

夏季长江口外赤潮海区叶绿素 a 分布特征与固碳能力

高 航¹, 王 璇¹, 朱雯喆², 谢 丽²

(1. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 2018 年和 2019 年分别对夏季长江口外赤潮海区开展了两个断面水体环境要素调查, 叶绿素 a (Chl a) 原位观测和同步水样采集测定的两套数据均表明该区夏季水体 Chl a 分布特征: 最大值不局限分布于表层 2m, 可深达 10~15m。全水柱 Chl a 观测值与实测值呈线性显著正相关 ($r > 0.8, p < 0.05$), 表明高深度分辨率的 Chl a 原位观测数据可全面反映水体浮游植物生物量垂直分布。采用真光层内高深度分辨率 Chl a 观测值积分优化方法的垂直归一化模型 (Vertically Generalized Production Model, VGPM) 估算整个藻华水柱初级生产力, 充分体现该海区藻华水层叶绿素垂直分布特征与其初级生产的固碳能力, 有助于深入理解受人类活动干扰严重的海岸带赤潮海区全水柱的固碳贡献及其在海洋碳中和与碳循环中的角色。

关键词: 长江口; 叶绿素 a; 原位观测; 初级生产力; 碳循环

中图分类号: P593; P717;

文献标志码: A

Distribution of Chlorophyll a and Carbon Fixation at HABs Coast of Yangtze River Estuary in Summer

GAO Hang¹, WANG Xuan¹, ZHU Wenzhe², XIE Li²

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The environmental factors in the water column were investigated along the 2 transects at the Harmful Algae Blooms (HABs) coast of the Yangtze River Estuary and Hangzhou Bay during summer in 2018 and 2019. Based on two datasets of Chl a obtained via *in situ* sensor-monitoring and simultaneously water sample analysis, it showed that the distribution of Chl a in summer was featured with the maximum concentration not only existing at a surface depth of 2m, but down to a depth range of 10~15 m. The *in situ* observed Chl a

concentrations showed the positively linear regression ($r > 0.8, p < 0.05$) with those determined from water samples through the water columns, suggesting that the observed Chl a data with high depth-resolution may be reliable to represent the vertical distribution of phytoplankton biomass. Therefore, based on that, the primary productivity of the whole blooming water column was estimated by the vertically generalized production model (VGPM) using the optimized method of the integrated Chl a concentrations with the photic depths. The optimized VGPM pattern may reflect the vertical distribution feature of Chl a and carbon fixation rate of the whole blooming waterbody, to improve our knowledge on the role of HABs coast water under the impacts of severe anthropogenic activities in the carbon neutrality and fixation in the marine carbon cycle.

Key words: Yangtze River Estuary; Chl a; *in situ* observation; primary productivity; carbon cycle

在全球碳循环中, 近百年的短时间尺度下, 海洋碳循环影响着大气 CO₂ 的收支平衡与气候变化^[1]。海洋作为巨大的碳库, 其储量占全球活性有机碳库的 1/6^[2], 其中生物泵作为海洋固碳的重要过程, 尽管海洋浮游植物生物量不及全球光合自养生物量的 1%, 但贡献的初级生产力占全球初级生产力总量的 50%^[3], 这为海洋碳循环、储碳及海洋在气候变化中的作用做出了巨大的贡献。因此, 海洋初级生产力 (ocean primary productivity, OPP), 即 CO₂ 固定生成有机碳的速率^[4]是研究海洋固碳通量与机制的基础。按照全年碳源汇总量估算, 高生产力的陆架边缘海被认为是海洋主要碳汇, 其对大气 CO₂ 的吸收占全球海洋 CO₂ 吸收总量 50%^[5-6]。而陆架边缘海域直接受到人类活动干扰, 如近岸流域的农作施

收稿日期: 2021-11-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61936014); 国家青年自然科学基金 (41406123)

第一作者: 高航 (1978—), 女, 讲师, 理学博士, 主要研究方向为海洋观测与生物地球化学过程。

E-mail: hgao@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

肥、废气排放及河流和地下水的输入等,导致大量营养盐输入,使得近海富营养化、赤潮、缺氧等生态灾害现象频发。

东海(East China Sea, ECS),作为西太平洋最大的陆架边缘海,陆架区面积可达 $5 \times 10^5 \text{ km}^2$ [7]。近几十年,在东海海域范围开展了初级生产力的大面走航采样调查,通常采用 ^{14}C 直接测定法,基于以往现场实验调查结果,因受河流输入和外海海水交汇作用影响,东海近海水体异质化性质显著,碳源汇性质及陆架区初级生产力都呈现明显的区域与季节变化特征[8-9]。Chl a作为浮游植物生物量指标用于估算海区初级生产力。近年,基于水样采集分析测定或海洋遥感观测的海表2m Chl a质量浓度和光衰减数据的各种初级生产力估算模型逐渐发展并得到广泛应用,如经验模型(Empirical Model, EM)、时间积分模型(Time Integrated Model, TIM)及垂直归一化生产力模型(Vertically Generalized Production Model, VGPM)[10]。各研究对东海初级生产力实验调查与模型估算结果有所差别,但都表明“东海初级生产力在夏季最高”[10-15]。

受河流输入等人类活动的直接影响,长江口外咸淡水交汇海域是春夏季赤潮频发区,也是东海近海夏季高初级生产力区,且常引发水体局部缺氧事件。以该区域为模式区域,开展夏季水体的Chl a分布特征研究,对于我们更好地理解人类活动直接干扰下近岸水体的固碳能力变化有重要意义。因此,2018和2019年夏季在长江口外赤潮频发海区开展全水柱环境要素特征调查,通过原位观测与同步采样测定的数据比对,着重研究水柱叶绿素垂直分布特征,并通过高深度分辨率的Chl a观测数据,采用真光层内水体叶绿素浓度对深度积分的归一化优化方法,为应用原位传感器高分辨率观测数据反演全水柱藻华水层的初级生产力即整体固碳能力提出了一种新估算模式。

1 材料与方法

1.1 研究区域

长江口外咸淡水交汇海域环境复杂,受控于不同水团作用,也受到人类活动的影响。该海域的水文条件受地形、长江径流、黑潮水和上升流的影响[16-18],春夏季水体温盐层化明显;夏季,大量陆源营养盐输入该区,浮游植物在适宜的光照、水温等条件下初级生产作用强烈,藻华频发,浮游植物死亡沉

降至底层,有机质矿化分解消耗大量 O_2 ,而稳定的水体结构使该海域的底层溶解氧消耗后不能得到有效补充[19]。常观测到长江口外缘(30.8°N , 122.5°E)底层水体存在局部低氧/缺氧现象[16]。自20世纪80年代以来,长江口邻近海域(124°E 以西, $28^\circ \sim 34^\circ\text{N}$)春夏季赤潮频发,尤其以 $122^\circ \sim 123^\circ\text{E}$, $30^\circ \sim 32^\circ\text{N}$ 海域赤潮发生最为频繁,因此该区域也被称为“长江口及其邻近海域的赤潮多发区”[14]。因而,以长江口外赤潮频发的交汇海域为研究对象,开展叶绿素分布特征及初级生产力的空间异质性研究,可为近海生物固碳提供重要基础信息。

1.2 原位观测与水样采集分析

2018年7月28日至8月4日、2019年7月30日至8月3日通过同济大学海洋与地球科学学院海洋技术专业实践航次,搭载浙江海洋大学“浙渔科2号”,对长江口外交汇海域($122.2^\circ \sim 123.3^\circ\text{E}$, $29.8^\circ \sim 31^\circ\text{N}$)共17个站位分别进行了两个夏季航次的综合调查(图1),包括传感器现场原位观测和同步海水样本采集。航次采用光合辐射仪、与配备水下荧光仪和水质多参数分析仪的CTD采水器,在现场进行垂直剖面调查,获取水体垂直剖面上的温度、盐度、光照强度、叶绿素和溶解氧等参数的实时观测环境数据(表1),并同步完成水样采集工作。

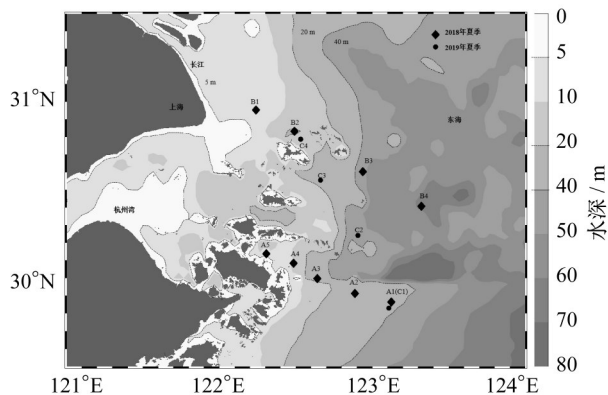


图1 2018和2019年夏季长江口外交汇海域调查站位
Fig.1 Investigated stations at HABs coast of the Yangtze River Estuary during summer cruises in 2018 and 2019

航次开展前,参照仪器使用手册推荐方法,在实验室内完成调查设备EXO2和C3校准。其叶绿素传感探头采用罗丹明WT标准溶液进行校正。CTD采水器与自身配备的溶解氧等传感探头,由浙江海洋大学“浙渔科2号”实验人员提供技术保障。

表1 现场观测主要仪器及其观测要素

Tab.1 Main instruments of field observation and the observed parameters

仪器	型号或规格	生产商	观测要素
CTD采水器 ^{1,2}	SBE25Plus+SBE32	美国 Sea Bird Scientific 公司	温度、盐度、深度、溶解氧、pH
光合辐射仪 ^{1,2}	BIS PAR	美国 Biospherical 公司	有效光合辐射能
水下荧光仪 ¹	C3	美国 Turner Designs 公司	叶绿素、浊度、荧光溶解有机质
多参数水质分析仪 ²	EXO2	美国 YSI 公司	叶绿素、浊度、荧光溶解有机质

注:1为2018年采用的观测仪器;2为2019年采用的观测仪器。

海水叶绿素样本采集与测定按照《海洋调查规范》(GB12763.4—2007)^[20]进行。共采集海水样本67个,现场立即采用玻璃纤维滤膜(0.7 μm, Whatman GF/F, 美国)过滤,样本置于-20℃冰柜避光保存,返航后按照《海洋生物生态调查技术规范》^[21],以标准 Chl a(S-C6114-1MG, Sigma, 美国)试剂配制标准曲线,采用荧光光谱仪(F-2700, HITACHI, 日本)通过荧光法完成 Chl a测定分析工作。

1.3 数据分析与初级生产力模型

采用 Ocean Data View 4.5 软件绘制采样站点图,采用 SPSS 17.0 统计软件分析 Chl a 原位观测和同步采样测定数据间相关性,采用 Origin 8.5 绘制 Chl a 和初级生产力等数据图。采用 EM 模型估算了表层水体初级生产力,并基于遥感常用 VGPM 模型,优化 C_{eu} 求值方法估算藻华水柱初级生产力。

EM 模型通常采用表层 Chl a 质量浓度值估算表层水体初级生产力 P 如下:^[22]

$$P = \frac{P'Dz}{2} \quad (2)$$

$$P' = CQ \quad (3)$$

$$1\% = \frac{P_{AR(z)}}{P_{AR(0)}} \quad (4)$$

式中: P 为初级生产力($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); P' 为表层浮游植物潜在生产力($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); D 为白昼时长(h); z 为真光层深度(m); C 为表层 Chl a 质量浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); Q 为同化指数($\text{mgC} \cdot (\text{mg Chl a} \cdot \text{h})^{-1}$); $P_{AR(z)}$ 和 $P_{AR(0)}$ 分别为水深 z m 和 0 m 的有效光合辐射能($\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

采用 EM 模型估算时,根据日出日落计算器将 D 记为 12 h。表层 Chl a 浓度测定值采用 2 m 层水体 Chl a 分析测定结果,表层 Chl a 浓度观测值采用 1~3 m 层水体 Chl a 原位观测数据的平均值。通过式(4),将 $P_{AR(z)}$ 是 $P_{AR(0)}$ 的 1% 时的深度作为真光层深度 z 。关于同化指数 Q ,Ryther 等^[23]指出,各种浮游植物在光饱和条件下碳同化速率为 $3.7 \text{ mgC} \cdot (\text{mg Chl a} \cdot \text{h})^{-1}$,本文参照周伟华等人夏季在邻近海区根

据实际调查获得的同化指数^[14], Q 采用 $2.663 \text{ mgC} \cdot (\text{mg Chl a} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

VGPM 多基于遥感获取叶绿素浓度数据反演真光层内水体初级生产力 P_{Pcu} (式5~式7),其中, C_{eu} 常采用表层水体 Chl a 浓度遥感测值^[24]。本文则基于传感器的高深度分辨率 Chl a 原位观测值,通过对真光层内各 Chl a 浓度进行藻华水层深度上的整体积分求和方法,优化 C_{eu} 估算公式(式8),以表征真光层内整个藻华水柱的初级生产力(式5~式7)^[4,12]:

$$P_{\text{Pcu}} = 0.66125 P_{\text{opt}}^B \frac{E_0}{E_0 + 4.1} z C_{\text{eu}} D \quad (5)$$

$$P_{\text{opt}}^B = \begin{cases} 1.13T \leq -1.0 \\ 4.00T \geq 28.5 \\ f(T) - 1.0 < T < 28.5 \end{cases} \quad (6)$$

$$f(T) = 1.2956 + 2.749 \times 10^{-1}T + 6.17 \times 10^{-2}T^2 - 2.05 \times 10^{-3}T^3 + 2.462 \times 10^{-3}T^4 - 1.348 \times 10^{-4}T^5 + 3.4131 \times 10^{-5}T^6 - 3.27 \times 10^{-8}T^7 \quad (7)$$

$$C_{\text{eu}} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\rho_{vi}(\text{Chl a}) + \rho_{vi+1}(\text{Chl a})}{2} \times (D_{i+1} - D_i)}{D_{\text{max}}} \quad (8)$$

式中: P_{Pcu} 为真光层内水体初级生产力($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); P_{opt}^B 为水体光合作用速率($\text{mgC} \cdot (\text{mg Chl a} \cdot \text{h})^{-1}$); E_0 为表层水体有效光合辐射能($\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); z 为真光层深度(m); C_{eu} 为真光层内 Chl a 的积分浓度值; D 为白昼时长(h); T 为表层水体温度(℃); $\rho_{vi}(\text{Chl a})$ 为第 i 层海水 Chl a 质量浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); D_i 为第 i 层水体深度(m); D_{max} 为最大采样深度(m); n 为取样层数。

采用 VGPM 模型估算时,根据日出日落计算器将 D 记为 12 h。同样,通过式(4)获得真光层深度 z 。真光层水柱内的 Chl a 质量浓度测定值和观测值分别代入到式(8)中,得到各自 C_{eu} ,再由式(5)获得各自 P_{Pcu} 。

2 结果与讨论

2.1 长江口-杭州湾外交汇海域夏季水体环境特征

在夏季长江冲淡水 and 外海水团的影响下,长江口-杭州湾外交汇海域各站位水环境参数全水柱均值(盐度、浊度、温度、溶解氧)分布呈现出因咸淡水混合导致的空间异质化特征(表2)。调查断面水体水温由近岸向离岸逐渐降低,盐度则呈现从近岸到离岸逐渐增大的趋势,2018年调查海域水体盐度分

布范围为 16.3~32.5 ppt,与 2019 年同期相比,盐度变化幅度明显,表明冲淡水作用显著;2019 年夏季水体表现出更为明显的层化现象,与 2018 年同期相比,虽表层(2m)溶解氧含量水平高,但全水柱溶解氧浓度均值水平低,表明该年度浮游植物勃发导致水体表层溶氧含量升高,但因层化现象加剧有机质矿化耗氧,而使得水体底部(近底 2m)发生局部低氧(表2),与前人认识结果一致^[16]。

表2 各站位水体环境要素(全水柱均值)与真光层深度

Tab 2 Environmental factors of seawater (average value of the whole water column) and the photic depth at each station

调查时间	站位	温度/℃	盐度/ppt	浊度/NTU	表层溶解氧/(mg·L ⁻¹)	底层溶解氧/(mg·L ⁻¹)	溶解氧/(mg·L ⁻¹)	真光层深度/m	水深/m
2018-07	A5	25.8	29.4	75.6	5.7	5.6	5.7	3.0	15.2
	A4	25.4	29.8	5.8	6.1	5.6	5.8	6.2	19.2
	A3	24.9	32.0	4.7	13.1	2.8	8.7	11.3	29.2
	A2	24.8	33.5	0.5	8.5	4.2	6.4	24.3	49.7
	A1	24.2	34.0	0.5	7.1	4.3	5.8	33.2	62.0
	B4	23.3	34.0	0.1	6.6	3.5	5.2	37.9	62.8
	B3	24.1	32.7	0.8	6.8	3.6	5.4	24.0	50.0
	B2	25.9	27.3	8.5	6.8	5.1	5.8	3.9	17.0
	B1	26.2	19.8	77.3	6.3	5.9	6.1	1.8	10.0
2019-07	A5	25.4	26.8	18.0	6.2	5.9	6.0	5.8	16.3
	A4	23.4	31.1	26.0	8.3	3.4	5.5	6.6	21.6
	A3	22.8	31.8	7.3	10.2	2.9	6.0	10.7	31.5
	A2	22.4	31.4	0.9	7.8	3.1	4.6	26.9	52.2
	A1(C1)	24.0	31.7	1.3	7.3	4.2	5.2	36.0	64.0
	C2	24.3	31.6	2.7	7.7	3.0	5.5	15.5	43.6
	C3	24.0	31.2	7.1	5.0	4.7	6.8	8.1	31.7
	C4	25.1	28.1	29.3	5.6	5.0	5.2	3.0	16.9

除此之外,调查断面水体浊度与真光层深度的分布特征呈现相反趋势。水体浊度均值水平由近岸向离岸逐渐降低,而真光层深度受浊度影响,呈现从近岸到离岸逐渐增大的趋势,近岸真光层深度约在全水深的-20%以浅,离岸真光层深度则深至全水深50%(表2),A断面离岸A1站位和长江口外B、C断面离岸B4、C1站位的真光层深度均大于30m。以杭州湾外A断面为例,各站位真光层深度在连续两年夏季调查期间基本稳定(除近岸站位A5)。

2.2 长江口-杭州湾交汇海域夏季 Chl a 分布特征

连续两年夏季调查区域水体 Chl a 原位观测和采样测定的数据分析结果显示其浓度在全水柱中的表层分布和垂直分布特征均呈现一致性(图2)。表层水体 Chl a 浓度随离岸距离增加,呈现先升高再降低的分布趋势,浓度核心高值基本集中在各断面的中间站位表层或次表层,均高于 5 mg·m⁻³,表明该区域夏季水体处于藻华期^[25];2019 年夏季水体叶绿素

浓度整体比 2018 年高近一倍水平,可能与 2019 年水体环境因素如温盐等条件有关^[15]。

连续两年夏季调查区域全水柱 Chl a 浓度均呈现从表层(次表层)到底层逐渐降低的垂直分布特征,尽管长江口和杭州湾外断面水体 Chl a 核心浓度高值与所在水层深度因调查年份有所差别。2019 年出现深层(次表层)水体 Chl a 极大值(deep chlorophyll a maximum, DCM)的藻华(Chl a 质量浓度 ≥ 5 mg·m⁻³)水层可深达 10~15m(图2)。连续两年夏季,A断面A3和A4站位 Chl a 测定值和观测值两套数据显示,质量浓度高值(11.7和20.0 mg·m⁻³; 22.5和18.3 mg·m⁻³)不仅出现在表层(2~3 m)水体,高浓度的藻华水层范围可深达 10m;同样,长江口外断面(B和C断面)B3和C3站位 Chl a 测定和观测质量浓度高值(7.8和3.1 mg·m⁻³; 13.4和24.3 mg·m⁻³)除出现在表层 2 m 水体,高浓度的藻华水层均深至 10~15m,尤其是 2019 年藻华水层覆盖范围

较深,这可能与DCM经常出现在层化水体如湖泊和海洋中有关^[26](图2)。

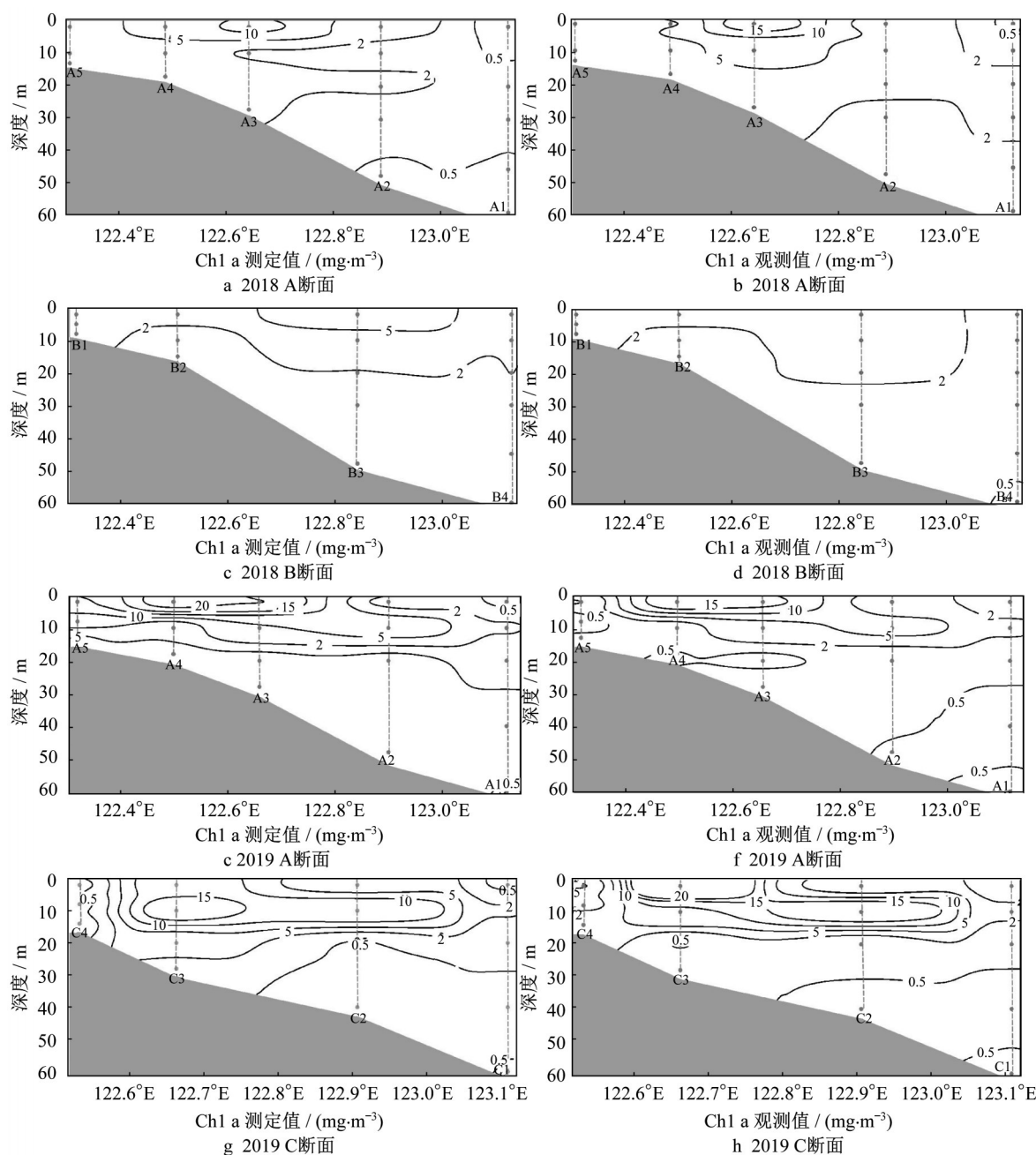


图2 长江口外赤潮海域叶绿素a分布特征

Fig.2 Distribution of Chl a along the section at HABs coast of the Yangtze Estuary based on two datasets.

连续两年夏季水体Chl a原位观测数据与同步采样测定数据的线性回归分析结果表明,除了个别层位水体浊度对原位观测数据有影响,全水柱中二者线性拟合关系良好且呈正相关($r > 0.9$),尤其是在Chl a质量浓度范围 $0 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 内呈现显著正相关($r > 0.8, p < 0.05$)(图3),表明现场同步原位观测与采样测定的两套数据具一致性,Chl a原位观测数据可真实、全面地表征浮游植物生物量的垂直分

布变化特征。

2.3 水体表层初级生产力P

基于表层Chl a观测和测定值的EM模型,2018和2019年调查区域夏季水体表层初级生产力P估算结果表明,二者呈现分布特征一致:随离岸距离的增加呈现先升高再下降的趋势,P高值出现在主要分布在调查区域的中部海域(A3、A4、B3和C3站位)(图4)。基于Chl a测定值和观测值估算结果,2018年调查海域表层

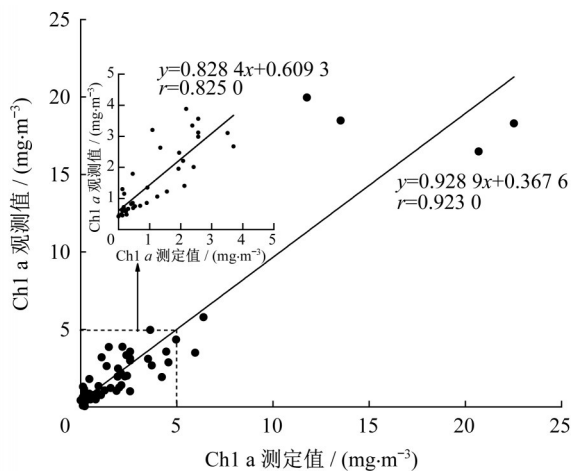


图3 Chl a原位观测与同步采样测定数据的线性回归分析
Fig.3 Linear regression analysis between the *in situ* observed and measured data of Chl a

初级生产力整体变化范围分别为82.8~2 986.7 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和56.9~3 614.2 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,整个调查海区表层初级生产力平均值分别为944.6 ($\pm 111\%$)和790.7 ($\pm 143\%$) $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 2019年调查海区整体表层初级生产力变化范围分别为10.6~3 546.7 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和12.1~4 851.9 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,平均值分别为1 024.7 ($\pm 123\%$)和1 346.5 ($\pm 119\%$) $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。调查区长江口和杭州湾外站位A3、B3和C3周边水体,位于赤潮频发海域($122.5^{\circ}\text{E} \sim 123^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{N} \sim 31^{\circ}\text{N}$ 附近),连续两年夏季均为高生产力区域。

在近岸海域,由于海水和冲淡水的混合强烈,长江悬浮泥沙的输入和海底沉积物的再悬浮导致海水浊度较高,光是限制浮游植物生长的主要因子;随着

冲淡水向外海方向扩散,水体层化,悬浮泥沙迅速沉降,透明度增大,河口输入的大量营养盐能较好的满足浮游植物快速增长,因此出现了初级生产力的高值区($122.5^{\circ}\text{E} \sim 123^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{N} \sim 31^{\circ}\text{N}$);在远岸海域,由于陆源营养盐被稀释,尽管水体透明度很高,初级生产力迅速下降,形成低值区^[27]。

由EM模型估算的表层初级生产力结果更多取决于表层Chl a取值,主要由2m层位其观测值与测定值的差异导致,二者的偏差范围介于31.32%~122.22%,这可能是仪器回收过程中因水体浊度、或震荡引起的气泡等因素影响传感器的原位观测结果^[28]所导致,表明基于表层Chl a观测值的表层水体初级生产力估算易受到外界环境因素干扰,带有一定的偶然因素,需要参考同步采样测定值与相应EM模型估算的初级生产力数据进行可靠性评估。

综上,由于连续两年夏季调查区域内高生产力海区浮游植物藻华水层10~15 m处存在深层(次表层)水体Chl a极大值(deep chlorophyll a maximum, DCM)(图2),通过局部表征的表层水体Chl a浓度来估算表层水体初级生产力,不能全面地认识整个水柱中浮游植物的固碳能力表现。调查海区夏季全水柱中Chl a观测值和测定值呈现线性显著正相关,表明观测值可较为真实、全面地表征浮游植物生物量的垂直分布变化特征。为更好地表征整个藻华水层的固碳能力,本文将基于高分辨率观测数据,采用真光层内Chl a质量浓度对深度积分方法的优化 C_{eu} 取值,估算真光层内藻华水柱初级生产力 P_{Pcu} 。

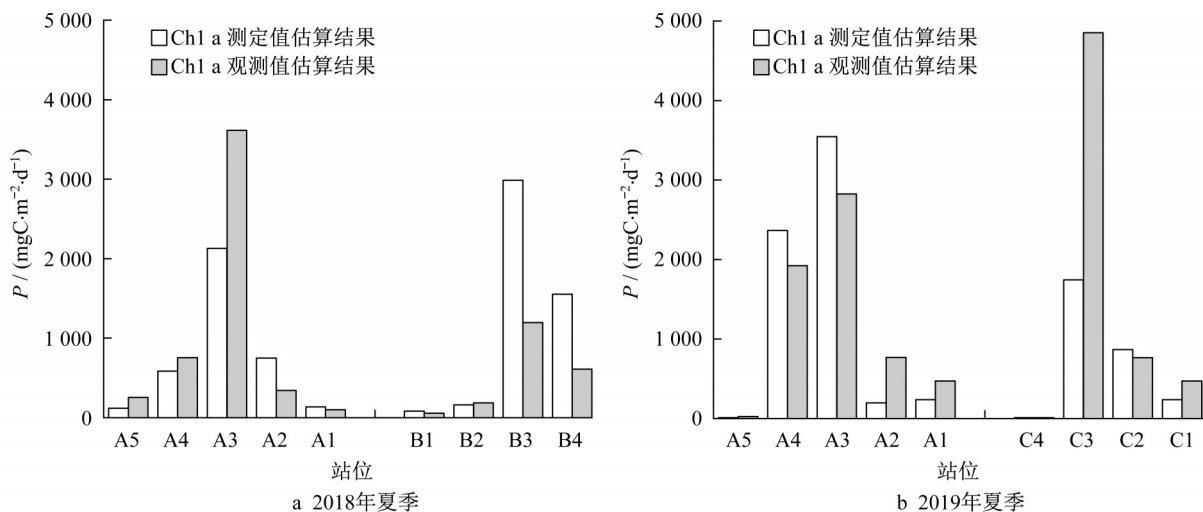


图4 分别基于表层Chl a测定和观测数据采用EM估算的表层水体初级生产力

Fig.4 Surface primary productivities estimated respectively based on the *in situ* observed and measured data of Chl a by EM

2.4 藻华水柱初级生产力 P_{Peu}

调查区域藻华水柱初级生产力 P_{Peu} 基于优化取值 C_{eu} 的 VGPM 模型估算获得。 P_{Peu} 与 P 的海域分布情况类似,呈现由近岸到离岸先升高后降低的分布特征(图5)。基于真光层 Chl a 测定值和观测值的 P_{Peu} 估算结果显示,2018年水柱初级生产力分别为 $78.8 \sim 2474.6 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $98.6 \sim 3630.3 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 平均值分别为 $1062.3 (\pm 77.3\%)$ 和 $1479.1 (\pm 79.8\%) \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 2019年水柱初级生

产力分别为 $15.0 \sim 2801.0$ 和 $40.0 \sim 3883.6 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 平均值分别为 $1559.2 (\pm 68.9\%)$ 和 $1987.6 (\pm 72.4\%) \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 基于 Chl a 观测值获得的 P_{Peu} 估算结果波动范围,与基于测定值估算 P_{Peu} 相比,有所收敛,降低了10%;两年夏季 P_{Peu} 高值区均在高 Chl a 浓度分布的 A3、B3 和 C3 藻华站位,都位于 $122.5^\circ \sim 123^\circ \text{E}$ 、 $30^\circ \sim 30.5^\circ \text{N}$ 的赤潮频发区^[14],这与 EM 模型 P 的分布特征结果一致。

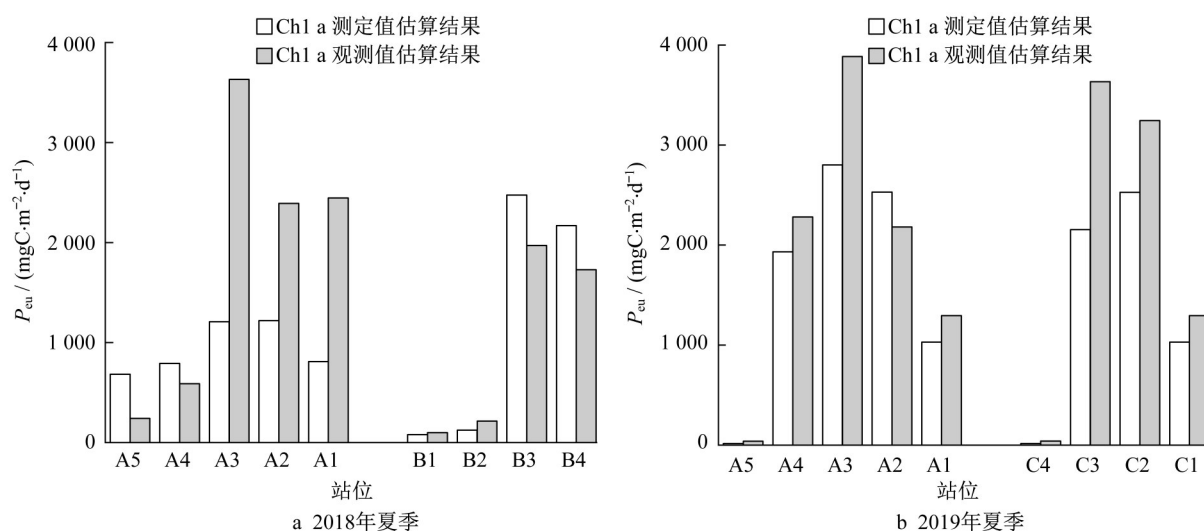


图5 分别基于真光层 Chl a 测定和观测数据采用积分优化 VGPM 估算的水柱初级生产力
Fig.5 Euphotic primary productivity estimated respectively based on the in situ observed and measured data of Chl a by VGPM

在近岸海域(如 A5、B1、C4 站位),水体浊度高达 75 NTU,真光层深度较浅(1.8~3 m),水柱初级生产力水平较低。焦念志等人^[29]调查东海初级生产力,结果也表明初级生产力与水团和海流运动相关,高生产力区位于锋面和上升流海域,低生产力区位于河口和近岸高浊度海域。而高生产力区因浊度低,真光层深度较深,本文调查海域透光深度可大于 30m,藻华水层深度不限于表层,可深达 15m^[30]。与 EM 模型 P 相比,采用真光层内积分优化取值 C_{eu} 的 VGPM 模型估算的 P_{Peu} 估值高出 30%,且区域误差范围收敛为 69%~79%,降低了 30%~45%。结果表明,各站位水体 P 可较好地表征表层 2m 水层浮游植物固碳能力,不适用于表征出现 DCM 藻华水层浮游植物的固碳能力,且无论基于 Chl a 测定或观测值通过 EM 估算获得的各站位 P 值差异较大,可能会对海区整个区域水体固碳能力均值估算引入较大的误差;采用积分优化 C_{eu} 取值获得的 P_{Peu} 能更好地表征真光层藻华水层及其浮游植物固碳能力,可帮助我们重新认识和评

价对藻华水层浮游植物固碳贡献。

自 1988 年以来,东海近海域已开展诸多在长江口及其邻近海域的夏季走航初级生产力调查,前人结果表明,Chl a 和初级生产力存在空间区域化分布特征,浮游植物生物量和初级生产力的锋面主要分布在 123°E 附近^[27],本文通过连续两年夏季航次调查,基于原位观测和同步水样测定,更为细致地刻画出夏季 $122.5^\circ \sim 123^\circ \text{E}$ 、 $30^\circ \sim 30.5^\circ \text{N}$ 赤潮频发区水体 Chl a 和初级生产固碳速率分布特征。与以往不同时期相近海域初级生产力水平相比(表3),本文 2018 年水柱初级生产力估算结果与前人夏季调查水平相当,2019 年水柱初级生产力估算结果与 1999—2002 年初级生产力调查水平相近,为 $250 \sim 2000 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[9],高于 2011 年初级生产力调查均值结果 $1274 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[11]。本文通过优化 VGPM 模型估算的区域水柱初级生产力水平略高于由遥感海表叶绿素浓度估算的 VGPM 结果($850 \sim 1200 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)^[24]。

表 3 初级生产力估算值与前人结果比对

Tab.3 Comparison of primary productivity estimates with previous results

调查时间	调查区域	相对位置	调查方法	真光层初级生产力/ (mgC·m ⁻² d ⁻¹)	参考文献	
2018-07	东海	调查区域	传感器	平均值	1 479.1	本文
2019-07	(122.2°~123.3°E, 29.8°~31°N)		VGPM估算法	平均值		
1991-10—1995-09	东海台湾海峡 (120°~123°E, 24.5°~26.5°N)	调查区域 附近	遥感 VGPM估算法	平均值	(春)309, (夏)276, (秋)287, (冬)296	[15]
1994-04	东海 (120°~129°E, 25°~32°N)	调查区域 以东	¹⁴ C法	变化 范围	200~2 770	[28]
1997-12和 1998-05、06、10	东海 (120°~126°E, 25°~32°N)	调查区域 以东	¹⁴ C法	变化 范围	200~1 200	[29]
1999—2002	东海 (124°~130°E, 29°~33°N)	调查区域 以东	¹⁴ C法	变化 范围	250~2 000	[9]
2003-8	东海 (124°~126°E, 31°~32°N)	调查区域 以东	遥感 VGPM估算法	变化 范围	850~1 200	[24]
2009-08—2011-05	东海 (120°~127°E, 26°~32°N)	调查区域 附近	¹⁴ C法	变化 范围	(5月)87~5 327, (8月)167~3 710	[12]
2011-04、08	黄海南部和东海北部 (120.0°~125.5°E, 26.5°~37.0°N)	调查区域 附近	¹⁴ C法	平均值	(春)994, (夏)1 274	[11]

3 结论与展望

通过对长江口外赤潮频发海域水体环境要素调查,尤其 Chl a 采样测定和同步原位观测数据分析,阐释在咸淡水混合影响下 Chl a 空间异质性分布特征,通过 EM 和基于深度积分优化的 VGPM 模型,对调查区域水体表层初级生产力和真光层内藻华水柱初级生产力进行估算,结果表明:

(1)连续两年夏季调查海区温盐数据表明水体存在层化,根据 Chl a 原位观测与采样测定数据,122.5°E、30°~31°N 海域呈现显著藻华特征($\geq 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),且藻华水层可深达 10~15m。

(2)除近岸站位水层高浊度或表层气泡影响,Chl a 观测与测定数据间线性拟合良好且呈显著正相关($r > 0.8, p < 0.05$),Chl a 观测数据可全面反映整个水柱中浮游植物生物量的垂直分布变化情况。

(3)基于 Chl a 测定值与观测值,通过 EM 和 VGPM 优化模型估算的表层和藻华水柱初级生产力 P 和 P_{Peu} 均表明 122.5°E、30°~31°N 为高生产力区;与 P 相比, P_{Peu} 均值范围 1 062.3~1 987.6 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,高出 30%,站位间差别收敛 10%,波动下降为 69%~79%,该差异主要由浮游植物垂直分布特征决定。

通过 Chl a 观测和测定数据的线性拟合分析,本文提出基于高深度分辨率观测数据的 VGPM 优化估算模式,表明高深度分辨率观测数据可精细刻画赤潮海域叶绿素垂直分布特征,更为准确地评估其初级生产的固碳能力,阐释了表层水体和真光层藻

华水柱内固碳能力的差异,可弥补基于遥感获取表层 Chl a 的 EM 和 VGPM 模型估算的不足,有助于深入理解受人类活动干扰严重的海岸带赤潮频发区其整个藻华水层的固碳贡献及其在海洋碳中和与碳循环中的角色。

作者贡献声明:

高航:研究方案制定与航次组织实施,样本采集与数据分析,论文撰写与修改。

王璇:样本采集测定,数据分析处理与绘图,论文撰写与修改。

朱雯喆:现场观测设备调研与调试准备工作,论文修改。

谢丽:学术指导,论文审阅。

致谢:感谢国家海底科学观测网支持。

参考文献:

- [1] SIEGENTHALER U, SARMIENTO J L. Atmospheric carbon dioxide and the ocean [J]. *Nature*, 1993, 365 (6442):119
- [2] HEDGES J I, KEIL R G, BENNER R. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? [J]. *Marine Chemistry*, 1997, 27(5/6):212.
- [3] HUGH D, DEBORAH S, KEN B. Upper ocean carbon export and the biological pump [J]. *Oceanography*, 2001, 14(4):50.
- [4] BEHRENFELD M J, FALKOWSKI P G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models [J]. *Limnology & Oceanography*, 1997, 42(7):1479.
- [5] THOMAS C D, CAMERON A, GREEN R E, *et al.*

- Extinction risk from climate change [J]. *Nature*, 2004, 427 (6970):145.
- [6] TSUNOGAI S, WATANABE S, SATO T. Is there a “continental shelf pump” for the absorption of atmospheric CO₂? [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1999, 51(3):701.
- [7] GUO Z, YANG Z, FAN D, *et al.* Seasonal variation of sedimentation in the Changjiang Estuary mud area [J]. *Journal of geographical sciences*, 2003, 13(3):348.
- [8] SONG J, QU B, LI X, *et al.* Carbon sinks/sources in the Yellow and East China Seas—air-sea interface exchange, dissolution in seawater, and burial in sediments [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(11):1583.
- [9] CAI W J, DAI M H. Comment on “enhanced open ocean storage of CO₂ from shelf sea pumping” [J]. *Science*, 2004, 306 (5701):1477.
- [10] SISWANTO E, ISHIZAKA J, YOKOUCHI K. Optimal primary production model and parameterization in the eastern East China Sea [J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62 (3):361.
- [11] 文斐. 黄东海春、夏季分粒级叶绿素a及初级生产力研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- WEN Fei. Study on the size fractionated chlorophyll a and primary productivity in spring and summer in the Yellow Sea and East China Sea [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [12] LIU X, LAWS E A, XIE Y, *et al.* Uncoupling of seasonal variations between phytoplankton chlorophyll a and production in the East China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(7):240.
- [13] 李国胜, 王芳, 梁强, 等. 东海初级生产力遥感反演及其时空演化机制[J]. *地理学报*, 2003, 58(4):483.
- LI Guosheng, WANG Fang, LIANG Qiang, *et al.* Estimation of ocean primary productivity by remote sensing and introduction to spatio-temporal variation mechanism for the East China Sea [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (4):483.
- [14] 周伟华, 袁翔城, 霍文毅, 等. 长江口邻域叶绿素a和初级生产力的分布[J]. *海洋学报(中文版)*, 2004(3):143.
- ZHOU Weihua, YUAN Xiangcheng, HUO Wenyi, *et al.* Distribution of chlorophyll a and primary productivity in the adjacent sea area of Changjiang River Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004(3):143.
- [15] 郝镡. 中国近海叶绿素和初级生产力的时空分布特征和环境调控机制研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010.
- HAO Qiang. The distribution of Chlorophyll a and Primary Production and the environmental control mechanism in the Chian Sea: ship-measured and satellite study [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [16] 李道季, 张经, 吴莹, 等. 长江口外氧的亏损[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2002(8):686.
- LI Daoji, ZHANG Jing, WU Ying, *et al.* Oxygen loss outside the Yangtze River Estuary [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2002 (8):686.
- [17] WANG B. Hydromorphological mechanisms leading to hypoxia off the Changjiang Estuary [J]. *Marine Environmental Research*, 2009, 67(1):53.
- [18] 周锋, 黄大吉, 倪晓波, 等. 影响长江口毗邻海域低氧区多种时间尺度变化的水文因素[J]. *生态学报*, 2010, 30(17):4728.
- ZHOU Feng, HUANG Daji, NI Xiaobo, *et al.* Hydrographic analysis on the multi-time scale variability of hypoxia adjacent to the Changjiang River Estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17):4728.
- [19] CHEN J, PAN D, LIU M, *et al.* Relationships between long-term trend of satellite-derived chlorophyll a and hypoxia off the Changjiang Estuary [J]. *Estuaries and Coasts*, 2017, 40(4):1.
- [20] 国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范(第6部分:海洋生物调查)[M]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- Standardization Administration of China. Specifications for oceanographic survey (part 6: marine biological survey) [M]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [21] 国家海洋局908专项办公室. 海洋生物生态调查技术规程[M]. 北京:海洋出版社, 2006.
- The 908 Special Project Office of State Oceanic Administration. Technical specification for marine bio-ecological surveys [M]. Beijing: Ocean Press, 2006.
- [22] CADEE G C. Primary production off the Guyana coast [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1975, 9(1):128.
- [23] RYTHER J H, YENTSCH C S. The estimation of phytoplankton production in the ocean from chlorophyll and light data [J]. *Limnology and Oceanography*, 1957, 2(3):281.
- [24] 丛丕福. 海洋叶绿素遥感反演及海洋初级生产力估算研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2006.
- CONG Pifu. Oceanic chlorophyll retrieval by remote sensing and ocean primary production estimate [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [25] WANG Yeqiao. Remote sensing of coastal environments [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [26] LEACH T H, BEISNER B E, CAREY C C, *et al.* Patterns and drivers of deep chlorophyll maxima structure in 100 lakes: the relative importance of light and thermal stratification [J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, 63: 628.
- [27] NING X, VAULOT D, LIU Z, *et al.* Standing stock and production of phytoplankton in the estuary of the Changjiang (Yangtze River) and the adjacent East China Sea [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 49:141.
- [28] SUTHERLAND T F, LANE P M, AMOS C L, *et al.* The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels [J]. *Marine Geology*, 2000, 162(2/4):587.
- [29] 焦念志, 王荣, 李超伦. 东海春季初级生产力与新生产力的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1998, 4(2):135.
- JIAO Nianzhi, WANG Rong, LI Chaolun. Primary production and new production in spring in the East China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 4(2):135.
- [30] WANG Jinhui, WU Jianyong. Occurrence and potential risks of harmful algal blooms in the East China Sea. [J]. *Science of the Total Environment*. 2009, 407: 4012.