

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020011002

# 夏季南黄海悬浮体粒度分布及其影响因素

李文建<sup>1,2</sup>, 王珍岩<sup>1,2,3,4</sup>, 黄海军<sup>1,3,4</sup>

1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071

**摘要:**南黄海是东亚海区陆源物质向西太平洋扩散的重要通道, 阐明该海区悬浮体粒度特征及其分布规律对于深入揭示中国东部陆架海区源汇沉积体系形成机制具有重要意义。利用2012年夏季在南黄海调查获取的水文环境资料和悬浮体现场粒度(LISST)观测数据, 分析悬浮体粒度分布特征及其影响因素, 探讨其在南黄海中部泥质区成因机制中的作用。结果表明: 夏季, 南黄海悬浮颗粒中 $\leq 128 \mu\text{m}$ 的细颗粒主要是由无机矿物颗粒组成, 而 $> 128 \mu\text{m}$ 的粗颗粒则由有机颗粒主导。无机颗粒主要分布在混合作用较强的近岸浅水区以及远岸的近底层, 有机颗粒在水体层化较强海域的密度跃层处占据主导地位。再悬浮的海底表层沉积物是海水中无机颗粒的主要来源, 潮混合过程是引起再悬浮作用的主要动力因素。潮混合锋阻挡了近岸高浓度无机悬浮颗粒物沿近底层向远岸扩散, 但跨锋面的表层离岸流可以将近岸区的部分无机细颗粒物输运至南黄海中部。密度跃层阻碍了冷水团内营养盐进一步向海表扩散, 导致浮游植物在密度跃层处富集; 大量浮游生物及其分泌物与细小的无机颗粒相结合形成絮集体是海水中 $> 128 \mu\text{m}$ 粗颗粒的主要来源。絮集体的形成促进了表层无机细颗粒向海底沉降, 促进了泥质区的形成。

**关键词:** 悬浮体; 粒度分布; 泥质沉积; 黄海冷水团; 南黄海

**中图分类号:** P736.21 **文献标识码:** A

## Grain size distribution pattern and influencing factors of suspended matters in the Southern Yellow Sea during summer season

LI Wenjian<sup>1,2</sup>, WANG Zhenyan<sup>1,2,3,4</sup>, HUANG Haijun<sup>1,3,4</sup>

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071, China

**Abstract:** The Southern Yellow Sea is an important passage for transporting terrigenous materials from the East Asian continent to the western Pacific Ocean. It is of great significance to clarify the size and distribution patterns of the particles transported through the Southern Yellow Sea for further understanding the source to sink system of the region. In this paper, we analyzed the grain size distribution and its influencing factors based on the hydrological and LISST data measured in the Southern Yellow Sea during the summer season of 2012. The results show that fine particles ( $\leq 128 \mu\text{m}$ ) are mainly composed of inorganic particles, while the coarse ( $> 128 \mu\text{m}$ ) dominated by organic particles during the summer season. The inorganic particles are mainly distributed in the well-mixed coastal shallow area and the bottom layer offshore, while organic particles mainly occupy the pycnocline where the water is highly stratified. The resuspended surface sediment is the main source of inorganic particles, and the tidal mixing process is the main driving force of resuspension. The tidal mixing front prevents the coastal inorganic particles from spreading to the offshore area in bottom layer, but some finer particles ( $< 16 \mu\text{m}$ ) can be transported to the central Southern Yellow Sea by surface cross-front currents. The pycnocline obstructs the upward diffusion of nutrients inside the Yellow Sea Cold Water Mass, which leads to the accumulation of phytoplankton in the pycnocline. The coarse particles ( $> 128 \mu\text{m}$ ) are mainly from the plankton or aggregates formed by organic secretion mixed with fine inorganic particles. The formation of aggregates enhances the sedimentation of surface

**资助项目:** 国家自然科学基金面上项目“黄海冷水团沉积动力过程及其沉积环境效应”(41476045); 中国科学院战略性先导科技专项“地球大数据科学工程”(XDA19060401), “美丽中国生态文明建设科技工程”(XDA23050502)

**作者简介:** 李文建(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为海洋沉积学, E-mail: liwenjian14@mails.ucas.ac.cn

**通讯作者:** 王珍岩(1972—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: zywang@qdio.ac.cn

**收稿日期:** 2020-01-10; **改回日期:** 2020-03-11. 文凤英编辑

fine inorganic particles and promotes the formation of mud deposits.

**Key words:** suspended particulate matter; grain size distribution; mud deposit; Yellow Sea cold water mass; the Southern Yellow Sea

黄海是位于中国大陆与朝鲜半岛之间的一个半封闭陆架浅海,承接了来自长江、黄河等周围河流的大量陆源物质<sup>[1]</sup>。这些巨量的陆源物质在复杂海洋动力条件下的输运和沉降过程是中国东部陆架海区源汇沉积体系的重要研究内容<sup>[2-3]</sup>。南黄海中部海区发育有典型的泥质沉积体,作为陆架海区细颗粒沉积物的聚集区和重要的碳汇,南黄海泥质沉积体的形成过程和动力机制是近年来黄海沉积学研究的热点<sup>[4-5]</sup>。前人研究表明黄海沉积物的沉积过程具有“夏储冬输”的季节性输运格局<sup>[6-7]</sup>,来自黄河的陆源物质可以在沿岸流的作用下进入南黄海中南部<sup>[8-11]</sup>,声学剖面观测也表明细颗粒沉积体可以延伸到南黄海中南部 80 m 深的区域<sup>[12]</sup>,而山东半岛沿岸流冬强夏弱的特征也使得冬季成为物质输运的主要季节<sup>[13-14]</sup>。作为冬季南黄海海区唯一一支向北的流系,黄海暖流也被认为可以将悬浮体从南向北输入到南黄海中南部<sup>[15-16]</sup>。夏季,黄海冷水团主导的“弱潮低能”的动力环境具有捕获悬浮物质的能力<sup>[17-18]</sup>,冷水团分布区与底部泥质沉积的位置对应关系指示了两者之间的密切联系。部分学者认为冷水团主导的环流体系,尤其是上升流对细颗粒的分选作用是泥质区形成的主要控制因素<sup>[19-20]</sup>。董礼先等则认为冷水团区较弱的潮动力对研究区的泥沙输运与沉积起主导作用<sup>[21-22]</sup>。然而这些理论缺乏现代沉积过程实测资料的支持,因此对南黄海中南部泥质沉积区的形成过程尚存在争议。

泥质沉积体是细颗粒沉积物的聚集区,不同粒度悬浮颗粒行为的研究对于厘清泥质沉积的形成过程具有重要意义。传统的悬浮体研究方法以抽滤法为主,这种方法将不同粒级的悬浮颗粒看作一个整体,破坏了颗粒的粒度结构和物质组成<sup>[23]</sup>,难以获得悬浮体的原位粒度分布数据。原位激光粒度仪(Laser In-Situ Scattering and Transmissometry, LISST)利用激光散射原理,可以同时测得 32 个粒级(2.5~500  $\mu\text{m}$ )的悬浮体的体积浓度(Volume Concentration, VC),使得无损、快捷、分粒级地观测悬浮体的分布成为可能<sup>[24-25]</sup>。

本文利用 2012 年夏季在南黄海调查获取的水文环境资料和悬浮体现场粒度观测数据,对悬浮体的粒度分布特征及其影响因素进行了研究,并对南黄海中南部泥质沉积区的形成机制进行了探讨,揭示了悬浮体粒度分布对研究陆架海区现代沉积过程

的重要意义。

## 1 数据与方法

“科学三号”考察船于 2012 年夏季(7 月 24 日至 8 月 7 日)在南黄海海区进行水体综合调查(图 1),在调查站位利用 SBE9/11plus 型 CTD 及其附带传感器获取水体温度、盐度和荧光叶绿素 a (chl *a*) 浓度剖面数据。利用 SBE Data Processing 软件对采集数据进行处理,得到垂向分辨率为 1 m 的剖面数据。同时,将 LISST-100X(C 型)固定于 CTD 上部,随采集系统一起下放,同步获取垂向分辨率为 1 m 的 32 个粒级的体积浓度数据。

在各调查站位利用 CTD 附属采水器在表层、5、10、20、30、50 m、底层(距海底 2~5 m)采集海水样品,并立即在船载实验室中用预先称重的混合纤维素酯滤膜(0.45  $\mu\text{m}$ )对水样进行过滤。过滤完成后用蒸馏水润洗滤膜以去除盐分,冷冻保存。在陆地实验室对滤膜烘干、称重,获得悬浮体质量浓度数据(Mass Concentration, MC)。

## 2 结果

### 2.1 水文环境

夏季,研究区表层海水温度高于 20  $^{\circ}\text{C}$ ,空间差异较小。沿 A03-B04-C05 站位存在一条表层冷水带(图 2a)。底层海水温度从近岸向远岸逐渐降低,高温水体位于水深较浅的江苏外海,南黄海中南部海水温度低于 10  $^{\circ}\text{C}$ ,两者之间形成较强的温度锋面(图 2b)。前人研究中多把 10  $^{\circ}\text{C}$  作为冷水团的边界<sup>[26]</sup>,因此这种底层冷水是典型的黄海冷水团水体。表层盐度在出现冷水条带的站位也出现了高盐特征,而底层盐度由近岸向南黄海中南部逐渐升高,盐度等值线分布特征与温度相似(图 2c 和 d)。

在垂向上,温度和盐度分布表现出近岸混合、远岸层化的分布特征(图 3)。在水深小于 20 m 的近岸区域,垂向温盐差异较小。在 >20 m 的深水区,温度(盐度)从表层向底层逐渐降低(升高),且表现出三层水文结构:上部浅水混合层、中部温度和盐度跃层,深度在 10~30 m 左右,底层为低温高盐的冷水团水体。在冷水团与近岸浅水区的边界,

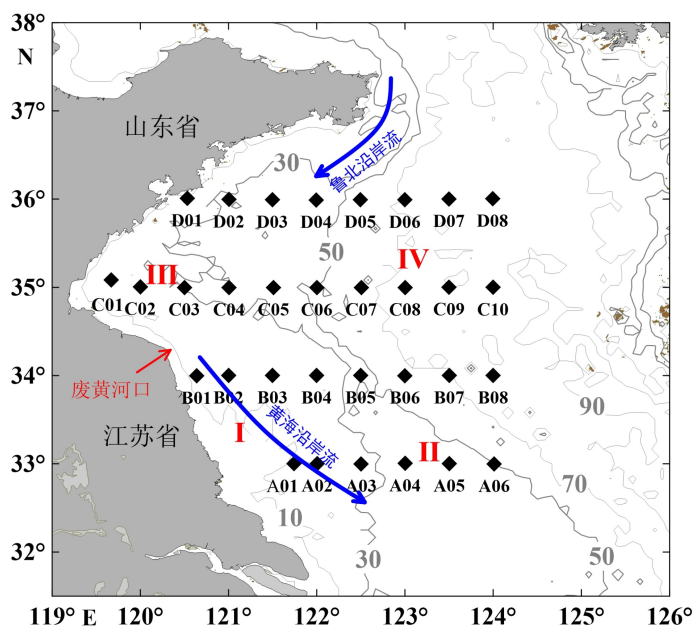


图 1 研究区地形及站位分布

黑色菱形代表调查站位, 蓝色箭头代表沿岸流, 灰色实线代表等深线; I 江苏外海浅水区;  
II 长江口东北部区域; III 海州湾区; IV 南黄海冷水团区。

Fig.1 Topography and sampling stations of the study area

The black rhombuses indicate the sample stations; the blue arrows indicate the coastal currents; the gray solid lines indicate the water depth; I shallow water area off the Jiangsu coast; II northeast of Changjiang River; III Haizhou Bay; IV South Yellow Sea Cold Water Mass.

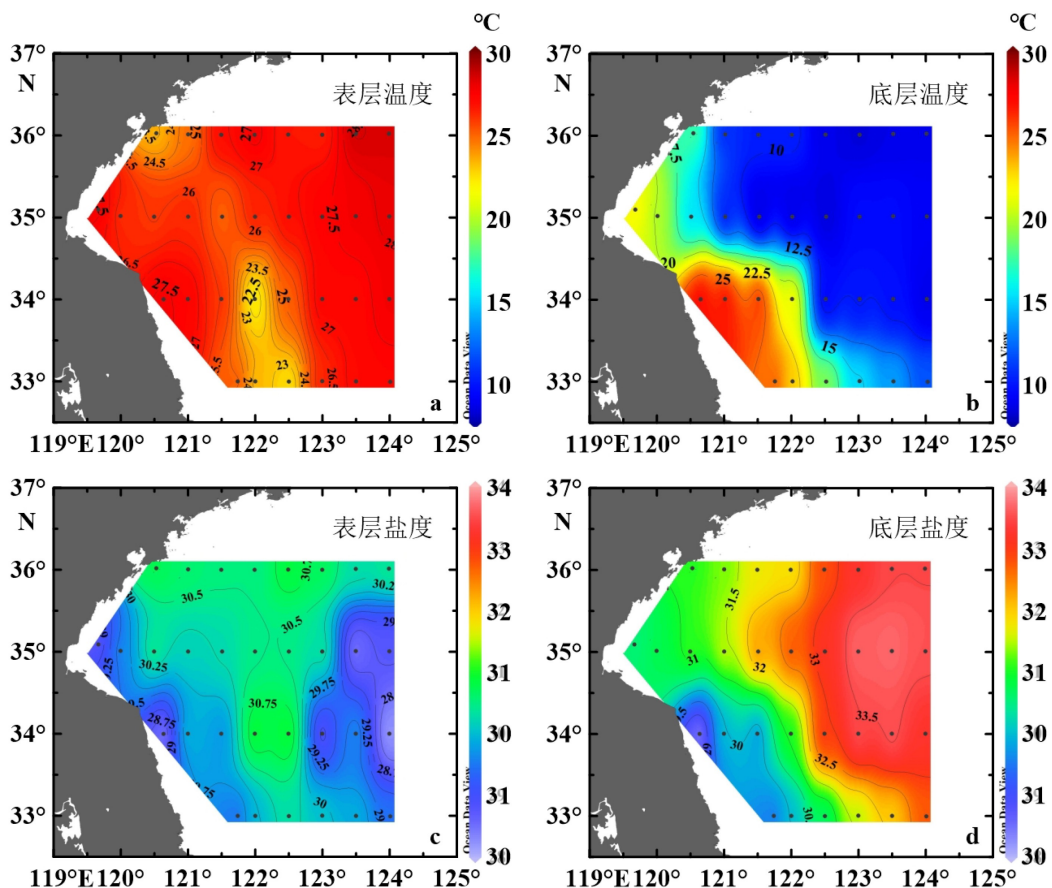


图 2 夏季温度和盐度平面分布特征

Fig.2 Horizontal distribution of temperature ( °C) and salinity in the study during summer season.

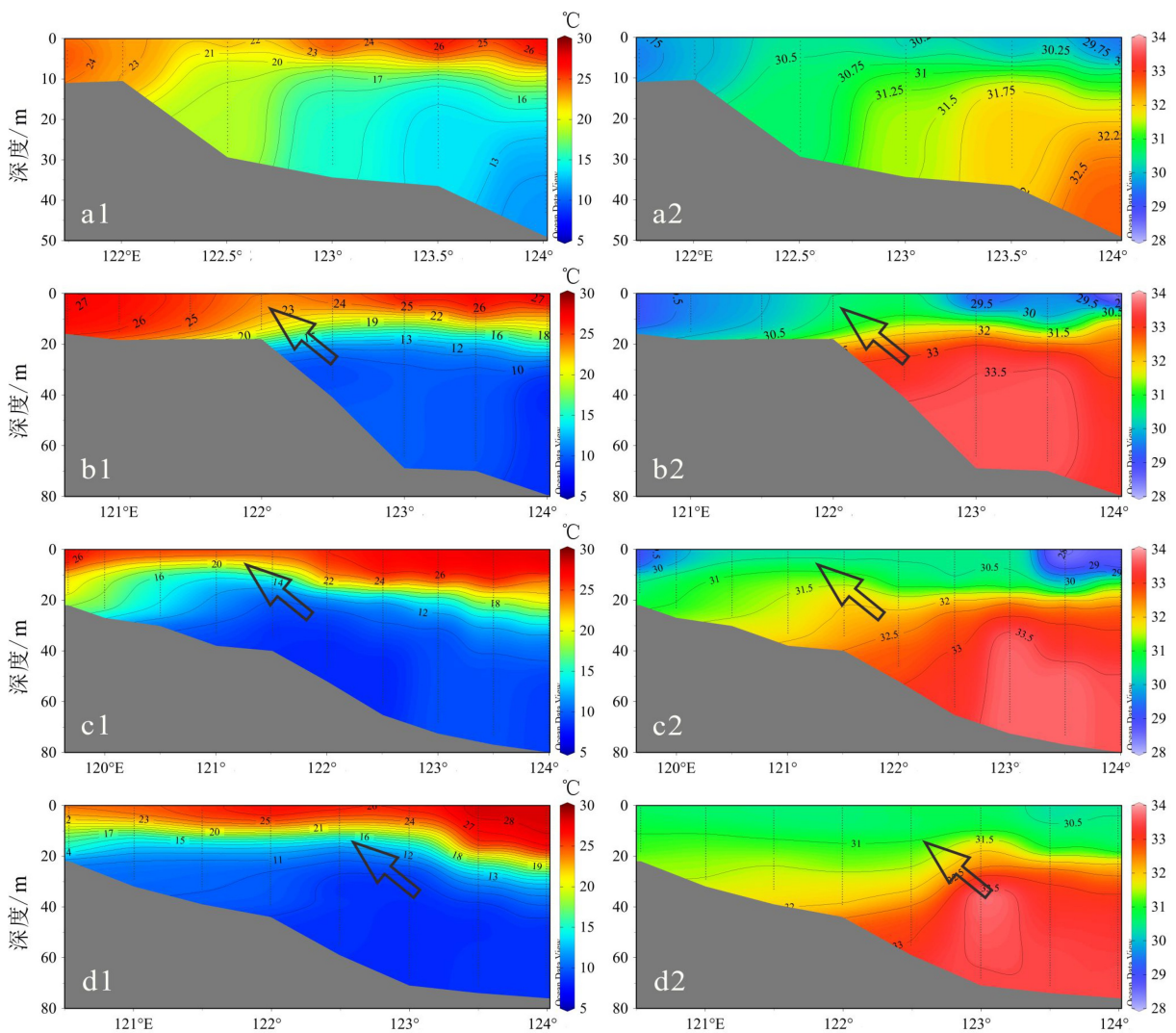


图3 夏季温度(a1—d1, °C)和盐度(a2—d2)垂向分布特征

a—d代表断面A—D; 箭头指示底层冷水上涌。

Fig.3 Vertical distribution of temperature (a1—d1, °C) and salinity (a2—d2) of the study area during summer season

a—d represent the sections of A—D; the arrows indicate the upwelling of bottom cold water.

即各断面坡度较陡的区域,等温线和等盐线表现出上凸的特征,指示了底层冷水上涌现象。

## 2.2 悬浮体分布

南黄海海区的悬浮体质量浓度表现出近岸高远岸低、底层高表层低的分布特征(图4 a1—d1)。从A断面到D断面,质量浓度逐渐降低,浓度最高值出现在B断面近岸浅水区域,高于100 mg/L。在远岸深水区,上层浓度值较低,底层均存在一个相对高浓度的雾状层。荧光叶绿素a浓度也呈层化分布特征,在温盐跃层存在的区域,存在一个次表层叶绿素最大值层,其深度与跃层深度相似,上部混合层及冷水团内部叶绿素浓度均较低(图4 a1—d2)。

为研究南黄海海区悬浮体的总体粒度分布特

征,我们对研究区所有站点所有层位的32个粒级的悬浮体体积浓度进行平均,并且将所有站点所有层位的质量浓度与32个粒级的体积浓度值分别进行了相关性分析(图5)。结果表明夏季南黄海海区悬浮体的平均体积浓度随粒径增大而逐渐增大,以128 μm 粒径为界,细颗粒体积浓度增加速度较缓,粗颗粒的体积浓度迅速增大。相关性分析也表明小于128 μm 的细颗粒与质量浓度表现出较好的相关性,而对大于128 μm 的粗颗粒,其与质量浓度之间的相关性迅速降低(图5)。质量浓度是对悬浮体样品进行抽滤的结果,含水量较高的浮游生物及其分泌物在抽滤过程中极易被破坏。因此,在无机矿物颗粒含量较高的陆架海区,质量浓度数据反映的主要是无机颗粒的含量<sup>[23]</sup>。夏季北黄海冷水团区



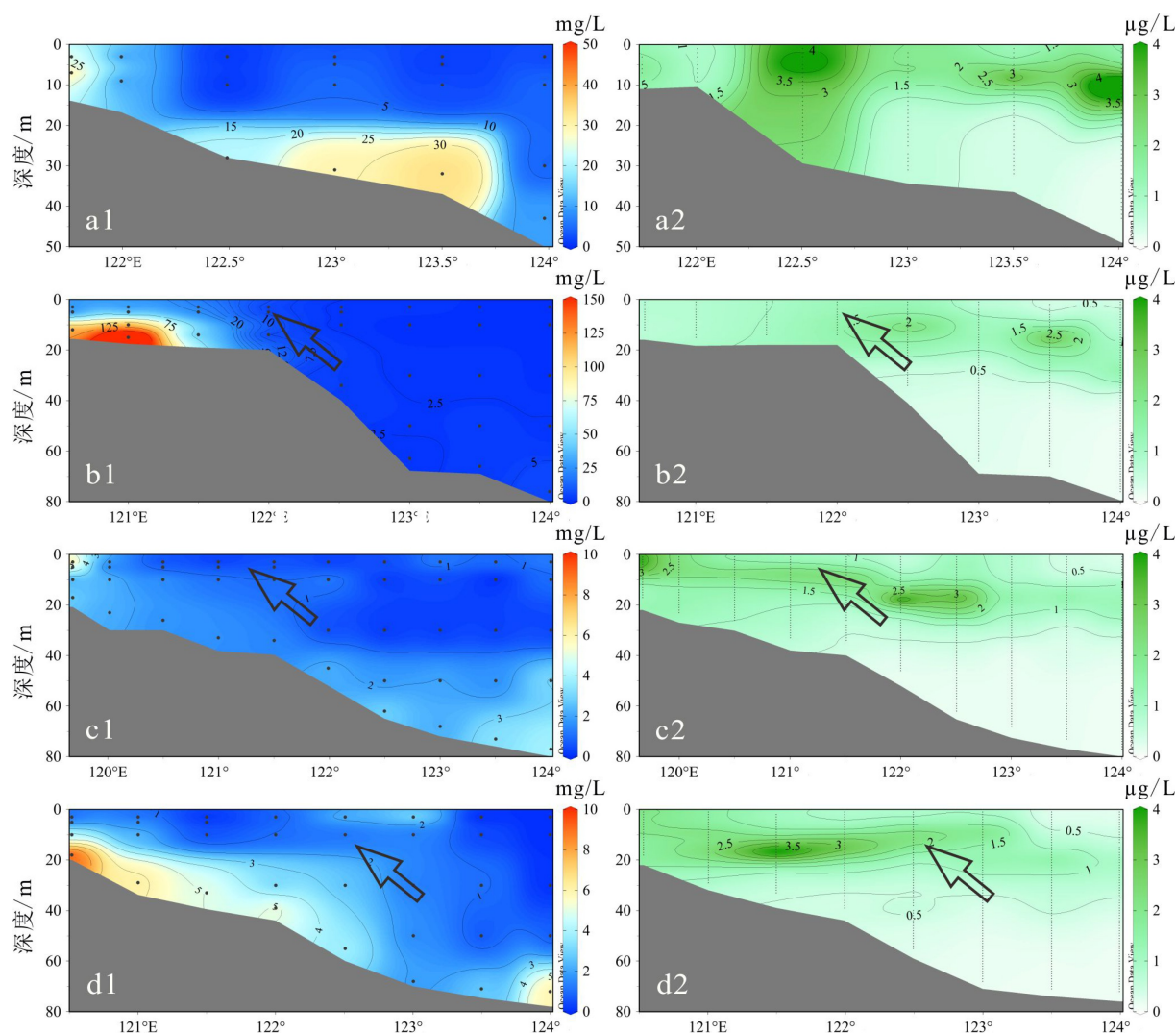


图 4 夏季和秋季悬浮体质量浓度 (a1—d1) 和叶绿素 a 浓度 (a2—d2) 垂向分布特征

a—d 代表断面 A—D; 箭头指示底层冷水上涌。

Fig.4 Vertical distribution of MC (a1—d1, mg/L) and chl a concentration (a2—d2, µg/L) of the study area during summer season

a—d represent the sections of A—D; the arrows indicate the upwelling of bottom cold water.

的粒度对比实验也表明, 现场颗粒中大颗粒主要由黏性有机聚集体和单体浮游生物组成<sup>[27]</sup>。悬浮体质量浓度与各粒级体积浓度的相关性分析指示了不同粒级颗粒与无机颗粒的关系, 高相关性表明悬浮颗粒以无机颗粒为主, 反之则证明有机物质占有不可忽略的比重。因此本文的讨论中我们将 $\leq 128 \mu\text{m}$ 的细颗粒定义为无机颗粒, 而 $> 128 \mu\text{m}$ 的粗颗粒则归类为有机颗粒。

悬浮体总体积浓度高值出现在近岸浅水区以及远岸的次表层 10~30 m 左右水层(图 6 a1—d1)。分粒级体积浓度垂向分布特征表明, 有机颗粒与无机颗粒对总体积浓度的贡献具有空间差异性, 近岸浅水区以及远岸深水区底层的高浓度主要是由无机颗粒导致, 而次表层体积浓度最大值则是由有机

颗粒造成的。另外, 在断面坡度较陡的 A 和 B 断面, 出现无机颗粒浓度锋面; 从 B 断面到 D 断面, 在等温线上凸的区域, 表层无机颗粒体积浓度高于次表层, 表明无机颗粒具有从表层向外海扩散的趋势(图 6 b2—d2)。

### 2.3 典型站位悬浮体粒度特征

根据水文特征和悬浮体粒度分布特征, 夏季南黄海海区可以划分为四种典型区域: I 江苏外海浅水区; II 长江口东北部区域(A 断面远岸区); III 海州湾区; IV 南黄海冷水团区。不同研究区的站位具有不同的悬浮体粒度分布特征(图 7)。B01 站位代表区域 I, 从表层到底层其粒度特征具有一致性, 呈三峰分布, 在细颗粒和粗颗粒端均存在上尾尾,

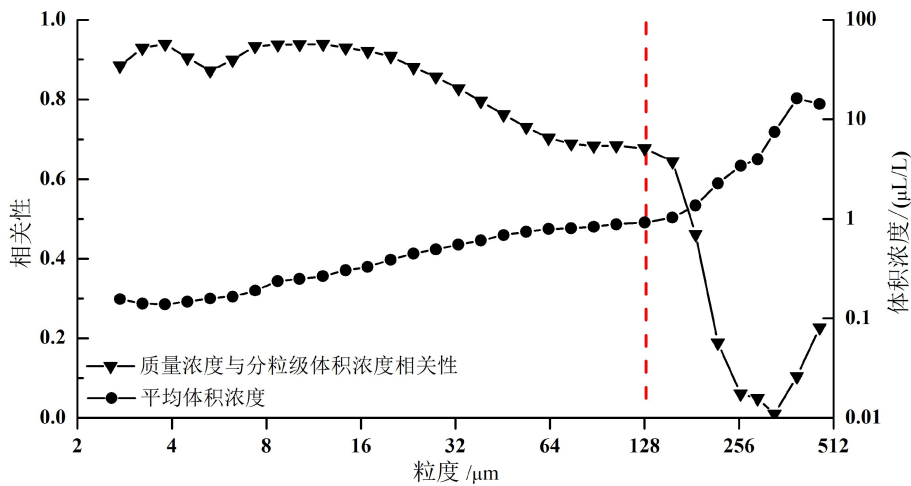


图5 调查站位所有层位的平均粒度分布特征以及质量浓度与各粒级体积浓度相关性

Fig.5 Average VC (black solid dots) and correlation between MC and VC (black triangle) of suspended particulate matter in different sizes. The VC was averaged based on all stations and layers

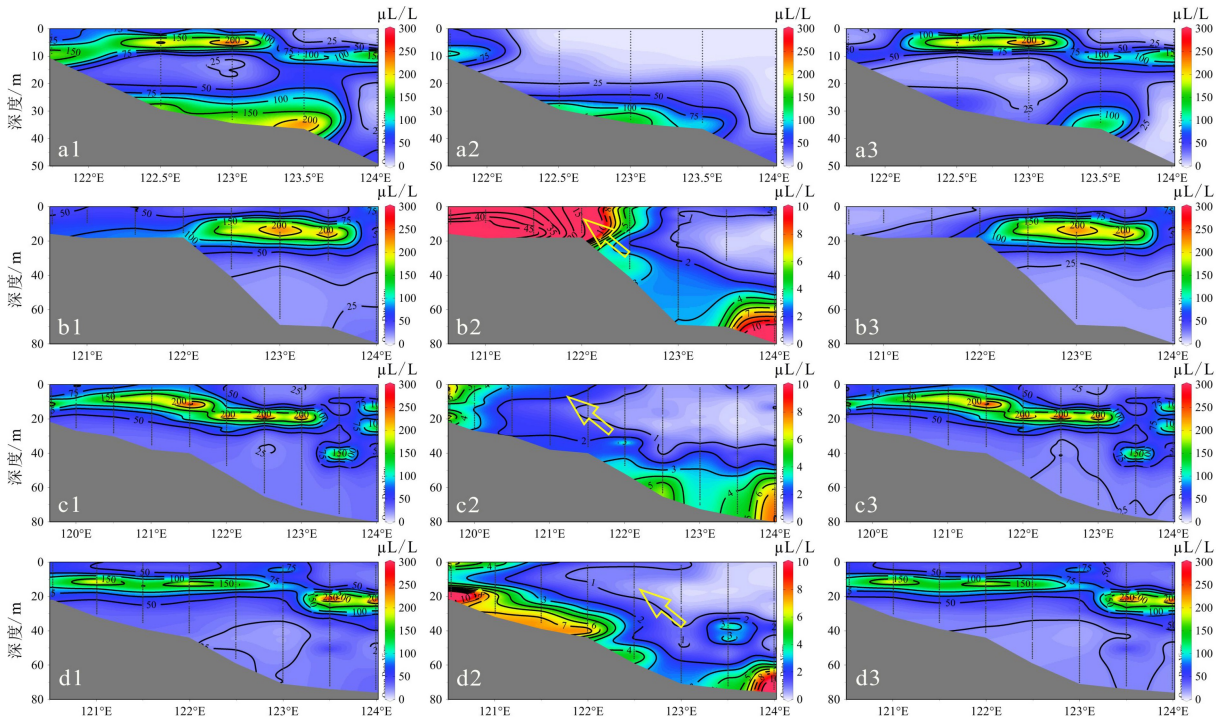


图6 夏季分粒级悬浮体体积浓度垂向分布特征

a1—d1 代表所有粒级的总体积浓度；a2—d2 代表≤128 μm 粒级颗粒的总体积浓度；  
a3—d3 代表 >128 μm 粒级颗粒的总体积浓度；黄色箭头指示底层冷水上涌现象。

Fig.6 Vertical distribution of total VCs (a1—d1) inorganic (a2—d2) and organic (a3—d3) VCs of the study area during summer season

a1—d1 indicate the total VCs; a2—d2 indicate the total VCs finer than 128 μm; a3—d3 indicate the total VCs coarser than 128 μm, the yellow arrows indicate the upwelling of bottom cold water.

中间峰值位于 16~32 μm 左右。B04 站位代表江苏外海浅水区与冷水团区之间的锋面区域，其粒度分布从表层到底层也具有一致性，体积浓度随粒径增大而增大。A04 站位代表区域 II，粒度分布主要分为两种类型：浅水层 (<10 m) 表现为双峰分布，峰

值粒径在 6 和 391 μm 左右，而 16~128 μm 左右的颗粒浓度较低，部分层位为 0；深水层表现为单峰分布，峰值粒径在 64 μm 左右。C03 站位代表区域 III，粒度分布特征分为两种类型：浅水层 (<8 m) 表现为双峰分布，在 6 μm 左右存在一个峰值，体积浓

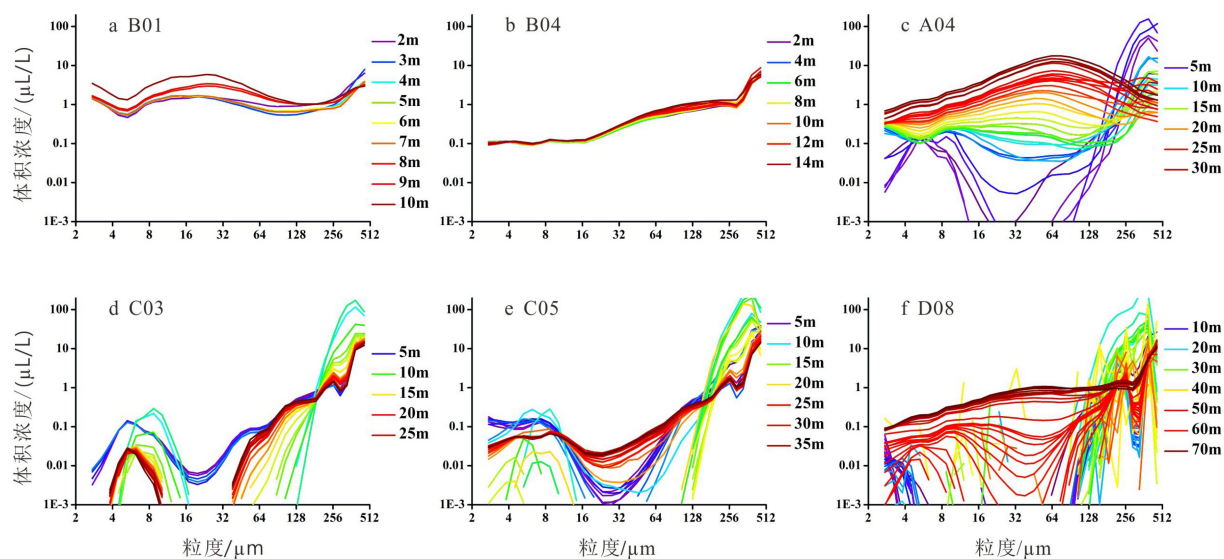


图7 典型站位的悬浮体粒度分布特征

Fig.7 Particle size distribution in some typical stations

度为  $0.1 \mu\text{L/L}$  左右,在粗颗粒端存在一个上升尾且峰值大于  $100 \mu\text{L/L}$ ;深水层也具有双峰分布特征,但峰值粒径在 6 和  $391 \mu\text{m}$  左右,在  $256 \mu\text{m}$  左右存在一个小的峰值,而  $16 \sim 128 \mu\text{m}$  左右的颗粒基本缺失。C05 代表 C 断面的温度锋区域,其粒度分布与 C03 站位相似,从表层到底层均具有双峰分布特征,但底层  $16 \sim 128 \mu\text{m}$  粒级的颗粒浓度高于 C03 站位。D08 站位代表区域 IV,其粒度分布特征分为四种类型:18 m 以浅水层呈三峰分布,粗、细颗粒端各存在一个上升尾,另外在  $256 \mu\text{m}$  左右存在一个小的峰值;18~45 m 水层颗粒集中在大于  $128 \mu\text{m}$  粒级,粒度分布较乱,无明显峰值粒级;45~62 m 层位颗粒呈 V 字形分布,且  $16 \sim 128 \mu\text{m}$  粒级浓度随水深增大而增大,在 10、256 以及  $391 \mu\text{m}$  左右存在 3 个峰值;62~74 m 水层  $16 \sim 128 \mu\text{m}$  粒级浓度较高,在  $32 \sim 64 \mu\text{m}$  左右存在一个较弱的峰值。

### 3 讨论

悬浮体的粒度特征由物质来源和水动力条件共同决定,物源决定其粒度特征的基本分布格局,水动力条件影响了其在基本格局下的波动<sup>[28]</sup>。因此本文从物源和水文动力两个方面探讨夏季南黄海海区悬浮体粒度分布特征的影响机制。

#### 3.1 悬浮体来源

南黄海海底沉积物类型较复杂<sup>[29]</sup>,砂质沉积物主要分布在长江口外部海域、辐射沙脊区以及废黄河三角洲外侧部分区域;在废黄河三角洲及南黄海

中部分布有大片黏土质粉砂,粉砂质黏土分布于南黄海中部的黏土质粉砂中;在近岸与南黄海中部之间的过渡区域和海州湾区发育有粉砂质砂,而苏北外海分布着砂质粉砂(图 8)。由于相对较强的再悬浮作用(见 4.2)以及较细的表层沉积物<sup>[30-31]</sup>,江苏外海及长江口东北部从底层到表层具有相对较高的无机颗粒百分比(图 9a—c)。前人研究也表明,海底沉积物的再悬浮是苏北近岸悬沙最主要的来源,形成了近岸高浓度区<sup>[32-33]</sup>。而长江口北支北侧断面向北进入江苏海域的悬沙通量约为  $0.35 \sim 0.36$  亿  $\text{t/a}$ <sup>[34]</sup>,悬浮颗粒的中值粒径为  $8 \sim 120 \mu\text{m}$ ,平均为  $38 \mu\text{m}$ <sup>[35]</sup>,也是江苏外海细颗粒悬浮体的重要来源。尽管处于水深小于 40 m 的近岸区,但海州湾区的砂质沉积导致了较低的无机颗粒比重(图 9d—e)。在南黄海中部,由于水深较深,底层细颗粒沉积物的再悬浮作用较弱,只在近底层出现了无机颗粒高百分比区(图 9f)。因此,海底表层沉积物是夏季南黄海海区无机颗粒的主要来源。

在具有层化特征的远岸深水区(如 D08 站位,图 9f),跃层及以上层位质量浓度较低,而叶绿素浓度较高,悬浮颗粒主要以有机粗颗粒为主,总体积浓度最高值与叶绿素最大值深度的一致性指示了生物源的有机组分对粗颗粒的影响。海水中的浮游植物在生长过程中会释放大量具有黏性的胞外聚合物<sup>[36]</sup>,这些低密度的有机物质在海水浮力作用下可以向上层扩散,同时也可以与密度较大的无机矿物颗粒结合形成粒径较大的絮集体而发生沉降<sup>[27, 37]</sup>,因此该区域悬浮颗粒主要集中在  $> 128 \mu\text{m}$  的粗颗粒端。



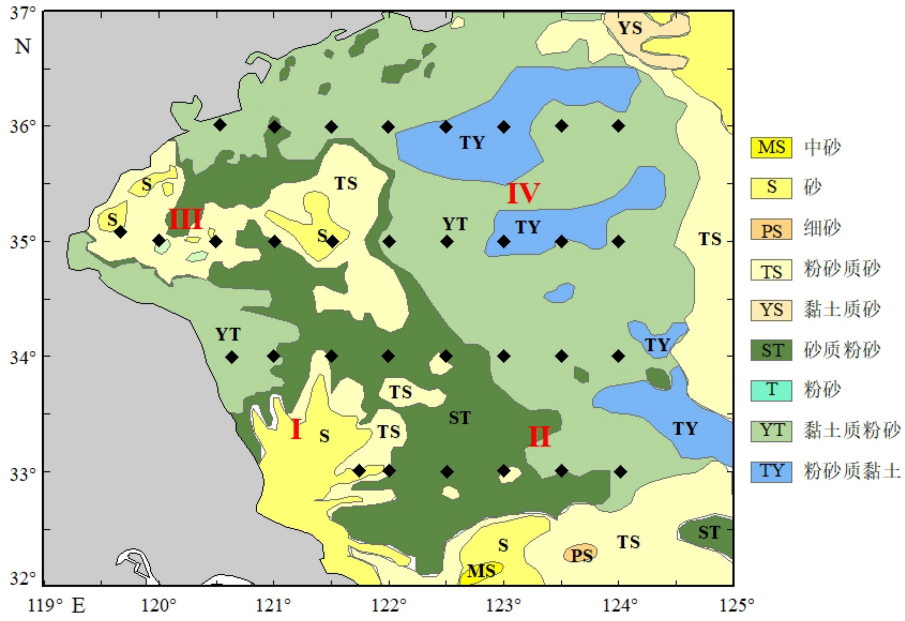


图8 南黄海沉积物类型 (改自文献 [29])

黑色菱形代表调查站位, I 江苏外海浅水区; II 长江口东北部区域; III 海州湾区; IV 冷水团区。

Fig.8 The sediment types in the Southern Yellow Sea (modified from reference [29])

The black rhombuses indicate the sample stations; I shallow water area off the Jiangsu coast area;

II northeast of Changjiang River; III Haizhou Bay; IV South Yellow Sea Cold Water Mass.

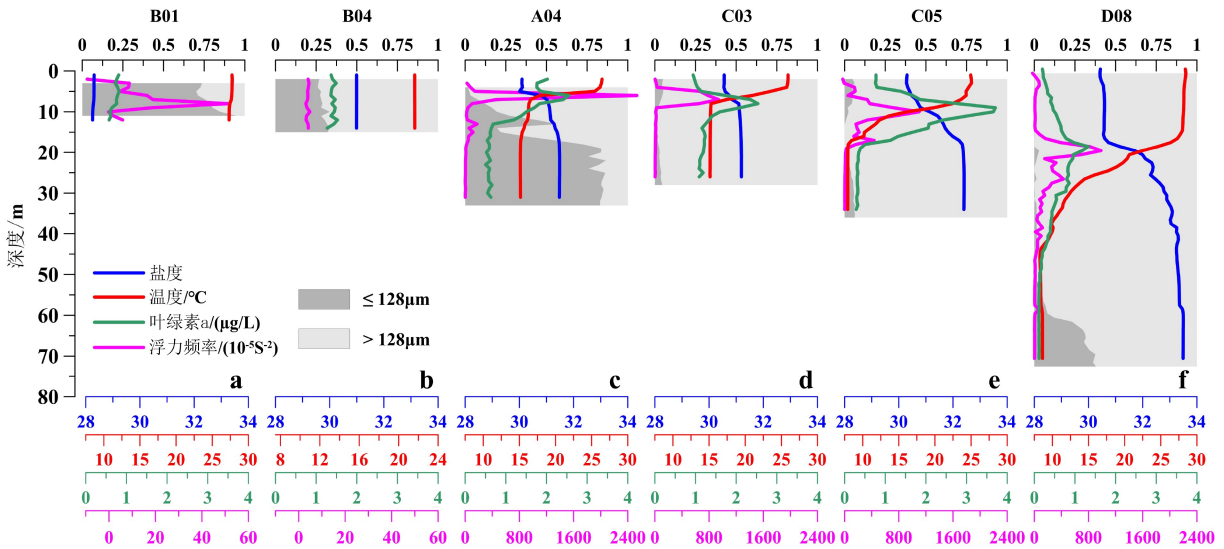


图9 典型站位温度、盐度、chl a、N<sup>2</sup> 以及无机和有机颗粒的累积体积百分比垂向分布

Fig.9 Vertical distribution of temperature, salinity, chl a, N<sup>2</sup> and cumulative frequency distribution of inorganic and organic particles at typical stations

### 3.2 水文动力环境对悬浮体粒度分布的影响

#### 3.2.1 潮流

潮流、季风和季节性水团特征是夏季影响南黄海海区悬浮体分布格局的主要动力因素。黄海海区的气候条件受东亚季风影响,具有较强的季节性特征,冬季风平均风速可达 10 m/s,而夏季东南季风

平均风速仅为 1.5 m/s<sup>[38]</sup>,因此较弱的夏季风对水动力条件的影 响有限,潮流和水团特征是主要的影 响因素<sup>[33,39]</sup>。

南黄海海区发育典型的规则半日潮(图 10),江苏外海的最大潮差可达 1~2 m。潮流流速具有近岸高远岸低的分布特征,苏北老黄河口至长江口沿岸属于强潮流区,潮流流速大于 1 m/s,而南黄海中



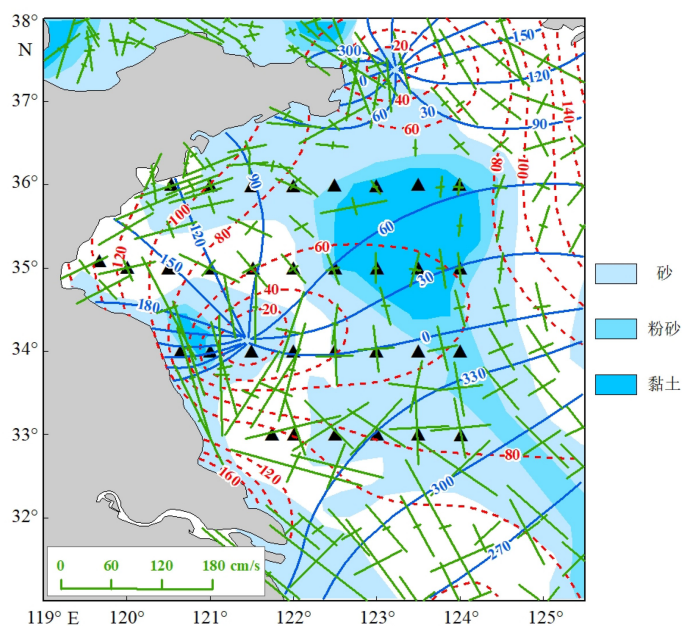


图 10 南黄海海区  $M_2$  旋转潮波系统和潮流椭圆图

黑色三角代表研究站位, 绿色十字代表潮流椭圆的长轴和短轴, 半长轴表示  $M_2$  潮流的最大速度和方向, 半短轴表示最小速度和方向(改自文献 [40]); 蓝色区域代表研究区的细颗粒沉积(改自文献 [41])。

Fig.10 Map of sampling locations, the amphidromic system of the principal  $M_2$  constituent, and the elliptical axes of  $M_2$  tidal currents in the Southern Yellow Sea

The half major axis indicates the maximum velocity and the direction of  $M_2$  tidal current and the half minor axis indicates the minimum velocity and the direction (modified from reference [40]). The blue areas show distribution of mud patches (modified from reference [41]).

部为弱潮流区, 潮流流速低于  $0.4 \text{ m/s}$ [38]。研究表明, 废黄河三角洲及辐射沙脊区的高浓度悬沙是由强烈的水流和海岸侵蚀造成的, 而潮动力是影响悬沙浓度的主要因素[33]。尽管 A04 站位离岸较远, 其潮流流速仍可达  $1 \text{ m/s}$ , 底层再悬浮作用较强。因此在江苏近岸海区以及 A 断面跃层以下层位, 悬浮体粒度分布以无机细颗粒为主(图 6 a2—d2)。海州湾区的弱潮流流速以及底层沉积物性质限制了再悬浮作用, 因此无机颗粒的贡献不明显(图 9d—e)。南黄海中部具有“弱潮低能”的水动力环境[18, 21], 现场观测结果证实悬浮体浓度随潮流变化显示出一定的周期性变化, 但是变化较小, 再悬浮作用只能影响到近底层一定深度范围[18], 无机颗粒的贡献小于江苏外海区域(图 9f)。

### 3.2.2 潮混合锋

研究表明, 夏季近岸水体在潮、风和波浪作用下水体混合较好, 而冷水团内部是稳定的低温高盐水体, 两者之间存在较大的温度或者密度差异, 形成了潮混合锋面[42]。任强等利用走航式剖面测量系统(MVP)测量了  $35^\circ\text{N}$  断面离底  $10 \text{ m}$  位置的水平温度梯度, 温度梯度最大值位于冷水团与近岸混合水边界位置, 可达  $0.28 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ [43]。较大的密度差

异在水平方向造成了较大的斜压梯度力, 这种斜压梯度力会驱使远岸水体向近岸移动, 在遇到坡度较陡的地形时会沿斜坡爬升, 形成上升流, 并在表层形成离岸流[42], 表层冷水条带即是冷水上涌的结果。现场调查及卫星遥感观测也证实这种表层冷水条带是夏季南黄海海区稳定存在的水文现象[42]。潮混合锋、质量浓度锋面以及无机颗粒体积浓度锋面的一致性表明潮混合锋的存在阻挡了近岸高浓度悬浮体向远岸扩散, 导致远岸区上层无机颗粒浓度较低(图 7f)。而无机细颗粒的垂向分布显示在锋面附近的表层区域, 悬浮体有向远岸区扩散的趋势(图 6 b2—d2)。远岸深水区站位表层颗粒在小于  $16 \mu\text{m}$  粒径浓度大于次表层, 且  $16 \sim 128 \mu\text{m}$  颗粒相对缺失, 表明通过离岸流向南黄海中部运输的主要是小于  $16 \mu\text{m}$  的细颗粒(图 7f), 这种跨锋面运输为南黄海中部提供了细颗粒的无机颗粒。

### 3.2.3 密度跃层

为讨论密度对水体垂向扩散特征的影响, 我们计算了各断面的浮力频率( $N^2$ )分布[44]:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (1)$$

这里  $g$  是重力加速度,  $\rho$  是水体密度,  $z$  是深度,

海水的扩散系数与浮力频率的倒数成正比,即  $K_V \propto 1/N$ 。高浮力频率值意味着低扩散系数,即相对稳定水体。浮力频率在海水密度跃层处存在高值,水体扩散作用较弱。而在上混合层,冷水团内部以及近岸浅水区,浮力频率表现为低值,水体混合较好(图9)。

2012年春季,南黄海藻华事件消耗了表层营养盐<sup>[45]</sup>,而大量有机物在冷水团内部的分解进一步促进了底层营养盐含量升高,形成了营养盐储库<sup>[46-47]</sup>。从春季到夏季,冷水团与上部混合层的密度跃层进一步增强,水体在跃层处的扩散作用较弱(图9e和f),底层的营养盐难以跨过密度跃层向表层输送<sup>[48]</sup>。营养盐的缺乏和较弱的光照条件分别使得表层和冷水团内部不利于浮游植物生长,而在密度跃层处,充足的营养盐和适宜的光照条件促进了浮游植物生长,形成了次表层叶绿素最大值层(图4a2—d2)。密度梯度最大值与chl *a*最大值深度的相关性证明了这种阻挡作用的存在(图11a)。浮游植物在生长过程中会分泌大量透明胞外物质,并与无机矿物颗粒结合形成尺寸和密度较大的絮集体,因此在跃层及跃层以上层位存在较多的粗颗粒物。总体积浓度峰值深度与chl *a*最大值深度的相关性证明了有机物质对大颗粒悬浮体的重要作用(图11b)。

### 3.3 悬浮体粒度分布对南黄海中部泥质区成因的指示意义

南黄海中部泥质沉积是细颗粒沉积物的聚集区。根据上述讨论,夏季无机悬浮颗粒在近岸浅水区形成了悬浮体高浓度中心,而潮混合锋阻挡了近岸高浓度悬浮体从近底层向南黄海中部扩散。数

值模拟结果则表明,潮混合区存在一个次级环流:底层冷水沿海底向岸流动,上升流沿斜坡向上爬升,并在上部表层逆向流动,即形成跨锋面的离岸流<sup>[42]</sup>。无机颗粒的断面分布特征则显示,细的无机颗粒( $< 16 \mu\text{m}$ )可以被离岸流输运至南黄海中部(图6b2—d2)。这种跨潮混合锋面的细颗粒离岸输运为泥质区的形成提供了物质来源。另一方面,来源于近岸跨锋面输运的细颗粒悬浮体是远岸区表层无机悬浮颗粒的主要来源,扩散系数较低的密度跃层的存在限制了这些颗粒的沉降,而絮集体的形成则极大地促进了无机细颗粒的跨跃层沉降,提高了表层到底层的无机颗粒通量。粒度对比试验结果也表明,这些粒度较大的絮集体是由单体浮游生物或黏性生物分泌物与小于 $32 \mu\text{m}$ 的细颗粒组成<sup>[27]</sup>,而絮集体的沉降速度比单体细颗粒高几个数量级<sup>[49]</sup>。这些有机物质在沉积过程中或沉降之后会发生分解,无机细颗粒的沉降则促进了底层泥质沉积的形成。因此,江苏外海的再悬浮颗粒为泥质区的形成提供了物源,跨潮混合锋面的离岸流是携带细颗粒进入南黄海中部的动力,絮集体的形成是将这些细颗粒带离表层并快速沉降到海底的主要方式。

## 4 结论

(1)夏季,南黄海悬浮颗粒中 $\leq 128 \mu\text{m}$ 的细颗粒主要是由无机矿物颗粒组成,而 $> 128 \mu\text{m}$ 的粗颗粒则由有机颗粒主导。无机颗粒主要分布在混合作用较强的近岸浅水区以及远岸的近底层,有机颗粒在水体层化较强海域的密度跃层处占据主导地位。

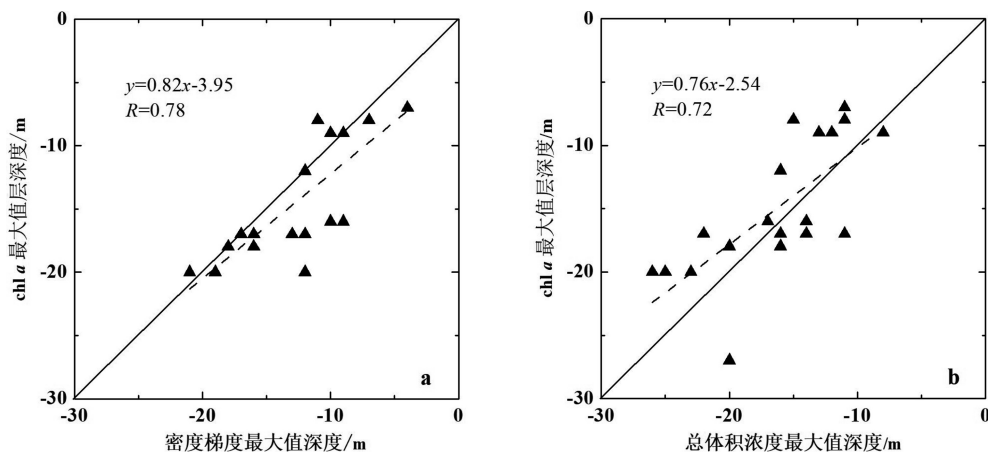


图11 Chl *a*最大值深度与密度梯度最大值深度或TVC最大值深度的相关性

Fig.11 Correlation between the depth of the maximum chl *a* concentration with the maximum density gradient (a) or TVC (b) during summer season

(2)再悬浮的海底表层沉积物是研究区无机颗粒的主要来源,而潮动力是其再悬浮的主要动力。潮混合锋面阻挡了近岸高浓度无机颗粒沿近底层向远岸扩散,但跨锋面的表层离岸流可以将部分细颗粒输运至南黄海中部。密度跃层阻挡了冷水团内部营养盐向表层扩散,浮游植物在密度跃层处聚集形成叶绿素次表层最大值层,浮游生物及其分泌的黏性有机物质与无机颗粒形成的絮集体是 $>128\ \mu\text{m}$ 的粗颗粒的主要来源。絮集体的形成促进了表层无机颗粒向底层的沉降。

(3)江苏外海的再悬浮颗粒为泥质区的形成提供了物源,跨潮混合锋面的离岸流是携带细颗粒进入南黄海中部的动力,絮集体的形成是将这些细颗粒带离表层并快速沉降到海底的主要方式,促进了南黄海中部泥质区的形成。

**致谢:** 感谢“科学三号”考察船全体船员和航次科考队员对相关采样和观测工作提供的帮助,谨致谢忱。

### 参考文献 (References)

- [1] Milliman J D, Farnsworth K L. Runoff, erosion, and delivery to the coastal ocean [M]. Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 13-69.
- [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] Qiao S Q, Shi X F, Wang G Q, et al. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea [J]. *Marine Geology*, 2017, 390: 270-281.
- [4] Wang Y H, Li G X, Zhang W G, et al. Sedimentary environment and formation mechanism of the mud deposit in the central South Yellow Sea during the past 40 kyr [J]. *Marine Geology*, 2014, 347: 123-135.
- [5] Hu B Q, Li J, Zhao J T, et al. Sr-Nd isotopic geochemistry of Holocene sediments from the South Yellow Sea: implications for provenance and monsoon variability [J]. *Chemical Geology*, 2018, 479: 102-112.
- [6] Yang Z S, Ji Y J, Bi N S, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 173-181.
- [7] Wang H J, Wang A M, Bi N S, et al. Seasonal distribution of suspended sediment in the Bohai Sea, China [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 17-32.
- [8] Milliman J D, Li F, Zhao Y Y, et al. Suspended matter regime in the Yellow Sea [J]. *Progress in Oceanography*, 1986, 17(3-4): 215-227.
- [9] Lee H J, Chough S K. Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 1989, 87(2-4): 195-205.
- [10] Alexander C R, DeMaster D J, Nittrouer C A. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 1991, 98(1): 51-72.
- [11] Park Y A, Khim B K. Origin and dispersal of recent clay minerals in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 1992, 104(1-4): 205-213.
- [12] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1-4): 169-176.
- [13] 余佳, 王厚杰, 毕乃双, 等. 基于MODIS L1B数据的黄海悬浮体季节性分布的反演[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 & Quaternary Geology*, 2014, 34(1): 1-9.]
- [14] 刘琳, 王珍岩. 山东半岛沿岸海域悬浮体时空分布及形成机制分析[J]. *海洋科学*, 2019, 43(10): 55-65. [LIU Lin, WANG Zhenyan. Temporal and spatial distributions and formation mechanism of suspended sediment in the coastal area of the Shandong Peninsula [J]. *Marine Science*, 2019, 43(10): 55-65.]
- [15] Gao S, Park Y A, Zhao Y Y. Transport and resuspension of fine-grained sediments over the southeastern Yellow Sea [C]//Proceedings of the Korea-China International Seminar on Holocene and Late Pleistocene Environments in the Yellow Sea Basin. Seoul: Seoul National University Press, 1996: 83-98.
- [16] Li W J, Wang Z Y, Huang H J. Indication of size distribution of suspended particulate matter for sediment transport in the South Yellow Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 235: 106619.
- [17] 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.
- [18] Li G X, Qiao L L, Dong P, et al. Hydrodynamic condition and suspended sediment diffusion in the Yellow Sea and East China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(8): 6204-6222.
- [19] Hu D X. Upwelling and sedimentation dynamics [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1984, 2(1): 12-19.
- [20] Qu T D, Hu D X. Upwelling and sedimentation dynamics [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1993, 11(4): 289-295.
- [21] 董礼先, 苏纪兰, 王康璋. 黄渤海潮流场及其与沉积物搬运的关系[J]. *海洋学报*, 1989, 8(4): 587-600. [DONG Lixian, SU Jilan, WANG Kangshan. The relationship between tidal current field and sediment transport in the Huanghai Sea and the Bohai Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 8(4): 587-600.]
- [22] Zhu Y, Chang R. Preliminary study of the dynamic origin of the distribution pattern of bottom sediments on the continental shelves of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 51(5): 663-680.
- [23] 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.]
- [24] 王珍岩, 张洪格, 高微. 冬季西太平洋雅浦海山(Y3)区次表层叶绿素最大值层分布及其对悬浮物粒度的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48 (6): 1404-1414. [WANG Zhenyan, ZHANG Hongge, GAO Wei. Subsurface chlorophyll maximum layer in Yap (Y3) seamount area in the western Pacific during winter: distribution and influence on particle size distribution of suspended particulate matter [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48 (6): 1404-1414.]
- [25] 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.
- [26] Oh K H, Lee S, Song K M, et al. The temporal and spatial variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in the southeastern Yellow Sea, 2009-2011 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32 (9): 1-10.
- [27] Zhang K N, Wang Z Y, Li W J, et al. Properties of coarse particles in suspended particulate matter of the North Yellow Sea during summer [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37 (1): 79-92.
- [28] McLaren P, Bowles D. The effects of sediment transport on grain-size distributions [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1985, 55 (4): 457-470.
- [29] 石学法. 中国近海海洋—海洋底质[M]. 北京: 海洋出版社, 2014. [SHI Xuefa. *China Coastal Seas-Marine Sediment*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2014.]
- [30] 刘强, 项立辉, 张刚, 等. 苏北废黄河口表层沉积物分布特征及其控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38 (1): 118-126. [LIU Qiang, XIANG Lihui, ZHANG Gang, et al. Distribution pattern of surface sediments around the abandoned Yellow River estuary of North Jiangsu Province and its controlling factors [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38 (1): 118-126.]
- [31] 邢飞, 汪亚平, 高建华, 等. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41 (3): 459-468. [XING Fei, WANG Yaping, GAO Jianhua, et al. Seasonal distributions of the concentrations of suspended sediment along Jiangsu coastal sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41 (3): 459-468.]
- [32] Wang X H, Qiao F L, Lu J, et al. The turbidity maxima of the northern Jiangsu shoal-water in the Yellow Sea, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93 (3): 202-211.
- [33] Xing F, Wang Y P, Wang H V. Tidal hydrodynamics and fine-grained sediment transport on the radial sand ridge system in the southern Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2012, 291-294: 192-210.
- [34] 万新宁, 李九发, 沈焕庭. 长江口外海滨典型断面悬沙通量计算[J]. *泥沙研究*, 2004 (6): 64-70. [WAN Xinyu, LI Jiufa, SHEN Huanting. Suspended sediment flux at the typical cross sections in the offshore area of Changjiang Estuary [J]. *Journal of Sediment Research*, 2004 (6): 64-70.]
- [35] 庞重光, 于炜, 杨扬. 长江口海域悬浮物的粒度特征与成因分析[J]. *环境科学*, 2010, 31 (3): 618-625. [PANG Chongguang, YU Wei, YANG Yang. Characteristics and its forming mechanism on grain size distribution of suspended matter at Changjiang estuary [J]. *Environmental Science*, 2010, 31 (3): 618-625.]
- [36] Engel A. The role of Transparent Exopolymer Particles (TEP) in the increase in apparent particle stickiness ( $\alpha$ ) during the decline of a diatom bloom [J]. *Journal of Plankton Research*, 2000, 22 (3): 485-497.
- [37] Passow U. Transparent Exopolymer Particles (TEP) in aquatic environments [J]. *Progress in Oceanography*, 2002, 55 (3-4): 287-333.
- [38] Song J M, Duan L Q. The Yellow Sea[M]//Sheppard C. *World Seas: An Environmental Evaluation*. London: Academic Press, 2019.
- [39] Dong L X, Guan W B, Chen Q, et al. Sediment transport in the Yellow Sea and East China Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93 (3): 248-258.
- [40] 海洋图集编委会. 渤海黄海东海海洋图集-水文[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 436-437, 429. [EBMA (Editorial Board of Marine Atlas). *Marine atlas of Bohai Sea Yellow Sea East China Sea*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992: 436-437, 429.]
- [41] Yuan D L, Zhu J R, Li C Y, et al. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations [J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 70 (1-2): 134-149.
- [42] Lü X G, Qiao F L, Xia C S, 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.
- [43] 任强. 黄海冷水团海域走航式剖面测量系统(MVP)的应用研究[D]. 中国科学院海洋研究所硕士学位论文, 2014. [REN Qiang. Research on the application of Moving Vessel Profile (MVP) in the Yellow Sea cold water mass[D]. Master Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014.]
- [44] Washburn L, Swenson M S, Largier J L, et al. Cross-shelf sediment transport by an anticyclonic eddy off northern California [J]. *Science*, 1993, 261 (5128): 1560-1564.
- [45] Liu X Q, Li Y, Wang Z L, et al. Cruise observation of *Ulva prolifera* bloom in the southern Yellow Sea, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 17-22.
- [46] Fu M z, Wang Z L, Li Y, et al. Phytoplankton biomass size structure and its regulation in the Southern Yellow Sea (China): seasonal variability [J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29 (18): 2178-2194.
- [47] Jin J, Liu S M, Ren J L, et al. Nutrient dynamics and coupling with phytoplankton species composition during the spring blooms in the Yellow Sea [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 97: 16-32.
- [48] 韦钦胜, 傅明珠, 李艳, 等. 南黄海冷水团海域溶解氧和叶绿素最大现象值及营养盐累积的季节演变[J]. *海洋学报*, 2013, 35 (4): 142-154. [WEI Qinsheng, FU Mingzhu, LI Yan, et al. Observation of the seasonal evolution of DO, chlorophyll a maximum phenomena and nutrient accumulating in the southern Huanghai (Yellow) Sea Cold Water Mass area [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35 (4): 142-154.]
- [49] Wang A J, Ye X, Chen J. Observations and analyses of flocculation size and flocculation settling velocity in coastal salt marsh of Luoyuan Bay, Fujian Province, China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29 (3): 116-126.