

DOI: 10.5846/stxb201911012305

郝林华, 何帅, 陈尚, 赵东波, 胡灯进. 海洋生态系统调节服务价值评估方法及应用——以温州市为例. 生态学报, 2020, 40(13): 4264-4278.

Hao L H, He S, Chen S, Zhao D B, Hu D J. Evaluation method and application on regulating service value in marine ecosystem: Wenzhou city's practice. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4264-4278.

# 海洋生态系统调节服务价值评估方法及应用

## ——以温州市为例

郝林华<sup>1,2</sup>, 何 帅<sup>1,2</sup>, 陈 尚<sup>1,2,\*</sup>, 赵东波<sup>3</sup>, 胡灯进<sup>3</sup>

1 自然资源部第一海洋研究所 海岸带科学与海洋发展战略研究中心, 青岛 266061

2 自然资源部海洋生态环境科学与技术重点实验室, 青岛 266061

3 福建海洋研究所 福建省海岛与海岸带管理技术研究重点实验室, 厦门 361013

**摘要:**海洋生态系统服务可分为供给、调节、文化和支持 4 组服务, 调节服务是海洋生态系统服务的关键构成要素之一。现行国家标准《海洋生态资本评估技术导则》(GB/T 28058-2011) 中调节服务价值已有相应评估指标和方法, 但与陆地生态系统的评估体系并不统一。为了更好地接轨陆地生态系统评估体系并将海洋生态系统服务价值评估纳入国民经济核算体系, 首先对调节服务价值的评估指标和方法进行改进和完善, 之后以温州海域为例开展应用验证, 并与国标方法评估的结果进行比对。选择固碳、气候调节和废弃物处理 3 项指标, 分别采用替代市场价格法和替代成本法对 2013—2017 年 5 年间温州海域生态系统提供的调节服务价值进行评估, 并初步揭示其空间分布规律。结果表明, 采用改进后的评估指标和方法, 2013—2017 年温州海域调节服务价值变化范围为 (63.59—86.25) 亿元; 其中, 以废弃物处理提供的服务价值占主导地位 (56.53%—76.64%), 其次是气候调节服务提供的价值 (23.33%—43.45%), 二者合计占调节服务价值的 99.9% 以上。可见, 温州海域调节服务价值的贡献主要来自废弃物处理和气候调节服务提供的价值。温州海域面积 8649 km<sup>2</sup>, 2013—2017 年其调节服务价值平均分布密度范围为 (73.52—99.72) 万元/km<sup>2</sup>。此外, 温州海域提供的调节服务价值相当于同年温州市地区海洋生产总值的 7.34%—11.88%, 相当于同年温州市地区生产总值 (GDP) 的 1.26%—2.00%, 对温州市第二产业增加值的贡献度为 17%—27%, 由此表明温州海域调节服务价值对温州市经济发展有着重要的支撑作用。温州海域调节服务价值的空间分布总体呈现出从近岸向外海明显降低趋势。采用新的评估指标和评估方法, 能大幅度提高调节服务的价值 (是旧方法评估价值的 6—9 倍), 从而使温州市海洋生态系统服务总价值得到大幅提升。本研究对温州市海洋生态系统调节服务价值的评估, 反映出近年来温州市海洋生态环境处于良好状态, 同时表明海洋生态系统为人类带来了巨大效益, 也可为温州市海洋生态文明建设和海洋部门管理工作提供一定的决策依据。

**关键词:**海洋生态系统; 调节服务价值; 评估方法; 应用; 温州市

## Evaluation method and application on regulating service value in marine ecosystem: Wenzhou city's practice

HAO Linhua<sup>1,2</sup>, HE Shuai<sup>1,2</sup>, CHEN Shang<sup>1,2,\*</sup>, ZHAO Dongbo<sup>3</sup>, HU Dengjin<sup>3</sup>

1 Research Center for Coastal Zone Science and Marine Development Strategy, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

2 Key Laboratory of Marine Eco-Environmental Science and Technology, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

3 Fujian Provincial Key Laboratory of Coast and Island Management Technology Study, Fujian Institute of Oceanography, Xiamen 361013, China

**Abstract:** The marine ecosystem services consist of four elements such as provisioning service, regulating service, cultural

**基金项目:**国家重点研发计划项目 (2016YFC0503503, 2016YFC0503401); 自然资源部海洋生态预警监测项目 (12116800000180053); 福建省科技计划项目 (2016R1006-2)

收稿日期: 2019-11-10; 修订日期: 2020-06-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qdes@163.com

service and supporting service. The regulating service value is one of the key constituents of marine ecosystem service values. There are corresponding evaluation indexes and methods for marine regulating service value in the current national standard 'Technical directives for marine ecological capital assessment' (GB/T 28058—2011), but it is not consistent with the evaluation system of terrestrial ecosystem. In order to better integrate the evaluation system of terrestrial ecosystem and bring the evaluation of marine ecosystem service values into the national economic accounting system, the evaluation indicators and methods of marine regulating service value were first improved in this paper, the application verification was carried out by taking Wenzhou coastal waters as an example, and the results were compared with those of the national standard method. Three indicators including carbon sequestering, climate regulating and waste disposal are selected to evaluate the regulating service value provided by marine ecosystem in Wenzhou city from 2013 to 2017. The replacement-market-price method and the replacement-cost method are used to value these indicators. The spatial distribution map of the regulating service value in Wenzhou coastal waters are also preliminarily revealed. The results show that adopting the improved evaluation indicators and methods, the regulating service value in Wenzhou coastal waters is 63.59—86.25 billion yuan, in which the value of waste disposal service makes a major contribution about 56.53%—76.64% of the total regulating service and the climate regulating service is lower in value with about 23.33%—43.45% of the total regulating service. The values of these two services account for more than 99.9% of the total regulating service value. According to the space range of 8649 km<sup>2</sup> in Wenzhou coastal waters, the average distribution density of regulating service value from 2013 to 2017 is valued as high as (73.52—99.72) ten thousand yuan/km<sup>2</sup>. Additionally, the regulating service value provided by marine ecosystem in Wenzhou city is equivalent to 7.34%—11.88% of Wenzhou's marine gross products, and about 1.26%—2.00% of Wenzhou's gross domestic product (GDP) in the same year, and the contribution to the added value of secondary industry is 17%—27%. It is shown that the marine regulating service value has played an important supporting role in the economic development of Wenzhou city. The spatial distribution of the regulating service value in Wenzhou coastal waters shows an obvious decreasing trend from inshore to offshore. The use of new evaluation indicators and methods can greatly increase the marine regulating service value (about 6—9 times), compared with that of the old evaluation system, thus the total marine ecosystem service values in Wenzhou city are greatly increased. The evaluation of the regulating service value provided by ecosystem in Wenzhou coastal waters from 2013 to 2017 can reflect the good state of marine ecological environment in Wenzhou city in recent years, and show that marine ecosystem has brought great benefits to human beings. It can also provide a certain decision-making basis for the construction of marine ecological civilization and the management of marine administrative departments at the present stage.

**Key Words:** marine ecosystem; regulating service value; evaluation method; application; Wenzhou city

1997年, Costanza等<sup>[1]</sup>计算了1994年整个生物圈所提供的生态系统服务价值。2000年, Daily等<sup>[2]</sup>全面介绍了生态系统服务理论体系和研究方法;这两项具有里程碑意义的研究成果在国际范围内引起了广泛关注,为全球生态系统服务的研究奠定了基础,由此生态系统服务价值研究也被认为是沟通生态学和经济学桥梁,为解决生态系统之于人类的重要性提供了量化的参考<sup>[3-5]</sup>。

海洋生态系统是全球生命支持系统的一个重要组成部分,以其独特的生物和非生物要素以及多样的文化景观,向人类提供了陆地生态系统所无法替代的生态系统服务。正确认识并有效评估海洋生态系统服务价值,是合理开发利用海洋资源,保护和管理海洋生态环境的重要内容。海洋生态系统服务是指通过海洋生态系统的功能结构和生态过程,以物品和服务等方式直接或间接地给人类提供的各种效用或惠益。按照联合国千年生态系统评估框架<sup>[6]</sup>,海洋生态系统为人类提供的服务可分为供给、调节、文化和支持4个大类,每一大类中又包含多个子类。随着基于生态系统的海洋管理理念不断推广,海洋生态系统服务识别和价值评估已逐渐成为国内外共同关注的焦点<sup>[7-13]</sup>。

海洋调节服务是海洋生态系统服务的关键构成要素之一,是指海洋生态系统通过其内在的各种生理生态过程和系统功能的调节作用为人类提供的各种生态惠益和防灾减灾的服务功能<sup>[6]</sup>。在实际评估过程中,不同学者针对海洋调节服务的组成要素、评估指标和价值核算方法等存在多种理解和认识。归纳起来,学者们认为海洋生态系统调节服务主要包括气候调节、空气质量调节、水质净化调节或污染物净化、废弃物处理、涵养水源、有害生物与疾病的生物调节与控制、干扰调节等指标,评估的方法主要有替代成本法、造林成本法、碳税法、污染防治成本法、重置成本法、专家评估法、成果参照法等<sup>[14-17]</sup>。陈尚等<sup>[18]</sup>认为,海洋调节服务是指海洋调节人类生态环境质量的服务,评估主要考虑气候调节、废弃物处理等指标。气候调节是指海洋植物(浮游植物和大型藻类)固碳的服务,废弃物处理是指海洋能够提供净化排海废水及 COD、氨氮等污染物总量的服务;评估方法主要采用替代市场价格法和替代成本法,并将该方法吸收采纳于国家标准《海洋生态资本评估技术导则》(GB/T 28058—2011)<sup>[19]</sup>。现行国标已实施 8 年,得到广泛应用,支撑全国围填海造成的海洋生态损失和补偿资金评估,也是海洋生态产品价值核算的基础性方法。

然而,作者经过进一步研究发现,国标《海洋生态资本评估技术导则》中气候调节的内涵和评估方法与国外 Costanza 等<sup>[1]</sup>和国内欧阳志云等<sup>[20]</sup>有关陆地生态系统调节服务中气候调节指标的内涵和评估方法并不统一。陆地生态系统中气候调节服务是指生态系统通过植被蒸腾作用和水面蒸发过程调节大气温度和湿度的生态效应。而生态系统的固碳服务是另外一项单独的评估指标。因此,为了更好地接轨陆地生态系统评估体系和将海洋生态系统服务价值评估纳入国民经济核算体系,现行国标中海洋调节服务的评估体系亟待完善。

此外,近年来,国内外学者已经对不同尺度不同对象的海洋生态系统服务价值评估开展了大量的探索,但研究目前仍多集中于大尺度近海海域或海湾、海岛、红树林、滨海湿地等生态类型<sup>[13]</sup>,对于具体行政区域尺度的海洋生态系统服务价值尚不多见。因此,按照行政管辖海域范围评估海洋生态系统服务价值,并将评估结果纳入决策、规划以及生态补偿、自然资源有偿使用等,对于地方政府的海洋管理开发、环保绩效考核及海洋生态文明建设或许更有意义。

温州市,浙江省地级市,位于浙江省东南部,瓯江下游南岸,区划海域海岸线总长 1247.61 km,海域空间范围 8649 km<sup>2</sup>。沿海自北向南分布有洞头、北麂、北龙、南麂和七星等 5 片列岛区。河口港湾众多,有温州湾、乐清湾、沿浦湾和大渔湾等 4 海湾,温州的苍南县和洞头县分别被命名为“中国紫菜之乡”和“中国羊栖菜之乡”,乐清湾是全国最大的泥蚶育苗基地,被誉为“贝藻王国”的南麂列岛国家海洋自然保护区是我国南北海岸带生物的聚集地。因此,温州在浙江省乃至在全国的海洋地位十分重要。

本研究首先对国标《海洋生态资本评估技术导则》中调节服务价值的评估指标和方法进行改进和完善,之后以温州海域为例开展应用验证,并与国标方法评估的结果进行比对;同时探讨了温州海域调节服务价值对温州市经济发展的贡献,为温州市海洋资源有偿使用、海洋环境保护提供重要的理论依据,也可为其海洋生态文明建设和海洋部门管理工作提供一定的决策依据。

## 1 评估方法

国标《海洋生态资本评估技术导则》(GB/T 28058—2011)中,调节服务评估主要考虑气候调节(等同于固碳)和废弃物处理 2 项指标<sup>[14]</sup>。本文调节服务评估指标选择固碳、气候调节和废弃物处理 3 项指标。首先,引入了固碳指标,增加了贝类固碳的评估方法;其次,改进和更新了气候调节指标的概念内涵和评估方法;最后,对废弃物处理的评估方法也进行了进一步完善,增加了主要入海河流排海污染物总量处理的评估方法。具体的评估方法如下所述。

### 1.1 固碳

#### 1.1.1 物质量评估

固碳服务是指海洋生态系统(浮游植物、大型藻类和贝类)通过吸收二氧化碳、减少大气中二氧化碳的含量进而减缓温室效应的服务功能。固碳服务的物质量包括浮游植物、大型藻类和贝类固定二氧化碳的量。其

中,贝类固碳的评估方法参考海洋行业标准《养殖双壳贝类碳汇计量方法——碳储量变化法》<sup>[21]</sup>和张继红等《中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献》<sup>[22]</sup>。

计算公式如下:

$$Q_{\text{CO}_2} = Q'_{\text{CO}_2} \times S \times 365 \times 10^{-3} + Q''_{\text{CO}_2} + Q'''_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

其中,

$$Q'_{\text{CO}_2} = 3.67 \times Q_{pp} \quad (2)$$

$$Q''_{\text{CO}_2} = 1.63 \times Q_A \quad (3)$$

$$Q'''_{\text{CO}_2} = Q \times P_s \times C_s \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

式中, $Q_{\text{CO}_2}$ 为固碳的物质质量(t/a); $Q'_{\text{CO}_2}$ 为单位时间单位面积海域浮游植物固定的二氧化碳量( $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ); $S$ 为评估海域面积( $\text{km}^2$ ); $Q''_{\text{CO}_2}$ 为大型藻类固定的二氧化碳量(t/a); $Q'''_{\text{CO}_2}$ 为贝类固定的二氧化碳量(t/a); $Q_{pp}$ 为浮游植物的初级生产力( $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ); $Q_A$ 为大型藻类干重(t/a); $Q$ 为贝类湿重(t/a); $P_s$ 为贝类贝壳干重与贝类湿重的比值(称为干壳重系数); $C_s$ 为贝壳中总碳的平均含量(%); $\frac{44}{12}$ 为贝壳含碳量换算成含二氧化碳量的系数。

### 1.1.2 价值量评估

固碳的价值量采用替代市场价格法进行评估。计算公式如下:

$$V_{\text{CO}_2} = Q_{\text{CO}_2} \times P_{\text{CO}_2} \times 10^{-4} \quad (5)$$

式中, $V_{\text{CO}_2}$ 为固碳的价值量(万元/a); $Q_{\text{CO}_2}$ 为固碳的物质质量(t/a); $P_{\text{CO}_2}$ 为二氧化碳排放权的平均市场交易价格(元/t)。

## 1.2 气候调节

### 1.2.1 物质质量评估

气候调节服务主要指海洋生态系统具有减缓气温变化幅度、增加空气湿度,达到改善人居空气环境舒适程度,具有使沿海地区气候冬暖夏凉的服务功能。气候调节服务的物质质量评估主要考虑评估沿海城市冬夏两季海气界面具有正效用的感热通量,根据相关的海洋气候监测数据,通过经验公式(块体法)<sup>[23-24]</sup>计算得到。计算公式如下:

$$W_s = A \times \sum_{i=1}^{365} Q_i \quad (6)$$

$$Q_i = \rho_a \times C_{pa} \times C_h \times (T_{wi} - \theta) \times V_{10i} \quad (7)$$

$$\theta = T_{ai} + 0.0098 \times Z_r \quad (8)$$

$$\rho_a = \frac{p \times 100}{(\theta + t_{ok}) \times r \times (1.0 + 0.00061 \times q_a)} \quad (9)$$

$$q_a = 0.62198 \times \frac{e_a \times f}{p - 0.37802 \times e_a \times f} \times 10^3 \quad (10)$$

$$e_a = 6.112 \times \exp\left(\frac{17.67 \times t}{t + 243.5}\right) \quad (11)$$

式中, $W_s$ 为气候调节的物质质量( $\text{kWh/a}$ ); $A$ 为评估海域面积( $10^6 \text{m}^2$ ); $Q_i$ 为第*i*日的海气感热通量( $\text{KJ d}^{-1} \text{m}^{-2}$ ); $\rho_a$ 为海气界面湿空气密度; $C_{pa}$ 为空气定压比热容,取 $1004.67(\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1})$ ; $C_h$ 为海气感热交换系数,取 $1.176 \times 10^{-3}$ ; $T_{wi}$ 为第*i*日海水表层平均温度(K); $\theta$ 为第*i*日海面上2 m高度的大气位温(K); $T_{ai}$ 为第*i*日海面上2 m高度的平均气温(K); $Z_r$ 为气温观测高度,取2 m; $p$ 为标准大气压,取 $1008.0 \text{mPa}$ ; $t_{ok}$ 为摄氏温度转化为开氏温度的换算常数,取 $273.16$ ; $r$ 为干空气气体常数,取 $287.1(\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1})$ ; $q_a$ 为海气界面10 m处空气比湿( $\text{g/kg}$ ); $V_{10i}$ 为第*i*日距海面上10 m高度的平均风速( $\text{m/s}$ ); $f$ 为第*i*日海面上10 m处平均相对湿度; $e_a$ 为大气饱和水汽压(Pa); $t$ 为第*i*日海面上10 m高度的平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )。

### 1.2.2 价值量评估

气候调节的价值量评估采用替代成本法(夏季人工降温和冬季人工增温所需要的耗电成本)进行核算。海洋向大气释放热量提高气温与使用空调耗电产热提高室内气温具有同样效果;同理,海洋从大气吸收热量降低气温与使用空调耗电制冷降低室内气温也有同样效果。可以将海洋调节气候的热量用空调耗电量替代评估。计算公式如下:

$$V_w = (W_s \times P_E) / (\gamma \times 10^9) \quad (12)$$

式中,  $V_w$  为气候调节的价值量(亿元/a);  $W_s$  为评估海域气候调节物质质量(kWh/a);  $\gamma$  为空调能效比,取3.25;  $P_E$  为空调耗电的电价(元/kWh)。

### 1.3 废弃物处理

#### 1.3.1 物质质量评估

废弃物处理服务是海洋为人类处理排海废弃物提供的服务,是海洋生态系统提供的重要环境调节服务功能之一,是指人类生产、生活产生的废弃物通过地表径流、直接排放等方式进入海洋,海洋生态系统发挥物理净化、化学净化和生物净化机制,通过扩散、稀释、包裹、分解、降解、转化等自然过程,把废弃物转化为有用物质(比如营养盐等),把高毒物质转化为低毒甚至无毒物质的过程。海水可以净化陆源排污的多种废弃物,尤其是对 COD、N、P、石油烃等营养元素的吸收、转化和滞留有较高的效率,能有效降低其在水体中的浓度。适度利用海洋的废弃物处理功能,可减少陆上垃圾处理费用,可以节省土地占用和成本。

废弃物处理的物质质量包括:工业废水总量、城镇生活污水总量和主要入海河流排海的污染物总量。因农村生活污水和农业生产排放污水未纳入地方统计体系,数据难以获得,未作考虑。计算公式如下:

$$Q_{SWT} = Q_{WW} - (Q_{COD} + Q_{NH_3-N}) \times 20\% + Q_{WT} \quad (13)$$

式中,  $Q_{SWT}$  为废弃物处理的物质质量(t/a);  $Q_{WW}$  为工业废水、城镇生活污水的排放总量(t/a);  $Q_{COD}$  为工业废水、城镇生活污水中的 COD 排放总量(t/a);  $Q_{NH_3-N}$  为工业废水、城镇生活污水中的氨氮排放总量(t/a);  $Q_{WT}$  为主要河流入海的 COD、氨氮总量(t/a)。

采用本评估方法有如下假设:

- a 工业废水、城镇生活污水经过管道、沟渠排放入海,未考虑大气蒸发损失;
- b 排污的管道、沟渠内底土达到水饱和,经过管道、沟渠的废水和污水下渗,全部入海,未考虑下渗损失;
- c 工业废水、城镇生活污水通过排污管道、沟渠入海过程中,COD 和氨氮有少部分滞留排污管道、沟渠内,取滞留率 20%。

#### 1.3.2 价值量评估

废弃物处理的价值量采用替代成本法进行评估。按照工业废水处理的价值量、城镇生活污水处理的价值量和主要河流入海污染物处理的价值量分别计算,然后将三者相加。计算公式如下:

$$V_{sw} = Q_{SWT} \times P_w \times 10^{-4} \quad (14)$$

式中,  $V_{sw}$  为废弃物处理的价值量(万元/a);  $Q_{SWT}$  为废弃物处理的物质质量(t/a);  $P_w$  为人工处理废弃物的单位成本(元/t)。

## 2 应用验证

采用上述评估方法,以温州海域为研究对象,对其调节服务价值进行评估。

### 2.1 评估海域概况

温州海域评估空间范围是指温州市行政区划管辖海域范围,面积为 8649 km<sup>2</sup>,其中内水 5912 km<sup>2</sup>,领海 2737 km<sup>2</sup>;包括洞头区、乐清市、龙湾区、瑞安市、平阳县和苍南县 6 个县级行政区的管辖海域(图 1)。

### 2.2 评估期限

评估期限为 2013—2017 年,逐年评估,以 2017 年为评估基准年。

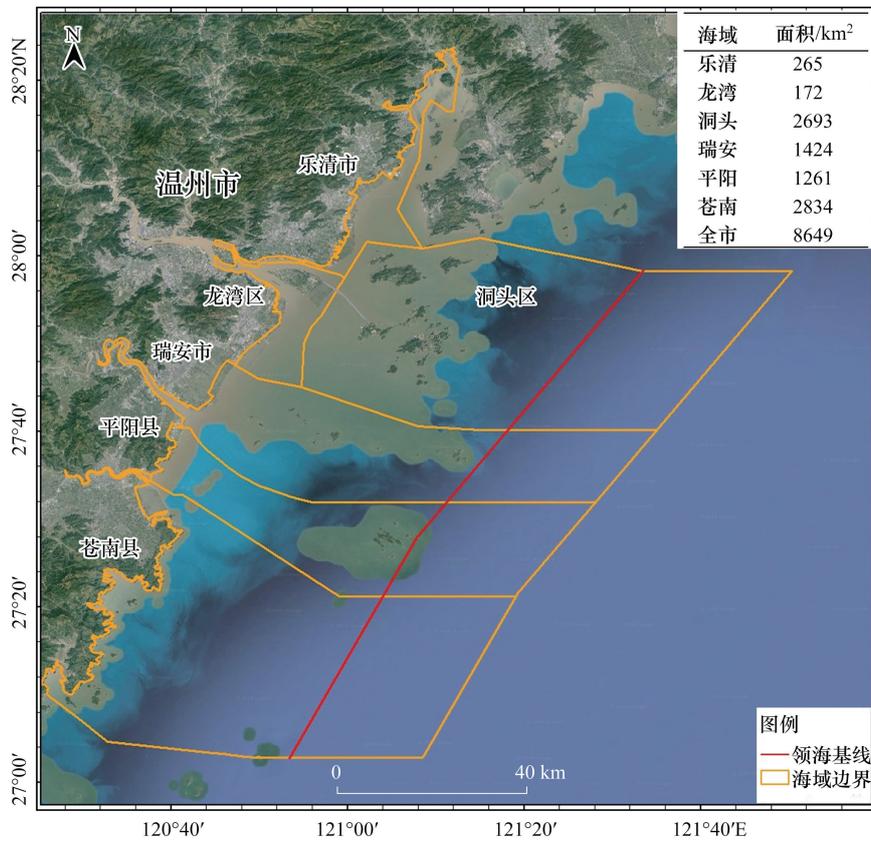


图 1 温州海域生态系统调节服务价值评估空间范围

Fig.1 Spatial scope of assessment of regulating service value in Wenzhou coastal waters

### 2.3 评估价值修正

在比较多个年份的调节服务价值时,为了去掉通货膨胀率的影响因素,应确定其中某一年为基准年,将其它年份的价值按照基准年的价值水平进行修正,然后再进行比较。因此,选取 2017 年为评估基准年,基于生产价格指数将温州海域调节服务 3 项指标的价值量进行逐年修正,计算公式如下:

$$V_{1P} = V_{2P} \times \frac{PPI_1}{PPI_2} \tag{15}$$

式中,  $V_{1P}$  为评估年份的固碳(或气候调节或废弃物处理)价值;  $V_{2P}$  为前一年份的固碳(或气候调节或废弃物处理)价值;  $PPI_1$  为评估年份的生产价格指数;  $PPI_2$  为前一年份的生产价格指数。

生产价格指数来自历年《温州市统计年鉴》<sup>[25]</sup>。统计年鉴通常将前一年的价格指数设为 100,以此为基准计算出后一年份的价格指数。2013—2017 年温州市生产价格指数见表 1。

表 1 2013—2017 年温州市生产价格指数

Table 1 The production price index of Wenzhou City from 2013 to 2017

年份 Year	2013	2014	2015	2016	2017
生产价格指数 Production price index	98.4	99.0	97.5	98.0	102.2

## 3 结果与分析

### 3.1 固碳

#### 3.1.1 物质量评估

按照本文评估方法,温州海域生态系统固碳服务包括浮游植物、大型藻类和贝类的固碳服务。浮游植物

固定二氧化碳的量应根据初级生产力实测值,基于光合作用方程计算获得。浮游植物的初级生产力根据国家海洋局温州海洋环境监测中心站提供的 2013—2017 年温州海域海洋环境监测资料中浮游植物的叶绿素、水层透光度数据及自然资源部第一海洋研究所提供的同化系数数据计算得到。大型藻类固定二氧化碳的量是根据《温州统计年鉴》<sup>[25]</sup>和温州市海洋与渔业局所统计的温州海水捕捞和养殖中大型藻类的产量数据换算大型藻类干重,再根据大型藻类初级生产固定二氧化碳的公式计算得到。贝类通过贝壳固定的碳量等于当年贝类的产量、贝类的干壳重系数和贝壳中总碳含量三者的乘积,再根据碳元素原子量在二氧化碳分子质量中的比例,乘以二氧化碳与碳的转换系数 44/12,换算成贝类所固定的二氧化碳量。贝类产量数据来自于《温州统计年鉴》中温州市海水捕捞和养殖贝类的产量;张继红等<sup>[22]</sup>测定了几种主要养殖贝类(栉孔扇贝、紫贻贝、太平洋牡蛎和菲律宾蛤仔)贝壳干重与贝类总湿重的比值(称为干壳重系数),取其平均值为 0.5902。根据海洋行业标准《养殖双壳贝类碳汇计量方法——碳储量变化法》<sup>[21]</sup>分析,常见养殖双壳贝类贝壳中的碳含量,分别是长牡蛎 11.52%、栉孔扇贝 11.44%、紫贻贝 12.68%、菲律宾蛤仔 11.40%,平均值为 11.45%。在本文研究中,养殖贝类按已知品种对应的干壳重系数、贝壳碳含量分别进行计算,其他品种按平均干壳重系数、贝壳平均碳含量进行计算。捕捞贝类因只有总产量数据,没有对应的品种和产量数据;又因为捕捞贝类品种主要是荔枝螺、单齿螺、赤蛙螺、条纹隔贻贝、青蚶、石鳖、藤壶、龟足等,这些品种的贝壳相对比较重,故按养殖贝类牡蛎的干壳重系数及贝壳碳含量进行计算。最后将养殖贝类固碳量和捕捞贝类固碳量进行加和,得到温州海域贝类固定二氧化碳的物质质量。

将浮游植物、大型藻类和贝类的固碳量分别进行加总,得到温州海域生态系统固定二氧化碳的物质质量,见表 2。由此可知,2013—2017 年间温州海域的固碳量在 2015 年呈现最低值,约为 2.55 万 t;2017 年达到最高值,约为 3.60 万 t;其余年份保持在 2.8 万 t 左右。此外,从表中还可看到,历年温州海域的固碳量,其中贝类固碳以 52.25%—61.81%的贡献率占主导地位;其次是大型藻类的固碳,贡献率约为 26.30%—39.13%;而浮游植物初级生产的固碳贡献率最低,仅为总固碳量的 8.46%—14.67%。

表 2 2013—2017 年温州海域固碳的物质质量

Table 2 The physical quantity of carbon dioxide sequestration in Wenzhou coastal waters from 2013 to 2017

年份 Year	浮游植物 固碳量 Carbon dioxide sequestration from phytoplankton /t	浮游植物对总固 碳量的贡献 Contribution of phytoplankton to total carbon dioxide sequestration /%	大型藻类 固碳量 Carbon dioxide sequestration from macroalgae/t	大型藻类对总固 碳量的贡献 Contribution of algae to total carbon dioxide sequestration /%	贝类固碳量 Carbon dioxide sequestration from shellfish/t	贝类对总固 碳量的贡献 Contribution of shellfish to total carbon dioxide sequestration/%	总的固碳量 Total carbon dioxide sequestration /t
2013	4105.16	14.62	7783.25	27.72	16191.50	57.28	28079.90
2014	4158.98	14.67	7457.58	26.30	16741.08	58.69	28357.63
2015	2203.03	8.63	7465.07	29.23	15868.45	61.81	25536.55
2016	3966.14	13.91	8239.00	28.91	16297.71	56.88	28502.84
2017	3043.75	8.46	14083.53	39.13	18861.88	52.25	35989.16

### 3.1.2 价值量评估

温州海域固碳的价值量评估结果和修正值见表 3。根据《北京碳市场年度报告 2017》统计分析,全国碳市场碳配额交易价格年度成交均价基本在 50 元/t 上下浮动<sup>[26]</sup>;因此,取二氧化碳排放权的平均市场交易价格(50 元/t)作为二氧化碳的单位价格。将历年温州海域固定二氧化碳的物质质量乘以二氧化碳的单位价格,得到温州海域固碳的价值量。由表 3 可见,2013—2017 年间,温州海域固碳的价值量呈现出波动变化趋势,先小幅上升然后下降之后又大幅上升,2015 年是低谷点,2017 年是峰值;其余 3 个年份差别不大,在 140 万元上下浮动。修正后的历年固碳价值量,除 2013 年、2014 年略低于原值,其余年份原值和修正值几乎无差别。

表 3 2013—2017 年温州海域固碳的价值量

Table 3 The value quantity of carbon dioxide sequestration in Wenzhou coastal waters from 2013 to 2017

年份 Year	固碳的物质质量 Carbon dioxide sequestration /t	二氧化碳排放权 平均市场交易价格 Average market trading price of carbon dioxide emission rights/(元/t)	固碳的价值量 Value quantity of carbon dioxide sequestration/万元	固碳的价值量修正值 Revised value of carbon dioxide sequestration /万元
2013	28079.90		140.40	135.73
2014	28357.63		141.79	138.46
2015	25536.55	50	127.68	127.88
2016	28502.84		142.51	145.65
2017	35989.16		179.95	179.95

### 3.2 气候调节

#### 3.2.1 物质质量评估

气候调节评估数据包括海域海水面积、海水表层旬平均温度、海面上 2 m 高度旬平均气温、海面上 10 m 高度旬平均风速等。评估海域面积数据由温州市海洋与渔业局提供;海水表层旬平均温度、海面上 2 m 高度旬平均气温、海面上 10 m 高度旬平均风速、相对湿度等数据由温州市海洋环境监测中心站海洋气象观测部门提供。

根据温州市海洋环境监测中心站提供的获取于沙岗头和北麂两站位的海洋气候监测数据,计算得到 2013—2017 年温州海域具有正效用的感热通量,视作气候调节服务的物质质量(表 4)。由于篇幅关系,具体核算过程不再详细展开。由此可知,2013—2017 年间,温州海域气候调节服务的物质质量,较高的年份是 2013 年和 2014 年,均在  $16 \times 10^9$  kWh 左右;其次是 2015 年和 2017 年,约在  $(13-14) \times 10^9$  kWh;而 2016 年最低,仅为  $9.06 \times 10^9$  kWh。

#### 3.2.2 价值量评估

气候调节价值量评估所需的温州市居民生活用电量的电费价格来自温州市供电局发布的电网销售电价表。温州海域气候调节服务的价值量评估结果和修正值见表 4。由此可知,2013—2017 年间,温州海域气候调节服务的价值量同样呈现出波动变化趋势,较高的年份是 2013 年和 2014 年,达到  $(26-27)$  亿元左右,其次是 2015 年和 2017 年,均在 22 亿元以上;价值量最低的年份是 2016 年,仅为 14 亿元左右。修正后的历年气候调节服务价值量,其原值和修正值差别很小。

表 4 2013—2017 年温州海域气候调节服务的物质质量和价值量

Table 4 The physical quantity and value quantity of climate regulating service in Wenzhou coastal waters from 2013 to 2017

年份 Year	气候调节的物质质量 Physical quantity of climate regulating service( $\times 10^9$ )/kWh	气候调节的价值量 Value quantity of climate regulating service /亿元	气候调节的价值量修正值 Revised value of climate regulating service /亿元
2013	16.7	27.63	27.46
2014	16.0	26.45	26.86
2015	14.2	23.58	23.46
2016	9.06	14.99	14.37
2017	13.3	22.07	22.07

### 3.3 废弃物处理

#### 3.3.1 物质质量评估

温州海域废弃物处理的物质质量包括工业废水总量、城镇生活污水总量和 3 条主要入海河流(瓯江、飞云江和鳌江)排海的污染物总量。温州海域接纳的工业废水总量、城镇生活污水总量及其中的 COD 和氨氮数

据,来自《浙江自然资源与环境统计年鉴》<sup>[27]</sup>,根据历年《温州市海洋环境公报》<sup>[28]</sup>,温州市3条主要入海河流的排海污染物主要是COD。

2013—2017年温州海域废弃物处理的物质量评估结果见表5。可以看到,2013—2017年间,历年温州海域废弃物处理的物质量变化趋势比较平缓,约为5亿t左右,主要来自城镇生活污水的贡献,占近90%;排海工业废水仅占10%左右,而主要河流入海污染物总量占比最小。

表5 2013—2017年温州海域废弃物处理服务的物质量

Table 5 The physical quantity of waste disposal service in Wenzhou coastal waters from 2013 to 2017

年份 Year	排海工业废水总量 Total amount of industrial wastewater/万 t	排海生活污水总量 Total amount of urban domestic sewage/万 t	主要河流入海污染物总量 Total amount of pollutants entering the sea from main rivers/万 t	废弃物处理的物质量 Physical quantity of waste disposal service/万 t
2013	7432.96	43495.10	59.81	50987.87
2014	6020.14	43626.17	116.98	49763.29
2015	6277.54	44234.54	91.70	50603.78
2016	5012.15	46150.65	93.30	51256.11
2017	5316.75	46507.69	95.91	51920.35

### 3.3.2 价值量评估

根据《浙江自然资源与环境统计年鉴》中温州市工业废水年处理量和工业废水治理设施年运行成本的数据<sup>[27]</sup>,计算得到历年温州市工业废水处理的单位成本;根据温州市市政执法局提供的温州市主要污水厂处理城镇生活污水的单位成本(含人工、折旧等)数据,取其平均值,计算得到历年温州市城镇生活污水处理的单位成本,见表6。可以看到,2013—2017年间,历年温州市工业废水处理的单位成本差别比较小,基本在4元/t左右;而温州市城镇生活污水处理的单位成本也基本不变,大约为(1.54—1.64)元/t。按照污染防治成本法,参考吴姗姗等的报道<sup>[29]</sup>,COD去除成本约为4300元/t。因此,本文温州市主要河流入海污染物COD处理的成本取4300元/t。

表6 2013—2017年温州市工业废水处理和城镇生活污水处理的单位成本

Table 6 The unit costs of industrial wastewater and urban domestic sewage treatment in Wenzhou coastal waters from 2013 to 2017

年份 Year	工业废水处理的单位成本/(元/t) Unit cost of industrial wastewater treatment	城镇生活污水处理的单位成本/(元/t) Unit cost of urban domestic sewage treatment
2013	4.16	1.64
2014	4.08	1.61
2015	4.41	1.57
2016	4.01	1.54
2017	4.18	1.57

温州海域废弃物处理的价值量评估结果和修正值见表7。由此可以看到,温州海域废弃物处理的价值量比较大,除2013年约为36亿元以外,其他年份均在50亿元以上。历年温州海域废弃物处理价值量中,来自3条主要河流入海污染物COD处理的价值量的贡献占主导地位,其次是来自城镇生活污水处理的价值量的贡献;而工业废水处理的贡献相对较低。修正后的温州海域历年废弃物处理价值量,原值和修正值差别很小。

### 3.4 调节服务价值评估

#### 3.4.1 价值量及其组成

2013—2017年温州海域调节服务价值及其组成见表8。由此可知,2013—2017年温州海域调节服务价值变化范围为(63.59—86.25)亿元,其修正值变化范围为(62.22—85.25)亿元,原值和修正值差别很小。2013—2017年间温州海域调节服务价值,以废弃物处理提供的价值为主(56.53%—76.64%),其次是气候调

节服务提供的价值(23.33%—43.45%),二者合计占调节服务价值的99.9%以上,而固碳提供的价值最低,仅不到0.1%。可见,温州海域调节服务价值的贡献主要来自废弃物处理和气候调节提供的服务。由表8还可看到,按温州海域评估空间范围8649 km<sup>2</sup>计算,2013—2017年其调节服务价值平均分布密度为(73.52—99.72)万元/km<sup>2</sup>。

表7 2013—2017年温州海域废弃物处理服务的价值量

Table 7 The value quantity of waste disposal service in Wenzhou coastal waters from 2013 to 2017

年份 Year	工业废水处理的物质量 Physical quantity of industrial wastewater/万 t	工业废水处理的单位成本 Unit cost of industrial wastewater treatment/(元/t)	工业废水处理的物质量 Value quantity of industrial wastewater treatment/万元	生活污水的物质量 Physical quantity of urban domestic sewage/万 t	生活污水处理的单位成本 Unit cost of urban domestic sewage treatment/(元/t)	生活污水处理的物质量 Value quantity of urban domestic sewage treatment/万元
2013	7432.96	4.16	30933.31	43495.10	1.64	71331.97
2014	6020.14	4.08	24588.33	43626.17	1.61	70238.13
2015	6277.54	4.41	27656.58	44234.54	1.57	69448.23
2016	5012.15	4.01	20095.40	46150.65	1.54	71072.01
2017	5316.75	4.18	22224.02	46507.69	1.57	73017.07

年份 Year	主要河流入海污染物COD总量 Total amount of pollutants COD entering the sea from main rivers/万 t	COD治理的单位成本 Unit cost of COD treatment/(元/t)	主要河流入海污染物COD处理的物质量 Value quantity of pollutants COD entering the sea from main rivers/万元	废弃物处理总的价值量 Total value quantity of waste disposal service/万元	废弃物处理总的价值量修正值 Revised value of waste disposal service/万元
2013	59.81	4300	257183	359448.28	347498.71
2014	116.98	4300	503014	597840.46	583803.76
2015	91.70	4300	394310	491414.81	492181.42
2016	93.30	4300	401190	492357.40	503189.26
2017	95.91	4300	412413	507654.09	507654.09

表8 2013—2017年温州海域生态系统调节服务价值及其组成

Table 8 The value and its composition of regulating service in Wenzhou coastal waters from 2013 to 2017

年份 Year	调节服务价值 Value of regulating service		价值平均分布密度 Average distribution density of value/(万元/km <sup>2</sup> )	指标 Index	各项指标价值 Value of each index		各项指标价值占总价值的比例 Proportion of the value of each index to the total value/%
	价值 Value/万元	修正值 Revised value/万元			价值 Value/万元	修正值 Revised value/万元	
2013	635888.68	622234.44	73.52	固碳	140.40	135.73	0.02
				气候调节	276300	274600	43.45
				废弃物处理	359448.28	347498.71	56.53
2014	862482.25	852542.22	99.72	固碳	141.79	138.46	0.02
				气候调节	264500	268600	30.67
				废弃物处理	597840.46	583803.76	69.32
2015	727342.49	726909.30	84.10	固碳	127.68	127.88	0.02
				气候调节	235800	234600	32.42
				废弃物处理	491414.81	492181.42	67.56
2016	642399.91	647034.91	74.27	固碳	142.51	145.65	0.02
				气候调节	149900	143700	23.33
				废弃物处理	492357.40	503189.26	76.64
2017	716828.62	716828.62	82.88	固碳	179.95	179.95	0.03
				气候调节	220700	220700	30.79
				废弃物处理	495948.67	495948.67	69.19

2013—2017 年温州海域调节服务价值及其修正值的变化见图 2。可见,温州海域调节服务价值呈现出先升后降又小幅上升的波动趋势。价值较低的年份为 2013 年和 2016 年,均在 60 亿元以上;价值最高的年份为 2014 年,约为 85 亿元左右。

3.4.2 价值量空间分布

基于 ArcGIS 9.0 软件,把温州海域评估区域划分成尺寸为 100 m×100 m 的单元格,分别以 2013—2017 年温州海域调节服务 3 项指标的价值做图,再将其通过空间叠加运算得到温州海域调节服务价值的空间分布图,初步揭示了其空间分布规律,见图 3。可以看出,历年温州海域调节服务价值的空间分布总体呈现出从近岸向外海逐渐降低趋势,最高值出现在乐清市、龙湾区和洞头区近岸海域。

3.4.3 采用新旧方法评估温州海域调节服务价值的比较

采用本文新方法和国标中旧方法分别评估 2013—2017 年温州海域生态系统调节服务价值,并进行比较,见表 9。结果表明,采用新方法评估得到的历年温州海域调节服务价值是采用旧方法评估得到价值的(6—9)倍左右。

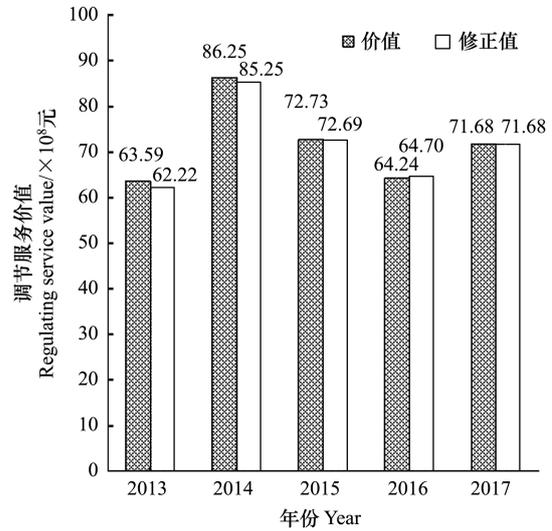


图 2 2013—2017 年温州海域调节服务价值及其修正值的变化  
Fig. 2 The change of regulating service value and its revised value in Wenzhou coastal waters from 2013 to 2017

表 9 采用新旧方法评估 2013—2017 年温州海域生态系统调节服务价值

Table 9 Using new and old methods to evaluate the regulating service value in Wenzhou coastal waters from 2013 to 2017

年份 Year	本文新评估方法 New evaluation method				国标中旧评估方法 Old evaluation method				新方法价值/ 旧方法价值 Value of new method/ value of old method
	功能 类别	价值/ 万元	指标	各项指标 价值/万元	功能 类别	价值/ 万元	指标	各项指标 价值/万元	
2013	调节服务	635888.68	固碳	140.40	调节服务	102324.72	气候调节 (等同于 固碳)	59.44	6.21
			气候调节	276300			—	—	
			废弃物处理	359448.28			废弃物处理	102265.28	
2014	调节服务	862482.25	固碳	141.79	调节服务	94884.54	气候调节 (等同于 固碳)	58.08	9.09
			气候调节	264500			—	—	
			废弃物处理	597840.46			废弃物处理	94826.46	
2015	调节服务	727342.49	固碳	127.68	调节服务	97153.15	气候调节 (等同于 固碳)	48.34	7.49
			气候调节	235800			—	—	
			废弃物处理	491414.81			废弃物处理	97104.81	
2016	调节服务	642399.91	固碳	142.51	调节服务	91228.44	气候调节 (等同于 固碳)	61.03	7.04
			气候调节	149900			—	—	
			废弃物处理	492357.40			废弃物处理	91167.41	
2017	调节服务	716828.62	固碳	179.95	调节服务	95326.73	气候调节 (等同于 固碳)	85.64	7.52
			气候调节	220700			—	—	
			废弃物处理	495948.67			废弃物处理	95241.09	

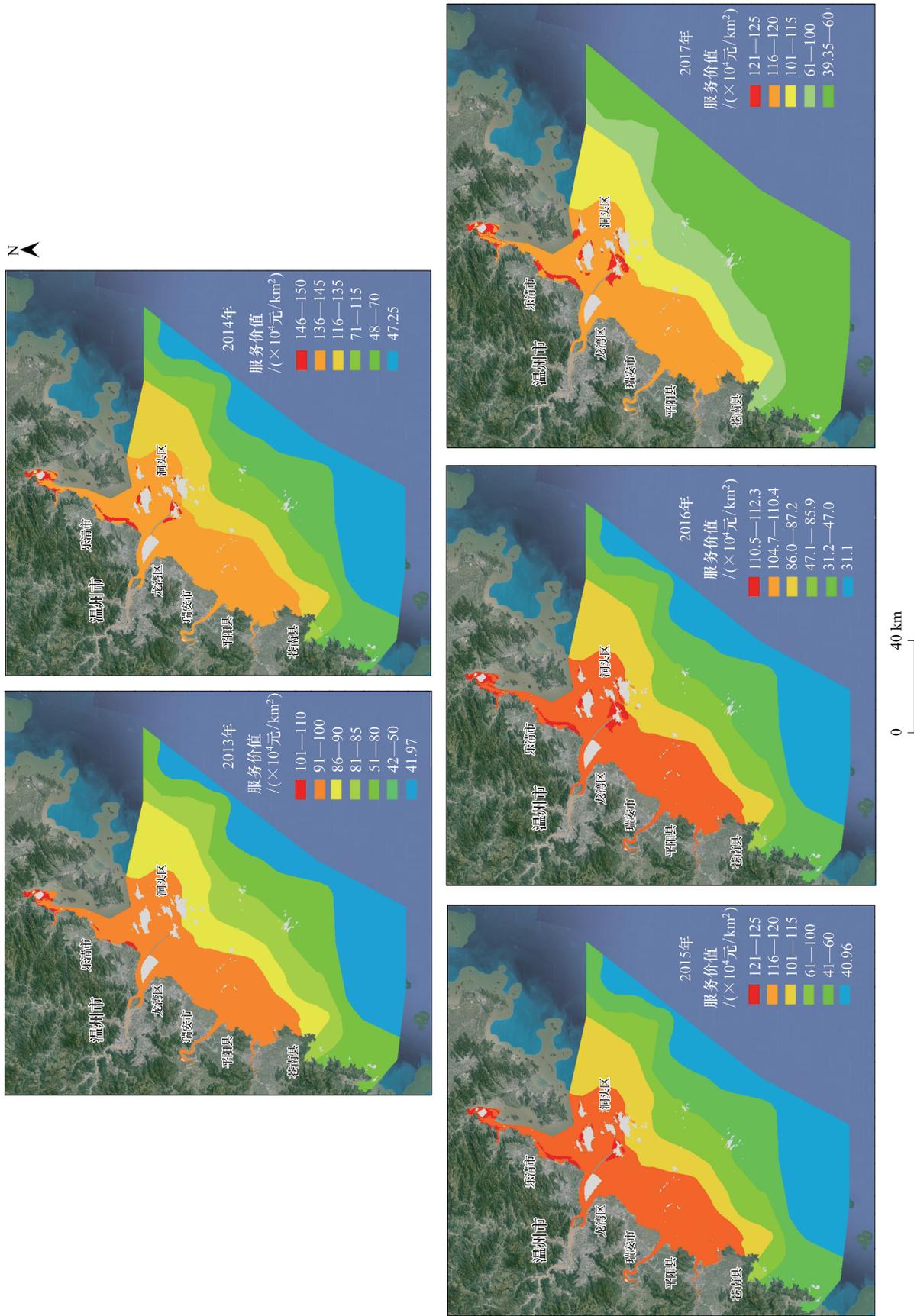


图3 2013-2017年温州海域调节服务价值的空间分布  
Fig.3 The spatial distribution of regulating service value in Wenzhou coastal waters from 2013 to 2017

### 3.5 温州海域调节服务价值对温州市经济发展的贡献

温州海域调节服务价值对其海洋生产总值和地区生产总值的贡献见表 10。可以看出,2013—2017 年间温州海域生态系统提供的调节服务价值相当于同年温州市海洋生产总值的 7.34%—11.88%,相当于同年温州市生产总值的 1.26%—2.00%。由此表明温州市每 1 元海洋调节服务价值支撑着(8.42—13.63)元的海洋生产总值,支撑着(49.89—79.41)元的地区生产总值。

表 10 2013—2017 年温州市海洋调节服务价值对地区生产总值和海洋生产总值的贡献

Table 10 The contribution of marine regulating service value to regional gross domestic product and marine gross domestic product in Wenzhou city from 2013 to 2017

年份 Year	调节服务价值 Regulating service value/亿元	地区海洋生产总值 Regional marine gross domestic product/亿元	地区生产总值(GDP) Regional gross domestic product/亿元	调节服务价值占海洋 生产总值比例 Proportion of regulating service value to marine gross domestic product/%	调节服务价值占 GDP 比例 Proportion of regulating service value to GDP/%
2013	63.59	667.21	4024.50	9.53	1.58
2014	86.25	726.27	4303.05	11.88	2.00
2015	72.73	790.47	4618.08	9.20	1.57
2016	64.24	875.38	5101.56	7.34	1.26
2017	71.68	957.50	5411.59	7.49	1.32

海洋生态系统服务价值与地区产值等经济指标间具有一定的函数关系,该函数关系体现了海洋生态系统服务价值对区域经济发展的贡献程度。我们将温州市海洋调节服务价值与地区第二产业增加值的比值定义为“地区产值对海洋调节服务价值的依存度”,其数值反映海洋调节服务价值对地区产值的贡献度,也体现地区经济增长对海洋调节服务价值的依赖程度,见表 11。由表中数据可知,2013—2017 年温州市海洋调节服务价值对地区第二产业增加值的贡献度为 17%—27%。就多年变化趋势而言,温州市调节服务价值对温州市第二产业增加值的贡献度以 2014 年为界,之前逐渐上升,之后逐渐下降,反映了企业对于该项服务的需求和压力先增后降,这可能与 2014 年以后政府加大环境污染治理,企业转型排污降低有关。

表 11 2013—2017 年温州市第二产业增加值对海洋调节服务价值的依存度

Table 11 The dependence of added value of secondary industry on marine regulating service value in Wenzhou city from 2013 to 2017

年份 Year	调节服务价值 Regulating service value/亿元	第二产业增加值 Added value of secondary industry/亿元	调节服务价值与 第二产业增加值的比值 Proportion of regulating service value to added value of secondary industry/%
2013	63.59	268.58	23.68
2014	86.25	323.13	26.69
2015	72.73	345.74	21.04
2016	64.24	353.54	18.17
2017	71.68	410.73	17.45

## 4 讨论

根据已有研究成果,调节服务是生态系统最主要的生态服务类型,其价值属于间接使用价值,调节服务的价值大大超过直接价值,占生态系统服务价值的 70%以上,甚至近 90%<sup>[30-32]</sup>。陆地上已有相对完善的调节服务价值评估方法<sup>[20]</sup>。针对海洋生态系统,现行国标中已有调节服务评估指标和评估方法,但与陆地生态系统调节服务相应指标和评估方法并不统一。

本文对国标中调节服务的评估指标和方法进行了改进和完善,之后以温州海域为例开展应用验证,评估了 2013—2017 年 5 年间温州海域生态系统提供的调节服务价值,并与国标方法评估的结果进行比对。可以

看出,改进和完善海洋调节服务核算指标和评估方法,能大幅度提高调节服务的价值(是旧方法评估价值的6—9倍),从而使温州海域生态系统服务总价值得到大幅提升。作者认为,开展海洋生态系统服务评估的目的并不是为了上市交易,是为了告诉人们海洋生态系统有多重要。开展海洋生态系统服务价值的核算,需要其相应的评估技术方法作为支撑。因此,提出相对科学合理完善的海洋生态系统服务价值核算方法,以货币的形式直观地展现海洋生态系统服务功能的价值,可以直观评价海洋生态环保实施效果,是生态效益纳入经济社会发展决策的重要内容。

根据评估结果,2013—2017年温州海域调节服务价值变化范围为(63.59—86.25)亿元,价值分布密度变化范围为(73.52—99.72)万元/km<sup>2</sup>。据报道,2009年浙江省近海调节服务价值平均值为103.82万元/km<sup>2</sup>[33]。温州海域调节服务价值分布密度基本上与浙江省处在同一个量级范围,说明本文对温州海域调节服务价值的估算处于合理范围。

评估表明,2013—2017年温州市每1元海洋生态系统调节服务价值支撑着(8.42—13.63)元的地区海洋生产总值,支撑着(49.89—79.41)元的地区生产总值,温州市海洋调节服务价值对其第二产业增加值的贡献度为17%—27%。温州市海洋调节服务价值的贡献主要来自废弃物处理和气候调节提供的价值,海洋的废弃物处理服务节省了大量的废水污水和污染物处理成本,而海洋的气候调节服务又节省了大量的夏季人工降温和冬季人工增温所需要开空调的耗电成本,相当于通过成本缩减的方式影响和放大生产过程和产出规模,同时,成本的降低带来了企业的利润和温州市第二产业增加值的扩大。因此,温州市海洋生态系统调节服务价值,对温州市经济发展有着重要的支撑作用。

本研究对温州市海洋生态系统调节服务价值的评估,反映出近年来温州市海洋生态环境处于良好状态,同时表明海洋生态系统为人类带来了巨大效益,也可为温州市海洋生态文明建设和海洋部门管理工作提供一定的决策依据。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] Daily G C, Söderqvist T, Aniyar S, Arrow K, Dasgupta P, Ehrlich P R, Folke C, Jansson A, Jansson B O, Kautsky N, Levin S, Lubchenco J, Maler K G, Simpson D, Starrett D, Tilman D, Walker B. The value of nature and the nature of value. *Science*, 2000, 289(5478): 395-396.
- [ 3 ] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [ 4 ] Pandeya B, Buytaert W, Zulkafli Z, Karpouzoglou T, Mao F, Hannah D M. A comparative analysis of ecosystem services valuation approaches for application at the local scale and in data scarce regions. *Ecosystem Services*, 2016, 22: 250-259.
- [ 5 ] Costanza R, de Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [ 6 ] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Washington DC: Island Press, 2003.
- [ 7 ] Lange G M, Jiddawi N. Economic value of marine ecosystem services in Zanzibar: implications for marine conservation and sustainable development. *Ocean & Coastal Management*, 2009, 52(10): 521-532.
- [ 8 ] Bürger T, Beaumont N J, Pendleton L, Boyle K J, Cooper P, Fletcher S, Haab T, Hanemann M, Hooper T L, Hussain S S, Portela R, Stithou M, Stockill J, Taylor T, Austen M C. Incorporating ecosystem services in marine planning: the role of valuation. *Marine Policy*, 2014, 46: 161-170.
- [ 9 ] Marre J B, Thebaud O, Pascoe S, Jennings S, Boncoeur J, Coglán L. Is economic valuation of ecosystem services useful to decision-makers? Lessons learned from Australian coastal and marine management. *Journal of Environmental Management*, 2016, 178: 52-62.
- [ 10 ] 张朝晖, 王宗灵, 朱明远. 海洋生态系统服务的研究进展. *生态学杂志*, 2007, 26(6): 925-932.
- [ 11 ] 石洪华, 郑伟, 陈尚, 吕吉斌, 丁德文. 海洋生态系统服务功能及其价值评估研究. *生态环境*, 2007, (3): 139-142.
- [ 12 ] 李宇亮, 温荣伟, 陈克亮. 海洋生态系统服务价值研究进展. *生态经济*, 2017, 33(6): 120-126.
- [ 13 ] 沈满洪, 毛狄. 海洋生态系统服务价值评估研究综述. *生态学报*, 2019, 39(6): 2255-2265.
- [ 14 ] 潘怡, 叶属峰, 刘星, 仵彦卿. 南麂列岛海域生态系统服务及价值评估研究. *海洋环境科学*, 2009, 28(2): 176-180.

- [15] 夏涛, 陈尚, 张涛, 王敏. 江苏近海生态系统服务价值评估. 生态学报, 2014, 34(17): 5069-5076.
- [16] 解学峰, 吴涛, 蒋国俊, 边华菁, 张勇. 乐清湾海洋生态系统服务价值评估. 应用海洋学学报, 2015, 34(4): 496-500.
- [17] 洪钟, 周连宁, 郝文龙, 余麟, 刘晓东. 深圳市海洋生态系统服务价值的估算. 安徽农业科学, 2016, 44(29): 57-59, 120-120.
- [18] 陈尚, 任大川, 夏涛, 李京梅, 杜国英, 王栋, 王其翔, 张涛. 海洋生态资本理论框架下的生态系统服务评估. 生态学报, 2013, 33(19): 6254-6263.
- [19] 陈尚, 任大川, 李京梅, 夏涛, 王栋, 王其翔, 杜国英, 王敏, 王丽, 张涛. GB/T 28058—2011 海洋生态资本评估技术导则. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [20] 欧阳志云, 靳乐山, 甄霖, 徐琳瑜, 葛察忠, 张亚雄, 肖焱. 面向生态补偿的生态系统生产总值(GEP)和生态资产核算. 北京: 科学出版社, 2017.
- [21] 张继红, 刘毅, 张岩, 孙科, 吴文广, 蔺凡, 王巍, 毛玉泽, 徐宗军. 养殖双壳贝类碳汇计量方法碳储量变化法(海洋行业标准报批稿). 2019.
- [22] 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. 地球科学进展, 2005, 20(3): 359-365.
- [23] 褚健婷, 陈锦年, 许兰英. 海-气界面热通量算法的研究及在中国近海的应用. 海洋与湖沼, 2006, 37(6): 481-487.
- [24] 骆敬新, 高志刚, 刘克修, 宋翔洲, 武双全, 范振华. 中国沿岸 ERA-Interim 和 MERRA 感热通量和潜热通量的资料评估. 气象科技进展, 2018, 8(4): 6-14.
- [25] 温州市统计局. 温州统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2014-2018.
- [26] 北京环境交易所和北京绿色金融协会的碳市场研究分析团队. 北京碳市场年度报告 2017.
- [27] 浙江省统计局. 浙江自然资源与环境统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2014-2018.
- [28] 温州市海洋与渔业局. 温州市海洋环境公报. 2013—2017.
- [29] 吴姗姗, 刘容子, 齐连明, 梁湘波. 渤海海域生态系统服务功能价值评估. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(2): 65-69.
- [30] 王莉雁, 肖焱, 欧阳志云, 韦勤, 博文静, 张健, 任苓. 国家级重点生态功能区县生态系统生产总值核算研究——以阿尔山市为例. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(3): 146-154.
- [31] 廖薇, 刘延惠, 曾亚军, 周华, 罗扬. 赤水市生态系统生产总值核算研究. 中国林业经济, 2019, (3): 111-117.
- [32] 杨渺, 肖焱, 欧阳志云, 叶宏, 邓懋涛, 艾蕾. 四川省生态系统生产总值(GEP)的调节服务价值核算. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2019, 45(3): 221-232.
- [33] 黎鹤仙, 谭春兰. 浙江省海洋生态系统服务功能及价值评估. 江苏农业科学, 2013, 41(4): 307-310.