

DOI: 10.5846/stxb201907261580

雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2020, 40(14): 4760-4773.

Lei J R, Chen Z Z, Chen X H, Li Y L, Wu T T. Spatio-temporal changes of land use and ecosystem services value in Hainan Island from 1980 to 2018. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4760-4773.

1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化

雷金睿, 陈宗铸*, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天

海南省林业科学研究院, 海南省红树林研究院, 海口 571100

摘要:以海南岛为研究区, 利用 1980—2018 年 5 期土地利用数据, 借助 ArcGIS 技术, 综合运用价值当量因子法、生态系统服务变化指数(Ecological Services Change Index, ESCI)、空间统计分析等方法, 探究了海南岛土地利用与生态系统服务价值(Ecosystem Services Values, ESV)的时空变化特征。结果表明:(1)林地是海南岛自然生态系统的主体, 占 62% 以上, 林地面积先升高后降低; 建设用地增加迅猛, 特别是在 2010 年以后, 增长率高达 122.46%, 其次水域增长率为 20.94%。土地利用主要呈现出草地转为林地, 耕地、林地转为建设用地或水域的变化特征。(2)1980—2018 年海南岛 ESV 总体表现为先增加后降低的变化趋势, 净增加 51.59 亿元, 增长率为 2.56%。其中林地 ESV 占比最高, 达 70% 以上; 单项 ESV 以水文调节、气候调节为主, 两者占总 ESV 的 50% 以上。(3)在空间分布上, 海南岛 ESV 存在着明显的中部高、四周低的空间分异特征, 在时间序列上高值区进一步萎缩、低值区逐渐扩展。(4)1980—2018 年海南岛 5 个时期的 ESV 及其变化在空间分布上具有显著的正向自相关性; ESV 增值热点区集中分布在大广坝水库等库区、海南岛东北部水产养殖场等地, ESV 损失冷点区主要出现在海口和三亚等重要城区、洋浦经济开发区以及旅游资源丰富的沿海地区。

关键词:土地利用; 生态系统服务价值; 热点分析; 时空变化; 空间自相关; 岛屿

Spatio-temporal changes of land use and ecosystem services value in Hainan Island from 1980 to 2018

LEI Jinrui, CHEN Zongzhu*, CHEN Xiaohua, LI Yuanling, WU Tingtian

Hainan Academy of Forestry, Hainan Academy of Mangrove, Haikou 571100, China

Abstract: This paper selected Hainan Island as the research area, collected the 5 phases land use data of 1980—2018 to analyze by ArcGIS. We used the equivalent factor method, ecosystem service change index (ESCI), and spatially statistical analysis method to explore the temporal and spatial change characteristics of land use and ecosystem service value (ESV) in Hainan Island. The results are shown as follows. (1) Forestland is the most important natural ecosystem in Hainan Island, accounting for more than 62% of its total area. The forestland area was firstly increased and then decreased in 1980—2018. The construction land increased rapidly, especially after 2010, with the growth rate of 122.46%, followed by the water area with the growth rate of 20.94%. Land use mainly presented the characteristics of changing from grassland to forest land, as well as from farmland and forestland to construction land or water area. (2) From 1980 to 2018, the overall ESV in Hainan Island showed a trend of first increasing and then decreasing, with a total increase of 5.159 billion yuan and a growth rate of 2.56%. Among them, the ESV of forestland accounted for the highest proportion with more than 70%. The single ESV was mainly hydrology regulation and climate regulation, which accounted for more than 50% of the total ESV. (3) In terms of

基金项目: 海南省财政科技计划资助 (KYYS-2019-14, KYYS-2018-32)

收稿日期: 2019-07-26; 网络出版日期: 2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenzongzhu@foxmail.com

spatial distribution, the ESV of Hainan Island had obviously spatial differentiation features with high in the middle area and low in the surrounding area. The high value area shrank further and the low value area expanded gradually in time series. (4) The spatial distribution of ESV and its changes in 5 periods from 1980 to 2018 in Hainan Island had significantly positive autocorrelation. The hot spots of ESV increment were mainly distributed in storage areas such as Daguangba reservoir and aquaculture farms in the northeast of Hainan Island. The cold spots of ESV loss were mainly distributed in important urban areas such as Haikou and Sanya, Yangpu economic development zone and coastal areas with rich tourism resources.

Key Words: land use; ecosystem services value; hotspot analysis; spatial and temporal changes; spatial autocorrelation; island

生态系统服务是指人类直接或间接从生态系统中获取的收益^[1],与人类福祉关系极其密切^[2-4]。正确认知生态系统服务之间的关系,是开展多种生态系统服务可持续管理决策的前提^[5-6]。目前,国内外在生态系统服务价值(Ecosystem Services Values,ESV)的评估方法上都开展了大量的研究工作,但尚未形成一套统一的评估体系^[3,7-10]。生态系统服务价值评估大致可以分为两类:基于单位服务功能价格方法和基于单位面积价值当量因子方法^[8],前者评估方法输入参数较多、计算过程较为复杂且标准难以统一,因此在具体理论和方法上尚未形成突破^[9-12];后者评估方法主要受到了 Costanza^[7]研究的影响,相对于前者而言,当量因子法较为直观易用、数据需求少、评估全面且可比性高,特别适用于区域和全球尺度生态系统服务价值评估^[8,13]。我国学者谢高地等^[4,8]在 Costanza 评价模型基础上改进并计算得到中国生态系统服务价值的基础当量,被大多数研究人员采用,广泛应用于评估国家、省市县、城市群、流域等不同空间尺度的生态系统服务价值^[12-16]。

土地利用/土地覆盖变化(LUCC)作为人类最基本的实践活动,是影响生态系统服务功能变化的重要因素^[16-18]。因地表覆被的改变导致生态系统内部结构、过程和功能发生了巨大变化,同时面临着日益加剧的人为活动压力^[19-21]。岛屿作为独特的自然生态系统,是沿海地区不可或缺的重要组成部分^[22],其所提供的生态系统服务功能也更易受到人类活动的影响而发生不可逆转的改变^[23-24]。我国沿海岛屿众多,当前对于岛屿型生态系统服务价值的评估研究相对匮乏^[22,25],对其认识也比较有限。如,Zhao 等^[26]采用价值当量法评估了 1990—2000 年崇明岛东滩土地利用和生态系统服务价值的变化情况;Lin 等^[22]分析了城市化背景下厦门岛 1973—2007 年的生态系统服务价值和景观格局变化;Qiu 等^[27]研究了 2009—2014 年舟山群岛土地利用与生态系统服务价值变化;Shifaw 等^[14]对福建平潭岛 2003—2017 年在实施综合实验区计划前后的土地利用格局与生态系统服务价值变化进行了量化评估。可见,当前大部分研究仅从时间动态变化上对一些岛屿的生态系统服务价值开展了评估与分析,缺乏在空间上变化特征的描述。而海南岛作为相对独立的地理单元,在生态系统服务价值评估上也多见于对局部区域或者部分类型生态系统服务价值进行研究,如喻露露等^[28]、雷金睿等^[15]分别对海口市海岸带、海南岛东北部的土地利用与生态系统服务价值开展了研究;欧阳志云等^[29]采用单位服务功能价格方法对 2002 年海南岛生态系统所提供的生态调节功能价值进行了评估,隋磊等^[30]同样采用该方法对 1998—2008 年海南岛森林、湿地、淡水和草地四类自然生态系统进行了动态评估,但始终缺乏从长时间序列角度对全岛土地利用与生态系统服务价值进行全面研究。此外,土地利用变化受自然、经济、政策等多种因素的影响^[31],具有很强的空间差异性,不同空间区位上的土地利用变化对生态系统服务价值的影响不尽相同^[32]。相关研究认为,基于网格单元的探索性空间统计分析能够有效表达生态系统服务价值的空间变化特征,更加精准地刻画出土地利用对生态系统服务价值的局部影响,而被大多数研究者采用^[12,15-16,27,32]。

海南岛为我国第二大岛屿,地理位置独特,是“21 世纪海上丝绸之路”的重要战略支点。2018 年中共中央、国务院提出在海南设立中国自由贸易试验区,2019 年又提出建设国家生态文明试验区,探索生态价值实现机制,这对海南生态环境保护与社会经济发展提出了更高的要求并赋予了新的生命动力。然而,海南特殊的岛屿生态

系统具有明显的独立性和脆弱性,一旦遭到破坏就会造成不可逆转的后果。在国家战略的背景下,以不破坏生态环境为前提,如何实现全岛生态系统服务最优权衡,对于认识土地资源开发利用和生态环境保护具有重要的理论意义和现实价值。因此,本文以海南本岛为研究对象,基于修订后的单位面积价值当量因子法,利用 1980—2018 年 5 期土地利用数据从时间和空间角度探究海南岛土地利用与生态系统服务价值的动态变化特征与权衡协同关系,以期为区域土地资源利用管理和生态系统可持续发展规划提供科学依据。

1 研究区概况

海南岛(18.80° — 20.10° N, 108.37° — 111.03° E)位于南海大陆架北端,与雷州半岛隔海相望,面积约 3.4 万 km^2 ,涉及 18 个市县,海岸线长 1944.4 km。区域地貌类型多样,地形中高周低,以五指山(1867 m)、鹦哥岭(1811 m)为隆起核心,从中部向四周依次为山地、丘陵、台地和平原等逐级递降(图 1)。气候高温多雨、长夏无冬,年降水量 1000—2500 mm,年平均气温 23.8 — 26.2°C ,具有典型的热带季风海洋性气候。自 1988 年海南建省,特别是 2009 年建设海南国际旅游岛以来,社会经济高速发展,城市迅速扩张,土地变化剧烈,深刻影响着全岛生态系统结构和功能。当前,海南岛土地利用现状以林地和耕地为主,两者接近总面积的 90%。岛内森林资源丰富、生态系统多样,拥有全国保存最完整的热带天然林,森林覆盖率从建省初期的 38.2% 提高到了 62.1%,为海南生态立省发展战略和国家生态文明试验区建设奠定了坚实基础。

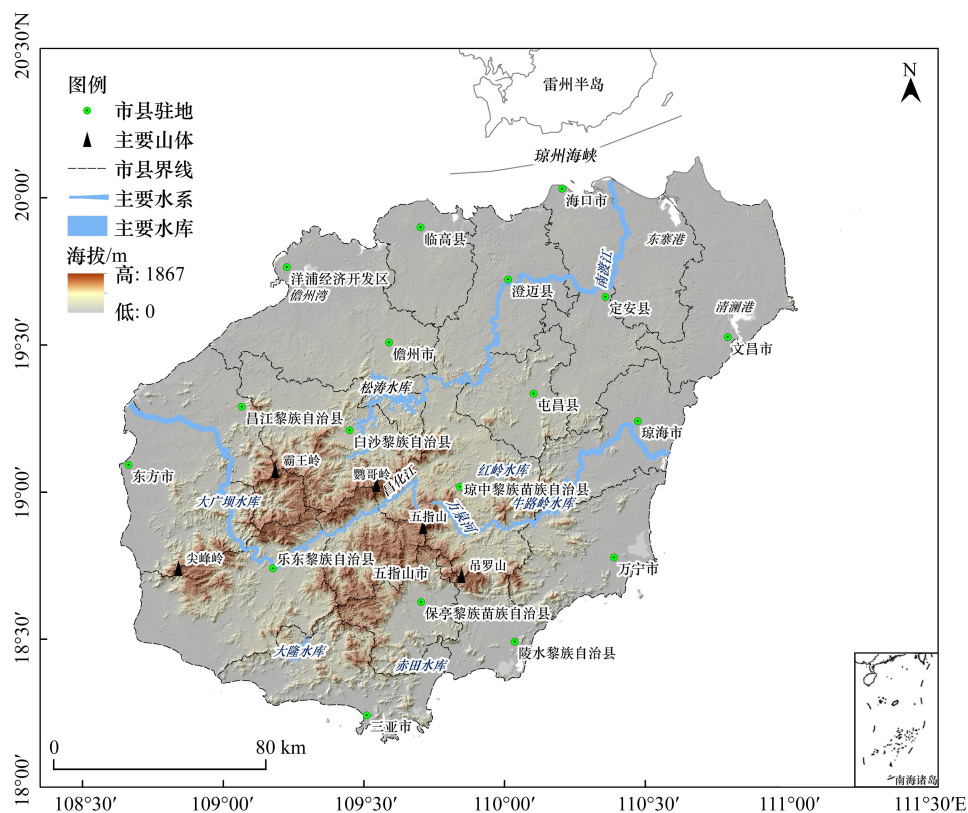


图 1 研究区位置

Fig.1 The location of the research area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

研究采用的 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2018 年 5 期土地利用矢量数据来源于中国土地利用现

状遥感监测数据库平台 (<http://www.resdc.cn/>), 精度达到 90% 以上^[33]。该系列数据依据全国土地利用遥感监测分类体系, 将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地 6 大类(图 2)。参考相关研究^[15-16,32], 借助 ArcGIS 渔网工具将海南岛划分为 2 km×2 km 正方形网格单元 8580 个, 并分别计算每个网格单元中各土地利用类型的面积。

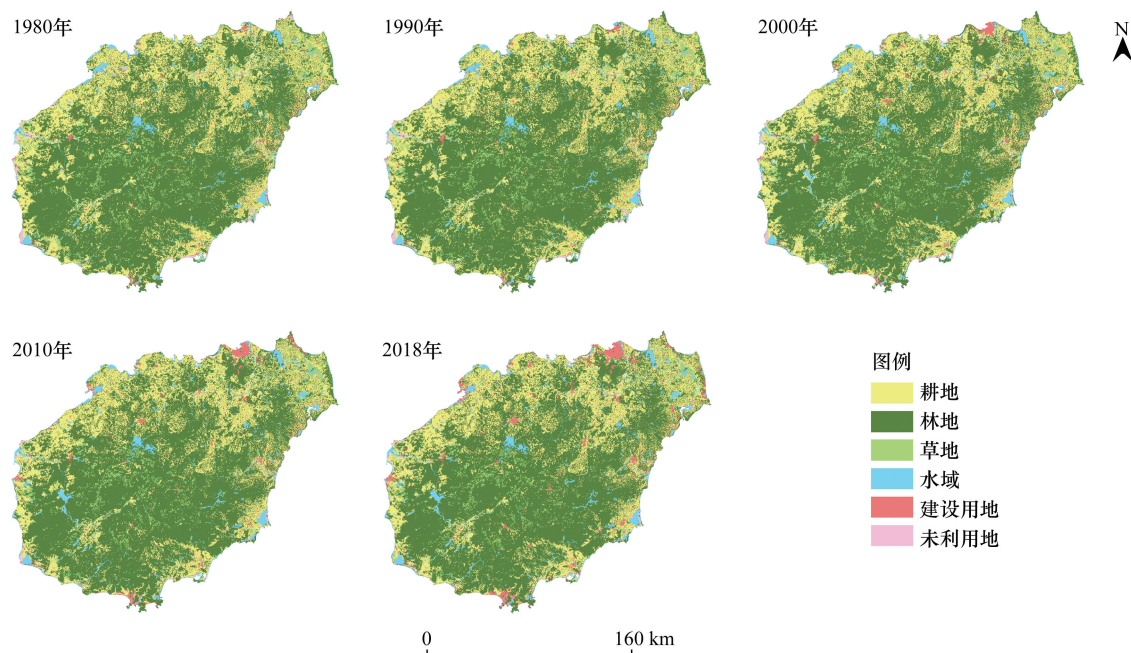


图 2 海南岛土地利用类型图

Fig.2 Land use types in Hainan Island in each year

2.2 生态系统服务价值评价

参照近年来关于生态系统服务价值的研究^[13,15,34], 以谢高地等^[4,8]制定的中国生态系统服务价值当量表为基础, 确定了中国 1 个生态系统价值当量的经济价值为 3406.50 元/hm²。根据研究期内海南省单位面积平均实际粮食产量 4822.45 kg/hm², 同期全国单位面积粮食产量 4974 kg/hm², 以此得出研究区生态系统服务当量价值的修正系数为 0.9695, 即换算得到研究区 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量为 3302.71 元/hm²。并结合喻露露等^[28]、雷金睿等^[15]人对海南岛局部区域的研究成果, 确定了海南岛生态系统服务价值当量表(表 1), 其中建设用地的价值当量为 0。根据修正后的价值当量和各土地利用类型的面积得到研究区生态系统服务价值, 计算公式为:

$$ESV = \sum_{i=1}^n A_i \times VC_i$$

$$ESV_f = \sum_{i=1}^n A_i \times VC_{fi}$$

$$VC_i = \sum_{f=1}^k EC_f \times E_a$$

式中, ESV 表示生态系统服务价值; A_i 表示第 i 种土地利用类型的面积(hm²); VC_i 表示第 i 种土地利用类型的生态系统服务价值系数; ESV_f 表示第 f 项生态系统服务的价值; VC_{fi} 表示第 i 种土地利用类型的第 f 项生态系统服务价值系数; EC_f 为某类土地利用类型第 f 项生态系统服务的价值当量; E_a 为 1 个标准当量生态系统服务价值, 即 3302.71 元/hm²。

表 1 海南岛单位面积生态服务价值当量

Table 1 The equivalent of ecological service value per unit area in Hainan Island

一级类型 First category	二级类型 Second category	耕地 Cropland	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water land	建设用地 Built land	未利用地 Unused land
供给服务 Provisioning services	食物生产	1.03	0.26	0.29	0.66	0	0.01
	原料生产	0.29	0.60	0.43	0.37	0	0.03
	水资源供给	-0.91	0.31	0.24	5.44	0	0.02
调节服务 Regulating services	气体调节	0.82	1.98	1.51	1.34	0	0.10
	气候调节	0.43	5.92	4.00	2.95	0	0.09
	净化环境	0.12	1.73	1.32	4.58	0	0.29
	水文调节	1.13	3.87	2.93	63.24	0	0.19
支持服务 Supporting services	土壤保持	0.67	2.41	1.84	1.62	0	0.12
	维持养分循环	0.14	0.18	0.14	0.13	0	0.01
	生物多样性	0.16	2.19	1.67	5.21	0	0.11
文化服务 Cultural services	美学景观	0.07	0.96	0.74	3.31	0	0.05

2.3 生态系统服务变化指数

采用生态系统服务变化指数(ESCI)对生态系统服务的变化进行刻画^[6,35],以表征各项生态系统服务的相对增益或减损。其计算公式为:

$$ESCI_x = \frac{ES_{CUR_x} - ES_{HIS_x}}{ES_{HIS_x}}$$

式中,ESCI_x代表单项生态系统服务变化指数;ES_{CUR_x}代表最后状态下的生态系统服务;ES_{HIS_x}代表初始状态下的生态系统服务。ESCI 值为 0 时表示生态系统服务没有变化;当为负值时表示有减损;为正值时表示有增益。

2.4 空间统计分析

利用探索性空间数据分析计算空间自相关系数,描述可视事物或现象空间分布格局的空间集聚和异常,发现研究对象间的空间相互作用现象。其中,Moran's *I* 用于描述生态系统服务价值全局空间自相关特征;*G_i^{*}* 用于探究生态系统服务价值空间变化的聚集与分异特征,即“热点”与“冷点”分布格局^[15,32,36-37]。计算公式分别为:

$$Moran's\ I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (\sum_i \sum_j w_{ij})}$$

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - X \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2]}{(n-1)}}}$$

$$X = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^2 - (X)^2}$$

式中,*n* 是空间网格单元数量,*x_i*和 *x_j*分别表示单元 *i* 和单元 *j* 的观测值, (*x_i* - $\bar{x}$) 是第 *i* 个空间单元上的观测值与平均值的偏差,*w_{ij}*是基于空间 *k* 邻接关系建立的空间权重矩阵。

3 结果与分析

3.1 海南岛土地利用动态变化特征

3.1.1 土地利用类型面积变化

根据海南岛不同时期遥感解译分类数据(图 2),可以看出,海南岛土地利用类型以林地为主,占总面积的 62%以上,主要分布在海南岛中南部;其次为耕地,占 26%左右,主要分布在海南岛北部和山地周围,两者接近海南岛总面积的 90%;其他土地利用类型面积占比较少。从表 2 的土地利用类型面积变化来看,1980—2018 年海南岛建设用地面积增加量最大,增加 741.38 km²,其次为水域,增加 261.89 km²;耕地和草地面积减少较大,分别为 493.58 km²和 367.15 km²,其他土地利用类型面积变化较小。从面积变化率来看,1980—2018 年海南岛建设用地面积变化幅度最大,增长率高达 122.46%,未利用地、草地、水域的面积变化幅度较大,变化率分别为-62.34%、-24.35%、20.94%,耕地和林地的变化幅度较小。从面积阶段性变化来看,建设用地面积比例呈现出持续增加的态势,且在 2010—2018 年间呈爆发式增加;耕地和未利用地持续减少,林地先增加后降低,草地先降低后略微增加;水域则是呈波动上升的趋势,在 2000—2010 年间增加最多。

表 2 1980—2018 年海南岛土地利用类型变化
Table 2 Changes of different land use types in Hainan Island from 1980 to 2018

土地利用类型 Land use types		草地 Grassland	耕地 Cropland	建设用地 Built land	林地 Forestland	水域 Water land	未利用地 Unused land
1980 年	面积/km ²	1507.63	9190.24	605.42	21512.47	1250.62	198.03
	比例/%	4.40	26.82	1.77	62.78	3.65	0.58
1990 年	面积/km ²	1455.11	9104.54	652.19	21651.60	1242.22	159.73
	比例/%	4.25	26.57	1.90	63.19	3.63	0.47
2000 年	面积/km ²	1234.45	9008.65	785.87	21819.14	1295.35	127.31
	比例/%	3.60	26.29	2.29	63.67	3.78	0.37
2010 年	面积/km ²	1135.90	8891.91	907.80	21742.21	1515.86	85.18
	比例/%	3.31	25.94	2.65	63.43	4.42	0.25
2018 年	面积/km ²	1140.48	8696.66	1346.80	21512.14	1512.51	74.58
	比例/%	3.33	25.37	3.93	62.75	4.41	0.22
1980—2018 年面积变化 Area change		-367.15	-493.58	741.38	-0.33	261.89	-123.45
1980—2018 年面积变化率 Rate of area change/%		-24.35	-5.37	122.46	0.00	20.94	-62.34

3.1.2 土地利用转移矩阵

从海南岛 1980—2018 年土地利用类型面积转移情况来看(表 3),耕地转出面积最大,转为建设用地、林地、水域的面积分别为 381.10、192.00、158.68 km²;其次为林地,转为建设用地、耕地、水域的面积分别为 293.61、133.90、102.76 km²;草地区转为林地的面积也较大,为 303.17 km²;其他土地利用类型转出的面积较小。从转入来看,建设用地转入面积最大,主要来自耕地和林地,面积分别为 381.10、293.61 km²;其次为林地,主要来自草地和耕地,面积分别为 303.17、192.00 km²;再次为水域,主要来自耕地 158.68 km²和林地 102.76 km²;草地、未利用地转入面积较小。从空间分布来看(图 3),海南岛土地利用转变主要集中在市县城区以及沿海地带,其中海口、三亚、儋州和东方市城区、洋浦经济开发区、文昌东北部沿海地区因城市建设造成土地利用类型转变较大,主要特征表现为耕地、林地、水域转为建设用地,而大型水库(如大广坝库区等)修建导致耕地、林地转为水域。其次,由于海南省绿化宝岛植树造林活动在文昌、东方等市县的草地和耕地等宜林地大面积转为林地,这在一定程度上保障了全岛林地资源的平衡。

表 3 1980—2018 年海南岛土地利用转移矩阵/km²

Table 3 Conversion of different land use types in Hainan Island from 1980 to 2018

1980	2018					
	草地 Grassland	耕地 Cropland	建设用地 Built land	林地 Forestland	水域 Water land	未利用地 Unused land
草地 Grassland	1079.19	14.70	46.26	303.17	64.28	0.00
耕地 Cropland	4.88	8453.38	381.10	192.00	158.68	0.15
建设用地 Built land	0.27	18.33	556.39	20.67	9.09	0.00
林地 Forestland	27.89	133.90	293.61	20950.21	102.76	3.48
水域 Water land	6.31	39.02	30.23	7.20	1163.50	0.16
未利用地 Unused land	21.84	37.32	17.20	38.02	12.80	70.77

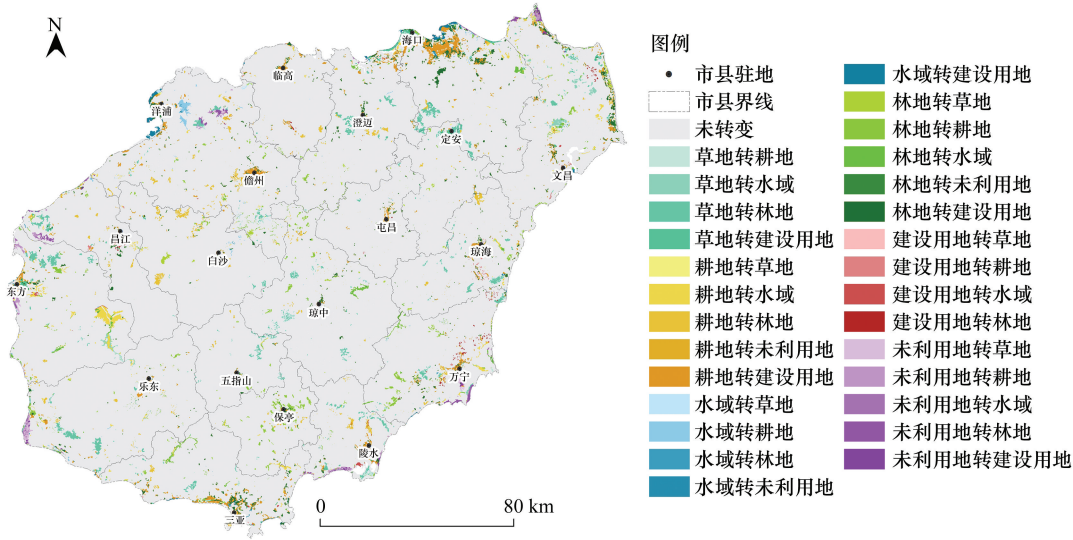


图 3 1980—2018 年海南岛土地利用变化空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of land use changes in Hainan Island from 1980 to 2018

3.2 海南岛生态系统服务价值动态变化特征

3.2.1 不同土地利用类型生态系统服务价值变化

1980—2018 年海南岛土地生态系统服务总价值整体表现为先增加后降低的变化过程(表 4),由 1980 年的 2014.03 亿元增加到 2010 年的 2084.49 亿元,增加了 70.46 亿元,之后减少到 2018 年的 2065.62 亿元,减少了 18.87 亿元;在这期间累计增加 51.59 亿元,增长率为 2.56%。从不同土地利用类型来看,仅有水域的 ESV 增加量最大,在 1980—2018 年间共增加 76.82 亿元,增长率达 20.94%;其余类型 ESV 不同程度降低,未利用地降低最大,为 -62.12%,但价值量仅降低 0.41 亿元;其次为草地和耕地,ESV 分别降低 18.33 亿元和 6.47 亿元,降低率为 -24.36%和 -5.37%;林地 ESV 占比最高,均达 70%以上,ESV 先升高后降低,与林地面积变化趋势一致,在研究期始末几乎持平,但在 2010—2018 年间林地 ESV 降低 15.51 亿元。可见,林地面积变化是造成 2010—2018 年间海南岛土地利用生态系统服务总价值变化的主要原因,而水域面积增加是导致 1980—2018 年间海南岛土地利用生态系统服务总价值增加的根本原因。

3.2.2 单项生态系统服务价值变化

1980—2018 年海南岛土地单项生态系统服务价值变化如表 5 所示。单项 ESV 以水文调节、气候调节为主,两者占总价值的 50%以上;在 1980—2018 年间单项 ESV 变化最大的是水文调节,增加 49.22 亿元,占总价值增加量的 95.41%,其次是水资源供给,增加 5.89 亿元,变化率达 32.45%。价值减少较大的为气候调节和气

体调节,分别减少 3.05 亿元和 2.07 亿元。水文调节、水资源供给价值增加驱使海南岛土地生态系统服务总价值总体增加,这得益于水域面积的持续增加;后期总价值降低是由于林地面积减少造成气候调节、水文调节、土壤保持和生物多样性价值降低。

表 4 1980—2018 年海南岛各类土地生态系统服务价值变化/10⁸元
Table 4 Ecosystem service value changes of each land use type of Hainan Island from 1980 to 2018

土地利用类型 Land use types		草地 Grassland	耕地 Cropland	建设用地 Built land	林地 Forestland	水域 Water land	未利用地 Unused land	总计 Total
1980	ESV	75.26	120.44	0.00	1450.83	366.84	0.66	2014.03
	比例/%	3.74	5.98	0.00	72.04	18.21	0.03	100
1990	ESV	72.64	119.32	0.00	1460.21	364.38	0.53	2017.08
	比例/%	3.60	5.92	0.00	72.39	18.06	0.03	100
2000	ESV	61.62	118.06	0.00	1471.51	379.97	0.42	2031.58
	比例/%	3.03	5.81	0.00	72.43	18.70	0.02	100
2010	ESV	56.70	116.53	0.00	1466.32	444.65	0.28	2084.49
	比例/%	2.72	5.59	0.00	70.34	21.33	0.01	100
2018	ESV	56.93	113.97	0.00	1450.81	443.65	0.25	2065.62
	比例/%	2.76	5.52	0.00	70.24	21.48	0.01	100
1980—2018 年 ESV 变化 ESV change		-18.33	-6.47	0.00	-0.02	76.82	-0.41	51.59
1980—2018 年 ESV 变化率 Rate of ESV change/%		-24.36	-5.37	0.00	0.00	20.94	-62.12	2.56

ESV: 生态系统服务价值 Ecosystem services values

表 5 1980—2018 年海南岛土地生态系统单项服务价值变化/10⁸元
Table 5 Changes of individual service value of land ecosystem in Hainan Island from 1980 to 2018

生态系统服务价值 ESV		供给服务 Provisioning services			调节服务 Regulating services				支持服务 Supporting services			文化服务 Cultural services	总计 Total
		食物生产	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	
1980	ESV	54.09	55.14	18.15	178.56	465.90	152.59	584.85	207.60	18.63	190.56	87.96	2014.03
	比例/%	2.69	2.74	0.90	8.87	23.13	7.58	29.04	10.31	0.93	9.46	4.37	100.00
1990	ESV	53.85	55.25	18.35	178.92	467.71	152.96	584.02	208.13	18.65	191.07	88.16	2017.08
	比例/%	2.67	2.74	0.91	8.87	23.19	7.58	28.95	10.32	0.92	9.47	4.37	100
2000	ESV	53.57	55.24	19.59	178.88	468.44	153.69	594.74	208.18	18.62	191.92	88.71	2031.58
	比例/%	2.64	2.72	0.96	8.80	23.06	7.56	29.27	10.25	0.92	9.45	4.37	100
2010	ESV	53.49	55.09	23.74	178.52	467.60	156.06	638.40	207.88	18.56	194.53	90.60	2084.49
	比例/%	2.57	2.64	1.14	8.56	22.43	7.49	30.63	9.97	0.89	9.33	4.35	100
2018	ESV	52.62	54.45	24.04	176.50	462.85	154.62	634.07	205.62	18.33	192.73	89.79	2065.62
	比例/%	2.55	2.64	1.16	8.54	22.41	7.49	30.70	9.95	0.89	9.33	4.35	100.00
1980—2018 年 ESV 变化 ESV change		-1.47	-0.69	5.89	-2.07	-3.05	2.03	49.22	-1.98	-0.30	2.17	1.83	51.59
1980—2018 年 ESV 变化率 Rate of ESV change/%		-2.71	-1.26	32.45	-1.16	-0.65	1.33	8.42	-0.95	-1.62	1.14	2.08	2.56

3.2.3 生态系统服务变化指数空间分布

为进一步分析海南岛生态系统服务价值及其变化程度的空间分布,以 2 km×2 km 正方形网格为单元,计

算其生态系统服务变化指数(ESCI),采用自然断点法分别制作得到 1980—2018 年海南岛 ESV 及其 ESCI 的空间分布图,其中研究区 ESV 从低到高划分为 6 个等级,一级最低、六级最高。

从 1980 年和 2018 年海南岛 ESV 的空间分布来看(图 4),研究区 ESV 除分布在水域较高之外,明显存在着海南岛中部高、四周低的空间分异特征,这与研究区海拔的空间差异分布高度契合。即中部海拔较高的区域主要地类为林地或草地,ESV 较高;四周海拔较低的区域主要地类为耕地或建设用地,ESV 较低,主要集中在海南岛北部和沿海区域。从 1980 年到 2018 年 ESV 的空间变化来看,高值区进一步萎缩、低值区逐渐扩展,而水域的新增造成研究区出现较多的点状 ESV 极高值区。

从 1980—2018 年海南岛 ESV 的损益变化(ESCI)来看(图 4),在海口和三亚城区、洋浦经济开发区、文昌东部沿海地区 ESV 减损较大,主要是由于重要城市和沿海经济建设造成 ESV 较高的土地利用类型(如水域、林地)向 ESV 较低的土地利用类型(如建设用地)转变。而在大广坝库区、海南岛东北部等地增益较大,这主要得益于库塘建设导致区域水域面积增加。其余地区 ESV 有增有减,变化并不显著。

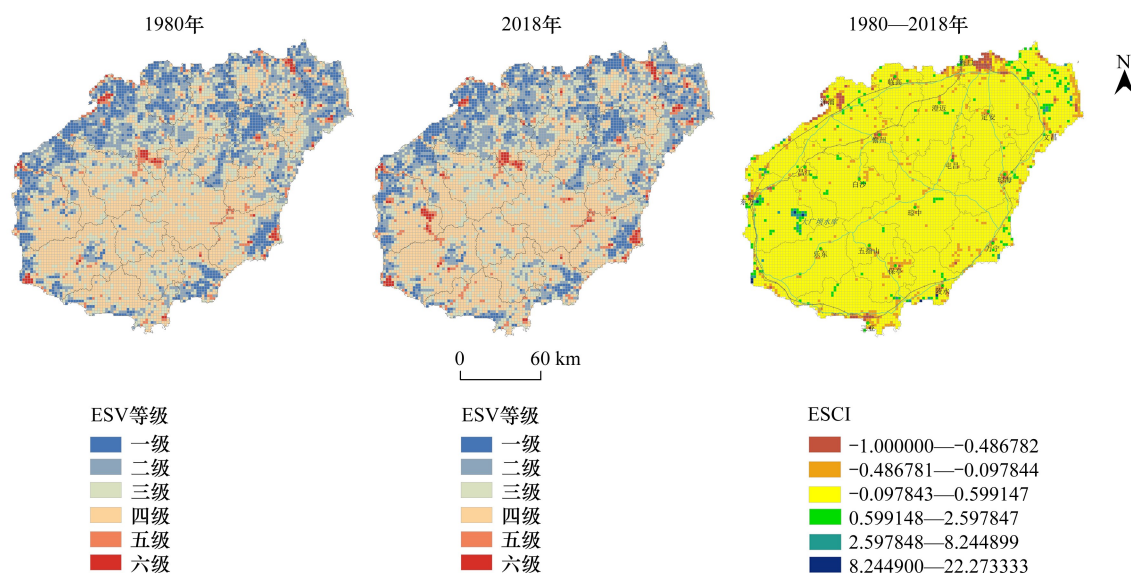


图 4 1980—2018 年海南岛生态系统服务价值及其生态系统服务变化指数的空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of ESV and ESCI in Hainan Island from 1980 to 2018

ESV: 生态系统服务价值 Ecosystem services values; ESCI: 生态系统服务变化指数 Ecological services change index

3.3 生态系统服务价值空间统计分析

3.3.1 空间自相关分析

从检验结果显示(表 6),1980—2018 年 5 个时期的 ESV 全局 Moran's I 值均大于 0, p 值均小于 0.001,表明研究区 ESV 的空间分布具有较强的正向自相关性,在空间上具有非常显著的聚集性,高值区趋于聚集,低值区趋于相邻;且 5 个时期的全局 Moran's I 值先降低后升高,在 2000 年达到最低值 0.4927,说明 ESV 的空间自相关性先减弱后增强,表明在 2000 年以后宏观政策与经济发展等因素促使海南岛 ESV 的空间分布聚集性不断增强。

进一步分析其 ESV 动态变化的空间自相关性,结果显示全局 Moran's I 值先升高后降低,同样具有明显的空间聚集性,且在 1990—2000 年间的 ESV 变化达到最大值,为 0.4187。这说明研究区 ESV 动态演化过程的空间聚集效应先增强后减弱,不同阶段表现出不同的空间聚集特征。而 1980—2018 年研究区整体 ESV 动态变化的全局 Moran's I 值达 0.4502,同样也表明具有显著的空间自相关性和空间聚集效应。

3.3.2 生态系统服务价值变化的冷点与热点分析

以网格单位为基础,利用 ArcGIS 热点分析工具(Getis-Ord G_i^*)选取置信度在 90%以上的具有统计显著

性的热点和冷点,分别得到研究区生态系统服务价值变化热点图(图 5)。

表 6 1980—2018 年海南岛 ESV 及其变化的空间自相关性

Table 6 Spatial autocorrelation of ESV and its changes in Hainan Island from 1980 to 2018

指数 Index	1980	1990	2000	2010	2018	1980—1990	1990—2000	2000—2010	2010—2018	1980—2018
Moran's I	0.5006	0.4932	0.4927	0.5118	0.5189	0.2271	0.4187	0.3387	0.2194	0.4502
z scores	91.9946	90.6311	90.5473	94.0510	95.3540	42.7926	78.2604	62.5902	41.0797	83.0595
P value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

z score 是标准差的倍数,P value 表示概率

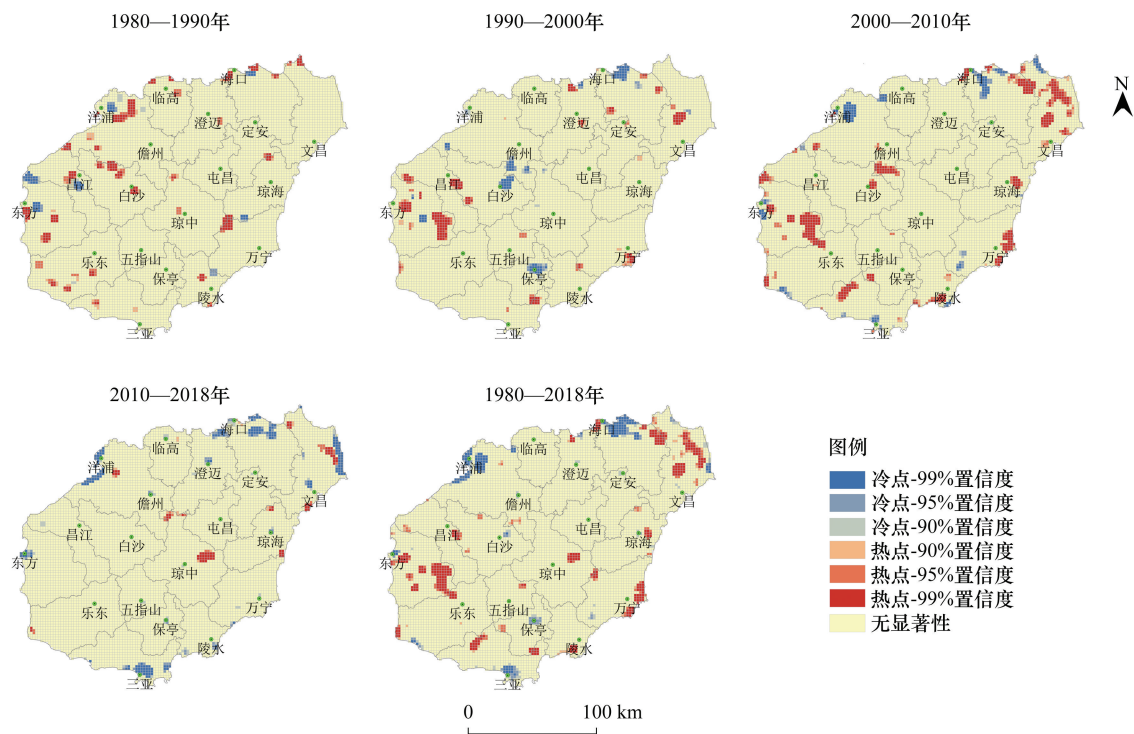


图 5 1980—2018 年海南岛 ESV 变化冷点和热点的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of cold spots and hot spots of ESV changes in Hainan Island from 1980 to 2018

在 1980—1990 年海南岛 ESV 增值热点区分布较为分散,但主要集中在海南岛西北部等地,这是由于草地转为林地或耕地转为水域导致局部 ESV 增高;ESV 损失冷点分布面积比例较少(表 7)。在 1990—2000 年和 2000—2010 年两个时间段内,ESV 增值热点区面积进一步扩大,主要表现为大型水库的修建,如赤田水库(1993 年)、大广坝水库(1994 年)、大隆水库(2007 年)等的相继建成使得局部水域面积迅速增加,其次在沿海地区特别是文昌市内水产养殖事业的发展导致耕地、林地转变为水域地类,使得 ESV 增高;ESV 损失冷点则主要分布在海口、三亚、洋浦、儋州、保亭等地,林地转为耕地、耕地转为建设用地,导致 ESV 迅速下降。2010—2018 年,由于海南国际旅游岛等一系列政策的推动,城市建设与土地开发进一步扩张,海口、三亚、澄迈老城、东方、文昌等城区,以及文昌月亮湾、儋州海花岛、三亚海棠湾等沿海区域成为 ESV 损失冷点;ESV 增值热点区则主要分布在红岭水库(2015 年建成)以及新增的水产养殖场等地,增值热点区面积明显少于损失冷点(表 7),这也印证了在这期间海南岛 ESV 呈下降的变化特征。

从研究期整体上看(图 5),与 1980—2018 年海南岛 ESCI 空间分布特征较为一致,ESV 增值热点区主要分布在大广坝水库、大隆水库、红岭水库等库区,以及东寨港、万宁小海和文昌境内的水产养殖场等区域,这主要是由于该地区水库建设和水产养殖业发展造成土地利用类型由耕地、林地转变为水域,从而使得 ESV 增

加。而 ESV 损失冷点区主要分布在海口、三亚等城区,洋浦经济开发区以及儋州海花岛、文昌月亮湾等沿海开发一带,这是因为城市扩张和土地开发导致建设用地占用耕地、林地或水域。从 1980—2018 年海南岛 ESV 变化冷点与热点的分布面积来看(表 7),损失冷点分布的面积比例少于增值热点,这也反映出海南岛土地利用的生态系统服务总价值增加。

表 7 1980—2018 年海南岛 ESV 变化冷点和热点的面积比例/%
Table 7 Area proportion of cold spots and hot spots of ESV changes in Hainan Island from 1980 to 2018

时期 Phases	1980—1990	1990—2000	2000—2010	2010—2018	1980—2018
冷点-99%置信度 Cold spot -99% confidence	0.71	1.10	1.38	2.07	1.76
冷点-95%置信度 Cold spot -95% confidence	0.28	0.45	0.62	0.71	0.76
冷点-90%置信度 Cold spot -90% confidence	0.23	0.35	0.27	0.61	0.73
无显著性 Not significant	94.69	94.97	91.25	95.27	90.97
热点-90%置信度 Hot spot -90% confidence	0.55	0.44	0.93	0.22	0.77
热点-95%置信度 Hot spot -95% confidence	1.06	0.78	1.34	0.26	1.20
热点-99%置信度 Hot spot -99% confidence	2.48	1.91	4.22	0.86	3.81

4 讨论

4.1 评估方法的局限性

生态系统服务价值评估存在很多主观因素,不同的评价方法在考虑视角、参数选择等方面的侧重,会使得评估结果存在较大差异,但得出的变化趋势是一致的^[16,38],不影响在同一方法、同一参数下研究结果的相互比较^[15]。如,欧阳志云等^[29]采用单位服务功能价格方法对 2002 年海南岛生态系统服务价值的评估结果为 2035.88—2153.39 亿元;谢高地等^[4]采用价值当量因子法对我国 2010 年生态系统服务价值进行了核算,其中海南 ESV 为 4488.25 亿元。本文采用修订后的单位面积价值当量因子法评估了海南岛 1980—2018 年近 40 年的 ESV,其价值为 2014.03—2084.49 亿元,与欧阳志云等^[29]的评估结果相接近,但与谢高地等^[4]相差一倍多。

显然,价值当量因子法自身也存在一定缺陷,相同研究区域修正方法和参数的不同都会使评价结果产生差异,而且局部的差异也难以用统一的参数来衡量。因此,需要有更为精准的评估模型,识别不同尺度下 ESV 非线性变化特征及局部特异信息^[39],提高 ESV 评估的全面性和科学性。其次,从空间角度分析土地利用变化对生态系统服务价值的影响,目前尚未有行之有效的方法^[32]。本文尝试通过划分网格单元采用探索性空间统计分析的方法能较好地空间分布角度反映出土地利用变化对生态系统服务价值的影响,利用 ESV 变化分析热点图,刻画出局部的变化特征,成为探究土地利用变化对生态系统服务影响的一种有益尝试。然而,对其变化背后复杂的社会经济驱动力尚未进行有效分析,空间关联关系也不明确,应当是今后进一步探索的研究方向之一。

4.2 土地利用变化对生态系统服务价值影响

海南岛作为国家重要的生态功能区^[40],在近 40 年来土地利用发生剧烈变化。林地是海南岛最主要的生态系统类型,占 62%以上,林地面积先升高后降低,在研究期始末几乎持平;建设用地面积增加迅猛,特别是在 2010 年海南国际旅游岛政策实施以后,增长率高达 122.46%。土地利用主要表现为草地转为林地,而耕地、林地转为建设用地或水域的变化特征,这也导致 ESV 的协同改变。1980—2018 年海南岛 ESV 总体表现

为先增加后降低的变化过程,研究期内净增加 51.59 亿元,增长率为 2.56%,这主要得益于水域面积增加导致水文调节、水资源供给等单项价值提高,从而使得海南岛总价值增加。2016 年海南通过省域“多规合一”改革完成总体空间规划,并划定生态保护红线,库塘、水产养殖场等水域面积再难以大幅增加;同时由于海南自贸区(港)建设对海陆生态空间的需求,可以预见海南岛 ESV 的下行压力将十分巨大。

4.3 海南岛生态系统服务价值空间分布格局

从空间分布来看,海南岛 ESV 总体上存在着明显中部高、四周低的空间分异特征,在时间序列上高值区进一步萎缩、低值区逐渐扩展。但好在海南岛中部地区在 ESCI 和热点分析上表现均不显著,这主要是由于中部地区是海南热带雨林的集中分布区,在国家和省级层面受多重保护^[40],难以大规模开发建设导致土地利用向低 ESV 转变,也因此成为海南岛重要的生态安全屏障。2019 年成立海南热带雨林国家公园,将海南中部地区热带雨林森林生态系统纳入严格保护范围,也为海南岛生态保护与修复注入强劲动力,保障 ESV 向增值方向发展。同时也应认识到另一面,在海南岛四周海拔较低的沿海地区,因地理资源优势造成城市扩张和土地开发迅速,使得建设用地占用耕地、林地或水域,导致区域 ESV 退化,主要出现在海口、三亚等重要城区,洋浦经济开发区以及旅游资源丰富的沿海开发区等。因此,建议通过严格保护与合理利用国土空间,建立开发边界外建设项目准入目录,增强沿海地区土地利用效率,同时实施生态修复战略提高 ESV 退化区域的生态系统服务功能和价值。

4.4 生态系统服务价值变化对岛屿生态保护的启示

千年生态系统评估^[1]将岛屿定义为“周围被水域隔离的土地,海滨与内陆面积的比值较高”,作为特殊的自然生态系统,也更易受到人类活动和环境变化的影响^[22]。海南岛地处热带,面向南海,特殊的地理位置使其极易受台风、高温等极端气候或自然灾害的影响,生态系统相对比较脆弱^[25];另一方面,受到岛内人口激增、城市建设扩张等人为活动的影响也使其所提供的 ESV 面临巨大压力^[14,23-24]。赵江等^[25]采用价值当量因子法对浙江金塘岛 1986—2014 年 ESV 的研究结果呈降低趋势,共减少了 1.08 亿元,减少了 30.23%,这主要是由于海港经济和城镇化的快速发展,迫使生态用地逐步向城镇建设用地发展。Zhao 等^[26]对上海崇明岛、Lin 等^[22]对福建厦门岛、Shifaw 等^[14]对福建平潭岛的 ESV 评估结果也均呈降低趋势,动态变化特征相似。本文对海南岛 ESV 的研究结果显示,1980—2010 年增加、2010—2018 年减少,总体依然增加了 51.59 亿元(2.56%)。究其原因主要有三方面,一是由于海南岛特殊的地形地貌特征造成中部地区历来发展迟缓,受人为活动干扰较少而呈现出较为完整的自然生态系统,生态系统服务价值高,成为全岛重要的生态源;其次,海南岛为我国第二大岛屿,较之小型岛屿,其生态系统稳定性更高,抵御极端气候或自然灾害的能力也较强;三是因为高当量价值的水域面积大幅增长保障了研究期内海南岛 ESV 的整体增加。但同时我们也应认识到其 ESV 在 2010—2018 年下降的客观事实,且随着社会经济的进一步发展,海南岛的生态建设将会面临更为严峻考验。长此以往,生态系统将无法支撑起社会经济的长远发展^[25]。因此,建议严格执行海南省“多规合一”总体空间规划和海陆生态保护红线管理,落实以图管地;注重对湿地、水域及林地等高 ESV 的保护与恢复,维护和强化全岛生态系统格局的连续性和完整性,引导土地利用向 ESV 保值或增值方向发展。

5 结论

本文基于网格单元采用修订后的单位面积价值当量因子法对海南岛 1980—2018 年近 40 年的土地利用与生态系统服务价值进行了评估,分析其时空动态变化特征,得出以下主要结论:

(1)林地是海南岛最主要的自然生态系统,占 62%以上,林地面积先升高后降低,在研究期始末几乎持平;建设用地增加迅猛,特别是在 2010 年以后,增长率高达 122.46%,其次水域增长率为 20.94%;未利用地、草地和耕地降低幅度较大。土地利用主要呈现出草地转为林地,耕地、林地转为建设用地或水域的变化特征。

(2)海南岛 ESV 在研究期内先增加后降低,净增加 51.59 亿元,增长率为 2.56%,其中林地 ESV 占比最高,达 70%以上;而单项 ESV 以水文调节、气候调节为主,两者占总价值的 50%以上。水域面积持续增长驱使

水文调节和水资源供给等单项 ESV 增加是保障海南岛 ESV 总体增加的重要原因。

(3) 在空间分布上,海南岛 ESV 总体上存在着明显的中部高、四周低的空间分异特征,在时间序列上高值区进一步萎缩、低值区逐渐扩展;在海口、三亚等重要城区,洋浦经济开发区以及旅游资源丰富的沿海地区 ESV 减损较大,在大广坝水库等库区、海南岛东北部水产养殖场等地增益较大。

(4) 1980—2018 年海南岛 5 个时期的 ESV 及其变化的全局 Moran's I 值均大于 0,具有非常明显的空间正向自相关性,高值区趋于聚集,低值区趋于相邻;不同阶段表现出不同的空间聚集特征,但在整体分布上 ESV 变化热点图与 ESCI 空间分布特征一致。

参考文献 (References):

- [1] MEA (Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] Costanza R, De Groot R, Sutton P, Van Der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [3] Kubiszewski I, Costanza R, Anderson S, Sutton P. The future value of ecosystem services: global scenarios and national implications. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 289-301.
- [4] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [5] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.
- [6] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 柳冬青, 马学成. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系. *地理学报*, 2018, 73(5): 868-879.
- [7] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [8] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [9] Yu Z Y, Bi H. The key problems and future direction of ecosystem services research. *Energy Procedia*, 2011, 5: 64-68.
- [10] Sun J. Research advances and trends in ecosystem services and evaluation in China. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 1791-1796.
- [11] 赵军, 杨凯. 生态系统服务价值评估研究进展. *生态学报*, 2007, 27(1): 346-356.
- [12] Zhang Y, Liu Y F, Zhang Y, Liu Y, Zhang G X, Chen Y Y. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: a case study in Wuhan, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638: 780-790.
- [13] 徐媛银, 郭砾, 薛达元, 孙思琦. 赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变. *生态学报*, 2019, 39(6): 1969-1978.
- [14] Shifaw E, Sha J M, Li X M, Bao Z C, Zhou Z L. An insight into land-cover changes and their impacts on ecosystem services before and after the implementation of a comprehensive experimental zone plan in Pingtan island, China. *Land Use Policy*, 2019, 82: 631-642.
- [15] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 李苑菱, 杨琦, 陈小花. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析. *生态学报*, 2019, 39(7): 2366-2377.
- [16] 邓楚雄, 钟小龙, 谢炳庚, 万义良, 宋雄伟. 洞庭湖区土地生态系统的服务价值时空变化. *地理研究*, 2019, 38(4): 844-855.
- [17] Song W, Deng X Z, Yuan Y W, Wang Z, Li Z H. Impacts of land-use change on valued ecosystem service in rapidly urbanized North China Plain. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 245-253.
- [18] 张天海, 田野, 徐舒, 唐立娜, 郭蔚. 滨海城市土地利用格局演变及对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2018, 38(21): 7572-7581.
- [19] Eigenbrod F, Bell V A, Davies H N, Heinemeyer A, Armsworth P R, Gaston K J. The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, 278(1722): 3201-3208.
- [20] Long H L, Liu Y Q, Hou X G, Li T T, Li Y R. Effects of land use transitions due to rapid urbanization on ecosystem services: implications for urban planning in the new developing area of China. *Habitat International*, 2014, 44: 536-544.
- [21] Estoque R C, Murayama Y. Landscape pattern and ecosystem service value changes: implications for environmental sustainability planning for the rapidly urbanizing summer capital of the Philippines. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 116: 60-72.
- [22] Lin T, Xue X Z, Shi L Y, Gao L J. Urban spatial expansion and its impacts on island ecosystem services and landscape pattern: a case study of the island city of Xiamen, Southeast China. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 81: 90-96.
- [23] 尹锴, 赵千钧, 文美平, 花利忠, 吝涛, 石龙宇. 海岛型城市森林景观格局效应及其生态系统服务评估. *国土资源遥感*, 2014, 26(2): 128-133.
- [24] 艾训安, 洪滔. 厦门岛生态系统服务价值评价与分析. *中国农学通报*, 2015, 31(16): 194-200.
- [25] 赵江, 沈刚, 严力蛟, 黄璐, 金爱民, 霍思高. 海岛生态系统服务价值评估及其时空变化——以浙江舟山金塘岛为例. *生态学报*, 2016,

- 36(23): 7768-7777.
- [26] Zhao B, Kreuter U, Li B, Ma Z J, Chen J K, Nakagoshi N. An ecosystem service value assessment of land-use change on Chongming Island, China. *Land Use Policy*, 2004, 21(2): 139-148.
- [27] Qiu S S, Yue W Z, Zhang H, Qi J G. Island ecosystem services value, land-use change, and the National New Area Policy in Zhoushan Archipelago, China. *Island Studies Journal*, 2017, 12(2): 177-198.
- [28] 喻露露, 张晓祥, 李杨帆, 赵杏杏, 马生全, Cao H H, 曹均阔. 海口市海岸带生态系统服务及其时空变异. *生态学报*, 2016, 36(8): 2431-2441.
- [29] 欧阳志云, 赵同谦, 赵景柱, 肖寒, 王效科. 海南岛生态系统生态调节功能及其生态经济价值研究. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1395-1402.
- [30] 隋磊, 赵智杰, 金羽, 关学彬, 肖明. 海南岛自然生态系统服务价值动态评估. *资源科学*, 2012, 34(3): 572-580.
- [31] Fu B J, Wang S, Su C H, Forsius M. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [32] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 高建华. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究. *生态学报*, 2019, 39(10): 3482-3493.
- [33] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.
- [34] 雷军成, 王莎, 汪金梅, 吴松钦, 游细斌, 吴军, 崔鹏, 丁晖. 土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2019, 39(9): 3089-3099.
- [35] 李晶, 李红艳, 张良. 关中-天水经济区生态系统服务权衡与协同关系. *生态学报*, 2016, 36(10): 3053-3062.
- [36] 涂小松, 龙花楼. 2000-2010 年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化. *资源科学*, 2015, 37(12): 2451-2460.
- [37] Li G D, Fang C L, Wang S J. Exploring spatiotemporal changes in ecosystem-service values and hotspots in China. *Science of the Total Environment*, 2016, 545-546: 609-620.
- [38] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 朱高儒, 马宗文. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法——以渤海湾沿岸为例. *地理研究*, 2012, 31(10): 1775-1784.
- [39] 南滔, 杨子寒, 毕旭, 付奇, 李波. 生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析——以长江中游华阳河湖群地区为例. *中国环境科学*, 2018, 38(9): 3531-3541.
- [40] 侯鹏, 翟俊, 曹巍, 杨旻, 蔡明勇, 李静. 国家重点生态功能区生态状况变化与保护成效评估——以海南岛中部山区国家重点生态功能区为例. *地理学报*, 2018, 73(3): 429-441.