

基于去重复性分析的广东省滨海湿地生态系统服务价值估算

高常军¹, 魏 龙¹, 贾 朋², 田惠玲², 李树光¹

(1. 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 2. 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要: 为了深入了解滨海湿地服务价值构成及特点, 以广东省滨海湿地生态系统为例, 筛选了 11 项去重复性的最终服务和评价指标体系, 选择市场价值法、替代成本法和实际调查法等适应度较高价值评价方法, 从而科学评估广东省滨海湿地生态系统的总服务价值, 并为湿地生态系统的保护与修复提供理论基础。结果表明: 2013 年广东省滨海湿地生态系统最终服务总价值为 664.074×10^8 元, 单位面积服务价值为 $8.147 \text{元} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在所评价的 11 项最终服务中, 食物供给价值最大, 占总服务价值的 73.48%, 其后依次为休闲旅游价值、风能供电价值、固碳价值、水质净化价值、航运价值、大气调节价值、供水价值、消浪护岸价值、原材料供给价值和科研教育价值。广东省滨海湿地不仅发挥显著的直接经济效益, 还兼具巨大的生态效益和社会效益, 同时在维系广东乃至华南地区海岸带生态安全及国民经济发展方面发挥不可替代的重要作用。图 1 表 4 参 29

关键词: 生态学; 滨海湿地; 重复性计算; 最终服务; 价值评价

中图分类号: S718.5; Q147 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2017)01-0152-09

Coastal wetland ecosystem evaluation in Guangdong Province by eliminating the double counting

GAO Changjun¹, WEI Long¹, JIA Peng², TIAN Huiling², LI Shuguang¹

(1. Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China; 2. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: Ecosystem service value assessment is vital in ecological economics as well as environmental economics, and coastal wetlands are an important component of an ecosystem. To better understand the components and characteristics of coastal wetlands and consequently evaluate its final ecosystem service values, the coastal wetlands in Guangdong Province were investigated and the 11 kinds of final services with eliminating the double counting were determined. The 11 kinds of final services in Guangdong Province were selected based on literature and field survey, and which were used to calculate the total value for the coastal wetlands in the study area. Subsequently, the evaluation system and methods of the final services were established and selected, such as market method, replacement cost method, field survey method, and other environmental economic evaluation methods. Results showed that the total value of coastal wetland ecosystem services in Guangdong Province in 2013 was 664.1×10^8 RMB yuan with an average value of $8.1 \text{RMB yuan} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The greatest among the indexes was the food supply service with 488.0×10^8 RMB yuan, accounting for 73.48% of the total value. The second largest index was recreation (124.1×10^8 RMB yuan, 18.7%) followed by wind power supply (16.7×10^8 RMB yuan, 2.52%), carbon sequestration (11.4×10^8 RMB yuan, 1.71%), water purification (11.3×10^8 RMB yuan, 1.70%), ocean shipping (4.3×10^8 RMB yuan, 0.64%), climate regulation (3.6×10^8 RMB yuan, 0.54%), water supply (2.3×10^8 RMB yuan, 0.35%), wave reduction and coastal protection (1.4×10^8 RMB yuan, 0.21%), raw material supply (1.0×10^8 RMB yuan, 0.15%), and scientific research (0.1×10^8 RMB yuan,

收稿日期: 2016-02-29; 修回日期: 2016-05-30

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404305); 广东省林业科技创新专项资金项目(2013KJCX011-01)

作者简介: 高常军, 助理研究员, 博士, 从事湿地生态学研究。E-mail: gaochangjun015@163.com

0.01%)。This indicated that coastal wetlands could not only have enormous economic, ecological, and social benefits, but could also play an irreplaceable role in the preservation of coastal ecological security and the development of the national economy in Guangdong Province or even in South China. [Ch, 1 fig. 4 tab. 29 ref.]

Key words: ecology; coastal wetland; double counting; final services; evaluation

湿地生态系统服务是指人类从湿地中获取的各种惠益^[1-2]，如湿地为人类提供的各种食物和原材料等直接使用资源，以及调蓄洪水和净化水质等各种直接或间接的服务与效益。联合国等组织开展的千年生态系统评估为湿地生态系统服务构建的供给、调节、支持和文化 4 类服务分类体系及其价值估算方法目前受到最为广泛的认可与应用^[1,3]。然而，上述服务分类体系因混淆生态系统的中间过程及最终服务结果，导致湿地生态系统服务评估的重复计算^[4]，如调蓄洪水和涵养水源 2 项服务通过调控生态系统的水文循环过程最终为人类提供供水服务。因此，在深入剖析湿地生态系统自身特点的基础上，通过构建合理的分类体系和选择恰当的评估指标与方法可有效剔除服务价值的重复性计算问题，从而提高湿地服务价值评估的可信度和科学性。广东省滨海湿地处于中国大陆最南端，占中国滨海湿地总面积的 14.06%，拥有《关于特别是作为水禽栖息地的国际重要湿地公约》(简称《湿地公约》)规定的所有滨海湿地类型，如拥有全球生物多样性最丰富和单位服务价值最高的红树林生态系统^[5-6]。然而，在台风、海浪侵蚀、围垦、养殖和沿海港口扩张等自然与人为活动的双重影响下，约 50% 的广东省滨海湿地面积遭受不同程度退化甚至消失，并导致其服务价值严重受损^[7]，因此，保护和恢复广东滨海湿地尤为紧迫和重要。本研究以广东省滨海湿地为例，基于千年生态系统评估体系，将该区湿地生态系统服务分为中间服务和最终服务 2 个部分，构建其可评价的最终服务，以期科学估算广东省滨海湿地生态系统的服务价值，为广东省滨海湿地的保护与修复提供理论基础。

1 研究区概况

广东省滨海湿地(地处 20°11'53.38"~ 23°37'14.05"N, 109°40'15.94"~ 117°11'33.99 E)，大陆海岸线长 3 368.1 km，岛屿海岸线长 1 649.5 km，大小海湾 510 多个，海岛 759 个，滨海沙滩 174 处，主要入海河口 6 处，绵长的海岸线和复杂的地貌结构孕育了丰富的滨海湿地资源(表 1)。广东省滨海湿地包含 11 个湿地类型，总面积为 8 150.98 km²，占全省湿地面积的 46.49%，行政范围涉及潮州市、汕头市、揭阳市、汕尾市、惠州市、东莞市、深圳市、广州市、中山市、珠海市、江门市、阳江市、茂名市和湛江市等 14 个沿海地级市和 38 个(区)县。

表 1 广东滨海湿地概况

Table 1 General situation of coastal wetlands in Guangdong Province

湿地类型	面积/km ²	比例/%	范围
近海水域	5 183.69	63.60	低潮时水深小于 6 m 的永久浅水域，植被盖度 < 30%，包括海湾、海峡。
潮下水生层	1.13	0.01	海洋潮下，湿地底部基质为有机部分组成，植被盖度 ≥ 30%，包括海草层、海草、热带海洋草地。
珊瑚礁	2.31	0.03	基质由珊瑚聚集生长而成的浅海湿地。
岩石海岸	20.46	0.25	底部基质 75% 以上是岩石和砾石，包括岩石性沿海岛屿、海岩峭壁。
沙石海滩	194.60	2.39	由砂质或沙石组成的，植被盖度 < 30% 的疏松海滩。
淤泥质海滩	328.48	4.03	由淤泥质组成的植被盖度 < 30% 的淤泥质海滩。
潮间盐水沼泽	8.02	0.10	潮间地带形成的植被盖度 ≥ 30% 的潮间沼泽，包括盐碱沼泽、盐水草地和海滩盐沼。
红树林	197.51	2.42	由红树植物为主组成的潮间沼泽。
河口水域	1 932.00	23.70	从近口段的潮区界(潮差为 0)至口外海滨段的淡水舌锋缘之间的永久性水域。
三角洲	100.19	1.23	河口系统四周冲积的泥/沙滩，沙州、沙岛(包括水下部分)植被盖度 < 30%。
海岸性咸水湖	182.59	2.24	地处海滨区域有 1 个或多个狭窄水道与海相通的湖泊，包括海岸性微咸水、咸水或盐水湖。

2 数据与方法

2.1 数据来源

广东省滨海湿地的类型、面积及分布等数据来自广东省第2次湿地资源调查数据,其他统计数据包括《中国渔业统计年鉴》《广东省海洋环境状况公报》《广东省统计年鉴》《广东省旅游统计年鉴》和《中国风电装机容量统计报告》等。另有部分数据参照广东价格信息网、广东省交通运输厅公众网、国家海洋环境预报中心和野外调查等。相关评估参数来源及野外调查介绍详见2.2.1, 2.2.2和2.2.3节各服务指标价值评估过程介绍。

2.2 广东滨海湿地生态服务价值估算指标体系与方法

湿地生态系统服务价值的重复性计算主要体现在总服务价值评估中的重复计算和部分服务之间的重复计算2个方面。前者在分类时存在重复性计算,而后者则由于指标的模糊不清、参数重复和评价方法的选择导致^[4]。如千年生态系统评估(MA)将生态系统服务分为供给、调节、支持和文化等4类服务,而调节和支持服务多通过供给服务间接为人类提供收益,即多数情况下供给服务是调节服务和支持服务的最终服务。为去除总服务价值评估中的重复性计算,基于千年生态系统评估体系和前人研究成果^[1,3],将广东省滨海湿地生态系统服务分为中间服务和最终服务,并以最终服务的价值作为广东省滨海湿地生态系统服务的总价值,在确定最终服务时,以对人类产生直接效益为唯一准则^[8]。为避免部分服务之间的重复性计算问题,在筛选评估指标时,根据科学性、全面性与重点相结合原则和可操作性原则,将评估指标分为2个层级,第1层级根据湿地的过程与功能特点确定(表2“最终服务”项);第2层级根据湿地生态系统服务的效用表现形式对二级分类进行细化和界定(表2“指标含义”项)。同时,在选择评估方法时,根据广东滨海湿地的特点选择每种服务的最适评价方法。如供水的目的是饮用水则选直接市场法;如果是为了瀑布或喷泉等景观观赏目的,则旅行费用法更为合适;如果是为了控制洪水则替代成本法是最好的选择,每种服务的最适评估方法介绍详见参考文献^[4]。基于上述湿地生态系统服务价值评价去重复性计算的过程,结合广东省滨海湿地的特点,确定最终服务包括11项指标分别为食物供给、供水、原材料供给、航运、风能供电、水质净化、固碳、大气(组分)调节、消浪护岸、休闲旅游和科研教育。

表2 广东滨海湿地生态系统服务价值评估指标体系

Table 2 Index system of estimation of coastal wetland ecosystem services in Guangdong Province

最终服务	中间服务	指标含义	评估方法
食物供给	净初级生产力、栖息地	滨海湿地供给鱼类、甲壳类、贝类、藻类等海水养殖产品。	市场价值法
供水	调蓄洪水、涵养水源、净初级生产力	红树林湿地蓄水能力为沿海居民提供的农田灌溉用水量。	市场价值法
原材料供给	净初级生产力、栖息地	红树林湿地每年材积生长量。	市场价值法
航运		沿海港口经由近海或河口水域的船舶货物、集装箱及客运吞吐量。	市场价值法
风能供电		滨海湿地区内风能电厂的年发电量。	市场价值法
水质净化	营养循环、净初级生产力	滨海湿地接纳污水并通过物理、化学或生物作用进行降解和去除。	污染防治成本法
固碳	营养循环、净初级生产力	滨海湿地植物和藻类通过光合作用及贝类(壳)通过生长固定二氧化碳量。	造林成本法 国际碳税法
大气调节	营养循环、净初级生产力	滨海湿地植物和藻类通过光合作用释放氧气及滨海湿地土壤通过呼吸作用释放二氧化碳和甲烷量。	工业制氧法 避免损失成本法
消浪护岸	土壤形成、营养循环	红树林岸线通过防御台风和风暴潮,每年承受的海浪能值。	替代费用法
休闲旅游	净初级生产力、水调节、栖息地	滨海湿地旅游资源提供的旅游收入。	实际调查法
科研教育	物种多样性、栖息地	用于滨海湿地相关研究的科研经费。	实际调查法

2.2.1 供给服务价值评估 ①食物供给:广东滨海湿地生态系统提供的物质产品主要有鱼类、甲壳类、贝类和藻类。湿地生态系统的食物(海产品)供给功能可通过直接市场法进行估算。公式如下:

$$V_s = \sum_{i=1}^n Y_i P_i - \sum_{j=1}^n Y C_j \quad (1)$$

式(1)中： V_s 指食物供给价值； i 是产品的种类； Y_i 是第 i 类产品的数量， P_i 是第 i 类产品的价格， j 是养殖成本支出的种类 Y 是广东近海养殖渔户数量， C_j 为第 j 类养殖成本的价格。2013年广东省近海养殖总产量为 $287.002 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，其中鱼类 $43.333 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，甲壳类 $43.772 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，贝类 $191.639 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，藻类 $7.585 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和其他类 $0.673 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ [9]。海产品单位价格参照广东省典型滨海湿地——汕尾市海丰湿地和广州市南沙湿地周边市场，平均单位价格为 $17.785 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2013年广东省近海养殖渔户为224 030户，其养殖成本支出包括雇工费用 $2\ 846.06 \text{ 元} \cdot \text{户}^{-1}$ ，饲料及苗种费用 $1\ 953.55 \text{ 元} \cdot \text{户}^{-1}$ ，燃料及设施维修费 $4\ 422.82 \text{ 元} \cdot \text{户}^{-1}$ ，其他支出为 $802.13 \text{ 元} \cdot \text{户}^{-1}$ [9]。②原材料供给(木材产品)：广东滨海湿地生态系统提供的原材料主要源自红树林湿地提供的木材产品，因此可通过红树林单位材积市场价格进行估算。广东滨海湿地区内红树林面积为 197.512 km^2 ，红树林年均材积生长量参照广东省典型滨海湿地——湛江红树林自然保护区不同年份红树林材积年均增量确定，为 $4.909 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。红树林木材单价参照文献[10]，并结合保护区当地木材市场确定，为 $996.725 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 。③供水：滨海红树林湿地受咸淡水周期性浸泡，并通过独特排盐方式保持体内水分。滨海红树林湿地独特的水源涵养功能主要体现在以浅层地下水的形式为当地居民提供农田灌溉用水。广东滨海红树林湿地单位面积蓄水量 $8\ 100.00 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ [11-12]。依据广东价格信息网(<http://www.gdpi.gov.cn>)，确定广东沿海各地级市2013年农用水均价为 $1.45 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 。④航运：据广东省交通运输厅公众网(<http://www.gdcd.gov.cn>)统计，2013年广东沿海港口货物、集装箱和客运吞吐量分别为13.085亿t，968万国际标准箱单位(1个集装箱约22t)，736万人次。广东沿海客运路线多短途且绝大部分属于内河航线，所以不在本研究范围内。由此可知，2013年广东沿海港口货物和集装箱总吞吐量为 $22.809 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，即为滨海湿地年运输总量。根据广东省航道图和2013年中国沿海运价统计表，得知广东滨海湿地(近海及河口水域)提供的有效运线长度和航运单价分别为 294.931 km 和 $0.017 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。2013年广东沿海港口货物的港口建设费征收标准均价为 $4.8 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ ，并据此估算其建设成本。⑤电力供给：滨海湿地的电力供给包括水力发电、潮汐能发电和风能发电。广东滨海湿地区内尚无水力发电和潮汐发电数据，因此，本研究只探讨广东滨海湿地的风能供电价值。广东属于亚热带海洋性季风气候，冬季盛行东北季风、夏季盛行西南季风，沿海地区蕴涵丰富的风能资源。据2013年中国风电装机容量统计报告统计，广东滨海湿地区共有汕尾红海湾($3.69 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)，阳江海陵岛($25.74 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)，雷州东里($1.00 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)、惠来石碑山($1.32 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)，陆丰甲湖湾($0.10 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)，汕头南澳($5.68 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)和珠海横琴岛($2.48 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)7处风能电厂，2013年总发电量分别为 $39.99 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。根据广东沿海各地电价价目表，得到广东沿海(县)市2013年平均电价为 $0.738 \text{ 元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ ，其中用于抵扣发电厂建设和运行成本的发电成本价为 $0.320 \text{ 元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ [13]。

2.2.2 调节服务价值评估 ①水质净化：广东滨海湿地水质净化功能主要体现在对进入海湾/河口水域内的各种污染物，通过物理、化学或生物作用进行降解和去除。采用污染防治法评估广东滨海湿地水质价值，并认为如果进入湿地的污染物没有使水体整体功能退化，即可认为湿地起到净化功能。2013年广东省海洋环境状况公报显示，2013年广东省6条主要入海河流(珠江、榕江、练江、漠阳江、深圳河和黄冈河等)污染物排放总量为 $117.63 \times 10^4 \text{ t}$ ，47个人海排污口年排污量 $1.69 \times 10^4 \text{ t}$ ，河流和入海排污口的各类污染物排放量详见表3，所有污染物均排入海湾等近海水域，同时广东省近海水域水质状况总体为优，其中Ⅱ类以上水质水体占84.5%，因此视为滨海湿地发挥了充分的污水处理能力。根据国务院《排污费征收使用管理条例》中相关规定[14]，确定各类污染物的处理成本(表3)。②固碳：广东滨海湿地固碳价值主要通过浮游植物、大型藻类、红树林湿地、潮间盐水沼泽、淤泥质海滩和贝类等湿地动植物的固碳功能实现(表4)。水体中的浮游植物直接通过光合与呼吸作用的平衡固定大气中二氧化碳。广东滨海湿地浮游植物固碳量，基于南海海域初级生产力均值 $230 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 进行估算[15]。大型藻类主要包括紫菜 *Porphyra* 和海带 *Laminaria japonica* 等通过光合作用将溶解在水体中的无机碳转换为有机碳[16]，因相关价值已在食物供给部分单独估算，因此大型藻类的该种固碳方式不再重复估算。红树林湿地的固碳量分为2个部分：一是红树林地上植被通过光合作用，因生长而每年固定的碳量，因相关价值在红树林

表3 广东滨海湿地生态系统水质净化功能评估参数

Table 3 Parameters of water purification functions of coastal wetland ecosystems in Guangdong Province

污染物	河流 I ($\times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)	入海排污口 I ($\times 10^3 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)	污水处理成本/(元 $\cdot\text{t}^{-1}$)
重铬酸盐指数(CODCr)	74.460	15.700	700
5日生物耗氧量(BOD5)	—	0.405	1 400
氨氮	3.010	0.562	875
硝酸盐氮	32.610	—	875
亚硝酸盐氮	2.750	—	875
总磷	3.090	0.255	875
重金属	0.410	0.001	35 000
石油类	1.300	0.019	7 000
其他	—	0.008	175
合计	117.630	16.900	47 775

材积蓄部分已单独估算,为避免重复计算,该种固碳方式不再估算。二是红树林土壤长期处于水分过饱和状态,厌氧条件显著降低了有机物的降解速率,从而导致土壤中有有机质的积累。根据中国红树林生态系统的年均碳增量 $11.35 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ [10]和红树林土壤的年均固碳率(固碳速率-碳释放速率) $2.789 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ [17]对以上2类固碳量分别进行估算。根据滩涂湿地(潮间盐沼和淤泥海滩)与红树林湿地间的固碳关系及野外实验,确定滩涂湿地植被与土壤的固碳速率分别为 $8.54 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $2.223 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ [18-19]。贝类的固碳方式有2种:一种是利用海水中的 HCO_3^- 形成碳酸钙(CaCO_3),俗称贝壳,其反应式如下[20]:



式(3)中:贝类每吸收 2 mol HCO_3^- ,形成 1 mol 碳酸钙的同时,会释放 1 mol 二氧化碳。上述贝类固碳的特点是通过收获方式从海水中永久性移出;另一种是通过摄取水体中浮游植物或底栖藻类等悬浮颗粒有机碳促进贝类软组织生长。因浮游植物固碳量已经单独估算,为避免重复计算,贝类的该种固碳方式不再估算[21]。中国造林成本为 $250 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$,国际碳税标准的均值为 $770 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ [22]。本研究以两者的均值作为固碳价值的碳税标准来估算广东滨海湿地固碳价值。③调节大气:广东滨海湿地的调节大气的作用包括湿地植被通过光合作用释放氧气的正效应和湿地土壤通过呼吸作用释放温室气体的负效应。根据光合作用公式,湿地植物每生产 1.00 g 干物质,释放 1.07 g 氧气。据此求算红树林植被、滩涂(包括淤泥海滩和潮间盐沼)植被、大型藻类和浮游植物释放氧气的物质质量(表4)。按中国工业制氧单价 $400.00 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ 估算广东滨海湿地氧气释放价值。湿地生态系统是二氧化碳和甲烷等温室的重要排放源。本研究主要计算红树林和滩涂湿地的二氧化碳和甲烷排放量(表4),2类湿地的土壤二氧化碳单位排放量(包括甲烷温室效应值折算成二氧化碳量)分别为 $12.26 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $9.78 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ [18,23]。④消浪护岸:广东省滨海湿地的消浪护岸功能主要体现在红树林湿地抵御台风、风暴潮冲击、消浪促淤和保护堤岸等方面。本研究以广东红树林岸线每年承受的海浪能值货币价值作为其消浪护岸价值,其计算公式如下:

$$E = 0.125L \times (pgv) \times h^2 \times t \times T_r \quad (4)$$

式(4)中: E 是滨海湿地的消浪护岸能值,单位为J; L 为岸线长度,单位为m; p 为海水密度,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; g 为重力加速度,单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; v 为流速,单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; h 为平均浪高,单位为m; t 为海浪周期,单位为 $\text{s}\cdot\text{a}^{-1}$,即 $3.150 \times 10^7 \text{ s}\cdot\text{a}^{-1}$; T_r 为波浪能的能值转换率,单位为 $\text{sej}\cdot\text{J}^{-1}$,sej为太阳能焦耳(solar enjoules)。广东滨海湿地岸线长度为 $4.114 \times 10^6 \text{ m}$,广东近海水域密度为 $1.030 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,流速为 $0.585 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均浪高 0.889 m ,能值转换率为 $2.590 \text{ sej}\cdot\text{J}^{-1}$ [24]。结合能值货币比率($8.7 \times 10^{13} \text{ sej}\cdot\text{美元}^{-1}$)和2013年美元兑换人民币汇率(6.152元),估算广东滨海湿地消浪护岸价值。

2.2.3 文化服务价值评估 ①休闲旅游:广东省海岸线曲折,形成大小海湾港湾510个、海岛750多个、沙滩有174处,全省滨海旅游资源类型丰富[25]。假定滨海湿地单体旅游价值与其他景区单体旅游价值相同,根据广东省滨海湿地地区旅游单体与全省旅游单体比值及全省旅游收入估算广东滨海湿地休闲旅游价值[14]。公式如下:

$$V_i = \frac{C_{\text{im}}}{P_{\text{im}}} \times V_{\text{GDP}_0} \quad (5)$$

表 4 广东滨海湿地生态系统二氧化碳收支及氧气释放量

Table 4 CO₂ budget and O₂ release of coastal wetland ecosystems in Guangdong Province

类型	干物质量/($\times 10^4$ t·a ⁻¹)	固定二氧化碳量/($\times 10^4$ t·a ⁻¹)	释放氧气量/($\times 10^4$ t·a ⁻¹)	释放二氧化碳量/($\times 10^4$ t·a ⁻¹)
滩涂	植被	28.738	20.918	
	土壤	7.48		32.910
红树林	植被		16.318	
	土壤	5.509		24.215
贝类	牡蛎	68.212	8.185	
	鲍	0.178	0.021	
	螺	4.541	0.545	
	蚶	2.302	0.276	
	贻贝	6.649	0.798	
	江珧	0.779	0.094	
	扇贝	5.410	0.649	
	蛤	13.613	1.634	
	蛸	0.378	0.045	
	其他	8.908	1.069	
	海带	0.129		0.094
	裙带菜	0.013		0.010
	紫菜	0.317		0.230
	大型藻类	江蓠	3.130	2.278
麒麟菜	0.040	0.029		
羊栖菜	0.002	0.002		
其他	0.052	0.038		
浮游植物		167.860	122.184	
合计	114.653	222.903	162.101	57.125

式(5)中： V_i 为广东省滨海湿地旅游价值； C_m 广东省滨海湿地区旅游单体数量，单位为个； P_m 为广东省旅游单体数量，单位为个； V_{GDR} 为广东省 2013 年旅游收入，单位为元。广东省滨海湿地及全省旅游单体数量分别为 256 个和 13 853 个，全省 2013 年旅游总收入为 $6\ 716.69 \times 10^8$ 元^[26-27]。②科研教育：滨海湿地生态系统的科研教育价值主要包括相关的基础科学研究、教学实习、文化宣传等价值。本研究只计算广东省滨海湿地的科研费用价值，通过每年发表与广东省滨海湿地有关论文的总投入成本来估算。在中国知网上检索到主题中含“广东滨海湿地”的 2013 年文章为 46 篇，在 sciencedirect 上以“coastal wetland in Guangdong”为搜索词，检索到 2013 年发表英文文章 29 篇。论文的投入成本以 11.920×10^4 元·篇⁻¹ 为标准^[8]。

3 结果与分析

2013 年广东省滨海湿地生态系统最终服务价值合计为 664.074×10^8 元·a⁻¹，滨海湿地的单位面积服务价值为 8.147 元·m⁻²·a⁻¹。在滨海湿地生态系统提供的各服务类型中，供给服务价值最高，为 512.226×10^8 元·a⁻¹，占总价值的 77.13%。其次为文化服务价值，为 124.210×10^8 元·a⁻¹，占总价值的 15.33%。调节服务价值最小，为 27.636×10^8 元·a⁻¹，仅占总价值的 4.16%(图 1)。调节服务价值较小、比例偏低，主要原因在于该类型中的多数服务为中间服务，并通过各种途径的组合方式以供给服务的形式向人类提供效益。如调蓄洪水和涵养水源等最终通过供水服务体现，大型藻类和红树林地上植株的固碳量最终分别通过食物和木材形式体现。

在滨海湿地生态系统服务价值的各组分中(图 1)，食物供给(海产品)服务价值最大，为 487.968×10^8 元·a⁻¹，占总价值的 73.48%，其次为休闲旅游(124.123×10^8 元·a⁻¹)，电力供给(16.716×10^8 元·a⁻¹)，固碳

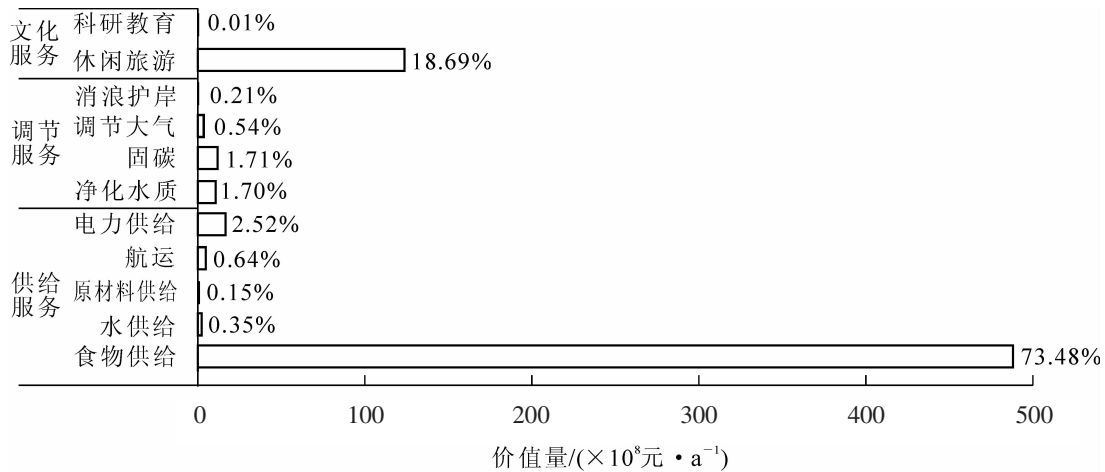


图1 广东滨海湿地生态系统服务价值

Figure 1 Values of ecosystem services of coastal wetlands in Guangdong Province

(11.368×10^8 元·a $^{-1}$)和水质净化(11.309×10^8 元·a $^{-1}$)服务价值,分别占总价值的 18.69%, 2.52%, 1.71%和 1.70%。剩余各类服务功能价值量之和仅为 12.590×10^8 元·a $^{-1}$, 占总价值的 1.90%, 而其中科研教育服务所提供的价值量最小(0.089×10^8 元·a $^{-1}$, 占总价值的 0.01%)。

广东省滨海湿地生态系统的主导服务价值主要体现在供给海产品等直接使用食物价值、风能发电、休闲旅游、固碳和水质净化等服务价值。这主要归咎于广东滨海湿地独特的结构组成,如近海水域自身巨大的海水养殖容量、沿海丰富的风能资源及滨海湿地区内蕴涵的多种旅游单体资源等通过市场直接为人类提供相关福祉,同时沿海的红树林也发挥了显著的生态调节服务,如固定二氧化碳和净化水质等。这说明广东省的滨海湿地生态系统在发挥巨大经济效益的同时兼具显著的生态效益。这与李志勇等^[28]的研究结果相似,即旅游娱乐和食品供给 2 类服务价值在广东近海海洋生态系统各类服务中排在前两位。广东滨海湿地原材料供给价值和科研教育价值分别占总服务价值的 0.15%和 0.01%,位居其他服务类型之后,表明广东省滨海湿地(如生物医药等原材料)开发技术、科研投入及教育宣传水平偏低,亟待提高。对比李志勇等^[28]的研究可知:本研究结果是其 1/3 倍,一是因为本研究的滨海湿地范围仅为前者的 1/8;二是因为评价方法和指标选取的不同所致,如前者选取的供给服务指标包含基因资源供给、海盐、珍珠和生物医药等原材料供给、食物(海产品)供给和风力发电等,而只有最后 2 项供给服务指标与本研究所选指标相同。

4 结论与讨论

湿地生态系统提供的服务,既有体现生态功能对人类福祉具有直接贡献的最终服务,又有参与生态过程具有调控或支持功能的中间服务,两者之间存在交叉重复^[4]。因此,在湿地生态系统服务总价值评估时需将两者区分,以最终服务作为生态系统服务总价值。通过分析湿地生态系统服务价值评估重复性计算产生的原因。本研究基于一个概念性框架尝试解决广东滨海湿地生态系统服务价值评估中的重复性计算问题。评估过程如下:首先根据广东滨海湿地特征和所处环境确定广东省滨海湿地生态系统的服务指标,将其中对人类效益有直接贡献的服务确定为最终服务,并依此作为广东省滨海湿地的服务总价值。其次在具体评估过程中通过明确各服务之间重复计算的关系,选择恰当评估参数与最适评价方法,构建数学公式等措施以达到尽量避免重复性计算的目的^[4]。最终,本研究确定了食物供给、供水、原材料供给、航运、风能供电、水质净化、固碳、调节大气(组分)、消浪护岸、休闲旅游和科研教育等 11 项最终服务。此外,因湿地生态系统的生态过程、服务功能及两者之间关系的复杂性,目前尚未有一套切实可行的价值评估理论可做到完全的去重复性,同时受评估方法、研究手段和资料获得性的限制,研究的估算结果与实际价值可能存在一定的误差。今后对滨海湿地服务价值评估去重复性计算的研究需开展更为详细的野外长期定位观测实验,同时结合新的评估指标体系和技术,或可提高滨海湿地服务价值评估的真实性及各研究之间的可比性和延续性^[29]。

湿地生态系统服务价值评估是生态经济学和环境经济学的研究热点。以广东省滨海湿地为例, 通过去重复性分析筛选最终服务, 通过分析各服务之间重复计算关系、选择最适评价方法和构建数学公式等措施尝试科学评估广东滨海湿地生态系统的最终服务价值。基于上述分析确定的广东省滨海湿地生态系统最终服务有 11 项, 分别为食物供给、供水、原材料供给、航运、风能供电、水质净化、固碳、大气(组分)调节、消浪护岸、休闲旅游和科研教育; 2013 年, 它们的服务价值分别为 487.968×10^8 元、 2.320×10^8 元、 0.967×10^8 元、 4.256×10^8 元、 16.716×10^8 元、 11.309×10^8 元、 11.368×10^8 元、 3.571×10^8 元、 1.388×10^8 元、 124.123×10^8 元和 0.089×10^8 元。其中, 主导生态系统服务包括食物供给、休闲旅游、风能供电、水质净化和固碳等 5 项服务, 表明广东省滨海湿地生态系统具有显著的经济和生态效益。因此, 在未来滨海湿地管理中, 应重点保障广东省滨海湿地在上述 5 个方面发挥其服务价值的基础上, 加强对滨海湿地受损或薄弱服务功能的研究。野外长期定位观测实验与新型生态系统服务价值评估理论与技术的结合, 可提高未来滨海湿地服务价值评估去重复性计算的精度, 为湿地生态系统的准确量化提供支撑。

5 参考文献

- [1] SARUKHÁN J. *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis* [M]. Washington D C: World Resources Institute, 2005.
- [2] MITSCH W J, GOSSELINK J G. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting [J]. *Ecol Econ*, 2000, **35**(1): 25 - 33.
- [3] COSTANZA R, PÉREZ-MAQUEO O, MARTINEZ M L, *et al.* The value of coastal wetlands for hurricane protection [J]. *Ambio A J Humn Environ*, 2008, **37**(4): 241 - 248.
- [4] 李伟, 崔丽娟, 庞丙亮, 等. 湿地生态系统服务价值评价去重复性研究的思考[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(10): 1716 - 1724.
LI Wei, CUI Lijuan, PANG Bingliang, *et al.* Thinking of solving double counting in wetland ecosystem services valuation [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, **23**(10): 1716 - 1724.
- [5] LEVENSON H. Coastal systems: on the margin[C]// BOLTON H S. *Coastal Wetlands*. New York: American Society of Civil Engineers, 2009: 75 - 83.
- [6] 国家林业局. 中国湿地资源简况: 第 2 次全国湿地资源调查[R]. 北京: 国家林业局, 2013: 1 - 3.
- [7] 张晓龙, 刘乐军, 李培英, 等. 中国滨海湿地退化评估[J]. 海洋通报, 2014, **33**(1): 112 - 119.
ZHANG Xiaolong, LIU lejun, LI Peiying, *et al.* Evaluation of coastal wetland degradation in China [J]. *Mar Sci Bull*, 2014, **33**(1): 112 - 119.
- [8] 庞丙亮, 崔丽娟, 马牧源, 等. 若尔盖高寒湿地生态系统服务价值评价[J]. 湿地科学, 2014, **12**(3): 273 - 278.
PANG Bingliang, CUI Lijuan, MA Muyuan, *et al.* Evaluation of ecosystem services valuation of alpine wetlands in Zoige Plateau [J]. *Wetland Sci*, 2014, **12**(3): 273 - 278.
- [9] 农业部渔业渔政管理局. 2014 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [10] 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.
HAN Weidong, GAO Xiumei, LU Changyi, *et al.* The ecological value of mangrove ecosystems in China [J]. *Ecol Sci*, 2000, **19**(1): 40 - 46.
- [11] 廖宝文, 郑松发, 陈玉军, 等. 海南东寨港几种国外红树植物引种初报[J]. 中南林学院学报, 2006, **26**(3): 63 - 67.
LIAO Baowen, ZHENG Songfa, CHEN Yujun, *et al.* Preliminary report on introduction of several alien mangrove plants in Dongzhai Harbour of Hainan Province [J]. *J Cent South For Univ*, 2006, **26**(3): 63 - 67.
- [12] 吕宪国. 湿地生态系统保护与管理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [13] 张正敏. 中国风力发电经济激励政策研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 王斌, 杨校生, 张彪, 等. 浙江省滨海湿地生态系统服务及其价值研究[J]. 湿地科学, 2012, **10**(1): 15 - 22.
WANG Bin, YANG Xiaosheng, ZHANG Biao, *et al.* Assessment of ecosystem services and value of coastal wetlands in Zhejiang Province [J]. *Wetland Sci*, 2012, **10**(1): 15 - 22.
- [15] 李小斌, 陈楚群, 施平, 等. 南海 1998-2002 年初级生产力的遥感估算及其时空演化机制[J]. 热带海洋学报,

- 2006, **25**(3): 57 – 62.
- LI Xiaobin, CHEN Chuqun, SHI Ping, *et al.* Estimation of primary production of south China sea from 1998 to 2002 by remote sensing and its spatio-temporal variation mechanism [J]. *J Trop Oceanogr*, 2006, **25**(3): 57 – 62.
- [16] 张朝晖, 吕吉斌, 叶属峰, 等. 桑沟湾海洋生态系统的服务价值[J]. 应用生态学报, 2008, **18**(11): 2540 – 2547.
- ZHANG Zhaohui, LÜ Jibin, YE Shufeng, *et al.* Values of marine ecosystem services in Sanggou Bay [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **18**(11): 2540 – 2547.
- [17] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 463 – 469.
- DUAN Xiaonan, WANG Xiaoke, LU Fei, *et al.* Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(2): 463 – 469.
- [18] 康文星, 赵仲辉, 田大伦, 等. 广州市红树林和滩涂湿地生态系统与大气二氧化碳交换[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(12): 2605 – 2610.
- KANG Wenxing, ZHAO Zhonghui, TIAN Dalun, *et al.* CO₂ exchange between mangrove and shoal wetland ecosystems and atmosphere in Guangzhou [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19**(12): 2605 – 2610.
- [19] 张莉, 郭志华, 李志勇. 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(4): 1153 – 1159.
- ZHANG Li, GUO Zhihua, LI Zhiyong. Carbon storage and carbon sink of mangrove wetland: research process [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(4): 1153 – 1159.
- [20] CHAUVAUD L, THOMPSON J K, CLOEM J E, *et al.* Clams as CO₂ generators: the potamocorbula amurensis example in San Francisco Bay [J]. *Limnol Oceanogr*, 2003, **48**(6): 2086 – 2092.
- [21] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J]. 地球科学进展, 2005, **20**(3): 359 – 365.
- ZHANG Jihong, FANG Jianguang, TANG Qisheng. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem [J]. *Adv Earth Sci*, 2005, **20**(3): 359 – 365.
- [22] 王凤珍, 周志翔, 郑忠明. 城郊过渡带湖泊湿地生态服务功能价值评估: 以武汉市严东湖为例[J]. 生态学报, 2011, **31**(7): 1946 – 1954.
- WANG Fengzhen, ZHOU Zhixiang, ZHENG Zhongming. Evaluation on service value of ecosystem of Peri-urban transition zone lake: a case study of Yandong Lake in Wuhan City [J]. *Acta Ecol Sin*, **31**(7): 1946 – 1954.
- [23] JENKINS W A, MURRAY B C, KRAMER R A, *et al.* Valuing ecosystem services from wetlands restoration in the Mississippi Alluvial Valley [J]. *Ecol Econ*, 2010, **69**(5): 1051 – 1061.
- [24] 赵晟, 洪华生, 张璐平, 等. 中国红树林生态系统服务的能值价值[J]. 资源科学, 2007, **29**(1): 147 – 154.
- ZHAO Sheng, HONG Huasheng, ZHANG Luoping, *et al.* Emergy value of mangrove ecosystem services in China [J]. *Resour Sci*, 2007, **29**(1): 147 – 154.
- [25] 庄伟光. 广东发展海洋旅游业的思考[J]. 中国国情国力, 2015(3): 57 – 59.
- ZHUANG Weiguang. Thinking of marine tourism development of Guangdong Province [J]. *China Nat Cond Strength*, 2015(3): 57 – 59.
- [26] 广东省社会科学院海洋经济研究中心, 广东新经济杂志社课题组. 广东省滨海旅游资源分析与发展历程[J]. 新经济, 2011(7): 82 – 84.
- Research Center of Marine Economy, Guangdong Academy of Social Sciences, Guangdong Magazine of New Economy. Analysis and development on coastal tourism resource in Guangdong province [J]. *New Econ*, 2011(7): 82 – 84.
- [27] 广东省统计局. 2014广东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [28] 李志勇, 徐颂军, 徐红宇, 等. 广东近海海洋生态系统服务功能价值评估[J]. 广东农业科学, 2011, **28**(23): 136 – 140.
- LI Zhiyong, XU Songjun, XU Hongyu, *et al.* Value assessment of offshore marine ecosystem service in Guangdong Province [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2011, **28**(23): 136 – 140.
- [29] 范钦栋. 昆虫生态服务的价值研究与探讨[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(5): 774 – 778.
- FAN Qindong. Research and discussion on the valuation of insects' ecosystem services [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2014, **31**(5): 774 – 778.