

# 基于空间插值的长江口邻近海域春季悬浮物和叶绿素 a 空间分布分析

赵菊英<sup>1</sup>, 杜博文<sup>1</sup>, 韦美怡<sup>1</sup>, 李阳东<sup>1,2\*</sup>, 胡松<sup>1</sup>, 李鸿莉<sup>1</sup>, 常亮<sup>1</sup>

(1.上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院,上海 201306;2.上海市河口海洋测绘工程技术研究中心,上海 201306)

**摘要:** 针对目前利用实测数据对长江口邻近海域水质状况进行分析研究相对偏少的情况,基于“淞航”号2018年春季航次对该海域的综合观测,利用实验室水样分析数据对船载温盐深仪(CTD)的测量数据进行校正,并对该区域2018年春季时节悬浮物(TSM)和叶绿素 a(*Chl-a*)浓度的空间插值结果进行分析。研究表明:CTD观测数据与水样分析数据呈较强线性相关关系。反距离权重插值对TSM和*Chl-a*浓度空间分布具有整体最优的效果。TSM浓度在近岸和近海底较高,在观测区域内出现两个高值中心;*Chl-a*浓度在近岸海域较高,有较明显的片状高值结构,垂向上表层较高。TSM与*Chl-a*浓度分布在长江口南北表现出不同的特征,且两者具有一定的负相关性。长江径流、外海洋流、潮汐混合等水动力过程是影响该区域TSM和*Chl-a*浓度分布的主要因素。

**关键词:** 长江口邻近海域;悬浮物浓度;叶绿素 a 浓度;空间插值;断面分析;大面分析

**中图分类号:** P734 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)01-0083-11

## 0 引言

长江口是我国一个世界级的特大型河口,也是我国五大重点开发海域之一。近年来,随着人类对长江口开发利用和保护等工作的持续开展,长江口经济发展与河口生态环境的矛盾日益激烈,对长江口水质情况进行研究分析有助于保护水环境并保障区域可持续发展与利用。海洋中悬浮体(Total Suspended Matter, TSM)以及叶绿素 a(Chlorophyll a, *Chl-a*)的含量是表征海洋性质的重要参数,悬浮物与沉积动力过程密切相关,而叶绿素则是初级生产力的直接反映,两者浓度变化反映了海水水质污染状况<sup>[1]</sup>,是水质监测的重要参数指标。对TSM和*Chl-a*时空分布的认识有助于深入了解河口和近岸

海洋动力过程、生态动力学过程,并为了解和评价重大人类活动对近海环境的影响提供参考<sup>[1-2]</sup>。

目前已有众多国内外学者对长江口及邻近海域进行了多方面的研究。黄李冰等<sup>[3]</sup>利用50 a的长时间序列数据对长江河口口外海滨区域的悬沙浓度分布特征进行了细致研究,并分析讨论了高浓度区域的形成原因及变化趋势。诸多学者将三峡大坝等大型河口工程建设前后的悬浮泥沙与*Chl-a*的分布情况进行对比<sup>[4-5]</sup>,并指出了高浓度区的变化趋势及可能驱动原因。GE等<sup>[6]</sup>基于有限体积海岸海洋模型(Finite Volume Community Ocean Model, FVCOM)和欧洲区域性海洋生态系模式(European Regional Sea Ecosystem Model, ERSEM)的耦合实验分析了长江口附近的悬浮泥沙锋面在不同季节

收稿日期: 2023-01-16。

基金项目: 国家自然科学基金(42174016);国家重点研发计划(2019YFD0901404)。

作者简介: 赵菊英(1996-),女,硕士,主要从事海洋科学相关领域的研究工作。E-mail: 1146709238@qq.com

\*通信作者: 李阳东(1977-),男,副教授,博士,主要从事卫星海洋学、海洋地理信息系统和海岸带环境水动力学模拟等方面的研究。

E-mail: ydli@shou.edu.cn

对营养盐和浮游植物的影响。相关研究表明控制该区域水生生态系统的自然动力过程包括径流、潮汐、风和陆架循环等,这些过程中运输的营养物质调节了河口附近海域的浊度,这在很大程度上影响了藻类的生长,从而影响叶绿素的空间分布<sup>[7-9]</sup>。

然而,上述研究大多是应用数值模型的计算结果或卫星遥感数据与少量实测数据结合进行的,基于实测数据对长江口邻近海域悬浮泥沙与 *Chl-a* 浓度分布的研究相对较少。此外,目前实测数据分布稀疏且不规则,多数研究也仅针对其中的温度、盐度、地形等要素开展<sup>[10-13]</sup>。现今的数值模式与卫星观测对上述要素的计算和监测较为精准,而由于水体高度浑浊的限制,卫星遥感在河口等地区对叶绿素等的监测尚存在不准确的问题<sup>[14]</sup>,且模式中往往使用卫星数据做同化处理,因而遥感数据的误差可能会影响到模式的运行结果。本文在相对足量的航次调查数据的基础上,对长江口邻近海域 TSM 与 *Chl-a* 两个要素的浓度空间插值结果进行分析与讨论,拟对该区域 TSM 和 *Chl-a* 的浓度分布情况进行更清晰和真实地刻画,为推动对复杂河口动力过程的理解和生态环境评估提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与数据获取

研究区域为长江口邻近海域(28°~33°N, 120°~125°E)。本文使用数据为上海海洋大学远洋渔业资源调查船“淞航”号 2018 年春季航次温盐深仪(Conductivity Temperature Depth, CTD)测量和采水样自测分析结果,航次作业时间段为 2018 年 4 月 28 日—5 月 10 日。研究区域内 CTD 测量的有效站位共计 42 个,采水样自测站位(部分站位与 CTD 测量站位位置相同)共计 81 个,站位分布及研究区域水深等值线见图 1。

使用“淞航”号甲板上的绞车在布设站位以大约 0.5 m/s 的速度缓慢释放 CTD-911 及采水器来实现测量。直读式 CTD-911 对海表—海底以 1 m 为间隔进行多参数连续测量,并依次进行释放和回收。电导率、温度和盐度等水温参数通过 CTD-911 传感器测量获得, *Chl-a* 使用连接到 CTD 的 WET Labs ECO-AFL/FL 荧光传感器进行测量,浊度信息则使

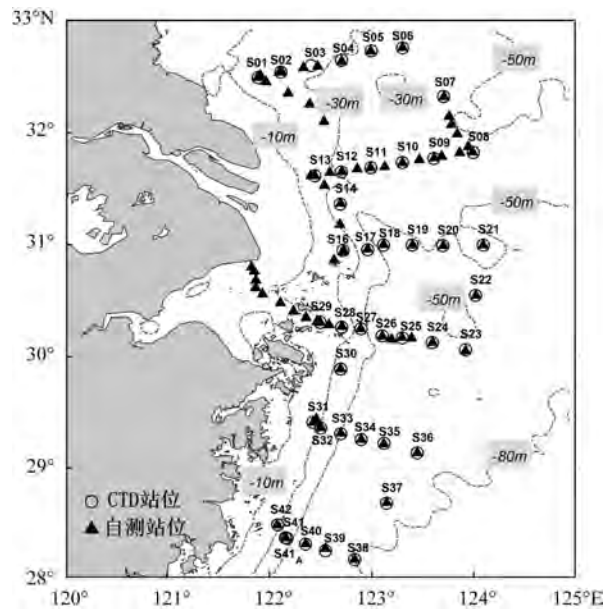


图1 站位与地形分布

Fig.1 Station distribution and bathymetric topography

用传感器测量水中悬浮粒子的散射光来获取。采水样自测过程中,依靠搭载在 CTD-911 上的采水器在作业站点某些特定水层采集水样后进行分装,每个水层各采集 1 个 TSM 水样(~1 000 mL)和 1 个 *Chl-a* 水样(~500 mL),然后立即利用 0.45 μm 孔径滤膜分别对两种水样进行过滤,将过滤后的滤膜折叠后用铝箔包好放于离心管内并在 -20 °C 环境下保存,待返航后进行 TSM 浓度和 *Chl-a* 浓度的测量分析。

### 1.2 方法

该航次采用“S”型走航行进方式,CTD 测量站位的分布自北向南大致呈现 6 个纬向断面,分别为 S01—S07、S08—S14、S16—S22、S23—S30、S31—S37 和 S38—S42(依次记为断面 1、断面 2、断面 3、断面 4、断面 5、断面 6)。参考前人的研究<sup>[15-17]</sup>,长江口邻近海域海水要素纬向断面分析一般考虑与大陆距离的影响、随水深的变化情况以及不同纬向断面之间的差异,因此本文采取类似的纬向研究方式,选取上述 6 个纬向断面进行 TSM 和 *Chl-a* 浓度的空间分布研究。

另外,为了对研究海域实现大面整体把握,本文充分考虑水深的影响,选取表层、中层和底层 3 个

典型代表水层进行研究区域 TSM 和 *Chl-a* 浓度的大面分析。表层 (0.5 m) 水体受到太阳辐射和风摩擦力的直接作用; 太阳辐射主要被表层海水吸收, 随着水深增加太阳辐射呈指数规律衰减<sup>[18]</sup>, 因此传递至中层的太阳辐射显著减少, 中层可以作为过渡水层的代表; 影响底层水体特点的重要因素为海底地形和综合控制的沉积物再悬浮。

该航次共历时 13 d, 气象资料记载该段时间内海洋没有经历巨大的变化, 因此可以整合该段时间的测量数据, 采用“断面法”和“大面法”进行分析。

### 1.2.1 数据预处理

利用 CTD-911 在各站位的导出数据将温度、盐度、浊度和 *Chl-a* 浓度剖面进行可视化, 对下放和回收两个过程中同一水层、同一要素数值相差过大的站位数据采取人工剔除, 以尽可能减小由于仪器碰壁和触底等原因造成的数据失真对分析的不利影响。经检查, 42 个 CTD 测量站位对应的剖面测量数据均为有效数据。

对出航所采的水样滤膜样品分别利用称重法和荧光法<sup>[19]</sup>进行 TSM 和 *Chl-a* 浓度测量, 并将测量结果按站位和水深进行整理。

由于 CTD 观测易受到人为操作、仪器碰壁触底和海水环境因素等干扰<sup>[20]</sup>, 因此船载仪器的测量数据需经过处理后使用。为获取 TSM 与 *Chl-a* 浓度数据, 需将船载 CTD 测得的浊度与叶绿素浓度数据进行转换与改正。本文基于图 1 的叠加站位在两种观测方式下相匹配点位和水层的数据建立的相关关系, 对 CTD 观测数据进行转换与改正, 以得到调查区域相对准确且数量较大的海水 TSM 和 *Chl-a* 浓度分析数据集。

### 1.2.2 断面处理

利用数据匹配所得的相关关系将 CTD 测量浊度值转换为 TSM 浓度值, 利用实验室水样测量分析的 *Chl-a* 浓度值校正现场实测 *Chl-a* 浓度值, 对 CTD 在释放和回收两个过程中对同一深度所测数据做平均处理。考虑到断面图面积相对较小且可用数据较多, 本文对转换后的数据进行线性插值和平滑处理, 按照 6 个纬向断面绘制分布图以获得纬向和纵向分布情况。海底地形使用航次单波束测深数据。

由于断面图所呈现的纬向-纵向尺度量级相差过大, 因此本文将纬向和纵向统一标尺, 均以 m 作

为度量单位, 避免因为尺度差异造成的错误。

### 1.2.3 大面处理

由于按照研究区域所绘制的大面图面积远大于断面图, 而前者的数据却比后者少数倍, 以稀疏的数据点来反演广阔空间场的要素分布特征, 插值方法的优劣性会在很大程度上影响反演结果的真实可靠程度。

为判定插值效果的优劣, 本文在所有站位中不掺杂主观因素地选取 6 个点位作为验证点组成验证集, 尽量保证这 6 个点位在整个平面具有较强代表性, 其余点位作为训练集。为避免一套测试点的绝对性和偶然性, 依照同样的原则共选取 5 套验证集, 结果见表 1。

表 1 实验选取验证站位

Tab.1 Stations selected for experiments and verifications

实验次数	验证站位					
1	S02	S10	S17	S23	S32	S41
2	S04	S12	S20	S29	S33	S39
3	S01	S09	S17	S27	S34	S41
4	S03	S10	S20	S28	S31	S38
5	S05	S13	S19	S28	S33	S40

周艳霞等<sup>[21]</sup>、李海涛等<sup>[11]</sup>的研究表明反距离权重插值 (Inverse Distance Weight, IDW) 和克里金插值 (Kriging) 对于海洋环境中的空间数据插值具有较好的效果, 更能反映空间场的真实性。基于此, 本文分别选取反距离权重插值法和克里金插值法 (共 12 种插值方法: 0 阶线性, 1 阶线性, 2 阶线性; 0 阶指数, 1 阶指数, 2 阶指数; 0 阶三次样条, 1 阶三次样条, 2 阶三次样条; 0 阶球形, 1 阶球形, 2 阶球形) 对训练集中的数据分别按照表层、中层、底层进行插值, 得到各种情况下验证集中各点的插值结果。并将其和真实值进行比较, 以确定各插值法的优劣程度。4 个评价参数计算公式如下:

$$\text{方差和} = \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2 \quad (1)$$

$$\text{均方误差} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{n} \quad (2)$$

$$\text{平均绝对误差} = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{x}_i - x_i|}{n} \quad (3)$$



$$\text{平均相对误差} = \frac{\sum_{i=1}^n |(\hat{x}_i - x_i) / x_i|}{n} \quad (4)$$

式中:  $\hat{x}_i$  为插值结果;  $x_i$  为观测值;  $n$  为验证点个数, 本实验中取 6。方差和反映插值结果和观测值误差的总体情况; 均方误差与方差和相似, 反映误差的总体偏差; 平均绝对误差反映误差的平均情况, 为避免正误差和负误差抵消, 这里采用绝对值的计算形式; 平均相对误差反映误差与观测值比的平均水平, 同样采用绝对值的形式。

为减少验证点位 TSM 和 *Chl-a* 浓度过大值或过小值的干扰, 对每一水层由 5 套验证点计算得到的 5 套评价参数, 分别对每个参数的 5 个值去掉 1 个极大值和 1 个极小值后求平均, 最终得到各要素在每一水层 4 个评价参数的值。

在数据处理过程中选用 IDW 方法和 Kriging 方法来评估插值方法的优劣。为确定各层水体中计算 TSM 和 *Chl-a* 浓度的 3 种最优插值方法, 根据插值效果对插值参数进行比对 (见表 2), 其中 IDW 表示反距离权重插值方法, K 表示克里金插值方法, 数字 0~2 表示克里金插值法的阶数, exp、spline、spherical 表示克里金插值法的函数类型, 分别对应指数、三次样条和球形。

对于不同水层的同一要素, 采取相同的插值方法更加合理。结合表 2 可知, 对于 TSM 浓度来说, IDW 法优于其他方法, 在各层都表现出最好的效果。对于 *Chl-a* 浓度而言, 0 阶指数型的 K 方法和

IDW 法在表层和中层的效果相近; 在底层则是后者优于前者; 但综合来看, IDW 法在各层 *Chl-a* 浓度计算中整体最优。因此, 对于 TSM 和 *Chl-a* 浓度, 本文认为 IDW 法均有良好的插值效果, 其插值结果更能反应出真实的海洋状况, 可用于生成研究所需的大面图。

## 2 结果与分析

### 2.1 CTD 观测与水样测量数据匹配

全部站位和水层匹配的 CTD 测量浊度和水样测量得到的 TSM 浓度共计 155 组, 剔除 10 组负值和异常大值后共 145 组, 建立 TSM 浓度-浊度相关关系 (见图 2a), 在  $p < 0.01$  时, 决定系数  $R^2 = 0.6679$ , 说明实验室仪器分析方法所得的 TSM 浓度与 CTD 测量浊度具有较强的线性相关性。

全部站位和水层匹配的 CTD 测量 *Chl-a* 浓度和水样测量得到的 *Chl-a* 浓度共计 159 组, 剔除 6 组负值和异常大值后共 153 组, 建立水样 *Chl-a* 浓度-CTD 测量 *Chl-a* 浓度相关关系 (见图 2b), 在  $p < 0.01$  时, 决定系数  $R^2 = 0.7742$ , 说明 CTD 测量的 *Chl-a* 浓度总体偏高, 且与实验室水样分析结果存在较强的相关性。

### 2.2 悬浮物浓度分析

#### 2.2.1 断面分析

使用线性插值方法计算并绘制该区域 6 个断面的 TSM 分布情况 (见图 3), 每幅子图顶部横向排列的红色圆点示意 CTD 观测站位, 站位名称在上方标注。

从断面图可以直观地发现, 调查区域大部分水域的 TSM 浓度为 4~260 mg/L。长江口邻近区域 TSM 浓度自西向东表现为随着与陆地距离的增大而降低, 随深度的增加而增加, 即与大陆距离和海底地形紧密相关。这其中, 断面 1 的 S01、断面 4 的 S29 和断面 5 的 S31 站位及邻近水域的海水 TSM 浓度显著高于其他水域, 考虑是由于长江携带大量泥沙注入东海, 影响范围波及上述几个站位, 因此对海水的 TSM 浓度造成一定影响。除断面 1 和断面 4 外, 10 m 以浅水层的 TSM 浓度值大多低于 20 mg/L。断面 1 和断面 2 存在分割线, 自分割线向两侧的 TSM 浓度分别有不同程度的增加趋势, 断面 1 在近

表 2 TSM 和 *Chl-a* 的表层、中层、底层最优方法排序 (仅列举前 3 种)

Tab.2 Optimal method ranking of the TSM and *Chl-a* for the surface, middle and bottom three layers (only the first three are listed)

要素	分层	最优方法排序		
		1	2	3
TSM	表层	IDW	K,2,spherical	K,0,spherical
	中层	IDW	K,1,exp	K,0,exp
	底层	IDW	K,2,exp	K,1,exp
<i>Chl-a</i>	表层	K,0,exp	IDW	K,1,exp
	中层	IDW	K,0,exp	K,2,exp
	底层	K,1,spline	K,1,exp	IDW

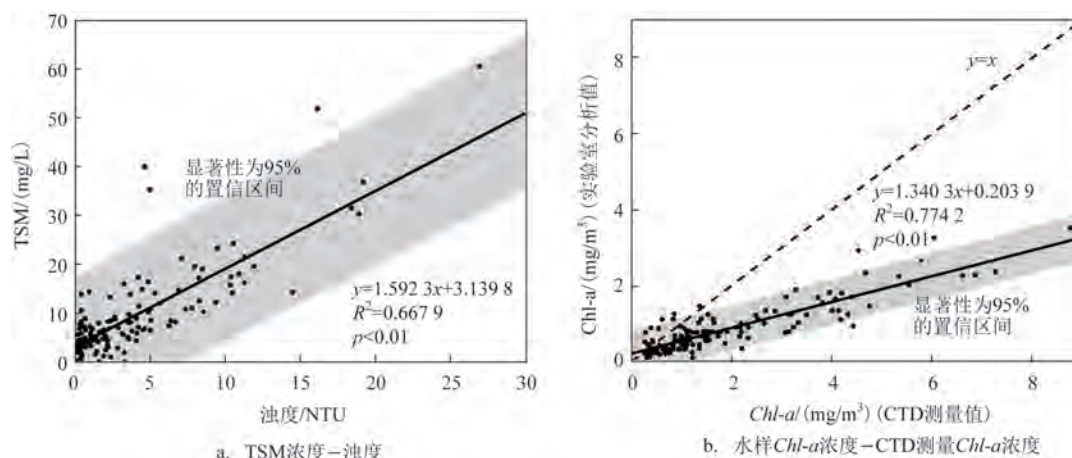


图2 相关关系散点图

Fig.2 Correlation scatter diagram

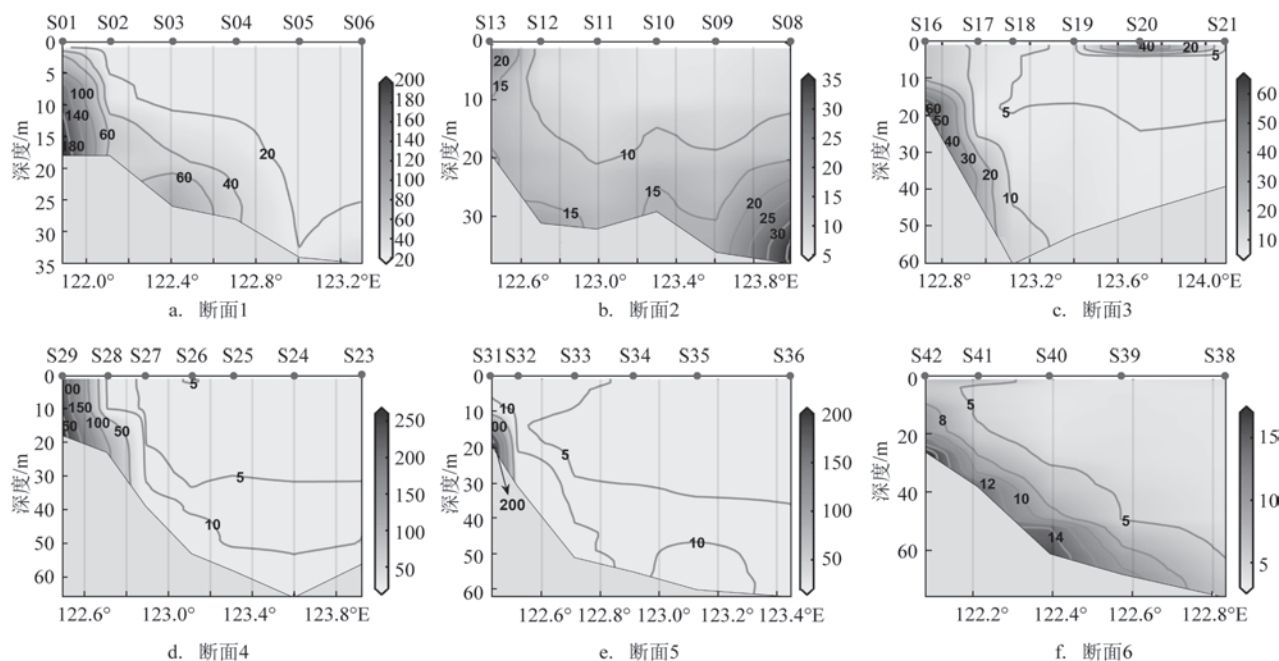


图3 TSM浓度断面分布(单位:mg/L)

Fig.3 TSM concentration profiles (unit:mg/L)

海底自S05站位向东略有增加;断面2在S11站位和S09站位各有一条分割线,自S09站位向东有相对较强的增加趋势。6个断面近岸处的TSM浓度受陆地影响明显,水平梯度较大;随着与陆地距离的增大,TSM浓度等值线由纵向分布逐渐向水平分布过渡,远离陆地的海域层化现象比较明显,尤其表现为和海底地形具有强相关性,等值线走势与海底地形基本一致。

本航次调查区域位于东海陆架区,海底地形自

西北向东南倾斜,海水深度逐渐增加,由于潮汐混合剧烈,大多在100 m以浅尤其是30 m内的垂向上TSM浓度较高,在接近海底处,由于潮汐混合带动及底泥沙再悬浮的因素,致使TSM浓度较其上层略有增加。S08和S20存在单独的相对较高的TSM浓度分布,说明该海域水动力情况复杂,需进一步研究。

### 2.2.2 大面分析

基于反距离权重插值方法生成该海域各层TSM浓度大面图(见图4)。长江口外因缺少站位,

因此结果分析主要聚焦在站位集中的长江口邻近区域。从图4可以发现,2018年春季长江口邻近区域TSM浓度分布为沿岸高、外海低,自沿岸呈羽状锋面逐渐侵入外海,大致侵入边界达到123°E并在此处形成一条东西分界线,其西部为高值集中区,该分布特征与陈黄蓉等<sup>[22]</sup>利用长江口及东海实测资料建立的浊度反演模型对最大浊度带的研究结果相近。中层高值中心(122.486 0°E, 30.287 9°N)和底层高值中心(122.091 0°E, 30.523 9°N)相对表层(122.486 0°E, 30.288 9°N)略向外海移动,表层呈现一个较明显的高值中心,自高值中心沿经向向北和向南减小。但在长江入海口北部出现梯度相反的情况,即大致于32°N向北增加,这种现象在中层和底层更加明显,以至于在中部和底部逐渐演变出现第二个高值中心。北部的高值中心向外海入侵,东西范围更广,向东减小的梯度小于南部的高值中心。北部高值中心位于南通市南北向岸线以东,南部高值中心大致与杭州湾喇叭口顶端处于同一纬向。随着海水深度的增加,高TSM浓度的覆盖面积增大。

已有众多学者对东海悬浮泥沙分布特征的成因进行了大量的研究,但直至目前尚存在诸多争议。长江口及附近海域的水动力过程十分复杂,加之工程建设的一系列影响,因此对研究区域各要素的分布特征及相较于之前发生微小变化的解释均需要十分谨慎。结合前人的研究,本文认为该航次调查的2018年春季长江口悬浮泥沙分布特征的原因主要包括潮汐运动、以长江为主的径流输入、洋

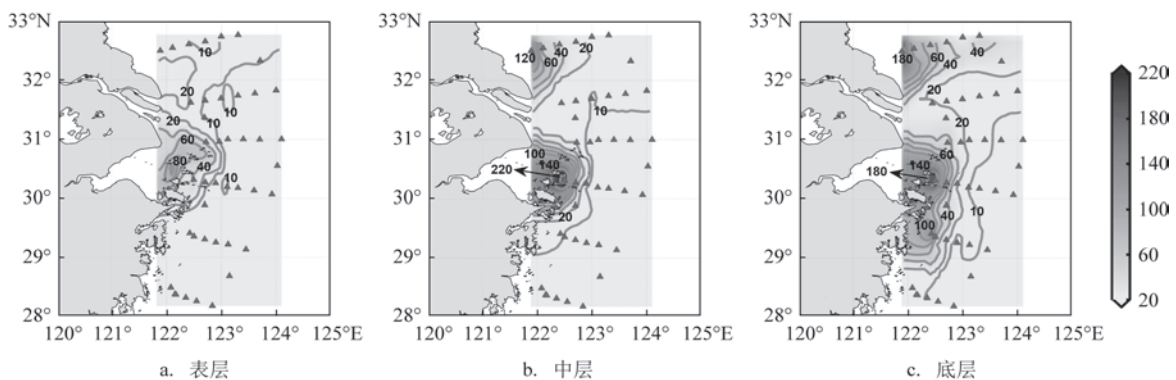
流运动等主要因素在内的水动力作用、河流径流和海洋动力的对比制约作用<sup>[23]</sup>。悬浮泥沙主要来源为长江径流的输入,经过长时间的沉淀作用,较多的悬浮物堆积在近海底区域,在较浅海域由于潮汐混合的动力作用会将悬浮物向上带动混合,形成高TSM浓度的海水;另外,口外洋流——“洁净”的台湾暖流流经此地,对研究区域的TSM浓度分布也存在一定程度的影响<sup>[24-25]</sup>。

## 2.3 叶绿素浓度分析

### 2.3.1 断面分析

类似地,将Chl-a浓度分布按6个断面进行绘制(见图5),其总体变化范围为0~6 mg/L。断面1和断面2中Chl-a的浓度等值线呈明显的纵向带状分布且贯穿至海底,断面3—6中高值区域的斑块特征比较明显,且斑块区悬浮于上层。值得注意的是,除断面1外,断面2—6中Chl-a斑块的高值区均伴随有显著层化的锋面结构,其高值中心均在10 m以浅的水层,且各高值中心所在站位对应的水深几乎均为30~50 m,断面高值中心连线与江苏—上海—浙江一带海岸线形状相似。断面1—4中近岸Chl-a浓度较低,断面5—6中近岸Chl-a浓度较高,浓度最高值出现在断面6的S42和S41站位附近水域。

由于该航次调查时间为春季,恰逢浮游植物生长时期,表层初级生产力是一年中的高峰<sup>[1]</sup>。考虑浮游植物生活环境的物理因素,即调查时段光照条件相对充足,加之温度回升作用于海洋,表层海洋被充分加热,因此导致跃层整体被抬升至相对较浅



注:三角形为CTD站位

图4 表层、中层、底层TSM浓度的大面分布(单位:mg/L)

Fig.4 TSM concentration distributions in the surface, middle and bottom layers (unit:mg/L)



的深度,相应地,由于浮游植物集中在较浅的水域,对应该深度海水的 *Chl-a* 浓度较高。由于供浮游植物生长的营养盐来源于海水下部,在上升流的搬运作用下被运输至浮游植物生活的空间内,因此图5断面中 *Chl-a* 高值斑块区大致处于海水垂向运动相对剧烈的区域,而在混合与层化的过渡区域(例如站点 S10),混合上升带来的营养盐和层化对浮游植物的限制主导了 *Chl-a* 浓度高值集中区的分布特征<sup>[26]</sup>。参考 TSM 浓度分布特征可以发现,高度浑浊的水体中 *Chl-a* 浓度较低,主要是由于悬浮物过多导致的阳光穿透能力减弱,浮游植物分布较少。此

外,该区域的 *Chl-a* 浓度分布也受到洋流运动及长江径流的作用<sup>[27-28]</sup>,但外海洋流如台湾暖流输入的营养盐对该区域的影响相对较小<sup>[29]</sup>,故本文不对其做重点讨论。

### 2.3.2 大面分析

采用反距离权重插值法绘制表层、中层、底层 *Chl-a* 浓度大面分布图(见图6),需要说明的是这里的 *Chl-a* 浓度以10为底的对数表示。海表 *Chl-a* 浓度远高于中层和底层,表层呈现沿南北方向的2个集中高值区,4个等值线闭合的高值中心,分别位于浙江舟山、宁波和台州沿岸海域以及上海东北部黄

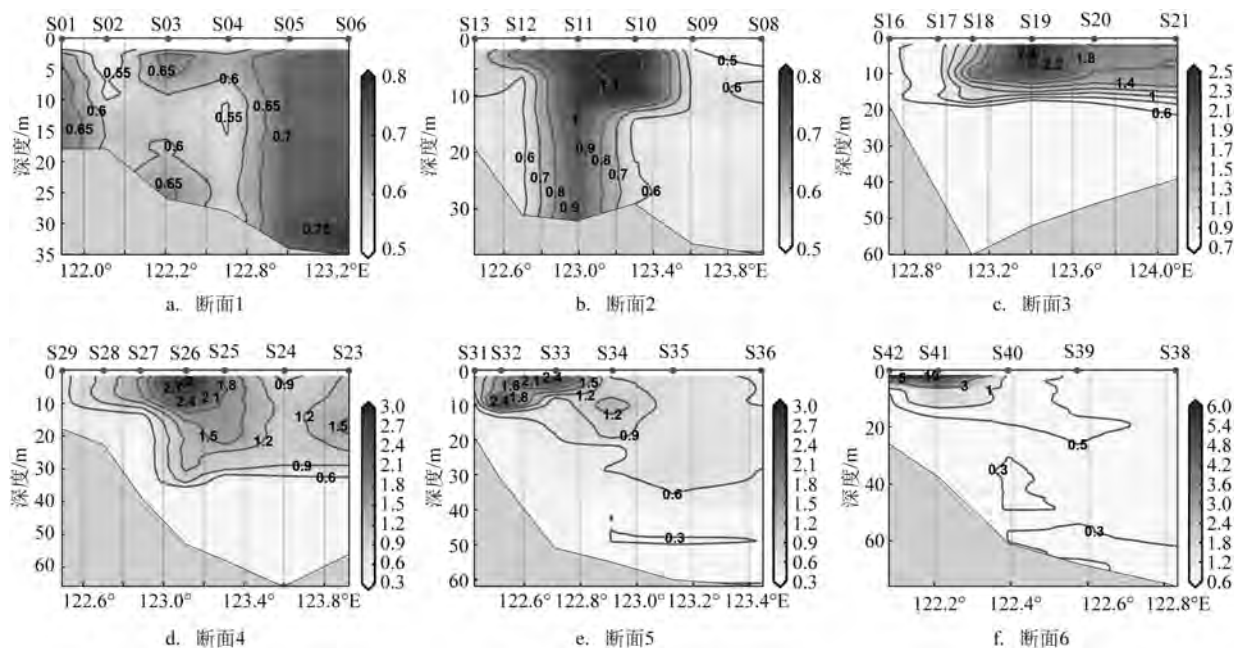


图5 *Chl-a* 浓度断面分布(单位:mg/m<sup>3</sup>)

Fig.5 *Chl-a* concentration profiles (unit:mg/m<sup>3</sup>)

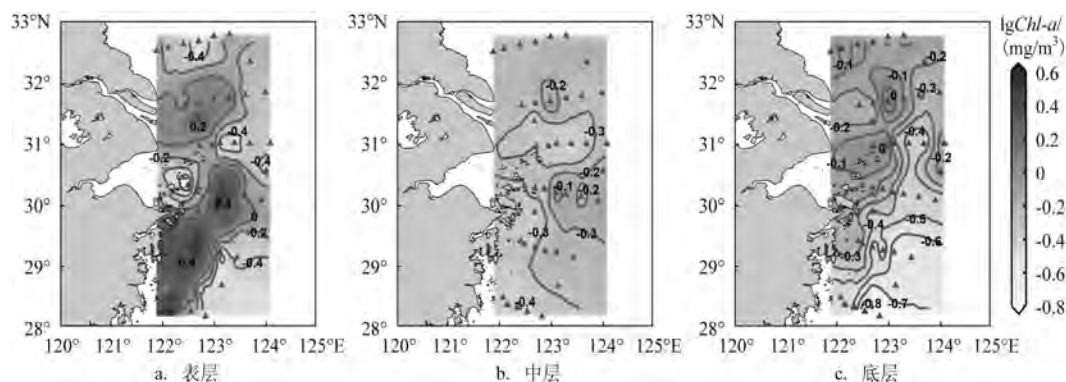


图6 表层、中层、底层 *Chl-a* 浓度大面分布示意图

Fig.6 *Chl-a* concentration distributions in the surface, middle and bottom layers

海-东海分界线以南海域。北部高值中心大致与长江口处于同一纬度,在长江口东部大约0.8个经度,南部高值区呈西南—东北走向,沿主轴分布有3个闭合的高值中心,且自近岸处喇叭口状向东北逐渐收缩。中层和底层的 *Chl-a* 浓度相较于表层显著降低,相对高值区域均沿123°E经线分布。

结合地理位置和气候因素,不难解释上述分布原因。表层的两个主要高值区域分别为长江径流波及区和舟山渔场所在区域,北部高值中心与长江口间存在距离是因为携带大陆物质的长江径流的输入导致水体不稳定且悬浮泥沙含量较高,水体透明度下降,不利于浮游植物生活<sup>[30]</sup>。南部高值区由来自大洋的营养盐控制,其中黑潮次表层水为主要输入源,台湾暖流的相对贡献可以忽略<sup>[31]</sup>。舟山渔场附近的高值区域生长的大量浮游植物为鱼类提供饵料,伴随着沿岸上升流的作用,营养盐被带到上层;中层和底层生活的浮游植物大大减少,加之由于阳光穿透海水的深度不大,不利于浮游植物的光合作用,因此中层和底层 *Chl-a* 浓度显著低于表层。

据《2018年浙江海洋公报》指出<sup>[32]</sup>,2018年4—8月浙江海域(尤以宁波为主)频发赤潮和绿潮灾害,浮游植物异常繁殖(该航次调查时段恰处于这期间),猜测 *Chl-a* 浓度分布可能受此影响。此外,根据已有学者的研究,春季中尺度涡中心的叶绿素含量高于夏、秋、冬三季,这也可能是影响 *Chl-a* 浓度变化的原因。

### 3 讨论

整体考虑 TSM 和 *Chl-a* 的浓度分布,两者均表现出相对显著的南北差异。以长江口为界,北部的断面1和断面2的 TSM 浓度相对南部的断面3—6表现出近海底升高幅度较大的特点,大面图亦如此,北部底层的 TSM 浓度等值线分布相对南部更加稀疏且偏东侧。*Chl-a* 浓度分布中北部两断面的垂向柱状结构更加显著,而南部断面则具有显著的跃层结构,上下层水体差异明显。

结合图3—6可以发现 TSM 浓度与 *Chl-a* 浓度空间分布的关系。高度浑浊的海水中 *Chl-a* 含量减少,反之亦然。考虑悬浮泥沙导致海水透光性减弱,浮游植物生活条件变差,因而呈现出一定的负

相关性。但 GE 等<sup>[6]</sup>的研究发现,春季研究区域悬浮泥沙锋附近存在较强的垂向混合,上升流的作用会将底层的营养盐带到上层,为浮游植物的生长创造了条件。因此,浮游植物生长与 TSM 浓度的关系不能被简单概括。

此外,虽然利用航次调查数据对长江口邻近海域的 TSM 和 *Chl-a* 浓度的分布进行了一些特征揭示,但插值和平滑只能反应空间整体大致的分布趋势,对于细节方面的刻画不是十分精准,因此后续还需补充观测。同时,需要加强综合现场观测、遥感观测和物理模拟等不同观测和研究方法的结合,以提高分析数据的准确性和时空分辨率。从前人的工作来看, TSM 和 *Chl-a* 的浓度分布呈现明显的随季节和潮汐等因素变动的特征,这与季节变化所导致的温度、盐度、环境因子和潮流等动力学机制密切相关<sup>[23, 33-35]</sup>;另外,已有研究表明该区域 *Chl-a* 的浓度分布还受到洋流运动及长江径流的作用<sup>[27-28]</sup>。因此,可结合海流、长江径流等数据进一步展开其他季节和潮汐周期内的相关研究,以便更全面地评估长江口邻近区域 TSM 和 *Chl-a* 浓度的时空分布特征、变化趋势及影响因素的作用机制。

### 4 总结

本文基于“淞航号”实测数据和实验室分析数据建立的相关关系,对船载仪器测得的 TSM 和 *Chl-a* 的浓度数据进行转换和校正,并进行大面和断面空间插值方法对比,对表现最优的插值结果进行特征分析和原因解释。结论如下:

①该航次调查水域的 TSM 浓度和 *Chl-a* 浓度两个要素的船载仪器 CTD 结果与实验室分析结果呈良好的线性相关关系。

②对于该航次调查海域空间 TSM 浓度和 *Chl-a* 浓度大面分布特征的刻画,利用反距离权重插值法可以得到整体最优的结果。

③2018年春季调查显示 TSM 与 *Chl-a* 的浓度分布在长江口南北部存在差异。*Chl-a* 表层浓度明显高于中层和底层,长江口以南断面中均存在 *Chl-a* 浓度跃层结构,主要是由混合和层化水动力过程对浮游植物的影响导致。

④TSM 与 *Chl-a* 的浓度分布具有负相关性,浑



浊的水体中 *Chl-a* 浓度较低,反之亦然。

### 参考文献:

- [1] 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, 2004, 26(3): 143-150.  
ZHOU W H, YUAN X C, HUO W Y, et al. Distribution of chlorophyll a and primary productivity in the adjacent sea area of Changjiang River Estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(3): 143-150.
- [2] WOHL C, BROWN I, KITIDIS V, et al. Underway seawater and atmospheric measurements of volatile organic compounds in the Southern Ocean[J]. Biogeosciences, 2020, 17(9): 2593-2619.
- [3] 黄李冰, 李义天, 孙昭华, 等. 长江河口口外海滨区域悬沙浓度分布特征研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(6): 155-161.  
HUANG L B, LI Y T, SUN Z H, et al. Characteristics of suspended sediment concentration in the offshore area of Yangtze Estuary[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(6): 155-161.
- [4] HE Y R, WANG Y H, WU H. Regulation of algal bloom hotspots under Mega Estuarine constructions in the Changjiang River Estuary[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 8: 791956.
- [5] 邵和宾, 范德江, 张晶, 等. 三峡大坝启用后长江口及邻近海域秋季悬浮体、叶绿素分布特征及影响因素[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(5): 94-104.  
SHAO H B, FAN D J, ZHANG J, et al. Distribution and influencing factors of suspended matters and chlorophyll in autumn in Yangtze River Estuary post-Three Gorges Dam[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(5): 94-104.
- [6] GE J Z, TORRES R, CHEN C S, et al. Influence of suspended sediment front on nutrients and phytoplankton dynamics off the Changjiang Estuary: a FVCOM-ERSEM coupled model experiment [J]. Journal of Marine Systems, 2020, 204: 103292.
- [7] CAFFREY J M, CLOERN J E, GRENZ C. Changes in production and respiration during a spring phytoplankton bloom in San Francisco Bay, California, USA: implications for net ecosystem metabolism[J]. Marine Ecology Progress Series, 1998, 172: 1-12.
- [8] GAO X L, SONG J M. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 50(3): 327-335.
- [9] WANG Y H, WU H, LIN J, et al. Phytoplankton blooms off a high turbidity estuary: a case study in the Changjiang River Estuary[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(11): 8036-8059.
- [10] 宋庆磊, 杜德文, 丁明, 等. 协同克里格方法在东海表面温度场数据插值中的应用[J]. 海岸工程, 2011, 30(3): 49-55.  
SONG Q L, DU D W, DING M, et al. Application of Co-Kriging method to interpolation of surface temperature data in East China Sea[J]. Coastal Engineering, 2011, 30(3): 49-55.
- [11] 李海涛, 邵泽东. 空间插值分析算法综述[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(7): 1-8.
- LI H T, SHAO Z D. Review of spatial interpolation analysis algorithm[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(7): 1-8.
- [12] 唐江浪, 李刚. 基于 MapGIS 的海洋地学空间数据插值方法探析[J]. 现代信息技术, 2019, 3(19): 20-23.  
TANG J L, LI G. Analysis of spatial data interpolation methods of ocean geosciences based on MapGIS[J]. Modern Information Technology, 2019, 3(19): 20-23.
- [13] 陈慧文, 陈锦辉, 吴建辉, 等. 基于空间插值法的长江口海水质量评价[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(6): 77-82.  
CHEN H W, CHEN J H, WU J H, et al. Evaluation of seawater quality in the Yangtze River Estuary based on spatial interpolation [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(6): 77-82.
- [14] FANG S, VERHOEF W, ZHOU Y X, et al. Satellite estimates of wide-range suspended sediment concentrations in Changjiang (Yangtze) Estuary using MERIS data[J]. Estuaries and Coasts, 2010, 33(6): 1420-1429.
- [15] 左书华, 李九发, 万新宁, 等. 长江河口悬沙浓度变化特征分析[J]. 泥沙研究, 2006(3): 68-75.  
ZUO S H, LI J F, WAN X N, et al. Characteristics of temporal and spatial variation of suspended sediment concentration in the Changjiang Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2006(3): 68-75.
- [16] 邵和宾, 范德江, 麦晓磊, 等. 长江口典型断面悬浮体颗粒类型与粒径构成及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(3): 47-56.  
SHAO H B, FAN D J, MAI X L, et al. Types and size of suspended particles in a typical cross section at the Changjiang Estuary and influence factors[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(3): 47-56.
- [17] FIRDAUS M R, FITRIYA N, WIJAYANTI L A S, et al. The vertical profile of chlorophyll-a in the waters of submarine volcano of Kawio Barat, Indonesia[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 789: 012004.
- [18] 沈永明, 郑永红, 吴修广. 近岸海域污染物迁移转化的三维水质动力学模型[J]. 自然科学进展, 2004, 14(6): 694-699.  
SHEN Y M, ZHENG Y H, WU X G, et al. A three-dimensional water quality dynamics model of pollutant migration and transformation in nearshore seas[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(6): 694-699.
- [19] 刘述锡, 林凤翔. 河北海域荧光法测定叶绿素含量周年季节分层分布[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(6): 710-714.  
LIU S X, LIN F A. The layered distribution of chlorophylla detected by fluorescent method in different seasons in Hebei offshore[J]. Marine Environmental Science, 2009, 28(6): 710-714.
- [20] 杨少磊, 谢玲玲, 杨庆轩. SBE911plus CTD 剖面仪的现场校正与数据处理[J]. 海洋技术, 2008, 27(3): 23-26.  
YANG S L, XIE L L, YANG Q X. Field calibration and data-

- processing of SBE911plus CTD profiler[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2008, 27(3): 23-26.
- [21] 周艳霞, 笕良龙, 韩梅, 等. 基于 ArcGIS 的海水温度空间插值方法研究[C]//张叔英. 中国声学学会水声学分会 2013 年全国水声学学术会议论文集.《声学技术》编辑部, 上海, 2013: 214-216.
- ZHOU Y X, DA L L, HAN M, et al. The research of the method of seawater temperature interpolation based on ArcGIS[J]//ZHANG S Y. 2013 National Conference on Hydroacoustics of Hydroacoustics Branch of Chinese Society of Acoustics. Editorial Department of Acoustic Technology, 2013: 214-216.
- [22] 陈黄蓉, 张靖玮, 王胜强, 等. 长江口及邻近海域的浊度日变化遥感研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0501003.
- CHEN H R, ZHANG J W, WANG S Q, et al. Study on diurnal variation of turbidity in the Yangtze Estuary and adjacent areas by Remote Sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0501003.
- [23] 陈沈良, 张国安, 杨世伦, 等. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮[J]. *地理学报*, 2004, 59(2): 260-266.
- CHEN S L, ZHANG G A, YANG S L, et al. Temporal and spatial changes of suspended sediment concentration and resuspension in the Yangtze River Estuary and its adjacent waters[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 260-266.
- [24] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局[J]. *海洋学报*, 1992, 14(2): 81-90.
- YANG Z S, GUO Z G, WANG Z X, et al. Macro pattern of transport of suspended debris from the Huangdong Sea shelf to its eastern deep sea area[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(2): 81-90.
- [25] 孙效功, 方明, 黄伟. 黄、东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 581-587.
- SUN X G, FANG M, HAUNG W. Spatial and temporal variations in suspended particulate matter transport on the Yellow and East China Sea shelf[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 581-587.
- [26] O'REILLY J E, BUSCH D A. Phytoplankton primary production on the northwestern Atlantic shelf[J]. *Rapport et Proces-Vervbaux Des Reunions*, 1984, 183: 255-268.
- [27] 吴琼. 长江入海径流对长江口浮游植物影响的模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- WU Q. Simulation of the effect of runoff from the Yangtze River on phytoplankton in the Yangtze Estuary[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2021.
- [28] 赵丹丹. 中尺度涡及海洋动力要素对叶绿素分布的影响[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2021.
- ZHAO D D. The influence of mesoscale eddies and oceanic dynamic factors on the distribution of chlorophyll[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences), 2021.
- [29] 袁涌铨. 人类活动与自然驱动不同背景下的典型海域营养盐分布与关键过程研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016.
- YUAN Y Q. Distribution and key processes of nutrients in the typical waters with anthropogenic activities and natural influences [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [30] DING Y Z, FU D Y, WEI Z H, et al. The spatial distribution of chlorophyll-a in Changjiang River Estuary and adjacent sea in spring[C]//Proceedings of SPIE 7150, Remote Sensing of Inland, Coastal, and Oceanic Waters. Noumea: SPIE, 2008: 715015.
- [31] XU L J, YANG D Z, YU R C, et al. Nonlocal population sources triggering dinoflagellate blooms in the Changjiang Estuary and adjacent seas: a modeling study[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(11): e2021JG006424.
- [32] 胡松, 李敏华, 刘必林, 等. 黑潮延伸体区域叶绿素季节变化以及中尺度涡对其影响机制研究[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(6): 1370-1378.
- HU S, LI M H, LIU B L, et al. Seasonal characteristics of chlorophyll a concentration in Kuroshio extension and influences of Mesoscale eddies[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(6): 1370-1378.
- [33] 俞秀霞, 孙琳, 陈长平. 厦门港叶绿素的时空分布及其与水环境因子关系的多元分析[J]. *海洋科学*, 2021, 45(6): 49-62.
- YU X X, SUN L, CHEN C P. Chlorophyll content in Xiamen Bay —spatiotemporal distribution and relationship with water environmental factors[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(6): 49-62.
- [34] 王勇智, 江文胜. 渤、黄、东海悬浮物质量浓度冬、夏季变化的数值模拟[J]. *海洋科学进展*, 2007, 25(1): 28-33.
- WANG Y Z, JIANG W S. Numerical simulation of variations in Winter and Summer suspended material concentrations in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2007, 25(1): 28-33.
- [35] 梁洲, 潘扬航, 祝嗣腾, 等. 长江口邻近海域总悬浮颗粒物的时空分布及其影响因素[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2020, 59(S1): 50-55.
- LIANG Z, PAN Y H, ZHU S T, et al. Spatiotemporal distribution and influencing factors of total suspended particles in the Yangtze River Estuary adjacent sea area[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2020, 59(S1): 50-55.

## Spatial distribution analysis of total suspended matter and chlorophyll-a in the adjacent waters of the Yangtze River Estuary in spring

ZHAO Juying<sup>1</sup>, DU Bowen<sup>1</sup>, WEI Meiyi<sup>1</sup>, LI Yangdong<sup>1,2\*</sup>, HU Song<sup>1</sup>, LI Hongli<sup>1</sup>, CHANG Liang<sup>1</sup>

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Estuarine and Oceanographic Mapping, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Considering the relatively few studies utilizing in-situ data on this topic, this study uses the comprehensive observational data collected by the Songhang voyage in spring 2018, to analyze the spatial distribution of total suspended matter (TSM) and chlorophyll a concentrations after correcting shipboard CTD measurements against the laboratory water sample analysis data. The results show that there is a strong linear correlation between CTD measurements and water sample analysis data. The inverse distance weight interpolation has the overall optimal effect on the spatial distribution of TSM concentration and chlorophyll a concentration. The TSM concentration is higher in the nearshore areas and in the bottom water near the seabed, and there are two high-value centers in the observation area; the chlorophyll a concentration is higher in the nearshore areas with obvious flake high-value structure, and higher in the vertical upper surface layer. The distributions of TSM concentration and chlorophyll a concentration in the north and south of the Yangtze River Estuary show different characteristics and negative correlation. The hydrodynamic processes including the runoff of the Yangtze River, ocean currents, and tidal mixing are the main factors affecting the distribution characteristics of TSM concentration and chlorophyll a concentration in the area.

**Key words:** adjacent waters of the Yangtze River Estuary; total suspended matter concentration; chlorophyll a concentration; spatial interpolation; section analysis; large area analysis