

赖勇, 林少涛, 黄光庆, 等. 快速城镇化背景下生态系统服务价值时空变化及空间特征研究——以潮州市潮安区为例[J]. 生态科学, 2023, 42(4): 18–28.

LAI Yong, LIN Shaotao, HUANG Guangqing, et al. Spatial-temporal dynamics of ecosystem services value in a rapidly urbanization process: a case study of Chao'an District, Chaozhou City[J]. Ecological Science, 2023, 42(4): 18–28.

快速城镇化背景下生态系统服务价值时空变化及空间特征研究——以潮州市潮安区为例

赖勇^{1,2,3}, 林少涛³, 黄光庆^{3,*}, 陈升忠³, 陈彩霞^{1,2,3}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 广东省科学院广州地理研究所, 广东省科学院广州地理研究所广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广东省科学院广州地理研究所遥感与地理信息系统应用重点实验室, 广州 510070

【摘要】 生态系统服务价值(ESV)动态评估可为区域可持续发展提供决策。基于生态系统服务价值当量法、双变量空间自相关分析法, 分析了潮安区 2008—2018 年生态系统服务价值变化特征, 及与主要经济指标的空间分析。结果表明: (1) 2008—2018 年期间, 潮安区的主要的生态用地阔叶林、水田和水域大面积减少; (2) 南部平原区 ESV 相对变化率较大, 相反北部山地丘陵区各镇 ESV 相对变化率较小; (3) 人均 GDP、工业生产总产值比例与生态系统服务价值存在明显的负相关关系, 其中工业总产值比例与生态系统服务价值的负相关性最强; 其双变量 LISA 图也具有相似的空间分异特征, 高一低聚集区总体分布于潮安区南部平原区, 低—高聚集区主要分布在北部山地丘陵地区。建议应注重产业经济的发展与生态环境保护的协调与平衡, 以提高生态用地服务功能的发挥。

关键词: 生态系统服务价值; ANN-CA 模型; 土地利用时空变化; 城镇化; 潮安区

doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2023.04.003 中图分类号: X826 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2023)04-018-11

Spatial-temporal dynamics of ecosystem services value in a rapidly urbanization process: a case study of Chao'an District, Chaozhou City

LAI Yong^{1,2,3}, LIN Shaotao³, HUANG Guangqing^{3,*}, CHEN Shengzhong³, CHEN Caixia³

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Key Lab of Guangdong for Utilization of Remote Sensing and Geographical Information System, Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

Abstract: The dynamics of ecosystem services value (ESV) can provide strategy for the regional sustainable development. Based on Evaluation Table of Ecological Service Value per Unit of the Ecosystem method and the Bivariate Spatial Autocorrelation Analysis, we analyzed the characteristics of ESV in Chao'an District during the 2008-2018. We also coupled the socio-economic factors to analyze the relation with the ESV. The result showed that: (1) the forest, the padding field and the water body in Chao'an District dropped dramatically during the 2008 to 2018 period; the ESVs of Chao'an District in

收稿日期: 2021-03-02; 修订日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(4177012472); 广东省科学院建设国内一流研究机构行动专项资金项目(2019GDASYL-0105001)

作者简介: 赖勇(1986—), 男, 广东广州人, 博士生, 助理研究员, 主要从事土地利用与生态服务研究, E-mail: laiyong_gz@foxmail.com

*通信作者: 黄光庆, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土地利用与生态环境研究, E-mail: hgq@gdas.ac.cn

2008 to 2018 decreased constantly. (2) Due to the different parts of socio-economic development of Chao'an District, the changing speed of ESVs in the southern part was more obvious than the north; (3) The main driven factors for the downward trend of the ESVs were GDP per person and GIP. Among them, the GIP and the ESV had a strong negative relativity. Finally, we concluded that it is crucial to balance the ESVs and the economic development so as to improve the ESV of the study region.

Key words: ESVs; ANN-CA Model; spatial-temporal dynamics of land use and land cover; urbanization; Chao'an District.

0 前言

我国正处于快速城镇化的阶段, 城镇化的快速发展导致的生态环境问题也日益突出^[1], 极大地改变了生态系统的结构, 导致生态系统提供服务的能力降低, 严重威胁我国的可持续发展^[2], 如何促进城镇化与生态环境的协调及可持续发展研究成为学术界的共识^[3]。

生态系统服务这一概念最早由 Paul Ehrlich 提出^[4]。随后, Costanza 指出生态系统产品和服务是指人类直接或间接从生态系统中获得的收益, 是人类社会赖以生存和发展的基础^[5]。上述文献把生态系统服务具体分为 17 种类型, 每类对应不同的生态系统功能。De Groot 指出生态系统服务为人类直接或者间接提供服务的能力^[6]。生态系统服务价值 (Ecosystem service value, ESV) 则是对人类与生态系统进行权衡而评估的目标和结果^[7], 其价值评估是生态环境保护、生态功能区划、环境经济核算和生态补偿决策的重要依据和基础^[8-9]。联合国的《千年生态系统评估报告》(Millennium Ecosystem Assessment) 对生态系统服务的定义与 Costanza 的基本相同, 把生态系统服务分为支持、调节、提供和文化服务四大类别^[10]。我国学者上述理论的基础上对我国陆地生态系统^[11-12]、生态学与生态系统核算^[13-15]、土地与生态系统服务进行研究^[16]。

土地利用是生态系统服务的主导驱动因子, 它是人类活动和生态系统服务的“桥梁”^[17]。国内外在研究土地利用与生态系统服务方面有多方面的成果。国外学者从夜间灯光数据^[18]、景观格局^[19]、大尺度城市群^[20]、土地利用结合气候变化^[21]和土地管理及生态系统服务优化^[22]等方面较多研究和关注。我国学者从不同区域^[23-27]及结合土地利用与生态系统服务优化^[28-32]有较为显著的成果。

现有研究多以区域等大尺度的为主, 在区县尺度, 特别对粤东人地矛盾突出地区的生态系统服务与土地利用的关系研究比较少。同时结合双变量空

间自分析空间生态系统服务差异原因的研究也相对较少。我国有着人口众多且空间分布不均和人均资源占有量低的特点, 有学者测算了我国 2010 年人均生态服务价值与人均国内生产总值的关系, 结果表明该年份全国人均生态系统服务量为 2.84 万元, 而人均国内生产总值为 2.99 万元, 两者之比约为 1:1。这表明我国生态系统服务价值相对社会经济价值有更高的稀缺性, 在东部经济发达和人口密集区域, 如北京、上海和天津等相对稀缺性更为突出^[16]。因此, 研究粤东经济相对发达且人口密集地区的生态系统服务与土地利用关系有着重要的意义。

潮州市潮安区地处深圳、汕头、厦门三大经济特区的交汇点, 2018 年全区人口密度 988 人·km⁻², 中部和南部各镇人口密度均超过 1000 人·km⁻², 其中庵埠镇人口密度达 4499 人·km⁻², 全区人均耕地 0.02 hm², 少于联合国人均耕地 0.053 hm², 是典型人多地少矛盾突出的地区^[33]。近年来潮安区社会经济发展迅速, 城镇化水平快速提高。但是在城镇化的发展进程中, 由于建设用地的扩张, 一些生态用地面积开始下降, 生态系统服务价值也随之降低。生态系统服务价值是衡量生态安全的重要指标, 加强对区域的生态系统服务价值时空分布动态监测和揭示其时空变化特征^[34], 既可为决策者制定生态环境保护措施提供科学的依据, 也为国土空间规划提供参考依据, 对区域可持续发展及改善人居环境有重要意义。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

潮州市潮安区位于广东省东部, 地处韩江下游, 南部为韩江三角洲平原的一部分。东邻饶平县和潮州市湘桥区, 南连汕头经济特区, 西与揭阳市揭东区交界, 北与梅州市丰顺县接壤。地处深圳、汕头、厦门三大经济特区的交汇处, 是连接珠三角经济区和海西经济区两大经济板块的重要节点。

潮安区属亚热带地区, 北回归线在南部穿越而过, 潮汕第一大河韩江流经南北 96 公里, 气候温和,

雨量充足, 四季常青, 全年日平均气温 21.4 °C。2018 年底, 潮安区常住人口 104.42 万人, 户籍人口 105.74 万人。多年来, 潮安区的地区生产总值、工业总产值及固定资产投资等三大指标位居潮州市各区(县)第一(表 1)。

1.2 数据来源

本文收集和分析的数据包括: 潮安区土地利用

数据、与土地利用变化扩展相关的适宜性数据和潮安区各镇经济统计数据。

(1) 土地利用数据

本研究土地利用数据基于潮安区 2008 年、2012 年和 2018 年土地利用变更调查数据进行制作, 数据以《土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2007)》进行分类, 数据比例尺为 1: 10000。

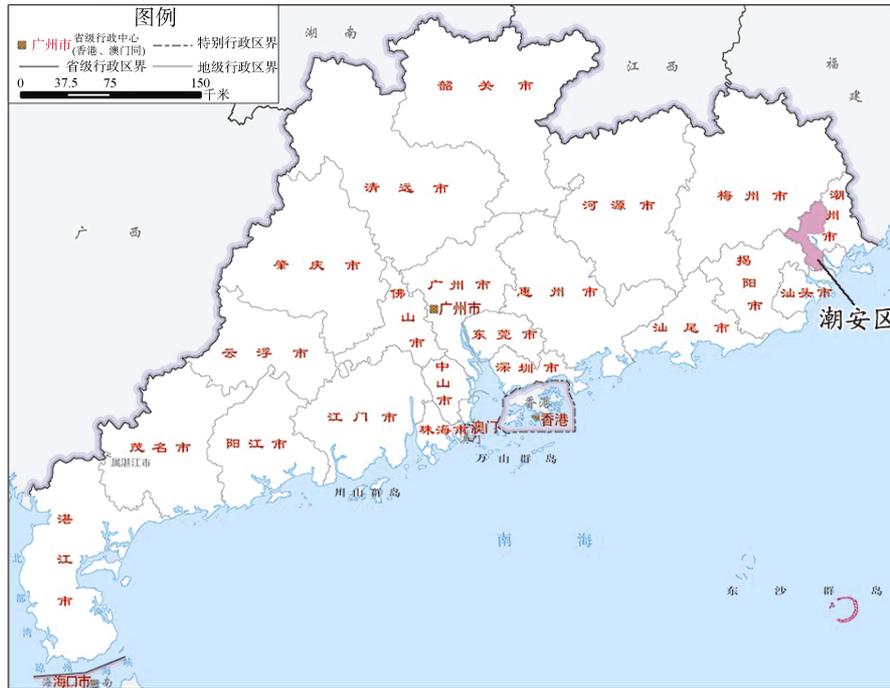


图 1 潮安区在广东省位置示意图

Figure 1 The location of Chao'an District in Guangdong Province

表 1 潮州市各区(县)经济数据 (亿元)

Table 1 Economic data of each district/county in Chaozhou City (100 million Yuan)

经济指标	行政区	年份				
		2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
地区生产总值	潮安区	359.97	379.33	396.16	407.41	434.93
	饶平县	302.85	303.58	270.55	259.07	302.18
	湘桥区	207.03	215.28	220.46	234.95	248.49
	枫溪区	100.97	105.75	107.39	109.34	115.5
工业总产值	潮安区	885.22	922.19	880.94	827.9	909.43
	饶平县	302.85	303.58	270.55	259.07	302.18
	湘桥区	287.36	351.63	371.09	465.86	528.09
	枫溪区	313.62	335.36	334.87	296.36	318.44
固定资产投资	潮安区	150.30	162.86	183.57	203.58	217.02
	饶平县	68.96	75.87	97.33	118.26	133.39
	湘桥区	105.62	113.37	120.64	123.66	129.47
	枫溪区	24.16	24.95	27.69	29.52	30.70

(2) 潮安区各镇经济统计数据

来源于潮安区 2018 年统计年鉴, 主要包括潮安区各镇人口数据、地区生产总值(GDP)、工业总产值和农业总产值数据。

1.3 研究方法

1.3.1 生态用地类型界定

目前已经有许多学者对于生态用地分类的界定开展了许多研究, 但是学上仍没有统一的标准^[35], 本文根据有关学者^[36-37]的研究, 将生态用地类型定义为能够起到保护及稳定区域生态环境的作用, 并且自身拥有一定的供给、调节、修复和维持能力和生态系统服务价值的土地。根据谢高地修订后当量表中的地类^[8]及对生态用地的分类^[38], 结合土地利用变更调查数据, 本研究将旱地、水田、阔叶林(包括园地、林地)、灌木、草地、裸土地和水域(包括河流水面、坑塘水面、湖泊水库水面和内陆滩涂)作为生态用地, 一共 7 类生态用地, 将建设用定为生态系统服务价值为 0 的土地利用类型^[5, 8]。该分类与谢高地修订后当量表^[8]的二级地类基本对应。

1.3.2 构建生态系统服务价值评价指标和估算体系

(1) 生态系统服务价值评价指标

利用当量因子法^[8]计算生态系统服务价值的方法已经得到广泛应用^[28, 39-41]。该方法将生态系统服务价值分为 4 个一级生态服务类和 11 个二级服务类。每种服务类分别赋予其当量因子, 不同生态系统服务价值当量按相对于耕地生产食物的相对重要性进行赋值, 其中假定耕地食物生产的单位面积生态系统服务价值当量因子为 1。本文以谢高地等提出修订后的单位面积生态系统服务价值当量表为基础, 确定了潮安区单位面积生态系统服务价值当量表, 如表 2 所示

(2) 生态系统服务价值估算

在计算生态系统服务价值前, 需要求得各种生态系统分类用地的生态系统服务价值单价。生态系统服务价值单价指的是某生态系统分类用地的单位面积生态系统服务价值系数。

$$U_k = F_k \times Q \quad (1)$$

$$ESV = \sum U_k \times S_k \quad (2)$$

公式(1)中, U_k 表示研究区域的第 k 类生态用地的单位面积生态系统服务价值系数(元·hm⁻²), 即生

态系统服务价值单价; F 表示第 k 类用地的生态系统服务价值当量因子; Q 表示单位当量因子的经济价值(元·hm⁻²)。

得到各种生态分类的生态系统服务价值单价后, 参考 Costanza^[5]等的生态系统服务价值评估体系, 通过公式(2)可以求得潮安区生态系统服务功能价值。公式(2)中的 ESV 表示潮安区的生态系统服务的总价值量(元); S 为第 k 类用地的面积。参考谢高地统计的 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量, 同时参考其他学者的修正研究^[34, 42]最终确定当量值, 可以利用潮安区的土地利用变更调查数据库来获取各土地利用类型及各类型的土地面积, 将其代入公式(2), 即可求得研究区相应的各个年份的生态系统服务价值。

1.3.3 双维度生态系统服务价值相对变化率

双维度下的生态系统服务价值相对变化率概括为: 一是区域空间维度上的相对变化率 R_i ; 二是各项生态系统服务功能(11 个二级服务类)维度上的相对变化率 R^f , R_i 和 R^f 分别反映的是在区域空间上和不同服务功能的尺度上生态系统服务价值的增减趋势, 其表达式如下:

$$R_i = \frac{(L_{t+j} - L_t) / L_t}{(C_{t+j} - C_t) / C_t} \quad (3)$$

$$R^{(f)} = \frac{(ESV_{t+j}^{(f)} - ESV_t^{(f)}) / ESV_t^{(f)}}{(ESV_{t+j} - ESV_t) / ESV_t} \quad (4)$$

表达式(3)中, R_i 为区域 i 的 ESV 相对变化率, L_{t+i} 、 L_t 分别表示为区域空间 i

在 $t+j$ 与 t 期的局部 ESV , C_{t+i} 、 C_t 分别为 $t+j$ 与 t 期的总体 ESV 。表达式(4)中, R^f 为第 f 项 ESV 相对变化率, $ESV_{t+j}^{(f)}$ 、 $ESV_t^{(f)}$ 分别表示为生态系统服务功能 f 在 $t+j$ 与 t 期的 ESV ; $ESV_{t+j} - ESV_t$ 表示为 $t+j$ 与 t 期的总体 ESV 。 $|R| > 1$ 表示区域空间 i 或生态系统服务功能 f 的 ESV 变化幅度大于研究区整体的变化幅度; $|R| \leq 1$ 表示区域空间 i 或生态系统服务功能 f 的 ESV 变化幅度小于或者等于研究区的整体变化幅度。 R 值的正负表示区域空间 i 或生态系统服务功能 f 的 ESV 变化方向与研究区整体的变化方向是否一致。

1.3.4 空间分异特征分析

空间自相关分析分为全局空间自相关分析和局部空间自相关分析。全局空间自相关分析研究的是所有对象整体的平均关联程度; 局部空间自相关分析,

表 2 潮安区单位面积生态系统服务价值当量表 (元·hm⁻²·a⁻¹)Table 2 Ecosystem services value coefficient for different land use types of Chao'an District (Yuan·hm⁻²·a⁻¹)

生态系统服务分类 用地名称	供给服务			调节服务				支持服务			文化服务
	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	养分 循环	生物多 样性	美学 景观
旱地	0.85	0.4	0.02	0.67	0.36	0.1	0.27	1.03	0.12	0.13	0.06
水田	1.36	0.09	-2.63	1.11	0.57	0.17	2.72	0.01	0.19	0.21	0.09
阔叶林	0.29	0.66	0.34	2.17	6.5	1.93	4.74	2.65	0.2	2.41	1.06
灌木	0.19	0.43	0.22	1.41	4.23	1.28	3.35	1.72	0.13	1.57	0.69
草地	0.1	0.14	0.08	0.51	1.34	0.44	0.98	0.62	0.05	0.56	0.25
裸地	0	0	0	0.02	0	0.1	0.03	0.02	0	0.02	0.01
水域	0.8	0.23	8.29	0.77	2.29	5.55	102.24	0.93	0.07	2.55	1.89
建设用地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

则用来描述不同区域上的空间集聚程度,能够发现空间局部的不平稳性,容易掌握局部空间要素的聚集性和分异特征。通常采用 Global Moran's I 和 Local Moran's I 指数反映全局空间自相关性和局部空间自相关性^[34, 43-45]。其中 Moran's I 指数的表达式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij} \cdot (Y_i - \bar{Y}) \cdot (Y_j - \bar{Y})}{S^2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij}} \quad (5)$$

对于单个空间对象的局部空间自相关性, Local Moran's I 指数的表达式为:

$$I_i = \frac{Y_i - \bar{Y}}{S_i^2} \cdot \sum_{i=1, j \neq i}^n W_{ij} \cdot (Y_i - \bar{Y}) \quad (6)$$

式中, $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$, $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$; Y_i 和 Y_j 分别表示对象 i 和对象 j 的属性值, n 为空间对象的总数量(本研究中为潮安区镇的数量); W_{ij} 是空间权重矩阵(本研究中采用 Queen 邻接作为邻接空间权重)。

双变量全局自相关和局部自相关,是在 Moran's I 指数的基础上的进一步拓展,可以描述两个地理要素的空间关联和依赖特征上具有较高适用性和有效性,能够探索两者的空间关联特征。其表达式为:

$$I_{lm}^p = z_l^p \cdot \sum_{q=1}^n W_{pq} \cdot z_m^q \quad (7)$$

式(7)中, $z_l^p = \frac{X_l^p - \bar{X}_l}{\sigma_l}$; $z_m^q = \frac{X_m^q - \bar{X}_m}{\sigma_m}$; X_l^p 是空间对象 p 的属性 l 的值; X_m^q 是空间对象 q 的属性 m

的值; \bar{X}_l 和 \bar{X}_m 分别是属性 l 和 m 的平均值; σ_l 和 σ_m 分别是属性 l 和 m 的方差。

2 结果与分析

2.1 潮安区生态系统服务价值变化趋势与特征

潮安区 2008 年、2012 年和 2018 年的生态系统服务价值如表 3、4 和 5 所示。由表格统计可以得出,2008 年潮安区的生态系统服务价值总价为 909121 万元。生态系统服务价值按照生态分类由大到小分别为阔叶林、水域、灌木、水田、旱地、草地、裸地。其中,阔叶林生态系统占潮安区生态系统服务价值总价的 55%,水域生态系统占 39%,灌木生态系统占 3%。这是由于潮安区的地形以山地丘陵为主,占土地的总面积的三分之二,剩余的为平原、盆地和水系。区内的水系水网分布也较为密集,其中粤东第一大河韩江在区境内长度达 96 公里。因此,在潮安区的快速城镇化背景下,保护和提升潮安区阔叶林和水域系统,有助于提升潮安区的生态系统服务价值和有效保护潮安区的生态环境。从生态系统服务功能的生态价值分析,由气体调节、气候调节、水文调节和净化环境构成的调节服务的生态系统服务价值最高,为 691206 万元,占总生态价值的 76%;其次为支持服务和供给服务,分别为 134566 万元和 52979 万元,分别占 15%和 6%;文化服务最低,为 30370 万元,占 3%。

从时间上分析,潮安区 2008 年—2012 年生态系统服务价值下降了 32754 万元;2012 年—2018 年生态系统服务价值下降了 16643 万元。

表 3 2008 年潮安区生态系统服务价值(万元)

Table 3 The ESVs of Chao'an District in the year of 2008 (10 thousand Yuan)

生态系统服务分类 土地利用名称	供给服务			调节服务				支持服务			文化服务	合计
	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	养分循环	生物多样性	美学景观	
旱地	579	272	14	456	245	68	184	702	82	89	41	2731
水田	5129	339	-9920	4187	2150	641	10259	38	717	792	339	14672
阔叶林	6355	14463	7451	47554	142442	42294	103873	58072	4383	52813	23229	502928
灌木	346	784	401	2571	7713	2334	6108	3136	237	2863	1258	27752
草地	40	56	32	204	537	176	393	248	20	224	100	2032
裸地	0	0	0	2	0	12	4	2	0	2	1	24
水域	2286	657	23692	2201	6545	15861	292193	2658	200	7288	5401	358982
建设用地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	14736	16573	21670	57175	159631	61387	413013	64857	5638	64071	30370	909121

表 4 2012 年潮安区生态系统服务价值(万元)

Table 4 The ESVs of Chao'an District in the year of 2012 (10 thousand Yuan)

生态系统服务分类 土地利用名称	供给服务			调节服务				支持服务			文化服务	合计
	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	养分循环	生物多样性	美学景观	
旱地	783	369	18	618	332	92	249	949	111	120	55	3696
水田	4797	317	-9276	3915	2010	600	9594	35	670	741	317	13721
阔叶林	6156	14011	7218	46067	137989	40972	100626	56257	4246	51162	22503	487208
灌木	378	856	438	2807	8420	2548	6668	3424	259	3125	1373	30294
草地	37	52	30	189	498	163	364	230	19	208	93	1884
裸地	0	0	0	8	0	38	11	8	0	8	4	76
水域	2162	622	22406	2081	6189	15000	276326	2514	189	6892	5108	339489
建设用地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	14314	16227	20833	55685	155438	59413	393838	63417	5493	62255	29454	876367

表 5 2018 年潮安区生态系统服务价值(万元)

Table 5 The ESVs of Chao'an District in the year of 2018 (10 thousand Yuan)

生态系统服务分类 土地利用名称	供给服务			调节服务				支持服务			文化服务	合计
	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	养分循环	生物多样性	美学景观	
旱地	766	361	18	604	325	90	243	929	108	117	54	3616
水田	4547	301	-8793	3711	1906	568	9094	33	635	702	301	13006
阔叶林	6108	13902	7161	45707	136909	40652	99839	55817	4213	50762	22327	483396
灌木	377	854	437	2799	8397	2541	6650	3414	258	3116	1370	30212
草地	35	49	28	178	466	153	341	216	17	195	87	1765
裸地	0	0	0	7	0	35	11	7	0	7	4	70
水域	2087	600	21625	2009	5974	14477	266699	2426	183	6652	4930	327661
建设用地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	13920	16065	20476	55014	153976	58517	382876	62842	5414	61551	29072	859724

主要原因是 2008 年—2018 年期间, 潮安区的城镇化水平不断提高, 建设用地规模不断增加, 农

地和其他土地向建设用地转换的过程导致潮安区的生态系统服务价值减少。

从空间上分析,由图 2 潮安区生态用地分布图可以看出,北部主要为山地丘陵,生态系统主要是阔叶林生态系统,植被生长环境好;南部主要是平原,城镇用地集聚,城镇化程度高,城镇建设用地的生态系统服务价值为 0,故南部的生态系统服务价值低。

2.2 生态服务价值变化速率分析

双维度下生态系统服务价值相对变化率统计结果如图 3 和图 4 所示,图 3 和图 4 分别反映的是潮安区 12 个镇的 R_i 值以及各单项生态系统服务功能的 R^0 值。从区域空间性分析,2008—2018 年潮安区各镇的 ESV 变化表现为区域空间变化差异大;潮安区各镇除浮洋镇、金石镇和万峰林场外,其余 13 镇均与潮安区整体变化趋势一致,即整体处于下降趋势;彩塘镇、沙溪镇、凤塘镇、古巷镇、庵埠镇和东凤镇 ESV 相对下降最明显,下降率高于整体平均值($R_i=1.44$)。上述 ESV 相对下降最明显的几个镇均位于潮安区南部平原区,工业产值高,经济发展迅速,城镇化率相对较高,因此建设用地面积迅速增加,其他类型生态用地面积不断减少,从而导致生态系统服务价值不断降低。北部各镇如赤凤镇、凤凰镇、归湖镇和文祠镇等位于山地丘陵区,自然生态环境优势明显,并且工业发展缓慢,城镇化水平较低,因此建设用地的转化率低,生态系统服务价

值变化率相应较低。

从单项生态系统服务功能分析,潮安区各项生态系统服务功能的变化均与总体的生态系统服务功能变化趋势一致。其中,水文调节、水资源供给、食物生产与净化环境的 ESV 相对下降最明显,其 R^0 大于潮安区整体水平的平均值 0.82;进一步反映了具有较高生态效益的生态地类,如水源涵养功能强的水域、食物生产功能强的耕地以及具有较好净化环境能力的阔叶林等用地的减少是区域 ESV 降低的主要原因。因此,在潮安区城镇化发展的过程中,应当更加注重水域、耕地和阔叶林等生态用地的保护。

2.3 生态系统服务价值变化与经济社会发展耦合分析

2.3.1 双变量全局自相关

用双变量 Moran's I 工具分别计算潮安区各镇人均 GDP、工业总产值比例、农业总产值比例与生态系统服务价值的全局空间自相关指数即 Moran's I (表 6)。从表 6 得出,3 项经济指标与生态系统服务分类双变量 Moran's I 指数均小于 0;人均 GDP 和工业总产值比例两项经济指标,与生态系统服务价值之间存在比较显著的空间负相关关系;工业总产值比例与生态系统服务价值负相关性最强,置信度为 99% 时, Moran's I 值为 -0.4064,表明城镇地区工业

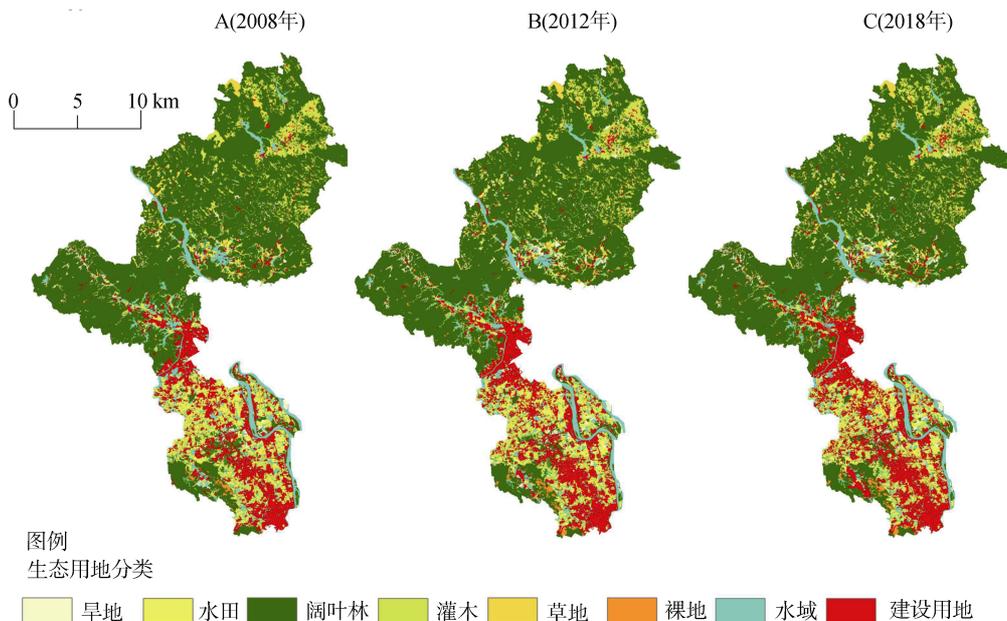


图 2 潮安区 2008, 2012 和 2018 年生态用地分类图

Figure 2 Land-use type of Chao'an District of the year in 2008, 2012 and 2018



图 3 2008—2018 年潮安区各镇的 ESV 相对变化率 R_i

Figure 3 The relative change rate R_i of ESV in Chao'an District from 2008 to 2018 in township

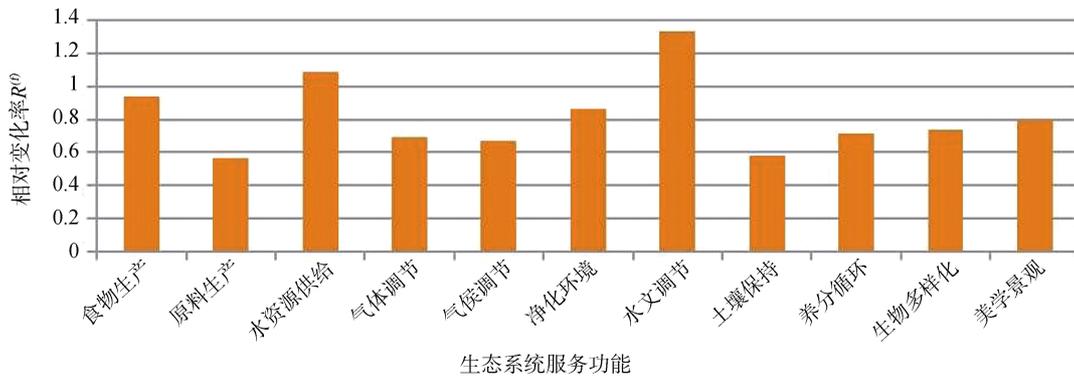


图 4 2008—2018 年潮安区各项生态系统服务功能 ESV 相对变化率 R^0

Figure 4 The relative change rate R^0 of each type of ESV in Chao'an District from 2008 to 2018

表 6 人均 GDP、工业总产值比例、农业总产值比例与生态服务价值双变量空间自相关结果

Table 6 The result of bivariate spatial correlation between GDP per person, ratio of total industrial output, ratio of total agricultural output

经济指标	供给服务	调节服务	支持服务	文化服务	总 ESV
人均 GDP	-0.2917*	-0.2760*	-0.3213*	-0.3157*	-0.2907*
工业总产值比例	-0.4088**	-0.3940**	-0.4261**	-0.4234**	-0.4064**
农业总产值比例	-0.2016*	-0.2083*	-0.1740	-0.1814	-0.2013

注: *和**分别表示在置信度为 95%和 99%时, 相关性是显著的。Moran's I 指数的数学期望 $E[I]$ 为-0.0667。

产业的发展, 与生态服务价值的下降相关度高。第二产业是潮安经济发展的主导产业, 2018 年全区第二产业占地区生产总值比例达 63%。第二产业发展

是推动潮安社会经济发展的主要因素, 也是推动潮安城镇化发展的重要原因。第二产业的快速发展必将引起区域的土地利用发生较大变化, 使得具有较

高生态系统服务价值的林地、耕地、水域和草地等土地类型大量向生态系统服务价值低的建设用地转变,必然会导致生态系统服务价值的急剧下降。

2.3.2 双变量局部自相关

运用 GeoDa 软件的双变量局部 Moran's I 工具,在 P 值 ≤ 0.05 (置信度 $\geq 95\%$)的基础上,绘制出双变量局部空间自相关 LISA 集聚图,如图 5 所示,用于描述区域经济发展指标与其区域生态系统服务价值的空间相关性,通常分为高—高/低—低的空间正相关、低—高/高—低的空间负相关和无显著的五种空间相关性关系。从表 5 可得,人均 GDP 和工业生产总值比例,与 ESV 的双变量 Moran's I 存在显著的空间负相关关系。而从图 5 经济指标与生态系统服务价值双变量 LISA 图可以看出,人均 GDP 和工业生产总值比例,与 ESV 的双变量局部空间相关性具有高度一致性。其中成低—高空间相关性的为北部山地丘陵区的万峰林场、归湖镇和文祠镇;成高—低空间相关性的为南部平原区的浮洋镇、彩塘镇和东风镇;成低—低空间相关性的只有金石镇。人均 GDP 和工业生产总值比例与 ESV 的双变量 LISA 图进一步说明了区域经济发展(主要表现为工业产业发展)与生态系统服务价值存在较强的空间异质性;呈低—低空间相关性的金石镇,表明与周边的镇相比,其经济发展水平(工业发展水平)

相对较低。农业生产总值与 ESV 的全局空间自相关指数虽然没有通过显著性检验,但其 LISA 图也一定程度上反映了经济发展与生态系统服务价值的空间关系。位于南部平原区的农业产值相对较低,但是工业总产值较高的东风镇和彩塘镇成低—低空间相关,为生态系统服务价值低的镇所围绕;而位于北部山地丘陵区的农业产值相对较高,工业发展相对落后的归湖镇成高—低空间相关,是被生态系统服务价值较高的镇包围。

3 讨论

从上述数据分析,发现潮安区生态服务价值分布存在空间不均的情况。建议着重统筹和协调发展,在今后的国土空间管理中,应着重全区的统筹发展,同时协调好与周边地区的发展与保护,针对不同的区域进行差异化管理。可考虑在生态系统服务高值区结合生态保护红线,划分不同的生态管制单元^[46]。北部划定林地保护区和水域保护区;中南部依据农业生产生活区域,重点划定连片且具有高质量的耕地和水域;中南部城镇村集中区,应划定一定区域的绿地、公园等开敞空间。这些管制单元应严格纳入国土空间管理,明确有关的空间管制措施,确保高值区发挥其生态系统服务作用。结合生态用地的分布情况,建议不同区域的生态系统服务价

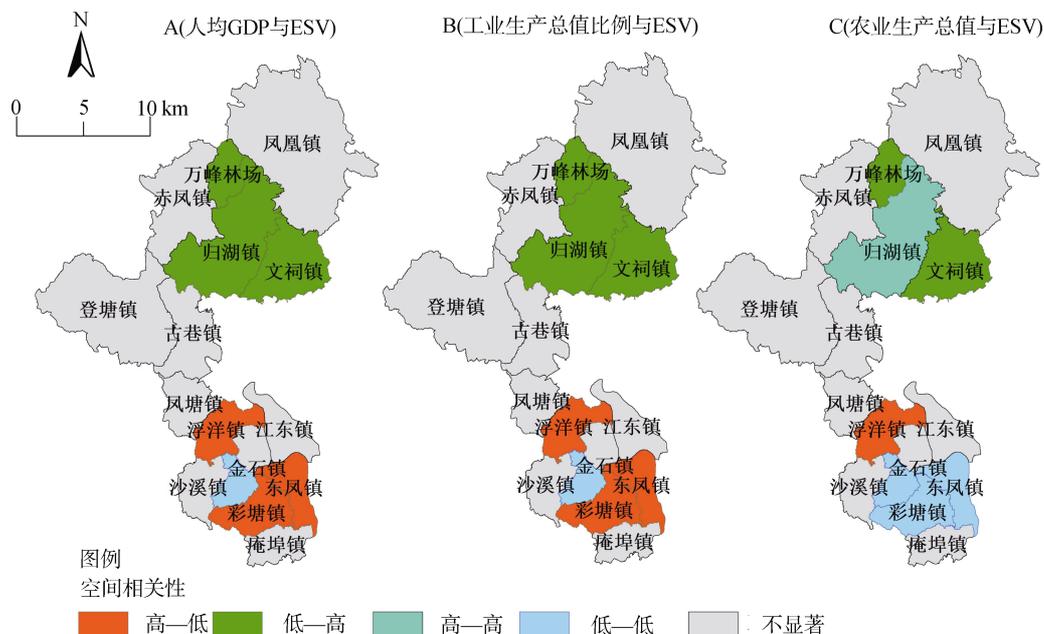


图 5 潮安区经济指标与生态系统服务价值双变量 LISA 图

Figure 5 Bivariate LISA cluster map of socio-economic index with ESV in Chao'an District

值提升重点及措施: 北部着重提升水文调节、土壤保持、气候调节及生物多样性等生态系统服务价值; 因该区域生态本底较好, 应着重保护现状土地利用类型, 禁止占用生态用地。中部和南部的农业生产区域应行土地综合整治^[47-48], 提高农业生产效益和效率, 提高供给及调节方面的生态服务价值。对于城镇集中区, 应保护现有的绿地、广场及休闲用地, 同时优化国土空间格局, 结合土地复垦等措施, 适当增加有关用地。

本文主要关注建设用地扩张导致的各行政区及总体的生态系统服务下降情况, 暂未讨论农林用地间转换的问题, 后续研究应更深入分析各类生态用地间的转换情况及原因; 其次, 截止目前收集的最新年份变更调查数据为潮安区 2018 年度变更调查数据, 后续研究应根据最新的土地利用数据对研究数据进行更新, 保持数据的时效性; 最后, 现行使用的当量因子法, 主要是基于国家平均水平进行确定, 能反映区域总体生态系统服务价值的变化趋势, 但其当量价格及因子值可再进一步根据区域实际情况, 加入更多如区域 NPP、实际降水和土壤保持等参数进行调节优化^[8], 从而更真实地反应有关地区的生态系统服务价值, 为日后生态补偿^[49]等作参考。

4 结论

本文通过构建潮安区生态系统服务价值评估模型, 对潮安区 2008—2018 年生态系统服务价值进行估算, 并分析了该时期内各镇的 ESV 相对变化率和空间相关进行分析。得出以下的结论:

(1)2008—2018 年, 潮安区的城镇化发展迅速, 城镇用地扩张加快, 生态系统服务价值也不断降低, 由 909121 万元下降至 859724 万元。生态系统服务价值在空间分异整体趋势为北高南低。

(2)潮安区人均 GDP 和工业总产值比例, 与生态系统服务价值存在明显的空间负相关关系。

参考文献

- [1] 姚士谋, 张平宇, 余成, 等. 中国新型城镇化理论与实践问题[J]. 地理科学, 2014, 34(6): 641-647.
- [2] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局[J]. 城市规划, 2010, 34(2): 19-24.
- [3] LIU Xiaopeng, CHEN Xiao, HUA Kaiping, et al. Effects of

- Land Use Change on Ecosystem Services in Arid Area Ecological Migration[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(5): 894-906.
- [4] 赵海凤, 徐明. 生态系统服务价值计量方法与应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [5] COSTANZA R, DARGE R, DEGROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [6] DE GROOT R, BRANDER L, VAN DER PLOEG S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units[J]. Ecosystem Services, 2012, 1(1): 50-61.
- [7] COSTANZA R, DE GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.
- [8] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 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[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [9] RUCKELSHAUS M, MCKENZIE E, TALLIS H, et al. Notes from the field: Lessons learned from using ecosystem service approaches to inform real-world decisions[J]. Ecological Economics, 2015, 115: 11-21.
- [10] (MEA) M E A. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [11] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [12] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 19-25.
- [13] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究[J]. 生态学报, 2013, 33(21): 6747-6761.
- [14] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [15] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [16] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [17] 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [18] SUTTON P C, COSTANZA R. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation[J]. Ecological Economics, 2002, 41(3): 509-527.
- [19] 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[J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 116: 60-72.

- [20] SUN X, CRITTENDEN J C, LI F, et al. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622: 974–987.
- [21] PETERS M K, HEMP A, APPELHANS T, et al. Climate-land-use interactions shape tropical mountain biodiversity and ecosystem functions[J]. *Nature*, 2019, 568(7750): 88–92.
- [22] KEESSTRA S, NUNES J, NOVARA A, et al. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610: 997–1009.
- [23] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 等. 1984—2014年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 1–12.
- [24] XUE Minggao, MA Shuhua. Optimized Land-Use Scheme Based on Ecosystem Service Value: Case Study of Taiyuan, China[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2018, 144(2): 11–21.
- [25] LIU Wei, ZHAN Jianyan, ZHAO Fen, et al. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 228–238.
- [26] 付晶, 高峻, 李杰, 等. 珠穆朗玛峰保护地生态系统文化服务空间分布及评价[J]. *生态学报*, 2021, 41(3): 901–911.
- [27] 胡其玉, 陈松林. 基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(2): 342–355.
- [28] 刘耀林, 郝弘睿, 谢婉婷, 等. 基于生态系统服务价值的土地利用空间优化[J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(1): 69–74+1.
- [29] 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 干旱区绿洲城市生态系统服务价值空间自相关格局分析与模拟[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(12): 1531–1540.
- [30] 陈万旭, 李江凤, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 325–337.
- [31] 吴未, 廉文慧. 生态系统服务功能视角下建设用地扩张对生境网络的影响——以苏锡常地区白鹭栖息地为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(5): 1043–1050.
- [32] 何玲, 贾启建, 李超, 等. 基于生态系统服务价值与粮食安全的生态安全底线核算[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 215–224.
- [33] 陈朝辉, 蔡人群, 许自策. 潮汕平原经济[M]. 广州: 广东人民出版社, 1994.
- [34] 姚小微, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 249–256.
- [35] 朱敏, 谢跟踪, 邱彭华. 海口市生态用地变化与安全格局构建[J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 1–9.
- [36] 陈瑜琦, 张智杰, 郭旭东, 等. 中国重点生态功能区生态用地时空格局变化研究[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(2): 19–26.
- [37] 陈爽, 刘云霞, 彭立华. 城市生态空间演变规律及调控机制——以南京市为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2270–2278.
- [38] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 等. 生态用地分类初步研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 1–7.
- [39] 张骞, 高明, 杨乐, 等. 1988—2013年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 1–10.
- [40] 李佳鸣, 冯长春. 基于土地利用变化的生态系统服务价值及其改善效果研究——以内蒙古自治区为[J]. *生态学报*, 2019, 39(13): 4741–4750.
- [41] 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 等. 基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1654–1665.
- [42] 胡应龙, 陈颖彪, 郑子豪, 等. 广州市生态系统服务价值空间异质性变化[J]. *热带地理*, 2018, 38(4): 475–486.
- [43] 张娜. 景观生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [44] BRADFORD J B, D'AMATO A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management[J]. *Frontiers in Ecology and Environment*, 2012, 10(4): 210–216.
- [45] ANSELIN L. LOCAL INDICATORS OF SPATIAL ASSOCIATION – LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93–115.
- [46] 王宏亮, 高艺宁, 王振宇, 等. 基于生态系统服务的城市生态管理分区——以深圳市为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8504–8515.
- [47] 苏梦园, 吴家龙. 土地综合整治对生态系统服务价值的影响——以广东江门沙仔岛为例[J]. *热带地理*, 2021, 41(1): 159–166.
- [48] 刘世梁, 安南南, 王军. 土地整理对生态系统服务影响的评价研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(9): 1010–1019.
- [49] 陈静, 张虹鸥, 吴旗韬. 我国生态补偿的研究进展与展望[J]. *热带地理*, 2010, 30(5): 503–509.