

黄渤海近海海藻养殖规模及固碳强度时空分布

曹万云^{1,2}, 肖鲁湘¹, 王 德², 侯金鑫¹

(1. 鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264000; 2. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 定量研究黄渤海近海大型经济海藻的面积、产量及其固碳能力和空间分布, 对海洋牧场建设和海藻固碳强度研究具有重要意义。基于 2001—2016 年《中国渔业统计年鉴》和 2016 年《山东渔业统计年鉴》数据, 对 2001—2015 年黄渤海近海和全国近海养殖大型经济海藻的产量、面积及结构进行了对比分析, 采用 CCI 指数计算了黄渤海近海及全国近海大型经济海藻的固碳能力, 并分析了 2016 年山东省养殖海藻的空间分布特征。研究表明: 2001—2015 年海藻养殖面积、产量整体呈上升趋势, 其中全国海藻养殖面积在 2005—2007 年, 产量在 2006—2007 年出现间断性下降, 黄渤海海藻养殖面积在 2005—2007 年, 产量在 2001—2003 年、2005—2008 年出现阶段性下降; 黄渤海近海海藻养殖产量占全国近海海藻养殖产量年均约 45.53%, 固碳总量占全国海藻固碳总量年均约 51.75%, 其中裙带菜, 海带及紫菜为黄渤海海藻养殖的主要经济藻类; 以山东省为典型省份的海藻固碳强度在海岸带间表现出明显的空间分布差异, 其中威海市荣成区域人工养殖海藻固碳总量最多。

关键词: 黄渤海; 海藻养殖; 固碳强度; 时空分布

中图分类号: S931.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)04-0112-08

DOI: 10.11759/hyxx20171117001

近海人工养殖海藻主要包括海带(*Laminaria japonica*)、裙带菜(*Undaria pinnatifida* Suringar)、紫菜(*Porphyra*)、江蓠(*Gracilaria*)等大型经济藻类, 在海洋生态系统中扮演者重要的角色, 影响着生态系统的二氧化碳交换。同时, 养殖海藻对海域富营养化水体改善具有重要作用, 是吸收水体碳、氮、磷等元素的主要方式之一。其中海带、紫菜等大面积近海养殖海藻的种植和收割可以从海洋中移除大量的有机物, 增加海洋对二氧化碳的吸收能力, 降低二氧化碳对全球温室效应造成的影响, 提高碳循环能力^[1]。此外海带等还是提取碘^[2]、褐藻胶^[3]等的重要原料。

遥感技术的发展为快速准确检测海洋藻类面积、产量及运动轨迹提供了新的技术手段。目前国内外利用海洋水色卫星数据, 构建归一化植被指数(NDVI)成功的捕捉到浒苔的运动轨迹^[4-6], 基于VB-FAH 指数进行了黄海绿潮遥感检测^[7]。然而近海人工养殖海藻基本为底栖藻类, 利用卫星光学传感器获取的海面表层离水辐射率, 无法准确的区分二类水体表层及底栖藻类被海水淹没部分的光谱特征。随着高分辨率遥感卫星的发展如: SPOT、GF2、ALOS 等的使用, 利用人工养殖海藻区域的纹理结构、灰度信息等自动化提取养殖区面积成为可能^[8-10],

但高分辨率数据价格昂贵, 可获取数据有限, 难以应用于长时间序列检测。人工收割获取海藻产量、面积, 费时费力, 而且难以大范围开展, 但是获取的数据可靠、准确, 仍然是目前进行科学研究的一种重要数据源。因此利用全国渔业统计年鉴和各省渔业统计年鉴成为分析海藻养殖及固碳强度估算的重要途径, 充分利用其长时间序列, 低成本优势^[11]。

目前在利用渔业统计数据进行海藻养殖及固碳强度估算领域, 通过海藻干重状态碳的平均碳含量指数 CCI(Carbon Content Index), 国内外开展了部分研究。张继红等^[12]利用 CCI 估算了桑沟湾石莼、海带、裙带菜、石花菜、江蓠等的年初级生产力; 郑国侠等^[13]利用 CCI 估算了渤海、黄海、东海的净初级生产力和固碳能力; 宋金明^[1]统计了 2000—2005 年中国近海大型经济藻固碳强度; 齐占会等^[14]定量评价了广东省海水养殖贝藻碳汇潜力; 权伟等计算了浙江省 1999—2012 年海藻固碳量。因此有必要分析

收稿日期: 2017-11-17; 修回日期: 2018-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41676171)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41676171]

作者简介: 曹万云(1992-), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 研究方向: 渔业碳汇分析, E-mail: wycao_ragis@163.com; 肖鲁湘, 通信作者, 副教授, 研究方向: 国土资源遥感, Email: xiaoluxiang@163.com

以渔业统计数据为基础的 CCI 在黄渤海人工养殖大型经济藻类的时间序列变化、固碳强度及典型地区空间分布特性,进一步将其推广到研究全国大型经济海藻的时空特性。

为此,本文以黄渤海近海为研究区,以具有海藻养殖的辽宁、山东、江苏三省渔业统计数据为数据源,采用 CCI 和 ArcGIS 软件,分析了黄渤海养殖海藻的时间序列变化,估算了大型经济海藻的固碳能力,并以山东省为典型省份探讨了 2016 年近海养殖海藻固碳量的空间分布状况。

1 研究区概况

黄渤海(117.58°~126.83°E, 31.67°~41°N)地处中国大陆东部,为黄海和渤海的简称,见图 1。渤海为中国内海,海岸线全长 3 784 km,其中大陆岸线全长 2 688 km,平均水深 18 m,最大深度 85 m,50%以上海域面积平均深度在 20 m 以内,由辽东湾、渤海湾、莱州湾、中央浅海盆地和渤海海峡组成;黄海为西印度洋边缘的半封闭式浅海,西靠山东半岛和苏北平原,东边为朝鲜半岛,平均水深 44 m,最大深度 140 m,按照海域自然地理特征,通常将黄海分为北黄海和南黄海。黄渤海近海海藻养殖主要分布于辽宁、山东、江苏三省近海区域。辽宁省有包括海带、裙带菜、石花菜等数量较多的藻类 20 多种,以裙带菜养殖居多;山东省海藻养殖面积 2 000 km²,占全国海藻养殖总面积 15.9%,海带、裙带菜和江蓠养殖产量居全国前列,江苏省紫菜养殖产业逐步走向精细化阶段,养殖规模、产量逐年增加。

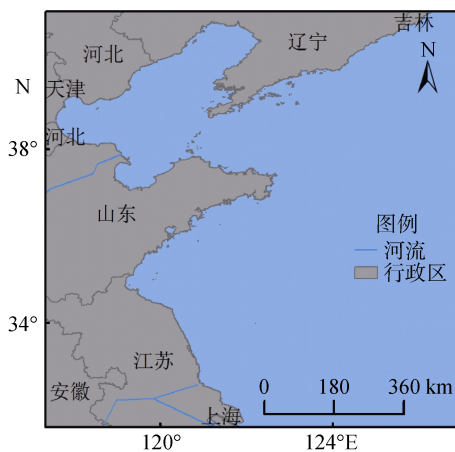


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the research area

2 数据来源及预处理

黄渤海近海海藻养殖规模分析及固碳强度空间分布需要选择合适的数据,根据数据的可获取性和可操作性,本文使用 2001—2016 年《中国渔业统计年鉴》数据进行海藻养殖现状分析,使用 2016 年《山东渔业统计年鉴》数据进行山东省海藻养殖固碳强度空间分布特征分析。以上数据由于涉及年份广,时间对应和养殖藻类产量、面积等的表征单位存在差异,进行分析之前对其进行说明及处理如下:

(1) 2001—2008 年《中国渔业统计年鉴》数据对应 2001—2008 年渔业统计数据;2010—2016 年《中国渔业统计年鉴》数据对应 2009—2015 年渔业统计数据。

(2) 渔业统计年鉴涉及产量单位统一为万 t,面积单位统一为 km²。

3 结果与讨论

3.1 海藻养殖现状分析

3.1.1 海藻养殖产量、面积

2001—2015 年,全国近海海藻养殖面积变化可分为四个阶段(图 2-a),第 1 阶段:2001—2005 年,面积增加;第 2 阶段:2005—2007 年,面积减少;第 3 阶段:2007—2010 年,面积增加;第 4 阶段:2010—2015 年,面积增加。第 1 阶段全国海藻养殖面积增长速率 96.14 km²/a,增速较快;第 2 阶段养殖面积逐年减少,降速-93.95 km²/a;第 3 阶段养殖面积逐年增加最快,增速 140.94 km²/a;第 4 阶段增速相对较慢,年均增长速率 20.72 km²/a。全国近海海藻养殖面积 2015 年最高 1 305.64 km²,2001 年最低 582.54 km²,全国近海年均海藻养殖面积 998.19 km²/a。

2001—2015 年,全国近海海藻养殖产量变化可分为三个阶段(图 2-b),第 1 阶段:2001—2006 年,产量逐年增加,增速为 5.76 万 t/a;第 2 阶段:2006—2007 年,产量逐年减少,降速为-14.73 万 t/a;第 3 阶段:2007—2015 年,产量逐年增加速度加剧,年均增速为 9.17 万 t/a。其中 2015 年全国近海海藻养殖产量最高 208.92 万 t,2001 年最低 121.48 万 t,年均海藻养殖产量 156.26 万 t/a。

2001—2015 年黄渤海近海区域人工养殖海藻面积波动较小,整体呈上升趋势,可分为四个阶段

(图 3-a), 第 1 阶段: 2001—2005 年; 第 2 阶段: 2005—2008 年; 第 3 阶段: 2008—2010 年; 第 4 阶段: 2010—2015 年。第 1 阶段和第 3 阶段为快速增长期, 其中第 1 阶段增速为 49.53 km²/a, 第 3 阶段增速为 116.62 km²/a;

第 2 阶段养殖面积逐年减少, 年均降速-33.34 km²/a; 第 4 阶段为匀速增长阶段, 年均增速 2.56 km²/a, 其中黄渤海近海海藻养殖面积 2015 年最高 720.43 km², 2001 年最低 306.12 km², 年均海藻养殖面积 546.52 km²/a。



图 2 全国近海海藻养殖面积、产量变化

Fig. 2 Changes in (a) yield and (b) area of marine algae culture in coastal China seas

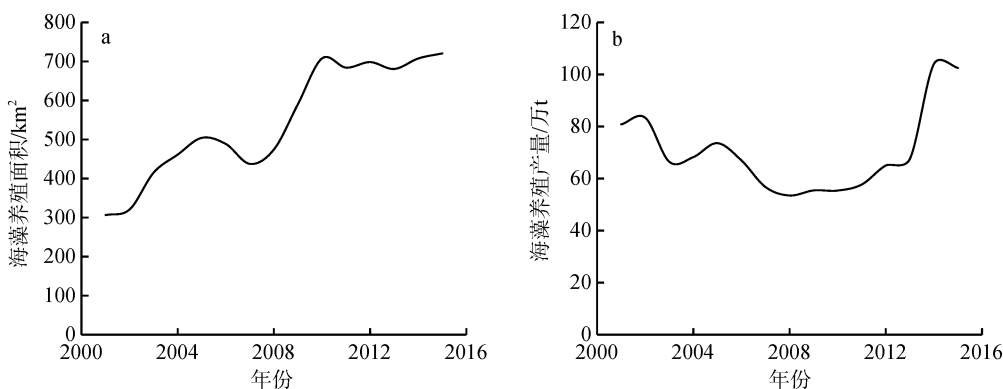


图 3 黄渤海近海海藻养殖面积、产量变化

Fig. 3 Changes in (a) yield and (b) area of marine algae culture in coastal Yellow Sea and Bohai Sea

2001—2015 年黄渤海近海区域人工养殖海藻产量波动较大, 整体呈先下降后上升趋势, 可分为五个阶段(图 3-b), 第 1 阶段: 2001—2003 年; 第 2 阶段: 2003—2005 年; 第 3 阶段: 2005—2008 年; 第 4 阶段: 2008—2013 年; 第 5 阶段: 2013—2015 年。第 1 阶段与第 3 阶段养殖面积逐年减少, 其中第 1 阶段年均降速-54.51 万 t/a, 第 3 阶段年均降速-9.93 万 t/a; 第 2 阶段年均增长速率 3.59 万 t/a; 第 4 阶段年均增速 2.82 万 t/a; 第 5 阶段年均增速 17.52 万 t/a, 其中海藻养殖产量 2014 年最高 104.03 万 t, 2008 年最低 53.49 万 t, 年均海藻养殖 70.48 万 t。

3.1.2 海藻养殖结构

2001—2015 年全国各类养殖海藻的累计产量占全国各类养殖海藻累计总产量的比例分别为海带(65%)、裙带菜(12%)、紫菜(7%)、江蓠(11%)、羊栖

菜等其他各类海藻占总量的(5%)(图 4-a)。2001—2015 年黄渤海各类养殖海藻的累计产量占全国累计总产量的百分比(图 4-b), 其中海带(72.32%)、裙带菜(22.13%)、紫菜(3.28%)、江蓠(2.27%)、以羊栖菜为主的其他海藻占(0.01%)。

3.1.3 黄渤海近海养殖海藻产量占全国近海养殖海藻产量百分比

2001—2015 年黄渤海近海海域不同养殖海藻累计产量占全国近海同种海藻累计产量百分比如(图 5-a)所示, 其中海带(51.43%)、裙带菜(93.70%)、紫菜(22.06%)、江蓠(11.06%)及以羊栖菜为主的其他不同海藻(0.08%)。

2001—2015 年黄渤海近海养殖海藻年均产量占全国养殖海藻年均产量百分比整体呈先下降后上升趋势, 可分为四个阶段(图 5-b)。第 1 阶段: 2001—

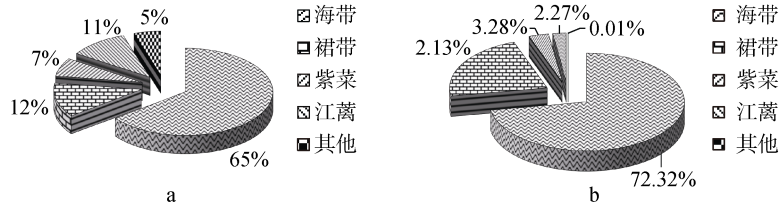


图 4 黄渤海近海和全国近海养殖海藻产量百分比

Fig. 4 Percentage yield cultivation of algae in (a) coastal Yellow and Bohai Seas and (b) China

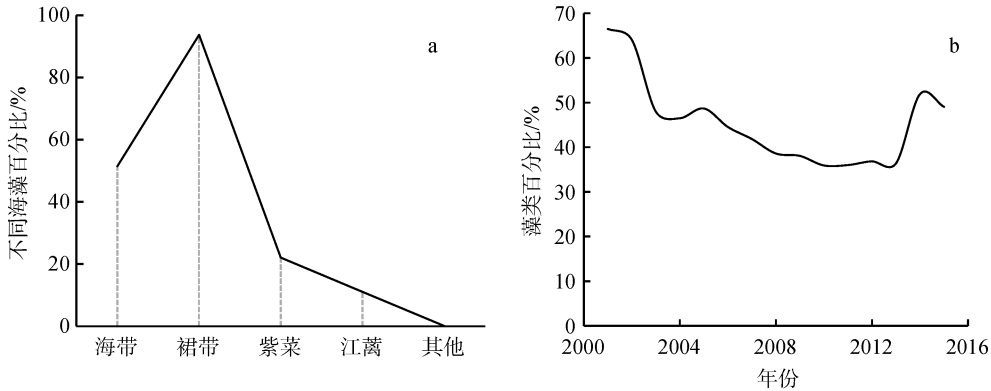


图 5 黄渤海海藻占全国海藻产量百分比

Fig. 5 Percentage ratios of algae yield of (a) Yellow Sea and (b) Bohai Sea in China

2003 年, 年均占比增速-9.23%; 第 2 阶段: 2003—2005 年, 年均占比增速 0.38%; 第 3 阶段: 2005—2013 年, 年均占比增速-1.54%; 第 4 阶段: 2013—2015 年, 年均占比增速 6.33%。其中 2001 年黄渤海近海海藻养殖产量占全国近海海藻养殖总产量份额最高 66.51%, 2011 年最低 36.02%, 年均占比 45.53%。

3.2 海藻养殖碳汇分析

3.2.1 近海海藻养殖碳汇时间序列变化

基于 2001—2016 年《中国渔业统计年鉴》海藻产量数据, 利用 CCI 指数计算黄渤海近海地区和全国近海养殖不同海藻的碳汇量, 海藻养殖碳汇量统计结果见(表 1)。不同海藻含碳质量分数, 海带(31.2%)^[15]、江蓠(24.5%)^[16]、裙带菜, 紫菜及其他经济型海藻(27.39%)^[17]。

由表 1 可知全国海带年均固碳量 29.14 万 t/a, 裙带菜 4.052 万 t/a, 江蓠 3.143 万 t/a, 紫菜 2.551 万 t/a, 其他 1.841 万 t/a。其中海带固碳强度最高, 占全国海藻固碳总量的 71.54%。黄渤海近海养殖海带年均固碳量 14.95 万 t/a, 裙带菜 4.015 万 t/a, 紫菜 0.609 万 t/a, 江蓠 0.353 万 t/a, 其他 1.150 万 t/a, 其中海带年均固碳量最高, 占黄渤海近海海藻固碳总量的 70.90%, 占全国近海海带年均固碳总量的 51.30%, 占全国近海海藻年均固碳总量的 36.71%。

3.2.2 近海海藻养殖碳汇强度县域空间分布

2001—2015 年黄渤海沿海省份近海海藻产量时间序列变化(图 6)。辽宁省海藻产量变化可分为三个阶段, 第 1 阶段 2001—2005 年, 海藻产量逐年增加, 年均增速 1.312 万 t/a; 第 2 阶段 2005—2009 年, 海藻产量逐年减少, 年均降速-2.2925 万 t/a; 第 3 阶段 2010—2015 年, 海藻产量逐年增加, 年均增速 1.5533 万 t/a, 近 15 年海藻养殖整体无大幅波动, 年均养殖海藻产量 31.73 万 t/a。山东省海藻养殖产量整体呈先下降后上升趋势, 可分为两个阶段, 第 1 阶段 2001—2009 年, 产量逐年减少, 年均降速-2.45 万 t/a; 第 2 阶段 2009—2015 年, 年均增速 6.28 万 t/a, 近 15 年海藻养殖产量波动明显, 年均养殖海藻 36.63 万 t/a。江苏省海藻养殖整体呈上升趋势, 年均增速 0.1332 万 t/a, 近 15 年海藻养殖年均 2.09 万 t/a。黄渤海沿海省份海藻养殖产量, 山东省>辽宁省>江苏省, 山东省海藻产量约占黄渤海藻类养殖产量的 50%以上, 结合辽宁、山东、江苏三省份海藻养殖种类(表 2), 研究山东省近海海藻养殖具有一定的典型性。所以本文以山东省为典型省份, 以 2016 年《山东渔业统计年鉴》为数据源, 以县(县、县级市、区)为单位计算各地区海藻干重状态下碳含量, 研究养殖海藻固碳强度的县域空间分布特征, 其中山东省各县近海海藻养殖固碳

强度等级分级采用 ArcGIS10.2 软件中自然断点法 (Natural Breaks)按照由低到高划分为 1~6 级, 见图 7。

表 1 中国和黄渤海近海海藻养殖碳汇量统计(万 t)
Tab. 1 Statistics on the carbon sink capacity of algae culture in coastal Yellow and Bohai Seas and in China

参数	年份								
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
黄渤海近海 海藻固碳量	海带	15.35	15.73	14.69	13.75	14.88	14.01	12.34	11.61
	裙带菜	0.00	0.00	4.69	6.01	6.55	5.43	3.84	3.62
	紫菜	0.27	0.40	0.43	0.44	0.54	0.58	0.84	0.72
	江蓠	0.00	0.00	0.15	0.15	0.15	0.01	0.04	0.10
	其他	8.38	8.62	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
	总量	24.00	24.75	19.97	20.36	22.12	20.04	17.06	16.06
中国近海 海藻固碳量	海带	24.89	26.26	25.55	27.46	26.92	26.43	24.19	24.89
	裙带菜	0.00	0.00	4.73	6.02	6.56	5.43	3.84	3.62
	紫菜	1.60	1.84	1.99	2.22	2.20	2.52	2.48	2.23
	江蓠	0.00	0.00	1.24	2.18	2.41	2.59	2.44	2.80
	其他	9.82	10.77	0.45	0.64	0.58	0.72	0.64	0.46
	总量	36.31	38.86	33.95	38.51	38.68	37.69	33.59	34.00
参数	年份							年平均	
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015		
黄渤海近海 海藻固碳量	海带	12.32	13.04	13.07	13.45	13.31	23.28	23.48	14.95
	裙带菜	3.28	2.95	3.65	4.78	4.65	5.55	5.23	4.01
	紫菜	0.70	0.67	0.62	0.60	0.77	0.76	0.77	0.61
	江蓠	0.09	0.07	0.05	0.55	1.25	1.49	1.20	0.35
	其他	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.08	0.11	1.15
	总量	16.40	16.75	17.39	19.39	19.99	31.16	30.80	21.08
中国近海 海藻固碳量	海带	25.83	27.57	28.34	30.54	31.75	42.46	44.03	29.14
	裙带菜	3.63	2.99	3.68	4.80	4.66	5.56	5.27	4.05
	紫菜	2.94	2.94	2.81	3.08	3.12	3.13	3.17	2.55
	江蓠	3.07	2.81	3.71	4.82	6.03	6.42	6.62	3.14
	其他	0.43	0.42	0.50	0.61	0.31	0.60	0.66	1.84
	总量	35.90	36.73	39.03	43.85	45.87	58.18	59.75	40.73

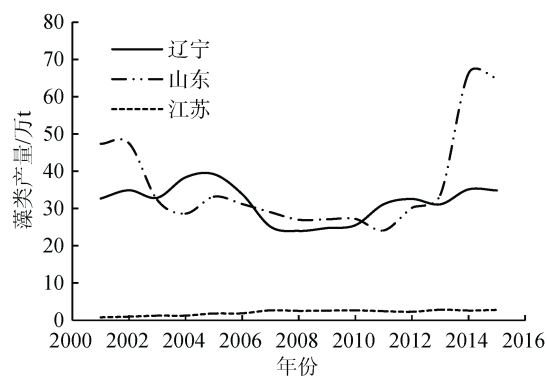


图 6 黄渤海三省近海海藻养殖产量时间序列变化

Fig. 6 Changes in the time series of marine algae production on the coasts of three provinces of the Yellow and Bohai Seas

图 7 显示, 山东省 2016 年沿海城市养殖海藻固碳能力呈现出明显空间分布差异, 以地级市为单位只有青岛、烟台、威海、日照具有大面积海藻养殖。以县为单位, 青岛包含: 黄岛区、崂山区、城阳区; 烟台包含: 长岛县、蓬莱市、福山区; 威海包含: 荣成市、乳山市; 日照包含: 东港区、岚山区。按照固碳强度等级将山东省近海海藻养殖分为 6 级, 一级: 威海荣成; 二级: 蓬莱长岛; 三级: 威海乳山、烟台福山区; 四级: 蓬莱市; 五级: 青岛崂山区、黄岛区, 日照岚山区; 六级: 图中除以上 5 级之外的所有地区, 不同地区在固碳能力上表现出明显的地域性差异。

表 2 2001 年-2015 年辽宁、山东、江苏海藻累计产量(万 t)

Tab. 2 Algae cumulative yield of Liaoning, Shandong, and Jiangsu provinces during 2001–2015 (Million tons)

省份	海带	裙带	紫菜	江蓠	石花菜	羊栖菜	苔菜	其他
辽宁	246.22	173.52	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	31.34
山东	431.92	34.36	3.57	20.99	0.08	0.70	0.06	30.72
江苏	1.36	0.00	27.08	0.29	0.00	0.02	0.00	0.00

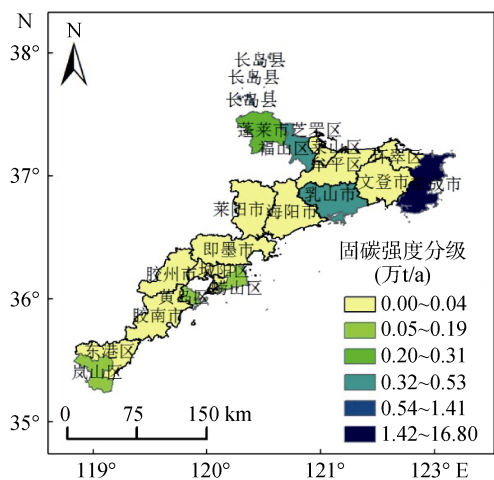


图 7 2016 年山东省近海海藻养殖固碳强度县域空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of carbon sink capacity of marine algae culture on coast of Shandong Province in 2016

3.3 讨论

黄渤海近海海藻养殖，在一定程度上能反映中国近海海藻养殖现状。目前对海藻研究主要关注于海藻生物学、养殖区海洋水色要素、生物群落多样性及利用定量手段研究温度、盐度、溶解氧、磷酸盐、氨盐及光照强度等对海藻生长结构的分析，利用统计数据研究近海海藻养殖结构、固碳强度及空间分布规律的较少。

3.3.1 近 15 年来近海海藻养殖规模变化分析

利用全国渔业统计年鉴数据分析黄渤海近海区域海藻养殖产量、面积整体呈上升趋势，图(5-b)统计结果显示黄渤海近海区域海藻养殖产量占全国近海海藻养殖产量年均约 45.53%，其中辽宁省 20.7%，山东省 23.5%，江苏省 1.3%，由北向南呈中间高两边低。其中辽宁省和江苏省在近 15 年海藻养殖产量和面积基本维持在相对稳定状态，山东省海藻养殖产量波动较大，在 2011—2015 年养殖产量增长约 2 倍，见图 6，与山东省相比较，辽宁省和江苏省在海藻养殖总量上处于相对较低水平，但是各省在养殖结构上呈现出各自优势，见表 2。结果显示辽宁海带养殖产量约占山东海带养殖产量的 50%左右，但是

裙带菜养殖产量是山东省约 5 倍，紫菜养殖较少；江苏省海带养殖较少，无裙带菜养殖，紫菜养殖为山东省紫菜养殖约 9 倍。综合分析海藻养殖产量、种类，山东省以海带养殖为主、辽宁省以裙带菜养殖为主、江苏省以紫菜养殖为主。

3.3.2 近海海藻养殖碳汇变化分析

国内外专家对海水养殖贝、藻类等固碳能力已经进行了部分研究。2005 年张继红等^[12]的研究结果表明仅 2002 年我国近海大型海藻的养殖可以从海水中移除近 33 万 t 碳，这一结果于本文 2002 年藻类固碳统计结果 38.86 万 t 较为接近；2006 年郑国侠等^[13]通过南黄海叶绿素 a 的分布特征分析了近海各海域初级生产力和固碳量，其中渤海年均初级生产力 112 g/(m²·a)，黄海 156 g/(m²·a)；2011 年宋金明等^[18]分析中国近海生态系统碳循环与生物固碳，结果表明近几年中国大型海藻养殖年均固碳约 40 万 t；2014 年权伟等^[19]利用 1999—2012 年中国渔业统计年鉴数据分析了浙江省近海养殖藻类和全国海藻养殖固碳量，结果表明 14 年间中国近海养殖海藻年均固碳量约 41.85 万 t，这一结果与本次实验统计 2001—2015 年全国近海海藻养殖年均固碳量 40.73 万 t 基本一致；2012 年齐占会等^[14]研究表明，广东省 2009 年海水养殖的贝、藻类固碳约 11 万 t；在利用海洋初级生产力和统计数据研究海藻养殖固碳能力的基础上，2014 年权伟等^[20]进行了基于时间序列模型的洞头大型海藻碳汇强度预测，结果显示：2012—2014 年洞头大藻固碳约为 0.368 万 t/a。上述研究从不同尺度、层面探索了近海大型海藻养殖在固碳方面的巨大潜力，同时研究结果也证实了本文对全国海藻固碳能力的分析结果，但未能利用相关研究结果或实测数据验证黄渤海近海海藻固碳能力的统计结果及山东省海藻养殖固碳量空间分布特征。

3.3.3 近海海藻养殖区规划建议

随着国家一带一路战略发展，建设海洋牧场，将产业发展和生态环境保护紧密结合，打造生态、高效、集约化程度高的新模式，成为当前产业结构发展的必然选择。开展海藻养殖区适宜性分析是加速实

现海洋牧场科学规划及海藻养殖风险规避的有效措施之一,通过定点实时监测获取海表温度、盐度、溶解氧、磷酸盐等影响海藻生长的生物因素;以地形坡度、水深为主的物理因素;以养殖区到近海工厂、码头和锚地、排污设施、道路等的距离为主的社会基础设施因素。利用层次分析法,通过对不同指标因素构建相应的子模型,将黄渤海近海区域生态因子、物理因子及社会基础设施因子空间化,然后结合各省海域使用规划现状,为黄渤海近海海域海藻养殖区规划提供决策支持。

4 结论

本文主要研究了2001—2015年全国近海海藻养殖面积、产量,黄渤海近海海藻养殖面积、产量的时间序列变化趋势,藻类固碳强度及典型省份海藻养殖的时空分布,得到以下结论:

(1) 2001—2015年海藻养殖面积、产量整体呈上升趋势。其中全国近海海藻养殖面积在2005—2007年,产量在2006—2007年出现间断性下降;黄渤海近海海藻养殖面积在2005—2007年,产量在2001—2003年、2005—2008年出现阶段性下降。

(2) 近15年黄渤海近海海藻养殖产量约占全国近海海藻养殖产量的年均约45.53%,年均固碳约51.75%,其中海带、裙带菜、紫菜为黄渤海近海海藻养殖的主要经济海藻。

(3) 以山东省为典型省份的近海海藻养殖固碳能力在近海区域表现出明显的空间分布差异,其中威海荣成区域海藻固碳量最多。

参考文献:

[1] 宋金明. 中国近海生态系统碳循环与生物固碳[J]. 中国水产科学, 2011, 3: 703-711.
Song Jinming. Carbon cycling processes and carbon fixed by organisms in China marginal seas[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 3: 703-711.

[2] 刘淇, 孙霞, 赵玲, 等. 鲜海带加工中甘露醇、碘及主要金属元素含量变化[J]. 海洋渔业, 2014, 1: 73-77.
Liu Qi, Sun Xia, Zhao Ling, et al. The content changes of mannitol iodine and main metal elements in the fresh *Laminaria japonica* processing[J]. Marine Fisheries, 2014, 1: 73-77.

[3] 尚德荣, 宁劲松, 赵艳芳, 等. 海带中褐藻胶含量测定方法的建立[J]. 食品科技, 2011, 8: 252-254.
Shang Derong, Ning Jinsong, Zhao Yanfang, et al. Establishment of the determination on kelp alginate[J]. Food Science and Technology, 2011, 8: 252-254.

[4] 顾行发, 陈兴峰, 尹球, 等. 黄海浒苔灾害遥感立体

监测[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1627-1632.
Gu Xingfa, Chen Xingfeng, Yin Qiu, et al. Stereoscopic remote sensing used in monitoring enteromorpha prolifera disaster in Chinese Yellow Sea[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1627-1632.

[5] 史正, 苏庆华, 高涛, 等. MODIS 数据在浒苔遥感监测中的应用能力评价[J]. 遥感信息, 2017(4): 132-137.
Shi Zheng, Su Qinghua, Gao Tao, et al. Application capability evaluation of MODIS data in enteromorpha remote sensing detection[J]. Remote Sensing Information, 2017(4): 132-137.

[6] 叶娜, 贾建军, 田静, 等. 浒苔遥感监测方法的研究进展[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 7-12.
Ye Na, Jia Jianjun, Tian Jing, et al. Advances in the study of *Ulva prolifera* monitoring with remote sensing[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2013, 25(1): 7-12.

[7] 郑翔宇, 高志强, 徐福祥, 等. 基于 VB-FAH 指数的黄海绿潮遥感监测及对比研究[J]. 海洋科学, 2017, 5: 71-79.
Zheng Xiangyu, Gao Zhiqiang, Xu Fuxiang, et al. Study of remote sensing monitoring and comparison of green tide in the Yellow Sea based on VB-FAH index[J]. Marine Sciences, 2017, 5: 71-79.

[8] 王静, 高俊峰. 基于对应分析的湖泊围网养殖范围提取[J]. 遥感学报, 2008, 12(5): 716-723.
WANG Jing, GAO Junfeng. Extraction of enclosure culture in gehu lake based on correspondence analysis[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(5): 716-723.

[9] 徐京津, 赵建华, 张丰收, 等. 面向对象的池塘养殖用海信息提取[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 82-85.
Xu Jingping, Zhao Jianhua, Zhang Fengshou, et al. Object-oriented information extraction of pond aquaculture[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(1): 82-85.

[10] 朱长明, 骆剑承, 沈占锋, 等. 高分辨率遥感影像近海养殖区自动识别方法[J]. 大连海事大学学报, 2011, 3: 66-69.
Zhu Changming, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, et al. Extract enclosure culture in coastal waters based on high spatial resolution remote sensing image[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2011, 3: 66-69.

[11] 王光镇, 王静璞, 邹学勇, 等. 基于像元三分模型的锡林郭勒草原光合植被和非光合植被覆盖度估算[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5722-5731.
Wang Guangzhen, Wang Jingpu, Zou Xueyong, et al. Estimation of fractional cover of photosynthetic and non-photosynthetic vegetation in the Xilingol steppe region using the NDVI-DFI model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5722-5731.

[12] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 359-365.
Zhang Jihong, Fang Jianguang, Tang Qisheng. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 359-365.

- [13] 郑国侠, 宋金明, 戴纪翠, 等. 南黄海秋季叶绿素 a 的分布特征与浮游植物的固碳强度[J]. 海洋学报, 2006, 28(3): 109-118.
Zheng Guoxia, Song Jinming, Dai Jicui, et al. Distributions of chlorophyll-a and carbon fixed strength of phytoplankton in autumn of the southern Huanghai Sea waters[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 28(3): 109-118.
- [14] 齐占会, 王珺, 黄洪辉, 等. 广东省海水养殖贝藻类碳汇潜力评估[J]. 南方水产科学, 2012, 8(1): 30-35.
Qi Zhanhui, Wang Jun, Huang Honghui, et al. Potential assessment of carbon sink capacity by marine bivalves and seaweeds in Guangdong province[J]. South China Fisheries Science, 2012, 8(1): 30-35.
- [15] 周毅, 杨红生, 刘石林, 等. 烟台四十里湾浅海养殖生物及附着生物的化学组成、有机净生产量及其生态效应[J]. 水产学报, 2002, 1: 21-27.
Zhou Yi, Yang Hongsheng, Liu Shilin, et al. Chemical composition and net organic production of cultivated and fouling organisms in Sishili Bay and their ecological effects[J]. Journal of Fisheries of China, 2002, 1: 21-27.
- [16] Lapointe B E, Littler M M, Littler D S. Nutrient availability to marine macroalgae in siliciclastic versus carbonate-rich coastal waters[J]. Estuaries, 1992, 15(1): 75-82.
- [17] 严立文, 黄海军, 陈纪涛, 等. 我国近海藻类养殖的碳汇强度估算[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(4): 537-545.
Yan Liwen, Huang Haijun, Chen Jitao, et al. Estimation of carbon sink capacity of algal mariculture in the coastal areas of China[J]. Advances in Marine Science, 2011, 29(4): 537-545.
- [18] 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 等. 中国近海生物固碳强度与潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 551-558.
Song Jinming, Li Xuegang, Yuan Huamao, et al. Carbon fixed by phytoplankton and cultured algae in china coastal seas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 551-558.
- [19] 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): 510-515.
Quan Wei, Ying Miaomiao, Kang Huajing, 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): 510-515.
- [20] 权伟, 应苗苗, 康华靖, 等. 基于时间序列模型的洞头大型藻类碳汇强度预测分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(8): 63-67.
Quan Wei, Ying Miaomiao, Kang Huajing, et al. Carbon sink capacity forecast of macroscopic algae in the coastal areas of Dongtou county based on time series model[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(8): 63-67.

Temporal and spatial distributions of carbon sink capacity and scale of algae culture in the Yellow and Bohai Seas

CAO Wan-yun^{1, 2}, XIAO Lu-xiang¹, WANG De², HOU Jin-xin¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264000, China; 2. Yantai Institute of Coastal Zone Research Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Received: Nov. 17, 2017

Key words: Yellow Sea and Bohai Sea; algae culture; carbon sink capacity; temporal spatial distribution

Abstract: A quantitative understanding of the economic yield, area, carbon sequestration capacity, and spatial distribution of large coastal commercial algae production is of great significance to the construction of marine ranches and our understanding of carbon sequestration in coastal waters. Based on data from the China Fisheries Statistics Yearbook in 2001–2016 and the 2016 Shandong Fisheries Statistics Yearbook, we compared and analyzed the yield, area, and structure of large commercial algae productions in the Yellow and Bohai Seas and in China overall. Using the commodity channel index (CCI) index, we calculated the carbon sequestration capacity of large commercial algae production in the Yellow and Bohai Seas. The results showed that in 2001–2015, the marine algae culture area and yield exhibited an overall upward trend, including increases in the national marine algae culture area from 2005–2007, intermittent decline in the yield in 2006–2007, and phase declines in the Yellow and Bohai Seas marine algae culture area from 2005–2007 and in the yields from 2001–2003 and 2005–2008. From 2001–2015, the yield of algae culture in Yellow and Bohai Seas averaged about 45.53% of that of China overall, and the annual carbon sequestration capacity was about 51.75%. *Undaria pinnatifida*, *Laminaria japonica*, and *Porphyra* are the main commercial algae farmed in the Yellow and Bohai Seas. Algae cultivation in Shandong Province, as an example of a typical province, showed obvious spatial distribution differences in the coastal zone, with the largest total amount of carbon fixation by artificial cultured algae found in Weihai, Rongcheng.

(本文编辑: 康亦兼)