doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2018.04.003

基于遥感的 2000-2015 年南黄海紫菜养殖空间分布变化研究

魏振宁[1,2], 邢前国[1,2*], 郭瑞宏[1,2], 李 琳[1]

(1.中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003;
2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于 Landsat 系列遥感影像, 研究了南黄海江苏沿海紫菜养殖区空间分布变化。针对江苏沿海两种紫菜养殖模式, 连云港的插杆式养殖模式和盐城-南通的半浮动筏式养殖模式, 分别提取了两个区域 2000-2015 年的紫菜养殖区面积, 并分析了 16 年间的紫菜养殖面积以及分布的动态变化情况。连云港养殖区, 紫菜养殖面积由 2000 年的 11 km^2 增加到 2015 年的 65 km^2, 呈逐年增加的趋势; 盐城、南通紫菜养殖区, 紫菜养殖面积由 2000 年的 46 km^2 增加到 2015 年的 241 km^2, 且养殖区由沿近岸分布不断向离岸较远的浅滩-浅海分布。黄海海域暴发的绿潮来源于南通、盐城一带的苏北浅滩区域, 而该区域的紫菜养殖面积在绿潮暴发期间也呈明显增加趋势; 连云港紫菜养殖同期也在增加, 但并没有产生绿潮。因此, 可初步认为, 黄海大规模绿潮的产生与苏北浅滩紫菜养殖的空间分布与养殖模式有关。本研究结果可为江苏紫菜养殖布局与黄海绿潮的防控提供支持。

关键词: 绿潮; 紫菜养殖; 空间分布; 卫星遥感; 黄海

中图分类号: X87 文献标志码: A 文章编号: 1003-2029(2018)04-0017-06

绿潮是海洋大型绿藻在短时间内迅速生长高度聚集而形成的藻华现象; 大规模的绿潮是一种有害藻华, 是一种海洋灾害。2007 年至今, 黄海海域每年夏季均暴发大规模绿潮(Ulva prolifera), 严重影响了海洋环境与生态服务功能[1-2]。其中 2008 年, 青岛沿岸暴发大规模绿潮, 当时正值青岛市举办 2008 年奥运会比赛, 为了避免绿潮暴发对比赛的影响, 出动打捞人员万余人次, 打捞总量超过 100 万 t, 总费用达 1 亿余美元[3]。黄海绿潮大规模的暴发严重破坏了海岸带生态环境, 同时也给当地的水产养殖业造成了巨大的经济损失, 引起了相关部门以及国内外专家学者的广泛关注。因此, 找出绿潮暴发的原因, 及时、有效地采取相应的治理措施, 显得至关重要。

据有关研究显示, 黄海绿潮暴发与江苏沿岸的紫菜养殖有关。一些学者通过卫星遥感与实地调查的方法研究发现, 绿潮的暴发源于南黄海紫菜养殖筏架[1,4-5]。基于卫星遥感与现场监测跟踪漂浮浒苔的漂流路径研究显示, 漂浮的浒苔首先零散出现在江苏浅滩沿岸, 这些漂浮的绿潮斑块在北向的洋流作用下进入南黄海[6-7]。目前对黄海绿潮暴发的原因还尚无定论。当前对绿潮暴发原因的探索研究较多, 但对绿潮暴发起源地的区域做长时间序列紫菜养殖监测的研究较少。本文基于卫星遥感影像提取了 2000-2015 年 16 年间江苏省沿岸紫菜养殖区, 计算其面积并分析其时空动态变化, 以期分析其对绿潮形成的贡献与机制。

收稿日期: 2018-04-19
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41676171); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2016ASKJ02)
作者简介: 魏振宁(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋遥感研究。E-mail: znwei@yic.ac.cn
通讯作者: 邢前国(1975-), 男, 研究员, 主要从事海洋遥感等的研究。E-mail: qgxing@yic.ac.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 研究区概况

选择的研究区为江苏省东部沿海地区的紫菜养殖区。江苏省位于中国大陆东部沿海地区，地跨116°18′E~121°57′E，30°45′N~35°20′N，东临黄海，北接山东，西连安徽，东南与上海、浙江接壤，是长江三角洲地区的重要组成部分；其海岸线南北分布，浅滩发达，海洋相关产业发展区位优越，如图1所示。

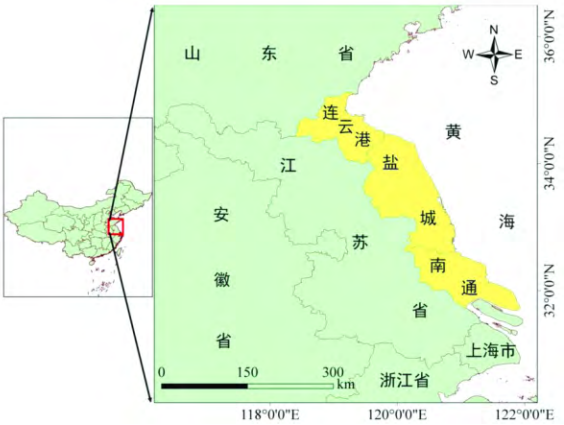

图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of study area

江苏省养殖的紫菜主要为条斑紫菜(*Porphyra*)，该紫菜生长在江苏省沿海三市，自北向南分别是连云港、盐城和南通。从地质构造上看，该区位于构造沉降带，以冲积平原与海积滩地地貌为主[8]。连云港养殖区所处的海岸为典型的沙质及基岩型海岸[9]。盐城、南通养殖区沿岸滩涂分布较广，并且拥有我国最大的滨海湿地自然保护区[10]。

2 数据和方法

文中所使用的数据为Landsat系列卫星遥感数据，主要包括Landsat5、Landsat7、Landsat8。数据从美国地质调查局（United States Geological Survey, USGS）官网（http://glovis.usgs.gov）下载获取。经筛选，本文共用到175景影像，其中Landsat5影像共103景，Landsat7影像共40景，Landsat8影像共32景。连云港养殖区使用了52幅影像，其中使用Landsat5影像36景，Landsat8影像10景。盐城、南通紫菜养殖区使用了113景影像，其中使用Landsat5影像67景，Landsat7影像34景，Landsat8影像22景。影像主要参数见表1。

表1 所用数据介绍

Tab.1 Data introduction

卫星	连云港下载年份	盐城南通下载年份	所用波段分辨率(R/G/B/NIR)	传感器
Landsat5	2000–2011（36景）	2000–2011（67景）	30 m	TM
Landsat7	2012–2013（6景）	2005–2013（34景）	30 m	ETM+
Landsat8	2014–2015（10景）	2014–2015（22景）	30 m	OLI

本研究主要通过光谱特征结合目视解译提取紫菜养殖区。紫菜是海藻的一种，它体内含有叶绿素a、胡萝卜素、叶黄素、藻红蛋白、藻蓝蛋白、R-藻蓝蛋白[11]等，由于不含叶绿素b，故而使紫菜一般呈现红褐色或褐色。其光谱特性与绿色植被的光谱特征较为相似[12]，有明显的红边现象，与海水光谱差异明显。现场实测的紫菜和及其邻近海水的光谱显示：在可见光波段，海水反射率要高于紫菜；而在近红外波段，紫菜反射率明显高于海水。因此，利用不同波段的不同组合所得的一些植被指数可以从海水中提取紫菜信息。潮滩有较强的反射比，在近红外波谱也有较大的反射比[13]；当退潮时，泥滩裸露，由于混合像元的存在，利用计算机自动提取泥滩上的紫菜养殖区的较为困难，此时需要结合人工目视解译进行提取。即使如此，也可能存在漏提，故而本研究每年选取多幅影像进行提取，最后将本年度所有提取结果叠加汇总，作为这一年紫菜养殖区的总面积。

首先，对获取的影像数据进行预处理，包括辐射校正、重投影等。

然后将影像的4、3、2波段分别赋予R、G、B（红、绿、蓝）进行图像假彩色合成。并进行遥感影像增强处理，由于部分影像对比度不强、难以识别，可能造成漏提，对其做拉伸之后，提高了影像的解译性。

最后对陆地区域进行掩膜处理，计算掩膜后的影像的归一化植被指数(NDVI)的值，结合人工目视解译，对养殖区进行信息提取。归一化植被指数计算公式如：$NDVI=(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})$，其中，$R$ 表示反射率，R_{NIR} 为近红外波段的反射率，R_{RED} 为红光波段反射率。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　结果与讨论

3.1　连云港养殖区

如图 2 所示，2000–2015 年，从空间分布上来看，连云港养殖区主要分布在绣针河口到灌河口的沿岸滩涂上以及秦山岛附近。从养殖面积上来看，连云港紫菜养殖面积总体上呈增加趋势，由 2000 年的 11 km^2 增加到 2015 年的 65 km^2。从时间上来看，2006 年以前，紫菜养殖只是沿着海岸滩涂零星分布，从 2007 年开始，在东西连岛两侧沿岸的紫菜养殖面积的增长速度不断加快，尤其是在 2011 年以后，紫菜养殖面积增长的速度更快，由 2011 年的 19 km^2 增长到 2015 的 65 km^2，增长了约 3 倍多。2015 年，紫菜养殖呈成片集中分布的状态，集中分布在东西连岛两侧的海域以及秦山岛养殖区，养殖区呈现出由沿岸滩涂逐渐向离岸较远的浅海处迁移的趋势。

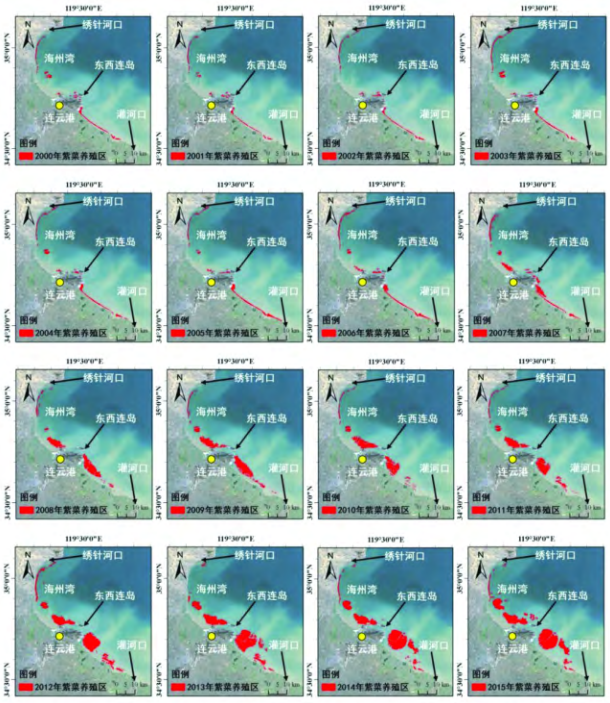

图 2　2000–2015 年连云港紫菜养殖区动态变化

Fig.2　Dynamic changes of *Porphyra* aquaculture area in Lianyungang from 2000 to 2015

3.2　盐城南通养殖区

如图 3 所示，从空间分布上来看，2000–2015 年，盐城、南通紫菜养殖区的分布变化主要特征如下：第一，从紫菜养殖的面积上来看，从 2000 年的 46 km^2 增加到 2015 年的 241 km^2，虽然在 2011 年有小幅度下降，但总体上呈波动上升趋势。第二，从空间分布上来看，紫菜养殖区由沿近岸分布不断向离岸较远的浅海分布。2000–2006 年，洋口港以北，养殖区呈分散零星分布；洋口港以南到吕四港，养殖区沿岸呈条带状分布。2007–2015 年，在洋口港以北，养殖区呈成片、大面积的分布，且养殖区有向北、向东、向南，不断向外扩展延伸的趋势。第三，从时间上来看，2000–2006 年，养殖区主要分布在从洋口港到吕四港之间的沿岸滩涂上；从 2007 年开始，养殖区域主要向北扩展，北延伸到距大丰港约 25 km 的辐射沙洲上。

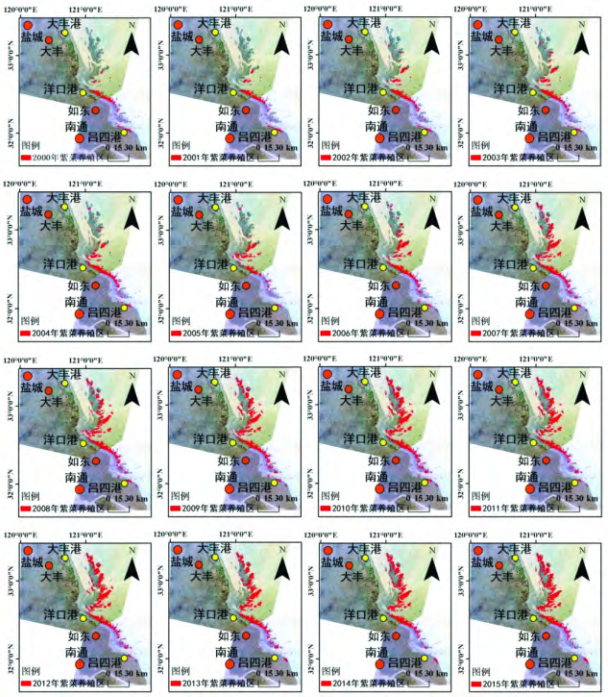

图 3　2000–2015 年盐城、南通紫菜养殖区动态变化

Fig.3　Dynamic changes of *Porphyra* aquaculture area in Yancheng and Nantong from 2000 to 2015

3.3　遥感结果分析

从江苏省紫菜养殖区的面积提取结果来看（见图 4）[14]，养殖区面积总体上是逐年增加的，从 2000 年的 58 km^2 增加到 2015 年的 306 km^2。但各年增长率却有所不同：如图 4 所示，2006 年、2007 年和 2009 年这 3 年的养殖面积增长最快，分别达到了 43.0%、29.5%和 29.7%（计算以上一年的数据为基准）。以统计年鉴数据作用参考评估提取结果差异，结果显示，从 2000 年到 2015 年，利用遥感影像提取养殖区的紫菜养殖面积总体小于渔业统计的养殖面积，只有 2002 年、2007 年和 2008 年遥感提取的面积多于渔业统计的养殖面积。2008 年以前，两

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

组数据相差较小，2008 年以后，渔业统计的养殖面积大于遥感提取的养殖面积。文中对利用两种方法所统计得到的紫菜养殖区面积进行了对比分析，结果如图 5 所示，2005 年、2007 年、2011 年差异较大，其余年份与渔业统计年鉴差异均在 30%以内；2002 年、2003 年、2006 年、2008 年面积差异最小。

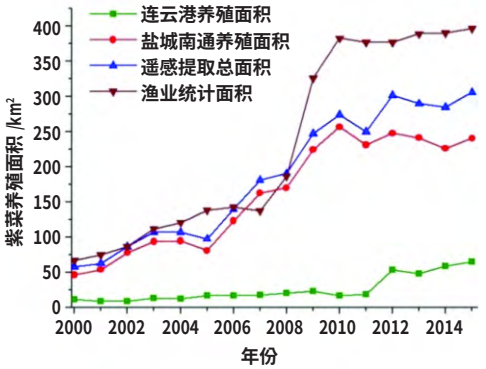

图 4 2000–2015 年遥感提取的紫菜养殖面积和渔业统计面积

Fig.4 *Porphyra* aquaculture area on the basis of remote sensing and the data of the fishery statistics from 2000 to 2015

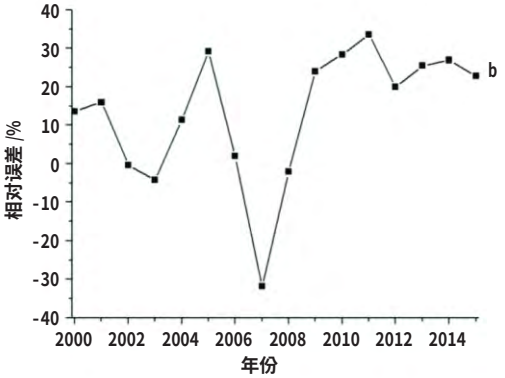

图 5 2000–2015 年遥感提取的紫菜养殖面积和渔业统计面积相对差异

Fig.5 the discrepancy of the *Porphyra* areas on the basis of remote sensing and the data of the fishery statistics from 2000 to 2015

连云港养殖区和盐城、南通养殖区相比，2011 年之前，连云港养殖区各年养殖面积波动较小，但 2011–2014 年间，连云港养殖面积增加了 1 倍多，盐城南通一带则没有明显变化；从养殖面积的总量来看，盐城南通养殖区的养殖面积占绝对优势。

另外，遥感提取结果显示，江苏紫菜养殖面积呈持续增加的趋势；而渔业统计的资料中，2008–2010 年，总面积增加了近 1 倍，这种突然增长的数据的可靠性可能需进一步分析。

3.4 对黄海绿潮形成的影响分析

从 2007 年开始，我国黄海海域连续暴发大规模的绿潮[15]，虽然在 2007 年以前，在黄海海域也曾有过绿潮，但是规模很小[16]。Qi，et al[17] 使用了 MODIS 数据对黄海西部海域暴发的绿潮进行了长时间序列（2007–2015 年）的监测。从年际变化尺度来看，2008–2011 年，绿潮平均覆盖面积在减少，但在 2012 年之后，绿潮平均覆盖面积由 2012 年 18 km² 迅速增加到 2015 年的 116 km²；从月平均尺度来看，绿潮平均覆盖面积从 2012 年 6 月的 18 km² 增长到 2015 年的 363 km²。

江苏省紫菜养殖面积从 2007 年的 181 km² 增加到 2015 年的 306 km²，养殖规模在不断的扩大。随着紫菜养殖面积的扩大，绿潮暴发的频率与规模也在持续上升，且绿潮开始暴发与紫菜养殖规模扩张，在时间上较为吻合，这说明绿潮的暴发和紫菜的养殖存在着一定的关系。连云港是支柱式养殖，无论该地的紫菜养殖规模是否大幅增加，该区域均不是绿潮起源地。绿潮主要来源于南通、盐城一带的苏北浅滩，该区域的紫菜养殖面积一直呈明显的增加趋势。

随着紫菜养殖规模的不断扩大，紫菜养殖设施上所附着的绿藻也在增多。每年 4 月养殖结束后，大多数的养殖户将筏架回收的同时，也将附着的绿藻就地丢进了海里，这些被丢进海里的绿藻在适宜的温度、光照以及营养盐的条件下，迅速繁殖，并在风或者洋流作用下，在每年的 5 月漂流到黄海海域并繁殖，6 月绿潮规模达到最大[1,16]。

从研究数据中发现，2007 和 2008 年这两年紫菜养殖面积没有迅猛增加，增长率分别为 32.3%和 4.4%。但 2007 年、2008 年在黄海海域突然暴发了大规模的绿潮，这说明紫菜养殖规模本身可能不是绿潮产生的主因。苏北浅滩紫菜养殖区从南到北的跨度很大，该区域的水动力环境也十分复杂。因此，不同紫菜养殖区出现的绿藻会对黄海绿潮的形成产生不一样的影响。2000–2006 年，在洋口港以北，养殖区呈分散零星分布；2007–2015 年，在洋口港以北，养殖区呈成片、大面积的分布，且养殖区有向北、向东不断向外扩展延伸的趋势，这个时间节点与 2007 年开始大规模形成绿潮较为一致。结合洋流等要素分析，可认为，黄海绿潮发生的原因主要与苏北浅滩北部出现的半浮筏式紫菜养殖有关，与江苏沿海或盐城–南通一带的总体紫菜养殖规模增加没有必然关系。因此，绿潮形成的原因可结合紫菜养殖的时空变化的细节进一步作深入分析。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 总 结

本文基于 Landsat 系列遥感影像，对江苏省沿海地区的紫菜养殖区进行了研究。针对江苏省两种养殖模式，即插杆式养殖模式（连云港紫菜养殖区）和半浮动筏式养殖模式（盐城、南通紫菜养殖区），分别提取了两种养殖模式下的紫菜养殖面积，分析了养殖区从 2000 年至 2015 年间紫菜养殖区变化。最后，分析了紫菜养殖区的动态变化与黄海绿潮暴发的关系。

从提取的数据来看，2000–2015 年，江苏省紫菜养殖总面积逐年增加，其中连云港紫菜养殖面积由 11 km^2 增加到 65 km^2；由零星养殖分布到成片养殖分布，由沿岸分布不断向外海推进；盐城–南通一带浅滩上的紫菜养殖区面积由 2000 年的 46 km^2 增加到 2015 年的 241 km^2，且养殖区由沿近岸分布不断向离岸较远的浅海分布；从 2007 年左右，养殖区主要表现为向北延伸。

黄海绿潮暴发与紫菜养殖面积增加表现出一定的相关性，绿潮的形成及变化原因需要后续进一步研究。

参考文献：

[1] Liu D, Keesing J K, Xing Q, et al. World's largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(6):888-895.

[2] Hu C, Li D, Chen C, et al. On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2010, 115(C5).

[3] Wang X H, Li L, Bao X, et al. Economic Cost of an Algae Bloom Cleanup in China's 2008 Olympic Sailing Venue [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2013, 90(28):238-239.

[4] Zhang J, Huo Y, Wu H, et al. The origin of the *Ulva macroalgal* blooms in the Yellow Sea in 2013 [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 89(1-2):276-283.

[5] Wang Z, Xiao J, Fan S, et al. Who made the world's largest green tide in China?—an integrated study on the initiation and early development of the green tide in Yellow Sea[J]. Limnology & Oceanography, 2015, 60(4):1105-1117.

[6] 邢前国, 郑向阳, 施平, 等. 基于多源、多时相遥感影像的黄、东海绿潮影响区检测 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1644-1647.

[7] Bao M, Guan W, Yang Y, et al. Drifting trajectories of green algae in the western Yellow Sea during the spring and summer of 2012[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2015, 163:9-16.

[8] 毋亭. 近 70 年中国大陆岸线变化的时空特征分析[D]. 烟台：中国科学院烟台海岸带研究所, 2016.

[9] 王建. 江苏省海岸滩涂及其利用潜力[M]. 北京:海洋出版社，2012. 19-38.

[10] 王艳芳, 沈永明. 盐城国家级自然保护区景观格局变化及其驱动力[J]. 生态学报, 2012, 32(15):4844-4851.

[11] 有贺祐胜, 于廷林. 条斑紫菜(*Porphyra yezoensis*)的颜色和色素[J]. 国外水产, 1982(4).

[12] 丘仲锋, 崔廷伟, 何宜军. 基于水体光谱特性的赤潮分布信息 MODIS 遥感提取 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2233-2237..

[13] 邢前国, 禹定峰, 娄明静, 等. 基于现场光谱的潮滩表层沉积物叶绿素 -a 含量遥感模式 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8): 2188-2191.

[14] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴 2000-2016[M]. 北京：中国农业出版社，2016.

[15] Xing Q, Hu C. Mapping macroalgal blooms in the Yellow Sea and East China Sea using HJ-1 and Landsat data: Application of a virtual baseline reflectance height technique[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 178:113-126.

[16] Xing Q, Tosi L, Braga F, et al. Interpreting the progressive eutrophication behind the world's largest macroalgal blooms with water quality and ocean color data[J]. Natural Hazards, 2015, 78(1):7-21.

[17] Qi L, Hu C, Xing Q, et al. Long-term trend of Ulva prolifera blooms in the western Yellow Sea.[J]. Harmful Algae, 2016, 58:35-44.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Study on the Spatial Distribution Variation of *Porphyra* Aquaculture in the Southern Yellow Sea During the Period 2000–2015 Retrieved by Satellite Remote Sensing

WEI Zhen-ning[1,2], XING Qian-guo[1,2], GUO Rui-hong[1,2], LI Lin[1]

1. *Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Process and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai* 264003, *Shandong Province, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: On the basis of the time series of Landsat images, the spatial distribution variation of *Porphyra* aquaculture rafts in the Southern Yellow Sea off the coast of Jiangsu Province is extracted and analyzed, including two types of aquaculture mode: the "height-adjustable mode" in Lianyungang *Porphyra* aquaculture zone, and the "height-fixing mode" in Yancheng-Nantong *Porphyra* aquaculture zone. The results show that, the total area of *Porphyra* aquaculture in the coastal waters of Southern Yellow Sea increased during the period from 2000 to 2015: the aquaculture area increased from 11 km^2 in 2000 to 65 km^2 in 2015 in the Lianyungang aquaculture zone, showing a year-on-year increase, while it increased from 46 km^2 to 240 km^2 during the same period in the Yancheng-Nantong aquaculture zone. However, the green tides caused by macroalgae blooms of *Ulva prolifera* in the Yellow Sea only originated from the Jiangsu shoal where the YanCheng-NanTong aquaculture zone is located. It can be concluded that the occurrence of large-scale green tides in the Yellow Sea in every Summer since 2007 are mainly caused by the *Porphyra* aquaculture mode and the changing spatial distributions of *Porphyra* aquaculture zone in the Jiangsu shoal. These findings are useful in optimizing the *Porphyra* aquaculture spatial distribution and responding to the green tide hazards in the Yellow Sea.

Key words: Green tide; *Porphyra* aquaculture; spatial distribution; satellite remote sensing; Yellow Sea

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net