



晚更新世以来南黄海中部进积体序列与古河流系统

陈晓辉, 陆 凯, 田振兴, 温珍河, 徐晓达, 张 勇, 孔祥淮

Progradational sediment: succession and paleo-channel system in the central South Yellow Sea since the Late Pleistocene

CHEN Xiaohui, LU Kai, TIAN Zhenxing, WEN Zhenhe, XU Xiaoda, ZHANG Yong, and KONG Xianghuai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

长江口外扬子浅滩YZ05孔沉积序列及晚更新世以来的环境演化

Sedimentary facies and environmental evolution of the Yangtze shoal, eastern China Sea shelf since Late Pleistocene: Evidence from core YZ05

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 22

温州沿海平原晚更新世以来的海相地层特征及沉积环境

Marine stratigraphy since Late Pleistocene on Wenzhou coastal plain and its depositional environment

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 148

渤海西部海域晚更新世以来的孢粉组合及古环境变化

Pollen spore assemblages and induced palaeoenvironmental changes in the western Bohai Sea since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 115

晚更新世以来台湾浅滩西北近岸沉积特征与古环境演化

Sedimentary characteristics and paleoenvironmental evolution of the northwest coast of the Taiwan Shoal since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 53

伶仃洋东岸晚更新世以来硅藻组合及环境意义

Diatom assemblage since late Pleistocene in the east coast of Lingdingyang Bay and its environmental implications

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 126



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈晓辉, 陆凯, 田振兴, 等. 晚更新世以来南黄海中部进积体序列与古河流系统 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 85-96.
CHEN Xiaohui, LU Kai, TIAN Zhenxing, et al. Progradational sediment: succession and paleo-channel system in the central South Yellow Sea since the Late Pleistocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 85-96.

晚更新世以来南黄海中部进积体序列与古河流系统

陈晓辉^{1,2}, 陆凯^{1,2}, 田振兴^{1,2}, 温珍河^{1,2}, 徐晓达^{1,2}, 张勇^{1,2}, 孔祥淮^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
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 266237

摘要:通过高分辨率浅地层剖面声学地层与钻孔沉积地层的综合对比分析,系统研究了晚更新世以来南黄海中部海域的层序地层序列及其对海平面变化的响应。研究显示,基于高分辨率浅地层剖面自老至新划分的6个声学地层单元(U5、U4、U3、U2、U1-2、U1-1)与钻孔划分的沉积地层单元密切相关。MIS4期与末次冰盛期低海面时期发育的2个层序界面(R4、R2),将研究区晚更新世以来的层序地层自下而上划分为3个层序(SQ3、SQ2、SQ1),并识别出3期进积体序列与2期古河流系统。MIS5期与MIS3期高海面及海平面下降期间的2期东向进积体序列主要包括高位体系域与强制海退体系域,对应浅海—滨海沉积,厚度分别由西部的24 m与40 m向东明显变薄,而全新世高海面以来向海的进积体序列主要对应高位体系域,与长江源的浅海相泥质沉积相关,最大厚度超过16 m。研究区MIS4期和末次冰盛期发育的2期古河流系统与低位体系域相对应,最大沉积厚度分别超过36 m与24 m,均与长江及黄河密切相关,影响范围延伸至黄海槽及其以东海域,尤其末次冰盛期最远可达济州岛附近海域。

关键词:进积体; 古河道; 层序地层; 晚更新世以来; 南黄海中部

中图分类号: P736.21 文献标识码: A DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072701](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072701)

Progradational sediment: succession and paleo-channel system in the central South Yellow Sea since the Late Pleistocene

CHEN Xiaohui^{1,2}, LU Kai^{1,2}, TIAN Zhenxing^{1,2}, WEN Zhenhe^{1,2}, XU Xiaoda^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, KONG Xianghuai^{1,2}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266237, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

Abstract: High-resolution seismic profiles and depositional stratigraphy of cores in the central South Yellow Sea (SYS) since the Late Pleistocene were analyzed. The sequence stratigraphy succession and its response to sea-level changes were studied. Results indicate that high-resolution seismic stratigraphy could be divided into six seismic units (U5, U4, U3, U2, U1-2, and U1-1 from early to late times), and they were closely related to depositional units of cores. Based on the two sequence boundaries R4 and R2, corresponding to sea-level lowstands of MIS4 and the Last Glacial Maximum (LGM) respectively, three distinct sequences (SQ3, SQ2, SQ1 from bottom to top) were identified. There are three stages of progradational sedimentation and two stages of paleo-channel systems. Two eastward progradational successions match the sea-level highstands after sea-level falls of MIS5 and MIS3, with thickness maxima 24 m and 40 m in the western part of the study area respectively; and they mainly consist of highstand systems tract (HST) and falling stage systems tract (FFST) (neritic and littoral facies), and obviously become thinner eastward. The seaward progradational succession since the sea-level highstand of the Holocene, with a maximum thickness of 24 m, is related to HST (mud sediment of neritic facies from the Yangtze River). The two stages of paleo-channel systems were dated to MIS4 and LGM, with the maxima thickness of 36 m and 24 m respectively, and they correspond to the lowstand systems tract that were closely associated with the Yellow River and Yangtze River in the past. The paleo-channel systems extended to the Yellow Sea trough and its eastern area could reach the Jeju Island (Korean Peninsula) coast in the past especially in the LGM.

Key words: progradational sediment; paleo-channel; sequence stratigraphy; Late Pleistocene; the central South Yellow Sea

资助项目:中国地质调查局地质调查项目“1:25万锦西、日照和霞浦县等图幅海洋区域地质调查”(DD20160139),“1:25万东海重点海域海洋区域地质调查”(GZH201500203),“东部重点海域海洋区域地质调查”(DD20221710);国家海洋地质专项项目“全国陆域及海区地质图件更新与共享”(DD20190377)

作者简介:陈晓辉(1981—),男,博士,正高级工程师,主要从事陆架晚第四纪层序地层与环境地质研究, E-mail: hongzi1982@163.com

通讯作者:陆凯(1978—),男,正高级工程师,主要从事海洋基础地质地球物理调查与研究, E-mail: qing_luk@163.com

收稿日期:2022-07-27; **改回日期:**2022-08-23. 文凤英编辑

南黄海介于中国大陆与朝鲜半岛之间,是一个典型的半封闭陆架浅海,大部分水深小于 100 m,地形自东、西两侧向黄海槽逐渐倾斜^[1]。自中更新世浙闽隆起大规模沉降导致黄海大规模海侵后,南黄海构造沉降趋于稳定^[2-3],尤其晚更新世以来,自中国大陆侧接受黄河、长江等搬运入海的大量陆源碎屑物质^[4-9],在海平面变化主控因素的影响下,形成海陆交互的特征地层。

20 世纪八九十年代,前人基于 QC2 孔沉积学、古生物学、年代学等资料的综合分析,建立了南黄海陆架区可进行区域对比的 1.7 Ma 以来包含 8 个海侵层的地层序列^[10],这一代表性研究是南黄海层序地层研究的前驱。近年来,高分辨率浅地层剖面测量与钻孔定年技术的发展应用,推动了南黄海层序地层学及与之密切相关的海平面变化研究。不同学者针对南黄海及周边海域晚第四纪层序地层进行了大量研究,在南黄海西部层序的级别、结构及其演化过程^[2,11-13]、南黄海东部层序中体系域的组合关系^[14-15]等方面取得了一系列的研究成果。然而,这些研究多局限在南黄海西部中国大陆近岸与东部朝鲜半岛近岸海域,针对南黄海中部晚第四纪尤其是晚更新世以来层序地层的研究相对薄弱,对发育的特征层序地层序列尚缺乏系统的认识。

近年来,随着我国南黄海重点地区中大比例尺海洋区域地质调查的相继完成,在南黄海中部海域积累了大量的高分辨率浅地层剖面资料与钻孔数

据。本文基于这些地质地球物理调查资料,结合前人研究成果,系统揭示了南黄海中部晚更新世以来的层序地层序列、结构特征及其对海平面变化的响应。

1 材料与方法

本文声学地层分析所采用的 6 011 km 高分辨率浅地层剖面资料由青岛海洋地质研究所于 2016 年 7—8 月在南黄海中部海域采集(图 1)。导航定位采用美国 NAVCOM 技术公司生产的 NAV3050 星站差分 GPS,定位精度优于 1 m。浅地层剖面测量采用英国 AAE 公司生产的 SBP/AAE 系统,测量过程中,测量船速控制在匀速 5 节左右,震源类型为电火花,激发能量为 500 J,触发间隔为 800 ms,滤波为 500~6000 Hz。本文在剖面时深转换时,采用的声学平均速度为 1600 m/s。

本文沉积地层分析采用青岛海洋地质研究所于 2018 年 10 月采集的 SYS-1 孔(34°13'33.77"N、123°1'23.25"E,水深 71.7 m,进尺 200 m)柱样,同时,结合收集的研究区内 NT1 孔相关资料^[6]。在室内对 SYS-1 孔沉积物进行详细描述和采样,本文研究层段为钻孔的 0~62.76 m。

微体古生物鉴定采样间距约为 40 cm,共获取微体古生物鉴定样品 175 件,鉴定工作在山东理工大学完成。充分浸泡后的样品经过 250 目(0.063 mm)的标准筛后烘干,之后过 120 目(0.125 mm)标准筛,

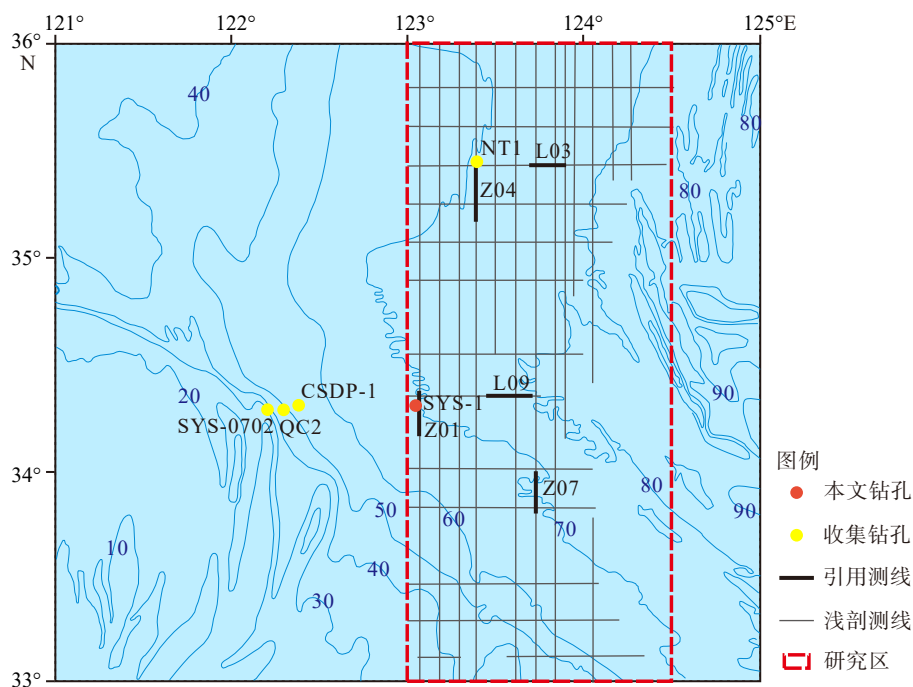


图 1 研究区浅地层剖面测线与钻孔位置图

Fig.1 Locations of seismic profiles and cores in the study area

对粗样中的有孔虫与介形虫在显微镜下进行统计。微体古生物丰度低的样品统计全样, 丰度较大的样品采用二分法缩分统计, 原则上统计底栖有孔虫不少于 100 枚、介形虫不少于 50 枚。本次鉴定介形虫含量较低, 仅在个别层位出现, 不具有统计意义, 本文仅依据底栖有孔虫的鉴定结果进行分析。微体古生物鉴定及底栖有孔虫类别的解释主要依据汪品先等^[16-18]、赵泉鸿等^[19]文献, 本文根据底栖有孔虫的水深分布及其温度、盐度特征, 将研究区的底栖有孔虫划分为陆架浅海类属种、冷水种、滨岸广盐类浅水种等 3 种类别, 基于此, 对沉积环境及沉积地层进行了划分。

钻孔年代标定采用 AMS ^{14}C 与 OSL 相结合的方法, 在岩芯 0~23 m 挑选 4 个混合底栖有孔虫样品、2 个植物碎屑样品于美国 Beta Analytic 实验室完成 AMS ^{14}C 年代测试, 在岩芯 18~62.76 m 选取 6 个沉积物样品在中国科学院青海盐湖研究所盐湖化学分析测试中心完成 OSL 年代测试。

2 浅地层剖面声学地层

基于研究区浅地层剖面资料的地质解释, 通过声学反射的形态结构、振幅强弱、叠置方式等, 自

下而上识别出南黄海中部海域晚更新世以来可进行区域连续追踪的 7 个声学反射界面 (R5、R4、R3、R2、R1、R1m、R0), 这些声学界面将研究区的声学地层自下而上划分为 6 个声学地层单元或亚单元 (U5、U4、U3、U2、U1-2、U1-1) (图 2—5)。这些声学界面和声学单元反射特征与赋存状况规律性明显, 具有明显的层序意义。

声学界面 R4 与 R2 形态上表现为强振幅、起伏大、较连续的侵蚀不整合面, 对应明显的层序界面, 这两个层序界面对下伏地层产生明显的侵蚀下切作用, 将界面上、下两套形态结构截然不同的地层分开, 反映了沉积环境与沉积相的转换。基于层序界面 R4 与 R2 对南黄海中部海域晚更新世以来的声学地层分布规律进行分析。

2.1 层序界面 R4 以下的声学地层

U5 声学地层单元是南黄海中部可连续追踪的最下部的地层单元, 本文对其下地层未进行划分。U5 声学地层单元以层序界面 R4 作为顶界面, 最大海泛面 R5 为底界面。该声学单元内部反射特征主要表现为弱或中等振幅、局部近水平、大部分向海进积 (研究区北部东南向、南部东北向) 的反射层。U5 声学地层单元受强振幅层序界面 R4 下切侵蚀

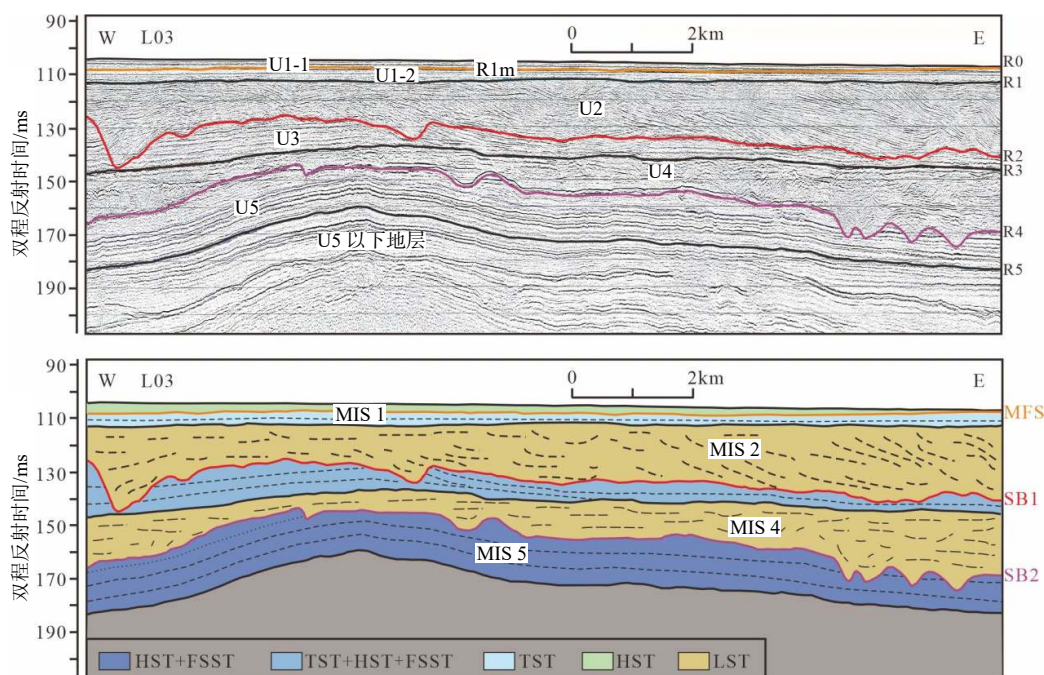


图 2 研究区 W-E 向 L03 线典型浅地层剖面

HST 为高位体系域, TST 为海侵体系域, LST 为低位体系域, FSST 为强制海退体系域, SB 为层序界面, MFS 为最大海泛面。

Fig.2 W-E typical seismic profile of L03 in the study area

HST: highstand systems tract; TST: transgressive systems tract; LST: lowstand systems tract; FSST: falling stage systems tract; SB: sequence boundary; MFS: maximum flooding surface.

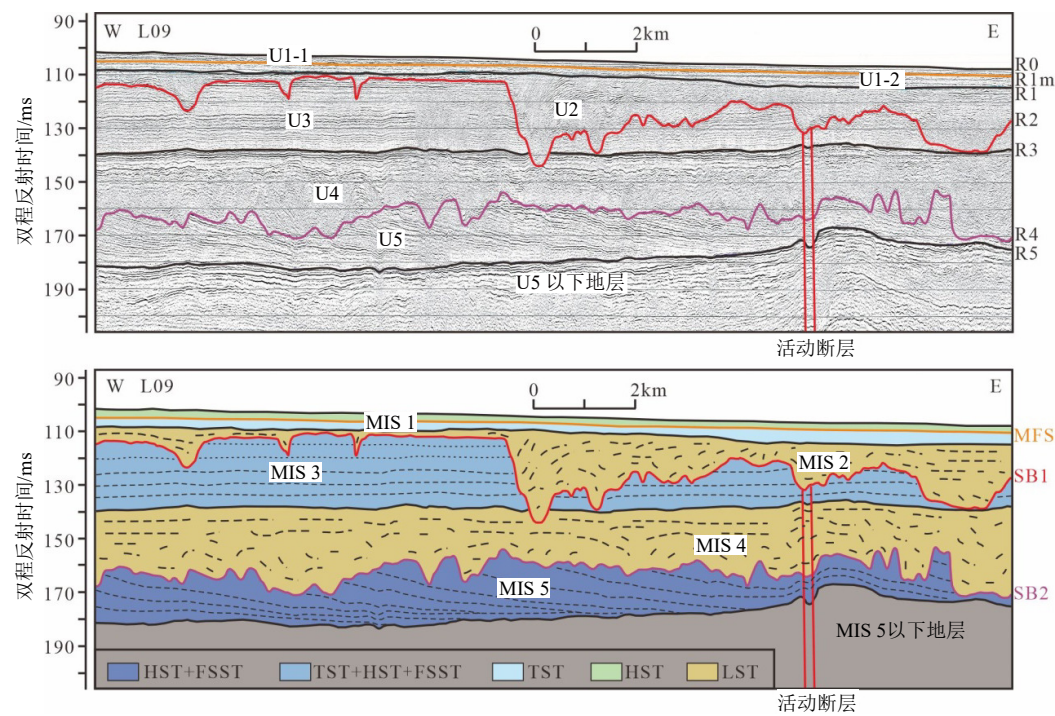


图 3 研究区 W-E 向 L09 线典型浅地层剖面

HST 为高位体系域, TST 为海侵体系域, LST 为低位体系域, FSST 为强制海退体系域, SB 为层序界面, MFS 为最大海泛面。

Fig.3 W-E typical seismic profile of L09 in the study area

HST: highstand systems tract; TST: transgressive systems tract; LST: lowstand systems tract; FSST: falling stage systems tract; SB: sequence boundary; MFS: maximum flooding surface.

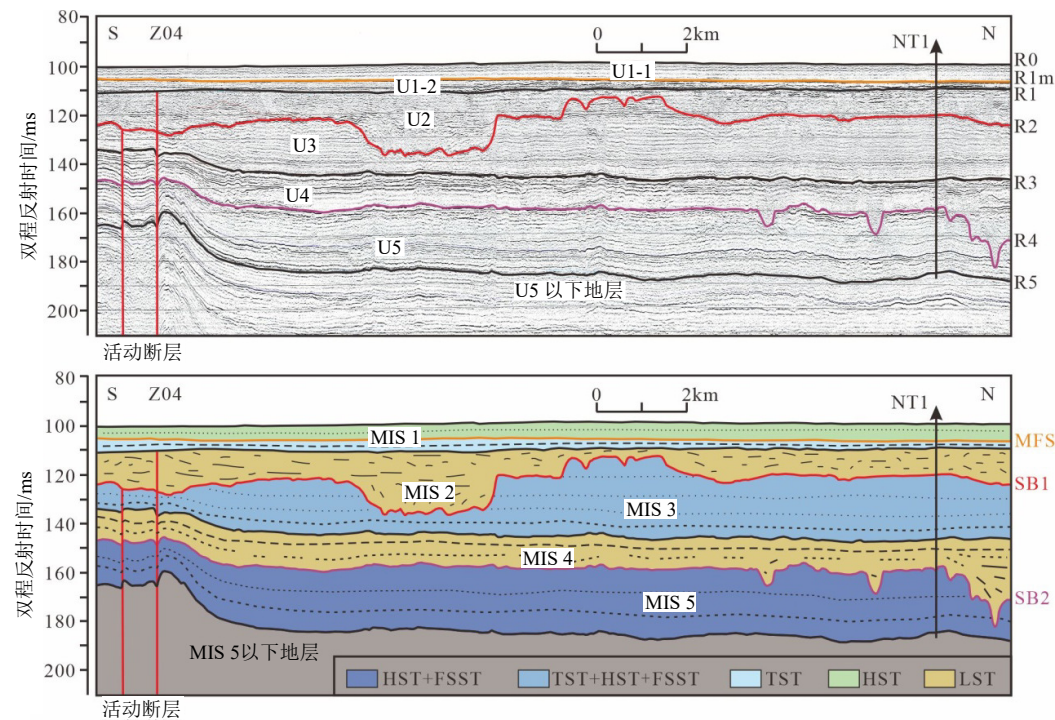


图 4 研究区 S-N 向 Z04 线典型浅地层剖面

HST 为高位体系域, TST 为海侵体系域, LST 为低位体系域, FSST 为强制海退体系域, SB 为层序界面, MFS 为最大海泛面。

Fig.4 S-N typical seismic profile of Z04 in the study area

HST: highstand systems tract; TST: transgressive systems tract; LST: lowstand systems tract; FSST: falling stage systems tract; SB: sequence boundary; MFS: maximum flooding surface.

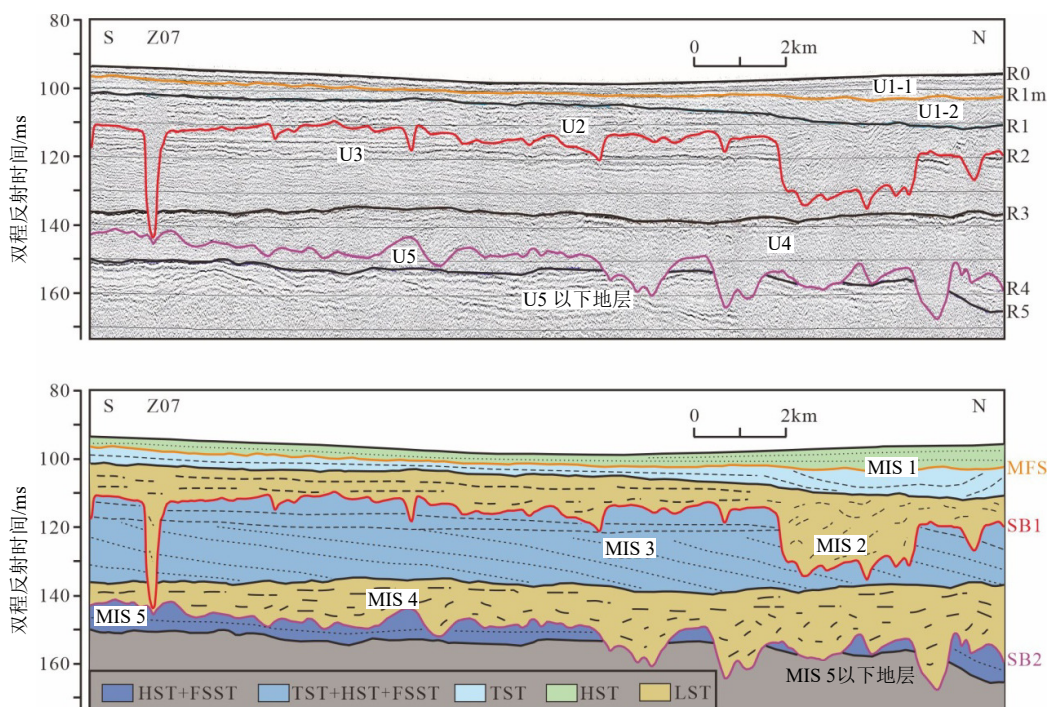


图 5 研究区 S-N 向 Z07 线典型浅地层剖面

HST 为高位体系域, TST 为海侵体系域, LST 为低位体系域, FSST 为强制海退体系域, SB 为层序界面, MFS 为最大海泛面。

Fig.5 S-N typical seismic profile of Z07 in the study area

HST: highstand systems tract; TST: transgressive systems tract; LST: lowstand systems tract; FSST: falling stage systems tract; SB: sequence boundary; MFS: maximum flooding surface.

作用,造成厚度变化较大,存在两个厚度中心,一是研究区北部,最大厚度超过 24 m,总体表现为自西北部向东南逐渐减薄甚至尖灭的分布特征,二是研究区南部,规模相对较小,最大厚度可达 15 m,呈现自西南部至东北部逐渐减薄直至尖灭的分布趋势(图 6)。

2.2 层序界面 R4 与 R2 之间的声学地层

U4 声学地层单元以层序界面 R4 为底界面,海进侵蚀面 R3 为顶界面,其内部反射下部表现为弱振幅、杂乱结构,上部呈现中强振幅、弱水平成层反射特征。U4 声学地层单元厚度分布规律性明显,研究区北部与南部均存在两个厚度中心,厚度普遍超过 20 m,其中北部厚度更大,东北部厚度中心最大厚度超过 40 m。此外,研究区中部厚度普遍较小,大部分海域厚度小于 10 m。

U3 声学地层单元位于海进侵蚀面 R3 之上,同时受到上覆层序界面 R2 明显的侵蚀下切作用,其下部多为中强振幅近水平或向海进积的层状反射,而上部表现为弱振幅、连续性较好、近似水平或缓波状的反射层。与 U5 声学地层单元类似,受层序界面 R2 的侵蚀作用, U3 声学地层单元赋存特征横

向与纵向变化较大,西部厚度大,其中西南部最大厚度超过 32 m,往东厚度逐渐变薄甚至尖灭,研究区东北部局部缺失。

2.3 层序界面 R2 之上的声学地层

U2 声学地层单元上覆于层序界面 R2 之上,顶界面海进侵蚀面 R1 对其存在明显的侵蚀削截,其内部反射大部分或表现为弱振幅、杂乱的反射特征,局部呈现中强振幅、弱水平成层反射结构。与 U4 声学地层单元相似,研究区不同海域的 U2 声学地层单元发育程度不尽相同,其下切深度和残存状态空间变化较大。该声学地层单元存在两个厚度中心,分别位于研究区的东北部与西南部,最大厚度均超过 24 m,两厚度中心分别表现为 NS 向与 WE 向展布特征,分布规模东北部明显大于西南部。

U1-2 声学地层单元上界面最大海泛面 R1m 与下界面海进侵蚀面 R1 近似平行,其内部反射表现为中强振幅、高频率、近水平的结构特征。该声学地层单元厚度变化较小,大部分为 1.5~5.5 m,研究区中部大部分区域厚度为 2.5~3.5 m,至研究区南部厚度略有增加,而西北部厚度较大,普遍超过 3.5 m。

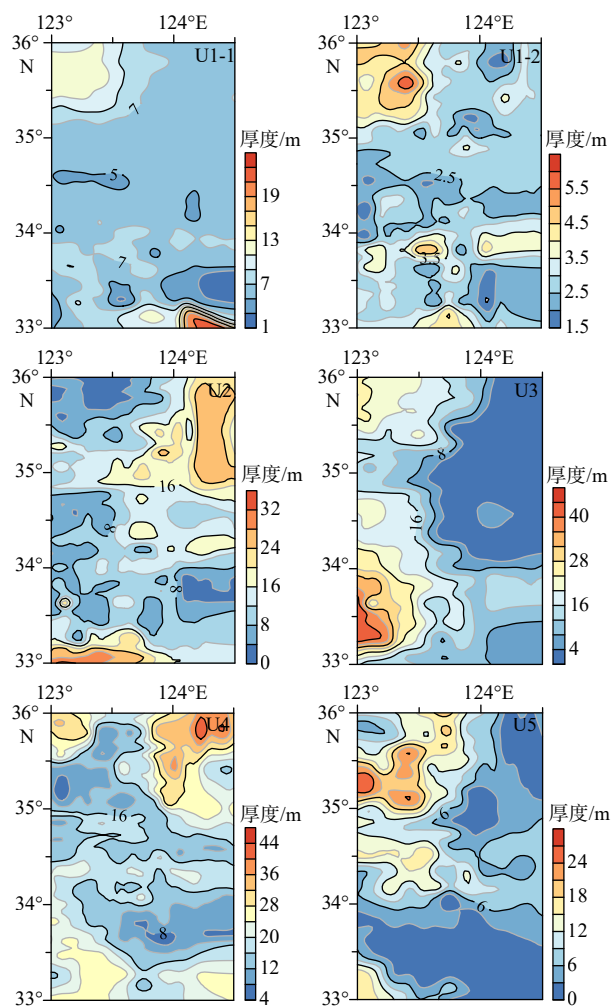


图6 研究区地层单元U1-1、U1-2、U2、U3、U4、U5厚度图

Fig.6 Isopach maps of units U1-1, U1-2, U2, U3, U4, and U5 in the study area

U1-1 声学地层单元上覆于最大海泛面 R1m 之上,是研究区发育的最上部的地层单元,其内部表现为弱振幅、低倾角向海进积的半透明声学反射层。U1-1 声学地层单元研究区大部分区域厚度为 2~4 m,在东南部与西北部存在两个厚度中心,其中东南部厚度超过 16 m,西北部厚度可达 6 m。

3 钻孔沉积地层

钻孔样品的 AMS ^{14}C 测年数据与 OSL 测年数据结果显示, SYS-1 孔 0~62.76 m 段地层蕴含着南黄海中部海域晚更新世 (MIS5 期) 以来的沉积记录。本文基于钻孔测年数据,结合岩性特征、微体古生物组合变化,确立了研究区晚更新世以来的年代地层格架,在此基础上,对 SYS-1 孔 0~62.76 m 段沉积地层进行详细划分。结果显示,该层段沉积

物由老至新可划分为 5 个沉积单元 (D5、D4、D3、D2、D1),这 5 个沉积单元与浅地层剖面关于声学地层单元的划分对应关系良好 (图 7)。

D5 沉积地层单元 (62.76~53.80 m): 与 U5 声学地层单元相对应,该单元岩性主要为深灰色黏土-灰褐色粉砂质黏土,上部与下部夹粉砂薄层,交错层理发育,中部发育大量粉砂透镜体,见虫孔构造及大量贝壳碎片,与下伏地层为侵蚀接触。该层段底栖有孔虫丰度均值为 210 枚/50g 干样,简单分异度和复合分异度均值分别为 6 种和 1.12,底栖有孔虫优势种主要包括陆架浅海类属种 *Elphidium magellanicum*、*Elphidium advenum*,沿岸流及冷水团影响区的冷水种 *Protelphidium tuberculatum* & *Buccella frigida*,滨岸广盐类浅水种 *Ammonia aomoriensis*、*Ammonia beccarii* var.,且冷水种与滨岸浅水种垂向上呈现明显的镜像关系,显示了这一单元海平面波动过程中沉积环境的阶段变化。D5 地层单元 55.30~7.30 m 的 3 个 OSL 年龄为 (104±11)~(124±12) kaBP,结合钻孔整体地层划分,该单元对应 MIS 5 期海平面波动过程中浅海、滨海相交替的沉积。

D4 沉积地层单元 (53.80~34.73 m): 对应声学地层单元 U4,该沉积单元岩性存在明显的分段性,自下而上粒度逐渐变细,其中下部 53.80~44.70 m,岩性较为均一,主要为深灰色、灰褐色、灰黑色细砂、中砂,见炭质斑点与贝壳碎片,与下伏地层为侵蚀不整合接触;中部 44.70~37.60 m,岩性主要为黄褐色粉砂质黏土与灰褐色粉砂互层,交错层理发育;上部 37.60~34.73 m,岩性主要为深灰色黏土,中下部夹粉砂透镜体,见贝壳碎片,顶部 34.74~34.73 m 为一泥炭层。该沉积单元微体古生物鉴定下部层位未发现任何完整的海相或陆相微体生物化石,中上部层位仅有零星出现的微体古生物化石,不具有代表意义,综合岩性与微体古生物变化,推测该层段对应 MIS 4 期低海面时期的河流相沉积及之后海平面上升过程中的河道充填相沉积。

D3 沉积地层单元 (34.73~4.40 m): 对应声学地层单元 U3,该沉积单元岩性主要为深灰色、灰褐色黏土、粉砂质黏土,夹粉砂薄层或透镜体,中下部见大量贝壳碎片,上部夹大量炭质斑点,局部见植物根茎,块状构造与虫孔构造发育,与下伏地层为侵蚀接触。该沉积单元底栖有孔虫丰度较高,最高值达 12 729 枚/50g 干样,为全孔最高,丰度均值 1425 枚/50 克干样,简单分异度与复合分异度均值分别为 11 种与 1.41,底栖有孔虫优势种主要包括陆架浅海类属种 *Elphidium magellanicum*、*Nonionella stella*、

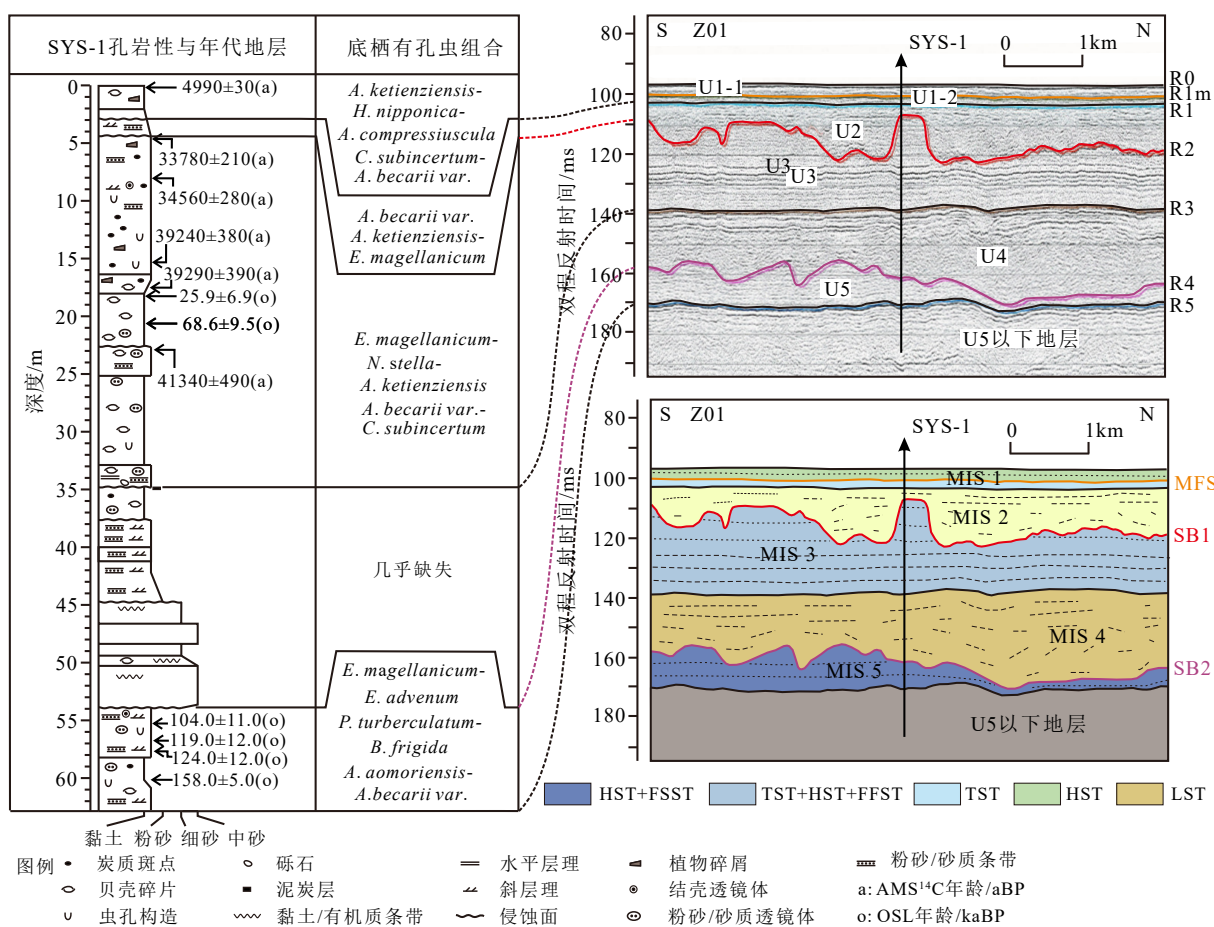


图 7 研究区 SYS-1 孔 0~62.76 m 段沉积地层与过孔浅地层剖面对比

HST 为高位体系域, TST 为海侵体系域, LST 为低位体系域, FSST 为强制海退体系域, SB 为层序界面, MFS 为最大海泛面。

Fig.7 Correlation between the depositional units of core SYS-1 (0~62.76 m) and the seismic units through the core in the study area

HST: highstand systems tract, TST: transgressive systems tract, LST: lowstand systems tract, FSST: falling stage systems tract, SB: sequence boundary,

MFS: maximum flooding surface.

Ammonia ketienziensis, 滨岸广盐类浅水种 *Ammonia becarii* var.、*Cribronion subincertum*。底栖有孔虫自下而上总体呈现三段式的变化, 中部微体古生物丰度较低, 海相性较弱, 下部与上部微体古生物丰度较高, 海相性明显增强, 显示了海平面波动过程中沉积环境的变化。D3 沉积单元中上部 4.94~22.72 m 段 AMS ^{14}C 测年为 $(33\,780\pm 210) \sim (41\,340\pm 490)$ aBP, 此外, 18.20 与 28.04 m 两处的 OSL 年龄为 25.9 ± 6.9 、 68.6 ± 9.5 kaBP, 总体显示该阶段对应 MIS 3 早中期海平面波动过程中的滨浅海相沉积。

D2 沉积地层单元 (4.40~2.98 m): 对应声学地层单元 U2, 该沉积单元岩性主要为黄褐色粉砂质黏土, 夹大量粉砂薄层, 粒度自下而上逐渐变细, 交错层理发育, 与下伏地层为侵蚀接触。该沉积单元底栖有孔虫丰度较下部地层单元明显降低, 该单元下部底栖有孔虫零星出现, 上部丰度略有增加, 底栖有孔虫优势种以滨岸广盐类浅水种 *Ammonia*

becarii var. 为主。根据岩性与微体古生物组合特征, 结合上下地层年代结果, D2 沉积单元对应末次冰盛期之后海平面逐渐上升过程中的河流充填相沉积。

D1 沉积地层单元 (2.98~0 m): 对应声学地层单元 U1, 该沉积单元岩性均一, 主要为灰褐色、深灰色黏土、粉砂质黏土, 块状构造发育, 自下而上粒度逐渐变细, 下部见粉砂透镜体, 中部夹植物根茎, 上部见贝壳碎片, 与下伏地层为侵蚀接触。该沉积单元底栖有孔虫丰度最高值 357 枚/50 g 干样, 均值为 29 枚/50 g 干样, 简单分异度与复合分异度均值分别为 6 种与 1.34, 单元内底栖有孔虫优势种主要包括陆架浅海类属种 *Ammonia ketienziensis*、*Hanzawaia nipponica*、*Ammonia compressiuscula*, 滨岸广盐类浅水种 *Cribronion subincertum*、*Ammonia becarii* var.。D1 沉积单元上部 10~12 cm 处的 AMS ^{14}C 年龄为 4990 ± 30 aBP, 总体显示该沉积单元对应全

新世海平面上升以来的滨浅海相沉积。

4 讨论

4.1 层序地层序列

研究表明,南黄海中部海域高分辨率浅地层剖面声学地层的划分与钻孔沉积地层的划分具有良好的对应关系,总体揭示了南黄海中部海域晚更新世以来的层序地层序列。晚更新世以来南黄海中部海域伴随海平面的多次波动,经历了陆地与陆架沉积环境的剧烈变换,形成了特征的沉积地层。南黄海中部 SYSC-1 孔与周边海域典型钻孔(如 SYS-0702 孔^[11]、QC2 孔^[10]、CSDP-1 孔^[2]、NT1 孔^[6])多项指标显示(图 8),研究区大部分地层序列主要形成于 MIS 5 期、MIS 3 期与全新世海平面相对较高地质时期,分别对应 U5、U3、U1-2—U1-1 三组海相沉积单元,其内部地层相对连续,厚度较大。研究区侵蚀作用主要发生在 MIS 4 期与 MIS 2 期低海面时期,河流沉积广泛发育,形成 R4 与 R2 两个层序界面及上覆于界面之上的 U4、U2 陆相沉积单元,

分别对前期 MIS 5 期与 MIS 3 期沉积地层产生不同程度的侵蚀下切作用,发育明显的沉积间断,并在后期的海平面上升阶段遭受不同程度的侵蚀与改造。

基于低海面时期形成的层序界面 R4 与 R2,晚更新世以来南黄海中部海域的层序地层自下而上可划分为 3 个层序序列: SQ3、SQ2、SQ1,分别对应 MIS 5 期、MIS 4 中晚期至 MIS 3 早中期、MIS 2 中晚期至全新世 3 个地质时期。

SQ3 是晚更新世以来南黄海中部海域可识别出的最下部层序,位于层序界面 R4 之下,主要涉及 MIS 5 期海平面波动过程形成的地层单元 U5,对应高位体系域与强制海退体系域组合,两种体系域内部结构均表现为明显的进积结构。由于这一地质时期海平面波动过程中的再造与混合沉积作用强烈,受到浅地层剖面分辨率的限制,本文未识别出两种体系域之间的界面,未对两组体系域分别进行界定。

SQ2 介于层序界面 R4 与 R2 之间,主要包括 U4 与 U3 两组地层单元。U4 地层单元上覆于层序界面 R4 之上,是 MIS 4 中晚期海平面较低时期的河流相沉积及随后海平面上升过程中的河流充填

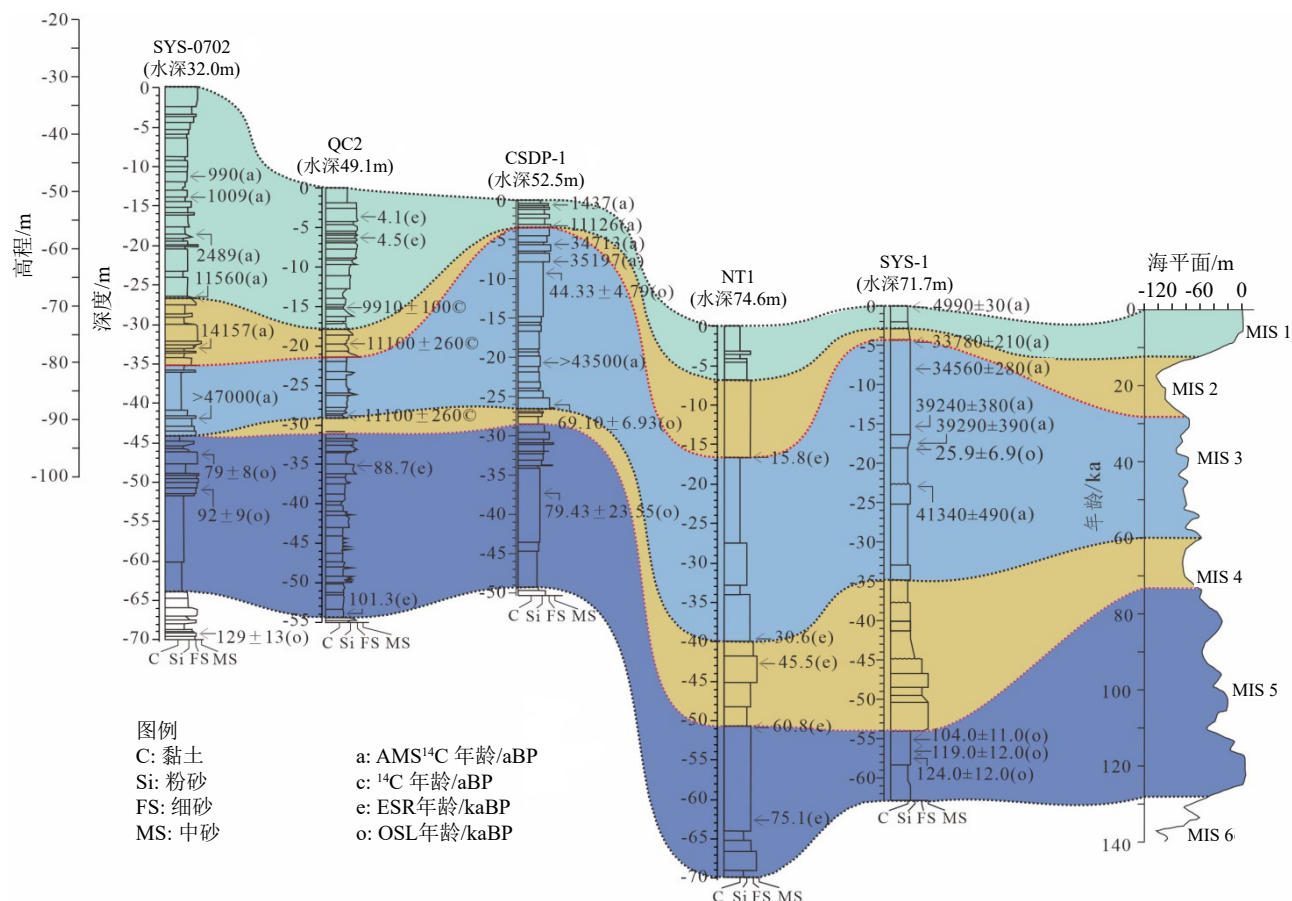


图 8 研究区 SYS-1 孔与周边钻孔^[2,6,10-11] 地层对比

Fig.8 Stratigraphic correlation of core SYS-1 with neighboring cores^[2,6,10-11] in the study area

相沉积, 对应低位体系域。U3 地层单元位于海进侵蚀面 R3 之上, 对应 MIS 3 早中期海水入侵后, 海平面波动过程中形成的滨浅海相沉积, 代表海侵体系域-高位体系域-强制海退体系域沉积, 与 MIS 5 期体系域组合相似, 三种体系域之间的界面受浅地层剖面分辨率的限制本文未进行识别。此外, MIS 3 晚期的沉积基本被末次冰盛期低海面时期的河流作用侵蚀殆尽而未得到保存。

SQ1 上覆于层序界面 R2 之上, 是晚更新世以来研究区识别出的最上部的层序, 自下而上由 U2、U1-2、U1-1 三组地层单元组成。U2 地层单元是形成于末次冰盛期低海面时期及随后的海平面上升过程的陆相沉积, 对应低位体系域, SYS-1 孔中该地层单元表现为河流充填相沉积。U1-2 地层单元上覆于海进侵蚀面 R1 之上, 形成于全新世早中期时海水入侵至海平面上升至最高海平面之前的阶段, 对应滨海相沉积, 代表海侵体系域。U1-1 地层单元上覆于最大海泛面 R1m 之上, 形成于全新世高海面以来, 对应浅海相沉积, 代表高位体系域。

此外, 研究区浅地层剖面结构显示, 活动构造广泛发育(图 2—4), 最新活动时代可追溯至 MIS 2 期甚至全新世, 虽然对地层的格架未产生决定性的作用, 但对地层的空间分布产生了明显影响。

4.2 晚更新世以来的进积体序列

浅地层剖面与钻孔资料揭示了晚更新世以来南黄海中部海域三组东向、东南向的进积体序列, 主要对应高位体系域与强制海退体系域, 分别对应 MIS 5 期、MIS 3 期、全新世高海面或海平面下降阶段, 同时其赋存状态受到低海面时期侵蚀作用的影响, 造成这三组进积体序列时空分布存在明显的规律性。

MIS 5 期, 全球气候变暖, 海平面逐渐上升, 至 MIS 5.5 甚至超过现今海平面高度^[20-21]; 随后经历 MIS 5.4、MIS 5.2 两次海平面低值与 MIS 5.3、MIS 5.1 两次海平面高值的波动过程, 总体上 MIS 5 时期海平面呈现由高到低的变化趋势, 这一过程与南黄海中部海域赋存的高位体系域和强制海退体系域的进积沉积相吻合, 进积方向主要为由西侧向东南或向东北进积, 厚度呈现自研究区西部 24 m 向东逐渐变薄的趋势, 这显示了中国河流陆源物质的主要贡献, 而这一地质时期与黄海暖流及沿岸流密切相关的长江物质主导了研究区沉积物的来源^[6]。这一时期相似的三角洲进积序列在南黄海西部海域^[11]及东海陆架区^[22]也均有发育, 显示了这一地质时期

中国大陆河流物质对东部海域的物源主控作用。

MIS 3 期, 全球海平面变化呈现高频率、低幅度的波动, 通常认为变化范围位于现今海平面以下 -40~-80 m^[20]。全球陆架区包括中国东部海域众多地区均发现了 MIS 3 期高海面的证据^[23-24], 其中南黄海西部研究显示 MIS 3 早期海平面位于现今海平面以下 -20~-50 m^[11], 之后至 MIS 3 中期(约 40 cal. kaBP), 海平面总体呈现下降趋势, 岸线后退, 南黄海中部海域这一时期形成进积体序列与 MIS 5 期相似, 均呈现自西向东进积的趋势, 厚度自西向东明显变薄甚至尖灭, 西部最大厚度超过 32 m, 对应海侵体系域、高位体系域与强制海退体系域的沉积, 这一时期古长江对南黄海中部控制作用明显^[6], 至 MIS 3 晚期, 海平面下降至现今海平面 -50 m 以下, 侵蚀先前形成的地层。MIS 3 早期至约 40 cal. kaBP 期间, 南黄海西部近岸区古三角洲广泛发育, 主要显示古黄河的影响^[11], MIS 3 后期同样遭受强烈侵蚀。

全新世早期, 随着海平面逐渐上升, 海水经黄海槽侵入南黄海, 至约 7.0 kaBP, 海平面达到现今海平面并稳定持续至今, 黄海槽西侧广泛发育泥质沉积, 剖面上表现为明显的向海进积结构, 代表高位体系域沉积, 下伏滨海相海侵体系域的沉积, 其中南黄海西部近岸海域主要受到黄河物质的影响^[11,25-26], 而南黄海中部海域主要受控于黄海暖流为主的沉积动力作用, 沉积物主要源于长江物质^[6,8], 这一地质时期黄海槽无沉积, 黄海槽东侧主要发育砂质底质为主的潮流沉积, 对应海侵体系域, 无高位体系域沉积^[27-28]。

4.3 低海面时期的古河流系统

晚更新世以来南黄海中部海域经历过两次低海面阶段, 导致陆架裸露, 河流系统纵横发育, 在地层中保存了相关地质记录(图 9)。

MIS 4 期, 气候变冷, 冰川发育, 海退持续, 尤其至中晚期, 海平面下降至现今海平面以下 90 m^[20], 这一低海面时期, 南黄海陆架区大部分出露海底, 研究区代表低位体系域的古河道沉积地层广泛发育, 最大沉积厚度可达 36 m, 这一时期在南黄海西部陆架区也保留了相关的沉积记录^[11], 总体显示了古黄河与古长江物质对南黄海地层的主控作用^[28], 影响范围可达黄海槽及其东部海域。这一时期的地层在渤海及北黄海陆架区发育了相同的古河道沉积, 而在东海中外陆架区同期的沉积相对连续, 沉积间断不发育^[22,30]。

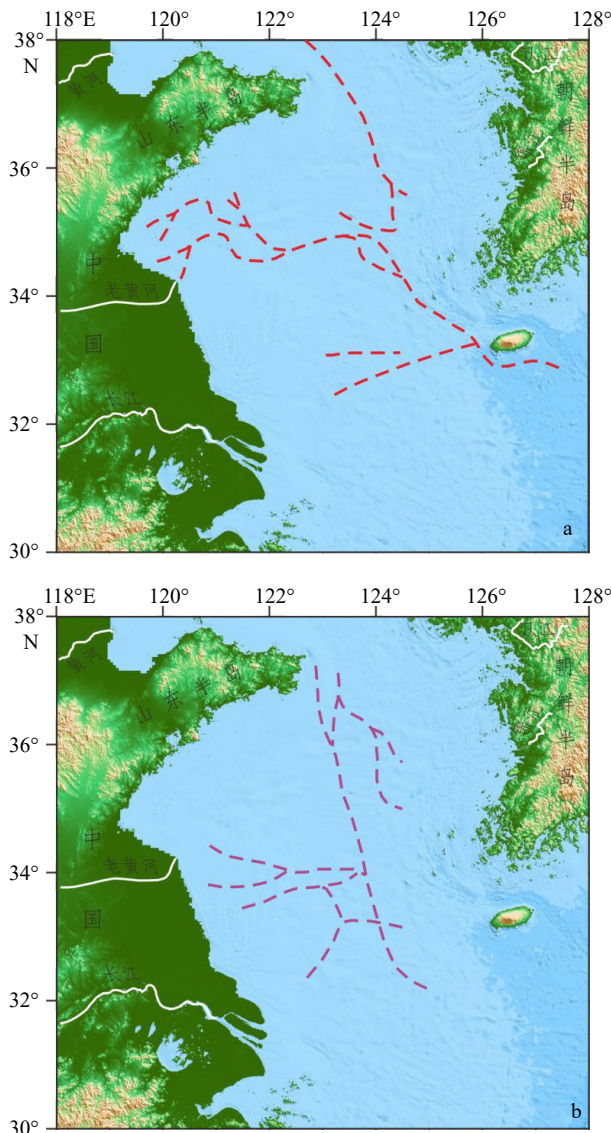


图9 研究区 MIS 2 期 (a) 与 MIS 4 期 (b) 低海面时期古河道流路
部分修改自文献 [3, 28-29]。

Fig.9 The paleo-river channels in the sea-level lowstand MIS2 (a) and MIS4 (b) in the study area

Some data are from reference [3, 28-29].

MIS 2 期, 海平面大幅度下降至现今海平面之下 -130 m [20-21, 31], 古岸线后退至冲绳海槽, 黄海地区裸露成陆 [26, 32-33], 古河道广泛发育 [34], 下切先前沉积地层, 导致与下伏地层之间沉积不连续, 存在明显的沉积间断, 研究区表现为层序界面 R2 及上覆低位体系域 U2 地层单元, U2 单元最大厚度超过 24 m 。与 MIS 4 期类似, 研究区这一低海面时期的古河流系统与古黄河及古长江密切相关, 影响范围最远可达济州岛附近的南黄海东南部海域 [3, 28-29, 35]。同期的低位体系域的河流沉积在渤海 [36-37]、北黄海 [38-39]、东海陆架区 [30, 40] 均有发育, 在陆坡或陆架边缘处, 则主要

表现为进积楔、斜坡扇、浊积扇 [27, 41-42]。

5 结论

(1) 基于高分辨率浅地层剖面地质解释识别的 6 个声学地层界面 (R5、R4、R3、R2、R1、R1m、R0), 晚更新世以来南黄海中部海域的地层自下而上划定了 6 个声学地层单元 (U5、U4、U3、U2、U1-2、U1-1), 这些声学地层单元的划分与典型钻孔沉积地层单元的划分具有良好的对应性。这些地层的发育受控于海平面变化, 同时受到新构造活动的作用。

(2) 基于 MIS 4 期与末次冰盛期低海面时期形成的两个层序界面 R4、R2, 晚更新世以来南黄海中部海域的层序地层由老至新可划分为 3 个层序 (SQ3、SQ2、SQ1), 这些层序中包含了低位体系域、海侵体系域、高位体系域与强制海退体系域的不同组合。

(3) 晚更新世以来南黄海中部海域存在 3 期进积体序列与 2 期古河道系统, 3 期进积体序列主要形成于 MIS 5 期与 MIS 3 期高海面及海平面下降期间、全新世高海面以来。MIS 5 期与 MIS 3 期的东向进积体序列主要包括高位体系域与强制海退体系域, 对应浅海—滨海沉积, 厚度分别由西部的 24 m 与 40 m 向东逐渐变薄, 而全新世高海面以来向海的进积体序列主要对应高位体系域, 与长江源的浅海相泥质沉积相关, 最大厚度超过 16 m 。研究区的 2 期古河道系统主要对应 MIS 4 期与末次冰盛期低海面时期, 发育低位体系域, 最大沉积厚度分别超过 36 m 与 24 m , 均与古长江及古黄河系统密切相关, 影响范围均延伸至黄海槽及其以东海域, 尤其末次冰盛期最远可达济州岛附近海域。

致谢: 感谢自然资源部国际合作司给与项目资助, 感谢两位审稿专家给予的宝贵意见。

参考文献 (References)

- [1] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 黄海地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 1989. [QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong, et al. Geology in the Yellow Sea [M]. Beijing: China Ocean Press, 1989.]
- [2] Liu J, Zhang X H, Mei X, et al. The sedimentary succession of the last $\sim 3.50\text{ Myr}$ in the western South Yellow Sea: paleoenvironmental and tectonic implications [J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 47-75.
- [3] Zhao D B, Wan S M, Jiang S J, et al. Quaternary sedimentary record in the northern Okinawa Trough indicates the tectonic control on depos-

- itional environment change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 516: 126-138.
- [4] 蓝先洪, 王红霞, 张志珣, 等. 南黄海表层沉积物稀土元素分布与物源关系[J]. *中国稀土学报*, 2006, 24(6): 745-749. [LAN Xianhong, WANG Hongxia, ZHANG Zhixun, et al. Distributions of rare earth elements and provenance relations in the surface sediments of the South Yellow Sea [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2006, 24(6): 745-749.]
- [5] 蓝先洪, 张宪军, 王红霞, 等. 南黄海NT2孔沉积地球化学及其物源[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(1): 51-60. [LAN Xianhong, ZHANG Xianjun, WANG Hongxia, et al. Sedimentary geochemistry in Core NT2 of the South Yellow Sea and its provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(1): 51-60.]
- [6] 蓝先洪, 张宪军, 赵广涛, 等. 南黄海NT1孔沉积物稀土元素组成与物源判别[J]. *地球化学*, 2009, 38(2): 123-132. [LAN Xianhong, ZHANG Xianjun, ZHAO Guangtao, et al. Distributions of rare earth elements in sediments from Core NT1 of the South Yellow Sea and their provenance discrimination [J]. *Geochimica*, 2009, 38(2): 123-132.]
- [7] 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 等. 南黄海NT2孔沉积物物源研究[J]. *沉积学报*, 2010, 28(6): 1182-1189. [LAN Xianhong, ZHANG Zhixun, LI Rihui, et al. Provenance study of sediments in Core NT2 of the South Yellow Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1182-1189.]
- [8] 何梦颖, 梅西, 张训华, 等. 南黄海陆架区CSDP-1孔沉积物碎屑锆石 U-Pb年龄物源判别[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2019, 49(1): 85-95. [HE Mengying, MEI Xi, ZHANG Xunhua, et al. Provenance discrimination of detrital zircon U-Pb dating in the Core CSDP-1 in the Continental Shelf of South Yellow Sea [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2019, 49(1): 85-95.]
- [9] 刘庚, 韩喜彬, 陈燕萍, 等. 南黄海沉积物磁性特征及其对物源变化的指示: 以南黄海中部泥质区YSC-10孔为例[J]. *沉积学报*, 2021, 39(2): 383-394. [LIU Geng, HAN Xibin, CHEN Yanping, et al. Magnetic characteristics of Core YSC-10 sediments in the central Yellow Sea Mud Area and implications for provenance changes [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(2): 383-394.]
- [10] 杨子庚, 林和茂. 中国第四纪地层与国际对比[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 31-55. [YANG Zigeng, LIN Hemao. Quaternary Stratigraphy in China and its International Correlation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 31-55.]
- [11] Liu J, Saito Y, Kong X H, et al. Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1-4): 54-76.
- [12] Yang J C, Li G X, Liu Y, et al. Evolution of sedimentary mode since Pleistocene in the central South Yellow Sea, China, based on seismic stratigraphy analysis [J]. *Quaternary International*, 2018, 482: 157-170.
- [13] 王中波, 张江勇, 梅西, 等. 中国陆架海MIS5(74~128 ka)以来地层及其沉积环境[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1370-1394. [WANG Zhongbo, ZHANG Jiangyong, MEI Xi, et al. The stratigraphy and depositional environments of China's sea shelves since MIS5(74-128) ka [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1370-1394.]
- [14] Jin J H, Chough S K, Ryang W H. Sequence aggradation and systems tracts partitioning in the mid-eastern Yellow Sea: roles of glacio-eustasy, subsidence and tidal dynamics [J]. *Marine Geology*, 2002, 184(3-4): 249-271.
- [15] Lee G S, Kim D C, Yoo D G, et al. Stratigraphy of late Quaternary deposits using high resolution seismic profile in the southeastern Yellow Sea [J]. *Quaternary International*, 2014, 344: 109-124.
- [16] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. *地质学报*, 1981, 55(1): 1-13. [WANG Pinxian, MIN Qiubao, BIAN Yunhua, et al. Strata of quaternary transgressions in East China: a preliminary study [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1981, 55(1): 1-13.]
- [17] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华. 黄海有孔虫、介形虫组合的初步研究[M]//汪品先. 海洋微体古生物论文集. 北京: 海洋出版社, 1980: 84-100. [WANG Pinxian, MIN Qiubao, BIAN Yunhua. A preliminary study of foraminiferal and ostracod assemblages of the Yellow Sea[M]//WANG Pinxian. Papers on Marine Micropaleontology. Beijing: China Ocean Press, 1980: 84-100.]
- [18] 汪品先, 章纪军, 赵泉鸿, 等. 东海底质中的有孔虫和介形虫[M]. 北京: 海洋出版社, 1988. [WANG Pinxian, ZHANG Jijun, ZHAO Quanhong, et al. Foraminifera and Ostracoda in Surface Sediments of the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1988.]
- [19] 赵泉鸿, 汪品先. 中国浅海现代介形虫的数量和属种分布[J]. *海洋与湖沼*, 1988, 19(6): 553-561. [ZHAO Quanhong, WANG Pinxian. Modern ostracoda in sediments of shelf seas off China: quantitative and qualitative distributions [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1988, 19(6): 553-561.]
- [20] Chappell J, Omura A, Esat T, et al. Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 141(1-4): 227-236.
- [21] Lea D W, Martin P A, Pak D K, et al. Reconstructing a 350 ky history of sea level using planktonic Mg/Ca and oxygen isotope records from a Cocos Ridge core [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1-3): 283-293.
- [22] Berné S, Vagner P, Guichard F, et al. Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea [J]. *Marine Geology*, 2002, 188(3-4): 293-315.
- [23] Hanebuth T J J, Saito Y, Tanabe S, et al. Sea levels during late marine isotope stage 3 (or older?) reported from the Red River delta (northern Vietnam) and adjacent regions [J]. *Quaternary International*, 2006, 145-146: 119-134.
- [24] Zhao B C, Wang Z H, Chen J, et al. Marine sediment records and relative sea level change during late Pleistocene in the Changjiang delta area and adjacent continental shelf [J]. *Quaternary International*, 2008, 186(1): 164-172.
- [25] 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.
- [26] Liu J, Saito Y, Wang H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 236(3-4): 165-187.
- [27] Li G X, Li P, Liu Y, et al. Sedimentary system response to the global

- sea level change in the East China Seas since the last glacial maximum [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 139: 390-405.
- [28] Yoo D G, Chang T S, Lee G S, et al. Late Quaternary seismic stratigraphy in response to postglacial sea-level rise at the mid-eastern Yellow Sea [J]. *Quaternary International*, 2016, 392: 125-136.
- [29] Yang S Y, Wang Z B, Dou Y G, et al. A review of sedimentation since the Last Glacial Maximum on the continental shelf of eastern China [M]//Chiocci F L, Chivas A R. *Continental Shelves of the World: Their Evolution during the Last Glacio-Eustatic Cycle*. Geological Society, London, Memoirs, 2014, 41: 293-303.
- [30] Xu T Y, Shi X F, Liu C G, et al. Stratigraphic framework and evolution of the mid-late Quaternary (since marine isotope stage 8) deposits on the outer shelf of the East China Sea [J]. *Marine Geology*, 2020, 419: 106047.
- [31] Lambeck K, Chappell J. Sea level change through the last glacial cycle [J]. *Science*, 2001, 292 (5517): 679-686.
- [32] 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 (1-4): 45-67.
- [33] Park S C, Yoo D G, Lee C W, et al. Last glacial sea-level changes and paleogeography of the Korea (Tsushima) Strait [J]. *Geo-Marine Letters*, 2000, 20 (2): 64-71.
- [34] 李凡, 张秀荣, 李永植, 等. 南黄海埋藏古三角洲[J]. *地理学报*, 1998, 53 (3): 238-244. [LI Fan, ZHANG Xiurong, LI Yongzhi, et al. Buried paleo-delta in the South Yellow Sea [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53 (3): 238-244.]
- [35] Xu Z K, Lim D, Li T G, et al. REEs and Sr-Nd isotope variations in a 20 ky-sediment core from the middle Okinawa Trough, East China Sea: an in-depth provenance analysis of siliciclastic components [J]. *Marine Geology*, 2019, 415: 105970.
- [36] 陈晓辉, 李日辉, 蓝先洪, 等. 渤海西部晚第四纪地层序特征及沉积响应[J]. *地球科学*, 2020, 45 (7): 2684-2696. [CHEN Xiaohui, LI Rihui, LAN Xianhong, et al. Late Quaternary stratigraphic sequence and depositional response in the Western Bohai Sea [J]. *Earth Science*, 2020, 45 (7): 2684-2696.]
- [37] 陈晓辉, 孟祥君, 李日辉. 辽东湾晚第四纪层序地层[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (2): 37-47. [CHEN Xiaohui, MENG Xi-angjun, LI Rihui. Sequence stratigraphy of the late Quaternary in Liaodong Bay [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (2): 37-47.]
- [38] Chen X H, Li R H, Lan X H, et al. Paleo-fluvial systems during Marine Isotope Stages 6, 4 and 2 in the North Yellow Sea [J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2016, 90 (2): 765-766.
- [39] Chen X H, Li R H, Lan X H, et al. Stratigraphy of late Quaternary deposits in the mid-western North Yellow Sea [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36 (6): 2130-2153.
- [40] Wang Z B, Yang S Y, Wang Q, et al. Late Quaternary stratigraphic evolution on the outer shelf of the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 5-16.
- [41] Yoo D G, Park S C. High-resolution seismic study as a tool for sequence stratigraphic evidence of high-frequency sea-level changes: latest Pleistocene-Holocene example from the Korea Strait [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70 (2): 296-309.
- [42] Yoo D G, Park S C, Sunwoo D, et al. Evolution and chronology of late Pleistocene shelf-perched lowstand wedges in the Korea strait [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 22 (1): 29-39.