

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.01.003

引用格式:于俊杰,刘平,林丰增,等.福建三沙湾 90 ka 以来沉积物来源及环境演变研究[J].华东地质,2022,43(1):30-39.(YU J J, LIU P, LIN F Z, et al. Sediment sources and environment evolution since 90 ka in Sansha Bay, Fujian Province[J]. East China Geology, 2022, 43(1): 30-39.)

## 福建三沙湾 90 ka 以来沉积物来源及环境演变研究

于俊杰<sup>1</sup>, 刘平<sup>2</sup>, 林丰增<sup>3</sup>, 王继龙<sup>1</sup>, 丁大林<sup>4</sup>, 彭博<sup>1</sup>, 武彬<sup>1</sup>, 劳金秀<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;

3. 宁德市自然资源局, 福建 宁德 352100; 4. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

**摘要:** 三沙湾是福建省最大的海湾,也是中国东部典型的基岩半封闭海湾,其冲淤变化受山溪性河流和潮汐输运泥沙量变化影响,明确物源演变特征对于研究湾内沉积演化趋势具有重要意义。以三沙湾 NDGK2 钻孔为研究对象,在前期地层序列和年代框架研究的基础上,通过重矿物和地球化学特征揭示 90 ka 以来的物源演变特征,进一步揭示三沙湾在全球气候海平面波动下的环境演变规律。重矿物分析显示:MIS5、MIS3 和 MIS1 高海面阶段以自生矿物为主,锆石含量相对较低,ZTR 指数较低;MIS4 和 MIS2 低海面阶段以褐铁矿为主,锆石含量相对较高,ZTR 指数较高。主量元素和微量元素地球化学特征显示:MIS5、MIS3 和 MIS1 高海面阶段 Ti、Ba、Ni 含量相对较高;MIS4 和 MIS2 低海面阶段 Ni、Ba 含量相对较低。重矿物特征及地球化学指标揭示了 90 ka 以来高海面阶段悬浮泥沙主要来源于潮流输入的海域泥沙,低海面阶段泥沙主要来源于亚热带气候下以霍童溪为代表的当地河流。相比内陆地区,沉积物物源指标及孢粉组合特征均表明宁德地区对全球降温事件的响应并不敏感,冰期河流仍较发育。轨道时间尺度上,相比陆源物质输入,海平面上升才是三沙湾泥沙淤积的关键影响因素。

**关键词:** 重矿物;地球化学;三沙湾;物源;海平面变化

**中图分类号:** P67

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2022)01-030-10

三沙湾位于福建省东北部,属于基岩型半封闭海湾<sup>[1]</sup>,是世界级天然深水良港和中国著名的大黄鱼产卵场。三沙湾东临东海,与台湾隔海相望,是福建海峡西岸经济区的重要组成部分。近些年来,三沙湾自然及生态环境一直备受关注,相关研究主要聚焦在水体环境生态风险评估方面<sup>[2-4]</sup>。20 世纪 80 年代以来,受流域绿化、水利工程和海湾围垦工程的影响,湾内河流泥沙量和自然潮滩面积减少,侵蚀和淤积有所调整,这关系到湾内岸线及海域的科学规划及管理<sup>[5]</sup>。在当前冲淤调整背景下,从长时间尺度掌握物质来源演变机理,对于未来海湾应对全球变化和人类活动带来的挑战具有重要意义。

三沙湾口小腹大,湾内波浪作用小,以潮汐作

用为主,涨潮历时大于落潮历时,每日纳潮量约  $27 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[6]</sup>,十余条山溪性河流注入三沙湾,年径流量约 100 亿  $\text{m}^3$ 。20 世纪 70 年代,三沙湾年平均输沙量 34.5 万 t,近些年来已减少至 20 万 t。严肃庄等<sup>[6]</sup>通过重矿物分析,发现湾内表层沉积物中粗颗粒物质主要来源于陆地径流,细颗粒由潮流从外海输入。目前,三沙湾内地质历史时期海陆相互作用下泥沙来源仍不清楚。已有研究<sup>[7]</sup>表明,三沙湾内第四纪沉积物厚度较薄,大多  $< 100 \text{ m}$ ,在晚更新世以来中国东部大规模海侵(MIS 5 海侵、MIS3 海侵和 MIS1 海侵)的影响下,保存了近 10 万年以来海陆相互作用的沉积记录。丁大林<sup>[7]</sup>、于俊杰等<sup>[8]</sup>对 NDGK2 钻孔开展了年代学、孢粉学和地层学研究,确立了年代地层框架和气候地层框架。本文在

\* 收稿日期:2021-09-06 修订日期:2021-12-27 责任编辑:谭桂丽

基金项目:中国地质调查局“宁德海岸带陆海统筹综合地质调查(编号:DD20189505)”项目资助。

第一作者简介:于俊杰,1983 年生,男,高级工程师,硕士,主要从事第四纪地质调查与研究工作。Email:25320701@qq.com。

上述研究的基础上,基于重矿物和地球化学分析结果进一步揭示三沙湾地区物源及沉积环境演变规律,为入海泥沙减少背景下海湾冲淤规律研究提供理论依据,从多指标地层划分角度探讨三沙湾第四系典型层序特征,为区域水文地质、工程地质建立地层标准提供依据。

## 1 区域地质及环境地质特征

### 1.1 区域地质特征

三沙湾地处武夷—云开造山系东部,自元古代以来,经历了多次岩浆活动和火山作用。其中以侏罗纪—白垩纪岩浆侵入和火山喷发最为强烈。地表出露的岩石大多数是花岗岩、花岗闪长岩、花岗斑岩及凝灰岩、凝灰熔岩、流纹岩、英安岩等酸性、中酸性岩浆岩,副矿物中磁铁矿、锆石等较丰富。

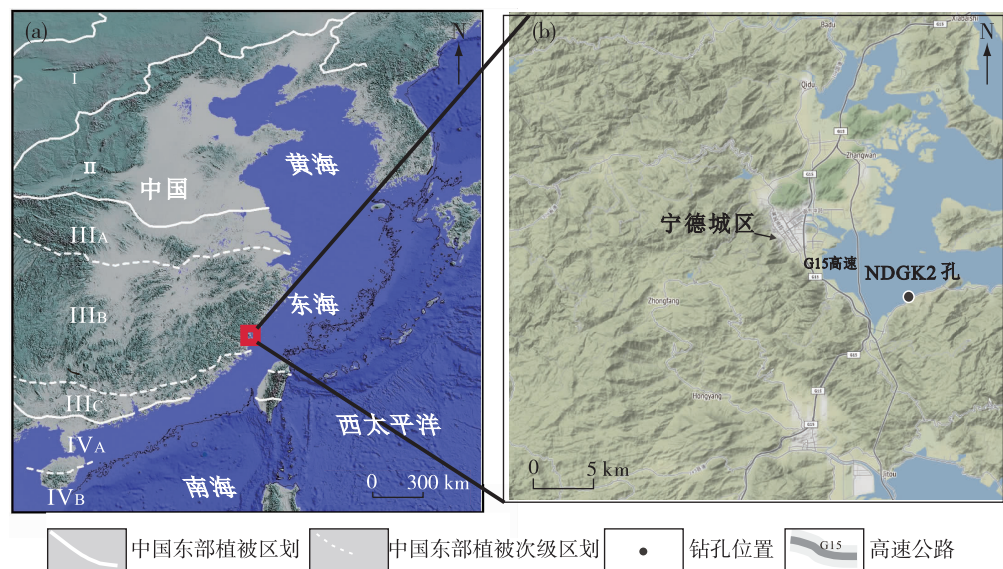
### 1.2 环境地质特征

三沙湾位于福建省东北部霞浦、福安、宁德、罗源等市县间,是由东冲半岛和鉴江半岛环抱而成的海湾。湾口东有西洋岛等屏障,东西长 45 km,南北宽 25 km,面积约 714 km<sup>2</sup>。湾内三都澳为著名的

深水良港。三沙湾周边被群山环抱,出水口只有唯一的东冲口水道,宽 < 3 km<sup>[6]</sup>。三沙湾属于亚热带海洋性季风气候,冬暖夏凉;降水丰富,气候湿润;夏季最长,秋季最短;气候资源丰富,气象灾害频繁。原生森林植被为常绿阔叶林,隶属于中国三大植被区域中的中国东部湿润森林区,属于中国植被区划中的中亚热带常绿阔叶林地带<sup>[9]</sup>,在福建省植被区划中为跨南亚热带雨林带和中亚热带阔叶林地带<sup>[10]</sup>。三沙湾拥有条件良好的临港沿岸开发腹地和丰富的非金属矿石、海洋渔业、淡水、水能和旅游资源,水资源总量约 150 亿 m<sup>3</sup>,水能理论蕴藏量 225 万 kW。

## 2 钻孔岩性和年代框架

NDGK2 钻孔位于三沙湾南部(地理坐标:26°36′24.89″N, 119°38′10.28″E,图 1),总长 95 m。钻孔下部 57~95 m 由强-中等风化基岩和残积黏土组成,钻孔上部 0~57 m 为第四纪松散沉积物。笔者前期对该孔上部 54.7 m 岩心进行了 AMS <sup>14</sup>C 测年、OSL 测年和孢粉学分析,确立了年代地层框架和气候地层框架<sup>[8]</sup>。



I. 温带草原; II. 温带落叶阔叶林; III<sub>A</sub>. 北亚热带常绿-落叶阔叶混交林; III<sub>B</sub>. 中亚热带常绿阔叶林; III<sub>C</sub>. 南亚热带常绿阔叶林; IV<sub>A</sub>. 北热带季雨林和热带雨林; IV<sub>B</sub>. 南热带季雨林和热带雨林; (a) 中红框表示福建省宁德市地理位置

图 1 中国东部植被区划图<sup>[8]</sup> (a) 及钻孔位置示意图 (b)

Fig. 1 Vegetation zone in eastern China (a) <sup>[8]</sup> and NDGK2's location (b)

该孔自下而上沉积序列及年代框架如图 2 所示。  
(1) 54.7~57 m, 砾石层, 粒径达卵石级别, 磨

圆度较好、分选性较差。根据年代框架, 推断属于 MIS6 期。

(2) 53.3~54.7 m, 灰色黏土, 软塑, 刀切面较光滑, 含丰富的沟鞭藻。

(3) 38.5~53.3 m, 上部和下部均为灰蓝色硬黏土, 中间层见软塑的蓝灰色黏土及含砾粗砂, 孢粉和藻类匮乏。

由于该孔下部地层(54.7~38.5 m)OSL 测年结果出现多个倒转, 无法确切标定地层年龄, 仅推测大致的年龄为距今 9~6 万年。其中 2 层中丰富的海相沟鞭藻指示了高海面, 推断对应 MIS5 全球性高海面阶段; 3 层孢粉和藻类的匮乏反应冷期稀

疏植被特征, 推断时代对应 MIS4 阶段。

(4) 32~38.5 m, 灰色黏土, 与下伏地层突变接触, 沟鞭藻丰富, 33.1 m 处 AMS<sup>14</sup>C 测年结果约 40 ka, 应属于 MIS3。

(5) 26.5~32 m, 杂色硬黏土, 与下伏地层突变接触, 孢粉藻类匮乏, 31.85 m 处 AMS<sup>14</sup>C 测年结果约 18 ka, 属于 MIS2 期。

(6) 0~26.5 m, 深灰色淤泥质黏土, 见贝壳和植物碎屑, 沟鞭藻丰富, AMS<sup>14</sup>C 测年结果均 < 10 ka, 属于 MIS1 期。

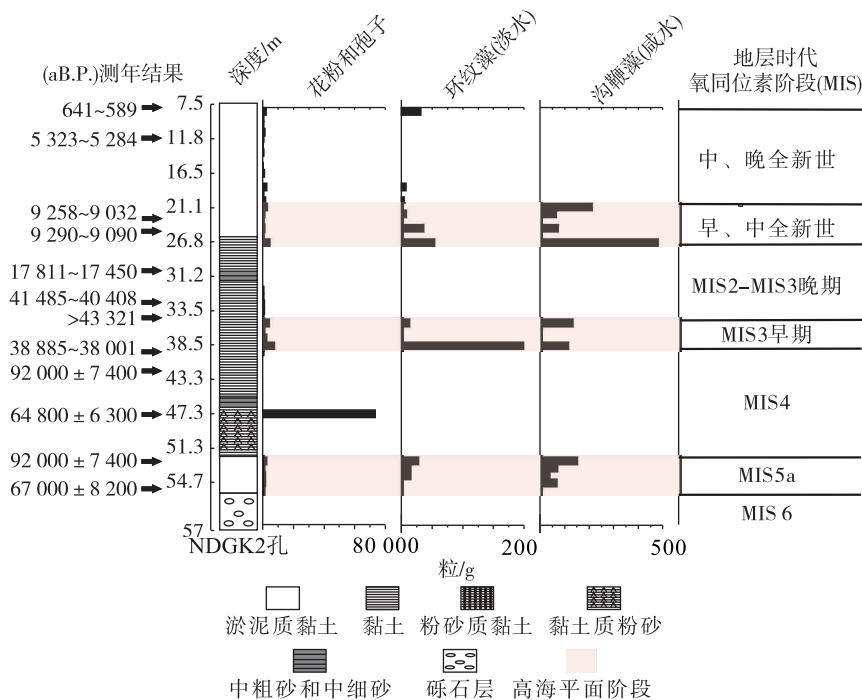


图2 NDGK2 孔中孢粉和藻类的浓度及地层对比<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Concentration and stratigraphic correlation of pollen and algae in NDGK2 core<sup>[8]</sup>

### 3 研究方法

#### 3.1 重矿物分析

在 NDGK2 钻孔 0~54.7 m 段岩心中采集 19 个沉积物样品做重矿物分析(采样深度如图 3 所示)。样品采集后送至华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 自然风干后筛选 500~32  $\mu\text{m}$  碎屑进行重矿物挑选和鉴定统计。

(1) 粒级提取。取约 20 g 干样, 用孔径为 500  $\mu\text{m}$  和 32  $\mu\text{m}$  的套筛反复进行水筛, 直至粗粉砂、细砂粒级沉积物基本被收集。取约 2.0 g 烘干后的宽广粒级(500~32  $\mu\text{m}$ )碎屑物置入装有重液聚钨酸钠(常温

下密度 2.88 g/cm<sup>3</sup>)的离心管中充分浸湿 5 min, 再利用离心法进行重液分离。将装有碎屑物样品的离心管放入离心机, 使用转速 2 200 rpm/min 离心 5 min。待轻矿物和重矿物完全分离, 再使用液氮冷却离心管底部的重矿物, 最后用蒸馏水反复冲洗重矿物, 对其烘干、保存。

(2) 碎屑矿物鉴定。矿物鉴定操作流程遵照“条带计数法”。不透明矿物、自生矿物和岩屑在反射光下用体视显微镜分析, 不易鉴别的透明矿物在偏光显微镜下鉴定。取少量重矿物样品放在干净的载玻片上, 用盖玻片划成一条线, 再从这一行中随机挑选出超过 300 颗矿物。先对不透明矿物进行鉴定统计, 待

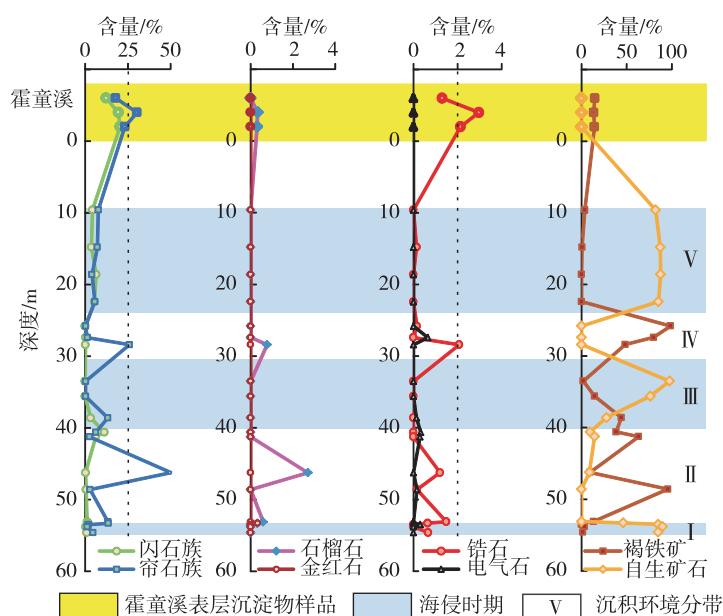


图 3 NDGK2 钻孔重矿物图谱

Fig. 3 Heavy minerals in NDGK2 core

不透明矿物分析完成后,再对透明矿物进行鉴定,针对不容易辨识的透明矿物,使用油浸法鉴别。

### 3.2 地球化学分析

NDGK2 钻孔地球化学测试样品主要采集于富黏土层位,0~54.7 m 段岩心中采集 52 个沉积物样品进行元素含量测试分析(采样位置如图 4 所示)。采集的样品在华东师范大学河口海岸学国家重点实验室测试完成。

采集样品在实验室中提取 $<45\ \mu\text{m}$ 组分样品(钻孔整体粒度较细,该粒级可代表大部分样品沉积物,且与重矿物粒级重复性不高),烘干,称取约 1 g 样品置于 50 mL 离心管中,加入足量的 1N HCl 溶液,在 60 °C 下水浴震荡 6 h,倒出上层清液,重复洗酸至溶液为中性。40 °C 下烘干样品,将样品磨碎后转移到坩埚内,置于 600 °C 下灼烧约 3 h,去除有机质。称取残渣样品 0.25~0.30 g 放置于消解罐中,加入 5 mL 硝酸和 3 mL 氢氟酸置于 85 °C 加热板上预加热 20 min,待消解罐冷却后转移到微波消解仪消解,直至消解罐中消化液蒸发至一滴黄豆大小,用 5% 稀硝酸定容至 5 mL,并从中抽取 1 mL 再用 5% 稀硝酸定容至 10 mL。实验采用 Thermo fisher VG-X7 型电感耦合等离子质谱(ICP-MS)进行微量元素测试,分析过程中使用国际标准(GSD-9)及空白样监测。此外,在霍童溪流域采集了 3 个样品并进行了重矿物和地球化学分析。

## 4 研究结果

### 4.1 NDGK2 钻孔重矿物分布特征

NDGK2 钻孔共鉴定出闪石族(普通角闪石、阳起石、透闪石)、帘石族(绿帘石、黝帘石)、石榴石、金红石、榍石、磷灰石、电气石、锆石、钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿、白钛石、自生矿物、石膏、胶磷矿、风化云母(包括少量黑云母和白云母)、岩屑和风化碎屑等二十余种碎屑重矿物,代表性碎屑重矿物的垂向分布如图 3 所示。对比霍童流域表层碎屑重矿物,结合钻孔碎屑重矿物组合特征,NDGK2 钻孔自下而上大致划分为 5 段(图 3)。

(1) I 段(55~53 m)。碎屑重矿物以黄铁矿等自生矿物为主,平均含量 $>67\%$ ,角闪石族、帘石族矿物含量相对较低( $<10\%$ ),云母较常见,偶见锆石、金红石。

(2) II 段(53~41 m)。以褐铁矿为主,含量为 0%~96%;其次为帘石族矿物,含量为 3%~50%;自生矿物、风化云母等较常见,平均含量均 $<10\%$ ;角闪石族矿物含量较低,平均含量 $<5\%$ 。碎屑锆石、电气石也有分布,但含量较低。

(3) III 段(41~31 m)。以黄铁矿等自生矿物为主,平均含量为 50%左右。褐铁矿、风化云母次之,闪石族和帘石族矿物较为常见,平均含量均 $<$



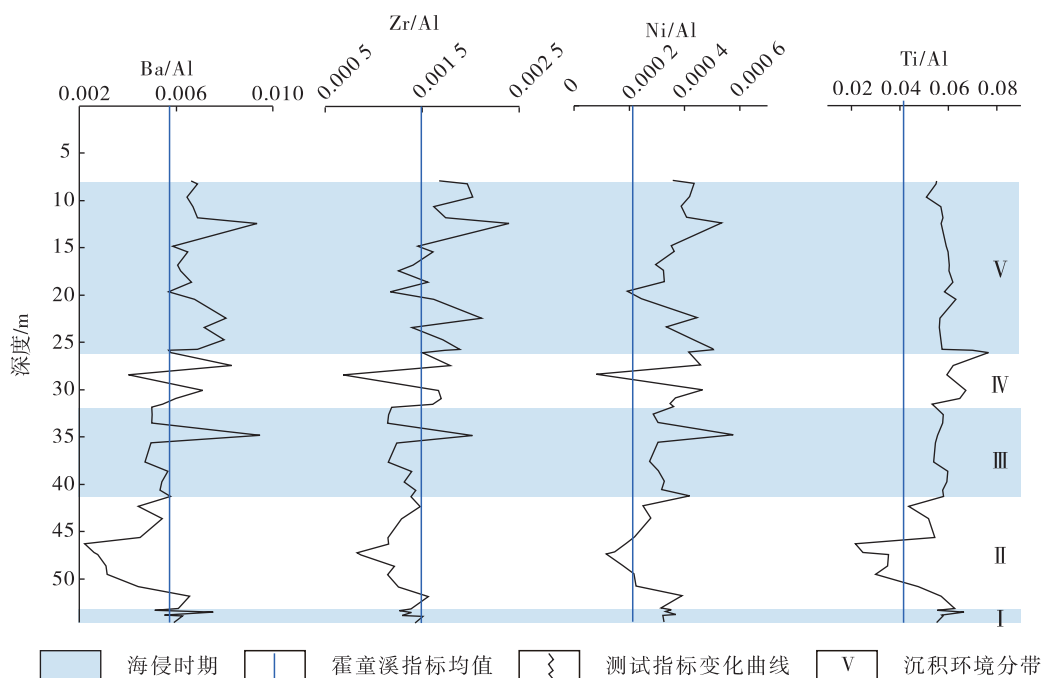


图4 NDGK2 钻孔沉积物地球化学元素比值垂向变化图

Fig. 4 Vertical variation of geochemical elements ratios in NDGK2

10%。此外,其他种类矿物含量较少,偶见电气石。

(4) IV段(31~25 m)。以褐铁矿为主,平均含量>67%;帘石族矿物及风化云母次之,平均含量均<10%。碎屑锆石、钛铁矿也有分布,不稳定矿物角闪石族以及自生矿物含量极低。

(5) V段(25~10 m)。碎屑重矿物种类较单一,主要以黄铁矿等自生矿物为主,平均含量>80%。角闪石族矿物、帘石族矿物平均含量约5%。

#### 4.2 地球化学元素分布特征

本文讨论的沉积物元素组成主要是经常被用于进行物源识别的特征元素(Ti, Zr, Ni, Ba)。沉积物中的物源物质成分会在搬运、沉积和成岩过程中受到分选作用、沉积再循环作用和钾交代作用影响<sup>[11-12]</sup>,因此,沉积物中元素含量很大程度上取决于沉积物的粒度、矿物组成及环境条件,沉积物中的元素含量往往与粒度呈明显的负相关。Al在风化过程中迁移能力小,其丰度与沉积物粒度呈负相关,且为细颗粒沉积物的主要组分,可以作为粒度替代指标<sup>[13]</sup>。为了减少粒度对沉积物中元素含量的影响,本文采用Al归一化处理。根据NDGK2钻孔元素垂向变化以及与本站河流霍童溪3个样品平均值(Ba/Al平均值为0.006、Zr/Al平

均值为0.0015、Ni/Al平均值为0.0002、Ti/Al平均值为0.04)进行对比,自下而上大致可以划分为5个带(图4),并与沉积物重矿物组合分带相对应。

(1) I带(55~53 m)。Ba、Zr与Al的比值(分别集中于0.005~0.007、0.0010~0.0015)与霍童溪相应比值相近;Ni、Ti与Al的比值(分别集中于0.0003~0.0005、0.05~0.07)明显大于霍童溪相应比值。

(2) II带(53~42 m)。Ba、Zr与Al的比值(分别集中于0.002~0.006、0.0007~0.0014)明显低于霍童溪相应比值,总体变化趋势均为先减小后增加;Ni、Ti与Al的比值(分别集中于0.0001~0.0003、0.02~0.05)与霍童溪相应值相近。该带元素比值总体上普遍较I带相应比值明显降低。

(3) III带(42~31.8 m)。Ba、Zr与Al的比值(分别集中于0.004~0.008、0.001~0.002)与霍童溪相应比值接近;Ni、Ti与Al的比值(分别集中于0.0003~0.0006、0.05~0.06)明显高于霍童溪相应比值。其中Ti/Al变化最平稳,Ba、Zr、Ni与Al的比值除1个最大值外,总体变化较小。

(4) IV带(31.8~25.8 m)。Ba、Zr与Al的比值(分别集中于0.003~0.008、0.0012~0.0018)与霍童溪相应比值接近;Ni、Ti与Al的比值(分别集

中于 0.000 3~0.000 5、0.05~0.07)虽大于霍童溪相应比值,但是与 II 带相比,其比值更加接近霍童溪相应比值。

(5) V 带(25.8~7.9 m)。Ba、Ti、Ni 与 Al 的比值(分别集中于 0.006~0.009、0.001 3~0.002 0、0.000 2~0.000 5)均大于霍童溪相应比值。该带元素比值总体与 I 带和 III 带相似,但变化范围较大。

NDGK2 钻孔沉积物地球化学元素比值垂向变化图(图 3)显示, I 段、III 段和 V 段碎屑重矿物中的自生矿物含量较高,褐铁矿含量较低,指示该时期具有还原环境。结合地层特征及沟鞭藻指标<sup>[8]</sup>可知,这些层位对应于海相沉积。而 II 段和 IV 段正好相反,褐铁矿含量剧增,甚至可超过 50%,自生矿物含量大幅度下降至 0,说明当时的沉积环境以氧化环境为主,为陆相沉积层,重矿物组合及 ZTR 指数与现霍童溪较相似。II 段和 IV 段较高的 ZTR 值表明,该时期沉积物中的重矿物成熟度相对较高,沉积物源经过较长距离的搬运。

## 5 讨论

### 5.1 90 ka 以来沉积物来源

将 NDGK2 钻孔沉积物的重矿物、地球化学元素指标、局部霍童溪以及远源浙闽沿岸和长江流域表层沉积物进行对比,从而推测物质来源<sup>[14-15]</sup>。相比于常量元素,某些微量元素具有非迁移性,受沉积物搬运、分选、沉积环境及成岩作用的影响小,能保留成岩物质来源的有关信息<sup>[15-17]</sup>。相对稳定的 Zr 往往在中酸性火山岩中富集,代表源岩为偏中酸性岩,而 Ti、Ni 等微量元素易于在基性岩石中富集<sup>[14]</sup>。因此,这两类元素的变化可以反映源岩信息。长江上游以峨眉山玄武岩最为典型,是长江流域含 Ti 磁铁矿的主要来源,前人研究显示峨眉山玄武岩磁铁矿中 Ti 含量远高于一般磁铁矿的 Ti 含量<sup>[14-15]</sup>。在同粒级残留相沉积物中,长江明显富含 Ti 等,浙闽河流相对贫 Ti 而富 Zr,应与浙闽地区普遍分布中酸性火成岩有关<sup>[16,18-19]</sup>。

研究发现,钻孔元素的变化阶段与沉积物重矿物组合分带相似,均可划分为 3 个海相层位(I、III 和 V)、两个陆相层位(II、IV)(图 3、图 4)。元素比值及重矿物组合特征表明,海相层和陆相层明显不同,海侵时形成的海相层与海平面下降后形成的陆相层沉积物来源不同。I、III 和 V 海相层位中的

Ti、Ba、Ni 等含量明显偏高,基本处于高值,与霍童溪沉积物相差较大,较接近长江沉积物特征,同时重矿物中锆石含量明显降低,角闪石含量相对增加,电气石有一定的占比,与现代长江流域重矿物特征较接近<sup>[20]</sup>,说明海相沉积层的物源很可能来源于海域(包括浙闽沿岸以及长江)。陆相 II 层元素比值最接近局地霍童溪,锆石含量明显偏高,帘石类矿物含量明显高于闪石类矿物,矿物组合与以霍童溪为代表的局地河流相似,推测这些层位物源基本来源于近源。陆相 IV 层比较特殊,虽然锆石含量与陆相 II 层相似,但与 II 层比,Ti 含量明显偏高,可能该层是低海平面时期局地与前期高海平面沉积(III 海相层)改造混合物源所致。

### 5.2 90 ka 以来沉积环境演化

NDGK2 钻孔多指标地层划分表明,三沙湾地区第四纪早期以风化剥蚀为主,形成了 40 m 厚的花岗岩/凝灰岩风化产物,推断在中更新世末期 MIS6 阶段形成了卵石层,反映了基岩海岸构造沉积幅度较小,山溪性河流影响显著的特点<sup>[7]</sup>。NDGK2 钻孔年代框架反映三沙湾地区海侵开始于晚更新世 MIS5,与中国东部海岸第四纪大规模海侵现象大体一致<sup>[21-25]</sup>。除了受全球海平面波动的影响,该区海侵还可能受中国东部构造沉降活动控制<sup>[26]</sup>。

NDGK2 钻孔沉积记录揭示了 MIS5 以来三沙湾在河海交替作用下的环境演化特征。MIS5 阶段,三沙湾发育海相环境,孢粉记录周边地区大量的松属花粉以及少量的常绿阔叶树花粉反映了相对温暖的气候特征<sup>[7-8]</sup>。重矿物和微量元素记录显示,该阶段细颗粒泥沙来源于海洋输运的长江物源。MIS4 阶段,由于全球海平面下降约 60 m<sup>[27]</sup>,海水完全退出三沙湾,沉积物供应减少,河流发育,沉积物以中细砂为主,局部地区发育砂砾石。孢粉记录表明,该阶段研究区有降温记录,但降温幅度较小,气候整体相对温暖<sup>[8]</sup>。重矿物和微量元素记录显示,该阶段相对较粗的泥沙来源于霍童溪等当地山溪性河流。在 MIS3 阶段,海平面由 MIS4 阶段的一 75 m 上升到约一 50 m,三沙湾再次被海水淹没,发育了第 II 黏土层,该黏土层在现代海岸线沿岸均有发育<sup>[7]</sup>。孢粉记录显示:MIS3 早期一中期,三沙湾气候比较温暖湿润,但 MIS3 晚期气候开始变冷变干,与北大西洋重建的海表温度变化一

致<sup>[28-29]</sup>。物源记录显示: MIS3 阶段三沙湾泥沙主要来自外海输入的长江远源泥沙, 类似于 MIS5 阶段物源特征。MIS2 时期, 全球冰盖范围扩大, 中国东部海区海平面下降超过 130 m<sup>[30-31]</sup>, 宁德地区海岸带发育陆相沉积。孢粉记录指示了宁德地区山地仍被亚热带阔叶林覆盖, 铁杉属植物增多, 说明气候略微转冷<sup>[8]</sup>。在全球及区域大尺度上气候整体变冷变干的背景下, 河流流量减少, 沉积物整体较细, 沉积物供应较少, 暴露的沉积环境使很多地方存在沉积间断。地球化学和重矿物记录显示: 该阶段泥沙来源为霍童溪局地物源与外海长江物源的混合物源, 反映了河流剥蚀作用下对前期高海面沉积物的侵蚀搬运及混合沉积作用。全新世 (MIS1 阶段), 孢粉记录显示喜暖的常绿栎等植被扩张<sup>[8]</sup>。全新世早期—中期, 气候快速回暖, 中国东部海平面快速上升<sup>[31-32]</sup>, 三沙湾大部分地区及宁德陆域遭受海侵<sup>[33-34]</sup>, 构成了宁德地区第四纪最大的海侵。

综上所述, 90 ka 以来三沙湾海平面变化对湾内冲淤变化的物源因素具有重要影响。目前, 河流泥沙减少已引起学者的广泛的关注, 海洋作用也不容忽视, 今后需深入开展现代不同时间尺度的定量研究, 为海岸带管理提供技术依据。

## 6 结论

(1)NDGK2 钻孔多重地层划分表明, 福建三沙湾第四纪早期以基岩风化和原地残积为主, 中更新世晚期发育了山溪性河流, 海陆交替的环境发育于晚更新世, 发育了 MIS5、MIS3 和 MIS1 海侵地层和 MIS4 和 MIS2 海退地层。

(2)NDGK2 钻孔矿物和元素物源指标揭示了三沙湾 90 ka 以来高海面阶段悬浮泥沙主要来源于海域泥沙, 低海面阶段泥沙主要来源于局地物源或前期沉积改造。晚更新世以来, 三沙湾沉积演化过程及物源主要受控于海平面和区域构造活动。

(3)NDGK2 钻孔重矿物 ZTR 指数及微量元素指标研究表明, 在 MIS4 和 MIS2 低海平面时期, 宁德地区入海河流域发育较成熟, 将较远区域的风化物质带入沿海地区, 仅局部区域可能因河流流量较小而出现沉积间断。这与孢粉记录反应的 MIS5a 以来宁德地区亚热带气候及冰期较低的降温幅度等气候特征一致, 进一步证明相比内陆地区, 该区对全球降温事件的响应并不敏感。

## 参考文献

- [1] 陈坚. 福建省近海海洋综合调查与评价总报告[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
CHEN J. General report on the comprehensive survey and evaluation of offshore marine in Fujian Province [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] 霍云龙, 陈金民, 林彩, 等. 三沙湾表层沉积物重金属含量分布及生态风险评估[J]. 应用海洋学报, 2015, 34(3): 356-364.  
HUO Y L, CHEN J M, LIN C, et al. Distribution of heavy metal contents in surface sediments of Sansha Bay and ecological risk assessment[J]. Journal of Applied Oceanography, 2015, 34(3): 356-364.
- [3] 陈强, 阎希柱, 王松, 等. 福建三沙湾滩涂表层沉积物污染物特征及生态风险评价[J]. 海洋湖沼通报, 2014, 2(7): 37-44.  
CHEN Q, YAN X Z, WANG S, et al. Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pollutants in the Intertidal Surface Sediments of Sansha Bay, Fujian[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014, 2(7): 37-44.
- [4] 蔡清海, 杜琦, 钱小明, 等. 福建三沙湾海洋沉积物中重金属和过渡元素来源分析[J]. 地质学报, 2007, 81(10): 1444-1448.  
CAI Q H, DU Q, QIAN X M, et al. Analysis on Source of Heavy Metals and Transitional Element in Marine Sediment in the Sansha Bay of Fujian[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(10): 1444-1448.
- [5] 张训华, 孙晓明, 印萍, 等. 推进海岸带综合地质调查, 为社会经济持续发展提供支撑[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(1): 1-8.  
ZHANG X H, SUN X M, YIN P, et al. Sustainable development of coastal zone has integrated geological investigation[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(1): 1-8.
- [6] 严肃庄, 曹沛奎. 三沙湾表层沉积物中矿物特征及其泥沙来源[J]. 台湾海峡, 1997, 16(2): 128-134.  
YAN S Z, CAO P K, et al. Mineral characteristics of Sansha Bay and its sediment resources[J]. JOURNAL OF OCEANOGRAPHY IN TAIWAN STRAIT, 1997, 16(2): 128-134.
- [7] 丁大林. 宁德海岸带晚第四纪地层、古气候与沉积环境演化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2020.  
DING D L. Late Quaternary stratigraphy, paleoclimate and sedimentary environmental evolution of the Ningde

- coastal zone [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2020.
- [8] 于俊杰, 彭博, 兰佑, 等. 孢粉证据揭示 MIS 5a 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, 46(1):12.
- YU J J, PENG B, LAN Y, 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, 46(1):12.
- [9] 王天刚, ADRIAN F, 姚仲友, 等. 勘查植物地球化学在我国不同地球化学景观区的应用现状及展望[J]. 华东地质, 2020, 41(1):1-7.
- WANG T G, ADRIAN F, YAO Z Y, et al. Status and outlook of the biogeochemical exploration in various geochemical landscape zones in China[J]. East China Geology, 2020, 41(1):1-7.
- [10] 林鹏, 丘喜昭. 福建省植被区划概要[J]. 武夷科学, 1985, 5(1):247-254.
- LIN P, QIU X Z. An outline of division of vegetation in fujian province[J]. WUYI SCIENCE JOURNAL, 1985, 5(01):247-254.
- [11] REIMER P J, BARD E, B AYLISA, et al. IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP[J]. Radiocarbon, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [12] 刘彬, 王学求. 长江中下游地区早古生代沉积岩地球化学特征及其构造背景与物源分析[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(1): 163-176.
- LIU B, WANG X Q. Geochemistry of Early Paleozoic Sedimentary Rocks in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River and its Constrains on Tectonic Setting and Provenance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, 42(1): 163-176.
- [13] 刘素美, 张经. 沉积物中重金属的归一化问题——以 Al 为例[J]. 东海海洋, 1998, 16(3): 48-55.
- LIU S M, ZHANG J. Normalization of heavy metals to aluminum in marine sediments[J]. DONGHAI MARINE SCIENCE, 1998, 16(3): 48-55.
- [14] YANGS, LI C, YOKOYAMAK. Elemental compositions and monazite age patterns of core sediments in the Changjiang Delta: Implications for sediment provenance and development history of the Changjiang River[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2006, 245 (3/4): 762-776.
- [15] 杨守业, 李超, 王中波, 等. 现代长江沉积物地球化学组成的不均一性与物源示踪[J]. 第四纪研究, 2013, 33 (4): 645-655.
- YANG S Y, LI C, WANG Z B, et al. Heterogeneity and source tracing of geochemical composition of modern Yangtze River sediments [J]. Quaternary Research, 2013, 33(4): 645-655.
- [16] 黄湘通, 郑洪波, 杨守业, 等. 长江三角洲 DY03 孔沉积物元素地球化学及其物源示踪意义[J]. 第四纪研究, 2009, 29(2): 299-307.
- HUANG X T, ZHENG H B, YANG S Y, et al. Elemental geochemistry of the DY03 hole sediments in the Yangtze Delta and its source tracing significance[J]. Quaternary Research, 2009, 29(2): 299-307.
- [17] 梅西, 张训华, 刘健, 等. 南黄海 3.50 Ma 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 X, ZHANG X H, LIU J, et al. Elemental Geochemical Record of Land and Sea Environmental Evolution Since 3.50 Ma in South Yellow Sea. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(1): 74-84.
- [18] GU J, CHENJ, SUN Q, et al. China's Yangtze delta: Geochemical fingerprints reflecting river connection to the sea[J]. Geomorphology, 2014, 227(15): 166-173.
- [19] 郭玉龙. 浙闽入海中小河流沉积物的元素地球化学组成:物源及化学风化的影响[D]. 上海: 同济大学, 2014.
- GUO Y L. Elemental geochemical composition of sediments from small and medium-sized rivers in Zhejiang and Fujian: influence of physical origin and chemical weathering[D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [20] YU E W, YANG S, ZJAO B, et al. Changes in environment and provenance within the Changjiang (Yangtze River) Delta during Pliocene to Pleistocene transition[J]. Marine Geology, 2019, 416:105976.
- [21] 王张华, 赵宝成, 陈静, 等. 长江三角洲地区晚第四纪年代地层框架及两次海侵问题的初步探讨[J]. 古地理学报, 2008, 10(1): 99-110.
- WANG Z H, ZHAO B C, CHEN J, et al. Chronostratigraphy and two transgressions during the Late Quaternary in Changjiang delta area[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(1): 99-110.
- [22] LIU J, SAITOY, WANG H, et al. Stratigraphic development during the Late Pleistocene and Holocene offshore of the Yellow River delta, Bohai Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36(4/5): 318-331.
- [23] ZHAO B, WANG Z, CHEN J, et al. Marine sediment records and relative sea level change during late Pleis-



- tocene in the Changjiang delta area and adjacent continental shelf[J]. *Quaternary International*, 2008, 186: 164-172.
- [24] LIU J, ZHANG X, 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.
- [25] 雒聪文, 马玉贞, 王凯, 等. 东亚地区 MIS 5 时期孢粉记录的植被与气候研究进展[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(5): 540-551.
- LUO C W, MA Y Z, WANG K, et al. Vegetation and climate inferred from pollen record in East Asian region during MIS 5: A review[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(5): 540-551.
- [26] 丁大林, 张训华, 于俊杰, 等. 长江三角洲北翼后缘晚第四纪以来的沉积粒度特征及环境演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(4): 34-45.
- DING D L, ZHANG X H, YU J J, et al. Sediment grain size distribution patterns of the late Quaternary on the back side of northern Yangtze River Delta and their environmental implications[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2019, 39(4): 34-45.
- [27] GEYH M A, STREIF H, KUDRASS H. Sea-level changes during the late Pleistocene and Holocene in the Strait of Malacca[J]. *Nature*, 1979, 278(5703): 441-443.
- [28] ZHENG Z, YANG S, DENG Y, et al. Pollen record of the past 60 ka BP in the Middle Okinawa Trough: Terrestrial provenance and reconstruction of the paleo-environment[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 307(1/4): 285-300.
- [29] OPPO D W, SUN Y. Amplitude and timing of sea-surface temperature change in the northern South China Sea: Dynamic link to the East Asian monsoon[J]. *Geology*, 2005, 33(10): 785-788.
- [30] 王张华, 丘金波, 冉莉华, 等. 长江三角洲南部地区晚更新世年代地层和海水进退[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4): 1-8.
- WANG Z H, QIU J B, RAN L H, et al. Late Pleistocene age stratigraphy and seawater progression in the southern Yangtze River Delta[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2004, 24(4): 1-8.
- [31] LI G, LI P, LIU Y, et al. Sedimentary system response to the global sea level change in the East China Seas since the last glacial maximum[J]. *Earth Science Reviews*, 2014, 139:390-405.
- [32] 丁大林, 李广雪, 徐继尚, 等. 全新世亚洲季风演变[J]. *地质前缘*, 2017, 24(4): 114-123.
- DING D L, LI G X, XU J S, et al. Evolution of the Holocene Asian monsoon[J]. *Geological foreground*, 2017, 24(4): 114-123.
- [33] 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): 96-103.
- ZENG C S. Late Quaternary sea erosion and sea surface changes along the northeast Fujian coast[J]. *Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition*, 1997, 13(4): 96-103.
- [34] ROLETT B V, ZHENG Z, YUE Y. Holocene sea-level change and the emergence of Neolithic seafaring in the Fuzhou Basin (Fujian, China) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(7/8): 788-797.

## Sediment sources and environment evolution since 90 ka in Sansha Bay, Fujian Province

YU Junjie<sup>1</sup>, LIU Ping<sup>2</sup>, LIN Fengzeng<sup>3</sup>, WANG Jilong<sup>1</sup>, DING Dalin<sup>4</sup>, PENG Bo<sup>1</sup>,  
WU Bin<sup>1</sup>, LAO Jinxiu<sup>1</sup>

(1.Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2.State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

3.Ningde Bureau of Natural Resources, Ningde 352100, Fujian, China; 4.School of Communication and

Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** The Sansha Bay, representing a typical bedrock semi-enclosed bay in eastern China, is the largest bay in Fujian Province. Processes of erosion and accumulation in Sansha Bay are affected by sedi-

ment provenance derived from mountainous rivers and tides. Therefore, understanding the characteristic of sediment provenance has critical significance for discussing sedimentary evolution in the bay. In this study, we conduct a heavy minerals and geochemical elements analysis of drilling core NDGK2 obtained from Sansha Bay, reconstruct the evolution history of sediment provenance since approximately 90 ka, based on the published stratigraphic sequence and chronological framework. Under the influence of global climate and sea level changes, sedimentary evolution patterns in Sansha Bay were proposed. The result shows that minerals were dominated by authigenic pyrite with relatively low zircon contents and low ZTR index during the high sea level stages of (marine isotope stage) MIS5, MIS3, MIS1, and were dominated by limonite with relatively high zircon contents and high ZTR index during the low sea level stages of MIS4 and MIS2. Major and trace elements are characterized with obviously high content of Ti, Ba, and Ni during stages MIS5, MIS3 and MIS1 and low Ni and Ba contents during stages MIS4 and MIS2. Both mineral and element proxies suggest that the suspended sediments in the high sea level stages since 90 ka were mainly derived from Yangtze River and probably transported by tidal currents. In contrast, sediments in the low sea level stages consisted of the mixture that was derived from local rivers represented by Huotong River and from Yangtze River. Compared with inland area, the characteristics of sediment provenance and palynological assemblage indicate that Ningde area is not sensitive to global cooling events and rivers are still relatively developed even in the glacial period. On the Earth's orbital scale, a high sea level plays a more substantial role than the terrigenous input in the formation of sedimentary environment. This study provided a valuable insight into the quantitative study of modern sediment sources in the Sansha Bay.

**Key words:** heavy minerals; geochemical elements; Sansha Bay; provenance; sea level change