

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.05.003

## 闽北附近海域悬浮体输运及通量的季节变化

薛碧颖<sup>1</sup>, 王厚杰<sup>1,2</sup>, 张勇<sup>3,4</sup>, 毕世普<sup>3,4</sup>, 宁泽<sup>1,3,4</sup>, 胡刚<sup>3,4</sup>

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061

3. 自然资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071

4. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

**摘要:** 基于2015年9月和12月闽北附近海域3条断面上的同步连续沉积动力学观测, 结合对应时段的卫星遥感海表温度资料, 研究了闽北近岸海域冬季和夏季悬浮体分布和输运通量的变化规律。结果表明, 该区域的悬浮体浓度存在明显的季节性变化, 冬季季风活动对水体扰动强烈, 水体垂向混合较为均匀, 近岸沉积物再悬浮活跃, 其浓度值明显高于外海; 而夏季近岸悬浮体浓度明显降低。在50m以深的外海海域, 悬浮体浓度无显著的季节差异, 且空间变化幅度很小。受东北季风和闽浙沿岸流的影响, 冬季悬浮体总体上沿东北向西南的沿岸方向输送, 输运通量由近岸向外海逐渐减小; 在夏季, 闽北近岸海域悬浮体输运方向与冬季一致, 但输运通量显著减小; 外海海域的悬浮体输运方向指向东北, 输运通量明显高于冬季。在离岸断面上, 中间站位(水深约50m)的悬浮体浓度低于其两侧站位的浓度, 这是由于在近岸一侧主要受控于闽浙沿岸流, 而外海海域主要受控于台湾暖流, 50m等深线为闽浙沿岸流和台湾暖流相互作用的交汇处, 受闽浙沿岸流和台湾暖流的共同影响。温度锋面与闽北附近海域内的泥质区对应关系较好, 温度锋面对悬浮体向外海扩散有明显的抑制作用, 温度锋面西北侧悬浮体浓度较高且沉积速率较高。

**关键词:** 悬浮体浓度; 输运通量; 季节变化; 闽北附近海域

**中图分类号:** X145      **文献标识码:** A

### Seasonal variations of suspended sediments in transport and flux in the coastal area of the northern Fujian Province

XUE Biying<sup>1</sup>, WANG Houjie<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong<sup>3,4</sup>, BI Shipu<sup>3,4</sup>, NING Ze<sup>1,3,4</sup>, HU Gang<sup>3,4</sup>

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technique, Ministry of Education, Qingdao 266100, China

2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

3. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266071, China

4. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

**Abstract:** Based on the simultaneous field observation along three transects off the coastal area of the northern Fujian Province in September and December of 2015, as well as the data of sea surface temperature acquired from MODIS, seasonal variations in suspended sediment concentration (SSC) and transport flux are examined. The results show that the nearshore SSC in winter is much higher than that in summer, and vertical mixing is obviously enhanced in winter due to the intensification of the winter-monsoon. The offshore SSC has low seasonal variability. Because of the strong wind and Min-Zhe coastal current in winter, the nearshore sediment transport flux is much higher than that offshore, and as the result, the sediment is transported southwestward in both summer and winter seasons. However, in the offshore area the sediment is transported northeastward in winter and southwestward in summer. At the stations around 50-m in depth there is no significant seasonal differences in both SSC and sediment flux observed. The distribution of thermal front derived from the sea surface temperature indicates that the interaction between Min-Zhe coastal current and Taiwan Warm Current will join and form a banded transition zone along the 50-m isobath. Facts show that the thermal front plays an important role in the tempo-spatial distribution.

**资助项目:** 国家自然科学基金项目“全新世以来长江远端三角洲的物质混合及其环境指示”(41676052); 中国地质调查项目(DD20160137, DD20160139)

**作者简介:** 薛碧颖(1992—), 女, 硕士研究生, 海洋地质专业, E-mail: starxbymoon@163.com

**通讯作者:** 张勇(1970—), 男, 博士, 教授级高工, 从事海洋地质研究, E-mail: qimgzy@163.com

**收稿日期:** 2017-04-17; **改回日期:** 2017-06-25.      文凤英编辑

bution pattern of SSC in the coastal area of the study area. It may constrain the cross-isobath transportation of suspended matter, as indicated by the higher SSC in the nearshore side of thermal front.

**Key words:** suspended sediment concentration; sediment flux; seasonal variation; coastal area in northern Fujian Province

东海是典型的宽广陆架海之一,地形平坦,浅水陆架区发育,外缘深度 130 ~ 150m,平均水深 350m,最深可达约 2700m,其总面积是渤海的 10 倍<sup>[1]</sup>。在东海沿岸有长江以及众多小型河流输入巨量泥沙,同时又受到北太平洋西边界流——黑潮及其分支台湾暖流的影响<sup>[2, 3]</sup>,充足的陆源沉积物供应和复杂的动力环境导致形成了典型泥质沉积区,即沿浙江和福建近岸分布的东海内陆架泥质区和济州岛西南侧的东海外陆架泥质区。东海内陆架泥质区又分为杭州湾以北的长江口泥质区和以南的闽浙沿岸泥质区,它是全新世以来形成的沉积中心<sup>[4, 5]</sup>,是东海的“沉积汇”<sup>[6]</sup>,在其形成过程与演化过程中保存了丰富的海洋环境变化信息,成为区域海洋环境演变和陆海相互作用(LOICZ)研究的重要信息载体。

闽北近岸海域位于闽浙沿岸泥质区南部,自 20 世纪 60 年代起,已开展包括水文气象、化学、生物和地质等学科的综合调查研究<sup>[7-9]</sup>。在闽浙泥质区的物质来源、沉积记录、古环境演化及沉积动力等方面取得了一系列的成果,指出闽浙沿岸泥质区的细粒沉积物中约有 85% 来自长江等沿岸河流供应<sup>[10]</sup>;根据地震剖面 and 岩心数据分析了沉积物的沉积特点并恢复了全新世中期以来闽浙沿岸泥质区的海洋古环境变化<sup>[11-13]</sup>;通过实测数据和数值模拟阐明了冬季

和夏季沉积物粒径和悬浮体浓度的分布情况,揭示了东海内陆架的跨锋面输运特征及其动力学机制<sup>[15-20]</sup>,还分析了台风对福建附近海域的影响<sup>[21]</sup>。上述调查研究多为范围较广的大面站调查与沉积记录的研究,或者是针对该区域沉积动力过程单一季节的研究,关于沉积动力过程季节性的差异对闽浙沿岸泥质区沉积物输运通量影响的研究相对较少。针对闽浙沿岸泥质区的沉积记录研究相对较多,但是由于缺乏现代沉积动力过程与沉积机制的深入认识,使得沉积记录的解释存在很大的不确定性。

本文利用 2015 年冬季和夏季在闽北近岸海域获得的悬浮体浓度和水文数据,结合 MODIS 卫星遥感反演海表温度,分析了不同季节悬浮体浓度与净单宽输运通量的变化特征,探讨沉积动力过程的季节性的差异对泥质区“源-汇”关系的影响,为泥质区的形成演化提供参考。

## 1 研究区概况

研究区域位于 26° ~ 27°N、120° ~ 121.5°E 之间,在闽浙泥质区的东南边缘处,主要分布在水深 70m 以浅的区域,近岸一侧站位水深约为 30m,离岸区域水深可达 90m(图 1)。该区域表层沉积物主

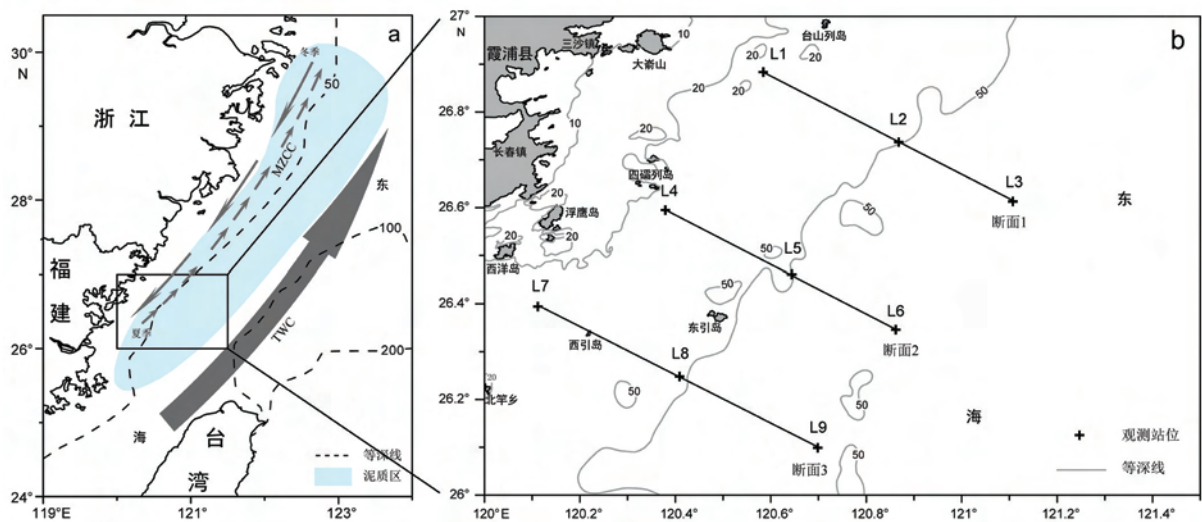


图 1 闽北近岸海域调查站位图

a: 水深地形图, 环流系统改绘自 Guan<sup>[29]</sup>, 泥质区改绘自 Liu 等<sup>[11]</sup>。MZCC: 闽浙沿岸流; TWC: 台湾暖流。b: 研究区域调查站位分布图

Fig.1 Locations of survey stations in coastal area of the northern Fujian Province

(a) Topography of the study area. Circulation system is modified after Guan (1994)<sup>[29]</sup>, and mud area is reproduced after Liu et al. (2010)<sup>[11]</sup>. MZCC: Min-Zhe Coastal Current; TWC: Taiwan Warm Current. (b) Detailed map of observation stations

要为褐灰色黏土和粉砂质黏土,平均粒径大于  $6.5\Phi$ ,研究表明近百年来平均沉积速率为  $0.79\text{cm/a}$ ,全新世以来沉积厚度仅为  $3\text{m}$  左右<sup>[1, 22]</sup>。该海域纬度相对较低,属于中亚热带季风湿润气候区,年均降雨量  $1100\sim 1800\text{mm}$ ,具有明显的季风气候特点,冬季以东北风为主,夏季西南风居多。冬季受东北季风持续作用,闽浙沿岸流(MZCC)沿岸自东北向西南流动,最大平均流速约为  $0.24\text{m/s}$ <sup>[23]</sup>,自北向南流幅逐渐变窄,流速增强<sup>[24]</sup>;夏季在偏南风作用下,沿岸流向东北流动,最大平均流速出现在平潭外海附近,约为  $0.40\text{m/s}$ <sup>[25]</sup>。台湾暖流(TWC)是作用于该区域外海的主要流系,终年向北流动,流速约为  $0.15\sim 0.40\text{m/s}$ <sup>[26]</sup>。研究区域的潮汐类型主要为正规半日潮,以  $M_2$  分潮为主,平均潮差大于  $4\text{m}$ ,近岸潮流表现为大致与等深线平行的往复流,外海潮流则呈现为逆时针方向的旋转流<sup>[27, 28]</sup>,潮流流速垂向分布表现为次表层流最大,其次为表层流,底层流速最小。

## 2 数据来源及方法

本文依托青岛海洋地质研究所“1:25万霞浦县幅海洋区域地质调查”项目,在研究区设置3条离岸断面(图1b),于2015年9月和12月分别在各个断面上进行了3船同步连续26小时观测,夏季观测时间(9.19~9.22)为小潮期间,冬季观测时间(12.11~12.14)为大潮期间,其中冬季L8站位在观测期间由于调查船发生故障而进行延测。

海流观测所用仪器为声学多普勒流速剖面仪,主要有挪威公司的 Nortek 系列(AWAC 和 Aquadopp)和美国公司的 RDI 和 RTI 系列,采样单元层厚度  $1\text{m}$ ,入水深度为  $0.5\sim 1.0\text{m}$ ,声学频率有  $300\text{kHz}$ 、 $600\text{kHz}$  和  $1\text{MHz}$ ,数据经后处理统一采样时间间隔为  $10\text{min}$ ;温度、盐度和水深观测使用温盐深仪(CTD),包括加拿大的 RBR,挪威的 SD204 和美国的 SeaBird 系列,测量间隔为  $2\text{h}$ ;水样采集仪器为卡盖式采水器,取  $0.2, 0.4, 0.6$  和  $0.8\text{H}$ ( $\text{H}$  为水深)4个层位的水样  $1000\text{mL}$ ,采样间隔为  $2\text{h}$ ;悬浮体浓度(SSC)数据通过水样抽滤实验获得,实验使用双层直径  $47\text{mm}$ 、孔径  $0.45\mu\text{m}$  的微孔醋酸纤维滤膜(下层滤膜用于校正),滤膜均用蒸馏水冲洗3次以上,抽滤完成后在  $60^\circ\text{C}$  温度下烘干  $24\text{h}$ ,用  $1/100000$  天平进行称重,根据沉积物质量和实际抽滤水样体积计算悬浮体浓度(单位:  $\text{mg/L}$ )。依据悬浮体浓度测试规范要求对 1008 个样品进行测试,悬浮体测试在国家海洋局第一海洋研究所海洋地质过程

与环境功能实验室完成,测试结果中有 2 个样品测得悬浮体浓度为负值,悬浮体浓度测试数据合格率为  $99.8\%$ ,数据质量符合要求。

MODIS 是搭载 Terra 和 Aqua 卫星上观测地球的 5 个传感器之一,其中 MOD28 为海表温度数据(Sea Surface Temperature, SST),数据产品为海洋 2 级和 3 级数据。本文所用海表温度数据为空间分辨率为  $4\text{km}$  的 3 级标准数据产品,数据来源于美国 NASA Ocean Color (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)。

## 3 结果

### 3.1 悬浮体分布

#### 3.1.1 悬浮体浓度的垂向变化

冬季,研究区悬浮体浓度为  $2\sim 35\text{mg/L}$ ,由近岸向外海浓度逐渐降低(图2)。近岸水体的悬浮体浓度普遍较高,尤其是 L7 站位底层水体悬浮体浓度最高可达到  $35\text{mg/L}$ (图2g),表明该站位水体受扰动发生局地再悬浮较明显。外海海域水体悬浮体浓度明显小于近岸,悬浮体浓度为  $2\sim 8\text{mg/L}$ ,其中浓度为  $2\sim 4\text{mg/L}$  的水体占据绝大部分。总体来看,表层悬浮体浓度低于底层悬浮体浓度。

盐度和温度由近岸向外海逐渐升高,近岸温盐约为  $16\sim 18^\circ\text{C}$ ,  $27\sim 30\text{PSU}$ ,中部海域约为  $18\sim 22^\circ\text{C}$ ,  $30.5\sim 33.8\text{PSU}$ ,深水海域约为  $22\sim 22.8^\circ\text{C}$ ,  $33.7\sim 34.3\text{PSU}$ ,由于温度的时间序列变化特征同盐度相似,故仅对盐度的时间序列特征进行分析。从盐度的垂向时间序列来看,冬季近岸海域水体盐度小于外海,是由于近岸区域受到河流淡水输入以及少量冲淡水等因素的影响,此外,近岸站位水体垂向混合作用较强,垂向混合所能影响到的水深接近站位水体底层,约  $29\text{m}$ 。单站位盐度的变化特征主要表现为,涨潮时盐度升高,落潮时盐度降低,表层水体盐度小于底层水体盐度,高潮平潮位时刻盐度达到最大值,在随后的落潮过程中,盐度逐渐降低。水体盐度变化显示出随潮流变化的周期性规律,近岸受潮流影响更大,周期性更为明显。

夏季水体悬浮体浓度整体偏低,为  $2\sim 11\text{mg/L}$ ,由近岸向外海浓度也逐渐降低(图3)。近岸悬浮体浓度最高约为  $11\text{mg/L}$ (图3g),外海海域悬浮体浓度略小于近岸,但与冬季外海悬浮体浓度相差不大。L4 和 L7 站位底层的高悬浮体浓度值出现在低潮时刻附近,与高盐时刻相对应(图3d, 3g)。

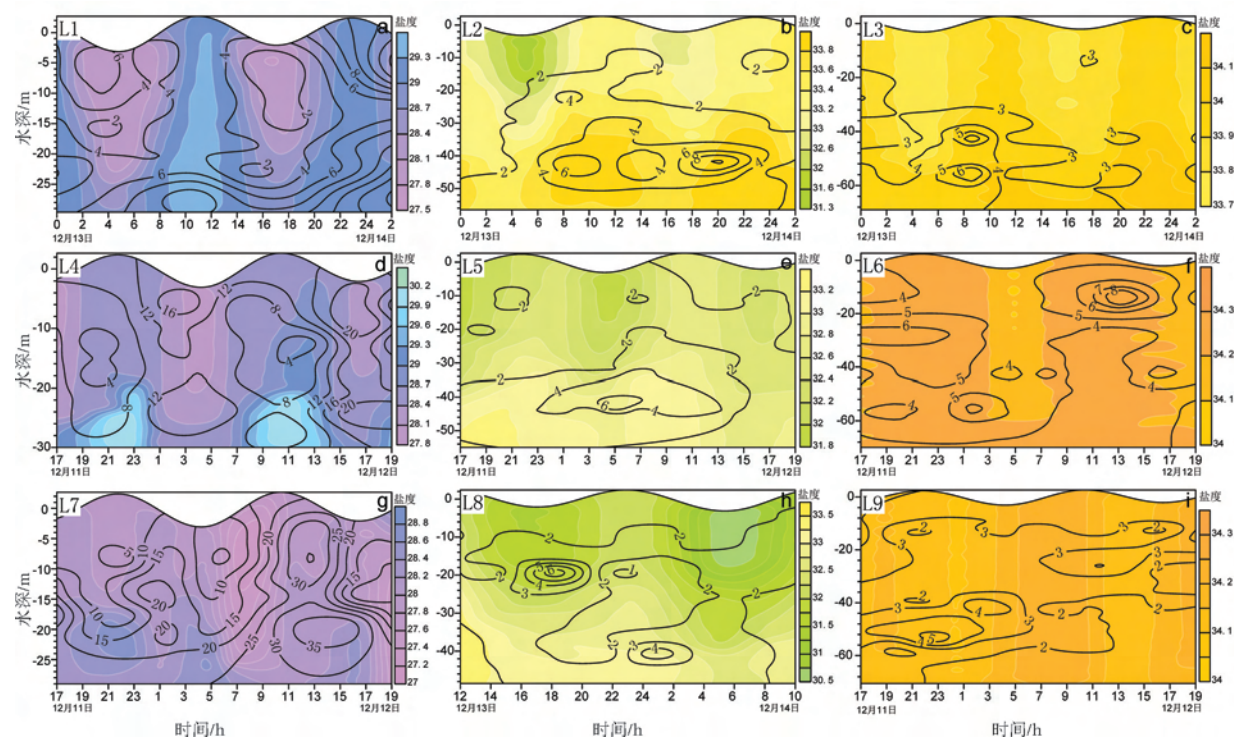


图 2 冬季各站位 SSC(黑色等值线,mg/L)和盐度(彩色等值线,PSU)时间序列图

Fig.2 Vertical variations in SSC (in black, mg/L) and salinity (in color, PSU) at each station in winter

夏季,盐度和表层水体温度由近岸向外海逐渐升高,近岸盐度约为 28.7~30.8 PSU,中部海域约为 29.2~34.3 PSU,深水海域约为 32.9~34.4 PSU,表层水体温度由近海的 25.5℃ 升高到外海的 26.2℃,而中下层水体温度则由近海的 26℃ 降低到

外海的 23.5℃。夏季近岸站位相同水深的盐度要略高于冬季时的盐度,例如 L1 站位夏季落潮平潮时刻盐度约为 28.1~28.2 PSU,高于冬季同时刻的 27.8~28.1 PSU(图 2a,3a)。夏季近岸海域水体的垂向混合所能影响到的水深小于冬季,约为 20m。

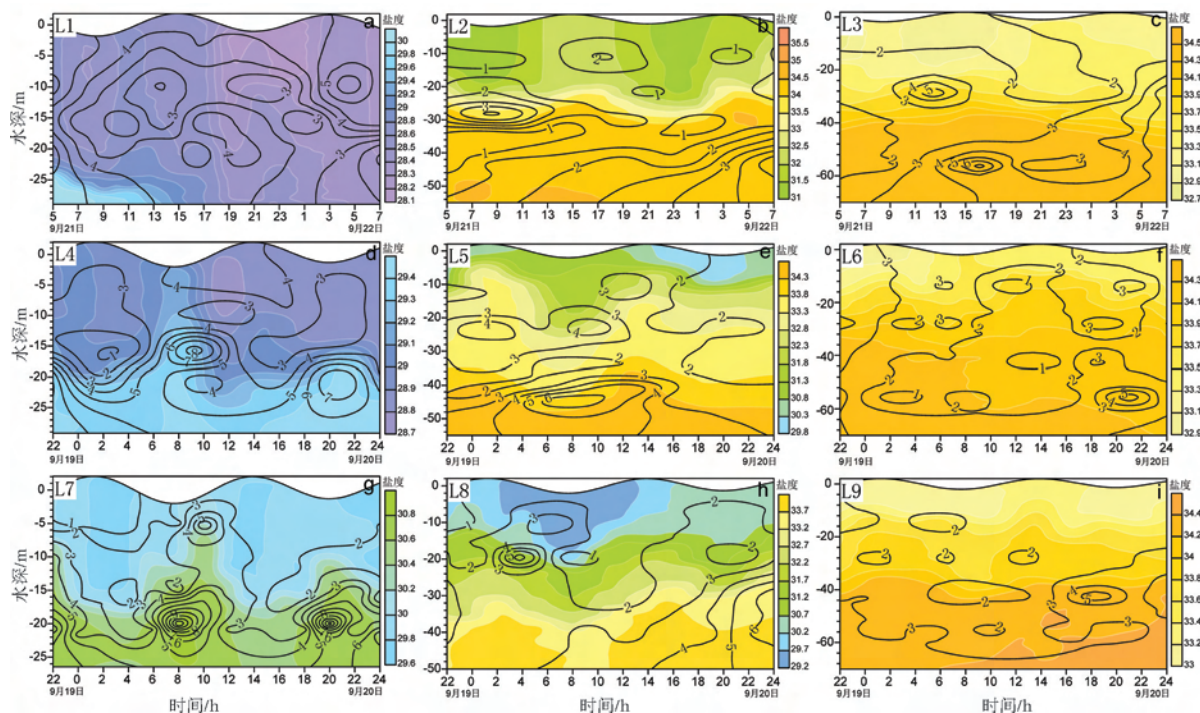


图 3 夏季各站位 SSC(黑色等值线,mg/L)和盐度(彩色等值线,PSU)时间序列图

Fig.3 Vertical variations in SSC (in black, mg/L) and salinity (in color, PSU) at each station in summer

外海海域中部盐度出现明显的层化现象,水深范围在 30~40m 左右,40m 水深以下水体盐度较为均一稳定,基本维持在 34 PSU 左右,盐度也显示出随潮流变化的周期性规律。

### 3.1.2 悬浮体浓度的水平分布

箱线图是用一组数据中的最小值、第一四分位数、中位数、第三四分位数和最大值这 5 个特征值来反映该组数据分布的中心位置和分散程度,可以体现出数据的集中性、分散性和极端分布情况<sup>[30]</sup>。

图 4 为冬季和夏季连续观测 26 h 期间各个站位的悬浮体浓度的统计图。总体上来看,近岸海域站位悬浮体浓度的分布区间及中位数的值均高于外海海域站位,表明近岸海域水体悬浮体浓度高于外海海域。从季节特征上看,冬季近海海域站位浓度的分布区间值大于夏季近海,表明冬季近海海域水体悬浮体浓度高于夏季。冬季, L1、L4 和 L7 站位箱体较长且最大值偏离箱体较远(图 4a, 4c, 4e),说明悬浮体浓度在近岸波动范围较大,由于近岸水浅,

易造成水体扰动发生再悬浮。外海海域悬浮体浓度波动范围小,浓度基本保持在 2~4mg/L。夏季,悬浮体浓度数据较为集中,中位数基本位于箱体中间,对称性较好,悬浮体浓度普遍较低,数据主要集中在 2~4mg/L 之间。无论冬季还是夏季 3 条断面中间站位的悬浮体浓度(图 4 灰色区域)均低于两侧站位的浓度,呈现出马鞍形的分布特征。

### 3.2 悬浮体输运通量

根据净单宽输运通量公式<sup>[31]</sup>计算冬季和夏季 9 个站位 26 h(两个潮周期)的悬浮体输运通量,公式如下:

$$F_{ui/vi} = U_i/V_i \cdot SSC_i \cdot \Delta h_i$$

$$F = F_u + F_v = \sum_{i=1}^{26} F_{ui} + \sum_{i=1}^{26} F_{vi}$$

其中,  $i$  为时间序列,  $U_i$  和  $V_i$  为实测流速在东西向和南北向上的流速值(m/s),  $SSC_i$  为悬浮体浓度值(mg/L),  $\Delta h_i$  为对应层位的厚度(m),  $F_{ui}$  和  $F_{vi}$  为东西向和南北向的净单宽输运通量,  $F$  为 26 h 内矢量合成的总净单宽输运通量(g/m/s)。

冬季,由近岸向外海悬浮体总净单宽输运通量减小(图 5a)。近岸站位悬浮体的总净单宽输运通量较高,大致沿岸由东北向西南输运, L4 和 L7 站位的输运通量在 50g/m/s 左右, L1 站位输运通量为 28.7g/m/s。外海 6 个站位的输运通量均小于近岸站位,最北侧断面 1 外海站位的输运通量较小,约为 3~5g/m/s(约为 L1 站通量的 10%),断面 2 和断面 3 外海站位的输运通量基本略大于 10g/m/s。这一分布显示冬季闽北附近海域悬浮体输运总体趋势为由东北向西南方向输送,输运通量由近岸向外海逐渐减小。

夏季各站位悬浮体总净单宽输运通量与冬季的分布明显不同,主要表现为近岸海域站位与深水海域站位的净单宽输运通量大小与运移方向的不同(图 5b)。近岸站位输运通量相比于冬季显著减少,尤其是 L4 和 L7 站位的输运通量仅为冬季的 6% 左右。而 L1 站位冬、夏季的输运通量相差不大,推测 L1 站沉积物输运可能受其东北方向台山列岛的影响。中部海域站位的输运通量与冬季相比基本变化不大。深水站位的输运通量同冬季相比显著增加,且输送方向指向北或西北方向,与台湾暖流的方向基本一致。上述分布特征表明夏季闽北近岸海域悬浮体传输方向与冬季一致,但输运通量显著减小;而深水海域悬浮体运移方向指向东北,与台湾暖流方向一致,输运通量明显大于冬季。

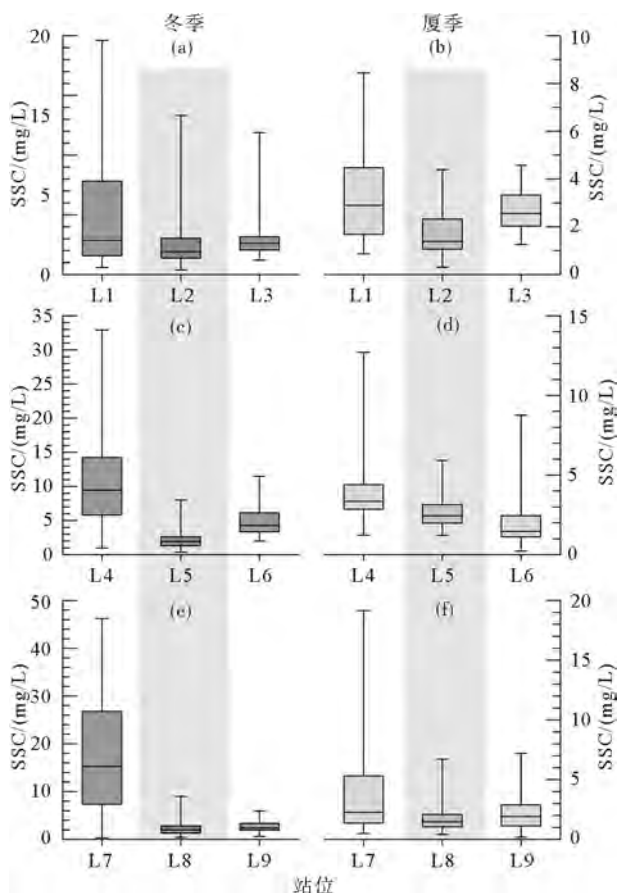


图 4 冬季和夏季连续观测 26 h 期间各个站位悬浮体浓度箱线图

Fig.4 Box-whisker plots of SSC during 26 hours at each station in winter and summer

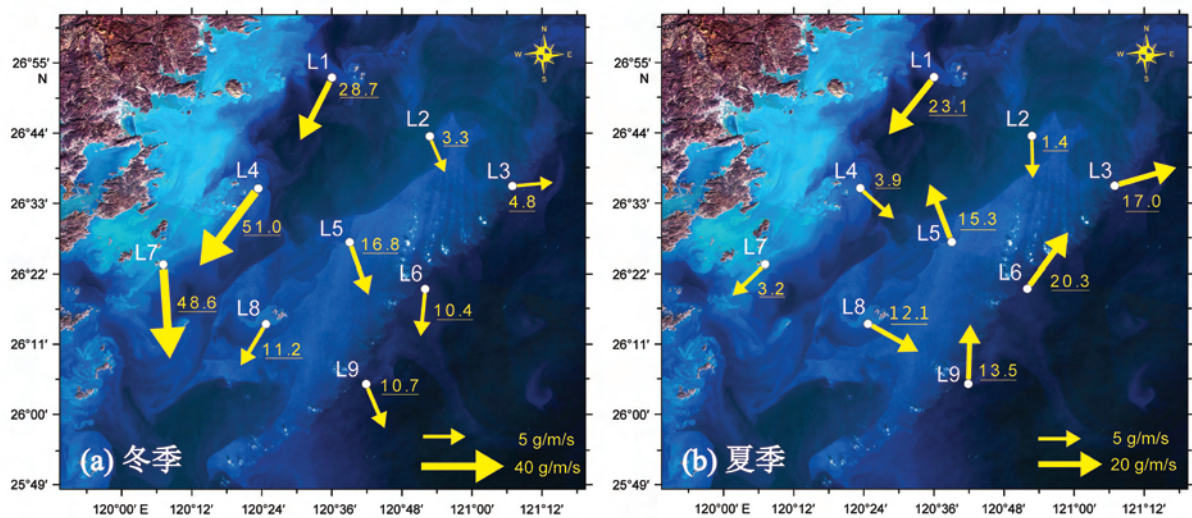


图 5 各站位观测 26 h 悬浮体净单宽输运通量(黄色加下划线数字为输运通量大小,Landsat 卫星影像日期为 2013 年 12 月 3 日)

Fig.5 Sediment fluxes at 9 stations based on 26 hours measurements

(The flux magnitudes are indicated by the yellow numbers underlined, the LANDSAT image was acquired on Dec 3, 2013)

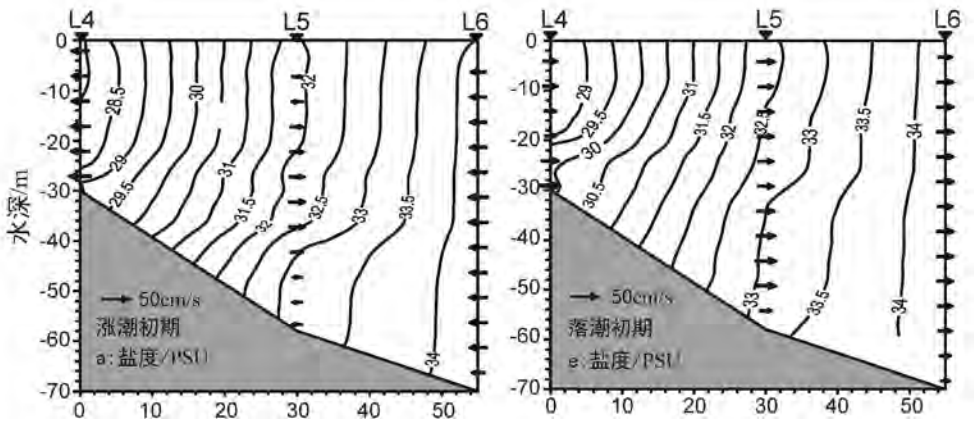
4 讨论

4.1 动力机制分析

闽北附近海域具有明显的季风气候特点。冬季多为强劲的东北偏北风,对水体扰动强烈,水体垂向混合程度较高(图 6),落潮初期(高潮时刻附近)水体混合程度强于涨潮初期(低潮时刻附近)。近岸海域易发生沉积物再悬浮,悬浮体浓度波动范围较大,浓度值明显高于外海。夏季则以西南季风为主,西南风频率超过 30% [33],但风力较弱,对水体扰动作用小,故近岸悬浮体浓度小于冬季,近岸悬浮体浓度最高约为 8mg/L,外海海域水深较大,水体结构稳定,冬、夏季悬浮体浓度相差不大,其中浓度为 2~4mg/L 的水体占据绝大部分。同时夏季由于太阳辐射影响,水体温度升高,盐度降低,密度减小,形成

稳定层,不利于表层水体的热量向下输送,外海海域水体在水深约 30~40m 范围内形成温跃层(图 7b, 7f),同时伴有盐度跃层和密度跃层,跃层的水深范围也伴随着涨、落潮上升和下移,跃层上下层水体较为稳定,变幅较小。近岸站位较易受到沿岸水体扰动,水体层化较弱。

闽浙沿岸流和台湾暖流是该研究区环流系统的主要组成部分。冬季,闽浙沿岸流在东北风驱动下,沿岸向西南方向流动,使得近岸悬浮体的输送方向总体指向西南(图 5),同时,由近岸向外海输运通量快速减小。夏季,受西南季风的影响闽浙沿岸流指向东北,而台湾暖流也终年向北流动,其夏季强度大于冬季[34],故夏季深水海域站位的悬浮体输运通量略大于近岸站位,且输送方向指向东北。尽管夏季闽浙沿岸流流向东北方向,但近岸海域的输送方向却总体指向南,这是因为航次现场观测的时间较短,所计算的输运通量在近岸主要受潮流影响。



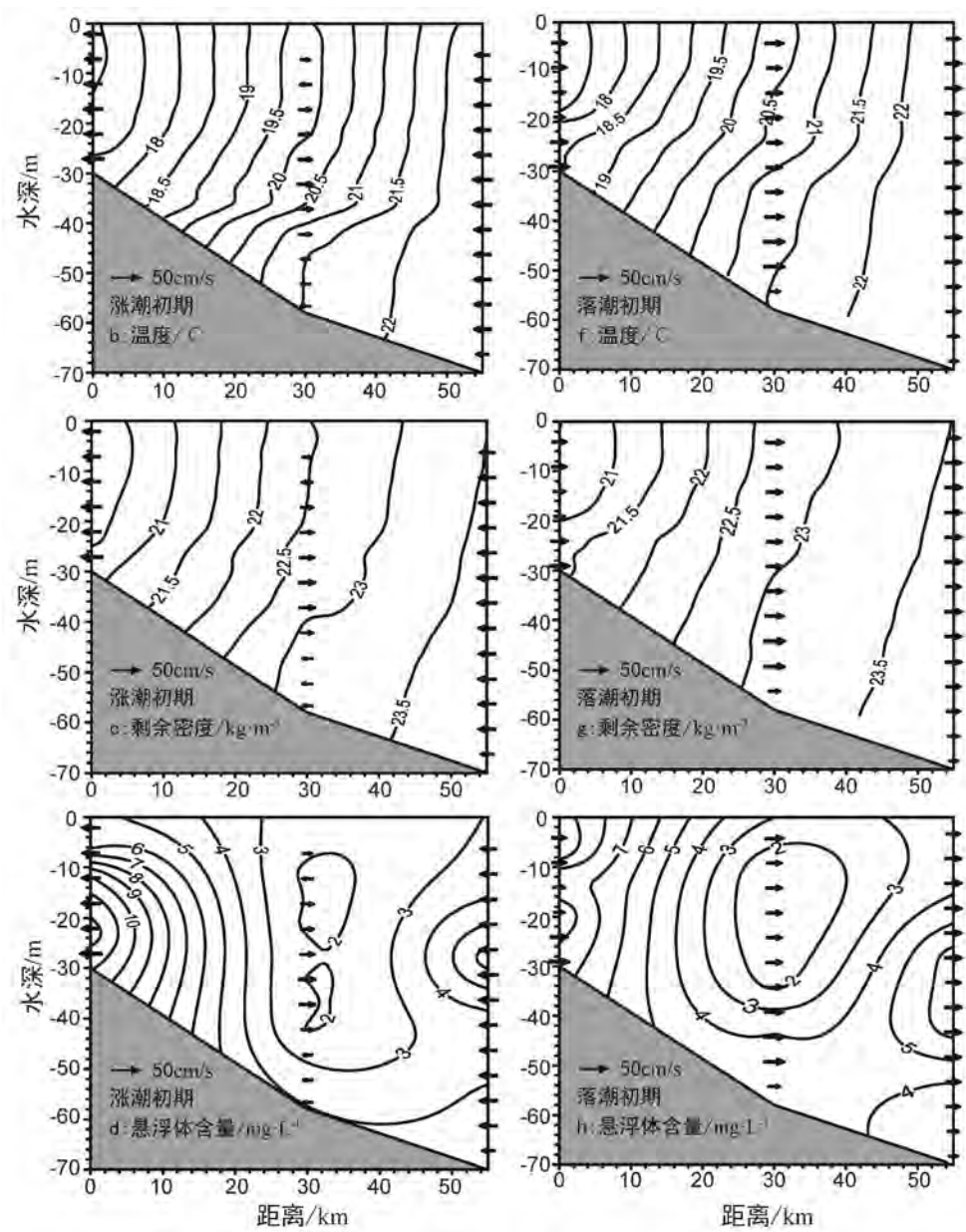
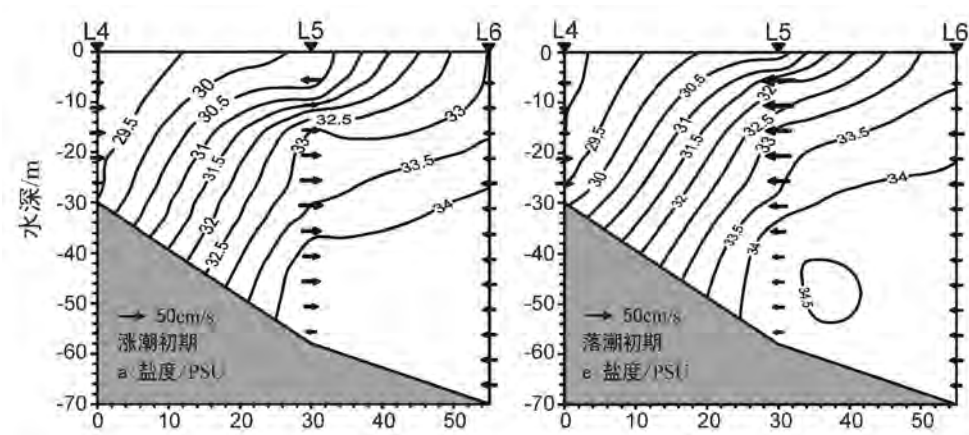


图 6 冬季断面 2 涨落潮初期水文要素剖面特征

Fig.6 Distributions of salinity, temperature, sigma-t and SSC along transect 2 during flood and ebb tides in winter



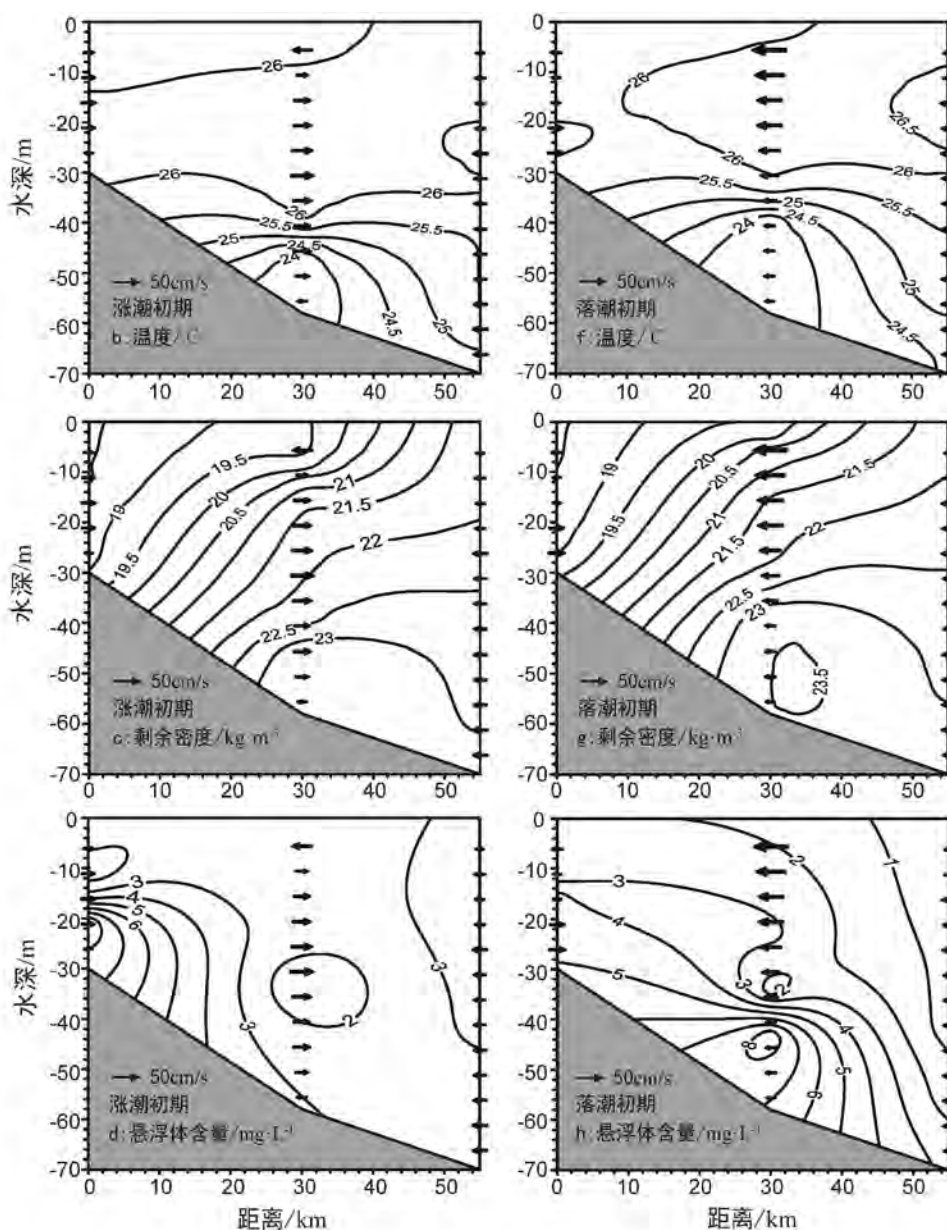


图 7 夏季断面 2 涨落潮初期水文要素剖面特征

Fig.7 Distributions of salinity, temperature, sigma-t and SSC along transect 2 during flood and ebb tides in summer

#### 4.2 温度锋面对泥质区的影响

由于实际观测站位较少且分散,不易反映出闽北附近海域的温度平面分布特征,故通过 MODIS Aqua 卫星遥感获取的海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 来反映海区温度空间分布情况。由于遥感数据易受到云层覆盖的影响造成温度偏差,选取 2015 年冬季 (12 月 10 日) 和夏季 (9 月 23 日) 较清晰无云层遮挡的海表温度数据,与 2015 年冬、夏季各站位实际观测资料进行比对 (相差 1~2 天),卫星遥感获得的海表温度与实测海表温度存在较好

的一致性 ( $R^2=0.97$ ,  $N=25$ ), 因此, 可以通过卫星遥感数据来反映研究区海表温度的季节分布特征。

闽北附近海域海表温度冬季明显低于夏季 (图 8), 冬季温度约为  $16\sim 23^\circ\text{C}$ , 夏季受太阳辐射影响温度约为  $25\sim 29^\circ\text{C}$ 。冬季, 海表温度由近岸  $17^\circ\text{C}$  左右递增到外海  $22^\circ\text{C}$  左右。 $18\sim 21^\circ\text{C}$  之间等温线较为密集, 指示温度梯度较高, 等温线分布与海岸线延伸方向基本一致, 为东北-西南向。夏季, 靠海岸的浅水区域 ( $<10\text{m}$ ) 受太阳辐射影响升温快<sup>[32]</sup>, 其海表温度高于  $27^\circ\text{C}$ , 等温线分布总体较为均匀。

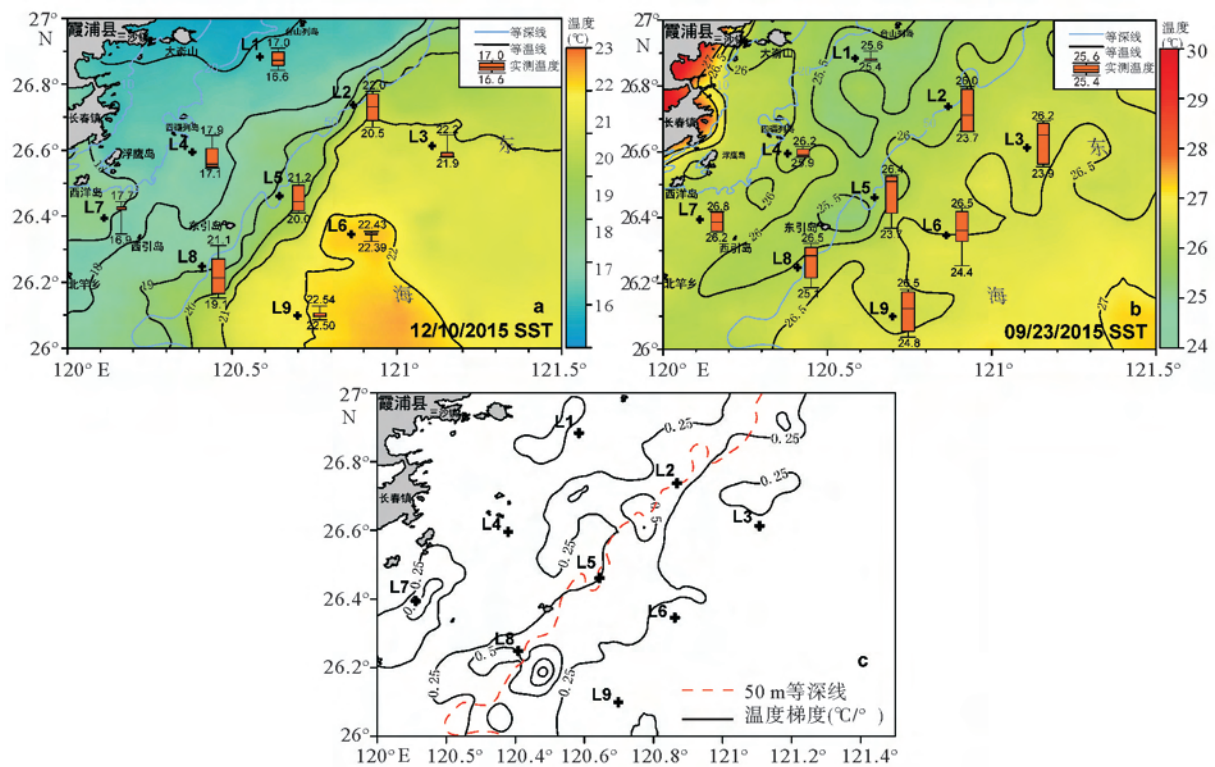


图 8 闽北附近海域卫星遥感海表温度

a: 冬季-2015 年 12 月 10 日, b: 夏季-2015 年 9 月 23 日; 橙色箱须图为该站位 26 h 观测期间温度的统计值, 包括最大/小值,

第一/三四分位数和中位数, c: 卫星遥感海表温度梯度, 2015 年 12 月 10 日

Fig.8 Satellite data of sea surface temperature in the study area

a: winter-December 10, 2015, spatial resolution is 4 km, b: summer-September 23, 2015, spatial resolution is 4 km; the orange

box-whisker plots are statistical parameters, including the maximum/minimum, 25th/75th percentiles and medians, during the investigation,

c: horizontal gradient of sea surface temperature derived from MODIS remote sensing data (December 10, 2015)

台湾暖流以西为低盐的闽浙沿岸流,二者交汇处一般存在着梯度较大的锋面<sup>[35]</sup>。根据卫星遥感海表温度计算的冬季温度梯度(图 8c),温度梯度最大值的分布与 50m 等深线延伸方向基本保持一致,表明 50m 等深线附近为台湾暖流与闽浙沿岸流共同作用的区域,这与前人的研究结果一致,曾定勇等<sup>[23]</sup>研究结果表明冬季闽浙沿岸流主要分布在 50m 等深线向岸一侧,在表层可扩展到 60m 等深线附近。Liu 等<sup>[36]</sup>认为锋面在垂向上呈倾斜分布,锋面底层水体主要位于 50m 等深线处,锋面由底至表向外海倾斜。因此,台湾暖流的西边界主要沿 50m 等深线分布,50m 等深线以西主要以闽浙沿岸流为主,而 50m 等深线附近则受到二者的共同影响。冬季高浓度悬浮体最远向外海扩散至水深约为 56m 的 L5 站位(图 6),表明了闽浙沿岸流的扩展范围可达到 50m 等深线附近。夏季,闽浙沿岸流向岸收缩,台湾暖流主轴向岸扩展<sup>[37]</sup>,从水文要素剖面特征可看出,台湾暖流底层水体最远涌升距离可达到位于 50m 等深线偏西侧 4~8 km 处(图 7),相比于

冬季,锋面位置向西侧略有偏移。冬季,由于 L2、L5 和 L8 站位位于 50m 等深线附近,是沿岸流和台湾暖流的交汇处,即过渡区域,水动力条件较弱,而夏季尽管温度锋面位置向西移动,但移动距离较小,中部海域站位仍位于二者交汇处,所以悬浮体浓度分布呈马鞍形特征,即每条断面中间站位的悬浮体浓度低于两侧站位浓度,且冬夏季的输运通量基本变化不大,仅近岸和深水海域存在较为显著的差异。总体而言,闽浙泥质区南部的沉积动力环境在近岸一侧主要受控于闽浙沿岸流,外海海域主要受控于台湾暖流,50m 等深线所在条带状海域位于过渡区,受闽浙沿岸流和台湾暖流的共同影响。

研究区域内的泥质区沉积速率同温度锋面的平面分布具有较好的对应关系(图 9)。冬季季风活动显著,泥质区内悬浮体供应充足,悬浮体输运通量较高,是悬浮体搬运和沉积的主要季节,大量沉积物随着闽浙沿岸流向西南方向输运,最远可扩展到 50~60m 等深线附近,即温度锋面,由于温度锋面西北侧沉积物供应充足,故泥质区沉积速率较高,大于

1.5 cm/a,而温度锋面东南侧悬浮沉积物质少,沉积速率则小于1.5 cm/a。夏季,悬浮体浓度普遍较低,使得该区域缺乏沉积物物源,沉积作用小于冬季。

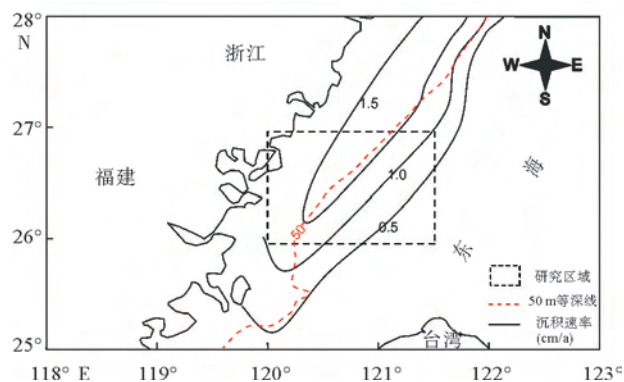


图9 研究区域沉积速率分布图(改绘自Liu等<sup>[12]</sup>)

Fig.9 Distribution of the sedimentation rate (cm/a) in the study area

## 5 结论

(1) 闽北近岸海域悬浮体浓度存在明显的季节性变化,冬季的季风活动对水体扰动强烈,水体垂向混合增强,近岸区域易发生沉积物再悬浮,悬浮体浓度波动范围较大,浓度值明显高于外海;夏季,由于风力减弱,近岸悬浮体浓度偏低。而对于外海海域来说,冬、夏季悬浮体浓度相差不大。

(2) 闽北附近海域输运通量计算结果表明,在冬季,沿岸水体受东北季风和闽浙沿岸流影响,悬浮体运移总体趋势为由东北向西南方向输送,输运通量由近岸向外海逐渐减小;夏季,闽北近岸海域悬浮体传输方向与冬季一致,但输运通量显著减小;深水海域悬浮体运移方向指向东北,与台湾暖流方向一致,输运通量明显大于冬季。

(3) 闽浙泥质区南部的沉积动力环境在近岸一侧主要受控于闽浙沿岸流,外海海域主要受控于台湾暖流,50m等深线为闽浙沿岸流和台湾暖流相互作用的交汇处,受闽浙沿岸流和台湾暖流的共同影响。

(4) 温度锋面对闽北附近海域悬浮体分布的时空变化有重要影响,温度锋面对悬浮体向外海扩散有明显的抑制作用,温度锋面西北侧悬浮体浓度较高且沉积速率较高。

## 参考文献 (References)

[1] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等. 东海地质[M]. 北京:科学出版社,1987. [QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong, et al.

Geology of the East China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1987.]

- [2] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/Tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers [J]. The Journal of Geology, 1992, 100 (5): 525-544.
- [3] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. 海洋学报, 2001 (4): 1-16. [SU Jilan. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001 (4): 1-16.]
- [4] Milliman J D, Qin Y S, Park Y A. Sediments and sedimentary processes in the Yellow and East China Seas[C]//Sedimentary Facies in the Active Plate Margin, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 1989: 233-249.
- [5] Demaster D J, McKee B A, Nittrouer C A, et al. Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 1985, 4 (1): 143-158.
- [6] Yang Z, Saito Y, Guo Z, et al. Distal mud area as a material sink in the East China Sea[C]// Proceedings of International Symposium on Global Fluxes of Carbon and Its Related Substances in the Coastal Sea-ocean Atmosphere System, Sapporo, (Japan) Hokkaido University, 1994: 1-6.
- [7] 全国海岸带和海涂资源综合调查成果编委会. 中国海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京:海洋出版社, 1991. [Editorial Committee of Chinese Coastal Zone and Tidal Flat Resources. Comprehensive Investigation of the Coastal Zone and Tidal Flat Resources in China [M]. Beijing: China Ocean Press, 1991.]
- [8] 严恺,梁其荀. 中国海岸带综合调查初步成果[J]. 水道港口, 1990(1): 1-9. [YAN Kai, LIANG Qixun. Preliminary achievements in the comprehensive survey of the coastal zone in China [J]. Journal of Waterway and Harbor, 1990(1): 1-9.]
- [9] 国家海洋局. 我国近海海洋综合调查与评价专项综合报告[M]. 北京:海洋出版社, 2012. [State Oceanic Administration. Comprehensive Investigation and Assessment in Offshore of China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.]
- [10] 肖尚斌,李安春,刘卫国,等. 闽浙沿岸泥质沉积的物源分析[J]. 自然科学进展, 2009, 19(2): 185-191. [XIAO Shangbin, LI Anchun, LIU Weiguo, et al. Provenance analysis of coastal Fujian and Zhejiang mud sediments[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(2): 185-191.]
- [11] Liu S, Shi X, Liu Y, et al. Records of the East Asian winter monsoon from the mud area on the inner shelf of the East China Sea since the mid-Holocene[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(21): 2306-2314.
- [12] Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(17-18): 2141-2156.
- [13] Liu J P, Liu C S, Xu K H, et al. Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait[J].

- Marine Geology, 2008, 256(1-4): 65-76.
- [15] Liu S, Qiao L, Li G, et al. Distribution and cross-front transport of suspended particulate matter over the inner shelf of the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2015, 107: 92-102.
- [16] Li F, Li P, Zhang X R, et al. Transport of suspended matter from the Changjiang River to the East China Sea shelf[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1997, 15(3): 264-270.
- [17] Yanagi T, Takahashi S, Hoshika A, et al. Seasonal variation in the transport of suspended matter in the East China Sea[J]. Journal of Oceanography, 1996, 52(5): 539-552.
- [18] 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.
- [19] Bian C, Jiang W, 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.
- [20] Bian C, Jiang W, Greatbatch R J, et al. The suspended sediment concentration distribution in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Ocean University of China, 2013, 12(3): 345-354.
- [21] Li Y, Li H, Qiao L, et al. Storm deposition layer on the Fujian coast generated by Typhoon Saola (2012)[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14904.
- [22] 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010(4): 19-30. [SHI Xuefa, LIU Shengfa, QIAO Shuqing, et al. Depositional features and palaeoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe coastal mud area, East China sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010(4): 19-30.]
- [23] 曾定勇, 倪晓波, 黄大吉. 冬季浙闽沿岸流与台湾暖流在浙南海域的时空变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2012(7): 1123-1134. [ZENG Dingyong, NI Xiaobo, HUANG Daji. Temporal and spatial variability of the ZheMin Coastal Current and the Taiwan Warm Current in winter in the southern Zhejiang coastal sea(in Chinese)[J]. Scientia Sinica Terrae, 2012(7): 1123-1134.]
- [24] 刘兴泉, 尹宝树, 侯一筠. 长江口及其邻近海区环流和温、盐结构动力学研究 II. 环流的基本特征[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(4): 312-320. [LIU Xingquan, YIN Baoshu, HOU Yiyun. The dynamic of circulation and temperature-salinity structure in the Changjiang mouth and its adjacent marine area[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2008, 39(4): 312-320.]
- [25] 万小芳, 潘爱军, 郭小钢, 等. 台湾海峡西侧水动力环境的季节变化特征[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(2): 156-163. [WAN Xiaofang, PAN Aijun, GUO Xiaogang, et al. Seasonal variation features of the hydrodynamic environment in the western Taiwan Strait[J]. Journal of Applied Oceanography, 2013, 32(2): 156-163.]
- [26] 管秉贤. 东海海流系统概述[C]//东海大陆架论文集. 青岛: 中国科学研究院海洋研究所, 1978: 126-133. [GUAN Bingxian. A summary of current system in the East China Sea [C]//Thesis of Continental Shelf in East China. Qingdao: Institute of Oceanology, China Academy of Sciences, 1978: 126-183.]
- [27] 董胜, 孔令双. 海洋工程环境概论[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005. [DONG Sheng, KONG Lingshuang. Conspectus on Ocean Engineering Environment[M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2005.]
- [28] 江甘兴. 福建海区的潮汐和潮流[J]. 台湾海峡, 1992(2): 89-94. [JIANG Ganxing. Tides and tidal currents in Fujian waters[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1992(2): 89-94.]
- [29] Guan B. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas[C]// Oceanology of China Seas. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994: 17-26.
- [30] 朱兵. 箱线图及其在 JCR 网络版中的应用[J]. 农业图书情报学刊, 2011, 23(8): 15-18. [ZHU Bing. Box Plot and its application in JCR web[J]. Journal of Library and Information Sciences in Agriculture, 2011, 23(8): 15-18.]
- [31] Wang H, Yang Z, Li Y, et al. Dispersal pattern of suspended sediment in the shear frontal zone off the Huanghe (Yellow River) mouth[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(6): 854-871.
- [32] 孙湘平. 中国沿岸海洋水文气象概况[M]. 北京: 科学出版社, 1981. [SUN Xiangping. General Situation of the Ocean Hydrometeor Along the Coast of China[M]. Beijing: Science Press, 1981.]
- [33] 张衡. 冬季黄海东海环流和长江冲淡水扩展[D]. 上海: 华东师范大学, 2004. [ZHANG Heng. The expansion of Changjiang diluted water and circulation in the Yellow Sea and East China Sea[D]. Shanghai: East China Normal University, 2004.]
- [34] 毕乃双. 黄河三角洲毗邻海域悬浮泥沙扩散和季节性变化及冲淤效应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. [BI Naishuang. Suspended sediment dispersal off the Huanghe (Yellow River) delta and in its adjacent Bohai Sea, its seasonal variation and effect on the delta erosion-accumulation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.]
- [35] 王从敏, 翁学传. 台湾海峡水运移路径的分析[J]. 海洋科学, 1987(3): 1-5. [WANG Congmin, WENG Xuechuan. An analysis of moving route of the Taiwan Strait water[J]. Marine Science, 1987(3): 1-5.]
- [36] Liu S, Qiao L, Li G, et al. Distribution and cross-front transport of suspended particulate matter over the inner shelf of the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2015, 107: 92-102.
- [37] 张志欣. 中国近海沿岸流及毗邻流系的观测与分析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. [ZHANG Zhixin. Observation and analysis of the coastal current and its adjacent current system in the China offshore waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.]