ED 情景下，水文调节大幅下降，进一步表明林地和湿地转变为建设用地

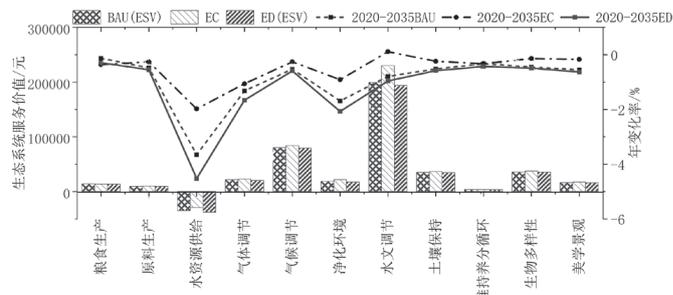


图 5 不同发展情景下海口市 *ESV* 量及年变化率
Fig.5 *ESV* volume and annual change rate in Haikou city under different development scenarios

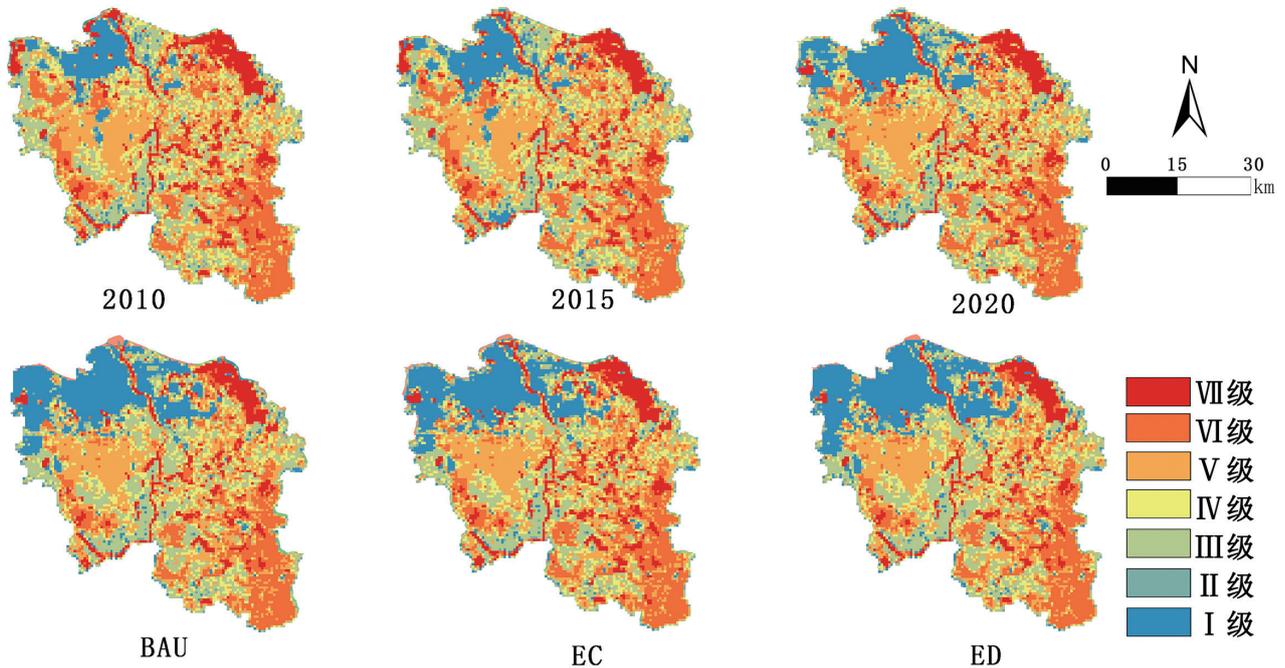


图6 不同发展情景下海口市 *ESV* 空间分布

Fig.6 Spatial distribution of *ESV* in Haikou city under different development scenarios

有很强的负面生态系统服务效应。在 EC 情景下，各项生态系统服务均得到改善，以水文调节和水资源供给改善最为明显；增值区主要集中在南渡江以东、大坡镇以北的农林生产保障区域。进一步表明区域 LULC 的结构调整，尤其是提高湿地占比，能显著改善区域整体生态系统服务。

本文中结合 PLUS 模型与当量因子法进行量化和模拟的研究方法，避免了单一模型的缺点，充分发挥 2 种方法在数量预测和空间模拟方面的优势^[18]。

沿海城市的沿海地区通常是土地利用变化最频繁的地区，也是生态系统服务下降最严重的地区^[19-20]。海口市作为典型的沿海“单核”城市，未来城市开发将集中在西北部的沿海岸线，形成西北区域的生态系统服务价值洼地。研究表明，推动城市由单核向多核转变能够转移部分产业和人口，以疏解大城市功能，减轻生态压力，有效缓解大城市空间功能的集中分布带来的生态系统结构单一等压力^[21]。2021 年 10 月公示的《海口市国土空间总体规划（2020—2035）（公众版）》提出，在国土空间保护开发策略中按照“东进、西提、南育、北联、中优”的原则，扭转海口现状单中心的空间格局，向多组团、网格化的空间结构转变。这样不仅可以平衡生态质量和区域经济增长的需求，还可为周边城镇提供发展空间，缩小城乡发展差距^[21-22]。这与本研究的结果一致。

对比 3 种模拟情景，EC、BAU 和 ED 的 *ESV* 差异显著，分别为 447 559.2 万元、399 556.3 万元和 386 073.6 万元。BAU 情景延续了当前土地政策的发展趋势，但 *ESV* 损失与 ED 情景相近，远高于 EC 情景，这表明在没有任何干预的情况下，海口市目前的土地和空间开发模式仍然不足以平衡

经济发展和生态保护，需要重新配置土地资源，以促进生态和经济的协调发展。EC、BAU 和 ED 的建设用地的年变化率分别为 1.94%、2.27% 和 2.96%，EC 情景能够在保持城市扩张速率与 BAU 情景接近的同时，维持较低的 *ESV* 损耗，更符合未来城市绿色发展的需求。未来 *ESV* 损失区域将集中在海口市西北部的城市建成区周边，而改善区域集中在海口市东南部的农林生产保障区。《海口市国土空间总体规划（2020—2035）（公众版）》提出，构建“两核三带、八廊多园”的市域生态保护格局，其中北部滨海生态带和南部生态绿带可分别改善城市建成区北部沿海区域和西部建成区的生态系统服务功能。2035 年 *ESV* 低值扩大区主要位于新海港临港片区和江东新区，因此未来还需关注“西提”，即西海岸和美安科技新城建设片区、“东进”江东新区，在新城规划时充分留足生态用地空间，采取最优的土地利用模式规避生态损失。

注：图 1 来自海南测绘地理信息局，审图号为琼 S（2021）023 号；其余均由作者自绘。

参考文献：

- [1]COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [2]COSTANZA R, DE GROOT R, BRAAT L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go?[J]. Ecosystem Services, 2017, 28: 1-16.

[3] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. Science, 2008, 319: 756-760.

[4] SCHNEIDER A, LOGAN K E, KUCHARIK C J. Impacts of urbanization on ecosystem goods and services in the U.S. Corn Belt[J]. Ecosystems, 2012, 15 (4) : 519-541.

[5] GAO J, YU Z, WANG L, et al. Suitability of regional development based on ecosystem service benefits and losses: A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration, China[J]. Ecological Indicators, 2019, 107: 105579.

[6] 黎佳君, 廖秋林, 沈守云, 等. 长株潭城市群绿心地区生态系统服务价值时空变化研究 [J]. 中国园林, 2022, 38 (1) : 100-105.

[7] 张晓瑶, 张潇, 李冬花, 等. 城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟——以深圳市为例 [J]. 生态学报, 2022 (6) : 1-12.

[8] 高星, 杨刘婉青, 李晨曦, 等. 模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应 [J]. 生态学报, 2021, 41 (20) : 7974-7988.

[9] 欧阳晓, 贺清云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长株潭城市群为例 [J]. 经济地理, 2020, 40 (1) : 93-102.

[10] 陈兵飞, 廖铁军, 张莉坤. 生态红线约束下万州区土地利用情景模拟及生态价值评估 [J]. 水土保持研究, 2020, 27 (5) : 349-357, 364.

[11] 海口市地方史志办公室. 2022 年海口年鉴 [M]. 海口: 南海出版社, 2022.

[12] FU J, ZHANG Q, WANG P, et al. Spatio-Temporal Changes in Ecosystem Service Value and Its Coordinated Development with Economy: A Case Study in Hainan Province, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14 (4) : 970.

[13] KURNIA A A, RUSTIADI E, FAUZI A, et al. Understanding Industrial Land Development on Rural-Urban Land Transformation of Jakarta Megacity's Outer Suburb[J]. Land, 2022, 11 (5) : 670.

[14] YE Y, BRYAN B A, CONNOR J D, et al. Changes in land-use and ecosystem services in the Guangzhou-Foshan Metropolitan Area, China from 1990 to 2010: Implications for sustainability under rapid urbanization[J]. Ecological indicators, 2018, 93: 930-941.

[15] DAI X, JOHNSON B A, LUO P, et al. Estimation of urban ecosystem services value: A case study of Chengdu, Southwestern China[J]. Remote Sensing, 2021, 13 (2) : 207.

[16] CHEN J, FU H, CHEN S. Multi-Scenario Simulation and Assessment of Ecosystem Service Value at the City Level from the Perspective of “Production-Living-Ecological” Spaces: A Case Study of Haikou, China[J]. Land, 2023, 12 (5) : 1021.

[17] 王婷, 韦仕川. 2009-2018 年海口市土地利用转型特征及其影响因素 [J]. 水土保持通报, 2022, 42 (1) : 344-352.

[18] SHI M, WU H, FAN X, et al. Trade-offs and synergies of multiple ecosystem services for different land use scenarios in the Yili river valley, China[J]. Sustainability, 2021, 13 (3) : 1577.

[19] O' HIGGINS T G, O' DWYER B. A vulnerability framework to protect coastal social ecological systems[J]. Anthropocene Coasts, 2019, 2 (1) : 279-292.

[20] POLITI E, PATERSON S K, SCARROTT R, et al. Earth observation applications for coastal sustainability: Potential and challenges for implementation[J]. Anthropocene Coasts, 2019,

2 (1) : 306-329.

[21] 肖金成. “多中心组团”模式应对“城市病” [N]. 中国社会科学报, 2012-04-09 (A07) .

[22] 史乃聚, 段培君. 城市病治理的战略哲学处方 [J]. 智库理论与实践, 2021, 6 (3) : 45-54.

作者简介:

付晖 /1985 年生 / 女 / 山东肥城人 / 博士 / 海南大学 (海口 570228) / 副教授 / 研究方向为景观生态规划

陈杰 /1996 年生 / 男 / 江苏南京人 / 硕士 / 海南大学 (海口 570228) / 专业方向为生态系统服务评估

黎淑翎 /1986 年生 / 女 / 广东佛山人 / 博士 / 海南大学 (海口 570228) / 讲师 / 研究方向为中外园林史、城乡规划与土地利用管理、风景园林规划管理与法规