

引用格式:侯晨阳,靳建辉,邱俊杰,卫俊杰,许岱玉.末次冰消期以来福建福宁湾钻孔的粒度特征及其环境指示意义[J].山地学报,2023,41(5):621-633.

HOU Chenyang, JIN Jianhui, QIU Junjie, WEI Junjie, XU Daiyu. Grain size characteristics of boreholes in Funing Bay, China and their environmental indications since the last deglaciation period [J]. Mountain Research, 2023, 41(5): 621-633.

末次冰消期以来福建福宁湾钻孔的粒度特征 及其环境指示意义

侯晨阳^{a, b}, 靳建辉^{a, b*}, 邱俊杰^{a, b}, 卫俊杰^{a, b}, 许岱玉^{a, b}

(福建师范大学 a. 福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福州 350007; b. 地理科学学院, 福州 350108)

摘要: 海岸沉积物是记录海-陆-气相互作用下区域古环境变化的重要载体。因短历时古气候事件发生时间短、各物质载体和代用指标都存在一定不足,对华南海岸带沉积物研究多探讨其与海平面波动等长时间尺度上的关系,限制了对粒度信息中可能记录的短期气候事件的深入研究,不利于解译古气候与古人类历史。本研究选取福建霞浦福宁湾 FN1 钻孔 0~8 m 部分,以光释光年代标尺为基础,使用粒度作为主要环境代用指标,并通过端元分析、主成分和相关性分析方法,阐明福建东北沿海地区沉积物粒度特征;再结合 TOC/TN 含量变化,探讨其环境指示意义。结果表明:(1)钻孔 0~8 m 沉积物以粉砂为主,不同沉积相中各粒级百分比含量波动较大,根据粒径变化趋势和各粒度参数变化曲线分为 U1、U2、U3 三层。(2)根据 BasEMMA 方法选取 3 个端元进行分析。其中,EM1 代表低能沉积条件,以粉砂为主,是受冬季风影响的敏感组分,可指示冬季风强度变化;EM2 代表中能沉积条件,出现粒级、TOC/TN 及沉积速率的突变。受东亚冬季风影响,陆源物质含量增加;EM3 代表高能沉积条件,区域水动力增强,沉积物粗颗粒含量增加;高能与低能条件的频繁变化使沉积过程变得复杂,形成海陆过渡相。(3) 3.9 ka B. P. ~3.7 ka B. P.、1.4 ka B. P. ~1.2 ka B. P. 以及距今约 500 a 以来,沉积物粒度与 TOC/TN 均出现明显变化。与前人对东亚季风与 ENSO 变化的研究对比发现,环境代用指标的突变与华南沿海在该时段发生的风暴潮频率密切相关,可能对该地区人类生活居住产生严重威胁,进而影响区域文化演替,这表明沉积物粒度特征和 TOC/TN 含量变化特征等具有指示区域人类活动和环境演变的潜力。本研究可以为古环境重建和人类文化研究提供支持。

关键词: 粒度;端元分析;环境演变;福建福宁湾

中图分类号: K903

文献标志码: A

华南沿海地区是海-陆-气三者相互作用的关键带。全新世以来,在相对稳定的海岸地质条件、稳定的浙闽沿岸流和振幅较小的海平面共同作用下,宁德-福州段海湾发育了百年-千年尺度上连续的海岸沉积物,发育形成了不同海岸类型^[1],是开展海岸

沉积物研究、深入了解区域环境演化和人类活动变迁的典型区域。

针对福建浅海沉积物的环境演变研究,尤其是气候突变事件的研究存在不足。第一,研究手段受限。由于技术手段限制,从沉积物中提取的环境突

收稿日期 (Received date): 2023-01-27; **改回日期** (Accepted date): 2023-10-16

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41301012);福建省自然科学基金 (2020J01185) [National Natural Science Foundation of China (41301012); Natural Science Foundation of Fujian Province (2020J01185)]

作者简介 (Biography): 侯晨阳 (2000-),女,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向:释光测年与环境演变。[HOU Chenyang (2000-), female, born in Yuncheng, Shanxi province, M. Sc. candidate, research on luminescence dating and environmental change] E-mail: hcyang1116@163.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 靳建辉 (1981-),男,博士,副教授,主要研究方向:风沙地貌过程与环境演变,释光年代学方法与应用。[JIN Jianhui (1981-), male, Ph. D., associate professor, research on the process of aeolian geomorphology and environmental change, luminescence chronology] E-mail: geojh@fjnu.edu.cn

变事件信息,无法准确判断突变出现的时间及影响,阻碍了关于古人类环境适应能力的认识。例如,利用泥炭中孢粉等指标重建环境演变序列;以海岸砂质沉积物为载体,尽管结合了不同指标,对 1.8 Ma 以来福建东部沿海环境演化阶段进行划分^[2-4],但未对某些气候突变时间做出较准确的判断。第二,研究视角单一。已有研究多侧重长时间尺度的气候、环境整体变化^[5-7],如全新世以来福建东北沿海地区人类活动与气候变化、福建沿海地区晚第四纪的海侵研究等。但对福建沿海过去可能发生的短气候事件研究较少,如台风、风暴潮^[8-13],以及沉积物粒度波动中蕴含的信息等^[14-19],不利于全面认识这一区域过去气候变化规律,限制对地人关系的研究和探索。因此,在福建沿海地区开展关于沉积物粒度特征记录的短气候事件研究,尤其是该区域沉积物信息记录的末次冰消期以来发生的气候突变事件,全面探索区域极端气候事件的发生和史前人类活动变迁,对复原区域环境演变与史前文明演化的耦合关系具有重要意义。

福建东北浅海沉积物有效记录了华南沿海区域气候变化和地貌发育过程。本文以福建霞浦福宁湾 FN1 钻孔为研究对象,采用粒度端元分析方法提取对气候变化响应敏感的粒级组分,结合主成分分析以及相关分析的方法,同时分析 TOC/TN 值变化,探讨其沉积过程中的动力特征;在年代学框架基础上,分析敏感粒级组分的气候和环境指示意义,对比前人对东亚季风与 ENSO 变化的研究,探讨区域 LGM (15 ka B. P.) 以来的环境变化过程及其与区域文化演替之间可能存在的关系,以期气候变化和史前人类活动研究提供支持。

1 研究区概况

福宁湾海域位于福建省霞浦县东南部,面向东海,与台湾岛隔海相望。位于东部季风区,属亚热带海洋性季风气候,年均温 19.1℃,年降水量 1416 mm。夏季以西南风为主,易受台风影响带来强降水;冬季受来自西伯利亚高压的东亚冬季风影响,寒冷干燥的气团南下,但由于高山阻挡和海洋增温效应,研究区温度比同纬度内陆地区温度高^[20]。注入霞浦湾主要河流为罗汉溪和杯溪,湾内大部分区域水深在 -10 m 以内,该海域潮汐类型为规则半

日潮,平均潮差 4.30 m,最大潮差 7.07 m^[21]。

福建省沿海地区第四纪地层发育,总体处于新构造运动上升区^[22]。自第四纪晚期以来该地区沉积的海陆相互作用地层,为研究福建沿海地区沉积环境和海平面变化提供了理想材料^[23-24]。本文研究区位于闽东火山喷发带上,以区域断裂构造为主,主要分布岩石为酸性、中性岩喷出岩和花岗岩^[22]。福宁湾所在区域多为基岩海岸,峡湾众多。此前众多研究显示这里沉积结构复杂,各种沉积相交互出现^[21,23,25-26]。

2 材料与方法

2.1 样品选取

本研究选取了位于潮间带的 FN1 岩芯,共深 15 m (本文所研究部分为 0~8 m),距东海边缘约 2 km,具体位置为 26°48'52.57"N, 120°01'19.49"E。此前,已有学者对该钻孔进行年代学和环境意义研究^[27-28]。2016 年使用 10 cm 的短钢管取得 14 个测年样品,2020 年从钻孔下半部取得 4 个测年样品。为确保实验结果准确性,在此期间样品密封且冷藏保存。本文所取年代为钻孔上半部的 8 个年代数据,该钻孔 0~8 m 岩性描述如下。

0~2.5 m: 浅灰色泥质细粉砂 (图 1), 表层有大量植物碎根屑,下部可见新鲜植物碎屑;

2.5~3.5 m: 棕灰色粉砂质细砂,富含植物炭屑;

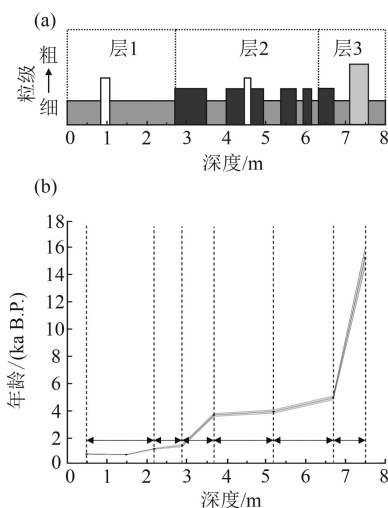


图 1 岩性剖面、沉积物特征与年龄-深度

Fig. 1 Lithologic profiles, sediment characteristics and age-depth

3.5 ~ 4 m: 浅灰色细粉砂, 质地均一;

4 ~ 6.4 m: 浅橄榄灰色细粉砂与灰棕色细砂不等厚互层, 局部见少量棕黄色中砂层, 含有大块植物炭屑与植物种子和疑似稻壳;

6.4 ~ 8 m: 浅灰色粗砂, 质地均一, 含丰富的碳块和植物残体碎屑。

2.2 粒度测试

以 5 cm 为间隔连续采样, 共使用 158 个沉积物样品进行粒度分析, 粒度测试仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪, 检测范围为 0.02 ~ 2000 μm , 重复测量误差小于 2%。

2.3 光释光 (OSL) 年代测试

本研究所采用的年代学数据引自任永青等^[28]对福建省沿海福宁湾 FN1 钻孔的 OSL 年代测试结果。为避免曝光对结果影响, OSL 样品前处理及测试均在暗室红光条件下进行。取采样管两端 3 ~ 5 cm 可能曝光部分沉积物以测定每个样品的含水量和剂量率, 中心部分未暴光沉积物用于测量石英和钾长石等效剂量 (De)。仪器采用丹麦国家实验室生产的 Ris TL/OSL DA20C/D 型光释光测量仪, 通过预热、辐照和激发等步骤完成测量。

2.4 TOC 与 TN 测试

碳氮比 (TOC/TN) 可以反映该地区陆源物质与海相物质输入的相对大小 能够准确反映沉积物中相对有机质含量, 而且根据数值不同可以分辨其有机质来源^[29-31]。一般认为, 藻类的 C/N 为 4 ~ 10, 而陆生维管植物在 20 以上, 二者混合在 10 ~ 20。

取需要测定样品进行处理。过 2 mm 筛, 称取 5.0 g 于 50 mL 离心管中。加入 40 mL 超纯水, 盖好瓶塞, 于 250 r/min 振荡 30 min 后, 在离心机上以 4000 r/min 转速离心 30 min。取上清液用 0.45 μm 滤膜抽滤, 滤液置于 50 mL 试剂瓶中。实验时需同时测定含水率。

2.5 端元分析方法

目前, 粒度端元分析方法已被用于判断不同的沉积物物源和动力, 此外, 还用来重建过去的冰川活动历史^[14, 32-36]。粒度端元分析模型由国内外众多研究者提出^[17, 36-37], 运用“降维”的思想, 将复杂且难以直观表现沉积物特点的粒度数据通过特定算法分解为不同组分, 即可更明确地指示、分析该沉积物搬运方式和动力。

本文采用 ZHANG^[37]等基于遗传算法提出的

BasEMMA 方法对 FN1 钻孔 (0 ~ 8 m) 进行粒度端元分析。其通过 Microsoft Excel 中的宏语言来实现。选取端元数量为 2、3、4、5, 依次计算各粒级复相关系数 (R^2) 及平均值, 根据 R^2 的大小和变化确定最终所选取端元数量。

2.6 主成分和相关分析方法

通过 Mastersizer 2000 和 Excel 整理粒度数据, 应用统计分析软件 SPSS 和 Origin 2019 对数据进行相关性分析、主成分分析。相关性分析基于 Pearson 相关系数法^[38]对均值粒径、中值粒径等 15 项粒度指标进行分析。Pearson 相关系数 r 可以用来表示两个变量之间的相关性大小, $|r| \in [0, 1]$, $|r| \geq 0.8$ 时为高度相关, $0.5 \leq |r| < 0.8$ 为中度相关, $0.3 \leq |r| < 0.5$ 为低度相关, $|r| < 0.3$ 为不相关。主成分分析通过降维将粒度指标变为一组向量, 并对其若干关键指标进行分组, 可以更准确指示粒度特征。

3 结果分析

3.1 粒度结果

根据 Udden-Wentworth 粒级标准^[45-46], 将 FN1 钻孔 (0 ~ 8 m) 的沉积物粒度类型分为粘土 (< 2 μm)、粉砂 (2 ~ 63 μm)、极细砂 (63 ~ 125 μm)、细砂 (125 ~ 250 μm)、中砂 (250 ~ 500 μm)、粗砂 (500 ~ 1000 μm)、极粗砂 (1000 ~ 2000 μm)。FN1 钻孔 (0 ~ 8 m) 粉砂含量相对较高 (变化范围为 10.23% ~ 64.45%, 平均值为 31.71%), 细砂次之 (3.33% ~ 39.89%, 平均值为 19.54%), 亦含有中砂 (5.60% ~ 33.15%, 平均值为 19.16%), 粗砂、极细砂和粘土平均值分别为 11.63%、10.57%、4.82%, 极粗砂含量最少 (0% ~ 18.09%, 平均值为 2.57%)。由图 2 得出, 在不同沉积相中, 各粒级百分比含量波动较大。浅灰色泥质细粉砂层粉砂 (46.67%) 与粘土 (6.92%) 含量高于钻孔平均值, 极细砂、细砂、中砂 (8.79%、10.95%、13.00%) 含量则低于平均值。浅灰色粗砂层粗砂与极粗砂 (23.71%、6.57%) 含量显著高于平均值, 极细砂与细砂 (5.84%、8.68%) 含量较平均值低。

根据沉积物在深度上的粒径变化趋势和各粒度参数变化曲线, 将 FN1 钻孔 (0 ~ 8 m) 划分为 3 个沉积单元, 自上而下分别表示为 U1、U2、U3。

FN1 钻孔 (0 ~ 8 m) 沉积物的平均粒径为

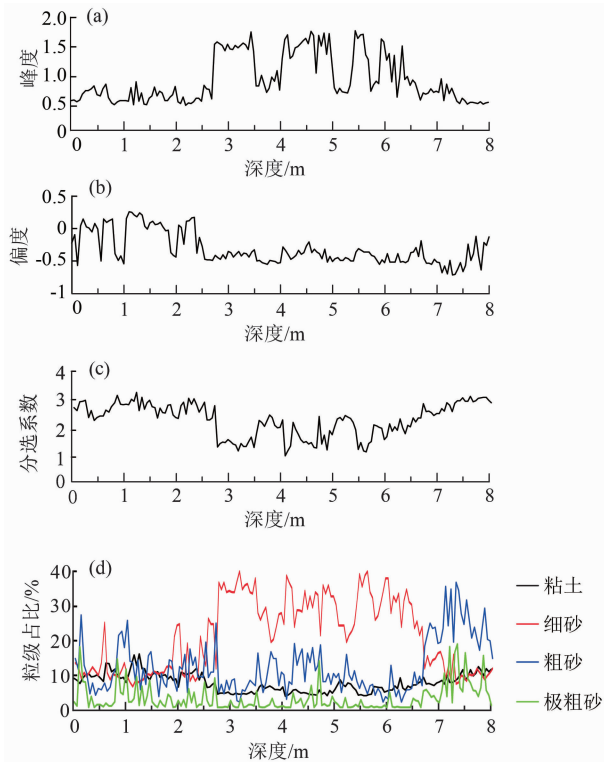


图2 FN1 钻孔粒度参数在深度上的变化特征

Fig.2 Characteristics of variation in depth of particle size parameters of FN1 borehole

1.95 ~ 5.98 ϕ , 平均值为 3.58 ϕ 。分选系数为 1.28 ~ 3.48, 介于分选较差至分选差范围。偏度为 -0.71 ~ 0.25, 大部分属负偏, 个别正偏仅出现在 0 ~ 2.8 m。峰度为 0.66 ~ 1.92, 平均值为 1.11, 0 ~ 2.8 m 与 6.7 ~ 8 m 属平坦, 2.8 ~ 6.7 m 属尖锐。各沉积相的比较中, U1 层平均粒径 (4.38 ϕ) > U3 层 (3.29 ϕ) > U2 层 (3.08 ϕ); U3 层分选系数 (3.05) > U1 层 (2.89) > U2 层 (2.07), 表明 U1 层沉积物粒度最细, 分选差; U2 层粒度最粗, 分选在三者中相对较好; U3 层粒度居中, 分选差。FN1 钻孔 (0 ~ 8 m) 的粒度频率分布曲线 (图 3a) 为明显的双峰分布, 且两峰相距较远, 总体呈正偏态, 表明该段沉积物混合、粒度较粗。主峰在 2.5 ~ 3 ϕ , 次峰在 7.5 ϕ , 说明该段钻孔沉积过程中整体搬运运动能较强, 以近源沉积为主, 并有少量的远源细颗粒组分存在。

粒度概率累积曲线是用来判断碎屑沉积物分选情况和沉积环境的良好指标。沉积物的粒度成分按搬运方式不同可分为悬浮、跳跃、滚动 3 种粒径大小不同的组分。U1 ~ U3 各地层的粒度概率累积曲线

(图 3b) 呈不典型的三段式。U1 层以悬浮组分为主, 占 80% 以上, 跃移组分含量较少, 整体水动力较弱; U2、U3 层悬浮组分减少, 跃移组分增加, 在 50% 左右, 说明水动力变强; U2 层曲线最陡, 分选相对较好。

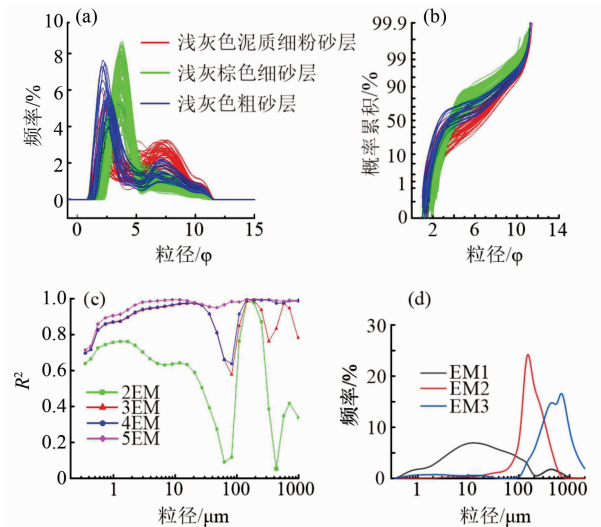


图3 钻孔采样点粒度特征及端元分析结果:

(a) 频率分布曲线; (b) 概率累积曲线; (c) 粒级-复相关系数; (d) 端元频率分布曲线

Fig.3 Drill sample point granularity characteristics and endpoint analysis results; (a) frequency distribution curves; (b) probabilistic cumulative curves; (c) grain-complex correlation coefficient; (d) EM frequency distribution curve

3.2 端元结果

当端元数取 3 时, R^2 均值为 0.85 (图 3c), 主体粒级复相关系数均大于 0.8, 拟合程度比 2 个端元更佳; 当端元数为 4 和 5 时, 各粒级复相关系数均值分别为 0.90 和 0.92, 较端元数取 3 时无明显变化。根据选取最少端元的原则, 将端元数确定为 3。

从端元频率分布曲线 (图 3d) 中可以看出, FN1 钻孔的 3 个端元频率分布曲线中 EM1 大致表现为一个主峰和一个较微弱的次峰。EM1 主峰所对应的粒径为 10.4 μm , 极其微弱的次峰对应粒径为 382.5 μm ; EM2 和 EM3 的主峰对应粒径分别是 126.5 μm 和 642 μm 。细粒端元 EM1 峰态相对较宽平, 峰值较低, 分选较差; EM2、EM3 峰态高窄, 峰值陡峭, 分选性增强。

根据 3 个端元的混合三角图 (图 4a), U1 层主要受到 EM1 所代表的动力控制, EM1 占比为 61.12%, EM2 和 EM3 组分含量接近 (占比分别为

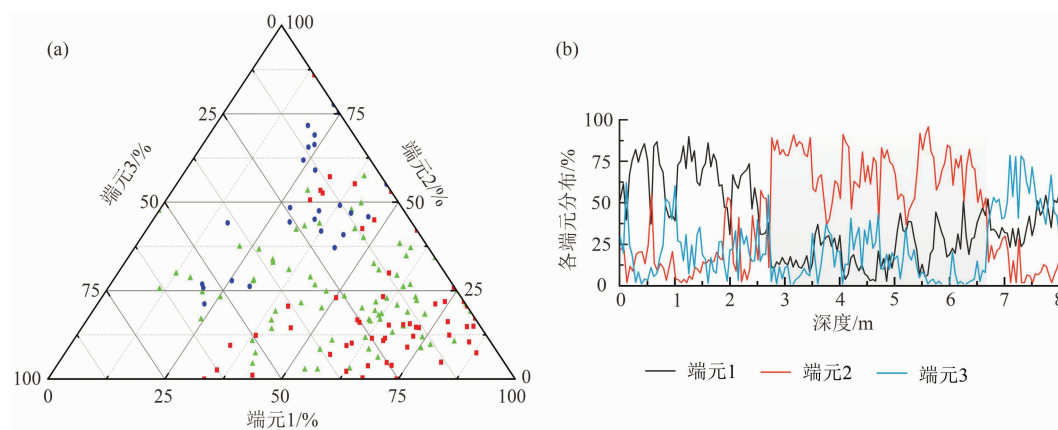


图4 FN1 钻孔粒度端元分析结果:(a) FN1 钻孔 3 个端元的混合三角图;(b)各端元在深度上的变化特征

Fig. 4 Results of the EM analysis of the grain size of the FN1 drill;

(a) mixed triangulation of 3 EM; (b) characteristics of variation in depth of each EM

18.98%、19.90%); U2 层主要受到 EM2 所代表的动力控制, EM2 占比为 66.34%, 同时也受到 EM1 和 EM3 的影响(占比分别为 21.55%、12.10%); U3 层主要受到 EM3 所代表的动力控制, EM3 占比为 52.42%, 也受到 EM1 和 EM2 的影响(占比分别为 37.23%、10.35%)。

在粒度特征分析的基础上, 进一步探讨 FN1 钻孔(0~8 m)的端元变化。根据图 4b, 端元与地层对应关系较好。在 1.44 ka B. P. 之前的 U2 层和 U3 层中, EM2 和 EM3 呈现对称分布, 而在 1.44 ka 之后的 U1 层中, EM1 和 EM2 也呈对称状。1.44 ka B. P. 以来, EM1 含量表现出明显的上升趋势, EM2 则显示出波动降低的状态。

3.3 相关系数及主成分分析

钻孔样品 3 个端元和各粒度参数的 Pearson 相关系数(图 5), 结果表明, EM1 与粘土、粉砂的相关系数分别为 0.96、0.88; EM2 与极细砂、细砂的相关系数分别为 0.85、1.00; EM3 与粗砂、极粗砂的相关系数分别为 0.99、0.80。均大于 0.8, 说明其都为高度相关关系。EM1 与细砂、中砂相关系数分别为 -0.80、-0.92, EM2 与粘土、粉砂相关系数分别为 -0.86、-0.74, EM3 与极细砂、细砂相关系数分别为 -0.81、-0.60, 以上均呈明显负相关, 说明三个端元与不同地层对应关系良好。

样品粒度及参数特征数据主成分分析见图 6b。结果表明, PC1 和 PC2 两个主成分可以近似解释总方差的 86.9%, 可以充分反映原始数据的主要信息。PC1 和 PC2 主成分分别解释了总方差的 60.0%

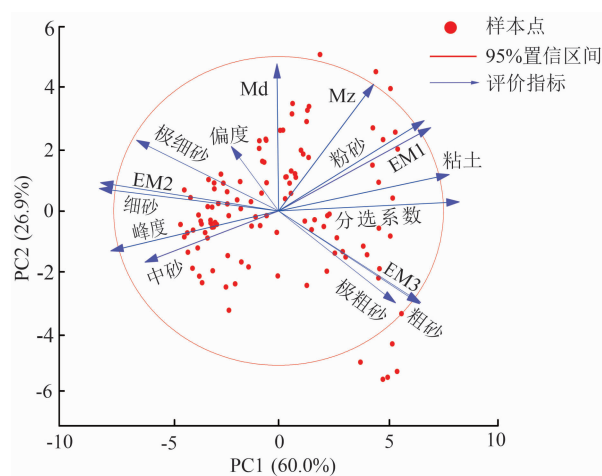


图5 FN1 钻孔粒度及参数主成分分析 (PCA)

Fig. 5 FN1 drill granularity parameters PCA

和 26.9%。主成分分析表明, EM1、EM2、EM3 分别对两个主成分都有较高的贡献率, EM1 与粘土、粉砂所指示的箭头距离较近, EM2 与极细砂、细砂对应箭头分布距离较近, EM3 与粗砂和极粗砂箭头分布较近; 而 U1~U3 地层中占比最高的分别是粘土和粉砂、极细砂和细砂、粗砂和极粗砂, 与各端元 and 不同粒径的分布对应一致, 这也表明 3 个地层在沉积过程中分别受 3 个端元所代表的主要动力控制。

4 讨论

4.1 粒度端元及沉积特征指示的环境意义

沉积过程中不同动力状况会随时间而发生改变。研究区位于海陆过渡带, 在不同地质历史时期

会受到不同搬运动力影响,形成的历史沉积环境复杂。本研究提取的 3 个粒度端元与搬运动力密切相关,能有效指示不同的动力环境条件。本研究 FN1 钻孔的 U1 层中粘土与粉砂占比大于 70%,U2 层中极细砂、细砂、中砂含量超过 60%,U3 层中粗砂与极粗砂占比大于 50%。综合图 4 和图 5 显示,U1 地层在沉积演化过程中主要受 EM1 所代表的动力控制,U2 地层主要受 EM2 所代表的动力控制,U3 地层则主要受 EM3 所代表的动力控制。EM1 是三个端元中细颗粒含量最多的组分,EM2 与 EM3 则以粗颗粒为主(表 1);且 3 个端元分别与不同粒径沉积物具有良好的相关关系,因此认为不同端元可以作为沉积搬运动力变化的指标。图 5b 可清晰显示,过去 15 ka B. P. 以来,福宁湾钻孔沉积是三种搬运动力条件下的产物。

表 1 FN1 钻孔(0~8 m)各端元粒度组成特征

Tab. 1 Characteristics of grain size composition of each end member of FN1 core (0~8 m)

端元数	粒度组成/%		
	粘土	粉砂	砂
EM1	11.64	70.20	18.16
EM2	0.26	7.81	91.93
EM3	3.96	4.97	91.06

(1)EM3 代表高能沉积条件。U3 地层中 EM3 占比最高,其粗砂与极粗砂含量达 50% 以上,判断 4.95 ka B. P. 以前以高能环境为主,但存在高能与低能的频繁波动,沉积过程中能量的变化使不同粒径颗粒混合,导致分选性变差。EM3 所代表的高能沉积环境在 U3 层使粗颗粒沉积增加,水动力增强,指示该段是相对高海平面时期。对南黄海岩芯粒度、沉积速率、TOC/TN 的研究认为,高沉积速率可能是东亚冬季风较强、沉积物搬运动力增加的结果。研究表明,闽东北沿海 3 ka B. P. 左右出现明显的海平面高峰期,5 ka B. P. 前后出现明显波动下降,全新世海侵盛期在 6 ka B. P. 前后^[42];6.7 ka B. P. ~5.6 ka B. P. 福建沿海海平面位置高于现代^[43];在 12 ka B. P. ~11 ka B. P. 福建沿海发生海侵^[44]。结合以上研究,表明在 11 ka B. P. 和 6 ka B. P. 前后福建沿海发生的海侵过程,为区域沉

积提供了高能沉积动力背景,较强的水动力使粗颗粒沉积物增加,形成 U3 层。

(2)EM2 代表中能沉积条件。该端元的沉积物以极细砂、细砂、中砂物质为主。U2 地层中 EM2 占比最高,指示在 4.95 ka B. P. ~1.44 ka B. P. 以中能沉积环境为主。图 6 表明,在 3.9 ka B. P. ~3.7 ka B. P. 期间,沉积物粒级突然变大,TOC/TN 值增至 15 左右,沉积速率显著增加。说明沉积区可能受 EAWM 影响,有机质中陆源物质输入增加,海洋物质输入减少;同时这一时期对应海平面上升阶段,夏季风活动增强,波浪运动使粗颗粒在沿海沉积,从而导致粒级突变。

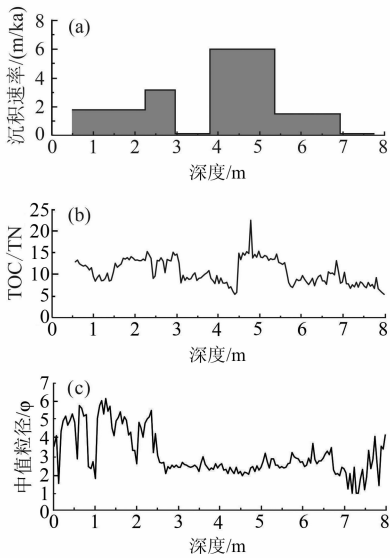


图 6 粒度特征、TOC/TN 及沉积速率

Fig. 6 Granularity characteristics, TOC/TN and deposition rate

(3)EM1 代表低能沉积条件,多沉积粘土、粉砂。U1 地层中 EM1 占比最高(图 4b),粉砂含量多(图 2),说明 1.44 ka B. P. 以来以低能环境为主,期间存在高能与低能的周期性波动。以往研究表明,滨海黄土中的细颗粒沉积物主要由西北向的冬季风自西北内陆地区搬运而来^[33,45]。已有研究结果表明,粒径区间为 14.35 ~ 230 μm 的敏感组分与东亚季风(EAM)的强度具有良好的对应关系,这一敏感组分的高值对应东亚冬季风(EAWM)的高值,两者存在显著相关性,其可作为 EAWM 的代用指标^[46]。结果表明(图 6),大约 1.44 ka B. P. 以来,TOC/TN 值呈上升趋势,沉积速率变化较为稳定,说明陆源物质增加,可能是东亚冬季风远距离搬运,带来的内陆

物质在此沉积;通过 EM1 与平均粒径的相关分析发现,二者相关系数是三个端元中最高的,因此,低能条件下形成的沉积物作为受 EAWM 影响的敏感组分,用来指示 EAWM 的变化。EAWM 较强时期陆源物质含量增加,沉积物中粉砂、粘土多,粒径较细,表明 1.44 ka B. P. 以来福宁湾海平面有相对降低的趋势,来自内陆的沉积物被冷锋和高空西风自西向东进行远距离悬浮搬运并不断在此沉积。

4.2 沉积特征记录的古气候变化

在华南海岸带,东亚季风强弱与飓风、风暴潮的产生有密切关系^[47-50]。已有对 ENSO 的研究^[47]表明, ENSO 活动频繁、强度大时,西非季风强度弱,飓风发生频率低;而 ENSO 强度小时,西非季风增强,飓风也更高频率发生。因此认为 ENSO 和季风活动等要素会影响飓风、风暴潮或热带气旋的产生。有学者在对 ENSO 与东亚季风的研究中指出^[51-53],东亚冬季风有利于东亚及中国南方地区增暖和冬季降水增加; ENSO 变化与夏季风也有密切联系,尤其是对我国南方地区降雨和台风运动轨迹的影响^[54-55]。

其研究表明,在 El Niño 强度不同的时期,登陆我国南方的台风及降水会有明显差别。钻孔所在的福宁湾区域位于我国东南沿海,属于东亚季风区和 ENSO 影响范围内,沉积物记录的信息可以作为判断环境变化的指标。为了探讨钻孔粒度特征与季风、 ENSO 之间的联系,我们选取了中国南方董哥洞石笋^[49]、广东湖光岩玛珥湖沉积物^[50];以及湖泊沉积^[48]记录的环境变化信息,与 FN1 钻孔沉积的 TOC/TN、极粗砂含量及两个指示主要动力环境的端元组分进行对比研究(图 7)。

沉积记录显示, 3.9 ka B. P. ~ 3.7 ka B. P.、1.4 ka B. P. ~ 1.2 ka B. P. 以及距今约 500 a 以来,沉积物粒度特征变幅较大,指示了百年尺度上的环境突变事件。在 3.9 ka B. P. ~ 3.7 ka B. P., 主要受 EM3 所代表的动力控制,属于高能环境。TOC/TN 值增至 20 以上,对比东亚冬夏季风与 ENSO 活动变化曲线,以及 $\delta^{18}\text{O}$ 、Ti、磁化率数值的变化,表明该段冬季风势力强,带来更多陆源物质沉积。已有研究指出,浙闽沿岸流的强度对东亚冬季风与夏季风的

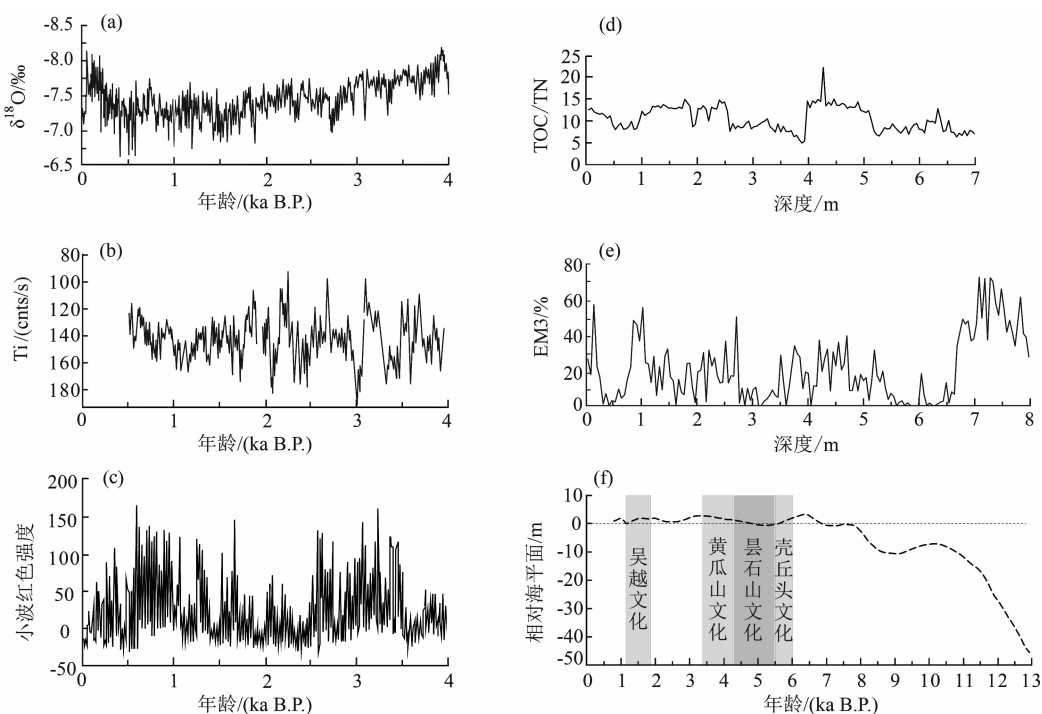


图 7 环境指标与 FN1 钻孔粒度参数对比:

(a) 距今 4000 年来董哥洞石笋记录的东亚夏季风记录^[55]; (b) 湖光岩玛珥湖沉积柱记录的东亚冬季风记录^[56];
(c) ENSO 变化记录^[54]; (d) TOC/TN; (e) EM3 占比; (f) 钻孔年代及闽北海平面变化^[27]

Fig. 7 Comparison of environmental indicators and FN1 drilling grain size parameters: (a) records of EASM in Dongge

Cave dating back 4000 years^[55]; (b) EAWM records of the sedimentary column in Lake Huguang Maar^[56];

(c) ENSO change records^[54]; (d) TOC / TN; (e) EM3 ratio; (f) age of drilling and sea level change of North Fujian^[27]

强弱变化有一定响应^[56]。东部沿海陆架的沉积物也受沿岸海流和波浪影响^[57]。极粗砂含量突然增大,可能是来自东南方向的夏季风势力增加,使福建沿海地区降水增加,且此时正处于海平面升高时期,同时在太平洋潮波系统作用下使粗颗粒不断沉积。已有研究也认为东亚冬季风与夏季风的相互作用对亚轨道时间尺度上快速气候波动有所影响^[58]。可以认为,ENSO 活动较平缓、冬季风与夏季风都渐强的时期,陆源物质和极粗砂含量较高。在 1.4 ka B. P.~1.2 ka B. P., EM1 占比迅速下降, EM3 达到 50% 以上, TOC/TN 值与极粗砂含量呈明显增长趋势,表明沉积动力增强,带了更多粗颗粒的沉积物。同时,季风状态较稳定, ENSO 活动弱。距今约 500 a 以来,夏季风呈现明显快速增强的趋势,我国南方沿海地区受海浪作用影响,粗颗粒沉积物可能会明显增多。由图 7 得出, EM3 占比均迅速增加,表明该段以高能沉积环境为主。

沉积物粒度特征记录的可能发生风暴潮时期与东亚季风、ENSO 活动记录基本吻合(图 7)。东亚冬季风增强,陆源物质含量高;而来自南部的夏季风作为高能环境产生的条件,大大增加了粗颗粒的含量。我国东南部气候对东亚季风变化有极为敏感的响应,结合 ENSO 和季风变化曲线,可以进一步证明在 3.9 ka B. P.~3.7 ka B. P.、1.4 ka B. P.~1.2 ka B. P. 以及距今约 500 年这三个时段,华南沿海地区可能受较大风暴潮事件影响,沉积环境剧烈变化,使沉积物粒度特征产生突变。自然环境是人类文化发展演变的基础,不同文化的更替与人类活动区域的迁移对地理环境变化有着一定响应,生存环境的突变会造成人类活动区域的改变。参考前人对福建海平面变化及环境考古的研究发现^[27,42,59],福建沿海的黄瓜山文化、壳丘头文化、昙石山文化的产生和更替与海平面波动有关,海面升降极有可能在人类生产和迁徙中发挥重要作用。具体来说,霞浦 FN1 钻孔所在的闽东北史前文化可以大致与 7 ka B. P. 以来的海平面上升期相对应(图 7h)。黄瓜山文化繁荣时期(约 4.3 ka B. P.~3.5 ka B. P.)对应于高海面,可能迫使古人向陆地迁徙,并促进海洋经济发展,例如捕捞、狩猎、造船等。但期间出现的气候突变事件,台风、风暴潮等可能会导致极短时间内文化的消失或更替。ENSO 活动较弱、东亚冬季风和夏季风强盛,这样的气候系统可能会使我国东南沿海风暴

潮频发,对该地区人类生活居住产生威胁,从而影响区域人类活动的范围和强度。以上特征表明,沉积物粒度和 TOC/TN 等信息有着作为区域人类活动和环境演变证据的潜力。

5 结论

利用端元分析方法对福建霞浦福宁湾 FN1 钻孔(0~8 m)沉积物粒度数据进行组分提取,筛选出 3 个敏感组分代表不同沉积动力和环境,结合 OSL 测年结果和 TOC/TN 等指标,探讨 15 ka 以来的区域环境演变过程。

(1)分选出的三个粒度端元具有明确的环境指示意义。EM3 代表高能沉积条件,主要由粒径较粗的颗粒组成,是区域水动力增强、海侵过程中对沉积物进行搬运的结果。EM2 代表中能沉积条件,期间受东亚季风等气候系统变化影响,沉积速率突然升高。EM1 代表低能沉积条件,以粉砂为主,陆源物质占比增加,是受冬季风影响的敏感组分,可指示季风强度变化。高能与低能条件的频繁变化使沉积过程变得复杂,形成海陆过渡相。

(2)沉积物粒度有记录古气候演变过程中台风或风暴潮的潜力。其中,3.9 ka B. P.~3.7 ka B. P.、1.4 ka B. P.~1.2 ka B. P. 以及距今约 500 a 以来受不同沉积动力影响,沉积物粒度和 TOC/TN 值出现突变现象,结合东亚季风与 ENSO 变化记录,发现这种突变现象可能是华南沿海在该时段频繁发生台风和风暴潮的响应。短时间内地理环境的剧烈变化对该区域人类活动有显著影响,粒度变化信息在研究区域史前人类活动和环境演变方面有很大潜力。同时,华南沿海地区的台风活动或风暴潮等极端气候事件与区域史前人类活动特征之间的关系也值得进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 吴正, 吴克则, 黄山, 等. 华南沿海全新世海岸沙丘研究[J]. 中国科学(B 辑: 化学, 生命科学, 地学), 1995(2): 211-218. [WU Zheng, WU Keze, HUANG Shan, et al. Study on Holocene coastal sand dunes off south China coast [J]. Science in China (Series B: Chemistry, Life, Sciences Geoscience), 1995(2): 211-218]
- [2] 杨建明. 福建沿海晚第四纪泥炭形成的分期及其与气候、海面变化的关系[J]. 热带海洋, 1992, 11(1): 45-51. [YANG

- Jianming. The phases of peat formation and their relationships to climatic and sea-level changes in coastal area of Fujian during Late Quaternary [J]. *Tropic Oceanology*, 1992, **11**(1): 45–51]
- [3] 赵倩. 福建东部沿海流水剖面砂质沉积地球化学特征及其古环境意义[D]. 福州: 福建师范大学, 2013: 7–18. [ZHAO Qian. Geochemical characteristics of the coastal sandy deposition and its paleoenvironment significance from liushui profile, eastern coast of Fujian province [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013: 7–18]
- [4] 龚松柏, 李志忠, 苏晓玲, 等. 福建漳浦六鳌半岛海岸沙丘记录的风沙气候变化[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2014, **48**(3): 448–455. [GONG Songbai, LI Zhizhong, SU Xiaoling, et al. The sandstorm climate change indicated by coastal dune at Liuaop peninsula of Zhangpu county in Fujian province [J]. *Journal of Huazhong Normal University (Natural Science)*, 2014, **48**(3): 448–455] DOI: 10.19603/j.cnki.1000–1190.2014.03.028
- [5] 于俊杰, 彭博, 兰佑, 等. 孢粉证据揭示 MIS5a 以来福建东北沿海地区人类活动、海平面及气候变化[J]. 地球科学, 2021, **46**(1): 281–292. [YU Junjie, PENG Bo, LAN You, et al. Palynological record revealed anthropogenic deforestation, sea level and climate changes since Marine Isotope Stage 5a in the northeastern coast of Fujian province [J]. *Earth Science*, 2021, **46**(1): 281–292] DOI: 10.3799/dqkx.2019.264
- [6] 马明明, 刘秀铭, 周国华, 等. 福建沿海地区晚第四纪海侵研究进展及存在的问题[J]. 亚热带资源与环境学报, 2016, **11**(3): 9–19. [MA Mingming, LIU Xiuming, ZHOU Guohua, et al. A review of late quaternary transgression studies and some basic questions in Fujian coastal area [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2016, **11**(3): 9–19] DOI: 10.19687/j.cnki.1673–7105.2016.03.002
- [7] ROLETT B V, ZHENG Z, YUE Y F. Holocene sea-level change and the emergence of Neolithic seafaring in the Fuzhou basin (Fujian, China) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, **30**(7): 788–797. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.01.015
- [8] WANG Z H, RYVES D B, SHAO L, et al. Middle Holocene marine flooding and human response in the south Yangtze coastal plain, east China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, **187**: 80–93. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.03.001
- [9] LI Pingyuan, LI Mingkun, GAN Huayang, et al. A preliminary study on sediment records of possible typhoon in the northern South China Sea during the past 6500 yr [J]. *The Holocene*, 2021, **31**(7): 1221–1228. DOI: 10.1177/09596836211003229
- [10] 赵松, 常凤鸣, 李铁刚, 等. 粒度端元法在东海内陆架古环境重建中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, **37**(3): 187–196. [ZHAO Song, CHANG Fengming, LI Tiegang, et al. The application of grain-size end member algorithm to paleoenvironmental reconstruction on inner shelf of East China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2017, **37**(3): 187–196] DOI: 10.16562/j.cnki.0256–1492.2017.03.019
- [11] 白雪, 杨振京, 毕志伟, 等. 银川盆地第四纪沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 山地学报, 2017, **35**(6): 874–881. [BAI Xue, YANG Zhenjing, BI Zhiwei, et al. Grain size characteristics and its depositional environment of Quaternary sediments in Yinchuan Plain, northwest China [J]. *Mountain Research*, 2017, **35**(6): 874–881] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000289
- [12] LI Yunhai, LI Haidong, QIAO Lei, et al. Storm deposition layer on the Fujian coast generated by Typhoon Saola (2012) [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**(1): 14904. DOI: 10.1038/srep14904
- [13] HARRIS C K, WIBERG P. Across-shelf sediment transport: Interactions between suspended sediment and bed sediment [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, **107**(C1): 3008. DOI: 10.1029/2000JC000634
- [14] 高文婷, 王斌, 彭俊, 等. 腾格里沙漠南缘风积物粒度空间分布及物源指示[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(6): 129–137. [GAO Wenting, WANG Bin, PENG Jun, et al. Spatial distribution of granularity parameter and provenance indication of aeolian deposits on the southern margin of the Tengger Desert [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(6): 129–137] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.06.029
- [15] 肖春晖, 王永红, 林间. 近 1 Ma 以来帕里西维拉海盆沉积物物源和古气候: 粒度和黏土矿物特征的指示[J]. 沉积学报, 2022, **40**(2): 508–524. [XIAO Chunhui, WANG Yonghong, LIN Jian. Provenance and paleoclimate of sediments in the Parece Vela Basin in past 1 Ma: Inferences from grain-size and clay mineral distribution [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, **40**(2): 508–524] DOI: 10.14027/j.issn.1000–0550.2020.091
- [16] 文星跃, 吴勇, 黄成敏, 等. 岷江上游晚更新世黄土粒度与元素组成特征及其物源指示意义[J]. 山地学报, 2019, **37**(4): 488–498. [WEN Xingyue, WU Yong, HUANG Chengmin, et al. Grain size and elements composition characteristics and their implications for provenance of the Late Pleistocene Loess in the upper reaches of the Minjiang River, China [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(4): 488–498] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000441
- [17] 王斌, 曾琳, 赵万苍, 等. 对黄土高原风尘搬运动力与沉积控制因素的新认识[J]. 中国沙漠, 2017, **37**(2): 237–246. [WANG Bin, ZENG Lin, ZHAO Wancang, et al. New research progress of the transport dynamics and the accumulation factor of the aeolian dust in Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Desert Research*, 2017, **37**(2): 237–246] DOI: 10.7522/j.issn.1000–694X.2017.00035
- [18] 何继山, 梁杏, 李静, 等. 天津滨海平原区深孔沉积物环境敏感粒度提取及其意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, **40**(7): 1215–1225. [HE Jishan, LIANG Xing, LI Jing, et al. Environmentally sensitive grain-size extraction of deep hole

- sediment from Tianjin costal plain and its significance [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2015, **40** (7): 1215 – 1225] DOI: 10.3799/dqkx.2015.101
- [19] 张晓东, 季阳, 杨作升, 等. 南黄海表层沉积物粒度端元反演及其对沉积动力环境的指示意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, **45** (10): 1515 – 1523. [ZHANG Xiaodong, JI Yang, YANG Zuosheng, et al. End member inversion of surface sediment grain size in the South Yellow Sea and its implications for dynamic sedimentary environments [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, **45** (10): 1515 – 1523] DOI: 10.1007/s11430-015-5165-8
- [20] DING Yihui, CHAN J C L. The East Asian summer monsoon: An overview [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2005, **89** (1-4): 117 – 142. DOI: 10.1007/s00703-005-0125-z
- [21] 孙丹丹, 刘平, 张杰, 等. 基于沉积成因地化元素指标的闽北海湾晚更新世海侵地层辨识及其意义[J]. *古地理学报*, 2022, **24** (1): 139 – 151. [SUN Dandan, LIU Ping, ZHANG Jie, et al. Identification and significance of the Late Pleistocene Transgressive strata in the bays of northern Fujian province based on geochemical element indicators of sedimentary origin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2022, **24** (1): 139 – 151] DOI: 10.7605/gdxb.2022.01.011
- [22] 童永福. 福建省第四系沉积概况[J]. *第四纪研究*, 1985(1): 99 – 106. [TONG Yongfu. An outline of the Quaternary deposits of Fujian province [J]. *Quaternary Sciences*, 1985(1): 99 – 106]
- [23] YUE Yuanfu, ZHENG Zhuo, ROLETT B V, et al. Holocene vegetation, environment and anthropogenic influence in the Fuzhou Basin, southeast China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, **99**: 1 – 48. DOI: 10.1016/j.jseas.2014.12.004
- [24] 郑荣章, 陈桂华, 徐锡伟, 等. 福州盆地埋藏晚第四纪沉积地层划分[J]. *地震地质*, 2005, **27** (4): 556 – 565. [ZHENG Rongzhang, CHEN Guihua, XU Xiwei, et al. Strata division of buried Late Quaternary of Fuzhou Basin [J]. *Seismology and Geology*, 2005, **27** (4): 556 – 565]
- [25] 马明明, 葛伟亚, 李春海, 等. 福建霞浦钻孔沉积物记录的约 7800a BP 以来海平面波动的磁学响应[J]. *第四纪研究*, 2016, **36** (5): 1307 – 1318. [MA Mingming, GE Weiya, LI Chunhai, et al. Magnetic responses to sea-level fluctuations since about 7800a B. P. recorded by core sediments at Xiapu, Fujian [J]. *Quaternary Sciences*, 2016, **36** (5): 1307 – 1318] DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2016.05.24
- [26] 王雨灼. 福建省第四纪地层的划分[J]. *福建地质*, 1990(4): 289 – 306. [WANG Yuzhuo. The classification of Quaternary strata in Fujian province [J]. *Geology of Fujian*, 1990(4): 289 – 306]
- [27] JIN Jianhui, HUANG Yunming, LI Zhizhong, et al. Optically stimulated luminescence dating of coastal sediments at Funing Bay, southeastern China [J]. *Geochronometria*, 2019, **46** (1): 15 – 24. DOI: 10.1515/geochr-2015-0103
- [28] REN Yongqing, JIN Jianhui, HUANG Yunming, et al. Chronology of Last Glacial Maximum sediments in the coast of Fujian, south China [J]. *Marine Geology*, 2022, **451**: 106884. DOI: 10.1016/j.margeo.2022.106884
- [29] MEYERS P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter [J]. *Chemical Geology*, 1994, **114** (3-4): 289 – 302. DOI: 10.1016/0009-2541(94)90059-0
- [30] MEYERS P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, **27** (5-6): 213 – 250. DOI: 10.1016/S0146-6380(97)00049-1
- [31] MEYERS P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, **34** (2): 261 – 289. DOI: 10.1016/S0146-6380(02)00168-7
- [32] 程良清, 宋友桂, 李越, 等. 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[J]. *沉积学报*, 2018, **36** (6): 1148 – 1156. [CHENG Liangqing, SONG Yougui, LI Yue, et al. Preliminary application of grain size end member model for dust source tracing of Xinjiang Loess and Paleoclimate reconstruction [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, **36** (6): 1148 – 1156] DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.087
- [33] 王思齐, 魏东岚, 张威. 末次冰期以来辽东半岛风沙沉积的粒度端元特征与古气候演变研究[J]. *第四纪研究*, 2022, **42** (2): 338 – 349. [WANG Siqi, WEI Donglan, ZHANG Wei. The end-member characteristics of the grain size of the aeolian sand deposits in the Liaodong Peninsula since the last glacial period and the study on paleoclimate evolution [J]. *Quaternary Sciences*, 2022, **42** (2): 338 – 349] DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2022.02.02
- [34] 韩鹏, 刘兴起. 内蒙古中东部查干湖流域 7000 年以来的气候演变[J]. *第四纪研究*, 2017, **37** (6): 1381 – 1390. [HAN Peng, LIU Xingqi. The climate evolution inferred from Chagan-Nuur in middle-east part of Inner Mongolia since the last 7000 years [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, **37** (6): 1381 – 1390] DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2017.06.20
- [35] 聂军胜, 李曼. 柴达木盆地晚中新世河湖相沉积物粒度组成及其古环境意义[J]. *第四纪研究*, 2017, **37** (5): 1017 – 1026. [NIE Junsheng, LI Man. A grain size study on Late Miocene Huaitoutala section, Ne Qaidam Basin, and implications for Asian monsoon evolution [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, **37** (5): 1017 – 1026] DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2017.05.09
- [36] 岳保静, 刘金庆, 刘健, 等. 渤海西缘 YRD-1101 孔晚更新世以来沉积物粒度特征及其环境变迁[J]. *中国地质*, 2020, **47** (3): 853 – 867. [YUE Baojing, LIU Jinqing, LIU Jian, et al. Grain size distribution of sediment of core YRD-1101 in the western

- margin of the modern Bohai Sea since the latest Pleistocene and its environmental change [J]. *Geology in China*, 2020, **47** (3): 853–867. DOI: 10.12029/gc20200321
- [37] ZHANG Xiaodong, WANG Hongmin, XU Shumei, et al. A basic end-member model algorithm for grain-size data of marine sediments [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, **236**: 106656. DOI: 10.1016/j. eccss. 2020. 106656
- [38] PEARSON K. Notes on the History of Correlation [J]. *Biometrika*, 1920, **13**(1): 25–45. DOI: 10.1130/GSAB–25–655
- [39] UDDEN J A. Mechanical composition of clastic sediments [J]. *Bulletin of the geological society of America*, 1914, **25**(1): 655–744.
- [40] WENTWORTH C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1922, **30**(5): 377–392. DOI: 10.1086/622910
- [41] 皮仲, 李铁刚, 南青云. 中全新世以来南黄海岩心记录的沉积环境演变对东亚季风的响应[J]. *海洋地质前沿*, 2016, **32**(7): 1–10. [PI Zhong, LI Tiegang, NAN Qingyun. Environmental changes since Mid Holocene revealed by core Z1 in the South Yellow Sea and their response to East Asian monsoon [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, **32**(7): 1–10] DOI: 10.16028/j. 1009–2722. 2016. 07001
- [42] 曾从盛. 闽东北沿海晚第四纪海侵与海面变动[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 1997, **13**(4): 94–101. [ZENG Congsheng. Transgressions and sea level changes along the northeast coast of Fujian during the Late Quaternary [J]. *Journal of Fujian Teachers University (Natural Science)*, 1997, **13**(4): 94–101]
- [43] 王绍鸿, 杨建明, 曾从盛, 等. 福建沿海晚更新世以来的海平面变化[J]. *台湾海峡*, 1994, **13**(2): 166–175. [WANG Shaohong, YANG Jianming, ZENG Congsheng, et al. Sea level changes since Late Pleistocene along Fujian coast [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1994, **13**(2): 166–175]
- [44] 童永福, 徐书勇. 福建省沿海第四系与活动构造[J]. *福建地质*, 1989(2): 81–99. [TONG Yongfu, XU Shuyong. The Quaternary and active fault in coastal area of Fujian [J]. *Geology of Fujian*, 1989(2): 81–99]
- [45] VANDENBERGHE J. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, **121**: 18–30. DOI: 10.1016/j. earscirev. 2013. 03. 001
- [46] ZHANG Xilin, FAN Dejiang, TIAN Yuan, et al. Quantitative reconstruction of the East Asian Winter Monsoon evolution over the past 100 years: Evidence from high-resolution sedimentary records of the inner continental shelf of the East China Sea [J]. *The Holocene*, 2020, **30**(7): 1–10. DOI: 10.1177/0959683620908661
- [47] DONNELLY J P, WOODRUFF J D. Intense hurricane activity over the past 5,000 years controlled by El Nino and the West African monsoon [J]. *Nature*, 2007, **447**(7143): 465–468. DOI: 10.1038/nature05834
- [48] MOY C M, SELTZER G O, ROBBELL D T, et al. Variability of El Nino/ Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch [J]. *Nature*, 2002, **420**(6912): 162–165. DOI: 10.1038/nature01194
- [49] WANG Yongjin, CHENG Hai, EDWARDS R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate [J]. *Science*, 2005, **308**(5723): 854–857. DOI: 10.1126/science. 1106296
- [50] YANCHEVA G, NOWACZYK N R, MINGRAM J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon [J]. *Nature*, 2007, **445**(7123): 74–77. DOI: 10.1038/nature05431
- [51] WANG Bin, WU Renguang, FU Xiuhua. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *American Meteorological Society*, 2000, **13**: 1517–1536. DOI: 10.1175/1520–0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2
- [52] WANG Bin, ZHANG Qin. Pacific-East Asian teleconnection. Part II: How the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development [J]. *Journal of Climate*, 2002, **15**: 3252–3265. DOI: 10.1175/1520–0442(2002)015<3252:PEATPI>2.0.CO;2
- [53] 巢纪平, 张人禾. 热带海气相互作用波及其不稳定性[J]. *气象学报*, 1990, **48**(1): 46–54. [CHAO Jiping, ZHANG Renhe. The air-sea interaction waves in the tropics and their instabilities [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, **48**(1): 46–54]
- [54] FENG Juan, CHEN Wen. Interference of the East Asian winter monsoon in the impact of ENSO on the East Asian summer monsoon in decaying phases [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, **31**(2): 344–354. DOI: 10.1007/s00376–013–3118–8
- [55] WANG Chunzai, WANG Xin. Classifying El Nino Modoki I and II by different impacts on rainfall in southern China and typhoon tracks [J]. *Journal of Climate*, 2013, **26**(4): 1322–1338. DOI: 10.1175/JCLI–D–12–00107.1
- [56] 潘爱军, 万小芳, 郭小钢, 等. 平潭岛外海浙闽沿岸流对2006年冬季风松弛的响应特征与机理[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, **42**(9): 1317–1328. [PAN Aijun, WAN Xiaofang, GUO Xiaogang, et al. Responses of the Zhe-Min coastal current adjacent to Pingtan Island to the wintertime monsoon relaxation in 2006 and its mechanism [J]. *Science China: Earth Science*, 2012, **42**(9): 1317–1328] DOI: 10.1007/s11430–012–4429–9
- [57] 王中波, 杨守业, 张志珣, 等. 东海陆架中北部沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. *海洋与湖沼*, 2012, **43**(6): 1039–1049. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, ZHANG Zhixun, et al. The grain size compositions of the surface sediments in the East China Sea: Indication for sedimentary environments [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, **43**(6): 1039–1049]

- [58] 管清玉, 潘保田, 邬光剑, 等. 末次冰期东亚季风快速波动的模式与成因[J]. 沉积学报, 2007, **25**(3): 429–436. [GUAN Qingyu, PAN Baotian, WU Guangjian, et al. East Asian monsoon pattern and cause of rapid climate fluctuations during the last glacial [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, **25**(3): 429–436] DOI: 10.14027/j.cnki.cjxb.2007.03.015
- [59] 曾从盛. 福建沿海全新世海平面变化[J]. 台湾海峡, 1991, **10**(1): 77–84. [ZENG Congsheng. Sea level variation along Fujian coast in Holocene [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1991, **10**(1): 77–84]

Grain Size Characteristics of Boreholes in Funing Bay, China and Their Environmental Indications since the Last Deglaciation Period

HOU Chenyang^{a,b}, JIN Jianhui^{a,b*}, QIU Junjie^{a,b}, WEI Junjie^{a,b}, XU Daiyu^{a,b}

(*a. Key Laboratory for Subtropical Resources and Environment, Fuzhou 350007;*

b. School of Geographical Sciences, Fuzhou 350108, Fujian Normal University, China)

Abstract: As the key zone of sea-land-air interaction, the coastal zone of South China has developed coastal sediments with a scale of thousands of years in evolution history, which is an important carrier to accurately record the regional paleoenvironment changes under the sea-land-air interaction. There were lots of scientific discussion about coastal sediments of South China in association with sea level fluctuation on a long-term scale, but hardly involving with short-term paleoclimatic events which may be recorded by granularity information in the coastal sediments on a particle-size scale. Because short-duration paleoclimate events occurred in a short time and their occurrences were difficult to be accurately determined, and available material carriers and proxy indicators in sediments, all of which prevented scientists from comprehensively interpreting and understanding paleoclimate and paleoanthropology.

Sediment grain size is an effective index for paleoenvironment reconstruction. The granularity end-member analysis (EMA) method can isolate sensitive components from complex granularity data and is widely used in paleoclimate research.

In this study, the 0–8 m segment of samples at FN1 borehole in Funing Bay, Xiapu, Fujian was selected for test. Based on photoluminescence dating scale, and sediment granularity as main environmental proxy index, it elucidates the characteristics of sediment grain size by means of end-member analysis, principal component analysis and correlation analysis; then by combined with the change of TOC/TN content, it discussed the significance of environmental indication.

It found that (1) The sediments from 0–8 m in the borehole were dominated by silt, with widely fluctuated percentage content of each grain size in different sedimentary phases. And it can be divided into three sections (U1, U2 and U3) according to the grain size trend and the curve of grain size parameters. (2) Three end-members were selected for analysis by BasEMMA method. Among them, EM1 represented low-energy deposition conditions, dominated by fine silt, which was a sensitive to East Asia winter monsoon (EAWM), a indicative of intensity of EAWM. EM2 represented medium-energy deposition conditions, suggesting possible mutations in grain size, TOC/TN and deposition rate. Due to East Asian monsoon, it brought out an increase in terrigenous geomaterial. EM3 represented high-energy deposition conditions, manifested as enhanced regional hydrodynamics

and increased sediment coarse-grained content. Frequent shifts in high-energy and low-energy conditions complicated sedimentary processes and formed sea-land transition phase. (3) From 3.9 ka B. P. to 3.7 ka B. P. , from 1.4 ka B. P. to 1.2 ka B. P. and about 500 years ago, the grain size and TOC/TN of sediments changed significantly. By comparison with previous studies on East Asian monsoon and ENSO changes, it revealed that abrupt changes in environmental proxies was closely related to the frequency of storm surges occurring along the coast of South China in the same period, which might pose a serious threat to habitation in the region, and consequently affected the regional cultural succession, suggesting that characteristics such as sediment grain size characteristics and changes in the content of TOC/TN have the potential to be indicative of regional human activities and environmental evolution.

This study can support paleoenvironmental reconstruction and human cultural studies for the coastal zone of South China.

Key words: grain size; end-member analysis (EMA); environmental evolution; Funing Bay

(责任编辑 李嵘)