

结合 GOCI 数据的黄海绿潮遥感监测及漂移轨迹研究

陈莹¹, 孙德勇^{1,2,3*}, 张海龙^{1,2,3}, 王胜强^{1,2,3}, 丘中锋^{1,2,3}, 何宜军^{1,2,3}

¹南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044

²江苏省海洋动力遥感与声学重点实验室, 江苏 南京 210044

³江苏省海洋环境探测工程技术研究中心, 江苏 南京 210044

摘要 结合 GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)传感器的波段特征,基于缨帽变换方法设计了一种简单有效的绿潮指数(TCT-GTI)算法。结合目视判断的绿潮识别结果,将 TCT-GTI 算法与两种已有的遥感算法(AFAI 和 IGAG 算法)监测结果进行对比发现,TCT-GTI 算法的绿潮遥感监测结果精度较高,具有较高的可信度。将 TCT-GTI 算法应用到 2017 年多景 GOCI 影像,对中国黄海海域绿潮信息进行提取,同时分析绿潮覆盖面积的日变化特征,研究 2017 年绿潮暴发事件的漂移轨迹。研究表明,绿潮覆盖面积在中午 12:00 达到最大,这可能是光合作用等因素的影响。2017 年,绿潮暴发事件经历了西北至东北的漂移路径,由江苏盐城外海海域向西北方向漂移至南黄海东部,然后继续向东北方向移动,抵达山东半岛南岸,逐渐消亡。

关键词 海洋光学; 绿潮; 绿潮指数算法; 静止轨道海洋水色成像仪; 漂移轨迹; 黄海

中图分类号 P76

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0301001

Remote-Sensing Monitoring of Green Tide and Its Drifting Trajectories in Yellow Sea Based on Observation Data of Geostationary Ocean Color Imager

Chen Ying¹, Sun Deyong^{1,2,3*}, Zhang Hailong^{1,2,3},

Wang Shengqiang^{1,2,3}, Qiu Zhongfeng^{1,2,3}, He Yijun^{1,2,3}

¹School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nangjing, Jiangsu 210044, China;

²Jiangsu Key Laboratory of Ocean Dynamics Remote Sensing and Acoustics, Nangjing, Jiangsu 210044, China;

³Jiangsu Research Center for Ocean Survey Technology, Nangjing, Jiangsu 210044, China

Abstract This study presents a simple and effective tasseled cap transformation based green tide index (TCT-GTI) algorithm by combining the band characteristics of the geostationary ocean color imager (GOCI). By analyzing the identification results of green tide from visual judgement, and comparing them with the monitoring results of two existing remote-sensing algorithms (AFAI and IGAG algorithms), we find that the TCT-GTI algorithm shows relatively high accuracy and reliability. In 2017, the TCT-GTI algorithm is applied to the extraction of green tide information in the Yellow Sea of China using the multi-view GOCI images. We analyze the daily variation characteristics of the green-tide coverage area and study the drift trajectory of the green tide event in 2017. The obtained results show that the green-tide coverage area reaches the maximum at 12:00, which may be influenced by factors such as photosynthesis. This bloom event of green tide in 2017 experiences a drifting trajectory from northwest to the northeast; i. e., it drifts from the offshore waters along Yancheng City in Jiangsu Province, to the east of the South Yellow Sea, then continues to move northeastward, reaches the south bank of the Shandong

收稿日期: 2019-08-12; 修回日期: 2019-09-18; 录用日期: 2019-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41876203, 41576172)、江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(JY-084)、江苏高校“青蓝工程”中青年学术带头人(R2019Q07)、南京信息工程大学人才启动经费(2019R058)、江苏省海洋科技创新项目(HY2017-5)、南京市留学人员科技创新项目(R2019LZ05)

* E-mail: sundeyong@nuist.edu.cn

Peninsula, and gradually disappears.

Key words oceanic optics; green tide; green tide index algorithm; geostationary ocean color imager; drifting trajectory; Yellow Sea

OCIS codes 010.4450; 010.0280; 010.7340

1 引 言

绿潮^[1-2]是指海洋水体中浒苔等大型绿藻爆发性增殖或高度聚集而引起水体变色的一种有害海洋生态现象。自 20 世纪 80 年代以来,亚洲日本、菲律宾,欧洲意大利、丹麦、荷兰、法国,美洲的美国、加拿大等国家都出现了绿潮暴发事件^[3-4]。在 2007 年,中国黄海中部和北部沿海海域首次发现了由大型藻类暴发增殖引起的绿潮灾害^[5]。特别的是,自 2008 年以来,每年 5 月到 8 月份黄海海域均会持续发生不同规模的浒苔绿潮灾害^[6]。据中国海洋局海洋灾害公报统计,我国黄海沿海海域在 2014 年至 2017 年期间的绿潮最大分布面积依次为 50000, 52700, 57500, 29522 km²,这对海洋生态环境、旅游业等产生了巨大的影响,并造成了巨大的经济损失。因此,及时、准确、有效地获取绿潮信息,对预防、监测和治理绿潮海洋灾害至关重要。绿潮灾害事件具有分布范围广和漂移速度快等特点,利用卫星遥感技术可以在时间和空间尺度上连续地提供观测数据,以便准确实时捕捉浒苔暴发的时间、范围和面积等信息,具有传统调查和实测方法不可替代的优势,卫星遥感数据尤其是光学遥感卫星已经被广泛用于监测绿潮^[7]。

随着卫星遥感技术的发展,一些基于光学特性的浒苔监测算法已经被广泛提出。根据浒苔在 700 nm 附近的“红边位移”特征^[8],研究学者提出了诸多浒苔遥感监测算法,如单波段阈值法、多波段比值法、监督分类方法以及人工智能方法等。例如, Son 等^[9]基于现场实测和静止轨道海洋水色成像仪(GOCI)数据,分析了藻类的光谱特征,提出了针对 GOCI 数据的“GOCI 漂浮绿潮指数”(IGAG)算法,同时将该算法应用于中国黄海、东海及韩国西部海岸浒苔灾害的监测,结果表明 IGAG 算法精度比归一化差异植被指数(NDVI)和增强植被指数(EVI)的高。Hu^[10]基于近红外(NIR)波段与红光、短波红外(SWIR)波段形成基线之间的瑞利校正反射率(R_{rc})差异,设计了漂浮藻类指数(FAI),并将该指数应用于 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、Landsat-5/TM 和 Landsat-7/ETM+等卫星数据源。Xing 等^[11]针对 HJ-1 卫星开发了漂浮藻类高度虚拟基线指数(VB-FAH),并

分析了黄海海域的绿潮暴发情况。但是,上述算法主要依赖于遥感反射率或瑞利校正后的反射率信息,而获取相关信息需要相对复杂、精确的大气校正程序,这在一定程度上增加了算法实施的复杂性。同时,大气校正需要更多的辅助信息,包括传感器的类型和高度、飞行时间、几何参数以及影像中心位置等信息^[12]。此外,目前还没有特定的针对海洋中绿色大型藻类的大气校正方法^[10,13]。因此,基于遥观测信号,需要开发一种无需进行大气校正且简单有效的绿潮遥感监测算法。

缨帽变换(TCT)方法是一种常用的遥感影像增强方法,被广泛应用于陆地植被信息提取。苏琦等^[14]将基于 DN(Digital Number)值的缨帽变换植被信息提取结果与 NDVI 结果进行比较,结果表明基于缨帽变换方法提取的结果图像纹理清晰,光谱保持能力强。陈利等^[15]采用 World View-2 的 DN 数据进行缨帽变换及主成分分析处理,获得了精度较高的植被信息。Zhang 等^[12]基于 HJ、GF-1 以及 Landsat-7 等数据的 DN 值设计了漂浮藻类指数(FGTI)用于提取中国近海的绿潮信息。上述研究证明了利用缨帽变换方法可以直接从卫星 DN 数据中提取大型漂浮藻类的图像信息,且信息的强度更强。

GOCI 数据覆盖我国近海区域,并且 GOCI 具有高时间分辨率(1 h),能逐小时获取从北京时间(GMT)8:00 到 15:00 的观测数据,这为监测和提取黄海浒苔逐小时变化特征提供了极有利的数据支撑。因此,本文以中国黄海为研究区,借鉴 Zhang 等^[12]的 FGTI 设计思路,结合 GOCI 传感器的波段设置特征,利用缨帽变换处理 DN 值以增强绿潮的图像特征(无需大气校正程序),进而设计了绿潮指数(TCT-GTI)。将该算法用于提取 2017 年黄海绿潮暴发信息,并深入研究分析绿潮的逐小时变化特征和漂移路径,以期绿潮灾害应急决策提供可靠的数据支持和全面保障。

2 研究区域与研究数据

2.1 研究区域概况

研究区域黄海是北太平洋西部一个半开放的陆架海,其经纬度大约为 30.5°N 到 39.8°N, 118.5°E 到 126.8°E[图 1(a)]。该海域横跨亚热带和暖温

带,夏季温暖湿润,同时受到陆地河流径流入海以及外海潮波交汇的影响^[16]。由于沿岸无机营养盐的持续输入,加上风、温度、流场等有利条件,大型漂浮藻类会在该区域内发生大规模的暴发增殖现

象^[17-20]。图 1(b)和图 1(c)分别表示北京时间 2017 年 5 月 26 日绿潮浒苔暴发的真彩色遥感影像以及 2016 年 7 月 10 日青岛遭受绿潮浒苔袭击时的航拍影像。

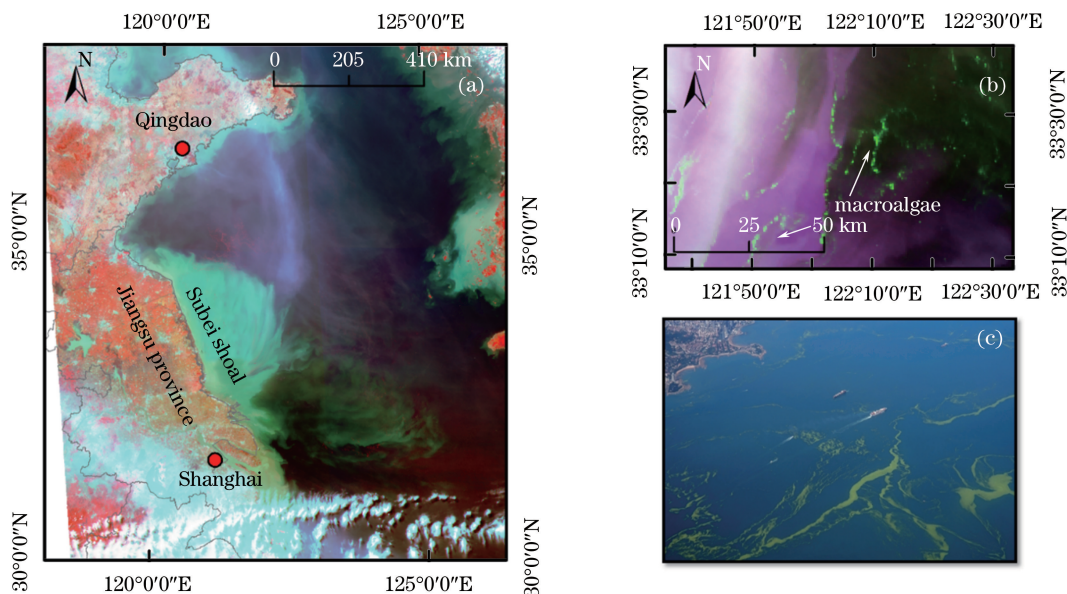


图 1 黄海区域浒苔分布。(a)黄海的位置分布示意图,其 RGB 影像为 2017 年 5 月 26 日 GOCI 假彩色合成影像;

(b) 2017 年 5 月 26 日青岛沿岸 GOCI 真彩色合成影像;(c) 2016 年 7 月 10 日青岛遭受浒苔袭击时的航拍影像

Fig. 1 Distribution of *Ulva prolifera* in Yellow Sea area. (a) Location of Yellow Sea, where RGB image shows pseudo-color composite image of GOCI acquired on 26 May, 2017; (b) true-color composite image of GOCI along coast of Qingdao acquired on 26 May, 2017; (c) aerial photo of Qingdao coast attacked by *Ulva prolifera* taken on 10 July, 2016

2.2 研究数据及其预处理

搭载了 GOCI 传感器的通信、海洋与气象学卫星 COMS (Communication Ocean and Meteorological Satellite)于 2010 年 6 月成功发射。GOCI 是世界上第一个用于海洋水色观测的地球静止轨道海洋卫星传感器,主要用于对朝鲜半岛附近海域进行近实时监测,其覆盖范围为 2500 km×2500 km。GOCI 的空间

分辨率为 500 m×500 m,时间分辨率为 1 h,可以逐小时获取从北京时间上午 8 时到下午 3 时的观测数据。GOCI 传感器设置了 6 个可见光波段和 2 个近红外波段,如表 1 所示。由于 GOCI 每天连续 8 h 逐小时连续观测,并且覆盖了包括中国黄海、渤海以及东海等海域,因此高时间分辨率的 GOCI 可为黄海海域绿潮的遥感研究提供充足的数据保障。

表 1 GOCI 传感器的波段特征及其主要应用

Table 1 Band characteristics of GOCI sensor and its main applications

Band	Band center /nm	Bandwidth /nm	SNR(signal to noise ratio)	Type	Primary use
1	412	20	1000	Visible	Yellow substance turbidity
2	443	20	1190	Visible	Chlorophyll absorption maximum
3	490	20	1170	Visible	Chlorophyll and other pigments
4	555	20	1070	Visible	Turbidity, suspended sediment
5	660	20	1010	Visible	Baseline of fluorescence signal, chlorophyll, suspended sediment
6	680	10	870	Visible	Atmospheric correction and fluorescence signal
7	745	20	860	NIR	Atmospheric correction and baseline of fluorescence
8	865	40	750	NIR	Aerosol optical thickness, vegetation, water vapor reference over the ocean

从韩国海洋卫星中心 (http://kosc.kiost.ac.kr/eng/p10/kosc_p11.html) 获取 2017 年 5 月 ~ 8 月期间的 GOCI Level-1B 数据, 并进行图像预处理, 包括辐射校正、几何校正、影像裁切和水陆分离等。需要说明的是, 虽然本研究基于 GOCI 数据 DN 值进行绿潮提取, 无需进行大气校正, 但为了验证构建算法的监测精度, 采用两种已有绿潮监测算法进行对比, 利用 GOCI 数据处理系统 (GDPS) 进行大气校正以获得 R_{rc} 数据^[20-21]。

本研究筛选了 2017 年所有无云的有效数据, 其中对包括 2017 年 5 月 19 日、2017 年 6 月 16 日以及 2017 年 7 月 13 日的 GOCI 影像进行算法介绍。另外, 选取 2017 年 5 月 13 日、2017 年 5 月 21 日、2017 年 6 月 4 日、2017 年 6 月 7 日、2017 年 6 月 26 日、2017 年 6 月 27 日和 2017 年 7 月 1 日的 GOCI 影像用于分析绿潮漂移轨迹。

根据美国国家航天航空局 (NASA) 的 CCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) 海表面风矢量分析数据 (<http://www.remss.com/measurements/ccmp/>) 的海表风场资料分析风速对绿潮浒苔漂移路径的影响。CCMP 的分辨率为 6 h, 空间分辨率为 0.25° , 覆盖范围广且具有较高连续性^[22]。

3 研究方法

3.1 缨帽变换原理的简介

缨帽变换又称 K-T 变换 (Kauth-Thomas Transformation), 是 1976 年 Kauth 和 Thomas 在研究陆地卫星 Landsat/MSS (multi-spectral scanner) 图像反映的农作物和植被生长的过程中提出的经验性多波段图像的线性变换方法^[23]。该方法是一种基于植被和土壤在影像中的物理特征, 利用多维光谱空间的信息分布结构对植被进行信息提取的图像增强方法^[24]。缨帽变换方法基于植被特征, 对原始遥感影像进行线性变换以增强影像的植被信息, 已被广泛用于各类传感器, 如 Landsat 系列、MODIS、HJ-1、IKONOS 以及 QuickBird 等^[25-27], K-T 变换本质上是一种特殊的主成分变换 (Principal Component Analysis), 其转换公式为

$$U = RX + r, \quad (1)$$

式中: X 为原始影像波段组成的向量矩阵; R 为缨帽变换系数; U 为变换后的影像; r 表示为避免出现负值而加入的特征常数偏移量。

相关研究表明, 浒苔和陆地植被信息具有相似的光谱特征^[7]。为了更好地对比分析浒苔与陆地植

被光谱的差异, 从 GOCI 影像上目视选取了陆地植被、浒苔、海水和云像元, 对应的反射率光谱如图 2 所示。从图 2 可以看出, 影像中大型漂浮藻类和陆地植被具有相同光谱特征, 在 555 nm 和 754 ~ 865 nm 有明显的反射峰, 在 660 nm 附近有明显的吸收峰, 并且在 745 nm 附近反射率急剧上升, 形成“红边现象”。综上所述, 利用缨帽变换增强海洋漂浮藻类信息并对其进行提取, 具有一定理论依据。

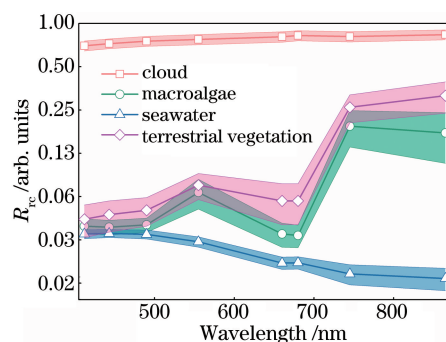


图 2 大型藻类、海水、陆地植被和云像元的瑞利校正反射率光谱平均值 (实线) 和标准差 (阴影)

Fig. 2 Mean value (solid line) and standard deviation (shadow) of Rayleigh-corrected reflectance spectra of macroalgae, seawater, terrestrial vegetation, and cloud pixels

3.2 TCT-GTI 算法的构建

缨帽变换的系数主要受影像 DN 值以及传感器波长的影响, GOCI 数据的波长设置类似于 IKONOS, 即 450 ~ 520 nm (蓝)、510 ~ 600 nm (绿)、630 ~ 700 nm (红) 和 750 ~ 860 nm (近红外), 这对应于 GOCI 的 490 nm (Band 3)、555 nm (Band 4)、660 nm (Band 5) 以及 865 nm (Band 8)。本研究利用 Horne^[28] 提出的 IKONOS 传感器的正交变换系数, 对大量图像进行施密特正交化并求出其总体平均值, 该平均值即为缨帽变换系数。结合 (1) 式和 IKONOS 的缨帽变换系数, GOCI 数据使用的缨帽变换公式为

$$\begin{bmatrix} 0.326 & 0.509 & 0.560 & 0.567 \\ -0.311 & -0.356 & -0.325 & 0.819 \\ -0.612 & -0.312 & 0.722 & -0.081 \\ -0.650 & 0.719 & -0.243 & -0.031 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{DNblue} \\ x_{DNgreen} \\ x_{DNred} \\ x_{DNnir} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: x_{DNi} 表示第 i 波段的 DN 值 ($i = \text{blue, green, red, nir}$); 四个分量 U_1, U_2, U_3, U_4 分别表示 DN 值

经缨帽变换后得到的亮度、绿色、湿度和黄色。在缨帽变换得到的四个分量中,前三个分量和地物类型密不可分。第一个亮度分量 U_1 为四个波段 DN 值的加权和,表示总反射率大小。 U_2 表示绿色,具体为近红外波段和可见光波段 DN 值的差值,突出了植被的特征^[29]。漂浮大型藻类的 U_2 值较高,而海水则较低。 U_3 可认为是红光波段减去蓝光波段,根据该分量可以对水体、植被及土壤作出准确细致的分析^[30]。 U_4 为黄色,表示绿光波段减去蓝光波段,但是该分量中噪声较大,所以在大多数情况下很少使用^[28,31]。综上,本研究的重点是分析前三个缨帽变换分量(即 U_1 、 U_2 及 U_3) 中大型漂浮藻类和海水的图像特征,建立一种有效的藻类识别算法。

首先利用(1)式对 GOCI 数据的 DN 影像进行缨帽变换获得四个分量,即亮度、绿色、湿度和黄色。然后利用 ENVI 软件的像素光谱采集模块,随机选

取 2017 年 5 月 19 日浒苔生长、2017 年 6 月 16 日浒苔暴发以及 2017 年 7 月 13 日浒苔消亡三个阶段,收集相应绿潮、海水以及厚云的像元样本(N 表示像元个数),如图 3 所示。从图 3 中可以看出,浒苔和海水的绿色分量 U_2 和湿度分量 U_3 存在明显的差异,可以基于海水和浒苔之间 U_2 和 U_3 的差异增强海水和漂浮藻类的对比。因此,针对 GOCI 数据,提出了基于缨帽变换方法的绿潮指数 $x_{TCT-GTI}$,其定义为绿色分量 U_2 和湿度分量 U_3 的比值,即

$$x_{TCT-GTI} = \frac{U_2}{U_3} \quad (3)$$

通过统计大型藻类和海水的 $x_{TCT-GTI}$ 值(图 4)可知,浒苔的 $x_{TCT-GTI}$ 值通常为 0.75,而海水像元的值大多集中在 0.8,所以可以将 $x_{TCT-GTI}$ 值的阈值设置为 0.75,大于 0.75 的为海水,小于 0.75 的为藻类。因此在不需大气校正的情况下,可以通过缨帽变换方法提取出海水中的大型藻类。

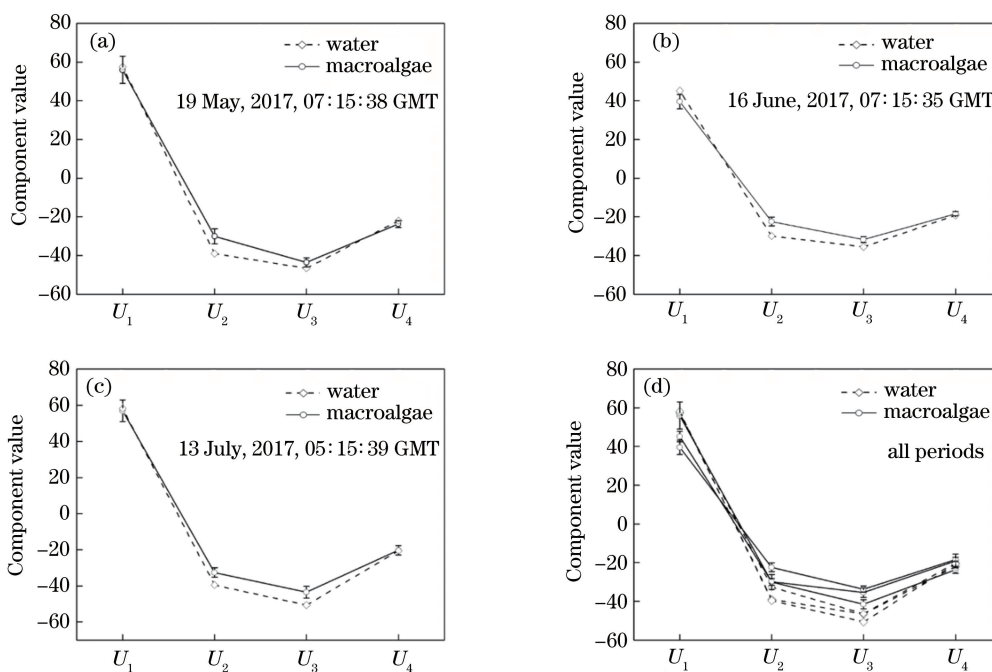


图 3 三个不同时期大型漂浮藻类及海水的缨帽变换组成特征曲线(误差线代表平均值的标准差)。

(a)2017 年 5 月 19 日;(b)2017 年 6 月 16 日;(c)2017 年 7 月 13 日;(d)三个时期

Fig. 3 Characteristic curves of K-T transformation components of floating macroalgae and seawater at three different periods (error lines represent standard deviation of mean values). (a) 19 May, 2017; (b) 16 June, 2017; (c) 13 July, 2017; (d) three different periods

由于卫星光学传感器无法穿透厚云^[32],获取厚云下的浒苔信息,因此首先需要对 GOCI 数据进行云掩模处理。厚云在遥感影像上往往表现出高反射率^[33-34],而缨帽变换的亮度分量 U_1 反映的是地物总体反射率,故厚云在亮度分量上具有较大

值,并且明显高于海水和绿潮像元,如图 5 所示。从图 5 中看出,绿潮像元和海水的亮度值低于 100,而厚云的亮度值范围分布在 250 以上。因此,利用亮度分量设置合理阈值可以进行简单的去云处理。

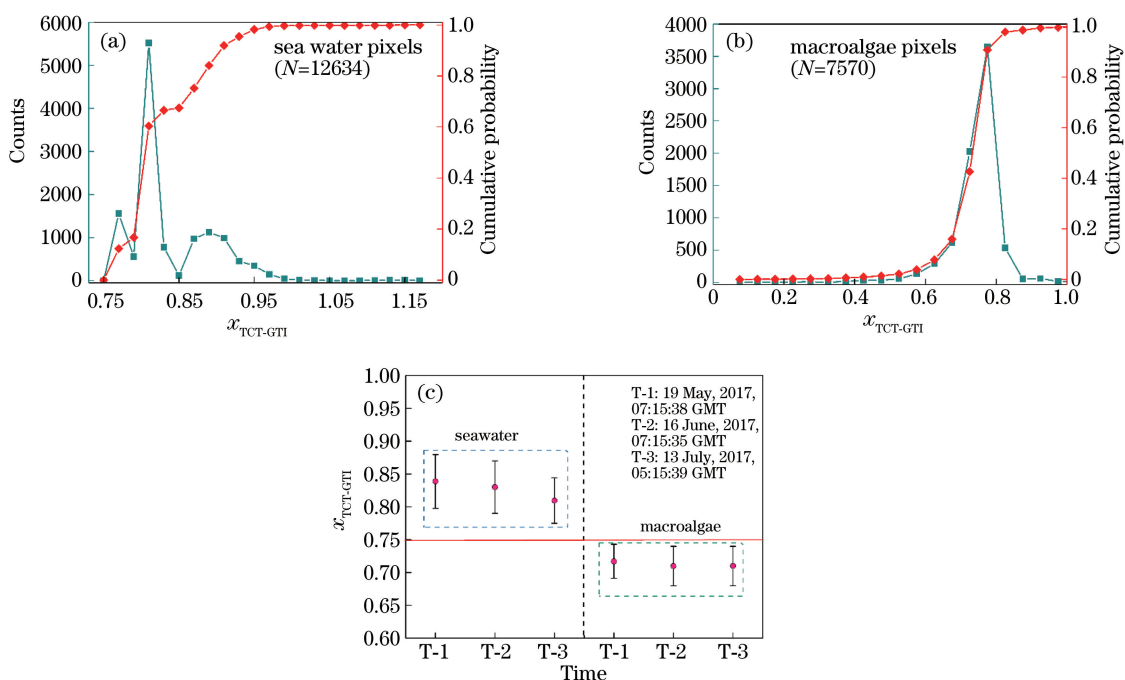


图 4 不同目标地物 TCT-GTI 的概率分布以及累积概率分布。(a)海水像元($N=12634$)；
(b)绿潮像元($N=7570$)；(c)所有绿潮像元和海水像元 TCT-GTI 均值及标准差

Fig. 4 Probability and cumulative probability distributions of TCT-GTI values for different target object pixels. (a) Seawater pixels ($N=12634$); (b) *Ulva prolifera* pixels ($N=7570$); (c) mean values and standard deviation of TCT-GTI values for all *Ulva prolifera* and seawater pixels

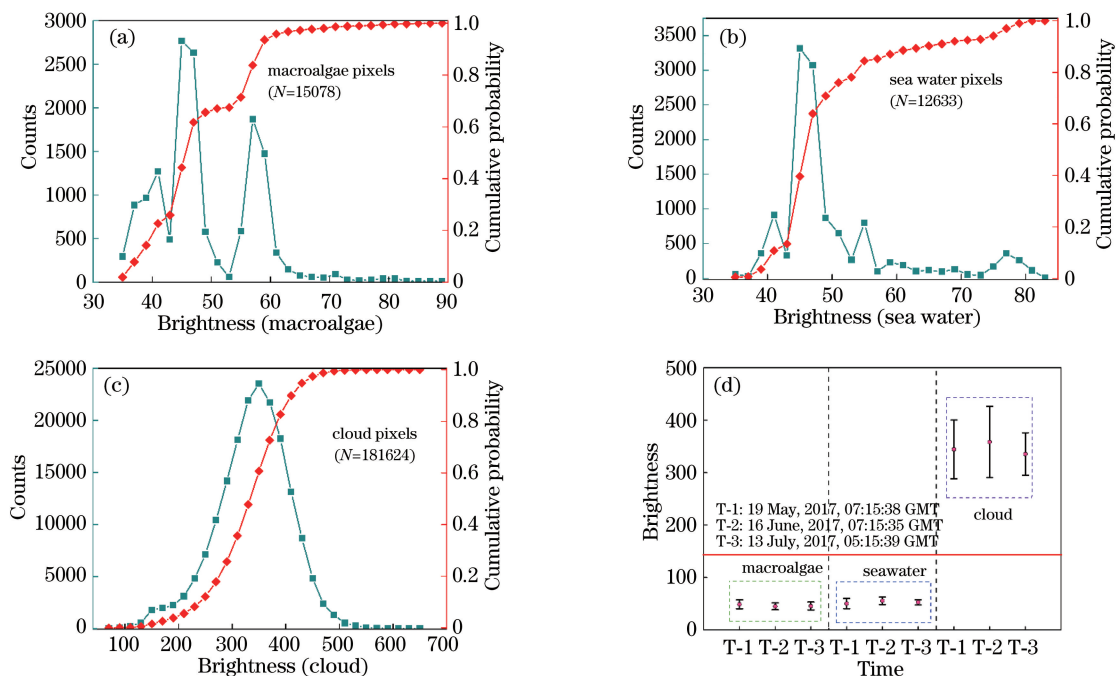


图 5 不同目标地物亮度值的概率分布以及累积概率分布。(a)绿潮($N=15078$)；(b)海水($N=12633$)；
(c)厚云($N=181624$)；(d)所有绿潮像元、海水像元和厚云像元亮度均值及标准差

Fig. 5 Probability and cumulative probability distributions of brightness values for different target object pixels. (a) *Ulva prolifera* ($N=15078$); (b) seawater ($N=12633$); (c) thick cloud ($N=181624$); (d) mean values and standard deviation of brightness values for all *Ulva prolifera*, seawater, and thick cloud pixels

3.3 算法的精度验证

由于绿潮漂移速度快覆盖范围广,难以获得实测的绿潮覆盖面积,故无法进行直接的定量研究,类似于叶绿素 *a* 和悬浮物浓度。为了定量评估 TCT-GTI 算法监测精度,采用了三种间接验证方法:1)与RGB 彩色合成图像进行对比分析;2)与两种传统藻类监测算法(AFAI 算法和 IGAG 算法)进行对比;3)利用常用的混淆矩阵对算法精度进行评价。与 RGB 彩色合成影像进行对比可以定性分析大型藻类提取精度,而与两种传统藻类监测方法的对比和采用混淆矩阵可以定量分析 TCT-GTI 算法的监测精度。下面对第 2)和 3)的验证方法进行详细介绍。

3.3.1 与 AFAI 和 IGAG 算法的对比

AFAI 和 IGAG 是两种常用的绿潮监测指数。将 x_{IGAG} ^[9] 定义为几个波段比值之和,即

$$x_{IGAG} = \frac{R_{555} + R_{660}}{R_{745} - R_{660}} + \frac{R_{754}}{R_{660}}, \quad (4)$$

式中: R_{555} 、 R_{660} 和 R_{745} 分别表示 GOCI 数据绿光波段和两个红光波段的反射率。 x_{AFAI} 的定义为^[10]

$$x_{AFAI} = R_{745} - R_{660} - \frac{(R_{865} - R_{660})(\lambda_{745} - \lambda_{660})}{\lambda_{865} - \lambda_{660}}. \quad (5)$$

式中: R_{660} 、 R_{745} 和 R_{865} 分别表示 GOCI 数据 660 nm、745 nm 以及 865 nm 波段的反射率。

同时,为了定量验证 TCT-GTI 算法藻类提取精度,计算和对比了 TCT-GTI 算法和其他两种算法提取绿潮面积的结果。本文将大型藻类的覆盖面积(A_a ; km^2) 定义为

$$A_a = N_A \times R_S^2, \quad (6)$$

式中: N_A 为影像中大型藻类像素之和; R_S 为卫星传感器的空间分辨率(对于 GOCI 数据, $R_S = 0.5 \text{ km}$)。

3.3.2 TCT-GTI 算法混淆矩阵

混淆矩阵又称为误差矩阵,是评价分类器性能的一种常用方法,通常用来描绘样本数据的真实属性与识别结果类型之间的关系^[35-37]。在误差矩阵的基础上,计算五个统计测量值,包括总体分类精度(Overall accuracy, x_{OA}),准确率(Precision, $x_{Precision}$),召回率(Recall, x_{Recall}),F1 值(F1-score, $x_{F1-score}$)和 Kappa 系数(K)。 x_{OA} 表示被正确分类的类别像元数与总的类别个数的比值。 $x_{Precision}$ 表示正确分类的类别像元与识别出的该类像元总数的比值。 x_{Recall} 为正确分类的类别像元与图像中该类像元总数的比值,他们分别是衡量查准率和查全率的指标。 $x_{F1-score}$ 定义为准确率和召回率的调和平均值,是评价分类精度的综合指标。 K 为一个比值,代表分类与完全随机的分类产生错误减少的比例。图 6 展示了误差矩阵的形式和相关计算公式,其中 X_{WA} 和 X_{AW} 分别表示将藻类误判为海水以及将海水误判为藻类的像元个数。 X_{AA} 和 X_{WW} 分别表示被正确识别为藻类和海水的像元个数。 X_{A+} 和 X_{+A} 分别表示所有被识别为藻类的像元个数(即被正确识别为藻类的像元个数和被误判为藻类的海水像元个数)以及实际的藻类像元个数(即被正确识别为藻类的像元个数和被误判为海水的藻类像元个数), X_{W+} 和 X_{+W} 也用同样的方法定义, N 表示所有像元的总个数。

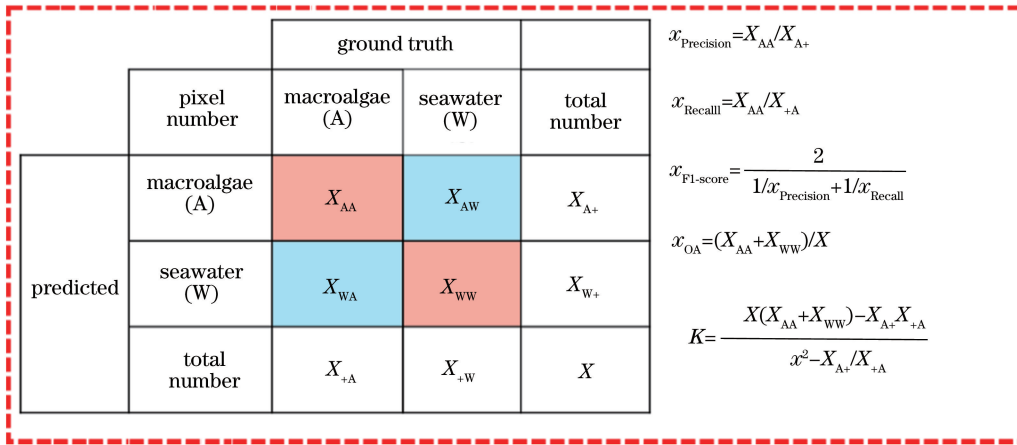


图 6 混淆矩阵和精度评价指标

Fig. 6 Confusion matrix and all indexes of accuracy evaluation

4 结果与讨论

4.1 绿潮遥感提取和精度验证

分别利用 IGAG 算法、AFAI 算法和本文提出的 TCT-GTI 算法对 2017 年 5 月 26 日的 GOCI 影像数据进行绿潮提取。图 7 展示了 GOCI 假彩色图像和三种算法的藻类提取结果分布。从图 7 可以看出,利用 TCT-GTI 算法提取的绿潮的分布轮廓[图 7(b)]和实际藻类分布范围[图 7(a)]能够较好地对应。同时对于藻类分布密集的区域 1[图 7(e)]和

藻类分布稀疏的区域 2[图 7(i)],TCT-GTI 算法绿潮提取结果图[图 7(f)和图 7(j)]与假彩色合成影像在轮廓和范围上均能较好地对应。另外,TCT-GTI 算法和 AFAI 算法在两个不同区域:区域 1[图 7(f),(g)]和区域 2[图 7(j),(k)]的藻类分布轮廓基本一致,并且和假彩色图像中绿潮的范围和轮廓对应得很好。相对 TCT-GTI 算法和 AFAI 算法,IGAG 算法得到的区域 1 的藻类分布面积与其他两种算法的相似,但区域 2 分布面积偏小,这可能是因为藻类面积较小,且 IGAG 算法无法识别水面下方的藻类。

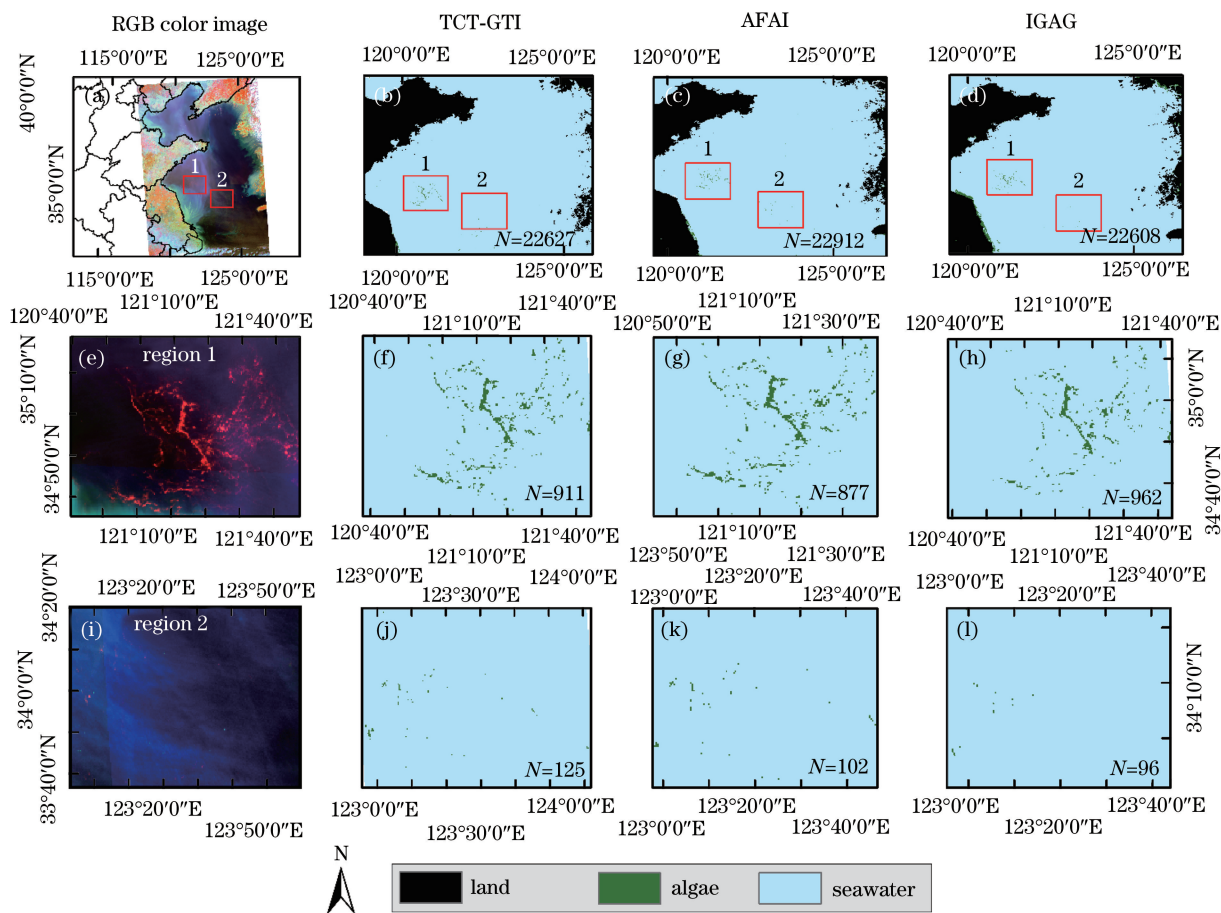


图 7 三种算法提取绿潮结果对比。(a)(e)(i)不同区域的假彩色合成影像;(b)~(d)TCT-GTI 算法的绿潮提取结果;(f)~(h)AFAI 算法的绿潮提取结果;(j)~(l)IGAG 算法的绿潮提取结果

Fig. 7 Comparison of results of green-tide extraction using three different algorithms. (a) (e) (i) Pseudo-color images for different regions; (b)~(d) results of green-tide extraction using TCT-GTI algorithm; (f)~(h) results of green-tide extraction using AFAI algorithm; (j)~(l) results of green-tide extraction using IGAG algorithm

利用 TCT-GTI 算法提取的绿潮总面积为 5656.75 km², 区域 1 和区域 2 的面积分别为 227.75 km² 和 31.25 km²; 利用 AFAI 算法和 IGAG 算法提取的总面积分别为 5728.00 km² 和 5652 km², 区域 1 和区域 2 的面积分别为 219.25 km²、240.50 km² 和 25.50 km²、24.00 km²,

如表 2 所示。由表 2 可以看出,TCT-GTI 算法和 AFAI 算法、IGAG 算法提取的大型藻类面积更接近绿潮的实际分布面积。

计算 TCT-GTI 算法、AFAI 算法以及 IGAG 算法的准确率、召回率、F1 值和 Kappa 系数,结果如图 8 所示。由图 8 可知,TCT-GTI 算法和 AFAI 算

表 2 利用三种算法提取的大型藻类覆盖范围比较

Table 2 Comparison of macroalgae coverage areas for three algorithms

Region	TCT-GTI		AFAI		IGAG	
	Pixel No.	A_a/km^2	Pixel No.	A_a/km^2	Pixel No.	A_a/km^2
Total area	22627	5656.75	22912	5728.00	23	5652.00
Region 1	911	227.75	877	219.25	962	240.50
Region 2	125	31.25	102	25.50	96	24.00

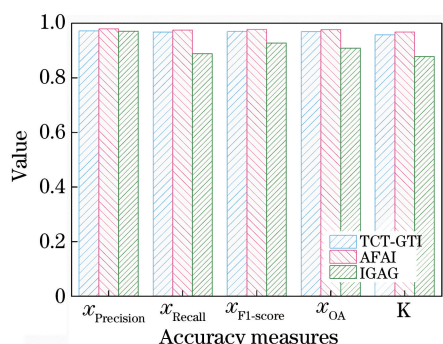


图 8 基于 TCT-GTI、AFAI 以及 IGAG 算法的精度评价

Fig. 8 Accuracy evaluation values of TCT-GTI, AFAI, and IGAG algorithms

法的精度较高,五个评价指标的值均在 90% 以上, TCT-GTI 算法五个指标的值分别为 97.250%、96.827%、96.945% 以及 95.877%, 而 IGAG 算法精度相对较低,尤其是 Kappa 系数约为 87.784%。因此利用 TCT-GTI 算法提取大型藻类精度较高,具有较高的可信度。

4.2 绿潮日变化特征

GOCI 可用于监测和提取黄海浒苔的逐小时变化特征,为应对绿潮灾害提供了有利的数据支持。选取了影像质量好且无云的 2017 年 5 月 26 日、2017 年 5 月 27 日、2017 年 6 月 4 日、2017 年 6 月 14 日以及 2017 年 6 月 27 日的的数据,基于 TCI-GTI 算法提取了海面的大型藻类覆盖面积进行分析,同时以上午 8:00 的浒苔面积为基准,计算了其他时刻 7 幅影像的相对变化率,如图 9 所示。从浒苔总体覆盖面积及覆盖面积的逐时变化分析可知,浒苔覆盖面积先增大再减小(从上午 8:00 到中午 12:00 面积增大,从中午 12:00 到下午 15:00 面积减小),覆盖面积最小值为上午 8:00,最大覆盖面积出现时间为中午 12:00,同时变化率达到最大。这可能是由于正午太阳辐射最强,有利于浒苔进行光合作用,释放出的氧气形成气泡增大了浒苔的浮力,使浒苔漂浮于表层海面^[5]。

4.3 绿潮漂移路径的监测

绿潮漂移路径的信息获取有助于了解绿潮暴发机制、影响范围等信息,为绿潮灾害监测提供信息服

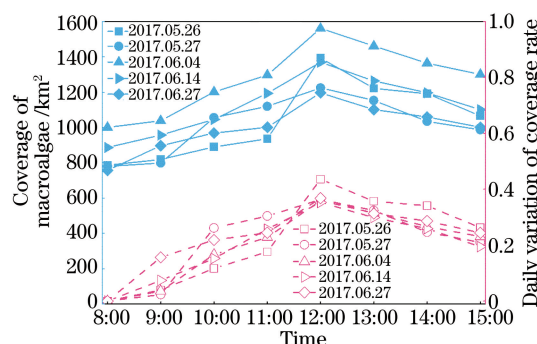


图 9 绿潮浒苔覆盖面积随时间的变化

Fig. 9 Coverage area of *Ulva prolifera* as a function of time

务。选取云覆盖面积低于 50% 的遥感影像,利用 TCT-GTI 算法对 2017 年绿潮暴发过程进行分析研究。其中选取 2017 年 5 月 13 日、2017 年 5 月 21 日、2017 年 6 月 4 日、2017 年 6 月 7 日、2017 年 6 月 26 日、2017 年 6 月 27 日和 2017 年 7 月 1 日的 GOCI 影像。然后,利用 ArcGIS 软件中“Mean Centre”工具提取每幅影像中浒苔质心的平均中心,然后按时间序列将每个平均中心进行连接,即可得到浒苔的漂移路径。图 10 所示为不同日期 GOCI 影像绿潮监测结果及其漂移路径。浒苔在 5 月中旬出现在江苏盐城外海海域,受潮汐、流场和海表风场的作用不断聚集增值,在江苏和山东半岛毗邻的南黄海中部海域大面积暴发,然后在山东半岛南岸登陆,进入消亡期。根据浒苔不同日期分布结果提取其漂移路径,如图 10(h)所示,浒苔经历了西北至东北的漂移路径,由江苏盐城外海海域向西北方向漂移至南黄海东部,然后继续向东北方向移动,抵达山东半岛南岸,逐渐消亡。研究表明浒苔漂移路径主要是海面风场、潮汐和流场的共同作用^[38-41]。图 11 为绿潮监测对应日期的平均风场分布图。从图 11 中可以看出,2017 年 5 月 13 日至 6 月 4 日黄海中部和南部盛行偏北风,6 月 4 日至 7 日江苏至山东半岛毗邻海域盛行偏西风,6 月 7 日至 6 月 26 日江苏盐城至青岛海域主要受西北风影响,6 月 26 日至 6 月 27 日该地区由西南风控制,从 6 月 27 日至 7 月 1 日山东半岛南岸盛行西北风。2017 年 5 月至 7 月绿潮主体由江苏盐城海域向北往山东半岛漂移,

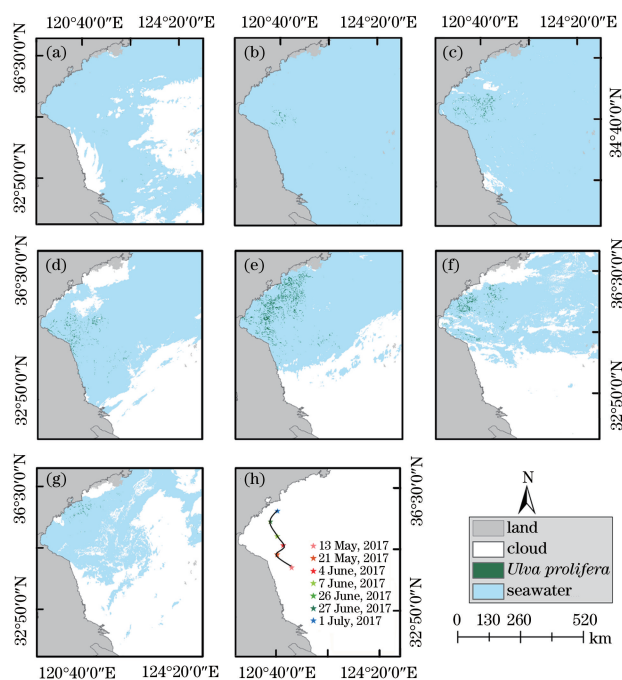


图 10 不同日期的 GOCI 影像绿潮监测结果及其漂移路径。(a) 2017 年 5 月 13 日浒苔分布;(b) 2017 年 5 月 21 日浒苔分布;(c) 2017 年 6 月 4 日浒苔分布;(d) 2017 年 6 月 7 日浒苔分布;(e) 2017 年 6 月 26 日浒苔分布;(f) 2017 年 6 月 27 日;(g) 2017 年 7 月 1 日浒苔分布;(h) 浒苔漂移路径

Fig. 10 Monitoring results of green tide of GOCI images at different time and its drifting trajectory. (a) Distribution of *Ulva prolifera* on 13 May, 2017; (b) distribution of *Ulva prolifera* on 21 May, 2017; (c) distribution of *Ulva prolifera* on 4 June, 2017; (d) distribution of *Ulva prolifera* on 7 June, 2017; (e) distribution of *Ulva prolifera* on 26 June, 2017; (f) distribution of *Ulva prolifera* on 27 June, 2017; (g) distribution of *Ulva prolifera* on 1 July, 2017; (h) drifting trajectory of *Ulva prolifera*

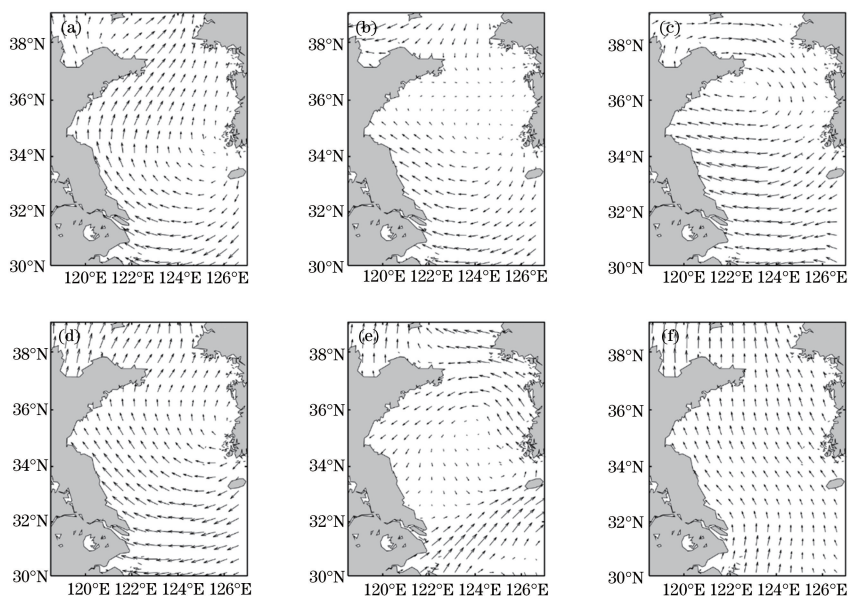


图 11 绿潮遥感监测对应日期的平均风场分布图。(a) 2017 年 5 月 13 日—21 日;(b) 5 月 21 日—6 月 4 日;(c) 6 月 4 日—7 日;(d) 6 月 7 日—26 日;(e) 6 月 26 日—27 日;(f) 6 月 27 日—7 月 1 日

Fig. 11 Average wind-field distributions for corresponding dates of green-tide remote sensing monitoring. (a) May 13-21, 2017; (b) May 21-June 4, 2017; (c) June 4-7, 2017; (d) June 6-26, 2017; (e) June 26-27, 2017; (f) June 27-July 1, 2017

与盛行风向大体相同。此外绿潮向北漂移过程中也存在向东的漂移,但没有出现明显的偏东风,这可能是绿潮漂移受风向和流场共同作用的结果^[39,42]。

5 结 论

本文基于 GOCI 数据,开发了一种简单有效的绿潮识别算法,即基于缨帽变换方法的绿潮指数 TCT-GTI。相对于常见绿潮监测算法,该算法无需进行大气校正,并且简单易行。将该算法应用于我国近海大型藻类暴发区,并结合两种常见的绿潮识别算法(AFAI,IGAG)对藻类监测结果进行交叉对比和精度验证,结果显示该算法可以有效识别出海水中的大型藻类,总体分类精度、准确率、召回率、F1 值和 Kappa 系数均大于 95%,算法精度较高。另外,利用该算法对 2017 年中国近海浒苔特征信息进行提取,结果表明浒苔覆盖面积在中午 12:00 时达到最大,这可能是受光合作用等因素的影响。2017 年浒苔经历了西北至东北的漂移路径,由江苏盐城外海海域向西北方向漂移至南黄海东部,然后继续向东北方向移动,抵达山东半岛南岸,逐渐消亡。但是,本研究采用的是 IKONOS 的缨帽变换系数,而不是针对 GOCI 传感器的变换系数。后续将结合多年 GOCI 卫星数据,优化该算法所使用的变换系数,从而提高绿潮遥感提取算法的精度和绿潮识别的准确性,为绿潮灾害的监测、预报预警提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Liu D Y, Keesing J K, He P M, et al. The world's largest macroalgal bloom in the Yellow Sea, China: formation and implications [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 129: 2-10.
- [2] Zhang H L, Sun D Y, Li J S, et al. Remote sensing algorithm for detecting green tide in China coastal waters based on GF1-WFV and HJ-CCD data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0601004.
张海龙, 孙德勇, 李俊生, 等. 基于 GF1-WFV 和 HJ-CCD 数据的我国近海绿潮遥感监测算法研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0601004.
- [3] Wang M Q, Hu C M. Mapping and quantifying sargassum distribution and coverage in the central West Atlantic using MODIS observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 183: 350-367.
- [4] Kudela R M, Berdalet E, Enevoldsen H, et al. GEOHAB: The Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms Program MOTIVATION, GOALS, AND LEGACY [J]. *Oceanography*, 2017, 30(1): 12-21.
- [5] Liang Z Y, Lin X Z, Ma M, et al. A preliminary study of the *Enteromorpha prolifera* drift gathering causing the green tide phenomenon [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(4): 601-604.
梁宗英, 林祥志, 马牧, 等. 浒苔漂流聚集绿潮现象的初步分析 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2008, 38(4): 601-604.
- [6] Cui T W, Zhang J, Sun L E, et al. Satellite monitoring of massive green macroalgae bloom (GMB): imaging ability comparison of multi-source data and drifting velocity estimation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(17): 5513-5527.
- [7] Qi L, Hu C M, Wang M Q, et al. Floating algae blooms in the East China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(22): 11501-11509.
- [8] Hu C M, He M X. Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2008, 89(33): 302-303.
- [9] Son Y B, Min J E, Ryu J H. Detecting massive green algae (*Ulva prolifera*) blooms in the Yellow Sea and East China Sea using geostationary ocean color imager (GOCI) data [J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 359-375.
- [10] Hu C M. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2118-2129.
- [11] Xing Q G, Hu C M. 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.
- [12] Zhang H L, Qiu Z F, Devred E, et al. A simple and effective method for monitoring floating green macroalgae blooms: a case study in the Yellow Sea [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4528-4548.
- [13] Xiao Y F, Zhang J, Cui T W. High-precision extraction of nearshore green tides using satellite remote sensing data of the Yellow Sea, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(6): 1626-1641.
- [14] Su Q, Yang F H, Wang M L, et al. The research on the method of extracting NDVI based on K-T transformation [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2010, 33(1): 150-152.
苏琦, 杨凤海, 王明亮, 等. 基于 K-T 变换的 NDVI 提取方法研究 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2010, 33(1): 150-152.
- [15] Chen L, Lin H. Vegetation information extraction

- based on K-T transform and principal component transform[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(6): 81-84.
- 陈利, 林辉. 基于 K-T 变换和主成分变换的植被信息提取[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(6): 81-84.
- [16] Zhu D K. Jiangsu marine environment and coastal economic development [J]. *Water Resources Protection*, 2003, 19(6): 19-21, 64.
- 朱大奎. 江苏海洋环境与沿海经济发展[J]. *水资源保护*, 2003, 19(6): 19-21, 64.
- [17] Gao Z H, Yang J Q, Zhang H L, et al. Occurrence condition and prevention techniques of green tide disaster[M]. Beijing: China Ocean Press, 2009: 80-92.
- 高振会, 杨建强, 张洪亮, 等. 绿潮灾害发生条件与防控技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 80-92.
- [18] Ding M J, Qiu Z F, Zhang H L, et al. Inversion algorithm for turbidity of Bohai and Yellow Seas based on NPP-VIIRS satellite data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0601002.
- 丁梦娇, 丘仲锋, 张海龙, 等. 基于 NPP-VIIRS 卫星数据的渤海黄海水体反演算法研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0601002.
- [19] Su X P, Sun D Y, Wang S Q, et al. Remote sensing to estimate sea-surface density of Yellow and Bohai Seas off the east coast of China [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110101.
- 苏校平, 孙德勇, 王胜强, 等. 黄渤海海表密度的遥感反演[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110101.
- [20] Ryu J H, Han H J, Cho S, et al. Overview of geostationary ocean color imager (GOCI) and GOCI data processing system (GDPS) [J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 223-233.
- [21] Ahn J H, Park Y J, Ryu J H, et al. Development of atmospheric correction algorithm for geostationary ocean color imager (GOCI) [J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 247-259.
- [22] Atlas R, Hoffman R N, Ardizzone J, et al. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(2): 157-174.
- [23] Kauth R J, Thomas G S. The tasseled cap—a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat [C] // *LARS Symposia*. 1976: 159.
- [24] Chen C, Jiang T, Liu X L. Research on remote sensing image fusion methods based on tasseled cap transformation [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(3): 105-106, 163.
- 陈超, 江涛, 刘祥磊. 基于缨帽变换的遥感图像融合方法研究[J]. *测绘科学*, 2009, 34(3): 105-106, 163.
- [25] Huang C, Wylie B, Yang L, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(8): 1741-1748.
- [26] Baig M H A, Zhang L F, Shuai T, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance [J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(5): 423-431.
- [27] Chen C X, Tang P, Bian Z. Tasseled cap transformation for HJ-1A/B charge coupled device images [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1): 063575.
- [28] Horne J H. A tasseled cap transformation for IKONOS images [C] // *ASPRS 2003 Annual conference proceedings*, May 2003, Anchorage, Alaska. [S.l.: s.n.], 2003.
- [29] Wei Y C, Tang G A, Yang X, et al. Remote sensing digital image processing tutorial [M]. Beijing: Science Press, 2007: 138-139.
- 韦玉春, 汤国安, 杨昕, 等. 遥感数字图像处理教程[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 138-139.
- [30] Zhang J Q, Guan W, Sun P, et al. Automatic water bodies extraction model based on K-T transformation [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(3): 88-92.
- 张景奇, 关威, 孙萍, 等. 基于 K-T 变换的地表水体信息遥感自动提取模型[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3): 88-92.
- [31] Jackson R D. Spectral indices in n -space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1983, 13(5): 409-421.
- [32] Moran M S, Vidal A, Troufleau D, et al. Combining multifrequency microwave and optical data for crop management [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(1): 96-109.
- [33] Zhu Z, Woodcock C E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 118: 83-94.
- [34] Yuan Y B, Qiu Z F, Sun D Y, et al. Daytime sea fog retrieval based on GOCI data: a case study over the Yellow Sea [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 787-801.
- [35] Congalton R G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 37(1): 35-46.
- [36] Fawcett T. An introduction to ROC analysis [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(8): 861-874.
- [37] Qiu Z F, Li Z X, Bilal M, et al. Automatic method

- to monitor floating macroalgae blooms based on multilayer perceptron: case study of Yellow Sea using GOCI images [J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 26810-26829.
- [38] Ma Y, Guo L N, Huang R, et al. Meteorological conditions of *Enteromorpha prolifera* outbreak and its movement in Qingdao seashore from 2008 to 2010 [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, 31(4): 89-96.
马艳, 郭丽娜, 黄容, 等. 2008—2010年青岛近海浒苔暴发气象条件及其漂移特征 [J]. *气象与环境学报*, 2015, 31(4): 89-96.
- [39] Li Y S, Pan L Z, Xiao W J, et al. Effect of wind on the drifting of green macroalgae in the Yellow Sea [J]. *Marine Environmental Science*, 2014, 33(5): 772-776.
李曰嵩, 潘灵芝, 肖文军, 等. 风对黄海绿潮藻漂移的影响 [J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(5): 772-776.
- [40] Zheng X Y, Xing Q G, Li L, et al. Numerical simulation of the 2008 green tide in the Yellow Sea [J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(7): 82-87.
郑向阳, 邢前国, 李丽, 等. 2008年黄海绿潮路径的数值模拟 [J]. *海洋科学*, 2011, 35(7): 82-87.
- [41] Lee J H, Pang I C, Moon I J, et al. On physical factors that controlled the massive green tide occurrence along the southern coast of the Shandong Peninsula in 2008: a numerical study using a particle-tracking experiment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C12): C12036.
- [42] Gao S, Huang J, Bai T, et al. Analysis on drifting path of green tides in the Yellow Sea in 2008 and 2009 [J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(2): 86-90.
高松, 黄娟, 白涛, 等. 2008年与2009年黄海绿潮漂移路径分析 [J]. *海洋科学*, 2014, 38(2): 86-90.