

doi: 10.6046/zrzyyg.2022296

引用格式: 侯英卓, 纪灵, 邢前国, 等. 卫星遥感辅助的大型海藻养殖动态对比监测——以威海市为例[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(2): 34–41. (Hou Y Z, Ji L, Xing Q G, et al. Satellite remote sensing - assisted comparative monitoring of dynamic characteristics of macroalgae aquaculture in Weihai City, Shandong Province, China[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(2): 34–41.)

卫星遥感辅助的大型海藻养殖动态对比监测 ——以威海市为例

侯英卓^{1,2,3}, 纪灵⁴, 邢前国^{1,2,3}, 盛德志^{1,2,3}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 烟台 264003;
2. 山东省海岸带环境过程重点实验室, 烟台 264003; 3. 中国科学院大学,
北京 100049; 4. 国家海洋局烟台海洋环境监测中心站, 烟台 264006)

摘要: 大型海藻养殖的时空动态变化监测对其环境管理至关重要, 目前关于不同品种的大型海藻养殖的对比监测鲜有研究报道。文章基于 Sentinel-2 卫星影像, 利用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI) 与支持向量机(support vector machine, SVM), 对山东省威海市文登区南部海域紫菜养殖区与荣成市南部海域海带养殖区的动态特征进行了监测。研究结果表明: ①威海市文登区的紫菜养殖在 2016 年遥感影像上首次出现, 与该市历史上首次出现紫菜养殖的年份相符; 基于文章方法提取的紫菜养殖区与海带养殖区的整体提取效果较好, 总体精度可达 84% 以上; ②2017—2021 年度紫菜养殖区的遥感监测面积整体呈逐年增加趋势, 空间上养殖区呈现远离岸边的分布趋势; ③紫菜与海带养殖区监测面积总体呈冬高、夏低的冷水型藻类养殖季节变化特征, 但紫菜养殖区监测面积最小值与最大值出现时间较海带养殖区早 1~2 个月。卫星遥感较统计年鉴能提供更精确的时间与空间信息, 研究可为中国北方海岸带大型海藻养殖管理提供监测技术与数据上的参考与借鉴。

关键词: Sentinel-2; 大型海藻; 紫菜; 海带; 山东半岛; 黄海

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)02-0034-08

0 引言

大型海藻养殖是海水养殖的重要组成部分, 主要分布在我国东部沿海地区, 包括江苏、福建、浙江、辽宁和山东等地^[1-2]。我国的大型海藻养殖种类众多, 主要有紫菜、海带和裙带菜等^[3]。海藻不仅具有巨大经济价值, 亦具有调节大气、净化水质和固碳等生态功能^[4]。然而, 海藻养殖不当也会产生环境危害, 已有研究显示, 我国近海的海洋大型藻等灾害与海藻养殖有着密切的联系^[5-6]。开展藻类养殖区的动态监测, 不仅可以掌握养殖区的动态变化特征, 还可以辅助分析周围水环境的变化, 为相关海洋灾害的产生机理研究提供基础数据。山东半岛, 特别是威海市沿岸, 是我国北方最重要的海藻养殖基地之一。近年, 受市场对养殖品种的需求、海水环境与

灾害等因素影响, 威海市近海的海藻养殖品种与空间布局正发生深刻变化。对本地区海藻养殖动态进行监测, 对其管理及灾害应对有重要的现实意义。

卫星遥感具有周期短、范围大、观测连续等优势, 可以提供传统调查不具备的精细化空间信息^[5-6]。国内外众多学者利用遥感影像对大型海藻养殖展开了广泛研究。在海藻养殖区的提取方法上, 目前主要有人工目视解译、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI) 阈值法、最大似然分类、支持向量机(support vector machine, SVM) 与面向对象分类等^[2, 5-10]。武易天等^[11]提出了一种耦合光谱与纹理信息的近海藻类养殖区自动提取方法; Won 等^[12]提出了一种基于极化熵信息的水下紫菜养殖区提取方法。在提取水色背景相对稳定的大型海藻养殖区时, NDVI 阈值法的监测效果较好^[8]。但当海水中混有大量悬浮

收稿日期: 2022-07-27; 修订日期: 2022-08-29

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项“地球大数据科学工程”(编号: XDA19060203)、国家自然科学基金项目“海表漂浮大型藻空间分布特征及其在覆盖面积卫星遥感估算中的应用研究”(编号: 42076188)、“面向冬季大型藻类高分遥感的海表耀光消减与利用研究”(编号: 41676171)和中国科学院仪器设备研制重点项目“沿海水色环境污染和资源机载高光谱成像探测仪”(编号: YJKYYQ20170048)共同资助。

第一作者: 侯英卓(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋遥感。Email: yingzhuohou@yic.ac.cn。

通信作者: 邢前国(1975-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为海岸带-海洋环境遥感、数值模拟与评估。Email: qgxing@yic.ac.cn。

泥沙、水色背景较复杂时,相比 NDVI 阈值法,SVM 有更高的监测精度^[8, 10, 13]。在大型海藻养殖的遥感动态监测上,国内学者研究较多,而国外目前相关研究较少。Xing 等^[6]对苏北浅滩的紫菜养殖动态进行了长时序精细化的遥感监测,获取了紫菜养殖年际变化以及每年的养殖设施回收进程的时空动态特征,并阐明了其对黄海浒苔绿潮的影响;郭瑞宏^[9]基于 Landsat 卫星的时序数据,分析了江苏省紫菜养殖区的年际变化特征;Lu 等^[14]利用 4 期 Landsat 影像,对连云港紫菜养殖区的空间变化特征展开研究;曹万云^[15]利用遥感影像与海带产量数据,分析了荣成市海带养殖的时空变化特征等。但是上述研究仅针对一种藻类养殖进行动态监测,缺乏不同类型大型海藻养殖的对比监测,且山东沿海的紫菜养殖动态研究鲜有报道。

因此,本文基于 Sentinel-2 卫星影像,结合目前较常用的 NDVI 与 SVM 方法提取山东省威海市文登区南部海域紫菜养殖区与荣成市典型海域海带养殖区信息,分析紫菜养殖的年际变化,并对比紫菜与海带养殖的季节变化特征。

1 研究区概况

研究区位于山东省威海市文登区与荣成市的南部海域。文登区(N36°52′~37°23′,E121°43′~122°19′)北连威海市环翠区,东邻荣成市,南濒黄海。荣成市(N36°45′~37°27′,E122°08′~122°42′)东、南、北三面濒临黄海。文登区与荣成市的近海是山东省海藻养殖的重要区域,如图 1 所示。据资料显示^[16],威海市文登区于 2016 年开始试养条斑紫菜;荣成市海域是山东省海带养殖的主要区域。

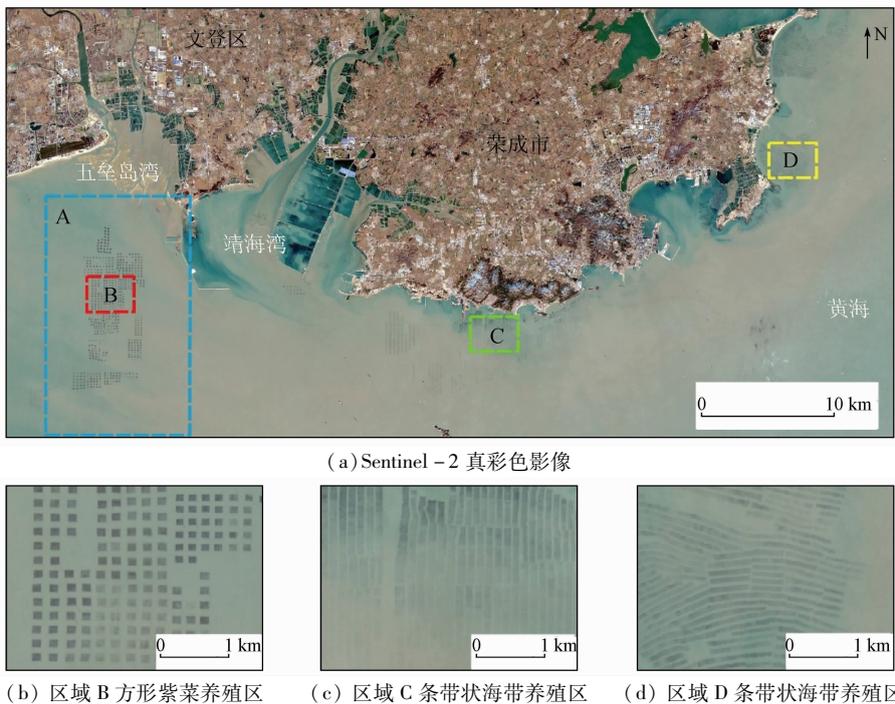


图 1 研究区地理位置及大型藻类养殖区分布

Fig. 1 Geographical location of the study area and distribution of macroalgae cultivation areas

2 数据源

本文以 Sentinel-2 卫星影像为基础数据,数据在欧洲航空局官网(<https://scihub.copernicus.eu/>)下载。所用卫星的传感器为多光谱成像仪(multi-spectral instrument, MSI),波段为 10 m 空间分辨率的蓝光、绿光、红光和近红外波段。经过筛选,共选取 2016—2021 年的 55 景影像用于监测文登区南部海域的紫菜养殖区,2019—2020 年间的 16 景影像用于监测荣成市南部海域的海带养殖区。所用影像时间如表 1 所示。统计年鉴数据来自《中国渔业统计年鉴》《山东渔业统计年鉴》和《威海统计年鉴》。

表 1 所用影像介绍

Tab. 1 Introduction of images

年份	影像日期
2016 年	01-25, 03-25, 04-24, 05-04, 07-13, 08-22, 09-11, 11-20, 12-10
2017 年	01-09, 03-10, 04-19, 05-19, 08-02, 09-11, 09-21, 10-21, 11-15, 12-05
2018 年	01-09, 02-13, 03-25, 04-19, 05-04, 06-03, 08-02, 10-21, 11-10, 11-30
2019 年	01-24, 02-23, 03-25, 04-14, 06-23, 08-17, 09-26, 10-31, 11-20, 12-20
2020 年	01-14, 02-23, 03-24, 04-03, 06-22, 07-02, 09-20, 10-25, 11-09, 12-19
2021 年	01-18, 02-02, 03-24, 04-18, 05-18, 07-22

3 研究方法

本文技术路线如图 2 所示,数据预处理主要有辐射定标、大气校正和影像裁剪等,提取后处理包括面积筛选与人工修正。其中,大气校正使用欧洲航空局提供的 Sen2cor 插件进行。

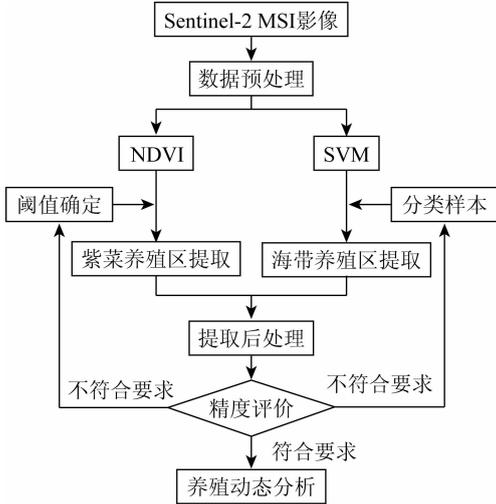


图 2 技术路线
Fig. 2 Technical route

紫菜富含叶绿素 a、胡萝卜素和叶黄素等色素^[17],具有与陆地绿色植物相似的光谱特征,即紫菜光谱存在红边效应。本文随机在 Sentinel-2 影

像的图 1(a)区域 A 范围内选取典型紫菜养殖区样本与海水样本,各 200 个像元,样本分布如图 3(a)所示。分别统计紫菜养殖区与海水样本的反射率均值,如图 3(b)所示。紫菜养殖区的光谱曲线在近红外波段处的值高于海水,而在红光波段处的值低于海水。所以,采用 NDVI 可以区分紫菜养殖区与海水。NDVI 的表达式为:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}, \quad (1)$$

式中 R_{NIR} 和 R_{Red} 分别为近红外和红光波段反射率,分别对应 Sentinel-2 影像第 8 与第 4 波段的反射率。针对紫菜养殖区提取的 NDVI 阈值确定,在 NDVI 影像上的紫菜养殖区域选取典型紫菜养殖区样本与海水样本,各 2 000 个像元,样本分布如图 3(c)所示,底图为 NDVI 值。统计样本的 NDVI 分布频率,如图 3(d)所示。根据频率分布情况,可初步确定区分紫菜养殖区与海水的阈值为 $[-0.4, 1]$,针对不同影像进行阈值调整。此外,经统计发现每块紫菜养殖方的面积均大于 $1\ 000\ m^2$,所以将筛选出面积大于 $1\ 000\ m^2$ 的斑块作为紫菜养殖区。故本文通过设置 NDVI 阈值初步提取紫菜养殖区,再对阈值提取结果进行面积筛选及人工修正,最终实现紫菜养殖区的监测。

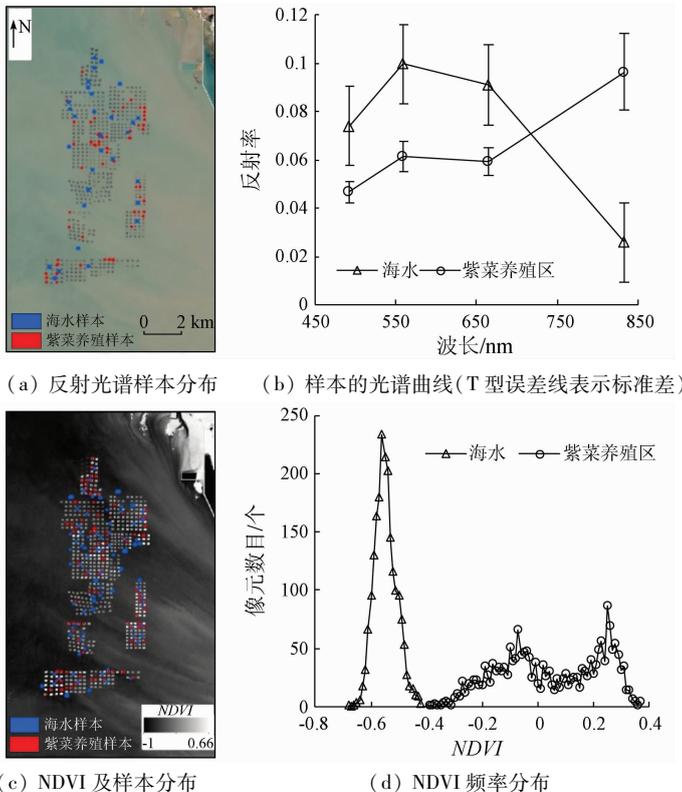


图 3 样本分布及相应的光谱曲线与 NDVI 频率分布

Fig. 3 Distribution and corresponding spectral curve of samples and frequency distribution of NDVI

经多次实验发现,在利用 NDVI 提取荣成市南部海域的海带养殖区时,NDVI 阈值法提取的效果较差。海带养殖区与周围海水均混有悬浮泥沙,导致海带养殖区与海水难以通过 NDVI 阈值法进行区分。故本文采用 SVM 机器学习分类方法,结合目视解译、面积筛选(将面积大于 1 000 m²的斑块作为海带养殖区)与人工修正实现海带养殖区的监测。其中,SVM 的核函数为线性核函数,且分类样本中典型海带养殖区样本与海水样本的分离度在 1.9 以上(研究表明样本分离度在 [0,2] 之间,尤其大于 1.8 时最佳^[18])。

在监测结果的精度评价中,分别目视选取养殖区与非养殖区验证样本,各 2 000 个像元,计算混淆矩阵,利用总体分类精度(overall accuracy, OA)与 Kappa 系数进行评价。每个季节选一景进行评价,选取 2019 年 1 月、4 月、6 月和 10 月的紫菜与海带养殖区的遥感监测结果进行精度评价。

4 结果与分析

4.1 监测结果与精度评价

图 1(a)中区域 A 范围中紫菜养殖的年度遥感监测结果如图 4 所示。紫菜的年度养殖方与年度监测面积,由前一年下半年下苗和第二年上半年的收割构成的一个养殖周期内的各期结果合并而成,如 2017 年度的紫菜养殖周期为 2016 年 7 月—2017 年 6 月。文登区南部海域的紫菜养殖块呈方形,与江苏连云港的紫菜养殖方形状类似;整体上,紫菜养殖区在五垒岛湾近海呈南北向分布,南北向跨度大,东西向跨度小。海带养殖区的监测结果如图 5 所示(仅展示 2020 年 2 月 23 日的监测结果,此时海带养殖的监测面积达 2020 年最大),荣成市南部海域的海带养殖呈条带状,紧沿岸边分布。通过目视观测,整体上遥感提取的紫菜与海带养殖区可以较好地覆盖底图显示的养殖方与养殖条带。

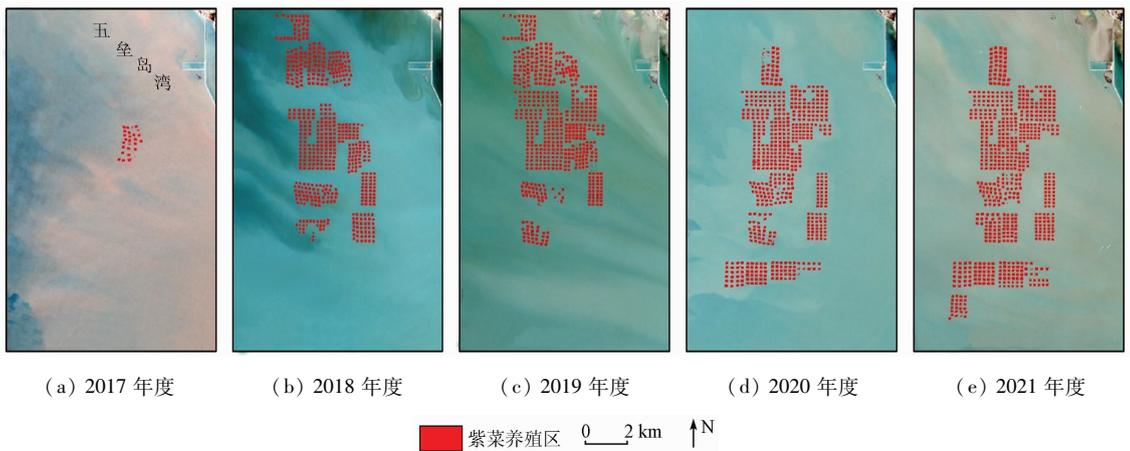


图 4 2017—2021 年度紫菜养殖区的遥感监测结果

Fig. 4 Remote sensing monitoring results of *Porphyra* aquaculture during 2017—2021



图 5 2020 年 2 月 23 日海带养殖区的遥感监测结果

Fig. 5 Remote sensing monitoring results of kelp farming areas on February 23, 2020

基于 NDVI 阈值法,利用 Sentinel-2 遥感影像追溯监测文登区南部海域大型藻类养殖历程发现,2016 年 9 月 11 日及以前影像上未监测到养殖区,

2016 年 11 月 20 日影像上开始有紫菜养殖区的分布;2016 年 12 月 10 日,监测到的紫菜养殖区总面积达到极大值(图 6(a)),约 0.38 km²;卫星监测可清晰识别养殖方,其最大数量为 27 个。据相关资料显示^[16],威海市文登区于 2016 年秋季开始在南部海域开展插杆式紫菜养殖,与卫星遥感结果一致;31 个养殖方(每方约 0.022 km²),与遥感监测结果间存在差异,这可能由于实际生产与原计划有一定出入。

基于验证样本计算 OA 与 Kappa 系数,计算结果如表 2 所示。针对 4 期紫菜养殖区的遥感监测结果,本文紫菜养殖区的 OA 均大于 92%,Kappa 系数均大于 0.84。针对 4 期海带养殖区的监测结果,OA 均大于 84%,除 2019 年 10 月 31 日外,其余 3 期海带养殖区的 Kappa 系数均大于 0.88。

表2 精度评价结果

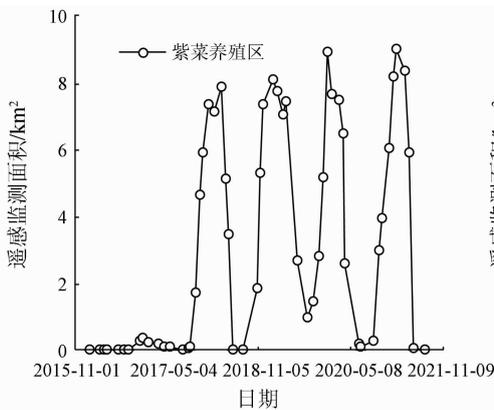
Tab.2 Results of the accuracy evaluation

指标	紫菜养殖区				海带养殖区			
	2019-01-24	2019-04-14	2019-06-23	2019-10-31	2019-01-24	2019-04-14	2019-06-23	2019-10-31
OA/%	99	99	92	95	94	94	95	84
Kappa	0.99	0.97	0.84	0.89	0.87	0.88	0.90	0.68

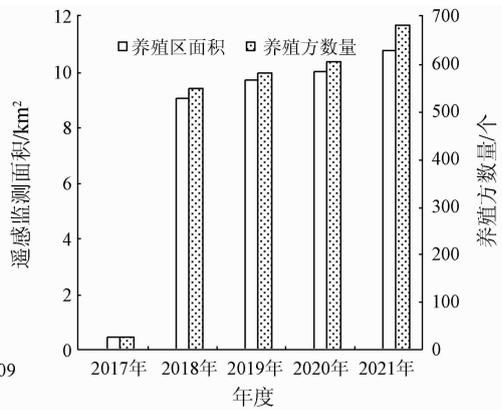
4.2 紫菜养殖年际变化

遥感监测的紫菜养殖区面积与养殖方个数如图6所示,2016—2021年,文登区紫菜养殖监测面积的逐月变化具有明显的周期性,每个周期内的遥感监测面积先增后减,故将每一养殖周期定义为一个养殖年度。文登区自2017年度开展养殖紫菜,2018年度便大幅增加,其后呈逐年增加趋势。2021年度紫菜养殖的监测面积比2017年度约多10.36 km²,养殖方个数多656个。2017—2018年度紫菜养殖

的监测面积与养殖方个数变化最大;在2018年以后,面积与养殖方数目的变化速率均减小,2019—2020年度变化最小。在空间上,如图4所示,2017—2021年度紫菜养殖的空间分布整体上逐渐变大,且变化明显,其中2017—2018年度变化最大,2018—2019年度与2020—2021年度变化相对较小。文登区自开始养殖紫菜,养殖区域呈先向岸扩展后离岸扩展。



(a) 2016—2021年养殖区监测面积变化



(b) 年度养殖区监测面积与养殖方个数变化

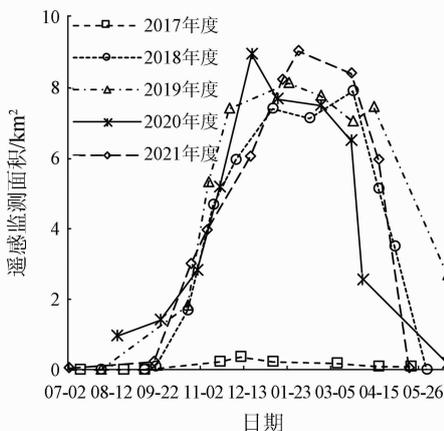
图6 遥感监测的紫菜养殖区面积与养殖方个数变化

Fig.6 Changes of the area of Porphyra aquaculture and the number of cultivation squares monitored by remote sensing

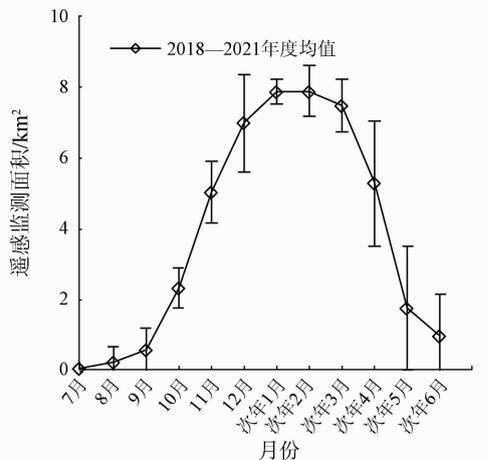
4.3 紫菜与海带养殖季节变化

文登区的紫菜养殖在每一年度均具有明显的季节性,如图7(a)所示,每一年度的逐月监测面积整体呈先增后减的趋势;2017—2021年度,紫菜养殖监测面积在12月、1—3月份监测面积较大,在7—8

月份监测面积较小。紫菜养殖的月均值曲线亦具有明显的季节性,如图7(b)所示,在2月份监测面积最大,在7月份监测面积最小。整体上,文登区紫菜养殖区的监测面积冬季最大,夏季最小。



(a) 逐月变化



(b) 月均值变化(T型误差线表示标准差)

图7 紫菜养殖遥感监测面积的季节变化

Fig.7 Seasonal changes of Porphyra culture monitoring area by remote sensing

选取 2019 年与 2020 年的 1—12 月的遥感影像,每月选用一景,开展紫菜与海带养殖区的对比监测,养殖区监测面积的逐月变化如图 8(a)所示。在 2019—2020 年,紫菜养殖的监测面积分别于 2019 年 8 月 17 日、2020 年 7 月 2 日出现极小值。在 2019 年 10 月 31 日和 2020 年 9 月 20 日,海带养殖的监测面积处于极小值,面积分别约为 0.84 km²和

0.7 km²。可以发现,紫菜养殖监测面积的极小值出现的时间比海带的大致早 2 个月。在 2019—2020 年,紫菜养殖的监测面积于 2019 年 4 月 14 日和 2019 年 12 月 20 日出现极大值,海带养殖的监测面积于 2019 年 6 月 23 和 2020 年 2 月 23 日出现极大值。可见紫菜养殖监测面积的极大值出现的时间也比海带的大致早 2 个月。

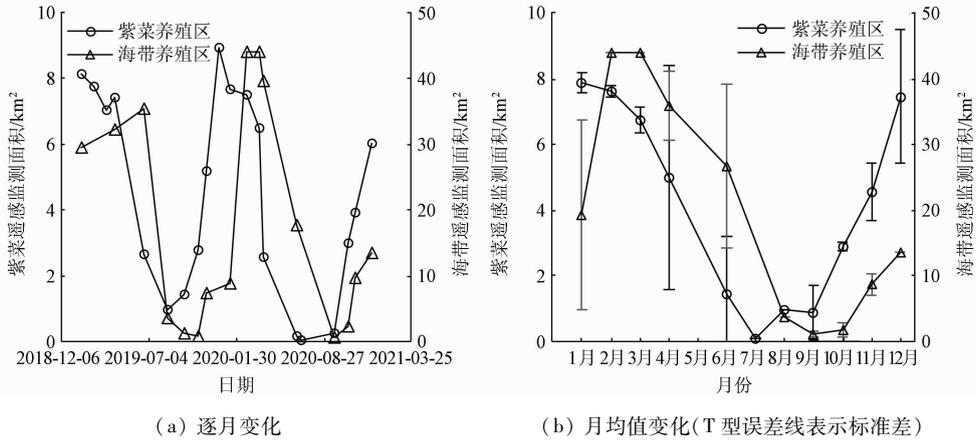


图 8 2019—2020 年紫菜与海带养殖的监测面积变化

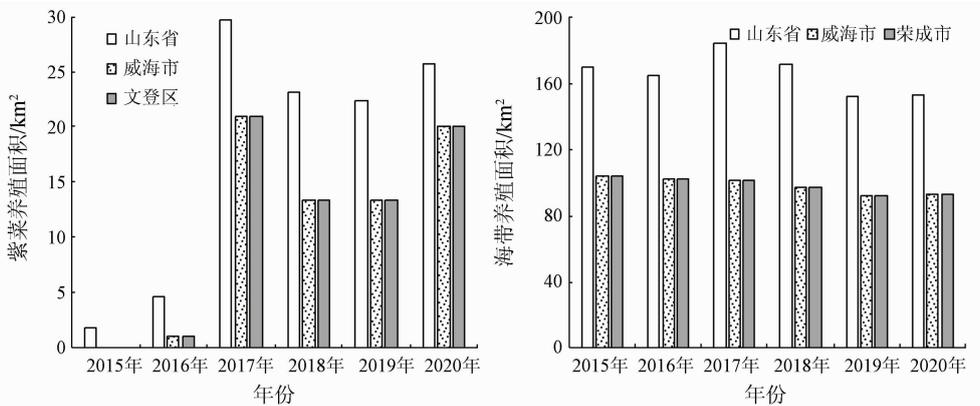
Fig. 8 Changes of the monitoring area of Porphyra and kelp culture from 2019 to 2020

将 2019 年与 2020 年相应月份的紫菜与海带养殖的监测面积分别取均值,如图 8(b)所示,因夏季的影像云量较多,所以共得到 11 个月份的紫菜监测面积均值和 10 个月份的海带监测面积均值。可以看到,在 1—12 月份紫菜养殖监测面积的月均值整体先减后增,而海带养殖监测面积的月均值整体先增后减再增。紫菜养殖监测面积的月均值的最小值出现在 7 月,而海带的出现在 9 月,时间间隔为 2 个月。此外,图 8 中的海带养殖监测面积的曲线整体

较紫菜的曲线均存在右移现象。上述表明,在同一养殖周期中,紫菜养殖监测面积的最大值出现在冬季,而海带养殖出现在初春;紫菜养殖监测面积的最小值出现在夏季,而海带养殖出现在秋季。整体而言,紫菜养殖监测面积最大值与最小值出现的时间比海带的早 1~2 个月。

4.4 与统计年鉴数据的对比分析

统计年鉴中紫菜与海带养殖面积的统计结果如图 9 所示。



(a) 山东省、威海市与文登区的紫菜养殖面积变化 (b) 山东省、威海市与荣成市的海带养殖面积变化

图 9 2015—2020 年统计年鉴中紫菜与海带的养殖面积变化

Fig. 9 Changes of the cultivation area of Porphyra and kelp in statistical yearbook during 2015—2020

对比图 6(b)与图 9(a)发现,整体上,紫菜年度养殖面积在遥感监测与统计年鉴中均呈现增加趋势。紫菜养殖面积的大幅度变化在本文遥感监测的

结果中出现在 2017—2018 年度,而在统计年鉴中出现在 2016—2017 年;这是因为统计年鉴中的紫菜年度养殖是由每年 1—12 月份的紫菜养殖组成,其

与本文所定义的紫菜年度养殖不同。如图 8(a) 与图 9(b) 所示, 本文遥感监测的荣成市部分海域的海带养殖面积整体变化不明显, 同样统计年鉴中 2015—2020 年荣成市的海带养殖面积整体变化也不明显。此外, 图 9 显示, 威海市的紫菜养殖面积约占山东省总养殖面积的 80%, 海带养殖面积约占山东省总养殖面积的 60%; 威海市的紫菜养殖均在文登区, 而海带养殖均在荣成市, 紫菜与海带养殖面积变化与山东省的总养殖面积变化基本一致。针对养殖周期跨年的大型海藻养殖, 统计年鉴按日历周期进行统计会导致时间信息不明确。由图 7 可知, 遥感能提供精细的季节变化特征, 可实现按养殖周期进行结果统计与分析; 并且, 遥感能提供精准的空间信息, 可对养殖区大型海藻生长的空间差异进行即时评估。如前所述, 考虑到研究区的紫菜与海带养殖在山东省占主要比重, 基于遥感的监测结果对威海市及山东省的紫菜与海带养殖状态有更好的指示作用。

5 结论与展望

本研究基于 Sentinel-2 卫星数据, 采用 NDVI 阈值法和 SVM 方法对威海市文登区南部海域的紫菜养殖区以及荣成市南部海域的海带养殖区的动态进行了对比监测。研究发现并证实了, 威海市及山东省紫菜养殖的大幅增加主要源于 2016 年秋季开始的威海市文登区南海海域的紫菜养殖扩张; 研究区的紫菜与海带养殖区遥感监测面积均呈冬高夏低的周期性变化特征, 紫菜养殖遥感监测结果的变化周期较海带早 1~2 个月。

卫星遥感数据能提供紫菜与海带养殖精准的生长时期空动态数据, 可以弥补统计年鉴数据时间、空间信息不全的不足, 这对威海市乃至山东省的大型海藻养殖管理有重要参考价值。在大型海藻养殖区遥感提取的基础上, 可进一步利用遥感监测估算其生长状态及生物量, 结合海温、水质等遥感监测对海藻产量及可能的灾害进行预警评估。

参考文献 (References):

- [1] 刘福利, 牛建峰, 隋正红, 等. 中国经济海藻养殖技术概况与展望[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(12): 1-9.
Liu F L, Niu J F, Sui Z H, et al. Overview and prospects of China economic seaweed cultivation technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(12): 1-9.
- [2] 卢霞, 顾杨, 王晓静, 等. 连云港近海紫菜养殖区遥感识别、空间变异和驱动分析[J]. 海洋科学, 2018, 42(7): 87-96.
Lu X, Gu Y, Wang X J, et al. The identification of Porphyra culture area by remote sensing and spatial distribution change and driving factors analysis[J]. Marine Sciences, 2018, 42(7): 87-96.
- [3] 李涵, 青平, 张晓恒, 等. 我国藻类产业发展现状、问题及对策建议[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(1): 12-20.
Li H, Qing P, Zhang X H, et al. Current status, problems and countermeasures of algae industry development in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(1): 12-20.
- [4] 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.
- [5] 魏振宁, 邢前国, 郭瑞宏, 等. 基于遥感的 2000—2015 年南黄海紫菜养殖空间分布变化研究[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(4): 17-22.
Wei Z N, Xing Q G, Guo R H, et al. Study on the spatial distribution variation of Porphyra aquaculture in the southern Yellow Sea during the period 2000—2015 retrieved by satellite remote sensing[J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(4): 17-22.
- [6] Xing Q, An D, Zheng X, et al. Monitoring seaweed aquaculture in the Yellow Sea with multiple sensors for managing the disaster of macroalgal blooms[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 111279.
- [7] 刘材材, 徐韧, 何培民, 等. 南黄海绿潮暴发与紫菜养殖的关系[J]. 海洋科学, 2017, 41(2): 35-43.
Liu C C, Xu R, He P M, et al. Research on the relations between green tide and Porphyra cultivation in the south Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2017, 41(2): 35-43.
- [8] 许海蓬, 张彦彦, 郑剑. 基于 SR-NDVI 和中值滤波的连云港海域紫菜筏架自动提取研究[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(2): 1-8.
Xu H P, Zhang Y Y, Zheng J. Research on the automatic extraction of floating raft aquaculture based on SR-NDVI and median filtering in Lianyungang[J]. Journal of Ocean Technology, 2021, 40(2): 1-8.
- [9] 郭瑞宏. 江苏沿海紫菜养殖时空动态遥感(2000—2015)[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
Guo R H. Evaluation on the changes in the seaweed (Porphyra yezoensis) aquaculture in Jiangsu coastal waters using remote sensing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [10] 初佳兰, 邵光辉, 赵建华, 等. 高分一号的浮筏养殖信息提取方法[J]. 测绘科学, 2020, 45(1): 92-98.
Chu J L, Shao G H, Zhao J H, et al. Information extraction of floating raft aquaculture based on GF-1[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(1): 92-98.
- [11] 武易天, 陈甫, 马勇, 等. 基于 Landsat8 数据的近海养殖区自动提取方法研究[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(3): 96-105. doi:10.6046/gtzyyg.2018.03.14.
Wu Y T, Chen F, Ma Y, et al. Research on automatic extraction method for coastal aquaculture area using Landsat8 data[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(3): 96-105. doi: 10.6046/gtzyyg.2018.03.14.
- [12] Won E S, Ouchi K, Yang C S. Extraction of underwater laver cultivation nets by SAR polarimetric entropy[J]. IEEE Geoscience and

Remote Sensing Letters, 2013, 10(2): 231–235.

- [13] 胡姣婵, 黄梦迪, 于浩洋, 等. 基于哨兵二号遥感影像的近海养殖区提取方法研究[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(4): 619–627.

Hu J C, Huang M D, Yu H Y, et al. Research on extraction method of offshore aquaculture area based on Sentinel-2 remote sensing imagery[J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(4): 619–627.

- [14] Lu X, Zhang Y Z, Zhang S, et al. Spatial change analysis of Porphyra yezoensis aquaculture in the Lianyungang coastal area by the use of remote sensing and geographic information system technology [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2019, 47(9): 1609–1622.

- [15] 曹万云. 荣成海带养殖时空变化与适宜性评价研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2016.

Cao W Y. Spatial-temporal variation and suitability evaluation of kelp culture in Rongcheng[D]. Yantai: Ludong University, 2016.

- [16] 海洋网. 威海海洋食品又添新品 文登千亩紫菜收割上市[EB/

OL]. (2017-01-10)[2022-02-24]. <http://www.hellosea.net/Product/7/2017-01-10/35877.html? cktove = ayvg03>.

Ocean Net. Weihai seafood has added new products Wendeng thousand Mu seaweed harvested and listed[EB/OL]. (2017-01-10)[2022-02-24]. <http://www.hellosea.net/Product/7/2017-01-10/35877.html? cktove = ayvg03>.

- [17] 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): 8–13.

Aruga Y, Yu T L. Color and pigment of *Porphyra yezoensis*[J]. Foreign Aquatic Products, 1982(4): 8–13.

- [18] 吴健生, 潘况一, 彭建, 等. 基于 QUEST 决策树的遥感影像土地利用分类——以云南省丽江市为例[J]. 地理研究, 2012, 31(11): 1973–1980.

Wu J S, Pan K Y, Peng J, et al. Research on the accuracy of TM images land-use classification based on QUEST decision tree: A case study of Lijiang in Yunnan[J]. Geographical Research, 2012, 31(11): 1973–1980.

Satellite remote sensing – assisted comparative monitoring of dynamic characteristics of macroalgae aquaculture in Weihai City, Shandong Province, China

HOU Yingzhuo^{1,2,3}, JI Ling⁴, XING Qianguo^{1,2,3}, SHENG Dezhi^{1,2,3}

- (1. CAS Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai 264003, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Yantai Marine Environment Monitoring Center, Yantai 264006, China)

Abstract: Monitoring the spatio-temporal dynamic changes in macroalgae aquaculture is crucial to its environmental management. However, few studies have been reported on the comparative monitoring of different macroalgae species. Based on images of the Sentinel-2 satellite and using the normalized difference vegetation index (NDVI) and the support vector machine (SVM), this study monitored the dynamic characteristics of both the *Porphyra* aquaculture area in the sea area of southern Wendeng District, Weihai City, Shandong Province and the kelp aquaculture area in the sea area of southern Rongcheng City, Weihai City. The results show that: ① The *Porphyra* aquaculture in Wendeng District was first captured in the satellite images of 2016, which is the same as the first year of *Porphyra* aquaculture in this city; the extraction method used in this study performed well in extracting the information about both the *Porphyra* and the kelp aquaculture areas overall, with the overall accuracy of 84% and above; ② During 2017–2021, the *Porphyra* aquaculture area monitored through remote sensing increased year by year and showed a trend far away from the shore; ③ The *Porphyra* and kelp aquaculture areas monitored both showed seasonal variations (high in winter and low in summer) of cold-water macroalgae aquaculture, but the minimum and maximum values of the *Porphyra* aquaculture area appeared 1~2 months earlier than those of the kelp aquaculture area. Compared with statistical yearbooks, satellite remote sensing can provide more accurate spatio-temporal information on macroalgae aquaculture. This study can be used as a reference in terms of monitoring technology and data for the management of macroalgae aquaculture in coastal areas of northern China.

Keywords: Sentinel-2; macroalgae; *Porphyra*; kelp; Shandong Peninsula; Yellow Sea

(责任编辑: 陈理)