



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

黄海绿潮早期附着生物量及海上漂移状态参量的估算研究

作者姓名: 姜晓鹏

指导教师: 高志强 研究员 中国科学院烟台海岸带研究所

学位类别: 工学博士

学科专业: 环境科学

培养单位: 中国科学院烟台海岸带研究所

2021年6月

Study on Estimation of Early Attached Biomass and Drift State

Parameters of Green Tide in the Yellow Sea

**A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Environmental Science**

By

Jiang Xiaopeng

Supervisor: Professor Gao Zhiqiang

**Yantai Insitute of Coastal Zone Research,
Chinese Academy of Sciences**

June 2021

摘要

自 2007 年, 黄海绿潮连年暴发, 对近海生态环境、水产养殖等造成巨大危害。由于绿潮早期起源过程监测难, 海上漂移时间长、漂移速度和生物量变化快, 基于传统技术难以对其进行高精度的应急监测。而绿潮的早期筏架附着生物量与海上漂移阶段状态参量的准确估算, 对绿潮灾害防控与预警具有重要意义。

以科考船甲板为无人机起降平台, 本文将高精度的无人机遥感应用到绿潮研究中, 并结合卫星遥感、现场调查等手段, 对绿潮的早期附生阶段, 提出了筏架网帘与纜绳附生绿藻生物量的估算方法; 对绿潮的海上漂移阶段, 首先构建了基于无人机可见光影像的新植被指数-可见光波段的漂浮藻类指数 (RGB-FAI), 用于提取绿潮; 进而基于 RGB-FAI 创建了浒苔生物量密度估算模型, 并实现了无人机遥感对绿潮海上生物量的估算; 最后利用船载无人机获取的绿潮双时相正射影像, 开展了绿潮漂移速度的估算与分析。主要结论如下:

(1) 估算出 2017 年苏北浅滩筏架网帘上附着的绿藻生物量为 8877 吨, 纜绳附生绿藻、浒苔的生物量分别约 2981 和 447 吨。2011~2013 年筏架纜绳上附生绿藻生物量分别为 7617、4132 和 3465 吨, 附生浒苔的生物量分别为 2774、1672 和 2137 吨。2011~2013 年的纜绳附生浒苔生物量, 与绿潮海上的初始覆盖面积, 在年际变化趋势上基本一致。(2) RGB-FAI 能很好提取可见光影像中的绿潮: 对于暴发期绿潮, 提取结果的 Kappa 系数为 0.95; 对薄雾天气下的衰退期绿潮, 其提取精度最高 (Kappa = 0.93), 优于其它 5 种可见光植被指数。(3) 基于无人机遥感估算了不同生长期绿潮的漂移生物量, 发现绿潮斑块的 RGB-FAI 最大值由暴发期的 61.9 降低为衰退期的 44.1, 浒苔生物量密度也由 0.92 kg/m² 降低为 0.52 kg/m²。(4) 基于无人机遥感估算三个海上站位的绿潮漂移速率分别为 0.256、0.439 和 0.257 m/s, 绿潮漂移方向与 M₂ 分潮的潮流方向基本一致, 位于风向右侧 1~62 度。高时空分辨率的无人机遥感方法, 可为 GOCI 等卫星遥感的速度结果进行校准。

本文基于无人机遥感在海上科考的成功应用, 对绿潮早期筏架附生阶段的生物量以及绿潮在海上漂移阶段的状态参量, 进行了高精度估算方法的研究与应用。研究成果将为绿潮研究提供新的技术手段和更精确的定量数据支撑, 为绿潮防控

靠前，制定精准的防控策略提供科学支持。

关键词：绿潮，遥感，生物量估算，无人机，漂移速度

Abstract

Since 2007, the Yellow Sea green tide has broken out year after year, which has caused great harm to the coastal ecological environment and aquaculture. It is characterized by the difficulty in monitoring the early origin process, long drift time at sea, and rapid change of drift velocity and biomass. Therefore, the traditional methods are difficult to carry out high-precision and emergency monitoring. If the biomass of green algae attached to raft and the drift state parameters of the green tide can be estimated with high accuracy, it will be of great significance for the prevention and control of disaster and accurate early warning.

Using the research ship deck as the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) landing platform, this paper applied high-precision UAV remote sensing to the research of green tide. At the same time, combined with satellite remote sensing, field survey and other means, the methods for biomass estimation of green algae attached to nursery-nets and raft rope were proposed on the early development of green tide. For the drift stage of green tide, firstly, a novel vegetation index, namely, the Red-Green-Blue Floating Algae Index (RGB-FAI) using RGB images captured by UAV was developed for green-tide detection; Then, by using RGB-FAI, the *Ulva prolifera* biomass estimation model was constructed, which was applied to the estimation of green-tidal biomass from UAV aerial images. Finally, based on the dual-phase orthophoto of the green tide obtained by the ship-borne UAV, the green-tidal velocity was estimated and analyzed. The main conclusions are as follows:

(1) In 2017, the biomass of green algae attached to nursery-net of raft on the Subei Shoal was 8877 tons, and the biomass of green algae and *U.prolifera* attached to rope was about 2981 and 447 tons respectively. From 2011 to 2013, the biomass of green algae attached to raft rope was 7617, 4132, and 3465 tons, of which the biomass of *U.prolifera* was 2774, 1672, and 2137 tons, respectively. The biomass of *U.prolifera* attached to rope from 2011 to 2013 was basically consistent with that of

the initial coverage area of green tide in the inter-annual change trend. (2) the RGB-FAI performed well in the detection of green tide from UAV-based RGB imagery and the accuracy was satisfactory ($\kappa=0.95$). It is worthy to note that RGB-FAI has the highest extraction accuracy ($\kappa=0.93$) among these competing indices for the declining green tide under a hazy atmospheric condition.(3) The green-tidal biomass in different growth stages were estimated by UAV remote sensing, and the results showed that the maximum value of RGB-FAI of green-tidal pixel decreased from 61.9 in the outbreak period to 44.1 in the decline period, and the biomass density also decreased from 0.92 kg/m^2 to 0.52 kg/m^2 .(4) The green-tidal velocity of three sites estimated by UAV remote sensing were 0.256, 0.439, and 0.257 m/s, respectively. The drift direction was basically consistent with the tidal current of M_2 , at $1^\circ \sim 62^\circ$ to the right of wind direction. The UAV remote sensing method with high spatial-temporal resolution can help calibrate the results of satellite remote sensing such as GOCI.

Based on the application of UAV remote sensing in marine scientific investigation, the high-precision estimation methods were carried out on the biomass of the green algae attached to the raft and the drift state parameters of the green tide. The paper is expected to provide new technical means and more accurate quantitative data support for the related research of green tide, as well as scientific support for the precise prediction, warning and control of green tide disaster.

Key Words: Green Tide, Remote Sensing, Biomass Estimation, UAV, Drift Velocity

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景及意义	1
1.2 国内外研究进展	5
1.2.1 筏架附生绿藻生物量估算的研究进展	5
1.2.2 无人机遥感海上绿潮的研究进展	6
1.2.3 漂浮藻类遥感的植被指数研究	7
1.2.4 绿潮漂移状态参量估算的研究进展	8
1.3 研究内容	10
1.4 论文组织结构	12
第 2 章 材料与方法	14
2.1 研究区概况	14
2.2 无人机遥感数据及预处理	16
2.2.1 无人机的应用背景	16
2.2.2 船载无人机航测作业及注意事项	18
2.2.3 无人机数据的获取与处理	20
2.3 卫星遥感数据源	22
2.3.1 高分、环境与哨兵卫星影像	23
2.3.2 GOCI 影像数据	24
2.4 野外调查与采样数据	25
2.4.1 筏架附生绿藻采样数据	25
2.4.2 船载气象仪风速数据	25
2.5 其它辅助数据	27
2.5.1 ERA5 风场数据	27
2.5.2 统计年鉴与公报数据	28
2.5.3 潮流与潮汐数据	28
2.6 研究方法	29
2.7 本章小结	30
第 3 章 黄海绿潮藻筏架附生生物量的估算研究	31

3.1	网帘附生绿藻生物量的估算	32
3.1.1	网帘紫菜与绿藻的提取	32
3.1.2	苏北浅滩紫菜产量的估算	34
3.1.3	网帘附生绿藻生物量的估算	36
3.2	纜绳附生绿藻生物量的估算	37
3.2.1	苏北浅滩紫菜网帘数量的估算	37
3.2.2	纜绳附生绿藻生物量的估算	39
3.2.3	纜绳附生浒苔的生物量	39
3.3	黄海绿潮与筏架附生绿藻的相关性探究	39
3.3.1	纜绳附生绿藻生物量的年际变化	40
3.3.2	纜绳附生浒苔与绿潮的相关性分析	42
3.4	不确定性分析	44
3.5	筏架附生绿藻的流向及启示	45
3.6	本章小结	48
第 4 章 基于无人机可见光遥感的海面绿潮提取		49
4.1	基于可见光波段的漂浮藻类指数构建	49
4.2	绿潮提取与精度评价	52
4.2.1	可见光影像的绿潮提取方法	52
4.2.2	不同植被指数提取结果的评价	53
4.3	RGB-FAI 提取绿潮的可靠性验证	54
4.4	薄雾条件下对衰退期绿潮的提取	56
4.5	RGB-FAI 的应用潜力	57
4.6	本章小结	59
第 5 章 绿潮漂移状态参量的无人机遥感估算		61
5.1	基于无人机遥感的绿潮漂移生物量的估算	61
5.1.1	基于 RGB-FAI 的浒苔生物量估算模型构建	61
5.1.2	基于无人机遥感的绿潮生物量估算	65
5.1.3	衰退期绿潮生物量的估算与对比	66
5.1.4	无人机遥感绿潮生物量的应用潜力	68
5.2	基于无人机遥感的绿潮漂移速度的估算与分析	69
5.2.1	基于双时相影像的绿潮漂移速度的计算	70

5.2.2 与 GOCI 卫星遥感结果的对比研究.....	76
5.2.3 绿潮漂移的驱动分析	78
5.2.4 不确定性分析	81
5.2.5 船载无人机在绿潮速度研究的应用优势	82
5.3 本章小结	83
第 6 章 结论与展望	85
6.1 结论	85
6.2 创新点	86
6.3 不足与展望	86
参考文献.....	89
附 录.....	97
致 谢.....	105
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	107

图目录

图 1.1	海面上与岸滩堆积的绿潮藻.....	1
图 1.2	绿潮的发展过程示意图.....	2
图 1.3	黄海绿潮的三个主要发展阶段.....	3
图 1.4	筏架附生绿藻的生物量估算流程图.....	10
图 1.5	绿潮漂移状态参量估算研究的流程图.....	11
图 2.1	苏北浅滩上的研究区与紫菜筏架.....	15
图 2.2	海上研究区与航拍站点分布图.....	16
图 2.3	野外调查所用的无人机与科考船.....	17
图 2.4	无人机降落前拍摄的科考船.....	20
图 2.5	三个站点作业期间的 1 分钟平均风矢量.....	26
图 3.1	苏北浅滩紫菜筏架上纜绳、网帘上的附生绿藻.....	31
图 3.2	网帘附生绿藻的提取流程.....	33
图 3.3	江苏近岸养殖区的三个调查站位.....	35
图 3.4	2017 年的苏北浅滩紫菜筏架分布图.....	37
图 3.5	苏北浅滩上的紫菜筏架布局.....	38
图 3.6	2011~2013 年的苏北浅滩紫菜筏架分布图.....	42
图 3.7	2011~2013 年绿潮初始覆盖面积与纜绳附生绿藻生物量的年际变化.....	44
图 3.8	网帘附生绿藻的采收作业.....	45
图 3.9	纜绳附生绿藻的处置流程.....	46
图 4.1	海上研究区站位、科考船与绿潮正射影像.....	49
图 4.2	浒苔的光谱特征.....	50
图 4.3	三种指数的构建原理图.....	51
图 4.4	六种植被指数的统计直方图.....	53
图 4.5	六种植被指数图与分类结果.....	54
图 4.6	无人机影像中的绿潮提取步骤.....	55
图 4.7	衰退期绿潮的提取结果对比.....	56
图 4.8	六种指数对衰退期绿潮的分类精度.....	57
图 4.9	海上的众多零散小面积绿潮斑块.....	58
图 5.1	不同生物量密度浒苔的图像与 RGB-FAI 值.....	63

图 5.2	浒苔的生物量密度与 RGB-FAI 值的拟合曲线图.....	64
图 5.3	无人机影像中绿潮的生物量估算.....	65
图 5.4	衰退期绿潮的生物量估算.....	66
图 5.5	船载无人机获取双时相绿潮正射影像的示意图.....	70
图 5.6	双时相绿潮影像的站位图.....	71
图 5.7	S2 站位绿潮的正射影像与双时相漂移图	72
图 5.8	S3 站位绿潮的正射影像与双时相漂移图	73
图 5.9	S4 站位绿潮的航拍图与双时相正射影像	75
图 5.10	基于 GOCI 影像的绿潮逐时漂移图.....	77
图 5.11	GOCI 与无人机遥感提取的绿潮速度对比	77
图 5.12	三个站点航拍作业时的潮位.....	79
图 5.13	站点 S2、S3 中绿潮、风、潮流的移动矢量图	80
图 5.14	站点 S4 中绿潮、风、潮流的移动矢量图	81

表目录

表 2.1	无人机的主要参数.....	18
表 2.2	本文的无人机数据列表.....	21
表 2.3	筏架提取所用的卫星影像列表.....	24
表 3.1	61 张网帘上紫菜与绿藻面积的提取结果.....	34
表 3.2	2011~2013 年度苏北浅滩筏架纜绳附生绿藻的生物量采样数据.....	41
表 3.3	2011~2013 年筏架纜绳附生绿藻与浒苔的生物量计算结果.....	42
表 4.1	六种指数的分类精度.....	54
表 4.2	基于 RGB-FAI 分类结果的混淆矩阵.....	56
表 5.1	不同生物量密度的浒苔在红绿蓝三波段的均值及 RGB-FAI 值.....	62
表 5.2	暴发期与衰亡期绿潮的生物量估算结果对比.....	67
表 5.3	2008~2017 年黄海绿潮的海上漂移时间统计	69
表 5.4	S2 站位七个子斑块的漂移速度数据	73
表 5.5	S3 站位的子斑块漂移数据	74
表 5.6	S4 站位子斑块的漂移数据	75
表 5.7	三个站点的绿潮漂移速度统计.....	75
表 5.8	无人机与 GOCI 影像提取绿潮漂移速度的结果对比.....	78
表 5.9	各站位的风速统计.....	80

第1章 绪论

1.1 选题背景及意义

绿潮（green tides）是指由于大型绿潮藻脱离附着基，形成漂浮群体后快速增殖、聚集而形成的一类海洋生态灾害^[1,2]。自 20 世纪 80 年代以来，绿潮在许多近岸海域频繁暴发，并呈现加剧态势。绿潮暴发期间，大量绿潮藻漂浮于海面，并在风场和洋流驱动下，侵扰近海海域和滩涂、浴场，破坏海洋生态系统，已成为一种世界性的海洋环境问题^[3]。自 2007 年以来^[4]，每年夏季中国南黄海海域都会暴发大规模的绿潮灾害（图 1.1），至今已持续 14 年，成为黄海海域一种常态化的生态灾害，对南黄海西部沿海地区的生态环境、水产养殖以及旅游业等造成了严重危害与巨大的损失^[5]，甚至对重要活动（如 2018 年青岛上合峰会）和核电站冷源系统的安全运转^[6]造成严重威胁。作为黄海绿潮的直接威胁区，海阳核电在每年的绿潮暴发期，需要对取水口海域日夜监测，严密防范和打捞来袭绿潮。每年的绿潮灾害均给南黄海沿岸省、市带来严重的经济损失和社会影响，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。尤其是在 2008 年青岛奥帆赛前夕，黄海海域暴发大规模绿潮，大量漂浮绿藻聚集，并覆盖了约三分之一的在奥帆赛场海域，对青岛奥帆赛造成了严重的威胁和影响。为消除绿潮威胁，青岛市政府组织大量人力物力进行绿藻打捞、拦截和清除，清理绿藻总量超过 80 万吨^[7]。

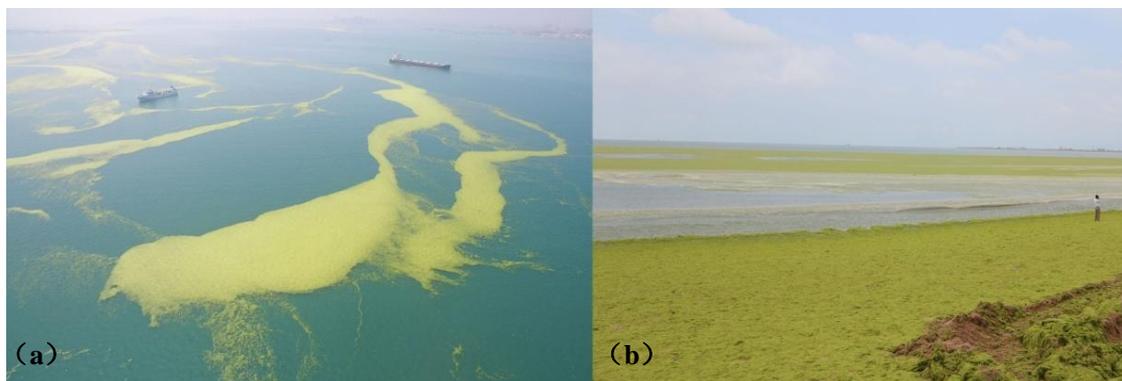


图 1.1 海面上与岸滩堆积的绿潮藻

Figure 1.1 The green algae on the Yellow sea and on the coastal zone

注：(a) 2019 年 7 月 20 日，由无人机航拍于青岛胶州湾海域；(b) 2016 年 7 月 6 日，拍摄于海阳沿岸。

Note:(a)The photo taken in the Jiaozhou Bar of Qingdao by unmanned aerial vehicle (UAV) on July 20,2019; (b) The photo taken in coastal zone of Haiyang on July 6, 2016.

已有的研究表明，黄海绿潮起源于苏北浅滩紫菜养殖筏架上的附生绿藻^[8,9]。绿藻的微观繁殖体发育成藻体首先要经过附着才能萌发，附着萌发期是其生长一个必不可少的阶段^[10]。现场调查发现紫菜养殖筏架上的绳、网帘和毛竹附生了大量绿藻，这一时期是绿潮藻的筏架附生阶段。在紫菜筏架的回收作业时，筏架绳附生的大量绿藻被农用机械直接刮落，并遗弃在潮滩上，随后随潮水进入黄海，开始海面漂移阶段。最初绿潮藻是零星漂浮的小斑块，约十多天后会聚集发展成较小的条带^[9, 11]，同时，漂浮绿潮藻在黄海的北向表层海流和夏季季风的作用下，向山东半岛海域边漂移边生长^[12, 13]；随着海温升高，漂浮绿藻吸收海水中充足的营养盐，生物量迅速扩大，聚集成大条带和大斑块，在黄海上形成大规模绿潮^[14]，并最终在山东半岛的青岛、海阳、乳山和文登等沿岸登陆（图 1.2），之后在海滩腐烂消亡或被人为清理。

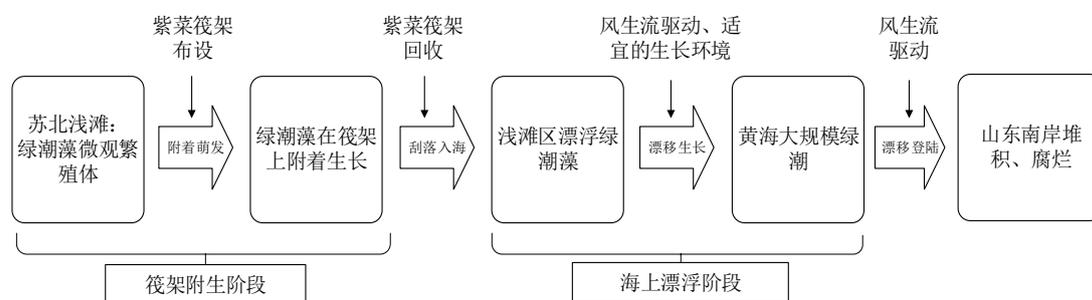


图 1.2 绿潮的发展过程示意图

Figure 1.2 Illustration of the development stage of green tide

因此，根据黄海绿潮自起源、发展到最终消亡所存在的不同地理位置与绿潮藻体特征，绿潮的整个生命周期可归结为三个主要阶段：第一阶段为苏北浅滩上绿潮起源的筏架附生阶段，第二阶段为在南黄海的海上漂移阶段，第三阶段为登陆山东东南沿岸并消亡的岸滩堆积阶段（图 1.3）。

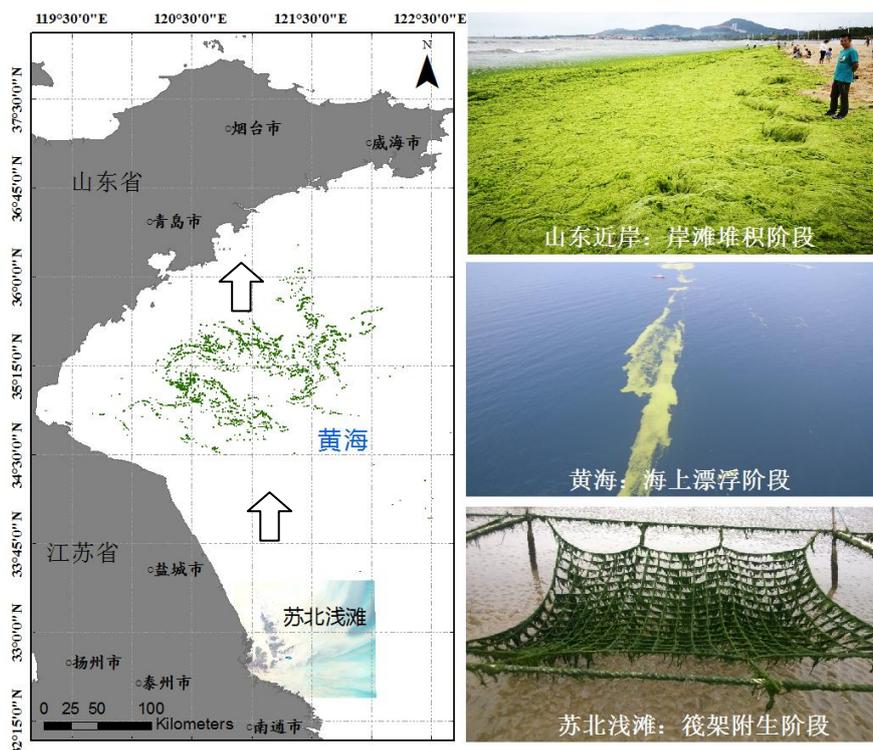


图 1.3 黄海绿潮的三个主要发展阶段

Figure 1.3 Three main development stages of the Yellow Sea green tide

筏架附生阶段中绿藻生物量的多少，从种源的角度影响着绿潮的初始规模。因此准确估算筏架不同部件的附着绿藻生物量，有助于研判同一年度的黄海绿潮规模，为绿潮灾害预警提供科学依据。同时，筏架的部分附生绿藻生长在紫菜的养殖网帘上，与紫菜构成互为竞争关系，这将降低紫菜的品质与产量，并增加紫菜产品的加工难度^[15]。紫菜作为江苏重要的经济栽培海藻^[16]，是江苏海水养殖产业的重要支柱，而筏架附生绿藻将严重危害紫菜养殖产业^[17]。因此，筏架附生绿藻生物量估算对黄海绿潮的暴发规模与江苏紫菜产业的养殖收益同时具有定量的指示作用。

绿潮“漂移状态参量”是用来描述黄海绿潮在海上漂移时的物理状态，包含绿潮的海上生物量与漂浮速度两个物理量。海上生物量是绿潮研究和减灾防灾的一项重要参数，对其进行监测与估算有助于评估黄海绿潮的成灾规模，对优化前置打捞的海域与时间，制定针对性强、与绿潮灾害规模相适应的绿潮防控措施具有重要意义。此外，黄海绿潮具有长时间跨区域运输、异地成灾的特点，因此绿潮漂移速率、方向与轨迹等动态信息，是绿潮灾害预警与防控工作

的重要参考。

纵观绿潮的生命周期和已有研究，我们看到绿潮的筏架附生阶段与海上漂浮阶段的绿海藻生长状态一定程度上决定了绿潮最终的灾害规模与损失大小，也是人为可控绿潮规模与防灾减灾的重要阶段。绿潮早期生物量以及海上的漂移状态参量（生物量与漂移速度）的研究，能为绿潮研究与防控提供精确的定量数据支撑。我国在绿潮形成原因与发生发展过程等方面已经取得了一定的进展，但受限于绿潮的起源、发生海域远离大陆，且绿藻附生的筏架绳或网帘直径为厘米级，而传统调查方法如卫星遥感的时间、空间分辨率远不能满足分钟/厘米级精度的要求，绿潮研究的许多方面依然存在着技术手段的不足，如：对绿潮生物量监测和评估，尤其是早期筏架附生绿藻的生物量，还缺少有效的方法；此外，对绿潮分布及其动态变化的监测精确度过低^[14]。要准确估算绿潮早期的筏架附着生物量以及漂移时的状态参量，需要在高精度水平上开展工作，需要高分辨率的技术进行支撑。而无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）遥感具有获取高分辨率数据、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、作物估产等方面已发挥了重要的作用，是地面调查与卫星遥感的重要补充^[18]。以往，无人机在陆地起飞后离海上目标往往远超其最大航程，因而很难应用于绿潮等海上目标的研究。随着相关技术的发展，消费级旋翼无人机具有了起降场地小、飞行性能更安全稳定、并可开展航测等诸多优势。

基于此，有必要克服无人机在海上研究调查方面的应用障碍，利用旋翼无人机在科考船甲板进行起降，从而将无人机与科考船联合作业，弥补以往对早期及海上漂浮期绿潮极少有高精度监测技术应用的空白，实现绿潮早期与漂移期高分辨率影像数据的获取，并可同时获取船载设备的气象水文等环境背景数据。结合卫星遥感、苏北浅滩的调查采样数据以及其它文献统计数据，即综合利用无人机遥感-卫星遥感-苏北浅滩定点采样调查-海上航次调查-室外实验相结合的方法，开展黄海绿潮的早期附着生物量与漂移期状态参量的估算研究。本文提出了对筏架绳与网帘附生绿藻的两种生物量估算方法，发展了对绿潮早期附生阶段的新监测手段，科学估算出筏架附生浒苔进入黄海的初始生物量，探讨筏架附生浒苔与黄海绿潮发生的相关性；构建基于无人机可见光影像的海

上绿潮监测的新植被指数, 计算了海上绿潮的生物量与漂移速度矢量, 并进行了绿潮漂移驱动的分析。本文将为绿潮相关研究提供更精确的定量数据支撑和新的技术手段。为绿潮防控靠前, 精准防控, 减轻绿潮灾害后期对沿海渔业养殖及旅游业的影响, 提供科学的数据支持, 将同时对江苏的紫菜养殖和山东的绿潮防控产生重要意义。

1.2 国内外研究进展

自 2008 年以来, 国内外相关学者围绕绿潮进行了一系列研究, 在绿潮微观繁殖体时空分布^[8, 19]、绿潮藻的种类组成^[20]、绿潮主要原因种的生理生态学特征^[21]、成因与发生发展过程^[8, 22]、漂移路径与年际变化^[23, 24]、绿潮的环境驱动机制^[25]以及绿潮危害防控^[5, 26]与资源化利用^[27-29]等方面取得了诸多成果。但是在绿潮早期的筏架附生生物量估算、绿潮漂移状态的高精度监测方法技术等方面还需要开展进一步的细致研究。

1.2.1 筏架附生绿藻生物量估算的研究进展

相较于海面漂浮的大面积绿潮藻斑块, 苏北浅滩筏架上的早期绿潮藻附生在紫菜筏架的网帘和绁绳上, 苏北浅滩紫菜筏架所用绁绳的直径为 1.8~2.0 厘米, 网帘绳子的直径约为 0.5~0.6 厘米^[30], 常用的卫星遥感技术不能达到厘米级的精度, 因此难以直接监测到筏架上的附生绿藻^[31]。目前对于辐射沙洲区筏架绿潮藻生物量的估算, 主要是基于调查区采样后结合面积进行推算的方式, 但不同研究的估算结果却有所差异。Liu 等^[22]对 2009 年苏北浅滩上的多个监测点进行采样, 获取筏架附着绿藻生物量的均值, 然后结合各地紫菜养殖面积的统计数据, 计算出筏架附生绿藻的生物量为 4620 吨; 刘材材等^[32]对 2013 年紫菜养殖区面积社会调查结合采样数据, 估算被刮除的绿藻生物量约为 5300 吨, 其中, 绿潮藻的生物量约为 3330 吨; Zhang 等^[11]通过卫星遥感技术提取辐射沙洲区紫菜养殖面积, 同时结合实地采样数据估算 2013 年 3 月辐射沙洲区筏架上的绿潮藻生物量约为 2784 吨。Huo 等^[33]基于类似方法对 2013 年 4 月苏北浅滩区筏架绿藻生物量进行了采样调查与计算, 发现苏北浅滩区筏架附生的所有绿藻生物量超过 2 万吨, 其中浒苔占据约 51 %。

对于苏北浅滩上紫菜养殖面积的估算, 以往研究大都通过社会调查或者参

阅统计年鉴等方式^[34]获取,其主观性强,精度较低。有学者^[11]通过卫星遥感与社会调查的方式统计了苏北浅滩区的紫菜养殖面积,并以此估算了附生绿藻的生物量。但是由于单列紫菜筏架的宽度小于2米,且筏架列之间存在较大的布置间隙,卫星影像上必将存在着大量的混合像元,直接利用卫星影像对筏架区域进行矢量化与面积量算,会将筏架列之间的潮滩面积误归为紫菜筏架面积,进而增大对苏北浅滩上筏架附生绿藻生物量估算的误差。此外,以往研究往往简单地将筏架上所有附生绿藻纳入黄海绿潮初始生物量的估算。但经实地调查与研究表明,只有筏架上的纜绳附生绿藻,才会在筏架回收作业时被刮落并随潮流进入黄海,成为绿潮的初始生物量^[35],而筏架网帘与毛竹上的附生绿藻并不会入海。尽管海上漂浮绿潮藻在适宜的条件下呈指数模式繁殖生长,但在相对固定的暴发期内(5月到8月),绿藻脱落后入海初始生物量的多少,将在一定程度上决定同一年度的绿潮灾害规模。因此探究能在绿潮早期有效发挥监测作用的高分辨率技术方法,区分网帘、纜绳等不同筏架部件的附生绿藻流向与作用,并建立筏架附生绿藻生物量的高精度估算方法,以准确了解筏架附生绿藻生物量,将有助于预测黄海绿潮的暴发规模,增加对黄海绿潮早期发生机理的科学认识。综上,对筏架不同部件的附生绿藻生物量分别进行精确估算亟需进行。

1.2.2 无人机遥感海上绿潮的研究进展

无人机遥感作为地面测绘调查与卫星遥感的重要补充,以其可达危险区、使用成本低、灵活性高,获取影像容易且空间分辨率高,受起降场地及天气条件影响小等优势,成为地面调查与高空观测(如卫星遥感)的有益补充^[36]。在生态环境监测^[18,37]、灾害评估与防控^[38]和农作物生产^[39]等方面发挥了不可替代的作用,其可实时获取的航拍影像是高分辨率遥感数据的重要来源之一^[40]。国内外已有学者基于无人机遥感技术在极地的人类扰动^[41]或陆地植被生物量估算^[42,43]等方面开展了探索研究。

随着旋翼无人机相关技术的日渐成熟与普及,无人机遥感也得到了更多的应用。关于无人机遥感对海上绿潮的监测研究,Wang等^[44]运用超像素分割与卷积神经网络分类法,从无人机航拍的可见光影像中,精确提取海上绿潮区域。李冬雪等^[45]基于无人机多光谱数据,对岸滩绿潮进行监测,并对岸滩堆积阶段

的绿潮生物量进行了估算。同时徐福祥等^[46]利用无人机航拍图像,对海滨景区的绿潮进行了提取研究。以上研究都是基于近岸陆地起降的旋翼无人机,对滨海或者岸滩堆积绿潮进行提取或生物量估算研究。旋翼无人机的最大飞行距离只有约 2~5 km 的限制,无法获取离岸稍远海域的绿潮影像,固定翼无人机飞行距离远,但其起降难度大,受监管以及安全性低等原因,其在近海应用很少。对离岸较远的海上绿潮的航空高分辨影像,以往有海洋监察部门运用有人驾驶的海洋监察固定翼飞机进行获取,其具有覆盖范围广且影像分辨率高的优势,如 Cui 等^[47]利用空间分辨率达到 3 m 的机载合成孔径雷达影像,评估并改善了卫星反演的海上绿潮的覆盖度,但有人驾驶的航空遥感开展难度高,飞行成本巨大。由此可知,无人机遥感对绿潮的少有研究只能集中在近岸海域或者岸滩区域,因难以获取海上漂移阶段绿潮的航测影像数据,基于无人机遥感对海上漂移绿潮的研究成果较少。

1.2.3 漂浮藻类遥感的植被指数研究

当绿潮发生时,由于绿潮的分布范围极广,通过调查船的航次监测手段很难对绿潮进行全范围监测。卫星遥感因具有较高的时效性、经济性以及大区域同步观测的能力,成为绿潮动态监测的重要技术手段^[48]。国内学者开展了大量的基于卫星遥感技术的绿潮监测研究。而绿潮的卫星遥感监测则大多需要借助植被指数。植被指数是利用绿色植被对不同波段的反射和吸收特性不同,通过将不同波段进行组合运算,从而达到增强植被信息的目的,是植被遥感中重要的技术手段^[49]。绿藻和陆地植被具有相似的光谱特征,在绿光和近红外波段有较强的反射率,在蓝光和红光波段吸收作用较强,而海水在近红外波段有较低的反射率,可以使用陆地植被指数提取绿藻,但不同的植被指数对绿藻的探测性能存在差异。许多学者对海上绿藻的识别提出了新的算法,Shi 等^[50]提出了“归一化藻类指数”(Normalized Difference Algae Index, NDAI)算法,并利用该指数揭示了 2008 年黄海绿潮的爆发时间、发展、覆盖度等参数。Hu^[51]利用 MODIS 影像,对开放海洋环境中的漂浮绿藻建立了漂浮藻类指数(Floating Algae Index, FAI),该指数对环境变化及观测条件的要求更低,因此相比于传统的归一化藻类指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)更加具有优势。Xing 等^[52]为了解决环境

1号等卫星缺少短波红外波段而不能应用FAI指数的缺陷,提出了“虚拟基线漂浮藻高度指数”(Virtual-Baseline Floating macroAlgae Height, VB-FAH),使用红波段和绿波段作为基线测定短波红外反射率的高度,并应用该指数监测了1995~2006年和2009~2014年黄海的大型藻潮。该指数在缺少短波红外波段的情况下,对大型藻的提取精度与FAI相当。

以往研究常用的NDVI、EVI、FAI、VB-FAH等植被指数都是基于卫星遥感的应用,需要多光谱或高光谱影像中的波段信息,而目前在实际应用中,搭载普通可见光相机获取RGB影像的无人机最为普遍,多光谱或高光谱的无人机遥感平台并不多见。但基于可见光波段的植被指数较少,目前主要有归一化绿红差异指数(NGRDI)^[53]、归一化绿蓝差异指数(NGBDI)^[54]、红绿蓝植被指数(RGBVI)^[55]和过绿植被指数(EXG)^[56],汪小钦等^[57]通过分析无人机RGB影像中的植被与非植被的光谱特征,提出了基于红、绿、蓝波段的新植被指数-可见光波段差异植被指数(VDVI),并验证了该植被指数对绿色植被具有很好的提取效果。这些可见光波段的植被指数都源于并多应用于陆地的植被遥感。基于上述可见光植被指数对绿潮的研究不多,仅在监测提取方面:NGBDI适合海滨景区漂浮绿藻的监测^[46],NGRDI指数在提取浅滩筏架上的附生绿藻有更高的精度^[58]。

绿潮藻漂浮在海面上,陆地植被生长在土地上,两者的背景地物不同。截至目前,还没有一种针对海上绿潮藻提取的可见光波段的植被指数,以用于从无人机遥感的数字正射影像中提取绿潮藻。因此有必要针对可见光波段的无人机影像,开展绿潮藻提取的植被指数的设计,以期获得一种能够有效提取海上绿潮藻的可见光波段的植被指数,扩大无人机遥感应用的区域范围,促进无人机遥感的海上应用。

1.2.4 绿潮漂移状态参量估算的研究进展

本文提出了用来描述绿潮在海上漂移物理状态的“漂移状态参量”,包含绿潮的生物量与漂移速度两方面,以往的相关研究多是对漂移生物量与漂移速度其中一个参数单独开展研究。

绿潮的“漂移生物量”作为评估绿潮灾害规模的重要参数,一直是绿潮研究重点关注的议题。卫星遥感反演技术可以成功应用于估算漂浮绿藻分布面积

及其随时间的变化,然而,绿潮生物量估算还需要结合估算模型与现场采样调查等其它方式同时进行。Hu 等^[59]基于实验室光谱实验并利用 MODIS 卫星影像和 FAI 指数构建了大洋尺度漂浮绿潮的生物量估算模型,并应用此模型对 2008 年至 2015 年黄海绿潮的生物量进行了评估,发现其生物量在 0.09×10^6 吨到 1.79×10^6 吨之间。范士亮等^[60]通过现场采样获取的单位面积漂浮绿藻生物量,乘以调查中 GPS 轨迹生成的调查范围面积估算了漂浮绿藻生物量。刘湘庆等^[19]利用水平拖网方法获取了海上单位面积的漂浮绿藻生物量,乘以 GOCI 卫星遥感资料提取的绿潮覆盖面积,估算黄海漂浮绿藻的总生物量及分布特征。肖艳芳等^[61]为估算海面漂浮绿潮生物量,现场试验测量了漂浮绿潮单位面积生物量与地物反射光谱数据,基于所分析出的漂浮绿潮光谱特征与单位面积生物量之间的关系,建立并验证了漂浮绿潮生物量估算模型。以上研究多采用了卫星遥感的方法,其具有大面积监测、能覆盖整个绿潮发生海域的优势,但是卫星遥感容易受到大气或云层的干扰,卫星影像空间分辨率的不足也导致大量混合像元的存在。通过地面光谱实验构建的浒苔生物量估算模型,由于卫星遥感与地面光谱测量实验之间存在着大气干扰、混合像元等引起的诸多不确定性因素,将地面估算模型推广到卫星遥感影像上需要更多的工作。

关于“绿潮漂移速度”的研究,数据也多源于卫星遥感数据。如衣立等^[62]利用 2009 年 6 月 24~25 日的 MODIS 的绿潮分布影像,提取了黄海上三个区域的绿潮漂移速率分别为 0.20、0.40 和 0.12 m/s;夏深圳^[63]基于 MODIS 与 GOCI 数据,估算了 2013~2015 年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^[64]利用时间分辨率可达 20 秒的 GF-4 卫星影像,基于最大相关系数法追踪绿潮,分析了 1 天之中(上午 9 时与下午 15 时)的绿潮漂移速度的不同变化。从 MODIS 的 1 天,到 GOCI 的 1 小时,再到 GF-4 影像的 20 秒,虽然时间分辨率在不断提高,但卫星影像极易受到天气及云层的干扰,如夏深圳在 2013~2015 年 5~7 月的 MODIS 数据中,遴选出可用于绿潮速度研究的有效卫星影像只占 20.7%^[63],GF-4 影像的覆盖范围也并不能恒定的监测绿潮发生海域,较难找到符合绿潮速度研究的影像数据,这样难以满足灾害应急监测的要求。且 MODIS 与 GOCI 的空间分辨率分别为 250 m 与 500 m,低分辨率的影像中存在大量的混合像元^[65, 66],从而影响绿潮

提取及速度估算的精度。在已有的绿潮驱动因素分析中，风速数据往往利用 QSCAT 等卫星遥感资料，其覆盖范围广，但空间分辨率低，不能满足单个站点绿潮漂移速度的精细研究。

综上，对绿潮生物量的高精度估算还缺少有效技术，对绿潮漂移速度及动态变化监测现有卫星遥感手段的时效性与精确度过低，制约着绿潮漂移预报模型的构建以及监测预警业务化的运行。绿潮漂移状态参量的估算需要高分辨率的技术与数据。

1.3 研究内容

本研究主要研究内容如下：

(1) 筏架附生绿藻的生物量估算

以苏北浅滩区紫菜筏架的附生绿藻为研究对象，对筏架纜绳附生绿藻与网帘附生绿藻，提出不同的生物量估算方法，计算出两者的生物量。同时，基于已有研究的 2011~2013 年度的纜绳附生绿藻采样数据，估算纜绳附生绿藻、浒苔的年际变化，并结合黄海绿潮早期被卫星监测到的海上覆盖面积，分析纜绳附生浒苔生物量与其在年际变化趋势的相关性，以探讨黄海绿潮的种源与筏架附生绿藻的相关性。最后，对比、分析纜绳与网帘附生绿藻的不同流向，区分两者在绿潮形成中的不同作用，探讨能够兼顾山东江苏两省利益的最优减灾措施。筏架附生绿藻生物量估算的技术路线如图 1.4。

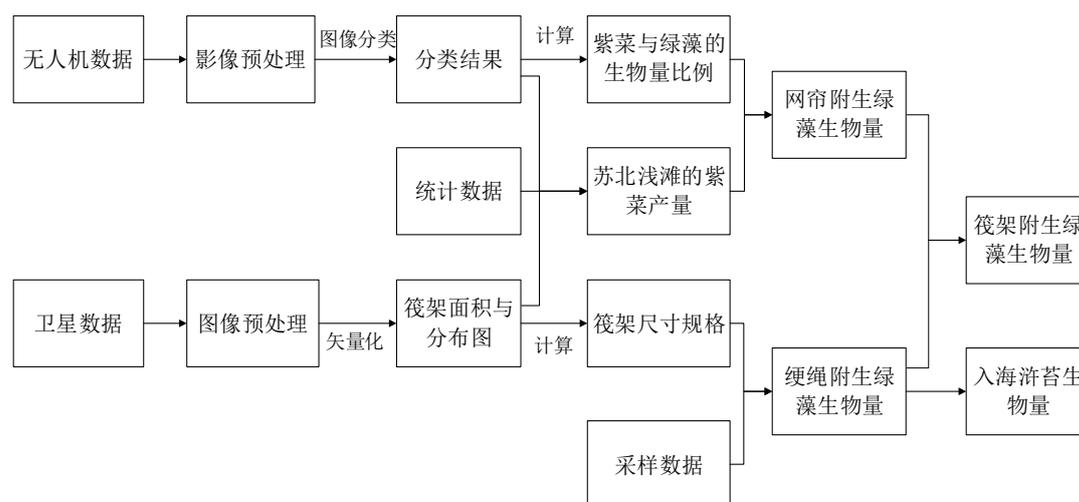


图 1.4 筏架附生绿藻的生物量估算流程图

Figure 1.4 Illustration of biomass estimation of the green algae attached to raft

(2) 基于无人机可见光遥感的漂浮藻类指数的建立

基于只包含红、绿、蓝三波段的无人机可见光影像，利用基线校正方法，对黄海绿潮的无人机遥感监测提出一种新的植被指数-可见光波段的漂浮藻类指数 (RGB-Floating Algae Index, RGB-FAI)，并验证该指数的提取精度。此外，通过在薄雾条件下对衰退期绿潮的提取，以及与其它可见光波段植被指数的对比，验证了该指数能应用于不同生长期绿潮的高精度监测，探讨了其对绿潮漂移速度、生物量估算等方面的应用潜力。

(3) 基于无人机遥感的绿潮漂移状态参量的估算

漂移状态参量包含绿潮的海上生物量与漂移速度两部分。绿潮漂移状态参量估算的技术路线如图 1.5 所示。

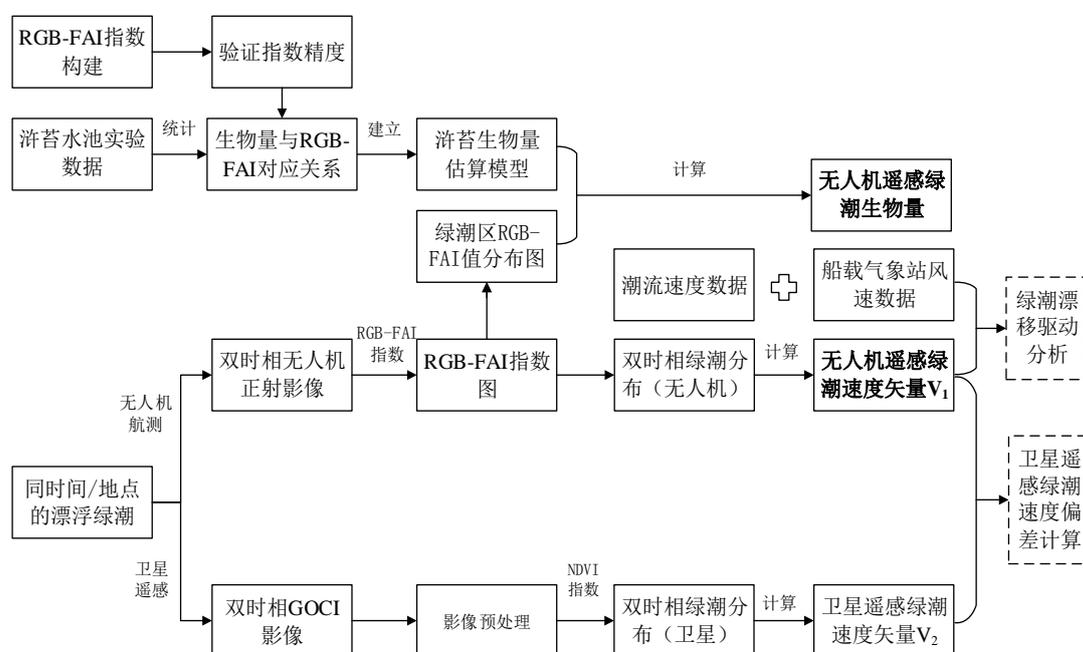


图 1.5 绿潮漂移状态参量估算研究的流程图

Figure 1.5 Illustration of parameters estimation for green tidal drift state

海上生物量的估算首先基于浒苔的水池光谱实验，统计不同生物量浒苔的 RGB 图像在红、绿、蓝波段的平均值，建立基于 RGB-FAI 的浒苔生物量密度估算模型。对黄海漂浮绿潮，通过计算无人机正射影像中绿潮像元的 RGB-FAI 值及其对应的数量，结合浒苔生物量密度估算模型，以此估算出影像中的绿潮生物量。并分析暴发期与衰退期绿潮在 RGB-FAI 最大值与浒苔生物量密度上的变化。

漂移速度的估算基于无人机遥感获取的海上漂浮绿潮的双时相正射影像，利用 RGB-FAI 指数提取两个时相的无人机影像中同一绿潮斑块的空间分布，估算出绿潮漂移的速度与方向。以无人机遥感提取的绿潮速度为基准，可计算 GOCI 卫星遥感速度结果的偏差。同时结合船载气象仪的风速数据与已有研究的潮流速度数据，分析了风与潮流对绿潮漂移的驱动。

1.4 论文组织结构

围绕基于无人机遥感的绿潮早期筏架附生绿藻生物量，以及绿潮海上漂移状态参量的高精度估算方法研究，本文将通过如下章节开展相关研究与讨论：

第一章，绪论。

介绍了本论文的选题背景与意义，通过对绿潮早期筏架附生生物量估算、绿藻提取的植被指数、绿潮海上的漂移状态参量等相关研究现状的总结，提出了本文的研究内容。

第二章，材料与方法。

首先介绍了本文两个研究区的概况。其次，介绍了论文所利用的无人机遥感数据、卫星遥感数据、航次调查与采样数据以及风场、流场等其它辅助数据的来源、用途、初处理步骤等，并介绍了研究方法。

第三章，黄海绿潮藻筏架附生生物量的估算。

针对作为黄海绿潮种源的筏架附生绿藻的生物量，提出了网帘、纜绳两种附生绿藻的生物量估算方法，并估算了 2017 年的网帘、纜绳附生绿藻与入海浒苔的生物量。同时，计算出 2011~2013 年度的纜绳附生绿藻、附生浒苔的生物量，结合同年度下绿潮海上的初始覆盖面积，分析两者在年际变化趋势的相关性。最后，探讨了使山东、江苏两省同时受益的绿潮防控措施。

第四章，基于无人机可见光遥感的海面绿潮提取。

船载无人机遥感应用到绿潮研究首先需要一种适合无人机可见光影像和海上绿潮光谱特征的植被指数。本章基于基线校正的思想，构建了一种新的可见光波段的漂浮藻类指数 RGB-FAI，并进行了精度验证。同时与其它常用的可见光植被指数，进行了提取精度的对比。

第五章，绿潮漂移状态参量的无人机遥感估算。

在可见光波段漂浮藻类指数 RGB-FAI 的基础上，基于水池实验构建了浒苔

生物量密度估算模型，利用船载无人机获取的海上绿潮的双时相正射影像，对绿潮在海上漂移阶段的生物量、漂移速度分别进行了估算研究，并比较了绿潮在暴发期与衰退期的浒苔生物量变化。结合风场、潮流对绿潮漂移进行了驱动分析，同时对比了无人机遥感与卫星遥感对绿潮漂移速度的反演结果。

第六章，结论与展望。

本章分别对论文的结论、创新点以及展望做了总结概述。

第2章 材料与方法

根据绿潮藻的不同生长阶段与研究需求, 本文的研究区分为苏北浅滩和南黄海海域。研究数据主要包括无人机遥感数据、卫星遥感数据、野外调查采样及风场等辅助数据, 本章将分别对研究区概况、研究方法、数据源及数据处理进行说明。

2.1 研究区概况

本文研究区分为两个区域, 其一为黄海绿潮藻起源的苏北浅滩, 其二为黄海绿潮漂移阶段的南黄海海域。

苏北浅滩是黄海西南部浅海内陆架的一种特殊大型堆积地貌, 位于苏北射阳河口与长江口之间的岸线外围, 南北长约 200 公里, 东西宽约 140 公里, 为面积宽广、成辐射状展布的淤泥质潮滩^[67] (图 2.1a)。大部分浅滩的水深小于 15 米, 浅滩外缘水深约 20~30 米^[68], 高潮时浅滩被淹没, 低潮时浅滩露出。本文在苏北浅滩南部的竹根沙(121.2939 E, 32.7882 N)设立了调查区(图 2.1b~c)。竹根沙及邻近的蒋家沙位于暖温带向北亚热带过渡区, 以季风气候为主, 气候条件上, 该区域全年平均气温 14~15 °C, 最高月平均气温为 7~8 月, 最低月平均气温出现在 1 月。全年平均日照总时数为 2100~2400 小时, 日照百分率为 50 %~55 %。年平均风速为 5~7 米/秒, 春季风速较大, 风速最大月份为 4 月, 秋季风速较小, 最小月份在 6~7 月。年平均降水量 1000~1080 毫米, 汛期在 5~9 月, 降水相对集中。年平均蒸发量 1200~1300 毫米, 相对湿度平均约 80 %。海洋水文方面, 具有低盐、透明度低、含沙量高的特点, 海水温度月平均最低温度出现在 2 月, 表层最低温度为 4.9 °C, 底层水温为 5.1 °C; 月平均最高温度出现在 8 月, 表层最高温度为 27.4 °C, 底层为 26.0 °C, 海水盐度变化范围在 29.53 ‰~32.24 ‰之间, 夏季盐度较低, 冬季盐度相对较高。调查海域属正规半日潮, 低潮期苏北浅滩的潮滩沙洲露出, 高潮期海水淹没潮滩。潮流以苏北沿岸流为主体, 平均大潮流速 150 cm/s 以上。波浪是以风浪为主的混合浪, 风浪季节性变化大, 全年盛行偏北向浪, 频率为 63 %, 主浪向东北偏东, 强浪向

为西北和北向，夏秋季台风期间波高达 1.5 米以上，冬季一般为 1.0 米左右，平均潮差在 4.0 米以上。海域水质总体较好，符合二类水质标准^[69, 70]。

苏北浅滩具备紫菜养殖得天独厚的自然条件，是中国最大的条斑紫菜养殖基地^[71]，浅滩紫菜栽培方式为半浮动筏式栽培。养殖筏架尺寸规格基本一致，由网帘、纜绳与横向竹竿和竖立支架组成，每列紫菜养殖筏架包含 2 根 150~180 米长的纜绳，纜绳两端被结实地锚定在浅滩上，两根纜绳间设置大约 30 张用于紫菜生长的养殖网帘，每张网帘四周有 4 根竖立支架支撑筏架，有 2 根横向竹竿用于固定纜绳间距^[72]（图 2.1d）。

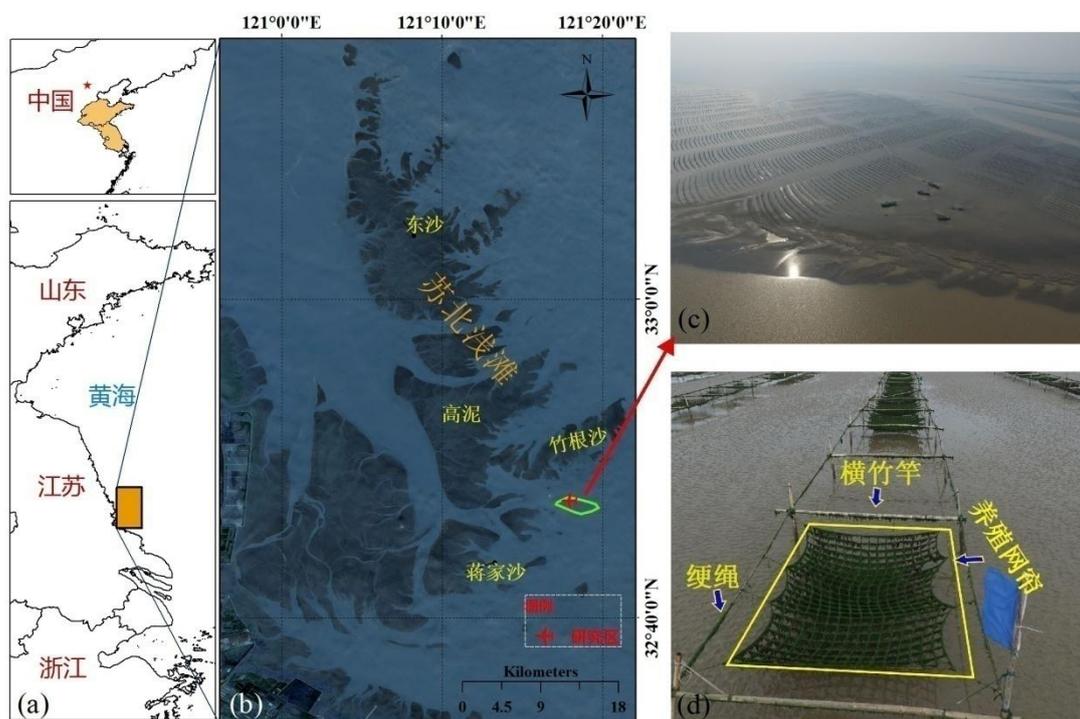


图 2.1 苏北浅滩上的研究区与紫菜筏架

Figure 2.1 The survey area and *Pyezoensis* raft on the Subei Shoal

本文的海上研究区位于南黄海海域（图 2.2）。南黄海海域为山东半岛成山角与朝鲜半岛长山串之间连线南部的黄海区域，面积约为 30.9 万平方公里，平均水深约为 46 米，最大水深为 140 米，在济州岛北侧。该海域受东亚季风影响，秋冬季多为北风或西北风，平均风速可达 6~8 m/s，此时表层海流多为偏南向流；4 月至 9 月的春夏季盛行南/东南风，平均风速为 4~6 m/s，海流为偏北向流。南黄海西部沿岸大部分区域为规则半日潮^[64]。2007 年之后的每年春夏季，南黄海海域连年暴发了大规模绿潮，其通常开始于 3 月末至 4 月的苏北浅滩海域，5

月中下旬至 6 月则进入暴发期,自 7 月则逐渐衰退,直至最终消亡^[73]。2016~2017 年,南黄海区域也发生了马尾藻引发的金潮,使盐城和南通两地的紫菜行业直接损失超过 5 亿元^[74],金潮灾害也呈现了逐年加剧的趋势。近年来,浒苔与马尾藻两种大型藻在夏季往往相互伴生共同肆虐南黄海海域^[6]。

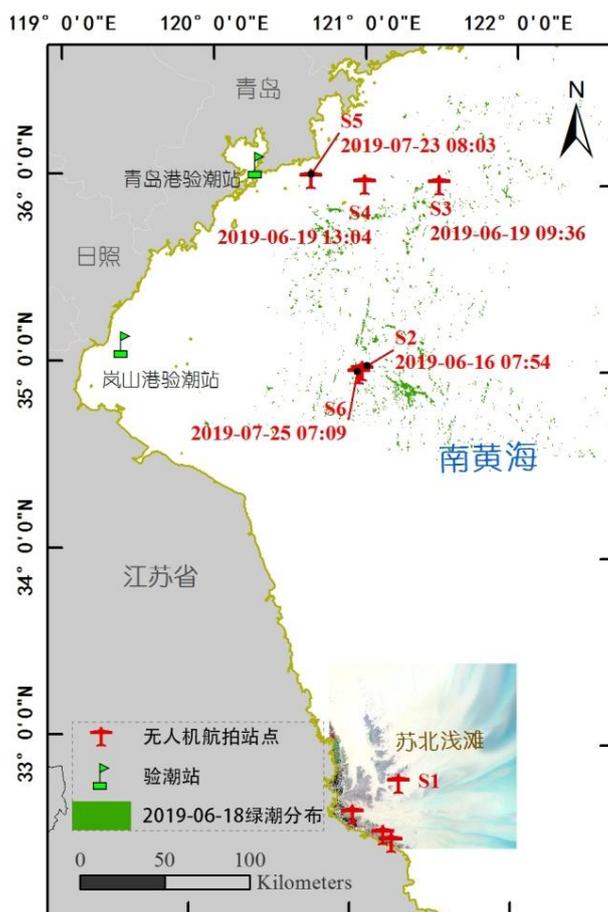


图 2.2 海上研究区与航拍站点分布图

Figure 2.2 Map of marine study area and aerial photography sites

2.2 无人机遥感数据及预处理

2.2.1 无人机的应用背景

苏北浅滩上选取的调查研究区 (121.2939 E, 32.7882 N) 位于苏北沿海岸外辐射沙洲上, 离大陆直线距离约 34 km, 过远的距离导致无法从大陆起飞无人机进行航测。在低潮期, 虽然人员可以到露出的潮滩从事作业活动, 但岸滩为淤泥质, 表面坑洼不平, 且密布水洼, 无法使用滑跑式起降的固定翼无人机; 而在高潮期, 海水淹没潮滩, 只能在调查船甲板上起降旋翼无人机, 调查船甲

板空间局促，对无人机体积和飞行稳定性有较高要求。而对于海上漂浮阶段的黄海绿潮，其在黄海的漂移过程中与陆地的距离也远远超过普通消费级无人机的最大飞行距离。随着消费级旋翼无人机相关技术的发展，无人机的飞行稳定性不断提高，对起降场地的面积要求不断降低。因此，本文寻求在科考船甲板上起降旋翼无人机，以实现海上目标进行航测作业。



图 2.3 野外调查所用的无人机与科考船

Figure 2.3 The UAV and research vessels used in the field investigation

注：(a) 大疆无人机；(b) 苏北浅滩海域所用的调查船；(c) 黄海海域所用的科考船

Note: (a) The DJI UAV; (b) the research vessels used in the Subei Shoal Sea; and (c) in the Yellow Sea

本研究使用的无人机为大疆悟 1 四旋翼无人机（图 2.3a），其为垂直起降方式，最大外形尺寸为 $43.8\text{ cm} \times 45.1\text{ cm} \times 30.1\text{ cm}$ ，其体积小，对起降场地的面积要求不大。该无人机携带与使用方便灵活，无论在苏北浅滩海域调查所用的当地渔船（图 2.3b），或者在南黄海海域调查所用的“科学三号”科考船（图 2.3c），都能基于其甲板进行起降飞行。无人机飞行高度可根据任务需求自主设定，但一般不超过 500 米，因此其影像可忽略大气干扰，其惯性测量单元模块（IMU）能保证无人机在海上复杂气象条件下的飞行姿态稳定。遥控器集成了大疆 Lightbridge 高清图传，地面操作人员可实时查看无人机相机画面，以及飞行高度、距离、剩余续航时间等信息。尽管单个架次的最大飞行时间只有约 18

分钟，但其更换电池方便，在一个任务中，通过使用多块电池轮替，能进行多个架次的起降，可较好的满足任务需要。此旋翼无人机可获取航拍图像或视频，本研究中航拍视频用于记录紫菜养殖的人工作业过程、实验布设或船载仪器采样作业等相关活动。该无人机采用 GLONASS+GPS 双系统定位，其拍摄的图像具备经纬度坐标信息，因此可利用图像拼接软件生成带有坐标系的数字正射影像，无人机遥感已在陆地小范围区域的大比例尺测图中得到了应用与精度验证^[75]。本文所用无人机的主要参数如表 2.1 所示。

表 2.1 无人机的主要参数

Table 2.1 Main parameters of UAV

	重量	3060g (含电池、云台)
	GPS 悬停精度	垂直: ± 0.5 m; 水平: ± 2.5 m
飞行器	最大水平飞行速度	22 m/s
	最大可承受风速	10 m/s
	最大飞行时间	约 18 min
	轴距	559 mm (不含桨, 降落模式)
	有效像素	1240 万像素
相机	照片最大分辨率	4000×3000
	工作环境温度	0 °至 40 °C
	型号	ZENMUSE X3
	角度抖动量	± 0.03 °
云台	安装方式	可拆式
	可控转动范围	俯仰: -90 °至+30 ° 水平: ± 320 °
	最大信号有效距离	5 km
遥控器	供电方式	内置锂电
	工作环境温度	-10 °C 至 40 °C

2.2.2 船载无人机航测作业及注意事项

不同于在陆地起降，在移动的调查船甲板上起降无人机有更加困难的外部

环境因素，需要更加谨慎。进行船载无人机的海上航测作业前，首先安装无人机电池与相机，组装好无人机飞行平台，连接无人机与遥控器的通讯系统，并对无人机进行指南针校准，检查电池电量、无人机图传系统以及无人机 GPS 状态等参数是否正常。当检查好无人机处于可安全飞行的状态时，可将无人机放置在尽可能空旷的甲板区域进行起飞操作。基于已开展的无人机海上航测作业的实践经验，本文总结无人机在船上起降开展航测作业的注意事项如下：

一、船上起降空间狭小，缺少容错空间，无人机在起飞后若受到干扰或者操作偏差，极易发生碰撞事故。因此，首先应注意保障人员安全，除无人机操作人员外，其他人员应在操作人员身后，或尽量远离起降甲板，躲避在安全的空间下；其次，为无人机起降清理出尽可能大的起飞空间，不仅要注意起降平面上有无杂乱物体，而且要注意起降航路上有无绳缆、旗帜或桅杆等空中物体。最后，可适当提高对外部气象要素（如风力等级）的要求，如陆地飞行作业时，无人机的最大抗风等级为 5 级风，在海上开展无人机飞行作业时，可要求作业时的风力在 4 级以下，当有较高价值的研究目标和熟练的飞行操作技能除外。另外，船体不同区域的风向变化剧烈，无人机起降过程中可能遭遇到不同风向，应小心风突变对无人机姿态的影响。

二、对于铁质船体和桅杆，尤其是黄海航次上的大型科考船，对无人机的导航与定位系统容易产生干扰，起飞前需要重新校准指南针，校准过程中应使无人机尽量远离铁质舱壁和桅杆，可能需要多次校准才能成功。在校准成功后应注意，当无人机起飞但仍未飞出船体时，极易产生不确定性的漂移，无法精准悬停。此时操作员应保持冷静的心态，以进行精准而微小幅度的手柄调节控制，以修正无人机姿态，阻止其漂移，保证其处于安全的空间中，并尽快使无人机飞出船体；无人机降落过程亦然（图 2.4），在进入船体附近的空间后，应集中精力修正无人机姿态，阻止其无规律漂移，并使其尽快降落到甲板，不要使其长时间逗留。此外，科考船的部分较大型无线电设备、基站可能会影响无人机飞控的正常工作，从而影响飞行安全。因此，在飞行作业前，应尽量向科考船操作船员请求关闭船载雷达等大功率设备。

三，无人机起降作业时，应让调查船停止航行。但当船体未抛锚时，应注意船体仍会随海流而移动。所以，应意识到无人机飞行过程中船体的实际坐

标位置已发生改变。因此无人机的“自动返航点”应设置为遥控器的位置，而非起飞点的位置。在飞行时，应时刻关注无人机与遥控器的距离、电池电量以及剩余的飞行时间，并预留一定的电量空间。且由于所用调查船的起降场竖直空间内桅杆林立、干扰物体较多，除非在大型科考船的空旷甲板上，尽量不应使用无人机的“一键自主起降”功能，否则极易发生无人机的碰撞事故。



图 2.4 无人机降落前拍摄的科考船

Figure 2.4 Research vessel before UAV landing

四，无人机在海面上飞行时，由于下垫面海水会影响无人机的测高精度，因此，无人机不能太贴近海面飞行，尤其是在目视范围之外，以防止无人机意外入水，或者飞行高度太低而与船只发生碰撞事故。

五，由于船上起降无人机风险较高，在航次出发前需要检查电池的健康状态，如不确定电池是否处于健康状态，可提前在陆地上先进行试飞，存在亏电现象的电池坚决不能携带到船上使用。此外，应使无人机电池在飞行前为满电状态，低于 90 % 电量的电池尽量不要使用，需要争取以尽可能少的飞行架次完成预定的航拍任务。

2.2.3 无人机数据的获取与处理

无人机开展绿潮斑块的航测作业时，大疆无人机具备高清图传功能，在飞机起飞后的升空过程中，使镜头垂直向下，在监视器上看到相机的视野能覆盖拍摄目标的宽度时，保持该飞行高度，使无人机沿目标的另一边飞行，期间操作无人机相机对目标进行连续航拍，保证相邻图像的航向重叠率大于 80 %，旁

向重叠率大于 70 %。以此方法,利用科考船甲板为无人机起降平台,本文于 2017 年春季获取了苏北浅滩两列紫菜筏架及其上紫菜网帘的高清正射影像,于 2019 年 6~7 月获取五个站位上黄海绿潮的高清正射影像,其中,三个站位为绿潮漂移状态的双时相正射影像。除无人机的航测作业外,还利用无人机拍摄了大量的图片视频,记录了江苏近岸紫菜生长状况,苏北浅滩紫菜养殖作业与筏架回收过程等信息。

研究采用 Pix4Dmapper 软件进行无人机航测影像的拼接与处理。该软件是一款专业的航空摄影测量后处理软件,主要处理过程包括初步处理、空三加密和数字表面模型和正射影像图生成。在软件中加载具备坐标信息的无人机航拍正射图像后,其自动处理分为如下步骤:(1)确定内方位元素;(2)通过算法搜索和匹配同名点;(3)利用同名点和影像 POS 信息进行区域网平差,还原影像的位置与姿态;(4)利用匹配点进行空三加密,生成影像点云;(5)由点云生成数字表面模型^[76],进而得到航拍目标的数字正射影像图(Digital Orthophoto Map, DOM)。利用该软件拼接无人机航拍的图像,生成紫菜筏架与海上漂浮绿潮的数字正射影像。本文获取的无人机数据详细信息如表 2.2 所示,无人机航拍站点的分布如图 2.2 所示。

表 2.2 本文的无人机数据列表

Table 2.2 List of UAV images

编号	航拍作业时间	作业位置坐标	飞行高度	影像分辨率/m	作业天气	数据格式、尺寸	在本文的应用
S1	2017/02/26	江苏近岸					
	-02/27	121.2604 E, 32.4705 N	多种		晴	图片/视频	江苏近岸筏架上紫菜与附生绿藻的生长状况
	2017/03/28	江苏近岸					
	-03/29						
	2017/03/30	苏北浅滩					苏北浅滩紫菜与筏架附生绿藻生物量的估算
	-04/01	121.2939 E, 32.7882 N	5	0.01	晴	DOM	

续表

编号	航拍作业时间	作业位置坐标	飞行高度	影像分辨率/m	作业天气	数据格式、尺寸	在本文的应用
S1	2017/03/27 -04/04	苏北浅滩	多种		晴	图片/视频	紫菜采收作业 调查
S1	2017/05/06 -05/12	121.2939 E, 32.7882 N					
S2	2019/06/16 07:54	南黄海 35 N, 121 E	270	0.12	阴	双时相 DOM, 1200m*760m	绿潮漂移速度 的估算
S3	2019/06/19 09: 36	南黄海 36 N, 121.5 E	330	0.14	薄雾 阴	双时相 DOM, 1700m*800m	绿潮漂移速度 的估算 对比 GOCI 反 演的速度结果
S4	2019/06/19 13:04	南黄海 35.992 N, 121.008 E	320	0.12	晴	双时相 DOM, 700m*2400m DOM, 317m*662m	绿潮漂移速度 的估算 RGB-FAI 的构 建与精度验证
S5	2019/07/23 08:03	南黄海 36.021 N, 120.661 E	400	0.15	晴	DOM, 460m*835m	RGB-FAI 的可 靠性验证 绿潮漂移生物 量估算
S6	2019/07/25 07:09	南黄海 34.978 N, 120.999 E	265	0.09	薄雾	DOM, 682m*348m	衰退期绿潮的 提取 衰退期绿潮的 生物量估算

2.3 卫星遥感数据源

卫星遥感以其监测范围大，时效性好，数据的综合性和可比性强、经济效

益与社会效益高等优势,在生态环境监测等诸多领域,发挥着不可或缺的作用。随着技术的发展,卫星遥感的时空分辨率、光谱分辨率在不断提高,可供选择的卫星影像数据种类也越来越丰富,为绿潮研究提供了重要的技术手段。本文使用的卫星遥感数据类型包含高分一号(GF-1)、环境一号(HJ-1)、哨兵二号(Sentinel-2A, S2A)以及 GOCI 卫星影像。其中,前三种影像空间分辨率较高,用于提取不同年际间的苏北浅滩上紫菜筏架区域。GOCI 影像则具有高时间分辨率的优势,且其监测区域恒定,用于本文第 5 章与无人机反演绿潮漂移速度的对比研究。

2.3.1 高分、环境与哨兵卫星影像

本文选择使用 GF-1 卫星影像与 S2A 卫星影像来提取 2017 年苏北浅滩的紫菜养殖筏架,GF-1 影像的空间分辨率为 16 米,S2A 影像的空间分辨率可达到 10 米,两者都具备较高的空间分辨率,能满足紫菜筏架养殖区的提取,以用于纓绳附生绿藻生物量的估算研究。同时利用不同卫星的多幅影像,便于在提取养殖区筏架时进行相互参考与对比,以保证提取过程不遗漏筏架区,使提取结果能完整反映养殖筏架的实际分布。由于 GF-1 卫星仅能提供 2013 年 4 月 26 日之后的数据,S2A 卫星也只能提供 2015 年 6 月 29 日之后的影像,因此对于 2011~2013 年的苏北浅滩养殖筏架提取,采用 HJ-1 卫星的 CCD 影像,其空间分辨率为 30 米,波谱范围为 0.43~0.9 μm ,分为 4 个波段,能提供 2008 年 9 月 6 日之后的影像数据,由于其时间分辨率可达到 2 天,且具有宏观性好、多尺度等特性,在大范围、全天候、全天时环境和灾害监测等方面具有广泛的应用前景。其中,GF-1 与 HJ-1 卫星数据来源于中国资源卫星应用中心(<http://www.cresda.com/CN/>)。S2A 影像由欧洲航天局(European Space Agency)免费提供(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>),其具有 13 个光谱波段,幅宽达 290 公里,单星的重访周期 10 天。

筏架信息的提取受海水潮位影响较大,这是因为低潮期裸露的潮滩与紫菜筏架在影像上难以分辨,而海水与紫菜筏架的光谱信息差别明显,在卫星影像上容易分辨,从而选取高潮位时的卫星影像便于筏架提取。另外根据调查结果,苏北浅滩的紫菜生长季节为 12 月到来年的 4 月,筏架回收作业多在 4~6 月进行^[32],因此卫星成像时间需要在 12 月到来年的 4 月期间,才能保证紫菜养殖区的

信息完整。另外需排除研究区被云层遮挡或通视性差的影像。综上，本文经过筛选，下载了如表 2.3 所示的环境、高分和哨兵卫星影像用于不同年度的苏北浅滩筏架面积的提取，综合多幅影像可尽可能接近苏北浅滩上的实际紫菜筏架总量。

表 2.3 筏架提取所用的卫星影像列表

Table 2.3 List of satellite images used for raft extraction

年度	所用卫星影像	影像时间	影像分辨率/米
2011 年	环境 1 号	2011-03-30	30
2012 年	环境 1 号	2012-04-02	30
		2012-04-23	
2013 年	环境 1 号	2013-01-28	30
2017 年	高分 1 号	2017-01-24	16
		2017-03-02	
	哨兵 2 号	2017-02-28	10

对下载的卫星遥感影像，首先，利用 ENVI 软件对卫星影像进行辐射定标、大气校正与投影转换等图像预处理，消除由大气影响所造成的辐射误差，并统一所有遥感影像的坐标系为 WGS_1984_UTM_ZONE_51N。然后在 Arcmap 中利用目视解译手动提取紫菜筏架，提取前，对多幅影像利用“Georeferencing”工具进行空间配准，然后利用矢量图层的创建、编辑工具对遥感影像中的紫菜筏架进行矢量化，生成四个年度的苏北浅滩筏架分布图，最后利用矢量图层属性表中的统计工具，计算出各个年度的紫菜养殖筏架面积。

2.3.2 GOCI 影像数据

GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) 影像用于海上绿潮漂移速度的估算，该卫星传感器由韩国发射，与 2011 年 4 月开始向公众提供影像数据，可以通过韩国海洋卫星中心 (<http://kosc.kiost.ac.kr/>) 下载，影像包含从 412~865 nm 的 6 个可见光波段与 2 个近红外波段，卫星覆盖范围达到 2500 km×2500 km，每天可提供从北京时间 8:30 到 15:30 的 8 景逐小时的影像数据，覆盖了我国渤海、黄海和东海^[77]，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。

GOCI 影像首先利用 GDPS (GOCI Data Processing System) 进行辐射校正, 然后利用 ENVI 软件, 采用 GLT (Geographic Lookup Table) 方法进行几何校正和数据投影, 并裁切出两幅影像中同时未被云层遮挡的海域。参考已有的绿潮提取研究, 采用归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) [78, 79], 并基于 Jenks 的自然间断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 (745 nm) 与第 5 红光波段 (660 nm)。

2.4 野外调查与采样数据

2.4.1 筏架附生绿藻采样数据

现场采样调查是研究筏架附生绿藻生物量必不可少的手段。筏架回收前, 纜绳附生绿藻随着生长, 生物量会持续增加, 因此, 在筏架回收作业前采集纜绳附生绿藻生物量的结果, 能较真实反映入海的绿藻生物量。2017 年 5 月 11 日, 在纜绳附生绿藻刮落作业的当天上午, 在位于苏北浅滩竹根沙的调查区 (121.2939 E, 32.7882 N), 进行筏架纜绳附生绿藻的采样。采样流程如下: 随机抽取 6 列筏架, 每列筏架再随机抽选 3 张网帘单元, 对总计 18 张紫菜网帘的纜绳进行绿藻取样; 用小刀刮落一米长度的纜绳附生绿藻, 将采集的绿藻样品编号, 装在样品袋中运回调查船, 室内处理时先用干净海水冲洗样品中的泥沙, 冲洗后挤干水分, 再用吸水纸吸干绿藻表面水分, 然后测定样本重量, 最后计算出一米长度纜绳上附生的绿藻生物量。

此外, 对于 2011~2013 年度的苏北浅滩筏架附生绿藻的生物量数据, 本文引用了已有研究的采样数据。

2.4.2 船载气象仪风速数据

用于绿潮漂移驱动分析的风速数据, 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/>) 于 2019 年 6 月的透明海洋共享航次, 科学三号科考船使用的气象仪为 “XZC6-1 型船用自动气象仪”, 该气象仪能自动、连续地测量、显示和记录真风速、真风向、气温、相对湿度、海水皮温等数据, 还可以按照《船舶海洋水文气象辅助测报规范》的要求人工输入观测数据, 并

可自动把数据通过卫星传输给陆地接收站。对于真风速测量，可以生成瞬时真风速、真风向，以及 1 分钟与 10 分钟的平均真风速、真风向。本研究取用其中的 1 分钟平均真风速、真风向。

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(如图 2.5)。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站风速资料中的 $T_0 \sim T_1$ 。这是由于以下两点：第一，各个站点中，船载气象站与航拍绿潮的距离有数百米至一公里不等，风通过这段距离，需要一定时间(设为 Δt 分钟)，即船载气象站所测定的风，需要 Δt 时间才能到达所航拍的绿潮。二，绿潮漂移具有惯性，对风等外力驱动作用有一定的滞后性，即某时刻下绿潮的漂移速度，是风力提前一段时间即开始的驱动结果，本文将该前置时间设为 2 分钟。通过量测各站点船载气象站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 $T_0 + \Delta t - 2 \sim T_1 + \Delta t$ 。对站点 S4, S3 和 S2，依据科考船与绿潮位置关系而算出的 Δt 分别为 -1 min, 5 min, 5 min。最终得到的各站点有效风时段如图 2.5 中的红色竖线间所示：

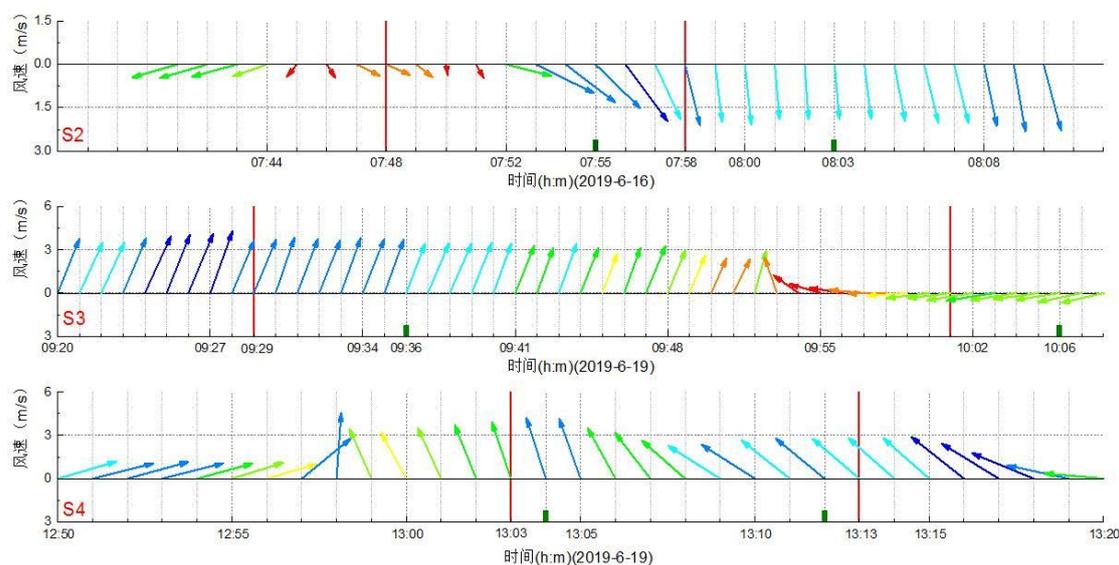


图 2.5 三个站点作业期间的 1 分钟平均风矢量

Figure 2.5 The 1-minute average wind vector during operation of three sites

注：两条红色竖线区间为选取的有效风时段，两个绿色标签点区间表示该站点航拍的绿潮漂移时段

Note: 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

最后, 对所选取时间段内的 1 分钟平均真风速、风向数据, 计算风速大小的算术平均值 $V_{\text{风速}}$, 与风向的矢量平均值 $Dir_{\text{风向}}$, 来表示作用于绿潮漂移的有效风矢量。两者的计算公式如下:

$$V_{\text{风速}} = \frac{1}{n} * (\sum_{i=1}^n V_i) \quad \dots(2.1)$$

$$Dir_{\text{风向}} = \arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^n V_i * \sin Dir_i}{\sum_{i=1}^n V_i * \cos Dir_i}\right) \quad \dots(2.2)$$

其中, V_i 代表第 i 时刻的 1 分钟平均真风速, Dir_i 代表 i 时刻的 1 分钟平均真风向。

2.5 其它辅助数据

2.5.1 ERA5 风场数据

为比较无人机与卫星反演绿潮速度所选取两处海域的风速差异, 本文绘制了 S3 站点作业期间黄海海域的风场数据。该风场数据来源于欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECWMF) 发布的再分析资料 (ECMWF Re-Analysis, ERA5)。ECWMF 是一家由 34 个成员与合作国提供支持的政府间机构, 致力于开发和提供全球气候预测信息。全球气候再分析产品结合了过去和现在的气象观测信息与现代预测模型, 采用了为数值天气预报开发的数据同化技术, 对了解和监测气候变化过程与预告未来气候变化状况提供了重要资源。ERA5 作为 ECMWF 全球气候大气再分析的第五代工具, 通过更充分地利用观测数据, 不断改善的物理过程描述与产品时空分辨率的显著提高, 对最近的全球气候提供了一种新的数值描述, 包含对不同海拔地区的空气温度、压力和风力等大气参数以及降雨、土壤含水量和海浪高度等地表参数的估值, 为研究、教育及其它行业应用创造了气候变化监测的新全球气候数据集^[80]。ECWMF 发布的数据集可从其官网的数据搜索页面 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>) 进行搜索并可免费下载。

本文所选用的数据集名称为“ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present”。下载了南黄海海域在 2019 年 6 月 19 日当天 1 000 hPa 大气压下，海平面之上 10 m 高度 u v 分量的风场数据，其中， u 为东西方向， v 分量表示南北方向，时间分辨率为逐小时，空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，下载的原始数据为 nc 格式。应用 python 程序（代码见附录 1）读取到 Excel 表格中，同时将 u v 分量转换为风速、风向。然后，在 Arcmap 中读取、显示包含经度、纬度、时间、风速和风向的风场表格数据，在其属性的“符号化”对话框中，通过设置箭头形状的旋转与大小来分别表示风的方向和速率，可视化显示南黄海区域在 19 日上午 10 时的风场数据，该风场数据用于本文第 5.2 节。

2.5.2 统计年鉴与公报数据

统计年鉴与公报数据由政府相关部门发布，具有权威性，本文使用了中国渔业统计年鉴以及海洋灾害公报两种数据。

中国农村农业部渔业渔政管理局等组织编写的《2018 中国渔业统计年鉴》，其统计了 2017 年度中国全社会的渔业经济产值、水产品产量、水产养殖面积、渔船数量、渔业人口等渔业数据，数据种类丰富。本文从中获取了江苏省在 2017 年度的紫菜总产量为 28 405 吨，总种植面积为 41 066 公顷，该数据用于第 3 章苏北浅滩上紫菜产量的估算。

自然资源部（原国家海洋局）北海分局的下属各级海洋主管部门负责管理北海区的海洋观测与预警报，并开展海洋防灾减灾工作。根据 2017 年北海区海洋观测数据和海洋灾害情况的调查、统计和分析结果，国家海洋局北海分局于 2018 年 4 月编制、发布了《2017 年北海区海洋灾害公报》。统计包含了风暴潮、海浪、海冰、绿潮、赤潮、海岸侵蚀、海水入侵、土壤盐渍化和海平面变化等海洋灾害，在 2017 年度发生的过程、特征和造成的损失等信息。本文从中获取了 2008~2017 年度黄海绿潮灾害的最早发现时间、持续天数等年际变化特征，用于本文的第 5.2 节。

2.5.3 潮流与潮汐数据

潮流数据引用了已发表的论文成果，是基于海洋数值模式计算出的南黄海六月表层的涨落潮流场分布数据。

潮汐数据来源于中国海事服务网 (<https://www.cnss.com.cn/tide/>)，用于查询

海上站位在航拍作业时的潮位，以配合涨落潮流场数据获取站位作业时的表层流场。该数据用于本文第 5.2.3 节中绿潮漂移的驱动分析。

2.6 研究方法

(1) 多平台、多手段联合应用

本研究将主要利用高时空分辨率的无人机遥感，同时结合卫星遥感、海上航次调查、统计年鉴、苏北浅滩、山东近岸的野外实测采样等多平台、多手段联合开展研究。传统的海上调查与野外实测采样是生物量估算研究中基础而必需的方式；卫星遥感则具备大面积同步观测的能力以及历史数据的可溯；船载无人机遥感使用灵活，其影像的高分辨率是卫星遥感所无法比拟的，将成为未来遥感监测不可或缺的手段。多平台联合应用的监测方法将弥补单一手段的不足，获取以往研究未能获得的数据，并进一步提高研究结果的精度，更好地实现本研究的目标。

(2) 最大似然比分类法

在筏架附生阶段的绿潮藻生物量估算研究中，对无人机影像中筏架网帘上绿潮藻与紫菜等进行分类时，拟应用最大似然比分类法。

最大似然比分类法是根据已知训练区地物的光谱特征，并假定其近似服从正态分布，利用训练区样本求出均值、方差等特征参数，建立判别函数，并针对图像地物进行分类的方法。即通过求出每个样本对于各类别的归属概率，并把待分像元分到归属概率最大的类别中^[81]。本研究将通过影像处理软件中集成的最大似然比分类法进行应用。

(3) 目视解译的信息复合法

筏架附生阶段的绿藻生物量估算中，苏北浅滩紫菜养殖筏架区域的提取受卫星影像分辨率、海水潮位以及天气云层等影响较大。在卫星影像中，裸露的潮滩与紫菜筏架在影像上难以分辨，而海水与筏架则容易分辨，为保证筏架面积提取的全面与准确，本研究拟采用目视解译的信息复合法进行提取。该方法是将苏北浅滩这一地区的不同时间、不同遥感卫星平台成像的多幅遥感影像复合，综合多幅遥感影像信息，识别遥感影像上目标地物的方法。这种方法将保证所提取紫菜筏架区域的完整性。

(4) 最佳阈值确定法

从海上漂浮绿潮藻的无人机可见光影像中，进行绿潮藻提取主要分两步：首先运用波段运算计算图像中各地物的植被指数。然后设定阈值，将植被指数大于或小于阈值的像元归为不同的地物类型。阈值的确定是利用植被指数提取绿潮藻的关键，本研究拟采用双峰直方图法确定各植被指数的阈值。双峰直方图法是指植被指数的图像中含有两个明显的波峰，两个波峰对应于对象内部和外部较多数目的点，波谷对应于对象边缘附近相对少数目的点^[82]，则波谷对应的数值即为最佳阈值。

2.7 本章小结

本章主要介绍了苏北浅滩与南黄海两个研究区的航次作业站位的位置、水文气象等特征。对无人机的海上航测数据、卫星遥感、野外采样以及风场等各类数据源、数据获取与处理方法进行了介绍。

第3章 黄海绿潮藻筏架附生生物量的估算研究

绿潮灾害出现后，探究黄海绿潮的主要致灾原因种以及起源地是研究者主要关注的问题之一。有学者通过多年的卫星遥感监测发现，南黄海绿潮的最初发生位置大都位于江苏辐射沙洲附近^[52]。数值模拟、海上航次观测和 GPS 浮标监测等结果也支持黄海浒苔绿潮自江苏浅滩附近海域向北漂移、并在山东南岸登陆的过程^[8, 24]。另外，绿潮优势种浒苔遗传特征的分析表明，每年黄海绿潮的优势种藻类同为“漂浮生态型”浒苔^[83]，该种浒苔在近岸定生种群中没有发现，而在苏北浅滩水体和沉积物的微观繁殖体，以及苏北浅滩海域 4~5 月份的漂浮绿藻中检测到了“漂浮生态型”浒苔，从而在生物学角度证明了南黄海浒苔的种源地是苏北浅滩^[84]。综上成果表明，苏北浅滩紫菜养殖活动中从筏架绳索上刮落大量绿藻，成为绿潮形成的重要环节^[85]。

已有的绿藻生物量研究多集中在海上漂浮期间，而对绿潮早期附生阶段中筏架附生绿藻生物量的研究并不多。仅有的研究多采用通过社会调查获取的主观估计数据，计算结果也仅是粗略的量级估算，精度较低，研究结果之间存在明显差异；或简单的将筏架附生的所有绿藻作为黄海绿潮的初始生物量，没有区分绳索附生绿藻与网帘附生绿藻（图 3.1）的不同流向与危害。因此，亟需新的高精度手段，对绿潮早期阶段的附着生物量开展研究，机动灵活、起飞方便且具有厘米级空间分辨率的无人机遥感被应用到此章节的研究中。

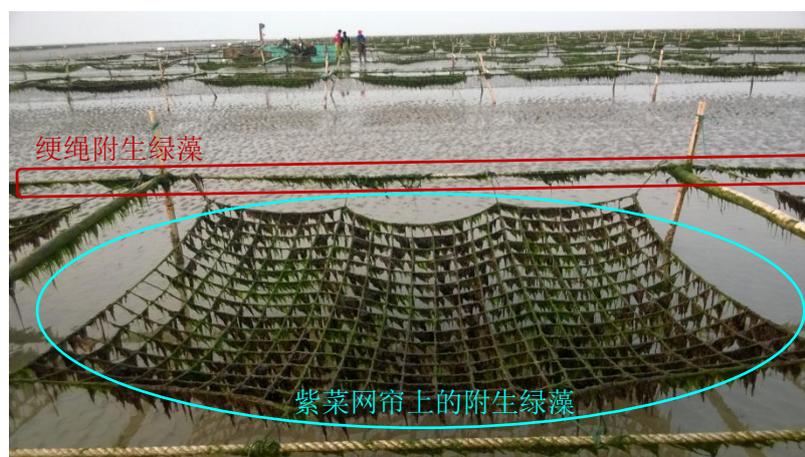


图 3.1 苏北浅滩紫菜筏架上绳索、网帘上的附生绿藻

Figure 3.1 The green algae attached to raft rope and nursery-nets in the Subei Shoal

3.1 网帘附生绿藻生物量的估算

网帘上的附生绿藻是紫菜养殖产业的主要危害之一。紫菜育苗时,紫菜丝状藻丝在贝壳内生长,绿藻能钻入贝壳生长,秋末冬初时,是紫菜叶状体在网帘上的生长阶段,而绿藻也在网帘上同时出苗生长,甚至在紫菜网帘上盖住紫菜,与紫菜构成直接竞争关系,能显著降低紫菜的产量和品级率,给紫菜养殖业造成巨大的经济损失^[86,87]。同时,苏北浅滩筏架网帘的绿藻生物量,往往与纜绳上的绿藻生物量正相关,后者被认为是黄海大规模漂浮绿潮的最初来源^[88],网帘附生绿藻生物量的多少也对同年黄海绿潮规模的大小有一定的指示作用。因此,网帘绿藻生物量的估算,对紫菜养殖产业以及绿潮灾害规模的预估同时具有重要意义,但其生物量的估算研究,因技术方法或数据精度的不足,之前少有相关研究报道。

除利用卫星遥感、现场调查与统计年鉴等数据外,本研究在海上相对较复杂的气象条件下,成功应用无人机获取了筏架网帘附生绿藻的正射影像。以当地渔船甲板作为无人机起降场,实现了消费级旋翼无人机在海上科学调查的应用,将无人机航拍与大比例尺测图应用到了筏架附生绿藻生物量估算的研究中,打破了无人机遥感在海上应用的障碍,为以后相关海上调查研究提供了新的工具与方法。

3.1.1 网帘紫菜与绿藻的提取

基于无人机低空航测生成的筏架正射影像(图 3.2a)具备准确的坐标信息,但拼接后影像质量降低,图像上出现色差,部分拼接区域发生地物变形(图 3.2b),目标物信息损失很大,影响绿藻与紫菜的判别与精确提取。所以,需要对紫菜筏架正射影像进行再处理。本研究依次将网帘的原始单张 JPG 格式的清晰图像,与拼接的数字正射影像进行配准与叠置,继而得到了信息无损且具备正确坐标的影像(图 3.2c),便于提取目标物的准确几何信息。

对配准后的图像裁切出网帘部分,采用监督分类方法,建立紫菜、绿藻、背景地物三种训练样本,使用最大似然分类(Maximum likelihood Classification)进行图像分类,提取网帘上的紫菜与绿藻,设置不同的颜色,青绿色表示绿藻,粉色表示紫菜,并与原始图像叠加(图 3.2d)。将原始图像与分类后的成果图(图 3.2e)放大至相同尺度并进行对照(图 3.2f 与 g),经过目视比对,判断此方法

对网帘上紫菜与绿藻的分类结果准确。

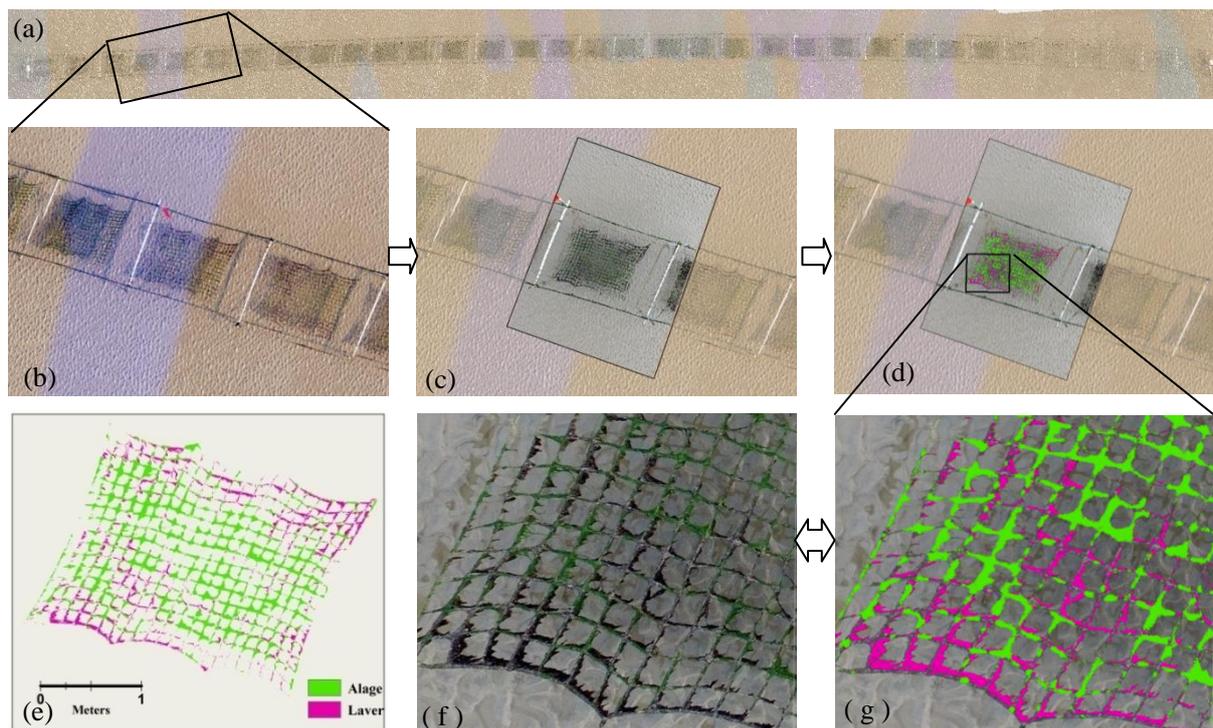


图 3.2 网帘附生绿藻的提取流程

Figure 3.2 Extraction of green algae attached to nursery-nets

注：(a) 筏架的数字正射影像；(b-e) 网帘上紫菜、绿藻的分类步骤；(f) 原始图像与 (g) 分类结果的对比

Note: (a) The orthophoto of rafts; (b-e) Classification procedure of green algae and *P. yezoensis* attached to nursery-nets; Comparison of (f) original and (g) classified images at the same scale for one example nursery-net.

利用无人机，对两列紫菜筏架共计 61 张紫菜网帘进行了航测，生成了两列筏架的数字正射影像。航测生成的筏架正射影像经过网帘图像的叠置与配准，具备了正确的几何坐标信息。分别裁切出所有的 61 张网帘，采用监督分类方法，建立紫菜、绿藻、背景地物三种训练样本，使用最大似然分类进行图像分类，提取出网帘上的紫菜与绿藻像元，同样设置青绿色表示绿藻，紫色表示紫菜，并与原始图像叠加。利用 ArcMap 软件统计出成果图中绿藻的像素数量与紫菜的像素数量，利用像素数量乘以图像分辨率等于面积，计算出 61 张网帘绿藻与紫菜的图斑面积，结果如表 3.1 所示。其中，*P* 代表紫菜 (*P. yezoensis*)，*G* 代表绿藻 (Green algae)，表中数字单位为平方米 (m^2)，61 张网帘的提取结果图

见附录 2。

表 3.1 61 张网帘上紫菜与绿藻面积 (m²) 的提取结果

Table 3.1 The area (m²) of *P. yezoensis* and green algae on the 61 nursery-nets

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>P</i>	0.07	0.07	0.24	0.50	0.17	1.59	0.30	0.30	0.14	0.84
<i>G</i>	0.27	0.14	0.05	1.04	0.39	0.06	0.15	0.03	0.44	1.58
No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>P</i>	0.84	1.27	0.78	1.54	0.59	0.32	1.31	1.01	0.46	0.55
<i>G</i>	1.57	0.89	0.39	0.60	0.65	0.97	0.01	0.83	0.77	0.34
No.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
<i>P</i>	0.41	0.60	0.50	0.81	0.76	0.19	0.24	0.08	0.23	0.13
<i>G</i>	0.83	1.61	1.06	0.42	0.14	1.22	1.15	0.98	0.03	0.14
No.	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
<i>P</i>	0.36	0.49	0.06	1.19	3.30	0.46	0.39	0.13	0.74	0.13
<i>G</i>	1.45	0.20	0.88	0.18	0.05	1.19	0.20	0.08	0.98	1.56
No.	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
<i>P</i>	0.30	0.21	0.22	0.54	0.42	0.20	0.19	0.16	0.14	0.64
<i>G</i>	1.70	1.10	2.97	0.43	1.97	2.80	2.98	2.00	2.29	1.50
No.	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
<i>P</i>	0.40	0.54	0.12	0.21	0.19	0.05	0.41	0.02	0.60	1.22
<i>G</i>	0.19	0.64	0.48	0.51	1.39	0.93	1.25	0.33	0.03	0.65
No.	61									
<i>P</i>	0.24									
<i>G</i>	0.98									

经统计, 61 张网帘中, 紫菜图斑面积的平均值约为 0.5207 m², 绿藻图斑面积的平均值约为 0.8516 m², 两者的比例约为 0.6115: 1。本文将 0.6115 作为苏北浅滩筏架网帘上紫菜与绿藻的生物量比值 R_I 。

3.1.2 苏北浅滩紫菜产量的估算

计算出网帘上紫菜与绿藻生物量的比例后，只需结合苏北浅滩区的紫菜产量，即可依照比例计算出苏北浅滩紫菜网帘附生绿藻的生物量。中国渔业经济统计年鉴中给出了同年度江苏省的紫菜产量，但未单独列出苏北浅滩上的紫菜产量。

除苏北浅滩外，江苏其它地区的紫菜养殖区离岸较近，本文统称为江苏近岸养殖区。已有研究表明，2012年12月至2013年4月的苏北浅滩蒋家沙、竹根沙和东沙三个紫菜养殖区的绿藻生物量要明显高于江苏近岸的紫菜养殖区^[89]。紫菜生长与采收过程中，江苏近岸等离岸近的养殖区，常采取人工剥离或涂酸等办法去除附生绿藻；而在苏北浅滩等离岸远的紫菜养殖区，一般不对网帘附生绿藻作处理^[32]。本研究在2017年2~3月在江苏近岸紫菜养殖区的实地调查中也发现，江苏近岸养殖筏架网帘基本不附生或很少附生绿藻，紫菜生长状况良好(图3.3)。而在苏北浅滩的调查区，大多网帘附生了数量不等的绿藻(如表3.1)。江苏近岸养殖区与苏北浅滩养殖区的单位面积紫菜产量显著不同。

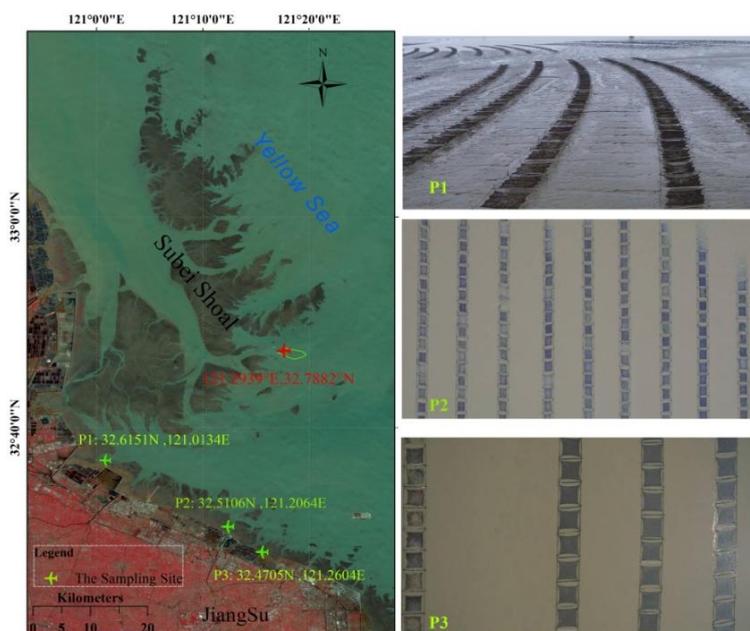


图 3.3 江苏近岸养殖区的三个调查站位

Figure 3.3 Three survey sites in nearshore aquaculture zone of Jiangsu

注：近岸站位的紫菜生长状态良好，P1 与 P2 站位的航拍时间 2017 年 3 月 29 日，P3 站位航拍时间 2017 年 2 月 27 日。

Note: *P. yezoensis* in three nearshore sites grew well on March 29, 2017 (P1 and P2), and February 27, 2017 (P3).

准确估算苏北浅滩的紫菜产量，需考虑“江苏近岸”与“苏北浅滩”两个养殖区紫菜生长状况的差异。将随机抽取的 61 张网帘提取数据（表 3.1）作为样品集，基于以上文献资料与近岸养殖区的实地调查，本文设定样品集中紫菜图斑面积最大的网帘（表 3.1 中的第 35 号）与江苏近岸区的紫菜生长状况相似。则“江苏近岸区”与“苏北浅滩区”单位面积紫菜产量的比值，等于“样品集中紫菜图斑面积的最大值（3.30）”与“61 张网帘紫菜图斑面积平均值（0.52）”的比例，算出该比值 R_s 约为 6.34: 1。

根据 2018 中国渔业统计年鉴，2017 年江苏省紫菜产量 W_{js} 为 41 860 吨，紫菜养殖总面积 S_{js} 为 47 255 公顷。本文利用卫星遥感提取出苏北浅滩的紫菜筏架面积 S_{qt} 约为 34.4373 万亩，与已有文献提到的浅滩紫菜养殖面积为 35 万亩^[6] 的结果相近，可证明本文提取筏架区域面积的可靠性。江苏近岸紫菜养殖区的面积，则为江苏紫菜养殖总面积与苏北浅滩紫菜养殖面积之差： $S_{js}-S_{qt}$ 。结合近岸与苏北浅滩区的面积，则可求得江苏近岸区与苏北浅滩区的紫菜总产量比值 R_t ：

$$R_t = [(S_{js} - S_{qt}) * R_s] / S_{qt} * 1 \quad \dots(3.1)$$

则苏北浅滩区紫菜产量 W_{qt} 为：

$$W_{qt} = W_{js} / (R_t + 1) \quad \dots(3.2)$$

3.1.3 网帘附生绿藻生物量的估算

在 3.1.1 节中得到苏北浅滩区养殖网帘上紫菜与绿藻生物量比值为 R_1 ，则苏北浅滩区网帘附生绿藻的生物量 W_1 为：

$$W_1 = W_{qt} / R_1 \quad \dots(3.3)$$

本节基于无人机航拍影像及统计数据，提取了 61 张网帘样本的紫菜与绿藻的图斑面积，将两者平均值的比例作为苏北浅滩网帘上紫菜与附生绿藻生物量的比例，进而利用统计年鉴数据，并考虑江苏近岸与苏北浅滩养殖区紫菜单位面积产量的不同，结合航拍图像中的提取结果，估算了苏北浅滩的紫菜产量，最终计算出网帘附生绿藻的生物量。结果为：计算出 2017 年的江苏近岸的紫菜养殖面积约为 24 297 公顷，根据公式（3.1），得到江苏近岸养殖区与苏北浅滩养殖区的紫菜产量比值约为 6.71，根据公式（3.2）、（3.3）与统计年鉴中的 2017

年江苏紫菜总产量，最终估算出 2017 年的网帘附生绿藻的总生物量约为 $W_1=8877$ 吨。

3.2 纜繩附生綠藻生物量的估算

3.2.1 苏北浅滩紫菜网帘数量的估算

首先，使用高分与哨兵影像提取了 2017 年苏北浅滩上的紫菜筏架分布图，如图 3.4 所示，并统计出 2017 年苏北浅滩紫菜筏架的总面积约为 34.4373 万亩。

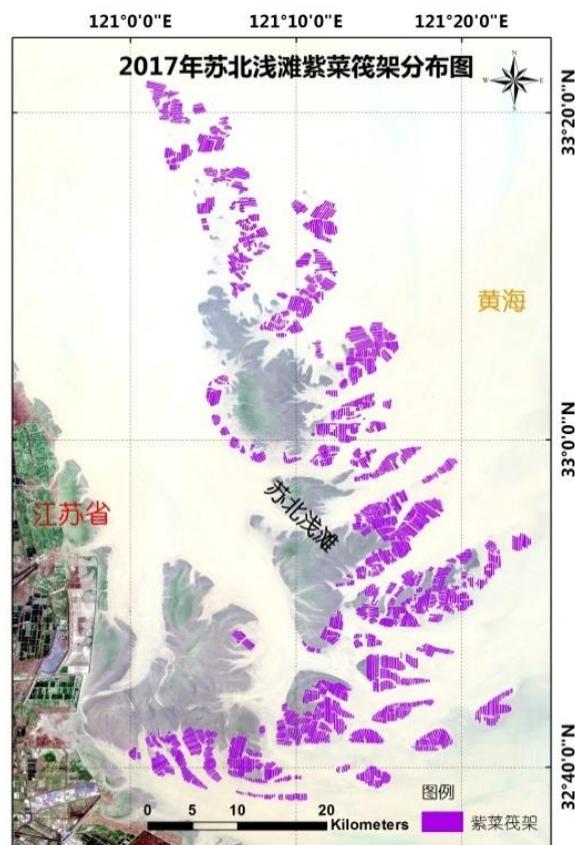


图 3.4 2017 年的苏北浅滩紫菜筏架分布图

Figure 3.4 Distribution map of *P. yezoensis* aquaculture rafts in the Subei Shoal in 2017

在所用的卫星遥感影像（空间分辨率最高为 10 米）上提取筏架区域时，并不能区分每一单列筏架（列宽约为 3 米），最小区分单元只能为一排筏架区域（如图 3.5a~b，黄色方框所示）。计算网帘数量时，需要将网帘间的面积去除。根据实地调查与航拍影像，苏北浅滩的养殖筏架是按照固定尺寸呈规律分布（图 3.5c）。单排筏架分布格局可模拟为图 3.5d 所示，其中每列筏架一般有 28~32 个网帘，横竿长度（列宽） w 为 3 米，单个网帘单元上单侧纜繩长度 l 为 3.8 米；

两列筏架的间距 a 约为 10 米。

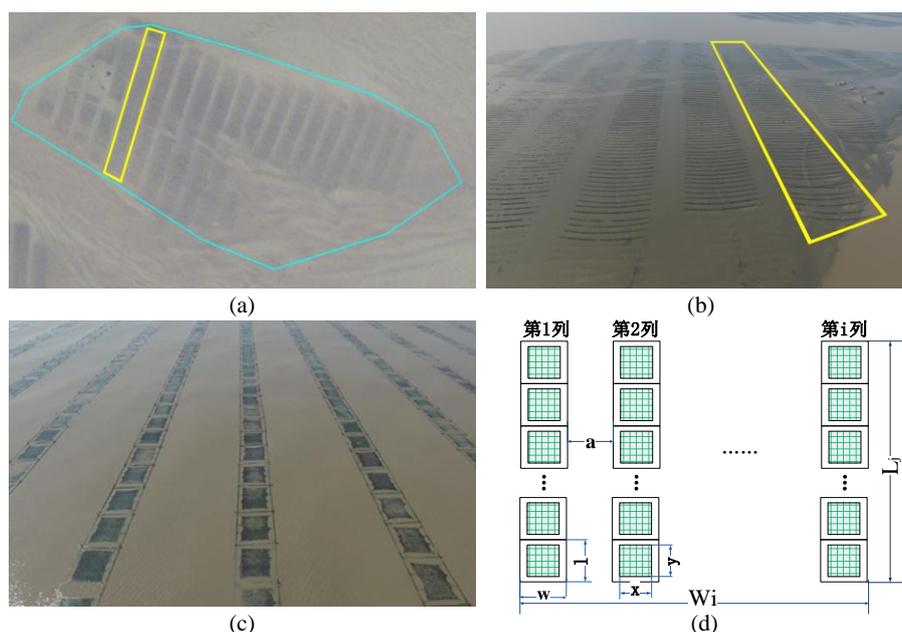


图 3.5 苏北浅滩上的紫菜筏架布局

Figure 3.5 Distribution of *P.yezoensis* raft on the Subei Shoal

注：(a) 采样区的卫星遥感影像；(b) 采样区的无人机航拍影像；(c) 高潮期的紫菜筏架航拍图；(d) 单排筏架分布格局图。(a) 与 (b) 中黄框所示区域相同，为同一排筏架；(d) 横杆宽 $w=3\text{m}$ ，网帘单元上单侧绳长 $l=3.8\text{m}$ ，网帘宽 $x=2.2\text{m}$ ，网帘长 $y=3\text{m}$ ，筏架间距 $a=10\text{m}$ 。

Note: (a) Satellite image of the sampling area; (b) UAV image of the sampling area; (c) the aerial photos of *P.yezoensis* raft during high tide periods (d) the distribution pattern for a single row of *P. yezoensis* rafts. The area marked by the yellow box in (a) is the same row as that in (b); (d) w and l represent the width and length of a raft unit, respectively, x and y are the width and length of a nursery-net, respectively, and a represents the column spacing. From our field measurements: $w = 3 \text{ m}$, $l = 3.8 \text{ m}$, $x = 2.2 \text{ m}$, $y = 3 \text{ m}$, and $a = 10 \text{ m}$.

则在一排筏架中，筏架所占的面积比为：

$$r1 = w * i / [w * i + a * (i - 1)] \quad \dots(3.4)$$

当每排的筏架列数 i 足够大时， $r1$ 可取近似值：

$$r1 \approx w * i / (w * i + a * i) = w / (w + a) \quad \dots(3.5)$$

在一张网帘单元中，网帘所占的面积比为：

$$r_2 = x * y / (w * l) \quad \dots(3.6)$$

S 为通过卫星遥感影像提取的苏北浅滩上筏架总面积，则苏北浅滩上网帘总数量的计算公式为：

$$N = S * r_1 * r_2 / (x * y) \quad \dots(3.7)$$

3.2.2 纜绳附生绿藻生物量的估算

网帘单元的单侧纜绳长度 l 为 3.8 米，紫菜养殖筏架的一个网帘单元两侧的纜绳长度 L_g 为：

$$L_g = 2 * l \quad \dots(3.8)$$

结合调查区随机采样的纜绳附生绿藻生物量均值 W_g g/m，则苏北浅滩紫菜养殖筏架的纜绳附生绿藻生物量总值为：

$$W_2 = \sum_{i=1}^N (L_g * W_g) \quad \dots(3.9)$$

3.2.3 纜绳附生浒苔的生物量

紫菜筏架上附生了多种绿藻，绿藻群落演替现象明显。在 2017 年 3 月份的现场采样发现，紫菜筏架上主要附生了 4 种绿藻，包括扁浒苔、盘苔、曲浒苔与缘管浒苔，群落结构中没有出现黄海绿潮的优势种-浒苔；到 5 月份进行筏架回收作业时，筏架附生绿藻的生物量明显高于 3 月份，但种类组成明显减少，主要存在 3 种附生绿藻，分别为盘苔、扁浒苔与浒苔。其中，浒苔在筏架附生绿藻群落中所占据的生物量比例并不高，为 15 %^[90]。以此，估算出 2017 年纜绳上附生浒苔的生物量 $W_3 = 15\% * W_2$ 。

经计算，苏北浅滩上网帘总数量 N 为 464.74 万张，单个网帘单元两侧纜绳长度 L_g 为 7.6 米，对调查区随机抽取的 18 个样本纜绳附生绿藻生物量，采样得到的均值 W_g 为 84.39 g/m。根据公式 (3.9)，苏北浅滩紫菜养殖纜绳上的绿藻生物量为 W_2 约为 2981 吨，其中的浒苔生物量 W_3 约为 447 吨。

3.3 黄海绿潮与筏架附生绿藻的相关性探究

已有研究表明，除水体富营养化以及全球气候变暖以外，苏北浅滩紫菜养殖活动中从筏架纜绳上刮落大量绿藻，这一过程促进了绿潮藻（浒苔）大量集

中入海，成为绿潮形成的重要环节^[85]。在绿潮藻入海形成零星漂浮后，随着海温升高，绿潮藻吸收海水的营养盐等迅速生长，并随着潮汐波浪聚集成片漂浮，达到基于遥感影像能进行识别的大片漂浮绿潮藻规模。从绿藻被刮落入海到发展到卫星遥感能识别的斑块，期间是绿潮发生发展的关键时期，也是绿潮研究一直以来的“观测盲区”。卫星遥感和海上调查揭示了绿潮大多在苏北浅滩海域被最早发现，认为绿潮发生同紫菜筏架的附生绿藻有关系，也认为绿潮藻从紫菜养殖筏架的纜绳上被刮落入海，是黄海绿潮的初始生物量。但之前因生物量估算技术精度不足等原因，很少有研究能直接从规模（生物量或面积）的角度探讨绿潮与筏架附生绿藻两者的关系。本节将基于纜绳附生浒苔生物量与绿潮初始覆盖面积的年际变化趋势，分析两者的相关性。

3.3.1 纜绳附生绿藻生物量的年际变化

自 2007 年，黄海绿潮已连续暴发 14 年，多年的卫星遥感监测以及野外实验调查表明，黄海上漂浮绿潮最早出现于黄海南部的苏北浅滩海域，在绿潮起源上，苏北浅滩上紫菜养殖筏架的附生绿藻被认为是黄海绿潮的种源^[8]。苏北浅滩上条斑紫菜养殖以年为周期进行养殖作业，养殖户于每年的 9~10 月在苏北浅滩上布设紫菜养殖筏架，于 12 月到来年 4 月，紫菜成熟并可按茬采收，于 4~5 月回收养殖筏架，而绿潮同样在 4~5 月开始出现在苏北浅滩海域。当地的紫菜养殖方式为半浮动筏式养殖，筏架包括竹竿、纜绳和紫菜生长的网帘。在每年春季，筏架上都会附着大量绿藻，除了在风浪流的自然外力作业下会脱落入海之外，还会受到养殖作业活动的直接影响：在筏架回收时，网帘与竹竿的附生绿藻会被装船送回陆地，而纜绳上的附生绿藻则被农用机械刮落并遗弃到浅滩上，之后随下一个潮周期入海^[88]。因此，筏架附生绿藻，尤其是纜绳上的附生绿藻生物量成为绿潮研究者关注的重点。有许多学者于 12 月到来年 5 月期间，对苏北浅滩多个沙洲上养殖筏架的附生绿藻开展了实地采样调查，以求掌握筏架附生绿藻的种类组成、演替以及生物量变化等。

方松^[91]于 2010 年 10 月至 2011 年 4 月，分别在苏北浅滩的小洋口养殖区、高泥养殖区、泥螺沙养殖区，设立三个调查站位进行筏架附生绿藻的采样。结果发现自 3 月开始，随着海区温度升高至接近 10 摄氏度，筏架附生绿藻生物量快速增加，浒苔开始出现，并占据 10%~20% 的比例；4 月份温度超过 15 摄氏

度, 更加适宜绿藻生长, 此时的 3 个调查站位的筏架附生绿藻生物量分别为: 小洋口养殖区 350 g/m, 高泥 224 g/m 以及泥螺沙站位的 179 g/m, 三个筏架区的浒苔比例也继续增加, 小洋口养殖区的比例达到 40%, 另两个站位的浒苔比例也超过了 30%。宋伟^[71]于 2012 年 3 月上旬到 2012 年 5 月下旬, 同样在紫菜养殖密集区的小洋口、高泥及泥螺沙分别布设了 3 个调查站位。在小洋口, 3 月下旬开始出现浒苔, 但生物量只有 1 g/m, 4 月中旬增长到 2.9 g/m, 5 月中旬迅速增加到 87.1 g/m; 在高泥站位, 在 3 月末发现浒苔, 随后其生物量在 5 月中旬增加到 52.79 g/m; 在泥螺沙站位, 附生浒苔生物量至 5 月中下旬达到了最大值 12.33 g/m。刘材材等^[32]于 2013 年 4 月, 在蒋家沙、竹根沙、东沙等紫菜养殖区, 对筏架绳、竹竿和网帘的附生绿藻分别进行了采样和藻类鉴定, 获取了附生绿藻的种类及百分比。其中, 三个站位的绳附生绿藻的生物量分别为 101.2、87.5 和 129.3 g/m, 浒苔比例分别为 88.56%、28.96% 和 62.76%。统计以上研究中绳附生绿藻及附生浒苔的采样数据, 结果如表 3.2 所示。

表 3.2 2011~2013 年度苏北浅滩筏架绳附生绿藻的生物量采样数据

Table 3.2 Biomass sampling data of green algae attached to raft's rope in Subei Shoal from 2011 to 2013

站位	2011 年 4 月 ^[91]		2012 年 5 月 ^[71]		2013 年 4 月 ^[32]	
	绿藻生物量 (g/m)	浒苔生物量 (g/m)	绿藻生物量 (g/m)	浒苔生物量 (g/m)	绿藻生物量 (g/m)	浒苔生物量 (g/m)
小洋口	350.00	140.00	203.30	87.10		
高泥	224.00	71.68	142.39	52.79		
东沙/泥螺沙	179.00	62.65	30.48	12.33	129.30	81.15
蒋家沙					101.20	89.62
竹根沙					87.50	25.34
平均值	251.00	91.44	125.39	50.74	106.00	65.37

紫菜筏架中只有绳上的附生绿藻被刮落进入了黄海, 其中的浒苔生物量成为黄海绿潮的初始生物量。利用本文第 3.2 节的估算方法, 进行绳附生绿藻与浒苔生物量的估算, 并对两者三年的年际变化趋势进行分析。首先, 筛选 2011~2013 年研究区上无云遮挡、筏架信息清晰的环境卫星影像, 利用手动矢

量化的方法分别提取出这三年的苏北浅滩紫菜筏架分布（图 3.6）。然后，统计出 2011~2013 三个年度的紫菜筏架面积，结果分别为 29.58、32.13、31.87 万亩。

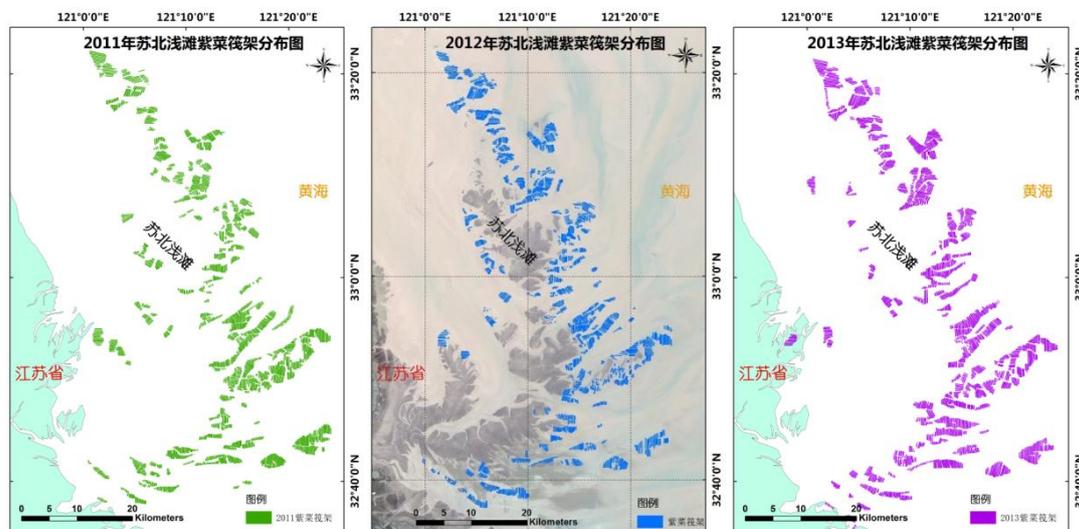


图 3.6 2011~2013 年的苏北浅滩紫菜筏架分布图

Figure 3.6 Distribution map of *P. yezoensis* aquaculture rafts in the Subei Shoal in 2011~2013

根据 3.2 节中的公式 (3.5) ~ (3.9)，结合提取的 2011、2012、2013 年的苏北浅滩筏架面积，以及表 3.2 中绿藻、浒苔在绳索上生物量密度的平均值，分别计算 2011~2013 年度苏北浅滩上绳索附生绿藻的总生物量，以及绳索上附生浒苔的总生物量，结果如表 3.3 所示。

表 3.3 2011~2013 年筏架绳索附生绿藻与浒苔的生物量计算结果

Table 3.3 Statistics on the biomass of green algae and *U. prolifera* attached to raft rope from 2011 to 2013

	2011 年	2012 年	2013 年
绿藻生物量密度/g*m ⁻¹	251.00	125.39	106.00
浒苔生物量密度/g*m ⁻¹	91.44	50.74	65.37
苏北浅滩筏架总面积/km ²	197.18	214.19	212.49
苏北浅滩绳索附生绿藻总生物量/吨	7614	4132	3465
苏北浅滩绳索附生浒苔总生物量/吨	2774	1672	2137

3.3.2 绳索附生浒苔与绿潮的相关性分析

本节将基于前一小节计算出的 2011~2013 年的绳索附生浒苔生物量的年际

变化, 探讨其与绿潮初始覆盖面积的相关性。

对于长时间序列的绿潮时空变化规律, 已有诸多研究借助高时间分辨率的卫星影像, 运用 NDVI、FAI 等植被指数结合目视解译的方法, 提取了黄海绿潮海上漂移期的时空分布图, 并以此对绿潮不同发展阶段的特征、影响区域、漂移路径等进行分析。其中, 黄海绿潮在进入海上的漂浮阶段后, 绿潮第一次被监测到的位置、日期、绿潮覆盖面积, 以及绿潮达到最大覆盖面积、最大分布面积及其日期等, 一直是国家海洋灾害监测部门与相关学者关注的重点。绿潮最大覆盖面积或分布面积一般出现在 6~7 月份, 此时绿潮规模的大小与年际间的差异不仅仅取决于该年份绿潮藻种源的生物量, 更是与其一个多月漂移过程中光照强度、海水温度、海水盐度、降水、营养盐^[92, 93]等水文气象因素决定的绿潮藻生长率有密切关系。而绿潮首次被卫星监测到多在 5 月份^[94], 这与纆绳附生绿藻的刮落作业时间相近, 且此时的海温等水文气象条件并未达到绿潮藻增殖的最适宜条件, 其生长速率低。因此绿潮最初被监测到的覆盖面积大小, 与绿潮藻种源的生物量直接相关, 且后者是最主要的决定因素。

为进一步探究苏北浅滩筏架附生绿藻与黄海绿潮的相关性, 基于本节已有的 2011~2013 年的纆绳附生绿藻生物量数据, 还需 2011~2013 年度的绿潮最初覆盖面积。由于基于卫星影像提取绿潮面积的方法中, 涉及到人工判读、植被指数阈值设定与影像选取等主观性较强的多个因素, 因此不同研究者提取的面积结果往往不同。为保持绿潮提取标准的统一, 本文采用一位研究者的提取数据。孙晓^[95]基于高时间分辨率的环境卫星 CCD 影像与 MODIS 卫星影像, 利用 NDVI 和人工解译的方法, 提取了 2011~2016 年间黄海绿潮从出现-发展-暴发-衰退-消亡的发展过程。其中, 对 2011 年的黄海绿潮, 首次监测到的黄海绿潮覆盖面积约为 15.137 km², 出现在 5 月 28 日的江苏盐城东部海域; 利用 2012 年 5 月 17 日的环境卫星影像, 监测到当年首次出现的黄海绿潮的覆盖面积约为 11.183 km²; 2013 年, 首次监测到绿潮的日期为 5 月 7 日, 在南通东部海域监测到的覆盖面积约为 12.917 km²。

本文利用上述研究中 2011~2013 年卫星监测的绿潮最初覆盖面积, 联合同年度的纆绳附生绿藻、附生浒苔的生物量, 进行年际变化的趋势分析, 结果如图 3.7 所示。

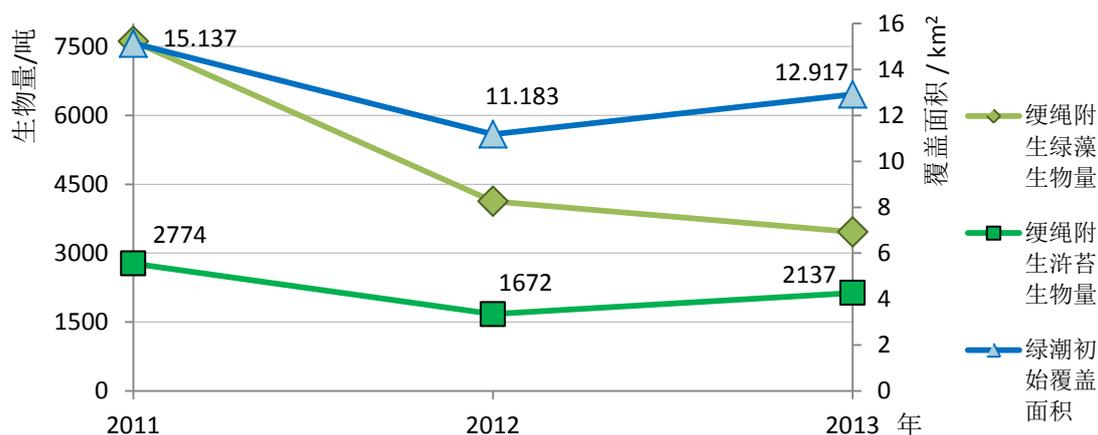


图 3.7 2011~2013 年绿潮初始覆盖面积与纜绳附生绿藻生物量的年际变化

Figure 3.7 Interannual variation of initial green tide coverage and biomass of green algae attached to raft rope from 2011 to 2013

如上图所示，黄海绿潮的初始覆盖面积在 2011 年为最大值，2012 年为最小值，呈现先降低后增大的趋势。纜绳附生浒苔的生物量年际变化同样如此，在 2011 年为最大值，2012 年降低为最小值，2013 年又呈现增加趋势，也同样小于 2011 年的生物量。而纜绳附生绿藻的生物量年际变化与两者不同，其在 2011~2013 年呈现逐年递减的趋势。这一定程度证明了黄海绿潮与纜绳附生浒苔生物量具有相关性，而与附生绿藻生物量的相关性不大。

受限于以往年度纜绳附生绿藻采样数据的缺乏，本节仅能基于 2011~2013 三个年度的数据，对绿潮初始面积与纜绳附生绿藻的相关性进行定性描述。由于样本数据少，而无法支撑相关系数计算等定量分析。相关系数是用来反映两个变量之间关联变化程度的指标，可以用来衡量两个变量之间相关性的大小，待今后更多年度的采样与覆盖面积数据的加入，则可进行绿潮初始覆盖面积与筏架附生浒苔年际变化趋势的定量分析，以从生物量的角度论证黄海绿潮与筏架附生浒苔的关系。

3.4 不确定性分析

本章研究的不确定性受以下几方面的影响：首先，在 3.2 节纜绳附生绿藻生物量估算的采样调查数据方面，我们的研究区只设立在苏北浅滩的竹根沙上，无人机航测数据和现场取样数据只是来源于竹根沙站位。而除竹根沙外，苏北

浅滩还包含蒋家沙和东沙等其它沙洲。虽然苏北浅滩的各个沙洲的气候、海洋水文等条件因素相似，但研究区单一，可能造成不能很好的代表苏北浅滩整个区域。其次，无人机拍摄网帘时，是在其正上方以垂直向下的角度拍摄，而紫菜和绿藻也是垂直向下生长的，与拍摄方向基本重合，将导致网帘下方的部分紫菜或绿藻会被上方的遮挡。航拍图片上所见到的是网帘上正射角度的图斑信息，并不完全等同紫菜与绿藻全部的图斑面积，因此将产生一定的误差。第三，在 3.1 节中，我们基于已有研究及近岸航拍结果，设定了苏北浅滩网帘样本中紫菜占比的最高值表示近岸地区的平均值。这种简化可能会对苏北浅滩紫菜产量的估算产生偏差。

为减小误差，本研究采取了以下方法进行纠正：除官方统计数据与遥感影像提取的筏架面积外，对基于无人机影像提取的紫菜、绿藻面积数据，本文进行相关计算时使用的是两者的比值，而非两者的“绝对值”，这样能降低因网帘藻类在拍摄方向上遮挡导致的偏差。

此外，下一步研究将考虑在其它沙洲增设更多的调查站位，使采样点在苏北浅滩各沙洲均匀分布。同时，对江苏近岸的紫菜养殖区设立研究区，以精确对比江苏近岸与苏北浅滩的紫菜产量差异，或力求从相关部门获得苏北浅滩紫菜的产量，以精准估算苏北浅滩的紫菜养殖产量及网帘附生绿藻的生物量。

3.5 筏架附生绿藻的流向及启示

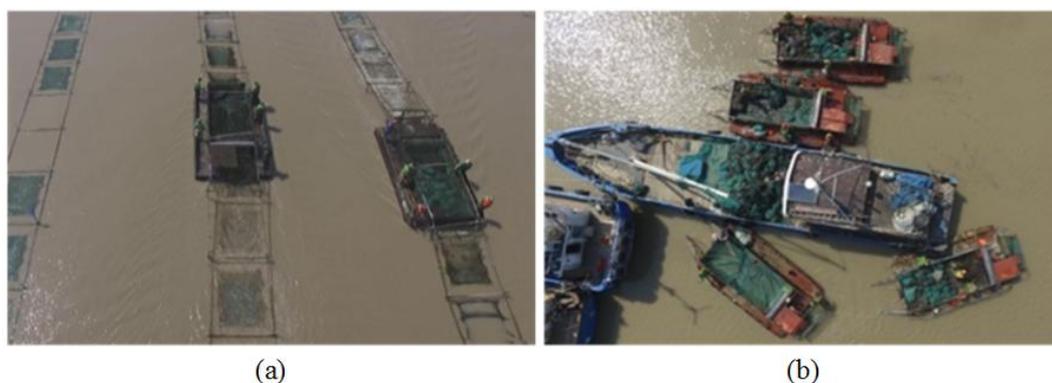


图 3.8 网帘附生绿藻的采收作业

Figure 3.8 The harvesting process for Green Algae Attached to Nursery-nets (GAAN)

注：(a) 网帘绿藻与紫菜被一起采收；(b) 紫菜收获物装船并运输到岸。

Note: (a) GAAN being harvested with *P. yezoensis*; (b) GAAN and *P. yezoensis* being

packed together.

苏北浅滩的紫菜养殖筏架为绿藻微观繁殖体提供了附着基，紫菜叶状体在网帘上生长时，绿藻的微观繁殖体也会附着在网帘上生长，甚至在紫菜网帘上盖住紫菜，降低紫菜的产量和品级率^[86, 87]。在紫菜采收时，网帘上的绿藻随紫菜被一起采收（图 3.8a），并一起打包由船运到岸上（图 3.8b），然后在紫菜加工厂内绿藻被剔除，增加了紫菜加工的成本。因此，网帘附生绿藻是紫菜养殖业的灾害之一，给江苏紫菜养殖业造成了巨大的损失。

筏架附生绿藻在生长过程中自然脱落的生物量低，张清春等^[88]通过现场试验测定绳附生绿藻的自然脱落率仅为 $3.58\% \pm 0.78\%$ 。但在筏架回收作业时（图 3.9a），绳附生的大量绿藻则被农用机械直接刮落（图 3.9b），遗弃在潮滩上（图 3.9c），并在下一个潮周期随潮流进入黄海，形成零星漂浮的小斑块及较小条带。随着海温升高，漂浮绿藻吸收海水中充足的营养盐，生物量迅速扩大，同时在黄海夏季季风和北向表层流的作用下，向黄海北部漂移^[12, 25]，并渐渐聚集成大条带和大斑块，最终形成大规模绿潮^[14]。因此，绳上刮落的绿藻被认为是黄海大规模漂浮绿潮的最初来源^[8, 9]。

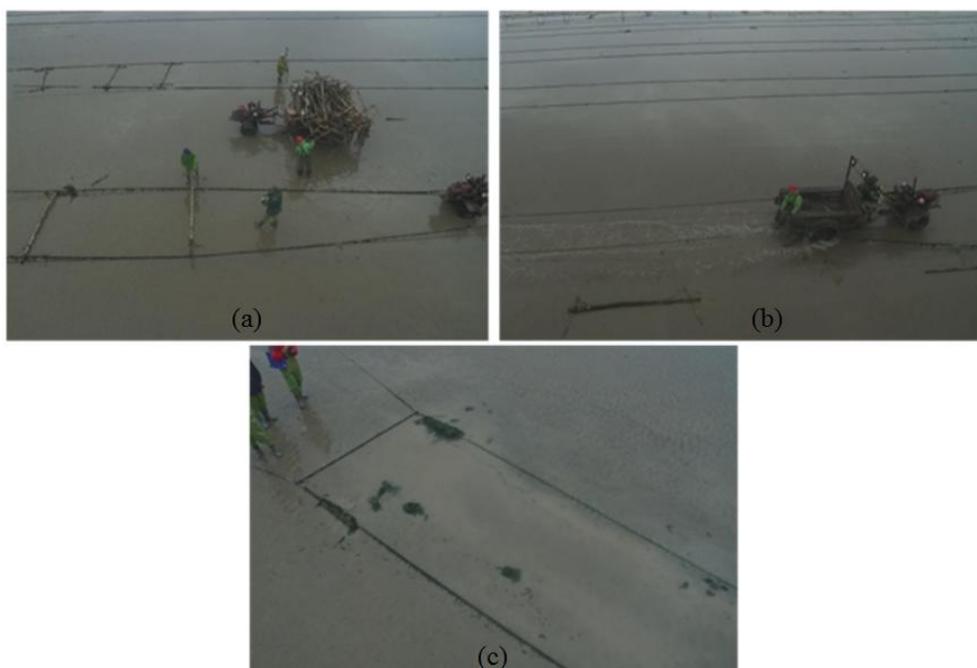


图 3.9 绳附生绿藻的处置流程

Figure 3.9 The processing method for green algae attached to rope (GAAR)

注：（a）回收筏架的支架，竹竿上的绿藻将被送回岸；（b）刮除绳附生绿藻；（c）

刮除绿藻后的纜绳，以及遗落在浅滩的绿藻。

Note: (a) Withdrawal and recycling of aquaculture rafts, where green algae attached to bamboo poles is brought ashore; (b) GAAR being scraped off; (c) GAAR being abandoned on the tide flats.

针对黄海大规模绿潮的防控措施已有了诸多研究，一些成果措施也已经实施。如青岛在一些重要的近岸区设置拦截网，并组织人工和船只打捞侵入的绿藻，并对打捞的绿藻开展资源化应用研究，已开发研制了海藻肥料、双藻糖肽产品等绿藻农用制品^[6]。尽管打捞的绿藻可进行资源化利用^[96]，但只能部分弥补绿潮导致的经济损失^[5]。有项目组研究了绿潮前置打捞的时间与区域，并于2016年，结合卫星遥感锁定合适的打捞地点与打捞时间，在盐城附近海域打捞绿藻1040吨，降低了山东近岸打捞的压力^[6]，这种被动打捞的操作难度和成本代价仍巨大。利用改性黏土等可以去除海水中绿藻微观繁殖体^[26]，但该方法较适合封闭或半封闭的海湾湖泊等，由于绿藻的微观繁殖体广泛存在于水体和沉积物中，对面积接近22 740 km²^[97]且开阔的苏北浅滩无可操作性。2019年11月，在苏北浅滩开展的使用次氯酸钠杀灭筏架附生绿藻的现场试验，虽然能明显的去除绿藻，但喷洒的药剂也影响到了筏架网帘上的紫菜，并且大量的药剂可能影响水中及底栖生物的生长繁殖^[98]。改变回收筏架等紫菜作业方式，杜绝将养殖筏架上附生绿藻直接刮落并遗弃在浅滩上，可能是短期内减少黄海绿潮规模最经济可行的控制方式^[88]。自然资源部在2019年11月至2020年7月期间，与江苏省共同开展了苏北浅滩紫菜养殖筏架回收作业的新试验，要求紫菜筏架须在5月8日前完成回收活动，并要求了纜绳附生绿藻不得人为清理遗弃到浅滩上，同步开展的海上与卫星遥感监测结果表明，2020年浒苔的规模和生物量确实远小于往年^[98]。以上实施的防控措施旨在减小绿潮漂移到山东沿岸城市的规模，降低对山东地区的影响，却没有兼顾筏架附生绿藻对江苏紫菜养殖业的危害。

绿藻的微观繁殖体发育成藻体首先要经过附着才能萌发，绿藻的附着萌发期是其生长一个必不可少的阶段。相较于海泥、细砂和石块等自然材料，紫菜养殖筏架更加适合绿藻生殖细胞的附着萌发^[99]，现场调查发现紫菜养殖筏架上的纜绳、网帘和毛竹都附生了大量绿藻。如果研发有效的筏架新材料或对已有

材料进行处理，力求显著减少绿藻在筏架绳索和网帘的附着及萌发，进而可极大降低筏架上的绿藻生物量，对江苏的紫菜产业与山东的绿潮防控都有重要意义。降低筏架附生绿藻源头的生物量，同时减轻对江苏、山东两地的危害，才是最优的防控策略。

3.6 本章小结

紫菜养殖是江苏的重要海水养殖产业，网帘附生绿藻严重损害了紫菜养殖业的收益，筏架绳索上的附生绿藻则是黄海绿潮的重要“种源”，对网帘、绳索附生绿藻生物量的综合研究之前少有报道。本研究综合应用无人机、卫星遥感、现场采样调查等手段，提出了筏架网帘和绳索附生绿藻生物量的估算方法，图形化的技术流程图如附录 3 所示。

对网帘附生绿藻生物量的估算，基于无人机数据，提取并估算出 2017 年苏北浅滩筏架网帘上紫菜与绿藻生物量的比值约为 0.6115，结合统计数据估算出网帘附生绿藻生物量约为 8877 吨。对绳索附生绿藻生物量的估算，首先提取了 2017 年苏北浅滩紫菜养殖筏架面积约为 34.4372 万亩，结合筏架的分布模型，得到苏北浅滩上网帘数量为 464.74 万张，估算出筏架绳索的附生绿藻生物量约为 2981 吨，并依据采样调查中浒苔所占绳索附生绿藻的比例，估算了其中附生浒苔的生物量约为 447 吨。

利用绳索附生绿藻生物量的估算方法，计算出 2011~2013 年筏架绳索上附生绿藻生物量分别为 7617、4132 和 3465 吨，附生浒苔的生物量分别为 2774、1672 和 2137 吨。同时，结合已有研究提取的 2011~2013 年的绿潮初始覆盖面积，发现其与绳索附生浒苔生物量的年际变化趋势基本一致，一定程度上证明了黄海绿潮与筏架附生浒苔具有较大相关性。

苏北浅滩的筏架附生绿藻对山东、江苏两省都造成了巨大损失，已实施的防控措施大多只是着眼于如何降低黄海绿潮规模，而忽视了对江苏紫菜养殖业的影响。通过减少绿藻在养殖筏架上的附着萌发，减少筏架附生绿藻生物量才是长久之计，将同时使山东、江苏两省受益。本章研究将对黄海绿潮早期附生绿藻生物量的估算提供新的高精度方法，对绿潮灾害防控提供新的思路。

第4章 基于无人机可见光遥感的海面绿潮提取

植被指数作为绿色植被监测的重要工具，已在基于卫星影像的绿潮提取工作中得到大量应用。由于无人机可见光相机只具备红、绿、蓝三个波段，NDVI、EVI 和 FAI 等典型植被指数并不适用于无人机可见光遥感，已有的少量可见光植被指数也多源于陆地遥感应用。而无人机遥感能弥补卫星遥感在影像分辨率、时效性等方面的不足，将普遍搭载可见光相机的无人机应用到绿潮研究领域，首先需要一种适合可见光图像与海上绿潮光谱特征的植被指数。借鉴 FAI 与 VB-FAH 指数的构建思想，本章将构建一种适用于无人机可见光遥感的新植被指数，并验证其对绿潮提取的可靠性。

4.1 基于可见光波段的漂浮藻类指数构建

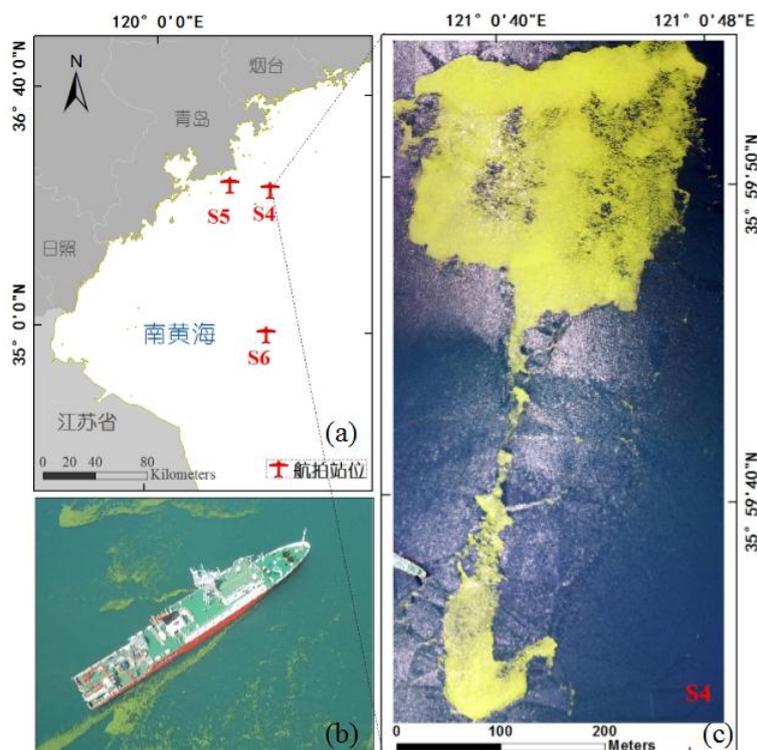


图 4.1 海上研究区站位、科考船与绿潮正射影像

Figure 4.1 Sites of marine study area, research vessel and the orthophoto of green tide

注：(a) 海上研究区与航拍站点；(b) 无人机拍摄的调查船与海面绿潮；(c) 站点 S4 处绿潮的数字正射影像。

Note: (a) Study area and aerial photography sites; (b) the research vessel and floating green algae on the sea, shot by UAV; (c) Digital orthophoto map of green tide at site S4.

在黄海的 S4 站位 (图 4.1a), 以中国科学院海洋研究所的“科学三号”科考船 (图 4.1b) 为起降平台, 于 2019 年 6 月 19 日 13 时, 利用大疆悟 1 无人机对海上漂浮的绿潮斑块进行正射航拍。无人机航拍高度为 320 米, 作业时天气晴朗 (表 2.2), 所获取影像受大气因素的影响可忽略。获取正射图像后, 使用 Pix4Dmapper 软件进行拼接, 生成空间分辨率为 0.12 m 的绿潮正射影像, 应用 Arcmap 软件裁切出其中 317 m×662 m 的矩形区域影像 (图 4.1c) 来构建新的漂浮藻类指数, 影像为可见光图像, 只具有红、绿、蓝三个波段。

海上漂浮的绿潮藻斑块为浒苔, 为海洋大型绿色藻类, 使用 USB4000 微型光纤光谱仪所测的浒苔光谱曲线如图 4.2a, 可见浒苔在绿光和近红外波段具有较强的反射作用, 在蓝光和红光波段具有吸收作用。图 4.1c 所示的无人机可见光影像中主要包括浒苔与海水两种地物类型。对每种地物分别选取一定数量的代表区域, 统计两者在红、绿、蓝 3 个波段中的像元平均值, 由统计结果 (图 4.2b) 可知: 浒苔的像元值满足 $R_{green} > R_{red} > R_{blue}$, 即: 在绿光波段的反射率最大, 其次是红光波段, 蓝光波段的反射率最小, 与图 4.2a 中浒苔的地物光谱曲线吻合; 海水的像元值关系为 $R_{blue} > R_{green} > R_{red}$ 。

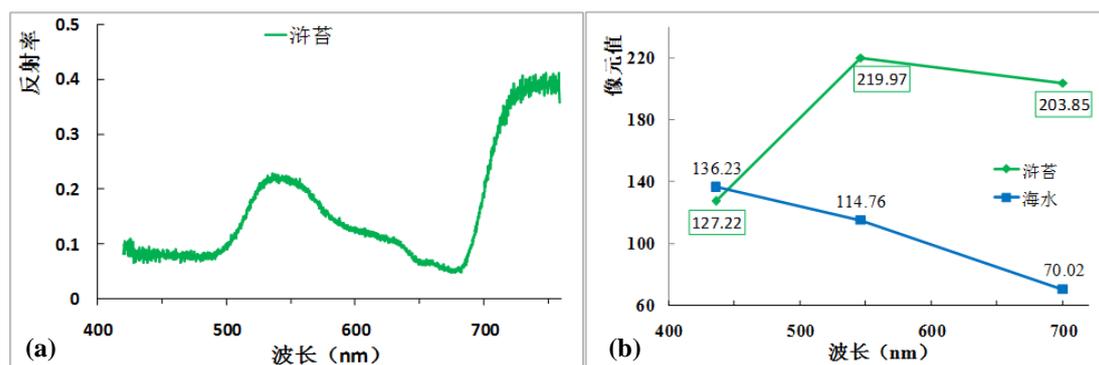


图 4.2 浒苔的光谱特征

Figure 4.2 Spectral characteristics of *U. prolifera*

注: (a) 浒苔的光谱曲线; (b) 浒苔与海水在红绿蓝三个波段的平均像元值。

Note: (a) Reflectance spectra of *U. prolifera*; (b) the pixel mean values of *U. prolifera* and seawater in red-green-blue bands.

为优化 MODIS 等卫星影像对绿潮的提取精度，Hu^[51]基于基线校正方法构建了 FAI 指数，其公式为：

$$FAI = (R_{nir} - R_{red}) - (R_{swir} - R_{red}) * (\lambda_{nir} - \lambda_{red}) / (\lambda_{swir} - \lambda_{red}) \quad \dots(4.1)$$

其中，下标 *nir*、*red*、*swir* 分别表示近红波段、红波段、短波红外波段，*R* 和 λ 分别表示各波段的反射率和中心波长。FAI 使用红波和短波红外形成基线，然后用近红外波的反射率减去基线反射率（图 4.3a）。Xing 等^[52]同样基于基线校正的方法，对缺少短波红外波段的环境卫星影像，利用近红外与红、绿三波段，构建 VB-FAH 指数（图 4.3b）来提取海上绿潮。基线校正方法可消除不同气溶胶类型或薄云等因素的扰动^[59]，便于形成明显的阈值来提取绿潮。

对于无人机 RGB 影像中的绿潮，综合考虑浒苔的地物光谱曲线（图 4.2a）及可见光影像中浒苔与海水的光谱特征（图 4.2b），即：绿光波段对浒苔具有较强的反射特性，而红光和蓝光波段具有吸收特性。因此采用与 FAI、VB-FAH 同样的基线校正方法，应用蓝光和红光波段作为基线，测量绿光波段反射率的高度值，如图 4.3c 所示，由此构建出基于可见光波段的漂浮藻类指数 RGB-FAI（RGB -Floating Algae Index）。

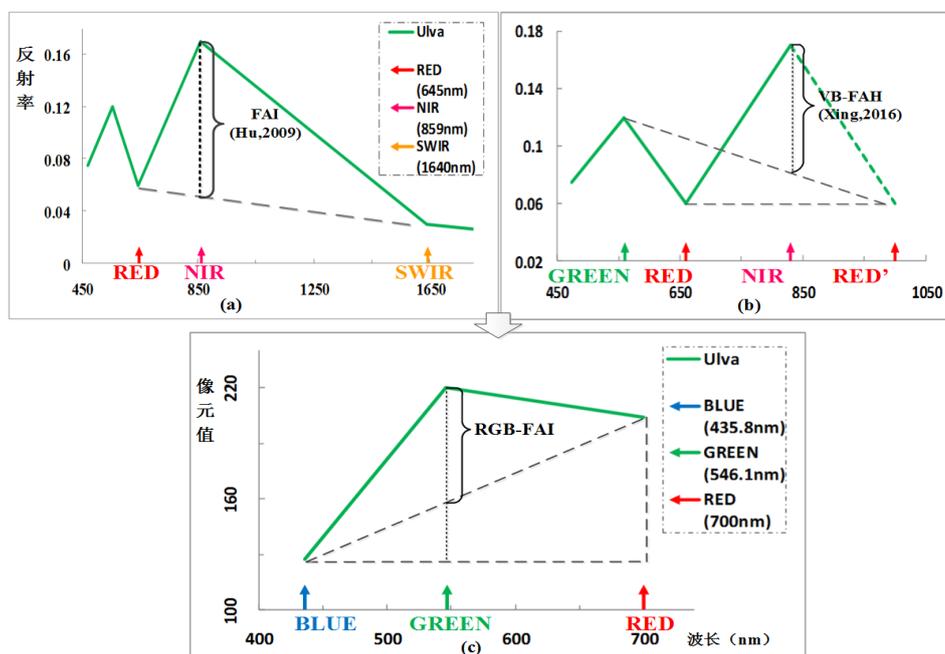


图 4.3 三种指数的构建原理图

Figure 4.3 Illustration of three indices

注：(a) 为 FAI (改绘自 Hu^[51])；(b) 为 VB-FAI (改绘自 Xing^[52])；(c) 为 RGB-FAI。

Note: (a) FAI (modified from Hu^[51]); (b) VB-FAH (modified from Xing^[52]); (c) RGB-FAI.

RGB-FAI 用于提取可见光影像中的海上漂浮绿潮，其算术公式如下：

$$RGB - FAI = (R_{green} - R_{blue}) - (R_{red} - R_{blue}) * (\lambda_{green} - \lambda_{blue}) / (\lambda_{red} - \lambda_{blue}) \dots (4.2)$$

其中，下标 *red*、*green*、*blue* 分别表示红光波段、绿光波段、蓝光波段，*R* 与 λ 则分别表示各波段的反射率与中心波长，对本研究使用的可见光相机， $\lambda_{red}=700 \text{ nm}$ ， $\lambda_{green}=546.1 \text{ nm}$ ， $\lambda_{blue}=435.8 \text{ nm}$ [100]。

4.2 绿潮提取与精度评价

目前已有的百余种植被指数大多基于卫星遥感的多光谱或高光谱波段，对仅基于可见光波段的植被指数则较少，主要有归一化绿红差异指数 (NGRDI) [53]、归一化绿蓝差异指数 (NGBDI) [54]、红绿蓝植被指数 (RGBVI) [55]、可见光波段差异植被指数 (VDVI) [57] 和过绿植被指数 (EXG) [56]，计算公式如式 (4.3) ~ (4.7) 所示。本文将利用 RGB-FAI 与这些可见光植被指数分别提取无人机可见光影像中的绿潮，并对提取结果进行精度评价和对比。

$$EXG = 2 * R_{green} - R_{red} - R_{blue} \dots (4.3)$$

$$NGBDI = (R_{green} - R_{blue}) / (R_{green} + R_{blue}) \dots (4.4)$$

$$NGRDI = (R_{green} - R_{red}) / (R_{green} + R_{red}) \dots (4.5)$$

$$RGBVI = (R_{green}^2 - R_{red} * R_{blue}) / (R_{green}^2 + R_{red} * R_{blue}) \dots (4.6)$$

$$VDVI = (2 * R_{green} - R_{red} - R_{blue}) / (2 * R_{green} + R_{red} + R_{blue}) \dots (4.7)$$

4.2.1 可见光影像的绿潮提取方法

从遥感影像中提取海上漂浮绿潮可主要分为如下几步：首先计算植被指数，然后设定阈值作为区分绿藻与非绿藻的标准，并进行分类提取。最后，进行分类结果的精度评价。

阈值的选取是影响提取精度的关键，本研究采用双峰直方图法确定各植被指数的阈值。双峰直方图法是指植被指数的图像中含有两个明显的波峰，两个波峰对应于对象内部和外部较多数目的点，波谷对应于对象边缘附近相对较少数目的点 [82]，则波谷对应的数值即为最佳阈值。

Kappa 系数是用来评估分类结果与真实值一致性的重要统计方法 [101]。本研究中，首先对每幅影像分别生成 1000 个随机点，以求尽可能广地覆盖影像。然后，通过参照清晰的原始影像，将这些随机点标明其代表的真实类型（海水或

者浒苔)。最后,通过对比六种分类结果图与这些随机参照点,获取六种植被指数分类精度的混淆矩阵与 Kappa 系数,以进行分类结果的精度评价。Kappa 系数的精度评价结果被分为六组,以代表不同的等级,分别为-1~0(缺少一致性); 0.01~0.20(极低一致性); 0.21~0.40(一般一致性); 0.41~0.60(中等一致性); 0.61~0.80(高度一致性); 以及 0.81~1.00(几乎完全一致); 当 kappa=1 时,表示完全符合真实情况^[102]。

4.2.2 不同植被指数提取结果的评价

为验证 RGB-FAI 对绿潮的提取精度,将其与另外 5 种可见光植被指数的绿潮提取结果进行对比。根据可见光植被指数公式(4.2)~(4.7),利用 ENVI,分别计算海上绿潮影像(图 4.1c)的各植被指数,得到六种植被指数的空间分布(图 4.5a)。其中,NGBDI、NGRDI、RGBVI 和 VDVI 值的范围为[-1,1],EXG 与 RGB-FAI 的值域为[-255,255]。然后对六种植被指数图,作出它们的图像直方图,如图 4.4 所示。

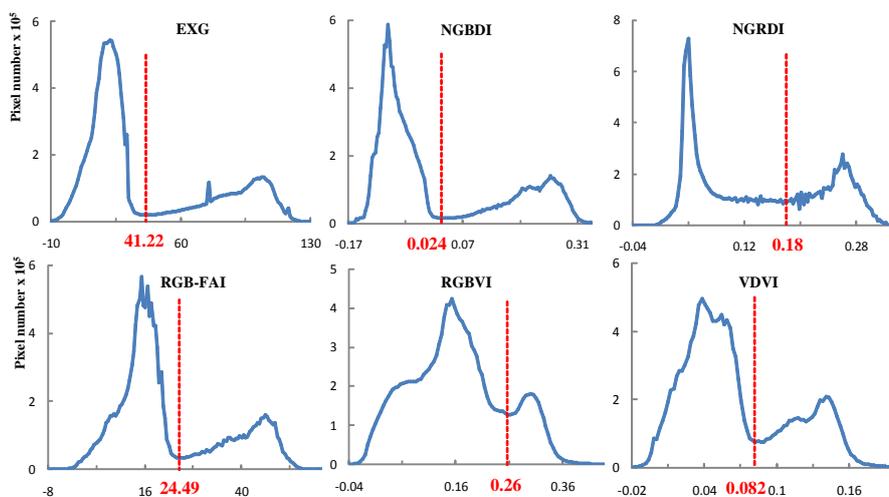


图 4.4 六种植被指数的统计直方图

Figure 4.4 The histograms of six indices

注:红色虚线表示分割阈值。

Note: Red figures and dotted line represent the selected threshold.

直方图中横坐标为各植被指数的数值,纵坐标为像元数量。六种植被指数的直方图都具有较明显的双峰特征,利用双峰直方图阈值法确定各植被指数的阈值(图 4.4 中的红色数字和虚线表示分割阈值),然后根据各阈值提取浒苔,

得到各植被指数对应的浒苔分类结果，如图 4.5b 所示。

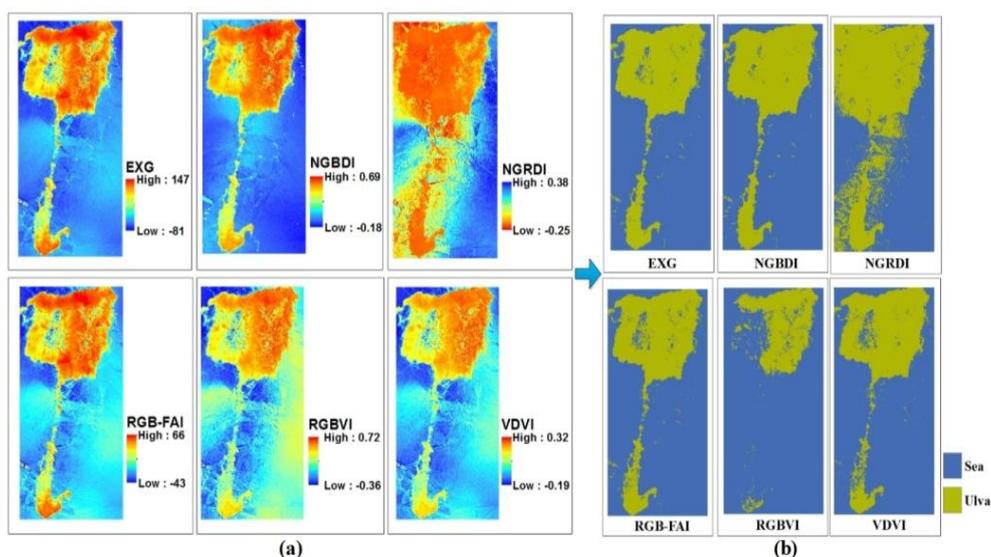


图 4.5 六种植被指数图与分类结果

Figure 4.5 Six vegetation indices images and classification results

在原始影像上生成 1000 个随机验证点（见附录 4，S4），利用无人机高清影像中绿藻与海水很容易目视识别的特点，对 6 种分类结果计算 Kappa 系数，以评价各植被指数的提取精度，分类精度结果如表 4.1 所示。

表 4.1 六种指数的分类精度

Table 4.1 Accuracy assessment of the six classified images

植被指数	精度 /%		总体精度/%	Kappa 系数
	绿潮	海水		
EXG	98.35	99.28	99.00	0.976
NGBDI	99.34	98.28	98.60	0.967
NGRDI	99.34	76.15	83.18	0.655
RGB-FAI	94.39	99.43	97.90	0.950
RGBVI	57.10	99.86	86.89	0.647
VDVI	92.74	98.13	96.50	0.916

根据分类精度结果可知，NGRDI 与 RGBVI 指数提取漂浮绿藻的效果不佳，Kappa 系数仅在 0.65 左右，VDVI 的提取精度次之。而 RGB-FAI 的 Kappa 系数高达 0.95，与精度最高的 EXG 指数的 kappa 只相差 0.026，RGB-FAI 处于分类

效果最好的等级中。

4.3 RGB-FAI 提取绿潮的可靠性验证

上一节的精度评价结果表明, RGB-FAI 对绿潮的提取精度较高。为了验证 RGB-FAI 指数的适用性与可靠性, 本文选取 2019 年 7 月 23 日上午 8 时, 在南黄海 S5 站位(图 4.1a)航拍的绿潮可见光图像, 生成海上绿潮的数字正射影像。该站位无人机航拍高度为 400 米, 影像的空间分辨率为 0.15 米, 截取其中宽 460 米、长 835 米的矩形区域(图 4.6a), 基于 RGB-FAI 指数, 使用与 4.2 节同样的方法提取绿潮信息, 可得到 RGB-FAI 的植被指数图(图 4.6b)与海上绿潮的分类结果图(图 4.6c)。

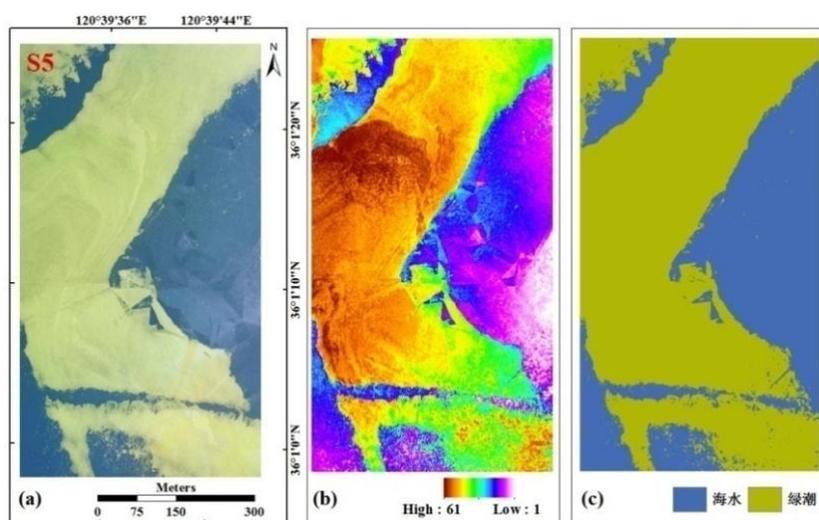


图 4.6 无人机影像中的绿潮提取步骤

Figure 4.6 Extraction steps of green tide from UAV images

注: (a) 无人机遥感的绿潮正射影像; (b) RGB-FAI 指数图; (c) RGB-FAI 指数的分类结果。

Note: (a) UAV-based digital orthophoto map of green-tide; (b) vegetation index image of RGB-FAI; (c) classified image of RGB-FAI.

为评价基于 RGB-FAI 的 S5 站位的海上绿潮提取精度, 采用同样的评价方法, 在原始影像上生成验证点(见附录 4, S5), 进行绿潮信息提取结果的精度评价。基于误差矩阵表获得生产者精度和用户精度(表 4.2), 并计算总精度和 Kappa 系数。

表 4.2 基于 RGB-FAI 分类结果的混淆矩阵

Table 4.2 Confusion matrix of classified image using RGB-FAI

	海水	绿潮	总行数	用户精度/%
海水	361	16	377	95.76
绿潮	7	616	623	98.88
总列数	368	632	1000	
生产者精度 /%	98.10	97.47		

根据表 4.2 的精度评价,该影像中漂浮绿潮的总体提取精度为 97.7%, Kappa 系数为 0.9508, 根据 Kappa 系数的精度评价标准, 表示分类结果与实际几乎完全一致。基于以上验证结果, 认为 RGB-FAI 能够满足海上绿潮高精度提取的要求。

4.4 薄雾条件下对衰退期绿潮的提取

黄海绿潮在 7~8 月进入衰退期, 与之前的生长暴发期相比, 浒苔藻体的叶绿素含量下降, 藻体的颜色由绿色变为黄绿色或黄色, 藻体细胞间隔增大, 部分细胞出现颗粒化^[103], 色素和细胞结构的变化将直接影响植被的波谱特征。原暴发期中聚集的大面积斑块也因藻体衰老和沉降, 分散成数量庞大的零散小斑块, 并占据较大比例, 这些因素都增加了衰退期绿潮遥感提取的难度。2019 年 7 月 25 日上午 7 时, 于南黄海的 S6 站位 (图 4.1a), 应用无人机航拍了一片衰退期的海上绿潮, 并生成数字正射影像 (图 4.7a), 影像分辨率为 9cm, 气象条件为通视性较差的薄雾天气。

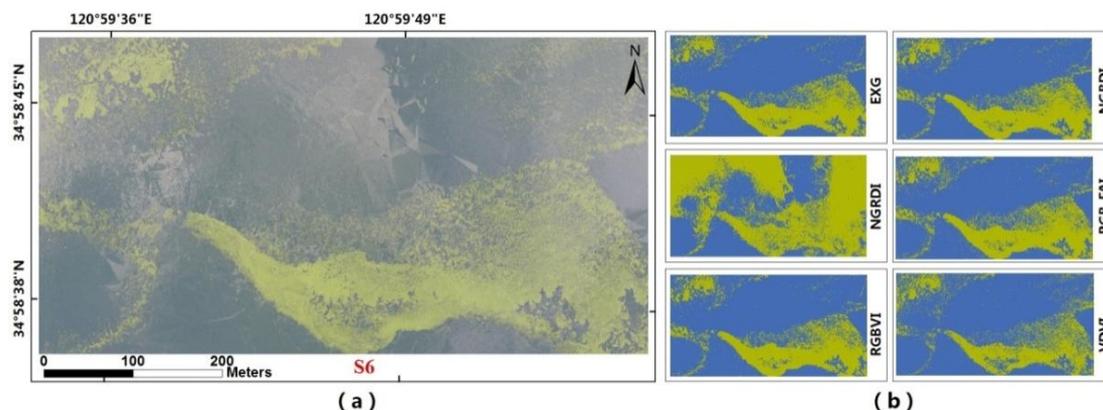


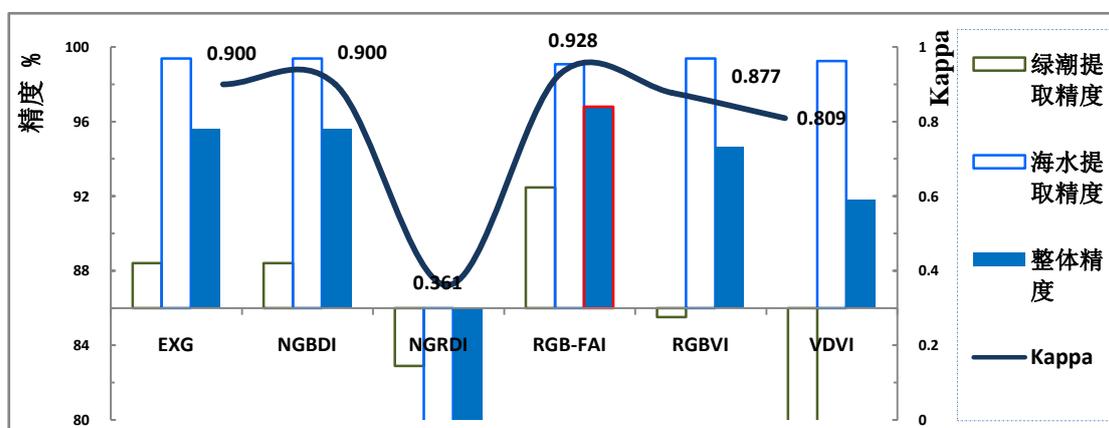
图 4.7 衰退期绿潮的提取结果对比

Figure 4.7 Extration and comparison of the declining green tide

注：(a) 薄雾天气下衰退期绿潮的无人机正射影像；(b) 六种指数的提取结果。

Note: (a) UAV-based digital orthophoto map of the declining green-tide under a hazy atmosphere;(b) the classified images of six indices.

应用与 4.2 节同样的方法，利用六种可见光植被指数（公式 4.2~4.7）对 S6 站位正射影像中的衰退期绿潮分别进行提取，生成提取结果图（图 4.7b），并利用随机生成的 1000 个验证点（见附录 4，S6）进行精度评价，提取结果的精度评价如图 4.8 所示。

**图 4.8** 六种指数对衰退期绿潮的分类精度**Figure 4.8** Accuracy assessment of six indices

注：红色轮廓线标示的 RGB-FAI 为精度最高的指数。

Note: The overall accuracy of RGB-FAI (marked by the red outline) is the highest.

由图 4.8 可知，在能见度低的气象条件下，对衰退期中的绿潮斑块，RGB-FAI 与 EXG、NGBDI 依旧处于分类精度最高的等级，Kappa 系数都大于或等于 0.9。不同于之前对晴朗天气条件下的大面积绿潮斑块，此时，RGB-FAI 分类结果的 Kappa 系数由 0.95 只降低为约 0.93，成为六种指数中提取精度最高的植被指数，显示出其在不良通视条件下，对低色素含量的衰退期绿潮可进行高精度监测的优势。

4.5 RGB-FAI 的应用潜力

海上绿潮的大条带或大斑块容易被卫星遥感监测，在绿潮发展过程中，几

十平方米和更小面积的浒苔斑块大量存在，常见于绿潮发展的早期^[9]以及衰亡期（图 4.9a~b）。即使在绿潮的暴发期，浒苔斑块在海上也存在众多零散、小面积的斑块，例如绿潮在强风作用下漂移方向的后部会有大量零散小斑块（图 4.9c~d）。钟山等^[104]研究表明，MODIS 影像对零散分布的绿潮斑块是难以兼顾的，以 HJ-1 卫星为参考时，业务化监测中提取绿潮的面积可能会被夸大 21%，不同影像空间分辨率导致的混合像元效应，将使不同卫星提取结果产生较大偏差^[105]。无人机遥感可获取厘米级的高空间分辨率影像，结合 RGB-FAI，可以对零散小面积绿潮斑块进行精确提取，能很好的弥补卫星遥感监测精度不足的缺陷。

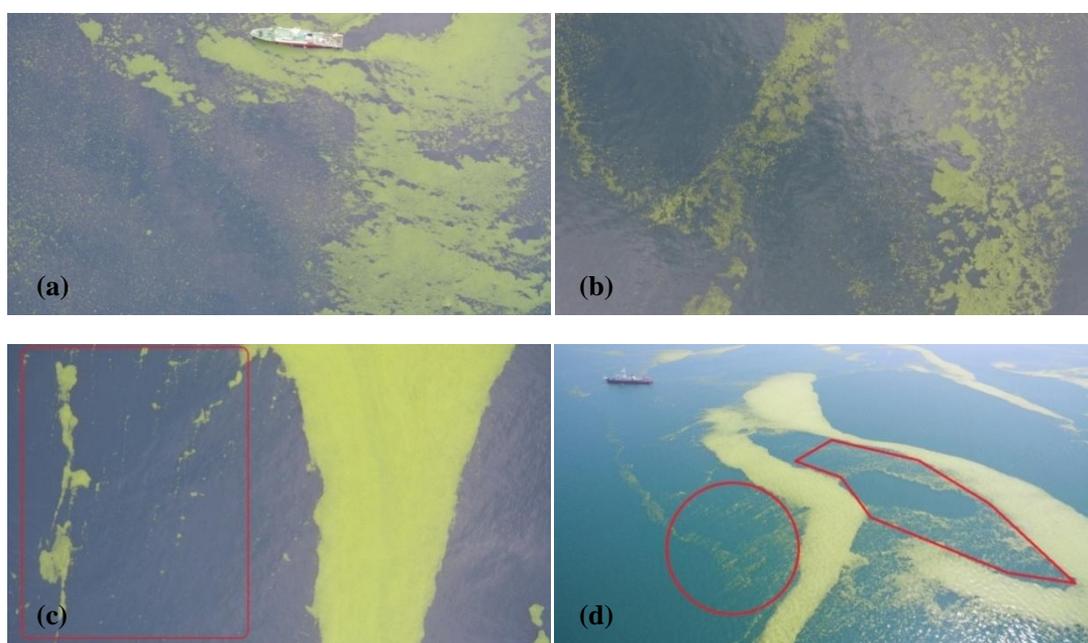


图 4.9 海上的众多零散小面积绿潮斑块

Figure 4.9 Large number of scattered small green-tide patches on the sea

注：(a)~(b)展示了绿潮在衰亡期的零散斑块；(c)~(d)显示了的生长期的绿潮大面积斑块周边仍存在着众多的小斑块。图片中绿潮斑块尺寸参照如下：图片(a)与(d)中的科考船长度为 73.3 米，图(a)~(d)的航拍高度分别为 270 米，265 米，281 米和 200 米。

Note: (a~b) show the scattered green algae patches in the declining phase; (c~d) show many small-area patches around large green-tide patch. For reference, the research vessel in picture (a) and (d) is 73.3 meters long, the height of aerial pictures from (a) to (d) successively are 270, 265, 281, and 200 meters, respectively.

RGB-FAI 指数是对无人机可见光影像提出的,而实际上,现阶段大多数卫星传感器有相似的红、绿、蓝波段,理论上也能应用 RGB-FAI 指数进行绿潮的监测,如 Landsat 卫星的 TM, ETM 和 OLI 传感器,高分与环境卫星的 CCD 传感器, S2A 卫星等。这些传感器的波段宽度与中心波长互不相同,使用时需调整公式 4.2 中 $(\lambda_{green} - \lambda_{blue})/(\lambda_{red} - \lambda_{blue})$ 的数值。需要指出的是,相比于 NDVI、FAI 等成熟的植被指数,卫星影像应用 RGB-FAI 指数监测绿潮的精度有待进一步验证,其优势是可见光波段在不同遥感平台上普遍存在,能同时应用在卫星遥感与无人机遥感。同时,求证 RGB-FAI 指数对陆地植被的适用性,可促进无人机可见光遥感的进一步发展。

基于船载无人机获取绿潮影像的方式不受云层影响,应用灵活,可借助其搭载平台-科考船对同一绿潮斑块持续追踪。除空间分辨率可达到厘米级外,还能获取同一绿潮斑块的在不同时刻的正射影像,影像的时间分辨率可达到分钟级,结合 RGB-FAI 指数,可以提取同一绿潮斑块在某时间段内的位移,从而实现绿潮漂移速度的高精度计算。

海上漂浮绿藻的生物量是绿潮研究和减灾防灾的一项重要参数,可用于评估黄海绿潮的成灾规模,但现阶段,绿潮生物量的监测与评估还缺少精确而有效的技术手段^[14]。已有学者基于地面实验建立浒苔单位面积生物量与植被指数的关系,在此基础上,构建漂浮绿潮的生物量估算模型^[61],并应用于卫星遥感影像,能实现海上绿潮生物量的估算^[59]。估算模型是基于地物光谱仪的浒苔光谱数据而构建的,而卫星传感器与地面测量之间,因大气干扰与混合像元等因素,将不可避免的存在偏差,进而影响绿潮生物量估算结果的准确性。无人机遥感受大气影响很小,其影像光谱数据更接近地面测量。因此,无人机可见光遥感可以作为地面测量与卫星遥感的桥梁,利用无人机与卫星遥感对同一绿潮斑块进行面积、生物量的计算、对比,可以实现无人机可见光遥感对卫星遥感提取结果的校正,再结合生物量密度估算模型,并发挥卫星遥感覆盖面积大的优势,可以实现黄海全海域绿潮生物量的精确估算。

4.6 本章小结

常用的植物指数利用高光谱或多光谱波段,而缺少用于海上绿潮提取的可

见光波段的植被指数。本章基于海上漂浮绿潮在无人机可见光影像的光谱特征，参照基线校正的思想，构建了一种综合利用红、绿、蓝三波段的漂浮藻类指数 RGB-FAI，并进行了可靠性验证。同时与其它常用的可见光植被指数，在不同的气象条件下，对不同生长期、不同状态的绿潮斑块进行了提取对比。结果表明：

(1) RGB-FAI 能很好地提取海上漂浮绿藻，对晴朗天气条件下暴发期绿潮提取结果的 Kappa 系数达到 0.95。

(2) 对分布零散的衰退期绿潮，与其它可见光植被指数相比，RGB-FAI 提取精度最高，Kappa 系数约为 0.93，显示了其在通视性差气象状况下提取衰退期绿潮的优势。

(3) RGB-FAI 指数结合无人机可见光遥感，能够精确提取不同生长期的绿潮斑块，对海上绿潮的漂移速度、生物量的精细估算具有较大的应用潜力。

无人机遥感获取影像的高时空分辨率是传统卫星遥感所无法比拟的，可解决以往卫星遥感监测所存在的大气干扰与混合像元问题。RGB-FAI 作为一种应用于无人机可见光遥感提取海上绿潮的新植被指数，将为绿潮的监测与研究提供高精度的技术手段。

第5章 绿潮漂移状态参量的无人机遥感估算

本文定义的绿潮漂移状态参量,是用来表征绿潮在海面漂移时的物理状态,包含黄海绿潮在海上漂移阶段的海上生物量与漂移速度两个物理量。绿潮藻从苏北浅滩进入黄海后,边漂移边生长,其漂移速度与生物量为不断变化状态。绿潮生物量是绿潮研究与防灾减灾的重要参数,黄海绿潮的生物量监测与评估还缺乏有效的高精度方法^[14]。绿潮漂移速度与方向是绿潮灾害预警与防控工作的重要参考,漂移速度的已有研究数据多源于卫星遥感。但卫星影像极易受到天气及云层干扰,不能满足绿潮灾害应急监测的要求,其影像的低空间分辨率也降低了绿潮提取及速度估算的精度。

要准确估算绿潮漂移时的状态参量,需要在高精度水平上开展工作,需要高分辨率的技术进行支撑。无人机遥感具有高时空分辨率、不受云层干扰、方便灵活等优势,利用船载无人机遥感获取海上绿潮双时相的数字正射影像,结合 RGB-FAI 指数与水池实验构建浒苔生物量密度的估算模型等,可以实现对绿潮海上生物量与漂移速度的估算。

5.1 基于无人机遥感的绿潮漂移生物量的估算

绿潮漂移生物量的估算,是研究绿潮规模、预警以及制定防控措施的关键。以往海上绿潮生物量的估算,多通过航次定时定速水平拖网的方式评估海上绿潮生物量密度,也有学者利用卫星遥感,结合浒苔生物量密度与 FAI 指数的拟合公式进行估算。海上绿潮的生物量密度是指单位面积海域的绿潮藻重量,可用 kg/m^2 表示。本章节的海上绿潮生物量估算,将利用船载无人机遥感的高空间分辨率的绿潮正射影像。估算方法概述如下:首先基于水池实验构建单位面积浒苔生物量与 RGB-FAI 的估算模型;然后,对无人机正射影像中的绿潮计算其 RGB-FAI 的植被指数图;进而利用浒苔生物量密度估算模型,实现该影像中绿潮生物量的计算。同时,本节将估算不同生长阶段的绿潮生物量,并分析其变化特征。

5.1.1 基于 RGB-FAI 的浒苔生物量估算模型构建

由于海上绿潮随风与海流不断漂移，基于调查船对海上绿潮的生物量取样和现场光谱测量存在较大困难，已有研究^[59]将绿潮藻（浒苔）打捞上岸，利用岸上的水池装置，开展浒苔不同生物量与对应光谱的测定实验，其实验方案如下：水池实验采用边长 1.2 米、深 0.3 米的正方体装置，使用黑色塑料作为水池装置的池底与池壁，以在测定水面浒苔光谱时减少来自池底、池壁反射光的干扰，使用光谱仪在水池中心正上方 2.5 米处，垂直向下测定水池浒苔和海水的反射率，在连接的电脑端记录光谱数据。实验开始后，首先将收集到的浒苔装入网袋中摇晃以甩出多余水分，使用精度为 1 克的秤进行称重。然后将适量海水倒入水池后，先放置 0.2 kg 湿重的浒苔到水池中，使其在水面尽量散开，使用光谱仪测定此生物量状态下漂浮浒苔的反射率，同时在水池正上方拍照记录漂浮浒苔图像。然后依次增添 0.2 kg 湿重的浒苔并使其在水面散开后，再次测其光谱、拍照，直至水池中加入浒苔的总湿重为 8 kg，即浒苔生物量密度从 0.14 kg/m² 增加到 5.55 kg/m²，这样得到了不同生物量浒苔的反射光谱曲线。以该水池实验获取的这些光谱数据，构建了浒苔单位面积生物量的地物光谱模型，并进行了验证。

由于基于可见光波段的漂浮藻类指数 RGB-FAI 与无人机海上获取的绿潮影像，都是基于可见光图像的红、绿、蓝三波段，因此本文引用上述研究在水池实验中漂浮浒苔不同生物量密度的 RGB 图像，并去除这些图像中与浒苔、海水不相关的池壁等地物。利用 ENVI 软件提取这些图像在红、绿、蓝三个波段的光谱信息，并统计不同浒苔生物量图像在三个波段的平均值，按照 RGB-FAI 的计算公式 (4.2)，计算出各生物量密度所对应的 RGB-FAI 值，如表 5.1 所示。

表 5.1 不同生物量密度浒苔在红绿蓝三波段的均值及 RGB-FAI 值

Table 5.1 Mean value of R,G,B bands and RGB-FAI value of *U.prolifera* with different biomass density

No.	生物量密度 (kg/m ²)	R 均值	G 均值	B 均值	RGB-FAI 值
1	0.14	150.653	152.056	142.102	6.384
2	0.28	129.882	133.709	118.284	10.583
3	0.42	142.011	146.108	122.006	15.750
4	0.56	144.003	150.254	113.678	23.916

续表

No.	生物量密度 (kg/m^2)	R 均值	G 均值	B 均值	RGB-FAI 值
5	0.70	143.055	149.891	100.167	31.819
6	0.83	153.923	167.903	103.619	43.283
7	0.98	149.472	163.941	93.953	46.810
8	1.39	164.576	179.911	92.169	57.513
9	1.94	163.833	184.046	81.755	68.025
10	3.33	175.804	195.871	92.488	68.600
11	4.44	176.578	196.867	82.127	75.308
12	5.55	168.659	192.246	74.410	78.488

水池实验中浒苔的不同生物量密度与 RGB-FAI 值所对应的池面图像如图 5.1 所示。

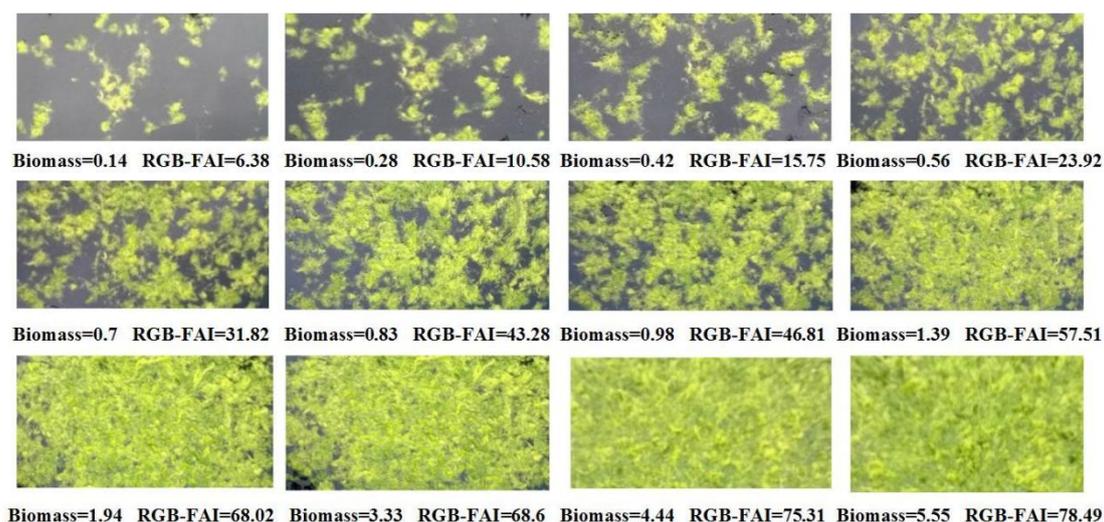


图 5.1 不同生物量密度浒苔的图像与 RGB-FAI 值 (图像改绘自 Hu 等^[59])

Figure 5.1 Images and RGB-FAI values of *U. prolifera* with different biomass density, modified from Hu^[59]

由图 5.1 的图像可知, 当浒苔生物量密度从 $0.14 \text{ kg}/\text{m}^2$ 到 $1.39 \text{ kg}/\text{m}^2$ 时, 浒苔未完全覆盖住水池表面; 当密度达到 $1.94 \text{ kg}/\text{m}^2$ 时, 浒苔已覆盖满池面, 之后再向水池添加浒苔, 由于浒苔在池面已基本达到饱和, 池面的外观改变很小。基于表 5.1 中浒苔在不同生物量密度下所对应的 RGB-FAI 值, 两者的对应关系如图 5.2 中的黑色实线所示。

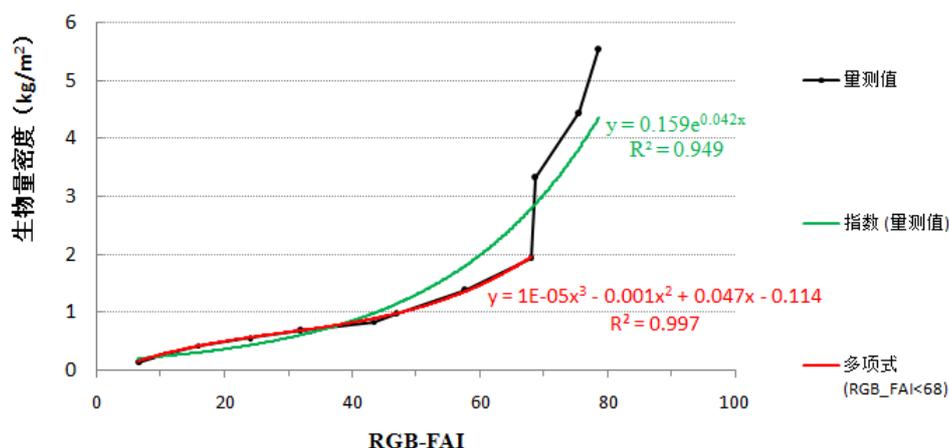


图 5.2 浒苔的生物量密度与 RGB-FAI 值的拟合曲线图

Figure 5.2 The fitting curve plot showing the relationship between the biomass density of *U.prolifera* and RGB-FAI value

由浒苔生物量密度与 RGB-FAI 的对应曲线可知，整体上，RGB-FAI 是关于浒苔生物量密度的单调增函数。基于该曲线与表 5.1，可发现如下结果：当 RGB-FAI 值小于或等于 68 时，RGB-FAI 与生物量密度近似为单调递增的线性函数关系；当 RGB-FAI 大于 68 时，随着浒苔生物量的再增加，RGB-FAI 值已接近稳定，且 RGB-FAI 随之的增长量，不再是线性关系。这与水池实验中，当添加的浒苔基本覆盖满水面后，池面外观状况不再发生较大改变相一致。基于以上分析，构建浒苔生物量密度与 RGB-FAI 值的拟合曲线，并基于最小二乘拟合法，生成曲线公式，即基于 RGB-FAI 指数的浒苔生物量密度估算模型，如公式 5.1 所示：

$$f(x) = \begin{cases} 1 \times 10^{-5} * x^3 - 0.001 * x^2 + 0.047 * x - 0.114, & 0 < x_{max} \leq 68 \\ 0.159 * e^{0.042 * x}, & 68 < x_{max} \end{cases} \dots(5.1)$$

其中， x 为 RGB-FAI， $f(x)$ 为浒苔生物量密度，单位为 kg/m^2 。当图像的 RGB-FAI 最大值 x_{max} 小于或等于 68 时，构建的拟合公式为一元三次多项式函数（如图 5.2 的红色曲线），公式的拟合优度 R^2 为 0.997；当 x_{max} 大于 68 时，拟合公式为以自然常数 e 为底的自然指数函数（如图 5.2 的绿色曲线），公式的拟合优度 R^2 为 0.949。拟合优度 R^2 是指拟合曲线对量测值的拟合程度， R^2 取值区间为 0~1，最大值为 1，其值越接近 1，说明曲线对量测值的拟合程度越好。由此可说明，公式 5.1 的拟合程度较优。需要说明的是，在实际海面绿潮中，由于海面足够宽阔，且风与海浪等外力作用会使海面浒苔较充分地散开，海面浒

苔很难像水池实验因有固定边界而发生严重堆积的现象，即 RGB-FAI 最大值 x_{max} 大于 68 的现象在实际海面将很少出现。

5.1.2 基于无人机遥感的绿潮生物量估算

本节基于 RGB-FAI 指数的浒苔生物量估算模型，对无人机正射影像中的海上漂浮绿潮，进行生物量的估算。以 S5 站位的无人机正射影像为例（图 5.3a），估算步骤如下：首先，依据 RGB-FAI 的计算公式（4.2），生成该影像的 RGB-FAI 指数图，并基于阈值分割法提取出图像中的绿潮区域（图 5.3b）。然后对绿潮区域的 RGB-FAI 指数图，利用 ENVI 的统计工具获取各绿潮像元的 RGB-FAI 值（图 5.3c），以及每一个 RGB-FAI 值所对应的像元数量 N ，则图像中的绿潮生物量 W 可表示为：

$$W = \sum_{x_1}^{x_n} y_i * N_i * a^2 \quad \dots(5.2)$$

其中， x_n 表示绿潮区域包含 n 个不同的 RGB-FAI 值； i 表示第 i 个 RGB-FAI 值， y_i 为公式（5.1）所计算出的浒苔生物量密度，单位为 kg/m^2 ； N_i 为第 i 个 RGB-FAI 值所对应的浒苔像元总数量； a 表示影像的空间分辨率，单位为米。

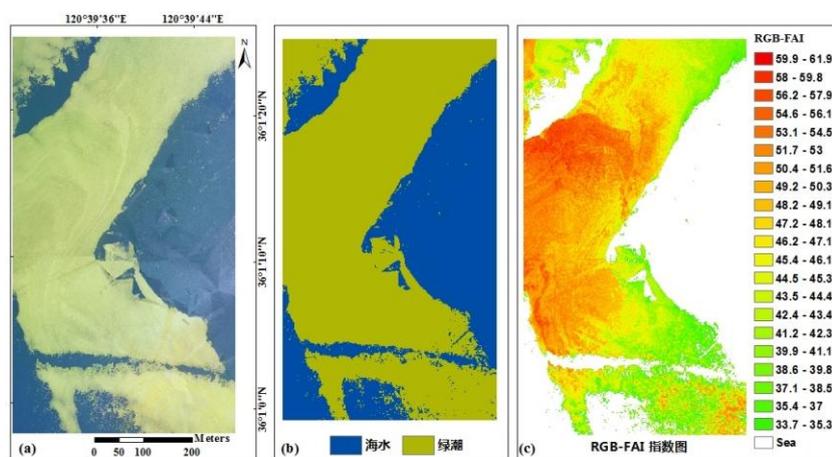


图 5.3 无人机影像中绿潮的生物量估算

Figure 5.3 Biomass estimation of green tide from UAV images

注：（a）绿潮的数字正射影像；（b）提取出绿潮区域；（c）绿潮区域中的 RGB-FAI 值分布。

Note: (a) Digital orthophoto map of green-tide; (b) extraction of green tide area; (c) distribution of RGB-FAI value in the green tide area.

S5 站位为暴发期绿潮（图 5.3a），该绿潮斑块的藻体颜色鲜绿，藻体为集聚

的大面积斑块。该站点的无人机正射影像的空间分辨率为 0.15 m，其长 836 m，宽 461 m，面积为 385 396 m²，其中，绿潮覆盖面积为 241 239 m²，占总面积的 62.6 %。该图像的 RGB-FAI 最大值为 61.9，小于阈值 68，因此计算生物量密度时，采用公式 (5.1) 中的一元三次多项式进行计算，联合公式 (5.2) 进行生物量估算。估算结果为：该影像中的浒苔生物量为 222 796 kg，绿潮区域中浒苔的生物量密度为 0.9235 kg/m²，该图像的浒苔生物量密度为 0.5781 kg/m²。

5.1.3 衰退期绿潮生物量的估算与对比

S6 站位的绿潮处于衰退期，其藻体呈现黄绿色，由于藻体活性降低后会发生沉降，形成了分布零散的大量小面积斑块 (图 5.4a)。该站点绿潮影像是 2019 年 7 月 25 日上午 7 时进行航拍作业所得 (见表 2.2)，截取的无人机正射影像为 682 m 长，348 m 宽，面积为 237 336 m²，图像的空间分辨率为 0.09 m，其中绿潮覆盖面积为 67 162.33 m²，占图像总面积的 28.3%。

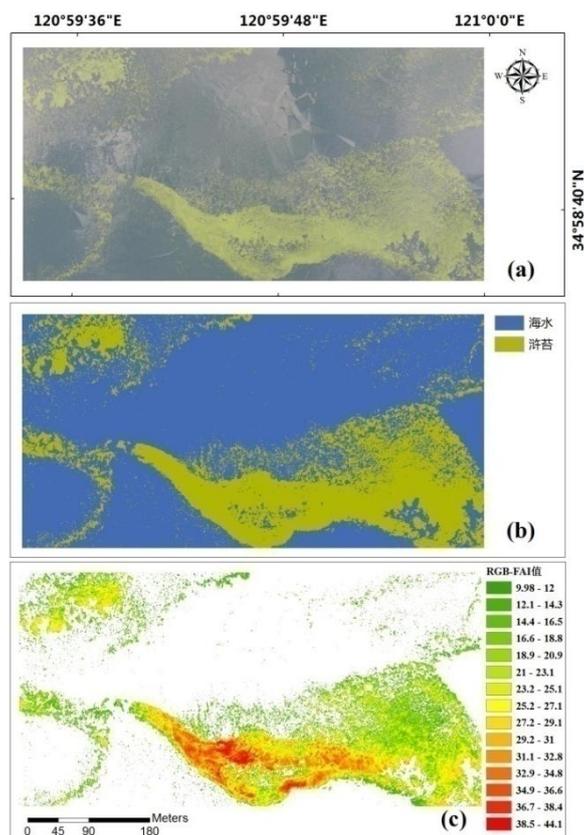


图 5.4 衰退期绿潮的生物量估算

Figure 5.4 Biomass estimation of the green tide in decline period

依据 5.1.2 节的生物量估算步骤，提取出绿潮区域 (图 5.4b)，并计算绿潮

区域的 RGB-FAI 值 (图 5.4c) 与对应的像元数量, 图像的 RGB-FAI 最大值为 44.1, 小于 68, 计算生物量密度时也采用公式 (5.1) 中的多项式函数进行计算。经计算, 该无人机影像中浒苔生物量为 35 070.41 kg, 绿潮区域中浒苔的生物量密度为: 0.5222 kg/m^2 , 整个图像的绿潮生物量密度为 0.1478 kg/m^2 。

将此衰退期绿潮的生物量计算结果与 S5 站位的暴发期绿潮斑块相对比, 结果如表 5.2 所示:

表 5.2 暴发期与衰亡期绿潮的生物量估算结果对比

Table 5.2 Comparison of biomass estimation results of the green tide between the outbreak period and the decline period

站 位	图像航拍 时间	图像面 积/ m^2	生命 阶段	绿潮面 积/ m^2	绿潮 面积 比/%	绿潮生 物量/kg	绿潮生 物量密 度 /(kg/m^2)	生物量 密度相 对变化 /%	RGB-FAI 最大值
S5	2019-7-23	385 396	暴发 期	241 239	62.6	222 796	0.9235	+76.9	61.9
S6	2019-7-25	237 336	衰退 期	67 162	28.3	35 070	0.5222	-43.4	44.1

绿潮在快速生长期与衰退期具有不同的生理形态特征。叶绿素是浒苔等藻类最重要的光合色素, 藻体中叶绿素的含量与光合作用的强弱及藻体的健康息息相关, 漂浮浒苔藻体颜色的变化, 可直接表明其处于不同的生理状态^[106]。暴发期中的浒苔, 叶绿素含量丰富, 藻体颜色为深绿色或翠绿色。浒苔藻体是由单层细胞组成的中空管状体, 藻体进行光合作用释放氧气使得藻体内包含气泡, 继而产生浮力, 使其能漂浮在海面上。海表上较强的光照强度, 促进了浒苔的光合作用^[107], 在充分的营养盐条件下, 海表面温度为浒苔生长所适宜的 $16\sim 21$ 摄氏度时^[92], 浒苔将进一步快速生长, 并分生出新枝, 藻体可生长到长达 $1\sim 2$ 米, 主枝直径可达 $2\sim 3 \text{ mm}$ 。同时, 在表层风场、海流的作用下, 小块的藻体斑块不断聚集, 形成更大面积的绿潮斑块^[107], 这样的过程将导致绿潮斑块的生物量密度也在不断增大。

绿潮进入衰亡期时, 浒苔藻体老化, 藻体的颜色由深绿色变为黄绿色或者

黄色,藻体细胞间隔增大,藻体的叶绿素含量降低^[106],而叶绿素含量与光合活性为正相关,藻体的光合作业减弱或基本失去光合作用的能力后,藻体自身浮力下降,当不足以支撑其漂浮时,在风浪流的作用下,浒苔藻体将由海面表层沉降入海底^[107],并在微生物等作用下分解。此时海面漂浮绿潮由暴发期时的大面积斑块,变为数量庞大的零散小面积斑块,海面绿潮的生物量密度也因此降低。如表 5.2 中生物量密度的相对变化所示,在衰退期的 S6 站位,相对暴发期的 S5 站位,绿潮像元所计算的 RGB-FAI 最大值由 61.9 降低为 44.1,减小了 28.8%,绿潮区域的浒苔生物量密度从暴发期到衰退期降低了 43.4%。由此可知,此估算结果符合绿潮生理状态的实际变化,一定程度上证明了本小节绿潮生物量估算方法的可靠性。

5.1.4 无人机遥感绿潮生物量的应用潜力

由于浒苔的生物量估算模型是基于水池实验的地物光谱而构建,而卫星遥感与地面实验测量之间存在着混合像元、大气等干扰因素,尤其对于斑块面积小于或接近卫星影像分辨率的零散小面积绿潮,卫星遥感无法对其有效提取,因此若将地面实验构建的生物量估算模型,应用到卫星遥感影像上还需要更多的校正工作。而无人机遥感的航测高度可灵活自主设定,一般小于五百米,作为高空间分辨率的低空遥感,几乎不受大气与混合像元的干扰,因此基于地面实验构建的绿潮生物量估算模型,更容易应用到无人机遥感影像中。无人机遥感需校正的干扰因素少,影像分辨率也远高于卫星影像,因此其估算生物量结果的精确度也将更高。但需要指出的是,本节提出的无人机遥感估算绿潮生物量的方法,受无人机飞行续航作业时间有限,且飞行速度低,无人机航测生产出的影像覆盖面积小,因此存在着估算区域小的不足。

无人机遥感作为地面调查和卫星遥感的有益补充,如果将无人机遥感与卫星遥感相结合,则可以将海上绿潮的生物量估算范围扩展到更广的海域。通过对同一绿潮斑块,无人机遥感与卫星遥感同时进行生物量估算,以计算出无人机遥感对卫星遥感估算结果的校正系数,再利用该校正系数与卫星遥感所具备的影像覆盖范围大的优势,则可实现对全南黄海区域的绿潮生物量估算,这一融合方法将具有重要的应用价值。

5.2 基于无人机遥感的绿潮漂移速度的估算与分析

关于浒苔的筏架附生阶段,通过2012年的苏北浅滩航次调查发现,在3月上旬筏架上并无附生浒苔,在3月中旬到4月底,筏架附生浒苔占整个附生绿藻的比例不超过15%,在5月初到5月中旬,附生浒苔的比例才上升到40.5%,成为第二优势种^[71]。而往往在5月中旬前后,紫菜养殖人员即开始回收紫菜筏架设施。纆绳附生绿藻,包含附生浒苔,被刮落进入黄海,结束筏架附生阶段。岸滩堆积阶段的浒苔,在光照、海浪等作用下,藻体往往快速变白、腐烂分解,或被人工机械等迅速清理。而根据2008~2017年的卫星遥感监测结果,以卫星遥感能分辨绿潮斑块大小为准,绿潮在海上漂移阶段可持续68~110天,持续时间较短的2017年也达到63天,2010、2011与2016年绿潮在海上的漂移阶段约为70~80天,其余年份更是达到了90~110天(表5.3)。因此,在绿潮的整个生命周期中,海上漂移阶段无疑是跨时最长的阶段。绿潮具有长时间跨区域运输、异地成灾的特点,其漂移速率、方向与轨迹等动态信息,是绿潮灾害预警与防控工作的重要参考。

表 5.3 2008~2017 年黄海绿潮的海上漂移时间统计^[108]

Table 5.3 The duration of green tide in the Yellow Sea from 2008 to 2017

年份	卫星最早发现时间	消亡时间	持续时间/天
2008	5月14日	9月1日	110
2009	5月20日	8月22日	94
2010	6月2日	8月17日	76
2011	5月27日	8月17日	82
2012	5月16日	8月30日	106
2013	5月10日	8月14日	96
2014	5月12日	8月15日	95
2015	5月16日	8月14日	93
2016	5月10日	8月2日	85
2017	5月14日	7月20日	68

以往研究利用卫星遥感估算绿潮漂移速度的方法,在时间上不能满足绿潮灾害应急监测的要求,在精度上无法达到对重点监测海域绿潮速度的精细估算。

而无人机遥感具有数据时空分辨率高、不受大气干扰、应用方便灵活等显著优势，是实地调查与卫星遥感的重要补充^[18]。近年来，无人机应用由陆地区域逐渐扩展到海洋环境监测^[44]等海洋研究领域。以科考船甲板为无人机起降平台，获取不同时相下的绿潮正射影像，可以为绿潮漂移速度估算提供数据支撑。而科考船搭载的相关仪器设备能同时获取绿潮监测站位的气象、水文、水质等环境数据。

5.2.1 基于双时相影像的绿潮漂移速度的计算

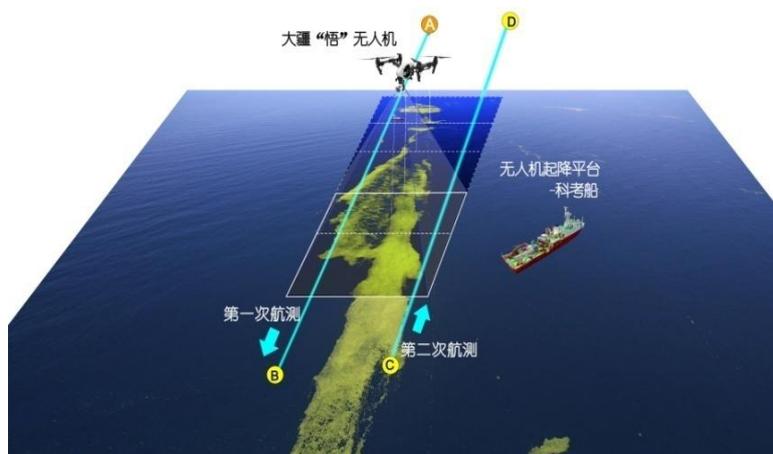


图 5.5 船载无人机获取双时相绿潮正射影像的示意图

Figure 5.5 Illustration of shipborne UAV acquiring two-phase orthophoto of green tide

大疆悟 1 四旋翼无人机，体积小，应用灵活，本文实现了其在科考船甲板上的起降，以进行海上航测作业。利用该无人机对海上绿潮进行低空摄影测量，在无人机到达绿潮斑块一端的正上空后，飞行高度调整为使无人机传感器的画幅能容纳绿潮斑块的宽度，相机镜头垂直向下，然后沿绿潮斑块的长边飞行拍摄，飞行中保证航拍图像的航向重叠度大于 80 %。对同一绿潮斑块分别执行两次航拍（图 5.5），采用 Pix4D 软件进行图像拼接，生成绿潮斑块在两个时相下的数字正射影像。

在 2019 年 6 月 16 日的 S2 站位，以及 2019 年 6 月 19 日的 S3、S4 站位（图 5.6），本研究对这三个站位的海上绿潮各进行了两次航测作业，获取了这三个站位绿潮的双时相正射影像。三个站位的航测坐标位置、天气、影像尺寸与分辨率等信息见表 2.2。

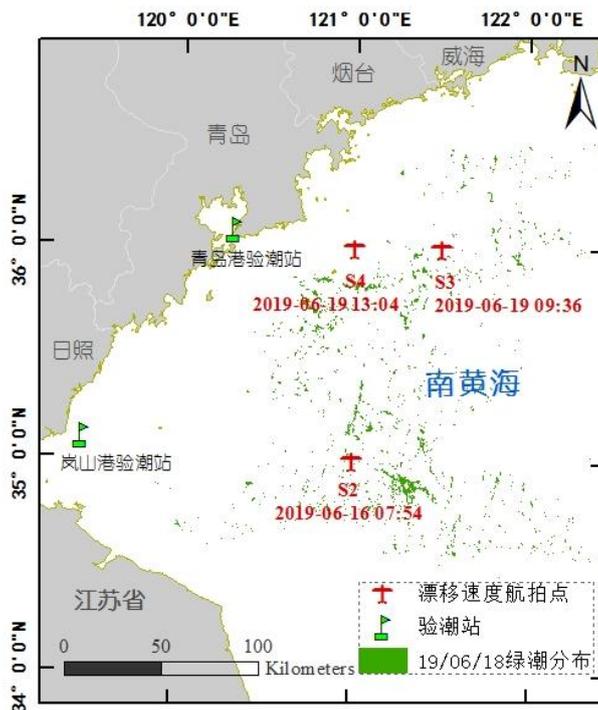


图 5.6 双时相绿潮影像的站位图

Figure 5.6 Site map of UAV acquiring two phase orthophoto

采用可见光波段的漂浮藻类指数 RGB-FAI (见公式 4.2) 与阈值分割法提取双时相无人机正射影像中的绿潮。RGB-FAI 是本文构建的用于从 RGB 影像中提取绿潮的植被指数, 其提取精度高, 能在薄雾等不良气象条件下, 实现对零散小面积绿潮斑块精确提取, 其可靠性已在本文第 4 章得到验证。

无人机在对整个绿潮斑块进行航测作业期间, 由于绿潮目标并非静止, 而是处于不断漂移状态, 且无人机无法在一个时刻对整块绿潮完成拍摄。为减小因位移偏差而导致的绿潮速度估算误差, 本文对航测生成的绿潮斑块影像, 先从中选取一定数量的子斑块, 然后计算各子斑块的速度, 用各子斑块速度的平均值, 来表示该站点绿潮的漂移速度。其中, 子斑块的选取原则为: (1) 所有子斑块在整个绿潮斑块范围内均匀分布; (2) 子斑块特征明显、形状清晰、易识别; (3) 子斑块的形状特征在两个时相的影像中保持不变。为保证两个时相影像中相同子斑块的点位一致, 利用 Arcmap 软件的 Mean Center 工具生成子斑块的地理中心点, 并用地理中心点的位移表示子斑块的位移。选择子斑块在原始单张航片中央位置时, 前后两个时相的航片拍摄时间, 来计算其漂移时长。则通过得到的漂移位移和时长可计算出各个子斑块的漂移速率, 并在

Arcmap 中可查询到各子斑块的漂移方向。取一个站位下各子斑块漂移速率的算术平均值为该站位绿潮的漂移速率，取各子斑块漂移方向的矢量平均值为该站位绿潮的漂移方向，两者的计算公式如下：

$$V_{ave} = \frac{1}{n} * \left(\sum_{i=1}^n S_i / t_i \right) \quad \dots(5.3)$$

$$Dir_{ave} = \arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^n V_i * \sin Dir_i}{\sum_{i=1}^n V_i * \cos Dir_i}\right) \quad \dots(5.4)$$

其中， i 与 n 分别代表子斑块及数量。 V 、 S 、 t 和 Dir 分别表示绿潮斑块漂移的速率、距离、时长和方向。

基于 RGB-FAI 指数与阈值分割法，对 S2 站位绿潮（图 5.7a）在两个时相下的数字正射影像分别进行提取，生成双时相下的绿潮分布图，并按照本节子斑块的选取原则，从该站点绿潮斑块中选出 7 个具有代表性的子斑块(图 5.7b)。

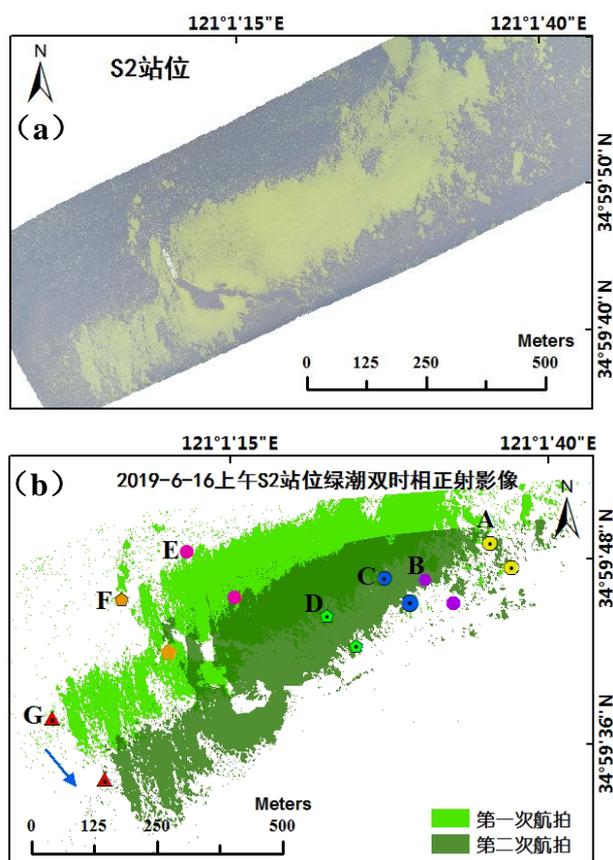


图 5.7 S2 站位绿潮的正射影像与双时相漂移图

Figure 5.7 The orthophoto and two-phase drift map of green tide at site S2

分别量测和计算出各个子斑块地理中心点的位移、时间和方向，计算出各

子斑块的漂移速率。然后利用公式 (5.3) 与 (5.4)，计算出该站点所有子斑块漂移速率的算术平均值，以及漂移方向的矢量平均值，结果如表 5.4 所示。在表中，本文所描述的方向以正北向为零度，顺时针为正。

表 5.4 S2 站位七个子斑块的漂移速度数据

Table 5.4 Drift velocity of seven sub-patches at site S2

S2 站位子斑块	位移/米	漂移时长/秒	速率/m · s ⁻¹	方向/度
A	64.9	326	0.199	140.4
B	72.4	348	0.208	129.6
C	70.6	362	0.195	136.6
D	82.3	382	0.215	136.2
E	132.6	414	0.320	134.0
F	141.0	440	0.321	138.1
G	161.6	482	0.335	139.3
平均值			0.256	136.5

基于同样的绿潮提取方法，对 S3 站位的双时相正射影像分别进行绿潮提取，生成双时相下的绿潮分布图，并从该站点绿潮中选出 A~F 共六个子斑块来计算该站点的绿潮速度，如图 5.8 所示。

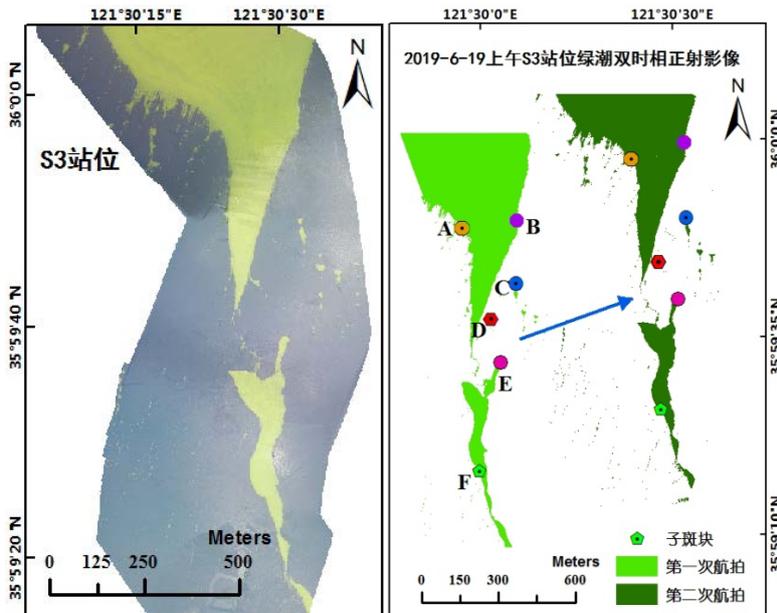


图 5.8 S3 站位绿潮的正射影像与双时相漂移图

Figure 5.8 The orthophoto and two-phase drift map of green tide at site S3

依据同样方法，分别量测出该站位绿潮六个子斑块地理中心点的位移、漂移时长和方向，计算出各子斑块的漂移速率。利用公式 (5.3) 与 (5.4) 计算出六个子斑块漂移速率算术平均值与漂移方向的矢量平均值，结果如表 5.5 所示。

表 5.5 S3 站位的子斑块漂移数据

Table 5.5 Drift velocity of six sub-patches at site S3

S3 子斑块	位移/米	漂移时长/秒	速率/m · s ⁻¹	方向/度
A	714.9	1564	0.457	67.8
B	722.7	1576	0.459	65.1
C	711.4	1625	0.438	68.8
D	689.2	1664	0.414	71.1
E	732.9	1678	0.437	70.3
F	745.5	1747	0.427	71.2
平均值			0.439	69.0

基于与 S2、S3 同样的方法步骤，对 S4 站位绿潮的双时相影像，提取出两个时刻下的绿潮分布，如图 5.9 所示。

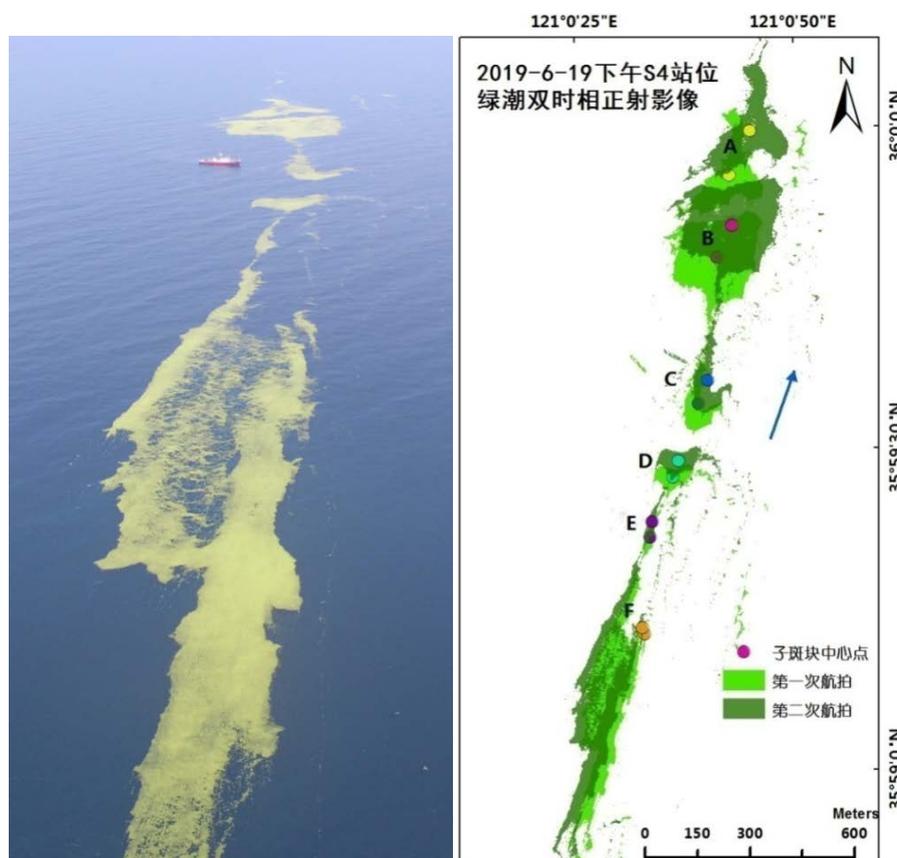


图 5.9 S4 站位绿潮的航拍图与双时相正射影像

Figure 5.9 The aerial photography and two-phase orthophoto map of green tide at site S4

参照子斑块选取原则,从 S4 站点绿潮中自北向南选出均匀分布的六个子斑块,量测并计算出各子斑块地理中心点的位移、时间、方向以及漂移速率。最后同样计算出所有子斑块漂移速率的算术平均值,以及方向的矢量平均值,结果如表 5.86 所示。

表 5.6 S4 站位子斑块的漂移数据

Table 5.6 Drift velocity of six sub-patches at site S4

S4 子斑块	位移/米	漂移时长/秒	速率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	方向/度
A	141.9	376	0.377	24.2
B	100.2	333	0.301	24.6
C	72.1	262	0.275	21.3
D	48.9	218	0.224	19.4
E	45.7	193	0.237	8.8
F	18.8	146	0.129	338.5
平均值			0.257	17.1

对 S2、S3、S4 三个站点的绿潮,使用各站点子斑块漂移速率的算术平均值与漂移方向的矢量平均值,来分别表示三个站点的绿潮漂移速率和方向,综合统计出三个站点的航拍作业信息与绿潮漂移数据,结果如表 5.7 所示。

表 5.7 三个站点的绿潮漂移速度统计

Table 5.7 Statistics of green-tide drift velocity at three sites

站 点	航拍日期	航拍时段	站点坐标	影像分辨 率/m	绿潮速率 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	绿潮方向/ 度
S2	2019/06/16	07:55-08:03	35°N, 121°E	0.12	0.256	136.5
S3	2019/06/19	09:36-10:06	36°N, 121.5°E	0.14	0.439	69.0
S4	2019/06/19	13:04-13:12	36°N, 121°E	0.12	0.257	17.1

由表 5.7 的结果可知,在站点 S2,绿潮漂移速率为 0.256 m/s,漂移方向为东南方向,出现了南向的速度分量;在 2019 年 6 月 19 日上午 9 时 36 分的 S3

站点, 绿潮漂移速率为三个站点的最大值, 达到了 0.439 m/s , 方向为北偏东 69° , 东向的速度分量较大; 到当天下午 13 时的 S4 站点, 绿潮漂移速率降低为 0.257 m/s , 方向改变为北偏东 17.1° , 东向的速度分量明显减小, 北向速度分量增大, 此时的漂移符合绿潮整体向北的大趋势。

可以看出, 绿潮在从苏北浅滩海域到山东近岸的整体向北漂移中, 会有短时南向漂移的时段(站点 S2), 这一现象也发现于陈晓英等^[64]基于 GF-4 卫星, 在 2016 年 6 月 25 日的绿潮漂移速度的反演研究中。基于船载无人机遥感的方法可以精细地揭示绿潮的瞬时漂移状态。在一天中的不同时刻, 绿潮漂移方向和速率在邻近海域也会有明显不同(站点 S3 与 S4)。对精细化的绿潮漂移特征或重点监测区域绿潮入侵时间的预测研究, 可以借助船载无人机遥感对绿潮速度进行及时、准确地掌握。

5.2.2 与 GOCI 卫星遥感结果的对比研究

GOCI 影像时间分辨率为 1 小时, 同样可应用于绿潮漂移速度的估算, 但其空间分辨率低, 可导致绿潮提取精度较低。以同时段的无人机高精度影像作为参考, 可对比分析 GOCI 影像反演的绿潮漂移速度结果。

由于本节三个研究站位中的 S2、S4 航测作业时, 全海域的绿潮在 GOCI 影像上被云层几乎完全覆盖, 对于 2019 年 6 月 19 日航测时段为 9:36~10:06 的 S3 站位, 9:30 与 10:30 两景 GOCI 影像中 S3 站点海域的绿潮也被云层遮挡, 在这两景卫星影像中尚存在其它两处同时无云层干扰的海面绿潮, 本文因此选择提取这两处海面绿潮, 来进行绿潮速度的卫星遥感反演, 并与 S3 站位的无人机遥感绿潮速度进行对比分析。这也反映了卫星影像极易受云层干扰而难以满足特定区域绿潮灾害的应急监测需求。

采用 NDVI 植被指数与阈值分割法提取这两景 GOCI 影像中的绿潮斑块, 利用 Arcmap 中的 Mean Center 工具计算两处海域绿潮斑块的中心点(图 5.10), 量测出绿潮斑块在 9:30 与 10:30 两景影像中的移动距离和方向, 分别计算出绿潮的漂移速度。最后按照公式 (5.3) 与 (5.4), 取两个区域的速度平均值作为 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° 。

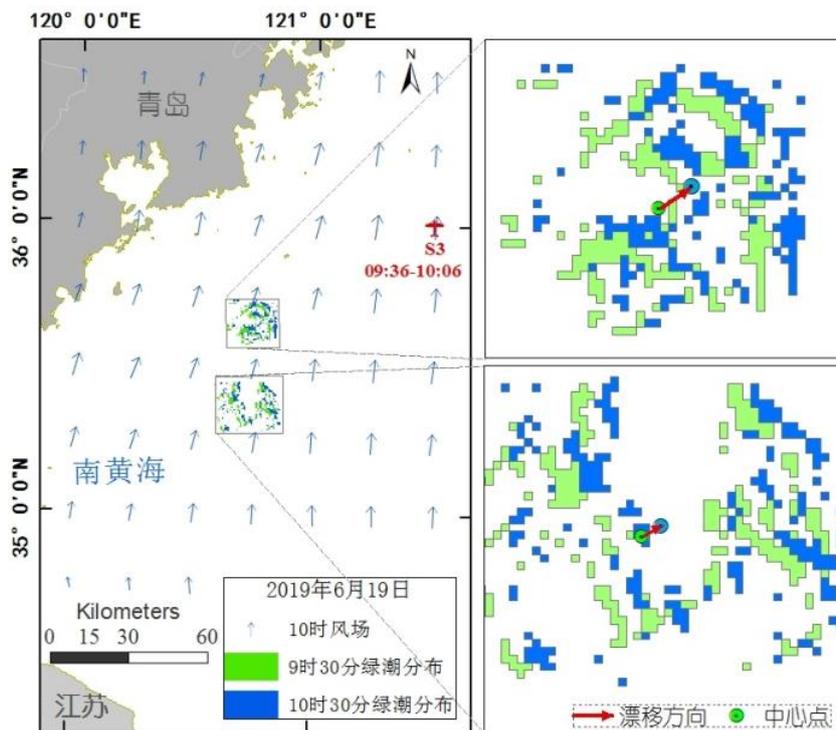


图 5.10 基于 GOCI 影像的绿潮逐时漂移图

Figure 5.10 The one-hour drift map of green-tide from GOCI images

无人机影像的空间分辨率远高于 GOCI 影像，将 GOCI 遥感估算的绿潮漂移速度矢量与 S3 站位的无人机遥感绿潮速度相对比，结果如图 5.11 所示。

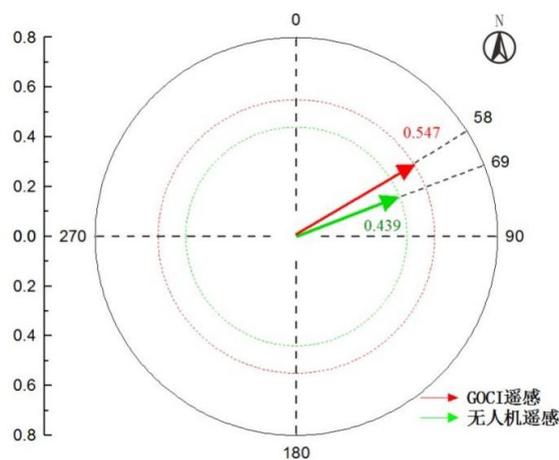


图 5.11 GOCI 与无人机遥感提取的绿潮速度对比

Figure 5.11 Comparison of green tidal velocity extracted by GOCI and UAV remote sensing

由图 5.11 可知，两种影像反演的漂移方向基本一致，同为向东北方向漂移，漂移速率上相差 0.108 m/s。需要说明的是，两者的偏差一方面应受到 GOCI 影

像低空间分辨率的影响；另一方面，由于选取的是与 S3 站位不同的海域作漂移速度的对比研究，两海域相差约 45 海里，且根据由 ERA5 资料提取的同时段下风场数据（图 5.10 中的 10 时风场）可知，GOCI 反演速度的海域与 S3 站位的风速与风向的相对偏差分别为 0.58 m/s 和 3 %，因此两海域绿潮漂移速度的实际值可能也存在差异。

综合无人机遥感与 GOCI 遥感提取的绿潮漂移速度，以及两处海域风速矢量，对比结果如表 5.8 所示。其中，表中的速率偏差定义为：测定值与基准值之差的绝对值；方向偏差定义为：将测定值与基准值之差的绝对值，除以 360，最后算出百分比。

表 5.8 无人机与 GOCI 影像提取绿潮漂移速度的结果对比

Table 5.8 Comparison of green-tidal drift velocity derived from UAV and GOCI images

	影像空间 分辨率/m	海域风向/ 度	海域风速/ m · s ⁻¹	绿潮方向/(北偏 东, 度)	绿潮速率/ m · s ⁻¹
无人机遥感	0.14	184.94	5.14	69.0	0.439
GOCI 遥感	500.00	195.48	4.56	58.4	0.547
偏差		3%	0.58	2.9%	0.108

尽管两种遥感影像为同一时段，但由于云层干扰的原因，本研究未能获得同一海域的两种遥感影像，以及绿潮速度结果，因此，并不能直接计算无人机遥感对 GOCI 卫星反演结果的精度提升量。对于绿潮漂移速度的研究，若能获取同时段、同位置绿潮漂移的两种影像，则可以利用高分辨率的无人机遥感提取的绿潮速度为基准，校正卫星遥感反演的速度结果，并依据计算出的校正系数，为全海域的绿潮漂移速度的高精度反演提供技术方法。

5.2.3 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 小时）的漂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到潮汐流的驱动^[109]。S2、S3 和 S4 三个速度反演站位所记录的绿潮漂移时长约为 2~29 分钟，远小于潮汐涨落一次所需的 12 小时，因此，绿潮的驱动分析需要结合潮汐流进行。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六月表层的涨落潮流场，将绿潮漂移速度与同一时刻的风场、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^[110]基于 FVCOM (Finite Volume Coast and Ocean Model) 海洋数值模式计算出了南黄海六月 M_2 分潮的涨落潮流场，即一个潮周期内四个主要时刻（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 S2、S3、S4 站位的航拍作业同在六月的南黄海海域，因此可通过该研究成果获取这三个站位的表层潮流矢量。

根据站点 S2 所在纬度 (35.00°N) 与岚山港验潮站 ($35^\circ05'\text{N}$) 相近，而站点 S3、S4 所在纬度 (36.00°N) 与青岛港验潮站 ($36^\circ04'\text{N}$) 相近 (图 5.6)，分别选取了站点 S2 所处于的 2019 年 6 月 16 日岚山港验潮站的潮汐表，站点 S3、S4 所处于的 2019 年 6 月 19 日青岛港验潮站的潮汐表，根据各站点的作业时间查询出三个站点作业时的潮位，如图 5.12 所示，据此可知，S2、S3 站位作业时处于落潮中间时，S4 站位作业时处于低潮时。

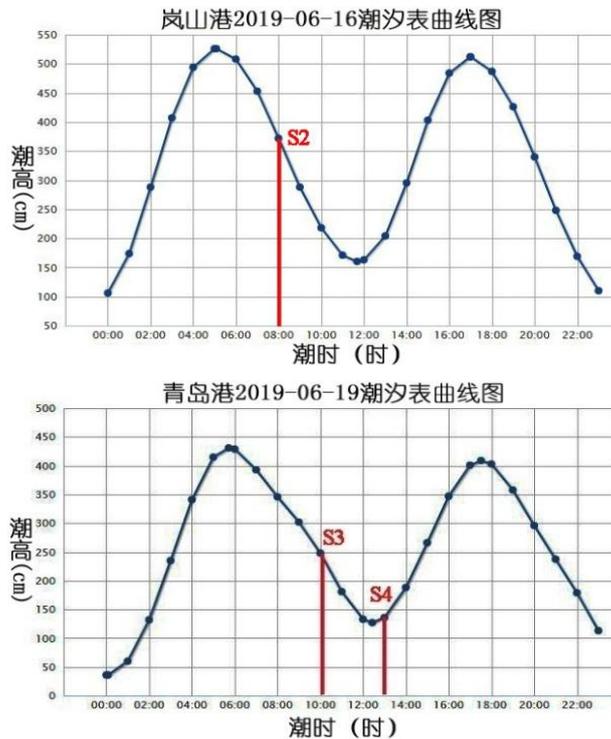


图 5.12 三个站点航拍作业时的潮位

Figure 5.12 Tidal height during aerial photography of three sites

依据 FVCOM 海洋数值模式的涨落潮流场结果与各站点作业时所处的潮位，

在“南黄海六月表层落潮中间时流场分布图”中可得到 S2、S3 站点航拍作业时的潮流方向（图 5.13b），在“南黄海六月表层低潮时流场分布图”中可得到 S4 站点的潮流方向（图 5.14b）。按照 2.4.2 节中确定的有效风速时段内的 1 分钟平均真风速、风向数据，计算每个站点风速大小的算术平均值，以及风向的矢量平均值，来表示作用于该站点绿潮漂移的有效风速矢量。各站点的平均风速与平均风向结果如表 5.9 所示。

表 5.9 各站位的风速统计

Table 5.9 Statistics of wind speed at three sites

站点	航拍日期	航拍时段	站点坐标	有效风时段	风速均值/ $m \cdot s^{-1}$	风向均值/ 度
S2	2019/06/16	07:55-08:03	35°N, 121°E	07:48-07:58	1.75	315.7
S3	2019/06/19	09:36-10:06	36°N, 121.5°E	09:29-10:01	3.23	186.9
S4	2019/06/19	13:04-13:12	36°N, 121°E	13:03-13:13	3.17	139.7

综合 S2、S3、S4 三个站点无人机遥感估算的绿潮漂移速度（表 5.7），由船载气象仪资料获取的有效风速矢量（表 5.9），以及 FVCOM 海洋数值模式所计算出的潮流矢量，将同一时段下的风速、潮流速度与绿潮漂移速度进行一致性分析。图 5.13 的(a)(c)分别为 S2、S3 站点中风与绿潮漂移的矢量图，红色箭头表示风矢量，绿色箭头表示绿潮漂移矢量。图 5.13b 为南黄海六月表层“落潮中间时”的流场分布，红色方框标识了 S2、S3 站点处的潮流矢量。

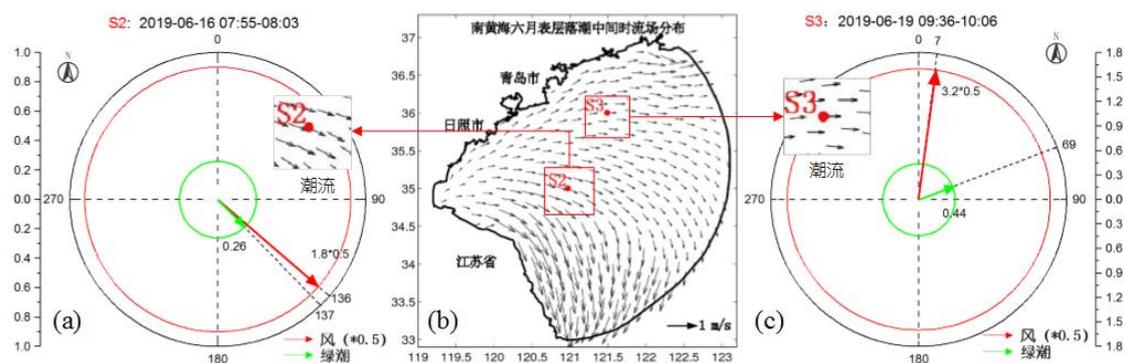


图 5.13 站点 S2、S3 中绿潮、风、潮流（改绘自^[110]）的移动矢量图

Figure 5.13 Motion vector of green-tide, wind and tidal current at sites S2 and S3

由上图可知，在站点 S2，风吹向北偏东 136 度，绿潮漂移方向偏于风向右

侧约 1 度，风速大小为 1.8 m/s，在绿潮漂移方向上风的速度分量为 1.7 m/s，约为绿潮速度的 6.8 倍；而潮流与绿潮漂移方向夹角约为 24 度，几乎同为东南向。在站点 S3，风向为北偏东 187 度，绿潮漂移方向偏于风向右侧约 62 度，风在绿潮漂移方向上的速率分量约为 1.5 m/s，为绿潮速度的 3.5 倍；而潮流与绿潮漂移方向基本一致。

在站点 S4 的绿潮、风、潮流的移动矢量图（图 5.14）中，各箭头符号含义与图 5.13 相同，红色箭头为风矢量，绿色箭头为绿潮漂移矢量。由图可知，站点 S4 作业时的风速为 3.17 m/s，风向为北偏东 140 度，绿潮漂移方向位于风向右侧约 57 度，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；而从图 5.14b 红色方框中的 S4 站点作业时的潮流矢量可知，绿潮漂移方向与潮流基本同为东北向。

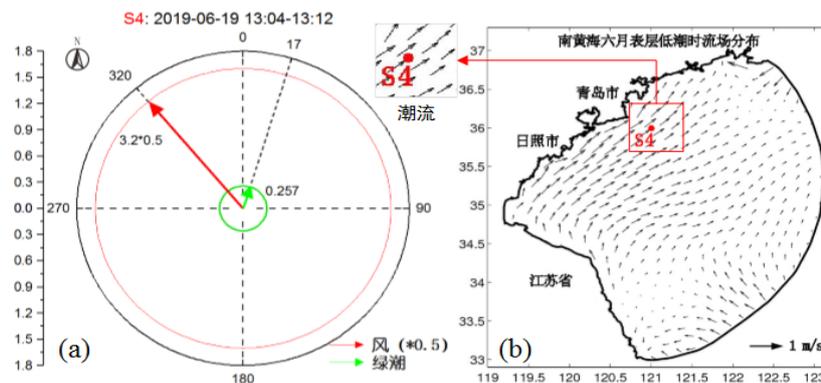


图 5.14 站点 S4 中绿潮、风、潮流（改绘自^[110]）的移动矢量图

Figure 5.14 Motion vector of green-tide, wind and tidal current at sites S4

综合上述结果可知，三个站点的绿潮漂移与 M_2 分潮的潮流方向基本一致，而位于风向右侧 1~62 度，较符合 Ekman 的漂流理论。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，说明各站点的绿潮漂移可能还存在其它驱动因素。

5.2.4 不确定性分析

本节中船载无人机的遥感影像，以及漂移驱动分析时采用的船载气象仪的风速数据，都具有较高的精度。但本节的绿潮漂移速度研究，在以下三方面存在一定的不确定性。

首先，对于绿潮漂移速度的规律总结与驱动分析上，应用于研究的双时相

绿潮正射影像的数据样本只有 3 个，对精确的定量分析，数量上还需要积累更多的无人机双时相绿潮漂移数据。第二，在绿潮对风驱动作用的滞后响应时间上，本节设置为 2 分钟，这仅为主观经验，还需要相关专业后期在理论与实验方面的进一步探索。第三，本文引用了已有研究中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，对绿潮漂移速率的作用分析则不够精确。未来研究则可考虑利用船载的声学多普勒流速剖面仪（ADCP），或便携式表层流速仪获取更精准的海水表层流场数据，为绿潮漂移速率与方向两方面的定量分析提供更精准的数据支撑。

5.2.5 船载无人机在绿潮速度研究的应用优势

受浒苔漂移过程中的爆发性增殖、沉降、消亡，以及风、浪、流等外力的直接影响，绿潮斑块形态极易发生剧烈改变。有研究表明，海上绿潮斑块的形态在超过 6 小时即变化较大^[64]，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海域，且卫星影像易受云层影响。

而基于船载起降的无人机遥感，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、更为精细地进行绿潮漂移监测。基于这些优势，本章节所建立的无人机遥感绿潮速度的方法，一是可用于重点区域的绿潮应急监测与灾害预警，如山东半岛重要旅游城市的海滨景区，以及核电站进水口等一些重要工业设施的临近海域。该方法可使绿潮灾害防控人员能及时估算出这些海域在绿潮灾害来临前的漂移速度、漂移方向、到达时间等，以提前做好有针对性的灾害应对措施。其次，可用于校正低空间分辨率卫星遥感的反演速度结果，实现更大范围海域上绿潮漂移速度的精确估算。三是，可为海洋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。

5.3 本章小结

绿潮海上漂移时的状态参量使用生物量与漂移速度两个物理量来表征。受风、海流的驱动,在适宜的温度、光照、营养盐等外部条件下,绿海藻边漂移边生长,且漂移速度与生物量处于不断变化中。低时空分辨率且易受大气干扰的卫星遥感或航次调查等传统技术手段,不能满足绿潮漂移状态参量高精度应急监测的要求,后者需要高分辨率的技术进行支撑。综合利用船载无人机遥感-航次调查-地面实验等方法,可以实现对绿潮漂移状态参量的估算。

对海上绿潮生物量的估算,本章节首先基于水池实验获取浒苔单位生物量与 RGB-FAI 指数的对应关系,构建了基于 RGB-FAI 的浒苔生物量密度估算模型。同时,对无人机航测的绿潮正射影像,建立了绿潮生物量的估算公式,并分别对暴发期与衰退期的无人机绿潮影像,进行了生物量估算与对比。结果如下:(1)对 S5 站位的暴发期绿潮,无人机影像的 RGB-FAI 最大值为 61.9,浒苔生物量为 222 796 kg,绿潮区域中浒苔的生物量密度为 0.9235 kg/m²。(2)对 S6 站位的衰退期绿潮,绿潮覆盖面积为 67 162.33 m²,浒苔生物量为 35 070.41 kg,绿潮区域中浒苔的生物量密度为 0.5222 kg/m²;(3)相对暴发期,衰退期无人机影像中的绿潮像元,RGB-FAI 最大值由 61.9 降低为 44.1,减小了 28.8%,浒苔的生物量密度降低了 43.4%,符合绿潮在暴发期与衰退期的实际生理状态。

(4)本章节建立的无人机遥感估算绿潮海上生物量的方法具有估算精度高、实时性强的优势,但同时存在估算区域范围有限的不足,若后期能够联合卫星遥感,则可以将海上绿潮的生物量的高精度估算范围扩展到整个黄海区域内,将具有重要的应用价值。

对海上绿潮漂移速度的估算,本章节基于船载无人机首次获取了黄海绿潮双时相的数字正射影像,实现了绿潮漂移速度的高精度估算。同时,与 GOCI 卫星遥感反演的绿潮漂移速度进行对比,最后,基于船载风速仪的风速数据以及数值模式计算的潮流数据,分析了风、潮流对绿潮漂移的驱动。结果如下:

(1)基于无人机遥感方法,估算出了三个航次站点的绿潮漂移速度分别为 0.256、0.439 和 0.257 m/s,绿潮的漂移速率与方向在一天中会发生明显变化,甚至有南向分量的漂移。(2)绿潮的漂移在短时间内受风与潮流的共同影响。绿潮漂移方向与 M₂ 分潮的潮流方向基本一致,位于风向的右侧 1~62 度。(3)船载无人机对绿潮漂移速度的估算,可校正卫星遥感的结果,实现更大范围的绿潮速

度的高精度估算，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持。

第6章 结论与展望

6.1 结论

在中国的南黄海海域,浒苔绿潮已连续暴发 14 年,成为一类严重的海洋生态灾害,给江苏和山东的沿海地区造成了巨大的生态威胁和经济损失。黄海绿潮发生规模大、持续时间和迁移距离长、海上生物量等状态参量变动剧烈、危害范围广,其早期附生阶段生物量以及海上漂移阶段的状态参量是绿潮规模以及灾害预警防控的重要参考。但传统的技术手段难以对其进行有效地监测和估算。对此,本论文基于无人机遥感在海上科考调查的成功应用,围绕绿潮早期筏架附生阶段的生物量,以及绿潮在海上漂移阶段的生物量与漂移速度,进行了高精度估算方法的研究与应用。主要结论如下:

(1) 对绿潮早期的筏架附生阶段,分别对网帘附生绿藻和纜绳附生绿藻的生物量提出了两种估算方法。将高精度的无人机遥感应用到网帘附生绿藻生物量的估算中,估算出 2017 年网帘附生绿藻生物量为 8877 吨。在纜绳附生绿藻生物量估算方面,提取了 2017 年苏北浅滩的紫菜养殖筏架面积约为 34.4 万亩,结合筏架的分布规则,得到网帘数量约为 464.74 万张,估算出 2017 年的纜绳附生绿藻生物量约为 2981 吨,其中附生浒苔的生物量约为 447 吨。此外,基于已有的采样数据,估算了 2011~2013 年度的纜绳附生绿藻生物量分别为 7617、4132 和 3465 吨,附生浒苔的生物量分别为 2774、1672 和 2137 吨。纜绳附生浒苔生物量与绿潮首次被卫星遥感监测的覆盖面积,在年际变化趋势上基本一致,一定程度上证明黄海绿潮的发生与紫菜筏架的附生绿藻具有相关性。已实施的防控措施大多只是被动的降低黄海绿潮规模,通过防附着材料的应用能有效减少绿藻的附生生物量,将使江苏、山东两省同时受益。

(2) 对海上漂浮绿潮的提取,构建了一种用于无人机可见光遥感的新植被指数 RGB-FAI,其可高精度地提取海上漂浮绿藻。对晴好气象条件下的暴发期绿潮,提取结果的 Kappa 系数为 0.95;对薄雾条件下的衰退期绿潮,与其它 5 种常见的可见光指数相比,RGB-FAI 提取精度最高,显示了其在通视性较差气象状况下对零散小面积斑块的提取具有独特优势。RGB-FAI 指数结合无人机可

见光遥感,对海上绿潮的漂移速度、生物量的精细估算具有较大的应用潜力,将为海上绿潮的精细遥感提供新的技术手段。

(3) 综合利用船载无人机遥感-航次调查-水池实验等方法,可实现绿潮漂移状态参量的估算。对海上绿潮生物量的估算,本文构建了基于 RGB-FAI 的浒苔生物量密度估算模型,同时,建立了基于无人机正射影像的绿潮生物量估算方法,并分别应用到暴发期与衰退期的绿潮。对暴发期的绿潮影像,估算出绿潮区域中浒苔的生物量密度为 0.9235 kg/m^2 ,衰退期绿潮区域中浒苔的生物量密度为 0.5222 kg/m^2 。相对于暴发期,衰退期浒苔生物量密度降低了 43.4%,无人机影像中绿潮像元的 RGB-FAI 最大值由 61.9 降低为 44.1,减小了 28.8%。

(4) 对海上绿潮漂移速度,基于船载无人机获取了黄海绿潮双时相的数字正射影像,估算出三个航次站点的绿潮漂移速度分别为 0.256、0.439 和 0.257 m/s,绿潮的漂移速率与方向在一天中会发生明显变化,甚至有南向分量的漂移。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 1~62 度。高时空分辨率的无人机遥感,能够为 GOCI 等卫星遥感反演的绿潮漂移速度结果提供校正。

6.2 创新点

(1) 基于无人机在科考船起降的成功实现,将高时空分辨率的无人机遥感应用到海上绿潮研究,并以此为基础,实现了对绿潮的海上漂移速度、生物量的高精度遥感估算。

(2) 基于高精度的无人机遥感,对苏北浅滩上紫菜网帘的附生绿藻生物量进行了估算。同时探讨了纆绳附生绿藻生物量与绿潮初始覆盖面积年际变化的相关性。

(3) 构建了一种新的基于可见光波段的漂浮藻类指数,对不同生长阶段的海上绿潮具有较高的提取精度,使常规的搭载可见光相机的无人机遥感能应用到绿潮研究领域。

6.3 不足与展望

(1) 苏北浅滩筏架附生绿藻生物量的估算方面:

苏北浅滩筏架附生绿藻生物量的采样区域只设立在其中的竹根沙上,无人

机航测数据和现场取样数据只是来源于竹根沙一个站位。除竹根沙外，苏北浅滩还包含蒋家沙和东沙等沙洲。下一步研究将增设更多的调查采样站位，使其在苏北浅滩的各沙洲均有分布。

(2) 海上漂浮绿潮生物量估算方面：

现阶段仅能实现对无人机影像范围内绿潮生物量的估算，应用范围过小。如果扩展到整个黄海区域内生物量的估算，则需要利用对同一绿潮斑块，无人机与卫星遥感同时获取其影像，并分别估算出生物量，以计算出无人机遥感对卫星遥感结果的校正系数，再利用该校正系数与卫星遥感的覆盖范围大的特点，可实现覆盖黄海区域的绿潮生物量估算。

(3) 海上绿潮漂移速度估算方面：

第一，获取到的绿潮双时相漂移数据只有三个，对于绿潮漂移速度的规律总结以及漂移驱动的定量分析，今后还需要积累更多样本数据的支持。第二，在绿潮对风驱动作用的滞后响应时间上，本节根据主观经验设置为 2 分钟，这需要相关专业的进一步探究。

参考文献

- [1] SUN S, WANG F, LI C, et al. Emerging challenges: Massive green algae blooms in the Yellow Sea [J]. Nature Precedings, 2008.
- [2] NELSON T A, NELSON A V, TJOELKER M. Seasonal and Spatial Patterns of "Green Tides" (Ulvoid Algal Blooms) and Related Water Quality Parameters in the Coastal Waters of Washington State, USA [J]. Botanica Marina, 2003, 46(3): 263-275.
- [3] SMETACEK V, ZINGONE A. Green and golden seaweed tides on the rise [J]. Nature, 2013, 504(7478): 84-88.
- [4] 唐启升, 张晓雯, 叶乃好, 等. 绿潮研究现状与问题 [J]. 中国科学基金, 2010, 24(01): 5-9.
- [5] 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.
- [6] 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(05): 950-958.
- [7] 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(05): 942-949.
- [8] 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.
- [9] WANG Z, JIE X, 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: Green tide in Yellow Sea of China [J]. Limnology & Oceanography, 2015, 60(4): 1105-1117.
- [10] LIU Q, YU R-C, YAN T, et al. Laboratory study on the life history of bloom-forming *Ulva prolifera* in the Yellow Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163: 82-88.
- [11] 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): 276-283.

- [12] XU Q, ZHANG H, CHENG Y, et al. Monitoring and Tracking the Green Tide in the Yellow Sea With Satellite Imagery and Trajectory Model [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2017, 9(11): 5172-5181.
- [13] 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 and Shelf Science, 2015, 163: 9-16.
- [14] 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(02): 1-13.
- [15] 施敏健, 王惠冲. 条斑紫菜人工育苗期预防绿藻的方法 [J]. 水产养殖, 1996, 02: 10-11.
- [16] 陆勤勤, 周伟, 朱建一, 等. 中国条斑紫菜产业的历史、现状与发展趋势 [J]. 中国海洋经济, 2018, 01: 3-11.
- [17] 张美如, 陆勤勤, 许广平. 条斑紫菜产业现状及对其健康发展的思考 [J]. 中国水产, 2012, 11: 15-19.
- [18] 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.
- [19] 刘湘庆. 黄海绿潮形成过程中漂浮绿藻及微观繁殖体时空分布研究 [D]; 国家海洋局第一海洋研究所, 2014.
- [20] ZHAO J, JIANG P, LIU Z Y, et al. The Yellow Sea green tides were dominated by one species, *Ulva* (*Enteromorpha*) *prolifera*, from 2007 to 2011 [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(19): 2298-2302.
- [21] LIU F, PANG S J, XU N, et al. *Ulva* diversity in the Yellow Sea during the large-scale green algal blooms in 2008-2009 [J]. Phycological Research, 2010, 58(4): 270-279.
- [22] LIU D, KEESING J K, DONG Z, 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.
- [23] XU Q, ZHANG H, LIAN J, et al. Interannual variability of *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(11-12): 4099-4113.
- [24] 乔方利, 王关锁, 吕新刚, 等. 2008 与 2010 年黄海浒苔漂移输运特征对比 [J]. 科学通报, 2011, 56(18): 1470-1476.
- [25] 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 [M]. 2015.

- [26] 张悦, 宋秀贤, 李靖, 等. 不同体系改性粘土对浒苔(*Ulva prolifera*)微观繁殖体去除及萌发的影响 [J]. 海洋学报, 2016, 38(08): 92-101.
- [27] 宋肖跃. 绿潮藻类对典型海域底栖生境影响及其饵料价值研究 [D]; 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2018.
- [28] 王淑贤. 绿潮藻浒苔降解发酵制备生物乙醇研究 [D]; 上海海洋大学, 2017.
- [29] 吴闯, 马家海, 高嵩, 等. 2010 年绿潮藻营养成分分析及其食用安全性评价 [J]. 水产学报, 2013, 37(01): 141-150.
- [30] 唐箭飞. 条斑紫菜养殖技术指要 [J]. 水产养殖, 2010, 31(12): 39-41.
- [31] 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(C05017).
- [32] 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(02): 35-43.
- [33] HUO Y, HAN H, SHI H, et al. Changes to the biomass and species composition of *Ulva* sp. on *Porphyra* aquaculture rafts, along the coastal radial sandbank of the Southern Yellow Sea [J]. *Marine pollution bulletin*, 2015, 93(1): 210-216.
- [34] 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.
- [35] 徐福祥. 基于无人机及多源数据的黄海绿潮监测研究 [D]; 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2018.
- [36] 汪沛, 罗锡文, 周志艳, 等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 1-12.
- [37] FALLATI L, POLIDORI A, SALVATORE C, et al. Anthropogenic Marine Debris assessment with Unmanned Aerial Vehicle imagery and deep learning: A case study along the beaches of the Republic of Maldives [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 693: 133581.
- [38] 李云, 徐伟, 吴玮. 灾害监测无人机技术应用与研究 [J]. 灾害学, 2011, 26(1): 138-143.
- [39] DONG-WOOK K, TAE-SUN M, YOONHA K, et al. Sustainable Agriculture by Increasing Nitrogen Fertilizer Efficiency Using Low-Resolution Camera Mounted on Unmanned Aerial Vehicles [J]. *International journal of environmental research and public health*, 2019, 16(20): 3893.

- [40] 孔振, 刘召芹, 高云军, 等. 消费级无人机在大比例尺测图中应用与精度评价 [J]. 测绘工程, 2016, 25(12): 55-60.
- [41] BOLLARD-BREEN B, BROOKS J D, JONES M R L, et al. Application of an unmanned aerial vehicle in spatial mapping of terrestrial biology and human disturbance in the McMurdo Dry Valleys, East Antarctica [J]. *Polar Biology*, 2015, 38(4): 573-578.
- [42] HASSAN M A, YANG M, FU L, et al. Accuracy assessment of plant height using an unmanned aerial vehicle for quantitative genomic analysis in bread wheat [J]. *Plant Methods*, 2019, 15(1): 37.
- [43] LU N, ZHOU J, HAN Z, et al. Improved estimation of aboveground biomass in wheat from RGB imagery and point cloud data acquired with a low-cost unmanned aerial vehicle system [J]. *Plant Methods*, 2019, 15(1): 17.
- [44] WANG S, LIU L, QU L, et al. Accurate *Ulva prolifera* regions extraction of UAV images with superpixel and CNNs for ocean environment monitoring [J]. *Neurocomputing*, 2019, 348: 158-168.
- [45] 李冬雪, 高志强, 尚伟涛, 等. 基于无人机多光谱影像的海滨景区浒苔信息提取研究 [J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(03): 438-446.
- [46] 徐福祥, 高志强, 尚伟涛, 等. 基于无人机的海滨景区绿潮监测 [J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(05): 1061-1067.
- [47] CUI T W, LIANG X J, GONG J L, et al. Assessing and refining the satellite-derived massive green macro-algal coverage in the Yellow Sea with high resolution images [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 144: 315-324.
- [48] 吴玲娟, 曹丛华, 高松, 等. 我国绿潮发生发展机理研究进展 [J]. *海洋科学*, 2013, 37(12): 118-121.
- [49] 郭妮. 植被指数及其研究进展 [J]. *干旱气象*, 2003, 04: 71-75.
- [50] SHI W, WANG M. Green macroalgae blooms in the Yellow Sea during the spring and summer of 2008 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C12): C12010.
- [51] HU C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2118-2129.
- [52] 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.
- [53] MEYER G E, NETO J C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 282-293.
- [54] HUNT E R, CAVIGELLI M, DAUGHTRY C S T, et al. Evaluation of Digital Photography from Model Aircraft for Remote Sensing of Crop Biomass and Nitrogen Status [J]. Precision Agriculture, 2005, 6(4): 359-378.
- [55] BENDIG J, YU K, AASEN H, et al. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 39: 79-87.
- [56] BELLVERT J, ZARCO-TEJADA P J, GIRONA J, et al. Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: Comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle [J]. Precision Agriculture, 2014, 15(4): 361-376.
- [57] 汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(05): 152-159.
- [58] XU F, GAO Z, JIANG X, et al. A UAV and S2A data-based estimation of the initial biomass of green algae in the South Yellow Sea [J]. Marine pollution bulletin, 2018, 128: 408-414.
- [59] HU L, HU C, MING-XIA H E. Remote estimation of biomass of *Ulva prolifera* macroalgae in the Yellow Sea [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 192: 217-227.
- [60] 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(中文版), 2012, 34(06): 187-194.
- [61] 肖艳芳, 张杰, 崔廷伟, 等. 海面漂浮绿潮生物量光谱特征及估算模型 [J]. 光学学报, 2017, 37(04): 346-354.
- [62] 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(自然科学版), 2010, 40(10): 15-23.
- [63] 夏深圳. 基于遥感的黄海浒苔漂移速度与驱动机制研究 [D]; 南京大学, 2016.
- [64] 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(01): 29-38.
- [65] 钟山, 丁一, 李振, 等. MODIS 浒苔遥感监测误差分析研究 [J]. 2013, 01: 38-42.
- [66] 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(05): 24-27.

- [67] 刘向南. 南黄海辐射沙洲岸滩演变动态特征研究 [D]; 南京师范大学, 2016.
- [68] 周长振, 孙家淞. 试论苏北岸外浅滩的成因 [J]. 海洋地质研究, 1981, 01: 83-91.
- [69] 江苏省海洋与渔业局. 江苏省蒋家沙竹根沙海域渔业养殖规划 (2010-2015 年) [M]// 江苏省海洋与渔业局. 江苏省海洋与渔业局. 2011.
- [70] 江苏省海洋与渔业局. 江苏省蒋家沙竹根沙海域渔业养殖规划 (2016-2020 年) [M]. 江苏省海洋与渔业局. 2017.
- [71] 宋伟. 苏北浅滩定生绿藻的鉴定、生理特征及群落演替研究 [D]; 湖南农业大学, 2014.
- [72] 朱建一, 陆勤勤, 周伟, 等. 条斑紫菜“苏通 2 号” [J]. 中国水产, 2015, 11: 60-62.
- [73] 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]; 华东师范大学, 2014.
- [74] 孔凡洲, 姜鹏, 魏传杰, 等. 2017 年春、夏季黄海 35° N 共发的绿潮、金潮和赤潮 [J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(05): 1021-1030.
- [75] 万剑华, 王朝, 刘善伟, 等. 消费级无人机的大比例尺测图能力分析 [J]. 测绘通报, 2018, 06: 104-108.
- [76] 张纯斌, 杨胜天, 赵长森, 等. 小型消费级无人机地形数据精度验证 [J]. 遥感学报, 2018, 22(01): 185-195.
- [77] 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.
- [78] 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]; 中国海洋大学, 2014.
- [79] 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(05): 1068-1074.
- [80] 欧洲中期天气预报中心(ECMWF). 气候变化监测的新里程碑: 欧洲中期天气预报中心推出 ERA5 预览版 [M]. 中国日报中文网. 2016.
- [81] 秦其明, 刘慧平 梅 彭. 遥感导论 [M]. 北京; 高等教育出版社. 2001.
- [82] 梁华为. 直接从双峰直方图确定二值化阈值 [J]. 模式识别与人工智能, 2002, 15(02): 253-256.
- [83] ZHAO J, JIANG P, QIN S, et al. Genetic analyses of floating *Ulva prolifera* in the Yellow Sea suggest a unique ecotype [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163: 96-102.

- [84] 姜鹏, 赵瑾. 黄海绿潮浒苔漂浮生态型的发现与启示 [J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(05): 959-966.
- [85] ZHANG X, XU D, MAO Y, et al. Title Settlement of vegetative fragments of *Ulva prolifera* confirmed as an important seed source for succession of a large-scale green tide bloom [J]. *Journal Limnology and Oceanography*, 2011, 56: 233-242.
- [86] 朱莹. 紫菜养殖筏架固着绿藻的清除方法研究 [D]; 上海海洋大学, 2014.
- [87] 王惠冲. 紫菜养殖中绿藻的综合防治 [J]. 水产养殖, 1992, 01: 5.
- [88] 张清春, 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(05): 1014-1020.
- [89] 刘材材, 徐韧, 何培民, 等. 南黄海绿潮暴发源头调查与研究; proceedings of the 2013 上海-釜山海洋研讨会, 中国上海, F, 2013 [C].
- [90] 韩笑天, 赵婷, 苗辉, 等. 苏北浅滩绿藻从定生到漂浮过程中的组成及其生长特性 [J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(02): 308-315.
- [91] 方松. 江苏近海筏架定生绿藻及微观繁殖体的研究 [M]. 国家海洋局第一海洋研究所. 2012.
- [92] 白雨, 赵亮, 刘境舟. 生态因子在黄海绿潮生消过程中的作用 [J]. 海洋学报, 2019, 41(08): 97-105.
- [93] 李文慧, 朱明, 刘冉, 等. 氮磷营养盐因子对缘管浒苔生长、叶绿素荧光特性和氮磷富集的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(04): 553-558.
- [94] 杨静, 张思, 刘桂梅. 基于卫星遥感监测的 2011—2016 年黄海绿潮变化特征分析 [J]. 海洋预报, 2017, 34(03): 56-61.
- [95] 孙晓. 黄海绿潮和叶绿素 a 浓度的遥感时空分异及两者响应机制 [D]; 鲁东大学, 2018.
- [96] CAI C E, YAO B, SHEN W R, et al. Determination and analysis of nutrition compositions in *Enteromorpha clathrata* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2009, 18(2): 155-159.
- [97] LIU D, ZHOU M. Green Tides of the Yellow Sea: Massive Free-Floating Blooms of *Ulva prolifera* [M]//GLIBERT P M, BERDALET E, BURFORD M A, et al. *Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms*. Cham; Springer International Publishing. 2018: 317-326.
- [98] 王宗灵, 傅明珠, 周健, 等. 黄海浒苔绿潮防灾减灾现状与早期防控展望 [J]. 海洋学报, 2020, 42(08): 1-11.

- [99] 耿慧霞, 颜天, 于仁成, 等. 浒苔孢子在不同材料基质上的附着萌发差异性研究 [J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(05): 1006-1013.
- [100] 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.
- [101] PONTIUS R G, MILLONES M. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(15): 4407-4429.
- [102] ROSENFELD 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.
- [103] 张林慧, 张建恒, 赵升, 等. 2014 年青岛海域消亡漂浮浒苔生理特征研究 [J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(04): 591-598.
- [104] 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(01): 40-44.
- [105] 郑翔宇, 高志强, 徐福祥, 等. 基于 VB-FAH 指数的黄海绿潮遥感监测及对比研究 [J]. 海洋科学, 2017, 41(05): 71-79.
- [106] 曹佳春, 吴青, 张建恒, 等. 青岛海域漂浮浒苔光合生理特性及藻体状态等级评价研究 [J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(06): 922-927.
- [107] 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, 04: 601-604.
- [108] 自然资源部北海局. 2017 年北海区海洋灾害公报 [M]//自然资源部北海局. 2018.
- [109] 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.
- [110] 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]; 中国海洋大学, 2011.

附录

(1)附录 1: ERA5 风场数据的转换代码。

程序读取了 2019 年 6 月 19 日当天, 南黄海研究区的 ERA5 逐小时风场的 nc 格式数据, 将其转换生成风速与风向, 并保存到 excel 表格中。

首先查询 nc 文件中的各物理量的名称:

```
>>> import netCDF4 as nc
>>> file='G:\\nc\\20190619winds.nc'
>>> dataset=nc.Dataset(file)
>>> print(dataset.variables.keys())
>>> print(dataset.variables["longitude"][:]) %查看某一项的属性值%
```

然后, 结合查询的属性值, 利用 python 读取风场数据, python 源码如下:

##读 nc 文件的风速数据, 并保存到 excel 中;

```
import pandas
import numpy as np
import csv
import glob
import sys
import netCDF4 as nc
from datetime import datetime
##将nc文件风速的uv分量转为风速和风向;
def uv2wsd(x, y):
    ws = np.sqrt(x ** 2 + y ** 2)
    wd = np.arctan2(y, x)
    phi = wd * 180 / np.pi
    if x>0 and y >0:
        wd1 =90-phi;
    elif x>=0 and y<0:
```

```

        wd1=90-phi;
    elif x<0 and y<0:
        wd1=90-phi;
    elif x<0 and y>0:
        wd1=450-phi;
    elif x==0 and y<0:
        wd1=180;
    elif x==0 and y>0:
        wd1=0;
    elif x>0 and y==0:
        wd1=90;
    elif x<0 and y==0:
        wd1=270;
    elif x==0 and y==0:
        wd1=999.9;
    return [ws, wd1]

```

#时间转换儒略日到常规的年月日时间

```

def jd_to_time(time,count):
    dt = ne.num2date(time[count], time.units, time.calendar)
    return dt

```

#函数将nc文件存储到excel中，首先应查询到nc文件中包含的variables

```

def to_csv(source_file):
    dataset=ne.Dataset(source_file)
    print(dataset.variables.keys())
    lat= dataset.variables['latitude'][:]
    lon= dataset.variables['longitude'][:]
    u=dataset.variables['u'][:]
    v=dataset.variables['v'][:]
    itime=dataset.variables['time']
    index=[]

```

```
for j in range(len(lat)):
    for k in range(len(lon)):
        if lat[j]>23 and lat[j]<40:
            if lon[k]>118 and lon[k]<123:
                index.append((j,k))

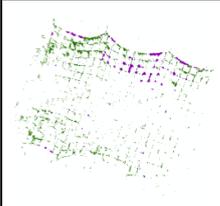
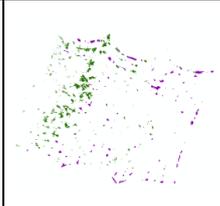
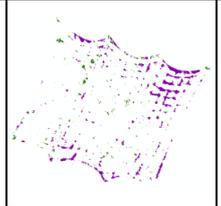
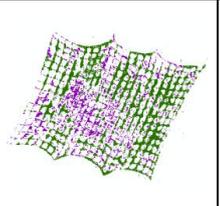
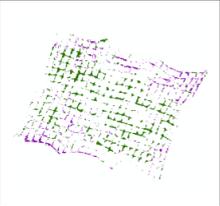
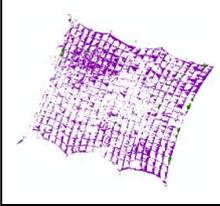
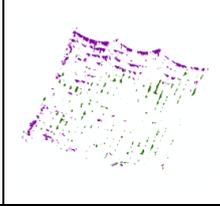
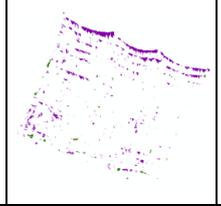
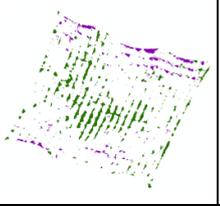
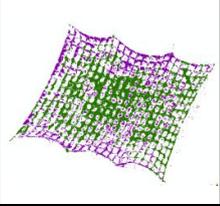
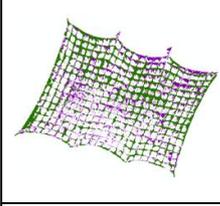
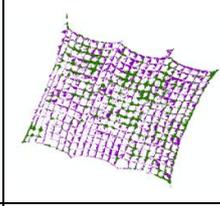
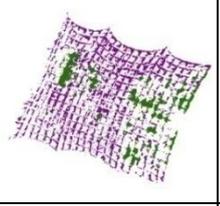
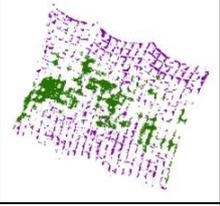
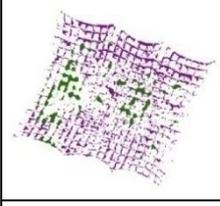
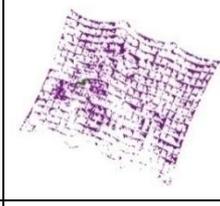
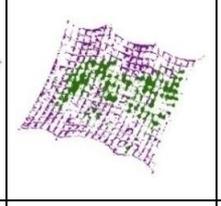
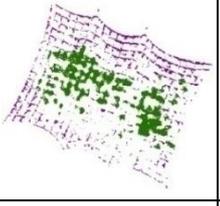
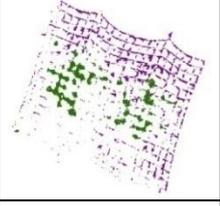
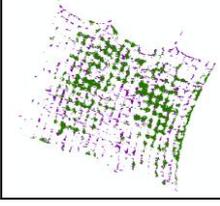
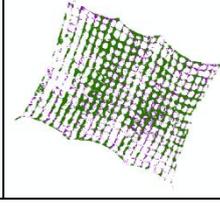
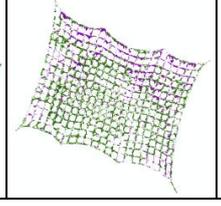
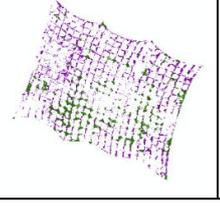
print('输出index列表: ')
print(index)
print('-----')
source_file=source_file.split('.')
file_name=source_file[0]
try:
    with open(file_name+'.csv','a',newline=") as targetFile:
        writer=csv.writer(targetFile)
        writer.writerow(('lat','lon','time','u','v','windspeed','winddir',))
        for j in range(len(lat)):
            for k in range(len(lon)):
                for m in range(len(itime)):
                    if lat[j] > 23 and lat[j] < 40:
                        if lon[k] > 118 and lon[k] < 123:
                            i=0
                            u1=u[m][j][k]
                            v1=v[m][j][k]
                            w1=uv2wsd(u1,v1)
        writer.writerow((lat[j],lon[k],jd_to_time(itime,m),u1,v1,w1[0],w1[1]))
        targetFile.close()
        print('Get'+file_name+'.csv Success!')
except Exception as e:
    print('Error:'+str(e))

##主程序入口
if '__name__'=='__main__':
```

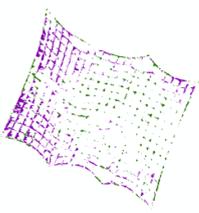
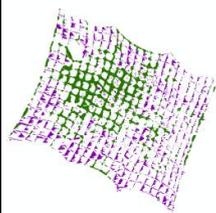
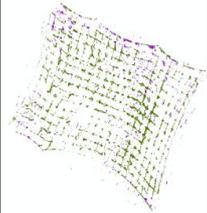
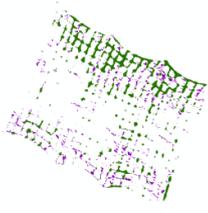
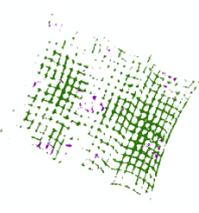
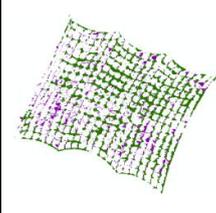
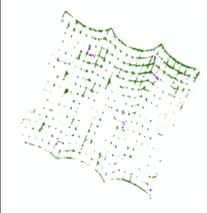
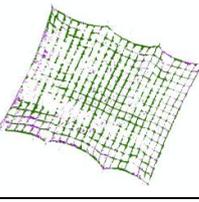
```
print("start transform!")
filename='F:\\ascat\\20190619winds.nc'
to_csv(filename)
print("Transform successfully")
```

(2) 附录 2: 苏北浅滩紫菜筏架 61 张网帘中紫菜、绿藻的提取结果图。

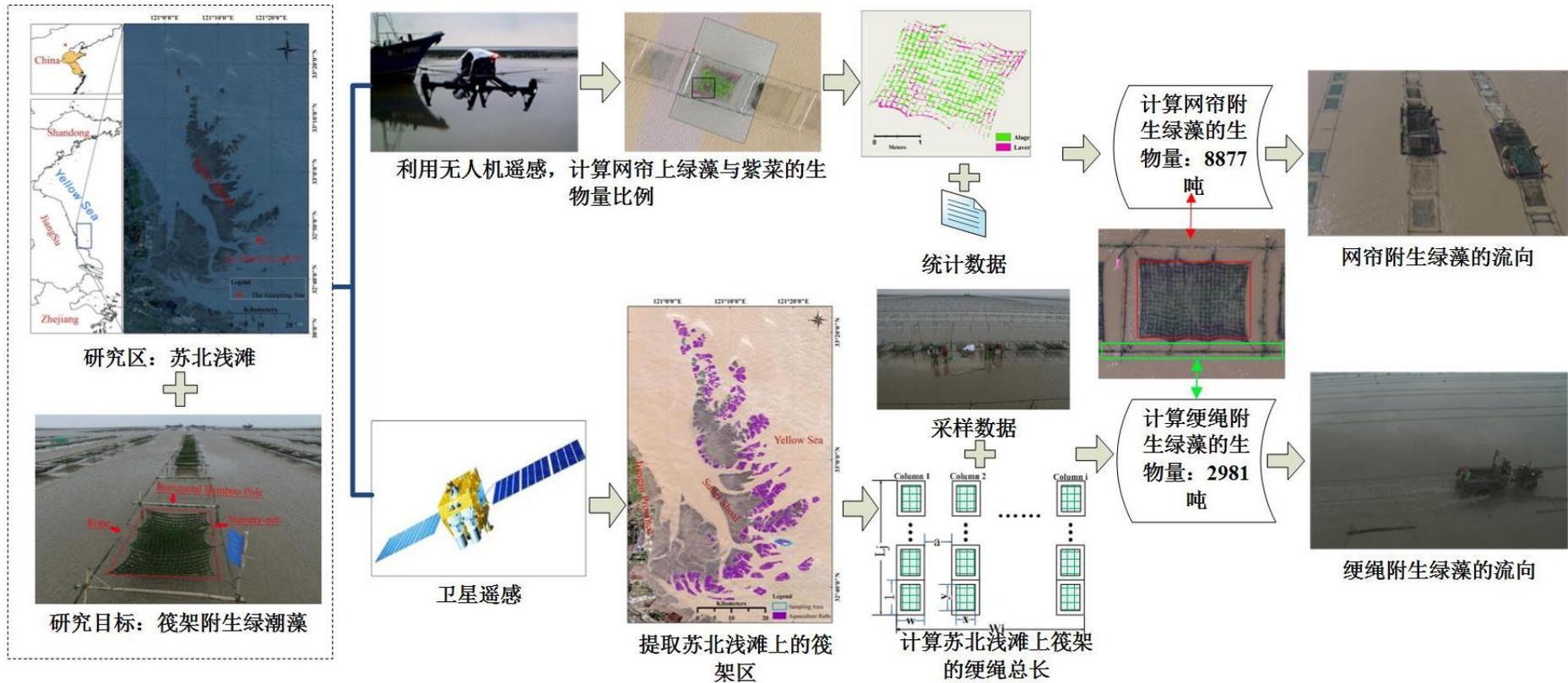
表格中 P 表示网帘上紫菜(*P. yezoensis*)的面积, G 表示网帘上绿藻(Green algae)的面积, 面积单位为平方米(m^2)。

				
(1): $P=0.07$; $G=0.27$	(2): $P=0.07$; $G=0.14$	(3): $P=0.24$; $G=0.05$	(4): $P=0.50$; $G=1.04$	(5): $P=0.17$; $G=0.39$
				
(6): $P=1.59$; $G=0.06$	(7): $P=0.30$; $G=0.15$	(8): $P=0.30$; $G=0.03$	(9): $P=0.14$; $G=0.44$	(10): $P=0.84$; $G=1.58$
				
(11): $P=0.84$; $G=1.57$	(12): $P=1.27$; $G=0.86$	(13): $P=0.78$; $G=0.39$	(14): $P=1.54$; $G=0.60$	(15): $P=0.59$; $G=0.65$
				
(16): $P=0.97$; $G=0.32$	(17): $P=1.31$; $G=0.01$	(18): $P=1.01$; $G=0.83$	(19): $P=0.46$; $G=0.77$	(20): $P=0.55$; $G=0.34$
				

(21): $P=0.41$; $G=0.83$	(22): $P=0.60$; $G=1.61$	(23): $P=0.50$; $G=1.06$	(24): $P=0.81$; $G=0.42$	(25): $P=0.76$; $G=0.14$
(26): $P=0.19$; $G=1.22$	(27): $P=0.24$; $G=1.15$	(28): $P=0.08$; $G=0.98$	(29): $P=0.23$; $G=0.03$	(30): $P=0.13$; $G=0.14$
(31): $P=0.36$; $G=1.45$	(32): $P=0.49$; $G=0.20$	(33): $P=0.06$; $G=0.88$	(34): $P=1.19$; $G=0.18$	(35): $P=3.30$; $G=0.06$
(36): $P=0.46$; $G=1.20$	(37): $P=0.39$; $G=0.20$	(38): $P=0.13$; $G=0.08$	(39): $P=0.74$; $G=0.98$	(40): $P=0.13$; $G=1.56$
(41): $P=0.30$; $G=1.70$	(42): $P=0.21$; $G=1.10$	(43): $P=0.23$; $G=2.97$	(44): $P=0.55$; $G=0.43$	(45): $P=0.42$; $G=1.97$
(46): $P=0.21$; $G=2.80$	(47): $P=0.19$; $G=2.98$	(48): $P=0.16$; $G=2.00$	(49): $P=0.14$; $G=2.29$	(50): $P=0.64$; $G=1.50$

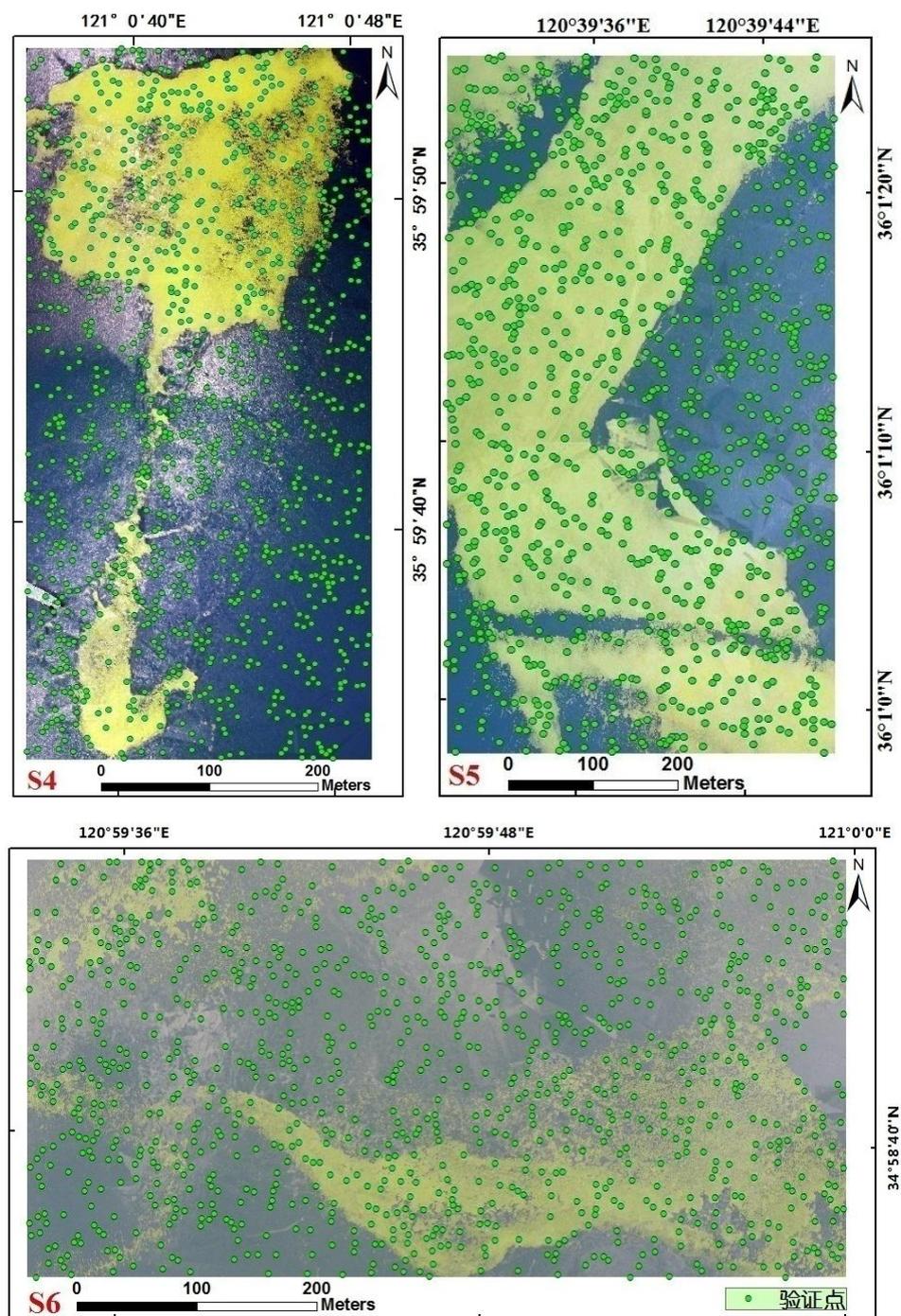
				
(51): $P=0.40$; $G=0.19$	(52): $P=0.54$; $G=0.64$	(53): $P=0.12$; $G=0.46$	(54): $P=0.21$; $G=0.51$	(55): $P=0.19$; $G=1.39$
				
(56): $P=0.05$; $G=0.93$	(57): $P=0.41$; $G=1.25$	(58): $P=0.02$; $G=0.33$	(59): $P=0.60$; $G=0.03$	(60): $P=1.22$; $G=0.65$
				
(61): $P=0.24$; $G=0.98$				

(3)附录 3: 筏架附生绿藻生物量估算研究的图形流程图。



(4)附录 4: 提取结果精度评价的验证点。

本文第四章对 S4、S5、S6 三个站位的绿潮提取结果进行了精度评价与对比, 每个站位随机生成 1000 个验证点用于精度评价, 足够多的验证点减小了评价误差, 各个站位的验证点分布如下图所示。



致 谢

时光荏苒，岁月如梭，三年博士光阴，弹指而过，其中阳光与风雨兼程，有幸春华秋实。前路漫漫，依旧任重而道远，学海无涯，仍需上下而求索。值此论文初成，谨向所有帮助给予诚挚致谢：

首先，致谢我的导师高志强研究员。高老师专业扎实，博物通达而又正直坦荡，对学生则言传身教，宽厚耐心。在学生迷茫时高老师指明方向、给予鼓励，在学生懈怠时常及时鞭策、督促前进。无论在科研、生活还是未来的人生道路，都给予了无私的帮助和悉心的指导，亦师亦友亦如父，师恩浩荡，教泽流芳。

其次，致谢课题组的吴晓青老师，毕晓丽老师，高猛老师，宁吉才老师以及王跃启老师、尚伟涛老师和田信鹏老师。在科研和生活的诸多方面，都得到了你们强大的助力，能在这样一个有温度的大家庭中与你们一起工作，常感骄傲和荣幸。此外，感谢中国科学院海洋研究所张清春老师在调查数据以及文章修改的帮助。感谢中国海洋大学的胡连波老师，虽素昧平生，却仍给予数据支持与专业交流指导，让我感受到了一名学者的平易近人与深厚的专业功底。感谢中国科学院海洋大数据中心提供的数据支持。感谢课题组的李冬雪、王志成等师弟师妹以及已毕业的各位师姐师兄的相伴和帮助。

最后，感谢家人的支持和付出，留给我休憩的港湾。感谢祖国对我们的庇护，这三年期间，国际形势波谲云诡，新冠疫情肆虐全球，祖国为我们提供了最坚实的保障，让我们可以畅快呼吸，正常开展研究等一系列工作。愿我们的祖国，巍巍然如泰山般，屹立于世界民族之林，愿为你的强大，贡献出自己的力量。

姜晓鹏

2021年6月

