

doi: 10.12131/20180041

柘林湾海洋牧场生态系统服务价值评估

马欢^{1,2}, 秦传新¹, 陈丕茂¹, 林会洁^{1,3}, 段丁毓^{1,2}

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站, 中国水产科学研究院海洋牧场技术重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 国家农业科学渔业资源环境大鹏观测实验站, 广东广州 510300; 2. 上海海洋大学, 上海 201306; 3. 宁波大学, 浙江宁波 315211)

摘要: 采用生态系统服务理论, 对柘林湾海洋牧场建设前后生态系统服务价值进行了系统评估。在此基础上, 运用 ArcGIS 分析了柘林湾海洋牧场网箱养殖区、海藻增殖区、贝类底播区、人工鱼礁区、增殖放流区等不同功能区生态系统服务价值的空间分布特征。结果表明, 2011—2013 年, 柘林湾生态系统服务价值从海洋牧场建设前的 58 613 万元上升至建设后的 67 370 万元。价值构成未发生明显变化, 表现为供给服务价值最高, 文化服务价值次之, 调节服务价值相对较低。柘林湾海洋牧场不同功能区服务功能价值空间分布特征大致为网箱养殖区>海藻增殖区>贝类底播区>人工鱼礁区>增殖放流区。

关键词: 海洋牧场; 生态系统服务; 价值评估; ArcGIS; 空间分布

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2019)01-0010-10

Valuation of ecosystem service of marine ranching in Zhelin Bay

MA Huan^{1,2}, QIN Chuanxin¹, CHEN Pimao¹, LIN Huijie^{1,3}, DUAN Dingyu^{1,2}

(1. Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Key Laboratory of Marine Ranching Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences; Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment; National Agricultural Scientific Fishery Resources and Environment Dapeng Observation Experimental Station; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Guangzhou 510300, China; 2. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: We evaluated the value of ecosystem service before and after the construction of marine ranching in Zhelin Bay by using the theory of ecosystem service. Besides, we investigated the spatial distribution characteristics of ecosystem service value in different functional areas, such as cage culture area, seaweed culture area, shellfish farming area, artificial reef area as well as enhancement and release area using ArcGIS. The results show that the ecosystem service value of Zhelin Bay marine ranching had increased from 586.13 million CNY to 673.70 million CNY during 2011–2013. However, the value structure did not change significantly, showing the highest value of provisioning service, followed by cultural service value, and relatively low value of regulating service. The spatial distribution characteristics of different functional areas in Zhelin Bay marine ranching are roughly as follows: cage culture area>seaweed culture area>shellfish farming area>artificial reef area>enhancement and release area.

Key words: marine ranching; ecosystem services; valuation; ArcGIS; spatial distribution

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-06-19

资助项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAD18B02); 海洋公益性行业科研专项经费项目 (201405020-2); 国家自然科学基金项目 (41206119); 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201003068); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (2017YB04)

作者简介: 马欢 (1991—), 女, 硕士研究生, 从事海洋生态修复研究。E-mail: mahuan121314@163.com

通信作者: 秦传新 (1978—), 男, 博士, 副研究员, 从事渔业资源保护和环境修复研究。E-mail: qincx@scsfri.ac.cn

近年来, 由于过度捕捞、环境污染、气候变化等原因, 海洋渔业资源严重衰退, 近海渔业资源和环境现状更是不容乐观, 如富营养化导致赤潮、水母暴发等生态灾害频发, 湿地减少引起产卵场、育幼场退化甚至消失等, 使得近海渔业资源的可持续利用受到严重威胁^[1]。在这一现状下, 海洋牧场作为一种保护生态环境、修复渔业资源、优化渔业产业结构的现代渔业生产方式, 成为解决当前渔业资源衰退问题的重要手段^[2]。我国海洋牧场建设始于 20 世纪 80 年代, 经过近几十年的发展, 已初具规模, 发展势头良好^[3-4]。但目前对于海洋牧场研究大多集中在海洋牧场选址^[5-6]、人工鱼礁模型^[7-9]以及渔业资源变动^[10-11]等方向, 对海洋牧场综合效益评估的研究较少。海洋牧场建设究竟会对海域生态、经济、文化等产生哪些影响, 带来哪些效益, 目前还缺乏系统的评估方法。

生态系统服务价值评估是海洋牧场效果评估的重要方法之一。生态系统服务是指人类从生态系统中获得的效益, 包含了自然生态系统和人类改造的生态系统^[12], 在此基础上将生态系统服务划分为供给服务、调节服务、文化服务和支撑服务, 包含了生态系统中经济、生态、社会等多方面价值, 生态系统服务价值评估目前已广泛应用于陆地生态系统服务的评估^[13-15]。柘林湾海洋牧场自 2011 年开始规划建设, 历时 3 年, 逐步形成了一个集生产、休闲、娱乐为一体的海洋牧场示范区, 对整个海域产生了较大影响。文章以柘林湾海洋牧场为例对海洋牧场建设前后供给服务、调节服务、文化服务变化进行评估, 并采用 ArcGIS 对柘林湾海洋牧场不同功能区生态系统服务价值进行空间分析, 在此基础上, 估算出柘林湾海洋牧场建设所产生的生态系统服务价值, 以期为今后海洋牧场系统评估和规划建设提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

柘林湾海洋牧场示范区位于粤东柘林湾和南澳岛海域, 地处闽粤交接地带, 地理位置优越, 岸线蜿蜒, 风景优美, 海洋生物资源丰富。柘林湾海洋牧场建设始于 2011 年, 历时 3 年, 至 2013 年建成了人工鱼礁区、网箱养殖区、增殖放流区、贝类底播区和海藻养殖区等 5 个功能区, 共 $2.067 \times 10^4 \text{ hm}^2$

的海洋牧场示范区(图 1)。其中人工鱼礁区累计投放 7 种礁体共 3 380 个, 礁体投放量 9.68×10^4 立方米, 建成贝壳导流堤 510 m。网箱养殖区内应用中上层网箱浮鱼礁生境营造技术, 拆除部分传统网箱, 优化配置, 建立浅水浮式聚鱼构件示范区面积 667 hm^2 , 深水浮式聚鱼构件示范区面积 127 hm^2 。增殖放流区筛选出紫红笛鲷 (*Lutjanus argentimaculatus*)、红笛鲷 (*L. sanguineus*)、真鲷 (*Pagrosomus major*)、黑鲷 (*Acanthopagrus schlegelii*)、黄鳍鲷 (*A. latus*)、花尾胡椒鲷 (*Plectorhinchus cinctus*) 等鱼类 6 种, 共投放鱼苗 720×10^4 尾; 斑节对虾 (*Penaeus monodon*)、日本对虾 (*P. japonicus*) 等虾类 2 种, 增殖放流 1.4×10^8 尾; 资源产出是投入的 7 倍、回补率 19.2%。贝类底播区筛选出波纹巴非蛤 (*Paphia undulata*)、近江牡蛎 (*Ostrea rivularis*)、寻氏肌蛤 (*Musculus senhousei*)、红肉河蓝蛤 (*Potamocorbula rubromuscula*) 等 4 种经济贝类, 投放贝类苗种 41.6×10^9 粒, 建立贝床示范面积 520 hm^2 , 贝类平均密度为 $11 \text{ 尾} \cdot \text{m}^{-2}$ 。海藻增殖区内建成以龙须菜 (*Asparagus schoberioides*)、马尾藻 (*Scagassum*)、紫菜 (*Porphyra*) 为主打的海藻区示范面积 333 hm^2 , 海藻场平均生物量达 $14 925 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上 [摘自南海水产研究所 2014 年《农业行业专项 (2010030608) 南海生态增殖型海洋牧场中期研究进展》, 未公开发表]。

1.2 数据来源

柘林湾海洋牧场养殖产量与捕捞产量源自 2011 年和 2013 年《广东省渔业统计年鉴》^[16-17],

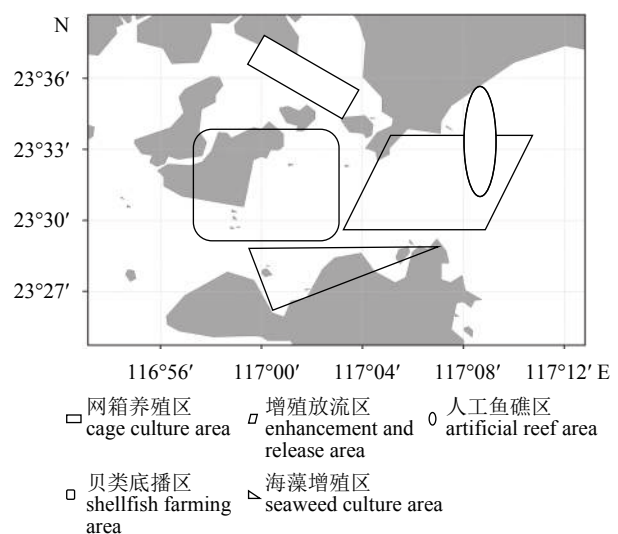


图1 柘林湾海洋牧场示范区

Fig.1 Demonstration area of marine ranching in Zhelin Bay

养殖价格和捕捞价格源自当年南澳水产品批发市场交易价格。柘林湾原材料生产价值主要考虑藻类作为工业原料的价值,据王兆礼等^[18]研究,柘林湾作为原材料的藻类约占藻类年产量的 70%,海藻年产量源自《广东省渔业统计年鉴》。基因资源价值参照广东近海海洋基因资源单位面积价值 $[6.272 \times 10^4 \text{ 元} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}]^{[19]}$ 。

柘林湾调节价值中氧气 (O_2) 生产物质量主要包含近海浮游植物、大型藻类光合作用产生的 O_2 , 而二氧化碳 (CO_2) 固定量不仅包括浮游植物和大型藻类吸收量,还包含了海洋现存生物、底栖生物、潮间带生物等生物体内固定的碳。初级生产力根据海域内叶绿素实测值估算,海域内生物现存量、底栖生物量、潮间带生物量等源自本单位资源调查数据^[20-23], O_2 价格参照工业制氧价格 ($567 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$), CO_2 参照 2008 年碳排放权价格 ($106.2 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$)^[24]。海洋生物储存氮 (N)、磷 (P) 含量取自实测数据^[25], 柘林湾海洋牧场属于二类水质,海洋中化学需氧量 (COD) 和石油类环境容量参照二类水质环境容量标准。生物控制价值参照广东省海洋生态系统服务价值现有成果 $[3.514 \times 10^4 \text{ 元} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}]^{[19]}$ 。人工处理废水价格参照已有成果估算^[26], N 处理价格 $1\ 500 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, P 处理价格 $2\ 500 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, COD 处理价格 $4\ 300 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 石油类处理价格 $7\ 000 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

旅游数据来源于 2011—2013 年《潮州市统计年鉴》和《南澳县统计年鉴》^[27-30]。科研价值通过中国知网等文献搜索引擎检索柘林湾相关文献,科技论文每篇科研经费参照夏涛等^[24]对海洋类科技论文经费投入的研究 (每篇 35.76×10^4 元)。

1.3 柘林湾海洋牧场生态系统服务价值评估方法

结合柘林湾海洋牧场实际情况和数据的可获取程度,根据 Costanza^[31]、陈尚等^[32]、秦传新等^[33]关于海洋生态系统服务价值功能和评估方法的研究,本文选取了养殖生产、捕捞生产、原材料生产、基因资源、 O_2 生产、 CO_2 吸收、水质净化、生物控制、休闲娱乐、科研服务等,共计 3 种服务类型 10 项指标,作为柘林湾海洋牧场的评估指标。

1.3.1 供给服务 是指海洋为人类直接提供产品的功能。柘林湾海洋牧场供给服务主要包括食品供给、原材料供给和基因资源 3 部分,而食品供给主要又包含养殖和捕捞两部分。

1) 养殖价值。主要采用市场价值法估算水产

养殖中鱼类、甲壳类、贝类、藻类和其他等价值。

$$V_{SM} = \sum (Q_{SMi} \times P_{Mi}) \times 10^{-1} \quad (1)$$

式中 V_{SM} 为养殖生产价值 ($\text{万元} \cdot \text{a}^{-1}$); Q_{SMi} 为第 i 类养殖水产品的产量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); $i=1,2,3,4,5$ 分别代表鱼类、甲壳类、贝类、藻类和其他; P_{Mi} 为第 i 类养殖水产品的平均市场价格 ($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2) 捕捞价值。

$$V_{SC} = \sum (Q_{SCi} \times P_{Ci}) \times 10^{-1} \quad (2)$$

式中 V_{SC} 为捕捞生产价值 ($\text{万元} \cdot \text{a}^{-1}$); Q_{SCi} 为第 i 类水产品的捕捞量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); $i=1,2,3,4,5$ 分别代表鱼类、甲壳类、贝类、藻类和其他; P_{Ci} 为第 i 类捕捞水产品的平均市场价格 ($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

3) 原材料生产。主要考虑藻类等作为工业原料的价值,采用市场价值法估算。

$$V_{SS} = Q_{SW} \times P_W \times 10^{-1} \quad (3)$$

式中 V_{SS} 为原材料生产价值 ($\text{万元} \cdot \text{a}^{-1}$); Q_{SW} 为用于工业生产的海藻产量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); P_W 为海藻的平均市场价格 ($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

4) 基因资源。是指海洋生物为人类提供的遗传基因资源,其价值与海域内生物物种数直接相关。柘林湾海域内物种多样、基因资源丰富。价值评估采用效益转移法,参照已有研究成果进行估算。

$$V_G = P_G \times S \quad (4)$$

式中 V_G 为生物控制价值量 ($\text{万元} \cdot \text{a}^{-1}$); P_G 为单位面积生物控制价值量 [$\text{万元} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]; S 为柘林湾海洋牧场海域面积 (km^2)。

1.3.2 调节服务 主要包含气候调节、水质净化和生物控制 3 个部分,其中气候调节包含 O_2 生产和 CO_2 吸收 2 个部分。

1) O_2 生产。主要考虑海洋植物通过光合作用产生 O_2 , 价值采用替代成本法估算。

$$V_{O_2} = Q_{O_2} \times P_{O_2} \times 10^{-4} \quad (5)$$

式中 V_{O_2} 为 O_2 生产价值 ($\text{万元} \cdot \text{a}^{-1}$); Q_{O_2} 为 O_2 生产的物质量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); P_{O_2} 为人工生产 O_2 的单位成本 ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$)。

$$Q_{O_2} = Q_{PP} \times 2.67 \times S \times 365 \times 10^{-3} + Q_A \times 1.19 \quad (6)$$

式中 Q_{PP} 为浮游植物的初级生产力 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; 2.67 为 O_2 转化系数; S 为柘林湾海洋牧场水域面积 (km^2); Q_A 为大型藻类干质量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); 1.19 为大型海藻氧气转化系数。

2) CO_2 吸收。气候调节服务中,海洋吸收 CO_2 , 减少大气中 CO_2 含量缓解温室效应。海洋对 CO_2

的吸收包含了浮游植物、大型藻类及海洋游泳生物、底栖生物、礁体附着生物等。

$$V_{CO_2} = Q_{CO_2} \times P_{CO_2} \times 10^{-4} \quad (7)$$

式中 V_{CO_2} 为气候调节价值 (万元·a⁻¹); Q_{CO_2} 为吸收 CO₂ 的物质质量 (t·a⁻¹); P_{CO_2} 为二氧化碳排放权的市场交易价格 (元·t⁻¹)。

$$Q_{CO_2} = Q_{PP} \times 3.67 \times S \times 365 \times 10^{-3} + Q'_{CO_2} \quad (8)$$

式中 Q_{PP} 为浮游植物的初级生产力 [mg·(m²·d)⁻¹]; 3.67 为 CO₂ 转化系数; S 为柘林湾海洋牧场水域面积 (km²); Q'_{CO_2} 为大型藻类及海洋生物固定 CO₂ 的量 (t·a⁻¹)。

$$Q'_{CO_2} = \sum (Q_{Si} \times C_i) \times 3.67 \times 10^{-2} \quad (9)$$

式中 Q_{Si} 为第 i 类养殖海洋生物的生物量 (包含现存生物量、底栖生物和礁体附着物等, t·a⁻¹); $i=1,2,3,4,5$ 分别代表鱼类、甲壳类、贝类、藻类和其他; C_i 为第 i 类生物的湿质量含碳率 (%); 3.67 为 CO₂ 转化系数。

3) 水质净化调节。主要是指海洋通过一系列生物化学作用将水体中 N、P、COD 及石油类等有害物质转化为无毒无害物质。本文主要估算海洋生物吸收的 N、P, 以及海洋中 COD 和石油类的环境容量。

$$V_w = Q_w \times P_w \quad (10)$$

式中 V_w 为水质净化调节价值 (万元·a⁻¹); Q_w 为有害物质总量 (t·a⁻¹); P_w 为人工处理废弃物价格 (元·t⁻¹)。

$$Q_w = \sum (Q_{Si} \times p_{ij}) \times 10^{-2} + Q'_w \quad (11)$$

式中 Q_{Si} 为第 i 种海洋生物生物量 (t·a⁻¹); p_{ij} 为第 i 种海洋生物第 j 类有毒有害物质含量 (%); 其中 $i=1,2,3,4,5$ 分别代表鱼类、甲壳类、贝类、藻类和其他, $j=1,2$ 分别代表 N、P 等有害物质; Q'_w 表示浮游生物吸收的 N、P 数量, 采用初级生产力的 Redfield 比值估算^[34]。COD 和石油类价值量参照二类水质标准的环境容量估算。

4) 生物控制。主要是通过生物种群的营养动力学机制, 减少相关灾害的损失。单位面积价值参照广东沿海生物控制价值量。

$$V_B = P_B \times S \quad (12)$$

式中 V_B 为生物控制价值量 (万元·a⁻¹); P_B 为单位面积生物控制价值量 [万元·(km²·a)⁻¹]; S 为柘林湾海洋牧场海域面积 (km²)。

1.3.3 文化服务 柘林湾海洋牧场文化服务主要

包含了休闲娱乐和科研服务两方面。

1) 休闲娱乐。

$$V_{ST} = \sum_j^m \sum_i^n (V_{Tj} \times P_{ji}) \quad (13)$$

式中 V_{ST} 为休闲娱乐服务的价值量 (万元·a⁻¹); V_{Tj} 为潮州市或汕头市旅游年收入 (万元·a⁻¹); P_{ji} 为柘林湾海域第 i 个滨海旅游景区的岸线长度系数; m 为评估柘林湾毗邻沿海市数; n 为柘林湾海域潮州市或汕头市滨海旅游景区数。

$$P_{ji} = L_i / \sum_i L_{ji} \quad (14)$$

式中 L_i 为柘林湾海洋牧场第 i 个滨海旅游景区海岸线长度 (km); $\sum_i L_{ji}$ 为柘林湾主要滨海旅游景区海岸线长度总和 (km)。

2) 科研服务。

$$V_{SR} = Q_{SR} \times P_{SR} \quad (15)$$

式中 V_{SR} 为柘林湾科研服务价值 (万元·a⁻¹), Q_{SR} 为科研论文发表数量 (篇·a⁻¹); P_{SR} 为每篇科技论文投入经费 (万元·篇⁻¹)。

2 结果

2.1 柘林湾海洋牧场生态系统服务价值变化

2011—2013 年, 柘林湾海洋牧场生态系统服务价值从 58 613 万元上升至 67 370 万元, 增长 8 756 万元。单位面积价值量由 255.79 万元·km⁻² 上升至 299.54 万元·km⁻², 增长 42.36 万元·km⁻² (表 1)。总体说明, 柘林湾海洋牧场建设促进了海域内生态系统服务价值的上升。

2.2 柘林湾海洋牧场生态系统服务价值构成

2011—2013 年柘林湾海洋牧场生态系统服务价值构成并未发生明显改变, 都表现为供给服务>文化服务>调节服务 (表 1)。

供给服务价值由 38 437 万元上升至 43 079 万元, 但价值比例略有下降, 各项指标大体上表现为养殖价值>捕捞价值>原材料价值>基因资源价值。而养殖价值和捕捞价值都属于食品供给价值, 2011—2013 年, 食品供给价值由 34 673 万元上升至 38 931 万元, 增长了 4 258 万元, 占总增长价值的 48.62%。基因资源价值参照广东近海单位面积价值量, 未发生明显变化。

文化服务价值由 14 535 万元上升至 18 440 万元, 价值比例由 24.80% 上升至 27.37%。其中旅游价值明显上升, 由 14 178 万元上升至 17 725 万元,

表1 柘林湾海洋牧场生态系统服务价值

Tab.1 Ecosystem service value of marine ranching in Zhelin Bay

生态系统服务类型 type of ecosystem service		2011年		2013年	
		价值量/万元 value	价值比例/% ratio	价值量/万元 value	价值比例/% ratio
供给服务 supply service	捕捞生产	9 788	0.17	8 787	0.13
	养殖生产	24 885	0.42	30 143	0.45
	基因资源	1 296	0.02	1 296	0.02
	原材料	2 468	0.04	2 852	0.04
	小计	38 437	0.66	43 079	0.64
调节服务 regulation service	氧气生产	2 026	0.03	1 882	0.03
	二氧化碳吸收	701	0.01	689	0.01
	废弃物处理	2 185	0.04	2 551	0.04
	生物控制	729	0.01	729	0.01
	小计	5 641	0.10	5 851	0.09
文化服务 culture service	科研服务	357	0.01	715	0.01
	休闲娱乐	14 178	0.24	17 725	0.26
	小计	14 535	0.25	18 440	0.27
合计 total	58 613	1.00	67 370	1.00	

增长了 3 546 万元，占总增长比例的 40.50%，价值比例也出现上升趋势。

调节服务价值由 5 641 万元上升至 5 851 万元，增幅不大，价值比例略有下降。各指标价值总体表现为水质调节价值>O₂ 生产>生物控制>CO₂ 吸收。除生物控制价值未发生变化外，O₂ 生产、CO₂ 吸收等价值均出现不同程度的下降，仅有水质调节价值略有上升。

总体而言，柘林湾海洋牧场生态系统服务价值中，食品供给价值与休闲娱乐价值是其价值构成的重要指标。调节服务价值虽然所占比例较小，但对海域内生态环境的调节作用不可忽视。

2.3 柘林湾海洋牧场生态系统服务价值空间分布

柘林湾海洋牧场被分为 5 个功能区，分别是人工鱼礁区、贝类底播区、海藻养殖区、增殖放流区和网箱养殖区。由于文化服务价值中旅游价值和科研价值缺乏相应数据支撑，所以本文只分析了供给服务价值和调节服务价值的空间分布，结果见图 2 和图 3。

图 2-a 表示不同功能区供给服务单位面积价值量，2011 年供给服务单位面积价值表现为网箱养

殖区>海藻增殖区>贝类底播区>增殖放流区>人工鱼礁区；2013 年表现为网箱养殖区>贝类底播区>海藻增殖区>人工鱼礁区>增殖放流区。图 2-b 表示不同功能区调节服务单位面积价值量，2011 年和 2013 年，调节服务单位面积价值量大体表现为海藻增殖区>贝类底播区>人工鱼礁区>增殖放流区>网箱养殖区。海藻增殖区不仅单位面积调节服务价值最高，且增长也最多。

图 3 表示 2011 年和 2013 年供给服务与调节服务单位面积价值量及其空间分布和差值。采用 ArcGIS 对海洋牧场不同功能区进行赋值，并在此基础上利用栅格计算器估算出某一功能区建设前后价值量变化，差值表示 2013 年单位面积价值量减去 2011 年单位面积价值量，差别越大表示供给服务上升越多。

图 3-a 表示柘林湾海洋牧场不同功能区供给服务空间分布，2011 年和 2013 年网箱养殖区供给服务价值明显高于其他功能区，但供给服务差值显示网箱养殖区单位面积价值量下降最多。

图 3-b 表示柘林湾海洋牧场不同功能区调节服务空间分布，海藻增殖区单位面积调节服务价值明

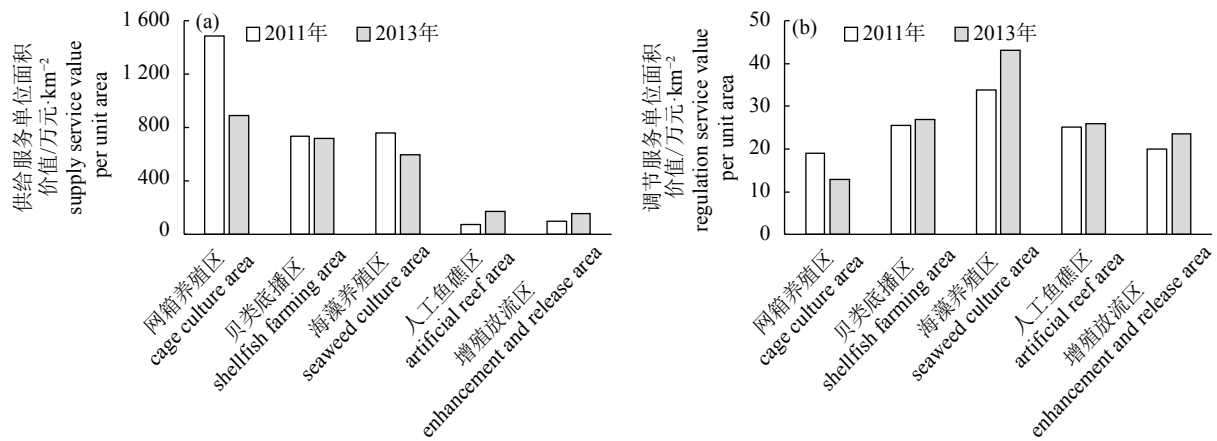


图2 柘林湾海洋牧场各功能区生态系统服务价值

Fig.2 Average ecosystem service value in different functional areas in Zhelin Bay marine ranching

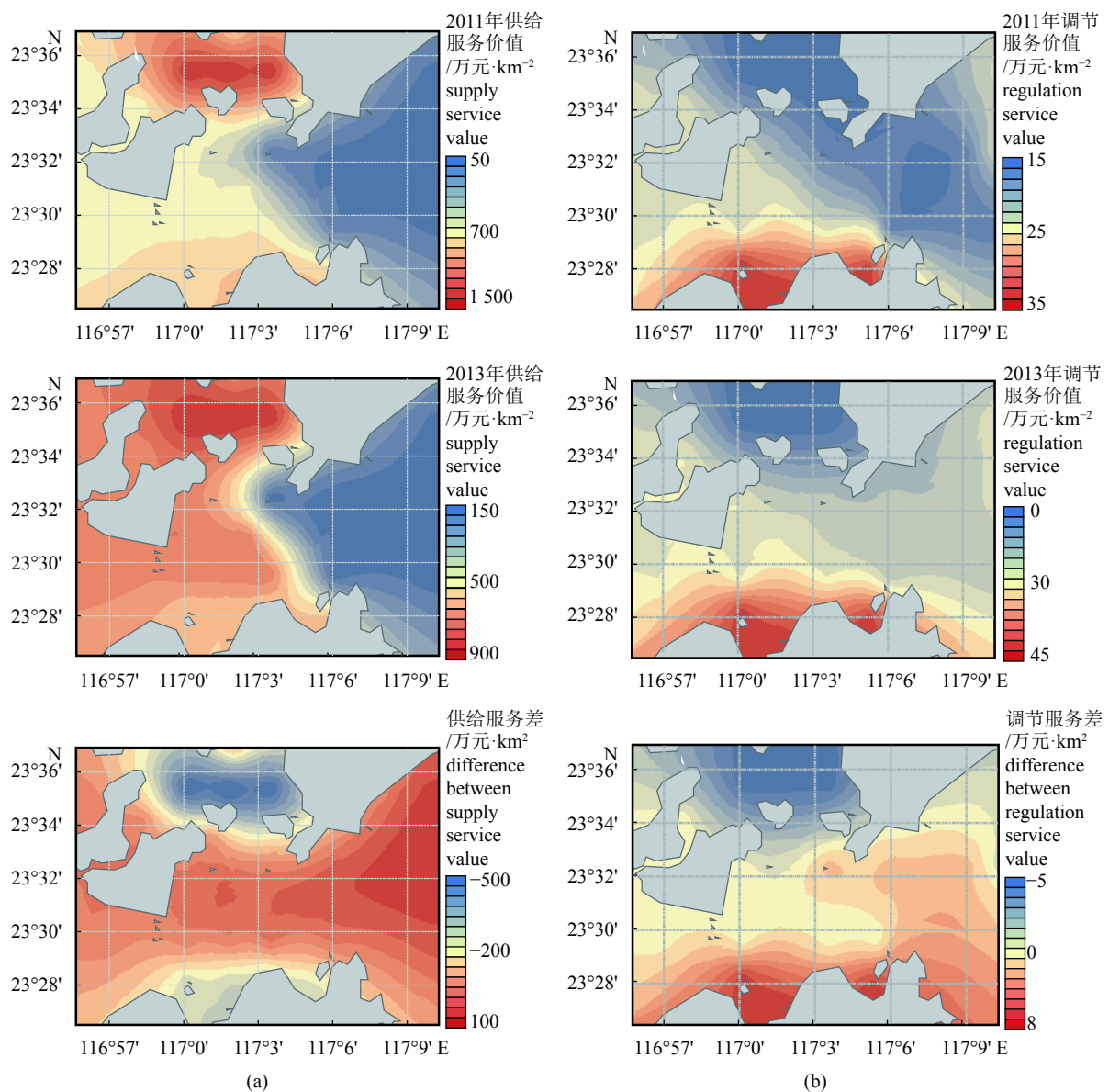


图3 柘林湾海洋牧场各功能区生态系统服务价值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of marine ranching ecosystem service value in different functional areas in Zhelin Bay

显高于其他功能区,且海藻增殖区单位面积价值量增长最多。

3 讨论

3.1 柘林湾海洋牧场生态系统服务价值

2011—2013年柘林湾海洋牧场生态系统服务价值总体呈上升趋势。供给服务总体上升,大体上表现为养殖价值>捕捞价值>原材料价值>基因资源价值。其中养殖生产价值上涨最多,海洋牧场建设后,鱼类、贝类、海藻等养殖产量都出现明显上升,加之价格上涨,因此养殖价值迅速增长。而捕捞生产价值出现轻微下降趋势,主要原因是捕捞产量下降,而贝类和头足类捕捞量下降最为明显,这可能与养殖面积增加,可捕捞海域减小,加之贝类底播区建设,捕捞成本增加有关。原材料价值比重较小,且处于低水平,一定程度上说明了柘林湾海域海产品多直接利用,深加工和工业材料利用较少。海洋牧场建设后,养殖产量已明显上升,但缺乏对海产品的深加工。由于基因资源价值与海域内生物物种数直接相关,而柘林湾海洋牧场建设生物物种并未发生明显变化,故基因资源保持不变。

调节服务总体略有上升,各服务功能价值表现为水质调节价值> O_2 生产>生物控制> CO_2 吸收。其中,水质调节价值最高,主要是由于海洋牧场建设后,柘林湾海域水质得到明显改善,N、P、COD、石油类等含量总体下降,使得海域内环境容量增加,价值量上升。 O_2 生产价值次之,且远高于 CO_2 吸收价值,但值得注意的是,虽然 O_2 生产价值较高,几乎是 CO_2 吸收的2~3倍,但 CO_2 吸收量($t \cdot a^{-1}$)却远高于 O_2 生产($t \cdot a^{-1}$)。造成这种巨大差异的主要原因在于工业制氧和 CO_2 的价格不同, O_2 生产价格采用工业制氧价格($567 \text{元} \cdot t^{-1}$),而 CO_2 市场价格仅为 $106.2 \text{元} \cdot t^{-1}$ 。价格的巨大差异,是造成价值差异的重要原因,并且这种差异还会持续反映在生态系统服务评估的整个过程中。除此之外, O_2 生产价值和 CO_2 吸收价值都出现轻微下降趋势,这主要与初级生产力变化有关,2011—2013年柘林湾海洋牧场初级生产力(C)由 $146.56 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 下降至 $133.45 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。海洋牧场建设过程中人工鱼礁的投放以及礁区形成的上升流^[35],会造成部分海域浑浊,致使透明度下降,从而导致光合作用减弱,初级生产力下降。

文化服务价值中,休闲娱乐大于科研服务,其中休闲娱乐服务和科研服务价值都明显上升,一方面,海洋牧场建设会增加生态系统服务价值,改善海洋生态环境,促进旅游发展;另一方面,海洋牧场建设所带来的科研价值也是多样的,无论是从海洋牧场选址,到人工鱼礁设计,再到海洋牧场资源的增加等都具有非常重大的科研价值。柘林湾海洋牧场人工鱼礁区、贝类底播区,海藻增殖区等功能区的建设,不仅丰富了海域内渔业资源,而且使生态环境得到显著改善;从而增强了柘林湾海域的娱乐性,休闲垂钓、潜水、农家乐等休闲娱乐活动的开展促进了附近海域旅游产业发展,使旅游价值得到明显上升。科研服务价值方面,柘林湾海域内“南海生态增殖型海洋牧场配套技术模式研究与示范”等科研项目的开展,使得海域内各项指标得到系统的调查与分析,且建成后关于海洋牧场的研究源源不断,科研价值突出,所以虽然柘林湾海洋牧场科研价值处于较低水平,但总体呈现出明显上升趋势。

3.2 柘林湾海洋牧场生态系统服务价值构成

柘林湾海洋牧场的建设为柘林湾海域及周边县市生态系统服务价值带来了变化,柘林湾海洋牧场建设后,生态系统服务价值明显上升。价值构成大致表现为供给服务>文化服务>调节服务,且海洋牧场建设前后价值构成基本不变,说明海洋牧场建设并未从根本上改变原有生产方式和格局。这与广东近海^[19]和深圳周边海域^[36]生态系统服务价值构成存在明显差异,广东近海和深圳周边海域价值构成表现为文化服务>调节服务>供给服务。造成这种差异的原因包括许多方面:1)柘林湾海洋牧场是增殖型牧场,食品供给是其生态系统服务价值的主要来源,故供给服务价值最高。而广东近海和深圳周边海域则是以旅游业发展为主,文化服务价值较高,供给服务价值相对偏低。2)广东近海和深圳周边海域调节服务价值较高,这主要是由评估方法及海域不同造成的。以广东近海为例,广东近海 CO_2 吸收价格采用造林成本法和瑞典碳税法均值($650 \text{元} \cdot t^{-1}$)^[19],但造林成本法获取的收益不仅包含了气候调节,还包含了生产 O_2 、防风固沙、涵养水源、调节空气质量、保持水土和维持营养物质循环等多种服务,所以采用单位面积造林成本法估算海洋气候调节并不合适;而国外的 CO_2 排放价格,如

瑞典碳税法等并不适合中国国情^[32]。因此, 本文采用北京环境交易所 CO₂ 排放权价格 (106.2 元·t⁻¹)^[24]。价格的巨大差异再加上不同海域内初级生产力不同, 造成了调节服务的显著差异。

值得注意的是, 各区域生态系统的评估上, 由于区域、评估年份、指标选取以及评估方法的差异, 会产生明显不同的结果^[37], 因此评估结果并不能进行全方位的对比, 但由于都选取了核心指标, 且对于基本的评估理念一致, 所以依然可以作为一种参考。尤其是在价值构成方面, 可以很好地反映一个海域的主导产业。象山港海域生态系统服务价值评估价值构成与柘林湾海洋牧场大体相似^[26], 就是由于两个区域都是海洋牧场区, 渔业生产是其主导, 而海洋牧场的建立也会促进旅游业发展。

3.3 柘林湾海洋牧场不同功能区生态系统服务价值比较

柘林湾海洋牧场的 5 个功能区中, 网箱养殖区依靠人工投饵进行高密度养殖, 食品供给服务价值显著高于其他功能区。但大范围的养殖活动又会明显改变海域内水质环境, 容易造成水体 N、P 含量增加。吴锐等^[38]研究也表明, 柘林湾网箱养殖区 N、P、COD 含量明显高于周边海域, 这导致了网箱养殖区的调节服务明显低于其他功能区。在柘林湾海洋牧场建设过程中对网箱养殖进行了优化整合, 在有序规划的基础上减少了一部分网箱, 因此供给价值出现明显下降趋势, 但对于柘林湾海洋牧场的长期发展有重要意义。

海藻场的建设不仅可以为人类提供食品等物质, 更重要的是可以通过光合作用调节气候, 改善水质, 对海域内生态环境起到修复作用。柘林湾海洋牧场示范区中海藻增殖区设在南澳岛北部海域, 主要以龙须菜、马尾藻、紫菜为主打品种, 藻类一方面通过光合作用吸收大气中 CO₂, 释放 O₂, 气候调节价值上升; 另外, 以叶片直接吸收海水中的无机盐类、金属、重金属等, 对海域内环境改善效果明显^[39]。因此柘林湾海藻增殖区调节价值上升且显著高于其他海域。海藻增殖区无论是供给价值还是调节价值所占比重都较高, 说明海藻增殖区作为海洋牧场建设的一个重要方向, 对区域内的经济效益和生态效益都有较大影响。

柘林湾海洋牧场贝类底播区主要以波纹巴非蛤、近江牡蛎、寻氏肌蛤、红肉河蓝蛤等品种为

主, 贝类底播区通过增养殖的方式使得海域内资源密度明显上升, 但由于养殖面积减小, 单位面积供给价值基本保持不变。而在调节服务中, 一方面养殖贝类通过大量摄食水体中的浮游植物, 影响甚至控制特定水域浮游植物的生长, 进而减弱浮游植物对海域内的气候调节作用^[40]。另一方面, 由于贝类中贝壳储碳效果明显^[25], 因此总体上气候调节变化并不明显。

人工鱼礁区可以为鱼类等水生生物的栖息、生长、繁育提供安全场所, 并营造适宜的生长环境, 从而使水生生物大量聚集, 形成了良好的人工渔场, 使海域内资源密度明显上升。秦传新等^[41]研究发现, 人工鱼礁的构建, 对礁区初级生产力及附着和底栖生物的生物量有显著影响, 从而使水质净化调节、原材料供给服务价值比例上升。本研究同样表明, 人工鱼礁区水质调节价值明显上升。说明人工鱼礁的投放影响并改变了人工鱼礁区海洋生态系统服务价值结构, 对于修复和保护近岸海洋生态环境具有重要意义。

增殖放流区主要是通过人工的增殖放流技术, 提高海域内游泳生物资源量, 以此提高海域内供给服务价值。增殖放流区相对于其他功能区而言, 供给服务较低, 主要是由于增殖放流依然是以自然海域生长为主, 且鱼类具有迁移功能, 对该功能区没有明显影响, 但对于整个海域资源量的上升具有非常重要的作用。

柘林湾海洋牧场 5 个功能区, 相互作用、相互影响共同促进了海域内生态系统服务价值的上升, 但对于各个功能区的内在关联, 还需要进一步研究。

4 结论

2011—2013 年, 柘林湾海洋牧场生态系统服务价值从 58 613 万元上升至 67 370 万元, 增长 8 756 万元, 单位面积价值量上升 42.36 万元·km⁻², 价值构成未产生明显变化, 供给服务价值最高, 文化服务价值次之, 调节服务价值相对较低。根据柘林湾海洋牧场价值量与价值构成的变化可以看出: 供给服务明显上升, 渔业生产是其主导产业, 食品供给在其生态系统服务价值中始终处于重要地位; 文化价值上升较快, 休闲娱乐是海洋牧场价值量增长的重要动力; 调节服务虽然增幅不大, 但其对海域内生态环境的调节作用不可忽视。柘林湾海洋牧场不

同功能区服务功能价值空间分布表现为网箱养殖区>海藻增殖区>贝类底播区>人工鱼礁区>增殖放流区,其中海藻增殖区无论是供给服务还是调节服务都处于较高水平。

除此之外,本文采用生态系统服务价值评估柘林湾海洋牧场建设效益,量化了海洋牧场建设对海域生态化境的影响,便于今后的管理和决策。但在评估过程中,未考虑非使用价值,对于物种多样性维持和生态系统多样性维持等服务功能等未做评估,这必然会导致总体评估价值偏低。且采用市场价值法评估,受价格影响较大,而影响市场价格的因素不仅包括产量,还包含了供需关系、交通运输、当地习俗等诸多因素,这些都必然会造成评估结果存在一些偏差。加之目前对于海洋认识和研究的局限性,也会造成海域内一些服务功能未考虑。总体而言,柘林湾海洋牧场评估反映了海洋牧场建设对海域的影响,但评估价值比实际价值偏小。因此,进一步完善海洋牧场生态系统服务类型和评估方法,将是海洋牧场价值评估的研究重点。

参考文献:

- [1] 金显仕, 窦硕增, 单秀娟, 等. 我国近海渔业资源可持续产出基础研究热点问题[J]. 渔业科学进展, 2015, 36(1): 124-131.
- [2] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1133-1140.
- [3] 张国胜, 陈勇, 张沛东, 等. 中国海域建设海洋牧场的意义及可行性[J]. 大连海洋大学学报, 2003, 18(2): 141-144.
- [4] 陈力群, 张朝晖, 王宗灵. 海洋渔业资源可持续利用的一种模式——海洋牧场[J]. 海岸工程, 2006, 25(4): 71-76.
- [5] 许强, 章守宇. 基于层次分析法的舟山市海洋牧场选址评价[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(1): 128-133.
- [6] BARBER J S, CHOSID D M, GLENN R P, et al. A systematic model for artificial reef site selection[J]. New Zeal J Mar Fresh, 2009, 43(1): 283-297.
- [7] LIU Y, ZHAO Y P, DONG G H, et al. A study of the flow field characteristics around star-shaped artificial reefs[J]. J Fluids Struct, 2013, 39(5): 27-40.
- [8] BURT J, BARTHOLOMEW A, BAUMAN A, et al. Coral recruitment and early benthic community development on several materials used in the construction of artificial reefs and breakwaters[J]. J Exp Mar Bio Ecol, 2009, 373(1): 72-78.
- [9] SMITH J A, LOWRY M B, SUTHER I M. Fish attraction to artificial reefs not always harmful: a simulation study[J]. Ecol Evol, 2015, 5(20): 4590-4602.
- [10] 张俊, 陈丕茂, 房立晨, 等. 南海柘林湾-南澳岛海洋牧场渔业资源本底声学评估[J]. 水产学报, 2015, 39(8): 1187-1198.
- [11] 陈勇, 杨军, 田涛, 等. 獐子岛海洋牧场人工鱼礁区鱼类资源养护效果的初步研究[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(2): 183-187.
- [12] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008: 1-36.
- [13] MARTIN-LÓPEZ B, GÓMEZ-BAGGETHUN E, GARCÍA-LLORENTE M, et al. Trade-offs across value-domains in ecosystem services assessment[J]. Ecol Indic, 2014, 37(A): 220-228.
- [14] RAUDSEPP-HEARNE C, PETERSON G D, BENNETT E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [15] NIETO-ROMERO M, OTEROS-ROZAS E, GONZÁLEZ J A. Exploring the knowledge landscape of ecosystem services assessments in Mediterranean agroecosystems: insights for future research[J]. Environ Sci Policy, 2014, 37(3): 121-133.
- [16] 广东省统计局. 广东省渔业统计年鉴[M]. 北京: 北京统计出版社, 2012: 151-158.
- [17] 广东省统计局. 广东省渔业统计年鉴[M]. 北京: 北京统计出版社, 2014: 145-147.
- [18] 王兆礼, 张汉华, 朱长波, 等. 深澳湾养殖生态系统服务功能价值评估[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(3): 378-382.
- [19] 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, 38(23): 136-140.
- [20] 舒黎明, 陈丕茂, 黎小国, 等. 柘林湾及其邻近海域大型底栖动物的种类组成和季节变化特征[J]. 应用海洋学学报, 2015, 34(1): 124-132.
- [21] 舒黎明, 陈丕茂, 秦传新, 等. 柘林湾-南澳岛潮间带冬夏的两季大型底栖动物种类组成及优势种[J]. 生态学杂志, 2016, 35(2): 423-430.
- [22] 陈海刚, 马胜伟, 蔡文贵, 等. 粤东柘林湾海域人工鱼礁投放前海水环境质量分析与评价[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 48-51.
- [23] 彭璇, 马胜伟, 陈海刚, 等. 夏季柘林湾-南澳岛海洋牧场营养盐的空间分布及其评价[J]. 南方水产科学, 2014, 10(6): 27-35.
- [24] 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.
- [25] 马欢, 秦传新, 陈丕茂, 等. 南海柘林湾海洋牧场生物碳储量研究[J]. 南方水产科学, 2017, 13(6): 56-64.
- [26] 程飞, 纪雅宁, 李偲莹, 等. 象山港海湾生态系统服务价值评估[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(2): 222-228.
- [27] 潮州市统计局. 潮州市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012: 254.
- [28] 潮州市统计局. 潮州市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014: 294-296.
- [29] 汕头市统计局. 汕头市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012: 318-321.
- [30] 汕头市统计局. 汕头市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社,

- 2014: 288-291.
- [31] COSTANZA R. Social goals and the valuation of ecosystem services[J]. *Ecosystems*, 2000, 3(1): 4-10.
- [32] 陈尚, 任大川, 夏涛, 等. 海洋生态资本理论框架下的生态系统服务评估[J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6254-6263.
- [33] 秦传新, 陈丕茂, 张安凯, 等. 珠海万山海域生态系统服务价值与能值评估[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1847-1853.
- [34] 王保栋, 陈爱萍, 刘峰. 海洋中 Redfield 比值的研究[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(2): 232-235.
- [35] LIU T L, SU D T. Numerical analysis of the influence of reef arrangements on artificial reef flow fields[J]. *Ocean Eng*, 2013, 74(6): 81-89.
- [36] 秦传新, 陈丕茂, 贾晓平, 等. 深圳市周边海域海洋生态系统服务功能及价值的变迁[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2012, 58(1): 54-60.
- [37] 江波, 陈媛媛, 肖洋, 等. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估[J]. *生态学报*, 2017, 37(8): 2497-2505.
- [38] 吴锐, 雷永乾, 王畅, 等. 粤东柘林湾养殖区海水富营养化评价[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(10): 210-215.
- [39] 章守宇, 孙宏超. 海藻场生态系统及其工程学研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1647-1653.
- [40] 杨红生. 滤食性贝类对养殖海区环境影响的研究进展[J]. *海洋科学*, 1998, 22(2): 42-44.
- [41] 秦传新, 陈丕茂, 贾晓平. 人工鱼礁构建对海洋生态系统服务价值的影响——以深圳杨梅坑人工鱼礁区为例[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2160-2166.

本刊网站全新改版, 推出优先出版服务

为适应数字时代发展要求, 为作者、读者、审者等搭建一个交流学术、传播信息、展示成果的良好平台, 提升用户体验, 近日, 经编辑部精心策划的《南方水产科学》新版网站上线了。

新网站在设计上体现水产、海洋特色, 采用主流的宽屏分辨率, 具有手机端自适应界面。网站除了提供全文 HTML 浏览和高清 PDF 文件下载外, 在布局和内容上突出了优先出版服务。

长期以来, 科技论文发表时滞长(超过 1 年)一直困扰着科技工作者和办刊人, 也影响了科技期刊的发展。此次网站改版, 本刊推出优先发表服务, 以进一步缩短出版时滞, 提高传播效率。优先出版的论文是已经过审稿、修改、编辑加工和初校后的录用稿, 其个别内容可能与最终的发表版本稍有差异, 但发布时已完成了 DOI 注册, 其论文版权与印刷版版权完全一致。一般情况下, 本刊通过终审的文章, 2 个月内可在网上发表, 实现优先出版。

此外, 网站还增加了服务功能, 提供在线 QQ 临时对话服务, 方便作者、读者等咨询有关投稿、发表、征订等问题, 进一步加强沟通与交流。

新时代, 新机遇, 新挑战, 我们将结合期刊的定位和特色, 坚持高标准、严要求, 聚焦水产科学研究的最新成果和热点、重点问题, 努力将《南方水产科学》建设成为高水平的学术性期刊。

《南方水产科学》编辑部

2018 年 12 月 20 日