

文章编号: 1671-1505(2025)04-1010-16 DOI: 10.7605/gdxb.2025.024

# 南海西北部陆架第四系沉积物粒度特征 及其沉积环境指示\*

葛家旺<sup>1</sup> 成 湘<sup>1</sup> 赵晓明<sup>1</sup> 刘宇明<sup>2</sup> 李旭彪<sup>1</sup> 张 欣<sup>1</sup>

1 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

2 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, 陕西西安 710061

**摘 要** 沉积物的粒度数据可反映水动力特征及陆源物质构成, 综合反馈海平面升降、区域物源及气候环境变化等信息, 其中粒度数据中环境敏感因子是沉积环境及季风强度的良好指标。南海西北浅水陆架地区系统的钻井资料为水动力和气候变化研究提供了良好的研究载体, 本研究基于获取的陆架区第四系 52 件样品的粒度特征分析认为, 南海西北部陆架沉积物主要由黏土和粉砂组成, 自下而上粒度呈“细—粗”的变化趋势, 水动力作用增强。分别采用粒级—标准偏差法、端元组分分析法和主成分因子分析法对沉积物样品提取环境敏感组分, 以探讨东亚季风气候的强度变化与敏感组分的响应关系。结果表明, 不同方法提取出的细粒和粗粒组含量呈现出相同的变化趋势, 说明 3 种方法均适用于南海西北部陆架区环境敏感组分分析。端元组分分析法获得的端元组分的比值  $EM1/(EM1+EM2+EM3+EM4)$ , 与主成分因子分析法分离出的 4 个粒级主成分计算得出的综合指标 GS, 具有相同的变化趋势, 可作为东亚夏季风相对强度变化的替代指标; 3 种方法综合得出的 4.03~8.68  $\mu\text{m}$  细粒组含量变化也可指示东亚夏季风的强度变化。中更新世气候转型 (约 0.8-0.9 Ma) 之后, 东亚季风的变化幅度加剧, 夏季风有所增强, 冬季风显著增强后减弱; 在 0.9 Ma 之后, 海平面下降造成陆架暴露, 粗粒沉积物随之增多。

**关键词** 粒度特征 环境敏感组分 沉积环境 第四系 南海西北部陆架

**第一作者简介** 葛家旺, 男, 1988 年生, 副研究员, 主要从事定量层序地层学、沉积学及开发地质学方面的教学和科研工作。E-mail: gjwddn@163.com。

**通讯作者简介** 赵晓明, 男, 1982 年生, 教授, 主要从事深水沉积学和开发地质学方面的教学和科研工作。E-mail: zhxm98@163.com。

中图分类号: P512.32; P534.63 文献标志码: A

## Characteristics of grain size of the Quaternary sediments and their palaeoenvironmental implications in continental shelf of northwestern South China Sea

GE Jiawang<sup>1</sup> CHENG Xiang<sup>1</sup> ZHAO Xiaoming<sup>1</sup> LIU Yuming<sup>2</sup> LI Xubiao<sup>1</sup> ZHANG Xin<sup>1</sup>

1 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

\* 四川省科技计划资助-自然科学基金 (No. 2023NSFSC0810) 和国家自然科学基金项目 (No. 41902124) 联合资助。[Co-funded by Sichuan Science and Technology Program-Natural Science Foundation of Sichuan (No. 2023NSFSC0810) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41902124)]

收稿日期: 2023-10-26 改回日期: 2024-12-13

**Abstract** The grain size data of sediments can quantitatively reflect hydrodynamic characteristics and terrestrial material composition, providing comprehensive insights into sea-level fluctuations, regional sources, and climate environmental changes. Among these data, environmentally sensitive factors in the particle size data serve as excellent indicators of sedimentary environment and monsoon intensity. The abundant drilling data from the northwestern shallow water shelf of the South China Sea provide an excellent research platform for studying hydrodynamics and climate change. Based on the particle size analysis of 52 Quaternary samples in the continental shelf area, it is concluded that the continental shelf sediments in the northwest of the South China Sea are primarily composed of clay and silt. From bottom to top, hydrodynamic activity gradually intensifies, resulting in a relatively turbulent overall sedimentary environment, with variations in source input and hydrodynamic activity at different times. To explore the response relationship between the East Asian monsoon intensity and the response of sensitive components, environmentally sensitive components in sediment samples were extracted using the grain-size-standard deviation method, the end-member component analysis, and the principal component factor analysis. The results show that the contents of fine and coarse grain components extracted by different methods exhibit the same trends. Therefore, it is considered that all three methods are suitable for analyzing environmental sensitive components in the northwestern shelf area of the South China Sea. The ratio of  $EM1 / (EM1 + EM2 + EM3 + EM4)$  obtained by end-member component analysis and the comprehensive index GS calculated from the four particle size main components separated by principal component factor analysis show the same trend and it thus can be used as alternative indicators of the relative intensity of the East Asian winter and summer monsoons. The content variation of  $4.03 \sim 8.68 \mu\text{m}$  fine fractions obtained by the three methods can also indicate the intensity variation of the East Asian summer monsoon. After the climate transition in the Mid-Pleistocene Climate Transition (around  $0.8 \sim 0.9 \text{ Ma}$ ), the amplitude of East Asian monsoon variations intensified, with a significant strengthening of the winter monsoon. After  $0.9 \text{ Ma}$ , the shelf is exposed as a result of sea level fall, with a subsequent increase in coarse-grained sediments.

**Key words** grain size characteristics, environmentally sensitive components, sedimentary environment, Quaternary, shelf of northwestern South China Sea

**About the first author** GE Jiawang, born in 1988, an associate researcher, is engaged in teaching and quantitative sequence stratigraphy, tectono-sedimentology and oil exploitation geology research. E-mail: gjwddn@163.com.

**About the corresponding author** ZHAO Xiaoming, born in 1982, a professor, is engaged in deep water sedimentology and oil exploitation geology teaching and research. E-mail: zhxim98@163.com.

不同沉积环境的沉积物具有其独特的粒径参数和组合特性。沉积物的粒度参数及其变化规律,是区域物源—沉积物搬运、水动力条件以及气候变化的综合响应(孙有斌等, 2003; 杨文光等, 2007; 郝榕荣等, 2023)。粒度分析方法主要分为 2 类,一是以筛析法为核心的传统粒度分析方法,二是基于计算机技术的激光粒度分析(陈秀法等, 2002)。

东亚季风是气候系统的重要组成部分(丁大林等, 2017),东亚季风的移动和变化影响着南海

及其周边陆地区域的降水,进而影响河流沉积物输入的组分及含量。海平面下降时期,气候条件更为干冷,一般伴随着东亚冬季风的增强(张宝方, 2015)。在南海西北部区域,前人尝试将黏土矿物(刘志飞等, 2007; 拓守廷, 2008)、孢粉(罗运利和孙湘君, 2012)、浮游有孔虫(苏克凡等, 2021)、粒度(陈国成等, 2007; Boulay *et al.*, 2007; 万世明等, 2007; 杨文光等, 2008)、微量元素(曲华祥和黄宝琦, 2019)等作为替代指标,来建立它们与东亚季风演化的内在联系。向荣

等 (2005) 对东海陆架济州岛西南泥质区沉积物样品进行了粒度分析, 识别出环境敏感粒度组分, 认为其含量和平均粒径变化指示了东亚冬季风的强弱变化。Boulay 等 (2006)、陈国成等 (2007)、郑洪波等 (2008) 采用不同方法分析了南海海域不同站位的沉积物样品的敏感粒度组分, 结果均表明特定的粒度组成能间接指示东亚季风的演化。相对于陆坡和深水区, 陆架地区环境敏感粒度组分研究相对薄弱。

本研究基于南海西北部陆架区第四系沉积物的粒度数据, 统计分析粒度参数特征, 分别采用粒径—标准偏差法、端元组分分析法及主成分因子法提取环境敏感因子, 探讨南海西北部陆架沉积物粒度分布特征和水动力条件, 以期丰富南海西北部第四纪季风演化的替代指标研究。

## 1 研究区概况

研究区位于南海西北部陆架海南岛西南海域 (图 1)。南海是东亚大陆河流物质的主要沉积区, 也是记录东亚季风的理想地点 (万世明等, 2007)。

沿岸流、径流、洋流等的综合作用, 导致了南海西北部陆架区复杂的沉积动力条件, 加之物源具有多样性, 导致其沉积物类型多样 (赵利等, 2016)。由于受到欧亚板块、印支板块和太平洋板块构造活动的影响, 南海西北部新生代盆地处于拉张构造环境, 经历了拉张裂隙和裂后热沉降 2 个主要演化阶段, 形成了双层结构盆地 (杨鹏等, 2017)。

红河、越南河流体系及海南岛沿岸碎屑被认为是南海西北部陆架区主要的沉积物来源, 同时可能有珠江、台湾岛等流域的物质贡献 (赵利等, 2016)。南海西北部陆架区发育了厚层的上新世 (莺歌海组下段)—第四纪 (莺歌海组上段—乐东组) 沉积物。莺歌海组分为上段和下段, 属于加速热沉降早期产物, 岩性主要为灰绿—灰色泥岩, 夹有薄层粉砂岩, 该时期沉积环境为浅海—半深海。乐东组为加速沉降晚期产物, 岩性主要为浅灰色、绿灰色黏土岩, 夹有薄层粉砂、细砂岩, 生物碎屑丰富, 未固结成岩以浅海相沉积为主。南海作为西太平洋地区受东亚季风气候影响较大的边缘海, 其表层和深海的洋流系统发育良好, 同时半深

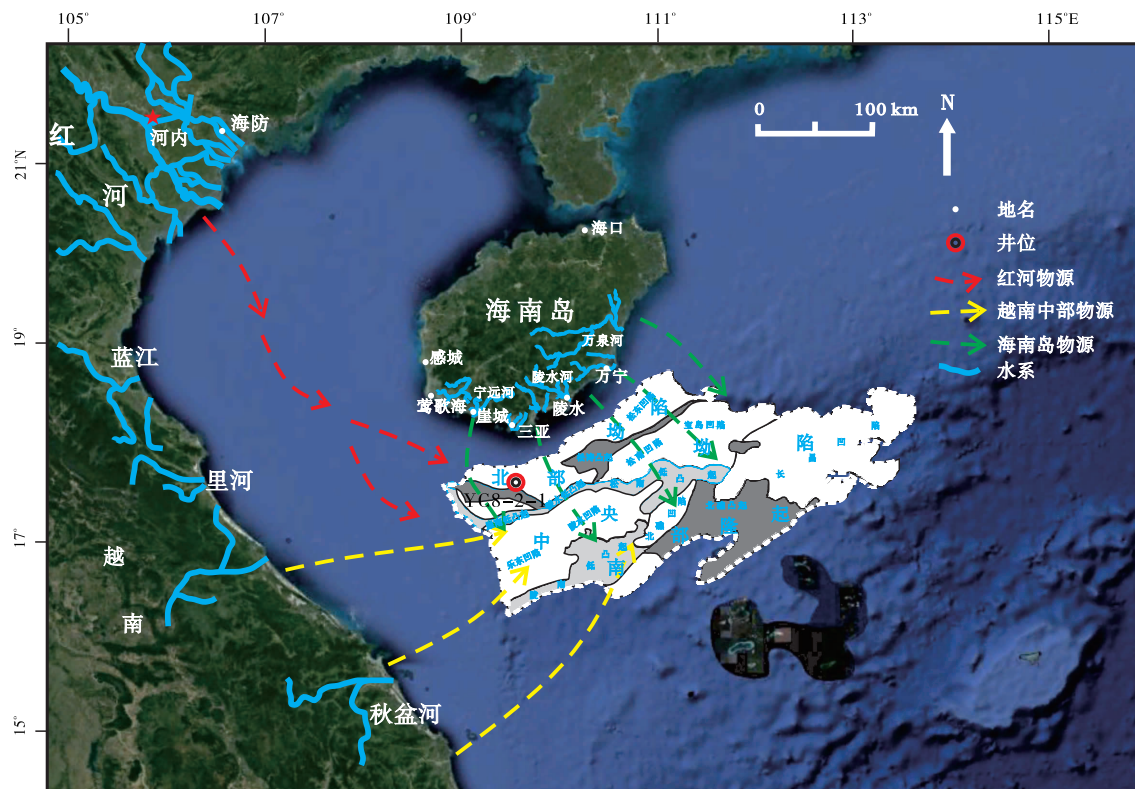


图 1 南海西北部物源供给及取样井位 YC 8-2-1 井地理位置图 (据马畅等, 2022; 有修改)  
Fig. 1 Provenance supply and sampling location of Well YC 8-2-1 in northwestern South China Sea  
(modified from Ma *et al.*, 2022)

海沉积物质亦得到了很好的保存，使其成为研究研究东亚季风演化的理想海域（刘志飞等，2017）。

为更好开展研究，本研究将琼东南盆地乐东组上中下 3 段分别命名为 U1、U2、U3，将莺歌海组分为上下 2 段，分别命名为 U4 和 U5，本研究目的层段为 U1-U4 段(图 2)。前人针对 YC 8-2-1 井上新世—第四纪自然伽马值进行米兰科维奇旋回分析，识别出 4.5~5 个长偏心率周期（405 kyr）、约 20 个短偏心率周期（99 kyr）和若干斜率和岁差周期，建立的天文年代标尺与理论时间相匹配（Li *et al.*, 2024）。对比钙质超微化石和浮游有孔虫年龄，建立的年代框架如下：莺歌海组上段（U4），时间跨度为 2.6/2.5—1.8 Ma；乐东组下段（U3），时间跨度为 1.8—1.3 Ma；乐东组中段（U2），时间跨度为 1.3—0.8 Ma；乐东组上段（U1），时间跨度为 0.8 Ma 至今。

## 2 材料和方法

### 2.1 样品来源及处理方法

南海西北部岩屑样品均取自 16°~18°N、109°~111°E 海域 YC 8-2-1 井(图 1)，样品均来自于中海石油湛江分公司岩心库。取样层位为莺歌海组上段及乐东组，在南海西北部陆架区 YC 8-2-1 井共采集沉积物样品 52 件（取样间隔 15~20 m）。自下而上，U4 段（1.8 Ma 以前）和 U3 段（1.8—1.3 Ma）以粉砂质泥岩为主，夹薄层细砂岩、泥质中砂岩；U2 段（1.3—0.8 Ma）以粉砂质泥岩为主；U1 段以砂岩为主，泥岩含量较高，砂

砾岩含量少。采用标准粒度分析方法对样品进行处理（郑洪波等，2008；郝榕荣等，2023），并用激光粒度分析仪器测量颗粒直径，之后选择福克和沃德公式（Folk and Ward, 1957）对相关粒度参数进行计算。

### 2.2 环境敏感组分提取方法

#### 1) 粒度—标准偏差法（STD）

粒度—标准偏差法是以计算不同粒度含量的标准偏差值为核心的 1 种数学方法，通常认为标准偏差值较大的 1 个或多个粒度则组成了环境敏感因子（陈桥等，2013）。敏感因子所对应粒度的标准偏差值越大，表示该粒度形成时的沉积环境越复杂、变化越剧烈（程良清等，2018）。

#### 2) 端元组分分析（EMMA）

本研究选择 Paterson 和 Heslop（2015）开发的基于 Matlab 软件的 AnalySize 程序，这一程序提供了非参数化 EMA 和 4 种参数化 EMA 方法。确定端元数量的标准一般是结合  $R^2$ （表示原始粒度数据集与端元的相关程度）、EM  $R^2$ （表示各个端元之间的相关程度，数值越大说明各端元之间的重合度越高）、 $\theta$ （端元与样品粒度曲线在形状拟合时的偏离角度）等参数，在拟合效果好且不存在过度拟合的前提下，选择尽可能少的端元数。

#### 3) 主成分因子分析法（PCA）

主成分因子分析法是一种针对不同粒度进行关联性分析的方法，将高度相关的粒度成分整合成一个因子，然后对每个因子进行分析，计算其对粒度的贡献率，一般将贡献较大的因子定义为主控因

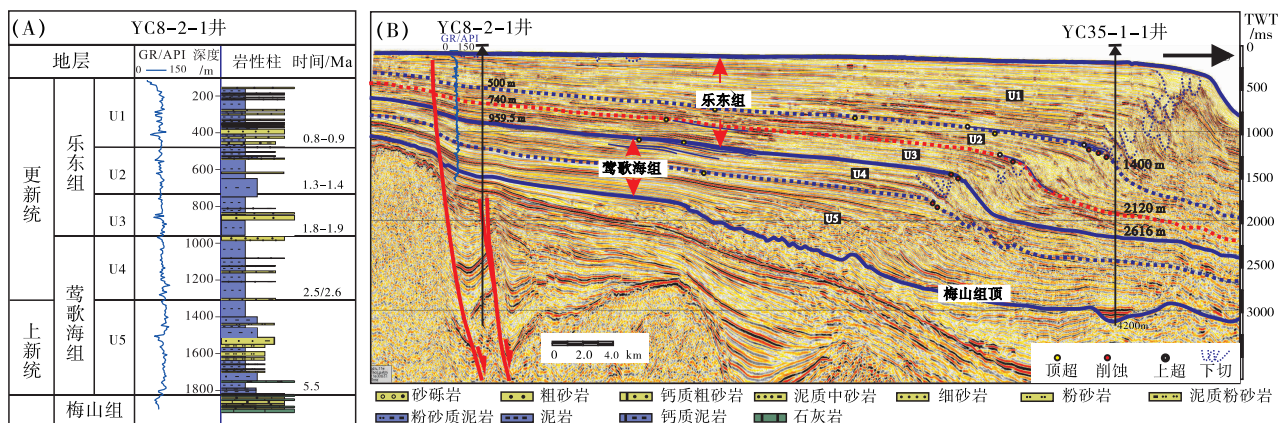


图 2 南海西北部 YC 8-2-1 井第四系年代框架和岩性解释 (A) 及地震剖面与单元划分图 (B)

Fig. 2 Interpretation of the Quaternary age framework and lithology of Well YC 8-2-1 in northwestern South China Sea (A) and seismic section and unitization (B)

子, 该因子对应的粒级范围即为环境敏感组分 (陈桥等, 2013)。

### 3 结果

#### 3.1 2.6 Ma 以来南海西北部陆架沉积物粒度特征

##### 3.1.1 粒度参数特征

本次研究采用的粒度分级方案为: 黏土 (小于  $5\ \mu\text{m}$ )、细粉砂 ( $5\sim 31\ \mu\text{m}$ )、粗粉砂 ( $31\sim 63\ \mu\text{m}$ )、超细砂 ( $63\sim 125\ \mu\text{m}$ )、细砂 ( $125\sim 250\ \mu\text{m}$ )、中砂 ( $250\sim 500\ \mu\text{m}$ )、粗砂 ( $500\sim 2500\ \mu\text{m}$ ) (Blott and Pye, 2001)。南海西北部陆架区 YC 8-2-1 井 2.6 Ma 以来沉积物以粉砂为主, 含量介于 44.73%~79.54% 之间, 平均值为 66.93%; 黏土次之, 含量介于 8.7%~26.19% 之间, 平均值为 20.49%; 砂含量最低, 含量介于 2.28%~45.84% 之间, 平均值为 12.59%。

U4 段平均粒径主要在  $8.2\sim 14.11\ \mu\text{m}$  之间, 平均值约为  $11.03\ \mu\text{m}$ ; 其分选系数  $\sigma_1$  介于 1.53~2.05 之间, 平均值约为 1.81, 分选较差; 偏度  $SK_1$  值较小, 分布在  $-0.28\sim -0.05$  之间, 平均约为  $-0.16$ , 均为负偏态; 峰度  $KG$  在 0.77~1.1 之间, 平均约为 0.93, 峰态特征为平坦到中等。U3 段平均粒径在  $8.43\sim 14.87\ \mu\text{m}$  之间, 平均值约为

$11.11\ \mu\text{m}$ ; 分选系数  $\sigma_1$  主要在 1.57~2.08 之间, 平均值约 1.76, 分选较差; 偏度  $SK_1$  值较小, 在  $-0.24\sim -0.06$  区间内, 平均值为  $-0.12$ , 均表现为负偏态; 峰度  $KG$  在 0.85~1.06 之间, 平均值为 0.97, 峰值等级表现为平坦到中等。U2 段平均粒径介于  $9.88\sim 17.88\ \mu\text{m}$  之间, 平均值为  $12.35\ \mu\text{m}$ ; 分选系数  $\sigma_1$  介于 1.73~2.38 之间, 平均值为 1.86, 分选较差; 偏度  $SK_1$  值较小, 在  $-0.17\sim -0.01$  区间内, 平均值为  $-0.1$ , 多数表现为负偏态; 峰度  $KG$  在 0.76~0.99 之间, 平均值约为 0.9, 峰值等级表现为平坦到中等。U1 段平均粒径主要在  $9.26\sim 55.5\ \mu\text{m}$  之间, 平均值约为  $20.49\ \mu\text{m}$ ; 分选系数  $\sigma_1$  在 1.37~3.14 之间, 其平均值约为 2, 分选差; 偏度  $SK_1$  值较小, 分布于  $-0.29\sim -0.02$  之间, 平均约为  $-0.08$ , 大多数表现为负偏态, 部分为正偏态; 峰度  $KG$  在 0.58~1 之间, 平均约为 0.87, 峰态特征描述为平坦到中等 (图 3)。

##### 3.1.2 粒度频率曲线特征

频率分布曲线是沉积物的重要参数特征, 其中众数和形态的差异对应着不同沉积物的粒径组合类型, 因此也指示了不同的水动力环境 (潘隆等, 2018)。YC 8-2-1 井 U4-U1 段沉积物粒度频率分布曲线各段众数粒径突出, 多峰的频率分布特征表明研究区复杂的水动力条件。U4 段频率曲线表现为双峰分布, 峰值主要在  $6.5\sim 7.5\ \phi$  (细粉砂)、

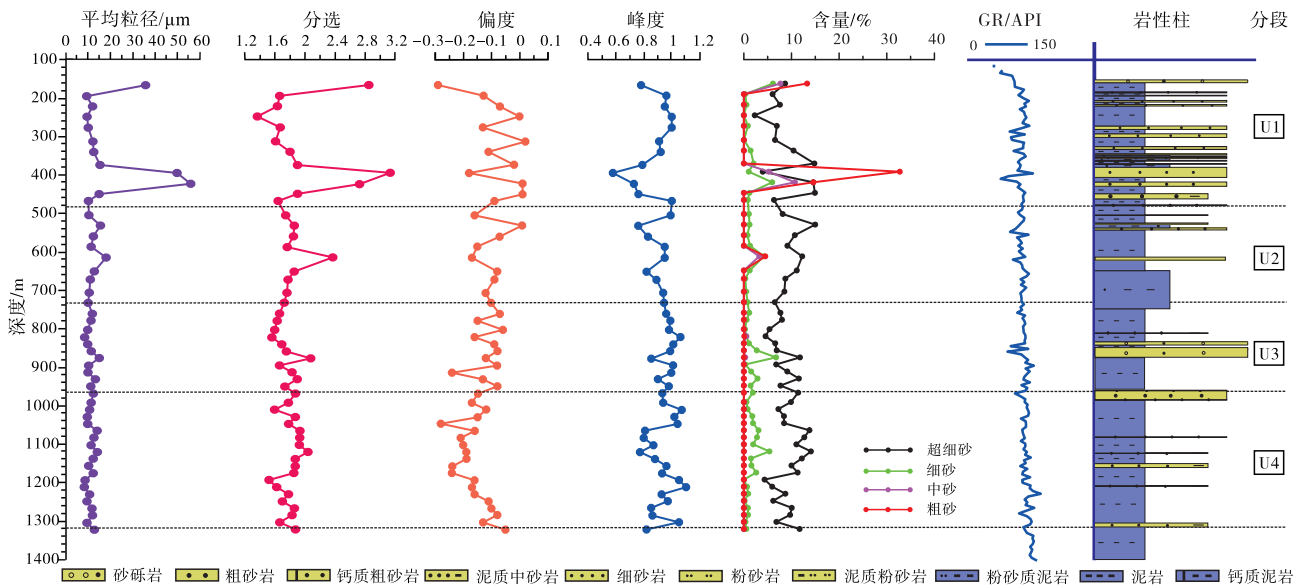


图 3 南海西北部陆架区 YC 8-2-1 井第四系沉积物粒度特征曲线  
 Fig. 3 Characteristic curve of grain size of the Quaternary sediments from Well YC 8-2-1 in continental shelf of northwestern South China Sea

3.5~4.5  $\phi$  (粗粉砂—细粉砂) 之间。U3 段频率曲线呈现为双峰, 峰值集中在 6~7.5  $\phi$  (细粉砂)、3~4  $\phi$  (粗粉砂) 区间内。U2 段沉积物样品整体呈现为双峰, 峰值集中出现在 7.5  $\phi$ 、4  $\phi$  附近, 存在一个样品表现为三峰特征, 峰值分别在 7.5  $\phi$ 、4  $\phi$ 、1  $\phi$  附近。U1 段频率曲线以不对称双峰为主, 少数呈现三峰特征, 峰值分别出现于 6.5~7.5  $\phi$ 、3.5~4  $\phi$  和 0~1  $\phi$  区间, 表明沉积过程中受到至少 2 种动力的综合作用。从 U4 到 U2 段, 频率曲线峰数和峰值无显著变化, 反映沉积水动力变化不大; U2 到 U1 段, 更多的沉积物样品频率曲线呈现三峰, 峰值对应的粒径增大, 代表 U1 段水动力条件相对高能(图 4)。整体来看, U4 到 U1 频率曲线由双峰到三峰, 且均在 10~12  $\phi$  之间出

现了很低的尾部, 表明水动力条件趋于复杂。

### 3.1.3 概率累积曲线特征

选择 YC 8-2-1 井 U4-U1 段代表性岩性组合的典型沉积物样品绘制概率累积曲线, 所选样品的概率累积曲线形态比较相似, 为滚动—跳跃—悬浮式。U4 段 3 个样品的概率累积曲线均呈四段式, 其中滚动和悬浮组分对应线段的斜率较大, 斜率基本大于 50°, 跳跃组分则包括 2 个次总体, 斜率相对较小, 滚动组分和悬浮组分的分选更好, 滚动组分和跳跃组分的截点(粗截点)多在 4  $\phi$  附近, 滚动组分含量在 5%~20% 之间。U3 与 U4 段样品相似, 也呈四段式, 滚动和悬浮组分对应线段的斜率较大, 2 个组分的截点在 2~4  $\phi$  之间, 滚动组分含量在 5%~10%, 跳跃组分含 2 个次总体, 对应的

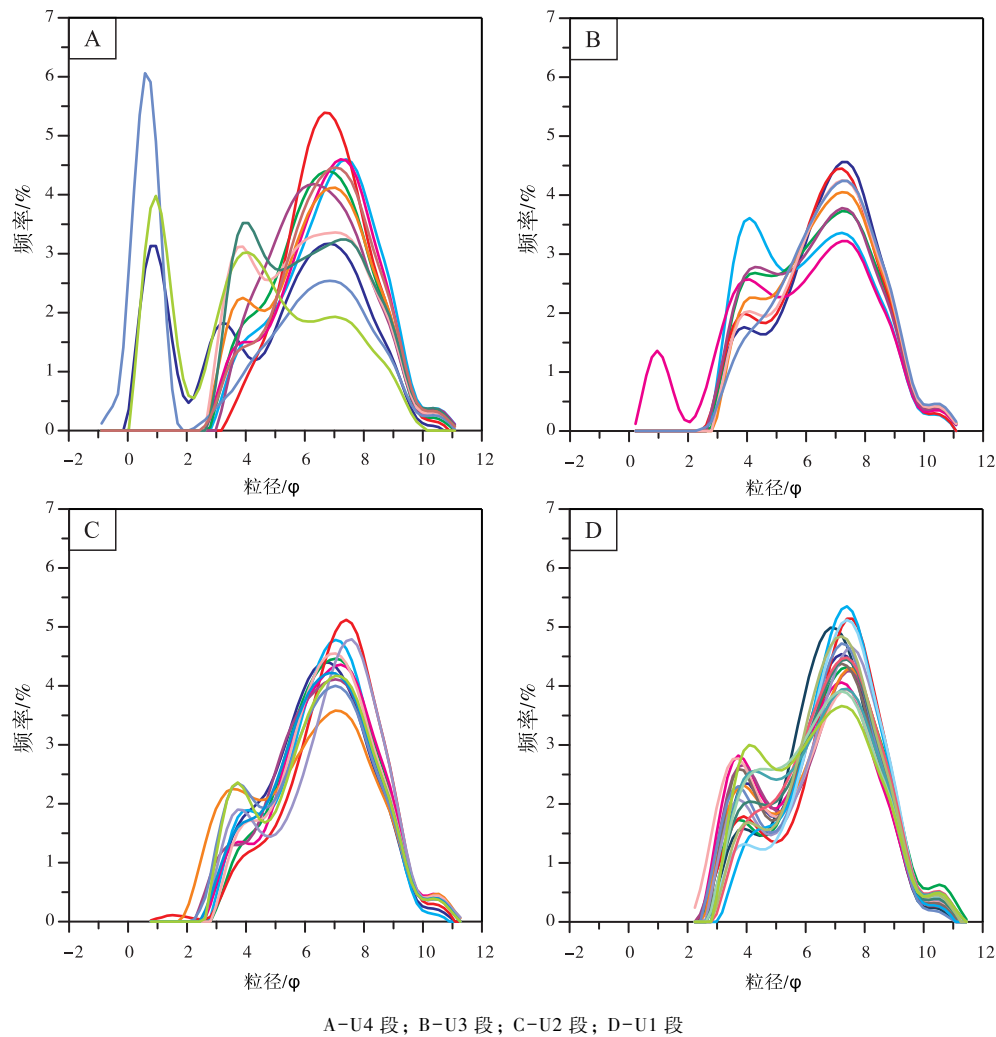


图 4 南海西北部陆架区 YC 8-2-1 井第四系沉积物样品粒度频率曲线

Fig. 4 Grain size frequency curves of the Quaternary sediment samples from Well YC 8-2-1 in continental shelf of northwestern South China Sea

斜率相对较小(图 5)。

U2 段累积曲线多呈四段式,少数表现为五段式,各组分对应线段的斜率变化不一;四段式曲线的截点出现在  $4\phi$  附近,滚动组分含量在 5%~15% 之间;五段式曲线的截点小于  $1\phi$ ,滚动组分含量约 5%,跳跃组分包含 3 个次总体。U1 段曲线少数呈四段式,多数呈五段式,滚动组分和跳跃组分的截点在  $0\sim 2\phi$  之间,对应粒径较粗,滚动组分含量为 5%~40%(图 5)。

### 3.2 2.6 Ma 以来南海西北部陆架沉积物环境敏感因子特征

#### 3.2.1 粒度—标准偏差法提取的敏感粒度特征

粒度—标准偏差曲线主要反映沉积物粒度含量在多个粒径范围内所表现出的差异性(丁喜桂等, 2010)。YC 8-2-1 井 U4-U1 段沉积物样品的粒度

—标准偏差曲线呈“多峰分布”(图 6),这表明沉积物粒度的产生受到多个因素控制。标准偏差曲线的 4 个峰值分别为  $0.675\ \mu\text{m}$ 、 $6.72\ \mu\text{m}$ 、 $66.9\ \mu\text{m}$  和  $516\ \mu\text{m}$ ,所对应的环境敏感粒度组分区间分别是  $0.405\sim 1.13\ \mu\text{m}$  (A0 组分)、 $4.03\sim 8.68\ \mu\text{m}$  (A1 组分)、 $66.9\sim 98.1\ \mu\text{m}$  (A2 组分) 和  $516\sim 666\ \mu\text{m}$  (A3 组分),其中 A0 组分含量较少,标准偏差值小,且对应粒级的百分含量变化不大(图 6),本次研究对其不做讨论。A3 组分对应的标准偏差值较 A1 和 A2 组分更大,说明 A3 组分的百分含量随时间和沉积环境的变化最为剧烈,对环境变化可能有良好的指示意义。其次,  $27.4\sim 35.3\ \mu\text{m}$  和  $211\sim 272\ \mu\text{m}$  标准偏差值偏低,说明它们对环境变化的响应欠佳,不宜作为敏感粒度。

#### 3.2.2 粒度端元组分分析法提取的敏感粒度特征

粒度数据分解为 3~5 个端元 (EM) 时,各拟

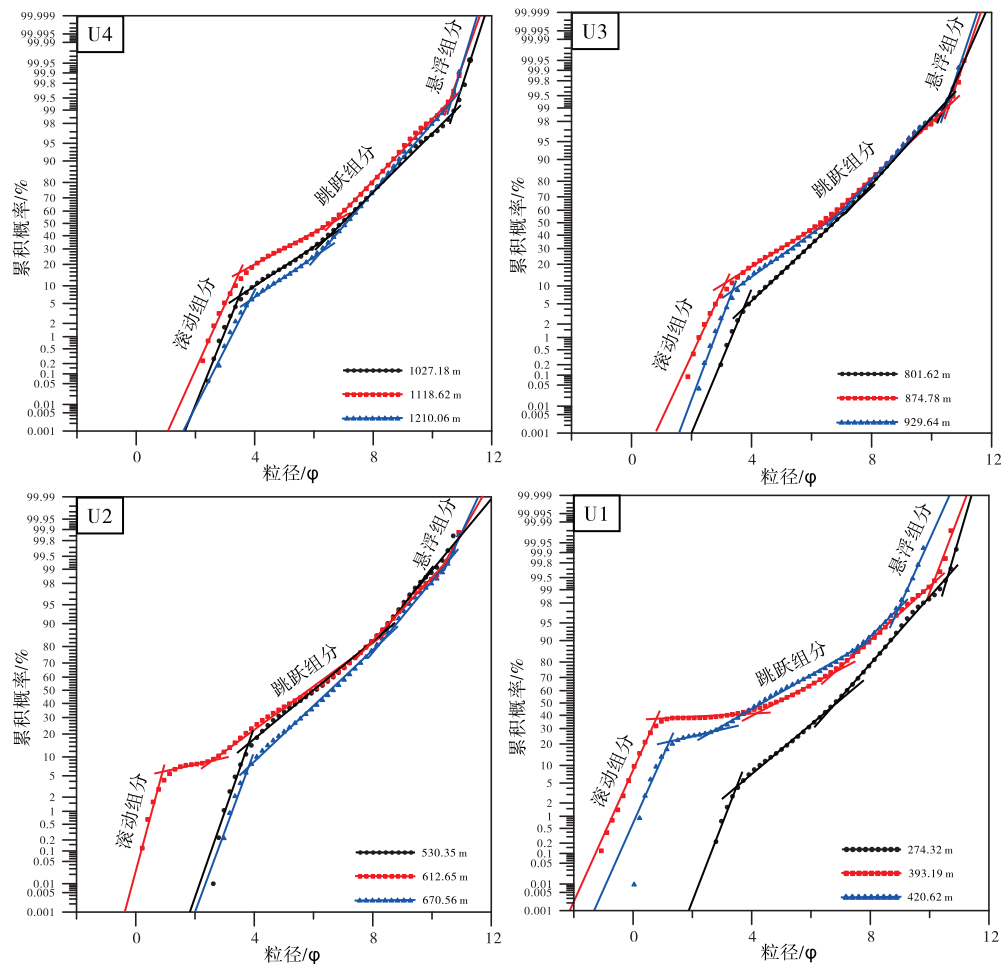


图 5 南海西北部陆架区 YC 8-2-1 井第四系沉积物样品粒度概率累积曲线

Fig. 5 Cumulative curve of probability value of grain size of the Quaternary sediment samples from Well YC 8-2-1 in continental shelf of northwestern South China Sea

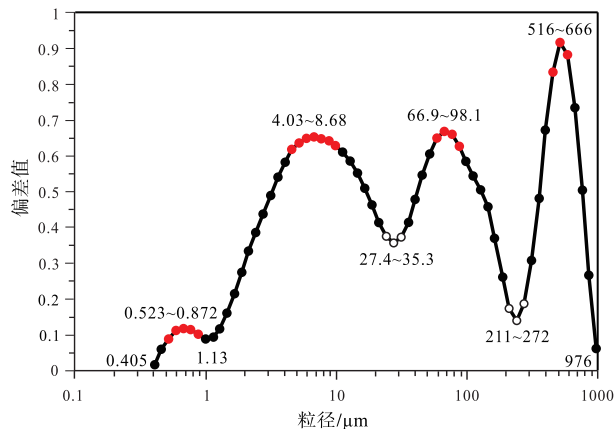


图 6 南海西北部陆架区 YC 8-2-1 井第四系沉积物样品  
粒级-标准偏差曲线

Fig. 6 Grain size-standard deviation curve of the Quaternary sediment samples from Well YC 8-2-1 in continental shelf of northwestern South China Sea

合参数值如表 1 所示，当端元数  $n=4$  时，EM  $R^2$  值较小，且  $R^2 > 0.98$ ，角度偏差小于  $5^\circ$ ，拟合效果最好；当端元数量为 4 时出现明显转折，端元组分数从 4~10 时， $R^2$  和  $\theta$  变化微弱(图 7-A, 7-B)，表明 4 端元模型满足“最小端元数量与较高的  $R^2$ ”的基本原则，此时  $R^2$  达到 98.99%，即每个粒级中 98.99% 的方差可以被重建。随端元数量增加， $R^2$  变化微弱；对 4 个及以上端元的模式， $\theta$  均小于  $5^\circ$ 。由此，4 端元组分模式所提供的分辨率更合乎实际需要，且满足最少端元数量及最高再现性的要求。

表 1 南海西北部陆架区 YC 8-2-1 井沉积物样品  
粒度端元分析拟合参数

Table 1 Fitting parameters for grain size end member analysis of sediment samples from Well YC 8-2-1 in continental shelf of the northwestern South China Sea

端元个数 $n$	端元相关性 EM $R^2$	线性相关性 $R^2$	角度偏差 $\theta/(^\circ)$
3	0.0012	0.9793	6.7658
4	0.0466	0.9899	4.7075
5	0.2434	0.9933	3.8365

沉积物样品提取出的 4 个端元粒度频率分布曲线均为单峰分布，曲线形态接近正态分布，EM1 到 EM4 众数粒级由细变粗。EM1 和 EM2 的众数粒径分别为  $5.21 \mu\text{m}$  ( $7.6 \phi$ ) 和  $18.7 \mu\text{m}$  ( $5.7 \phi$ )，属于细粉砂；EM3 的众数粒径为  $66.9 \mu\text{m}$  ( $3.9 \phi$ )，属于粗粉砂；EM4 的众数粒径为  $666 \mu\text{m}$

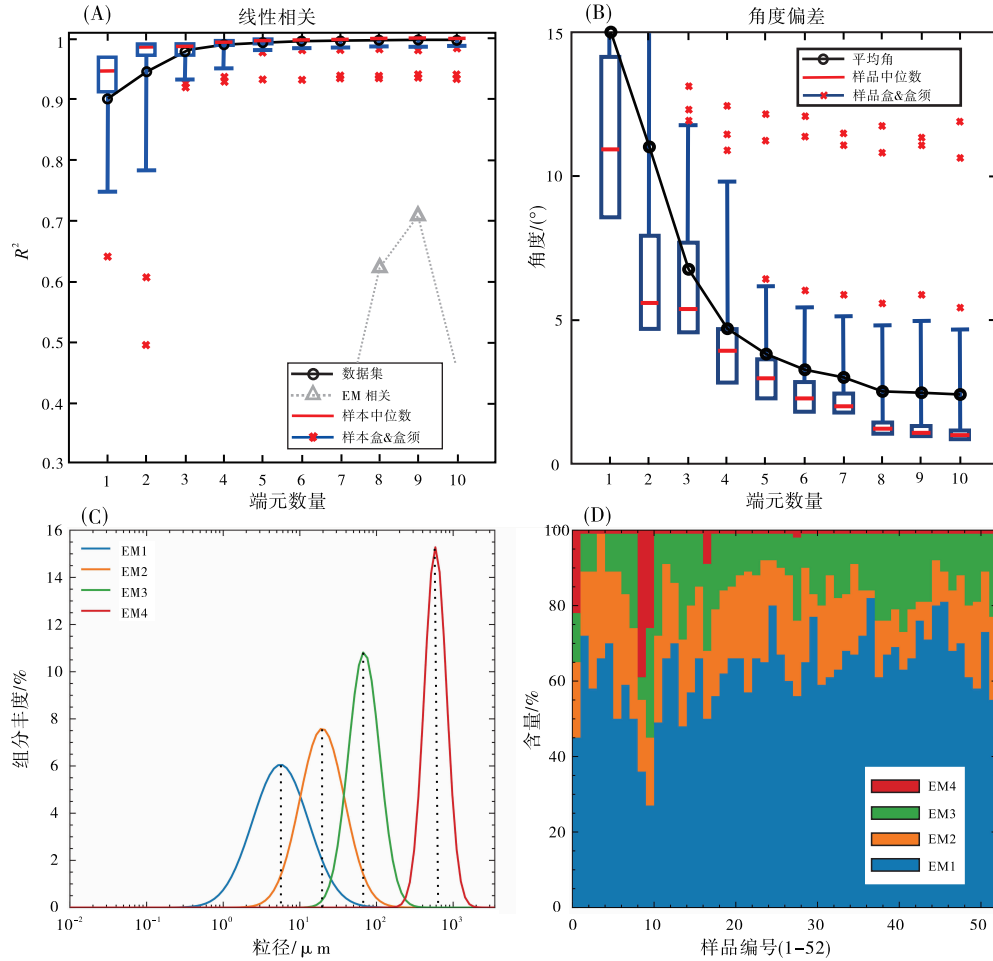
( $0.59 \phi$ )，属于粗砂，为粒度最粗的组分。EM1-EM4 的主要粒径范围分别为  $2.75 \sim 9.86 \mu\text{m}$ 、 $8.68 \sim 31.1 \mu\text{m}$ 、 $40.1 \sim 111 \mu\text{m}$ 、 $400 \sim 859 \mu\text{m}$  (图 7-C 至 7-D)。4 个端元中，EM1 的峰度较低 (0.91)，粒度分布范围最广，分选最差 (1.11)；EM4 的峰度最高 (1.24)，分选最好 (0.53)。EM1 的含量在 25.73%~79.36% 范围内变化剧烈，平均含量为 58.96%，主要由粉砂和黏土组成。EM2 的含量范围为 1.55%~40.70%，平均含量为 19.14%，主要由粉砂组成，砂含量少。EM3 含量范围为 2.16%~34.90%，平均含量为 19.89%，主要由粉砂和砂组成。EM4 含量变化范围为 0%~39.33%，且变化较为剧烈，平均含量为 2.27%，主要由砂组成，粉砂含量极少，不含黏土(表 2)。

### 3.2.3 主成分因子分析法提取的环境敏感因子特征

主成分因子分析法广泛应用于南黄海、渤海等海域表层沉积物粒度研究中，主要是将众多沉积物粒度数据中对环境变化敏感的粒级分离出来，用以指示季风演化(冷传旭等，2017)。前人用此方法对中国渤海晚第四纪的沉积记录进行研究，将提取出的 4 个主控因子组合成一个新的粒度序列(GS)，作为亚洲季风强度变化的替代指标，以重建亚洲季风的变化(Yi *et al.*, 2012)。

含量小于 0.1% 的粒径样品的标准偏差值低(小于 0.05)，其对环境变化的响应甚微，因此本次研究不对其作讨论。对 52 个沉积物样品进行主成分因子分析，获得 4 个主控因子 F1、F2、F3、F4，这 4 个主控因子分别解释了所有粒级的 31.466%、21.020%、18.685% 和 16.753%(表 3)，据此可认为这 4 个主控因子包含了原始数据矩阵方差 87% 以上的信息，可用来代表 52 个沉积物样品的总体粒度变化特征。

粒度主成分 F1 在  $5.21 \mu\text{m}$  处有 1 个宽广的正相关峰，在  $586 \mu\text{m}$  处有 1 个较狭窄且起伏较低的负相关峰，与其高度相关的敏感粒级组分为  $1.45 \sim 9.68 \mu\text{m}$  和  $310 \sim 976 \mu\text{m}$ 。粒度主成分 F2 在  $66.9 \mu\text{m}$  处有 1 个较狭窄的正相关峰，在  $7.64 \mu\text{m}$  处有 1 个较宽广的负相关峰，与其高度相关的敏感粒级组分为  $35.3 \sim 111 \mu\text{m}$  与 F2 的相关性高。粒度主成分 F3 在  $0.523 \mu\text{m}$  处有 1 个狭窄的正相关峰，在  $272 \mu\text{m}$  处有 1 个狭窄的负相关峰，与其高度相



A—端元划分的线性相关；B—角度偏差；C—端元组分模拟结果；D—EM1-EM4 粒级含量分布

图 7 南海西北部陆架区 YC 8-2-1 井第四系沉积物样品端元组分分析结果

Fig. 7 Results of end member analysis of the Quaternary sediment samples from Well YC 8-2-1 in continental shelf of northwestern South China Sea

表 2 南海西北部陆架区第四系沉积物  
粒度端元组分参数特征

Table 2 Characteristics of grain size end-member component parameters of the Quaternary sediments in continental shelf of northwestern South China Sea

端元 组分	平均粒径 (Mz)/ $\mu\text{m}$	分选 ( $\sigma$ )	偏度 (SK)	峰度 (KG)	黏土 /%	粉砂 /%	砂 /%
EM1	5.21	1.11	0.004	0.91	33.51	66.46	0.03
EM2	15.77	1.01	0.096	0.93	2.54	96.13	1.33
EM3	56.33	0.81	0.124	0.95	0.02	52.12	47.87
EM4	538.37	0.53	0.335	1.24	0	0.02	99.98

关的敏感粒级组分为 0.46~1.45  $\mu\text{m}$ 。粒度主成分 F4 在 127  $\mu\text{m}$  处有 1 个狭窄的正相关峰，在 21.2  $\mu\text{m}$  处有 1 个狭窄的负相关峰，与其高度相关

表 3 南海西北部陆架区 YC 8-2-1 井第四系沉积物样品  
粒度主控因子累计贡献率

Table 3 Cumulative contribution rate of main controlling factors of grain size of the Quaternary sediment samples from Well YC 8-2-1 in continental shelf of northwestern South China Sea

主控 因子	得分	方差贡献率 /%	累计贡献率 /%	因子构成 / $\mu\text{m}$
F1	19.509	31.466	31.466	1.45~9.86, 310~976
F2	13.032	21.020	52.486	35.3~111
F3	11.585	18.685	71.171	0.46~1.45
F4	10.387	16.753	87.924	12.7~31.1

的敏感粒级组分为 12.7~31.1  $\mu\text{m}$  (图 8)。代表 F3 的敏感粒级组分 (0.46~1.45  $\mu\text{m}$ ) 含量较少，且变化小，本次研究对其不进行讨论。

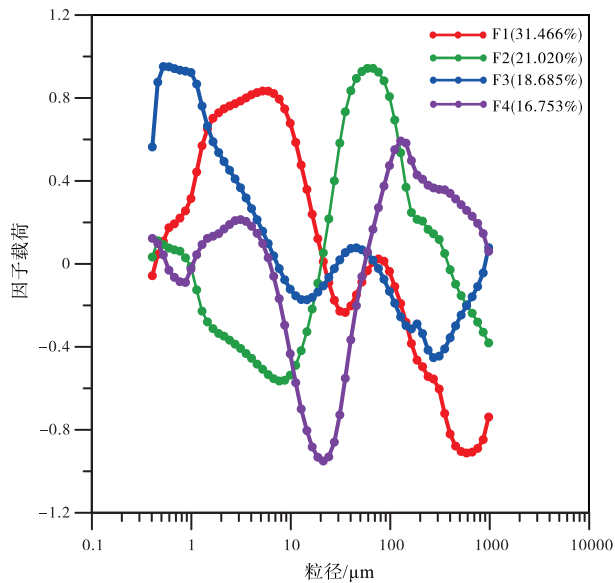


图 8 南海西北部陆架区 YC 8-2-1 井第四系沉积物样品主成分因子载荷图

Fig. 8 Principal component factor loading diagram of the Quaternary sediment samples from Well YC 8-2-1 in continental shelf of northwestern South China Sea

## 4 讨论

### 4.1 粒度参数特征对沉积水动力的启示

频率分布曲线中，沉积物粒径的峰值分布范围与沉积水动力条件近似成正相关关系，而峰值数目则与沉积环境复杂程度密切相关（张宝方，2015）。若曲线峰值位于粗粒范围内，则说明水动力能量高；反之则低。沉积动力学研究结果表明，各种成因组分的含量因搬运方式、搬运距离等因素的不同可存在差异，一般情况下单成因组分的频率曲线为单峰分布，多成因组分的频率曲线为多峰分布（孙华杰等，2018）。

陆架区 YC 8-2-1 井第四系沉积物粒度特征在垂向上变化具有一定的规律性。U4 段沉积物以细粉砂为主，分选较差（1.53~2.05），呈多成因组分、双峰分布的频率曲线，峰值主要在 6.5~7.5 $\phi$ 、3.5~4.5 $\phi$  区间，概率累积曲线呈四段式，粗截点在 4 $\phi$  附近；U3 段沉积物粒度与分选较 U4 段变化不大，频率曲线呈双峰，峰值对应的粒度稍有变粗，概率累积曲线也表现为四段式。说明 U4 和 U3 段水动力能量相似，双峰分布的频率曲线以及四段式概率累积曲线反映了相对复杂的水动力过程。

U2 段沉积物以细粉砂为主，较 U4 和 U3 段粒度更粗、分选更差（1.73~2.38），该段频率曲线主要呈双峰分布，有一个沉积物样品呈三峰，三峰曲线峰值对应的粒度最大约为 1 $\phi$ ，概率累积曲线四段式居多，少数表现为五段式，粗截点所对应的粒度增大，表明 U2 段时期水动力能量增强。U1 段沉积物粗粒度组分含量最高，以细粉砂为主，含粗粉砂夹层，平均粒径变化区间大，分选差（1.37~3.14）；该段频率曲线多数呈双峰，部分呈三峰分布，三峰曲线峰值出现在 0~1 $\phi$ ，概率累积曲线多数呈五段式，少数呈四段式，滚动组分含量增加，综合来看 U1 段沉积期水动力能量进一步增强且变化复杂。

总结起来，U4 到 U3 段跳跃组分分选稍有变好，U3 到 U2 段跳跃组分次总体个数有所增加，指示 U2 段沉积期搬运动力波动；U2 到 U1 段更多的沉积物样品表现为五段式曲线，且粗截点对应的粒径变粗、含量增大。Visher（1969）指出滚动组分若在 35% 以上，则表示截点较粗的曲线可能对应急流沉积，且含量越高水流越湍急。综合来看，U4 到 U1 段，滚动组分和跳跃组分的截点呈逐渐变粗的趋势，滚动组分含量增加，由此可推断 U4 到 U1 段水动力能量呈变强的趋势，其中 U1 段水动力能量最强且最为动荡。

### 4.2 不同方法提取的环境敏感因子比较分析

对比国内关于不同海域岩心敏感粒级的研究成果可知，粒级—标准偏差法提取的敏感组分范围主要依靠估测；此外，这种方法注重对粒度整体性的考量，可能会忽略个体之间的差异性（Wan *et al.*, 2007）。与粒级—标准偏差相比，端元组分分析法更具综合性，每个端元有其对应的真实物理意义，这种方法本质上是一种模拟沉积物亚群的数学方法，由于地质时期的沉积物源多样性及运输动力的复杂性，很难将所有端元完全分离。主成分因子分析法主要用于分析某种动力机制的粒度主成分，它比粒级—标准偏差法更具有统计意义，能更加准确地识别出不同粒度组分之间的关联性（表 4）。

YC 8-2-1 井沉积物通过粒级—标准偏差法（STD）提取出 3 个环境敏感组分，对应的粒级分别为 4.03~8.68 $\mu\text{m}$ （A1）、66.9~98.1 $\mu\text{m}$ （A2）、516~666 $\mu\text{m}$ （A3）；端元组分分析法（EMMA）提取出 4 个环境敏感组分，对应的粒级分别为 2.75~

表 4 用于南海东亚季风气候研究的沉积物粒度指标总结

Table 4 Summary of sediment grain size indicators for East Asian monsoon in the South China Sea

岩心编号/钻孔名称	方法	环境敏感粒级/指标	指示意义	参考文献
MD05-2901(南海西部)	PCA	10.8~14.3 $\mu\text{m}$ 、30.1~43.7 $\mu\text{m}$	夏季风(细粒) 冬季风(粗粒)	郑洪波等(2008); 陈国成等(2007)
	STD	1.3~2.4 $\mu\text{m}$ /10~19 $\mu\text{m}$	冬季风与夏季风的相对强度	
ODP 1146(南海北部)	EMMA	11 $\mu\text{m}$ (EM1)、7.5 $\mu\text{m}$ (EM2)、 2 $\mu\text{m}$ (EM3)	EM1 指示冬季风强度; EM1/(EM2+EM3) 指示冬季风相对于夏季风的强度	万世明等(2007)
ODP 1144(南海北部)	STD	2.5~5 $\mu\text{m}$ 、20~40 $\mu\text{m}$	夏季风(细粒) 冬季风(粗粒)	Boulay 等(2006)
PC 338(南海西北部)	EMMA	0~2 $\mu\text{m}$ (EM1)、2~10 $\mu\text{m}$ (EM2)、5~28 $\mu\text{m}$ (EM3)、15~ 100 $\mu\text{m}$ (EM4)	EM1 和 EM4 指示海平面变化; EM2 指示东亚夏季风	李明坤(2018)
S20(南海北部)	STD	细粒组分(<19 $\mu\text{m}$ )的平均粒径	冬季风	田旭等(2015)
MD05-2905(南海北部)	STD	2~9 $\mu\text{m}$ 、15.5~63.5 $\mu\text{m}$	夏季风(细粒),冬季风(粗粒)	杨文光等(2008)
MD05-2903(南海北部)	STD	3~5 $\mu\text{m}$ 、13~16 $\mu\text{m}$	夏季风(细粒),冬季风(粗粒)	Xie 等(2014)

注: PCA—主成分因子分析法; STD—粒级—标准偏差法; EMMA—端元组分分析法。

9.86  $\mu\text{m}$ (EM1)、8.68~31.1  $\mu\text{m}$ (EM2)、40.1~111  $\mu\text{m}$ (EM3)、400~859  $\mu\text{m}$ (EM4); 主成分因子分析法(PCA)提取出4个环境敏感组分,对应的粒级分别为1.45~9.86  $\mu\text{m}$ (F1-1)、12.7~31.1  $\mu\text{m}$ (F4)、35.3~111  $\mu\text{m}$ (F2)、310~976  $\mu\text{m}$ (F1-2)。3种方法选用的粒度参数和计算过程存在一定差异,提取出的敏感粒级具有一定的兼容性,且含量随深度变化的趋势高度吻合(图9-A至9-C),表明3种方法均适用于本研究区环境敏感组分的提取。其中,主成分因子分析法提取出的因子F4(12.7~31.1  $\mu\text{m}$ )在粒级—标准偏差法中的A1-A3并未得到很好的体现,究其原因F4对应粒级的标准偏差值过低,即在这一粒径范围内粒度含量变化不明显。

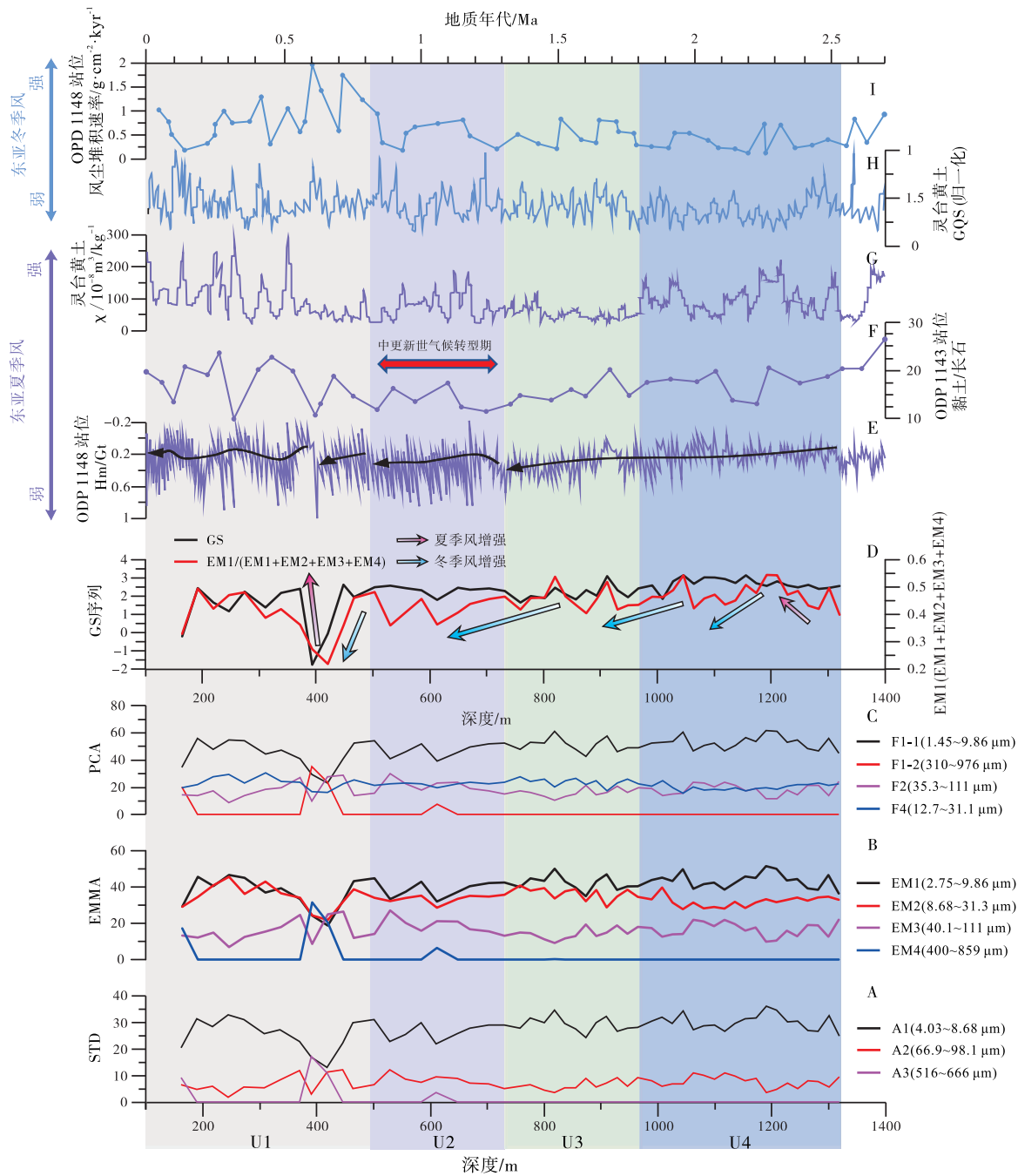
#### 4.3 敏感组分的解释及其环境指示意义

针对南海沉积物粒度敏感组分以及季风演化,前人已做了大量的研究,总结发现0~15  $\mu\text{m}$ 范围内的细粒组分通常被认为是东亚夏季风的有效指标(Boulay *et al.*, 2007; 杨文光等, 2008; 郑洪波等, 2008; 李明坤, 2018), 16~63.5  $\mu\text{m}$ 区间一般可以指示东亚冬季风强度(Boulay *et al.*, 2006; 杨文光等, 2007; 郑洪波等, 2008)(表4), 不同研究区提取出的敏感粒级范围存在一定差异。

研究表明,夏季风增强会导致降水量增加,河

流输入的细粒成分也随之增多,而冬季风的增强往往伴随着相对干冷的气候条件,此时更多的粗粒物质和粉尘物质被搬运至南海西北部(杨文光等, 2008)。因此,细粒和粗粒组分含量的变化可分别用作东亚夏季风和冬季风演化的替代指标。EM1-EM4是具有实际物理意义的端元组分,前人对南海西北部陆源碎屑多解释为河流搬运(夏季风)和风尘搬运(冬季风)作用的共同结果,一般将细粒组分解释为河流泥,中间组分解释为河流粉砂,粒径较粗的组分则解释为风尘(Wang *et al.*, 1999; Wan *et al.*, 2006, 2007)。因此,将本次端元分析获得的EM1和EM2解释为河流输入的泥和粉砂;EM3的粒径更接近南海西北部的风尘组分(Boulay *et al.*, 2007; Wan *et al.*, 2007; 李明坤, 2018),然而,只有很少一部分风尘物质可以沉积在南海西北部(Boulay *et al.*, 2007; Wan *et al.*, 2007),且目的层段富含生物碎屑,因此推测EM3为海洋生物碎屑和陆源碎屑的混合组分;EM4则可能反馈了流水搬运而来的陆地近源粗粒物质。

为了更好地表征粒度特征变化对环境的影响,用EM1/(EM1+EM2+EM3+EM4)表示端元组分分析法提取出的细粒物质在沉积物总体的占比;另将主成分因子分析法提取出的4个分量组合成一个新的粒度序列(GS),计算出F1-F4与其平方载荷之和,公式如下:



A—粒级—标准偏差法 (STD) 提取出的环境敏感粒级含量变化; B—端元组分分析法 (EMMA) 提取出的环境敏感粒级含量变化; C—主成分因子分析法 (PCA) 提取出的环境敏感粒级含量变化; D—GS 序列及 EM1/(EM1+EM2+EM3+EM4) 指标; E—南海北部 ODP 1148 岩心 Hm/Gt (赤铁矿/针铁矿) 记录 (Clift, 2006); F—南海西南部 ODP 1143 岩心黏土/长石记录 (Wan *et al.*, 2006); G、H—黄土高原灵台黄土磁化率 (χ) 和石英粒度 (QGS) 记录 (Sun *et al.*, 2010); I—南海北部 ODP 1146 岩心风尘累积率 (Wan *et al.*, 2007)

图 9 南海西北部 2.6 Ma 以来不同方法提取出的环境敏感粒级组分与东亚季风强度替代指标对比

Fig. 9 Comparison of environmental sensitive grain fractions extracted by different methods and East Asian monsoon intensity proxy index in the northwestern South China Sea since 2.6 Ma

$$GS = 0.3579 \times F1 + 0.2391 \times F2 + 0.2125 \times F3 + 0.1905 \times F4$$

GS 序列与再悬浮强度有关。流速的增大、再

悬浮强度的增强, 导致泥沙中粗粒减少、细粒增多, GS 随之增大, 因此可以用 GS 序列来表示东亚季风强度 (Yi *et al.*, 2012)。当东亚冬季风增强

时, 河流作用减弱, 粗粒物质增多, GS 值减小; 当东亚夏季风增强时, 河流作用增强, 细粒物质增多, GS 值增大 (郝榕荣等, 2023)。GS 序列与  $EM1/(EM1+EM2+EM3+EM4)$  变化趋势一致 (图 9-D), 均反映了沉积物中的细粒物质的变化, 可作为夏季风相对强度变化的替代指标。将本次研究成果与前人对南海东亚季风演化的研究 (Clift, 2006; Wan *et al.*, 2006, 2007; Sun *et al.*, 2010) 进行对比分析, 可进一步探讨研究区 2.6 Ma 以来敏感粒径对东亚季风的指示作用。

在 2.6—1.8 Ma 沉积时期 (U4), GS 序列和  $EM1/(EM1+EM2+EM3+EM4)$  值均表现为先增后减的变化趋势 (图 9-D), 表明这一时期水动力先增强后减弱, 与提取出的细粒组分含量变化趋势一致, 东亚夏季风也增强后减弱, 这与黄土高原灵台黄土记录的东亚冬季风气候 (图 9-H) 相对应。在 1.8—1.3 Ma (U3), GS 序列和  $EM1/(EM1+EM2+EM3+EM4)$  值进一步减小 (图 9-D), 表明这一时期水动力减弱, 冬季风增强, 这与灵台黄土和南海北部风尘堆积所记录的冬季风变化趋势一致 (图 9-H, 9-I)。在 1.3—0.8 Ma (U2) 阶段 (中更新世过渡阶段), 3 种方法提取出的敏感组分含量都表现为在 0.9 Ma 之前变化较稳定, 幅度相对较小, 而在 0.9 Ma 之后变化幅度增大 (图 9-A 至 9-C), 这与中更新世气候转型 (Mid-Pleistocene Climate Transition, MPT) 后全球冰期—间冰期旋回的周期和强度加大有关, 转型后冰期旋回的周期由 40 kyr 演变为 100 kyr, 转型后海平面升降幅度可达 120 m (拓守廷, 2008)。GS 和  $EM1/(EM1+EM2+EM3+EM4)$  值在 0.9 Ma 之前呈逐渐减小的趋势, 表明此时冬季风增强, 在 0.9 Ma 之后明显增大, 曲线斜率增大, 表示此时冬季风和夏季风均增强, 且变化幅度大, 这一现象与灵台黄土和南海北部风尘堆积所记录的冬季风 (图 9-H, 9-I) 和南海西南部黏土/长石和北部 Hm/Gt (赤铁矿/针铁矿) 所记录的夏季风 (图 9-E, 9-F, 9-G) 变化趋势一致。0.8 Ma 以来 (U1), 南海西北部的温度变化幅度加剧, 陆源碎屑堆积速率也逐渐增大 (金海燕和翦知潜, 2008; 拓守廷, 2008)。干冷的气候条件及海平面大幅下降导致由陆地近源搬运而来的粗粒物质突增, GS 和  $EM1/(EM1+EM2+EM3+EM4)$  值在 0.7 Ma 附近出现谷值 (图 9-D), 表明此时冬季

风强度最大, 与灵台黄土和南海北部风尘堆积所记录的冬季风有相似的变化趋势 (图 9-H, 9-I)。0.7 Ma 之后, GS 和  $EM1/(EM1+EM2+EM3+EM4)$  值增大, 3 种方法所提取出的细粒组分含量均表现出增加趋势, 指示夏季风有所增强。

本次研究使用的 3 种方法提取出的细粒敏感粒径高度重合, 且它们的含量变化趋势一致, 其中粒径—标准偏差法提取出的细粒组分 (4.03 ~ 8.68  $\mu\text{m}$ ) 为三者的交集, 能较好地反映夏季风的变化趋势 (图 9-A, 9-F); 据此, 认为 4.03 ~ 8.68  $\mu\text{m}$  组分可作为东亚夏季风的替代指标。

研究区处于陆架区, 沉积物搬运距离相对短, 导致粒径整体较粗, 提取出的粗粒组分主要出现在中更新世气候转型之后, 高幅海平面升降, 河口处发生显著的溯源侵蚀作用, 利于粗颗粒沉积物的搬运和就地沉积。受限于粗粒组分的样品数量限制, 本研究不讨论东亚冬季风的粒度替代指标。

## 5 结论

基于南海西北部陆架 YC 8-2-1 井 52 个第四系沉积物样品的激光粒度数据, 通过粒度特征分析, 利用粒径—标准偏差法、端元组分分析、主成分因子分析 3 种方法提取环境敏感粒度组分, 得到以下的认识。

1) 南海西北部陆架沉积物主要由粉砂和黏土组成, 沉积物粒度总体分布集中, 双峰或多峰的频率曲线可能反馈了多种水动力影响。U4-U1 段沉积物粒度自下而上呈“细—粗”的变化趋势, 水动力环境趋于复杂动荡, 水动力作用逐渐增强。

2) 粒径—标准偏差法、端元组分分析法及主成分分析法提取出的粒径组分呈现出相同的变化趋势, 均适用于南海西北部环境敏感组分的提取。端元组分分析提取出的 4 个敏感组分可解释为: EM1 和 EM2 表示河流输入的泥和粉砂; EM3 代表海洋生物碎屑和陆源碎屑的混合物质; EM4 为近源陆地物质。

3) GS 和  $EM1/(EM1+EM2+EM3+EM4)$  值可反应东亚夏季风相对强度变化, 同时本次研究认为 4.03 ~ 8.68  $\mu\text{m}$  的粒径组分含量变化可作为南海西北部第四纪夏季风强度变化的替代指标。

4) 在中更新世气候转型 (0.9 Ma) 后, 冬季风显著增强, 且变化幅度加剧, 同期夏季风也有所

增强；冰期—间冰期旋回的海平面波动周期和幅度加大导致大部分陆架暴露，有利于粗粒沉积物的形成和就地沉积。

### 参考文献 (References)

- 陈国成, 郑洪波, 李建如, 谢昕, 梅西. 2007. 南海西部陆源沉积粒度组成的控制动力及其反映的东亚季风演化. 科学通报, 52(23): 2768–2776. [Chen G C, Zheng H B, Li J R, Xie X, Mei X. 2007. Controlling dynamics of grain size composition of terrigenous sediments in the western South China Sea and its reflection on East Asian monsoon evolution. Chinese Science Bulletin, 52(23): 2768–2776]
- 陈桥, 刘东艳, 陈颖军, 申旭红, 蒋金杰, 李欣, 姜晓华. 2013. 粒度—标准偏差法和主成分因子分析法在粒度敏感因子提取中的对比. 地球与环境, 41(3): 319–325. [Chen Q, Liu D Y, Chen Y J, Shen X H, Jiang J J, Li X, Jiang X H. 2013. Comparative analysis of grade-standard deviation method and factors analysis method for environmental sensitive factor analysis. Earth and Environment, 41(3): 319–325]
- 陈秀法, 冯秀丽, 刘冬雁, 庄振业, 吴振利, 赵冕. 2002. 激光粒度分析与传统粒度分析方法相关对比. 中国海洋大学学报(自然科学版), 32(4): 608–614. [Chen X F, Feng X L, Liu D Y, Zhuang Z Y, Wu Z L, Zhao M. 2002. Correlation comparison between laser method and pipette-sieve method of grain size. Periodical of Ocean University of China, 32(4): 608–614]
- 程良清, 宋友桂, 李越, 张治平. 2018. 粒度端元模型在新疆黄土粉尘来源与古气候研究中的初步应用. 沉积学报, 36(6): 1148–1156. [Cheng L Q, Song Y G, Li Y, Zhang Z P. 2018. Preliminary application of grain size end member model for dust source tracing of Xinjiang loess and paleoclimate reconstruction. Acta Sedimentologica Sinica, 36(6): 1148–1156]
- 丁大林, 李广雪, 徐继尚, 丁咚, 李倩, 王丽艳, 王昊寅, 张洋. 2017. 全新世亚洲季风演变. 地学前缘, 24(4): 114–123. [Ding D L, Li G X, Xu J S, Ding D, Li Q, Wang L Y, Wang H Y, Zhang Y. 2017. Evolution of the Asian monsoon during the Holocene. Earth Science Frontiers, 24(4): 114–123]
- 丁喜桂, 叶思源, 宫少军, 赵广明. 2010. 黄河三角洲 ZK1 孔岩心环境敏感粒度组分及沉积环境分析. 世界地质, 29(4): 575–581. [Ding X G, Ye S Y, Gong S J, Zhao G M. 2010. Analysis on environmentally sensitive grain-size population and sedimentary environment of ZK1 drilling core in Yellow River delta. Global Geology, 29(4): 575–581]
- 郝榕荣, 杨怡红, 朱龙海, 朱颖涛, 袁晓东. 2023. 环境敏感因子在威海湾沉积环境中的应用比较. 沉积学报, 41(3): 763–777. [Hao R R, Yang Y H, Zhu L H, Zhu Y T, Yuan X D. 2023. Application of environmentally sensitive factors in bay sedimentary environments. Acta Sedimentologica Sinica, 41(3): 763–777]
- 金海燕, 翦知潏. 2008. 中更新世气候转型期南海北部和南部的气候变化差异. 第四纪研究, 28(3): 381–390. [Jin H Y, Jian Z M. 2008. Comparison of climate changes between northern and southern South China Sea during the mid-Pleistocene climate transition period. Quaternary Sciences, 28(3): 381–390]
- 冷传旭, 袁鸿洁, 徐翠玲, 郝娅楠, 赵广涛. 2017. 对数比变换在因子分析法提取东亚冬季风敏感粒级中的应用: 以南黄海中部泥质区 H07 孔为例. 海洋地质与第四纪地质, 37(1): 151–161. [Leng C X, Yuan H J, Xu C L, Hao Y N, Zhao G T. 2017. Applications of logarithm ratio transformation to extraction of the sensitive grain size of East Asian winter monsoon by the method of factor analysis: a case study of core H07 from the central mud area of the South Yellow Sea. Marine Geology & Quaternary Geology, 37(1): 151–161]
- 李明坤. 2018. 南海西北部 36 kyr BP 以来的古气候环境演变与驱动机制. 中国科学院大学博士学位论文: 55–66. [Li M K. 2018. Paleoclimate and paleoenvironment evolutions in the northwestern South China Sea over the past 36 kyr BP and the forcing mechanisms. Doctoral dissertation of Chinese Academy of Sciences: 55–66]
- 刘志飞, 赵玉龙, 李建如, Christophe Colin. 2007. 南海西部越南岸外晚第四纪黏土矿物记录: 物源分析与东亚季风演化. 中国科学(D辑: 地球科学), 37(9): 1176–1184. [Liu Z F, Zhao Y L, Li J R, Colin C. 2007. Late Quaternary clay mineral records off the coast of Vietnam in the western South China Sea: Provenance analysis and East Asian monsoon evolution. Science in China(Series D), 37(9): 1176–1184]
- 刘志飞, 赵玉龙, 王轶婕, 陈全. 2017. 南海第四纪东亚季风演化的粘土矿物指标. 第四纪研究, 37(5): 921–933. [Liu Z F, Zhao Y L, Wang Y J, Chen Q. 2017. Clay mineralogical proxy of the East Asian monsoon evolution during the Quaternary in the South China Sea. Quaternary Sciences, 37(5): 921–933]
- 罗运利, 孙湘君. 2012. 3.15~0.67 Ma 时段南海北部深海沉积物孢粉记录的植被演化及其对全球变化的响应. 科学通报, 57(30): 2882–2891. [Luo Y L, Sun X J. 2012. Vegetation evolution and its response to climatic change during 3.15–0.67 Ma BP in deep-sea pollen record from northern South China Sea. Chinese Science Bulletin, 57(30): 2882–2891]
- 马畅, 葛家旺, 赵晓明, 廖晋, 姚哲, 朱继田, 方小宇, 向柱. 2022. 南海北部琼东南盆地第四系陆架边缘轨迹迁移及深水沉积模式. 地学前缘, 29(4): 55–72. [Ma C, Ge J W, Zhao X M, Liao J, Yao Z, Zhu J T, Fang X Y, Xiang Z. 2022. Quaternary Qiongdongnan Basin in South China Sea: shelf-edge trajectory migration and deep-water depositional models. Earth Science Frontiers, 29(4): 55–72]
- 潘隆, 方晶, 田立柱, 李杨, 王福, 齐乌云, 王中良. 2018. 天津南港工业区海区表层沉积物粒度特征及沉积环境分析. 应用海洋学报, 37(4): 462–471. [Pan L, Fang J, Tian L Z, Li Y, Wang F, Qi W Y, Wang Z L. 2018. Grain size characteristics of surface sediments and the response to sedimentary environment in the coastal waters of Tianjin Nangang Industrial Zone in Bohai Bay. Journal of Applied Oceanography, 37(4): 462–471]
- 曲华祥, 黄宝琦. 2019. 南海北部 MD12–3432 站深海氧同位素 MIS6

- 期到 MIS5 期陆源沉积物元素比值反映的古气候变化. 地学前缘, 26(3): 236-242. [Qu H X, Huang B Q. 2019. Paleoclimate change reflected by element ratios of terrigenous sediments from deep-sea oxygen isotope MIS6 to MIS5 at MD12-3432 station in northern South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 26(3): 236-242]
- 苏克凡, 高萌, 胡哲, 王娜, 黄宝琦. 2021. 基于浮游有孔虫重建的南海北部 400 ka 以来上层水体结构变化及其对东亚季风的响应. 第四纪研究, 41(6): 1607-1618. [Su K F, Gao M, Hu Z, Wang N, Huang B Q. 2021. Reconstruction of upper water structure in the northern South China Sea since 400 ka based on planktonic foraminiferal assemblages and its response to the East Asian monsoon. *Quaternary Sciences*, 41(6): 1607-1618]
- 孙华杰, 臧淑英, 孙德尧, 张科, 孙丽. 2018. 呼伦湖沉积物粒度特征及其环境指示意义. 地理科学, 38(9): 1570-1578. [Sun H J, Zang S Y, Sun D Y, Zhang K, Sun L. 2018. Grain-size characteristics and their environmental significance of Hulun Lake sediments. *Scientia Geographica Sinica*, 38(9): 1570-1578]
- 孙有斌, 高抒, 李军. 2003. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析. 科学通报, 48(1): 83-86. [Sun Y B, Gao S, Li J. 2003. Preliminary analysis of environmentally sensitive grain size components in marginal Marine terrigenous materials. *Chinese Science Bulletin*, 48(1): 83-86]
- 拓守廷. 2008. 南海北部中更新世气候转型期高分辨率沉积学记录及其古气候研究. 同济大学博士学位论文: 41-46. [Tuo S T. 2008. High-resolution sedimentological records and paleoclimate studies of the Middle Pleistocene climate transition in the northern South China Sea. Doctoral dissertation of Tongji University: 41-46]
- 田旭, 徐方建, 徐微, 刘喜玲. 2015. 近 4400a 南海北部陆架沉积物的东亚季风记录. 海洋科学, 39(9): 62-68. [Tian X, Xu F J, Xu W, Liu X L. 2015. 4400 a East Asian monsoon record from sediments in the continental shelf of the northern South China Sea. *Marine Sciences*, 39(9): 62-68]
- 万世明, 李安春, Jan-Berend W Stuu, 徐方建. 2007. 南海北部 ODP1146 站粒度揭示的近 20 Ma 以来东亚季风演化. 中国科学(D 辑: 地球科学), 37(6): 761-770. [Wan S M, Li A C, Stuu J, Xu F J. 2007. Grain size of ODP1146 station in the northern South China Sea reveals the evolution of East Asian monsoon since last 20 Ma. *Science in China(Series D)*, 37(6): 761-770]
- 向荣, 杨作升, 郭志刚, Saito Y., 范德江, 肖尚斌, 陈木宏. 2005. 济州岛西南泥质区粒度组分变化的古环境应用. 地球科学, 30(5): 582-588. [Xiang R, Yang Z S, Guo Z G, Saito Y., Fan D J, Xiao S B, Chen M H. 2005. Paleoenvironmental implications of grain-size component variations in the mud area southwest off Cheju Island, ECS. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 582-588]
- 杨鹏, 夏斌, 蔡周荣, 万志峰, 黄强大, 张勇. 2017. 南海北部莺歌海盆地成因机制: 与渭河盆地构造对比分析的启示. 海洋地质与第四纪地质, 37(6): 65-75. [Yang P, Xia B, Cai Z R, Wan Z F, Huang Q T, Zhang Y. 2017. Genetic mechanism of the Yinggehai Basin northern South China Sea: a comparative study to the Weihe Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 37(6): 65-75]
- 杨文光, 郑洪波, 王可, 谢昕, 陈国成, 梅西. 2007. 南海东北部 MD05-2905 站 36 ka BP 以来的陆源碎屑沉积特征与东亚季风的演化. 地球科学进展, 22(10): 1012-1018. [Yang W G, Zheng H B, Wang K, Xie X, Chen G C, Mei X. 2007. Sedimentary characteristic of terrigenous clast of site MD05-2905 in the northeastern part of South China Sea after 36 ka and evolution of East Asian monsoon. *Advances in Earth Science*, 22(10): 1012-1018]
- 杨文光, 郑洪波, 谢昕, 周斌, 成鑫荣. 2008. 南海北部陆坡沉积记录的全新世早期夏季风极强事件. 第四纪研究, 28(3): 425-430. [Yang W G, Zheng H B, Xie X, Zhou B, Cheng X R. 2008. East Asian summer monsoon maximum records in northern South China Sea during the early Holocene. *Quaternary Sciences*, 28(3): 425-430]
- 张宝方. 2015. 南海北部陆坡区更新世以来沉积物粒度特征及沉积环境演化. 中国海洋大学硕士学位论文: 17-54. [Zhang B F. 2015. Grain size distribution and sedimentary environment evolution in northern South China Sea slope since Pleistocene. Masteral dissertation of Ocean University of China: 17-54]
- 赵利, 彭学超, 钟和贤, 蔡观强, 李波, 李顺, 田成静. 2016. 南海北部陆架区表层沉积物粒度特征与沉积环境. 海洋地质与第四纪地质, 36(6): 111-122. [Zhao L, Peng X C, Zhong H X, Cai G Q, Li B, Li S, Tian C J. 2016. Characteristics of grain size distribution of surface sediments and depositional environments in the northern shelf region of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(6): 111-122]
- 郑洪波, 陈国成, 谢昕, 梅西, 李建如, 葛黄敏, 黄恩清. 2008. 南海晚第四纪陆源沉积: 粒度组成、动力控制及反映的东亚季风演化. 第四纪研究, 28(3): 414-424. [Zheng H B, Chen G C, Xie X, Mei X, Li J R, Ge H M, Huang E Q. 2008. Grain size distribution and dynamic control of late Quaternary terrigenous sediments in the South China Sea and their implication for East Asian monsoon evolution. *Quaternary Sciences*, 28(3): 414-424]
- Blott S J, Pye K. 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11): 1237-1248.
- Boulay S, Colin C, Trentesaux A, Pluquet F, Bertaux J, Blamart D, Buehring C, Wang P. 2006. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 184(211): 1-21.
- Boulay S, Colin C, Trentesaux A, Clain S, Liu Z F, Lauer-Leredde C. 2007. Sedimentary responses to the Pleistocene climatic variations recorded in the South China Sea. *Quaternary Research*, 68(1): 162-172.
- Clift P D. 2006. Controls on the erosion of Cenozoic Asia and the flux of clastic sediment to the ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3-4): 571-580.
- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos River bar[Texas]: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*,

- 27(1): 3–26.
- Li X B, Ge J W, Zhao X M, Qi K, Jones B G, Fang X Y. 2024. Geochemistry of Quaternary sediments in the northwestern South China Sea: sediment provenance and mid-Pleistocene transition. *Marine Geology*, 477: 107371.
- Paterson G A, Heslop D. 2015. New methods for unmixing sediment grain size data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(12): 4494–4506.
- Sun Y B, An Z S, Clemens S C, Bloemendal J, Vandenberghe J. 2010. Seven million years of wind and precipitation variability on the Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 297(3–4): 525–535.
- Visher G S. 1969. Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Research*, 39(3): 1074–1106.
- Wan S M, Li A C, Clift P D, Jiang H Y. 2006. Development of the East Asian summer monsoon: evidence from the sediment record in the South China Sea since 8.5 Ma. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 241(1): 139–159.
- Wan S M, Li A C, Clift P D, Stuut J B W. 2007. Development of the East Asian monsoon: mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(3–4): 561–582.
- Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, Grimalt J, Grootes P, Heilig S, Ivanova E, Kienast M, Pelejero C, Pflaumann U. 1999. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology*, 156(1–4): 245–284.
- Xie X, Zheng H B, Qiao P J. 2014. Millennial climate changes since MIS3 revealed by element records in deep-sea sediments from northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 59: 776–784.
- Yi L, Yu H J, Ortiz J D, Xu X Y, Chen S L, Ge J Y, Hao Q Z, Yao J, Shi X F, Peng S Z. 2012. Late Quaternary linkage of sedimentary records to three astronomical rhythms and the Asian monsoon, inferred from a coastal borehole in the South Bohai Sea, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 329: 101–117.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)

## 中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会 第十一届委员会委员名单 (2025—2029 年)

主任委员: 王贵文

副主任委员: 姜在兴 孟庆涛 屈红军 邵龙义 时志强 朱光有

委员:

鲍志东 郭艳琴 郭英海 胡宗全 简星 姜在兴 李华 李攀 李胜利  
李振生 刘建波 柳永清 鲁静 孟庆涛 乔占峰 屈红军 单新 邵磊  
邵龙义 时志强 宋慧波 王健 王贵文 王启宇 王文卉 吴亚生 谢晓军  
许欢 许淑梅 薛宗安 杨小强 余文超 张霞 张永利 赵晓明 郑秀娟  
朱光有 朱茂炎 朱世发 朱筱敏

秘书长: 郑秀娟

副秘书长: 陈骁帅 李飞 李新坡 余文超 苏中堂 朱世发

中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会  
2025-06-26