

DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0050

黄海中部春、夏季悬浮颗粒物垂向分布特征 及其驱动因素分析

凡仁福^{1,2}, 魏皓³, 赵亮⁴, 王道儒^{1,2}

(1.海南省海洋与渔业科学院, 海南 海口 571126; 2.海南热带海洋学院崖州湾创新研究院, 海南 三亚 572025; 3.天津大学 海洋科学与技术学院, 天津 300072; 4.天津科技大学 海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要:本研究基于黄海中部春、夏季由 LISST-100 和 RBR620 CTD 同步原位观测的数据, 分析了悬浮颗粒物浓度和粒径的垂向分布特征, 并探讨了浮游生物分布和水动力状况对悬浮颗粒物变化的影响。春季 10 m 以深水垂直混合均匀, 10~25 m 次表层观测到约 4 d 的浮游植物藻华过程。夏季水体呈现显著的三层结构, 双跃层分别位于 15~20 m 和 25~35 m 水深。春季次表层出现的高悬浮颗粒物浓度是由粒径为 10~20 μm 的微型浮游植物发生藻华而形成的。夏季层化水体中, 粒径大于 250 μm 的中型浮游动物一直处在双跃层附近, 导致悬浮颗粒物浓度呈现高值。春、夏季近底层以粒径为 26~38 μm 的颗粒物占优, 沉积物局地再悬浮过程导致了夏季近底层颗粒物浓度升高, 春季近底层颗粒物的高浓度主要受颗粒物水平对流输运过程的影响。

关键词: 悬浮颗粒物; 粒径谱; 浮游生物; 现场激光粒度仪; 黄海

中图分类号: P731.2; X143

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2026)02-0205-10

Vertical distribution characteristics of suspended particulate matter and their influential factors in the central Yellow Sea during spring and summer

Fan Renfu^{1,2}, Wei Hao³, Zhao Liang⁴, Wang Daoru^{1,2}

(1.Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 571126, China; 2.Yazhou Bay Innovation Institute of Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572025, China; 3.School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4.College of Marine and Environmental Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: This study revealed the vertical distribution characteristics of suspended particulate matter (SPM) and explored the influences of plankton distribution and hydrodynamic conditions on variations in SPM, based on observational data collected using LISST-100 and RBR620 CTD instruments in the central Yellow Sea during spring and summer. In spring, the water column below 10 m was vertically well-mixed, and a phytoplankton bloom observed in the subsurface layer that spread across depths of 10-25 m for approximately 4 days. In summer, the water column exhibited a distinct three-layer structure with strong stratification at depths of 15-20 m and 25-35 m. The high concentration of SPM observed in the subsurface layer during spring was attributed to a bloom of microphytoplankton with particle sizes of 10-20 μm . In stratified waters during summer, the presence of mesozooplankton with particles >250 μm near the double stratification contributed to high SPM concentrations. In both spring and summer, particles sized 26-38 μm predominated near the bottom layer. Local

收稿日期: 2025-03-19, 修订日期: 2025-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42106026); 海南省自然科学基金高层次人才项目(423RC553)

作者简介: 凡仁福(1990—), 男, 海南保亭人, 副研究员, 博士, 主要研究方向为浅海动力学、珊瑚礁环境动力学, E-mail:

fanrenfu@tju.edu.cn

resuspension of sediments contributed to the high SPM concentrations observed near the bottom layer in summer, while the variations in high concentrations near the bottom layer in spring were primarily influenced by horizontal convection processes of SPM.

Key words: suspended particulate matter; particle size; plankton; LISST; Yellow Sea

认识原位观测的悬浮颗粒物分布规律有助于理解局地沉积动力学特性,可为海洋生态动力学研究提供支撑。海水中悬浮颗粒物浓度是重要的水质参数,浓度的高低直接影响水体透光性,间接影响海洋初级生产力,同时,悬浮颗粒物粒径大小也是颗粒物沉降速度计算时需要的重要指标^[1]。通过原位观测认识悬浮颗粒物浓度时空变化对揭示不同时期海水中有机和无机颗粒物的变化具有重要意义。

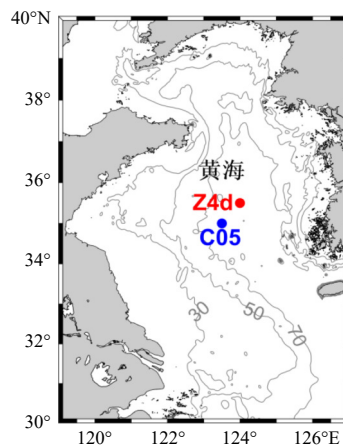
陆架海春季水体悬浮颗粒物浓度通常呈现近岸高于外海、底层高于表层的特征,浅水区沉积物再悬浮较为显著^[2-3]。在水体层化季节,密度跃层的存在可以抑制水体混合^[4],导致沉积物再悬浮作用减弱^[5];次表层会出现悬浮颗粒物浓度跃层现象^[6]。Qiao 等^[7]在渤海湾观测发现,最大悬浮颗粒物浓度分布在次表温跃层附近。当次表层浮游生物非常丰富时^[8-9],它们的分布可能会影响悬浮颗粒物的空间分布。韦钦胜等^[3]在黄海的调查发现,表层悬浮颗粒物高浓度呈斑块分布,中层出现最大悬浮颗粒物浓度,并初步解释这与浮游生物活动有关,但未阐明是来自哪些浮游生物颗粒分布的贡献。李文建等^[10]研究表明,密度跃层附近的粗颗粒主要来自浮游生物或有机分泌物与细无机颗粒混合形成的聚合体。此外,杨作升等^[11]基于东中国海陆架观测数据发现,不同水团对悬浮颗粒物浓度分布存在影响。

黄海是位于太平洋西侧的半封闭浅海,平均水深为 44 m,具有高浊度和高初级生产力的特点^[2,12]。从冬季开始黄海大部分海域会受到黄海暖流的影响,春季黄海暖流减弱,水体无明显分层现象,到了夏季,海表层增温迅速,导致次表层形成强温跃层,在跃层下方出现了黄海冷水团现象^[13-15]。在水文环境复杂以及高浊度与高初级生产力的海域,前人关于悬浮颗粒物浓度、粒径垂向分布以及受不同粒径浮游生物颗粒影响的细致刻画略显不足。基于上述的研究背景和动

机,本研究以黄海中部两次原位观测为例,揭示不同季节悬浮颗粒物浓度和粒径的垂向分布规律,探究浮游生物分布和水动力状况对悬浮颗粒物变化的影响。

1 材料与方法

在黄海中部海域开展了两次锚碇观测,站点分别为 Z4d(35.5°N, 124.0°E)和 C05(35.0°N, 123.5°E),相应的平均水深分别为 81 m 和 75 m(图 1)。Z4d 站的观测时间为 2009 年 4 月 9 日 04 时至 14 日 09 时(春季),C05 站的观测时间为 2013 年 7 月 17 日 05 时至 18 日 04 时(夏季)。



注:灰色线表示等深线

Note: Gray lines denote isobaths

图 1 黄海中部春季和夏季锚碇观测站 Z4d 和 C05 的位置
Fig. 1 Location of spring and summer mooring stations Z4d and C05 in the central Yellow Sea

利用 RBR620 CTD 仪测量水体温度、盐度、压力和叶绿素 *a* 浓度剖面,仪器采样频率为 6 Hz。由 LISST-100 仪获取水体不同粒径的悬浮颗粒物体积浓度剖面,仪器采样频率为 1 Hz。LISST-100 仪基于不同粒径悬浮颗粒物对激光束的散射角度不同,测定了 32 级不同激光散射角度,并运用 Mie 散射理论,从数学上反推散射数据,获得测量粒径范围内 32 个粒级的体积浓度分布^[16]。春季观测使用 LISST-100 B 型仪,测量

粒径范围为 1.25 ~ 250.00 μm, 夏季观测使用 LISST-100 C 型仪, 测量粒径范围为 2.50 ~ 500.00 μm。观测期间, 通过绞车匀速同步下放两套设备开展观测。

对 LISST-100 和 RBR620 CTD 仪采集的数据进行质量控制, 仅取下行阶段的剖面数据用于处理分析。每个剖面数据中, 出现逆压力、尖峰和粗误差等情况的数据会被剔除。最终, 以 1 m 间隔进行平均后获得悬浮颗粒物浓度、粒径以及温度、盐度、压力和叶绿素 *a* 浓度的剖面数据。

浮力频率平方 (N^2) 用于表征跃层强度, 计算公式如下:

$$N^2 = -(g/\rho)(d\rho/dz) \tag{1}$$

式中: g 为重力加速度; z 为向下测量的深度; ρ 为位势密度, 由观测的温度、盐度和压力计算^[17]。

参照 Luo 等^[18] 描述的方法, 在总水深小于 200 m 的区域, 跃层的垂直密度梯度一般大于 0.1 kg/m⁴, 这相当于 N^2 大于 1×10⁻³ /s², 将其取对数 [$\log_{10}(N^2)$] 后, 大于 -3 /s² 表明跃层存在。由

Oregon State University Tidal Prediction(<http://volkov.oce.orst.edu/tides>) 获取东中国海空间分辨率为 1/30° 的潮汐潮流调和常数资料, 计算得出研究地点每个观测时刻的潮位和正压潮流流速大小与流向。参考前人研究^[19-20], 浮游生物颗粒按粒级大小可以分为 5 类, 具体列于表 1。

表 1 不同粒级的浮游生物	
Tab.1 Plankton of different grain sizes	
粒级/μm	名称
0.2 ~ 2	微微型浮游生物
2 ~ 20	微型浮游生物
20 ~ 200	小型浮游生物
200 ~ 2000	中型浮游生物
>2000	大型浮游生物

2 结果与讨论

2.1 水文特征

春季水体温度、盐度和 N^2 的深度-时间变化如图 2 所示。10 m 以浅的温度随观测时间的推

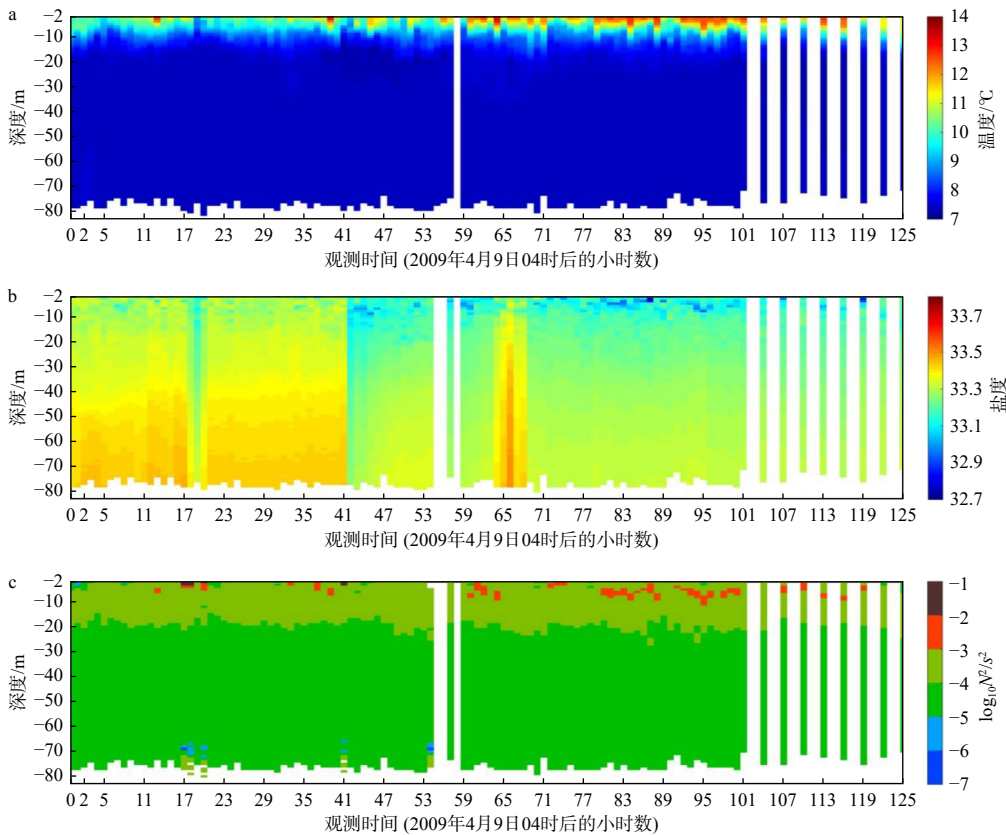


图 2 春季水体温度、盐度和浮力频率平方 N^2 的深度-时间变化

Fig. 2 Depth-time variations of temperature, salinity, and buoyancy frequency squared N^2 during spring observations

移呈现逐渐升高的趋势,在20 m以深分布着7℃~8℃的低温水(图2a)。这与冬季水体温度状况一致。观测期间盐度在整个水层的变化较小,范围为32.9~33.6(图2b)。除观测中、后期10 m以浅水体出现不连续的层化现象外,10 m以深水体仍处于垂直混合均匀状态(图2c)。

夏季水体呈现出显著的分层现象(图3)。

N^2 剖面显示在水深15~20 m和25~35 m处存在双跃层(图3c)。整个水体分为3层结构(图3a、图3b):上跃层上方存在高温低盐水,且随着时间的推移,盐度从31.0减小到30.0;下跃层下方存在低温高盐水,温度均低于10℃,这是夏季黄海最突出的水文特征;介于高温低盐水和低温高盐水之间的混合水团主要分布在跃层周围,水温为11℃~19℃,盐度为31.5~33.0。

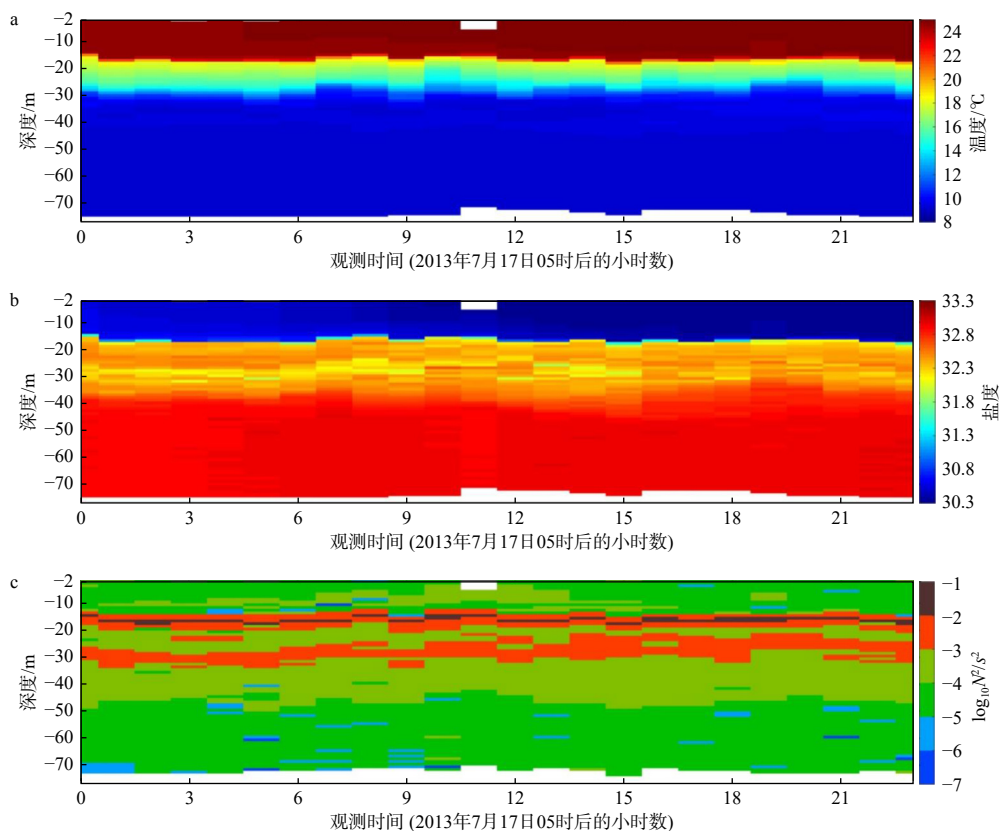


图3 夏季水体温度、盐度和 N^2 的深度-时间变化

Fig. 3 Depth-time variations of temperature, salinity, and N^2 during summer observations

2.2 叶绿素 a 浓度分布

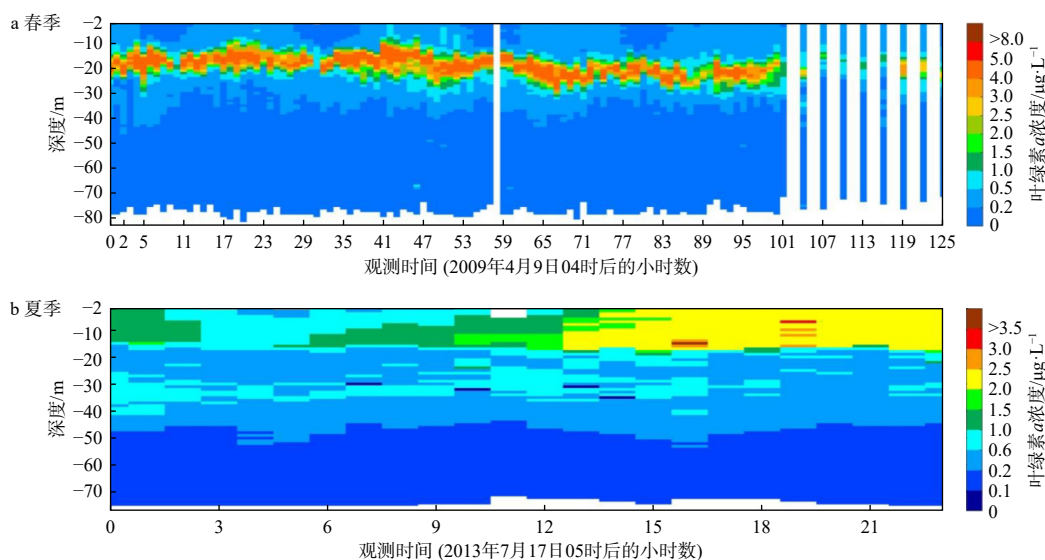
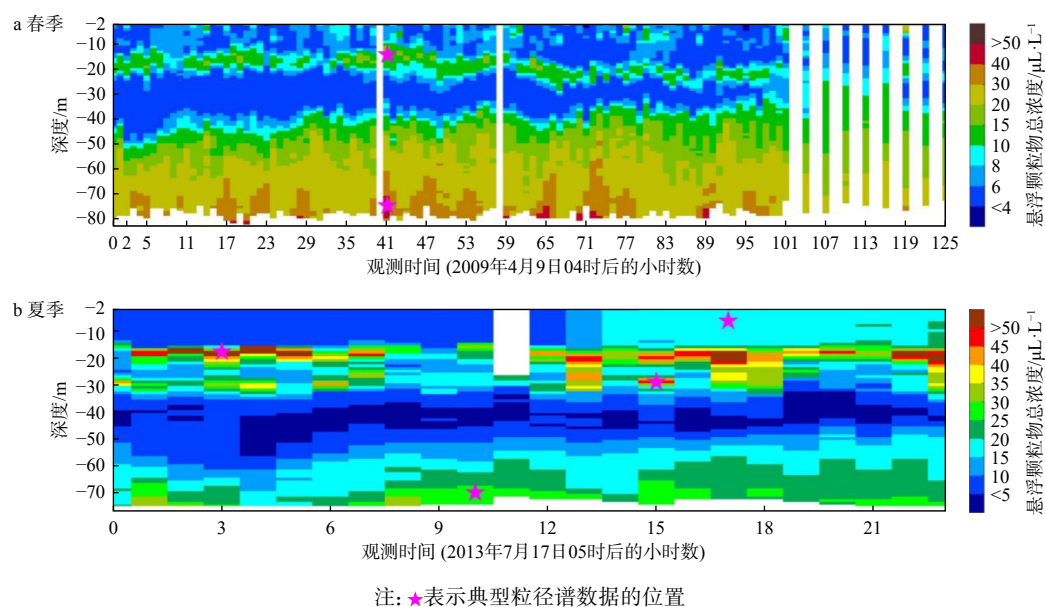
本研究将叶绿素 a 浓度变化作为指示浮游植物分布的指标。春季水体叶绿素 a 浓度的深度-时间变化如图4a所示。10~25 m次表层出现叶绿素 a 浓度最大值,为2.0~5.0 $\mu\text{g/L}$,此时正在发生浮游植物藻华现象^[9],藻华持续时间大约4 d,其间次表层形成了高生物量的浮游植物群落。在藻华期间,其他水层的叶绿素 a 浓度(<0.5 $\mu\text{g/L}$)均较低,次表层的叶绿素 a 浓度为其他水层的3~10倍。

夏季水体叶绿素 a 浓度最大值出现在上跃

层上方,浓度范围为0.6~3.5 $\mu\text{g/L}$,并且随着观测时间的推移,叶绿素 a 浓度不断升高,在夜间时段(20:00—04:00)叶绿素 a 浓度维持在大于2.0 $\mu\text{g/L}$ 的水平(图4b)。这里出现的叶绿素 a 浓度高值对应盐度低值(图3b)。30 m水层附近叶绿素 a 浓度为0.6~1.0 $\mu\text{g/L}$,50 m以深的近底层叶绿素 a 浓度出现最低值,小于0.2 $\mu\text{g/L}$ 。

2.3 悬浮颗粒物变化

图5a给出了春季水体悬浮颗粒物总浓度的深度-时间变化,其中总浓度是指仪器测量粒径范围内的浓度之和。由图5a可以看出,悬浮颗

图4 春、夏季水体叶绿素 *a* 浓度的深度-时间变化Fig. 4 Depth-time variations of chlorophyll *a* concentrations during spring and summer observations

注: ★表示典型粒径谱数据的位置

Note: ★denote the locations of typical particle size distribution data

图5 春、夏季水体悬浮颗粒物总浓度的深度-时间变化

Fig. 5 Depth-time variations of total suspended particulate material concentration during spring and summer observations

颗粒物总浓度出现两个主要高值区: 10 ~ 25 m 层为连续的高浓度分布 (10 ~ 20 $\mu\text{L/L}$), 且观测后期高浓度减小至 6 ~ 8 $\mu\text{L/L}$; 60 ~ 80 m 层为颗粒物浓度最高值区, 浓度范围为 20 ~ 50 $\mu\text{L/L}$, 分布于近底层, 且高浓度能够延伸至距海底 40 m 处。

夏季水体悬浮颗粒物总浓度的深度-时间变化如图 5b 所示。15 ~ 60 $\mu\text{L/L}$ 的高浓度区分别位于 15 ~ 20 m、25 ~ 35 m 和 60 ~ 75 m 层, 相对

低浓度 (3 ~ 10 $\mu\text{L/L}$) 区分别在 2 ~ 10 m 和 40 ~ 50 m 层, 但是在 2 ~ 10 m 层的夜间时段 (20:00—04:00) 出现了 15 ~ 20 $\mu\text{L/L}$ 的相对高浓度。最大悬浮颗粒物浓度出现在 15 ~ 20 m 层, 为 30 ~ 60 $\mu\text{L/L}$, 并且一直维持着高浓度状态。60 ~ 75 m 近底层悬浮颗粒物高浓度范围随时间呈现涨-落变化, 具有潮周期信号特征, 浓度基本维持在 15 ~ 30 $\mu\text{L/L}$ 。

总的来说,春、夏季悬浮颗粒物浓度垂向分布均呈现分层现象,高浓度中心位于不同水层,两个季节的高浓度分布范围有所不同,形成悬浮颗粒物高浓度的原因将在下文进一步讨论。

为了进一步揭示高浓度区的悬浮颗粒物粒径分布情况,图6给出了春、夏季不同水层高浓度区典型的悬浮颗粒物粒径谱分布,该图数据的来源位置如图5粉红色五角星所示。春季,10~25 m次表层从观测开始直至第100 h,颗粒物以10~20 μm (峰值12 μm)的粒径为主(图6a),到了观测后期,该粒径颗粒物逐渐减少;60 m以深的近底层出现较高的颗粒物浓度,占比较大的粒径范围为26~38 μm (峰值32 μm),粒径谱峰型较宽(图6b)。夏季,2~10 m层颗粒物呈现日间少、夜间多的变化,在夜间时段增多的颗粒物呈现双峰型,主要粒径范围分别为2~4 μm (峰值3 μm)和12~20 μm (峰值16 μm)(图6c);15~20 m和25~35 m的次表层呈现相同的粒径谱,粒径大于250 μm 的颗粒物形成了较高的浓度(图6d、图6e);整个中、上层水体中最显著的现象是粒径大于250 μm 的颗粒物持续存在,颗粒物浓度较高;60 m以深的近底层颗粒物粒径谱和峰值粒径(图6f)均与春季的分布情况相似,但颗粒物浓度比春季的略低。

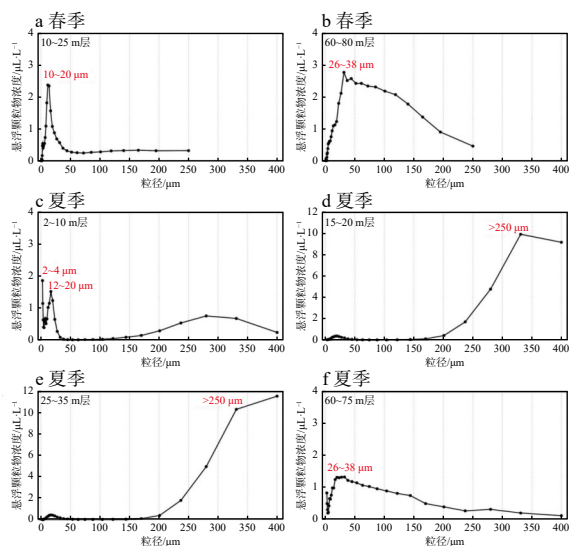


图6 春、夏季不同水层高浓度区典型的悬浮颗粒物粒径谱分布

Fig. 6 Typical particle size distribution in the different water layers during spring and summer observations

2.4 讨论

海水中悬浮颗粒物通常由有机颗粒和无机颗粒组成。有机颗粒主要包括浮游生物及其尸体等,而无机颗粒主要包括泥、黏土、粉砂等^[21]。已有研究表明,黄海中部海域春、夏季通常会出现浮游生物(如硅藻类、桡足类)旺发^[8-9,22],促使水体中有机颗粒物增加。黄海中部底质沉积物类型为细颗粒泥质^[23],沉积物再悬浮后会导致水体中无机颗粒物增加。因此,悬浮颗粒物变化会受到环境因子的显著影响。

春季上层水体出现了悬浮颗粒物浓度高值,这主要受浮游生物颗粒的影响。10 m以深水体垂直混合均匀(图2c),10~25 m次表层出现悬浮颗粒物浓度高值(图5a),粒径分布显示微型浮游生物颗粒粒径占优(图6a、表1),并且叶绿素 *a* 浓度分布显示该期间发生了浮游植物藻华(图4a)。本研究将占优粒径(10~20 μm)的颗粒物浓度与相对应的叶绿素 *a* 浓度高值建立关系,结果显示两者的变化趋势完全一致,并且具有较高的线性正相关关系,相关系数达到0.93(图7)。上述分析表明,春季次表层悬浮颗粒物高浓度主要是受到微型浮游植物发生藻华形成高生物量的影响。田伟^[24]在相同站位的网采浮游植物数据分析中也指出,优势种为异孢藻(*Hetercapsa* sp.)、微小原甲藻(*Proocentrum minimum*)等微型浮游植物。

夏季水体分层显著,上跃层上方夜间时段出现悬浮颗粒物浓度高值(图5b),与叶绿素 *a* 浓度变化具有一致性(图4b),粒径组分属于微型浮游生物粒级(图6c、表1),该粒径(2~20 μm)和粒径大于20 μm 的颗粒物浓度与叶绿素 *a* 浓度的散点关系显示,夜间时段,随着叶绿素 *a* 浓度的增加,粒径为2~20 μm 的颗粒物浓度增加,而粒径大于20 μm 的颗粒物浓度并未增加(图8a、图8b),这说明悬浮颗粒物浓度高值是由微型浮游植物聚集形成的。盐度变化(图3b)显示,此处较高的浮游植物生物量应该是由相对低盐水带来的。次表双跃层附近一直存在较高的悬浮颗粒物浓度(图3c、图5b),粒径大于250 μm (图6d、图6e),且属于中型浮游生物粒级范围(表1),双跃层附近大颗粒物显著占优并对高浓

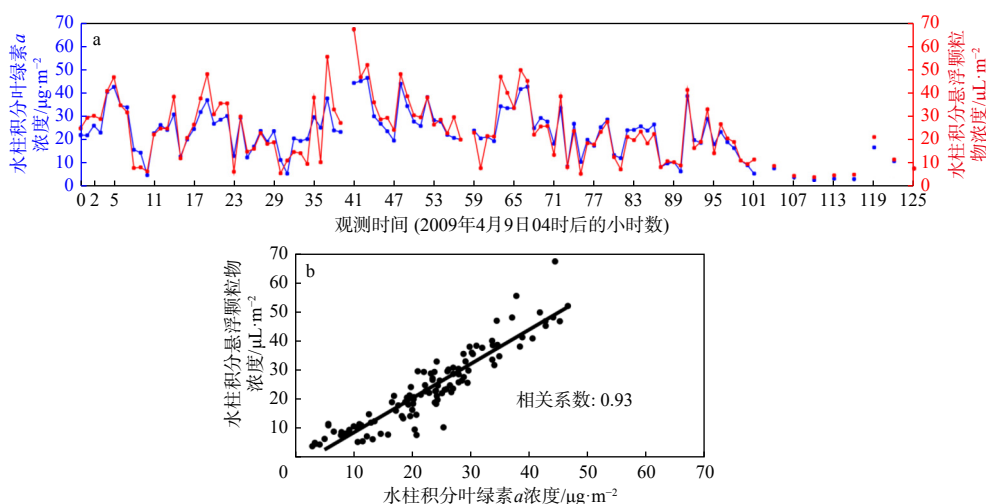


图7 春季10~25 m层水柱积分的叶绿素 a 浓度与粒径10~20 μm 悬浮颗粒物浓度的时间序列和散点图

Fig. 7 Time series and scatter plots of the vertically integrated concentration of 10-20 μm sized particles and the corresponding chlorophyll a concentration at 10-25 m depth during spring observations

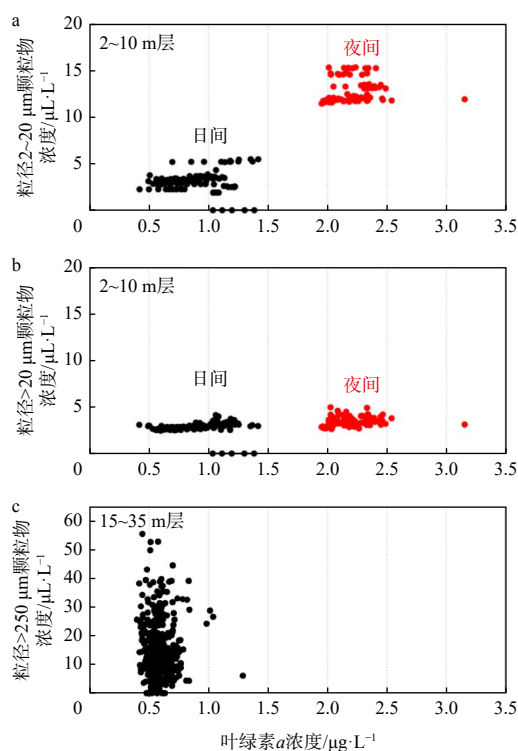
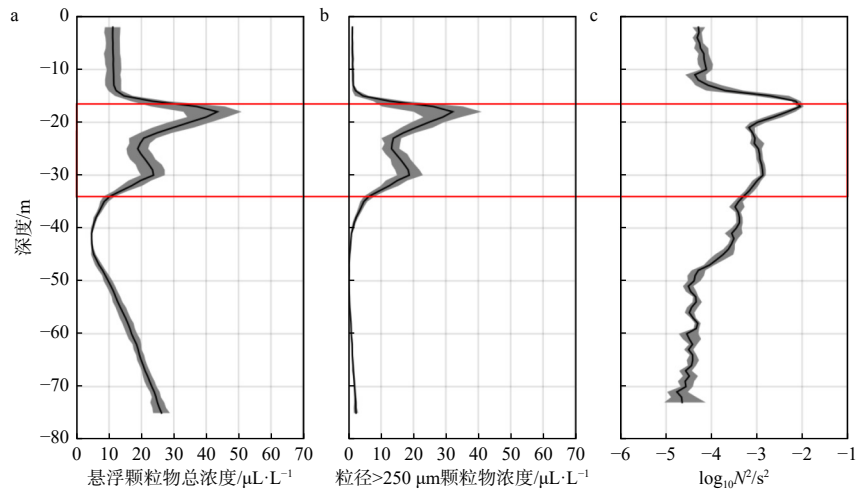


图8 夏季2~10 m层粒径2~20 μm 和粒径>20 μm 的颗粒物浓度及15~35 m层粒径>250 μm 颗粒物浓度与相应的叶绿素 a 浓度的散点图

Fig. 8 Scatter plots of the concentrations of particulate matter with sizes of 2-20 μm and >20 μm at 2-10 m depth, and that sized >250 μm at 15-35 m depth versus the corresponding chlorophyll a concentrations during summer observations

度变化起主导作用,贡献了82%的高浓度(图9,红色虚线框)。此外,粒径大于250 μm 的颗粒物浓度与叶绿素 a 浓度无相关性(图8c),说明不是浮游植物颗粒。综上所述,此处高浓度悬浮颗粒物是由浮游动物聚集而形成。此时大粒径且高密度的无机颗粒物很难停留在一定的水层,这些颗粒物在重力作用下均会发生快速沉降^[25]。只有当颗粒物是由一些带有鞭毛的浮游生物组成时,它们才能够停留在一定的水层^[26-27]。因此这些大颗粒物应该是中型浮游动物,例如,桡足类浮游动物就具有该特征。Li等^[22]在相同站位的网采浮游动物资料分析中也指出优势种为拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)、小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)和双刺纺锤水蚤(*Acartia bifilosa*)等桡足类浮游动物,并且它们常活动在次表层相对低温水环境^[28]。

春、夏季近底层水体呈现悬浮颗粒物高浓度(图5),峰值粒径为32 μm ,粒径谱峰型较宽(图6b、图6f),反映出颗粒物物源丰富,叶绿素 a 浓度较低(图4a),说明浮游植物颗粒相对较少。前人研究显示,该研究区域还存在碎屑矿物、自生矿物和生物碎屑等颗粒类型^[25]。近底层悬浮颗粒物高浓度的形成通常和颗粒物局地再悬浮与水平对流输运过程有关,这些过程的发生与水动力状况紧密相连^[29]。本研究得到的流速、流向和近底层平均的悬浮颗粒物浓度结果(图10)



注: 黑色曲线和灰色阴影分别表示平均值和标准差, 红色框表示双跃层的位置

Note: Black curves denote average values, and gray shadows denote standard deviations. Red dotted box denotes the location of double stratification

图9 夏季悬浮颗粒物总浓度、粒径 $>250\ \mu\text{m}$ 颗粒物浓度和 N^2 的垂直剖面

Fig. 9 Vertical profiles of total suspended particulate material concentration, concentrations of particles larger than $250\ \mu\text{m}$, and N^2 during summer observations

显示: 夏季观测期间海水为南-北向流动, 高浓度与强流速的变化具有一致性(图 10e、图 10f), 说明强流动状况引起了再悬浮过程而形成高浓度; 春季观测期间也是南-北向流动, 但高浓度时段未对应强流速阶段而是对应着弱流速阶段(图 10b、图 10c), 说明此时形成的高浓度不是来自局地再悬浮过程的贡献, 落潮期间为北至南向流动, 悬

浮颗粒物浓度不断增大, 涨潮期间为南至北向流动, 悬浮颗粒物浓度减小(图 10a—图 10c), 这应该是涨-落往复潮流作用下形成颗粒物水平对流运输过程导致在特定时段呈现高浓度状况。前人在黄海西侧近岸海域的现场观测中发现过类似的现象^[29]。夏季近底层悬浮颗粒物高浓度的垂向扩散范围明显小于春季, 这应该与夏季次表

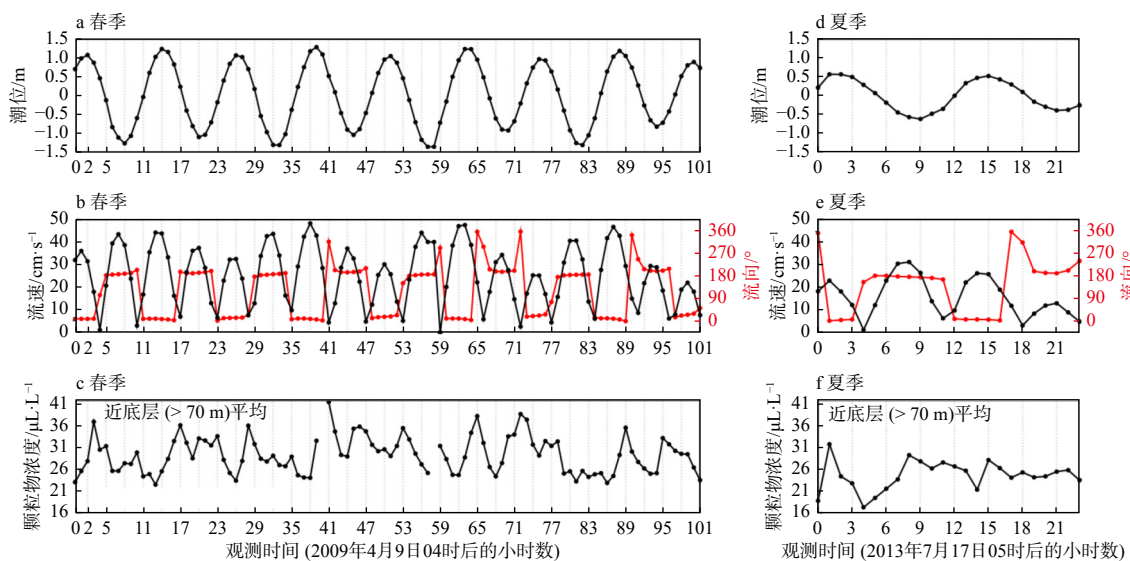


图10 春、夏季潮位、正压潮流流速大小与方向和近底层($>70\ \text{m}$) 平均的悬浮颗粒物浓度的时间序列

Fig. 10 Time series of tidal level, magnitude and direction of barotropic tidal currents, and average concentrations of suspended particulate matter in the near-bottom layer ($>70\ \text{m}$) during spring and summer observations

双跃层有关,跃层的存在对于沉积物再悬浮后的垂向扩散起抑制作用^[30]。春季10 m以深水体垂直混合均匀(图2c),有利于颗粒物的垂向扩散。此外,春季观测时间为当地农历十四至十九,处于大潮期(图10a),夏季观测时间为当地农历初十至十一,处于小潮期(图10d),大潮期的水动力相对较强,这在一定程度上应该会增强悬浮颗粒物浓度的垂向分布扩散范围。

3 结论

(1)春季10 m以深水体垂直混合均匀,中下层温度为7℃~8℃、盐度为33.2~33.6;10~25 m次表层观测到约4 d的浮游植物藻华过程,其间叶绿素 a 浓度为2.0~5.0 $\mu\text{g/L}$ 、悬浮颗粒物浓度为10~20 $\mu\text{L/L}$ 。夏季水体呈现了显著的分层结构,双跃层分别位于15~20 m和25~35 m水深,上跃层上方叶绿素 a 浓度最大,为0.6~3.5 $\mu\text{g/L}$,近底层叶绿素 a 浓度最小,小于0.2 $\mu\text{g/L}$ 。

(2)春季次表层出现的高悬浮颗粒物浓度是由粒径为10~20 μm 的微型浮游植物发生藻华造成的。夏季上跃层上方夜间出现的微型浮游植物高生物量造成了悬浮颗粒物浓度的高值;粒径大于250 μm 的中型浮游动物一直处在双跃层附近,导致了该处高悬浮颗粒物浓度。春、夏季近底层以粒径为26~38 μm 的颗粒物占优,夏季近底层受沉积物局地再悬浮过程影响而形成高悬浮颗粒物浓度,春季近底层高浓度的形成主要是颗粒物水平对流输运过程的贡献。次表跃层的存在或消失对近底层高悬浮颗粒物浓度的垂向扩散起到影响作用。本研究剖析了不同季节黄海中部海域悬浮颗粒物浓度、粒径变化规律,可为今后悬浮颗粒物输运的模拟研究提供重要参考。

参考文献:

- [1] Soulsby R L, Manning A J, Spearman J, et al. Settling velocity and mass settling flux of flocculated estuarine sediments[J]. *Marine Geology*, 2013, 339: 1-12.
- [2] Bian C W, Jiang W S, Quan Q, et al. Distributions of suspended sediment concentration in the Yellow Sea and the East China Sea based on field surveys during the four seasons of 2011[J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 121/122: 24-35.
- [3] 韦钦胜,王辉武,葛人峰,等.南黄海悬浮体的垂直分布特性及其指示意义[J].*地球科学进展*, 2013, 28(3): 374-390.
- [4] Liu Z Y, Wei H, Lozovatsky I D, et al. Late summer stratification, internal waves, and turbulence in the Yellow Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 77(4): 459-472.
- [5] 原野,江文胜,高会旺,等.莱州湾口弱层结水体中沉积物再悬浮特征及其水平、沉降通量研究[J].*海洋与湖沼*, 2011, 42(1): 1-8.
- [6] 秦蕴珊,李凡,郑铁民,等.南黄海冬季海水中悬浮体的研究[J].*海洋科学*, 1986, 10(6): 1-7.
- [7] Qiao L L, Wang Y Z, Li G X, et al. Distribution of suspended particulate matter in the northern Bohai Bay in summer and its relation with thermocline[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 212-219.
- [8] Sun J, Feng Y Y, Wang D, et al. Bottom-up control of phytoplankton growth in spring blooms in central Yellow Sea, China[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 97: 61-71.
- [9] Sun J, Feng Y Y, Zhou F, et al. Top-down control of spring surface phytoplankton blooms by microzooplankton in the central Yellow Sea, China[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 97: 51-60.
- [10] 李文建,王珍岩,黄海军.夏季南黄海悬浮体粒度分布及其影响因素[J].*海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(6): 49-60.
- [11] 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影响因素[J].*青岛海洋大学学报*, 1991, 21(3): 55-69.
- [12] Hyun M J, Choi D H, Lee H, et al. Phytoplankton spring succession pattern in the Yellow Sea surveyed at Socheongcho Ocean Research Station[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1280612.
- [13] Zhang S W, Wang Q Y, Lü Y, et al. Observation of the seasonal evolution of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1996-1998[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(3): 442-457.
- [14] Xu L L, Wu D X, Lin X P, et al. The study of the Yellow Sea warm current and its seasonal variability[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, 21(2): 159-165.
- [15] Yu F, Ren Q, Diao X Y, et al. The sandwich structure of the southern Yellow Sea cold water mass and Yellow Sea warm current[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 8: 767850.
- [16] 程江,何青,王元叶.利用LISST观测絮凝体粒径、有效密度和沉速的垂线分布[J].*泥沙研究*, 2005(1): 33-39.
- [17] Jackett D R, McDougall T J. Minimal adjustment of hydrographic profiles to achieve static stability[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12(2): 381-389.
- [18] Luo X F, Wei H, Fan R F, et al. On influencing factors of hy-

- poxia in waters adjacent to the Changjiang estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2018, 152: 1-13.
- [19] Sieburth J M, Smetacek V, Lenz J. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions[J]. *Limnology and Oceanography*, 1978, 23(6): 1256-1263.
- [20] 张武昌, 赵苑, 董逸, 等. 上层海洋浮游生物地理分布[J]. *海洋与湖沼*, 2021, 52(2): 332-345.
- [21] Turner A, Millward G E. Suspended particles: their role in estuarine biogeochemical cycles[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55(6): 857-883.
- [22] Li C L, Yang G, Ning J, et al. Response of copepod grazing and reproduction to different taxa of spring bloom phytoplankton in the southern Yellow Sea[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 97: 101-108.
- [23] Zhou C Y, Dong P, Li G X. Hydrodynamic processes and their impacts on the mud deposit in the southern Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2015, 360: 1-16.
- [24] 田伟. 黄海中部春季浮游植物水华群落结构及演替[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [25] 刘晶晶, 程鹏, 逢悦, 等. 南黄海中部泥质区悬浮体颗粒组成及沉降[J]. *海洋科学进展*, 2023, 41(2): 233-245.
- [26] 左涛, 王荣, 王克, 等. 夏季南黄海浮游动物的垂直分布与昼夜垂直移动[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 524-530.
- [27] 徐亚军, 赵亮, 原野. 基于声学仪器与粒径分析仪研究东海浮游动物昼夜垂直迁移过程[J]. *海洋学报*, 2016, 38(8): 123-130.
- [28] Zhang G T, Sun S, Yang B. Summer reproduction of the planktonic copepod *Calanus sinicus* in the Yellow Sea: influences of high surface temperature and cold bottom water[J]. *Journal of Plankton Research*, 2007, 29(2): 179-186.
- [29] Fan R F, Wei H, Zhao L, et al. Identify the impacts of waves and tides to coastal suspended sediment concentration based on high-frequency acoustic observations[J]. *Marine Geology*, 2019, 408: 154-164.
- [30] Scully M E, Friedrichs C T. The influence of asymmetries in overlying stratification on near-bed turbulence and sediment suspension in a partially mixed estuary[J]. *Ocean Dynamics*, 2003, 53(3): 208-219.

(本文编辑: 曲丽梅)