



# 海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

## 南黄海SYS90-1A孔第四纪沉积物磁性地层学研究

陆 凯, 孙 军, 李广雪, 杨慧良, 王忠蕾, 梅 西, 陈晓辉, 郑江豪, 朱晓青, 强小科

**Magnetostratigraphy of Quaternary sediments from borehole SYS90-1A in the South Yellow Sea**

LU Kai, SUN Jun, LI Guangxue, YANG Huiliang, WANG Zhonglei, MEI Xi, CHEN Xiaohui, QI Jianghao, ZHU Xiaoqing, and QIANG Xiaoke

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023052203>

## 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): 25–43

#### 苏北-南黄海西部第四纪长江埋藏古河道分布研究进展

Research progress on distribution of Quaternary buried paleo-Yangtze River channels in the North Jiangsu-western South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 40–54

#### 西菲律宾海盆XT06孔第四纪磁性地层与深海沉积动力过程

Magnetostratigraphy of core XT06 and Quaternary sedimentary dynamics of the deep-sea deposits in the West Philippian Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 61–74

#### 南黄海辐射沙脊群西洋潮流通道的浅部沉积层序及其形成演化再认识

Rethinking on shallow sedimentary sequence and its evolution of the Xiyang tidal channel in the Radial Sand Ridge Field, South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 13–26

#### 江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210–220

#### 南黄海中部隆起二叠纪-三叠纪菊石的发现及其意义

DISCOVERY OF PERMIAN-TRIASSIC AMMONOIDS IN THE CENTRAL UPLIFT OF THE SOUTH YELLOW SEA AND ITS GEOLOGICAL IMPLICATIONS

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(3): 121–128



关注微信公众号，获得更多资讯信息

陆凯, 孙军, 李广雪, 等. 南黄海 SYS90-1A 孔第四纪沉积物磁性地层学研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(2): 97-109.  
LU Kai, SUN Jun, LI Guangxue, et al. Magnetostatigraphy of Quaternary sediments from borehole SYS90-1A in the South Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(2): 97-109.

# 南黄海 SYS90-1A 孔第四纪沉积物磁性地层学研究

陆凯<sup>1,2,3</sup>, 孙军<sup>2,3,4</sup>, 李广雪<sup>1</sup>, 杨慧良<sup>2,3</sup>, 王忠蕾<sup>2,3</sup>, 梅西<sup>2,3</sup>, 陈晓辉<sup>2,3</sup>, 祁江豪<sup>2,3</sup>, 朱晓青<sup>2,3</sup>, 强小科<sup>5</sup>

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100  
2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237  
3. 崂山实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237  
4. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083  
5. 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 中国科学院地球环境研究所, 西安 210008

**摘要:** 可靠的年代地层框架是开展南黄海地区第四纪环境演变研究的基础。目前南黄海南部地区缺乏可靠年代学控制的长序列钻孔。通过对南黄海南部 SYS90-1A 孔(孔深 90.1 m)沉积物开展详细的磁性地层学研究, 并结合 AMS<sup>14</sup>C 测年结果及区域已有磁性地层学结果, 建立南黄海南部地区第四纪沉积物年代地层框架。结果显示, SYS90-1A 孔岩芯记录了从布容(Brunhes)正极性时至松山(Matuyama)负极性时上部, 包括 Kamikatsura 和 Santa Rosa 地磁漂移事件。早、中更新世界线即布容正极性时与松山负极性时界线(B/M 界线)深度位于 74.2 m, Kamikatsura 和 Santa Rosa 地磁漂移事件深度分别位于 79.75~82.47 m 和 85.25~87.74 m。根据 Kamikatsura 和 Santa Rosa 地磁漂移事件的年代控制点和平均沉积速率, 推算钻孔底部年龄为 0.96 Ma。南黄海 SYS90-1A 孔早更新世晚期的沉积速率约为 8.66 cm/ka, 中更新世以来的沉积速率约为 9.5 cm/ka, 而全新世以来的沉积速率为 12.8 cm/ka, 沉积速率自早更新世晚期以来呈增加趋势。这一结果不仅为南黄海南部第四纪沉积物研究提供了有效的年代学约束, 而且为南黄海地区第四纪地层划分和对比、沉积环境与气候变化、物源示踪等研究提供了重要的时间标尺。

**关键词:** 古地磁学; 沉积速率; 第四纪; 中部泥质区; 南黄海

中图分类号:P736 文献标识码:A DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2023052203](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023052203)

## Magnetostatigraphy of Quaternary sediments from borehole SYS90-1A in the South Yellow Sea

LU Kai<sup>1,2,3</sup>, SUN Jun<sup>2,3,4</sup>, LI Guangxue<sup>1</sup>, YANG Huiliang<sup>2,3</sup>, WANG Zhonglei<sup>2,3</sup>, MEI Xi<sup>2,3</sup>, CHEN Xiaohui<sup>2,3</sup>, QI Jianghao<sup>2,3</sup>, ZHU Xiaoqing<sup>2,3</sup>, QIANG Xiaoke<sup>5</sup>

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China  
2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China  
3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China  
4. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China  
5. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China

**Abstract:** Quaternary sediments in the southern South Yellow Sea provide important geological archives for addressing Quaternary sea-level changes and environmental evolution. However, long sedimentary sequences with a reliable chrono-logical framework in this area are scarce. A detailed paleomagnetism study on sediments from borehole SYS90-1A (90.1 m) that located in the southern South Yellow Sea was carried out in combination with AMS<sup>14</sup>C dating data and published studies regarded. Eleven normal inclination zones and 11 negative inclination zones in the borehole SYS90-1A were revealed from the characteristic remanent magnetization after alternating-field demagnetization. The Matuyama/Brunhes boundary was found at the core depth of ~74.2 m. Meanwhile, the Kamikatsura excursion and Santa Rosa excursion were recognized at depth of 79.75~82.47m and 85.25~87.74m, respectively. The basal age of the core was estimated for about 0.96 Ma by the

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目“深海调查-测量”(DD20230643, DD20191003), “东部重点海域海洋区域地质调查”(DD20221710), “1:25 万锦西、日照和霞浦县等图幅海洋区域地质调查”(DD20160139)

作者简介: 陆凯(1978—), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 从事海洋地质学研究, E-mail: [qimg\\_luk@163.com](mailto:qimg_luk@163.com)

通讯作者: 孙军(1989—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 从事沉积学与古海洋学研究, E-mail: [sunjun607@126.com](mailto:sunjun607@126.com)

李广雪(1962—), 男, 博士, 教授, 从事海洋沉积学、古环境与古气候研究, E-mail: [gqli1962@ouc.edu.cn](mailto:gqli1962@ouc.edu.cn)

收稿日期: 2023-05-22; 改回日期: 2023-07-03. 张现荣编辑

extrapolation of average sedimentation rate between the Kamikatsura excursion and Santa Rosa excursion. The average sedimentation rate of borehole SYS90-1A is 8.66 cm/ka in the late Early Pleistocene, 9.5 cm/ka since the Middle Pleistocene, and 12.8 cm/ka since the start of the Holocene. The sedimentation rate of the core showed an increasing trend since the late Early Pleistocene. This study provided a reliable geochronological framework of the borehole, which facilitated the stratigraphic division and tectonic evolution of the Quaternary System in the southern South Yellow Sea and its neighboring regions.

**Key words:** paleomagnetism; sedimentation rate; Quaternary; central mud area; South Yellow Sea

南黄海是位于东亚大陆边缘的半封闭陆架浅海,作为连接东亚大陆与西太平洋进行物质和能量交换的过渡区域,在区域和全球气候与环境变化中扮演着十分重要的角色<sup>[1-3]</sup>。第四纪以来,以冰期-间冰期交替为主要特征的全球气候变化造成海平面频繁波动<sup>[4]</sup>。南黄海地区自新近纪以来持续沉降,对气候与海平面变化的响应十分敏感,第四纪以来经历多次海平面升降变化,海陆交互作用强烈,发育的海陆交互沉积序列蕴含着丰富的古气候和环境变化信息,成为研究东亚大陆边缘沉积物源-汇过程、海陆变迁、气候与海平面变化的热点区域<sup>[2,5-10]</sup>。

可靠的年代地层框架是开展南黄海地区第四纪环境演化和物源示踪等科学问题研究的基础。20世纪80年代以来,随着年轻地质体测年方法和技术手段的不断发展和成熟,不同学者陆续使用不同测年方法对南黄海及近岸地区的沉积物开展了年代学研究,为南黄海第四纪高精度年代地层框架的建立提供了可能<sup>[11-15]</sup>。其中,<sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs、<sup>14</sup>C 和光释光(OSL)等测年技术为南黄海晚第四纪沉积物提供了可靠的年龄框架<sup>[7,9,15-17]</sup>。然而,由于海洋沉积物的长序列钻孔样品不易获取、早期测年技术限制等多方面原因,南黄海地区仅有少量长序列钻孔钻至下第四系或前第四系(如QC2孔、EY02-2孔、NHH01孔、DLC70-3孔、CSDP-1孔、CSDP-2孔),且相关研究主要集中于南黄海中、西部地区<sup>[7,13,18-21]</sup>。此外,南黄海地区第四纪以来海陆交互作用强烈,频繁的水动力条件变化使得地层结构相变快、变化复杂<sup>[22-23]</sup>,而目前南黄海特别是南部地区长序列钻孔数量匮乏,缺少可靠的高分辨率年代地层框架约束,使得前人在南黄海南部地区沉积地层结构及形成时代、第四纪沉积环境演化等地质问题的认识上仍非常薄弱,严重制约了对南黄海第四纪以来沉积演化过程、海平面升降变化和物质来源等科学问题的认识。

磁性地层学是建立第四纪长时间尺度年代地层框架最主要手段之一,是通过测量钻孔或地层剖面沉积物记录的剩磁信息来建立地磁场极性倒转序列,并与标准地磁极性年代表进行比对,利用

极性反转事件获得年代控制点,从而建立沉积序列的地层年代框架<sup>[12, 24-26]</sup>。本论文利用南黄海南部地区新近获取的SYS90-1A孔沉积物样品开展详细的磁性地层学研究,并结合AMS<sup>14</sup>C测年结果,建立南黄海南部地区第四纪磁性地层年代框架,为南黄海南部地区第四纪地层划分与对比、沉积环境演化、海陆交互作用等研究提供可靠的年代标尺。

## 1 区域地质背景

南黄海位于中国大陆与朝鲜半岛之间(图1),海底地形呈不对称分布,东陡西缓,地形由两侧向中央倾斜,水深呈由西北向东南加深的趋势,平均水深约46 m,靠近济州岛方向,最大水深可达140 m<sup>[2,27]</sup>。南黄海周边河流包括黄河、长江、淮河、朝鲜半岛沿岸河流、山东半岛和江苏沿岸河流等,这些河流携带陆源碎屑物质从中国大陆或朝鲜半岛直接或间接入海,为南黄海提供了丰富的陆源物质供给<sup>[2]</sup>。其中,尽管长江和黄河现今的入海口都不在南黄海,但两条河流在地质历史时期曾发生多次河道迁移,直接或通过沿岸流间接为南黄海输送碎屑物质,在南黄海地区沉积供应中占据主导地位<sup>[2,28-30]</sup>。南黄海现代海洋环流体系主要由黄海暖流、沿岸流、长江冲淡水和黄海冷水团等组成。其中,南黄海中部受黄海冷水团和上升流的共同作用发育泥质沉积分布区;在东部、西南部海区则受强潮流作用发育潮流沙脊<sup>[21,31]</sup>。南黄海地区的沉积格局受陆源物质和海洋环流的共同影响,冬季风驱动沿岸流将黄河入海物质向南搬运,而长江冲淡水携带长江物质在夏季风和黄海暖流的影响下向北输运<sup>[32-33]</sup>。

在大地构造上,南黄海地区位于华南古陆下扬子块体之上,构造单元主体部分为南黄海盆地<sup>[34-35]</sup>。南黄海盆地自新近纪以来持续沉降,受东亚季风和海洋环流等的共同影响,接受来自长江、黄河等周边河流携带的陆源碎屑物质汇入,新近纪—第四纪沉积序列厚达500~2 000 m<sup>[9,21,36-37]</sup>。浙闽隆起带是分隔南黄海盆地与东海盆地的火山岩构造带,中生代由于大规模火山活动发生隆升,成为黄、渤海与

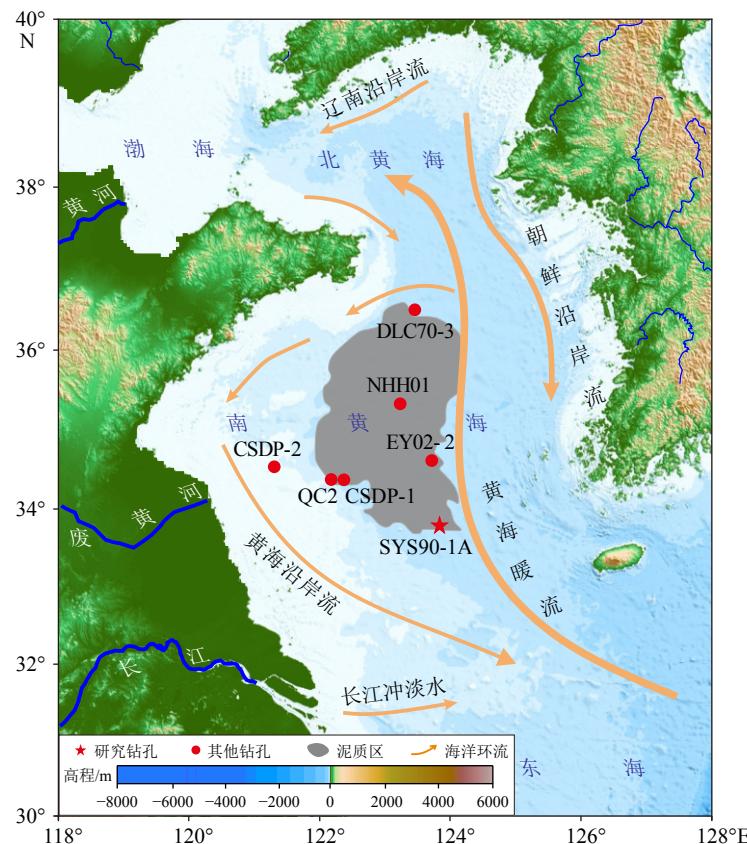


图 1 南黄海环流体系及钻孔位置图

Fig.1 The current systems in the South Yellow Sea and the locations of borehole of this study (red star) and other boreholes (red dots)

东海之间的屏障,不仅阻碍了东海海水侵入黄、渤海,而且阻碍了黄、渤海向东海陆架和冲绳海槽的沉积物运输<sup>[2,38-40]</sup>。新近纪以来,浙闽隆起带逐渐解体和沉降,海水在约 1.7 Ma 从东海越过浙闽隆起进入黄海,南黄海开始受到海侵<sup>[2,9,21,39]</sup>。早更新世海侵较弱,表现为通道式海侵,浙闽隆起带东部的济州海峡很可能 是黄海第四纪早期的海侵通道<sup>[9,41]</sup>。随着浙闽隆起持续沉降,海平面变化在约 0.83 Ma 以来对南黄海地区沉积环境的控制作用越来越显著,第四纪以来的沉积特征表现为由河、湖相沉积转为受海平面变化控制的海陆交互相沉积<sup>[2,9,22]</sup>。现代黄海则形成于全新世海侵<sup>[2]</sup>。

## 2 材料与方法

SYS90-1A 孔位于南黄海南部(中部泥质区南缘),钻孔地理坐标为 33°48'49" N、123°43'58" E,水深约 69.3 m,由中国地质调查局青岛海洋地质研究所于 2017 年组织施工使用机械旋转法钻取岩芯。SYS90-1A 孔进尺 90.1 m,共获得样品 86 管,获取岩芯实际长度为 83.8 m,平均回收率高达 93%,是目前南黄海地区取芯率最高的钻孔之一。在青岛

海洋地质研究所岩芯库将岩芯纵向剖开,平均分成两半,一半存档于青岛海洋地质研究所岩芯库,另一半依次排列,进行拍照、岩芯描述和样品分样。岩芯描述包括沉积物的颜色、岩性、结构、化石(软体动物化石、植物碎屑等)、地层接触关系等。

从 SYS90-1A 孔顶部 4.6 m 沉积物不同深度处选取有孔虫丰度较高的层位,挑选 5 件底栖有孔虫混合种壳体样品作为 AMS<sup>14</sup>C 测年材料,送往美国 BETA 实验室(Beta analysis Inc.)进行 AMS<sup>14</sup>C 测年。直接测定年龄是以 5 568 a 为半衰期,同时测量样品的 δ<sup>13</sup>C 值。测得的放射性年龄数据根据区域海洋碳库效应进行了校正(南黄海地区海洋碳库年龄差值为 ΔR=−100±36 a)<sup>[42]</sup>,并使用 Calib Rev.7.0.2 软件进行日历年的校准<sup>[43]</sup>,本文所使用的日历年均是以 1950 年为基点向前推算的,以 cal.aBP 标识。

在 SYS90-1A 孔岩芯新鲜面上使用 U-channel 无磁塑料管连续采集古地磁样品 86 件。磁化率与古地磁测试在中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室完成,样品测量间距为 2 cm。其中,样品低频磁化率使用 Bartington MS2 磁化率仪与 2G-755R U-channel 岩石超导磁力仪联

机测量。古地磁测试使用2G-755R U-channel岩石超导磁力仪以2~10 mT的步长从0 mT(NRM)到80 mT使用逐步交变退磁方法对沉积物样品进行系统的退磁和剩磁测量,具体退磁步骤分为0(NRM)、2、5、7.5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、60、70、80 mT,共分16步。所有退磁过程及剩磁测量过程置于零磁空间(<300 nT)完成。退磁数据使用PaleoMag软件采用主成分分析法进行特征剩磁(ChRM)分析和拟合,并选择最大角偏差(MAD)<15°的样品建立磁极性序列。

### 3 结果

#### 3.1 钻孔岩性特征

根据沉积物的颜色、岩性、地层结构和生物碎屑等特征,对南黄海南部SYS90-1A孔岩芯自上而下的岩性特征描述如下。

0~4.64 m: 灰色粉砂夹灰黑色黏土质粉砂和灰黄色细砂。在0.25 m和2.45 m处含有少量贝壳碎屑,底部含水率较高,在0.4 m和1.5 m处见冲刷面。

4.64~14.8 m: 灰黑色、深灰—浅灰色粉砂质黏土夹灰黄色黏土质粉砂,包含4个颜色向上变浅的旋回,每个旋回底部颜色为深灰色至灰黑色泥炭层,含有黑色碳质斑点。5.0~5.14 m处为灰黄色细砂团块夹灰色砂质黏土条带。

14.8~23 m: 深灰色黏土质粉砂与灰色粉砂质黏土互层,黏土质粉砂层较厚,粉砂质黏土为薄层。15.04~15.2、16.44~16.6、21.32~21.8 m处发育粉砂质条带和透镜体,20~20.6 m含有粉砂团块,下部黏土质粉砂变薄。

23~33.6 m: 灰色粉砂质黏土与深灰色黏土质粉砂互层,粉砂质黏土层较厚,黏土质粉砂为薄层。整段均匀发育厚约0.5 cm的黏土质粉砂条带,条带间距4~16 cm不等;向下黏土质粉砂层逐渐增厚。

33.6~35.64 m: 深灰色粉砂和细砂。34.60~34.66 m处含有大量贝壳碎屑和若干磨圆度较好的砾石,其中大块砾石的直径约2 cm。

35.64~47.6 m: 灰色粉砂质黏土、深灰色黏土质粉砂和细砂。36~42 m处灰色粉砂质黏土与深灰色黏土质粉砂互层;43.6~44 m处含有大量灰黑色碳质斑点;44.9~45.1、45.22~45.3 m处含有大量贝壳碎屑,45.44 m处可见冲刷面。

47.6~74.4 m: 深灰色细砂与灰色粉砂互层。其中,47.6~54.22 m为深灰色细砂含粉砂质黏土团块,含有数层粉砂条带,底部含有小砾石和大量云母颗粒;54.22~55.2 m为灰色粉砂质黏土夹深灰色粉砂团块;55.2~74.4 m为深灰色粉砂夹灰黄色细砂,发育粉砂条带呈平行层理分布;58 m处含有一个直径约5 cm的灰黄色粉砂结壳;60.6 m处疑似厚2 cm的灰黄色粉砂岩结壳;62.72~63.12 m处泥浆混染严重;65.86~65.90 m发育灰色黏土层;65.20~65.22 m、67.80~67.82 m处发育厚约2 cm的灰黑色砂层;69.48~69.74 m处含风化严重的贝壳碎屑;74.16~74.4 m为灰色粉砂质黏土。

74.4~90.1 m: 灰色粉砂质黏土、深灰色粉砂,发育3个沉积物粒度向上变粗的旋回,粉砂质黏土中含有粉砂质条带,条带之间近乎等间距呈平行层理发育。75.5~76 m处含有若干颗粒较小的砾石;76.3、80.6、88.4 m处推断为冲刷面;85.45 m处含有小砾石;89.2~90.1 m处含有灰黑色的碳质斑点。

#### 3.2 AMS<sup>14</sup>C测年结果

南黄海SYS90-1A孔顶部(孔深0~4.6 m)沉积物的AMS<sup>14</sup>C测年结果如表1所示,包括取样深度、测年材料、常规年龄和日历年年龄等。AMS<sup>14</sup>C年龄结果自下而上遵循下老上新的规律,表明钻孔顶部的沉积基本稳定,没有受到强水动力或风暴干扰导致较老沉积物被侵蚀搬运再沉积的现象,年龄结果可信。

表1 南黄海SYS90-1A孔AMS<sup>14</sup>C测年结果

Table 1 The AMS<sup>14</sup>C dating results for the SYS90-1A core in the southern Yellow Sea

深度/m	测试材料	$\delta^{13}\text{C} / \text{‰}$	常规年龄		日历年年龄/cal.aBP		样品编号
			( <sup>14</sup> C/aBP)	中值	范围( $1\sigma$ )		
1.14~1.16	底栖有孔虫	-0.9	11 050 ± 30 BP	10 702	10 656~10 748	520560	
2.44~2.46	底栖有孔虫	-2	16 110 ± 40 BP	17 097	17 012~17 182	520562	
3.82~3.84	底栖有孔虫	-1.3	16 830 ± 40 BP	17 996	17 894~18 099	520563	
4.58~4.60	底栖有孔虫	-4	17 820 ± 60 BP	19 206	19 072~19 341	520564	

### 3.3 古地磁测试结果

南黄海 SYS90-1A 孔沉积物样品通过系统的交变退磁, 大部分样品在去掉次生剩磁组分后, 成功分离出了特征剩磁组分。退磁曲线结果显示(图 2), 大部分样品在退磁过程中, 剩磁强度表现为 0~15 mT 和 20~80 mT 两个分量。其中, 0~15 mT 分量与现代地磁场方向一致, 为次生粘滞剩磁; 20~80 mT 剩磁方向逐步趋向原点, 指示原生特征剩磁方向(图 2a、c、d、e、g); 少量的沉积物样品的剩磁强度在退磁过程中表现出稳定下降并趋向原点的单分量特征(图 2b、f、h)。大部分样品在交变退磁场为 70 mT 时已经退去天然剩磁的 80%, 甚至更多, 且退磁方向趋向原点。SYS90-1A 孔沉积物样品的交变退磁特征说明, 在 20~70 mT 之间即可分离出线性较好的特征剩磁分量。因此, 本次研究选用 20~60 mT 的区间剩磁分量, 利用 PaleoMag 软件对分离出的特征剩磁(ChRM)进行主成分分析<sup>[44-45]</sup>, 选取至少 4 个连续的剩磁分量投影点进行拟合, 并通过最小二乘法拟合计算得到样品的特征剩磁方向。同时, 为了消除人为扰动对管状岩芯两端可能造成的影响, 对每管 U-channel 样品两端的古地磁数据点进行舍弃, 根据数据的可靠程度, 一般上端舍弃不超过 2~3 个数据点, 下端舍弃不超过 3~5 个数据点, 此外, 根据 SYS90-1A 孔岩芯内部的岩性变化、岩芯扰动以及泥浆混染等情况, 对测量的数据点进行筛选。最终, SYS90-1A 孔岩芯序列获得具有稳定特征剩磁的 3737 个数据点(约占样品总测量数的 90.3%)。

SYS90-1A 孔获取的 3737 个古地磁数据用于建立磁性地层序列, 由于钻取过程中岩芯的水平方向已经转动, 样品的磁偏角数据并不能反映沉积物沉积时的地磁场偏角<sup>[46]</sup>, 本文仅利用磁倾角数据建立磁极性柱。由于样品测量间距达 2 cm, 且陆架地区沉积速率较高, 为了避免取样或测试过程中可能导致样品方向颠倒等情况, 本次研究对连续 5 个以上的样品出现反极性时, 定义一次漂移或极性亚时; 连续 10 个以上样品出现反极性时定义一次极性时, 且地层厚度超过 0.2 m。根据获得的稳定特征剩磁将南黄海 SYS90-1A 孔的磁极性序列划分为 22 个磁极性区间, 其中, 正极性段 11 个(N1—N11), 分别为: N1(0~4.95 m)、N2(5.13~15.99 m)、N3(16.19~35.33 m)、N4(37.09~43.61 m)、N5(45.85~46.47 m)、N6(47.72~48.59 m)、N7(50.19~55.93 m)、N8(57.09~63.25 m)、N9(63.41~74.2 m)、N10(79.75~

82.47 m) 和 N11(83.57~87.74 m); 负极性段 11 个(R1—R11), 分别为: R1(4.95~5.13 m)、R2(15.99~16.19 m)、R3(35.33~37.09 m)、R4(43.61~45.85 m)、R5(46.47~47.72 m)、R6(48.59~50.19 m)、R7(55.93~57.09 m)、R8(63.25~63.41 m)、R9(74.2~79.75 m)、R10(82.47~83.57 m) 和 R11(87.74~90.1 m)。其中, 负极性段 R8(62.47~63.25 m) 连续 7 个样品出现反极性时, 但该部分沉积物存在严重的泥浆混染, 岩芯扰动较大, 故不定义为一次地磁极性漂移或极性亚时。

## 4 讨论

### 4.1 SYS90-1A 孔磁性地层年代框架

南黄海陆架地区第四纪以来海陆交互作用频繁, 发育海陆交互沉积, 受海侵-海退作用及区域构造沉降影响, 尽管沉积物在暴露或海侵期间受到一定程度的冲刷、侵蚀, 可能存在沉积间断, 但持续时间较长的地磁极性事件仍可保留在沉积物中<sup>[2,9,19,30,47]</sup>。SYS90-1A 孔沉积物样品剩磁测量的分辨率高达 2 cm, 因此, 只要地层连续, 就不会漏掉持续时间较长的地磁极性事件。

根据获得的稳定特征剩磁样品的磁倾角数据建立南黄海 SYS90-1A 孔磁性地层序列, 结合 AMS<sup>14</sup>C 测年数据, 将 SYS90-1A 孔地层岩性柱、磁化率和磁倾角随深度变化曲线以及获得的地磁极性柱与标准地磁极性年表(GPTS)进行对比<sup>[48-49]</sup>(图 3)。结果表明, SYS90-1A 孔岩芯序列的磁极性主要分布在布容正极性时, 是否存在松山负极性时还需进一步讨论。

第四纪以来, 受海平面升降、区域构造活动等多种因素作用, SYS90-1A 孔岩芯存在多个冲刷面/侵蚀面, 指示南黄海地区第四纪以来沉积序列存在不同程度的沉积间断。SYS90-1A 孔自上而下发现多个倾角变负的短期地磁极性事件, 考虑到岩性变化、钻探取样的影响以及岩性内部可能的数据点筛选, 将这些负极性磁倾角变化均定义为地磁漂移事件较为困难。AMS<sup>14</sup>C 测年结果表明, SYS90-1A 孔全新世沉积厚度约 1.5 m, 全新世平均沉积速率为 12.8 cm/ka, 低于南黄海其他 4 个长序列钻孔(QC2、EY02-2、NHH01、CSDP-1 孔)记录的沉积速率。全新世吉登堡(Gothenberg)地磁极性漂移事件没有被钻孔岩芯记录到, 这可能是由于该事件持续时间较短(<1 ka)和钻孔所在研究区沉积速率较低所致。

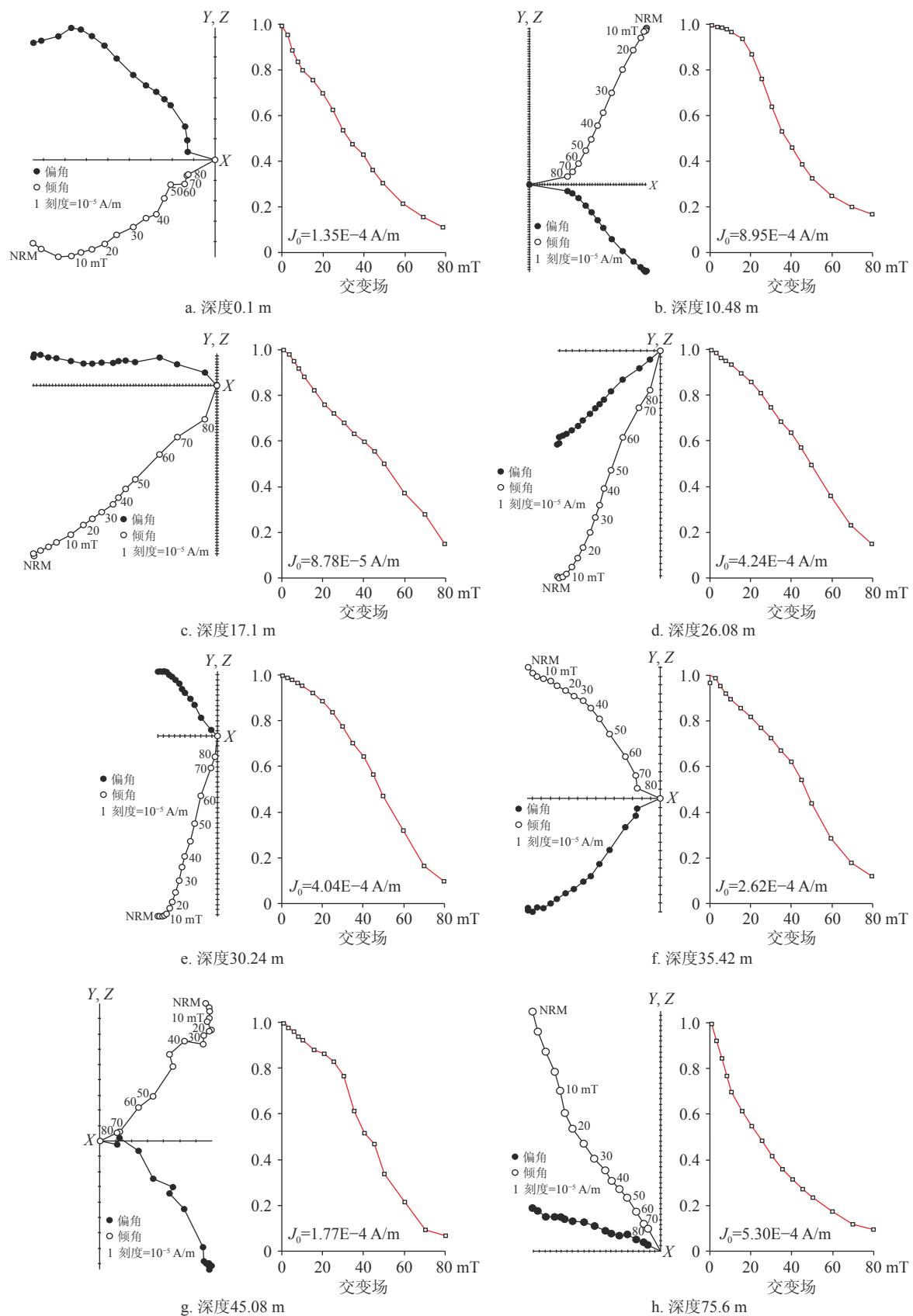


图2 SYS90-1A孔典型沉积物样品退磁正交矢量投影图与归一化剩磁强度衰减图

退磁正交矢量投影图中的实心圆和空心圆分别代表水平投影和垂直投影。

Fig.2 Orthogonal vector plots and remanence decay curves of typical specimens from the SYS90-1A core

White and black dots denote horizontal and vertical components, respectively.

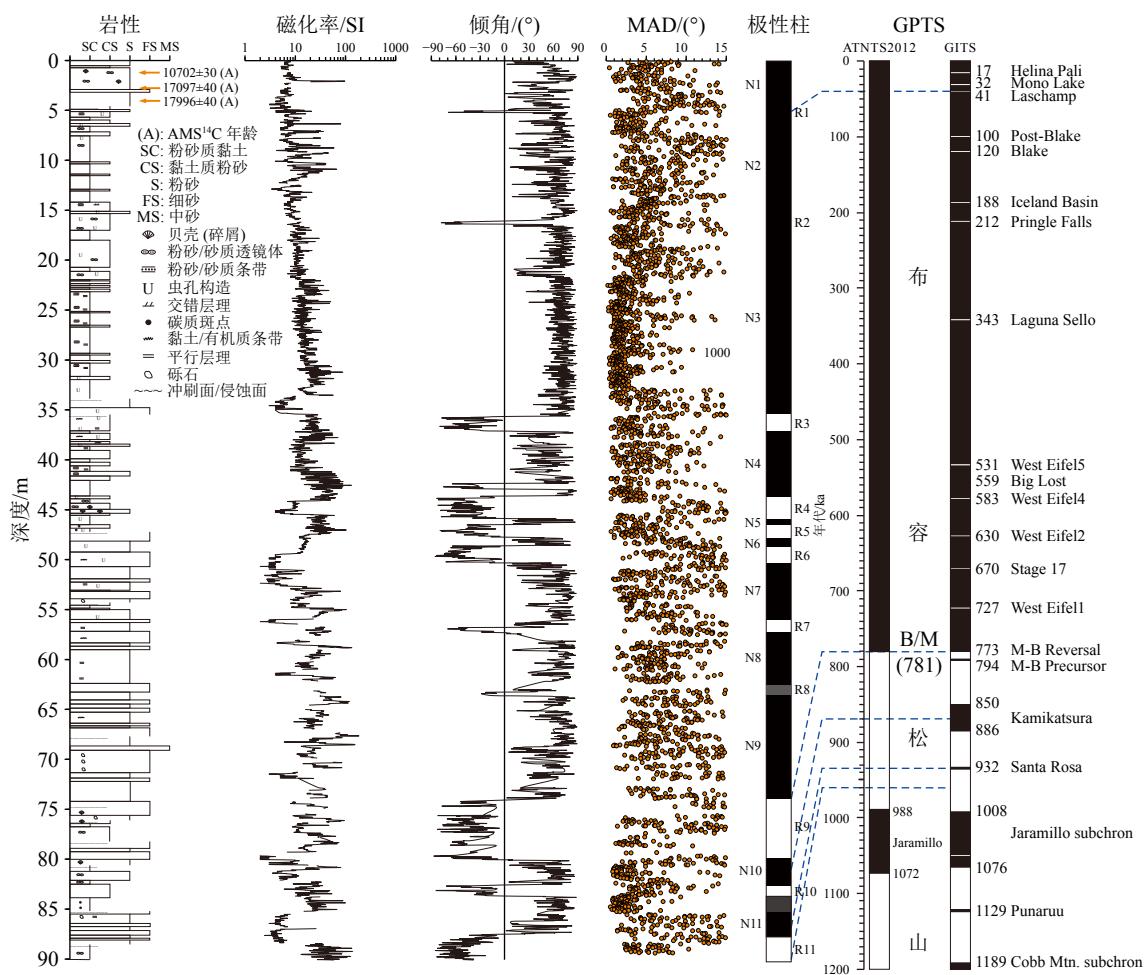


图 3 南黄海 SYS90-1A 孔岩石地层和磁性地层分析结果  
地磁极性年表 GPTS 据文献 [48-49]。

Fig.3 Lithology and magnetostratigraphy of the SYS90-1A core  
Geomagnetic polarity timescale (GPTS) is based on references [48-49].

钻孔记录的 R1(4.95~5.13 m) 负极性段对应 Laschamp(40~45 ka) 磁性漂移事件, 此事件也在南黄海中部泥质区的 NHH01 孔、DLC70-3 孔沉积序列中被发现<sup>[7,20]</sup>。

SYS90-1A 孔布容期内的磁倾角自 35 m 以下存在较大幅度的波动, 其中, 在 R4—R6(43.61~50.19 m) 负极性段内夹杂两个不连续的短时正极性段。尽管前人发现布容期内存在 10 多个地磁漂移事件, 持续时间均不超过 20 ka, 但 SYS90-1A 孔布容期内出现如此长时间的负极性段是不正常的, 并且岩性记录显示该段沉积序列并非一套短时期的快速沉积, 因此, 将 R4—R6 段内的负极性磁倾角变化是否定义为地磁极性漂移事件还需进一步探讨。由于本次研究未对 SYS90-1A 孔岩芯沉积物开展系统的岩石磁学研究, 为我们判断 R4—R6 是否为真实的极性反转记录带来了困难。南黄海泥质区中部的 NHH01 孔也在相同深度(44.4~52.8m)处的负极

性段内记录了 3 个不连续的短时正极性段<sup>[20,50]</sup>, 由于两个钻孔相距不远, 且沉积环境相似, 可以认为两个钻孔记录的是同一事件, 因此, 可以根据 NHH01 孔该段内的岩石磁学结果来推断 SYS90-1A 孔 R4—R6 段磁性记录是否真实。根据岩石磁学结果<sup>[20,50]</sup>, NHH01 孔该段沉积物的载磁矿物为胶黄铁矿, 该胶黄铁矿层位所记录的负极性并非与对应地层沉积时的地磁场方向一致。出现这种情况的原因可能是由于胶黄铁矿在富含有机质还原条件下由硫酸盐和铁的氧化物溶解经过一定的化学反应或由生物作用而形成, 在形成过程中获得了大量的化学剩磁, 导致了重磁化, 因此其记录的是自生胶黄铁矿形成时的极性, 而非对应层位沉积时的地磁场极性。此外, 位于南黄海中部泥质区北缘的 DLC70-3 孔在 49.2~52.84 m 深度处同样也发现由胶黄铁矿层形成的极性反转<sup>[7]</sup>。3 个钻孔在相同深度区间均出现相似的极性反转, 进一步推断 SYS90-1A 孔

R4—R6(43.61~50.19 m)内的负极性磁倾角变化是由胶黄铁矿层引起的极性反转，并非真实的地磁场极性漂移事件。此外，刘建兴<sup>[50]</sup>通过与氧同位素曲线对比认为这段沉积物形成于 MIS12—MIS13。

SYS90-1A 孔岩芯的磁倾角在垂向上变化相对单一，在 74.2 m 和 87.74 m 处存在明显的极性转换特征。布容正极性时和松山负极性时的界线(B/M 界线)是具有全球意义的古地磁年代控制点，对于二者是否是 B/M 界线还需结合区域地质背景和周边其他钻孔资料进一步论证。南黄海第四纪以来稳定沉降，地形起伏不大，根据目前南黄海已经钻获的长时间尺度钻孔的磁性地层学结果来看，B/M 界线深度为 59.08~79.95 m，整体表现为随水深增加而减小，中更新世(B/M 界线)以来的沉积速率为 7.67~9.43 cm/ka(表 2)<sup>[7,18-21]</sup>。如果将 SYS90-1A 孔的 B/M 界线定在 87.74 m 处，则中更新世以来的沉积速率高达 11.23 cm/ka，与前人的研究差别较大；如果将 B/M 界线定在 74.2 m 处，则 MBB 以来的沉积速率为 9.45 cm/ka，与周边其他钻孔的沉积速率基本一致。此外，NHH01 孔、EY02-2 孔均位于南黄海中部泥质区中部地区，与位于泥质区南缘的 SYS90-1A 孔的沉积环境相似，结合水深、地形和沉积厚度等因素，将 SYS90-1A 孔 B/M 界线定在 74.2 m 处，3 个钻孔的沉积速率高度吻合。因此，本文确定 SYS90-1A 孔 B/M 界线的深度位于 74.2 m 处。

SYS90-1A 孔 74.2 m 深度以下揭示松山负极性时存在两个正极性段 N10(79.75~82.47 m) 和 N11(83.57~87.74 m)。Jaramillo 极性亚时是早更新世晚期重要的地磁极性倒转事件，持续时间长、强度大，南黄海及邻区多个长时间尺度钻孔如 CSDP-1、GZK01、QC2 孔均有记录<sup>[18,20,51]</sup>，如将 N11—N12 对应 Jaramillo 极性亚时，则 B/M 界线与 Jaramillo 极性亚时顶界的沉积速率仅为 2.9 cm/ka，这与南黄海其

他已有钻孔(NHH01 孔、EY02-2 孔、CSDP-2 孔)的认识存在较大差距，且该时期南黄海地区构造较为稳定，没有大规模的沉积间断，不会出现沉积速率突变的情况，因此，N11—N12 正极性段不支持对应 Jaramillo 极性亚时。若 N10 和 N11 分别对应 Kamikatsura 和 Santa Rosa 地磁漂移事件，则 B/M 界线与 Kamikatsura 地磁漂移事件顶界的沉积速率为 8.65 cm/ka，Kamikatsura 地磁漂移期间的平均沉积速率为 7.77 cm/ka，这与南黄海中部 NHH01 孔(11.48 cm/ka)、EY02-2 孔(7.26 cm/ka)记录的同时期沉积速率基本一致；而 Santa Rosa 地磁漂移事件区间的沉积速率则高达 41.7 cm/ka，明显异于全孔和研究区的正常沉积速率，为我们解释地磁漂移事件带来了困难。岩性、岩相和微体古生物组合揭示 N11(83.57~87.74 m) 上部的 83.7~85.25 m 深度处的沉积环境为低能潮坪环境，发育深灰色的粉砂质黏土-黏土，有机质含量高，在弱水动力条件下不利于水体的氧交换，为厌氧细菌的发育提供了基础，有利于发育胶黄铁矿<sup>[52]</sup>，推断该段的极性反转形成原因与 R4—R6 相同，记录的是自生胶黄铁矿形成时的极性，并非真实的地磁场极性漂移事件。因此，N11(83.57~87.74 m) 极性反转对应的实际深度应为 85.25~87.74 m，则 Santa Rosa 地磁漂移期间的沉积速率为 12.4 cm/ka，与研究区同时期的沉积速率基本一致。综上所述，南黄海 SYS90-1A 孔包含了布容正极性时和松山负极性时两个明显的正、负极性段，结束于松山负极性时上部。松山负极性时包含 Kamikatsura 和 Santa Rosa 两个地磁漂移事件，根据平均沉积速率推算 SYS90-1A 孔底界年龄约为 0.96 Ma。

## 4.2 沉积速率变化

根据南黄海 SYS90-1A 孔 AMS<sup>14</sup>C 测年和磁性

表 2 南黄海地区主要钻孔 M/B 界线深度

Table 2 Depth of the M/B boundary in major boreholes in the South Yellow Sea

钻孔	水深/m	进尺/m	取芯率/%	B/M 界线深度/m	地理坐标	文献来源
SYS90-1A	69.3	90.1	93	74.2	33°49'N、123°44'E	本文
DLC70-3	73	71.2	93	59.08	36°38'N、23°33'E	[7]
NHH01	73	125.6	91	68.64	35°13'N、123°13'E	[20]
EY02-2	79	70	86.5	63.29	34°30'N、123°30'E	[19]
QC2	49	108.8	90.4	79.95	34°18'N、122°16'E	[18]
CSDP-1	52.5	300.1	80	73.68	34°18'N、122°22'E	[13]
CSDP-2	22	2 809.88	91.7	65.23	34°33'N、21°15'E	[21]

地层学结果建立的年代框架和各年代控制点之间的沉积厚度, 推算出各段内沉积物的平均沉积速率, 建立了钻孔的沉积年代-深度曲线及沉积速率模式图(图 4)。结果表明, SYS90-1A 孔的沉积速率相对稳定, 平均沉积速率约 9.4 cm/ka, 但各段之间存在较小的差异。早更新世晚期的沉积速率为 8.65~8.68 cm/ka, 平均沉积速率约为 8.66 cm/ka。中更新世以来的沉积速率约为 9.45 cm/ka, 全新世以来的沉积速率为 12.8 cm/ka。沉积速率自早更新世晚期以来呈增加趋势, 这可能与第四纪以来盆地持续沉

降、陆源碎屑物质供应增加有关。SYS90-1A 孔上部沉积物存在的冲刷面/侵蚀面, 结合 AMS<sup>14</sup>C 测年结果, 我们认为钻孔在晚更新世存在明显的沉积侵蚀间断, 推断与南黄海地区晚第四纪以来的海平面下降有关, 海平面下降使得沉积地层暴露在地表遭受侵蚀<sup>[30]</sup>。

#### 4.3 区域钻孔磁性地层对比

地层年代框架不仅为地层划分对比提供年代学上的依据, 而且可以反映不同地质历史时期的沉

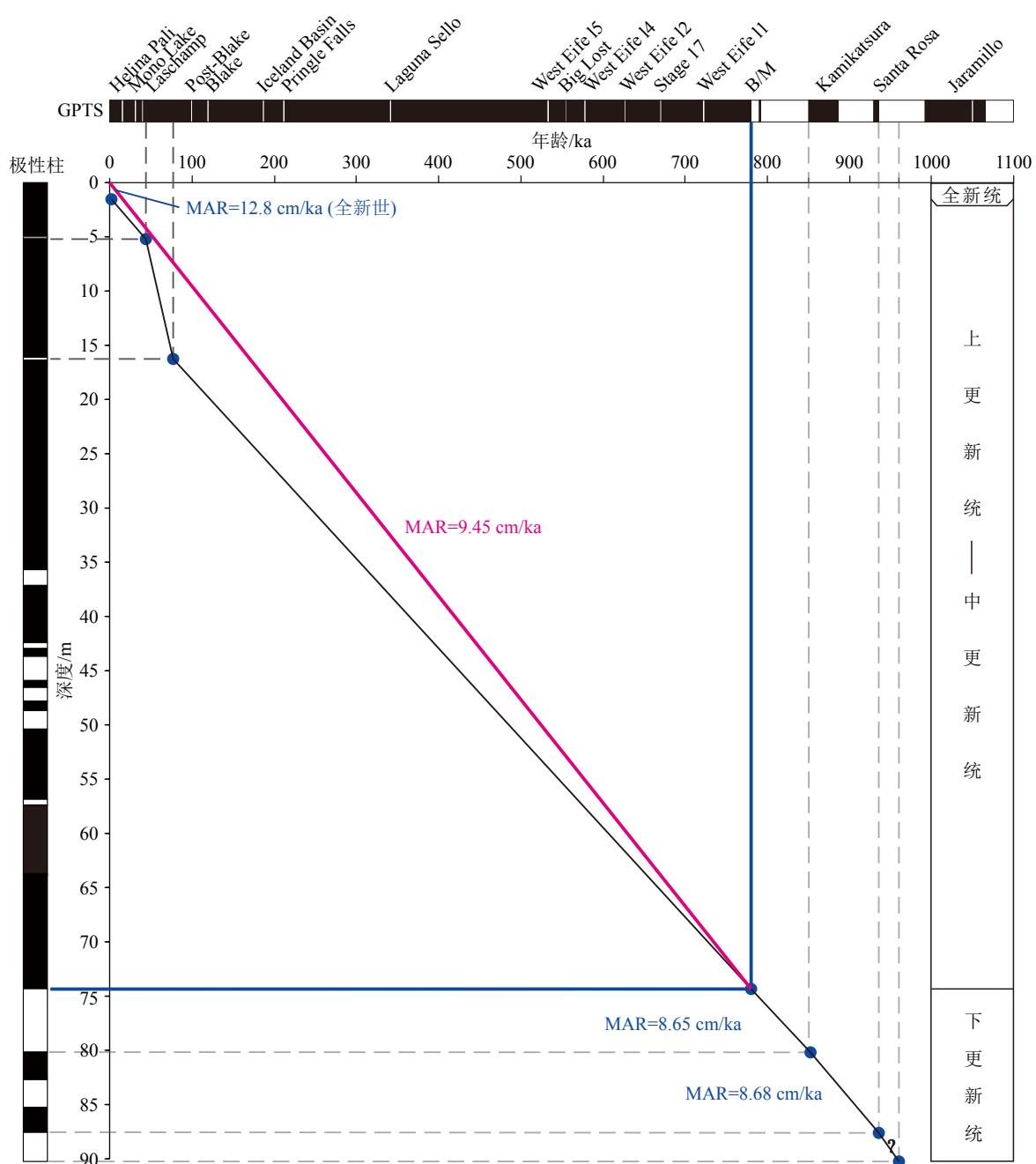


图 4 南黄海 SYS90-1A 孔沉积年代-深度曲线及沉积速率模式图  
Fig.4 The age-depth and sedimentation rate model of SYS90-1A core in the South Yellow Sea

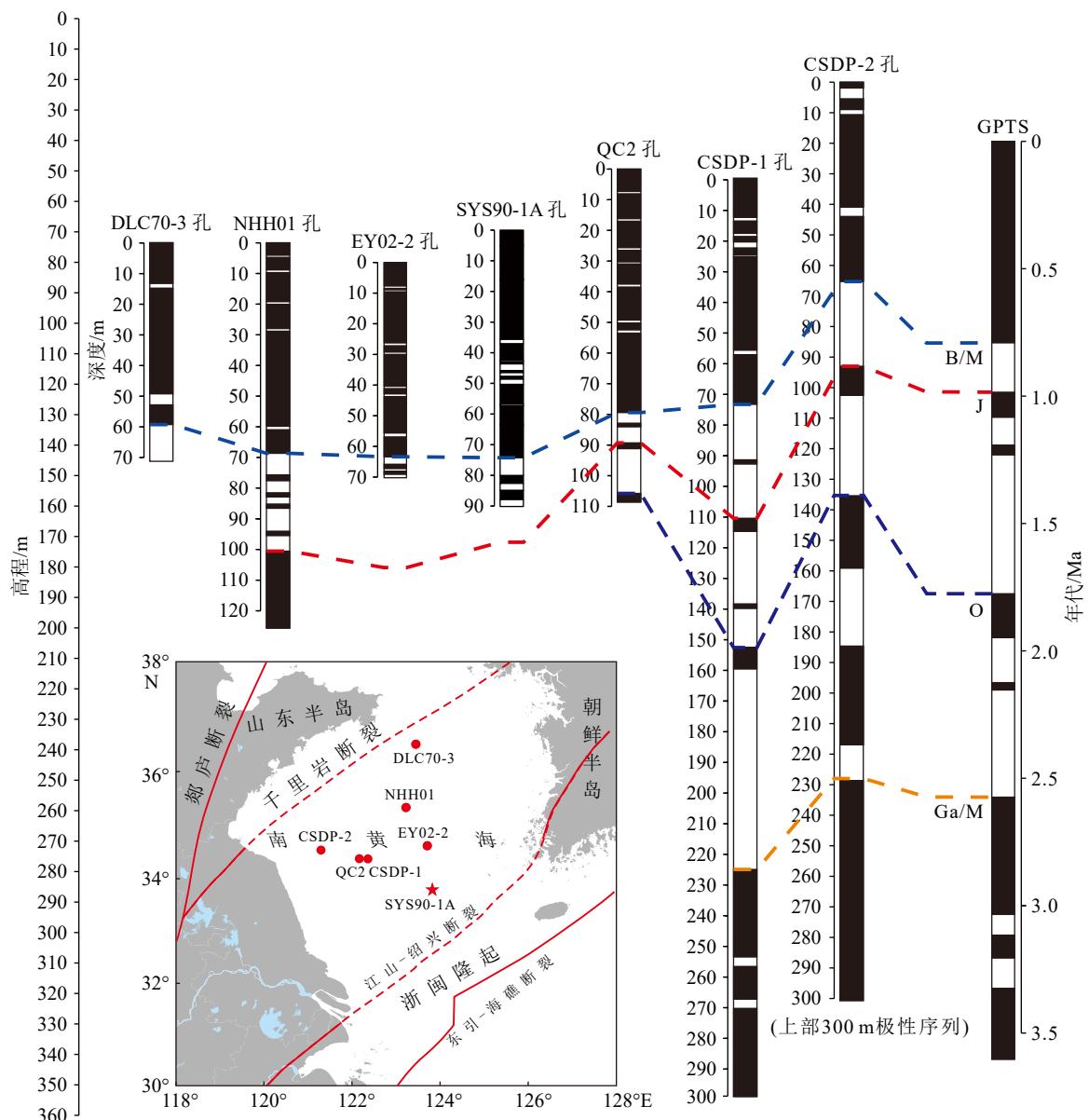


图 5 南黄海 SYS90-1A 孔与南黄海地区其他主要钻孔磁性地层结果对比

Fig.5 Comparison in magnetostratigraphy between the SYS90-1A core and other cores in the South Yellow Sea and adjacent areas

积厚度和沉积速率的变化,是开展第四纪环境演化和气候变化的重要年代标尺<sup>[53]</sup>。SYS90-1A 孔与南黄海其他长序列钻孔的磁性地层结果如图 5 所示,主要钻孔的 B/M 界线深度位于 59.08~79.75 m,表明南黄海地区第四纪以来沉积环境较为稳定,没有出现大的构造变动,沉积速率整体差别不大。南黄海陆架西部的 CSDP-1 孔和 QC2 孔相距很近,沉积环境相似,二者的 B/M 界线深度分别为 73.68 和 79.95 m,刘建兴等<sup>[12]</sup>认为缺乏对 QC2 孔沉积物岩石磁学的认识是造成 B/M 界线深度差异的原因之一。有机质的常规<sup>14</sup>C 测年揭示 QC2 孔全新世的沉积厚度达 17.84 m<sup>[54]</sup>,而贝壳的 AMS<sup>14</sup>C 测年结果显示 CSDP-1 孔全新世沉积厚度仅约 3 m<sup>[13]</sup>,两孔全新

世沉积厚度的巨大差异是由于测年方法和材料的不同还是沉积环境的差异仍需进一步厘定<sup>[12]</sup>。此外,刘建兴等<sup>[12]</sup>通过钻孔沉积速率和极性事件比对,认为将 QC2 孔的底界年龄定为约 1 Ma 才更为合理。DLC70-3<sup>[7]</sup>、NHH01<sup>[20]</sup>、EY02-2 孔<sup>[19]</sup>和本论文研究的 SYS90-1A 孔均位于南黄海中部地区,自北向南分布,B/M 界线深度依次为 59.08、68.64、63.29 和 74.2 m,考虑钻孔所在位置的水深差异,则 NHH01、EY02-2 和 SYS90-1A 孔的 B/M 界线深度在高程上高度一致,而 DLC70-3 孔的 B/M 界线深度与其他 3 个钻孔在高程上相差 10 m。出现这种差异的原因可能在于晚更新世以来 DLC70-3 孔沉积物遭受强烈侵蚀所致<sup>[7]</sup>。NHH01、EY02-2 和 SYS90-

1A 孔的全新世沉积厚度分别为 4.5、2、1.5 m, 这与南黄海中部地区全新统厚度基本一致<sup>[5]</sup>, 而 DLC70-3 孔缺失全新统和部分晚更新统<sup>[30]</sup>。已有主要钻孔研究表明, 南黄海西部地区全新世沉积厚度不仅比中部地区更厚, 而且钻孔 B/M 界线比中部地区的钻孔要更深, 即西部地区中更新世以来沉积了更多的碎屑物质, 这可能与陆源碎屑物质的输入、海平面波动和季风气候变化以及局部地区的差异性沉降等因素有关<sup>[3,9,36]</sup>。

## 5 结论

(1) 南海南部 SYS90-1A 孔 AMS<sup>14</sup>C 测年结果和磁性地层学研究表明, 钻孔岩芯记录了从布容正极性时至松山负极性时上部, 包括 Kamikatsura 和 Santa Rosa 地磁极性漂移事件。早、中更新世界线即布容正极性时/松山负极性时界线(B/M 界线)深度位于 74.2 m, Kamikatsura 和 Santa Rosa 地磁极性漂移事件深度分别位于 79.75~82.47、85.25~87.74 m。

(2) 黄海南部 SYS90-1A 孔早更新世晚期以来的沉积速率相对稳定, 平均沉积速率约为 9.4 cm/ka, 但各段之间存在较小的差异。早更新世晚期的沉积速率为 8.65~8.68 cm/ka, 平均沉积速率约为 8.66 cm/ka。中更新世以来的沉积速率约为 9.45 cm/ka, 全新世以来的沉积速率为 12.8 cm/ka。沉积速率自早更新世晚期以来呈增加趋势, 这可能与第四纪以来盆地持续沉降、陆源碎屑物质供应增加有关。

**致谢:** 感谢中国地质调查局青岛海洋地质研究所虞义勇高级工程师、秦亚超研究员、刘长春助理研究员在图件绘制和数据分析方面提供的帮助。感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

## 参考文献 (References)

- [1] Song J M. Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [2] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 黄海地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 1989: 1-289. [QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong, et al. Geology of the Yellow Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1989.]
- [3] 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.]
- [4] Clark P U, Archer D, Pollard D, et al. The middle Pleistocene transition: characteristics, mechanisms, and implications for long-term changes in atmospheric pCO<sub>2</sub>[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(23-24): 3150-3184.
- [5] 郑光膺. 黄海第四纪地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. [ZHENG Guangying. Quaternary Geology of the Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press, 1991.]
- [6] 刘健, 李绍全, 王圣洁, 等. 末次冰消期以来黄海海平面变化与黄海暖流的形成 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 13-24. [LIU Jian, LI Shaoquan, WANG Shengjie, et al. Sea level changes of the Yellow Sea and formation of the Yellow Sea Warm Current since the last deglaciation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 13-24.]
- [7] Mei X, Li R H, Zhang X H, et al. Evolution of the Yellow Sea warm current and the Yellow Sea cold water mass since the middle Pleistocene[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 442: 48-60.
- [8] 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.
- [9] Liu J, Zhang X H, Mei X, et al. The sedimentary succession of the last ~3.50 Myr in the western South Yellow Sea: paleoenvironmental and tectonic implications[J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 47-65.
- [10] 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.
- [11] 业渝光, 刁少波, 和杰, 等. 南黄海 QC<sub>2</sub> 孔的 ESR 年代学 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(1): 95-102. [YE Yuguang, DIAO Shaobo, HE Jie, et al. ESR chronology of well QC<sub>2</sub> in the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16(1): 95-102.]
- [12] 刘建兴, 刘青松, 石学法, 等. 黄海第四纪年代学研究进展 [J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(2): 17-25. [LIU Jianxing, LIU Qingsong, SHI Xuefa, et al. Progress of quaternary chronological research in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(2): 17-25.]
- [13] Liu J X, Liu Q S, Zhang X H, et al. Magnetostratigraphy of a long Quaternary sediment core in the South Yellow Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 144: 1-15.
- [14] Wang L Y, Li G X, Liu J, et al. Astronomical dating of Quaternary strata in the South Yellow Sea and its indication for paleoclimatic evolution[J]. *Marine Geology*, 2021, 439: 106557.
- [15] 赵一飞, 徐敏, 刘晴, 等. 苏北辐射沙洲岸滩沉积物元素地球化学记录的百年尺度环境变化 [J]. 海洋学报, 2021, 43(8): 66-80. [ZHAO Yifei, XU Min, LIU Qing, et al. Centennial scale environmental changes in the elemental geochemistry of tidal flat sediments in the northern Jiangsu radial sand ridges[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(8): 66-80.]
- [16] 张军强, 刘健, 孔祥淮, 等. 南黄海西部陆架区 SYS-0804 孔 MIS 6 以来地层和沉积演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 1-12. [ZHANG Junqiang, LIU Jian, KONG Xianghuai, et al. Stratigraphic sequence and depositional environment since marine isotope stage 6

- in the continental shelf of the western south yellow sea: a case of SYS-0804 core[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(1): 1-12.]
- [17] 陈筱林. 南黄海泥质区西北缘 B01 孔沉积地球化学记录及源—汇效应研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2015. [CHEN Xiaolin. Geochemical records of sediments and source to sink effect of B01 core in northwest margin of South Yellow Sea mud area[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2015.]
- [18] 周墨清, 葛宗诗. 南黄海及相邻陆区松散沉积层磁性地层的研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1990, 10(4): 21-33. [ZHOU Moqing, GE Zongshi. Magnetostratigraphic study of loose sediments in southern yellow sea and its adjacent land area[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1990, 10(4): 21-33.]
- [19] 葛淑兰, 石学法, 朱日祥, 等. 南黄海 EY02-2 孔磁性地层及古环境意义 [J]. *科学通报*, 2005, 50(22): 2531-2540. [GE Shulan, SHI Xuefa, ZHU Rixiang, et al. Magnetostratigraphy of borehole EY02-2 in the southern Yellow Sea and its paleoenvironmental significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7): 855-865.]
- [20] Liu J X, Shi X F, Liu Q S, et al. Magnetostratigraphy of a greigite - bearing core from the South Yellow Sea: implications for remagnetization and sedimentation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(10): 7425-7441.
- [21] 刘健, 段宗奇, 梅西, 等. 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 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 25-43. [LIU Jian, DUAN Zongqi, MEI Xi, et al. Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(5): 25-43.]
- [22] 杨继超. 南黄海盆地中部第四纪地震层序与地层学 [D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2014. [YANG Jichao. Quaternary seismic sequence and stratigraphy in the central South Yellow Sea Basin[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2014.]
- [23] Wang L Y, Li G X, Xu J S, et al. Strata sequence and paleochannel response to tectonic, sea-level, and Asian monsoon variability since the late Pleistocene in the South Yellow Sea[J]. *Quaternary Research*, 2019, 92(2): 450-468.
- [24] Tauxe L, Stickley C E, Sugisaki S, et al. Chronostratigraphic framework for the IODP Expedition 318 cores from the Wilkes Land Margin: constraints for paleoceanographic reconstruction[J]. *Paleoceanography*, 2012, 27(2): PA2214.
- [25] 易亮, 姜兴钰, 田立柱, 等. 渤海盆地演化的年代学研究 [J]. *第四纪研究*, 2016, 36(5): 1075-1087. [YI Liang, JIANG Xingyu, TIAN Lizhu, et al. Geochronological study on Plio-Pleistocene evolution of Bohai basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(5): 1075-1087.]
- [26] 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(2): 315-324. [SUN Jun, YANG Huiliang, HE Lei, et al. Quaternary magnetostratigraphy record in sediments from borehole BHS01 in the Bohai strait[J]. *Geoscience*, 2019, 33(2): 315-324.]
- [27] 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. [CAI Feng, CAO Chao, ZHOU Xinghua, et al. *China Offshore Ocean-Submarine Topography and Geomorphology*[M]. Beijing: Ocean Press, 2013.]
- [28] Milliman J D, Farnsworth K L. *River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [29] Zhang J, Wan S M, Clift P D, et al. History of Yellow River and Yangtze River delivering sediment to the Yellow Sea since 3.5 Ma: tectonic or climate forcing?[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 216: 74-88.
- [30] 梅西. 南黄海 DLC70-3 孔晚更新世以来的沉积记录与环境响应 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2012. [MEI Xi. Sedimentary record and environmental implications since the late Pleistocene from the core DLC70-3 in South Yellow Sea[D]. Doctor Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2012.]
- [31] 王忠蕾, 陆凯, 孙军, 等. 南黄海中部泥质区沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄物源判别 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(5): 70-82. [WANG Zhonglei, LU Kai, SUN Jun, et al. Detrital zircon U-Pb age and provenance discrimination in sediments of the central mud area in the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(5): 70-82.]
- [32] 孙效功, 方明, 黄伟. 黄、东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律 [J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 581-587. [SUN Xiaogong, FANG Ming, HUANG Wei. Spatial and temporal variations in suspended particulate matter transport on the Yellow and East China Sea shelf[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 581-587.]
- [33] 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.]
- [34] Pang Y M, Guo X W, Han Z Z, et al. Mesozoic-Cenozoic denudation and thermal history in the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin and the implications for hydrocarbon systems: constraints from the CSDP-2 borehole[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 99: 355-369.
- [35] 黄龙, 耿威, 陆凯, 等. 南黄海中部 MIS6 期以来沉积物稀土元素组成及其物源指示意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(2): 92-105. [HUANG Long, GENG Wei, LU Kai, et al. Rare earth element composition and provenance implication of sediments in the Central South Yellow Sea since MIS6[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(2): 92-105.]
- [36] 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(1-2): 93-120.
- [37] 郑求根, 蔡立国, 丁文龙, 等. 黄海海域盆地的形成与演化 [J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(5): 647-654. [ZHENG Qiugen, CAI Liguo, DING Wenlong, et al. Development and evolution of basins in Yellow Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(5): 647-654.]
- [38] 金翔龙, 喻普之. 东海大陆架地磁场与地质构造的初步研究 [J]. *海洋科学*, 1979(S1): 94-96. [JIN Xianglong, YU Puzhi. Preliminary study on geomagnetic field and tectonics of continental shelf of the East China Sea[J]. *Marine Sciences*, 1979(S1): 94-96.]

- [39] Yi L, Ye X Y, Chen J B, et al. Magnetostratigraphy and luminescence dating on a sedimentary sequence from northern East China Sea: constraints on evolutionary history of eastern marginal seas of China since the Early Pleistocene[J]. *Quaternary International*, 2014, 349: 316-326.
- [40] Zhao D B, Wan S M, Jiang S J, et al. Quaternary sedimentary record in the northern Okinawa Trough indicates the tectonic control on depositional environment change[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 516: 126-138.
- [41] 杨子廉. 中国东部陆架第四纪时期的演变及其环境效应 [M]//梁名胜, 张吉林. 中国海陆第四纪对比研究. 北京: 科学出版社, 1991: 1-22. [YANG Zigeng. Evolution of eastern shelf of China in quaternary and its environmental consequences[M]//LIANG Mingsheng, ZHANG Jilin. Correlation of Onshore and Offshore Quaternary in China. Beijing: Science Press, 1991: 1-22.]
- [42] Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J]. *Radiocarbon*, 2002, 44(1): 167-180.
- [43] Stuiver M, Reimer P J, Reimer R W, 2017. CALIB 7.1[EB/OL]. [2017-11-16]. <http://calib.org>.
- [44] Zijderveld J D A. A. C. Demagnetization of rocks: analysis of results[M]//Collinson D W, Creer K M, Runcorn S K. Methods in Palaeomagnetism. Amsterdam: Elsevier, 1967.
- [45] Jones C H. User-driven integrated software lives: "Paleomag" paleomagnetics analysis on the Macintosh[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(10): 1145-1151.
- [46] Chang H, An Z S, Liu W G, et al. Magnetostratigraphic and paleoenvironmental records for a Late Cenozoic sedimentary sequence drilled from Lop Nor in the eastern Tarim Basin[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 80-81: 113-122.
- [47] Shi X F, Yao Z Q, Liu J X, et al. Dominant role of sea level on the sedimentary environmental evolution in the Bohai and Yellow Seas over the last 1 million years[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 229.
- [48] Hilgen F J, Lourens L J, van Dam J A, et al. The neogene period[M]//Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, et al. The Geologic Time Scale. Amsterdam: Elsevier, 2012: 923-978.
- [49] Ogg J G. Geomagnetic polarity time scale[J]. *Geologic Time Scale*, 2020, 2020, 1: 159-192.
- [50] 刘建兴. 南黄海中部泥质区 NHH01 孔磁性地层学研究 [D]. 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文, 2012. [LIU Jianxing. Magnetostratigraphy of borehole NHH01 in the central southern Yellow Sea mud[D]. Master Dissertation of the First Institute of Oceanography, SOA, 2012.]
- [51] Gao X B, Ou J, Guo S Q, et al. Sedimentary history of the coastal plain of the south Yellow Sea since 5.1 Ma constrained by high-resolution magnetostratigraphy of onshore borehole core GZK01[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 239: 106355.
- [52] 王昆山, 石学法, 李珍, 等. 东海 DGKS9617 岩心重矿物及自生黄铁矿记录 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(4): 41-45. [WANG Kunshan, SHI Xuefa, LI Zhen, et al. Records of heavy mineral and authigenous pyrite in core DGKS9617 from the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(4): 41-45.]
- [53] 王润华, 郭坤一, 于振江, 等. 长江三角洲地区第四纪磁性地层学研究 [J]. *地层学杂志*, 2005, 29(S1): 612-617. [WANG Runhua, GUO Kunyi, YU Zhenjiang, et al. Quaternary magneto-stratigraphy of the Yangtze Delta Area[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2005, 29(S1): 612-617.]
- [54] 郑光膺. 南黄海第四纪层型地层对比 [M]. 北京: 科学出版社, 1989. [ZHENG Guangying. Quaternary Stratigraphic Correlation in the South Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press, 1989.]
- [55] 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.
- [56] 侯方辉. 南黄海晚第四纪地震地层学与新构造运动研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2006. [HOU Fanghui. The studying on late quaternary seismic stratigraphy and neotectonic movement of the South Yellow Sea[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2006.]