DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0107

基于遥感的苏北浅滩早期漂浮绿藻分布与黄海绿潮规模响应关系研究

李世凯， 高郭平， 陈 洁， 钟玉松， 苗侨龙

（上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306）

摘 要: 2007 年以来, 黄海绿潮频繁暴发, 严重影响近海生态与渔业生产。苏北浅滩作为早期漂浮绿藻的主要聚集区, 对绿潮演化具有重要意义, 本研究利用多源遥感影像, 对 2016—2023 年苏北浅滩的早期漂浮绿藻信息进行提取, 分析了其时空分布特征及与黄海绿潮最大规模的响应关系。结果表明: （1）漂浮绿藻被遥感影像发现时间不一, 最早可追溯至 4 月下旬, 早期较多分布在浅滩东侧蒋家沙和外毛竹沙附近潮沟。（2）苏北浅滩东北侧区域在多个年份出现稳定的绿藻累积高值, 而西侧区域则在部分年份与黄海绿潮的后期发展存在明显响应关系。（3）苏北浅滩早期漂浮绿藻的覆盖面积与当年黄海绿潮最大规模呈显著相关关系（r=0.77, p<0.05）。

关键词: 漂浮绿藻; 苏北浅滩; 时空分布; 遥感提取

中图分类号: X55; X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6336(2026)02-0295-09

Spatiotemporal dynamics of early floating green algae in the Subei Shoal and their response to green tide development in the Yellow Sea based on remote sensing

Li Shikai, Gao Guoping, Chen Jie, Zhong Yusong, Miao Qiaolong

(College of Marine Science and Ecological Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Since 2007, large-scale green tide events have frequently occurred in the Yellow Sea, causing severe impacts on coastal ecosystems and fisheries. The Subei Shoal, as a primary aggregation zone for early-stage floating green algae, plays a crucial role in the evolution of green tides. In this study, multi-source remote sensing imagery was employed to extract early-stage floating algal information in the Subei Shoal from 2016 to 2023, and to analyze its spatiotemporal distribution patterns as well as its relationship with the maximum extent of Yellow Sea green tides. The results show that: (1) The earliest remote sensing detection of floating algae varied among years, with the earliest occurrence traced back to late April, predominantly along tidal channels near Jiangjiasha and Waimaozhusha on the eastern shoal. (2)The northeastern part of the Subei Shoal consistently exhibited high algal accumulation in multiple years, whereas the western part showed a pronounced response to the later development stages of Yellow Sea green tides in certain years. (3) The coverage area of early-stage floating algae in the Subei Shoal was significantly correlated with the annual maximum green tide extent (r = 0.77, p < 0.05).

Key words: floating green algae; Subei Shoal; spatiotemporal distribution; remote sensing extraction

收稿日期: 2025-07-02, **修订日期:** 2025-09-13

基金项目: 国家重点研发计划项目（2022YFC3106003）

作者简介: 李世凯（2000—）, 女, 河南汝州人, 硕士研究生, 研究方向为海洋生态遥感分析, E-mail: lishikai77@163.com

通信作者: 高郭平, 教授, 主要从事海洋模型和海洋环境安全等方面研究, E-mail: gpgao@shou.edu.cn

绿潮通常是指由于大型绿藻过度增殖、繁殖和聚集导致水域生态环境发生显著变化的生态异常现象[1]。2007 年 6 月，我国黄海海域首次暴发了以浒苔（*Ulva prolifera*）为主要原因种的绿潮[2]。此后，绿潮每年春、夏季都会在黄海海域大规模出现[3]，至今已连续多年。绿潮暴发给南黄海沿岸地区带来严重的经济损失和社会影响[4]，政府需要投入大量的人力、物力、财力进行绿潮的打捞和防控工作。据中国海洋灾害公报统计，2008 年南黄海绿潮对山东、江苏沿岸地区造成的直接经济损失达 13.22 亿元。2008 年青岛奥帆赛前夕，黄海海域暴发大规模绿潮，青岛市政府紧急组织打捞、拦截和清除工作，累计清理绿藻超 80 万吨[5]。

绿潮持续时间长、影响范围大，传统现场调查手段难以实现有效监控，而遥感技术凭借其大范围、高时间分辨率和多谱段成像能力，已成为海洋绿潮监测与评估的重要手段[6]。在遥感识别方面，常见的绿潮提取算法包括归一化植被指数（normalized difference vegetation index, *NDVI*）、漂浮藻类指数（floating algae index, *FAI*）及虚拟基线漂浮藻类指数（virtual baseline floating algae height, *VB-FAH*）等。*NDVI* 方法能够更好地减少大气和云的影响，是目前应用最多的方法。在数据源方面，中高分辨率影像如高分一号（GF-1）、哨兵二号（Sentinel-2）等被广泛用于绿藻斑块的精细提取[7-8]，而 MODIS、GOCI 等中低分辨率影像则因其高时间分辨率优势，广泛应用于绿潮长时序演变监测中[9-10]。在研究内容方面，遥感数据被广泛用于揭示绿潮的发生时间、漂移路径与扩散模式[11]，识别其与风场、潮流、温盐等环境因子的耦合关系[12]，并在生物量估算[13]、驱动机制分析和生态模拟验证等方面发挥着重要作用。

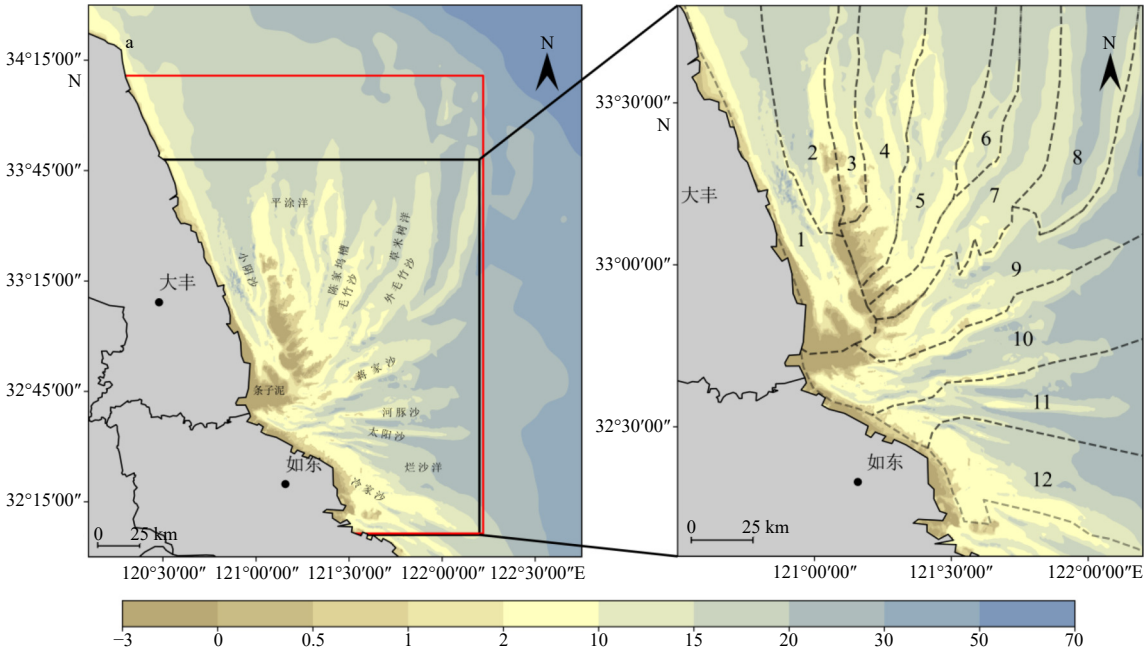
苏北浅滩位于黄海南部沿岸，是典型的泥质潮滩区域，具有复杂的地貌结构与水动力条件。该区域天然潮道密集，呈“舌状–槽状”结构发育，整体受东海前进潮波与黄海旋转潮波系统的双重调控[14]，潮流系统表现出高度的空间异质性。苏北浅滩西侧区域受黄海旋转潮波主导，潮流呈明显往复特征[15]，导致局部水体物质滞留时间延长，这种潮流格局有利于泥沙[16]、绿藻[5] 等在浅滩与潮道交界区域的持续聚集。与之相对，苏北浅滩东侧受东海前进潮波系统影响，潮流方向较为稳定，流速持久性好。特别是在春末夏初，南风或东南风增强沿岸流动力，进一步加速绿藻向外输运[17]。多项现场调查[18]、遥感追踪[19] 和数值模拟研究[20] 均已证实，南黄海绿潮的起源主要集中在苏北浅滩近岸海域。研究指出，苏北浅滩紫菜养殖筏架上的附生绿藻在春末夏初时大量脱落入海，成为南黄海大规模绿潮暴发的重要源头[21]。早期绿藻斑块条带若未被及时监测和清除，将在数日内随表层海流北移，受夏季风和表层水温上升等环境因子共同作用[22]，迅速增殖并形成大范围绿潮。

然而，目前针对该区域的绿藻遥感监测多为短期或区域性研究，缺乏多年连续的高精度观测数据。尽管 MODIS 影像具备较高的时间分辨率，在绿潮大范围动态监测中被广泛应用，但其空间分辨率难以满足对于苏北浅滩复杂近岸环境中绿藻斑块的精细识别的需求。因此，本文基于 Sentinel-2 和 GF-1 遥感影像，构建 2016—2023 年苏北浅滩漂浮绿藻长时序数据集，分析早期绿藻的时空分布特征，并基于地形划分主要水道，探讨水道间的年际差异及其与黄海绿潮最大规模（以最大覆盖面积表征）的耦合关系，为绿潮早期防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域（图 1）位于南黄海西部的苏北浅滩及其北部（32.1° N—34.2° N, 120.3° E—122.2° E）。苏北浅滩是以东台琼港为中心的典型辐射沙洲地貌区，呈三角洲状向外辐射，发育有多条东北-东南向延伸的沙脊与潮沟系统。该区域潮汐动力显著，涨落潮主流向与潮沟走向一致，且潮沟流速普遍高于沙脊，形成了独特的沉积-水动力耦合环境[15]。由于苏北浅滩区域的漂浮绿藻主要依托潮沟系统向外输运，为量化及描述其输移过程，利用 ArcGIS 软件，结合水深地形数据将调查区域划分为多个水道（W1—W12），其中 10 条水道从浅滩中部开始，另外 2 条水道 (W6、W8) 位于下游，分别是上游水道的支流。每条水道都由一条连接深沟的主河道和由邻近沙脊勾



注：图中红框为研究区域

图 1　苏北浅滩地形和主要水道概况

Fig. 1　Topography and major waterways of the Subei Shoal

勒出的相关分水岭组成。

1.2　数据来源

本研究基于 Sentinel-2 和 GF-1 数据，构建高精度多源遥感影像数据集，用于高效提取苏北浅滩区域的漂浮绿藻信息。Sentinel-2 卫星是欧洲航天局哥白尼计划发射的多光谱对地观测卫星，重访周期为 5 d，空间分辨率为 10 m。GF-1 是中国高分辨率对地观测系统的第一颗卫星，于 2013 年 4 月 26 日成功发射。GF-1 WFV 数据空间分辨率是 16 m，重访周期是 4 d。WFV 传感器包含 4 个光谱波段（蓝：450 ~ 520 nm，绿：520 ~ 590 nm，红：630 ~ 690 nm，近红外：770 ~ 890 nm）。

黄海绿潮暴发具有典型的物候特征，漂浮绿藻通常在 4 月、5 月于苏北浅滩开始聚集，6 月中旬中心区向黄海中部迁移，并于 6 月下旬达到年度最大覆盖面积[23]。本研究基于 2016—2023 年每年 4 月 15 日至 6 月 15 日的卫星遥感数据，通过筛选获取有效观测影像。首先，剔除云覆盖率超过 20%、存在显著太阳耀光干扰或传感器异常的影像；然后，针对研究区的绿藻空间分布特征，在藻华暴发初期（4 月下旬至 5 月上旬），保留所有检测到绿藻斑块的影像以捕捉初始扩散过程，当进入暴发活跃期（5 月中旬至 6 月中旬）后，排除因绿藻大规模往北迁移导致研究区内仅存零星条带或完全无藻覆盖的影像。经过两阶段筛选，最终获得 21 景合格影像，包括 16 景 Sentinel-2 数据、5 景 GF-1 数据。影像时间分布呈现非均匀性特征：绿藻高暴发年份（如 2019 年、2021 年）每年获取 3 ~ 4 景数据，低暴发年份（如 2017 年、2018 年）仅 2 景，该差异主要受研究区域藻华持续时间与同期阴雨天气条件共同影响。筛选后的影像日期及卫星来源详见表 1。

黄海绿潮规模数据以最大覆盖面积为表征，主要来源于《2023 年中国海洋灾害公报》[24]。公报中的“大型藻类（绿潮）灾害”部分详细记录了黄海海域绿潮的最大覆盖面积。该数据是由自然资源部北海局和国家海洋环境监测中心通过卫星遥感监测及现场实地核查得出的，并通过网站（www.mnr.gov.cn）向公众公开。除此之外，部分文献中的绿潮覆盖面积数据也被作为参考[25]，以进一步补充和验证研究结果。

流场数据来自欧盟哥白尼海洋环境监测服务（CMEMS）提供的全球海洋再分析产品（global ocean reanalysis and simulation，GLORYS）。该产品基于 NEMO 模型运行，并同化卫星高度

表 1 遥感影像类型及日期

Tab.1 Remote sensing image type and date

卫星名称	日期
GF-1	2016-05-11、2016-05-19、2017-05-07、2017-05-28、2018-05-23
Sentinel-2	2018-06-03、2019-05-09、2019-05-29、2019-06-03、2019-06-08、2020-04-28、2020-05-13、2021-05-03、2021-05-08、2021-05-28、2022-05-03、2022-05-18、2022-05-23、2023-05-13、2023-05-23、2023-05-28

计、海表温度、Argo 浮标等多源观测资料生成，时间分辨率为逐日，水平分辨率约为 1/12°，覆盖全球海域，提供从海表至深海的三维物理要素。本研究选取其 0 m 海表流速分量 *U*（经向）数据用于计算分析。

1.3 漂浮绿藻提取与验证

本研究针对不同遥感数据实施差异化预处理流程，其中 Sentinel-2 数据是基于 Google Earth Engine（GEE）平台调用欧洲航天局预处理产品（L2A 级数据），该数据已集成 Sen2cor 大气校正算法与地形辐射归一化处理，可直接基于质量评估 QA 波段进行云掩膜处理，并依据研究区矢量边界完成空间裁剪。对于 GF-1 数据，基于 ENVI 5.6 平台对其实现标准化预处理，先后进行辐射定标、大气校正等处理，并且基于红波段地表反射率阈值法实现云检测，设定阈值上限为 0.15，该方法可识别厚云[26]。

光学遥感监测漂浮绿藻的方法是基于自然海水表面和漂浮绿藻覆盖海水表面光谱特征的差异展开的[27]。漂浮绿藻中含有丰富的叶绿素 *a*，其强吸收特性导致红光波段（630 ~ 690 nm）反射率显著降低，而近红外波段（770 ~ 890 nm）因藻体细胞壁多次散射效应呈现高反射特征[28]。*NDVI* 通过计算近红外与红光波段的标准化差异，可有效放大藻华与背景水体的光谱差异，其阈值分割法已被验证为绿藻识别的有效手段[29]。本研究通过 *NDVI* 阈值分割和假彩色合成图像进行目视解译来共同确定 *T* 值，提取漂浮绿藻信息。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

式中：*NIR*、*R* 分别为近红外和红外波段的反射率。本研究中，*NIR* 采用 Sentinel-2 的 B8 波段、GF-1 WFV 的 B4 波段，*R* 采用 Sentinel-2 的 B4 波段、GF-1 WFV 的 B3 波段。

NDVI 阈值 *T* 的理论值为 0，但受水色条件及成像光照等因素影响，实际影像中该值存在一定波动。本文参考已有文献的先验范围[7]，在多幅影像上分别于开阔水体、浅滩及藻区选取若干样本像元，统计其 *NDVI* 分布特征，确定适用范围。为提高结果的稳定性与可靠性，漂浮绿藻提取过程由两位研究人员独立进行。过程中结合假彩色合成影像，通过比对提取结果与影像特征，逐步调整和验证每景影像的 *T* 值。同时，开展交叉比对，对存在差异的结果进行复核，直至达成一致。不同影像的 *T* 值在统一范围 [−0.05, 0.05] 内存在小幅差异，其调整主要取决于当日成像的光照条件和藻体状态等因素。

通过现场同步调查，对 2023 年 5 月 23 日 Sentinel-2 影像提取的漂浮绿藻信息进行验证。结果表明，Sentinel-2 提取的漂浮绿藻信息能够与现场数据相匹配。漂浮绿藻位于海水表面，在浑浊水体中可以与背景区分开，能够清晰地从影像中看到漂浮绿藻条带（图 2）。

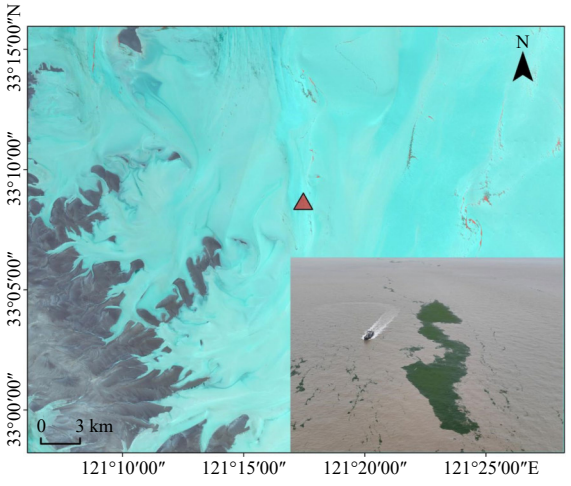


图 2 现场漂浮绿藻及位置信息

Fig. 2 Floating green algae on site and location information

1.4 累积位移计算

为表征研究期内水体在经向上的累计漂移强度，分别计算平均累计西向位移量和平均累计东向位移量。其计算公式如下：

$$L_{\text{west/east}}=\frac{1}{N}\sum_{x,y}\left[\sum_{t}U_{\text{west/east}}(x,y,t)\cdot\Delta t\right] \quad (2)$$

式中：L_{west}和L_{east}分别表示平均累计西向与东向位移量（m）；$U_{\text{west}}(x,y,t)$为经向流速在西向的分量（当U<0 时取$-U$，单位 m/s）；$U_{\text{east}}(x,y,t)$为经向流速在东向的分量（当U>0 时取U，单位 m/s）；Δt为时间间隔（s）；N为研究区域内网格总数；x,y为空间网格索引；t为时间步数。

2　结果与讨论

2.1　漂浮绿藻早期时空特征

苏北浅滩区域的漂浮绿藻除小斑块外，多聚集成条带状，自浅滩中心沿各潮沟向外呈现辐射状分布，潮沟作为水体交换的重要通道，在绿藻的传播和聚集过程中发挥关键作用。每年漂浮绿藻分布不尽相同，但早期多分布在浅滩东侧，尤其是蒋家沙和外毛竹沙附近潮沟，而 2017 年、2019 年、2020 年和 2023 年浅滩西侧也出现部分漂浮绿藻条带（图 3）。

苏北浅滩区域漂浮绿藻的初现时间和覆盖面积存在年际差异（图 4）。多数年份于 5 月 10 日之前就发现绿藻聚集现象并开始快速增长，其中 2020 年在 4 月底即发现漂浮绿藻信息，而 2018 年呈现异常特征，其初始发现时间最早为当年 5 月 23 日，且覆盖面积小于同期均值。苏北浅滩区域漂浮绿藻覆盖面积规模等级呈现

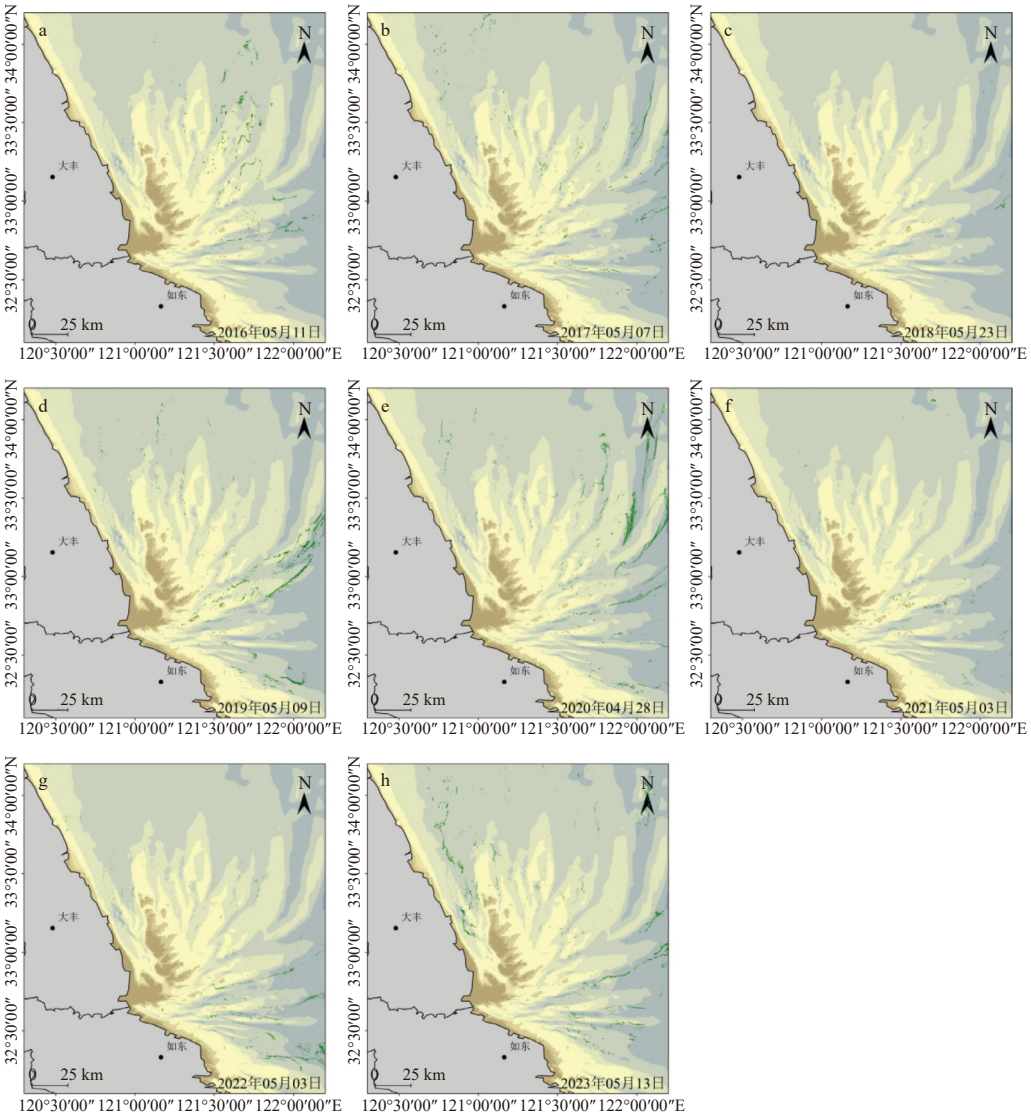


图 3　2016－2023 年苏北浅滩漂浮绿藻早期分布

Fig. 3　Early distribution of floating green algae in the Subei Shoal from 2016 to 2023

出不均匀性变化，“大”年和“小”年交替出现。以每年 5 月 23 日前后日期为观察窗口，可知，2017 年、2018 年、2022 年早期规模较小，2016 年、2019 年、2021 年、2023 年规模稍大，其中 2019 年苏北浅滩区域的漂浮绿藻持续时间较长，存在覆盖面积的阶段性波动。

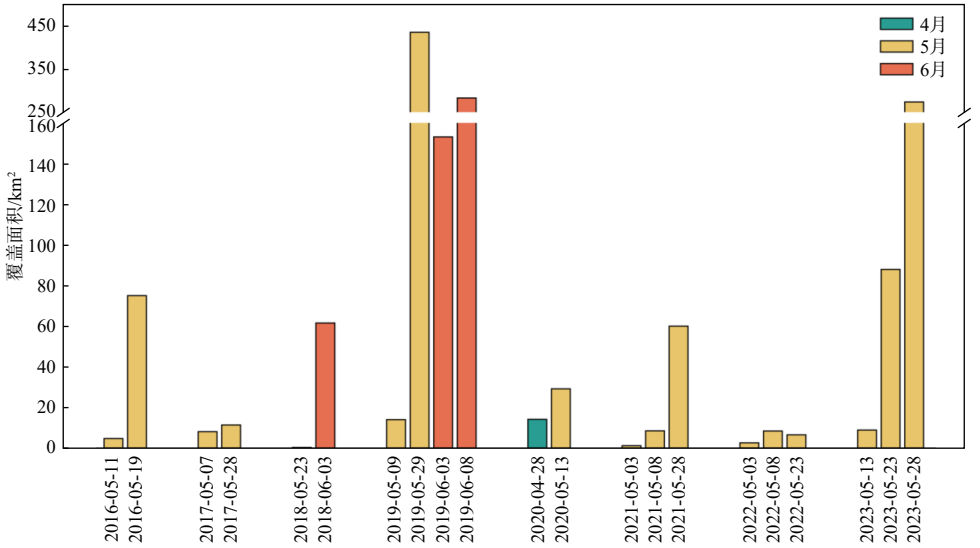


图 4　2016—2023 年 4 月—6 月苏北浅滩漂浮绿藻面积变化

Fig. 4　Changes in the area of floating green algae in the Subei Shoal from April to June 2016 to 2023

2.2　漂浮绿藻热点水道分析

遥感观测结果表明，漂浮绿藻的空间分布与苏北浅滩主要水道的地形格局具有较高一致性。由于不同年份漂浮绿藻的总体规模存在差异，本研究采用各水道多年累计覆盖面积占研究区多年总覆盖面积的比例来识别热点水道。结果显示（图 5），W7 区域多年累计绿潮覆盖面积达 141 km^2，约占多年总覆盖面积的 16.36%，为核心分布区。次高值区包括 W4（98.13 km^2）、W5（111.62 km^2）、W8（93.13 km^2）和 W9（110.42 km^2）区域，四者合计占多年总覆盖面积的 47.86%。W3 与 W6 区域受水道形态限制，总水域面积较小，导致多年累计覆盖面积明显偏低。浅滩南部的 W10—W12 区域水域面积较大，但绿潮覆盖率仅为 0.8%～4.44%，显著低于北部水道，这与紫菜养殖筏架在南部水域分布较少存在一定关联。

通过计算各水道逐年的累计覆盖面积，展示了不同年份各水道绿藻累计面积的时空分布特征。绿藻覆盖面积高累计区域呈现显著的年际变化与空间分异（图 6）。在 9 年的监测期内，W9、W7、W5、W4、W8（按照频次排列）区域累积面积较高，多次出现在前四位高累积面积的水道中。例如，2019 年这 5 条水道的累积面积分别为 67.34 km^2、106.51 km^2、71.02 km^2、62.27 km^2 和 68.35 km^2，显示出显著的绿藻富集现象。相比之下，W2、W11、W1、W12 区域在同一年份中累计面积较低，排名后四位。2023 年 W1 和 W2 区域的漂浮绿藻累计面积（分别为 65.59 km^2 和 22.11 km^2）位列该年度前两位。W2 区域在 2021 年的累计面积也较高（11.13 km^2），为该年

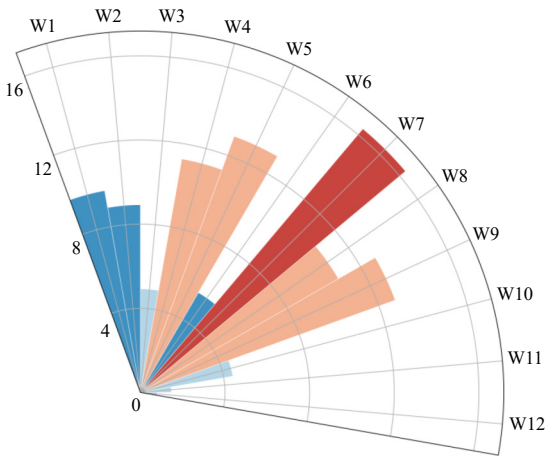


图 5　苏北浅滩各水道漂浮绿藻覆盖面积分布比例（%）

Fig. 5　Distribution ratio of floating green algae coverage area in each waterway in Subei Shoal(%)

度最大值。漂浮绿藻在不同水道的累计面积呈现出显著的空间异质性。部分水道在某些年份中表现出较高的累计面积，而在其他年份则较低，这种年际变化可能与环境因素密切相关。

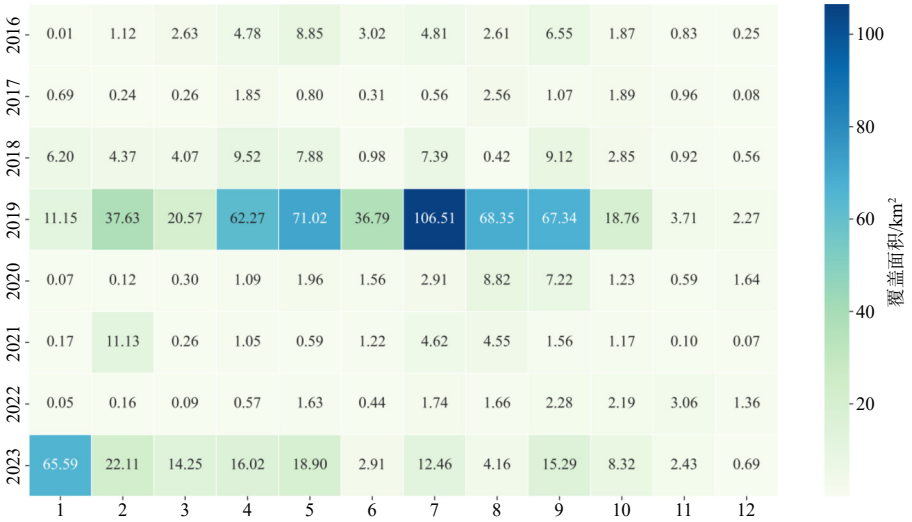


图 6　2016—2023 年各水道漂浮绿藻累计覆盖面积（km^2）

Fig. 6　Accumulated coverage area of floating green algae in various waterways from 2016 to 2023 (km^2)

2.3　黄海绿潮最大规模与苏北浅滩源区时空关联分析

为了揭示黄海绿潮暴发的早期预警信号，本研究分析了苏北浅滩早期漂浮绿藻覆盖面积与黄海绿潮最大规模的关系。结果表明，5 月 23 日前后是关键预警窗口期：该时段覆盖面积与当年绿潮最大规模呈显著正相关关系（Spearman $r = 0.77$, $p < 0.05$），且当覆盖面积超过 20 km^2 阈值时，绿潮最大规模通常突破 300 km^2（图 7）。相比之下，更早时段（如 5 月 10 日前后）的覆盖面积与绿潮最大规模缺乏显著相关性，这主要归因于漂浮绿藻的空间迁移。例如，2020 年 5 月 13 日在苏北浅滩观测到 29.21 km^2 的覆盖面积，但至关键的 5 月 23 日窗口期，该区域藻类已大幅减少，当年绿潮最大规模仅为 192 km^2。

W1 和 W2 区域呈现典型的低频高值绿潮发生特征（图 6）。相关性分析显示，W2 区域的绿潮覆盖面积与当年绿潮最大规模呈显著强正相关关系（$r = 0.83$, $p < 0.01$）。为揭示其空间分异

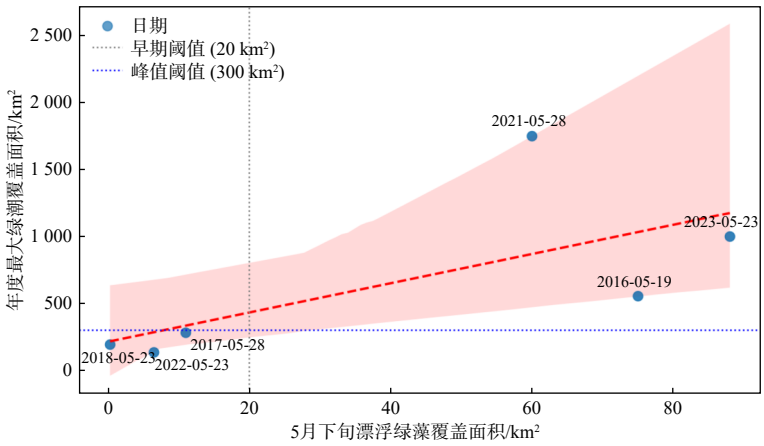


图 7　早期覆盖面积与绿潮最大规模（以最大覆盖面积表征）相关性分析

Fig. 7　Correlation analysis between early coverage area and maximum scale of green tide (represented by maximum coverage area)

机制，本研究聚焦绿潮早期发展阶段（4 月 25 日至 5 月 25 日）。已有研究表明，紫菜养殖筏架是漂浮绿藻的主要来源，此阶段绿藻生物量较小，海流输运作用占主导地位。基于此，本研究提取苏北浅滩筏架核心区（32.23° N—33.38° N, 120.93° E—121.59° E）的海表流速经向分量数据（*U*, 东向为正），计算西向与东向累计位移指数，以量化漂浮绿藻的净西向输运趋势（西向位移−东向位移）。

分析表明，净西向位移与漂浮绿藻的空间分布格局及最大绿潮覆盖面积均存在显著关联（图 8）。其中，最大绿潮覆盖面积（Max）与净西向位移呈显著正相关关系（$r = 0.78$, $p = 0.02$）。水道 W1 与 W2 区域总覆盖面积（W1、2）及水道 W2 区域的独立覆盖面积与净西向位移的相关系数分别为 0.62（$p = 0.10$）和 0.55（$p = 0.12$），尽管未达到通常意义上的显著性水平（$p < 0.05$），但是结果仍提示净西向位移可能对绿藻的空间分布具有一定影响，不过其可靠性尚需更多数据进一步验证。

根据以上分析可认为，西向优势位移促使绿藻向浅滩西侧输运。该区域盛行的往复流[15]延长了绿藻滞留时间，加之其较高的营养盐背景[30]，共同为滞留绿藻的聚集与增殖提供了有利条件。综合来看，海流动力（净西向位移）在早期绿藻分布中可能发挥重要调控作用，并通过触发“西侧滞留−富营养化环境−生物量增殖”过程，促成 W2 区域呈现低频高值特征，并与最大绿潮规模存在紧密耦合。然而，苏北浅滩地形复杂，潮流与风应力的共同作用使海流场具有显著的时空变异性，而绿潮的发生、发展同时还受到水温、营养盐、风场及养殖活动等多因子协同影响。未来研究有必要耦合高分辨率海洋数值模型，系统量化多环境因子对绿潮发生规模的相对贡献。

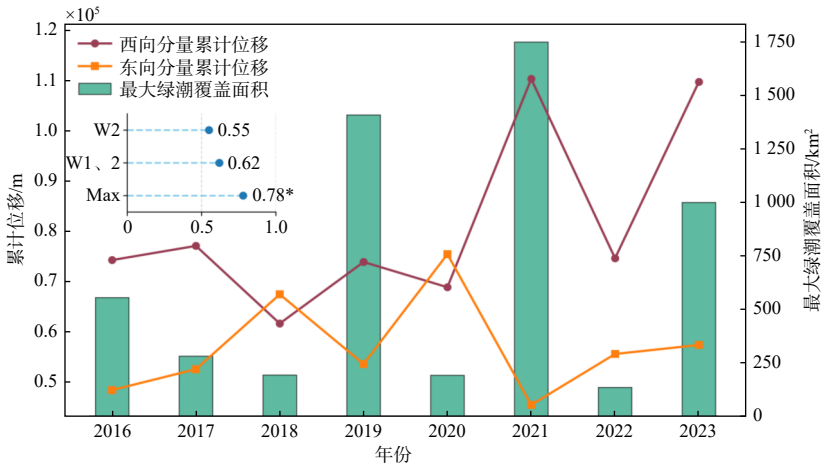


图 8 绿潮最大规模与东西向位移分量的关联性分析

Fig. 8 Association between maximum green tide coverage area and east-west displacement components

3 结 论

（1）苏北浅滩区域的早期漂浮绿藻每年时空分布和规模有较大差异，最早在 4 月底就发现漂浮绿藻，漂浮绿藻聚集成条状沿潮沟向外辐射分布，尤其是在蒋家沙和外毛竹沙附近。

（2）绿藻在各水道中呈现出明显的时空异质性与年际波动，W9、W7、W5、W4、W8 区域在多个年份中持续表现出绿藻面积高累计趋势，W1、W2 区域在研究期内总体绿藻累计面积较低，呈现低频聚集特征，但仍存在个别年份如 2023 年出现高值的情况。

（3）5 月 23 日前后的关键时间窗口内，绿藻覆盖面积与当年绿潮最大规模呈显著正相关关系，可作为重要早期预警信号。尽管 W2 区域绿藻累计面积在多数年份并不显著，但其与绿潮最大规模的相关性最高，可能与净西向位移驱动的西向输运及滞留−富营养化协同作用有关。

参考文献：

[1] Valiela I, Mcclelland J, Hauxwell J, et al. Macroalgal blooms in shallow estuaries: Controls and ecophysiological and

ecosystem consequences[J]. Limnology and Oceanography, 1997, 42(5part2): 1105-1118.

[2] 王宗灵, 傅明珠, 肖　洁, 等. 黄海浒苔绿潮研究进展 [J]. 海洋学报, 2018, 40(2): 1-13.

[3] Zhang Y Y, He P M, Li H M, et al. *Ulva prolifera* green-tide outbreaks and their environmental impact in the Yellow Sea, China[J]. National Science Review, 2019, 6(4): 825-838.

[4] Ye N H, Zhang X W, Mao Y Z, et al. "Green tides" are overwhelming the coastline of our blue planet: taking the world's largest example[J]. Ecological Research, 2011, 26(3): 477-485.

[5] 于仁成, 孙　松, 颜　天, 等. 黄海绿潮研究: 回顾与展望 [J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(5): 942-949.

[6] Fan J C, Ma Y J, Liang T T, et al. Multi-source remote sensing big data mining reveals cross-regional correlation between aquaculture and Enteromorpha disaster outbreaks[J]. Geo-spatial Information Science, 2025, 28(3): 1072-1084.

[7] 袁　超, 张靖宇, 肖　洁, 等. 基于哨兵 2 号卫星遥感影像的 2018 年苏北浅滩漂浮绿藻时空分布特征研究 [J]. 海洋学报, 2020, 42(8): 12-20.

[8] Li C, Zhu X Y, Li X W, et al. All-weather monitoring of *Ulva prolifera* in the Yellow Sea based on sentinel-1, sentinel-3, and NPP satellite data[J]. Remote Sensing, 2023, 15(24): 5772.

[9] Cao H Y, Han L. Drift path of green tide and the impact of typhoon "Chan-hom" in the Chinese Yellow Sea based on GOCI images in 2015[J]. Ecological Informatics, 2020, 60: 101156.

[10] Men Y, Liu Y Y, Ma Y F, et al. Remote sensing monitoring of green tide disaster using MODIS and GF-1 data: a case study in the Yellow Sea[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(12): 2212.

[11] 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.

[12] Hou W L, Chen J Y, He M X, et al. Evolutionary trends and analysis of the driving factors of *Ulva prolifera* green tides: a study based on the random forest algorithm and multisource remote sensing images[J]. Marine Environmental Research, 2024, 198: 106495.

[13] Hu L B, Hu C M, He M X. Remote estimation of biomass of *Ulva prolifera* macroalgae in the Yellow Sea[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 192: 217-227.

[14] Zhang Q, Su M, Yao P, et al. Dynamics of a tidal current system in a marginal sea: a case study of the yellow sea, China[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 596388.

[15] Xing F, Wang Y P, Jia J J. Hydrodynamics and sediment transport patterns on intertidal flats along middle Jiangsu coast[J]. Anthropocene Coasts, 2022, 5(1): 12.

[16] Yu Q, Wang Y W, Shi B W, et al. Physical and sedimentary processes on the tidal flat of central Jiangsu coast, China: headland induced tidal eddies and benthic fluid mud layers[J]. Continental Shelf Research, 2017, 133: 26-36.

[17] Liu X Q, Li Y, Wang Z L, et al. Cruise observation of *Ulva prolifera* bloom in the southern yellow sea, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163: 17-22.

[18] 范士亮, 傅明珠, 李　艳, 等. 2009—2010 年黄海绿潮起源与发生过程调查研究 [J]. 海洋学报, 2012, 34(6): 187-194.

[19] Zhang G Z, Niu L F, Wu M Q, et al. Ecological impact patterns and temporal cycles of green tide biomass in the settlement region: based on time-series remote sensing and in situ data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 1610-1622.

[20] Xing Q G, An D Y, Zheng X Y, 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.

[21] Wang Z L, Xiao J, Fan S L, 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 and Oceanography, 2015, 60(4): 1105-1117.

[22] Xue M, Wu M, Zheng L, et al. Multi-factors synthetically contribute to *Ulva prolifera* outbreaks in the south yellow sea of China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(21): 5151.

[23] Zhan Y T, Qiu Z F, Wang Y J, et al. Long-term spatiotemporal characteristics of *Ulva prolifera* green tide and effects of environmental drivers on its monitoring by satellites: a case study in the Yellow Sea, China, from 2008 to 2023[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(4): 630.

[24] 中华人民共和国自然资源部. 2023 年中国海洋灾害公报 [R/OL]. 北京: 中华人民共和国自然资源部. (2024-04-15)[2025-07-02]https://gi.mnr.gov.cn/202404/t20240429_2844013.html.

[25] Zhang G Z, Wu M Q, Wei J, et al. Adaptive threshold model in google earth engine: A case study of *Ulva prolifera* extraction in the south yellow sea, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3240.

[26] Wang S L, Li J S, Zhang B, et al. A simple correction method for the MODIS surface reflectance product over typical inland waters in China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(24): 6076-6096.

[27] 谢宏全, 卢　霞, 周　立, 等. 基于连云港海域浒苔光谱的高光谱特征参数分析 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(27): 16964-16966.

[28] 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.

[29] Xu Q, Zhang H Y, Cheng Y C. Multi-sensor monitoring of *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea using different methods[J]. Frontiers of Earth Science, 2016, 10(2): 378-388.

[30] 张　瑾, 董明帆, 杨福霞, 等. 苏北浅滩营养盐的分布特征与控制因素 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2023, 53(9): 113-122.

（本文编辑：曲丽梅）