

基于 GIS 和 InVEST 模型的海岸带生态系统服务价值时空动态变化分析—以龙海市为例

黄博强¹, 黄金良¹, 李 迅¹, 涂振顺²

(1. 厦门大学 海洋与海岸带发展研究院 福建 厦门 361005; 2. 福建海洋研究所 福建 厦门 361013)

摘 要: 本文选取地处海西城市群的漳州龙海市为研究区, 基于联合国千年评估提出的生态系统服务框架, 借助 GIS 技术、InVEST 模型和经济价值模型评估方法, 评估龙海近 30 a(1986~2010) 生态系统服务价值时空动态变化。结果表明: 从 1986 至 2010 年, 龙海生态系统服务价值整体呈降低趋势, 尤其在南溪河口区、卓岐镇海区、海门岛及漳州开发区更为明显; 龙海研究区域内生态系统服务价值存在明显空间差异性, 单位面积生态系统服务价值较高为卓岐镇海区、漳州开发区、隆教湾、海门岛, 人类干扰强度最大的龙海市中心为最低; 龙海生态系统服务价值中养分调节、污染处理与控制及休闲娱乐价值明显高于其他服务价值, 且七个分区生态系统服务主导功能存在明显差异, 南溪河口区、海门岛、漳州开发区和紫泥岛有红树林的存在, 红树林提供的气候调节和维持空气质量服务价值及防洪防潮稳定岸线服务价值较高。本研究可为龙海市海岸带空间规划和管理提供参考。

关键词: 生态系统服务价值; InVEST 模型; 海岸带; 龙海市

中图分类号: X32; X87 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2015)06-0916-09

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2015.06.019

Spatiotemporal dynamics of coastal ecosystem services using GIS and InVEST: a case study in the Longhai City

HUANG Bo-qiang¹, HUANG Jin-liang¹, LI Xun¹, TU Zhen-shun²

(1. Coastal and Ocean Management Institute, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Institute of Oceanography, Xiamen 361013, China)

Abstract: This article uses GIS technology, InVEST model and economic valuation models as the assessment methods to assess the value and the spatial distribution of coastal ecosystem services in Longhai coastal city over the past 30 years (1986~1996) based on The Millennium Ecosystem Assessment framework proposed by the UN. The results reveal that the overall value of ecosystem services in Longhai City decreased between 1986 and 1996, especially in Nanxi Estuary, Zhuoqi Town district, Haimen Island and Zhangzhou development zone. The value of services provided by seven coastal zones in Longhai City varies spatially with Zhuoqi Town, Haimen Island and Longjiao Estuary providing the much higher valuable ecosystem services value whereas Longhai City Center provides the least valuable ecosystem service value. Due to the presence of mangroves in Nanxi Estuary, Haimen Island, Zhangzhou Development Zone and Zini Island; the value of the ecosystem services provided by the mangroves are relatively higher in these areas. Of all the ecosystem services, Pollution treatment and control service, recreational and nutrient retention services have been revealed to be more valuable than other ecosystem services. This paper will potentially serve as a reference document to land managers for Longhai coastal spatial planning and management.

Key words: ecosystem service value; InVEST model; coastal zone; LonghaiCity

收稿日期: 2014-10-27, 修订日期: 2014-12-13

基金项目: 福建省海岛与海岸带管理技术研究重点实验室开放基金(FJKL-C&IMTS2013021, FJKL-C&IMTS201302)

作者简介: 黄博强(1990-), 男, 福建泉州人, 海洋事务硕士研究生, 主要研究方向为海洋与海岸带综合管理, E-mail: bqhuang@stu.xmu.edu.cn

通讯作者: 黄金良, 教授, 博导, 研究方向为海岸带环境演变及其效应, E-mail: jlhuang@xmu.edu.cn

生态系统服务是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[1]。生态系统服务价值(ESV)是人们对生态系统服务功能赋予价值属性并进行量化与评价的方法^[2]。自 Costanza 等提出生态系统服务的概念,国内外众多专家学者从全球、区域、流域及单个生态系统的尺度,展开了大量有关城市化发展对各类生态过程与生态服务功能影响的研究工作^[3-6]。

海岸带是人口和经济高度集中的地区,日益频繁的社会经济活动及不当的利用正在导致海岸带生态系统提供服务的能力不断降低,因此对海岸带生态系统服务价值进行评估显得更加重要,尽管经济价值不是评估海岸带生态系统的唯一方法,但在进行海岸带生态系统资源的配置时,经济价值是最有效的方法。海岸带生态系统位于陆地和海洋的相互作用地带,同时包括了陆地和海洋的多种生态系统,每一种生态系统都提供了独特的服务,所以海岸带生态系统和海岸带生态系统服务的界定比较复杂和困难^[7]。

本文选取地处海西城市群的漳州龙海市为研究区,基于联合国千年评估提出的生态系统服务框架,借助 GIS 技术、InVEST 模型和经济价值模型评估方法,评估龙海海岸带近 30 a (1986 ~ 2010) 生态系统服务价值时空动态变化。该研究可为龙海市海岸带空间规划和管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域的概况及划分

龙海市地处福建东南沿海九龙江下游,位于 24°11' ~ 24°36' N, 117°29' ~ 118°14' E, 东西长 67.85 km, 南北宽 36.5 km, 海岸长 103.3 km。龙海市经济发展、就业和市民福利的改善依赖于海洋与海岸带生态系统提供的各种产品和服务。除了直接的经济价值外,龙海的海洋与海岸带生态系统还提供了多种生态系统服务,例如丰富的物种和基因资源、营养储存和循环、净化陆源污染物、稳定岸线等。同时,海洋生态系统在调节气候和维持空气质量方面起着关键的作用,是主要的碳源和氧源。这些形成了龙海市的生命支持系统,对龙海市的经济与环境的发展都有着不可替代的作用。

本文综合考虑龙海海岸带资源、发展区与岸线功能定位、行政边界等属性,海岸带岸线开发利

用现状以及相关规划资料,从规划和管理可操作性以及海陆统筹的角度出发,将龙海市海岸带研究区划分为 7 个区段进行研究见图 1。

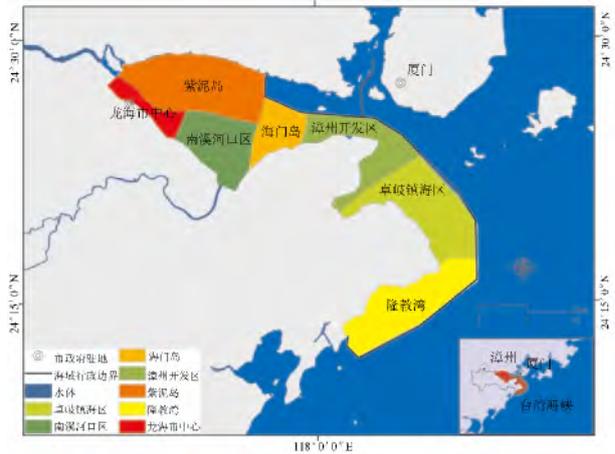


图 1 龙海市海岸带研究区域分布

Fig.1 The location of Longhaicoastal zone study area

1.2 研究方法

1.2.1 遥感影像解译

研究所需的土地利用数据采用 1986 年、1996 年、2002 年和 2010 年美国陆地卫星 7 号(Landsat-7)的 ETM+ 卫星遥感影像,并用 EDRAS 遥感软件对 TM 影像进行几何纠正和解译。本研究使用了一种较为先进的方法——“倒退法”(backdating),对 4 个年份的卫片进行解译。倒退法在本研究中的具体步骤如下:(1) 解译 2010 年卫片,生成土地利用与覆被类型图;(2) 以 2010 年解译数据作为基础,根据其 11 种土地利用类型分布信息对 2002 年份的卫片产生 11 张掩膜,根据不同类型的面积大小在非监督分类中设置不同的分组数:面积较大的如水体、建筑用地、农业用地、林地分 90 组,水产养殖、果园分 60 组,面积较小的如坑塘水库、道路、滩涂、裸地、红树林则分 30 组,进行后续解译;(3) 如此类推,往前一个年份的卫片根据后一年份的卫片解译所得到的土地利用数据和信息产生掩膜,进行解译,利用倒退式的方法,依次解译剩下的 1996 和 1986 年份的卫片。然后在 ArcGIS9.3 的支持下对数据进行处理,得到四期的土地利用数据。

1.2.2 生态系统服务价值的计算方法

1.2.2.1 生态-经济模型评估方法

本文基于联合国千年生态系统评估的分类,采用了彭本荣等人研究的填海造地的生态损害评估所建立的生态-经济模型^[8],以及 InVEST 模型的方法

对漳州龙海市海岸带研究区域的生态系统服务价值进行经济评估,得到每年单位面积不同的生态系统服务功能的服务价值,并由卫星图片解译得出的不同年份的研究区域土地利用的面积计算得出各个研究区域4 a的生态系统服务的总价值。

本研究对于每个土地利用类型生态系统服务价值的估算采用下述公式对1986~2010年龙海海岸带进行生态系统服务价值评估:

$$V_t = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot S_i) \quad (1)$$

式中: V_t 为研究区每年生态系统服务价值总量; i 为第 i 种特定的土地利用类型,如海域、沙滩等; 为每年单位面积第 i 种土地利用的生态系统服务价值量; 为第 i 种土地利用类型的总面积。其中由生态经济模型、InVEST模型计算以及资料查找所得,由四期解译后的土地利用数据所得。

1.2.2.2 千年生态系统评估分类

千年生态系统评估将生态系统服务分为供给服务、调节服务、文化服务、和支持服务四大类。其中供给服务提供产品,如渔业资源服务;调节服务指人类从生态系统过程的调节作用中受益,如气候调节和维持空气质量服务、防洪防潮和稳定岸线服务、污染处理与控制服务;文化服务是指人类可以从生态系统中获得非物质收益,如休闲娱乐服务、景观价值服务、科学研究和教育服务;支持服务是支持和产生其他生态系统服务的基础服务,如养分调节、繁殖与栖息地服务。

1.2.2.3 InVEST模型的简介

InVEST(The Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool) 全称为生态系统服务功能综合估价和权衡得失评估模型,由美国斯坦福大学、TNC和世界自然基金会合作联合开发,初衷是为了能够在地图上标出自然景观的价值,使自然资本更为容易地纳入决策体系,将经济因素与环境保护有机结合。目前,许多专家、学者把InVEST作为一款实用的分析工具,将其应用于生态环境、水利水电、土地资源、水产养殖等不同的领域。InVEST模型基于GIS平台,最大的特点便是将量化的生态系统服务功能以地图的形式表现出来,可不再用繁琐的计算公式和过多文字的赘述来表达;其次,InVEST模型相对其他模型而言,导入数据较少,输出数据量大,且优化了很多复杂的问题,抓其重点,最终使问题得到圆满解决。InVEST模型拥有多个模块,采用多级设计,可进

行多尺度、多情境的分析^[9]。

1.2.2.4 资料和数据来源

本研究用于计算生态系统服务的数据与来源如表1所示。

表1 数据来源
Tab.1 Data resource

生态系统服务	主要数据	资料来源
气候调节和维持空气	初级生产力、固定CO ₂ 的成本、制造	[10]
气质量服务	O ₂ 的成本、红树林的初级生产力	
防洪、防潮及稳定岸线服务	减灾收益	[11]
养分调节服务	营养盐处理量、处理成本	[12]
污染处理与控制服务	废物及水环境容量、处理成本	[13-14]
繁殖与栖息地服务	初级生产力、转化效率、销售价格、销售利润率	[14]
渔业资源服务	销售收入、成本、海域面积	[15-16]
休闲娱乐服务	旅游、娱乐价值、面积	[17]
景观服务价值	景观价值、面积	[18]
科学研究和教育服务	科学研究和教育的价值	[19]

1.2.2.5 各类生态系统服务价值的评估模型

表2给出了本文用于计算生态系统服务价值的评估模型及各参数的含义。

1.3 生态系统评估模型构建

根据表1所收集的数据,以表2的评估模型及对龙海海岸带的各种生态系统服务价值进行评估。每个模型的详细计算结果如下:

1.3.1 气候调节服务的价值

根据2012年《龙海市海水养殖水域规划》,龙海海域平均初级生产力为16.42~229.31 mgC/m²·d,总平均值为57.8 mgC/m²·d,即21.097 gC/m²·a。而根据何斌源等人的研究^[10],红树林的初级生产力为4.58 t/m²·a,即458 gC/m²·a。式(2)还需要固定CO₂释放O₂的成本。通过对O₂制造厂的调查发现O₂的成本为0.8元/Nm³,而每吨O₂相当于700 Nm³,即成本为560元/t。CO₂的固定成本可以使用国际碳交易市场的碳税率标准,由于不同国家碳税率相关很大,我们用各国平均值42.46美元/t作为固定CO₂的成本,按当下汇率1:6.20来计算,折合人民币约为263.25元/t。将以上的数据代入式(2),可以得到龙海市海域气候调节的服务价值为0.02元/m²·a,红树林的气候调节服务价值为0.5元/m²·a。

表 2 生态系统服务价值模型及参数的含义
Tab. 2 ESV models and implication of parameters

生态系统服务	模型	各种指标的含义
气候调节和维持空气质量	$P_{ar} = (1.63C_{CO_2} + 1.19C_{O_2})$ (2)	P_{ar} 为单位面积研究区域每年所提供的气候调节和维持空气质量服务的经济价值(单位: 元/ $m^2 \cdot a$); 固定 CO_2 、释放 O_2 的成本 C_{CO_2} 、 C_{O_2} 。
防洪、防潮及稳定岸线服务	$P_{dr} = B_{dc} \cdot S_m$ (3)	P_{dr} 为稳定岸线、洪水防护服务的价值(单位: 元/ $m^2 \cdot a$); B_{dc} 为红树林减灾收益(单位: 元/ $m^2 \cdot a$); S_m 为各海域红树林的面积(m^2); P_{nr} 是填海造地营养调节损害的价值(元/ $m^2 \cdot a$); C 是单位体积污水中 N、P 的去除成本(元/); Q 是海域所接纳的含 N、P 污水量(m^3); S 是海域面积(m^2)。
养分调节服务	$P_{nr} = \frac{QC}{S}$ (4)	单位面积海域每年的污染处理与控制服务的价值 P_{ev} (元/ $m^2 \cdot a$); 一块海域第 i 种污染物每年的环境容量是 X_i (吨/a); i 种污染物的处理成本是 C_i (元/吨); 海域面积是 S (m^2); 水深 h (m) 的海域, 每年提供的污染处理与控制服务价值是 P_v (元/ $m^2 \cdot a$): P_{hr} 是繁殖栖息的服务价值(元/ $m^2 \cdot a$); P 是单位面积海域的初级生产力(以碳计); E 为转化效率, 即初级生产力转化为软体动物的效率; δ 为贝类产品混合含碳率(%); σ 为贝类重量与软体组织重量的比(通过这个系数, 可以将软体组织的重量转化为贝类产品的重量); P_s 为贝类产品平均市场价格(元/kg); ρ_s 为贝类产品销售利润率(%)。其中 P_{mf} 为渔业资源服务的价值(元/ $m^2 \cdot a$); R_{mf} 为每年的海洋捕捞收入(元/a); C_{mf} 为每年的海洋捕捞成本(元/a); S 为海洋捕捞面积(m^2)。
污染处理与控制服务	$\Delta v = \sum_{i=1}^n X_i C_i / Q$ (5) $P_v = \Delta v (Sh)$ (6) $P_{ev} = \frac{P_v}{S} = h \sum_{i=1}^n X_i C_i / Q$ (7)	
繁殖与栖息地服务	$P_{hr} = \frac{P_0 E}{\delta} \sigma P_s \rho_s$ (8)	
渔业资源服务	$P_{mf} = \frac{R_{mf} - C_{mf}}{S}$ (9)	
休闲娱乐服务	$IS_i = \sum_{ij} U_{ij} I_j$ (10)	IS_i 表示 i 区域的重要性指数(Importance Score, IS); U_{ij} 表示 i 区域内 j 活动或者 j 景观的利用(有利用 $U_{ij} = 1$, 反之 $U_{ij} = 0$); I_j 表示 j 活动或 j 景观的价值(或重要性)。
景观服务价值	$IS_i = \sum_{ij} U_{ij} I_j$ (10)	IS_i 表示 i 区域的重要性指数(importance score, IS); U_{ij} 表示 i 区域内 j 活动或者 j 景观的利用(有利用 $U_{ij} = 1$, 反之 $U_{ij} = 0$); I_j 表示 j 活动或 j 景观的价值(或重要性)。
科学研究和教育服务	$IS_i = \sum_{ij} U_{ij} I_j$ (10)	IS_i 表示 i 区域的重要性指数(importance score, IS); U_{ij} 表示 i 区域内 j 活动或者 j 景观的利用(有利用 $U_{ij} = 1$, 反之 $U_{ij} = 0$); I_j 表示 j 活动或 j 景观的价值。

1.3.2 防洪、防潮及稳定岸线服务的价值

海洋与海岸带生态系统洪水防护、稳定岸线的功能主要由红树林生态系统提供。韩维栋等人^[11]用专家评估法的研究显示, 平均宽 100 m、长 1000 m 的红树林海岸线可提供约 80000 元的台风灾害防护效益。根据式(3), 可以得到该海域防洪、防潮和稳定岸线服务价值的价值是 0.8 元/ $m^2 \cdot a$, 如果是海滩泥滩, 则取红树林的 40%, 即 0.32 元/ $m^2 \cdot a$, 其余海域则取 0。

1.3.3 养分调节服务的价值

养分调节服务价值主要计算海域接纳来自陆地的营养盐而因此节约的污水处理成本。由于无法获得龙海海域接纳的营养盐的数据, 因此采用厦门海域的营养盐数据作为参考。根据福建省海洋开发管理小组办公室和近海海洋环境科学国家

重点实验室 2006 年的研究表明: 厦门海域的总氮量为 50064 t; 总磷量为 3478 t^[12]。而查阅全国污染普查办公室的《生活污水排污系数手册》, 发现全市生活污水总氮总磷的浓度大约为 75.14 mg/L 和 6.27 mg/L。由此得出, 厦门海域接纳污水的总量约为 6.663 亿 m^3 。根据污水处理厂提供的数据, 含 N、P 的污水平均去除成本是 0.8 元/ m^3 左右。将以上的数据代入式(4), 可以得出海域养分调节的服务价值是 1.37 元/ $m^2 \cdot a$ 。

1.3.4 污染处理与控制服务

海洋容纳的污染物很多, 包括 COD、N、P 等, 由于 N、P 容量的价值在养分调节中已有体现, 为避免重复计算, 这里主要估算 COD 环境容量的价值。由于无法获取龙海海域相关的研究数据, 因此采用与龙海海域相近的厦门西海域的研究数据

作为参考。根据国家海洋局第三海洋研究所和陈伟琪等人的研究^[13-14],厦门西海域 COD 容量是 17520 t/a,海域水容量是 $2.52 \times 10^8 \text{ m}^3$,COD 去除成本为 4300 元/t。由于填海造地主要在海岸带地区,水体厚度取厦门平均潮高 2 m。根据式(7),可以得到养分调节的服务价值为 $0.60 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 。

这里需要注意的是,在计算中,应当认为沙滩、浴场等海域是不能接纳污水的,所以这些区域的污染控制服务价值应取 0。

1.3.5 繁殖与栖息地服务的价值

龙海海域平均初级生产力为 $21.097 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{a}$,红树林的初级生产力为 $458 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{a}$,根据 Tait R V^[15] 对近岸海域生态系统能流的分析,10%的初级生产力会转化为软体动物;卢振彬等人^[16]的研究表明,软体动物混合含碳率为 8.33%,各类软体组织与其外壳的平均重量比为 1:5.52;根据厦门海洋与渔业局和厦门水产学会的调查,贝类产品平均市场价格 16 元/kg,销售利润率为 25%。将这些数据代入式(8),可以得到,海域和红树林的繁殖与栖息地的服务价值分别为 $0.17 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 、 $3.58 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 。

1.3.6 渔业资源的价值

根据 2010 年《龙海市统计年鉴》可以获得不同研究区域的渔业总产值及渔业中间消耗值,结合卫星图片提取的海域面积,即可得到各海域海洋捕捞的单位面积利润,输入式(9)计算得到南溪河口区、海门岛、漳州开发区、紫泥岛、隆教湾、龙海市中心、卓岐镇海区的渔业资源价值分别为 $0.32 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 、 $0.32 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 、 $0.16 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 、 $0.13 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 、 $0.09 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 、 $0.16 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 、 $0.03 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 。

1.3.7 休闲娱乐的价值

本文将该服务价值分为 3 类:沙滩的价值、海域水质达到划船水质的价值和海域水质达到钓鱼

水质的价值。参考彭本荣等人的研究,市民对于沙滩的平均支付意愿为 86 元/a^[17]。由卫星图片可得研究区的沙滩面积总计为 758.2 万 m^2 ,龙海市人口为 82.49 万,所以单位面积沙滩的价值为 $9.24 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 。同理,市民对海域水质达到划船水质的平均支付意愿为 58.65 元/a,计算得出单位面积海域划船水质价值为 $0.26 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$;对海域水质达到钓鱼的平均支付意愿为 60 元/a,所以单位面积海域钓鱼水质的价值为 $0.27 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 。

1.3.8 景观服务的价值

根据洪华生等人的研究表明^[18],市民对于海域景观的支付意愿为 $94.95 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$,龙海市人口为 82.49 万,所以景观服务总价值为 7737.4755 万元。总价值除以海域面积得到单位面积海域的景观服务价值为 $0.11 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 。

1.3.9 科学研究教育服务的价值

该服务价值参考 Costanza 等人 1997 年的研究成果^[19],单位面积海域的科研文化功能价值取 $62 \text{ 美元/hm}^2 \cdot \text{a}$,约合当时人民币 $0.0496 \text{ 元/hm}^2 \cdot \text{a}$,若取平均贴现率为 5% 来计算,到 2014 年合人民币 $0.1083 \text{ 元/m}^2 \cdot \text{a}$ 。

2 结果与讨论

2.1 1986~2010 年龙海海岸带生态系统服务价值变化分析

由上述方法计算结果得,龙海研究区域内生态系统服务价值存在明显空间差异性,单位面积生态系统服务价值较高的是海门岛、漳州开发区、隆教湾和卓岐镇海区,而单位面积生态系统服务价值最低的是人类干扰强度最大的龙海市中心。从 1986 年到 2010 年,南溪河口区、海门岛、漳州开发区、卓岐镇海区生态系统服务价值下降趋势较为明显,隆教湾和龙海市中心整体变化较小,1996 年紫泥岛生态系统服务价值明显高于其他三年。

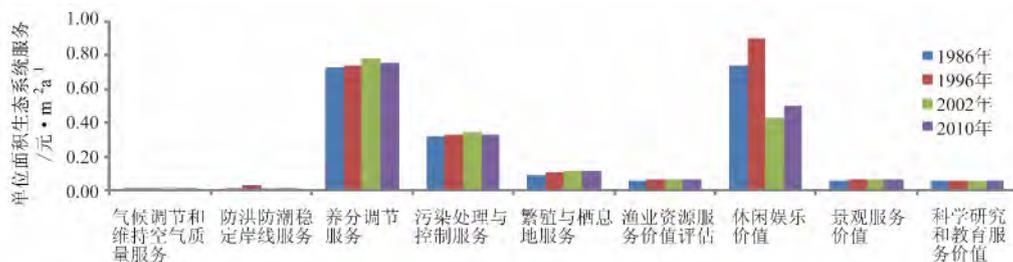


图2 1986~2010 年单位面积不同生态系统服务功能价值

Fig. 2 Different functions of ESV per square meter during 1986~2010

从图 2 可以看出, 养分调节服务价值、污染处理与控制服务价值和休闲娱乐价值明显高于其他功能的生态系统服务价值, 占据着主导地位。而气候调节和维持空气质量服务、防洪防潮稳定岸线服务价值最低。

龙海市海岸带 1986、1996、2002、2010 年单位面积生态系统服务总价值分别为 2.07 元/m²·a、2.29 元/m²·a、1.88 元/m²·a、1.90 元/m²·a, 总体而言, 龙海市海岸带研究区 1986~2010 年单位面积海岸带生态系统服务价值总体呈现先增加后下降的趋势。其中 1996 年单位面积生态系统服务价值最大, 2002 年与 2010 年较小, 整体差异不大。

2.2 ESV 价值变化与土地利用的关系分析

海岸带生态系统服务价值受人类主导的土地利用变化影响, 主要为填海造地, 其对生态系统服务价值的时空动态影响表现在对海洋与海岸带生态系统自然属性永久性的改变, 引起海洋与海岸带生态系统为人类提供的其他服务, 如营养储存和循环、净化陆源污染物、保护岸线、调节全球水动力和气候、吸收 CO₂ 和释放 O₂, 以及休闲娱乐等的完全破坏, 从而造成生态系统服务价值在空间上存在差异; 同时还会带来其他的问题, 如海洋泥沙淤积、海洋环境质量下降、渔民赖以生存的空间丧失以及生境退化和海岸带生物多样性的减少等。与本研究密切相关的三种龙海海岸带土地利用类型的面积变化情况如图 3 所示。

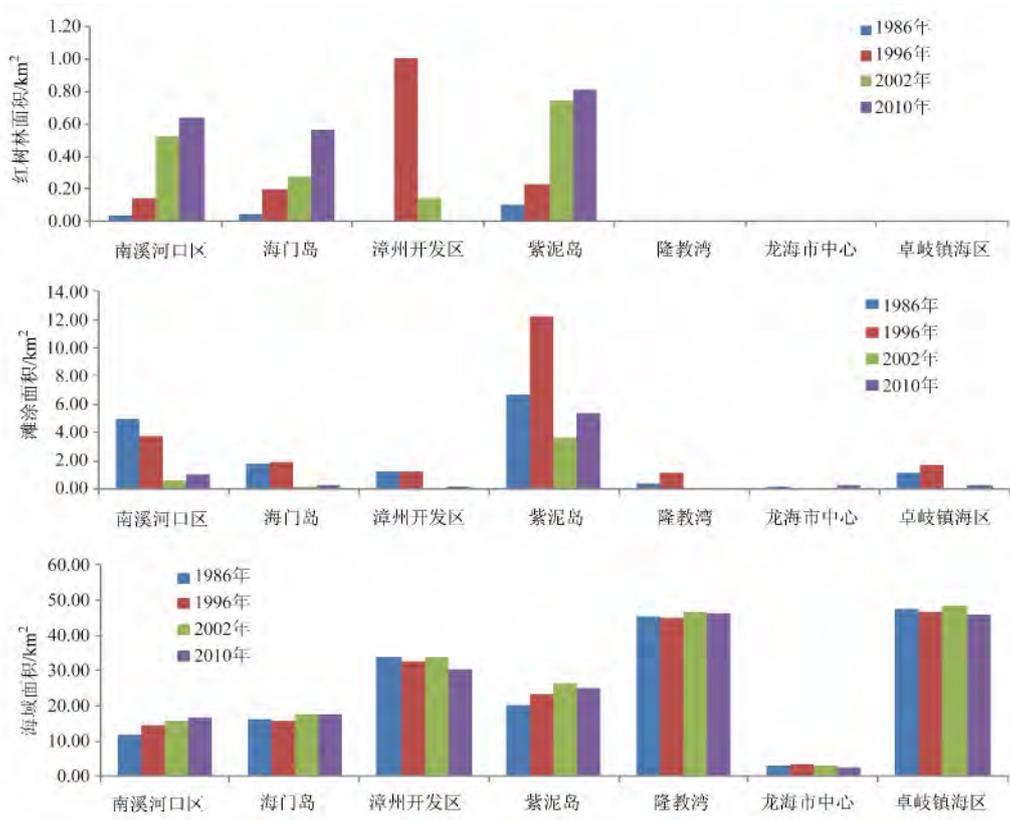


图 3 1986~2010 年龙海研究区红树林、滩涂、海域面积变化情况

Fig. 3 Areas change of different land use styles in Longhai during 1986~2010

由图 3 分析可以看出, 龙海市海岸带研究区的土地利用变化主要有: (1) 1986~2010 年红树林的面积总体呈现出逐渐增大的趋势, 主要集中在南溪河口区、海门岛、漳州开发区和紫泥岛, 而隆教湾、龙海市中心和卓岐镇海区几乎没有红树林; (2) 滩涂的面积从 1986~1996 年总体呈现先增大后减小的趋势, 其中南溪河口区滩涂面积逐

渐减小, 1996 年紫泥岛滩涂明显大于其他年份, 受人类活动的影响较大; (3) 海域面积整体变化较小。

2.3 产生以上土地利用变化趋势的驱动力分析

2.3.1 经济因素

经济的高速发展经常是人类活动区域土地利用改变的主要驱动因素^[20], 龙海市 1986~2010

年的 GDP、人口、人均 GDP 如表 3。由表 3 可知,龙海市社会经济呈现高速发展,人均 GDP 不断增加,而经济的发展必然会带动土地利用类型向有利于经济效益的方向的改变。

表 3 1986~2010 年龙海市社会经济概况

Tab. 3 The social and economic situation of Longhai city during 1986~2010

年份	GDP/万元	人口/万人	人均 GDP/元
1986	56569	75.72	747.08
1996	453019	87.17	5196.96
2002	907295	78.25	11594.82
2010	3655009	81.49	44852.24

1986~1996 年期间,由于水产养殖的发展,很多成土田质、河流冲积物及海积物都转化为滩涂,从而滩涂的面积增加较大。尤其是紫泥岛的滩涂面积增加幅度更加明显,主要是因为紫泥岛属于典型的河口冲击洲,地势平坦低洼,又处于九龙江的咸淡水的交界处,水质较好,水产养殖条件得天独厚,很多成土田质、河流冲积物及海积物都转化为滩涂,大力发展水产养殖,从而滩涂面积增加较多。1996 年以后,由于海西经济区的快速发展,投入大量资金改善交通基础设施,随着一批桥梁、道路的建成,海岛交通状况得到根本改善。先后于 1992 年和 1998 年建成的中港大桥、锦江大桥把浒茂、乌礁、石码三地连成一体,结束了紫泥数百年舟渡的历史,成为紫泥发展标志性的景观;北港大桥于 2008 年 4 月建成通车,打通了紫泥镇第二条对外陆路通道,与中港大桥、锦江悬索大桥构成龙海中部南北通道,连接角美镇,使紫泥镇融入“厦门半小时经济圈”;制约紫泥发展交通的瓶颈问题将得到根本解决。由于海上交通、码头等基础设施以及工业园区的建设,围海造地等,导致滩涂面积转化为工业建筑用地,这与本研究的分析结果相对一致。

2.3.2 政策因素

20 世纪 80 年代中期沿海地区开始建码头和围塘建虾池,红树林因此遭受到一定程度的破坏。之后政府开始重视红树林的生态效应对周边产业的经济影响,并开始对红树林进行大力保护^[20]。特别是 1986 年龙海九龙江河口红树林省级自然保护区的成立,根据福建省人民政府闽政[1988]综 6 号《关于成立龙海县红树林保护区的批复》,保护区范围包括龙海浮空、紫泥、角尾三

个乡(镇)及港尾乡的滩涂,总面积为 200 hm²;2006 年 12 月 29 日福建省人民政府又以闽政文[2006]577 号《福建省人民政府关于调整龙海九龙江口红树林省级自然保护区范围的批复》同意调整龙海九龙江口红树林省级自然保护区范围,调整后龙海省级自然保护区总面积为 420.02 hm²,保护区由甘文区片、大涂洲区片和浮宫区片 3 个部分组成^[21]。这一系列政府的有效措施使得红树林的面积逐渐增加,且保持着较好的自然状态。这与本研究的分析结果相对一致。

2.3.3 科研活动的影响

龙海市地处九龙江河口,周边区域厦门市是政治、经济、文化相对发达的地区,科研和环境保护等人类活动相对频繁。厦门大学、国家海洋局第三研究所、中国科学院城市环境研究所、华侨大学等科研机构的积极研究,充分利用了九龙江河口红树林湿地的科研优势,深入开展致力于保护和恢复九龙江河口红树林湿地生态系统、改善九龙江河口地区的生态环境的项目等,也促进了红树林湿地恢复增加和改善,这也可能是红树林面积增加的一个原因,与本研究的分析结果一致。

2.3.4 潮汐情况因素

九龙江河口 TM 影像的成像日期的潮位情况、以及河口径流也是影响海域、滩涂面积的因素。九龙江河口年径流量 117 m³,江口海区的潮汐性质属于半日潮,海潮时间为 6 小时 18 分,落潮时间为 6 小时 7 分,平均高潮间隙 40 min,平均潮差 3.98 m,平均大潮差 4.95 m,平均小潮差 2.85 m。因此 TM 影像成像日期的潮位情况也是影响海域、滩涂、红树林面积提取的原因,即可能存在结果比较的不公平性。

2.3.5 其他可能因素

除了以上的因素外,九龙江河口的其他因素,包括海上交通的高速发展、滨海旅游业的发展、城市化驱动建设用地的扩张、海洋污染及垃圾造成的危害、各种病虫害等^[40],也是导致海域、滩涂等面积变化。

漳州市龙海海岸带生态系统服务价值以文化服务和支持服务为主,二者四年服务价值平均值分别为 36.62% 和 42.46%,即龙海海岸带生态系统服务价值是以文化服务和支持服务为主的综合开发利用型。陈尚^[22]对江苏近海生态系统服务价值进行评估,结果表明江苏近海生态系统服务

价值以供给服务和文化服务为主导,二者合计占总服务价值96.94%,两者存在一定差异,这是由于龙海市的渔业资源等方面的供给价值较低,龙海市为海西城市群,渔业、捕捞生产等在经济发展中不占主导地位,另一方面是由于龙海市邻近厦门,滨海旅游的发展以及自然保护区等的建立是龙海市休闲娱乐、景观价值和科研教育价值较高的原因。

彭本荣等^[8]在2005年对厦门填海造地对海域造成的生态损害进行评估,结果显示厦门海域填海造地生态损害价值平均为13.72元/m²·a,与本研究评估结果相比较。一方面因为在他的研究中评估的生态系统服务类别较多,除了本文出现的9种服务功能价值外,同时还对海水增殖、海洋捕捞、生物多样性和自然水道价值进行评估。而本文由于资料和技术等方法的限制,本研究未能进行计算。这使得总价值结果偏低;另一方面由于厦门市是典型的滨海旅游城市,旅游、娱乐价值和景观价值明显高于龙海市。也是导致本研究结果较低的一个因素。

王萱等^[23]在2013年对围头湾至大嶝海域的3个地区块海岸带生态系统服务价值进行货币化评估,评估结果为金井、石井和大嶝海岸带单位面积的生态系统服务价值分别为3.22元/m²·a、4.93元/m²·a、5.23元/m²·a。与本研究结果相比较偏大,但也在可理解范围内,一方面因为该研究中增加了基因资源、港航资源、食物供给和生物多样性价值;另一方面研究方法的不同也是造成差异的一个原因。综合上述研究结果与分析可得,本研究的分析方法和结果具有一定的可靠性,可以为海岸带空间规划和管理提供参考依据。

目前对于海岸带区域生态系统服务价值的计算还未形成统一的标准,所评估生态系统类别功能类别的差异、对于同一种功能的估算可能也存在多种的计算方法、各研究选取指标不一致等,这些都是造成研究结果有所差异的重要原因。因此,探寻建立地域适应性强、科学合理的指标体系和方法应成为今后的海岸带生态系统服务估值研究的重要方向之一。此外,根据生态服务功能评估结果,结合城市发展和人口增长速度,探讨基于GDP和人口增长海岸带生态系统服务模式也有待进一步研究。

3 结 论

(1) 从1986至2010年,龙海生态系统服务价值整体呈现降低趋势,尤其在南溪河口区、卓岐镇海区、海门岛及漳州开发区更为明显;

(2) 龙海研究区域内生态系统服务价值存在明显空间差异性,单位面积生态系统服务价值较高为卓岐镇海区、漳州开发区、隆教湾、海门岛,人类干扰强度最大的龙海市中心为最低;

(3) 龙海生态系统服务价值中养分调节、污染处理与控制及休闲娱乐价值明显高于其他服务价值,且七个分区生态系统服务主导功能存在明显差异。南溪河口区、海门岛、漳州开发区和紫泥岛有红树林的存在,红树林提供的气候调节和维持空气质量服务价值及防洪防潮稳定岸线服务价值比其他研究区域高。

参考文献:

- [1] 李屹峰,罗跃初,刘纲,等.土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J].生态学报,2013,33(3):726-736.
- [2] 吴蒙,车越,杨凯.基于生态系统服务价值的城市土地空间优化研究——以上海市宝山区为例[J].资源科学,2013,35(12):2390-2396.
- [3] DAILY G C, POLASKY S, GOLDSTEIN J, et al. Ecosystem service in decision making: time to deliver [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2009 7(1): 21-28.
- [4] 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.
- [5] 张舟,吴次芳,谭荣.生态系统服务价值在土地利用变化研究中的应用:瓶颈和展望[J].应用生态学报,2013,24(2):556-562.
- [6] WU J S, FENG Z, GAO Y, et al. Hotspot and relationship identification in multiple landscape services: A case study on an area with intensive human activities [J]. *Ecological Indicators* 2013, 29: 529-537.
- [7] 刘红梅,吴晓青,都晓岩,等.海岸带生态系统科研价值评估——以环渤海区域为例[J].生态经济,2014,30(4):153-157.
- [8] 彭本荣,洪华生,陈伟琪,等.填海造地生态损害评估:理论、方法及应用研究[J].自然资源学报,2005,20(5):714-726.
- [9] 杨园园,戴尔卓,付华.基于InVEST模型的生态系统服务功能价值评估研究框架[J].首都师范大学学报:自然科学版,2012,33(3):41-47.
- [10] 何斌源,范航清,王瑁,等.中国红树林湿地物种多样性及其形成[J].生态学报,2007,27(11):4859-4870.
- [11] 韩维栋,高秀梅,卢昌义,等.中国红树林生态系统生态价值

- 评估[J]. 生态科学 2000, 19(1): 40-46.
- [12] 福建省海洋开发管理小组办公室. 近岸海域环境容量的价值及其价值评估[R]. 厦门: 近海海洋环境科学国家重点实验室 2006.
- [13] 国家海洋局第三海洋研究所. 厦门海域环境容量研究[R]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 1995.
- [14] 陈伟琪, 洪华生, 薛雄志, 等. 近岸海域环境容量的价值及其价值量评估初探[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1999, 38(6): 896-901.
- [15] TAIT R V. Elements of marine ecology: an introductory course [M]. 3rd ed. London: Butterworth-Heinemann, 1981.
- [16] 卢振彬, 杜琦, 颜尤明, 等. 厦门沿岸海域贝类适养面积和可养量的估算[J]. 台湾海峡, 1999, 18(2): 199-204.
- [17] 彭本荣, 洪华生, 陈伟琪, 等. 海岸带环境资源价值评估—理论方法与案例研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, 43(增刊): 184-189.
- [18] 洪华生, 彭本荣, 陈伟琪. 厦门西海域综合整治社会经济效益分析[R]. 厦门: 厦门大学环境科学研究中心, 2004.
- [19] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOR, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [20] 薛志勇. 福建九龙江口红树林造林遇到的问题[J]. 湿地科学与管理 2006, 2(3): 54-57.
- [21] 杨忠兰. 福建九龙江河口湿地现状评价及保护对策[J]. 中南林业调查规划 2004, 23(3): 40-23.
- [22] 夏涛, 陈尚, 张涛, 等. 江苏近海生态系统服务价值评估[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 5069-5076.
- [23] 王莹. 价值评估在生态损害补偿标准制订中的应用[J]. 海峡科学 2013(6): 45-52.
-
- (上接第903页)
- [3] NDUNGU J, MONGER B C, AUGUSTIJN D C M, et al. Evaluation of spatio-temporal variations in chlorophyll-a in Lake Naivasha, Kenya: remote-sensing approach [J]. International Journal of Remote Sensing 2013, 34(22): 8142-8155.
- [4] 任敬萍, 赵进平. 二类水体水色遥感的主要进展与发展前景[J]. 地球科学进展 2002, 17(3): 363-371.
- [5] 詹海刚, 詹海刚, 施平, 等. 利用神经网络反演海水叶绿素浓度[J]. 科学通报 2000, 45(17): 1879-1884.
- [6] RADIARTA I N, SAITOH S I. Satellite-derived measurements of spatial and temporal chlorophyll-a variability in Funka Bay, Southwestern Hokkaido, Japan [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science 2008, 79(3): 400-408.
- [7] 郑小慎, 魏皓, 王玉衡. 基于水色遥感的黄、东海叶绿素 a 浓度季节和年际变化特征分析[J]. 海洋与湖沼, 2012(3): 649-654.
- [8] YAMAGUCHI H, KIM H C, SON Y B, et al. Seasonal and summer interannual variations of SeaWiFS chlorophyll a in the Yellow Sea and East China Sea [J]. Progress in Oceanography 2012, 105(S1): 22-29.
- [9] 于春艳, 梁斌, 鲍晨光, 等. 渤海富营养化现状及趋势研究[J]. 海洋环境科学 2013, 32(2): 175-177.
- [10] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 13-49.
- [11] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 1-95.
- [12] 王颖. 中国海洋地理[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 15-22.
- [13] 蒋德才, 刘百桥, 韩树宗. 工程环境海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 4-14.
- [14] 崔正国. 环渤海13城市主要化学污染物排放总量控制方案研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 29-71.
- [15] 张志锋, 贺欣, 张哲, 等. 渤海富营养化现状、机制及其与赤潮的时空耦合性[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(4): 465-468, 483.
- [16] 刘娟. 渤海化学污染物入海通量研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006: 27-42.
- [17] WU M, ZHANG W, WANG X J, et al. Application of MODIS satellite data in monitoring water quality parameters of Chaohu Lake in China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 148(1/2/3/4): 255-264.
- [18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第2版. 北京: 气象出版社, 2007: 46-47.
- [19] 钱莉, 刘文岭, 郑小慎. 基于MODIS数据反演的渤海叶绿素浓度时空变化[J]. 海洋通报 2011(6): 683-687.
- [20] 魏皓, 赵亮, 于志刚, 等. 渤海浮游植物生物量时空变化初析[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2003, 33(2): 173-179.