文章编号:1009-2722(2015)07-0001-10

黄海近岸锋面的时空变化及其 对沉积物输运和沉积的影响

藏政晨^{1,3},王厚杰^{1,2*},薛 佐³,毕乃双¹,吴 晓¹,张 勇⁴

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院,青岛 266100;2 海底科学与探测技术教育部重点实验室,青岛 266100; 3 美国路易斯安那州立大学,Baton Rouge, LA 70803, USA;4 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266071)

摘 要:利用 2010 和 2012 年黄海海域不同季节的航次观测数据与 HYCOM 模式再分析 数据进行了比对,检验了 HYCOM 模式的水体温度数据在黄海海域的适用性。据此分析 了黄海海域的温度锋面和混合锋面的时空变化。结果显示,温度锋通常在秋季开始出现, 在冬季最为发育,在春季逐渐消失;黄海混合锋面与季风活动密切相关,主要在秋季开始 出现,在冬季发育。悬浮沉积物基本上集中在温度锋的向岸一侧,难以跨越锋面输运。山 东半岛成山头海域的温度锋在形态及空间位置上与泥质沉积区相对应,沉积中心(厚度 40 m)主要分布在温度锋的西侧,而在其东侧泥质沉积厚度快速减小。研究结果发现,秋 冬季节混合锋与温度锋的空间位置并不一致,混合锋位于温度锋的西侧,强烈混合使得沉 积物不易沉降,对应泥质沉积厚度小;而在混合锋东侧,悬浮沉积物浓度高且水体层化显 著,沉积物易于沉降堆积,与泥质沉积中心对应。混合锋与温度锋的空间分布差异与共同 作用可能是该区域泥质沉积体"Ω"形态发育的动力学机制。 关键词:黄海;HYCOM 模式;沉积物输运;温度锋;混合锋;泥质沉积区

中图分类号:P736 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2015.07001

河流是陆源物质向海洋输送的重要通 道^[1,2]。据 Milliman 和 Syvitski^[3]估算,陆地通 过河流输送到海洋中的沉积物通量每年高达 200 亿 t。入海沉积物大部分在三角洲区域沉积,细 颗粒沉积物随海流扩散至离岸较远的海域堆积。 作为陆源物质的汇和扩散至深海的沉积物质的 源^[4-6],陆架上河流入海沉积物的扩散与沉积过程 是研究大河物质源汇过程的关键之一。

基金项目:国家自然科学基金(41376096,41476069,41376079)

作者简介:藏政晨(1989一),男,在读硕士,主要从事海洋沉积方面的研究工作.E-mail:zzangl@tigers.lsu.edu

* 通讯作者:王厚杰(1970一),男,博士,教授,主要从事近海 沉积动力学方面的研究工作. E-mail: hjwang@ouc.edu.cn

黄海是中国东部陆架海的重要组成部分,沉 积物来源复杂,黄海既是陆源沉积物的汇,也是向 外海输运的沉积物的源,因而在东中国海沉积物 输运格局中具有重要的意义。卫星遥感资料显 示,从渤海莱州湾内通过渤海海峡南端延伸至北 黄海的近岸区域存在一条明显的浑浊带,其在一 定程度上指示了渤海沉积物向黄海运输的主要路 径^[7+9]。渤海物质向黄海输送具有显著的季节性 变化,冬季是主要的输运季节^[4+10,11]。Yang 和 Liu^[5]通过大量的高分辨率浅地层剖面记录揭示 了在山东半岛东北沿岸海域存在着一个"Ω"型的 泥质沉积带,其空间分布形态与卫星遥感指示的 悬浮体由渤海向北黄海输运的路径基本一致。

关于黄海悬浮体的时空分布,秦蕴珊等^[12,13] 在 20 世纪 80 年代开展了一系列的研究,提出海

收稿日期:2014-03-24

底沉积物的再悬浮是黄海悬浮体的主要来源,水 动力因素对悬浮体分布有较大影响;赵一阳等^[14] 根据 1996 年 6—7 月中韩南黄海联合调查航次的 观测资料,认为黄海底层悬浮体浓度会受到大风 等极端天气事件的影响而升高,风暴会导致细颗 粒沉积物发生强烈的再悬浮,作用水深可达 50~ 90 m;鲍献文等^[15]的研究结果表明夏、冬两季山 东半岛北部沿岸和成山头海域为悬浮体浓度高值 区。

前人对黄海海域锋面已进行了大量研究。赵 宝仁[16,17] 通过计算辛普森一亨特参数并结合卫 星数据及前人研究结果得出了黄海海域夏季温度 锋面的空间分布特征;刘传玉等[18]认为东中国海 温度锋面主要出现在冬季,山东半岛南部的锋面 在11月中旬开始形成,至次年2月中旬减弱;刘 先炳等[19]研究了某些沿岸锋面的形成过程后提 出沿岸锋面与上升流之间有密切的关系;王锡候 等^[20]通过大面站准同步观测数据分析了夏季黄 海海域水团锋面的特征; 刘丽萍^[21]利用 HAM-SOM 模式对黄海冬季锋面进行了三维数值模拟, 认为冬季青岛一荣成一烟台外海温度锋面强度大 且锋面的时空变化特征明显;王勇智等[22]分析了 成山头外海在强海流切变峰作用下悬浮体的输运 和沉积特征,提出冬季山东半岛东部沿岸存在的 强海流切变锋可抑制悬浮体向海的扩散,这有利 于山东半岛东端"Ω"型泥质沉积体的形成。

前人的研究主要集中于黄海悬浮体输运的季 节性变化与锋面季节变化特征,关于锋面对悬浮 体输运及沉积过程影响的研究相对较少。因此, 本文基于 HYCOM 数值模拟结果,研究了黄海温 度锋和混合锋面的时空变化,结合不同季节悬浮 体空间分布,探讨了黄海近岸锋面过程对悬浮体 输运及沉积过程的影响。

1 区域概况

黄海位于中国大陆和朝鲜半岛之间,西侧与 渤海通过渤海海峡相互连接,南侧与东海相邻,其 界线为韩国济州岛和长江口北角启东嘴连线。黄 海分为南黄海与北黄海,其界线为山东半岛东端 成山头和朝鲜半岛常山串联线。黄海海槽为黄海 的中轴线,也是全新世海水向北流动的主要通道, 存在"南深北浅、东陡西缓"的地形特征[23]。

黄海大部分区域均为正规半日潮,潮流大都 为规则半日潮流,但在南黄海的中南部海域为不 规则的半日潮流,烟台外海则为不规则全日潮流。 北黄海 M_2 分潮流东侧大于西侧,流速自西向东 逐渐增加^[24]。西朝鲜湾流速>60 cm/s,最大可 达 80 cm/s。北黄海中部为 40 cm/s,烟台附近出 现一片弱流区,流速约为 20 cm/s。北黄海 K_1 分 潮较弱,最大流速一般在 10 cm/s 左右。南黄海 的 M_2 分潮流速较强,除南黄海中部海域潮流速 较低外,其他海域流速基本在 40~60 cm/s。南 黄海的 K_1 分潮流速较低,一般<10 cm/s^[25]。

黄海海域的环流主要包括黄海暖流、山东半 岛沿岸流、苏北沿岸流和朝鲜半岛沿岸流^[26]。冬 半年,黄海的环流主要有2支,即黄海暖流及其余 脉与黄海沿岸流。冬季黄海暖流特征非常明显: 自表至底的相对高温高盐水体自济州岛西南海域 呈舌状沿黄海海槽西部自南向北逐渐延伸;进入 北黄海之后,黄海暖流方向逐渐向西移动。冬季 黄海暖流的余脉可以沿渤海海峡中北部进入渤 海^[27]。夏半年,黄海海域环流明显减弱,黄海暖 流几乎不存在^[28]。Bian等^[29]利用 ROMS 模式 模拟黄海环流,发现黄海沿岸流在冬季向南而在 夏季向北,在夏季表层流自黄海西岸向东一直延 伸至济州岛附近。

黄海海域季风强度大、范围广且存在明显的 季节差异。夏季风为南向,风速较小,风浪和涌浪 也较弱。冬季风为北向,其风速较其他季节有明 显增强^[30],同时冬季风浪和涌浪也比其他季节 强。春秋两季为季风转换时期,波向变化较大。 秋冬季节黄海的波高一般大于春夏季节,但特殊 气候事件也会对波浪造成短时剧烈的影响。在冬 季,寒潮出现频繁,导致波高急剧增加,波高有时 可达 3.5~8.5 m。在夏季,台风过境也会导致波 高在短时间内迅速增加^[31]。但这种短期气象过 程造成的波高变化历时较短。

黄海海域悬浮体分布具有明显的季节性差异。夏半年,山东半岛北部沿岸海域的底层悬浮体浓度较高且悬浮物含量随海流的减弱而自西向东逐渐下降。山东半岛东部北上的沿岸流与山东 半岛北侧沿岸流在成山头相遇导致该海域再悬浮 作用强烈,悬浮体浓度较高^[15]。夏季苏北浅滩的 高悬浮体浓度水体主要被限制在近岸有限的范围内。冬半年,山东半岛北部沿岸和成山头附近海域悬浮体浓度出现明显上升。由于潮流和海浪的强烈作用,江苏近岸海域悬浮体浓度较夏半年明显增加,高悬浮体浓度海域的范围也显著扩大^[32]。

2 资料与方法

2.1 数据来源

本文所用实测水文和悬浮沉积物数据来自于 国家自然科学基金委"渤黄海海洋学综合科学考 察"2010 年春、秋季 2 个航次以及 2012 年夏、冬 季 2 个航次。4 个航次均由中国海洋大学"东方 红 2 号"海洋综合调查船承担,每个航次分为南黄 海航段与北黄海—渤海航段,4 个航次在黄海海 域的站位分布及相关信息如表 1 及图 1 所示。

表 1 2010 年及 2012 年国家 自然科学基金委共享航次信息

Table 1Information about National Natural ScienceFoundation of China supported open cruises in 2010 and 2012

起止日期	航次类型	站位数	采集悬浮 体水样数
2010.04.21-2010.05.04	春季航次	98	432
2010.09.08-2010.09.21	秋季航次	99	371
2012.05.02-2012.05.20	夏季航次	118	393
2012.11.02-2012.11.19	冬季航次	109	329

根据水深和海况,每个站位一般分 3~6 个采 水层来采集悬浮体样品,同时采用 CTD(Seabird 911 plus)来采集水体的温度、盐度剖面数据。在 CTD 投放时,为防止仪器触底,通常将 CTD 的最 大下放深度控制在海底之上 3 m 左右。悬浮体 样品采集后在船上实验室采用双滤膜进行现场抽 滤,并用纯净水进行洗盐。航次结束后在实验室 进行烘干,并用高精度电子天平称重,根据悬浮体 的质量与抽滤水样的体积计算悬浮体浓度。

本文选取的数值模拟结果为来自于 Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM)模式的输出 结果。HYCOM是由美国迈阿密大学 MICOM



c 2010 年秋季(9月)航次;d 2012 年冬季(11月)航次

图 1 2010、2012 年 4 航次站位

Fig. 1 Stations for cruises in 2010 and 2012

全球海洋环流模式的基础上发展而来,提供了多种复杂的湍封闭方案用于解决上混合层和层化相对较弱区域的跨等密度面混合问题。同时,HY-COM模式考虑多种海气要素,如海表风场、长短波辐射等热通量场、蒸发及降雨、高纬度存在海冰以及河流淡水输入等,使得模拟结果更加准确。HYCOM模式存在众多实验版本,本文选取HY-COM + NCODA Global 1/12° Reanalysis (GLBu0.08) data (https:// hycom.org/)的数据^[33],该数据是将卫星高度资料、实测海表温度及垂向温盐断面、Argo 浮标数据和系留浮标数据与HYCOM模式结果进行数据同化而得出最终预测结果。

2.2 HYCOM 模式结果的适用性

根据国家自然科学基金委 4 个不同季节航次 站位的观测时间,将对应时间上 HYCOM 模式结 果在实测站位上进行差值,获取实测站位不同层 位上的 HYCOM 模式输出的温度数据,形成了与 观测站位上时间一致、水深一致的温度数据。这

2 套数据的比对结果如图 2 所示。



Fig. 2 Correlation between in-situ temperature and HYCOM temperature

从图 2 可以看到, HYCOM 温度数据与实测 温度数据基本一致, 两者在不同季节的确定系数 (R²)均>0.77, 其中春季 2 组数据的吻合度最 好,其确定系数高达 0.95,9 月份的数据相对偏差 较大。总体而言, 数据的比对表明, HYCOM 模 式结果能够较为准确地反映黄海海域不同季节的 水温变化和垂向分布结构。空间上与覆盖不完整 的实测资料相比, HYCOM 模式的优越性在于能 提供覆盖整个黄海海域的高分辨率数值结果, 这 为分析该海域温度场的时空分布提供了重要的数 据支持。

3 结果与讨论

3.1 温度锋面的时空变化

由于 HYCOM 温度数据与实测温度数据存 在较好的一致性,本文利用 HYCOM 温度数据来 识别海域温度锋面及其季节性变化。本文中使用 公式(1)计算水平温度梯度进而确定温度锋面的 位置及强度。

 $G = \sqrt{((T_{i+1,j} - T_{i,j})/D_1)^2 + ((T_{i,j+1} - T_{i,j})/D_2)^2}$ (1)

式中:G为温度的水平梯度,℃/km;

 $T_{i,j}$ 为第(i,j)个网格处的垂向平均温度, C; D_1 和 D_2 分别为东西向和南北向的网格间距, km。

选择 4、6、10 月和 1 月 HYCOM 模式的垂向平 均温度数据分别代表春、夏、秋、冬 4 个季节,来探讨 黄海海域温度锋面的时空变化过程(图 3)。



图 3 黄海海域水平温度梯度



春季,黄海温度锋面零星地分布在山东半岛 及苏北沿岸、朝鲜半岛沿岸与济州岛西北侧(图 3a),这些锋面规模较小且在空间上不连续。另 外,在南黄海冷水团东侧也有一规模较小的温度 锋面,其锋面强度<0.1 ℃/km。该锋面是由于 南黄海冷水团的水温较周围水体明显偏低所致。 整体来看,春季黄海海域的水平温度梯度不大,锋 面主要集中在近岸浅水的局部区域。在夏季,黄 海海域温度锋面依旧分布在山东半岛南北两侧及 朝鲜半岛的沿岸海域(图 3b)。黄海中部的温度 水平变化梯度较小,不存在明显的温度锋面。这 可能是由于夏季黄海水温显著高于其他季节,近 岸水体与黄海中部水温差较小所致。在秋季,黄 海海域温度锋面主要分布在朝鲜半岛、山东半岛 和江苏沿岸海域,锋面有明显的空间连续性,但锋 面强度较低(0.05~0.1 ℃/km),尤其是在山东 半岛成山头外海出现明显的温度锋面,其强度约 为0.07 ℃/km(图 3c)。在冬季,成山头外海、山 东半岛南侧近岸海域、长江口外海及朝鲜半岛西 侧温度锋面强度明显增大(温度梯度为 0.1~ 0.15 ℃/km,图 3d)。冬季锋面的强度和空间尺 度较秋季明显加大,有良好的空间连续性。成山 头外海的强温度锋面可能是由于低温的沿岸流与 高温的黄海暖流切变导致,其空间分布形态与 40 m等深线基本一致。

综上所述,温度锋面主要分布在近岸海域且 在春、夏季节较弱,而在秋季开始出现,在冬季显 著增强,空间范围扩大。造成这种现象的主要原 因是冬季近岸水体与黄海中部水体来源不同,水 温差异明显。春、秋两季是黄海海域水温快速升 高和快速下降的时段,在水温快速变化的过程中 沿岸水体和黄海中部水体的温度差异在一段时间 内减小进而导致温度锋面较弱。而夏季黄海西侧 的沿岸流极弱,近岸与远岸水体温度差异极小导 致锋面几乎不存在。

3.2 混合锋面的时空变化

辛普森一亨特参数(Simpson and Hunter parameter, SH)广泛被用于识别潮汐混合锋面位置^[34],该参数的表达式如下:

$$SH = \lg \frac{H}{U^3} \tag{2}$$

式中:U为流速,m/s;

H 为水深值,m;

SH 参数表征了水体垂向混合状态,数值越 小表明垂向混合越强烈,而值越大表明垂向层化 越显著。本文采用 HYCOM 模式得到的垂向平 均流速进行分析。

在春季,黄海大部分海域的 SH 参数数值较高(>5.5,图 4a)。在山东半岛南部沿岸存在一较弱的混合锋面,其 SH 参数数值约为 4.5。在黄海中部几乎不存在混合锋面,SH 参数的最大值接近 7.0。这表明春季在山东半岛南侧近岸海域以及苏北沿岸的水体存在一定程度的垂向混合,而在黄海绝大部分海域的水体垂向层化显著。在夏季,整个黄海的 SH 参数依旧处于较高水平(图 4b)。与春季相比,山东半岛沿岸的低 SH 参



Fig. 4 Distributions of SH parameter in Yellow Sea

数区域面积进一步缩小,苏北沿岸的混合锋沿岸 线分布且规模极小。在渤海海峡的北端及沿岸区 域,SH参数值略有下降。因此,夏季黄海海域垂 向层化显著,由于动力环境相对较弱,太阳辐射增 强,表、底层水体难以混合,这与以往的观测结果 是一致的[35]。在秋季,山东半岛沿岸开始出现弧 形的混合锋面,沿烟台外海绕过成山头向南扩展, SH 参数值约为 4。但长江口外海、江苏沿岸以及 朝鲜半岛西岸的海域出现了强度较大的混合锋, SH 参数值约在 3.2~4.0 之间(图 4c)。这表明 在秋季随着季风的转换和逐渐增强,江苏沿岸与 朝鲜半岛西岸海域水体的垂向混合在逐渐增强。 冬季,在山东半岛沿岸出现了强混合锋面,自渤海 海峡南端沿岸向东延伸,绕过山东半岛成山头后 向南扩展,强度逐渐减弱,其SH参数最低约为3 (图 4d)。江苏沿岸的混合锋面规模较秋季明显扩 张,锋面的强度也明显增强,并一直向北延伸至 35.5°N,与山东半岛外海的锋面几乎连接在一起。

HYCOM 模式的数值结果所揭示的黄海海 域混合锋面的时空变化表明,混合锋主要出现在 长江口外海、山东半岛及江苏沿岸海域以及朝鲜 半岛西岸的海域,而在黄海中部基本不存在混合 锋;混合锋在秋季开始出现,在冬季混合锋面的强 度最为显著,在春季随着季风的转换和减弱而逐 渐消失,在夏季几乎难以发现典型的锋面存在。

3.3 黄海海域悬浮沉积物浓度的时空分布及其 与锋面的关系

春季(4月),在黄海大部分海域表层悬浮体 浓度都处于较低的水平,但在苏北沿岸老黄河口 水下三角洲及江苏沿岸海域,其悬浮体浓度较高, 最高可达 200 mg/L以上(图 5a)。这主要是由于 春季苏北废黄河水下三角洲的细粒泥沙在强动力 作用下发生再悬浮造成的。另外,在成山头外海 也存在一悬浮体浓度高值中心,其表层悬浮体浓 度最高可超过 80 mg/L。

夏季黄海大部分区域表层悬浮体浓度都处于 极低的水平,除山东半岛东侧近岸及江苏沿岸海 域,其余大部分海域的悬浮体浓度均<2 mg/L (图 5b)。夏季山东半岛东侧近岸表层高悬沙浓 度水体主要由底质沉积物的再悬浮造成。与春季 相比,夏季水动力变弱、水体层化增强(图 4b)抑 制了海底沉积物再悬浮。底层高悬浮体浓度的水



a、b、c、d分别为春、夏、秋、冬,单位为 mg/L

图 5 黄海表层悬浮体分布

Fig. 5 Horizontal distributions of surface suspended sediment concentration in Yellow Sea

体与表层水体交换明显减弱,因此,夏季该海域表 层悬浮体浓度明显小于春季。同样地,江苏沿岸 海域悬浮体浓度与春季相比也有大幅度下降,表 层水体的悬浮体浓度最高仅为 32 mg/L。

秋季悬浮体浓度高值区主要分布在苏北老黄 河水下三角洲区域(图 5c)。在表层,苏北沿岸悬 浮体浓度最高超过 280 mg/L,其影响范围几乎覆 盖全部江苏近岸海域。与夏季相比,秋季表层水 体中悬浮体浓度显著升高,其影响范围向东南扩 展显著。这表明秋季苏北沿岸的水动力作用增 强,底质细粒沉积物再悬浮活跃并在沿岸流的作 用下沿江苏近岸逐渐向南扩展。在成山头东南外 海表层水体中出现一规模较小的悬浮体浓度高值 区,其悬浮体浓度最高为 8.8 mg/L。

冬季(11月),研究区表层悬浮体浓度显著高 于秋季,高悬浮体浓度海域主要分布在渤海海峡 南侧、成山头近岸和苏北废黄河口水下三角洲海 域(图 5d)。渤海海峡南侧悬浮体浓度最高可达 60 mg/L,指示了冬季渤海沉积物通过渤海海峡 南端向北黄海输运的路径^[11,12]。另一个悬浮体 浓度高值中心出现在成山头外海,最大悬浮体浓 度值超过140 mg/L。与其他季节相比,冬季该海 域的表层悬浮体浓度最大。就整个黄海而言,最 大规模的表层悬浮体高浓度区依然是苏北废黄河 水下三角洲区,该区最高值达480 mg/L,主要是 冬季强动力作用引起的大规模再悬浮所致。

底层悬浮体空间分布与表层基本一致,但浓 度显著高于表层。春季黄海底层实测悬浮体浓度 高值主要出现在苏北沿岸及成山头外海(图 6a)。 在老黄河水下三角洲区域悬浮体浓度最高超过 1 000 mg/L。与表层相比,底层悬浮体浓度明显 偏高。该悬浮体浓度高值区呈带状分布在苏北沿 岸并向南扩展,其影响范围最远可延伸至长江口 外海域。但该悬浮体浓度高值区向黄海中部扩散 的趋势不明显。成山头外海底层高悬浮体区较表 层规模明显增大,悬浮体浓度也明显偏高。

夏季底层水悬浮体浓度较低,江苏沿岸最大 悬浮体浓度超过 62 mg/L(图 6b)。在成山头外 海悬浮体浓度约为 25 mg/L,该高值区在空间上 向南延伸至 36°N,向东可扩展至 124°E 附近。与 夏季表层水体相比,底层水体中悬浮体浓度高于 表层且高浓度水体范围更大。







Fig. 6 Horizontal distribution of bottom suspended sediment concentration in Yellow Sea

在秋季,苏北沿岸水体底层高悬浮体浓度区 依然存在,悬浮体浓度最高约为 680 mg/L(图 6c)。与夏季相比,秋季底层悬浮体浓度明显增 加。在成山头外海、山东半岛南侧近岸海域和南 黄海中部底层水体中出现较为零散的悬浮体高值 区,这与夏季底层悬浮体分布存在一定的差异。 在秋季,动力作用下的海底再悬浮增强,但表底层 的悬浮体浓度差异仍然较大,表明秋季水体的垂 向层化并未被完全破坏,水体垂向混合不充分。

冬季黄海底层悬浮体浓度高值区出现在渤海 海峡南端、成山头外海及苏北沿岸(图 6d)。渤海 海峡南端海域悬浮体浓度约为 60 mg/L,并沿岸 向东扩展。在成山头外海出现悬浮体浓度的高值 区,最大可达 160 mg/L,高于渤海海峡的南端,表 明动力作用导致的局地再悬浮占主导。空间分布 上,成山头外海的悬浮体高值区逐渐向南延伸,不 存在明显向东扩散的趋势。在苏北老黄河水下三 角洲区,悬浮体浓度最大接近 600 mg/L,高悬浮 体浓度水体主要呈带状沿岸分布。

结合黄海海域温度锋面、混合锋面的时空变

化特征可以发现,秋、冬季节为温度锋面和混合锋 面最为显著的时段,也对应了该海区悬浮体输运 的重要季节。受温度锋面的限制,成山头外海高 悬浮体浓度的水体被控制在温度锋西侧的近岸海 域内,悬浮体高值区基本上沿锋面走向分布,向黄 海中部的扩散受到明显的抑制。同时,在混合锋 面控制的海域,水体垂向混合强烈,表层悬浮体浓 度在冬季也明显偏高。而在夏季,黄海海域温度 锋强度极弱,对悬浮体向海扩散无明显抑制作用, 导致高悬浮体浓度水体向海扩散。夏季水体层化 显著,加之波浪作用较弱,沉积物再悬浮主要由潮 流作用导致,夏季底层水体的悬浮体浓度显著低 于其他季节。另外,受水体层化的影响,底层再悬 浮泥沙难以进入表层水体,导致表层水体浓度显 著低于秋冬季节。

黄海的沉积物来源较为复杂,从悬浮体浓度 的分布上看,苏北老黄河水下三角洲及江苏沿岸 的再悬浮是南黄海沉积物的重要来源,该区域海 洋动力作用强烈,除夏季以外,海底再悬浮导致近 岸海域悬浮沉积物浓度显著高于其他区域,再悬 浮沉积物受温度锋面和混合锋面的限制(图3、4), 在季节性沿岸流的作用下沿岸向南输运,并在长 江口外的泥质沉积记录中得到保存^[36]。现代黄 河沉积物则通过渤海海峡从渤海进入北黄海,而 山东半岛沿岸在秋冬季节发育的温度锋和混合锋 则将沉积物限制在浅水区域沿岸输运,这与卫星 遥感显示的沿岸高浑浊带的分布是一致的。

3.4 锋面与泥质区沉积分布的关系

Yang和 Liu^[5]利用高分辨率的浅地层剖面 观测资料并结合已有的钻孔资料,揭示了全新世 以来形成的黄海中部泥质沉积区的空间分布和结 构。该泥质区的沉积物以粉砂及黏土为主,其空 间分布及沉积厚度如图 7 所示。在山东半岛北 侧,沉积厚度超过 10 m 的区域面积较大,可一直 扩展到北黄海中部。在山东半岛东侧近岸海域, 沉积厚度最大可超过 40 m,但沉积范围相对较 小。从泥质区的沉积体积看,大量沉积物集中分 布在成山头外海有限的区域内,在 123.3°E 以东 沉积区厚度基本趋于零。而在南北向上,该沉积 区向南延伸相对较远,且沉积厚度向南逐渐降低, 35°N 以南的区域泥质沉积逐渐消失。



图 7 黄海全新世沉积物等厚度线 与秋、冬季温度锋面(a)、混合锋面(b)的空间位置 (单位:m,改绘自文献[5])

Fig. 7 Isopach map of the Holocene mud and location of temperature front and mixing front in fall and winter (modified from reference [5])

海洋锋面对于悬浮泥沙的扩散与沉降具有显 著作用[37]。前人研究表明,秋冬季节是黄河入海 泥沙由渤海向黄海输运的主要季节[4,10,11],同时 也是研究区温度锋面和混合锋面最发育的季节。 利用 HYCOM 模式在秋冬季节的数值结果进行 平均,计算海域的水平温度梯度和 SH 参数,并与 山东半岛海域泥质沉积的空间分布进行对比可以 发现:山东半岛沿岸温度锋与该海域泥质沉积区 在形态及空间位置上具有良好的对应关系(图 7a)。沉积厚度较大的区域主要分布在温度锋以 西的近岸区,而在温度锋的东侧,沉积区厚度快速 减小,这表明沉积物主要沿着温度锋的路径进行 输运,而离岸输运则受到锋面的限制。因此,锋面 的东侧沉积速率小,大量沉积物集中在锋面的西 侧随海流向南输运并逐渐沉积,这与悬浮沉积物 的空间分布基本一致(图 5d、6d)。

在山东半岛成山头的南侧,泥质沉积体厚度 显著增加,最大厚度可达 40 m,其与混合锋面的 空间分布具有良好的对应关系。秋冬季节是渤海 南部,尤其是黄河三角洲沿岸沉积物再悬浮活跃 的时段,大量沉积物通过渤海海峡南部进入北黄 海。在山东半岛成山头海域,集中在温度锋的西 侧向南输运。但是混合锋面的结果显示,在浅水 区水体混合强烈,沉积物不易沉降,因此,混合锋 的西侧泥质沉积的厚度较小。而在混合锋的东侧 水体层化明显(图 4d,7b),沉积物在此快速沉积, 泥质沉积的厚度最大40m。图7显示,秋冬季节 山东半岛成山头外的温度锋和混合锋虽然形态相 似,但空间位置并不一致,混合锋处在温度锋的西 侧,而温度锋则位于泥质区沉积中心的东侧,这为 解释该区域泥质沉积体为何呈现"Ω"形态提供了 一种可能的动力学机制解释。当然,在泥质沉积 区形成演化的长期历史中,物源供应、海平面变化 和动力环境都是不断变化的,对此还需要结合沉 积记录、高分辨率沉积动力学观测进行深入研究。

4 结论

本文利用黄海海域不同季节的航次观测数据 与 HYCOM 模式再分析数据进行了比对,结果显 示,HYCOM 模式的水体温度结果在黄海海域是 适用的。在此基础上,选取典型月份的数据,对黄 海海域的温度锋面和混合锋面的时空变化进行了 详细分析,结果表明,黄海海域温度锋面主要出现 在山东半岛成山头外海、苏北沿岸以及朝鲜半岛 的西岸。温度锋的强度及空间分布存在明显的季 节性变化,通常是在秋季开始出现,在冬季最为发 育,在春季逐渐消失,在夏季几乎不存在。温度锋 的时空变化与季风和环流系统控制下的水团分布 有密切的关系。在冬季季风作用下沿岸流增强, 同时黄海暖流作为补偿流强度也明显增加,因此, 导致水体温度的水平梯度增大,使得温度锋面最 为发育;而在夏季,季风转向而且强度减弱,沿岸 流和黄海暖流不明显,温度锋面消失。黄海的混 合锋面也存在明显的季节性变化,该变化与季风 活动密切相关,体现在浅水区域混合强烈,在深水 区域层化显著。混合锋面主要在秋季开始出现, 在冬季发育,主要分布在山东半岛的东侧海域、江 苏沿岸至长江口的海域以及朝鲜半岛的西岸。

锋面的空间分布和季节性变化对黄海悬浮沉 积物的输运有重要的控制作用。悬浮沉积物基本 上集中在温度锋面的向岸一侧,难以跨越锋面输 运,锋面对悬浮沉积物产生捕集效应,这在成山头 海域尤为明显。混合锋面则显示了锋面两侧水体 混合与层化状态的显著差异,对于沉积物再悬浮 和沉降的空间分异有重要控制作用。江苏沿岸年 内大多时间混合强烈,在冬季混合锋强度最大,悬 浮体浓度极高。山东半岛成山头海域的温度锋在 形态及空间位置上与泥质沉积区有良好的对应, 沉积中心(厚度 40 m)主要分布在温度锋的西侧, 而在温度锋的东侧沉积厚度快速减小。混合锋与 温度锋的空间位置并不一致,混合锋位于温度锋 的西侧,在秋冬季节强烈的水体混合使得沉积物 不易沉降,因而混合锋控制区域泥质沉积厚度小; 而在混合锋的东侧,悬浮沉积物浓度高且水体湍 动较弱(SH 参数较高),沉积物易于沉降堆积,对 应了泥质区的沉积中心。混合锋与温度锋的空间 分布差异与共同作用可能是该区域泥质沉积体 "Ω"结构形成的动力学机制。

致谢:感谢"东方红2号"科考船实验室成员 在航次工作和数据采集方面给予的大力支持!

参考文献:

- [1] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of sediment to the oceans[J]. Journal of Geology, 1983; 91(1):
 1-21.
- [2] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1): 111-126.
- [3] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers[J]. Journal of Geology, 1992,100(5): 525-544.
- [4] 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.
- [5] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2007, 240(1): 169-176.
- [6] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. Geomorphology, 2007, 85(3): 208-224.
- [7] 秦蕴珊,李 凡. 渤海海水中悬浮体的研究[J]. 海洋学报 (中文版), 1982,4(2):191-200.
- [8] Zhang J, Huang W W, Martin J M. Trace metals distribution in Huanghe (Yellow River) estuarine sediments[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1988, 26(5): 499-516.
- [9] Liu J P, Milliman J D, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea
 [J]. Marine Geology, 2004, 209(1): 45-67.
- [10] 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.

- Bi N S, Yang Z S, Wang H J, et al. Seasonal variation of suspended-sediment transport through the southern Bohai Strait[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 93 (3): 239-247.
- [12] 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.
- [13] 秦蕴珊,李 凡,徐善民,等. 南黄海海水中悬浮体的研 究[J]. 海洋与湖沼, 1989, 20(2): 101-112.
- [14] 赵一阳,朴龙安,秦蕴珊,等.南黄海沉积学研究新进展——中韩联合调查[J].海洋科学,1998,22(1):34-37.
- [15] 鲍献文,李 真,王勇智,等. 冬、夏季北黄海悬浮物分布 特征[J]. 泥沙研究, 2010 (2): 48-56.
- [16] 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.
- [17] 赵保仁. 黄海潮生陆架锋的分布[J]. 黄渤海海洋, 1987, 5(2):16-23.
- [18] 刘传玉,王 凡. 黄海暖流源区海表面温度锋面的结构及 季节内演变[J]. 海洋科学, 2009, 33(7): 87-93.
- [19] 刘先炳,苏纪兰.浙江沿岸上升流和沿岸锋面的数值研究 [J].海洋学报,1991,13(3):305-314.
- [20] 王锡侯,韩玺山. 黄海北部水团锋面分析[J]. 海洋通报, 1994, 13(2): 1-6.
- [21] 刘丽萍. 黄海冬季锋生锋消过程的数值研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [22] 王勇智,乔璐璐,杨作升,等.近岸强海流切变锋作用下 悬浮沉积物的输送和沉积[J].沉积学报,2013,31(3):9-19.
- [23] 宋文鹏. 渤海冬、夏季温盐场结构及其海流特征分析[D]. 青岛:中国海洋大学, 2009.
- [24] 刘爱菊, 尹逊福, 卢 铭. 黄海潮汐特征[J]. 海洋科学进展, 1983,1(2):1-7.
- [25] 汤毓祥,姚兰芳. 南黄海潮流和潮余流的数值计算[J]. 海洋湖沼通报,1989,2(1):1-7.
- [26] 韦钦胜,于志刚,冉祥滨,等.黄海西部沿岸流系特征分 析及其对物质输运的影响[J].地球科学进展,2011,26 (2):145-156.
- [27] 臧家业,汤毓祥,邹娥梅.黄海环流的分析[J]. 科学通报,2009 (S1),2001,46:7-15.
- [28] 汤毓祥,李兴宰.南黄海环流的若干特征[J].海洋学报, 2000,22(1):1-16.
- [29] Bian C W, Jiang W S, Greatbatch R J. An exploratory model study of sediment transport sources and deposits in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118 (11): 5 908-5 923.
- [30] 陈红霞,华 锋,袁业立.中国近海及临近海域海浪的季 节特征及其时间变化[J].海洋科学进展,2006,24(4): 407-415.
- [31] 梁书秀, 孙昭晨. 渤海典型余环流及其影响因素研究[J].

大连理工大学学报,2006,46(1):103-110.

- [32] 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.
- [33] HYCOM + NCODA Global 1/12° Analysis (GLBu0.08) [DB/OL]. (2012-12-31) [2015-04-29]. http://hycom. org/data/glbu0pt08.
- [34] Simpson J H, Hunter J R. Fronts in the Irish Sea[J]. Nature, 1974, 250: 404-406.
- [35] 李 伟,王玉衡,汪嘉宁,等. 2011 年春、夏季黄、东海水 团与水文结构分布特征[J].海洋与湖沼, 2012, 43(3):

615-623.

- [36] Liu J, Yoshiki S, Kong X H, et al. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last ~13 000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(17): 2 424-2 438.
- [37] Wang H J, Yang Z S, Li Y H, 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.

TEMPORAL AND SPATIAL VARIABILITY OF NEARSHORE FRONTS IN THE YELLOW SEA AND ITS INFLUENCE ON SEDIMENT TRANSPORT AND DEPOSITION

ZANG Zhengchen^{1,3}, WANG Houjie^{1,2*}, XUE Zuo³, BI Naishuang¹, WU Xiao¹, ZHANG Yong⁴

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Technology of Ministry of Education, Qingdao 266100, China;

3 Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA;

4 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266100, China)

Abstract: In-situ water temperature data collected during different seasons in 2010 and 2012 was compared with HYCOM reanalysis data. The results illustrated that temperature data derived from HY-COM is applicable in the Yellow Sea. Based on the HYCOM datasets, temporal and spatial variability of the thermal front and mixing front in the Yellow Sea was analyzed in detail. The results showed that the thermal front appeared in fall, became strongest in winter and disappeared gradually in spring. Seasonal variability of mixing front in the Yellow Sea was related to monsoon. Mixing front appeared in the fall and well developed in the winter. Suspended sediment was concentrated in onshore side of the thermal front that constrained the offshore transport. The thermal front in Chengshantou coastal area corresponded to mud deposit in shape and location, as the depo-center (40 m thick) was located at the onshore side of the thermal front while on the offshore side the mud thickness decreased sharply. The results indicated difference between locations of the thermal front and mixing front, as the mixing front was located at the west of the thermal front where strong mixing was unfavorable for sediment accumulation. At the east side of mixing front, suspended sediment concentration was high with low turbulence, which favored rapid sediment accumulation corresponding to the mud depo-center. The spatial differences and interaction between the thermal front and mixing front might be the dynamic mechanism dominating the formation of omega (" Ω ") -shaped mud deposits.

Key words: Yellow Sea; HYCOM model; sediment transport; thermal front; mixing front; mud patch