

孙 军,路 月,杨慧良,等. 渤海海峡 BHS01 孔海陆交互沉积物粒度特征及沉积环境分析[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(8):11-19.

渤海海峡 BHS01 孔海陆交互沉积物 粒度特征及沉积环境分析

孙 军^{1,2},路 月^{1,3},杨慧良^{1,2*},褚宏宪^{1,2},祁江豪^{1,2},刘长春^{1,2},李攀峰^{1,2},窦振亚^{1,2}

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266071;2 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,青岛 266071;3 中国地质大学(北京)海洋学院,北京 100083)

摘 要:通过对渤海海峡 BHS01 孔上部 40 m 沉积物样品进行粒度测试分析,探讨渤海海峡地区的沉积环境变化。结果表明,渤海海峡 BHS01 孔上部沉积物平均粒径(\bar{X})介于 $3.2\Phi\sim 7.5\Phi$,以粉砂质砂、砂质粉砂为主;分选系数(δ)介于 1.3~2.5,分选较差—差;偏度(Sk)为 $-0.4\sim 3.0$,以正偏、极正偏为主;峰度(Ku)1.9~12.4,表现为尖锐—正态。通过对沉积物粒级组成、粒度结构以及粒度参数随深度变化等特征进行分析,揭示了渤海海峡地区水动力条件较强,波动频繁的环境变化信息,据此将 BHS01 孔上部沉积物自下而上划分为 7 个沉积层段,反映渤海海峡地区中更新世以来经历了从浅海相—河流相—浅海相的沉积变化过程。

关键词:渤海海峡;BHS01 孔;海陆交互沉积;粒度特征

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.08002

0 引言

粒度是沉积物颗粒大小的表征,其组成与分布受控于物源供给、搬运条件、沉积动力及地形地貌等因素,包含了丰富的物源、水动力条件、沉积环境等环境变化信息^[1-3]。因此,通过对沉积物粒度的分析,可以有效的追踪物质来源^[3-4]、判别水

动力条件^[5]、分析沉积物运移趋势以及识别沉积环境类型等^[6-9]。

渤海是位于东亚大陆边缘的半封闭陆架浅海,海陆交互作用强烈,第四纪以来随气候冷暖变化经历了多次海平面升降变化,沉积物的物源供给和运移方式也随之变迁,这些变化都保存在陆架沉积物记录中^[10-12]。渤海海峡作为渤海连接黄海的通道,其沉积物的搬运和保存都强烈受控于海平面升降变化、水动力条件及区域地质构造等因素,沉积物敏感地记录了海陆变迁、海平面变化、河流输入物质和气候变化等环境变化信息,为海陆交互作用和沉积环境变化研究提供了理想记录^[13]。近些年来,前人对渤海海峡地区表层沉积物的粒度特征^[14-17]、地球化学^[18]、环境磁学^[19]、古生物学^[20]、沉积动力^[21-22]等开展了一系列的研究,取得了大量的研究成果。然而,由于渤海海峡长序列沉积钻孔数量匮乏,对于蕴含古环境变化

收稿日期:2018-12-25

基金项目:中国地质调查局项目(DD20191003, DD20190365, DD20190208, DD20189503);国家自然科学基金(41330964, 41606083, 41506119)

作者简介:孙 军(1989—),男,硕士,研究实习员,主要从事海洋地质、磁性地层学、旋回地层学等方面的研究工作。E-mail:sun-jun607@126.com

* 通讯作者:杨慧良(1977—),男,硕士,高级工程师,主要从事海洋地质及地球物理等方面的研究工作。E-mail:qdyhuijiang@163.com

信息的沉积物粒度特征的研究程度一直较低,严重制约了对渤海海峡地区沉积物输运、水动力条件变化、沉积环境变化过程的认识。

笔者利用渤海海峡钻取的 BHS01 孔上部 40 m 海陆交互沉积物样品,进行粒度测试分析,通过识别沉积物类型,提取粒度参数蕴含的沉积环境信息,探讨渤海海峡地区的沉积环境变化过程。

1 研究区概况

渤海是位于东亚大陆边缘的半封闭陆架浅海,三面环陆,仅以渤海海峡与黄海连通。由辽东湾、渤海湾、莱州湾、渤海海峡和渤海中央盆地组成,黄河、海河、滦河、辽河等周边河流注入大量泥、沙,致使渤海水深较浅,海底地形平缓,由陆地

向渤海中央盆地及渤海海峡方向倾斜,平均水深仅 18 m^[10,23]。渤海海峡位于山东半岛和辽东半岛之间,宽约 100 km,平均水深 25 m,最大水深局部超过 80 m,庙岛群岛呈 NE 向横亘其中^[10,23-25]。渤海海峡是黄海水团进出渤海进行水动力交换的重要通道,黄海暖流及辽南沿岸流从海峡北部进入渤海,分别形成各自的环流后,再由海峡南部流向黄海^[26]。

第四纪以来,渤海地区受全球气候冰期-间冰期旋回作用,海平面升降波动频繁,多次发生海侵—海退过程,发育海陆交互沉积地层^[10,12]。渤海海峡地区活动断裂发育,水动力条件活跃,沉积厚度较薄,高分辨率地震反射剖面揭示渤海海峡地区第四纪沉积厚度仅为 100~250 m^[27]。

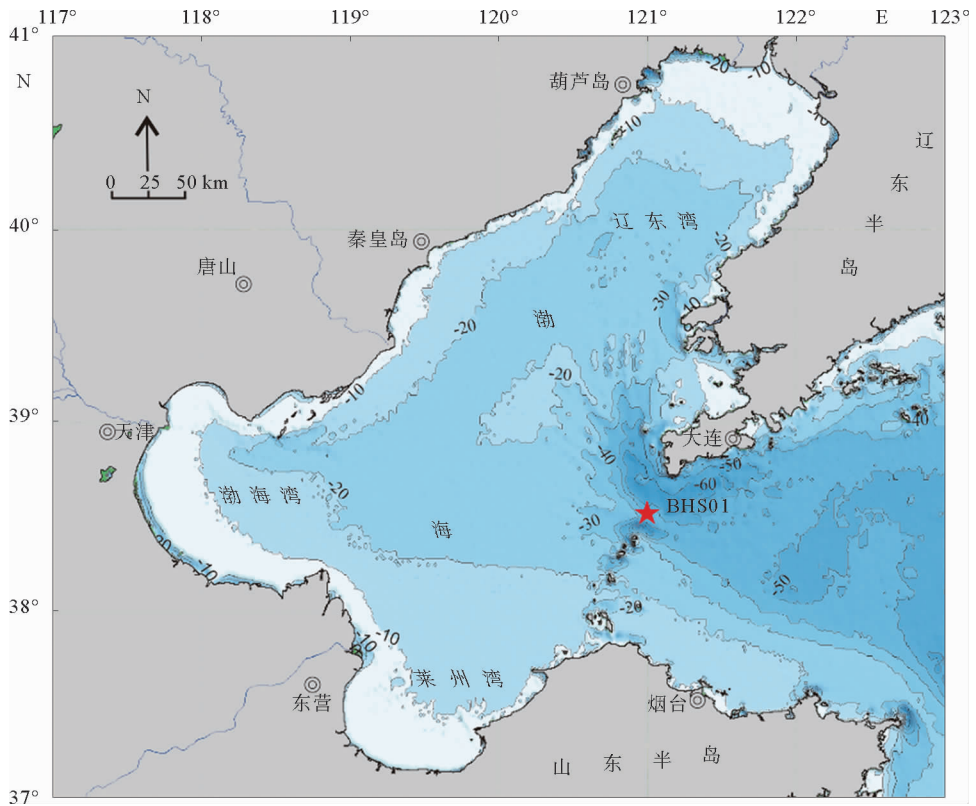


图 1 BHS01 孔位置图

Fig. 1 Location of the core BHS01

2 材料与方法

BHS01 孔 (38°31'N, 120°54'E) 位于渤海海

峡北隍城岛东侧海域,孔口水深 39.6 m,为中国地质调查局青岛海洋地质研究所于 2017 年施工钻取岩心(图 1)。将岩心纵向剖开,依次摆好,进行编录、拍照和样品采集。样品采样间距为 10 cm,

共获得粒度样品 307 件,根据每回次进尺和取心率,将取样深度换算为实际深度。样品粒度测试在中国科学院地球环境研究所沉积学实验室使用英国马尔文 (Malvern) 公司生产的 Mastersizer2000 型激光粒度分析仪。

粒度测量前对样品进行前处理,步骤概述如下:①每个样品取约 1 g 放入烧杯中,加 10 mL 10% 的 H₂O₂ 去除有机质;②加入 10 mL 30% 的 HCl 除去钙质胶结物和生物壳;③用去离子水加满烧杯并静置 1 天,除去上清液,重复水洗步骤 1~2 次,去除反应剩余的 H₂O₂ 和 HCl;④把适量待测悬液样品加入烧杯中,加入 10 mL 0.05 mol/L 的分散剂 (NaPO₃)₆,在超声波振荡器上振荡 10~15 min,之后放入激光粒度仪测试。

沉积物的分类和定名采用 Folk 三端元分类法^[28];沉积物粒度标准采用 Udden-Wentworth 等比制 Φ 粒度标准^[29];粒度参数(平均粒径 \bar{X} 、分选系数 δ 、偏度 Sk 、峰度 Ku)采用 McManus^[30] 矩值法进行计算,公式如下:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum X_i f_i}{100} \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 f_i}{100}} \quad (2)$$

$$Sk = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3 f_i}{100}} \quad (3)$$

$$Ku = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4 f_i}{100}} \quad (4)$$

式中: \bar{X} 为平均粒径;

δ 为分选系数;

Sk 为偏度;

Ku 为峰度;

f 为各粒级的百分含量;

$\sum f = 100$ 。

3 粒度特征分析

3.1 粒级组分特征

沉积物粒级组成是反映沉积物粒度特征、指示沉积环境的重要指标^[14,17]。根据沉积物颗粒粒径大小将 BHS01 孔沉积物的粒级分为黏土(<

4 μm)、粉砂(4~63 μm)和砂(>63 μm)。结果显示,BHS01 孔上部 40 m 的沉积物样品砂级(>63 μm)含量范围为 0.1%~91.6%,平均含量为 56.7%,是钻孔上部沉积物的第 1 粒组(主众数粒组);粉砂级(4~63 μm)含量范围为 5.8%~82.2%,平均 32.4%,是钻孔上部沉积物的第 2 粒组(次众数粒组);黏粒(<4 μm)含量范围为 2.5%~40.9%,平均含量仅为 10.9%。将沉积物样品的平均粒径投影到 Folk 三角图上(图 2),结果显示,BHS01 孔上部 40 m 的沉积物样品大部分以粉砂质砂为主,其次为砂质粉砂、泥质砂、粉砂,沉积物粒度较粗,在 Folk 三角图中投点分散,分选较差,大致呈线性展布,反映渤海海峡地区沉积环境水动能较强,水动力条件变化较大。

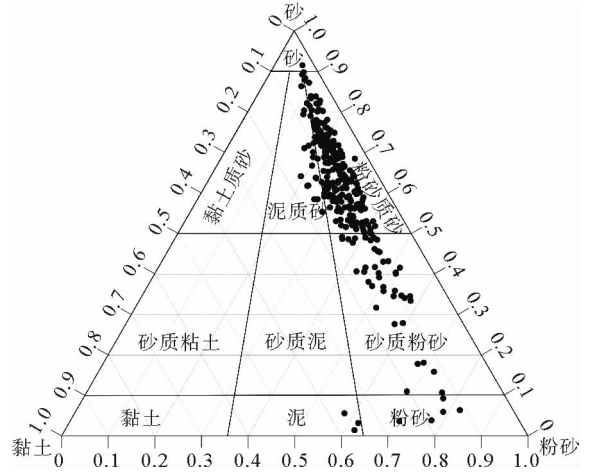


图 2 BHS01 孔上部沉积物 Folk 三角图投点示意图

Fig. 2 Classification of the sediments of the upper parts of core BHS01

3.2 粒度象特征

粒度象是反映沉积物粒度分布、判断搬运方式、指示沉积环境的重要替代指标^[31-32]。为详细研究 BHS01 孔上部 40 m 沉积物蕴含的水动力条件变化信息,笔者根据 Passega^[33-34] 选择与沉积搬运有密切关系的粒度参数 C(累积曲线上颗粒含量为 1% 的粒径值)、M(累积曲线上含量为 50% 的粒径值,即中值粒径)、A(<4 μm 组分的百分含量)、L(<31 μm 组分的百分含量)、F(<125 μm 组分的百分含量)分别以 C 对 M、A 对 M、L 对 M、F 对 M 作粒度象 C-M、A-M、L-M、F-

M图(图3、4)。其中,C值与样品中最粗颗粒的粒径相当,代表了水动力搅动开始搬运的最大能量;M值是中值,代表了水动力的平均能量;A、F、L和M值表征样品不同粒级的细粒组分。

沉积物粒度象C-M图如图3所示,图中C值介于49~400 μm,M值介于7~161 μm。其中,C值总体相对稳定,M值相对变化较大,反映钻孔上部沉积物在沉积时初始水动能较为稳定而平均水动能变化较大。C-M图投点指示沉积物的搬运方式以递变悬浮为主,均匀悬浮为辅,表明渤海海峡地区在钻孔揭示的地质历史时期内水动能较强,处于高能沉积环境下。根据BHS01孔上部沉积物样品在C-M图中投点的离散程度以及M值的变化,可以将投点区域划分为2块,区域一:

50 μm<C<380 μm,7 μm<M<50 μm;区域二:160 μm<C<400 μm,50 μm<M<160 μm(图3)。区域一反映研究区初始水动能较大而平均水动能较小,指示了渤海海峡地区沉积物搬运的初始水动能较强,后期水动能减弱,沉积环境总体处于较为稳定的低能环境下;区域二反映研究区初始水动能较大,平均水动能也较大,指示研究区处于不稳定的高能沉积环境下。BHS01孔上部40m沉积物样品投点大部分集中于区域二,表明渤海海峡地区沉积物在地质历史时期内以区域二样品表征的沉积特征为主,处于不稳定的、相对高能的沉积环境下,这可能与渤海海峡地区水动力条件较强、海陆交互作用强烈有关。

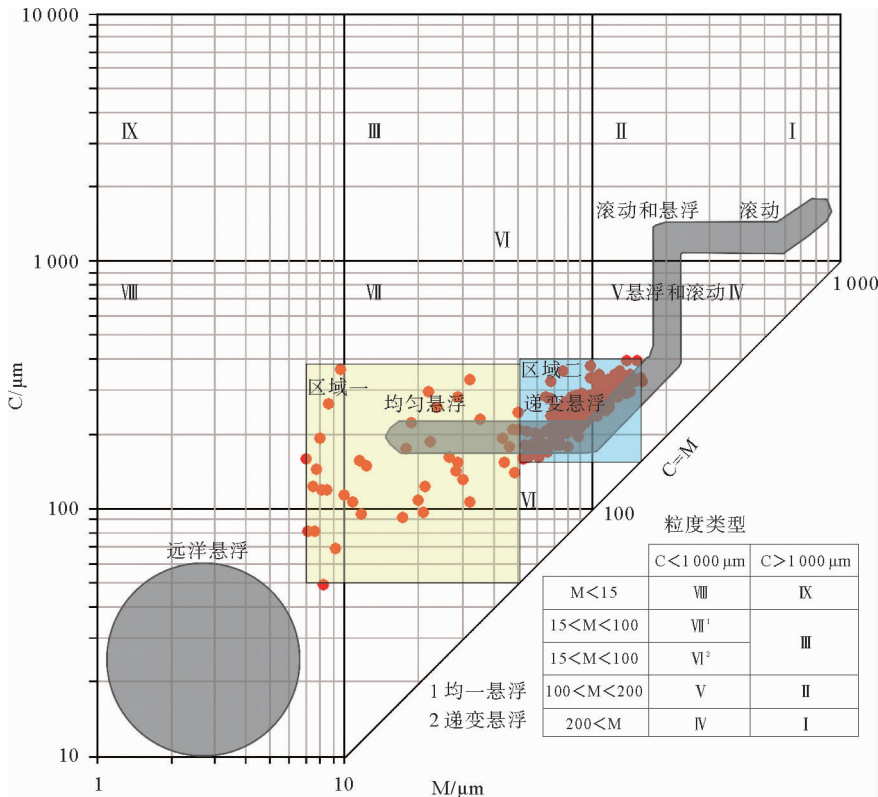


图3 BHS01孔上部沉积物粒度象C-M图

Fig. 3 Distribution of the sediments of the upper parts of the core BHS01 in a C-M diagram

由沉积物粒度象A-M、L-M、F-M综合图(图4)可知,对于BHS01孔上部海陆交互沉积物,M介于10~160 μm,A(<4 μm)组分所占比例较小,百分含量随M增大而减小;L(<31 μm)组分含量随M增大而迅速减少,由90%减少至10%;

F(<125 μm)组分含量变化随M增大逐步减小,由100%减少至40%。研究表明,A(<4 μm)组分整体上所占比例很小,细粒物质不为优势组分;L(<31 μm)组分含量和F(<125 μm)组分含量随着M的变化呈不同变化特征,当M < 60 μm

时,样品沉积物颗粒几乎全部 $< 125 \mu\text{m}$, $31 \sim 125 \mu\text{m}$ 组分含量随 M 增大而成为优势组分, $A (< 4 \mu\text{m})$ 组分含量和 $F (< 31 \mu\text{m})$ 组分含量随 M 增大而迅速减小;当 $M > 60 \mu\text{m}$ 时, BHS01 孔上部沉积物中 $> 125 \mu\text{m}$ 的颗粒逐渐增加,并逐步成为优势组分, $31 \sim 125 \mu\text{m}$ 组分含量逐步减少,细粒物质含量变得极低。综上所述, BHS01 孔上部沉积物组分整体变化较大,细粒组分不为优势组

分,指示研究区沉积物分选较差,沉积水动能变化频繁,水动力条件较强。

3.3 粒度结构特征

粒度结构散点图可以有效的区分沉积环境^[31-32]。笔者选择与沉积环境关系密切的粒度参数平均粒径(\bar{X})、分选系数(δ)、偏度(Sk)分别以对 δ 、 Sk 对 δ 作粒度结构散点图(图 5a、b)。由图 5a 可知,平均粒径(\bar{X})介于 $3.2\Phi \sim 7.5\Phi$,分选系数(δ)为 $1.3 \sim 2.5$,样品沉积物分选系数较差一差。当平均粒径值 $< 5\Phi$ 时,分选系数为 $1.3 \sim 2.5$,分选系数与平均粒径呈正相关关系;当平均粒径值 $> 5\Phi$ 时,分选系数为 $1.6 \sim 2.4$,分选系数与平均粒径呈负相关关系。由图 5b 可知, BHS01 孔上部沉积物偏度为 $-0.4 \sim 3.0$,样品沉积物偏度以正偏—极正偏为主。研究表明,偏度与分选系数呈负相关关系,即随着沉积物分选变差,沉积物偏度由正偏逐步向正态变化。综上所述, BHS01 孔上部沉积物平均粒径较大,整体分选较差一差,指示沉积物在沉积过程中处于较强的水动力环境下。

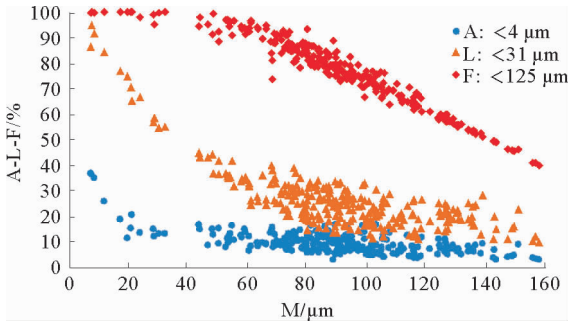


图 4 BHS01 孔上部沉积物粒度象 A-M, L-M, F-M 综合图
Fig. 4 Relationships between A vs M, L vs M and F vs M of the sediments for the upper part of the core BHS01

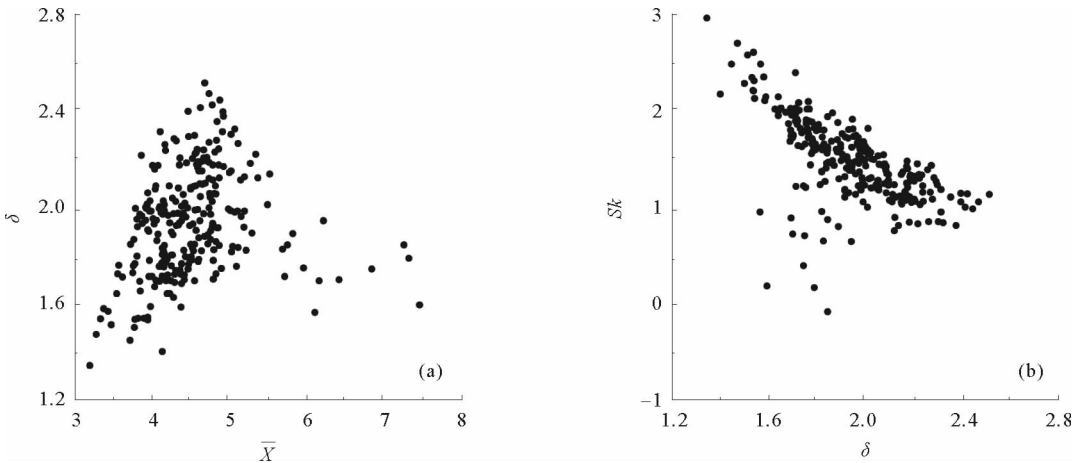


图 5 BHS01 孔上部沉积物粒度结构散点图(a: $\bar{X}-\delta$; b: $\delta-Sk$)

Fig. 5 Scatter diagrams of the sediments from the upper part of the core BHS01

3.4 粒度参数随深度变化特征

粒度参数可以直观表达和描述沉积物分布特征,与沉积物形成时的沉积环境具有较好的相关性^[35]。BHS01 孔上部 40 m 沉积物粒级组成、平均粒径(\bar{X})、分选系数(δ)、偏度(Sk)和峰度

(Ku)随深度变化曲线如图 6 所示。结果显示,渤海海峡上部 40 m 沉积物样品平均粒径(\bar{X})变化范围为 $3.2\Phi \sim 7.5\Phi$,平均值为 4.6Φ ;分选系数(δ)变化范围为 $1.3 \sim 2.5$,平均值为 1.9 ;偏度(Sk)变化范围为 $-0.4 \sim 3.0$,平均值为 1.3 ;峰度(Ku)变化范围为 $1.9 \sim 12.4$,平均值为 4.4 。

研究表明,随着钻孔深度的增加,沉积物样品的平均粒径整体呈减小趋势,分选系数、偏度、峰度随深度变化呈韵律性波动。BHS01孔沉积物样品中粘土($<4\ \mu\text{m}$)组分含量较低,相比其他粒级含量变化较小,只在下部层位显著增加,整体变化趋势与粉砂级($4\sim 63\ \mu\text{m}$)呈一定的相关性;粉砂级($4\sim 63\ \mu\text{m}$)组分含量与砂级($>63\ \mu\text{m}$)组分含量

随深度变化呈负相关变化,这可能与渤海海峡地区水动力条件变化有关。

综上所述,结合钻孔岩性特征及前人研究成果^[27],渤海海峡 BHS01 孔上部 40 m 沉积物岩性受水动力条件变化影响较大,水动力条件总体较强,表现为砂级组分含量在整体粒级含量中占主导地位。

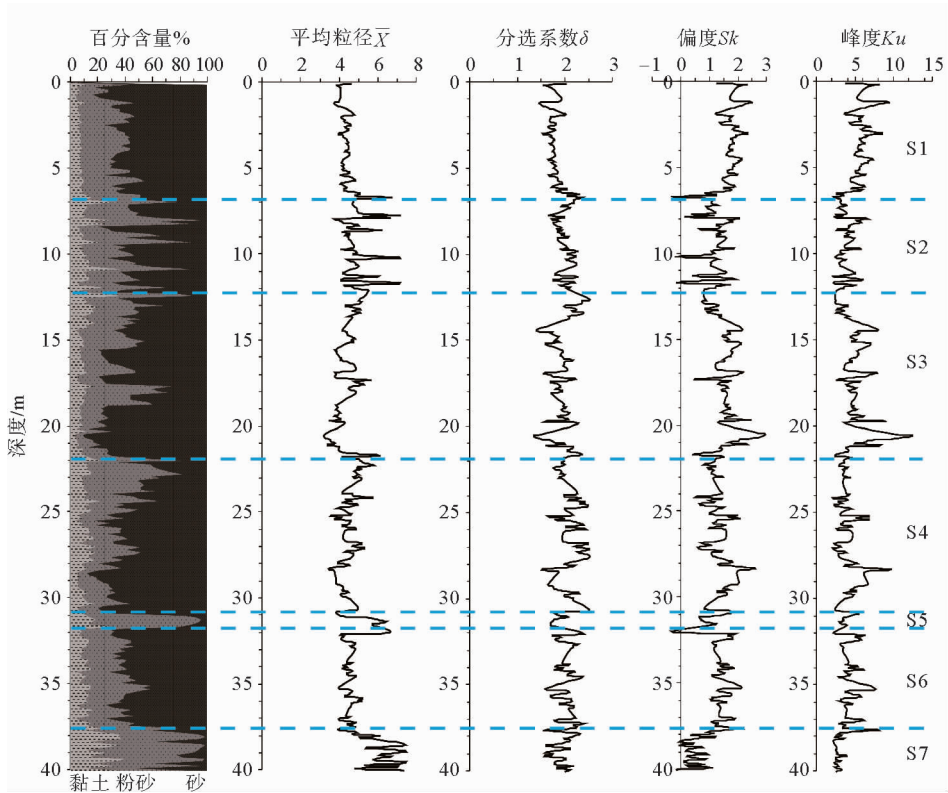


图6 BHS01孔上部沉积物粒级组成与粒度参数随深度变化图

Fig. 6 Changes in grain size compositions and parameters with the depth for the upper part of the core BHS01

4 沉积环境变化

第四纪以来,渤海地区受冰期-间冰期旋回作用而发生多次海侵—海退事件,海相和陆相地层交替发育^[12,14]。BHS01孔上部40 m沉积物为一套砂泥交互发育的沉积地层,磁性地层学研究表明BHS01孔上部40 m沉积物为中更新世以来沉积产物^[36]。根据沉积物粒度组成、粒度象、粒度结构以及粒度参数变化,结合沉积物颜色、岩性、构造及古生物分布特征,将BHS01孔上部40 m沉积物自上而下划分为7个沉积层段。

(1)S1(0~6.5 m):沉积物以灰色细砂为主,局部发育黏土质粉砂和粉砂透镜体,见海相牡蛎碎屑。砂组分平均含量达63.57%,为优势组分;粉砂组分含量平均为29.4%;黏土含量较低,平均仅为6.9%。平均粒径为91.3 μm (4.3 Φ),粒度较粗,属于细砂级。分选系数平均值为1.7,变化范围在1.4~2.3,总体分选较差;偏度平均值为1.7,波动区间为0.8~2.4,以极正偏为主;峰度平均值为5.7,波动区间为2.5~9.5,以尖锐形态为主,少数为极尖锐形态。这些说明S1层位沉积过程中水动力较强,整体处于高能沉积环境下,砂组分含量后期迅速增加,推断S1层位前期为河

流相沉积,后期发生海侵,发育海相沉积。

(2)S2(6.5~11.7 m):灰色—深灰色细砂与灰色、灰黄色黏土质粉砂互层,黏土质粉砂厚度较薄,含灰黑色有机质斑点,发育平行纹层。砂组分含量较高,平均可达49.1%;粉砂组分含量平均为37.6%;黏土组分含量平均为13.2%。平均粒径为76.1 μm (4.9 Φ),属于细砂级。分选系数平均值为2.0,变化范围在1.6~2.3,总体分选较差一差;偏度平均值为1.1,波动区间为-0.3~2.0,以正偏—极正偏为主;峰度平均值为3.6,波动区间为1.9~6.6,以尖锐形态为主,少数为正态形态。S2层位厚度仅为5.2 m,砂组分含量和粉砂组分含量呈负相关变化,指示水动力条件波动频繁,期间发育几处以粉砂为主的沉积薄层,但厚度很小,推断S2层以河流相沉积为主,夹薄层湖相沉积。

(3)S3(11.7~21.7 m):灰色—深灰色细砂为主,下部夹浅灰色黏土质粉砂薄层,含水率较高,见河蚌碎屑。砂组分含量平均为63.9%,为优势组分;粉砂组分含量平均可达27.1%;粘土组分平均含量仅为8.9%。平均粒径为104.1 μm (4.3 Φ),颗粒较粗,属于细砂级。分选系数为1.9,变化范围在1.3~2.5,总体分选较差一差;偏度平均值为1.5,波动区间为0.4~2.9,以正偏—极正偏为主;峰度平均值为4.9,波动区间为2.3~12.4,以尖锐形态为主,少数为正态形态。S3层位水动力条件总体较强,由下而上呈逐渐减弱趋势,推断为河流相沉积。

(4)S4(21.7~31.0 m):灰色细砂,含陆相小腹足类化石。砂组分平均含量高达62.0%;粉砂组分平均含量为27.5%;黏土组分平均含量仅为10.4%。平均粒径为98.49 μm (4.5 Φ),属于细砂级。分选系数为2.1,变化范围在1.5~2.5,总体分选较差一差;偏度平均值为1.3,波动区间为0.5~2.5,以极正偏为主;峰度平均值为4.1,波动区间为2.1~9.6,以尖锐形态为主,少数为极尖锐形态。S4层水动力条件总体较强,砂组分含量由下往上呈减少趋势,指示水动力逐渐减弱,推断为河流相沉积。

(5)S5(31.0~32 m):灰色粉砂夹深灰色黏土质粉砂薄层,含贝壳碎屑。砂组分含量平均10.8%;粉砂组分平均含量高达71.5%;黏土组

分平均含量为17.6%。平均粒径为98.4 μm (6.1 Φ),属于粉砂级。分选系数为1.8,变化范围在1.7~2.4,总体分选较差;偏度平均值为0.64,波动区间为-0.3~1.2,以正偏为主;峰度平均值为3.2,波动区间为2.2~3.8,以正态形态为主。S6层位水动力较弱,物源较为单一,沉积环境较稳定,推断为海相沉积。

(6)S6(32~37.9 m):灰色—棕黄色细砂,局部层段发育黏土质粉砂薄层和有机质斑点。砂组分含量平均达61.0%,为优势组分;粉砂组分含量平均为28.7%;黏土组分含量平均仅为10.2%。平均粒径为91.2 μm (4.5 Φ),颗粒较粗,属于细砂级。分选系数平均为2.0,变化范围在1.5~2.4,总体分选差;偏度平均值为1.4,波动区间为0.9~2.2,以极正偏为主;峰度平均值为4.3,波动区间为2.7~8.0,以极尖锐形态为主。这些特征指示S6层位沉积过程中水动力较强,推断为河流相沉积。

(7)S7(37.9~40 m):灰色粉砂质黏土与深灰色粉砂互层,局部含丰富有机质,透镜体发育,发育虫孔构造。砂组分含量平均仅为15.3%;粉砂组分含量平均可达59.1%,为优势级组分;黏土组分含量较高,平均25.4%。平均粒径为32.0 μm (6.4 Φ),属于粉砂级。分选系数为1.8,变化范围在1.5~2.1,分选较差;偏度平均值为0.4,波动区间为-0.1~1.2,以正态为主;峰度平均值为2.6,波动区间为2.1~3.9,正态分布形态。S7层位粒度组成及其参数的垂向变化较小,水动力较弱,沉积环境较为稳定,推断为浅海相沉积。

5 结论

(1)渤海海峡 BHS01 孔上部 40 m 沉积物岩性以粉砂质砂为主,其次为砂质粉砂、泥质砂、粉砂,沉积物粒度较粗;沉积物分选较差;以正偏、极正偏为主;沉积物形态以尖锐为主,总体指示了不稳定的高能沉积环境。

(2)BHS01 孔上部 40 m 沉积物平均粒径随深度增加呈减小趋势,分选系数、偏度、峰度随深度变化呈韵律性波动,指示了水动力条件在地质历史时期内强弱波动频繁。

(3)渤海海峡中更新世以来水动力条件变化

频繁,总体水动力较强,沉积物以河流相沉积为主,海相沉积侵蚀严重,沉积物经历了浅海相—河流相—浅海相交替变化的沉积过程,指示了高能环境下的海陆交互作用。

致谢:感谢中国科学院地球环境研究所郭飞博士与青岛海洋地质研究所秦亚超副研究员在实验和数据处理过程中提供的指导和帮助,感谢审稿专家的指导意见。

参考文献:

- [1] Visher G S. Grain size distributions and depositional processes [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1969, 39 (3):1074-1106.
- [2] Saito Y, Yang Z, Hori K. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: a review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene [J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2):219-231.
- [3] Yang S Y, Jung H S, Lim D I, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea [J]. *Earth Science Reviews*, 2003, 63(1):93-120.
- [4] Liu Z, Tuo S, Colin C, et al. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation [J]. *Marine Geology*, 2008, 255(3/4): 149-155.
- [5] 蒋东辉,高 抒. 渤海海峡潮流底应力与沉积物分布的关系 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 663-667.
- [6] 高 抒. 沉积物粒径趋势分析:原理与应用条件 [J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 826-836.
- [7] 乔淑卿,石学法,王国庆,等. 渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨 [J]. *海洋学报*, 2010, 32(4):139-147.
- [8] 孙有斌,高 抒,李 军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析 [J]. *科学通报*, 2003, 48(1):83-86.
- [9] Cheng P, Gao S, Bokuniewicz H. Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60 (2): 203-212.
- [10] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质 [M]. 北京:科学出版社, 1985: 1-233.
- [11] 陈中亚,马妍妍,李广雪. 中国东部陆架海区粒度分析研究进展 [J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(4):18-23.
- [12] 姚政权,石学法. 渤海湾沿岸第四纪海侵研究进展 [J]. *海洋地质前沿*. 2015, 31(2): 9-16.
- [13] 姚 菁. 渤海南岸 LZ908 孔海陆交互相地层气候代用指标及沉积环境研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
- [14] 杨旭辉,冯秀丽,褚忠信,等. 中国东部陆架表层沉积物粒度特征及其沉积环境浅析 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(7/8):126-134.
- [15] 李 艳,刘 艳,李安春,等. 大连湾附近海域表层沉积物粒度特征及水动力环境指示 [J]. *海洋通报*, 2014, 33 (5): 552-558.
- [16] 刘 成,胡日军,朱龙海,等. 庙岛群岛海域沉积动力环境分区及沉积物输运趋势 [J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34 (8): 24-33.
- [17] 张 剑,李日辉,王中波,等. 渤海东部与黄海北部表层沉积物的粒度特征及其沉积环境 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5): 1-12.
- [18] 蓝先洪,李日辉,张志珣,等. 渤海东部与黄海北部表层沉积物的元素地球化学记录 [J]. *地球学报*, 2015, 36 (6):718-728.
- [19] 王 双. 黄渤海表层沉积物磁学特征及其环境指示意义 [D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
- [20] 李日辉,孙荣涛,徐兆凯,等. 黄海与渤海交界区附近表层沉积物中的底栖有孔虫分布与环境因素制约 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(3):93-103.
- [21] 王 庆,仲少云,刘建华,等. 山东庙岛海峡的峡道动力地貌 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(2):17-24.
- [22] 乔淑卿,石学法,王国庆,等. 渤海底质沉积物的粒度特征及输运趋势探讨 [J]. *海洋学报*, 2009, 32 (4):139-146.
- [23] 陈义兰,吴永亭,刘晓瑜,等. 渤海海底地形特征 [J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(1):75-82.
- [24] 蔡 锋,曹超,周兴华,等. 中国近海海洋-海底地形地貌 [M]. 北京:海洋出版社, 2013: 46-55.
- [25] 陈晓辉,张训华,李日辉,等. 渤海海峡海域灾害地质研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*. 2014, 34(1):11-19.
- [26] 刘建华,王 庆,仲少云,等. 渤海海峡老铁山水道动力地貌及演变研究 [J]. *海洋通报*, 2008, 27(1):68-74.
- [27] 赵铁虎,齐 君,梅 赛,等. 渤海海峡跨海通道地质条件调查与分析 [J]. *科技导报*, 2016, 34(21): 39-47.
- [28] Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand [J]. *New Zealand journal of geology and geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.
- [29] Wentworth, Chester K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [30] McManus J. Grain size determination and interpretation [J]. *Techniques in sedimentology*, 1988: 63-85.
- [31] 李 琰,于洪军,易 亮,等. 渤海南部 Lz908 孔海陆交互沉积的粒度特征及其对沉积环境的指示 [J]. *海洋科学*, 2014, 38(5):107-113.
- [32] 吕文哲,易 亮,付腾飞,等. 渤海南部早-中更新统湖相沉积的粒度特征及其对沉积环境的指示 [J]. *海岸工程*, 2017, 36(1):34-42.
- [33] Passega R. Texture as Characteristic of Clastic Deposition [J]. *Bull amer assoc petrol geol*, 1957, 41:1952-1984.
- [34] Passega R. Grain size representation by CM patterns as a geologic tool [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1964,

34(4):830-847.

版), 2015, 45(3): 918-925.

[35] 李 勇, 李海燕, 赵应权. 沉积物粒度特征及其对环境的指示意义——以濠河为例[J]. 吉林大学学报(地球科学

[36] 孙 军, 杨慧良, 何 磊, 等. 渤海海峡 BHS01 孔沉积物磁性地层学研究[J]. 现代地质, 2019, 33(02): 315-324.

GRAIN-SIZE DISTRIBUTION PATTERNS OF THE CORE SEDIMENTS FROM BHS01 OF BOHAI STRAIT AND THEIR ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS

SUN Jun^{1,2}, LU Yue^{1,3}, YANG Huiliang^{1,2*}, CHU Hongxian^{1,2}, QI Jianghao^{1,2},
LIU Changchun^{1,2}, LI Panfeng^{1,2}, DOU Zhenya^{1,2}

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China;

2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology,

Qingdao 266071, China; 3 School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Grain-size distribution patterns of the upper 40m of sediments of the core BHS01 are studied to detect the evolutional course of depositional environment of the Bohai Strait. Results show that the mean grain size of the sediments varies from 3.2Φ to 7.5Φ , indicating mixed sediments of silty sand and sandy silt. The sorting of the sediments ranges from 1.3 to 2.5, indicating poor sorting deposits. The skewness of the sediments are mostly dropped in the range of $-0.4\sim 3.0$, showing a positive and super-positive skewness, while the kurtosis of the sediments varies from 1.9 to 12.4, showing an acute normal distribution. Based on the integrated analysis of grain size parameters, C-M diagrams, scatter diagrams and the changes in grain size with depth, it is concluded that the Bohai Strait was once a high-energy environment. Seven sedimentary units are recognized for the upper part of BHS01, which indicate the evolutional history of the region since Middle Pleistocene from shallow sea facies to fluvial facies, to shallow sea facies again.

Key words: the Bohai Strait; BHS01 core; marine-terrigenous sediments; grain-size