



南黄海中部泥质区沉积物碎屑锆石U-Pb年龄物源判别

王忠蕾，陆 凯，孙 军，张 勇，朱晓青，胡 刚，何梦颖，黄湘通，密蓓蓓

Detrital zircon U-Pb age and provenance discrimination in sediments of the central mud area in the South Yellow Sea

WANG Zhonglei, LU Kai, SUN Jun, ZHANG Yong, ZHU Xiaoqing, HU Gang, HE Mengying, HUANG Xiangtong, and MI Beibei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062402>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号，获得更多资讯信息

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.

南黄海中部泥质区沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄物源判别

王忠蕾^{1,2}, 陆凯^{1,3}, 孙军¹, 张勇^{1,2}, 朱晓青^{1,2}, 胡刚^{1,2}, 何梦颖⁴, 黄湘通⁵, 密蓓蓓¹

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, 青岛 266237
3. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛, 266100
4. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023
5. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

摘要: 对南黄海中部泥质区南侧 4 个表层沉积物和 SYS90-1A 孔中 5 个沉积物样品进行碎屑锆石 U-Pb 定年, 具体分析了研究区表层沉积物物源差异及约 1.0 Ma 以来沉积物物源变化。结果显示, 泥质区沉积物主要来自黄河, 而泥质区外部南侧沉积物可能主要由长江供应。SYS90-1A 孔主要记录了早更新世晚期以来的沉积记录, 不同时期物源差异明显: 中更新世早期以长江源物质为主, 利用磁化率开展旋回地层学分析, 根据天文年代调谐确定该时期具体时代为 0.59~0.71 Ma; 早更新世晚期至中更新世以及中更新世中期以来以黄河源物质为主。这一结果与前人关于南黄海早更新世以来沉积物以黄河源物质为主的认识不同, 长江源物质对南黄海泥质区沉积物贡献需要重新认识。上述表层沉积物样品和钻孔沉积物样品碎屑锆石 U-Pb 年龄分布与朝鲜半岛河流沉积物完全不同, 说明该区域自早更新世晚期以来沉积物主要来自中国大陆。

关键词: 中部泥质区; 碎屑锆石 U-Pb 年龄; 物源判别; 南黄海

中图分类号:P736 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062402

Detrital zircon U-Pb age and provenance discrimination in sediments of the central mud area in the South Yellow Sea

WANG Zhonglei^{1,2}, LU Kai^{1,3}, SUN Jun¹, ZHANG Yong^{1,2}, ZHU Xiaoqing^{1,2}, HU Gang^{1,2}, HE Mengying⁴, HUANG Xiangtong⁵, MI Beibei¹

1. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266237, China
2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China
3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
4. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China
5. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Detrital zircons taken from four surface sediments and five sediment samples from SYS90-1A borehole in the southern part of the central mud area of the South Yellow Sea was U-Pb dated and their provenances were discriminated, based on which the changes since about 1.0 Ma in the provenance of the sediment samples were analyzed. Results show that the sediments in the mud area are mainly from the Yellow River, and the sediments in the south of the mud area may be transported by the Yangtze River. The borehole SYS90-1A mainly records the deposits since the late Early Pleistocene, showing obvious provenance differences in different stages. In the early Middle Pleistocene, the sediments were mainly transported from the Yangtze River; and cyclic stratigraphy that was determined based on magnetic susceptibility and astronomical chronology tuning showed that the specific time of the stage is 590~710 ka. From the late early Pleistocene to the middle Pleistocene and since the middle Pleistocene, the sediments were mainly from the Yellow River. This result is different from the previous understanding that the sediments in the South Yellow Sea since the Early Pleistocene were mainly derived from the Yellow River, and the contribution of the sediments from the Yangtze River to the mud area needs to be re-recognized. The detrital zircon U-Pb age distribution of all samples is completely different from that of the fluvial sediments of the Korean Peninsula, indicating that the sediments in this area are mainly from mainland China since the late Early Pleistocene.

Key words: central mud area; detrital zircon U-Pb dating; provenance discrimination; South Yellow Sea

资助项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费(2022QNLM05032); 中国地质调查局海洋地质调查专项(DD20221710)

作者简介: 王忠蕾(1983—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋地质与第四纪地质学研究, E-mail: wzhl2010@sina.cn

通讯作者: 陆凯(1978—), 男, 在读博士, 正高级工程师, 主要从事海洋地质学研究, E-mail: 250173726@qq.com

收稿日期: 2022-06-24; 改回日期: 2022-08-06。 周立君编辑

东亚大陆边缘河流沉积物源汇过程是地球科学领域的重大科学问题^[1], 中国东部海域浅海陆架沉积地层记录了该大型源汇体系的演化过程, 是重建新生代亚洲大陆构造隆升、季风演化以及气候变化等过程的重要信息载体^[2-3], 同时, 浅海陆架沉积记录对全球海平面变化也具有重要指示^[4-6]。

黄海是一个典型的半封闭型陆架海, 周边河流主要包括中国大陆的长江、淮河、黄河以及朝鲜半岛汉江、锦江等河流, 接受上述河流的大量陆源碎屑物质^[7]。受黄海暖流、沿岸流等海流以及冷水团的控制, 在北黄海西部、南黄海中部、济州岛西南和南黄海东南部形成了多个泥质区^[8]。其中, 南黄海中部泥质区的研究成果最为丰富。在物源研究方面, 利用矿物学和地球化学方面的证据, 多数学者认为南黄海中部泥质区沉积物主要由黄河和长江供应^[7,9-12]。其他潜在来源是局部小河流, 如淮河等, 其年入海沉积物通量(约 76 Mt/a)相对较低, 对中部泥质区的贡献可能很小^[13]。发源于朝鲜半岛的主要河流, 如汉江、锦江等, 向黄海东部输送沉积物通量仅为 18 Mt/a^[13], 对中部泥质区沉积物贡献微不足道^[7]。此外, 由于黄河和长江巨量泥沙的稀释, 风尘对南黄海沉积的影响几乎可忽略不计^[14]。利用钻孔沉积物资料, Yao 等人研究表明, 南黄海 0.88 Ma 以来物质来源主要受黄河控制^[15]。CSDP-1 孔的碎屑锆石 U-Pb 年龄分析显示 0.78 Ma 中部泥质区才开始有黄河源的物质, 并且自此黄河成为钻孔区主要物质来源^[16]。

多数物源研究成果以细粒沉积物为研究对象, 主要分析了末次间冰期以来短时间尺度的物源变化。虽然已经形成南黄海中部泥质区为黄河源和长江源物质混合区的认识, 但二者占主导的区域分界还不够清晰, 地质历史时期不同河流对南黄海海底沉积物影响程度的认识还存在较多分歧。

锆石具有很强的抗风化能力, 广泛分布于河流、湖泊和三角洲各种沉积环境的陆源碎屑沉积物中。通过多个样品的年龄图谱相互比较, 并分析整个流域的构造运动历史及沉积环境特征, 可以很好地追踪沉积物的输运轨迹^[17-18]。在过去 20 年里, 单颗粒矿物原位分析技术的发展使得碎屑锆石 U-Pb 年代学方法成为沉积物物源研究的标准方法之一^[19-21]。本文以南黄海中部泥质区南部及泥质区外缘 4 个表层沉积物样品和 5 个钻孔沉积物样品的碎屑锆石 U-Pb 年龄进行分析, 为南黄海中部泥质区物源分界、地质历史时期物源及沉积环境演化研究提供新证据。

1 地质背景

南黄海位于中国大陆和朝鲜半岛之间(图 1), 平均水深 46 m, 最深处位于济州岛北侧, 深达 140 m^[22]。南黄海海底包括鲁南岸坡及海州湾阶地平原、苏北岸外舌状台地、中部平原、黄海槽洼地、朝鲜半岛岸外台地和济州岛西部砂脊六大地形单元。黄海槽洼地位于南黄海中部, 靠近朝鲜半岛一侧, 北浅南深, 海槽地形东陡西缓^[22], 最深处处在 100 m 以上。前人研究认为, 黄海槽由末次冰期水流运动形成, 为全新世海水入侵的主要通道^[23]。

南黄海现代海洋流系主要包括黄海暖流、沿岸流等。南黄海中部的黄海冷水团是一个低能环境, 为泥质沉积分布区; 在南黄海的东部、西南部海区则发育强潮流, 形成了潮流沙脊^[9]。通过对南黄海打穿第四系的 CSDP-2 孔研究, 发现南黄海在 1.66 Ma 左右出现第一次海侵, 1.66~0.83 Ma 南黄海地区以河流相沉积为主, 有 3 次较弱的海侵, 直到 0.83 Ma 以来海侵强度才与现今接近^[9,26]。浙闽隆起的进一步沉降使得南黄海中部隆起区在间冰期高海平面时期的海洋环境基本接近现今环境。南黄海西部陆架在 MIS5 发育范围比现今更广^[9]。

南黄海周边河流主要有中国大陆一侧的黄河、长江和朝鲜半岛一侧的汉江、锦江、蟾津江等河流。长江是我国第一长河, 流域纬向跨度大, 自西向东流经昌都地块、松潘-甘孜褶皱带、秦岭-大别构造带、扬子地块和华夏地块^[27], 地层出露复杂, 元古界至第四系均有分布, 包括大面积的碳酸盐岩、陆源碎屑岩和中酸性侵入岩、片岩和片麻岩等^[28]。通过大量碎屑锆石 U-Pb 年龄分析, 发现长江碎屑沉积物主要有 6 组峰: <65、200~300、400~550、700~1000、1800~2000 和 2400~2600 Ma, 其中 200~300 和 700~1000 Ma 为主要的两组峰^[29]。黄河是我国第二长河, 以年输沙量巨大著称, 流经松潘-甘孜造山带、秦岭造山带、祁连造山带和华北陆块等多个构造单元^[30], 碎屑锆石 U-Pb 年龄结果显示, 黄河碎屑沉积物主要有 6 组峰: 200~350、350~500、700~1000、1000~1800、1800~2000 和 2000~2600 Ma, 其中 200~350、350~500、1800~2000 和 2000~2600 Ma 为主要的四组峰^[31-32]。朝鲜半岛一侧的河流主要为汉江、锦江、蟾津江等中小河流。锆石 U-Pb 年龄谱显示半岛东西两侧差异明显, 年龄范围从早新生代到晚太古代, 西部以古生代至新元古代锆石为主, 东部以古元古代锆石为主^[33]。

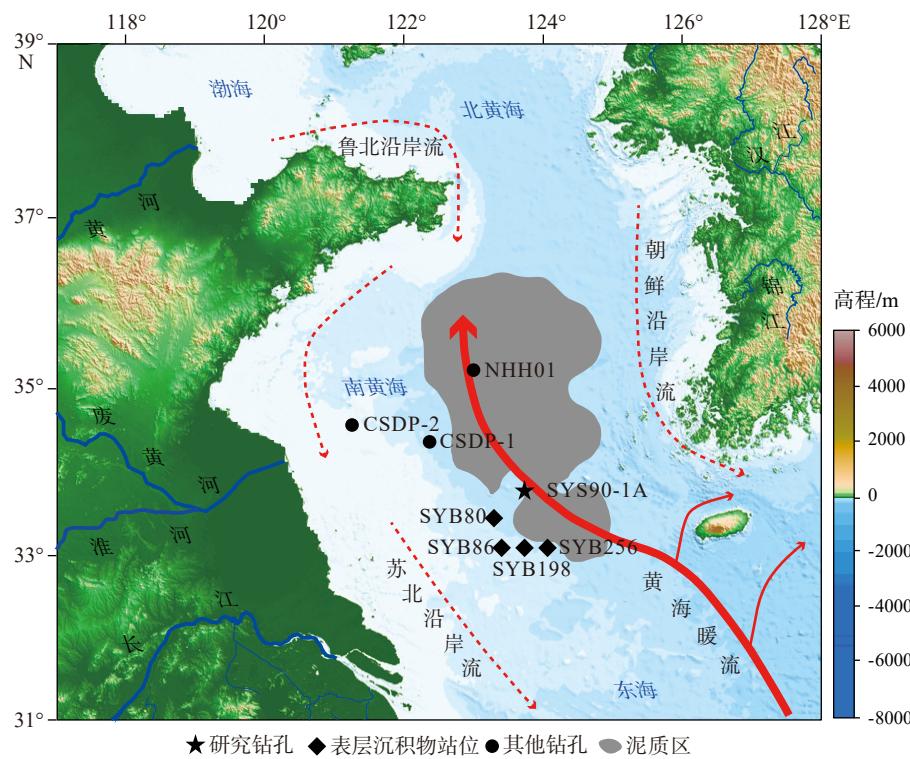


图 1 南黄海及研究钻孔位置示意图

CSDP-1 孔见文献 [16], CSDP-2 孔见文献 [9], NHH01 孔见文献 [15], 海流根据文献 [24] 绘制, 泥质区范围根据文献 [25] 绘制。SYB80、SYB86、SYB198 和 SYB256 为本文研究表层样站位。

Fig.1 South Yellow Sea and the borehole location

Data sources: Borehole CSDP-1 from [16], borehole CSDP-2 from [9], borehole NHH01 from [15], marine circulation from [24], mud area from [25]. SYB80, SYB86, SYB198, and SYB256 are from this study.

2 材料及方法

2.1 样品

2018 年 4—5 月, 青岛海洋地质研究所在南黄海泥质区附近获取表层样 300 个站位, 每个站位用箱式取样器取海底表层 20 cm 以内样品 2 袋。SYS90-1A 孔由青岛海洋地质研究所在 2017 年 6 月利用“明源 1001”轮实施, 地理坐标为 33°48'49"N、123°43'58"E, 水深约 69.3 m, 钻孔深 90.1 m, 有效样品 86 管, 岩芯总长 83.8 m, 平均取芯率 93.0%。

对 SYS90-1A 孔全孔进行了连续低场磁化率测量和古地磁交变场退磁测定, 结合钻孔上部 AMS¹⁴C 和光释光测年结果, 建立了钻孔的年代框架^①(图 2)。SYS90-1A 孔底界年龄约为 1.0 Ma, 布容正极性时和松山负极性时倒转边界(0.78 Ma)大约位于 73.78 m。上部年龄数据较多(图 2), 根据沉积速率推测晚更新世底界埋深为 21.50 m。上部 15 m 沉积物记录了

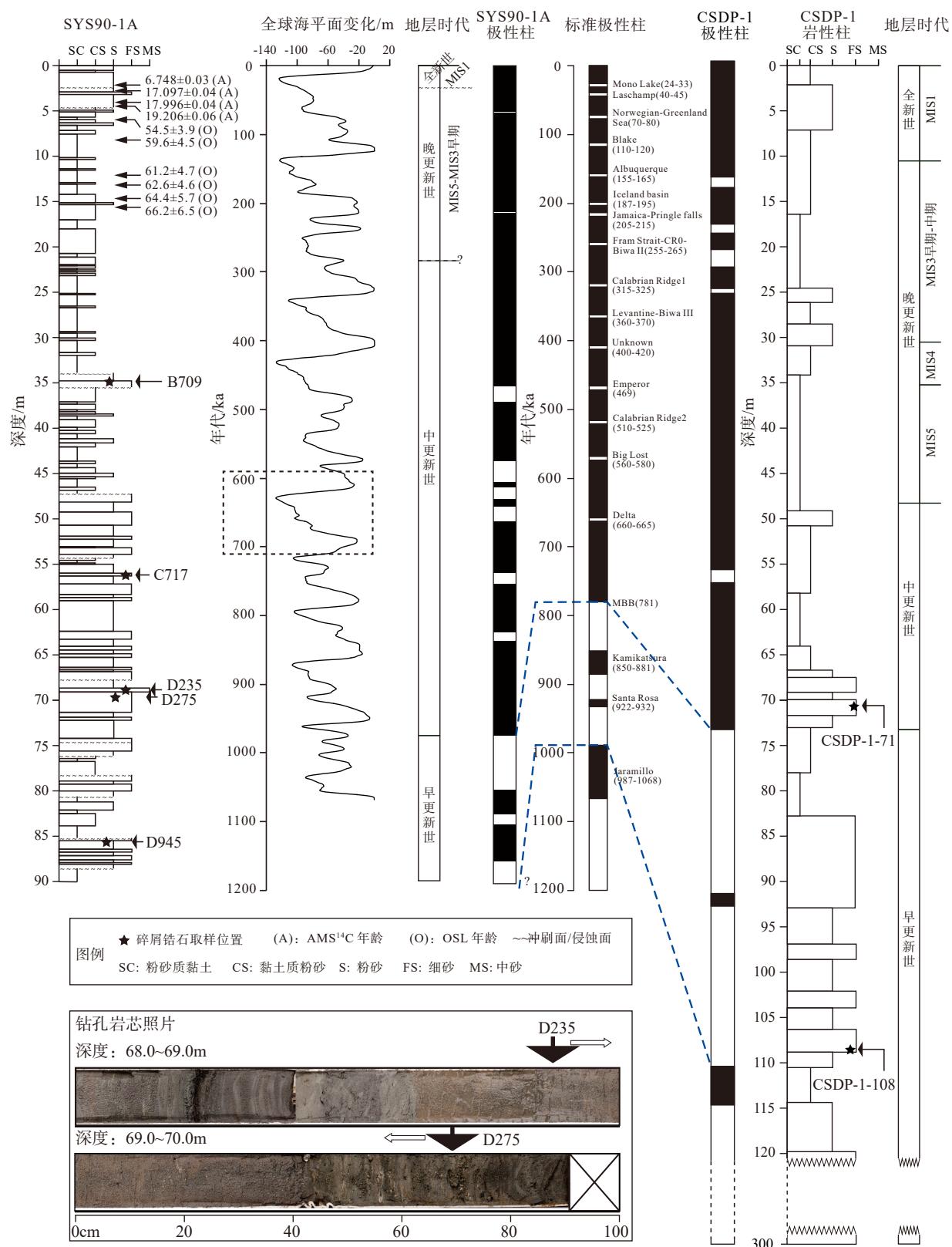
MIS4、MIS3 早期和 MIS1 的沉积, 缺失 MIS3 晚期至 MIS2 早期的沉积。

2.2 测试方法

根据岩芯描述及沉积学分析, 结合年代学结果, 对 SYS90-1A 孔进行碎屑锆石 U-Pb 定年分析, 共选取 5 个样品。钻孔岩芯在 69.48~69.74 m 层位见风化严重的贝壳碎屑, 岩性变化明显(图 2), 推测彼时沉积环境可能发生改变。在层位上下各取 1 个样品, 根据泥质区分布, 共选取 4 个表层沉积物样品进行碎屑锆石 U-Pb 定年分析。9 个沉积物样品位置见图 1, 埋深和岩性等信息见表 1, 锆石挑选、制靶、反射光、透射光和阴极荧光(CL)拍摄和测试均在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。

首先利用常规的浮选和电磁法分离出锆石, 随机选出 250 粒进行环氧树脂制靶, 并拍摄显微镜照相(透射光与反射光), 然后在场发射扫描电镜实验

^① 陆凯等主编《乳山东南三幅 1:25 万海洋区域地质调查报告》(2019)

图 2 SYS90-1A 孔与 CSDP-1 孔^[30]年代框架及锆石定年分析样品取样位置示意图

全球海平面变化曲线据文献 [34]。

Fig.2 The age frame of the SYS90-1A and CSDP-1 boreholes^[30] and the sampling location of zircon dating

Global sea level change curve is from reference [34].

表 1 沉积物样品位置及岩性信息
Table 1 Samples location and lithology information

序号	样品编号	位置	埋深/m	岩性	备注
1	SYB80	33°27'15"N、123°17'46"E	0.20	粉砂	表层样
2	SYB86	33°05'40"N、124°24'17"E	0.20	粉砂	表层样
3	SYB198	33°05'40"N、124°44'02"E	0.20	粉砂	表层样
4	SYB256	33°05'40"N、124°03'48"E	0.20	粉砂	表层样
5	SYS90-1A-B709	33°48'49"N、123°43'58"E	34.88	粉砂	钻孔样
6	SYS90-1A-C717	33°48'49"N、123°43'58"E	56.20	细砂	钻孔样
7	SYS90-1A-D235	33°48'49"N、123°43'58"E	68.88	粉砂	钻孔样
8	SYS90-1A-D275	33°48'49"N、123°43'58"E	69.68	粉砂	钻孔样
9	SYS90-1A-D945	33°48'49"N、123°43'58"E	85.66	粉砂	钻孔样

室进行阴极荧光拍摄,发射扫描电镜型号为 TESCAN MIRA3,探头由 TESCAN 公司提供。

锆石 U-Pb 定年使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICPMS) 完成。激光剥蚀平台采用 Resolution SE 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统 (Applied Spectra, 美国), 配备 S155 型双体积样品池。质谱仪采用 Agilent7900 型电感耦合等离子体质谱仪 (Agilent, 美国)。详细的调谐参数见 Thompson 等的文献^[35], 采用束斑直径 50 μm、剥蚀频率 10 Hz、能量密度 3.5 J/cm²、扫描速度 3 μm/s 的激光参数剥蚀玻璃标样 NIST 612, 调节气流以获得高的信号强度。选用 100 μm 束斑线扫玻璃标样 NIST 610 对待测元素进行 P/A 调谐。测量质量数²⁹Si、³¹P、⁴⁵Sc、⁴⁹Ti、⁵⁶Fe、⁸⁹Y、⁹¹Zr、⁹³Nb、¹³⁹La、¹⁴⁰Ce、¹⁴¹Pr、¹⁴⁶Nd、¹⁴⁷Sm、¹⁵¹Eu、¹⁵⁷Gd、¹⁵⁹Tb、¹⁶³Dy、¹⁶⁵Ho、¹⁶⁶Er、¹⁶⁹Tm、¹⁷³Yb、¹⁷⁵Lu、¹⁷⁸Hf、¹⁸¹Ta、²⁰²Hg、²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁵U、²³⁸U, 总的扫描时间约为 0.23 s。锆石样品固定在环氧树脂靶上, 抛光后在超纯水中超声清洗, 分析前用分析级甲醇擦拭样品表面。采用 5 个激光脉冲对每个剥蚀区域进行预剥蚀(剥蚀深度约 0.3 μm), 以去除样品表面可能的污染。在束斑直径 30 μm、剥蚀频率 5 Hz、能量密度 2 J/cm² 的激光条件下分析样品。数据处理采用 Iolite 程序^[36], 锆石 91500 作为校正标样, GJ-1 作为监测标样, 每隔 10~12 个样品点分析 2 个 91500 标样及 1 个 GJ-1 标样。通常采集 20 s 的气体空白, 35~40 s 的信号区间进行数据处理, 按指数方程进行深度分馏校正^[36]。以玻璃标样 NIST 610 作为外标, ⁹¹Zr 作为内标计算微量元素含量。本次实验过程中测定的 91500 (1061.5 ± 3.2 Ma, 2σ)、GJ-1 (604 ± 6 Ma, 2σ) 年龄在不确定范围内与推荐值一

致。锆石年龄选择按照如下原则:对于 < 1000 Ma 的年龄选取²⁰⁶Pb/²³⁸U 计算值, 对于 > 1000 Ma 的年龄选取²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 计算值^[37]。

3 结果与讨论

3.1 碎屑锆石形态及 U-Pb 年龄

3.1.1 锆石形态

从研究样品锆石 CL 图像可以看出, 碎屑锆石粒径变化较大, 范围为 20~200 μm。磨圆度从圆形到棱角均有分布, 以次圆形和次棱角居多。研究样品中部分锆石具有清晰的岩浆岩振荡环带, 如图 3 中 C717-70、S256-112、S256-62、D275-111 和 S80-91, 其中后两者可能为低温条件下微量元素的扩散速度慢而形成。样品中也有部分变质锆石, 如无分带的 D235-94 和具有变质增生边的 C717-52 和 D945-68 两个样品(图 3)。

3.1.2 碎屑锆石 U-Pb 年龄特征

锆石 Th、U 含量及 Th/U 值能够大致反映锆石的成因^[38]。通常认为, 岩浆锆石中 Th、U 含量较高且 Th/U 值较大, 一般 > 0.3 , 而变质锆石的 Th、U 含量相对较低, 一般 < 0.1 。用于本文研究的 85% 以上的沉积物锆石 Th/U > 0.3 , 仅少数的 Th/U < 0.1 (图 4), 说明大多数锆石为岩浆成因, 能够反映其结晶年龄。

南黄海中部泥质区南部表层沉积物和 SYS90-1A 孔沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图如图 5 所示, 各样品中年龄谐和锆石数量均超过 90%, 文中所用沉积物锆石年龄谐和度均 $> 90\%$ 。9 个沉积物样品锆石 U-Pb 年龄测试结果显示, 根据年龄分布

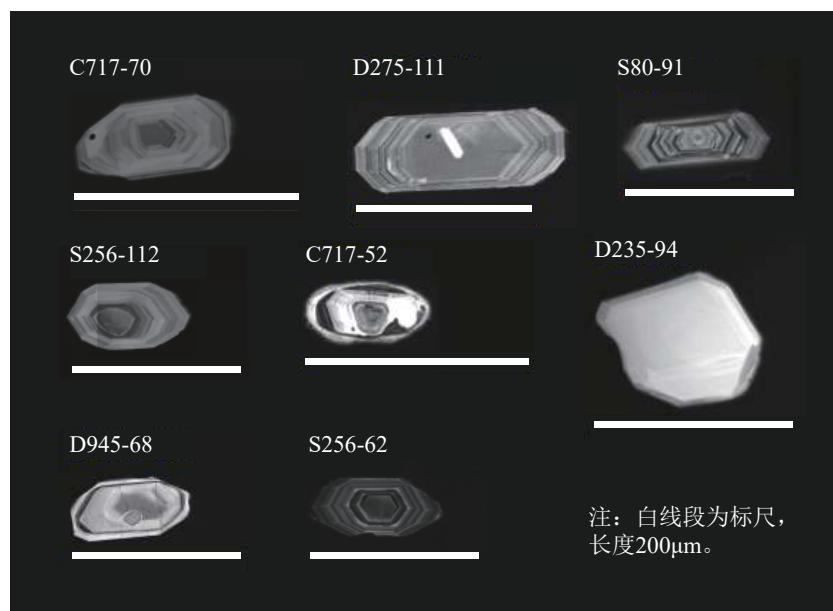


图 3 研究样品部分锆石 CL 图像
Fig.3 CL images of some zircons in the study samples

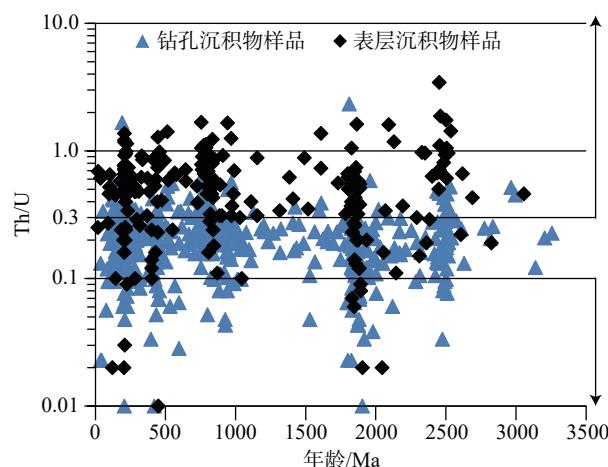


图 4 SYS90-1A 孔沉积物和表层沉积物碎屑锆石 Th/U 值
Fig.4 Plot of Th/U ratios versus U-Pb ages of detrital zircons from SYS90-1A borehole and surface sediments of South Yellow Sea

大致可分为两组: 第一组表现出 <100 Ma、100~300、300~500、600~1100、1800~2000 和 2300~

2700 Ma 等 6 个年龄区间, 样品包括表层沉积物 SYB86、SYB198、SYB256 和钻孔沉积物 SYS90-1A-C717、SYS90-1A-D235; 第二组表现出 <200、200~300、350~500、600~1100、1800~2000 和 2000~2600 Ma 等 6 个主要年龄区间, 样品包括表层沉积物 SYB80 和钻孔沉积物 SYS90-1A-B709、SYS90-1A-D275、SYS90-1A-D945。各样品不同年龄区间锆石比例见表 2 和表 3。

3.2 沉积物碎屑锆石年龄物源判别

3.2.1 物源判别

南黄海周边的黄河、长江和朝鲜半岛的汉江、锦江、蟾津江等河流可能为海底沉积物的主要输送通道, 本文以上述河流为端元进行物源判别。

首先, 利用 IsoplotR 软件^[39]绘制了研究样品与周边河流样品的 KDE 图(图 6), 结合各样品不同年龄区间的锆石比例, 初步认为表层沉积物 SYB86、SYB198、SYB256 和钻孔沉积物 SYS90-1A-C717、

表 2 第一组样品不同年龄区间锆石比例
Table 2 The proportion of zircons in different ages of the first group of samples

样品编号	<100 Ma	100~300 Ma	300~500 Ma	600~1100 Ma	1300~1500 Ma	1800~2000 Ma	2300~2700 Ma	%
SYS90-1A-C717	1	27	13	27	4	16	12	
SYS90-1A-D235	4	26	11	35	2	6	17	
SYB86	0	44	11	18	4	18	5	
SYB198	3	54	13	21	2	5	2	
SYB256	3	33	13	18	3	19	11	

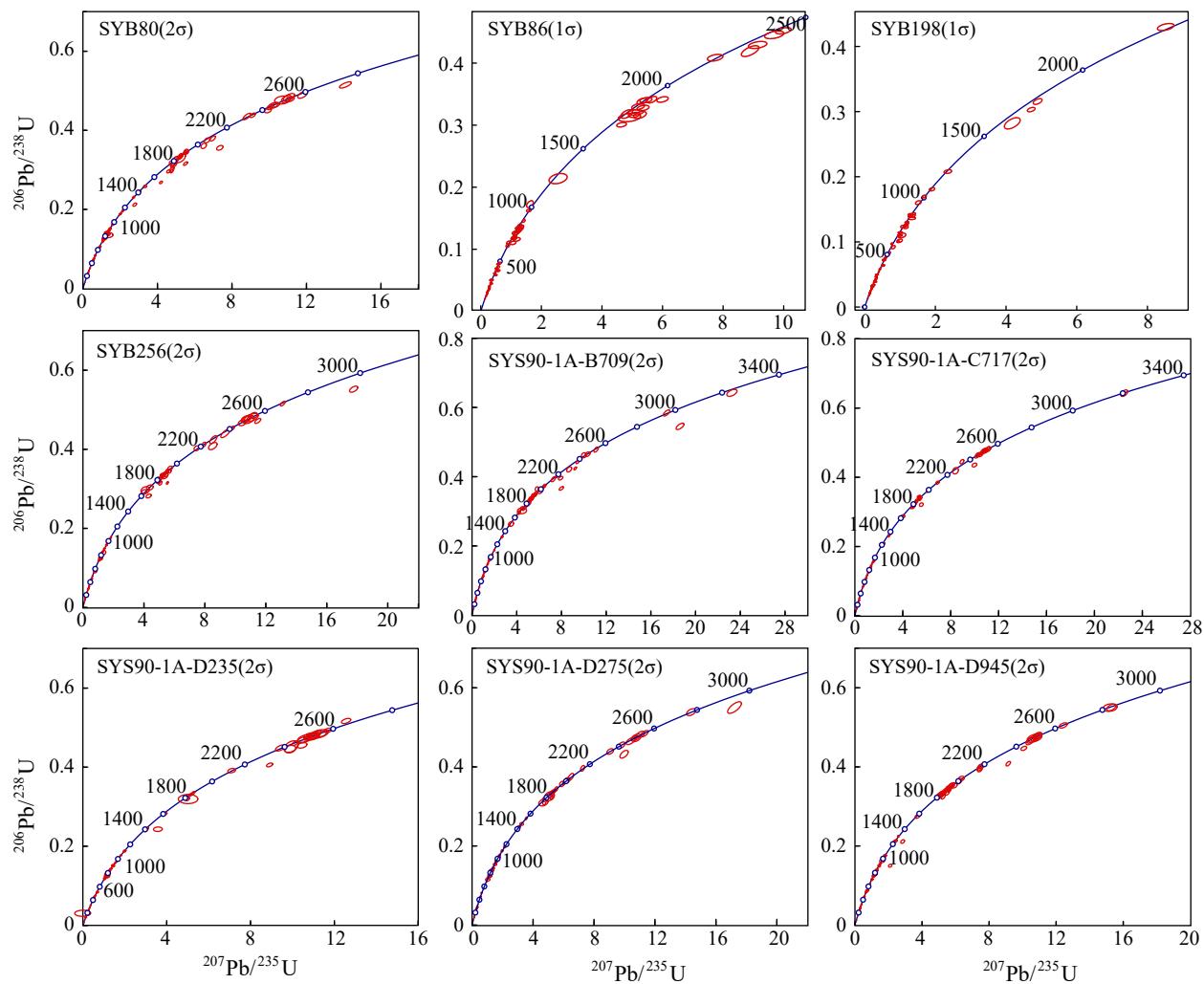


图 5 沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig.5 Concordia ages of single zircon grains from the samples

表 3 第二组样品不同年龄区间锆石比例

Table 3 The proportion of zircons in different ages of the second group of samples

%

样品编号	<200 Ma	200~300 Ma	350~500 Ma	600~1100 Ma	1300~1500 Ma	1800~2000 Ma	2000~2600 Ma
SYS90-1A-B709	4	21	11	23	6	23	13
SYS90-1A-D275	3	13	12	41	3	16	13
SYS90-1A-D945	2	22	13	26	2	22	15
SYB80	2	21	9	35	4	15	15

SYS90-1A-D235 与长江输送沉积物的锆石 U-Pb 年龄谱比较相似, 以 200~300 和 700~1000 Ma 为两组主要年龄, 且多数样品含有<65 Ma 年龄的锆石颗粒。其中年龄<65 Ma(新生代)的锆石样品占比不高, 但明显说明这一组样品与其他样品的差异。长江上游流经的昌都地块和松潘-甘孜褶皱带及下游流经的下扬子板块均出露新生代岩体^[40]。

表层沉积物 SYB80 和钻孔沉积物 SYS90-1A-B709、SYS90-1A-D275、SYS90-1A-D945 与黄河输

送沉积物的锆石 U-Pb 年龄谱比较相似, 以 200~300、350~500、600~1100、1800~2000 和 2000~2600 Ma 为主要的年龄峰, 年龄峰的增加可能主要是受源区拓展的影响^[43]。600~1100 Ma 为长江输送沉积物的主要年龄峰。长江流域 700~1000 Ma 的锆石含量均较高, 主要是有大量扬子克拉通和秦岭-大别造山带^[44-45]碎屑沉积物输入所致。

研究样品与朝鲜半岛三条河流输送物质的锆石 U-Pb 年龄谱区别较大, 应该不存在物源关系。

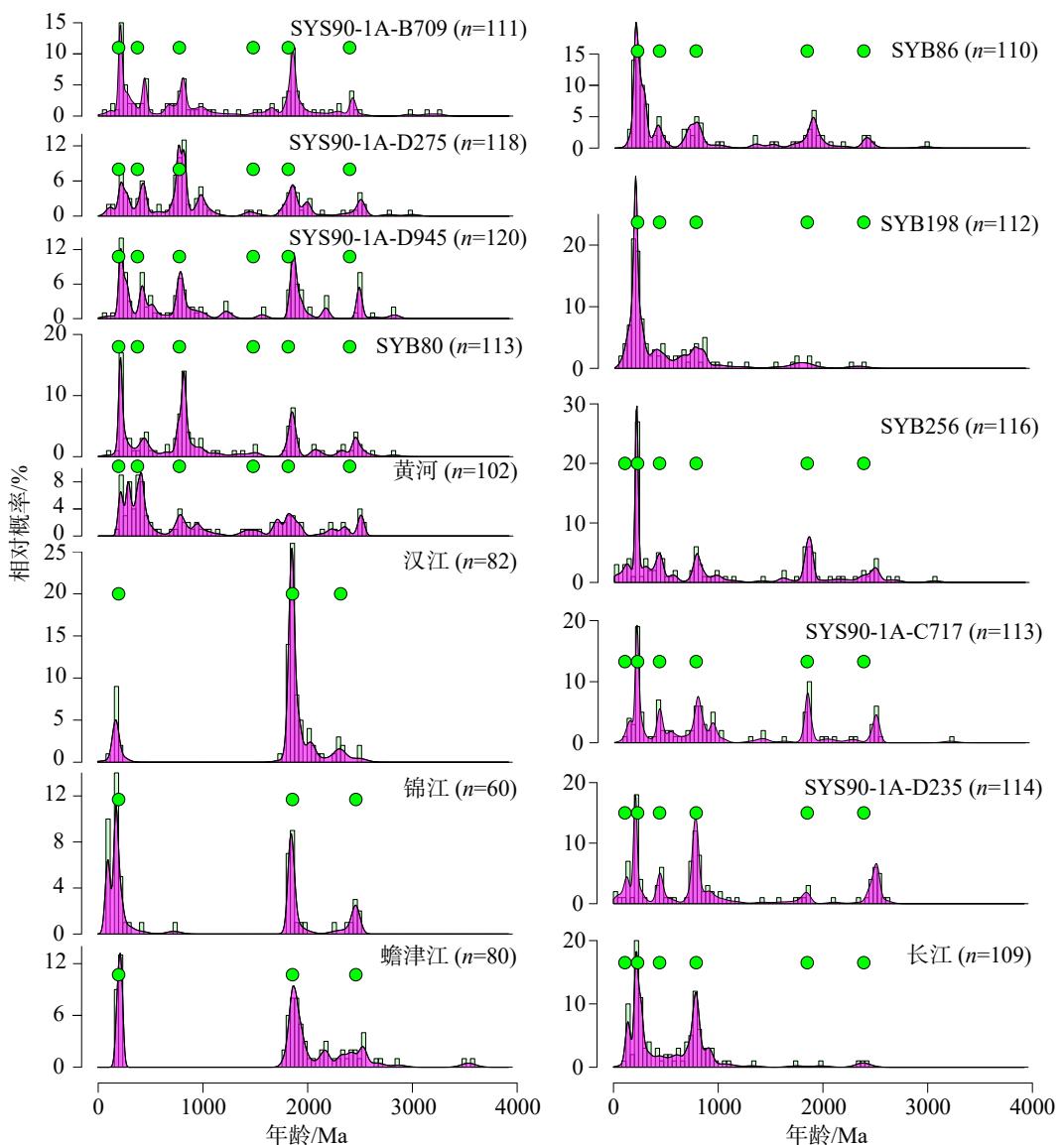


图 6 研究样品及周边河流沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱

黄河样品数据来自文献 [41], 长江样品数据来自文献 [42], 锦江、汉江和蟠津江样品数据来自文献 [33]。图中绿色圆点为主要对比峰值区。

Fig.6 U-Pb age spectra of detrital zircon of the study samples and the surrounding river sediments

Data sources: Yellow River sample data from [41], Yangze River sample data from [42], Han River, Geum River, and Seomjin River samples data from [33].

The green dots are peak areas for comparison.

朝鲜半岛河流锆石 U-Pb 年龄谱以 100~250 和 1800~2000 Ma 两组年龄峰为特征^[33], 与长江、黄河输送物质的锆石 U-Pb 年龄谱区别明显。

Vermeesch 研究认为, 基于多维定标法 (MDS) 的碎屑锆石 U-Pb 年龄相似性量化分析, 能够实现年龄分布的有效捕捉, 具有很强的实用性^[46]。该基于 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验的 D 值或 Kuiper 检验的 V 值, 通过特定的算法, 将分析结果以点的形式投射在多维空间(二维或三维)中, 表示多个样本之间的相对差异, 从而显著提升碎屑锆石样品量化分析结果的可视化效果。样品间的差异性(δ)矩

阵被函数 f 转换为一个由直线距离(d)表示的差异矩阵, 对于两个样品 i 和 j , 其定义如下:

$$d_{ij} \approx f(\sigma_{ij}) \quad (1)$$

式(1)中: $f(\delta_{ij})$ 是单调递增的转换函数, 即 i 和 j 样品的差异性越大, 多维空间中代表 2 个样品的点之间的距离也就越大。MDS 利用这些差异矩阵将样品点投射在二维或三维空间中绘制成图。

利用 IsoplotsR 软件绘制了研究样品与长江、黄河以及朝鲜半岛汉江、锦江、蟠津江等河流的 MDS 图(图 7)。从图 7 中可以看出表层沉积物 SYB80 和钻孔沉积物 SYS90-1A-B709、SYS90-1A-D275、

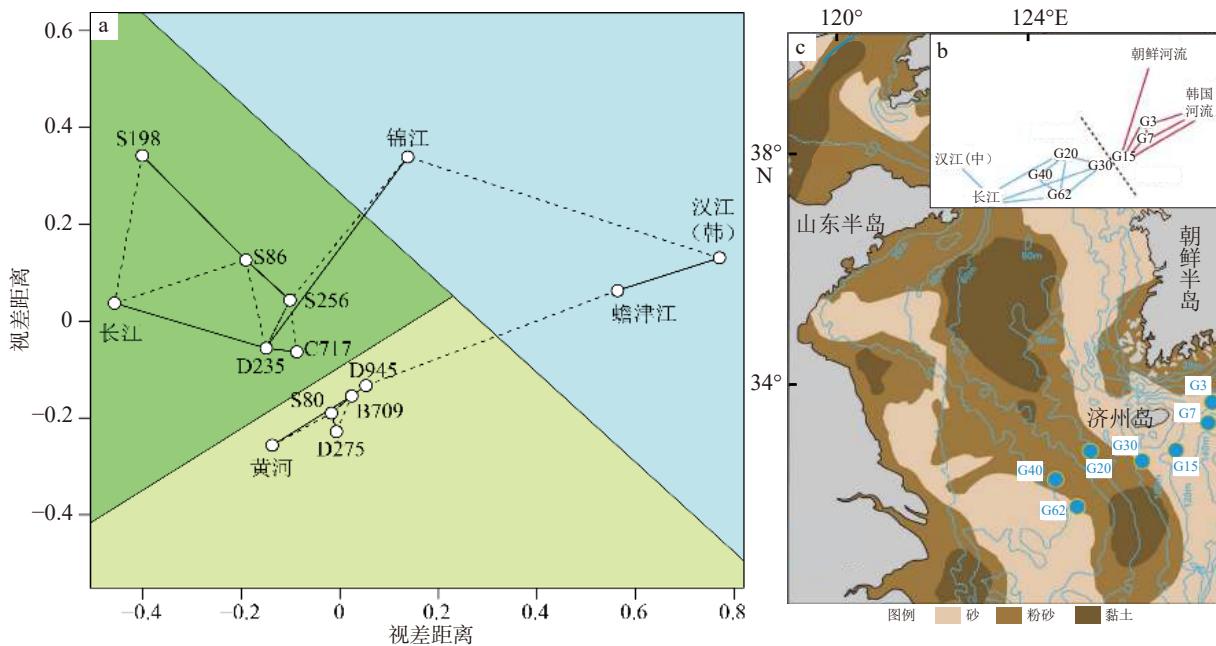


图 7 物源分析图

a. 研究样品与周边河流样品 MDS 图, b. 基于 K-S 检验南黄海南部表层样品物源分析^[33], c. 样品位置图。

Fig. 7 Provenance analysis

a: MDS plot of study samples and surrounding river samples; b: Possible provenance discrimination of southeastern Yellow Sea sandy sediments using the Kolmogorov-Smirnov (K-S) test^[33]; c: Sample location.

SYS90-1A-D945 与黄河沉积物的锆石 U-Pb 年龄比较靠近。表层沉积物 SYB86、SYB198、SYB256 和钻孔沉积物 SYS90-1A-C717、SYS90-1A-D235 与长江沉积物的锆石 U-Pb 年龄比较靠近。所有样品与朝鲜半岛河流相距均较远。韩国学者^[33]对黄海表层沉积物锆石 U-Pb 年龄分析结果显示(图 7b), 南黄海南部大致以济州岛西缘为界, 以西区域沉积物主要来自中国大陆, 以东区域沉积物主要来自朝鲜半岛, 这一界限大致与南黄海东侧粉砂区与砂质区分界重合。

3.2.2 沉积动力机制对物源的控制

南黄海中部泥质区的形成受海平面变化、海洋环流、东亚季风、河流改道及河口三角洲形成等多种因素的影响^[47-53]。其中, 以黄海暖流和两侧沿岸流为主的南黄海环流体系, 控制了周边河流输入物质的搬运和沉积^[54]。北上的黄海暖流与南下的沿岸流相互作用形成逆时针旋转的气旋型涡旋, 称为冷水团或冷涡, 对南黄海中部泥质区的形成具有明显的控制作用^[55]。诸多学者对黄海暖流的形成时间进行了研究^[48,56-57], 将其进入时间限定在 6.9~4.3 kaBP。南黄海柱状沉积物环境磁学参数研究发现, 黄海暖流进入以前南黄海沉积物可能主要由黄河供应, 之后长江源物质的影响相对增加^[58]。黄河

入海物质向南搬运的沉积动力主要为冬季风驱动的沿岸流。黄海沿岸流携带的悬浮物质沉积形成南黄海中部泥质区, 冬季风增强则加剧沉积物的再悬浮, 使得悬浮体浓度增加、粒度变粗。长江入海物质沉积动力主要为夏季风和黄海暖流, 二者共同作用于长江冲淡水^[59], 将其携带的物质向西北输运, 沿岸流和黄海暖流共同影响南黄海沉积环境过程^[60-61]。苏北-南黄海盆地和现代长江三角洲地层厚度的显著变化反映了河口的迁移, 在低海平面时期长江分支河流直接向南黄海中部泥质区输送物质^[62]。

通过南黄海中部泥质区表层沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄分析, 发现中部泥质区为一个混合沉积区, 在泥质区内部以黄河输送物质占主导, 而在泥质区南侧, 以长江输送物质居多。黄河和长江输送物质在南黄海中部泥质区的主控分界大致位于 33.4°N 附近。

3.2.3 晚第四纪沉积环境演化

CSDP-2 孔位于南黄海中部隆起区, 上部 592.00 m 岩芯为松散沉积物, 刘健等^[9]对其开展了详细的古地磁、沉积相以及第四纪地质研究, 可以作为南黄海第四纪地质研究的标准钻孔。钻孔研究结果显示, 南黄海在新近纪的剥蚀止于约 5.2 Ma, 从约 5.2 Ma

至约 1.7 Ma 主要发育陆相地层。约 1.7 Ma 开始浙闽隆起逐渐沉降, 至约 0.83 Ma 南黄海首次接受海侵, 发育潮坪-滨岸相与河流相交互地层。约 0.83 Ma 开始, 浙闽隆起沉降加剧, 南黄海在间冰期高海平面时期的海洋环境基本接近现今环境。通过与周边 QC2 孔^[63]、SYS-0702 孔^[64] 和 CSDP-1 孔^[65-66] 等进行对比, 发现南黄海西部陆架冷水团沉积在 MIS5 时期发育范围比现今更为广泛, 之后则依次发育河流相、三角洲相、河流相和滨岸-陆架相沉积^[9]。

本文利用碎屑锆石 U-Pb 定年开展物源分析显示, 钻孔沉积物可以分为 3 段: 第一段从钻孔底部至 69.68 m, 沉积物可能来自黄河输送入海物质; 第二段从 56.20 m 到 68.88 m, 沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄特征与长江源物质相似度较高, 说明该时段长江源物质对研究区贡献较大; 第三段从 56.20 m 至钻孔顶部, 沉积物主要为黄河源物质。据古地磁推测, SYS90-1A 孔底界年龄约为 1.0 Ma。利用天文年代调谐确定 56.20 ~ 68.88 m 沉积物具体时代为 0.59~0.71 Ma。

CSDP-1 孔的研究结果显示, 0.83 Ma 开始南黄海发生大规模区域性海侵, 南黄海海洋环境与现今接近, 在此之前南黄海区域沉积物以长江物质为主^[62]。南黄海 NHH01 孔的研究结果表明^[15], 0.88 Ma 以来才开始出现黄河源物质信号, 这与本文的研究结果较为一致, 说明黄河源物质大致在 0.88~1.0 Ma 开始影响南黄海。对照全球海平面变化曲线(图 2), 0.59~0.71 Ma 为低海平面时期, SYS90-1A 孔沉积物在该时段主要受长江控制, 推测与海平面下降及长江入海口向海推进有关。综合 CSDP-1 孔、NHH01 孔和 SYS90-1A 孔(钻孔位置见图 1)沉积环境对比及物源分析结果, 在南黄海地区, 受浙闽隆起沉降影响, 约 1.0~0.83 Ma 期间, 海水从东南方向以“通道”式进入南黄海, 不同区域存在“同期异象”现象。至晚更新世, 受全球海平面变化影响, 3 个钻孔沉积环境变化一致。

4 结论

南黄海中部泥质区南部锆石 U-Pb 年龄特征指示沉积物主要由黄河供应, 而泥质区以南区域长江源物质占主导。早更新世晚期以来沉积物不同时期物源差异明显, 其中, 中更新世早期(0.59~0.71 Ma)以长江源物质为主, 早更新晚期至中更新世以及中更新世中期以来以黄河源物质为主。上述表层沉积物样品和钻孔沉积物样品碎屑锆石 U-Pb 年龄分

布与朝鲜半岛河流沉积物完全不同。

早期关于南黄海早更新世以来沉积物物源的认识主要以黄河源物质为主, 长江源物质对南黄海泥质区沉积物的影响范围不够清晰。本文通过地质浅钻揭示出长江源物质在早更新世晚期和中更新世早期(0.59~0.71 Ma)对南黄海泥质区贡献较大, 但难以从区域上识别出这一阶段长江源物质的影响范围。且受取样密度所限, 可能对 SYS90-1A 孔中长江源物质占主导时期的揭示有所遗漏, 后期需要开展进一步研究。

致谢: 感谢自然资源部国际合作司提供支持。

参考文献 (References)

- [1] 石学法, 乔淑卿, 杨守业, 等. 亚洲大陆边缘沉积学研究进展(2011-2020)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(2): 319-336. [SHI Xuefa, QIAO Shuqing, YANG Shouye, et al. Progress in sedimentology research of the Asian continental margin (2011-2020) [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(2): 319-336.]
- [2] 杨守业. 亚洲主要河流的沉积地球化学示踪研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(6): 648-655. [YANG Shouye. Advances in sedimentary geochemistry and tracing applications of Asian rivers [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(6): 648-655.]
- [3] 汪品先, 詹知滑. 探索南海深部的回顾与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 62(10): 1473-1488. [WANG Pinxian, JIAN Zhimin. Exploring the deep South China Sea: retrospects and prospects [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(10): 1473-1488.]
- [4] Shackleton N J, Hall M A, Pate D. Pliocene stable isotope stratigraphy of site 846 [J]. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 1995, 138: 337-355.
- [5] Mix A C, Le J, Shackleton N J. Benthic foraminiferal stable isotope stratigraphy of Site 846: 0-1.8 Ma [J]. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 1995, 138: 839-856.
- [6] 张勇, 姚永坚, 李学杰, 等. 中生代以来东亚洋陆汇聚带多圈层动力下的中国海及邻区构造演化及资源环境效应[J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1271-1309. [ZHANG Yong, YAO Yongjian, LI Xuejie, et al. Tectonic evolution and resource-environmental effect of China Seas and adjacent areas under the multisphere geodynamic system of the East Asia ocean-continent convergent belt since Mesozoic [J]. Geology in China, 2020, 47(5): 1271-1309.]
- [7] 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.
- [8] 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.]

- [9] 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.]
- [10] 卢健, 李安春. 南黄海表层沉积物粒度特征季节变化及其影响因素[J]. *海洋科学*, 2015, 39(3): 48-58. [LU Jian, LI Anchun. Seasonal variations and influencing factors of the grain size characteristics of surface sediments in the South Yellow Sea [J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(3): 48-58.]
- [11] 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: Oceanic Publish House, 1989: 1-289.]
- [12] 魏建伟, 石学法, 辛春英, 等. 南黄海黏土矿物分布特征及其指示意义[J]. 科学通报, 2003, 48(1): 7-11. [WEI Jianwei, SHI Xuefa, XIN Chunying, et al. Clay mineral distributions in the southern Yellow Sea and their significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(1): 7-11.]
- [13] Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [14] Qiao S Q, Shi X F, Wang G Q, et al. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea [J]. *Marine Geology*, 2017, 390: 270-281.
- [15] Yao Z Q, Shi X F, Qiao S Q, et al. Persistent effects of the Yellow River on the Chinese marginal seas began at least ~ 880 ka ago [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2827.
- [16] 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.]
- [17] Stevens T, Carter A, Watson T P, et al. Genetic linkage between the Yellow River, the Mu Us desert and the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 78: 355-368.
- [18] Vermeesch P, Garzanti E. Making geological sense of 'Big Data' in sedimentary provenance analysis [J]. *Chemical Geology*, 2015, 409: 20-27.
- [19] Fedo C M, Sircombe K N, Rainbird R H. Detrital zircon analysis of the sedimentary record [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 277-303.
- [20] Gehrels G E, Valencia V A, Ruiz J. Enhanced precision, accuracy, efficiency, and spatial resolution of U-Pb ages by laser ablation-multicollector-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(3): Q03017.
- [21] Shaulis B, Lapen T J, Toms A. Signal linearity of an extended range pulse counting detector: applications to accurate and precise U-Pb dating of zircon by laser ablation quadrupole ICP-MS [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(11): Q0AA11.
- [22] 许东禹, 刘锡清, 张训华, 等. 中国近海地质[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-80. [XU Dongyu, LIU Xiqing, ZHANG Xunhua, et al. *China Offshore Geology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1-80.]
- [23] 刘忠臣, 刘保华, 黄振宗, 等. 中国近海及邻近海域地形地貌[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 1-96. [LIU Zhongchen, LIU Baohua, HUANG Zhenzong, et al. *Topography and Geomorphology of China's Offshore and Adjacent Areas* [M]. Beijing: Oceanic Publish House, 2005: 1-96.]
- [24] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. *海洋学报*, 2001, 23(3): 1-16. [SU Jilan. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(3): 1-16.]
- [25] 梅西, 李学杰, 密蓓蓓, 等. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式[J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1447-1462. [MEI Xi, LI Xuejie, MI Beibei, et al. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1447-1462.]
- [26] 梅西, 张训华, 刘健, 等. 南黄海3.50Ma以来海陆环境演变的元素地球化学记录[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2019, 49(1): 74-84. [MEI Xi, ZHANG Xunhua, LIU Jian, et al. Elemental geochemical record of land and sea environmental evolution since 3.50 Ma in South Yellow Sea [J]. *Journal of Jilin University:Earth Science Edition*, 2019, 49(1): 74-84.]
- [27] 任纪舜. 新一代中国大地构造图: 中国及邻区大地构造图(1:5000000)附简要说明: 从全球看中国大地构造[J]. *地球学报*, 2003, 24(1): 1-2. [REN Jishun. The new generation geotectonic map of China-geotectonic map of China and adjacent areas (1: 5000000) a brief description: Chinese geotectonics in a global view [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(1): 1-2.]
- [28] Shao L, Li C A, Yuan S Y, et al. Neodymium isotopic variations of the late Cenozoic sediments in the Jianghan Basin: implications for sediment source and evolution of the Yangtze River [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 45: 57-64.
- [29] 何梦颖, 郑洪波, 贾军涛. 长江现代沉积物碎屑锆石U-Pb年龄及Hf同位素组成与物源示踪研究[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(4): 656-670. [HE Mengying, ZHENG Hongbo, JIA Juntao. Detrital zircon U-Pb dating and Hf isotope of modern sediments in the Yangtze River: implications for the sediment provenance [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(4): 656-670.]
- [30] 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992. [XU Zhiqin, HOU Liwei, WANG Zongxiu, et al. *Orogenic Processes of the Songpan Ganze Orogenic Belt of China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.]
- [31] 岳保静, 廖晶. 黄河流域现代沉积物碎屑锆石U-Pb年龄物源探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5): 109-119. [YUE Baojing, LIAO Jing. Provenance study of Yellow River sediments by U-Pb dating of the detrital zircons [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 109-119.]
- [32] 林旭, 刘静, 吴中海, 等. 环渤海湾盆地主要河流碎屑锆石U-Pb年龄特征及其物源示踪意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(2): 136-145. [LIN Xu, LIU Jing, WU Zhonghai, et al. U-Pb age characteristics of major fluvial detrital zircons in the Bohai Bay Basin and their

- provenance implications [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(2): 136-145.]
- [33] Choi T, Lee Y I, Orihashi Y, et al. The provenance of the southeastern Yellow Sea sediments constrained by detrital zircon U-Pb age [J]. *Marine Geology*, 2013, 337: 182-194.
- [34] Bintanja R, van de Wal R S W, Oerlemans J. Modelled atmospheric temperatures and global sea levels over the past million years [J]. *Nature*, 2005, 437(7055): 125-128.
- [35] Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, et al. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(3): Q0AA06.
- [36] Thompson J M, Meffre S, Danyushevsky L. Impact of air, laser pulse width and fluence on U-Pb dating of zircons by LA-ICPMS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2018, 33(2): 221-230.
- [37] Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale [J]. *Journal of the Geological Society*, 1992, 149(2): 171-184.
- [38] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约 [J]. *科学通报*, 2004, 49(15): 1554-1569. [WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1554-1569.]
- [39] Vermeesch P. IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology [J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(5): 1479-1493.
- [40] 贾军涛, 郑洪波, 杨守业. 长江流域岩体的时空分布与碎屑锆石物源示踪 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(9): 1375-1380. [JIA Juntao, ZHENG Hongbo, YANG Shouye. Rock types in Yangtze drainage and their implications for zircon U-Pb provenance study of Yangtze sediments [J]. *Journal of Tongji University:Natural Science*, 2010, 38(9): 1375-1380.]
- [41] Yang J, Gao S, Chen C, et al. Episodic crustal growth of North China as revealed by U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(9): 2660-2673.
- [42] Liang Z W, Gao S, Hawkesworth C J, et al. Step-like growth of the continental crust in South China: evidence from detrital zircons in Yangtze River sediments [J]. *Lithos*, 2018, 320-321: 155-171.
- [43] 向芳, 杨栋, 田馨, 等. 湖北宜昌地区第四纪沉积物中锆石的U-Pb年龄特征及其物源意义 [J]. *矿物岩石*, 2011, 31(2): 106-114. [XIANG Fang, YANG Dong, TIAN Xin, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of zircons in the Quaternary sediments from the Yichang area of Hubei Province and its provenance significance [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2011, 31(2): 106-114.]
- [44] Li Z X, Li X H, Zhou H W, et al. Grenvillian continental collision in south China: new SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia [J]. *Geology*, 2002, 30(2): 163-166.
- [45] Zhang C L, Li M, Wang T, et al. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of granitoids in the Douling Group in the eastern Qinling [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(1): 83-95.
- [46] Vermeesch P. Multi-sample comparison of detrital age distributions [J]. *Chemical Geology*, 2013, 341: 140-146.
- [47] Yi L, Chen S L, Ortiz J D, et al. 1500-year cycle dominated Holocene dynamics of the Yellow River delta, China [J]. *The Holocene*, 2016, 26(2): 222-234.
- [48] Kong G S, Park S C, Han H C, et al. Late Quaternary paleoenvironmental changes in the southeastern Yellow Sea, Korea [J]. *Quaternary International*, 2006, 144(1): 38-52.
- [49] Zhou X, Sun L G, Huang W, et al. Relationship between magnetic susceptibility and grain size of sediments in the China Seas and its implications [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 72: 131-137.
- [50] 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.
- [51] Hu B Q, Yang Z S, Zhao M X, et al. Grain size records reveal variability of the East Asian Winter Monsoon since the Middle Holocene in the Central Yellow Sea mud area, China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(10): 1656-1668.
- [52] Zhou X, Sun L G, Huang W, et al. Precipitation in the Yellow River drainage basin and East Asian monsoon strength on a decadal time scale [J]. *Quaternary Research*, 2012, 78(3): 486-491.
- [53] Zhou X, Jia N, Cheng W H, et al. Relocation of the Yellow River estuary in 1855 AD recorded in the sediment core from the northern Yellow Sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(4): 624-628.
- [54] Naimie C E, Blain C A, Lynch D R. Seasonal mean circulation in the Yellow Sea: a model-generated climatology [J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21(6-7): 667-695.
- [55] 王飞飞, 刘健, 仇建东, 等. 南黄海中西部全新世中期以来泥质沉积厚度与成因 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(5): 1-11. [WANG Feifei, LIU Jian, QIU Jiandong, et al. Thickness variation and provenance of Mid-Holocene mud sediments in the central and western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(5): 1-11.]
- [56] 李铁刚, 李绍全, 苍树溪, 等. YSDP102钻孔有孔虫动物群与南黄海东南部古水文重建 [J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 588-595. [LI Tiegang, LI Shaoquan, CANG Shuxi, et al. Paleo-hydrological reconstruction of the southern Yellow Sea inferred from foraminiferal fauna in core YSDP102 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 588-595.]
- [57] 王利波, 杨作升, 赵晓辉, 等. 南黄海中部泥质区YE-2孔8.4 ka BP来的沉积特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 1-11. [WANG Libo, YANG Zuosheng, ZHAO Xiaohui, et al. Sedimentary characteristics of core YE-2 from the central mud area in the South Yellow Sea during last 8400 years and its interspace coarse layers [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 1-11.]
- [58] 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.]
- [59] 胡刚, 张勇, 孔祥淮, 等. 全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 77-89. [HU Gang, ZHANG Yong, KONG Xianghuai, et al. Changes

- of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(5) : 77-89.]
- [60] 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.]
- [61] 刘德政, 夏非. 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 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5) : 210-220. [LIU Dezheng, XIA Fei. Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(5) : 210-220.]
- [62] 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.
- [63] 杨子廉. Olduvai亚时以来南黄海沉积层序及古地理变迁 [J]. *地质学报*, 1993, 67(4) : 357-366. [YANG Zigeng. The sedimentary sequence and palaeogeographic changes of the South Yellow Sea since the Olduvai subchron [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1993, 67(4) : 357-366.]
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 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.