

夏季北黄海不同性质悬浮体分布特征及其控制因素分析

张凯南^{1,3}, 王珍岩^{1,2,4}, 李文建^{1,3}, 刘长华¹, 阎 军^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 为了探讨夏季不同性质悬浮体在研究区的分布特征及其控制因素, 于 2016 年 6—7 月在北黄海使用 LISST-100X(C)型激光粒度仪和 CTD 测量了悬浮体浓度和水体温度、浊度、荧光叶绿素浓度数据。结合现场水文数据对不同粒径悬浮体的分布规律进行分析。结果表明, 夏季研究区悬浮体含有大量以生源颗粒为主的粗颗粒(>128 μm), 其浓度在下层水体较低, 在远岸层结水体的温跃层附近最高。粒径 <128 μm 的细颗粒浓度与浊度分布趋势一致, 主要反映陆源无机颗粒的变化。其浓度整体呈近岸高远岸低、下层高上层低的分布特征; 在成山头近岸海域最高, 并且在鲁北沿岸浅水与远岸深水之间存在浓度锋。潮混合作用和温跃层是影响悬浮体浓度空间分布的主要控制因素。潮混合作用促使鲁北沿岸出现陆架温度锋, 阻碍沿岸细颗粒物向海输运; 成山头近岸较强的潮混合作用导致当地沉积物再悬浮, 使该区域细颗粒浓度最高。温跃层不仅阻碍了底层细颗粒物向上扩散, 还对上层沉降下来的颗粒有“累积”作用。此外, 跃层附近丰富的浮游植物对粗颗粒浓度高值区的形成有促进作用。

关键词: 悬浮体; 粒径; 北黄海; 潮混合; 温跃层

中图分类号: P736.21 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2017)10-0086-08

DOI: 10.11759/hyxx20170301001

悬浮体是指以悬浮态存在于海水中的颗粒物, 其时空分布特征直接反映着海洋现代沉积过程。北黄海连接渤海和南黄海, 是二者水体交换和物质运输的重要通道。研究悬浮体在该海域的分布特征对深入了解北黄海现代沉积过程和机制、沉积物输运宏观格局等具有重要意义。

以往研究分析了悬浮体在北黄海的分布特征^[1-4]以及悬浮体在鲁北沿岸的输运机制^[5-6]。研究指出, 鲁北沿岸悬浮体的季节性输运具有类似“夏储冬输”的宏观格局^[6]; 夏季北黄海悬浮体浓度整体较低, 并且呈现近岸浅水区高, 远岸深水区低, 跃层附近相对较低的分布特征^[1-4]。冷水团、黄海沿岸流、潮混合是影响其分布的主要因素^[1-4]。上述研究结果主要基于水体浊度、悬浮体质量浓度以及卫星遥感数据反演的表层悬沙浓度数据, 三者主要受密度较大的泥沙颗粒控制。然而, 海洋悬浮体中除泥沙颗粒外, 还含有大量粒径较大的生源颗粒^[7-9]和絮团^[10]。尤其在夏季, 生源有机质是北黄海悬浮颗粒物的重要组成部分^[10], 其存在会促进絮团的形成^[12], 从而对细颗粒泥沙的沉降机制^[13]以及生物地球化学循环过程产生重要影响。因此, 探讨由不同物质组成的悬浮颗

粒分布特征对于全面、深入地了解北黄海悬浮体输运、沉降过程及其作用机制等具有重要意义。

悬浮体的粒度特征在一定程度上能够反映其存在形式和物质组成^[14], 不同粒径悬浮体的分布能够反映不同性质悬浮体的空间分布特征。原位激光粒度仪(Laser In-Situ Scattering and Transmissometry, LISST)是近年来研制的一种能在水体环境中对悬浮颗粒物的粒度(32 个粒级)和体积浓度进行原位测量的仪器; 与常用的质量浓度(mass concentration)相对应, 体积浓度(volume concentration)是指 LISST 利用激光衍射原理测得的单位体积水体中含有的颗粒物的体积量, 单位为 μL/L^[15]。吴昊等^[16]利用 LISST 数据分析了黄、渤海悬浮体的粒径分布特征, 结果显示,

收稿日期: 2017-03-01; 修回日期: 2017-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41476045); 中国科学院战略性先导科技专项项目(A类)(XDA11030103)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41476045; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, XDA11030103]

作者简介: 张凯南(1987-), 女, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: zhangkainan.815@163.com; 王珍岩(1972-), 男, 副研究员, 通信作者, E-mail: zywang@qdio.ac.cn

夏季北黄海悬浮体的中值粒径在几十到几百微米之间变化,并且在远岸上层水体较大。显然,夏季悬浮体颗粒间的粒径差异大,其性质也很可能有较大不同。为了进一步研究夏季北黄海不同性质悬浮体的分布特征及环境因素对其影响,本文将使用 LISST 测量的夏季北黄海悬浮体粒径、体积浓度数据,结合同步测量的海水温度、浊度、荧光叶绿素浓度数据,分析不同粒径范围悬浮体的空间分布特征及其控制因素。

1 材料与方 法

本文所使用数据及样品由中国海洋大学“东方红 2 号”考察船在 2016 年 6—7 月对北黄海进行现场调查时获得,包括 4 条断面和 20 个大面站,其分

布情况如图 1 所示。调查资料包括悬浮体体积浓度($\mu\text{L/L}$)、粒径(μm)以及水体温度($^{\circ}\text{C}$)、浊度(NTU)、荧光叶绿素浓度($\mu\text{g/L}$)的剖面连续数据。

悬浮体原位体积浓度、粒径数据由 LISST 100-X(C)型现场激光粒度仪测量。LISST 100-X(C)是由美国 SEQUOIA 公司开发的一种原位激光粒度仪,可同时测量 2.5~500 μm 的 32 个粒级的悬浮体体积浓度($\mu\text{L/L}$)。水体温度、浊度及荧光叶绿素浓度数据由 SeaBird 9Plus/11 CTD 携带 Wetlab 浊度、荧光叶绿素传感器进行采集。

本文所使用悬浮体体积浓度、温度、浊度、荧光叶绿素浓度均为将原始数据校正处理后进行 1 m 层平均所获得的分层平均值。

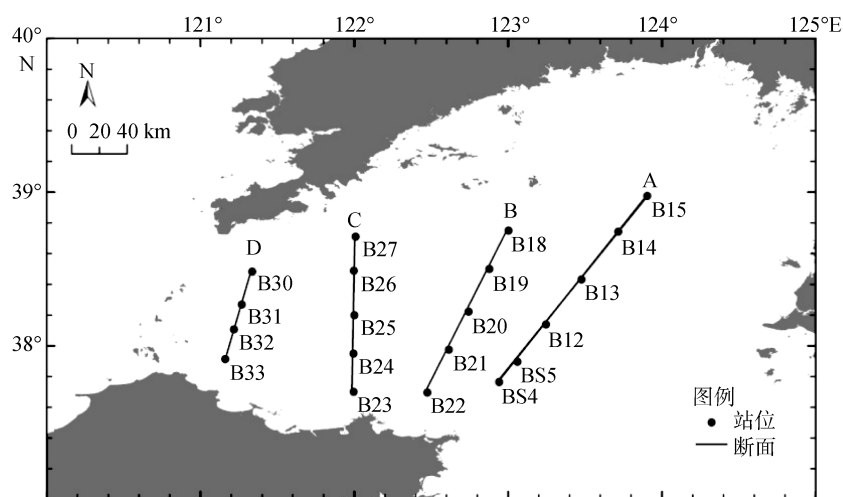


图 1 研究区调查站位、断面分布图

Fig. 1 Distributions of stations and sections in the study area

2 结果

2.1 各粒级悬浮体体积浓度统计结果

粒径是悬浮体的重要属性,粒径差异较大的悬浮体在物源、物质组成^[14]、沉降特性^[17]等方面也截然不同。因此,可根据粒径将悬浮体进行分类,从而研究不同性质悬浮体的分布规律。

对全部调查站位的悬浮体体积浓度进行平均计算,分别得到研究区悬浮体体积浓度在 32 个粒级的平均值。结果显示(如图 2),粒径 $<128 \mu\text{m}$ 的悬浮体体积浓度较低,变化比较平稳,而粒径 $>128 \mu\text{m}$ 的悬浮体体积浓度随粒径增大而迅速升高。Eisma^[10]认为,海水中悬浮体以单体颗粒、结构紧实的小絮团以及

含水率高、结构松散的大絮团 3 种形式存在; Mikkelson 等^[18]也用实测数据证实了上述观点,两者均指出划分结构紧实的小絮团和结构松散的大絮团的粒径标准在 130 μm 左右,结构松散的大絮团由单体颗粒和小絮团形成,其体积随粒径增大而迅速增大。本文数据显示的粒径 $>128 \mu\text{m}$ 的悬浮体体积浓度随粒径增大而迅速升高的现象与上述文献的认识相一致。

因此,本文以 128 μm 为标准,将悬浮体划分为两类性质不同的颗粒。为了便于文中讨论,我们将粒径小于该值、结构紧实的悬浮体称为细颗粒,将大于该值、结构松散的悬浮体称为粗颗粒。显然,夏季北黄海水体中的悬浮体以粗颗粒为主,其浓度占悬浮体总体积浓度的 74%,而细颗粒仅占 26%。

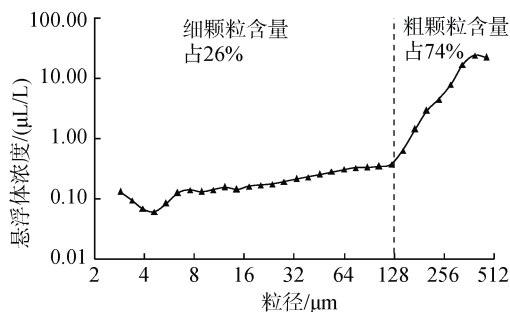


图2 研究区悬浮体平均体积浓度的粒径分布曲线
Fig. 2 Particle size spectra of mean volume concentrations

2.2 粗颗粒、细颗粒悬浮体体积浓度以及水体浊度、荧光叶绿素浓度分布特征

浊度测量基于水体中颗粒物的后向散射，光学仪器测量的后向散射强度对密度较大的无机颗粒敏感度较高，而对粒径较大的生源颗粒敏感度较低^[19]。夏季北黄海水体浊度与悬浮体质量浓度有良好的相关性^[3]。因此，研究区浊度可以反映密度较大的无机颗粒的浓度变化。荧光叶绿素浓度是衡量浮游植物生物量和估算海洋初级生产力的重要参数^[20]，可用于指示生源物质的空间分布特征。因此，为了进一步分析研究区不同性质悬浮体的空间分布特征及其控制因素，分别绘制了细颗粒、粗颗粒悬浮体体积浓度以及浊度、荧光叶绿素浓度的断面分布图，对各参数进行综合对比(图3)。

细颗粒体积浓度在各断面水平方向上均呈现出在鲁北近岸较高、由近岸向远岸降低的趋势。并且，鲁北沿岸各站位(B33、B23、B22)与远岸深水的下层水体之间均出现体积浓度锋面，其中渤海海峡南端的B33站和成山头西北岸外的B22站与远岸上层水体之间也形成了体积浓度锋。沿垂向观察发现，细颗粒体积浓度表现出下层水体较高，上层水体较低分布特征。在远岸深水区域，各断面细颗粒体积浓度均在底层最高，向上层逐渐降低，直至10~30 m层出现体积浓度跃层，使该层以浅水体成为相对低值区(<1 μL/L)。整体来看，近成山头海域(BS4、BS5、B22站)细颗粒体积浓度最高(>8 μL/L)。

粗颗粒体积浓度分布特征与细颗粒的不同，其大致表现为两种分布类型：第一类位于成山头西北沿岸(B22站)和渤海海峡南部(B31—B33站)较浅水域。该区域粗颗粒体积浓度整体较低，上层水体相对高于下层水体；第二类主要位于远岸深水区。该区域粗颗粒体积浓度较高，整体表现出上层水体高于下

层水体的分布趋势，并且普遍在10~30 m层出现相对高值区(>150 μL/L)。

浊度的分布趋势与细颗粒体积浓度的分布趋势具有较好的一致性，而与粗颗粒体积浓度分布趋势迥异，由此可见，细颗粒以陆源无机颗粒为主。荧光叶绿素浓度高值主要集中在远岸深水区的10~30 m层，与粗颗粒体积浓度高值分布具有一定的一致性。显然，粗颗粒体积浓度受到生源物质的影响，其高值分布于初级生产力较高的中上层水体。但是，在成山头西北沿岸(B22站)和渤海海峡南部(B31—B33站)较浅海域，粗颗粒体积浓度高值并未在荧光叶绿素浓度高值水层中出现。这说明，粗颗粒体积浓度变化虽然与生源物质有关，但并非仅由浮游植物量控制，可能还受到其他环境因素的共同作用。

3 讨论

夏季，低温高盐的冷水团盘踞于北黄海中部深水区，与上混合层之间存在较强的温度跃层，其内部水体性质较稳定，动力环境微弱^[21]。围绕冷水团，由南黄海入侵高盐水^[22]、辽南沿岸流、鲁北沿岸流构成了气旋式环流^[23]。在夏季，由于没有东北季风的强迫，鲁北沿岸流微弱，成为保留有冬季水性质的鲁北沿岸水^[24]。北黄海沿岸潮流较强^[25]，潮混合产生的湍流作用成为沿岸水体混合和物质交换的主要动力。水体理化特性、动力条件是悬浮体分布的重要控制因素。结合研究区的温度分布情况分析发现，跃层、潮混合对悬浮体分布有重要影响。

3.1 潮混合对悬浮体分布的影响

在北黄海海域，潮混合控制着冷水团边界和陆架锋的空间分布^[26-28]。研究区温度分布显示(图4)，在蓬莱近岸(B33站)和成山头西北近岸(B22站)，沿岸浅水区上层水温低于远岸深水区上混合层，下层水温高于相邻冷水团的温度，形成明显的潮生陆架锋，而鲁北沿岸中段的B23站则仅在下层出现陆架锋，上层并未出现。由此可见，蓬莱近岸和成山头西北近岸海域的水体混合较强，这主要是由渤海海峡和成山头近岸海域潮混合作用较强^[25]造成的。细颗粒分布(图3)显示，其体积浓度在陆架锋近岸侧高，远岸侧低，并且形成了与该锋一致的“细颗粒体积浓度锋”。显然，潮混合形成的陆架锋阻碍了鲁北沿岸的细颗粒悬浮体向北黄海中部输运。

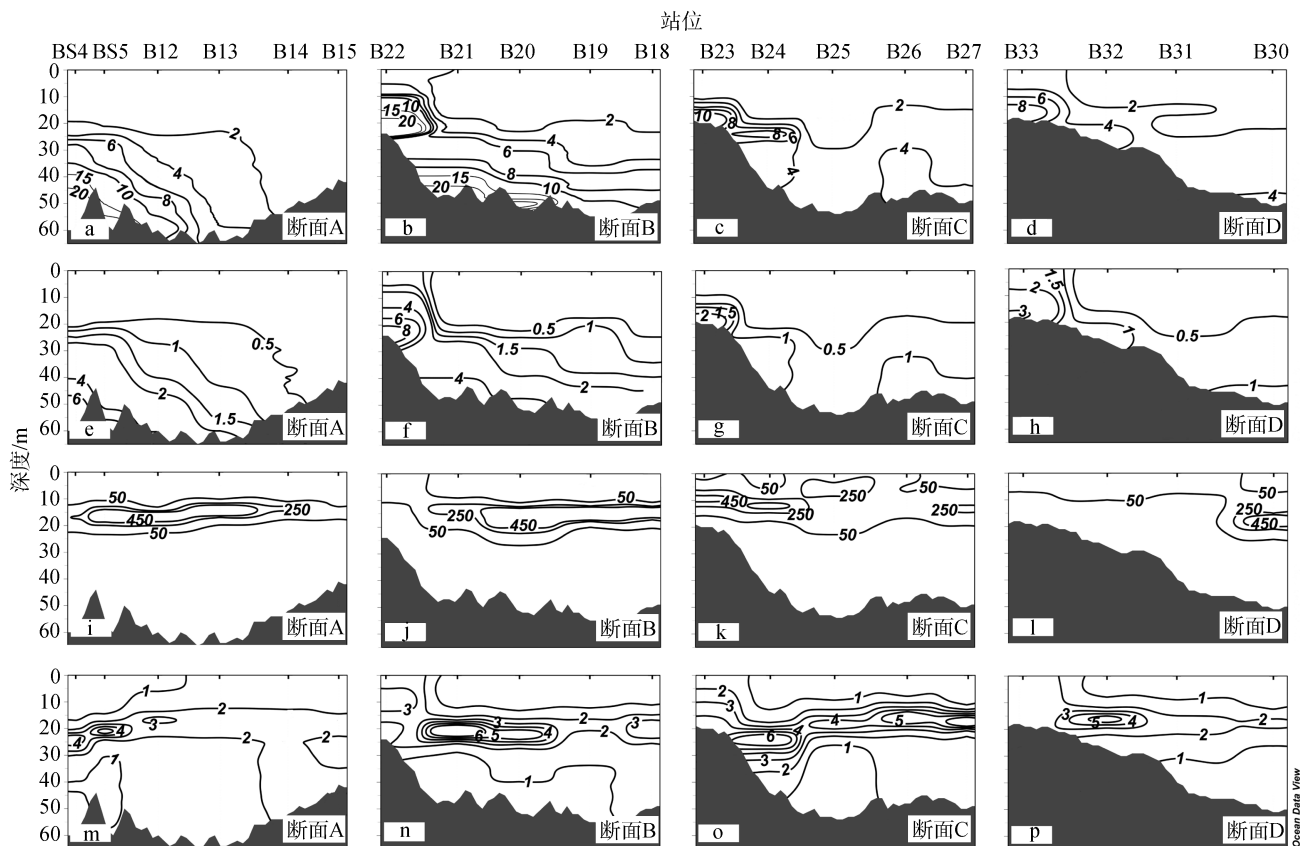


图 3 各断面悬浮体体积浓度及各项水文参数等值线分布图

Fig. 3 Contours of particle volume concentrations and hydrological parameters in work sections

a-d. 各断面细颗粒体积浓度/($\mu\text{L/L}$); e-h. 各断面浊度/NTU; i-l. 各断面粗颗粒体积浓度/($\mu\text{L/L}$); m-p. 各断面荧光叶绿素浓度/($\mu\text{g/L}$)
 a-d. fine-particle volume concentrations ($\mu\text{L/L}$); e-h. turbidity/NTU; j-l. coarse-particle volume concentrations ($\mu\text{L/L}$); m-p. chlorophyll fluorescence concentrations ($\mu\text{g/L}$) in work sections

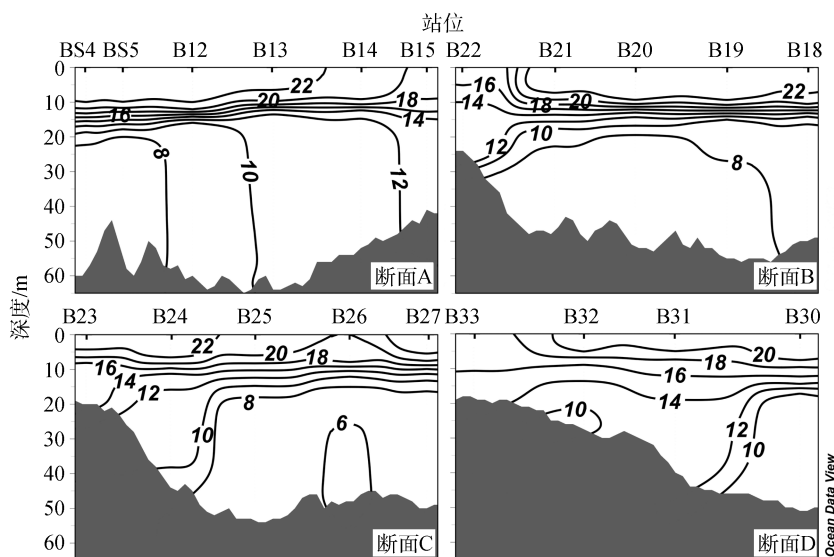


图 4 各断面温度($^{\circ}\text{C}$)等值线分布图

Fig. 4 Temperature contours in work sections

此外，潮混合会影响底层沉积动力环境，造成沉积物的再悬浮^[26]，从而对悬浮体空间分布产生重

要影响。以往研究显示^[27,30]，强烈的潮混合作用遇爬升地形会使底层冷水上涌，形成潮致上升流，导

致表层水体出现低温现象。以往研究中遥感海表面温度数据^[27, 31-32]显示,成山头附近海域夏季表层温度较低,出现“冷斑”,表现出强烈的潮混合作用,该现象与数值模拟结果相一致^[30]。本文研究区温度分布(图 4)显示,成山头西北沿岸站位(B22 站)温度等值线向上弯曲,下层冷水上涌,使该站表层温度在研究区表层最低,显示出该区域存在较强的潮混合作用。与此对应,细颗粒体积浓度在此区域下层水体较高,沿鲁北沿岸流流向观察发现,与之相比,位于鲁北沿岸流上游区域的下层水体细颗粒体积浓度反而较低,显然,近成山头海域的细颗粒体积浓度高值并非主要由鲁北沿岸流携带细颗粒至此造成,而更可能是潮混合使本地沉积物再悬浮造成的。

3.2 温跃层对悬浮体分布的影响

研究区温度分布(图 4)显示,冷水团分布于北黄海中部深水区,与上混合层水体之间存在较强的温跃层,跃层位于 10~30 m 水层。悬浮体分布与温跃层密切相关。

冷水团所在的北黄海中部深水区,细颗粒体积浓度由底层向上层逐渐降低。由于下层水体中的悬浮体主要来自于风浪和潮流造成的海底沉积物再悬浮^[33],上述现象即为再悬浮的沉积物向上扩散造成的。而向上扩散的细颗粒在 10~30 m 附近出现了体积浓度跃层,在其以浅,体积浓度整体保持低值。该体积浓度跃层与温跃层位置基本一致。显然,是温跃层阻碍了底层细颗粒悬浮体向上扩散。

粗颗粒分布特征表现为两种类型(图 3)。第一类:体积浓度在上层水体较高,而在下层水体较低,该类分布主要出现在渤海海峡南部、鲁北沿岸浅水区。第二类:体积浓度整体高于第一类,高值集中分布于 10~30 m 水层,该类分布主要出现在远岸深水区。结合荧光叶绿素浓度(图 3)和温度分布(图 4)分析发现,在第二类分布特征所在区域,温跃层较强,荧光叶绿素浓度和粗颗粒体积浓度高值区都分布于温跃层附近。然而,在第一类分布特征所在区域,温度的垂向变化较小,几乎不存在温跃层。荧光叶绿素浓度与粗颗粒体积浓度的分布不再具有一致性。这说明,粗颗粒体积浓度变化虽然与生源物质有关,但并非仅由浮游植物量控制,还与温跃层紧密相关。乔璐璐等^[34]通过计算表明,温跃层越强,跃层内的扩散系数越小,对垂向运动的抑制作用越强。实验证明^[35],跃层内海水密度迅速增大,为沉降至此的悬浮体提

供更大的浮力,使其沉降速度减慢。因此,温跃层能够使上层沉降的悬浮颗粒在此积聚。另外,冷水团是营养盐的重要储库^[36],而跃层限制了下层营养物质向上运输,为了适应营养盐和光照的分布,浮游植物在跃层下界附近比较丰富^[37]。浮游植物在提供大量生源颗粒的同时,还会促进水体中悬浮颗粒聚集形成粒径较大的聚集体^[38]。因此,温跃层内对应出现了粗颗粒悬浮体体积浓度的高值区,而近岸浅水区虽然也有较高的浮游植物量,却因没有强跃层而未出现粗颗粒悬浮体的高值区。

4 结论

1) 夏季北黄海水体中粒径<128 μm 的细颗粒体积浓度较低,粒径>128 μm 的粗颗粒体积浓度较高,两者分别占悬浮体总体积浓度的 26%、74%。

2) 细颗粒悬浮体体积浓度与水体浊度的分布特征基本一致,主要反映了陆源无机颗粒的空间变化。其体积浓度整体呈近岸高远岸低,下层高上层低的分布趋势。并且在鲁北沿岸浅水与远岸深水之间出现了体积浓度锋面,在远岸深水区域以温跃层为界,其上为相对低值区,其下体积浓度较高。整体来看,细颗粒悬浮体体积浓度在近成山头海域最高(>8 μL/L)。粗颗粒悬浮体则主要受生源物质影响。在近岸浅水区,其体积浓度由上层水体向下层水体逐渐降低;在远岸深水区,其体积浓度高值集中出现在 10~30m 的温跃层内。

3) 潮混合作用和温跃层是控制悬浮体分布的主要因素。成山头西北近岸较强的潮混合作用使底部沉积物再悬浮是造成该区域细颗粒悬浮体高浓度的主要原因。另外,潮混合作用于冷水团边界,在鲁北沿岸形成陆架锋,阻碍了沿岸细颗粒向北黄海中部运输。

4) 较强的温跃层广泛分布于研究区较深海域,阻碍了底层细颗粒向上层水体扩散,从而使细颗粒在温跃层附近形成了体积浓度跃层。此外,强跃层会降低悬浮颗粒的沉降速率,使上层沉降颗粒在跃层聚集,加之跃层附近丰富的浮游植物为悬浮体提供了大量生源颗粒,同时促进小颗粒凝聚成为粒径更大的聚集体,致使温跃层附近成为粗颗粒体积浓度高值区。

参考文献:

- [1] Li Zhen, Bao Xianwen, Wang Yongzhi, et al. Seasonal distribution and relationship of water mass and suspended load in North Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(4): 907-918.

- [2] 鲍献文, 李真, 王勇智, 等. 冬、夏季北黄海悬浮物分布特征[J]. 泥沙研究, 2010, 4 (2): 48-56.
Bao Xianwen, Li Zhen, Wang Yongzhi, et al. Sediment distribution features in the North Yellow Sea during summer and winter[J]. Journal of Sediment Research, 2010, 4(2): 48-56.
- [3] 王勇智, 鞠霞, 乔璐璐, 等. 夏冬季北黄海水体浊度分布特征研究[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(5): 928-937.
Wang Yongzhi, Ju Xia, Qiao Lulu, et al. Water turbidity in the northern Yellow Sea in summer and winter[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(5): 928-937.
- [4] 余佳, 王厚杰, 毕乃双, 等. 基于 MODIS L1B 数据的黄海悬浮物季节性分布的反演[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 1-9.
Yu Jia, Wang Houjie, Bi Naishuang, et al. Seasonal distribution and variation of suspended sediment in the Yellow Sea in 2010 based on retrieved monthly data from MODIS L1B imagery[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2014, 34 (1): 1-9.
- [5] 王勇智, 乔璐璐, 鲍献文, 等. 夏季北黄海水体浊度分布特征的初步研究[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(6): 1-8.
Wang Yongzhi, Qiao Lulu, Bao Xianwen, et al. A preliminary study on water turbidity distribution characteristics in the northern Yellow Sea in summer[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(6): 1-8.
- [6] 王勇智, 乔璐璐, 杨作升, 等. 近岸强海流切变锋作用下悬浮沉积物的输送和沉积——以山东半岛东端外海为例[J]. 沉积学报, 2013, 31(3): 486-496.
Wang Yongzhi, Qiao Lulu, Yang Zuosheng, et al. Suspended sediment transport and deposition due to strong regional shear current front: an example from the shelf waters off eastern Shandong peninsula[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(3): 486-496.
- [7] Qin Yunshan, Li Fan, Xu Shanmin, et al. Study on suspended matter in seawater in the southern Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1988, 6(3): 201-215.
- [8] Karageorgis A P, Kaberi H G, Tengberg A, et al. Comparison of particulate matter distribution, in relation to hydrography, in the mesotrophic Skagerrak and the oligotrophic northeastern Aegean Sea[J]. Continental Shelf Research, 2003, 23(17-19): 1787-1809.
- [9] Guo Xuewu, Zhang Yansong, Zhang Feijun, et al. Characteristics and flux of settling particulate matter in neritic waters: The southern Yellow Sea and the East China Sea[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2010, 57(57): 1058-1063.
- [10] Eisma D. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1986, 20(2-3): 183-199.
- [11] 张海波, 杨鲁宁, 王丽莎, 等. 2013 年夏季黄、渤海颗粒有机碳分布及来源分析[J]. 海洋学报, 2016, 38(8): 24-35.
Zhang Haibo, Yang Luning, Wang Lisha, et al. Distribution and source analyses of particulate organic carbon in the Yellow Sea and Bohai Sea during summer, 2013[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(8): 24-35.
- [12] Jähmlich S, Thomsen L, Graf G. Factors controlling aggregate formation in the benthic boundary layer of the Mecklenburg Bight (western Baltic Sea)[J]. Journal of Sea Research, 1999, 41(4): 245-254.
- [13] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄、东海水体中的有机包膜及其沉积作用[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(2): 222-226.
Yang Zuosheng, Guo Zhigang, Wang Zhaoxiang, et al. Organic films and its sedimentation in the water column in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992, 23(2): 222-226.
- [14] Lam P J, Ohnemos D C, Auro M E. Size-fractionated major particle composition and concentrations from the US GEOTRACES North Atlantic Zonal Transect[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2014, 116: 303-320.
- [15] Agrawal Y C, Pottsmith H C. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport[J]. Marine Geology, 2000, 168(1-4): 89-114.
- [16] 吴昊, 丘仲锋, 张艳萍, 等. 2013 年夏季黄、渤海悬浮颗粒物粒径分布特征[J]. 海洋科学, 2015, 39(12): 91-99.
Wu Hao, Qiu Zhongfeng, Zhang Yanping, et al. Distribution characteristics of suspended particle size in the Yellow and Bohai Seas in summer and autumn 2013[J]. Marine Sciences, 2015, 39(12): 91-99.
- [17] Mikkelsen O, 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(4): 187-195.
- [18] Mikkelsen O A, Hill P S, Milligan T G. Single-grain, microfloc and macrofloc volume variations observed with a LISST-100 and a digital floc camera[J]. Journal of Sea Research, 2006, 55(2): 87-102.
- [19] Flory E N, Hill P S, Milligan T G, et al. The relationship between floc area and backscatter during a spring phytoplankton bloom[J]. Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers, 2004, 51(2): 213-223.
- [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. Estimation primary productivity using Chlorophyll data[J]. Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas, 1997, 15(1): 35-47.

- [21] 苏纪兰, 黄大吉. 黄海冷水团的环流结构[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(S1): 1-7.
Su Jilan, Huang Daji. On the current field associated with the Yellow Sea cold water mass[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(S1): 1-7.
- [22] Pang Chongguang, Liang Jianxia, Hu Dunxin, et al. Surface circulation patterns observed by drifters in the Yellow Sea in summer of 2001, 2002 and 2003[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2004, 22(3): 209-216.
- [23] 韦钦胜, 于志刚, 冉祥滨, 等. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质输运的影响[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 145-156.
Wei Qinsheng, Yu Zhigang, Ran Xiangbin, et al. Characteristics of the western coastal current of the Yellow Sea and its impacts on material transportation[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(2): 145-156.
- [24] 鲍献文, 李娜, 姚志刚, 等. 北黄海温盐分布季节变化特征分析[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(4): 553-562.
Bao Xianwen, Li Na, Yao Zhigang, et al. Seasonal variation characteristics of temperature and salinity of the North Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(4): 553-562.
- [25] Fang Guohong. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1986, 4(1): 1-16.
- [26] 江文胜, 苏健, 杨华, 等. 渤海悬浮物浓度分布和水动力特征的关系[J]. 海洋学报, 2002, 24(1): 214-271.
Jiang Wensheng, Su Jian, Yang Hua, et al. The relationship between SPM concentration and hydrodynamic condition in the Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(1): 214-271.
- [27] 赵保仁. 黄海冷水团锋面与潮混合[J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(6): 451-460.
Zhao Baoren. The fronts of the Huanghai Sea cold water mass induced by tidal mixing[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1985, 16(6): 451-460.
- [28] 戚建华, 苏育嵩. 黄海潮生陆架锋的数值模拟研究[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(3): 247-254.
Qi Jianhua, Su Yusong. Numerical simulation of the tide-induced continental front in the Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 29(3): 247-254.
- [29] 任慧军, 詹杰民. 黄海冷水团的季节变化特征及其形成机制研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(s1): 887-896.
Ren Huijun, Zhan Jiemin. A numerical study on the seasonal variability of the Yellow Sea cold water mass and the related dynamics[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2005, 20(s1): 887-896.
- [30] Lü Xingang, Qiao Fangli, Xia Changshui, et al. Upwelling and surface cold patches in the Yellow Sea in summer: Effects of tidal mixing on the vertical circulation[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(6): 620-632.
- [31] 邹娥梅, 郭炳火, 汤毓祥, 等. 南黄海及东海北部夏季若干水文特征和环流的分析[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 340-348.
Zou Emei, Guo Binghuo, Tang Yuxiang, et al. An analysis of summer hydrographic features and circulation in the southern Yellow Sea and the northern East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(3): 340-348.
- [32] Huang Daji, Zhang Tao, Zhou Feng. Sea-surface temperature fronts in the Yellow and East China Seas from TRMM microwave imager data[J]. *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(11-12): 1017-1024.
- [33] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄、东海毗邻海域悬浮物与水团的对应关系及影响因素[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 mass and factors of influence[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1991, 21(3): 55-69.
- [34] 乔璐璐, 李广雪, 邓声贵, 等. 夏季渤海湾中北部悬浮物分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(3): 23-30.
Qiao Lulu, Li Guangxue, Deng Shenggui, et al. Distribution of suspended particulate matters in the middle and northern Bohai Bay in summer[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2010, 30(3): 23-30.
- [35] Prairie J C, Kai Z, Camassa R, et al. Delayed settling of marine snow: Effects of density gradient and particle properties and implications for carbon cycling[J]. *Marine Chemistry*, 2015, 175: 28-38.
- [36] 王保栋. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系[J]. 海洋学报, 2000, 22(6): 47-54.
Wang Baodong. Characteristics of variations and interrelations of biogenic elements in the Huanghai Sea cold water mass[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(6): 47-54.
- [37] 张书文. 黄海冷水团夏季叶绿素垂向分布结构的影响机制[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(2): 179-186.
Zhang Shuwen. Effect mechanisms on chlorophyll-a vertical distribution in the summer within Yellow Sea cold water mass[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(2): 179-186.
- [38] Cross J, Nimmo-Smith W A M, Torres R, et al. Biological controls on resuspension and the relationship between particle size and the Kolmogorov length scale in a shallow coastal sea[J]. *Marine Geology*, 2013, 343(1): 29-38.

Distribution and its control factors of the suspended particulate matter in the North Yellow Sea during summer

ZHANG Kai-nan^{1,3}, WANG Zhen-yan^{1,2,4}, LI Wen-jian^{1,3}, LIU Chang-hua¹, YAN Jun^{1,2}

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Received: Mar. 1, 2017

Key words: suspended particulate matter (SPM); particle size; the North Yellow Sea; tidal mixing; thermocline

Abstract: To better understand the distribution of different kinds of suspended particulate matter (SPM) in the North Yellow Sea and the key factors controlling them, in June and July 2016, we measured the SPM volume concentrations and sizes with an in-situ laser particle sizer, LISST-100X(C). We obtained the chlorophyll fluorescence concentration, turbidity, and temperature of the entire water column with a CTD device. The results indicate that coarse particles (>128 μm) of predominately biogenic matter account for most of the SPM, with the concentrations substantially higher in the thermocline of the stratificated offshore water. The concentration distributions of fine particles (<128 μm) exhibits the same tendency as turbidity, and accordingly, verify the mainly inorganic terrigenous particles of the area. Generally, the concentrations are high along the Shandong Peninsula coast and low in the offshore deep water where there is a concentration front along the coast. The concentrations are low in the upper water and high in the water below. The highest concentration is at the bottom near the Chengshantou area. Tidal mixing and the thermocline are key factors controlling the SPM distribution in the study area. Tidal mixing prompts shelf thermal fronts, which prevent coastal fine particles from spreading seaward. The strong tidal mixing near the Chengshantou area results in a resuspension of the local sediments, so the fine-particle concentration here is highest. The thermocline not only impedes the upward spreading of fine particles, but also delays the settling of particles from the upper water. Moreover, phytoplanktons gathered near the thermocline also have a significant promoter effect on the formation of high coarse-particle concentrations.

(本文编辑: 刘珊珊)