

基于 LISST 数据的冬季南黄海悬浮体分布

李建超^{1,2}, 乔璐璐^{1,2}, 李广雪^{1,2}, 刘勇^{1,2}, 马妍妍^{1,2}, 刘玲²

(1. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

2. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 青岛 266100)

摘要: 用现场激光粒度仪 LISST 观测悬浮体, 具有纵向分辨率更大及可以实现分粒级测量悬浮体浓度的优势。基于 2007 年 1 月南黄海高分辨率 LISST 观测数据, 结合水样抽滤、CTD 温盐等观测数据, 将 LISST 体积浓度转化为质量浓度, 分析冬季南黄海悬浮体分布规律。结果表明, 南黄海三剖面的 LISST 体积浓度数据与抽滤质量浓度相关性较好, 转化后的 LISST 数据与抽滤相比更适于分析悬浮体的分布; 受海流影响, 南黄海海底存在多个高悬浮体区域, 沿岸流控制下的悬浮体主要为细颗粒物, 黄海暖流控制下的悬浮体主要为粗颗粒物; 海洋温跃层明显促进了近底层悬浮体的富集。

关键词: 悬浮体; LISST; 黄海暖流; 温跃层; 南黄海

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2013)05-0013-13

抽滤法作为常用的测定悬浮体质量浓度的方法, 虽然方法简单、易于操作, 但费时费力、效率不高, 且测量水层数量有限。近年来, 随着观测技术的不断进步, 现场激光粒度分析仪 LISST 被广泛应用^[1-2], 其可在现场实时完成泥沙颗粒级配与浓度的测量, 具有测验效率高、垂向分辨率高、可以实现分粒级测量悬浮体浓度等优点。

魏建伟等用 LISST 在胶州湾进行了剖面实验, 获得了悬浮颗粒现场粒度分布及光衰减资料, 将其作为遥感离水反射率的替代指标^[3]。原野等将 ADCP、LISST 及 CTD 等新型仪器用于黄河口连续观测站中, 重点讨论了观测区域粒径变化对结果的影响, 表明粒径的剧烈变化会降低观测结果与悬浮物浓度之间的相关性, 粒径的增大会降低相关性^[4]。程江等利用 LISST 在长江口定点连续计算了现场絮凝体有效密度和沉速, 并分析了絮凝体体积浓度和水动力的关系^[5-6]。唐建华等在长江口浑浊带利用 LISST 定点连续测量了涨落潮变化过程中表层泥沙絮凝体, 为长江口浑浊带形成机制及长江口黏性泥沙动力沉积过程的研究提供了依据^[7]。

对南黄海悬浮体浓度的研究, 不仅可用于分析南黄海沉积物的运移和分布规律, 还可以验证南黄

海的海流及水团的演变。然而在已有的研究成果中, 多基于有限水层的悬浮体抽滤数据^[8-9], 或透光度、浊度反演数据开展研究^[10], 对悬浮体垂直分布特征的直观描述和细致刻画略显不足。本文基于南黄海高分辨率 LISST 观测数据, 结合水样抽滤、CTD 温盐等观测数据对冬季南黄海悬浮体分布规律进行研究。

1 资料与方法

1.1 调查与样品采集

本文所采用的数据主要来源于 2007 年 1 月搭载“东方红 2 号”考察船, 采集包括水文、生物、化学、遥感、大气等各类数据。本文就其中南黄海的 3 个断面, 包括控制了南黄海的南北边界的 B1、W4 断面以及从中部穿过南黄海泥质区的 W3 断面进行分析, 如图 1 所示。

观测要素包括: CTD 观测水体温度、盐度、溶解氧、浊度等数据, 垂直分辨率 1 m; 取水样进行室内抽滤测定悬浮体质量浓度, 根据水深以 10 m 为取样间隔, 并对表层和底层等标准层次取水; LISST-100 现场激光粒度仪测量悬浮体体积浓度, 除 B1 断面站位对标准层次进行观测, 取样间隔与抽滤水样相同, W3、W4 断面站位垂直分辨率 1 m。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40906025, 41030856); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2012HZ022)

作者简介: 李建超(1989—), 男, 硕士生, 主要从事沉积动力研究, E-mail: 619611618@qq.com

收稿日期: 2012-10-11; 改回日期: 2012-12-09. 张光威编辑

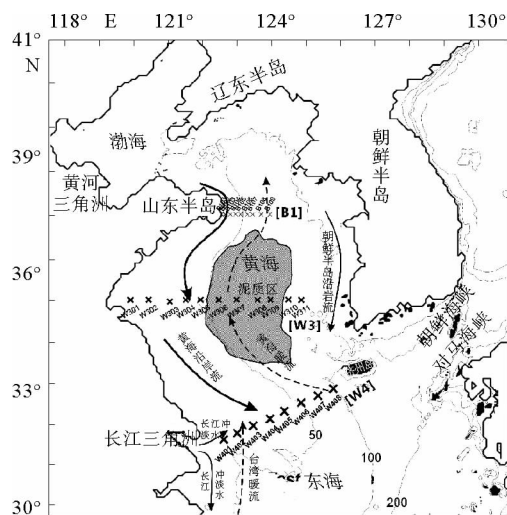


图1 南黄海调查站位示意图
(流场根据韦钦胜的文献重新编制^[11])

Fig. 1 Observation stations and currents in the southern Yellow Sea
(modified from Wei Qincheng^[11])

1.2 LISST 数据换算悬浮体质量浓度

LISST-100 基于不同粒径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而获得水中颗粒物 2.72~460.16 μm 范围内共 32 个粒级的体积浓度分布^[5]。受观测方法的限制,LISST 在测定水体中悬浮体体积分数时会将所有颗粒都计入最终结果中,而悬浮体组分包括矿物碎屑、黏土矿物、生物骨屑、海洋生物粪团、有机包膜等,此外,还有碎屑颗粒聚集而成的絮凝体^[12],而往往生物组分悬浮体和絮凝体以较小的质量占据较大的体积,因此,如含有较多矿物聚合体或生物碎屑时会有较大的 LISST 数值,在测量粒径的上界,产生“上升尾”现象^[13]。而抽滤称重测得悬浮体的质量浓度结果以高密度颗粒重量为主,生物组分影响较小。

因此,先对数据进行处理,将明显的异常值如具有较高抽滤数据但较低 LISST 数据的点剔除掉;为了使结果更直观且能利用于传统的基于质量浓度的悬浮体分析,且削弱大颗粒低密度悬浮体对 LISST 观测结果的影响,将 LISST 数据与抽滤数据对比,将体积浓度转化为质量浓度。

计算三剖面 LISST 各粒级组分累积体积浓度数据与抽滤质量浓度数据相关系数,如图 2 所示。三剖面的 LISST 与抽滤数据相关性特征相差较大,B1 剖面除了粒径最粗的两组数据相关性稍差外,其

他粒径的相关性都非常高,值都接近 1,反映出该剖面 LISST 数据与抽滤数据极好的对应关系;W3 剖面的二者相关性要低于 B1 剖面,呈现出随着粒径的增加,相关性先增高、后降低的趋势,在 32 μm 达到最大;W4 剖面的相关性要小于 W3 剖面,整体上呈现出随着粒径的增大相关性逐渐增大的趋势,在粒径为 103 μm 时达到最大,随后缓慢降低。从总体上说,数值上相关性从北向南越来越低,而且三剖面累加到某一粒径的 LISST 数值相关性相对较高的粒径也并不相同,B1 剖面为 280 μm ,W3 剖面为 64 μm ,而 W4 剖面相关性整体较低。

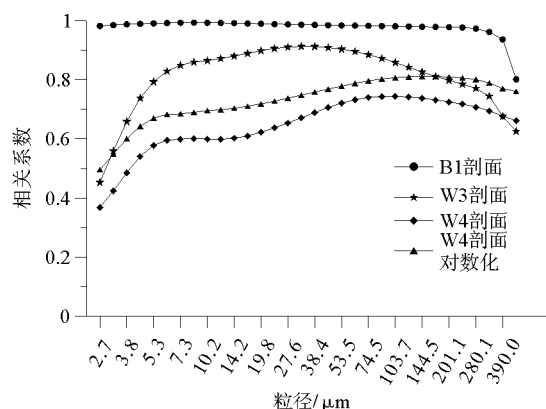


图2 南黄海三剖面各粒级累积体积浓度数据与抽滤质量浓度数据对比相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient between volume concentration and mass concentration of suspended particulate matters from three transects

由于 W4 剖面的相关性较低,结合 W4 剖面的 LISST 数据分布特征,有很多较大颗粒的悬浮体分布于其中,因此,对 W4 剖面做了进一步处理,对 W4 剖面的 LISST 数据取自然对数,削弱体积浓度高值对质量浓度的影响,随后将对数值与抽滤值进行对比,相关性明显提高,如图 2 所示。

将 B1 剖面与 W3 剖面的数据也进行与 W4 剖面相似的对数化处理,得出的 B1 剖面 LISST 体积浓度与抽滤质量浓度的相关系数 R^2 约为 0.8~0.85,最大值 0.866,而 W3 剖面的相关系数 R^2 约为 0.5~0.8,最大值 0.788,相关性均小于原始数据的线性关系,因此,对于 B1、W3 剖面依旧采用线性关系转换公式。

根据选取较高相关性,并且对于数据利用率较高的原则,对 B1、W3 剖面分别选取以下粒径作为能较好的代表矿物悬浮体的 LISST 数据:B1 剖面 280 μm ,W3 剖面 64 μm 。各剖面利用该粒径下的

LISST 累积体积浓度转化成质量浓度的公式如下:

$$B1 \text{ 剖面: } Y = \alpha X - 1.5257 \quad R^2 = 0.9735$$

其中, Y 为悬浮体质量浓度 (mg/L), X 为 LISST 观测悬浮体体积浓度 ($\mu\text{L/L}$), 为粒径小于 $280 \mu\text{m}$ 的数据的累加值, α 为比例常数 ($\text{mg}/\mu\text{L}$), 值为 0.6601 , R 为相关系数。

$$W3 \text{ 剖面: } Y = \beta X + 0.2901 \quad R^2 = 0.8957$$

其中, Y 为悬浮体质量浓度 (mg/L), X 为 LISST 观测悬浮体体积浓度 ($\mu\text{L/L}$), 为粒径小于 $64 \mu\text{m}$ 的数据的累加值, β 为比例常数 ($\text{mg}/\mu\text{L}$), 值为 0.5157 。

对于 W4 剖面, 选择对数转换公式, 利用 $280 \mu\text{m}$ 以下的 LISST 累加数据进行质量浓度的转化, 转换公式为:

$$W4 \text{ 剖面: } Y = \gamma \ln X - 6.4611 \quad R^2 = 0.8014$$

其中, Y 为悬浮体质量浓度 (mg/L), X 为 LISST 观测悬浮体体积浓度 ($\mu\text{L/L}$), 为粒径小于 $280 \mu\text{m}$ 的数据的累加值, γ 为比例常数 ($\text{mg}/\mu\text{L}$), 值为 5.2651 。

2 南黄海冬季环流

南黄海的环流体系如图 1 所示, 在南黄海的西部为受冬季风驱动的低温低盐的强沿岸流, 从渤海向东绕过成山角进入南黄海, 从山东半岛南侧南下^[14], 另外, 在苏北受到冬季风影响产生向东南方向行进的沿岸流, 共同组成南黄海沿岸流系。整体上作用于南黄海的西部, 所经过之处受其影响, 温度盐度均明显降低。该沿岸流在南黄海为最强的流系, 流速 15 cm/s 左右, 最大可达 20 cm/s 左右^[15]。而南黄海的中东部则受到黄海暖流的影响, 流速较沿岸流弱, 平均流速 $5 \sim 10 \text{ cm/s}$ ^[16-17], 它从南黄海的东南部进入, 随后向西北前进, 进入到南黄海中部 $34^\circ \sim 36^\circ \text{N}$ 海区分成两支暖水舌, 一支向西北方向扩展, 到达青岛近海; 另一支转向东北, 越过南北黄海边界后进入北黄海和渤海^[18]。南黄海的最东侧为低温低盐的沿朝鲜半岛南下的朝鲜半岛沿岸流^[19]。

本次调查 CTD 温度和盐度数据亦显示了南黄海这一环流特征, 如图 3 所示。

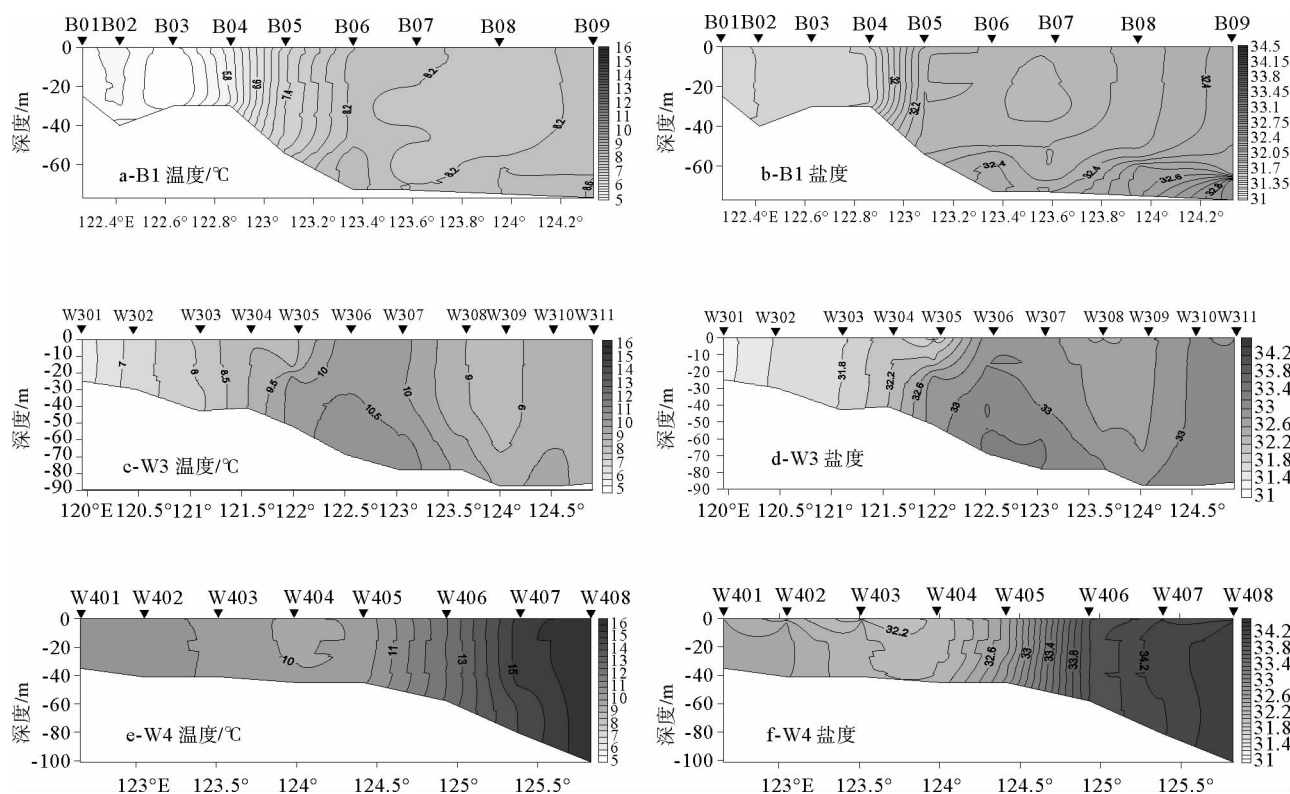


图 3 南黄海三剖面水体温盐特征剖面

Fig. 3 Contour map of temperature and salinity from three transects

在图 3a、b 中,整个 B1 观测剖面西侧受到冬季低温低盐的强沿岸流的影响,海水的温度和盐度均较低;而剖面东侧主要受到黄海暖流的影响,温盐均较高。位于南黄海中部的 W3 剖面海水的温盐分布趋势相近(图 3c、d),整体上高于 B1 剖面。剖面的西部为受沿岸流影响的低温低盐水体,并且以 W304 站为边界, W306 站和 W307 站受北上的黄海暖流控制,表现为高温高盐特征。除此之外,在大致 W310 站的海底,即黄海槽处也存在相对高温高盐的海水。W4 剖面的海水温盐近岸低、远岸高(图 3e、f),整体上高于 W3 剖面,其中 W404 站位周围的低温低盐水体,主要受到由苏北浅滩向东南行进的沿岸流的影响;而剖面东部则受高温高盐水体控制。

3 悬浮体垂直剖面分布

3.1 悬浮体质量浓度与 LISST 总体积浓度对比

按照 1.2 的换算方法,将 LISST 数据转换成质量浓度,并对其和抽滤质量浓度数据分别做剖面等值线图(图 4)。

从北到南分析,如图 4A,在 B1 剖面的等值线图中悬浮体的浓度明显西高东低,西边的 4 站悬浮体浓度较大,达到 20~30 mg/L,除了 B101 站纵向

上浓度均较大外,其他 3 站整体上呈现表层浓度低底层浓度高的趋势;剖面东边的悬浮体浓度急剧降低,浓度在 2 mg/L 左右,也具有表层低、底层高的趋势。

W3 剖面的悬浮体浓度大都低于 2 mg/L,远远小于 B1 剖面,在整个剖面都存在有表层浓度较低、底层浓度较高的趋势,并且主要分布有三大相对高值区,分别为剖面的西部、中部和东部,分别对应图 3c、d 中的沿岸流、黄海暖流和黄海槽的区域。

W4 剖面的悬浮体浓度再度增大,主要浓度范围为 10~30 mg/L。浓度的最大值分布在 W404 站位的底部,与沿岸流的路径相对应。

与抽滤数据等值线图比较,在经过了转换后的 LISST 数据在整体的分布和数值上与抽滤数据较一致。但两种观测方法所得出的悬浮体浓度还是有以下差异: B1 剖面的 LISST 数据与抽滤数据相比在东侧的海底有一较小的高值区; W3 剖面的 LISST 数据在 W307 站的底部某一深度出现抽滤数据没有体现出的突变; W4 剖面的 LISST 数据在 W404 站的表层悬浮体浓度要远低于抽滤数据,并且在 W406 和 W407 站 LISST 数据明显更高。

考虑到与抽滤数据相比, LISST 数据取样间隔密集,能够更细微地观察到海洋中悬浮体浓度在纵向上的变化,能够很好地探测到悬浮体浓度发生突

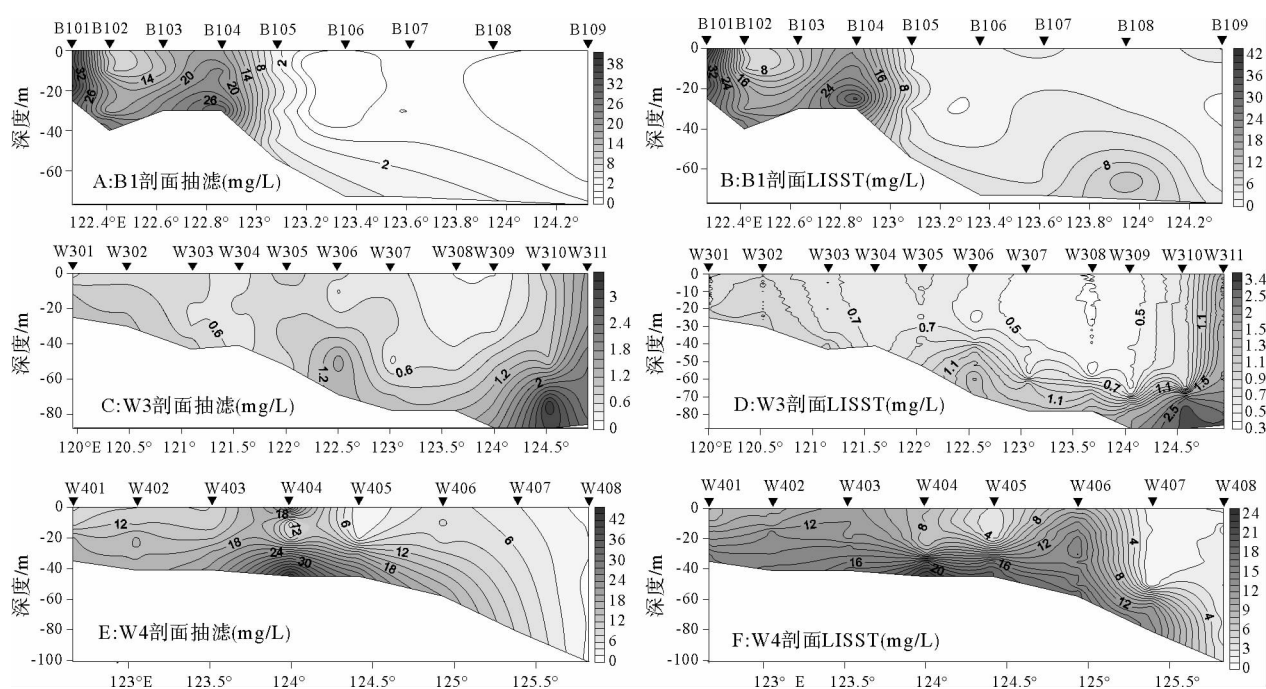


图 4 南黄海三剖面悬浮体抽滤及 LISST 质量浓度(mg/L)垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of mass concentration of suspended particulate matters measured by LISST at three transects

变的位置,并且可以实现分粒级测量悬浮体浓度,因此,除了抽滤所主要体现的高密度悬浮体外,也能够反映大颗粒低密度悬浮体如生物体的分布情况;整体上与温盐数据及海流场对应更好,因此,利用经过校正后的 LISST 数据能更好地分析悬浮体的分布及规律。

3.2 悬浮体各粒级质量浓度垂直分布

由于 LISST 数据与抽滤及浊度数据相比,最大的优势在于能够测量出各粒径区间的体积浓度,因此,可以对各粒级的悬浮体分布进行研究。将 LISST 数据按照乌氏粒级标准就近划分为黏土($\leq 3.79 \mu\text{m}$)、细粉砂($4.47 \sim 16.8 \mu\text{m}$)、中粉砂($16.8 \sim 32.57 \mu\text{m}$)、粗粉砂($32.57 \sim 63.14 \mu\text{m}$)、极细砂($63.14 \sim 122.42 \mu\text{m}$)、细砂($122.42 \sim 280.07 \mu\text{m}$)、中砂($280.07 \sim 460.16 \mu\text{m}$)。其中,由于 B1 剖面 and W4 剖面的有效数据上限都为 $280 \mu\text{m}$,因此,将细砂组的上限扩大至 $280 \mu\text{m}$ 。

为了与之前的质量浓度对应,将各粒级的体积浓度转换为质量浓度,假设各粒级的悬浮体的密度相近,则可通过以下公式进行转换:

$$Y = (X/X_0) * M_0$$

其中, Y 为换算后的某一深度处悬浮体质量浓度, X 为该站位该深度某粒级区间的体积浓度和, X_0 为该站位该深度总体积浓度, M_0 为利用之前公式得出的总悬浮体质量浓度。然而就实际情况而言,细颗粒悬浮体的密度要大于粗颗粒悬浮体,因此,转换后的细颗粒悬浮体质量浓度偏低,而粗颗粒悬浮体质量浓度偏高。

3.2.1 B1 剖面各粒级悬浮体质量浓度分布

如图 5 所示,B1 剖面东侧的悬浮体主要以粗颗粒为主,随着粒径变大,悬浮体浓度逐渐变大,说明这些大颗粒悬浮体的密度较小;在 B1 剖面左侧,浓度最大的为细粉砂粒级,粗粉砂粒级以下的悬浮体有较相似的分布趋势,在纵向上分布较为平均,而砂粒级的两组悬浮体在纵向上分布差异较大,主要分布在表层和底层,反映出粗颗粒悬浮体中含有密度较小的组分。结合海流动力特征,剖面西侧的悬浮体主要由搬运了一定距离的黄河来源的细颗粒悬浮体组成,而东侧的悬浮体主要由黄海暖流带来的大颗粒低密度的悬浮体组成。

3.2.2 W3 剖面各粒级悬浮体质量浓度分布

通过图 6 分析,W3 剖面各粒级悬浮体的分布,

尤其是在底层的高值分布较为一致,在 W307 站和 W310 站各粒级悬浮体的浓度均较高。石学法证实该气旋型涡旋中心区以 50 m 层为界,以上为辐散区,以下为辐聚区。近底层的悬浮物质随海水向涡旋中心输送,不断堆积于海底形成了泥质沉积^[20]。该剖面中部 06-09 站位跨越南黄海泥质区,絮凝体浓度较高,而生物因素是泥质区悬浮体发生絮凝的机制之一。生物产生的有机质可将矿物碎屑和生物骨屑黏结在一起形成絮凝体而迅速沉积^[19]。因此,可初步推断底层的高浓度粗颗粒悬浮体应为黏土颗粒的聚合体和大颗粒生物源悬浮体。主要的不同点在于从 W306 站到 W309 站的中上层,粗颗粒悬浮体在该区域内的浓度基本上是 0,细颗粒悬浮体在该区域内有所分布,且黏土粒级悬浮体在 W307 站表层的浓度甚至大于中层。联系该剖面的动力分布特征及 CTD 资料(图 8)显示,在 06、07 站底层温盐特征发生突然增高,黄海暖流与其上部原位水体间温盐流跃层阻碍了悬浮体向上扩散,尤其是大颗粒悬浮体。而黏土粒级悬浮体可能由于物质来源的不同而在纵向上均有分布。

3.2.3 W4 剖面各粒级悬浮体质量浓度分布

如图 7 所示,W4 剖面各粒级悬浮体分布特征有所不同,在剖面西侧 W401-W403 站位,随着粒径由细变粗,悬浮体的浓度逐渐变大;剖面的中部 W404 站底层高值区整体上随着粒径的变大浓度越来越小;W405、W406 站底层高值区整体上随着粒径的变大浓度越来越大;W408 站整体悬浮体含量很低。结合该剖面动力特征,W401、W402 两站由于长江入海的悬浮体大部分都随浙闽沿岸流向南运移,且台湾暖流阻碍了悬浮体向东的输运^[21],因此,悬浮体含量相对较低,同时仅粗颗粒悬浮体较多,该区域粗颗粒悬浮体应以低密度颗粒为主;W404 站附近主要受到从北方而来的沿岸流影响,携带了从苏北老黄河口再悬浮的大量泥沙,南黄海辐射沙洲区最大潮流速度可达 140 cm/s 以上,巨大的风浪和强大的潮流造成辐射沙洲海底的沉积物再悬浮、搬运和再沉积,并在苏北沿岸流的作用下向东南输运^[22]。海底沉积物的侵蚀是海水中悬沙的主要来源之一,并在物质输运过程中占有重要地位^[23-24]。因此,W404 站黏土粒级悬浮体含量最高,并且粗粉砂以上粒级的悬浮体含量较少,表明悬浮物可能为矿物颗粒或矿物颗粒集合体。

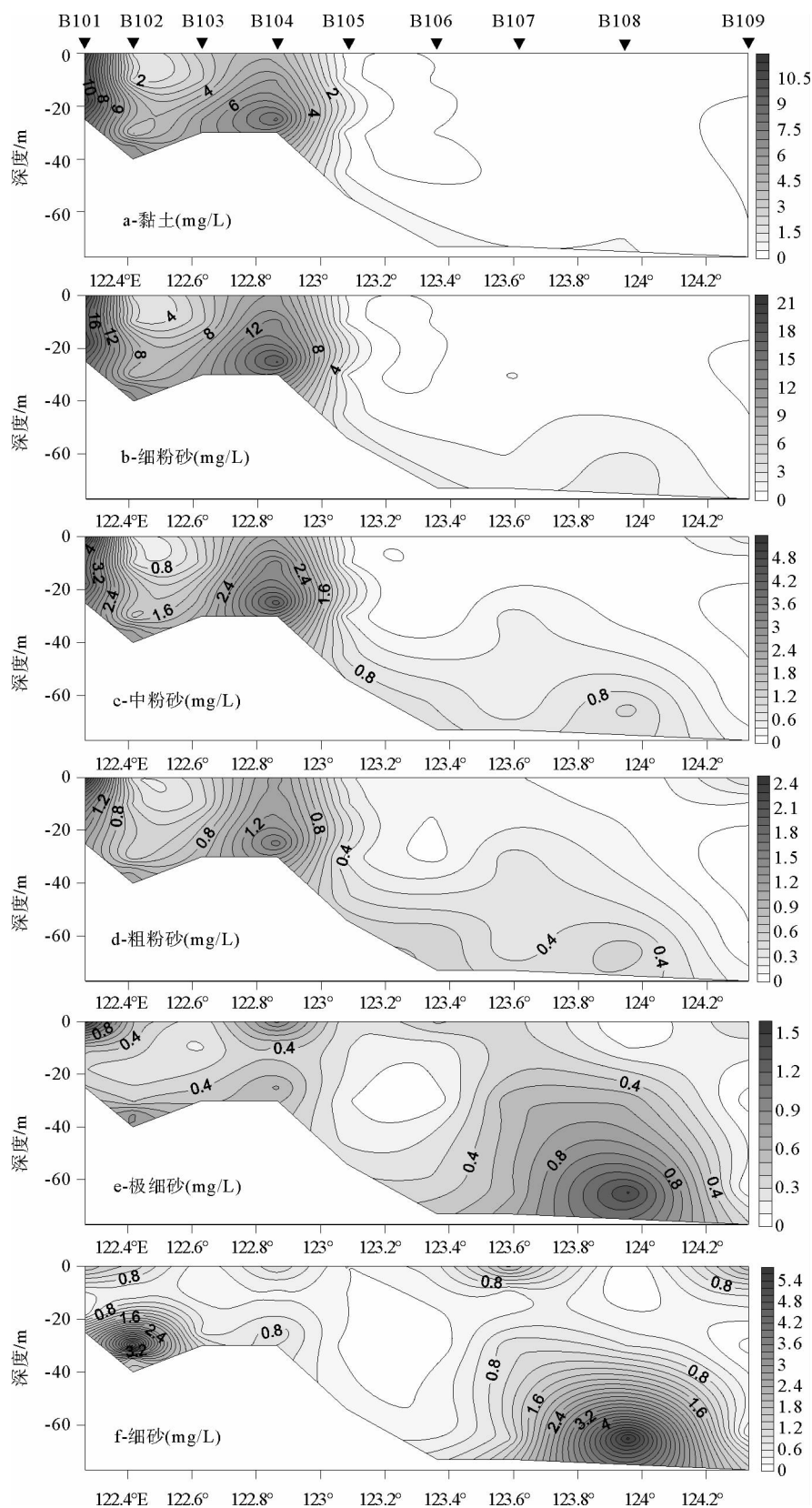


图 5 南黄海 B1 剖面悬浮体 LISST 数据质量浓度(mg/L)分级粒度分布

Fig. 5 Mass concentration of suspended particulate matters according to LISST data for each grain size along B1 transect

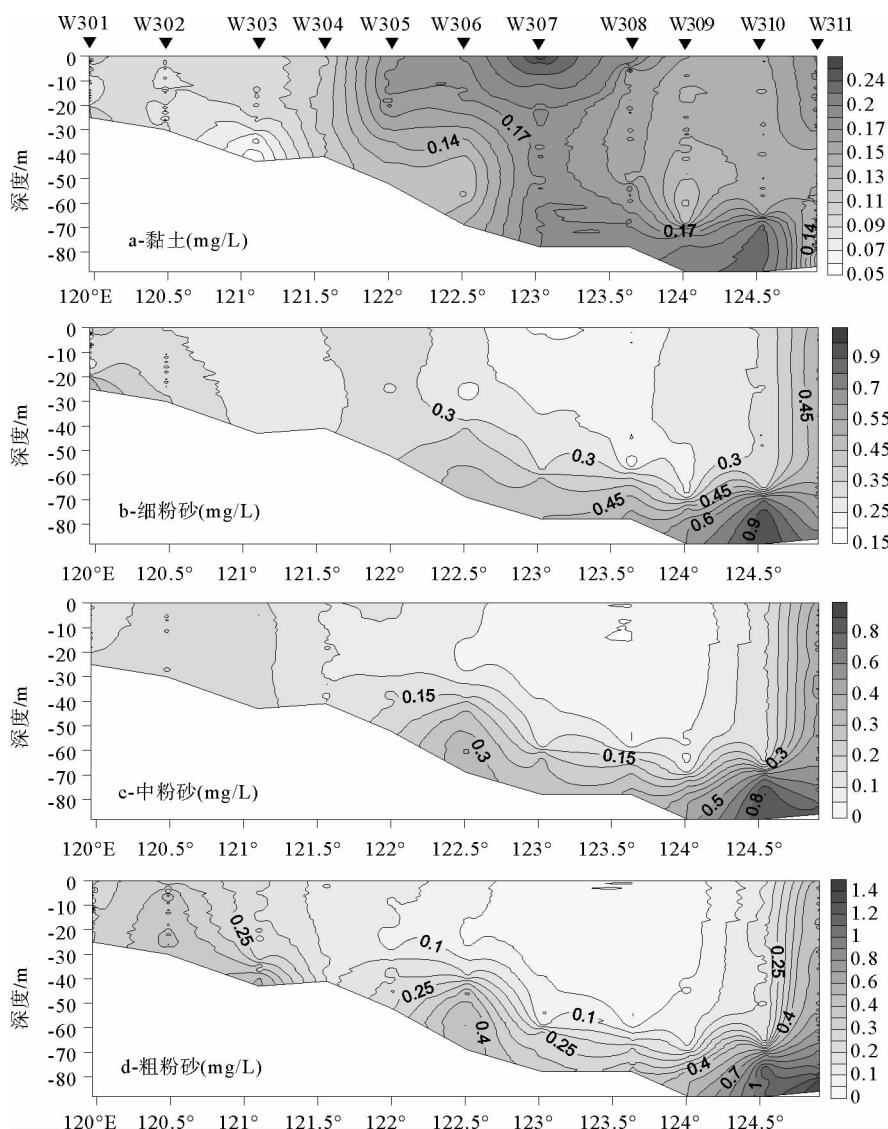


图 6 南黄海 W3 剖面悬浮体 LISST 数据质量浓度(mg/L)分级粒度分布

Fig. 6 Mass concentration of suspended particulate matters according to LISST data for each grain size along W3 transect

4 讨论

4.1 温盐跃层与悬浮体浓度跃层

悬浮体浓度与温盐纵向分布对比分析过程中,温盐跃层处对应了悬浮体浓度的跃层。我们将 CTD 的温、盐、密度、浊度数据以及 LISST 体积浓度各粒级数据做纵向分布图,由于各粒级 LISST 在温跃层变化几乎一致,因此各粒级只选择一条曲线为代表。如图 8a 所示,W307 站位于黄海暖流区,表层水体与下层高温高盐的暖流在 60 m 水深处出现温盐跃层,而悬浮体浓度在该水深处也同步出现跃层;如图 8b 所示,W404 站位于沿岸流区,表层低

温低盐的沿岸流与下层水体在 30 m 水深处形成温盐跃层,悬浮体浓度在该水深处也同步出现跃层。由于温跃层内水体层结构稳定,海水扩散系数小^[25],有效地阻止了悬浮体从底层向上运移,从而促进了悬浮体在跃层下的富集。

而如图 8c 所示,W302 站没有出现温盐跃层,悬浮体浓度垂直分布亦未有跃层存在。

4.2 黏土粒级悬浮体低值粒径

除了极个别站位数据由于黏土粒级悬浮体含量非常低无法看出趋势外,在 3 个剖面绝大部分站位的 LISST 数据都存在以下现象,即在 4~6 μm 时悬浮体体积浓度达到最小值。李秀文在长江口利用 LISST 的研究中也发现了这一趋势,他认为该粒径

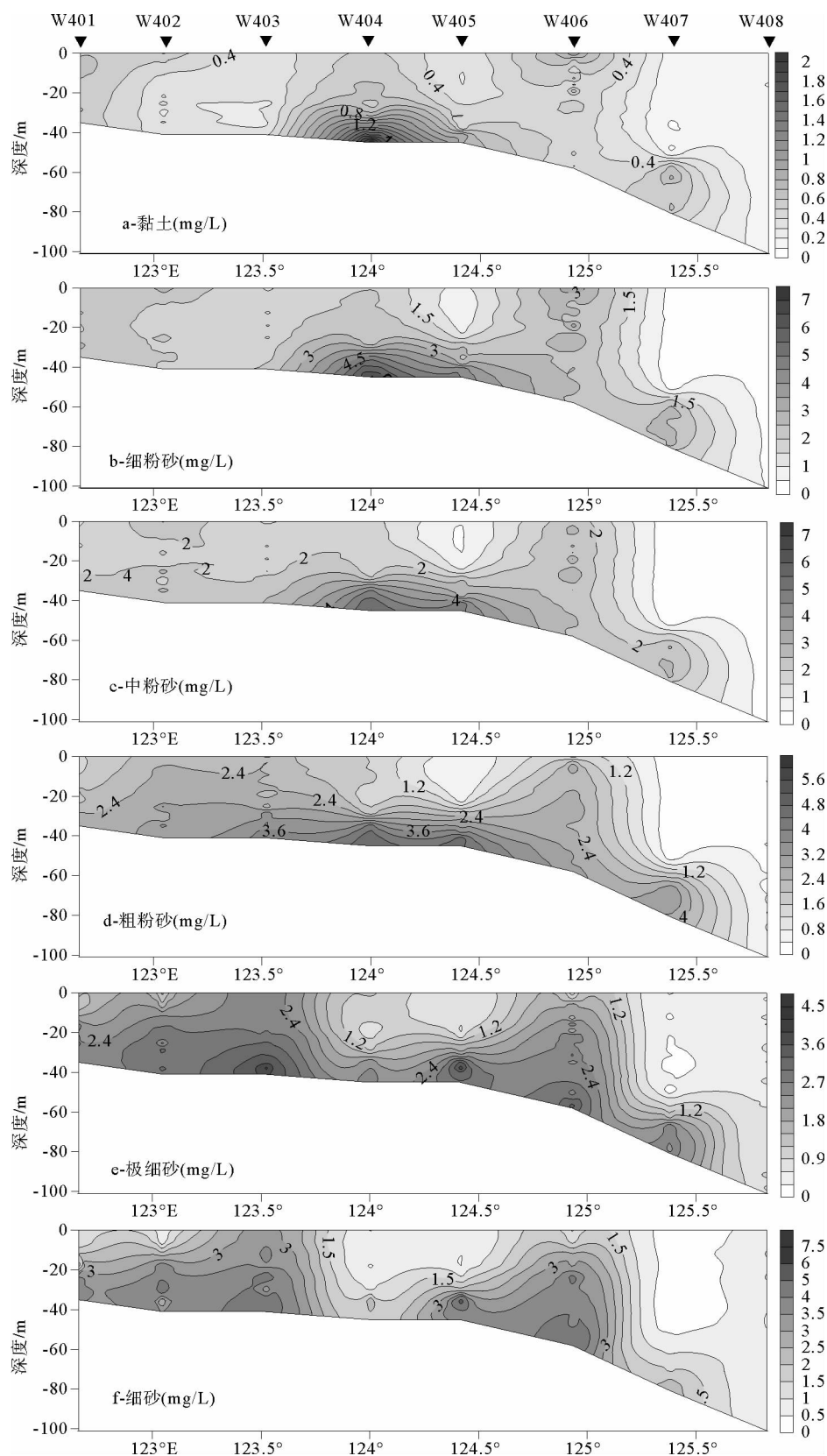


图 7 南黄海 W4 剖面悬浮体 LISST 数据质量浓度(mg/L)分级粒度分布

Fig. 7 Mass concentration of suspended particulate matters according to LISST data for each grain size along W4 transect

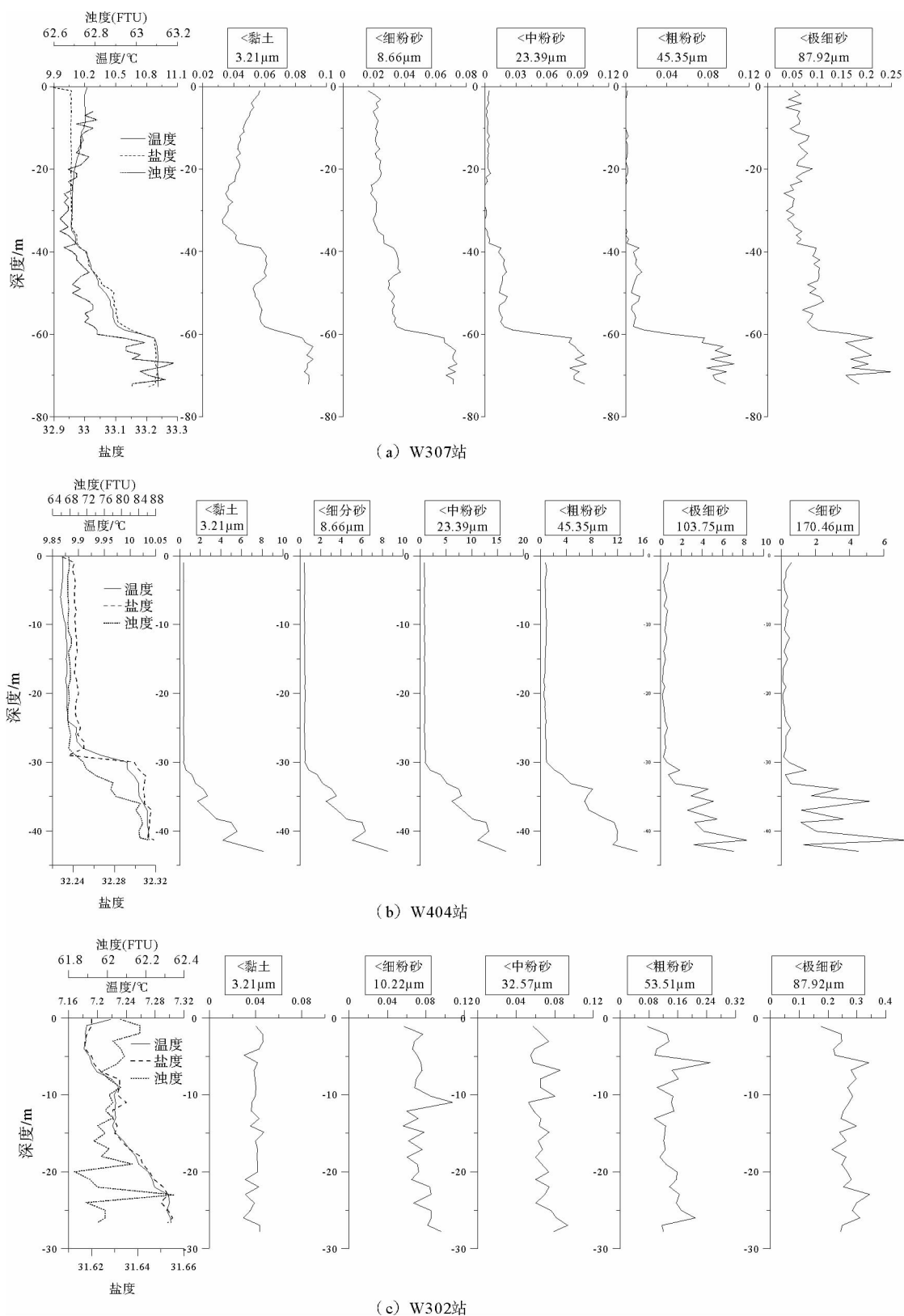


图 8 南黄海 W307(a)、W404(b)、W302(c)站温度、盐度、体积浓度垂直分布图(图中横线为跃层示意线)

Fig. 8 Vertical distribution of temperature, salinity and volume concentration at station W307, W404, W302
(the horizontal line in the graph shows the boundary of Thermocline)

是该区域的絮凝最佳粒径,由于它最容易发生絮凝而形成较大絮团,从而使得它在水体中含量最

少^[26]。由沉积有机质的碳同位素信号证实,在南黄海深水区的陆源沉积物主要来自废黄河物质和现代

黄河物质,现代长江物质所占比例相对较少^[27]。在本次调查中,整个南黄海都满足 $4\sim 6\ \mu\text{m}$ 的絮凝最佳粒径。

4.3 不同粒径悬浮体垂直分布的相关性

LISST 体积浓度数据纵向分布存在粉砂以粗粒级曲线与粉砂以细粒级曲线浓度高低值相反情况,这种现象在 W4 剖面几乎各个站位及 W3 剖面的东部底部站位存在,如图 9 所示。

可以看到在细颗粒浓度高低值交错的情况下,粗颗粒浓度曲线的高低值变化与细颗粒完全相反,这与 W4 剖面多站位存在两种悬浮体分布曲线交替出现这一现象是对应的,可能与“沉降滞后”有关,由于 W4 剖面发生的是从老黄河口而来的大量泥沙颗粒在此发生沉降的过程,粉砂以下的悬浮体和粉砂

以上的悬浮体在沉降的过程中是不同步的,具体说来,粉砂粒级以下的悬浮体主要为矿物颗粒或者矿物颗粒的小聚合体,较少是生物成因的,而粉砂以上粒级的悬浮体受流速所限不能被搬运到这么远的距离,因此,应该含有较多低密度大颗粒矿物集合体和生物成因悬浮体,这种颗粒沉降的速度较慢,导致两种悬浮体的不同步,在曲线上就反映出粉砂上下的悬浮体分布曲线是错开的,因此出现高低值相反对应的情况。亦可能由于 W3 剖面的东部和 W4 剖面温度相对较高,生物含量也相对较高,表现为大颗粒的悬浮体,而当细颗粒悬浮体浓度大时,水质较差不利于生物存在,使其生成的大颗粒悬浮体较少;反之,当细颗粒悬浮体浓度较低,水质较好,生物含量增高,形成的大颗粒悬浮体较多。具体原因有待更多观测资料的深入探讨。

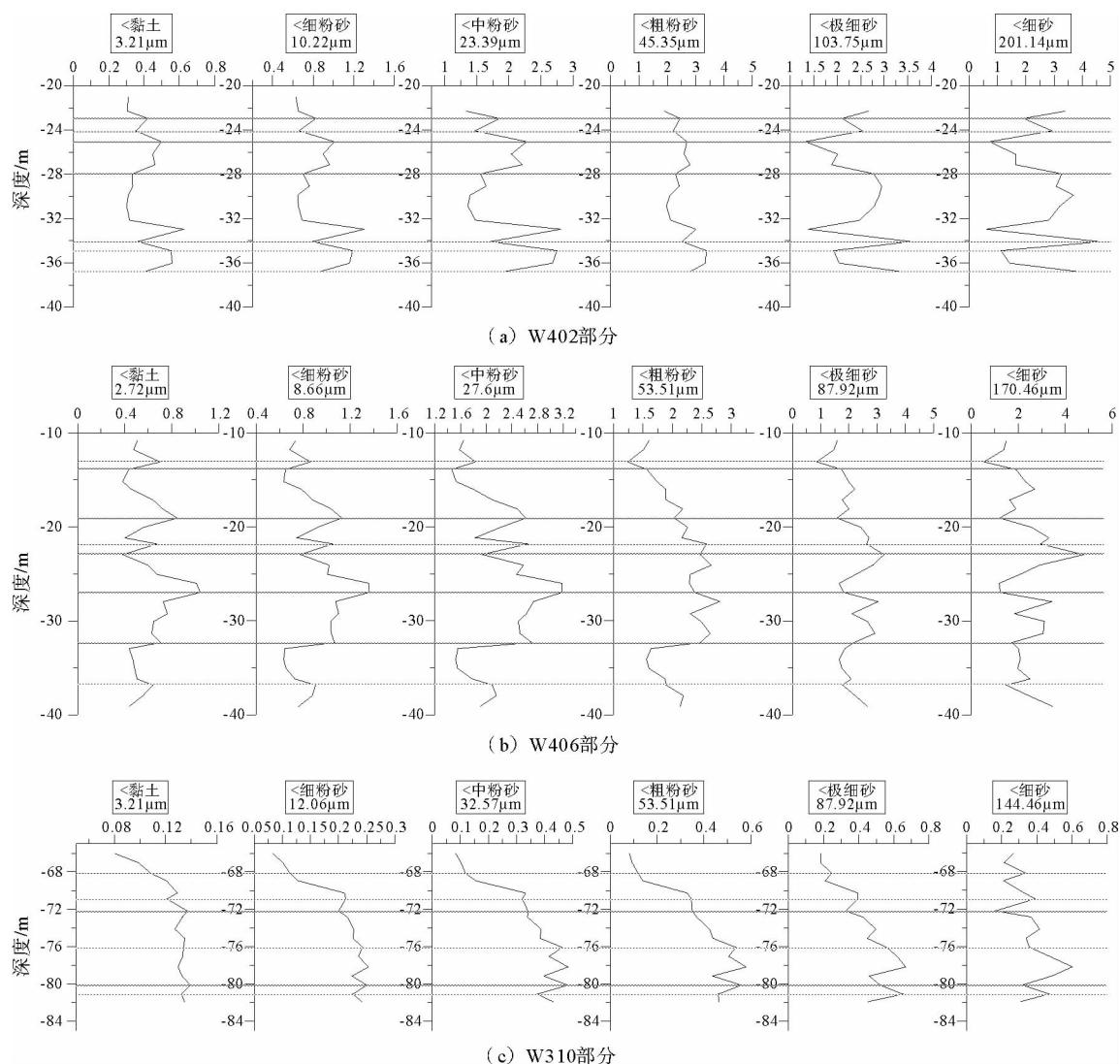


图 9 南黄海 W402(a)、W406(b)、W310(c)站体积浓度垂直分布(图中横线为相反值示意线)

Fig. 9 Vertical distribution of volume concentration at station W402, W406, W310
(the horizontal lines in the graphs show the opposite distribution of different size fractions)

4.4 南黄海悬浮体分布规律

综上所述,南黄海环流对于悬浮体的分布及搬运起到了重要的作用。近岸悬浮体高浓度区受沿岸流控制,主要由细颗粒悬浮体组成;而受黄海暖流控制的海区悬浮体浓度相对较低,但其中大颗粒悬浮体含量较多,可能与生物体有关;中部泥质区各粒级含量均较为丰富。

南海海的西部主要由南下的沿岸流控制,含有较多细颗粒悬浮体的现代黄河三角洲沉积物的沿岸流绕过成山头从 B1 剖面的西部进入南黄海,悬浮体粒径一般小于 $30\ \mu\text{m}$,且分布于 B104 站位以西的区域。当黄海沿岸流进入到 W3 剖面时,悬浮体来源减少,此外,由于环流涡旋使悬浮体在泥质区沉积,加上 W3 剖面西侧主要为残留沉积,沿岸流比较难以让底质沉积物启动,因此, W3 剖面悬浮体浓度明显变小,尤其是小于 $120\ \mu\text{m}$ 的悬浮体体积浓度降为 B1 剖面的 $1/10$ 。之后苏北老黄河口的底质沉积物被强潮流再悬浮,被沿岸流向东南运移,进入 W404 站位附近,受长江冲淡水及台湾暖流的影响,顶托作用使悬浮泥沙沉降,细颗粒悬浮体含量较高。

南海海中东部主要受到北上的黄海暖流控制,通过温盐剖面可以明显看出从南向北黄海暖流强度逐渐变弱,在纵向上的影响范围逐渐变小。黄海暖流从济州岛西侧进入南黄海,水体较为清澈,矿物颗粒较少,生物颗粒较多^[21]。除了 W3 剖面的泥质区外,黄海暖流流经的区域悬浮体粒径一般较粗,细颗粒悬浮体较少。而当黄海暖流流经南黄海泥质区的 W305-W307 站位时,受到黄海暖流与沿岸流形成涡旋沉积及上升流的影响,在该区域形成“汇”^[17],并且由于温跃层和锋面的作用,使底层悬浮体浓度明显加大,尤其黏土粒级悬浮体。

5 结论

(1)将南黄海三剖面的 LISST 进行了由体积浓度向质量浓度的转化,北黄海及南黄海中部剖面符合线性相关,南海海南部断面符合对数相关关系。

(2)南黄海悬浮体浓度具有明显的区域化分布特征,位于成山头外海、苏北老黄河口沿岸、苏北外海区及黄海槽海域的高浓度悬浮体,分别对应了黄海沿岸流和黄海暖流。南海海环流是该海域悬浮体分布和运移的主要动力和控制因素。

(3)通过对 LISST 数据按粒径分级分析,南海海近岸悬浮体浓度较高,主要由细颗粒物质组成;而

在黄海暖流流经区域,悬浮体颗粒较粗,反而浓度相对较低,可能与生物质存在有关;中部泥质区各粒径悬浮体都有较高浓度分布。

(4)南海海沿岸流及黄海暖流与周围水体形成的温盐跃层,抑制了底层悬浮体向表层输运,促进了悬浮体的沉积,形成了悬浮体富集区,与悬浮体浓度跃层对应。

参考文献 (References)

- [1] Mikkelsen Ole A, Paul S. Hill, Timothy G Milligan, et al. In situ particle size distributions and volume concentrations from a LISST-100 laser particle sizer and a digital floc camera[J]. Continental Shelf Research, 2005, 25: 1959-1978.
- [2] Agrawal Y C, Pottsmith H C. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport[J]. Marine Geology, 2000, 168: 89-114.
- [3] 魏建伟,石学法,方习生,等. 胶州湾悬浮颗粒现场剖面测量与结果分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(1): 74-82. [WEI Jianguo, SHI Xuefa, FANG Xisheng, et al. In-situ Profiling of Suspended Particulate Matters in the Jiaozhou Bay and Analysis of Observed Data [J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(1): 74-82.]
- [4] 原野,赵亮,魏皓,等. 利用 ADCP 和 LISST-100 仪观测悬浮物浓度的研究[J]. 海洋学报. 2008, 30(3): 48-55. [YUAN Ye, ZHAO Liang, WEI Hao, et al. Research on observing suspended sediment concentration using ADCP and LISST-100 instruments [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(3): 48-55.]
- [5] 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. [CHENG Jiang, HE Qing, WANG Yuanye. Using LISST-100 for in-situ estimates of floc size, density and settling velocity, Changjiang Estuary, China[J]. Journal of Sediment Research, 2005, 1: 33-39.]
- [6] 程江,何青,夏小明. 2007. 长江口徐六泾悬浮细颗粒泥沙絮凝体特性[J]. 海洋与湖泊, 2007, 38(4): 304-313. [CHENG Jiang, HE Qing, XIA Xiao-Ming. Characteristics of suspended fine sediment flocs in Changjiang (Yangtze) Estuary [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(4): 304-313.]
- [7] 唐建华,何青,王元叶,等. 长江口浑浊带絮凝体特性[J]. 泥沙研究, 2008, 2: 27-33. [TANG Jianhua, HE Qing, WANG Yuanye, et al. Study on in-situ flocs size in turbidity maximum of the Changjiang Estuary [J]. Journal of Sediment Research, 2008, 2: 27-33.]
- [8] 唐建华,梁斌,李若华. 强潮河口悬浮泥沙浓度垂向结构分析——以杭州湾乍浦水域大潮期为例[J]. 水利水运工程学报, 2009, 2: 39-43. [TANG Jianhua, LIANG Bin, LI Ruohua. Discussion on vertical structure of suspended sediment concentration of macro-tidal estuary during spring tide——taking Zhapu of Hangzhou Bay as an example [J]. Hydro-Science and Engineering, 2009, 2: 39-43.]

- [9] 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 Shenliang, ZHANG Guoan, YANG Shilun, 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.]
- [10] 翟世奎, 张怀静, 范德江等. 长江口及其邻近海域悬浮物浓度和浊度的对应关系[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 693-699. [ZHAI Shikui, ZHANG Huaijing, FAN Dejiang, et al. Corresponding relationship between suspended matter concentration and turbidity on Changjiang Estuary and adjacent sea area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(5): 693-699.]
- [11] 韦钦胜, 刘璐, 臧家业, 等. 南黄海悬浮体浓度的平面分布特征及其输运规律[J]. 海洋学报, 2012, 34(2): 73-83. [WEI Qinsheng, LIU Lu, ZANG Jiaye. The distribution and transport of suspended matter in the southern Huanghai Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(2): 73-83.]
- [12] 雷坤, 杨作升, 郭志刚. 东海陆架北部泥质区悬浮体的絮凝沉积作用[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 288-295. [LEI Kun, YANG Zuosheng, GUO Zhigang. Sedimentation with aggregation of suspended sediment in a mud area of the northern East China Sea [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2001, 32(3): 288-295.]
- [13] 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.
- [14] 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.]
- [15] 刘桂梅, 孙文心, 雷坤, 等. 黄、东海环流的数值研究Ⅲ——正压环流的数值模拟[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(1): 1-8. [LIU Guimei, SUN Wenxin, LEI Kun, et al. A numerical study of circulation in the Huanghai Sea and East China Sea III: Numerical simulation of barotropic circulation [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(1): 1-8.]
- [16] 王辉武, 于非, 吕连港, 等. 冬季黄海暖流区的空间变化和际变化特征[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(2): 140-148. [WANG Huiwu, YU Fei, LV Liangang, et al. Characteristics of spatial and interannual variation in the Yellow Sea warm current area in winter [J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(2): 140-148.]
- [17] 李广雪, 杨子赓, 刘勇. 中国东部海域海底沉积环境成因研究[M]. 北京: 科学出版社, 2005. [LI Guangxue, YANG Zigeng, LIU Yong. Research On Submarine Sedimentary Environment Of East China Sea [M]. Beijing: Science Press, 2005.]
- [18] 王辉武. 黄海暖流季节和际变化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 27-30. [WANG Huiwu. Study on Seasonal and inter-annual variations of the Yellow Sea Warm Current. Qingdao: Ocean University of China, 2008: 27-30.]
- [19] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2006. [SUN Xiangping. China's Offshore Marine Science [M]. Beijing: Science Press, 2006.]
- [20] 石学法, 申顺喜, 陈志华, 等. 南黄海现代沉积环境及动力[J]. 科学通报, 2001, 46: 1-6. [SHI Xuefa, Shen Shunxi, CHEN Zhihua, et al. modern sedimentary environment and dynamics of South Yellow Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46: 1-6.]
- [21] 郭志刚, 杨作升, 张东奇, 等. 冬、夏季东海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(9): 71-80. [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(9): 71-80.]
- [22] 宋召军, 黄海军, 杜廷芹, 等. 南黄海辐射沙洲附近海域悬浮体的研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(6): 19-25. [SONG Zhaojun, HUANG Haijun, DU Tingqin, et al. Suspended sediment near radial sand ridge area in the South Yellow Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(6): 19-25.]
- [23] Souza A, Holt J, Proctor R. Modeling SPM on the NW European Shelf Seas [C]// Coastal and Shelf Sediment Transport. Geological Society of London, Special Publications. 2007, 274: 147-158.
- [24] Holt J T, James I D. A simulation of the southern North Sea in comparison with measurements from the North Sea Project. Part 2 Suspended particulate matter [J]. Continental Shelf Research. 1999, 19: 1617-1642.
- [25] 乔璐璐, 李广雪, 邓声贵, 等. 夏季渤海湾中北部悬浮体分布[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.]
- [26] 李秀文, 朱博章. 长江口大面积水域絮凝体粒径分布规律研究[J]. 人民长江, 2010, 41(19): 60-63. [LI Xiuwen, ZHU Bozhang. Distribution laws of flocs diameter in large area waters in the Changjiang Estuary [J]. Yangtze River, 2010, 41(19): 60-63.]
- [27] 蔡德陵, 石学法, 周卫健, 等. 南黄海悬浮体和沉积物的物质来源和运移: 来自碳稳定同位素组成的证据[J]. 科学通报, 2001, 46: 16-23. [CAI Deling, SHI Xuefa, ZHOU Weijian, et al. Sources and transportation of the materials consisted of suspended matter and sediment in the southern Yellow Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (Suppl.): 16-23.]

DISTRIBUTION OF WINTER SUSPENDED PARTICULATE MATTERS IN THE SOUTH YELLOW SEA BASED ON LISST DATA

LI Jianchao^{1,2}, QIAO Lulu^{1,2}, LI Guangxue^{1,2}, LIU Yong^{1,2}, MA Yanyan^{1,2}, LIU Ling²

(1. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract: The distribution of winter suspended particulate matters (SPM) in the South Yellow Sea was studied in this paper based on the LISST data acquired in January 2007. Mass concentration of SPM was measured by membrane filtering, drying and weighting in the laboratory. Water temperature and salinity surveyed by CTD were also taken into account in this study. Volume concentration was converted to mass concentration, considering the closely correlation between the volume concentrations of SPM observed by LISST and the mass concentration collected by suction filtration. Furthermore, volume concentrations were preferred to the description of SPM distribution in the South Yellow Sea, because of its high resolution in the vertical direction. Fine particles can be suspended by coastal currents, while coarse biological particles can be transported by the Yellow Sea Warm Current. SPM can be concentrated below the thermocline. This study has provided a perspective to the detailed description of vertical distribution of SPM.

Key words: South Yellow Sea; suspended particulate matter (SPM); Yellow Sea warm current; thermocline