

姜晓鹏, 高志强, 吴晓青, 等. 基于船载无人机的绿潮漂移速度估算与分析[J]. 海洋学报, 2021, 43(4): 96–105, doi:10.12284/hyxb2021054
Jiang Xiaopeng, Gao Zhiqiang, Wu Xiaoqing, et al. Estimation and analysis of the green-tide drift velocity using ship-borne UAV[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(4): 96–105, doi:10.12284/hyxb2021054

基于船载无人机的绿潮漂移速度估算与分析

姜晓鹏^{1,2,3}, 高志强^{1,3*}, 吴晓青^{1,3}, 王跃启^{1,3}, 宁吉才^{1,3}

(1. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院烟台海岸带研究所 山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003)

摘要: 无人机遥感具有应用灵活、不受云层干扰以及时空分辨率高的显著优势。为探索无人机在海洋灾害监测中的应用, 本文以科考船为起降平台, 首次基于无人机获取的双时相绿潮正射影像, 开展了黄海绿潮漂移速度的估算研究。同时对比了卫星影像提取的速度结果, 并探讨了风与潮流对海上绿潮漂移的驱动。研究发现: (1) 可见光波段的漂浮藻类指数能高精度地提取无人机可见光影像中的绿潮 (κ 系数=0.95); (2) 无人机遥感估算 3 个站位的绿潮漂移速率为 0.26~0.44 m/s, 漂移方向在 1 天之内变化明显; (3) 绿潮短时间内的漂移受到风与潮流的共同影响, 漂移方向与 M_2 分潮的潮流方向基本一致, 位于风向右侧 $1^\circ\sim 62^\circ$ 。基于船载的无人机航测, 能高精度地估算绿潮漂移速度, 为精细化的绿潮灾害预警与防控提供技术支撑。

关键词: 无人机遥感; 黄海; 绿潮; 漂移速度; 漂浮藻类指数

中图分类号: X87 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2021)04-0096-10

1 引言

自 2007 年夏季, 黄海绿潮已连续暴发 14 年, 成为黄海海域一种常态化的海洋生态灾害^[1-2], 对青岛、海阳、日照等沿海城市的滨海旅游、海水养殖、生态环境等造成了严重的危害^[3]。已有研究确认了黄海绿潮的原因种为浒苔 (*Ulva prolifera*)^[4-5], 通过野外调查、遥感以及数值模拟等手段证明了黄海绿潮最初起源于苏北浅滩海域^[6-7], 然后向北进入黄海, 边漂移边生长, 并最终在山东半岛东部沿海聚集堆积^[8-10]。黄海绿潮具有长时间跨区域输运、异地成灾的特点, 准确掌握其漂移速率、方向与轨迹等动态信息, 能为绿潮灾害预警与防控提供重要参考。

以往绿潮漂移速度的研究数据多源于卫星遥

感。如衣立等^[11]利用 2009 年 6 月 24–25 日的 MODIS 的绿潮影像, 提取了黄海 3 个区域的绿潮漂移速率, 分别为 0.2 m/s、0.4 m/s 和 0.12 m/s; 夏深圳^[12]基于 MODIS 与 GOCI 数据, 估算了 2013–2015 年黄海绿潮漂移速率的变化范围, 为 0.01~0.98 m/s, 并指出绿潮漂移速度存在明显的时变特征。陈晓英等^[13]利用 GF-4 卫星影像, 基于最大相关系数法追踪绿潮, 分析了 9 时与 15 时绿潮漂移速度的不同变化。从 MODIS 的 1 d, 到 GOCI 的 1 h, 再到 GF-4 卫星的 20 s, 虽然所用影像的时间分辨率不断提高, 但卫星遥感极易受到天气及云层的干扰, 如 2013–2015 年 5–7 月的 MODIS 数据中, 可用于绿潮速度研究的影像只占 20.7%^[12]。GF-4 卫星在南黄海区域的重访周期并不恒定, 不能满足绿潮灾害应急监测的要求, 且 MODIS 与 GOCI 的空间

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2020-12-08。

基金项目: 国家自然科学基金(41876107); 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”项目(2019YFD0900705); 山东省联合基金(U1706219); 中国科学院海洋大科学研究中心重点部署项目(COMS2019J02); 中国科学院前沿科学重点研究计划(ZDBS-LY-7010); 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室开放基金(KLMEES202005); 山东省海岸带环境过程重点实验室(中国科学院烟台海岸带研究所)开放基金(2019SDHADK-FJ07)。

作者简介: 姜晓鹏(1986—), 男, 山东省威海市人, 博士研究生, 研究方向为环境遥感与 GIS 开发。E-mail: xpjiang@yic.ac.cn

* **通信作者:** 高志强, 博士生导师, 研究员, 研究方向为海岸带信息集成及定量遥感。E-mail: zqgao@yic.ac.cn

分辨率分别为 250 m 与 500 m, 低分辨率的影像中存在着大量的混合像元^[14-15], 从而影响绿潮提取及速度估算的精度。

无人机遥感具有时空分辨率高、不受云层干扰等优势, 能根据任务需求灵活开展航测作业, 在陆地灾害评估、测绘、作物估产等方面发挥了重要的作用, 是地面调查与卫星遥感的重要补充^[16]。近年来, 随着小型旋翼无人机技术的发展, 无人机应用也逐渐扩展到海洋环境监测^[17]、绿潮初始生物量估算^[18]等海洋研究领域。无人机与科考船的联合作业, 可发挥船载设备能同时获取海上气象、水文等数据的优势。

本文利用科考船作为无人机起降平台, 首次获取了双时相的绿潮正射影像, 基于可见光波段的漂浮藻类指数 (RGB-FAI)^[19] 提取了无人机可见光影像中的绿潮, 计算出高精度的绿潮漂移速度, 并与 GOCI 影像反演的速度结果进行对比。同时结合船载气象仪的风速数据与已有研究的潮流数据, 分析了绿潮漂移对风与潮流的响应。本文以期扩展无人机在绿潮监测方面的应用, 为绿潮灾害的应急预警与防灾减灾提供高精度的技术支撑。

2 数据与方法

2.1 研究区

研究区位于南黄海海域(图 1)。南黄海为山东半岛成山角与朝鲜半岛长山串连线南部的黄海区域, 面积约为 $30.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 平均水深约 46 m, 其西部沿岸海域为规则半日潮。南黄海受东亚季风影响, 秋、冬季盛行北风或西北风, 平均风速达 6~8 m/s, 海流多为偏南向流。春季, 风向多变, 风力减弱; 夏季, 东亚夏季风与副热带高压带来平均风速为 4~6 m/s 的偏南风, 海流为偏北向流, 海表面温度达到一年中的最大值^[13, 20]。2007 年后, 南黄海在每年的春夏季都会出现大规模的绿潮, 其通常开始于 3 月末至 4 月的苏北浅滩海域, 约 5 月中下旬进入暴发期, 自 7 月则逐渐衰退, 直至最终消亡^[21]。

2.2 无人机数据及预处理

利用大疆“悟 1”无人机获取 3 个站点(图 1)的海上绿潮影像。该四旋翼无人机体积小, 为垂直起降方式, 可在小面积场地起降, 其惯性测量单元模块以及最大 5 级的抗风能力, 能保证无人机在海上复杂气象条件下的飞行姿态稳定。该无人机采用 GLONASS+GPS 双系统定位, 搭载 4K 可见光高清镜头, 获取的航拍图像具有坐标信息, 在小范围的大比例尺测图中已

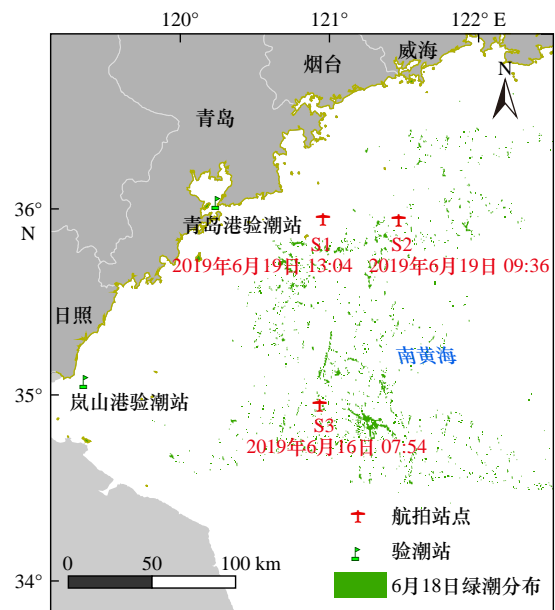


图 1 航拍站点、验潮站及研究区示意图

Fig. 1 Map of aerial photography sites, tide station and study area

得到了应用与精度验证^[22]。无人机对绿潮进行航测作业时, 以科考船甲板为起降平台, 飞行高度尽可能使单幅图片能容纳所拍摄的绿潮斑块宽度, 并保证图像的航向重叠度大于 60%, 以满足后期图像拼接的要求。对漂移的同一绿潮斑块分别执行 2 次航拍(图 2), 生成其在 2 个时相的数字正射影像。

2.3 基于无人机 RGB 影像的绿潮提取方法

采用 RGB-FAI 与阈值分割法提取无人机正射影像中的绿潮。RGB-FAI 是一种基于基线校正思想, 用于从可见光影像中提取绿潮的植被指数, 其提取精度高, 并能适用于薄雾气象条件下对零散、小面积绿潮斑块的提取与监测^[19]。RGB-FAI 的算术公式如下:

$$\text{RGB-FAI} = \frac{(R_{\text{green}} - R_{\text{blue}}) - (R_{\text{red}} - R_{\text{blue}}) \times (\lambda_{\text{green}} - \lambda_{\text{blue}}) / (\lambda_{\text{red}} - \lambda_{\text{blue}})}{(\lambda_{\text{green}} - \lambda_{\text{blue}}) / (\lambda_{\text{red}} - \lambda_{\text{blue}})} \quad (1)$$

式中, R 表示反射率或像元值; λ 表示中心波长, 下标

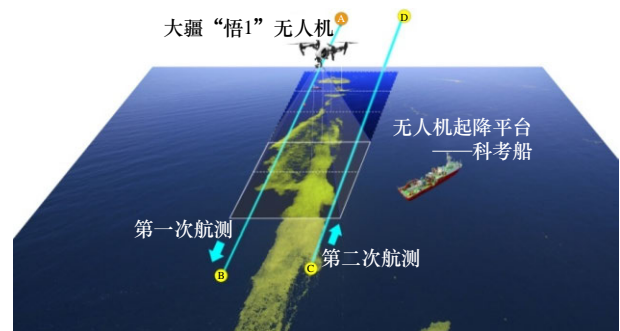


图 2 船载无人机获取绿潮正射影像示意图

Fig. 2 Green-tidal orthophoto taken by ship-borne unmanned aerial vehicle (UAV)

red、green、blue 分别表示红光波段、绿光波段、蓝光波段,其中, $\lambda_{red}=700\text{ nm}$, $\lambda_{green}=546.1\text{ nm}$, $\lambda_{blue}=435.8\text{ nm}$ ^[23]。

由于绿潮不断漂移,为减小速度估算的误差,在整个绿潮斑块选取一定数量的子斑块,通过计算子斑块速度的平均值来表示该站点绿潮的漂移速度。首先,子斑块的选取原则为:(1)尽可能均匀分布在绿潮范围内;(2)子斑块形状清晰、明显,容易识别;(3)形态特征在两幅影像中基本不变。其次,为保证两个时相影像中相同子斑块的代表点位一致,利用 Arcmap 软件的 Mean Center 工具生成这些子斑块的地理中心点。然后,量测各地理中心点(子斑块)的位移,通过子斑块所在图像的拍摄时间获得其漂移时长,最终可计算出各个子斑块的漂移速率与方向,并求出它们的平均值。整个绿潮漂移速率 V_{ave} 为这些子斑块漂移速率的算术平均值,而漂移方向 Dir_{ave} 取子斑块的矢量平均值,两者的计算公式如下:

$$V_{ave} = \frac{1}{n} \times \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{t_i} \right), \quad (2)$$

$$Dir_{ave} = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_i \times \sin Dir_i}{\sum_{i=1}^n V_i \times \cos Dir_i} \right), \quad (3)$$

式中, i 与 n 分别代表子斑块及其数量; S 、 t 和 Dir 分别表示漂移的距离、时间和方向。

2.4 GOCI 影像数据及其绿潮提取方法

GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)影像从韩国海洋卫星中心网站(<http://kosc.kiost.ac.kr/>)下载,影像包含从 412~865 nm 的可见光及近红外光共 8 个波段,每天可提供从北京时间 08:30–15:30 的 8 景逐小时影像,其时间分辨率(1 h)和空间分辨率(500 m)优势可用于黄、渤海及东海海域的海洋环境监测^[24]。

GOCI 影像首先利用 GDPS(GOCI Data Processing System)进行辐射校正,然后基于 GLT(Geographic Lookup Table)进行几何校正,选取并裁切出 2 幅影像中同时未被云层遮挡的海域。参考已有的绿潮提取算法研究,采用 NDVI 指数^[25–26],并基于 Jenks 的自然断裂点分级法和目视解译,提取海水中的绿潮。其中, $NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$, R_{NIR} 、 R_{RED} 分别对应于 GOCI 影像的第 7 近红外波段(波长为 745 nm)与第 5 红光波段(波长为 660 nm)。

2.5 风速与潮流数据

2.5.1 数据来源

本文的风速数据分为航次站点的风速数据与南黄海区域的风场数据。航次站点的风速数据来源于

中国科学院海洋研究所海洋大数据中心(<http://msdc.qdio.ac.cn/>)在 2019 年 6 月的透明海洋共享航次,由“科学三号”的“XZC6-1 型船用自动气象仪”所获取的 1 min 平均真风速、真风向数据。海域的风场数据来源于欧洲中期天气预报中心(ECWMF)发布的再分析资料(ERA5),从中提取出南黄海海域在 6 月 19 日当天 1 000 hPa 大气压下,海面 10 m 高处的逐小时风场数据,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

潮流数据引用了已发表的成果,为南黄海 6 月表层的涨落潮流数据。此外,潮汐表用于查询站点作业时的潮位,其来源于中国海事服务网(<https://www.cnss.com.cn/tide/>),考虑到站点 S1、S2 所在的纬度(36°N)与青岛港验潮站($36^\circ04'\text{N}$)相近,站点 S3 的纬度(35°N)与岚山港验潮站($35^\circ05'\text{N}$)相近(图 1),因此分别选取了青岛港 2019 年 6 月 19 日与岚山港 2019 年 6 月 16 日的潮汐表的潮位数据。

2.5.2 站点有效风速数据的选取与处理

由船载气象仪记录的风速数据可知,风速在作业时段变化较大。若航拍所记录的绿潮漂移时间段为 $T_0 \sim T_1$,则作用于该时段绿潮漂移的有效风速时段,并不等同于船载气象仪风速资料中的 $T_0 \sim T_1$ 。这是由于以下两点:第一,各个站点中,科考船与航拍绿潮的距离有数百米至 1 km,风通过这段距离,需要一定时间(设为 Δt ,单位: min);第二,绿潮漂移具有惯性,对风等外力驱动作用有一定的滞后时间,本文将该响应时间设为 2 min。通过量测各站点船载气象仪与绿潮中心在风向上的投影位移,结合风速,可估算出 Δt 。当科考船位于绿潮的上风向时,将航拍记录的时段整体前移 Δt ,选取的有效风速时段为 $T_0 - \Delta t - 2 \sim T_1 - \Delta t$;下风向时,则整体后移 Δt ,为 $T_0 + \Delta t - 2 \sim T_1 + \Delta t$ 。则站点 S1、S2 和 S3 的 Δt 的值分别为 -1 min、5 min、5 min。各站点选取的有效风时段如图 3 中的红色竖线间所示。

最后,用选取时间段内的 1 min 平均真风速和风向数据来计算风速的算术平均值 $V_{风速}$ 和风向的矢量平均值 $Dir_{风向}$,表示作用于绿潮漂移的有效风。两者的计算公式如下:

$$V_{风速} = \frac{1}{n} \times \left(\sum_{i=1}^n V_i \right), \quad (4)$$

$$Dir_{风向} = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_i \times \sin Dir_i}{\sum_{i=1}^n V_i \times \cos Dir_i} \right), \quad (5)$$

式中, V_i 代表第 i 时刻的 1 min 平均真风速; Dir_i 代表

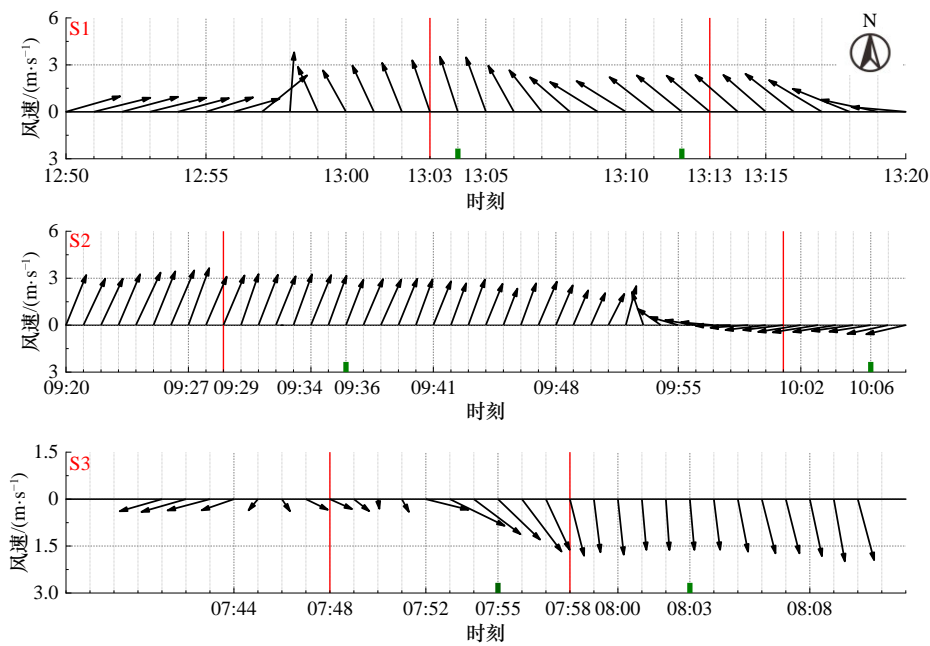


图3 3个站点作业期间的1 min 平均风速矢量

Fig. 3 The 1-minute average wind data of three sites during operation

2条红色竖线间为选取的有效风时段, 2个绿色标签点之间表示该站点航拍的绿潮漂移时段

The selected effective wind period is between two red vertical lines, and two green label points represent the green-tide drift period photographed by UAV

第 i 时刻的 1 min 平均真风向。

3 结果与分析

3.1 基于 RGB-FAI 指数提取绿潮斑块

用 RGB-FAI 分别提取 3 个站点中的绿潮。为检验该指数提取绿潮的精度, 从 S1 站点的绿潮分布图中,

截取宽为 317 m、长为 662 m 的矩形区作为样例(图 4a), 计算其 RGB-FAI(图 4b), 并设定阈值提取出绿潮, 同时在图像区域内生成 999 个随机验证点(图 4c), 利用无人机影像的高空间分辨率(0.12 m)、易目视识别的特点, 对该矩形区域的绿潮提取结果进行精度评价, 基于误差矩阵表获得生产者精度与用户精度(表 1),

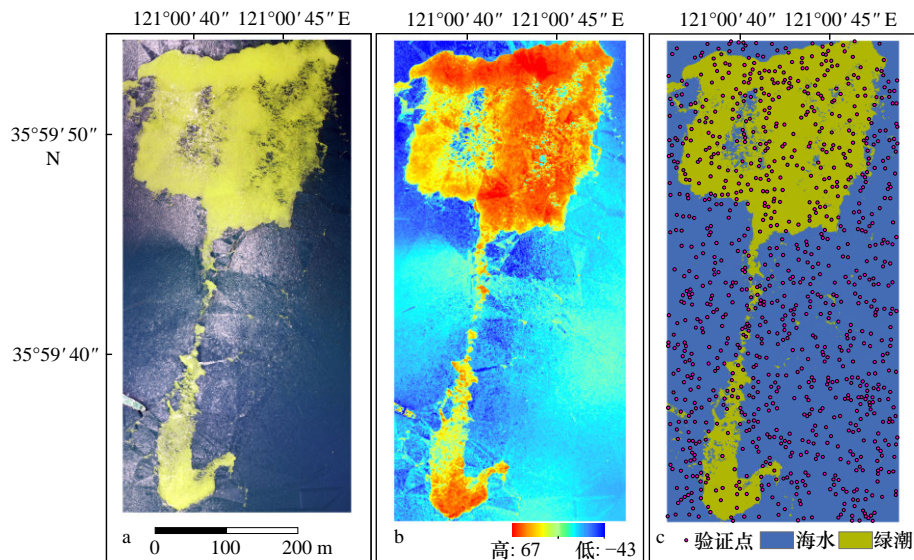


图4 绿潮提取步骤

Fig. 4 Steps of extracting green-tide

a. 生成数字正射影像; b. 计算 RGB-FAI; c. 应用阈值分割法提取绿潮, 并使用随机点进行精度评价

a. Generating digital orthophoto image; b. calculating RGB-FAI; c. extracting green-tide by threshold segmentation, and using

the random points for accuracy evaluation

并计算提取结果的总精度与 kappa 系数。

计算出绿潮提取的总精度为 97.9%, kappa 系数为 0.95。kappa 系数为一致性检验指标, 值为-1~1, 当系数在 0.81~1 时, 认为分类结果与真实状况几乎完全一致^[27], 因此, 基于以上验证结果, 认为 RGB-FAI 能够适用于无人机可见光影像的海上绿潮提取。

3.2 基于无人机双时相影像的绿潮速度计算

基于 RGB-FAI, 对 3 个站点的双时相无人机正射

表 1 绿潮提取误差矩阵表

Table 1 Error matrix of green-tide extraction

	海水	绿藻	行总和	用户精度/%
海水	692	17	709	97.60
绿藻	4	286	290	98.62
列总和	696	303	999	
生产者精度/%	99.43	94.39		

影像进行绿潮提取, 并在 3 个站点各选出 6~8 个子斑块, 量测出子斑块地理中心点的位移、时间、方向(图 5), 计算出各子斑块的漂移速度。利用公式(2)、公式(3), 依次计算出各站点的绿潮漂移速率和方向, 并按照 2.5 节中确定的有效风速时间段, 计算各站点的平均风速与平均风向, 结果如表 2 所示。

在站点 S1, 绿潮漂移速率为 0.257 m/s, 其北向速度分量较大, 符合绿潮北漂的整体趋势。站点 S2, 绿潮漂移速率达到 0.439 m/s, 其东向速度分量较大。在站点 S3, 绿潮漂移速率为 0.256 m/s, 方向为东南方向, 有南向的速度分量。结果表明, 绿潮在从苏北浅滩海域到山东近岸的北向漂移过程中, 甚至会有暂时向南漂移的时段(S3); 在一天中的不同时刻, 邻近海域的绿潮漂移速率和方向也会明显不同(S1、S2), 无人机遥感可以精确地揭示出绿潮的瞬时漂移状态。

3.3 绿潮漂移的驱动分析

一般而言, 海面漂浮物在长时段(大于 12 h)的漂

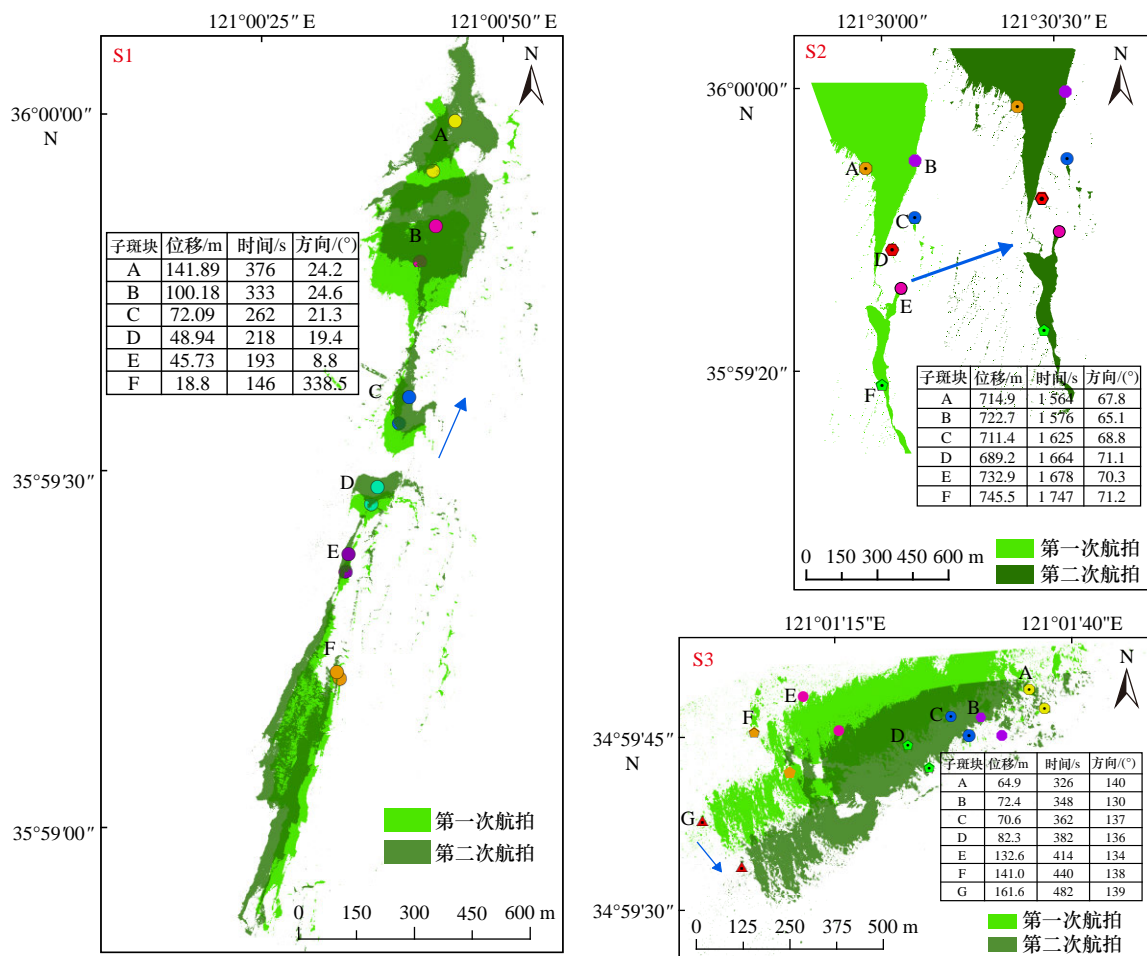


图 5 3 个站点的绿潮斑块漂移图
Fig. 5 The green-tide drifting map of three sites

点状符号表示各子斑块的中心点

The dot symbols in the graph represent the center of different sub patches

表2 绿潮斑块漂移速度与风速的统计

Table 2 Statistics of green-tide drifting velocity and the corresponding wind velocity

站点	站点坐标	航拍日期	航拍时段	漂移速率/(m·s ⁻¹)	漂移方向*/(°)	有效风时段	风速均值/(m·s ⁻¹)	风向均值*/(°)
S1	36°N, 121°E	2019年6月19日	13:04-13:12	0.257	17.1	13:03-13:13	3.17	139.7
S2	36°N, 121.5°E	2019年6月19日	09:36-10:06	0.439	69.0	09:29-10:01	3.23	186.9
S3	35°N, 121°E	2019年6月16日	07:55-08:03	0.256	136.5	07:48-07:58	1.75	315.7

注: *方向以正北向为0°, 顺时针为正。

移轨迹受风与局部洋流的共同影响,但短时间内的漂移则会明显受潮流的驱动^[28]。本文计算绿潮速度所记录的漂移时长为2~29 min,远小于潮汐涨落1次所需的约12 h,因此,绿潮的驱动需要结合潮汐流进行分析。此外,风是绿潮漂移的重要驱动因素。本文利用船载气象仪记录的风速数据、验潮站记录的潮汐表以及南黄海6月表层的涨落潮流场,将绿潮漂移与同一时刻的风速(表2)、潮流进行一致性分析。

南黄海区域涨潮与落潮时的潮流方向并非简单的朝向正西、正东。于晓杰^[29]基于FVCOM(Finite Volume Coast and Ocean Model)海洋数值模式计算出了南黄海6月M₂分潮的涨落潮流场,即1个潮周期内4个主要时刻(高潮时、落潮中间时、低潮时、涨潮中间时)的表层流场分布。本文的航拍作业同为6月的南黄海海域,查询S1、S2、S3站点同纬度近岸验潮站的潮汐表,根据各站点的作业时间查询出航拍时段的潮汐状态(图6)。据此,在南黄海6月表层“低潮时流场分布图”中可得到S1站点的潮流方向(图7b),在“落潮中间时流场分布图”中可得到S2、S3站点航拍时的潮流方向(图7d)。

在站点S1,绿潮漂移方向位于风向右侧约57°,与潮流同为东北向(图7a,图7b),风在绿潮漂移方向上的速率分量为1.7 m/s,约为绿潮速率的6.7倍。在站点S2,绿潮方向偏于风向右侧约62°,与潮流方向基本一致,夹角约为20°,为偏东向(图7c,图7d),风

在绿潮漂移方向上的速率分量约为1.5 m/s,为绿潮速率的3.5倍。在站点S3,绿潮漂移方向在风向右侧约1°,与潮流方向夹角约为24°,同为东南向(图7d,图7e),风在绿潮漂移方向上的速率分量为1.7 m/s,约为绿潮速率的6.8倍。可以看出,3个站点的绿潮漂移与潮流方向基本一致,位于风向右侧1°~62°。风在绿潮漂移方向上的速率分量为绿潮速率的3.5~6.8倍,非恒定系数。

3.4 无人机与卫星反演绿潮速度结果的对比

GOCI影像的时间分辨率为1 h,同样可应用于绿潮漂移速度的估算,因此,可与同时段下无人机遥感的速度做对比分析。

S1、S3站点航拍时段的海面绿潮,在GOCI影像上被云层覆盖,本文选取了与S2站点同一时段,即19日09:30与10:30的两景GOCI影像反演绿潮速度。由于S2站点被云遮挡,在另两处无云海域提取绿潮。利用Arcmap软件计算两个区域绿潮在两景影像的中心点,量测出中心点在09:30-10:30的移动距离和方向,分别算出两个区域绿潮的漂移速度(图8),最后取两者的均值作为GOCI影像反演的绿潮漂移速度。经计算,绿潮漂移速率均值为0.547 m/s,方向均值为北偏东58.4°。

与S2站点的无人机遥感结果相比(表3),两种方式反演的绿潮漂移方向基本一致,同为东北向,漂移速率上相差0.108 m/s。需要说明的是,由当天10时的风

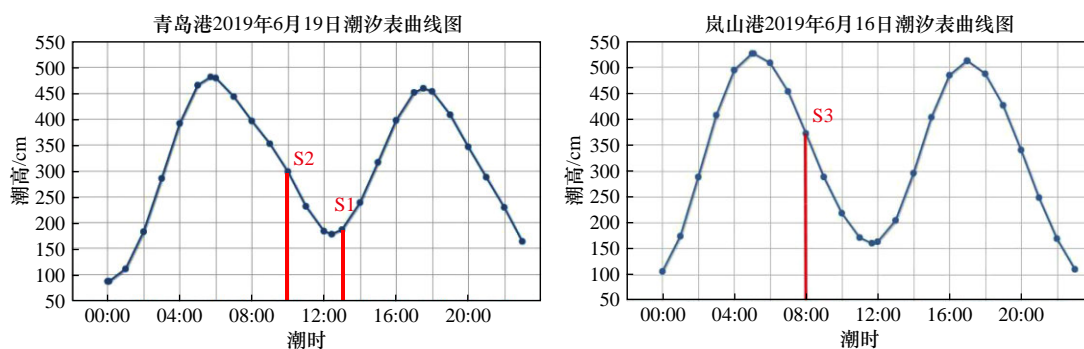


图6 3个站点航拍作业时的潮位

Fig. 6 Tidal height during aerial photography of three sites

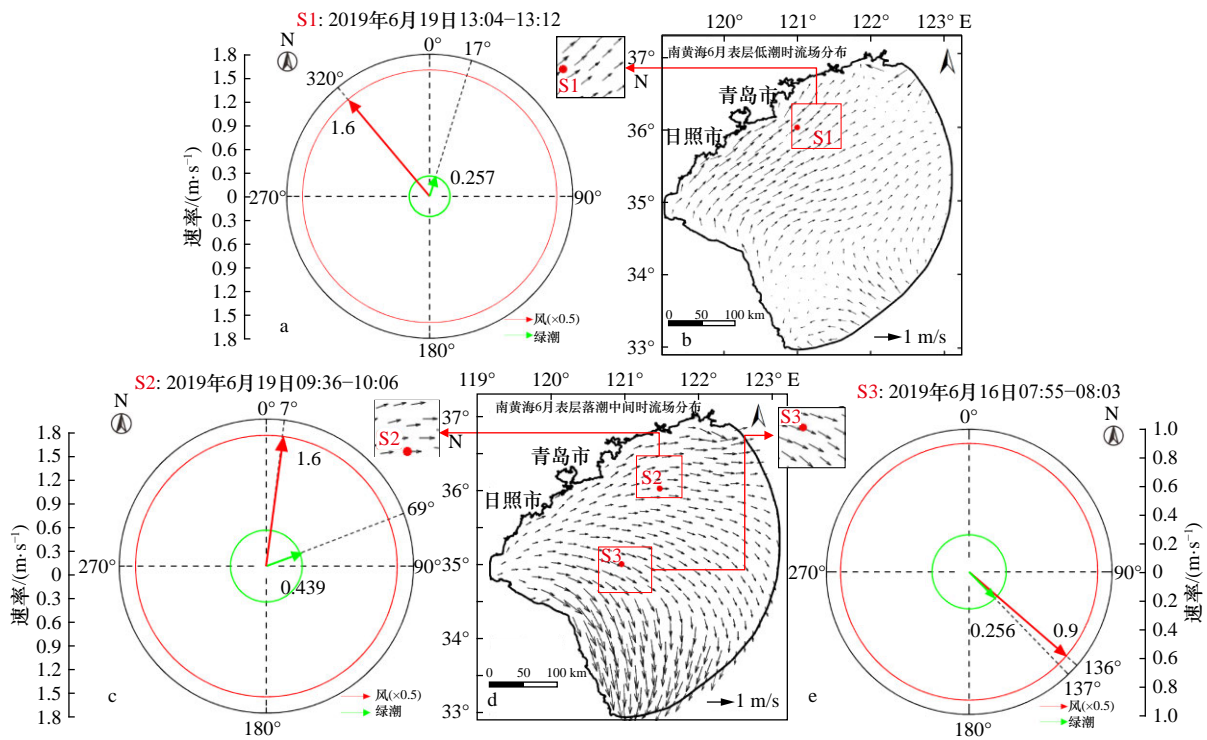


图 7 绿潮、风、潮流的移动矢量图

Fig. 7 Motion vector of green-tide, wind and tidal current

a, c, e 分别为 S1、S2、S3 站点风与绿潮漂移的矢量图，红色箭头为风矢量，绿色箭头为绿潮漂移矢量；b、d 分别为南黄海 6 月表层低潮时、落潮中间时的流场分布（改绘自文献 [29]），红点标识了 3 个站点的位置

a, c, e are vector diagrams of wind and green-tide drift at sites S1, S2 and S3, respectively, with red arrow as the wind vector and green arrow as the green-tide drifting vector; b, d are the tidal current field of the low tide and the middle of ebb in surface of the southern Yellow Sea in June (modified from reference [29]), where the red dots indicate the positions of three sites

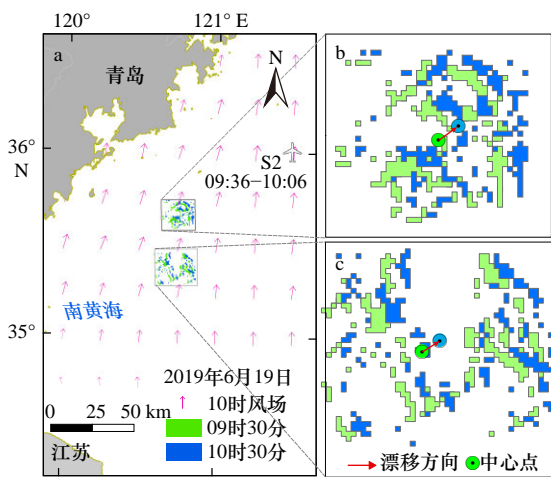


图 8 基于 GOCI 影像的绿潮逐时漂移图

Fig. 8 The one-hour drifting map of green-tide from GOCI images

场数据(图 8a)可知, S2 站点与 GOCI 反演海域在风速与风向的相对偏差分别为 0.58 m/s 和 3%, 因此两个海域绿潮漂移速度的实际值可能也存在差异。由于无人机影像的时空分辨率远高于卫星影像, 若能获取同时

表 3 基于 UAV 和 GOCI 影像的绿潮漂移速度提取结果的对比

Table 3 Comparison of green-tide drifting velocity derived from UAV and GOCI images

	无人机遥感	GOCI 卫星遥感	偏差*
影像分辨率/m	0.14	500	
漂移方向(北偏东)/(°)	69.0	58.4	2.9%
漂移速率/(m·s ⁻¹)	0.439	0.547	0.108

注: *方向偏差 = |测定值 - 基准值| / 360° × 100%; 速率偏差 = |测定值 - 基准值|。

段、同位置绿潮漂移的两种影像, 则无人机可以为卫星反演大范围海域的绿潮漂移速度提供高精度校准。

4 讨论

4.1 不确定性分析

本文通过无人机遥感与船载气象仪获取的绿潮漂移速度与风速数据具有较高精度, 但在以下方面存在不确定性。首先, 对于绿潮漂移的驱动分析, 用于

分析的数据样本只有3个,对绿潮漂移的定量分析还需要更多样本数据的支持。第二,在绿潮对风驱动作用的滞后时间上,根据主观经验设置为2 min,而这需要相关专业后期理论与实验的探索。第三,本文引用了基于海洋数值模式的潮流数据,能用于绿潮漂移方向的驱动分析,未来研究可考虑利用船载的声学多普勒流速剖面仪(ADCP),获取更精准的海水表层流场数据,为绿潮漂移的定量分析提供更精准的数据支撑。

4.2 船载无人机对绿潮漂移速度研究的优势

受风、浪、流的影响,海上绿潮斑块的形态在超过6 h时变化较大^[4],因此绿潮漂移速度的研究需要高时间分辨率的遥感影像。常用的卫星影像中MODIS、GOCI与GF-4能满足时间分辨率的要求,但MODIS和GOCI影像的空间分辨率较低,GF-4卫星的成像范围并不固定在绿潮发生区,且卫星影像易受云层影响。

而基于船载起降的无人机,可依靠科考船实时追踪绿潮,具备作业灵活、获取影像的时空分辨率高、不受云层干扰等优势,可快速、连续、更为精细地监测绿潮漂移。这些优势,一是可用于对重点区域的绿潮应急监测与灾害预警,如海滨景区、重要设施(核电站进水口等)的附近海域;其次,可校正卫星遥感提取结果,实现更大范围海域上绿潮漂移的精确监测。最后,可为数值模型预测绿潮漂移等研究提供高精度的验证数据与方法。同时,科考船搭载的温盐深仪、ADCP、自动气象

仪等设备,可以测量海水的温度、盐度、叶绿素浓度、海流速度、流向以及大气温度、风、气压等诸多水文与气象参数,这些数据与船载无人机获取的绿潮面积、形态、漂移速度等高精度结果相结合,可以为绿潮生长、漂移相关的研究提供更加充分的数据支持。

5 结论

本文基于船载无人机获取了黄海绿潮双时相的数字正射影像,开展了绿潮漂移速度的估算,并与GOCI卫星影像反演的绿潮速度进行对比,同时分析了风、潮流对绿潮漂移的驱动。结论如下:

(1) RGB-FAI可有效提取可见光影像中的绿潮信息(κ 系数为0.95),可辅助无人机高精度的估算绿潮漂移速度;3个站点的绿潮漂移速率为0.26~0.44 m/s,漂移方向在一天中会发生明显变化,甚至有南向分量的漂移。

(2) 绿潮短时间内的漂移受风与潮流的共同影响。绿潮漂移方向与 M_2 分潮的潮流方向基本一致,位于风向的右侧 $1^\circ\sim 62^\circ$ 。

(3) 船载无人机对绿潮漂移状态的监测,可校正卫星遥感的结果,能为绿潮灾害的应急监测、预警及相关研究提供重要的数据与技术支撑。

致谢: 感谢中国科学院海洋研究所海洋大数据中心(<http://msdc.qdio.ac.cn/>)提供数据支持。

参考文献:

- [1] Liu Dongyan, Keesing J K, He Peimin, 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] 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.
Yu Rencheng, Sun Song, Yan Tian, et al. Progresses and perspectives on green-tide studies in the Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(5): 942-949.
- [3] 于仁成, 刘东艳. 我国近海藻华灾害现状、演变趋势与应对策略[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1167-1174.
Yu Rencheng, Liu Dongyan. Harmful algal blooms in the coastal waters of China: current situation, long-term changes and prevention strategies[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(10): 1167-1174.
- [4] Wang Zongling, Xiao Jie, Fan Shiliang, 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: Green tide in Yellow Sea of China[J]. *Limnology & Oceanography*, 2015, 60(4): 1105-1117.
- [5] 颜天, 于仁成, 周名江, 等. 黄海海域大规模绿潮成因与应对策略——“鳌山计划”研究进展[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(5): 950-958.
Yan Tian, Yu Rencheng, Zhou Mingjiang, et al. Mechanism of massive formation and prevention strategy against large-scale green tides in the south Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(5): 950-958.
- [6] 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 Caicai, Xu Ren, He Peimin, 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.
- [7] 张青春, 孔凡洲, 颜天, 等. 苏北浅滩养殖筏架附生绿藻入海过程在黄海绿潮形成中的作用[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(5): 1014-1020.
Zhang Qingchun, Kong Fanzhou, Yan Tian, et al. Green algae detached from aquaculture rafts into seawater resulted in green tide occurrence in the Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(5): 1014-1020.
- [8] Liu Dongyan, Keesing J K, Dong Zhijun, et al. Recurrence of the world's largest green-tide in 2009 in Yellow Sea, China: *Porphyra yezoensis* aquaculture rafts confirmed as nursery for macroalgal blooms[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(9): 1423-1432.

- [9] Bao Min, Guan Weibing, Yang Yang, et al. Drifting trajectories of green algae in the western Yellow Sea during the spring and summer of 2012[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 9–16.
- [10] 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.
Wang Zongling, Fu Mingzhu, Xiao Jie, et al. Progress on the study of the Yellow Sea green tides caused by *Ulva prolifera*[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(2): 1–13.
- [11] 衣立, 张苏平, 殷玉齐. 2009年黄海绿潮浒苔爆发与漂移的水文气象环境[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(10): 15–23.
Yi Li, Zhang Suping, Yin Yuqi. Influence of environmental hydro-meteorological conditions to enteromorpha prolifera blooms in Yellow Sea, 2009[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(10): 15–23.
- [12] 夏深圳. 基于遥感的黄海浒苔漂移速度与驱动机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
Xia Shenzhen. Distribution and driving mechanism of the drift velocity of *Ulva prolifera* in the Yellow Sea based on remote sensing[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- [13] 陈晓英, 张杰, 崔廷伟, 等. 基于高分四号卫星的黄海绿潮漂移速度提取研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(1): 29–38.
Chen Xiaoying, Zhang Jie, Cui Tingwei, et al. Extraction of the green tide drift velocity in the Yellow Sea based on GF-4[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(1): 29–38.
- [14] 钟山, 丁一, 李振, 等. MODIS浒苔遥感监测误差分析研究[J]. 遥感信息, 2013, 28(1): 38–42.
Zhong Shan, Ding Yi, Li Zhen, et al. Error analysis on enteromorpha prolifera monitoring using MODIS data[J]. *Remote Sensing Information*, 2013, 28(1): 38–42.
- [15] 王法景, 盛辉, 苏婧, 等. 基于GOCI数据的绿潮覆盖面积精细化提取方法[J]. 测绘地理信息, 2018, 43(5): 24–27.
Wang Fajing, Sheng Hui, Su Jing, et al. Refined extraction method for green tide coverage area based on GOCI data[J]. *Journal of Geomatics*, 2018, 43(5): 24–27.
- [16] 李佳琦, 李家国, 朱利, 等. 太原市黑臭水体遥感识别与地面验证[J]. 遥感学报, 2019, 23(4): 773–784.
Li Jiaqi, Li Jianguo, Zhu Li, et al. Remote sensing identification and validation of urban black and odorous water in Taiyuan City[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(4): 773–784.
- [17] Wang Shengke, Liu Lu, Qu Liang, et al. Accurate *Ulva prolifera* regions extraction of UAV images with superpixel and CNNs for ocean environment monitoring[J]. *Neurocomputing*, 2019, 348: 158–168.
- [18] Jiang Xiaopeng, Gao Zhiqiang, Zhang Qingchun, et al. Remote sensing methods for biomass estimation of green algae attached to nursery-nets and raft rope[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 150: 110678.
- [19] Jiang Xiaopeng, Gao Meng, Gao Zhiqiang. A novel index to detect green-tide using UAV-based RGB imagery[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 245: 106943.
- [20] 魏传杰. 南黄海水文环境季节变化与湍流混合研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2018.
Wei Chuanjie. Seasonal variability of hydrological properties and turbulent mixing in southern Yellow Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [21] 张正龙. 我国黄、东海浒苔和马尾藻的遥感鉴别及绿潮发生过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
Zhang Zhenglong. Remote sensing identification of *Ulva prolifera* and *Sargassum* and evolution of green tide in the Yellow Sea and the East China Sea[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [22] 万剑华, 王朝, 刘善伟, 等. 消费级无人机的的大比例尺测图能力分析[J]. 测绘通报, 2018(6): 104–108.
Wan Jianhua, Wang Zhao, Liu Shanwei, et al. Analysis of large scale mapping capability of consumer unmanned aerial vehicles[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(6): 104–108.
- [23] Fairman H S, Brill M H, Hemmendinger H. How the CIE 1931 color-matching functions were derived from Wright-Guild data[J]. *Color Research & Application*, 1997, 22(1): 11–23.
- [24] 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.
- [25] 蔡晓晴. 基于静止轨道海洋水色卫星数据的绿潮遥感探测方法和逐时变化特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Cai Xiaoping. Remote sensing detection and diurnal variation research of green macro-algae bloom by geostationary ocean color imager[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [26] 宋德彬, 高志强, 徐福祥, 等. 基于GOCI的2017年南黄海浒苔演变遥感分析[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(5): 1068–1074.
Song Debin, Gao Zhiqiang, Xu Fuxiang, et al. Spatial and temporal variability of the green tide in the south Yellow Sea in 2017 deciphered from the GOCI image[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(5): 1068–1074.
- [27] Rosenfield G H, Fitzpatrick-Lins K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1986, 52(2): 223–227.
- [28] Son Y B, Choi B J, Kim Y H, et al. Tracing floating green algae blooms in the Yellow Sea and the East China Sea using GOCI satellite data and lagrangian transport simulations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 21–33.
- [29] 于晓杰. 南黄海西部夏季环流及其对浒苔漂移影响的数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
Yu Xiaojie. Numerical study about circulation in summer and its impact on the drift of enteromorpha prolifera in the western part of south Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.

Estimation and analysis of the green-tide drift velocity using ship-borne UAV

Jiang Xiaopeng^{1,2,3}, Gao Zhiqiang^{1,3}, Wu Xiaoqing^{1,3}, Wang Yueqi^{1,3}, Ning Jicai^{1,3}

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing has distinct advantages of flexible use, no cloud interference, and high spatial-temporal resolution. Aim to explore UAV's utilization potential in marine disaster monitoring, research ship was used as the UAV landing pad, and for the first time, based on the bi-temporal orthophotos acquired by the ship-borne UAV, the drift velocity of green-tide in the Yellow Sea was estimated. In addition, the velocity result extracted from satellite images was compared, and the influences of wind and tidal currents on green-tide drift were analyzed. The results show that: (1) the red-green-blue floating algae index (RGB-FAI) can extract green-tide patches from UAV-based RGB orthophotos with a high-accuracy (kappa coefficient=0.95); (2) the green-tidal speed of three sites estimated by UAV remote sensing are 0.26–0.44 m/s, and the drift direction changed significantly throughout the day; (3) the short-term drift of green-tide is forced by the wind and tidal current. The drift direction of the green-tide is basically consistent with the tidal current of M_2 , at 1° – 62° to the right of wind direction. The ability to estimate green-tidal velocity accurately from the ship-borne UAV images is expected to provide technical support for the precise prediction, warning and control of green-tide disaster.

Key words: UAV remote sensing; Yellow Sea; green tides; drift velocity; RGB-FAI