海洋生态系统服务的内涵和损失评估的进展及争议

张　蓬[1,2], 石　仞[1], 丁　丽[2], 孙禾琳[2], 葛林科[1,2]

(1. 陕西科技大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 国家海洋环境监测中心 国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为实现充分补偿污染事故造成的海洋生态环境损害的目的, 应当合理地评估生态环境损害的程度并将损失货币化。其中, 海洋生态系统服务价值的损失评估是至关重要的组成部分。本文首先回顾了国内外学者对海洋生态系统服务的定义、分类指标体系和价值的研究进展, 然后提出目前评估海洋生态系统服务的损害程度和货币化损害方法中存在的争议和问题, 包括: 衡量海洋环境质量和生态系统变化的指标的单一性、文化服务的定义、指标和估算方法的缺陷以及生态系统服务基线的非稳定性等。最后展望了海洋生态系统服务损失评估的未来发展方向, 提出需要深入研究的科学问题和进一步的管理要求。

关键词: 海上污染事故; 海洋生态环境损害; 生态系统服务价值; 基线; 评估方法

中图分类号: F062.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2022)1-0172-09

DOI: 10.11759/hykx20210407001

海运是化学品运输的首选方式, 随着海上运输业的蓬勃发展, 船载化学品和燃料油泄漏导致海洋环境污染事件时有发生, 造成海洋环境质量、生物多样性以及生态系统服务功能的损失。2016 年 6 月 2 日, 我国最高人民法院正式发布了《关于充分发挥审判职能作用为推进生态文明建设与绿色发展提供司法服务和保障的意见》, 明确规定责任人依法承担生态环境修复费用和生态环境服务功能的损失[1]。我国国家标准《GB/T 34546.3—2017 海洋生态损害评估技术导则》中明确了溢油事故导致海洋生态服务价值损失的计算框架。美国国家大气与海洋管理局(NOAA)提出了生境等价分析(habitat equivalency analysis, HEA), 随后进一步发展了资源等价分析法(resource equivalency analysis, REA), 等价分析法成为美国国内计算污染事件损失的首选方法。欧洲专门成立了“欧盟应用资源等价分析法评估环境损害”项目(EAM), 开展 EAM 的工具和案例研究[2-3]。由此可见, 国内外在立法和制度上支持生态服务损害的评估和索赔。

海洋和近岸生态系统被认为是世界上最具生产力的生态系统之一, 海洋自然资源的生物和非生物部分对人类福利提供多种关键的生态服务[4-5]。评估海洋生态系统的服务价值是生态经济学中充满争议和挑战的热点领域之一, 争论的焦点在于海洋生态系统服务的认定和量化方法, 即将生态系统服务的定义引入危险品风险评价工作以及实现生态系统服务损害评估的方法[6]。首先, 本文简要论述了海洋生态系统服务价值的定义、分类组成以及评估指标和计算方法; 然后, 通过分析海洋污染事故导致的生态服务价值损失评估的案例, 总结目前存在的争议和挑战; 最后, 展望海洋生态服务损害评估工作的未来的科研方向和管理要求, 提出相应的建议。

1　海洋生态系统服务的指标体系和价值评估方法

1.1　海洋生态系统服务的定义和范围

最初, 研究者对生态系统服务的分类只是从功能性出发的穷尽性举例[7]。“千年生态系统评估(MEA)”将生态系统服务功能的定义为: 人类从生态系统中获得的效益, 包括生态系统对人类可以产生

收稿日期: 2021-04-07; 修回日期: 2021-10-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC1402405); 国家自然基金项目(22076112)

[Foundation: The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFC1402405; National Natural Science Foundation of China, No. 22076112]

作者简介: 张蓬(1980—), 女, 山东东营人, 教授, 博士, 从事生态损害评估方面研究, E-mail: zhangpeng4477@sust.edu.cn; 葛林科(1980—), 通信作者, 男, 山东济宁人, 教授, 博士, 主要从事环境科学方面研究, E-mail: gelinke@sust.edu.cn

直接影响的供给功能、调节功能和文化功能以及对维持生态系统其他功能具有重要作用的支持功能，然后在这 4 大类的基础上进行了进一步地细分为二级分类[8-9]。Costanza 等[10]将生态系统提供的产品和服务统称为生态系统服务，并将生态系统服务功能分为 17 个类型。Patterson 等[11]将海洋生态系统服务分为提供基于食物网生产过程的直接的物质产出(如渔业生产)、物质循环、污染物和废弃物的转化分解和吸收、海滨娱乐旅游和休闲产业、沿岸土地形成以及文化和将来的科学价值等 6 项服务。我国“海洋生态系统服务功能及其价值评估”研究计划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 4 大类，每一大类包含多项子服务[12]。就我国的典型生态系统而言，森林生态系统提供的服务价值最高，占总量的 46.0%；其中调节服务占 4 大类服务的比例最高，高达 71.31%[13]。丁广瑞等[14]总结了我国近海海洋生态系统的生态服务指标中排名靠前的生态系统服务为：食物生产、文化旅游、气体调节、污染物处理、生物多样性保护和营养物质循环。

1.2 海洋生态系统服务的估算方法和价值

生态系统价值评估是表现生态系统产品和服务价值的过程。某些生态系统服务的价值可以通过市场交易的方式直接或间接地表现出来，例如渔业资源、矿业资源等。然而，有些生态系统服务(如碳汇、气候调节等)则完全被排除在市场交易之外，因此，人类的支付意愿无法通过市场价格体现。对于此类生态系统服务，需要构建一个虚拟的市场，模拟传统市场中商品价格的形成机制[15-16]。表 1 列举了国内外主流的评估方法，不同研究者计算的全球的海洋生态服务价值之间差距较大。总体而言，开放海区和大洋的服务价值最低，典型的海洋生态系统，如海草床和珊瑚礁的生态系统服务价值远远大于其他类型生态系统。随着人们对人类活动和自然环境之间相互作用过程的理解不断加深，生态系统服务价值的概念得到更为广泛的认可，研究者们致力于新理论和新方法的研究，推动管理者、经营者和民众等对生态系统服务的进一步关注。Costanza 等[17]在 2007 年基于近期的生态数据和新的计算方法，对全球的海洋生态系统服务价值进行评估，其估算结果较 1997 年[10]有了大幅提高(表 1)。同时，作者提倡建立多尺度、范围更广的多元化方法。通过这些方法估算与人类福利相关的生态系统服务的货币价值，对提高人们对生态系统服务的理论认识水平和实际估算工作发挥关键作用。

表 1 国内外学者估算生态系统服务价值的方法及其货币价值

Tab. 1 Evaluation methods and monetary value of the ecosystem service in some global areas

生态环境类型	计算年份	服务价值	估算的方法	参考文献
海区	1997	577 美元/(hm^2·a)	支付意愿	[10]
开放大洋区	1997	252 美元/(hm^2·a)		
沿岸	1997	4 052 美元/(hm^2·a)		
河口	1997	22 832 美元/(hm^2·a)		
海草/藻床	1997	19 004 美元/(hm^2·a)		
珊瑚礁	1997	6 075 美元/(hm^2·a)		
大陆架	1997	1 610 美元/(hm^2·a)		
湖泊	2010	106~140 美元/(单个调查对象·人) 169~403 美元/(单处财产·a)	元分析 Meta-analysis	[18]
海区	2007	1 368 美元/(hm^2·a)	支付意愿	[10]
开放大洋区	2007	660 美元/(hm^2·a)		
沿岸	2007	8 944 美元/(hm^2·a)		
河口	2007	28 916 美元/(hm^2·a)		
海草/藻床	2007	28 916 美元/(hm^2·a)		
珊瑚礁	2007	352 249 美元/(hm^2·a)		
大陆架	2007	2 222 美元/(hm^2·a)		

续表

生态环境类型	计算年份	服务价值	估算的方法	参考文献
开放大洋	2012	135 国际元/(hm^2·a)	直接市场价值法、收入要素/生产函数和意愿调查法, Ecosystem Service Valuation Database 中多个数据求平均值	[19]
珊瑚礁	2012	197 900 国际元/(hm^2·a)		
海岸系统	2012	26 760 国际元/(hm^2·a)		
海岸湿地	2012	12 163 国际元/(hm^2·a)		
中国雷州半岛	2012	1.475 8×10^6 元/(km^2·a)	直接市场法、成果参照法、成本替代法、碳税法等	[20]
中国天津滨海新区	2017	4.472 5×10^6 元/(km^2·a)	影子工程市场价格法、成果参照法、替代成本法	[21]
中国桑沟湾	2003—2004	4.240 14×10^6 元/(km^2·a)	市场价值法、影子工程法、替代成本法、旅行费用法	[15]
澳大利亚大堡礁世界遗产区	2014	43 103~45 977 美元/(km^2·a)	新的“整个生态系统法”	[22]
印度 Akkulam-Veli 湿地	2013	7 577~8 952 美元/(hm^2·a)	价值转移法	[23]

注: 1 hm^2=0.01 km^2。自从 1997 年至今, 1 美元对人民币汇率: 6.5~8.29。国际元: 采用购买力平价为转换因子来折算不同国家的货币, 单位是“国际元”。

1.3 评估海洋生态系统服务价值损失的方法

日益增加的人类活动的压力和影响可能会导致海洋生境退化, 生物多样性的损失, 严重地影响海洋生态系统为人类提供福利的能力, 充分评估和赔偿受损的生态系统服务对于维持海洋生态环境健康, 为人类提供可持续的福利具有重要的科学和管理意义。目前, 关于海洋生态损害的评估方法主要有两类——基于受损海洋生态系统服务的单位面积货币价值的经济价值评估, 以及将受损的海洋生态与海洋资源修复到基线状态的等价分析[24]。采用经济价值评估的案例有: “埃克森·瓦尔迪兹”号溢油事故给阿拉斯加海岸的休闲娱乐功能造成了 380 万美元的损失[25]。碳九泄漏事故造成生态系统服务损失的总价值预估为 1.93 亿元[26]。近年来, 美国和欧盟采用的等价分析是基于生态修复评估生态服务损失的重要办法, 目前已经在较多案例中得以应用。美国“World Prodigy”号在美国罗德岛的布瑞顿礁搁浅, 索赔委员会向肇事方索赔 567 000 美元用于修复自然资源[27]。截止到 2000 年, 美国 57 起事故采用了自然资源损害评估(NRDA)的方法进行索赔, 总计 3.973 亿美元[28]。

生态服务损害评估的结果明显地依赖于方法的选择, 评价结果差别较大, 因此, 对于海洋生态服务损失估算的结果仍存在巨大的争议。以“塔斯曼海”号溢油事故为例, 高振会等[29]通过受损害海域的面积、生态功能损失率和生态系统服务的单位面积货币价值的乘积估算海洋生态系统服务损失为 738.17 万元, 修复费用共计 4 964.92 万元。李京梅等[30]基于 REA 的方法, 采用补偿性修复计划——种植盐沼植物的成本估算了受损海域的生态系统服务价值为 6 945.73 万元。在实际的法庭审判中, 海洋生态服务损失的索赔未得到支持, 原因在于海洋生态服务功能损失的鉴定中缺少实际的原始监测数据和法定的计算流程。由此可见, 需要进一步的整合目前的研究成果, 形成一套公认的理论体系, 进而推进生态系统服务损失索赔的制度化发展, 使保障评估和索赔工作有法可依。

2 目前的海洋生态系统服务损失评估工作所面临的挑战

采用经济价值法评估生态服务损失的首要前提是获得受损生态系统的单位面积货币价值当量, 然而该值受到地域特征和生态环境类型的显著影响, 在研究时间、社会经济状况和估算方法等多个因素的共同作用下, 同一类型生态系统的单位面积价值当量跨越范围很广。例如, 面积小、位置偏远的珊瑚礁所能提供的休闲娱乐服务的货币价值可能小于 0.1 国际元/(公顷·年); 然而, 某些游客众多的珊瑚礁的休闲娱乐服务价值则大于 100 万国际元/(公顷·年)。此外, 在实际环境中, 即使生态系统的类型相同, 其所提供的生态服务价值并不总是与生态环境的面积成正比, 这将为基于单位面积价值当量的生态服务损失评估带来偏差[19]。等价分析的理论模型规避了

单位面积价值当量选择的问题，采用替代工程的成本补偿损害。但是，理论模型需要输入的参数较多，包括受损害的程度、受损害生态环境的面积、修复曲线形状、贴现率、修复计划的时长、修复计划提供最大收益的水平和时间等，这些参数的选择和精密度对模型运算的结果产生显著的影响[30-32]。

2.1 非物质服务——文化功能的价值评估

生态系统服务价值当量的研究面临的最大挑战可能来自对一些无法直接或间接带来物质福利的服务的评估。生态系统服务的非物质福利属于“文化服务”类。文化服务在提高生物多样性和增强当地经济方面具有最高的潜力，因此，研究者对文化服务价值的估算愈加重视[33]。“文化”是一个整合了非物质、精神和经验的概念，当计算其价值时常常引起研究者的争论。首先，文化的定义和范围难以界定。目前文化的范围包括美学景观、休闲娱乐、文化继承、科学体育、教育和精神/宗教价值[33-34]。某些与精神相关的景观要素(如教堂、圣坛和圣殿等)被定义为精神服务的指标，则不可以再归类到旅游服务范畴[35]。其次，文化服务的跨分类的现象非常普遍，例如，钓鱼兼顾了休闲娱乐和食品供给的功能，因此可能会造成重复计算[36]。最后，仍未建立明确的文化服务的分类和表征指标[35]。绝大多数研究关注对休闲娱乐价值的评估；对科学研究价值的评估停滞不前，是由于知识产业化所产生的社会经济效益以及转化成为人类可利用的福利难以估算。目前，仅有的科学研究价值估算是通过发表论文的数量和单篇科研经费进行，可比性较差。文化是通过一系列社会、相互沟通和生产活动的过程来决定人与环境的相互作用，文化的价值估算指标体系框架应当更加细化，选择的指标应当对人类与环境的相互作用的表现更加敏感[37-38]。

许多方法曾经被用来评估文化服务价值，这些方法随着时间和地域而发生变化。最早 MEA 开展了大量的问卷调查，获得旅游者的支付意愿和旅游意愿，进而估算休闲娱乐服务的货币价值。另外，有研究者选择食物网为对象，结合专家判断设计问卷调查，构建了基于食物网、营养级与支付意愿之间的关系的新方评估文化服务货币价值的新方法[39]。由于问卷调查需要投入大量的时间和经费，具有地理标签的照片和社交媒体成为新的替代方法，这些照片同样能够反映公众的意愿。通过文本挖掘、信息分类和因素分析等方法解析照片的内容，研究者可以多维度地区分文化服务，获得文化服务的分类和频率，掌握旅游者和当地居民对海洋生态环境的使用状况[33, 40-41]。

总而言之，关于计算非物质服务的方法可以分为 3 类：基于市场价格法(可能有市场价值)，与花费相关的揭示偏好(例如花费在直接消费或者时间花费有关的经验上)和陈述偏好(为增加或者增强某项服务愿意的支出)，或者是建立在花费的基础上的方法，例如为了替代这项非物质服务或者避免受到损害所需的花费。这 3 种方法都有一个主要的缺陷：每一项服务只能赋予“一个价值”[42-43]。而且，与支付意愿相关的方法常常受到社会经济条件、地理区域以及参与调查对象的生态认知和教育程度、收入以及居住地等因素的影响[44]。既然目前的生态服务框架仍努力地将非物质服务包含在内，研究者日益认识到：要么修改生态系统服务的框架，使其更好地依赖于环境的非经济因素和受益人；要么采取全新的立场去审视“文化”的定义，以及人类与自然的相互作用所导致的价值表现[45-46]。因此，越来越多的研究者从当地人、管理者和旅游者的角度出发，探讨他们的活动与海洋生态系统的相互作用及其产生的影响，而且探究生态指标与生态环境提供的福利之间的关系。

2.2 表征生态系统服务变化的指标

通常，海上污染事故并不会导致生态系统服务的完全损失，无论采用经济价值评估还是等价分析法，确定生态系统服务损失的程度都是进行损害评估的一个关键步骤。我国的国家标准《GB/T 34546.2—2017 海洋生态损害评估技术导则》规定溢油事故对生态系统影响程度 s_i 以生态系统健康指数的变化率表示。在国内外研究者应用等价分析法评估生态系统服务损害时，污染事故发生前后的生物指标或者化学物质的浓度常被用作衡量海洋生态系统服务价值变化程度的指标，如表 2 所示。这两类指标可以较大程度地简化补偿受损生态服务的替代工程的计算，但是在许多情况下，基于这两类指标评估事故对公共利益损害不够客观。生物指标通常是采用一个生物过程、种类或者群落来评估环境质量及其时间变化趋势[47]。微生物、藻类、贝类、牡蛎和其他敏感的底栖生物种类，常被用做生物监测或生态系统的模型研究[48-50]。沉积物中化合物的含量易于测定，然而不

是总能准确地反映生态环境的整体服务水平变化。就生物指标而言, 对污染物浓度尤为敏感的底栖生物种群、鱼卵和仔稚鱼的变化对占主要地位的海洋生态系统服务(如调节服务和供给服务)的指示作用微乎其微。例如, 生态系统服务价值数据库(ecosystem services valuation database, ESVD)列举的海洋生态系统提供的调节服务(所占总服务比例范围为: 48.8%~89.4%)包括: 气候调节、水土保持、废物处理和海水净化、减少灾害以及营养盐循环等功能[19]。然而, 底栖和鱼类生物量的变化与这些非生物的服务和福利之间存在着巨大的理论差距, 二者之间缺乏有效的定量关系。

表 2　国内外海洋污染事故实际案例所选择的反映生态系统服务变化的指标

Tab. 2　Indices representing the ecosystem service variation resulting from chemical and oil spill incidents in the world

研究区域	生态服务指标	事故原因	生态环境类型	参考文献
瑞典赫尔辛基港附近西南海区	无脊椎动物的总数、种类密度和总生物量	船只碰撞事故	潮下带	[51]
美国佛罗里达州礁岛群岛国家海洋保护区	钱芥末滨珊瑚和叶火珊瑚的密度	美国 M/V Miss Beholden 搁浅事故	珊瑚礁	[52]
美国爱达荷州科达伦河	鳟鱼种群密度	矿井开发	河流	[53]
天津大沽锚地	初级生产力、次级生产力、经济鱼类、沉积物中油类含量	“塔斯曼海”事故	港口	[29]
美国密西西比湾和莫比尔湾	次级生产力	“深水地平线”石油平台泄漏事故	潮间带沼泽边缘、海岸、牡蛎礁	[54]
我国某海域	红树林大型底栖动物密度、海草床短枝密度、造礁珊瑚覆盖度	模拟石油泄漏事故	红树林	[33]
渤海	底栖生物和非底栖生物(包括浮游幼虫幼体、鱼卵、仔稚鱼等)	蓬莱 19-3 油田漏油事故	海区	[55]

若以代替工程和修复受损生态环境为损失评估的手段, 根据受损害生态系统的类型选择生态系统服务指标具有一定的合理性和科学性, 但目前的案例中采用的指标选择少, 研究相对比较片面。修复的目的仅是恢复受损生态环境的主要的生物功能, 不能涵盖生态系统结构变化。Balcomb 等[39]开发了通过海洋食物网估算文化服务的方法, 该方法选择的生物指标则更为丰富, 包括浮游植物、贝类、水母、鱼类、海鸟和哺乳动物, 他的研究也为损害评估提供了新的思路。在未来的研究中, 应该根据受损害区域的环境化学和食物网中代表生物的损失率、重要程度及其存在状况, 将上述各个指标赋予不同的分值, 整合成为一个能够反映生态服务的变化的指标。

2.3　生态系统服务基线的确定

基于等价分析方法进行生态系统服务损害评估的另外一个关键问题是确定评估的基线, 基线指在事故发生前自然资源和生态系统服务的存在状态。基线是确定污染的责任、明确合适的修复终点和评估损失程度的重要基础数据。定义生态基线有两个难点: ①多数情况下, 研究者缺少未发生损害时描述生态系统功能的数据, ②自然资源和生态系统远非稳定和原始。生态基线包括 3 种类型: 静态基线、动态下降基线、动态上升基线。生态系统服务的恢复曲线常采用线性和逻辑斯蒂(Logistic)型; 在不同类型的基线和修复曲线情况下, 生态系统服务损失的计算结果存在巨大的差异。

仅从生态学定义出发, 传统的基线在研究生态系统服务价值时是不够充分的, 基线还明显地依赖于社会经济特征。从获得过渡期损失和确定补偿修复范围的目的出发, 生态和经济学意义的基线之间是相互联系的。在比较不同类型生态服务损失的方法体系中, 以货币为单位描述基线是一种更加简单和直观的方法。整合基线货币价值具有两个明显的好处: 一是确定事故前对公民和社区具有特殊价值的资源和服务的可能性更高; 二是改进了数据收集过程, 尤其在建立基线和预测价值时, 能够作为一种选择生态变量的辅助方法。此外, 生态系统服务的基线可能持续地退化或恢复, 受到外部冲击或其他因素的影响在短期内非恒定; 而且, 基线会响应社会经济学参数而发生变化, 社会经济参数的变化是

可预测的, 因此, 确定评估基线的方法考虑生态系统服务货币价值的特征更为合理, 用货币价值来描述基线能够对不同类别的服务以及对不同利益相关者的损害进行直观、直接的比较[56]。

3 结论

保护海洋生态环境, 维持海洋生态服务价值水平和经济发展并非是二选一的关系。中国自 2000 至 2010 年之间经济发展与生态环境服务价值呈现同时增长的趋势[57]。社会经济的发展提升了人们对生态服务价值的认知水平和接受程度, 进而推动生态系统服务的指标框架和计算方法框架研究的进步。近几十年来, 中国在基础应用方面取得了丰硕的成果, 但总体而言, 相关研究多为引入型和跟踪型研究, 原创性不足[58]。在将来亟待开展的研究, 总结如下:

1) 整合海洋生态服务指标体系的多个指标评估服务价值损失。海洋生态系统服务的价值由多项服务的价值组成, 指标体系复杂。在采用等价分析的方法进行服务价值损害评估时, 为简化计算流程, 表征生态服务价值损失程度的指标多为单一指标。指标的选取常带有很强的主观性, 同行研究之间无可比性。基于单项服务评价的结果可能与实际情况不符, 且无法避免单一指标波动的负面影响。因此, 建议将几个有代表性的服务类型采取专家评估法等赋予一定权重, 将其整合成为一项服务指标, 根据该指标的变化状况定量地表达整个生态系统服务的变化。

2) 生态服务价值中非物质福利服务的评估。非物质福利或者不具有市场价值的服务主要体现在文化服务当中, 但是对文化服务价值的评估较为主观, 难以给出客观的方法, 因此, 需要重新审视文化的概念与内涵, 对文化服务的表征指标和表现形式进行进一步的梳理。

3) 生态系统服务基线的变化。在实际受损的海洋生态环境中, 生态系统服务的基线极大可能处于变化状态, 筛选用于表征服务价值基线的指标对揭示基线随时间变化的趋势至关重要。当估算海上污染事故导致的生态系统服务价值损失时, 未能考虑资源与生态系统价值的空间流转及其异地实现过程, 忽略了事故发生地的生态系统的修复能力, 不能预测基线的变化, 可能会导致评估产生偏差。因此, 基线的相关研究需要深入。

总而言之, 建立成熟的海洋生态服务价值分类框架和货币化方法框架, 推动科学与政策的相互融合, 促进生态系统服务价值损失的制度化进程, 使生态服务价值研究更好地服务于决策和管理支撑, 对补偿海洋受到污染后引起的生态服务功能损失和制定海洋开发规划具有重要的科学和管理意义。

参考文献:

[1] 蔡先凤, 郑佳宇. 论海洋生态损害的鉴定评估及赔偿范围[J]. 宁波大学学报(人文版), 2016, 29(5): 105-114.
CAI Xianfeng, ZHENG Jiayu. The identification, assessment and extent of compensation for marine ecological damage[J]. Journal of Ningbo University (Liberal Arts Edition), 2016, 29(5): 105-114.

[2] 张蓬, 冯俊乔, 葛林科, 等. 基于等价分析法评估溢油事故的自然资源损害[J]. 地球科学进展, 2012, 27(6): 633-643.
ZHANG Peng, FENG Junqiao, GE Linke, et al. The assessment of natural resource damages caused by oil spill incidents based on equivalency analysis methods[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(6): 633-643.

[3] DESVOUSGES W H, GARD N, MICHEAL H J, et al. Habitat and resource equivalency analysis: a critical assessment[J]. Ecological Economics, 2018, 143: 74-89.

[4] 黄利, 周密. 国际生态系统服务研究动态与地域差异评价[J]. 资源科学, 2020, 42(4): 607-620.
HUANG Li, ZHOU Mi. International ecosystem service research dynamics and regional differences: A bibliometric analysis based on Web of Science data[J]. Resources Science, 2020, 42(4): 607-620.

[5] BUONOCORE E, DONNARUMMA L, APPOLLONI L, et al. Marine natural capital and ecosystem services: An environmental accounting model[J]. Ecological Modelling, 2020, 424: 109029.

[6] FABER J H, MARSHALL S, VAN DEN BRINK P J, et al. Priorities and opportunities in the application of the ecosystem services concept in risk assessment for chemicals in the environment[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 1067-1077.

[7] 沈满洪, 毛狄. 海洋生态系统服务价值评估研究综述[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1-11.
SHEN Manhong, MAO Di. Review of the evaluation of marine ecosystem services value[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): 1-11.

[8] ALCAMO J, HASSAN R, PAULY D, et al. Ecosystems and human well-being: A framework for assessment[M]. Washington DC, USA: Island Press, 2003.

[9] 石洪华, 郑伟, 丁德文, 等. 典型海洋生态系统服务功能及价值评估——以桑沟湾为例[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(2): 3-6.
SHI Honghua, ZHENG Wei, DING Dewen, et al. Valua-

tion of typical marine ecosystem services-A case study in Sanggou Bay[J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(2): 3-6.

[10] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[11] PATTERSON M. Commensuration and theories of value in ecological economics[J]. Ecological Economics, 1998, 25(1): 105-125.

[12] 刘伟峰, 臧家业, 刘玮, 等. 海洋溢油生态损害评估指标及方法初探[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(8): 68-75.
LIU Weifeng, ZANG Jiaye, LIU Wei, et al. The study of ecological loss assessment index and methods derived from marine oil spill[J]. Ocean Development and Management, 2014, 31(8): 68-75.

[13] XIE G D, ZHANG C X, LIN Z, et al. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services[J]. Ecosystem Services, 2017, 26: 146-154.

[14] 丁广瑞, 陈云浩. 滨海城市生态系统服务评价研究——以晋江市为例[J]. 亚热带资源与环境学报, 2018, 13(3): 40-48.
DING Guangrui, CHEN Yunhao. Evaluation of ecosystem services of the coastal city: A case study in Jinjiang[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2018, 13(3): 40-48.

[15] 张朝晖. 桑沟湾海洋生态系统服务价值评估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
ZHANG Zhaohui. The valuation of marine ecosystem services in Sanggou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.

[16] 郭晶. 海洋生态系统服务非市场价值评估框架: 内涵、技术与准则[J]. 海洋通报, 2007, 36(5): 490-496.
GUO Jing. Nonmarket valuation framework for marine ecosystem services: concepts, techniques and principles. Marine Science Bulletin, 2007, 36(5): 490-496.

[17] COSTANZA R, DECROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.

[18] REYNAUD A, LANZANOVA D. A global meta-analysis of the value of ecosystem services provided by lakes[J]. Ecological Economics, 2017, 137: 184-194.

[19] DE GROOT R, BRANDER L, VAN DER PLOEG S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units[J]. Ecosystem Services, 2012, 1(1): 50-61.

[20] 李志勇, 徐颂军, 徐红宇, 等. 雷州半岛近海洋生态系统服务功能价值评估[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2012, 44(4): 133-137.
LI Zhiyong, XU Songjun, XU Hongyu, et al. Value assessment of offshore marine ecosystem service in Leizhou Peninsula[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2012, 44(4): 133-137.

[21] 马玉艳, 屠建波, 张秋丰, 等. 天津滨海新区围填海工程对海洋生态系统服务功能价值的损失评估[J]. 海岸工程, 2017, 36(3): 65-71.
MA Yuyan, TU Jianbo, ZHANG Qiufeng, et al. Loss appraisal on sea reclamation project to marine ecosystem service function value in Binhai New Area of Tianjin[J]. Coastal Engineering, 2017, 36(3): 65-71.

[22] STOECKL N, FARR M, LARSON S, et al. A new approach to the problem of overlapping values: a case study in Australia's Great Barrier Reef[J]. Ecosystem Services, 2014, 10: 61-78.

[23] GHERMANDI A, SHEEL A M, JUSTUS J. Integrating similarity analysis and ecosystem service value transfer: results from a tropical coastal wetland in India[J]. Ecosystem Services, 2016, 22: 73-82.

[24] 童晨, 李加林, 黄日鹏, 等. 陆源污染生态损害评估及其补偿标准研究——以象山港为例[J]. 海洋通报, 2018, 37(6): 88-97.
TONG Chen, LI Jialin, HUANG Ripeng, et al. Study on evaluation of ecological damage and compensation standard of land: based pollution in the Xiangshan Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(6): 88-97.

[25] HAUSMAN A J, LEONAR K G, MCFADDEN D. A utility-consistent, combined discrete choice and count data model assessing recreational use losses due to natural resource damage[J]. Journal of Public Economics, 1995, 56(1): 1-30.

[26] 李志攀, 税伟, 吴朝玮, 等. C9 泄漏事故对海湾生态系统服务的影响评估——以 x 海湾为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1735-1745.
LI Zhipan, SHUI Wei, WU Zhaowei, et al. Evaluating the impacts of C9 leakage on bay ecosystem services: A case study in x bay[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1735-1745.

[27] BURLINGTON L B. An update on implementation of natural resource damage assessment and restoration under OPA[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2002, 7(1): 23-29.

[28] OFIARA D D. Natural resource damage assessments in the United States: rules and procedures for compensation from spills of hazardous substances and oil in waterways under US jurisdiction[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(2): 96-110.

[29] 高振会, 杨建强, 王培刚. 海洋溢油生态损害评估的理论、方法及案例研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2007.
GAO Zhenhui, YANG Jianqiang, WANG Peigang. The studies on theories, methods and cases of ecological damage assessment derived from marine oil spill[M]. Beijing: China Ocean Press, 2007.

[30] 李京梅, 王晓玲. 基于资源等价分析法的海洋溢油生态损害评估模型及应用[J]. 海洋科学, 2012, 36(5): 98-102.
LI Jingmei, WANG Xiaoling. A model based on the resource equivalency analysis method to evaluate marine ecological damage by oil spill[J]. Marine Sciences, 2012, 36(5): 98-102.

[31] 许志华, 李京梅, 杨雪. 基于生境等价分析法的罗源湾填海生态损害评估[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(1): 13-19.
XU Zhihua, LI Jingmei, YANG Xue. Ecological damage assessment of Luoyuan bay reclamation based on habitat equivalency analysis[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(1): 13-19.

[32] 张继伟, 袁征, 王金坑. 基于生境等价分析法的溢油生态损害评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 162-166.
ZHANG Jiwei, YUAN Zheng, WANG Jinkeng. Assessment of ecological damages caused by oil spill based on Habitat Equivalency Analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 162-166.

[33] LEE J H, PARK H J, KIM I, et al. Analysis of cultural ecosystem services using text mining of residents' opinions[J]. Ecological Indicators, 2020, 115: 106368.

[34] CHAKRABORTY S, SAHA S K, SELIM S A. Recreational services in tourism dominated coastal ecosystems: Bringing the non-economic values into focus[J]. Journal of Outdoor Recreation and Tourism, 2020, 30: 100279.

[35] HERNÁNDEZ-MORCILLO M, PLIENINGER T, BIELING C. An empirical review of cultural ecosystem service indicators[J]. Ecological Indicators, 2013, 29: 434-444.

[36] SCHOLTE S S K, VAN TEEFFELEN A J A, VERBURG P H. Integrating socio-cultural perspectives into ecosystem service valuation: a review of concepts and methods[J]. Ecological Economics, 2015, 114: 67-78.

[37] PROPPER M, HAUPTS F. The culturality of ecosystem services. Emphasizing process and transformation[J]. Ecological Economics, 2014, 108: 28-35.

[38] CHURCH A, FISH R, HAINES-YOUNG R, et al. UK National Ecosystem Assessment Follow-on. Work Package Report 5: Cultural ecosystem services and indicators[R/OL]. [2014-01-01]. http://uknea.unep-wcmc.org/LinkClick.aspx?fileticket=10%2FZhq%2Bgwtc%3D&tabid=82.

[39] BAULCOMB C, FLETCHER R, LEWIS A, et al. A pathway to identifying and valuing cultural ecosystem services: An application to marine food webs[J]. Ecosystem Services, 2015, 11: 128-139.

[40] GHERMANDI A, CAMACHO-VALDEZ V, TREJO-ESPINOSA, H. Social media-based analysis of cultural ecosystem services and heritage tourism in a coastal region of Mexico[J]. Tourism Management, 2020, 77: 104002.

[41] KEELER B L, WOOD S A, POLASKY S, et al. Recreational demand for clean water: evidence from geotagged photographs by visitors to lakes[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2015, 13(2): 76-81.

[42] MILCU A I, HANSPACH J, ABSON D, et al. Cultural ecosystem services: A literature review and prospects for future research[J]. Ecology & Society, 2013, 18(3): 261-272.

[43] KENTER J O, O'BRIEN L, HOCHLEY N, et al. What are shared and social values of ecosystems[J]. Ecological Economics, 2015, 111(C): 86-99.

[44] 杨曼莉. 收入差距是否影响环境质量?[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(4): 116-124.
YANG Manli. Does income inequality affect environmental quality?[J]. China population, resources and environment, 2020, 30(4): 116-124.

[45] SMALL N, MUNDAY M I D. The challenge of valuing ecosystem services that have no material benefits[J]. Global Environmental Change, 2017, 44: 57-67.

[46] KENNEDY C J, CHEONG S M. Lost ecosystem services as a measure of oil spill damages: A conceptual analysis of the importance of baselines[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 128(20): 43-51.

[47] HOLT E A, MILLER S W. Bioindicators: using organisms to measure environmental impacts[J]. Nature Education Knowledge, 2010, 3: 8.

[48] SCHUBERT P R, ROLF K, REUSCH T B H, et al. Isotopic signatures of eelgrass (*Zostera marina L.*) as bioindicator of anthropogenic nutrient input in the western Baltic Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 72(1): 64-70.

[49] KEELEY N B, CROMEY C J, GOODWIN E O, et al. Predictive depositional modeling (DEPOMOD) of the interactive effect of current flow and resuspension on ecological impacts beneath salmon farms[J]. Aquaculture Environment Interactions, 2013, 3(3): 275-291.

[50] WATSONS C L, PATERSON D M, QUEIROS A M, et al. A conceptual framework for assessing the ecosystem service of waste remediation: in the marine environment[J]. Ecosystem Services, 2016, 20: 69-81.

[51] COLE G, KRISTROM B. Tank collapse and chemical Release (Helsingborg, Sweden)[R/OL]. [2008-10-31]. http://www.envliability.eu/docs/D12CaseStudies/D12_REMEDE_Tank_Collapse_Sweden_Oct%2008.pdf.

[52] JULIUS S B E, ILIFF J W, WHALE C M, et al. Natural resource damage assessment: M/V Miss Beholden Grounding Site, Western Sambo Reef, Florida Keys National Marine Sanctuary, March 13, 1993[R/OL]. [1999-08-16]. http://www.gc.noaa.gov/gc-cd/missbeh2.pdf.

[53] CHAPMAN D, IADANZA N, PENN T. Calculating resource compensation: an application of the service-to-service approach to the Blackbird Mine, hazardous waste site[R/OL]. [1998-10-16]. https://casedocuments.darrp.noaa.gov/northwest/black/pdf/blackfnl.pdf.

[54] BLANCHER E C, PARK R A, CLOUGH J S, et al. Establishing nearshore marine secondary productivity baseline estimates for multiple habitats in coastal Mississippi and Alabama using AQUATOX 3.1 NME for use in the Deepwater Horizon natural resource damage assessment[J]. Ecological Modelling, 2017, 359: 49-68.

[55] 李京梅, 侯怀洲, 姚海燕, 等. 基于资源等价分析法的海洋溢油生物资源损害评估[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3762-3770.
LI Jingmei, HOU Huaizhou, YAO Haiyan, et al. Marine biological damage assessment of oil spill based on resources equivalency analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3762-3770.

[56] 柳荻, 胡振通, 靳乐山. 生态保护补偿的分析框架研究综述[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 380-392.
LIU Di, HU Zhentong, JIN Leshan. Review on analytical framework of eco-compensation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 380-392.

[57] OUYANG Z Y, ZHENG H W, XIAO Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. Science, 2016, 352(6292): 1455-1459.

[58] 巩杰, 燕玲玲, 徐彩仙, 等. 近 30 年来中美生态系统服务研究热点对比分析[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 1-11.
GONG Jie, YAN Lingling, XU Caixian, et al. A comparative review of research highlightes on ecosystem services of China and USA in the latest 30 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 1-11.

Progress and controversy in the connotation and theoretical models of the assessment of marine ecosystem service loss

ZHANG Peng[1, 2], SHI Ren[1], DING Li[1], SUN He-lin[1], GE Lin-ke[1, 2]

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem, National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Received: Apr. 7, 2020
Key words: marine pollution incidents; marine eco-environment damage; ecosystem service value; baseline; evaluation methods

Abstract: To achieve the complete compensation of marine environmental damage caused by ship-borne pollution incidents, the marine ecosystem loss should be assessed and evaluated properly. Therein, the ecosystem serviceloss is an essential component for ecological damage assessment. This paper reviewed the progress of the concept, scale, and category indicators of ecosystem service and payments for ecosystem service. Subsequently, some arguments and controversies on currently used payments for ecosystem service indicators and calculation method frames were elaborated, including the monotonicity of the indicator frame used in assessing the variation extent of the environmental quality and ecosystem service loss, concepts, calculation, and index of culture service as well as the choice of the ecosystem service value baseline. Finally, this paper proposed the future hotspots of ecological and economic research and scientific issues and management requirement of the marine payments for ecosystem service, from which the achievement made in the assessment of payments for ecosystem service would benefit both in scientific research and governing the exploration in marine eco-environment.

(本文编辑: 丛培秀)