

DOI: 10. 3724/SP. J. 1140. 2015. 02053

夏季东海陆架区悬浮体有效密度分布及其影响因素

尹孟山^{1,2,3}, 王珍岩^{1,3}, 高微^{1,2,3}, 张凯南^{1,3}, 王保铎^{1,3}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071)

摘要:依据 2012 年 6—7 月在东海陆架区所取得的悬浮体、温度、盐度和叶绿素资料,探讨了该区悬浮体有效密度的分布特征及其影响因素。结果表明,研究区的悬浮体有效密度总体上表现为近岸低、外海高的分布特征。随深度的增加,近岸海域悬浮体有效密度逐渐增大,底层水体较上层水体呈现为高值;外海区悬浮体有效密度则相对稳定,底层水体较上层水体呈现为低值。研究区悬浮体有效密度的空间分布主要受到长江冲淡水、浙江沿岸上升流和海底沉积环境的影响,其中长江冲淡水和浙江沿岸上升流对该区的“叠加”影响是主要因素。

关键词:悬浮体;有效密度;长江冲淡水;浙江沿岸上升流;东海陆架区

中图分类号:P736. 21 **文献标识码:**A **文章编号:**0256-1492(2015)02-0053-08

东海陆架区作为长江入海物质的主要沉积区,因其承载了大量的陆源输入物质而成为世界上悬浮体含量较高的海域之一,其悬浮体分布和运输的时空变化也吸引了大量学者的关注。以往的研究表明,东海陆架区的悬浮体含量较其东部陆坡和深海区体现为高值特征,且近岸高于远岸,在运移规律上该区悬浮体具有“夏储冬输”的季节性输运格局;影响其悬浮体分布和运输的主要因素包括悬浮体在水体中的分异、物质来源、东海环流、风暴、潮流等^[1-6]。但目前有关东海陆架区悬浮体本身特性的研究还较少,且多局限于粒径、叶绿素含量等表观量方面^[7-9]。悬浮体的有效密度指的是去除了(海)水的影响后水体中悬浮体本身的真实密度,也被称为冗余密度或差异密度^[10]。悬浮体有效密度在一定程度上是其物质组成与结构特性的综合体现,相比于其他参数能更具代表性地反映出悬浮体在自然水体中的真实状态,对进一步开展有关悬浮体现代沉积过程和沉积环境效应等研究具有重要意义。为此,本文依据 2012 年夏季在东海陆架区开展调查工作所取得的实测资料,对该区悬浮体有效密度的分布特征及其影响因素进行探讨。

基金项目:国家重大科学研究计划项目“全球变暖下的海洋响应及其对东亚气候和近海储碳的影响”(2012CB956000);中国科学院战略性先导科技专项(A 类, XDA11030103)

作者简介:尹孟山(1989—),男,硕士生,研究方向为海洋沉积, E-mail: yinjiayinmengshan@163. com

通讯作者:王珍岩(1972—),男,博士,副研究员, E-mail: zywang@qdio. ac. cn

收稿日期:2014-05-14; **改回日期:**2014-08-25. 文凤英编辑

1 区域概况

研究区位于 26°~30°N、125°E 以西靠近浙江沿岸的东海陆架海区(图 1);该区海底地形复杂,水深大都小于 100 m,总体呈自近岸向外海逐渐下倾的趋势;西北和东南两侧研究边界与海岸线接近平行,西南和东北两侧研究边界与海岸线接近垂直。研究区浮游植物相对富集,且主要集中在近岸上层水域^[9, 11];在闽浙沿岸的砂质基底上发育有一处泥质沉积区,为东海陆架的两大现代泥质沉积区之一,其物质主要来源于长江径流输送的陆源悬浮体,泥质区内再悬浮作用强烈^[12]。影响该海域的水团在夏季大致有 3 个:闽浙沿岸水团、台湾暖流上层水团和台湾暖流深层水团,这三者在来源上分别受到低盐

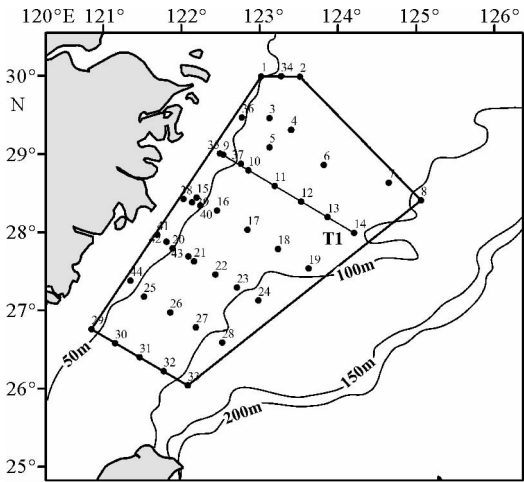


图 1 调查区域和站位

Fig. 1 Investigation area and sample stations

的长江冲淡水、高盐的台湾海峡水及高盐的黑潮次表层水的影响^[13]。此外,受地形、台湾暖流和西南季风的影响,夏季浙江沿岸存在明显的上升流^[14]。

2 材料与方法

2.1 调查方法

中科院海洋研究所“科学三号”调查船于 2012 年 6—7 月对研究海区的水文、地质、生物、生态等方面进行了系统的综合调查。悬浮体调查是其中主要内容之一,共布设了 7 个断面、44 个调查站位(图 1)。在各站位分别对水体剖面的温度、盐度、叶绿素含量和悬浮体粒度分布进行现场仪器观测,并分层采集水样进行悬浮体含量分析。

悬浮体的现场粒度数据由美国 SEQUOIA 公司开发的 LISST 100-X(C)型现场激光粒度仪测量获得。该仪器能够在原位状态下获取水体中粒径范围为 2.5~500 μm 的 32 个粒级悬浮颗粒的体积浓度数据,通过计算可得到水体中悬浮体的平均粒径(Mean Diameter, D_M)与总的体积浓度(Volume Concentration, VC)数据。

利用美国 SeaBird 公司研制的 SBE9/11 plus 型温盐深仪(CTD)控制采水器对研究区水体进行海水取样。该仪器另外配备外置的 Seapoint 叶绿素传感器,可在对水体剖面进行温度(T)、盐度(S)观测的同时进行叶绿素(Chl)浓度的连续测量。CTD 与 LISST 同时下放,保证了测量数据的同步性。

海水样品取上甲板后,立即在船载实验室中用预先称重的孔径为 0.45 μm 的混合纤维素酯滤膜对其进行颗粒物过滤;水样滤完后用蒸馏水滤洗滤膜,去除滤膜及过滤物中的残留盐分。过滤后的滤膜低温冷冻保存,带回陆地实验室烘干称重,获得悬浮体质量浓度(TSM)数据。

2.2 计算方法

由取样方法可知,悬浮体质量浓度数据的获取过程实际上已经去除了海水的影响,而 LISST 在测量悬浮体体积浓度的过程中基本不会对悬浮体的原始状态产生扰动,因此,悬浮体的有效密度($\Delta\rho$)可通过其质量浓度和体积浓度的比值进行求取^[15-18],具体的计算公式如下:

$$\Delta\rho = \frac{\text{TSM}}{\text{VC}} \quad (1)$$

其中, $\Delta\rho$ 为悬浮体的有效密度(kg/m^3),TSM 为悬浮体的质量浓度(mg/L),VC 为悬浮体的体积浓度($\mu\text{L}/\text{L}$)。需要特别指出的是,河口和海岸环境的悬浮体多以絮凝态存在^[10, 19],故在实际研究中常以絮凝体的有效密度来代表整个悬浮体组分的有效密度。而陆架区由于浮游植物相对富集,加之大量来自陆源的悬浮体颗粒已在河口和海岸地区发生沉降^[5],降低了悬浮体颗粒发生碰撞和絮凝的几率,因此,与河口和海岸环境相比,陆架海区悬浮体的有效密度在结果上将更接近分散的悬浮体颗粒的密度^[16]。

3 结果

从悬浮体有效密度的计算公式(1)可知,悬浮体的质量浓度和体积浓度直接决定了悬浮体有效密度的大小,在实际研究中它们也常被用作悬浮体富集程度的指示参数。悬浮体的平均粒径则是决定悬浮体体积浓度的关键因素之一,同时,也是悬浮体自身结构的重要参数。而水体中的叶绿素浓度不仅可代表水体中的浮游植物生物量,还可以用于估算水域的初级生产力^[20]。因此,为对研究区悬浮体有效密度的空间分布特征进行更好地阐释,我们尝试将研究区表层、10 m 层、30 m 层和底层(近海底 2~3 m 水层)水体中悬浮体的有效密度($\Delta\rho, \text{kg}/\text{m}^3$)与其质量浓度(TSM, mg/L)、体积浓度(VC, $\mu\text{L}/\text{L}$)、平均粒径($D_M, \mu\text{m}$)、叶绿素浓度(Chl, $\mu\text{g}/\text{L}$)等参数进行综合对比分析(图 2)。根据研究区悬浮体有效密度的空间分布特征,我们将其分为以下两种情况:

(1)上层水体(表层至 30 m 层):从悬浮体有效密度(图 2 a1—a3)的水平分布来看,近岸海域表现为悬浮体有效密度的相对低值区($< 240 \text{ kg}/\text{m}^3$),由近岸向外海,悬浮体有效密度逐渐增大,表层及 10 m 层近岸海域的悬浮体有效密度表现为自西北向东南逐渐增大的趋势。在垂向上,随着深度的增加,近岸海域悬浮体有效密度逐渐增大,外海区悬浮体有效密度则保持较为稳定的相对高值($> 360 \text{ kg}/\text{m}^3$),近岸与外海之间悬浮体有效密度的差异化程度逐渐减小。通过对比悬浮体质量浓度(图 2 b1—b3)和体积浓度(图 2 c1—c3)的分布情况可以发现,悬浮体质量浓度和体积浓度的水平分布均是近岸高、外海低;由表层至 30 m 层,悬浮体质量浓度的分布变化不大,但近岸海域悬浮体体积浓度却在垂向上急剧降低。参照各水层悬浮体有效密度和体积浓度的等值线分布趋势,可以看出上层水体中悬浮

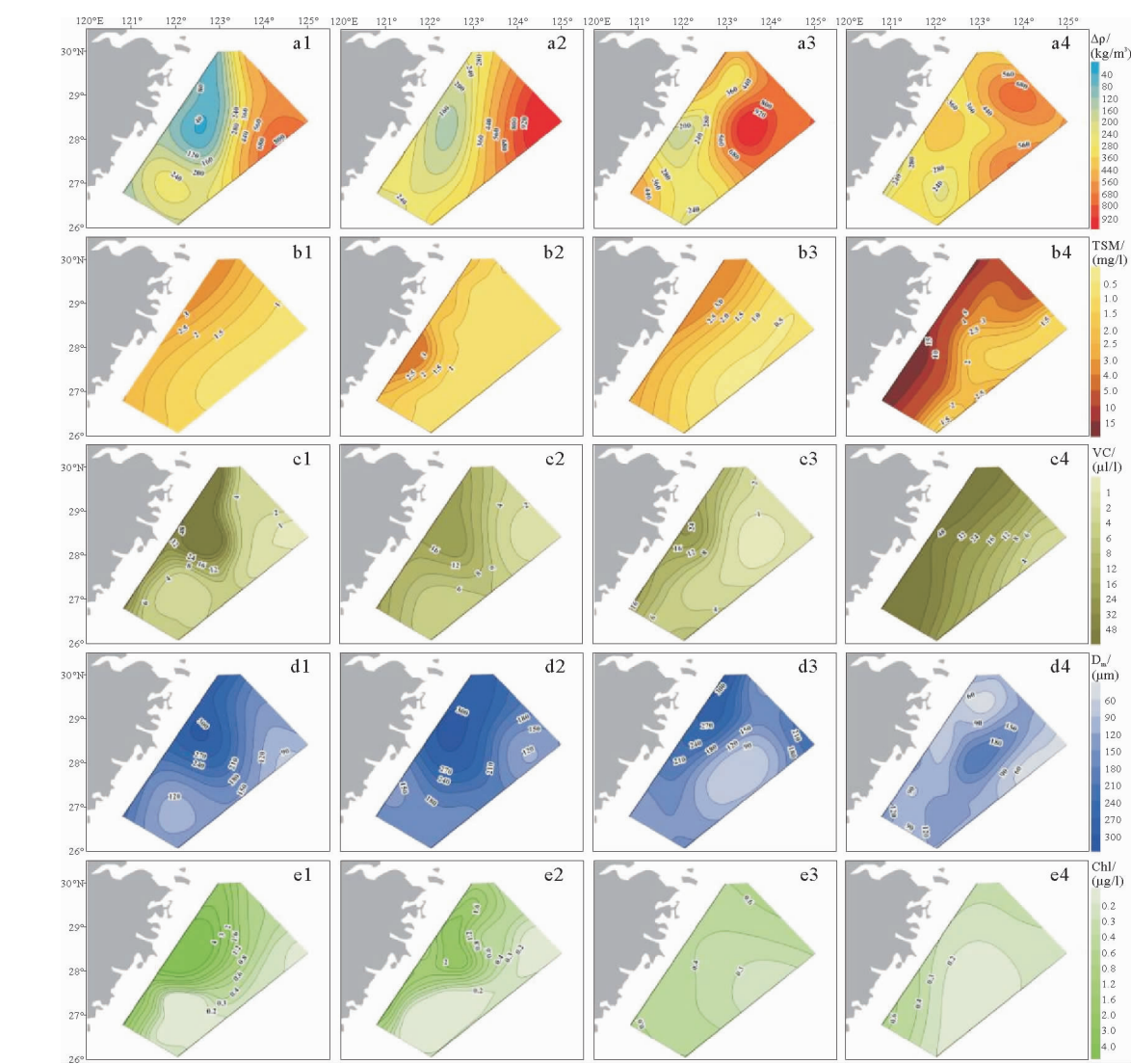


图 2 研究区典型水层悬浮体有效密度($\Delta\rho$)、质量浓度(TSM)、体积浓度(VC)、平均粒径(D_M)和叶绿素浓度(Chl)的平面分布
(图中序号 1、2、3、4 分别对应表层、10 m 层、30 m 层和底层水体)

Fig. 2 Horizontal distributions of effective density($\Delta\rho$), total suspended matter(TSM), volume concentration(VC), mean diameter(D_M) and chlorophyll(Chl) in the study area

(The number 1, 2, 3, 4 in the picture represents the surface layer, 10m layer, 30m layer and bottom layer water respectively)

体有效密度的空间分布变化与其体积浓度的空间分布变化呈明显的负相关关系。而由叶绿素浓度的空间分布可知,水体中叶绿素浓度(图 2 e1—e3)的空间分布变化与悬浮体平均粒径(图 2 d1—d3)和体积浓度的空间分布变化呈良好的正相关关系:近岸海域的表层和 10 m 层水体中含有大量浮游植物(叶绿素浓度 $>1.6\text{ }\mu\text{g/L}$),该海域的悬浮体平均粒径($>270\text{ }\mu\text{m}$)和体积浓度($>16\text{ }\mu\text{L/L}$)也表现为相应的高值;外海区的浮游植物含量很少(叶绿素浓度 $<0.6\text{ }\mu\text{g/L}$),悬浮体的平均粒径($<180\text{ }\mu\text{m}$)和体积浓度($<6\text{ }\mu\text{L/L}$)则表现为相应的低值。海洋悬浮颗粒物中的浮游植物具有粒径较大、质量较轻的特征,其大量存在会极大影响悬浮体平均粒径和体

积浓度的观测结果,但对悬浮体质量浓度的影响却相对较小。由此我们认为,正是由于近岸海域浮游植物的高生物量导致了其悬浮体体积浓度的相对高值,进而造成其悬浮体有效密度的相对低值;外海区的浮游植物含量少,悬浮体主要由河流输入的陆源物质构成^[5],其悬浮体有效密度因而相对较大。随深度增加,近岸海域浮游植物的生物量逐渐减小,近岸与外海区悬浮体有效密度的差异也逐渐减小。

(2)底层水体:悬浮体有效密度(图 2 a4)的平面分布特征仍表现为近岸低、外海高,但近岸海域的悬浮体有效密度较上层水体明显增大,而外海区的悬浮体有效密度较上层水体则显著减小。从底层水体中叶绿素浓度(图 2 e4)的分布情况可以看出,底层

水体中浮游植物的生物量较上层水体明显减少(叶绿素浓度大都低于 0.3 $\mu\text{g/L}$),虽然近岸较外海仍表现为高值,致使近岸海域悬浮体有效密度比外海低,但此时的影响已远不如上层水体明显。反映在悬浮体平均粒径(图 2 d4)的分布上,表现为底层水体悬浮体平均粒径的整体低值($<180\text{ }\mu\text{m}$),尤其是近岸海域($<120\text{ }\mu\text{m}$)较其上层水体明显降低。然而,底层水体悬浮体体积浓度(图 2c4)却整体表现为高值($>6\text{ }\mu\text{L/L}$),近岸海域甚至呈现出极大值($>32\text{ }\mu\text{L/L}$),这就说明底层水体中的悬浮体应是由大量的细颗粒物质所组成的,这一点,从悬浮体质量浓度(图 2 b4)的分布上也可以得到验证:研究区悬浮体质量浓度与体积浓度的分布趋势十分一致,悬浮体体积浓度高的地方,其质量浓度值也大。

4 讨论

4.1 长江冲淡水的影响

在以往的研究中,常把盐度作为指示长江冲淡水的示性指标^[7, 21],为更直观地展示长江冲淡水对研究区的影响,我们绘制了研究区盐度的平面分布图(图 3)。若以 31 的盐度特征值作为整个长江冲淡水的界限盐度值^[22],则从图中可以看出,研究区表层和 10 m 层长江冲淡水的范围界限(图 3 S1—S2)与叶绿素浓度分布的 1.6 $\mu\text{g/L}$ 等值线(图 2 e1—e2)大致相当,长江冲淡水的影响区普遍表现为浮游植物的高生物量。由近岸向外海,随着长江冲淡水影响的减弱,浮游植物的生物量迅速减小。根据宁修仁等^[7]的研究,长江冲淡水会携带来丰富的陆源营养盐,使水体肥沃,从而极大地促进浮游植物的生长和繁殖,这会造成其影响范围内浮游植物的相对富集。而由于长江冲淡水在离开河口后多是“漂浮在背景海水上的一薄层水体”^[23],很难影响到较深的海区(S3、S4),再加之光照随深度增大也会逐渐减弱,因此研究区较深的海区呈现为叶绿素含量的低值区($<0.6\text{ }\mu\text{g/L}$)。通过前文分析我们得知,夏季研究区近岸海域中浮游植物的高生物量是造成其悬浮体有效密度空间分布差异的关键因素。研究区近岸海域表层及 10 m 层悬浮体有效密度(图 2 a1—a2)表现出自西北向东南逐渐增大的扩展趋势,而水体中的叶绿素浓度等参数的分布(图 2)在不同程度上也反映出这一趋势,联系影响该地区的水团要素,本文认为夏季自长江口顺岸南下的长江冲淡水是造成上述现象的主要原因。

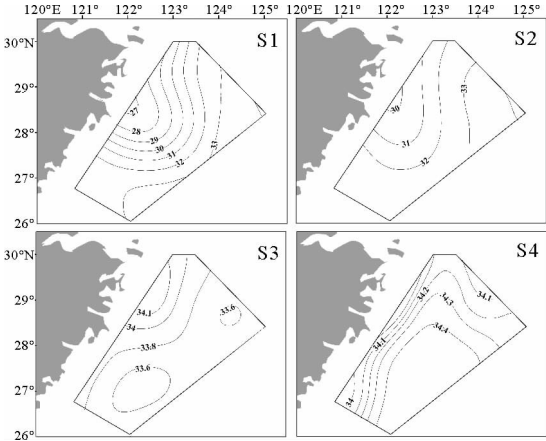


图 3 研究区盐度平面分布

(图中序号 1、2、3、4 分别对应表层、10m 层、30m 层和底层水体)
Fig. 3 Horizontal distribution of salinity in the study area
(The number 1, 2, 3, 4 in the picture represents the surface layer, 10m layer, 30m layer and bottom layer water respectively)

4.2 浙江沿岸上升流的影响

众所周知,上升流在整个海洋环流中是一个十分重要的组成部分,它的量级虽小,却可以把下层海水中的营养物质带到上层,促进浮游生物的生长和上下层水体之间的物质能量交换,从而对海洋生物资源和气候产生重要的影响^[14, 24]。浙江沿岸上升流是我国最显著的上升流,也是我国近海最大的渔场——舟山渔场的所在海域^[25]。早在 1980 年,胡敦欣等^[24]就通过实测的水温断面,证实了浙江近海在夏季有下层水的上升。之后,潘玉球、宁修仁等^[7, 26-29]分别就其锋面结构、理化特征、形成机制等方面进行了研究,进一步证实了浙江沿岸上升流的存在。在此基础上,曹欣中^[30]通过参照历年断面的观测资料,发现浙江沿岸上升流表现出“每年五月下旬起始,六月加强,七至八月最强,九至十月逐渐消退”的变化规律。由于研究区内悬浮体有效密度的相对低值区恰好位于浙江近岸海域(图 2 a1—a4),与浙江沿岸上升流活动区相对应,而本文所涉及的调查时间又正是浙江沿岸上升流的最强月份,因此,有必要对浙江沿岸上升流活动对研究区悬浮体有效密度的影响进行分析。

为确定浙江沿岸上升流对研究区的影响,我们在邻近舟山群岛的海区选择了一条与海岸线接近垂直的 T1 断面(图 1),绘制了 T1 断面的温度剖面图(图 4)。结果显示,在浙江近海的 35 号站位和 10 号站位之间的 30 m 以浅海域存在一处明显的向上温度递增现象(方框区域),该位置与胡明娜等^[31]利

用海洋卫星遥感技术提取的 7 月份浙江沿岸上升流的分布范围比较吻合。此外,选择了位于上升流影响区的 9 号和 10 号站位,绘制其站点的温盐分布图(图 5),从图中可以看出,上升流区的上层水体中存在明显的温盐跃层,且随着水深的增大,其跃层的厚度也相应地增加。具体表现为:在水深不足 50 m 的 9 号站位,其温、盐跃层分布在表层至 30 m 的范围内,而到了水深超过 60 m 的 10 号站位,其温盐跃层的影响深度则扩展至 40 m 以下。曹欣中等^[7, 25, 29]的研究表明:上升流能携带大量的营养盐至真光层供浮游植物摄取,使浮游植物得以大量繁殖。同时温盐跃层的存在,会造成水体垂直稳定度增大,客观上将更有利于浮游植物生物量的增加^[7]。通过比对 9 号和 10 号站位所在海域上层水体中浮游植物的高生物量,不难看出浙江沿岸上升流对于

研究区近岸海域上层水体中浮游植物的繁盛具有重要贡献,而浮游植物的大量生长必然导致上升流活动区内悬浮体体积浓度大增,使得其悬浮体有效密度值相对于区内其他海区呈现为低值特征。

上述研究表明,长江冲淡水和浙江沿岸上升流对造成浙江近岸上层水体中浮游植物的富集均有重要作用,导致该海域悬浮体有效密度大大降低。本文认为,夏季长江冲淡水和浙江沿岸上升流对东海陆架区的“叠加”影响是造成研究区悬浮体有效密度出现空间分布特征差异的主要原因。

4.3 海底沉积环境的影响

从研究区底层水体悬浮体质量浓度(图 2 b4)和体积浓度(图 2 c4)的平面分布可以看出,底层水体中悬浮体质量浓度和体积浓度的等值线走向与等深线走向(图 1)基本平行,水深越浅的地区,浓度越高,由近岸向外海随水深的增加,浓度值相应减小,反映出底层水体中悬浮体的分布受到海底地形特征的影响。前人研究结果显示^[32],浙江沿海存在一处覆盖在海侵砂质层之上的水下泥质区,泥质区在 20~30 m 水深的厚度约为 40 m,向外海逐渐变薄,到了 60~90 m 水深,厚度小于 1~2 m,泥质区的分布与底层悬浮体质量浓度和体积浓度的分布相对应。杨作升等^[1]研究认为,由风浪和潮流搅起的海底沉积物再悬浮是近底层海水中悬浮体的重要组成部分。研究区近岸海域水深较浅,风浪和潮流的作用强度较大,底层水体扰动剧烈,能够使大量的海底细颗粒沉积物(图 2 d4)发生再悬浮^[5],造成研究区近岸海域底层海水的悬浮体质量浓度和体积浓度相对

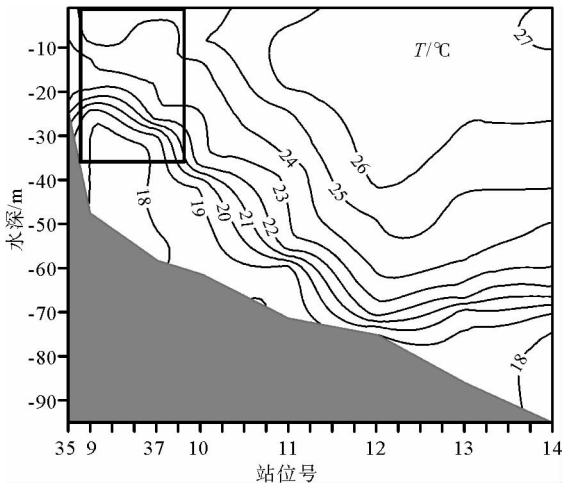


图 4 断面 T1 温度的垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of temperature in section T1

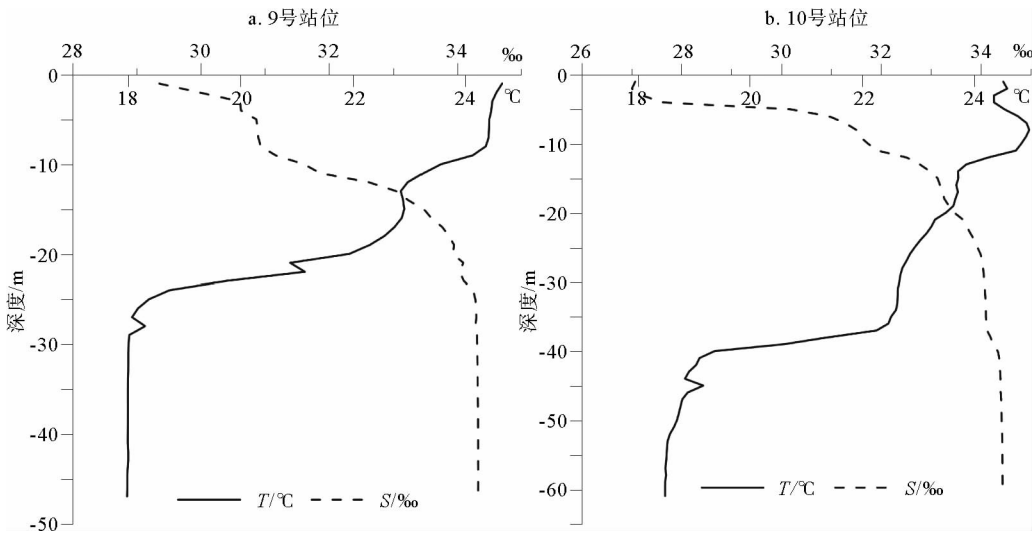


图 5 9 号和 10 号站位温度与盐度垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of temperature, salinity in station 9 and 10

于上层水体都呈现高值。同时,大量的细颗粒沉积物分布在近底层海水中,会使得近底层海水水体混浊,光照变弱,浮游植物含量降低(图 2 e4);此外,由于浮游植物的密度远低于主要由无机矿物颗粒组成的海底沉积物的密度,大量细颗粒沉积物进入近底层海水,也会“稀释”浮游植物的影响,使浮游植物对悬浮体有效密度的贡献降低,造成近岸海域底层水体的悬浮体有效密度(图 2 a4)较其上层水体增大。而外海区水深较大,风浪作用不易影响到海底,底层水体的扰动程度反而不如其上层水体强烈,海底沉积物的再悬浮作用较弱,部分有效密度较大的细粒陆源物质在上层水体中能够保持悬浮,至底层水体则发生沉降,造成底层水体的悬浮体有效密度较其上层水体减小。由此可见,海底地形、底质沉积物等沉积环境要素对近海底水体悬浮体有效密度的空间分布具有重要影响。

5 结论

(1)夏季东海陆架区悬浮体有效密度总体表现为近岸低、外海高的分布趋势;随深度的增加,近岸海域悬浮体有效密度逐渐增大,底层水体较上层水体呈现为高值;外海区悬浮体有效密度则相对稳定,底层水体较上层水体呈现为低值。

(2)夏季长江冲淡水 and 浙江沿岸上升流对东海陆架区的“叠加”影响,导致了研究区近岸海域上层水体中浮游植物的高生物量,这是造成研究区悬浮体有效密度空间分布差异的主要原因。

(3)海底沉积环境对悬浮体有效密度的空间分布具有重要影响。近岸海域水深较浅,风浪和潮流所引发的强烈再悬浮作用会使海底细颗粒沉积物大量进入近底层海水,降低和“稀释”浮游植物对近底层海水中悬浮体有效密度的影响,使底层水体的悬浮体有效密度相对上层水体呈现为高值;而在水深较大的外海区,风浪作用不易影响到海底,海底沉积物的再悬浮作用较弱,使得底层水体的悬浮体有效密度较其上层水体呈现为低值。

致谢:感谢国家自然科学基金委员会 2012 年度“东海科学考察实验研究”海洋科学共享航次对本项研究海上调查工作的支持;感谢中国科学院海洋研究所“科学三号”考察船 2012 年夏季航次全体船员对海上采样和观测工作提供的帮助;中国科学院海洋环流与波动重点实验室袁东亮研究员、庞重光研究员为本项研究的外业工作提供了支持,谨致谢忱。

参考文献(References)

- [1] 杨作升,郭志刚,王兆祥,等. 黄、东海毗邻海域悬浮体与水团的对应关系及其影响因素[J]. 青岛海洋大学学报, 1991, 21(3): 55-69. [YANG Zuosheng, GUO Zhigang, WANG Zhaoxiang, et al. Suspended matter in the Huanghai Sea and East China Sea; its contents, distribution, relation to the water masses and factors of influence[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1991, 21(3): 55-69.]
- [2] 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 Zuosheng, GUO Zhigang, WANG Zhaoxiang, et al. Suspended matter in the Huanghai Sea and East China Sea shelf and macro-pattern of their being transported to the eastern deeper sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1992, 14(2): 81-90.]
- [3] 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 Xiaogong, FANG Ming, HUANG Wei, et al. 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.]
- [4] 郭志刚,杨作升,张东奇,等. 冬、夏季东北北部悬浮体分布及海流对悬浮体输运的阻隔作用[J]. 海洋学报, 2002, 24(5): 71-79. [GUO Zhigang, YANG Zuosheng, ZHANG Dongqi, et al. Seasonal distribution of suspended matter in the northern East China Sea and barrier effect of current circulation on its transport[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(5): 71-79.]
- [5] 庞重光,王凡. 东海悬浮体的分布特征及其演变[J]. 海洋科学集刊, 2004, 46: 22-31. [PANG Chongguang, WANG Fang. The distribution features and temporal variability of suspended matter concentration in the East China Sea[J]. Studia Marine Sinica, 2004, 46: 22-31.]
- [6] 刘升发,石学法,刘焱光,等. 东海内陆架泥质区夏季悬浮体的分布特征及影响因素分析[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(1): 37-46. [LIU Shengfa, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Distribution of suspended matter in the inner-shelf mud area of the East China Sea in summer and their influence factors[J]. Advances in Marine Science, 2011, 29(1): 37-46.]
- [7] 宁修仁,史君贤,刘子琳,等. 长江口及浙江近海夏季叶绿素 a 和 ATP 的分布特征[J]. 海洋学报, 1986, 8(5): 603-610. [NING Xiuren, SHI Junxian, LIU Zilin, et al. Distribution of chlorophyll a and ATP in Changjiang River estuary and Zhejiang coastal area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1986, 8(5): 603-610.]
- [8] 虞兰兰,江文胜. 黄、东海悬浮细颗粒物浓度和粒径分布变化研究[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(4): 476-481. [YU Lanlan, JIANG Wensheng. Seasonal variations in the distributions of suspended fine particulate matter in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(4): 476-481.]

- [9] 文斐, 孙晓霞, 郑珊, 等. 2011 年春、夏季黄、东海叶绿素 a 和初级生产力的时空变化特征 [J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 438-444. [WEN Fei, SUN Xiaoxia, ZHENG Shan, et al. Spatial and seasonal variations of chlorophyll a and primary productivity in spring and summer in the Yellow Sea and East China Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(3): 438-444.]
- [10] Dyer K R, Manning A G. Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions [J]. Journal of Sea Research, 1999, 41: 87-95.
- [11] 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 等. 中国近海生物固碳强度与潜力 [J]. 生态学报, 2008, 28(2): 551-558. [SONG Jinming, LI Xuegang, YUAN Huamao, et al. Carbon fixed by phytoplankton and cultured algae in China coastal seas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 551-558.]
- [12] 许东禹. 东海陆架泥质沉积作用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(2): 17-26. [XU Dongyu. Mud sedimentation on the East China Sea continental shelf [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1985, 5(2): 17-26.]
- [13] 潘玉萍, 沙文钰. 夏季闽浙沿岸上升流的数值模拟 [J]. 海洋通报, 2004, 23(3): 1-11. [PAN Yuping, SHA Wenyu. Numerical study on the summer coastal upwelling off Fujian and Zhejiang [J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(3): 1-11.]
- [14] 许建平, 曹欣中, 潘玉球. 浙江近岸存在沿岸上升流的证据 [J]. 海洋湖沼通报, 1983, 4: 17-25. [XU Jianping, CAO Xinzhong, PAN Yuqiu. Evidence for the coastal upwelling off Zhejiang [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1983, 4: 17-25.]
- [15] Mikkelsen O A, Pejrup M. In situ particle size spectra and density of particle aggregates in a dredging plume [J]. Marine Geology, 2000, 170: 443-459.
- [16] Mikkelsen O A, Pejrup M. The use of a LISST-100 laser particle sizer for in-situ estimates of floc size, density and settling velocity [J]. Geo-Marine Letters, 2001, 20: 187-195.
- [17] Mikkelsen O A. Examples of spatial and temporal variations of some fine-grained suspended particle characteristics in two Danish coastal water bodies [J]. Oceanologica Acta, 2002, 25: 39-49.
- [18] Braithwaite K M, Bowers D G, Wamn S, et al. Observations of particle density and scattering in the Tamar Estuary [J]. Marine Geology, 2010, 277: 1-10.
- [19] Eisma D, Chen S, Li A. Tidal variations in suspended matter floc size in the elbe river and dollard estuaries [J]. Netherlands Journal of Aquatic Ecology, 1994, 28(3-4): 267-274.
- [20] 费尊乐, Trees C C, 李宝华. 利用叶绿素资料计算初级生产力 [J]. 黄渤海海洋, 1997, 15(1): 35-47. [FEI Zunle, Trees C C, LI Baohua. Estimating primary productivity using chlorophyll data [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1997, 15(1): 35-47.]
- [21] 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨 [J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(3): 183-206. [MAO Hanli, GAN Zijun, LAN Shufang. A preliminary study of the Yangtze diluted water and its mixing processes [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1963, 5(3): 183-206.]
- [22] 廖启煜, 郭炳火, 刘赞沛. 夏季长江冲淡水转向机制分析 [J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(3): 19-25. [LIAO Qiyu, GUO Binghuo, LIU Zanpei. Analysis of direction change mechanism of the Changjiang River diluted water in summer [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2001, 19(3): 19-25.]
- [23] 张庆华, 董昌明. 长江冲淡水与邻近海域生态环境的关系 [J]. 黄渤海海洋, 1993, 11(3): 27-29. [ZHANG Qinghua, DONG Changming. On the correlation of the diluted water of Yangzi River and ecological environment of its adjacent oceanic area [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1993, 11(3): 27-29.]
- [24] 胡敦欣, 吕良洪, 熊庆成, 等. 关于浙江沿岸上升流的研究 [J]. 科学通报, 1980, 3: 131-133. [HU Dunxin, LU Lianghong, XIONG Qingcheng, et al. The study on the upwelling off Zhejiang [J]. Chinese Science Bulletin, 1980, 3: 131-133.]
- [25] 曹欣中. 浙江近海沿岸上升流与渔场的关系 [J]. 海洋湖沼通报, 1985, 1: 25-28. [CAO Xinzhong. On the relationship of the upwelling with fishery off Zhejiang [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1985, 1: 25-28.]
- [26] 潘玉球, 曹欣中, 许建平. 浙江沿岸上升流锋区特征及其成因的初步探讨 [J]. 海洋湖沼通报, 1982, 3: 1-7. [PAN Yuqiu, CAO Xinzhong, XU Jianping. A preliminary investigation of the cause and characteristics of the upwelling front zone off Zhejiang [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1982, 3: 1-7.]
- [27] 丁宗信. 风对浙江沿岸海域夏季温、盐度垂直结构和上升流的影响 [J]. 海洋与湖沼, 1983, 14(1): 14-21. [DING Zongxin. Influence of wind on vertical structures of temperature and salinity, and upwelling off the Zhejiang coast [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1983, 14(1): 14-21.]
- [28] 潘玉球, 徐端蓉, 许建平. 浙江沿岸上升流区的锋面结构、变化及其原因 [J]. 海洋学报, 1985, 7(4): 401-410. [PAN Yuqiu, XU Duanrong, XU Jianping. The front structures, variation and cause of the upwelling front zone off Zhejiang [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1985, 7(4): 401-410.]
- [29] 宁修仁, 刘子琳, 胡钦贤. 浙江沿岸上升流区叶绿素 a 和初级生产力的分布特征 [J]. 海洋学报, 1985, 7(6): 751-762. [NING Xiuren, LIU Zilin, HU Qinxian. Distribution of chlorophyll a and primary productivity in the upwelling zone off Zhejiang [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1985, 7(6): 751-762.]
- [30] 曹欣中. 浙江近海上上升流季过程的初步研究 [J]. 水产学报, 1986, 10(1): 51-69. [CAO Xinzhong. Preliminary study on the seasonal process of the coastal upwelling off Zhejiang in the East China Sea [J]. Journal of Fisheries of China, 1986, 10(1): 51-69.]
- [31] 胡明娜, 赵朝方. 浙江近海夏季上升流的遥感观测与分析 [J]. 遥感学报, 2008, 12(2): 297-304. [HU Mingna, ZHAO Chaofang. Upwelling in Zhejiang coastal areas during summer detected by satellite observations [J]. Journal of Remote

Sensing, 2008, 12(2): 297-304.]

[32] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea [J]. Geomorphology, 2007, 85:208-224.

DISTRIBUTION OF EFFECTIVE DENSITY OF SUSPENDED MATTERS AND THEIR INFLUENCE FACTORS IN THE SHELF AREA OF THE EAST CHINA SEA IN SUMMER

YIN Mengshan^{1,2,3}, WANG Zhenyan^{1,3}, GAO Wei^{1,2,3}, ZHANG Kainan^{1,3}, WANG Baoduo^{1,3}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the data of suspended matters, temperature, salinity and chlorophyll obtained in June and July of 2012, we discussed the distribution pattern of effective density of suspended matters and their influence factors on the shelf of the East China Sea in summer. The results show that the value of effective density of suspended matters is much higher in the offshore area than in the nearshore area. With depth increasing, the effective density of suspended matters in the nearshore area is also increased gradually and the value in the bottom water is higher than the value in its upper water; but the effective density of suspended matters in the offshore area remains relatively stable and the value in the bottom water is lower than that in the upper water. The distribution of effective density of suspended matters in the study area is chiefly affected by the Changjiang River diluted water, the coastal upwelling off Zhejiang and the submarine sedimentary environment, among which the main factor is the joint effect from the Changjiang River diluted water and the coastal upwelling off Zhejiang.

Key words: shelf area of the East China Sea; suspended matters; effective density; Changjiang River diluted water; coastal upwelling off Zhejiang