

文章编号: 1000-0615(2018)08-1254-09

DOI: 10.11964/jfc.20170610864

浙江和江苏沿海大型海藻养殖的生态服务价值

吕 韩¹, 叶观琼^{1*}, 靳明建², 贾世国³

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316000;
2. 如东县海洋与渔业局, 江苏 南通 226000;
3. 中山大学大气科学学院, 广东 广州 510006)

摘要: 实验以2005—2014年我国浙江省和江苏省沿海的养殖海藻为研究对象, 利用替代成本法和机会成本法对海藻养殖直接与间接生态系统服务价值进行评价。研究结果表明, 养殖海藻场产生的直接生态服务价值主要包含三项: 海藻固碳价值、海水富营养化调节价值和重金属移除价值; 间接生态服务价值包括避免森林转化价值、避免淡水资源、减少化肥和农药使用价值。2014年, 浙江省海藻养殖的三项直接生态服务价值分别达到了40.96万元、196.55万元、60.71万元, 江苏省则分别为25.83万元、123.98万元、38.29万元; 浙江省海藻养殖的四项间接生态服务价值则分别达到46 487.04万元、1 160.78万元、308.52万元、1 176.71万元, 江苏省为29 321.52万元、732.15万元、194.60万元、742.21万元。海藻养殖的生态服务价值远大于海藻的直接经济价值。我国海岸带面积广阔, 海藻养殖潜力巨大。发展海藻养殖不仅可以部分缓解全球粮食危机, 而且对减少碳排放、减少营养盐污染和应对全球变化也具有积极意义。

关键词: 海藻; 养殖; 生态服务; 价值评估; 浙江省; 江苏省

中图分类号: S 968.4

文献标志码: A

自1950年以来, 中国已经建立了大规模的海藻养殖产业, 大约有10种海藻已经在中国整个沿海海域种植, 包括海带(*Laminaria japonica*)、紫菜(*Porphyra*)、裙带菜(*Undaria pinnatifida*)、江蓠(*Gracilaria*)、麒麟菜(*Eucheuma muricatum*)及羊栖菜(*Hizikia fusiforme*)。根据世界粮农组织2013年的统计数据^[1], 近10年来, 全世界的海藻养殖产量都呈现迅速上升的趋势, 而我国海藻养殖产量占全球的50%以上, 其2013年直接经济价值为30.4亿美元。

随着社会经济的迅速发展, 海藻产业面临更大的发展需求, 这不仅体现在食品、药品、纺织等领域, 更反映在海藻对浅海生态环境的改善所起的重要作用。目前, 养殖的大型藻类已成为浅海生态系统的重要生产者^[2], 其生长速率快^[3], 常被认为是高效的生物过滤器^[4-5], 为人

类提供多种生态服务功能, 如通过光合作用固定二氧化碳释放氧气、利用水溶性无机氮和磷缓解沿海海水富营养化、调节pH值、为海洋生物提供多样化^[6]和生产活动的栖息地^[7]等。此外, 海藻养殖也可作为对陆地农业的良好补充。

国内很多学者结合不同的服务对象对我国海藻生态服务进行了研究。权伟等^[8]对我国海藻养殖碳汇强度进行了评估, 让人们认识到海藻养殖在固碳释氧上的巨大作用; 李岩等^[9]和岳冬冬等^[10]根据生态服务功能(包括二氧化碳固定、富营养化调节和重金属移除等)提出了各自的评估方法, 为我国后续海藻养殖生态价值研究提供了系统的参考依据。但是国内在针对生态服务功能评价时对生态服务单价的确定并没有统一的标准, 研究所造成的误差也相对较大, 并且国内尚未有针对海藻养殖所节省或避免的生态系统服务的研究。

收稿日期: 2017-06-04 修回日期: 2017-08-21

资助项目: 基于能值的海洋自然资本空间化评估方法研究(41606124); 污染海域生物修复及其固碳效应研究(2015DFA01410)

通信作者: 叶观琼, E-mail: gqy@zju.edu.cn

考虑到海藻生态服务的重要性, 以及目前海藻生态服务价值评价体系的缺陷, 本研究设计了一套更为系统的评价模型, 采用更为保守且符合我国国情的系统参数对我国海藻养殖生态服务价值进行评估, 并首次将海藻养殖所节省或避免的生态系统服务纳入海藻养殖生态服务研究中。浙江省和江苏省地处我国海岸线中段, 所养殖的海藻种类覆盖了我国除麒麟菜外所有的藻种, 是具有代表性的两个研究区域, 能为后续全国海藻养殖情况的研究提供参考。本研究以浙江省和江苏省为对象, 分析 2005—2014年两省海藻养殖的生态系统服务价值情况, 揭示大型海藻各项生态服务价值的重要性, 为进一步提升浙江省和江苏省的海藻养殖产业发展水平提供理论依据, 并为后续海藻养殖生态服务方面的研究提供了一定的借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

浙江省和江苏省都是我国海洋养殖大省, 同属于亚热带气候。浙江省海域面积为26万km², 拥有6 696 km海岸线, 占全国海岸线总长度的20.9%, 居全国第1位, 其中深水岸线506 km, 占全国30.7%^[11]。江苏省拥有1 070 km海岸线, 居全国第7^[12]。本研究对象包括浙江省和江苏省沿海养殖的大型海藻, 江苏省主要养殖的是条斑紫菜; 浙江省养殖种类繁多, 主要养殖海带、紫菜、羊栖菜。

1.2 生态服务价值评估模型

基于现有生态服务评价体系与大型海藻自身生态服务价值研究^[8-10, 13], 构建了大型海藻生态服务价值评估模型, 本模型中生态服务价值由直接生成和间接节约生态服务两部分组成(表1)。直接生成的服务包括CO₂固定、富营养化调节和重金属移除。间接节约的生态服务即海藻养殖与陆基农业中产生相同数量的营养价值时所节省的服务, 包括相当于节约森林改造过程中损失的服务, 以及水资源、化肥和农药的使用所造成的生态服务损耗。

评估方法和参数确定: 为了计算由海藻养殖直接和间接的生态服务的货币价值(表1), 模型建立主要包括三个步骤: (1)确定估价方法; (2)确定单价并计算生态系统服务量; (3)利用下列公式计算生态服务的价值。

$$Tv = \sum_i v_i = \sum_i \sum_j k_{ij} \cdot p_{ij} \cdot q_{ij}$$

式中, *Tv*为生态服务价值, *v_i*为各项直接和间接生态服务价值, *p*为生态服务单价, *q*是海藻重量(干重), *k*为转化相关系数, *i*为各项生态服务, *j*为海藻种类。

上述模型的建立需设定两个前提条件: (1)假设海藻干重占海藻湿重的10%^[14]; (2)假设1 t干重的海藻的营养价值与1.5 t谷物相当^[15-16]。基于广泛的文献总结, 具体估值方法、转化系数、单价以及参考文献列于表1, 数据来源: (1)公布的政府文件; (2)科学技术文献; (3)与研究区域的当地农民和科研人员面谈。

表 1 海藻养殖生态服务价值评估指标与评估参数

Tab. 1 The indicators and parameters of ecological services evaluation of seaweed aquaculture

	生态服务类型 identified ecological services	评价方法 valuation methods	转化相关系数(<i>k</i>) transfer coefficient	单位价格(<i>p</i>) unit price	参考文献
直接生态服务 generated ecological services	CO ₂ 固定 CO ₂ capture	碳汇价格 carbon credit	碳含量: 27.39% carbon content	35 RMB/t	[8, 17]
	富营养化调节 eutrophication regulation	N、P排放处罚标准 the penalty standard of N, P pollutant discharge	N、P含量 N, P content	8 752 800 RMB/t	[18-19]
	重金属移除 heavy metal removal	重金属排放处罚标准 the penalty standard of heavy metal discharge	90.22 g/t	15 750 RMB/t	[14, 18]
节约生态服务 saved ecological services	节约森林转化面积 avoided transformed forest land	森林服务价值 ecological services value of forest land	0.15 hm ² 土地/t 海藻	49 660 RMB/hm ²	[15, 20]
	节约的水资源 avoided use of water resource	水资源价格 value of water resource	667 t 水/hm ²	1.86 RMB/t	[20-21]
	节约的化肥 avoided use of fertilizer	N、P排放处罚标准 the penalty standard of N, P pollutant discharge	351.60 kg/hm ²	8 752 800 RMB/t	[18, 22]
	节约的农药 avoided use of pesticide	环境污染处罚标准 environmental damage value	50.43 kg 农药/hm ²	24.9 RMB/kg	[22-23]

2 结果

2.1 浙江、江苏两省海藻养殖产业发展情况

浙江是一个海藻养殖大省,与之相毗邻的江苏也是海洋大省,由于地理、历史和渔业政策等原因,两省的海藻养殖产业有一定的差别。近10年来,浙江省海藻养殖由2005年的33 427 t发展到2014年的42 724 t,提高1.28倍左右,其中紫菜养殖产量增至22 752 t,占总海藻养殖产量的53.25%左右,其产量提高1.30倍以上,在浙江海藻养殖产业中起到了举足轻重的作用。除了紫菜养殖外,浙江省还大面积种植海带和羊栖菜,包括少量的江篱以及石莼(*Ulva lactuca*);而江苏省的生产情况为2005年的18 202 t,发展到2014年的26 948 t,提高1.48倍左右,主要以紫菜和海带为主。其中紫菜增至25 786 t,占总海藻养殖产量的95.69%左右,其产量提高1.43倍以上。

浙江的海域环境造就了其独特的区位和生态多样性的海藻产业结构,海藻种类兼有南北品种^[8]:大面积地种植紫菜(46.68%)、海带(24.84%)和羊栖菜(25.67%),还包括少量的江篱(1.75%)以及石莼(1.06%)。相比浙江,江苏主要以紫菜养殖为主(占总海藻养殖面积的93.74%),江篱(4.39%)、海带(1.85%)为辅,还包括少量的裙带菜(0.02%)。其中,2014年浙江、江苏以及全国海洋产业主要产量面积数据如表2所示^[24],在浙江省,海带、紫菜、羊栖菜的养殖面积分别为637、8 437、840 hm²,而在江苏省海藻养殖

表2 浙江省与江苏省海藻养殖产业对比

Tab. 2 Comparison of seaweed farming industry between Zhejiang Province and Jiangsu Province

种类 species	产量/ton production		面积/hm ² area	
	江苏 Jiangsu	浙江 Zhejiang	江苏 Jiangsu	浙江 Zhejiang
海带 <i>Laminaria japonica</i>	351	9 937	700	637
裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i>	6			
紫菜 <i>Porphyra</i>	25 786	22 752	39 024	8 437
江篱 <i>Gracilaria</i>	805	800		25
麒麟菜 <i>Euचेuma muricatum</i>				
羊栖菜 <i>Sargassum fusiforme</i>		9 135		840
石莼 <i>Ulva lactuca</i>		100		39
总量 total	26 948	42 724	39 724	9 978

面积更大,紫菜和海带的养殖面积分别达到39 024和700 hm²。

2.2 浙江、江苏两省生态服务价值

研究表明,江苏省生态服务价值由2005年21 057.28万元增至2014年31 178.58万元,而浙江省则由2005年的38 670.58万元增至2014年的49 431.27万元。2005年至2014年间浙江省和江苏省近海养殖海藻生态服务价值整体呈上升趋势(图1),年均增幅分别为2.77%和4.46%。2004年江苏省年总值最低,为2.11亿元;2008年浙江省年总值最低,为3.87亿元;最高值所在年份两省也有所不同,江苏省在2009年达到海藻养殖高峰,为3.78亿元,接近浙江省的4.63亿元;浙江省在2012年时达到最高值,为5.37亿元,超出江苏省1倍的价值量。以2014年为例,浙江省和江苏省的海藻养殖三项直接生态服务价值分别为40.96万元、196.55万元、60.71万元和25.83万元、123.98万元、38.29万元,而四项间接生态服务价值分别达到46 487.04万元、1 160.78万元、308.52万元、1 176.71万元和29 321.52万元、732.15万元、194.60万元、742.21万元(表3)。

3 讨论

3.1 模型特点及优化

由于本研究将各项生态服务的单位价格修订为符合中国国情的价格,海藻养殖直接生态

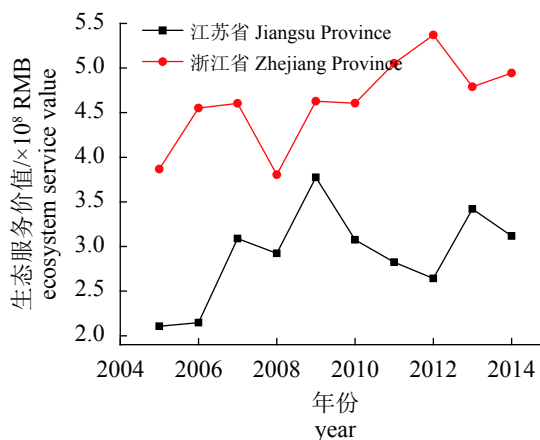


图1 浙江省和江苏省近海养殖海藻生态服务价值比较(2005-2014)

Fig. 1 Comparison of the value of seaweed ecological services of Zhejiang Province and Jiangsu Province (2005-2014)

表 3 浙江省和江苏省生态服务价值情况(2005–2014)

Tab. 3 The ecological services value between Zhejiang Province and Jiangsu Province (2005–2014)		万元										
生态服务价值 ecological services value		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
江苏省 Jiangsu Province	CO ₂ 固定 CO ₂ capture	17.45	17.79	25.59	24.22	31.27	25.47	23.40	21.90	28.35	25.83	
	富营养化调节 eutrophication regulation	81.48	84.39	123.08	116.61	151.75	124.57	113.40	105.72	137.21	123.98	
	重金属移除 heavy metal removal	25.86	26.36	37.93	35.91	46.36	37.76	34.69	32.46	42.02	38.29	
	节约森林转化面积 avoided transformed forest land	19 805.19	20 188.20	29 042.98	27 494.64	35 496.36	28 913.49	26 563.25	24 856.05	32 172.29	29 321.52	
	节约的水资源 avoided use of water resource	494.53	504.10	725.20	686.54	886.34	721.97	663.28	620.65	803.34	732.15	
	节约的化肥 avoided use of fertilizer	131.44	133.98	192.75	182.47	235.58	191.89	176.29	164.96	213.52	194.60	
	节约的农药 avoided use of pesticide	501.32	511.02	735.16	695.96	898.51	731.88	672.39	629.17	814.37	742.21	
	总价值 total value	21 057.28	21 465.83	30 882.67	29 236.35	37 746.18	30 747.03	28 246.70	26 430.92	34 211.08	31 178.58	
	浙江省 Zhejiang Province	CO ₂ 固定 CO ₂ capture	32.04	37.72	38.14	31.53	38.36	38.17	41.88	44.49	39.69	40.96
		富营养化调节 eutrophication regulation	149.63	178.95	183.44	151.76	186.12	186.66	202.92	214.80	192.15	196.55
重金属移除 heavy metal removal		47.50	55.91	56.53	46.73	56.85	56.58	62.07	65.95	58.84	60.71	
节约森林转化面积 avoided transformed forest land		36 371.18	42 810.42	43 287.00	35 782.53	43 535.08	43 326.17	47 530.51	50 500.96	45 052.95	46 487.04	
节约的水资源 avoided use of water resource		908.18	1 068.97	1 080.87	893.49	1 087.07	1 081.85	1 186.83	1 261.00	1 124.97	1 160.78	
节约的化肥 avoided use of fertilizer		241.38	284.12	287.28	237.48	288.93	287.54	315.44	335.16	299.00	308.52	
节约的农药 avoided use of pesticide		920.65	1 083.65	1 095.71	905.75	1 101.99	1 096.70	1 203.13	1 278.32	1 140.41	1 176.71	
总价值 total value		38 670.58	45 519.74	46 028.97	38 049.26	46 294.40	46 073.68	50 542.77	53 700.69	47 908.01	49 431.27	

服务价值比类似研究更加符合中国的实际情况。对于固碳价值,本研究采用了中国目前的碳税价格(35元/t),更加符合中国国情,而不是直接采用造林成本^[25]、Swit^[9]的碳税或其他标准^[8, 26]。N、P污染物的处理价格是采用N、P去除量代替海洋污水总处理量^[27],这极大地降低了N、P污染物的处理价格,更加接近实际价值。并且,在确定N、P和重金属污染物的处理价格时,本研究选取我国污染物排放处罚标准中单价作为替代价格,相比治污价格^[27]和氮、磷处理成本^[9]更具有参考价值。与此同时,本研究首次将间接生态服务纳入中国海藻养殖生态服务价值研究中,这部分价值巨大,可极大地提高人们对海藻水产养殖重要性的认识。

针对不同的海藻物种具有不同的CO₂吸收能力,N、P和重金属移除能力,本研究可对直接生态服务进一步优化以确定不同海藻在直接生

态服务方面的特异性,如紫菜在C、N和P含量方面具有很好的固定能力,海带、江蓠和麒麟菜具有较高的N、P去除能力。而Pb、Cr、Zn和Cu是海藻聚集最多的4种主要金属,其中江蓠具有最强的吸收Pb、Cr和Cu的能力,羊栖菜和石莼次之;羊栖菜和石莼具有最高的Zn吸收能力,分别为279.2和439.3 mg/kg(表4)。如前所述,浙江省和江苏省海域污染情况也呈现区域特异性,通过对海藻生态服务方面特异性的研究将为政府等有关部门在海域管理方面提供帮助。

与此同时,考虑到服务量或服务价值量化的困难性,除了本研究计算的海藻养殖生态服务外,还有一些其他的生态服务需进一步纳入模型的研究当中。(1)栖息地价值:海藻在海洋食物链中作为主要生产者的作用具有较强的生态重要性^[6, 13, 32-34]。(2)氧气排放:据估计,1 t湿

表4 海藻中C、N、P和重金属含量(基于干物质)

Tab. 4 C, N, P and heavy metals content of seaweed species (based on dry weight)

种类 species	碳含量/% C content	氮含量 ^[19)] % N content	磷含量 ^[19)] % P content	重金属含量/(mg/kg) ^[3, 6, 8, 10] heavy metals content			
				Pd	Cr	Zn	Cu
海带 <i>Laminaria japonica</i>	29.3~33.5 ^[28]	3.71	0.52			13.41	7.20
裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i>	36.84 ^[29]	2.69	0.12			7.76	6.41
紫菜 <i>Porphyra</i>	38.19 ^[5]	4.57	0.75				
江蓠 <i>Gracilaria</i>	20.6~30.18 ^[9, 30]	4.53	0.34	24.26	0.39~68.12	63.36~170.7	34.35~62.34
麒麟菜 <i>Eucheuma muricatum</i>		4.09	0.46	1.86	0.06	206.1	1.96
羊栖菜 <i>Hizikia fusiforme</i>	30~32 ^[31]	2.47	0.16	6.66	18.96	19.04~279.2	11.53~49.98
石莼 <i>Ulva lactuca</i>	23.5~30.7 ^[31]	2.75	0.16	2.01~5.57	23.43~39.79	5.13~439.3	7.51~59.58

海藻可以通过光合作用产生0.12 t氧气；如果海藻释放的氧气与工业制氧单价(单价400元/t)相同，2014年浙江省和江苏省的大型海藻可产生相当于2 036万元的氧气。(3)其他服务：如沿海环境保护^[35]、娱乐^[36]、科学教育^[37]等。

3.2 大型海藻的利用现状

我国现有海藻产业生态服务价值并未得到充分开发。首先海藻养殖产品仍以初级产品为主，如干海带、干紫菜等产品，缺乏具有高新技术和核心竞争力的产品，导致海藻产业加工过程中下游产品竞争力严重不足，制约了我国海藻产业的发展。以紫菜养殖为例^[38-40]，浙江省和江苏省都是紫菜养殖大省，养殖品种稍有差别，浙江省养殖的坛紫菜(*P. haitanensis*)多以较分散的小养殖户为主；从事加工的多为作坊式的小加工厂，加工工艺相对落后；企业分散、规模较小，组织化程度不高。以上原因造成浙江地区坛紫菜产量虽然相对较高，生产效益却相对落后。与之对比，江苏省条斑紫菜(*P. yezoensis*)生产加工产业链由于组成与建制成熟、业内及行业间协调整合，产业集群模式基本成型，但在江苏省紫菜产业体系中，中小型企业占主体地位，存在着低端产品竞争激烈，高端产品生产力量不足的现象。再对比邻国日本、韩国，我国海藻的加工技术远远落后，以致于大多数加工机器必须从日本和韩国进口^[41]。其次，我国人民对海藻产品接受度不高，通过市场调研发现，2012年江苏省条斑紫菜出口外销率达到60%~70%，国内消费主要以海苔为主，消费量仅占加

工量的10%~20%。再次，在环境污染防治方面也未引起足够重视，据统计^[42-43]，浙江沿海分别有接近80%和70%的海域的无机氮和活性磷酸盐超过了一类海水水质标准，其中杭州湾、甬江湾、象山湾、三门湾等入海口都存在不同程度的富营养化。而江苏近岸连云港海域、南通海域、盐城海域也存在富营养化问题，海藻作为浅海主要的初级生产者，在富营养化海域修复方面已经表现出极大的潜力，林贞贤等^[44]、杨宇峰等^[45]研究表明大规模养殖海藻是改善海水环境质量的有效手段。

因此，政府应加大对海藻产业科技研发的投入，实现相关企业在产业结构上的调整，从而增强我国海藻产业的竞争力；与此同时，实现海藻产品升级并扩大宣传，提高人们对海藻产品的认可度；最后，充分发挥海藻在生态修复方面的潜力，尽早实现海藻在海域修复方面的价值。

3.3 大型海藻生态价值的重要性

海藻作为浅海生态系统的重要初级生产者，具有类似于热带雨林般的固碳能力^[46]，随着全球气候变暖，碳固定也越来越受到人们的重视，养殖量逐渐增加的海藻将在一定程度上缓解温室效应的压力。其中2014年浙江省和江苏省海藻养殖固碳量分别达到11 702和7 381 t，相当于14 251 hm²森林1年的固碳量^[47]。

无论是浙江省还是江苏省，污染严重的海域主要分布在入海口及海湾地带，越远离海岸的海域污染程度越小^[42-43]，而海藻养殖是解决海

域污染的重要手段之一^[4-5]。据统计, 浙江省每年有11.5万t的营养盐和1 481 t的重金属进入海洋, 江苏省也有2.1万t营养盐和234.1 t的重金属流入海洋^[41-42], 而通过本研究计算, 2014年浙江省通过海藻养殖可以从海洋(近海)中移除1 673 t N、239.8 t P和3 882 kg重金属, 江苏省通过海藻养殖可以移除1 228 t N、198.0 t P和2 449 kg重金属, 目前浙江省和江苏省的海藻养殖量可以分别转移4.9%和6.5%的营养盐和少量的重金属污染物, 这在一定程度上缓解了两省沿海海域的环境压力。

大型海藻较高的食用和营养价值^[29]使得海藻养殖一方面节省了耕地资源, 另一方面也避免了传统农业由于化肥、农药、水土流失造成的生态服务损耗。2014年浙江省通过海藻养殖, 避免了9 399 hm²耕地、3 290 t肥料、6 237 704 t淡水和470.0 t农药的使用, 江苏省通过海藻养殖节约的生态服务相当于避免了5 929 hm²森林转化为耕地, 避免了2 074 t肥料, 3 934 408 t淡水和296.4 t农药的使用。目前浙江省和江苏省的海藻养殖量并不大, 各占用约9%和28%的浅海海域养殖面积^[48], 而江苏省和浙江省绵长的海岸线所具有的浅海面积将为海藻养殖提供巨大的发展空间, 从而可在减轻耕地和粮食危机方面做出更大的贡献。

参考文献:

- [1] FAO. Fisheries and Aquaculture Statistics 2015[M]. Rome: Food & Agriculture Organization. 2016.
- [2] Koru E. Seaweeds for Food and Industrial Applications [M]. Food Industry. 2013, doi: 10.5772/53172.
- [3] Hernández I, Martínez-Aragón J F, Tovar A. Biofiltering efficiency in removal of dissolved nutrients by three species of estuarine macroalgae cultivated with sea bass (*Dicentrarchus labrax*) waste waters 2. Ammonium[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2002, 14(5): 375-384.
- [4] Wu H L, Huo Y Z, Hu M, *et al.* Eutrophication assessment and bioremediation strategy using seaweeds co-cultured with aquatic animals in an enclosed bay in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 95(1): 342-349.
- [5] Marinho G S, Holdt S L, Birkeland M J, *et al.* Commercial cultivation and bioremediation potential of sugar kelp, *Saccharina latissima*, in Danish waters[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2015, 27(5): 1963-1973.
- [6] Liu J Y. Status of marine biodiversity of the China Seas[J]. *PLoS One*, 2013, 8(1): e50719.
- [7] Steneck R S, Graham M H, Bourque B J, *et al.* Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future[J]. *Environmental Conservation*, 2002, 29(4): 436-459.
- [8] 权伟, 应苗苗, 康华靖, 等. 中国近海海藻养殖及碳汇强度估算[J]. *水产学报*, 2014, 38(4): 515-521.
- Quan W, Ying M M, Kang H J, *et al.* Marine algae culture and the estimation of carbon sink capacity in the coastal areas of China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(4): 515-521(in Chinese).
- [9] 李岩, 付秀梅. 中国大型海藻资源生态价值分析与评估[J]. *中国渔业经济*, 2015, 33(2): 57-62.
- Li Y, Fu X M. Analysis and valuation of ecological value of large macroalgae in China[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2015, 33(2): 57-62(in Chinese).
- [10] 岳冬冬, 王鲁民, 耿瑞, 等. 中国近海藻类养殖生态价值评估初探[J]. *中国农业科技导报*, 2014, 16(3): 126-133.
- Yue D D, Wang L M, Geng R, *et al.* Initial assessment of seaweed farming ecological value in coastal waters of China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 16(3): 126-133(in Chinese).
- [11] 黎鹤仙, 谭春兰. 浙江省海洋生态系统服务功能及价值评估[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(4): 307-310.
- Li H X, Tan C L. Evaluation and value evaluation of marine ecosystem services in Zhejiang Province[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(4): 307-310(in Chinese).
- [12] 陈长江. 江苏省与我国其它沿海省份海洋产业比较及对策[J]. *南通航运职业技术学院学报*, 2013, 12(2): 13-18.
- Chen C J. A comparison between the marine industry in Jiangsu Province and that of other coastal provinces and its Countermeasures[J]. *Journal of Nantong Vocational & Technical Shipping College*, 2013, 12(2): 13-18(in Chinese).
- [13] Vázquez J A, Zuñiga S, Tala F, *et al.* Economic valuation of kelp forests in northern Chile: values of goods and services of the ecosystem[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2014, 26(2): 1081-1088.
- [14] Duarte C M. Nutrient concentration of aquatic plants: patterns across species[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(4): 882-889.

- [15] FAO. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.
- [16] Fleurence J. Seaweed proteins: biochemical, nutritional aspects and potential uses[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1999, 10(1): 25-28.
- [17] 国家发展与改革委员会. 中国碳市场行情K线走势图[EB/OL]. [2016-12-25]. <http://www.tanjiaoyi.org.cn/>. National Development and Reform Commission. The K line of carbon market in China[EB/OL]. [2016-12-25]. <http://www.tanjiaoyi.org.cn/> (in Chinese).
- [18] 中华人民共和国国务院. 排污费征收使用管理条例(国务院令 第369号)[EB/OL]. (2015-01-14)[2017-06-05]. <http://www.ghb.gov.cn/doc/2015114/761226012.shtml>. State Council of the PRC. Regulations on the administration of the collection and use of sewage fees: State Council order[2003] NO.369[EB/OL]. (2015-01-14)[2017-06-05]. <http://www.ghb.gov.cn/doc/2015114/761226012.shtml> (in Chinese).
- [19] Xiao X, Agusti S, Lin F, *et al.* Nutrient removal from Chinese coastal waters by large-scale seaweed aquaculture[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 46613.
- [20] Xie G D, Zhen L, Lu C X, *et al.* Applying value transfer method for eco-service valuation in China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(1): 51-59.
- [21] 周龙春. 基于虚拟水的粮食生产水资源成本核算研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. Zhou L C. The study of water cost accounting in food production-based on virtual water theory[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011 (in Chinese).
- [22] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015. Department of Rural Social and Economic Investigation of the National Bureau of Statistics. China Rural Statistical Yearbook 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015 (in Chinese).
- [23] Pimentel D. 'Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States'[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2005, 7(2): 229-252.
- [24] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴2006-2014[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006-2014. Ministry of Agriculture Fishery Bureau. China Fishery Statistical Yearbook 2006-2014[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2006-2014 (in Chinese).
- [25] 陈忠. 广东省红树林生态系统净化功能及其价值评估[D]. 广州: 华南师范大学, 2007. Chen Z. Guangdong Province mangrove forest ecosystem purification function and its value appraisal[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2007 (in Chinese).
- [26] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [27] Liu S, Costanza R, Farber S, *et al.* Valuing ecosystem services: Theory, practice, and the need for a transdisciplinary synthesis[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 1185: 54-78.
- [28] Nayar S, Froese F. Are biofuels from seaweed a viable proposition? Bioeconomic modeling of biogas production and co-generation in an Australian context[J]. *Biofuels*, 2013, 4(4): 371-378.
- [29] Duarte C M, Holmer M, Olsen Y, *et al.* Will the oceans help feed humanity?[J]. *BioScience*, 2009, 59(11): 967-976.
- [30] 张才学, 白富进, 孙省利, 等. 流沙湾冬、春季大型海藻的微量元素分析[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(1): 154-160. Zhang C X, Bai F J, Sun X L, *et al.* Trace elements of spring and winter macroalgae in Liusha Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(1): 154-160 (in Chinese).
- [31] Atkinson M J, Smith S V. C:N:P ratios of benthic marine plants[J]. *Limnology and Oceanography*, 1983, 28(3): 568-574.
- [32] Bertocci I, Araújo R, Oliveira P, *et al.* REVIEW: Potential effects of kelp species on local fisheries[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(5): 1216-1226.
- [33] Seitz R D, Wennhage H, Bergström U, *et al.* Ecological value of coastal habitats for commercially and ecologically important species[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2014, 71(3): 648-665.
- [34] Almanza V, Buschmann A H, Hernández-González M C, *et al.* Can giant kelp (*Macrocystis pyrifera*) forests enhance invertebrate recruitment in southern Chile?[J]. *Marine Biology Research*, 2012, 8(9): 855-864.
- [35] Dubi A, Tørum A. Wave damping by kelp vegetation [C]//Proceedings 24th International Conference on

- Coastal Engineering. Kobe, Japan: ASCE, 1994, doi: [10.1061/9780784400890.012](https://doi.org/10.1061/9780784400890.012).
- [36] Naber H, Lange G M, Hatzios M. Valuation of marine ecosystem services: a gap analysis[R]. Montreal, Canada: Convention on Biological Diversity Report, 2008.
- [37] 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[J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [38] 姜桥, 周德庆, 孟宪军, 等. 我国食用海藻加工利用的现状 & 问题[J]. *食品与发酵工业*, 2005, 31(5): 68-72.
Jiang Q, Zhou D Q, Meng X J, *et al.* Status and problems on edible seaweeds processing and utilization in China[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2005, 31(5): 68-72(in Chinese).
- [39] 丛大鹏, 咸洪泉. 我国海藻的开发利用价值及产业化生产[J]. *中国渔业经济*, 2009, 27(1): 93-97.
Cong D P, Xian H Q. Development of seaweed industry in China[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2009, 27(1): 93-97(in Chinese).
- [40] 张盼盼, 杨锐, 吴小凯. 江苏省条斑紫菜产业现状调研[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2014, 27(1): 18-22.
Zhang P P, Yang R, Wu X K. Laver industry in Jiangsu Province: investigation[J]. *Journal of Ningbo University (NSEE)*, 2014, 27(1): 18-22(in Chinese).
- [41] 徐中平, 腾照军, 王波, 等. 我国海藻生产与加工利用的现状: 存在问题及发展策略[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(30): 14961-14963.
Xu Z P, Teng Z J, Wang B, *et al.* Present status, problems and development tactics of seaweed industries in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(30): 14961-14963(in Chinese).
- [42] 浙江省海洋与渔业局. 2014年浙江省海洋环境公报[EB/OL]. <http://www.zjoaf.gov.cn/attaches/2015/07/14/2015071400021.pdf>, 2015-07-14/2016-08-10.
Zhejiang Ocean and Fishery Bureau. Zhejiang Province marine environment bulletin in 2014[EB/OL]. <http://www.zjoaf.gov.cn/attaches/2015/07/14/2015071400021.pdf>, 2015-07-14/2016-08-10 (in Chinese).
- [43] 江苏省海洋与渔业局. 2014年江苏省海洋环境公报[EB/OL]. <http://hyyyj.jiangsu.gov.cn/attach/GJAttach/1467017689657.pdf>, 2015-02-27/2016-08-10 (in Chinese).
Jiangsu Ocean and Fishery Bureau. Jiangsu Province marine environment bulletin in 2014[EB/OL]. <http://hyyyj.jiangsu.gov.cn/attach/GJAttach/1467017689657.pdf>, 2015-07-14/2016-08-10 (in Chinese).
- [44] 林贞贤, 汝少国, 杨宇峰. 大型海藻对富营养化海湾生物修复的研究进展[J]. *海洋湖沼通报*, 2006(4): 128-134.
Lin Z X, Ru S G, Yang Y F. Prospect for bioremediation of large-sized seaweed cultivation in eutrophic bays[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006(4): 128-134(in Chinese).
- [45] 杨宇峰, 费修纆. 大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望[J]. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(1): 53-57.
Yang Y F, Fei X G. Prospects for bioremediation of cultivation of large-sized seaweed in eutrophic mariculture areas[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(1): 53-57(in Chinese).
- [46] Henriksson P, Egeskog J. Ecosystem services deriving from sugar kelp cultivation in Skagerrak[R]. Stockholm: KTH, 2015, doi: [10.13140/RG.2.2.31562.57287](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31562.57287).
- [47] 马长欣, 刘建军, 康博文, 等. 1999—2003年陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估[J]. *生态学报*, 2010, 30(6): 1412-1422.
Ma C X, Liu J J, Kang B W, *et al.* Evaluation of forest ecosystem carbon fixation and oxygen release services in Shaanxi Province from 1999 to 2003[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(6): 1412-1422(in Chinese).
- [48] 国家海洋局. 2011中国海洋统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
State Oceanic Administration. 2011 China Marine Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011 (in Chinese).

Ecological service value evaluation of seaweed aquaculture in Zhejiang and Jiangsu Provinces

LÜ Han¹, YE Guanqiong^{1*}, JIN Mingjian², JIA Shiguo³

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316000, China;

2. Rudong Marine and Fishery Bureau, Nantong 226000, China;

3. College of Atmospheric Sciences, Sun Yat - sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The alternative cost method and opportunity cost method were used to evaluate the value of ecological services provided by seaweed aquaculture based on the study of seaweed farming in Zhejiang Province and Jiangsu Province from 2005 to 2014. The results showed that the value of direct ecological services mainly included three factors: the value of carbon capture, the value of eutrophication regulation and the value of heavy metal removal. The value of indirect ecological services included the value of avoided transformed forest land, avoided use of water resources, avoided use of fertilizer and avoided use of pesticide. In 2014, the values of three seaweed aquaculture direct ecological services are 0.41 million RMB, 1.97 million RMB, 0.61 million RMB for Zhejiang Province and 0.26 million RMB, 1.24 million RMB and 0.38 million RMB for Jiangsu Province, respectively; the value of four indirect ecological services are 464.87 million RMB, 11.61 million RMB, 3.09 million RMB and 11.77 million RMB for Zhejiang Province and 293.22 million RMB, 7.32 million RMB, 1.95 million RMB and 7.42 million RMB for Jiangsu Province. The total value of ecological services of seaweed aquaculture is far greater than the direct economic value of seaweed. The vast area of coastline indicates that seaweed farming has great potential for development, and the promotion of seaweed farming can not only be a solution to address the arable land and food crisis, but also has a positive effect on reducing carbon emissions, reducing nutrient pollution and coping with global changes.

Key words: seaweed; aquaculture; ecological services; value evaluation; Zhejiang Province ; Jiangsu Province

Corresponding author: YE Guanqiong. E-mail: gqy@zju.edu.cn

Funding projects: Emergy-GIS Approach for Marine Natural Capital Assessment (41606124); Study on Biological Restoration and Carbon Sequestration Effect in Polluted Sea Area (2015DFA01410)