ISSN 1009-2722	海洋地质前沿	第 39 卷第 9 期
CN37-1475/P	Marine Geology Frontiers	Vol 39 No 9

阎琨, 庞国涛, 邢新丽, 等. 广西三娘湾准残留沉积——来自端元分析和稀土元素地球化学的证据[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(9): 25-34. YAN Kun, PANG Guotao, XING Xinli, et al. Palimpsest sediments in Sanniang Bay, Guangxi: evidence from end-member and rare earth elements[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(9): 25-34.

# 广西三娘湾准残留沉积

# ——来自端元分析和稀土元素地球化学的证据

阎琨<sup>1,2</sup>,庞国涛<sup>1</sup>,邢新丽<sup>2</sup>,李伟<sup>1</sup>,杨源祯<sup>1\*</sup>,鲍宽乐<sup>1</sup>

(1中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心,烟台 264000; 2中国地质大学(武汉)环境学院,武汉 430000)

**摘 要:**残留沉积能够记录海进海退的关键信息,也是恢复古地理的有力证据。在2019年 10月的海洋地质调查中,在三娘湾海域>10m水深区域识别出一套含砾的沉积物。在粒度分 析和地球化学测试的基础上,利用端元分析模型和稀土元素判别图解分析其形成原因及物质 来源。结果表明,三娘湾沉积物的信息可以由4个端元(EM)来表示,EM1代表了钦州湾往 复潮流的特征,EM2为大风江河口高能的冲刷环境,EM3代表了残留沉积与波浪的混合作用, EM4代表了残留沉积的原始河流沉积。稀土元素特征表明,残留沉积具有低稀土总量、高ΣLREE/ ΣHREE 的特点。经过上地壳稀土元素标准化后,显示出明显的δCe 正异常和δEu 负异常,表 现出砂页岩、砂岩来源的特征,与钦州湾东北部的近岸沉积具有相似的特征。综合分析表明, 三娘湾准残留沉积是北部湾地区最后一次大规模海进的残留产物,受到海流和潮流的后期改 造,这为北部湾地区古海岸线识别和演化研究,提供了关键信息。

关键词:三娘湾;准残留沉积;端元分析;稀土元素

中图分类号:P736.2; P736.4 文献标识码:A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.095

# 0 引言

残留沉积(relict sediments)是未被现代沉积物 覆盖的海底表层沉积物,指示了其沉积环境与现代 沉积环境的不平衡<sup>[1]</sup>。部分学者指出,现在大部分 残留沉积都遭到现代环境的破坏,应该称为准残留 沉积(palimpsest sediments)<sup>[2-4]</sup>。也有学者<sup>[3]</sup>指出, 残留沉积受到现代潮流的强烈改造,应该称为现代 潮流沉积。现代陆架约有 70%以上的面积被残留 沉积物覆盖,对其出露范围、形成过程和成因模式 的研究受到众多学者的关注<sup>[5-7]</sup>。沈华梯<sup>[8]</sup>利用沉 积学、年代学的方法对东海陆架残留沉积进行研究, 认为其可以分为海进改造沉积和海退残留沉积; 王 张华等<sup>[9]</sup>利用地层对比和古生物学的方法,将平北 地区沉积物分为3层,认为其受晚更新世末期以来 的海平面控制;肖尚斌等<sup>[10]</sup>对南海的柱状沉积物 进行研究,认为其下段主要为晚更新世的近邻滨沉 积,受后期改造较少,为准残留沉积,与其他学者的 认识一致<sup>[11]</sup>。

北部湾地区末次冰盛期以来经历多次海平面 的上升,已经发现多处残留沉积(准残留沉积)。窦 衍光等<sup>[12]</sup>对北部湾海域表层沉积物开展地球化学 研究,认为北部湾中部存在残留沉积,主要为红河 古三角洲沉积,显示粒度较粗、稀土总量较低的特 征;林镇坤等<sup>[13]</sup>对南流江水下三角洲进行沉积学 研究,在远离河口的低能带识别出一套含砾的残留 沉积物;许冬<sup>[14]</sup>认为大风江以东的残留沉积与更 新世北海组、湛江组密切相关。笔者在最新的海洋 地质调查中,在大风江以西三娘湾海域,识别出一 套含砾的沉积物,其沉积学、地球化学特征均与所 处环境有明显区别,推测为准残留沉积。因此,利 用端元分析及地球化学的方法,对其沉积特征进行 探讨,分析其可能的形成原因,为钦州湾乃至北部

收稿日期: 2022-04-06

**资助项目:** 中国地质调查局项目(DD20191024,ZD20220604,ZD20220131) 作者简介: 阎琨(1988-),男,硕士,高级工程师,主要从事环境地质调查 与评价方面的研究工作. E-mail: 544507188@qq.com

<sup>\*</sup> 通讯作者:杨源祯(1990-),男,硕士,工程师,主要从事海岸带地质调 查与评价方面的研究工作. E-mail: 452998432@qq.com

湾的研究提供一定的基础资料。

# 1 研究区概况

三娘湾海域位于广西钦州市钦州港东南侧,其 西侧为钦州湾外湾颈口,东侧为大风江河口。三娘 湾属于广义钦州湾的一部分,区域主要河流有南流 江、钦江、茅岭江、防城江、大风江等(图1)。其中,南 流江为研究区最大的河流,年输沙量超过115万t, 大风江输沙量最少,为36万t。以大风江为界,东部 大风江、南流江流域出露地层以第四系为主,西部 钦江、防城江流域以志留纪碎屑岩、酸性岩浆岩为主。

钦州湾沿岸以全日潮为主,最大潮差>4 m,平 均潮差 2~3 m,三娘湾海域最大潮差可达 6.41 m。 潮流以往复流为主,潮流流向东北,落潮流向西 南<sup>[15]</sup>。北部湾存在较大的逆时针环流,逆时针环流 在广西沿岸较稳定,致使沿岸潮流增强。研究区沿 岸波浪季节性变化明显,冬季以 NE 和 NNE 向浪为 主,夏季主要为S向浪。

2 研究方法

#### 2.1 采样位置及方法

于 2019 年 10 月在三娘湾海域利用 DGPS 定位, 箱式取样器取样, 采取表层样品 41 件, 利用木 勺取表层 0~5 cm, 置于聚乙烯袋中密封低温保存, 待实验测试。

## 2.2 测试方法

粒度和稀土元素测试分析由广西地质矿产测 试研究中心完成。粒度分析样品处理过程:取沉积 物样品3g并置入玻璃杯中,加纯净水、加六偏磷 酸钠浸泡样品24h,并每隔8h轻轻搅拌1次,使样 品充分分散;不含砾样品用激光法测试,含砾沉积 物采用筛析法测试。稀土元素分析样品处理过程:



样品低温烘干,研磨成200目粉末待分析;之后,称 取0.05g样品经硝酸、氢氟酸、高氯酸密闭分解后, 在开放体系中蒸发除去氢氟酸,用盐酸加热溶解 盐类,并转化为硝酸介质,采用电感耦合等离子体 质谱仪测定稀土元素含量。分析测试过程利用国 家标准物质GBW07458、GBW07459、GBW07460、 GBW07461控制,平均每5个样品插入1个标准样 品,测试结果符合质控要求,测试误差<5%。

#### 2.3 端元模型

沉积物粒度特征受不同的沉积动力条件控制, 对沉积物进行粒度分类或分区,可以揭示沉积物的 形成机制。常用方法有主成分分析法、聚类分析法、 端元分析法等<sup>[16-18]</sup>。对粒径参数或粒径区间值进 行主成分分析可以分析沉积物的控制因素,沉积物 的Q型聚类分析在对沉积物进行分区及环境研究 上有一定的优势,但是均难以定量研究沉积物的来 源及控制因素。WELTJE<sup>[19]</sup>基于定量分析的理论, 提出端元分析模型。端元分析模型的理论基础是 不同水动力条件形成的沉积物粒径分布不同,而混 合水动力条件的沉积粒径分布可以分解为不同水 动力条件粒径的组合,其数学模型为:

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{B} + \boldsymbol{E} \tag{1}$$

式中:X(n×p)为沉积物粒度矩阵;

M(n×q)为端元相对含量矩阵;

**B**(q×p)为端元粒度矩阵;

n 为样品数;

- p 为粒级总数;
- q 为动力组分数;
- E 为残差矩阵。

该模型可以利用数学方法求解。

PATERSON<sup>[20]</sup> 基于上述模型在 Matlab 平台 开发出 AnalySize 端元分析软件,目前已广泛应用 于风成沉积、河流沉积及河口沉积<sup>[21-23]</sup>,取得了很 好的应用效果。本次研究利用 AnalySize 对沉积物 进行端元分解,根据各端元相对含量,采用 Ocean Data View 软件(ODV)制作平面图<sup>[24]</sup>。

3 沉积物端元分解

# 3.1 表层沉积物组成

按照 Folk 分类方法<sup>[25]</sup>,将研究区表层沉积物

分为8类,分别为砾质泥质砂、砾质泥、含砾泥质砂、 含砾泥、砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂。含砾沉积 物主要分布在研究区东南部,集中在水深>10m的 区域(图2)。含砾泥、含砾泥质砂分布面积相对较 小,分布范围靠近海岸线;砾质泥和砾质泥质砂分 布范围相对较大;不含砾的沉积物主要分布在靠近 钦州湾-大风江一线;其中,钦州湾附近以细粒沉积 物砂质粉砂、粉砂为主;靠近大风江河口位置,以粉 砂质砂、砂为主。从沉积物类型分布可以看出,在 水深<10m、水动力相对较强的近岸地区,以砂质 沉积为主;钦州湾外湾南部水深>10m的地区,水 动力条件较弱,多为粉砂质沉积。而在水深>10m 的研究区东南部,出现了大量与现代沉积环境不 同的含砾沉积物,可以初步判断,其可能为准残留 沉积。



#### 3.2 粒度数据端元分析

为更好地对这套含砾沉积物进行研究,利用端 元分析模型对研究区表层沉积物进行解析(图 3)。 一般来说,复相关系数>95%时,分析效果较好,结 果可信<sup>[22-23]</sup>。本次样品在端元数等于4时,复相关 系数为96.5%,可以代表研究区粒径的总体特征。 将端元设置为 4,得到拟合的端元频率分布。端元 频率分布曲线可以分为 2 类,其中 EM1 和 EM2 为

一类,主要显出单峰的特征。EM3 和 EM4 则表现 为多峰的特点。





# 4 讨论

#### 4.1 端元指示的沉积动力环境

利用端元分布平面图(图4),结合端元的特征 参数(表1),可以很好地区分各端元代表的水动力 条件和沉积环境。

端元相对含量分布图显示, EM1 在研究区东侧, 靠近钦州湾外湾湾口附近为高值区, 研究区西侧靠 近大风江附近为低值区(图 4a)。其在研究区分布 面积最大, 主要呈近 SN 向分布, 以黏土-粉砂级的 颗粒为特征, 分选较差, 水动力条件相对较弱。该 区域沉积物类型以砂质粉砂、粉砂为主, 这与端元 的粒径特征相对应, 表明该端元类型对该区域沉积 物类型的控制作用。在地貌上为钦州湾外湾的水 下岸坡, 受钦州湾外湾三角洲的控制, 而钦州湾外 湾三角洲为一种典型的潮控三角洲<sup>[26]</sup>。钦州湾湾 口潮流方向为近 SN 向, 与 EM1 的载荷分布类似。 种种迹象表明, EM1 可能主要代表了钦州湾沿岸的 低能环境, 沉积物分布受到潮汐作用影响。

EM2 分布范围最小,载荷高值区位于大风江入 海河口西侧,靠近岸线附近(图 4b)。其主要粒级组 分为砂级组分,曲线显示出正态分布的特征,且分 选较好,端元峰值为 2Φ。其分布范围表现出受到 明显河口河流和波浪的共同冲刷作用。该端元的 高值区与表层沉积物中的砂相对应。大风江年径 流量和输沙量较小,属于北部湾相对较小的河流, 水下三角洲分布范围远小于南流江、钦州湾外湾。 EM2 在研究区西北部钦州湾外湾附近也有少量载 荷,显示 EM2 主要是属于水动力条件较强的环境, 可能主要受河流波浪冲刷作用的影响。

EM3高值区主要分布在研究区东侧(图 4c),砂 级颗粒占比超过 80%,分选差,主峰值为 10,属于 粗砂的范围,在-10 和 70 各有 1 个次峰,表明砾级 颗粒和粉砂级颗粒具有一定贡献。一般来说,频率 分布曲线为双峰或者多峰的,往往具有河流沉积的 特征。EM3 砂级颗粒相对较少、分选较差,表明水 动力条件相对 EM2 较弱,可能代表了河流残留沉 积受到后期环流改造作用。该区域沉积物类型以 粉砂质砂、含砾泥质砂、含砾泥为主,靠近海岸含砾 沉积物减少,结合端元分析,推测该区域原始沉积 为含砾沉积物,受后期改造,部分区域覆盖了细粒 沉积物。

EM4 的分布范围在研究区南部(图 4d), 砾级 和砂级颗粒占比较多, 分选差, 频率分布曲线与含 砾沉积物相似。与 EM3 不同的是, EM4 的多峰没 有明显的主峰, 显示出 3 个大致相等的峰值。相对 较高的峰值为-2Φ, 为砾级颗粒, 显示出河漫滩或者 洪积扇的特点。相对较小的峰值为 1Φ 和 7Φ, 分别 代表了砂级和粉砂级的颗粒, 这种多粒级、分选差 的特征, 往往代表了河流沉积物的快速堆积。该端 元泥质颗粒相对较少, 表明后期沉积作用影响较小, 能代表最原始的沉积特征。该区域的沉积物类型 主要砾质泥、砾质泥质砂, 与端元所代表的沉积物



Fig.4 Plane distribution of relative content of each end-member of the sediment

表1 研究区端元特征参数

Table 1	Characteristic	parameters	of end-member	in the study area
---------	----------------	------------	---------------	-------------------

端元	黏土/%	粉砂/%	砂/%	砾/%	Mz/Φ	σ	SK	Kg
EM1	24.67	66.54	8.79	0.00	6.59	1.98	0.03	0.92
EM2	0.00	1.69	98.31	0.00	2.56	0.64	0.06	1.36
EM3	6.03	12.34	80.37	1.26	3.00	2.55	0.61	2.54
EM4	11.27	29.16	39.56	20.01	2.68	3.78	0.33	0.60

相对应,表明该区域为河流相的残留沉积。

## 4.2 稀土元素来源指示

为了进一步分析残留沉积的来源,在端元分析的基础上,将沉积物进行动力分区(图 5)。分区的 原则是根据最大贡献率的端元确定该样品点的分 区类型,4个分区基本对应4个端元的高值区。对 不同分区的地球化学元素含量进行统计分析(表 2)。 稀土元素受后期影响改造较小,往往可以较好的反 映沉积物的源区特征<sup>[27]</sup>。稀土元素的含量,往往与 沉积物的粒度密切相关<sup>[28]</sup>,研究区 F1 区域的ΣREE 含量最高,其余区域含量相对较少,表现出细粒沉 积物稀土元素相对富集的特征(图 6a),与前人研究 成果—致<sup>[12,29]</sup>。虽然沉积物的粒级对稀土总量影



图 5 研究区表层沉积动力分区

Fig.5 Zones in dynamics of sedimentation at bottom surface in the Sanniang Bay

响较大,但稀土元素的比值参数,如  $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 、 (La/Yb)<sub>N</sub>等受此影响较小<sup>[32]</sup>,研究区 Mz 与  $\Sigma LREE/\Sigma$ HREE、(La/Yb)<sub>N</sub>的相关性图解也显示(图 6b、6c),粒径对稀土元素的比值参数影响较小。因此,利用特征比值可以很好地对沉积物的源区进行示踪。利用上地壳稀土元素含量将研究区沉积物稀土元素进行标准化<sup>[33]</sup>,得到  $\Sigma LREE/\Sigma HREE \ \delta Ce$ 、 $\delta Eu$ 、(La/Yb)<sub>N</sub>等特征参数。代表残留沉积的F3和F4 区具有明显的低  $\Sigma REE$ 、高  $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 的特点,表现出明显的轻重稀土分馏。

(La/Yb)<sub>N</sub>-δEu 图解显示(图 7a), F1 和 F2 区域 (La/Yb)<sub>N</sub> 值相对集中, F3 和 F4 变化范围相对较大, 但总体靠近 F2 区域,显示出一定相关性。研究区 沉积物 δEu 多显示为负异常。一般来说,酸性火成 岩、陆源碎屑岩来源的沉积物往往具有 δEu 负异常, 而基性火成岩往往 δEu 异常不明显<sup>[34]</sup>。朱维晃等<sup>[35]</sup> 对邻区成土母质的稀土元素研究表明,花岗岩、砂 岩、砂页岩的 δEu 值分别为 0.665、0.536、0.39。研 究区 F1 区的 δEu 平均值为 0.64,显示出混合来源 特征,这可能意味着其主要来源为钦州地区的陆源 碎屑岩与花岗岩。F2 区的 δEu 平均值为 0.25,最大 值为 0.36,表明其主要为砂页岩、砂岩来源,该区域 靠近大风江口,可能主要来源为潮流、海浪对沿岸 的北海组、湛江组的剥蚀作用。F3 区和 F4 区的 δEu 值平均分别为 0.34 和 0.45, 表明其主要为砂页 岩、砂岩来源,可能混有花岗岩的来源。根据前文 水动力条件分析,认为其可能为来自北部湾东部的 河流残留沉积。

ΣLREEΣ/HREE- $\delta$ Ce 图解显示(图 7b), ΣLREE/ ΣHREE 从 F2 区到 F4 区呈增大的趋势,显示出随 着水深轻稀土富集的特征。窦衍光等<sup>[12]</sup>认为, HREE 容易发生迁移,而 LREE 往往容易在风化残余物中 富集,进一步证明了准残留沉积的存在。F1 区 δCe 异常不明显, 而其他区域则显示出明显的 δCe 正异 常。一般来说, δCe的负异常主要由于河口低盐缺 氧的环境,导致 Ce 的亏损,而在海水的 pH-Eh 条件 下,海水中的 Ce 容易氧化为 CeO2 沉淀,以至于海 水中 δCe 形成负异常, 沉积物中 Ce 则相对增加, 形 成正异常<sup>[36]</sup>。而F2区位于河口区域,生产力相对 较高,却具有较明显的 δCe 正异常,这可能与源区 物质明显相关。那么具有同样物质来源的 F3 区和 F4区,也可能主要受源区物质输入的影响,少部分 受海洋自生沉积影响。前人对北部湾沿岸表层沉 积物的地球化学研究表明,在北部湾东北部近岸海

	F1			F2			F3			F4			. UCC <sup>[33]</sup>
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	
La/(µg/g)	43.6	22.8	35.9	12.9	8.71	10.81	19.6	3.45	9.9	17.8	9	13.24	30
Ce/(µg/g)	98.1	57	80.44	38.6	35.5	37.05	57	22.8	35.79	53	31.9	42.74	64
$Pr/(\mu g/g)$	10.7	6.51	9.15	4.55	3.54	4.05	6.29	2.75	4.04	5.5	3.59	4.52	7.1
$Nd/(\mu g/g)$	41.9	26.8	36.35	18.9	15.9	17.4	26.3	11.3	17.04	22.4	15.7	18.96	26
$Sm/(\mu g/g)$	7.85	4.71	6.69	2.94	2.51	2.73	4.75	1.3	2.58	3.79	2.15	3	4.5
$Eu/(\mu g/g)$	1.42	0.33	0.93	0.26	0.07	0.17	0.35	0.08	0.18	0.46	0.1	0.29	0.88
Gd/(µg/g)	9.57	4.54	6.86	3.84	2.72	3.28	4.84	1.4	2.67	3.75	2.02	2.81	3.8
Tb/(µg/g)	1.38	0.74	1.11	0.6	0.42	0.51	0.8	0.3	0.47	0.61	0.34	0.49	0.64
Dy/(µg/g)	6.92	4.22	5.88	3.54	2.69	3.12	4.46	2.02	2.87	3.67	2.22	2.93	3.5
Ho/(µg/g)	1.46	0.86	1.18	0.76	0.52	0.64	0.9	0.39	0.56	0.7	0.38	0.54	0.8
$Er/(\mu g/g)$	4.46	2.75	3.65	2.4	1.74	2.07	2.98	1.25	1.83	2.25	1.22	1.75	2.3
$Tm/(\mu g/g)$	0.76	0.48	0.61	0.44	0.34	0.39	0.51	0.27	0.35	0.4	0.26	0.34	0.33
Yb/(µg/g)	4.5	2.42	3.45	1.77	1.3	1.54	2.64	0.44	1.22	1.85	0.62	1.26	2.2
$Lu/(\mu g/g)$	0.66	0.35	0.52	0.3	0.19	0.25	0.36	0.08	0.18	0.28	0.11	0.2	0.32
Y/(µg/g)	34.4	15.1	24.92	11.3	6.29	8.8	17.7	2.79	7.78	12.6	3.98	8.01	
$\Sigma REE/(\mu g/g)$	226.11	134.54	192.35	91.8	76.15	83.98	131.69	47.89	79.68	116.45	71.08	93.23	
$\Sigma LREE/(\mu g/g)$	201.45	118.18	169.35	78.15	66.23	72.19	114.2	41.74	69.53	102.95	63.04	82.82	
$\Sigma$ HREE/( $\mu$ g/g)	29.41	16.36	23.24	13.65	9.92	11.79	17.49	6.15	10.15	13.5	7.27	10.32	
ΣLREE/ΣHREE	8.17	6.43	7.35	6.68	5.73	6.2	8.84	5.6	7.11	9.7	7.61	8.28	
δEu	0.91	0.32	0.64	0.36	0.13	0.25	0.5	0.16	0.34	0.66	0.21	0.45	
δCe	1.06	0.95	1.01	1.45	1.14	1.3	1.68	1.15	1.38	1.56	1.1	1.3	
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.9	0.63	0.77	0.53	0.49	0.51	0.84	0.38	0.64	1.08	0.68	0.83	

表 2 三娘湾海域表层沉积物稀土元素含量统计

Table 2 Statistics of rare earth elements in surface sediments of the Sanniang Bay



图 6 平均粒径(Mz)与稀土元素特征参数相关性图解

Fig.6 Correlation between the mean grain size (Mz) and characteristic parameters of rare earth elements





域, 普遍存在 δCe 的正异常<sup>[12,14]</sup>, 这种异常可能是 由北海半岛母岩区铁铝相对富集以及母岩风化作 用强弱的差异性导致<sup>[35,37]</sup>。因此, 研究区的 δCe 异 常与北部湾东北部的新生代沉积物物源密切相关, 与钦州地区的物源关系不明显。

# 4.3 准残留沉积的意义

准残留沉积是恢复古地貌古环境的重要依据, 因为其往往蕴含着海侵海退的关键信息<sup>[4]</sup>。三娘湾 海域的准残留沉积与北部湾东北部沿岸的新生代 沉积关系密切。海域物探数据显示,在北部湾海域 15 m 等深线附近,存在多条埋深较浅的古河道,其 中规模最大的为南流江古河道,宽 2~4 km,延伸超 过 80 km<sup>[30]</sup>。三娘湾的准残留沉积,正处在古河道 的位置,这意味着二者可能具有一定的关联。前人 通过钦州湾海域的柱状沉积物和钻孔数据研究,认 为在 0.4 m 以下埋深存在河流相沉积, C<sup>14</sup> 测年显示, 古河道为晚更新世--早全新世的产物<sup>[38]</sup>。有学者 认为晚更新世海岸线在目前的 50 m 水深的位置, 称其为第二古海岸线[35]。莫永杰[39] 认为大风江东 侧残留沉积重矿物组成与湛江组、北海组类似,显 示其为海侵形成的残留沉积。冯文科<sup>[31]</sup>认为在此 时期,在目前15~20m水深的位置,存在第一古海 岸线(图 5)。钻孔数据显示,在 8 000 aBP 时期,钦 州湾地区为河漫滩沉积,为此推论提供了证据<sup>[30]</sup>。 因此,可以确定的是,三娘湾地区在8000 aBP 左右 为古南流江流域河道沉积,沉积了河漫滩相的砾质 沉积物,主要物源区为北海市南流江流域,而非 钦州地区。6000 aBP 钦州湾-三娘湾地区开始大规 模的海侵,海平面上升至目前高程约5m的位置<sup>[31]</sup>. 三娘湾南部地区变为浅海环境,陆源物质供给不足, 之前的河漫滩沉积被相对完整的保留了下来,形成 了残留沉积。后期受北部湾地区逆时针环流和潮

流的共同影响,大风江西侧为主要的淤积区,这也 是研究区准残留沉积受后期改造明显的原因之一。 总之,三娘湾海域准残留沉积的发现,为研究古地 貌和古环境演化提供了新的证据。

# 5 结论

广西三娘湾海域沉积物分为8类,其中,含砾 沉积物主要分布在目前水动力条件较弱的地区,为 一套准残留沉积。利用端元模型对三娘湾表层沉 积物进行定量解析,提取出4个端元,分别代表了 潮流、河口波浪、混合沉积及河流残留作用。稀土 元素特征显示,准残留沉积具有与北部湾东北部沿 岸沉积物相近的特征,其物源主要为砂页岩、砂岩 等,推测其为晚更新世一全新世的河流残留沉积。 残留沉积的识别,对恢复北部湾乃至南海北部地区 的古海平面和古地形具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 刘锡清.中国陆架的残留沉积[J].海洋地质与第四纪地质, 1987,7(1):1-14.
- [2] EMERY K O. Relict sediments on continental shelves of world[J]. Bulletin of The American Association of Petroleum Geologists, 1968, 52(3): 445-464.
- [3] MCMANUS D A. Modern versus relict sediment on the continental shelf[J]. Geological Society of American Bulletin, 1975, 86(8): 1154-1160.
- [4] 刘锡清. 近海沉积地貌研究中的几个问题[J]. 海洋地质动态, 1995, 14(2): 1-3.
- [5] 苏广庆. 南海现代沉积地质学的若干问题[J]. 台湾海峡, 1991, 10(4): 31-37.
- [6] 罗又郎, 冯伟文, 林怀兆. 南海表层沉积类型与沉积作用若干特征[J]. 热带海洋, 1994, 13(1): 47-54.
- [7] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等.东海地质[M].北京:科学出版社, 1987.
- [8] 沈华悌.东海陆架残留沉积时代和成因模式[J].海洋学报(中

文版), 1985, 7(1): 67-77.

- [9] 王张华, 过仲阳, 陈中原. 东海陆架平北地区残留沉积特征及古 环境意义[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2002(1): 81-86.
- [10] 肖尚斌,陈木宏,陆钧,等.南海北部陆架柱状沉积物记录的 残留沉积[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(3):1-5.
- [11] 吴时国, 罗又郎. 南海南部大陆架的残留沉积[J]. 热带海洋, 1994, 13(3): 47-53.
- [12] 窦衍光,李军,李炎.北部湾东部海域表层沉积物稀土元素组成及物源指示意义[J].地球化学,2012,41(2):147-157.
- [13] 林镇坤,王爱军,叶翔.南流江河口水下三角洲表层沉积物端 元分析及其沉积动力环境意义[J].沉积学报,2019,37(1): 124-134.
- [14] 许冬.北部湾东部末次冰消期以来的沉积记录及现代沉积格局的形成[D].青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2014.
- [15] 庞国涛, 阎琨, 李伟. 广西三娘湾海域表层沉积物多环芳烃特 征及风险评价[J]. 中国地质调查, 2021, 8(5): 95-100.
- [16] 赵利,彭学超,钟和贤,等.南海北部陆架区表层沉积物粒度 特征与沉积环境[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(6): 111-122.
- [17] 张晋,李安春,万世明,等.南海南部表层沉积物粒度分布特
  征及其影响因素[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(2):1 10.
- [18] 朱海,张玉芬,李长安. 端元分析在长江武汉段古洪水识别中的应用[J]. 沉积学报, 2020, 38(2): 297-305.
- [19] WELTJE G J. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem [J]. Mathematical Geology, 1997, 29(4): 503-549.
- [20] PATERSON G A, HESLOP D. New methods for unmixing sediment grain size data[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, 16(12): 4494-4506.
- [21] 黄丹青,杨利荣,李建星,等.阿尔金新近纪红黏土粒度特征 及古气候记录[J].沉积学报,2019,37(2):309-319.
- [22] 许良宇,杨立辉,张硕,等. 宣城向阳剖面网纹红土粒度端元 分析及指示意义[J]. 地球与环境, 2021, 49(6): 646-654.
- [23] 张晓东,翟世奎,许淑梅.端元分析模型在长江口邻近海域沉积物粒度数据反演方面的应用[J].海洋学报(中文版),2006, 28(4):159-166.
- [24] SCHLITZER R. Ocean Data View [EB/OL]. https://odv.awi. de.[2022-04-04]

- [25] Folk R L. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature[J]. Joural of Geology, 1954, 62(4): 344-359.
- [26] 张伯虎,陈沈良,刘焱雄,等.广西钦州湾海域表层沉积物分 异特征与规律[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(4): 66-70.
- [27] 杨守业,李从先. REE示踪沉积物物源研究进展[J]. 地球科学 进展, 1999, 14(2): 63-66.
- [28] 曹鹏,石学法,李巍然,等.安达曼海东南部海域表层沉积物 稀土元素特征及其物源指示意义[J].海洋地质与第四纪地质, 2015,35(5):57-67.
- [29] 张现荣,李军,窦衍光,等. 辽东湾东南部海域柱状沉积物稀 土元素地球化学特征与物源识别[J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 684-691.
- [30] 马胜中,梁开,陈太浩.广西钦州湾浅层埋藏古河道沉积特征[C].第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下册), 2009:346-350.
- [31] 冯文科. 南海北部滨岸海成阶地与古海岸线遗迹[C]. 中国第 四纪海岸线学术讨论会论文集. 1985: 221-229.
- [32] 孙兴全,刘升发,李景瑞,等. 孟加拉湾南部表层沉积物稀土 元素组成及其物源指示意义[J].海洋地质与第四纪地质, 2020,40(2):80-89.
- [33] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Melbourne: Blackwell, 1985: 29-45.
- [34] CRICHTON J G, CONDIE K C. Trace element as source indicators in cratonic sediments: a case study from the early Proterozoic Libby Creek Group, southeastern Wyoming[J]. Journal of Geology, 1993, 101(3): 319-332.
- [35] 朱维晃,杨元根,毕华,等.海南省土壤中稀土元素含量与分 布[J].地球与环境,2004,32(2):20-25.
- [36] SHOLKOVITZ E R. The geochemistry of rare earth elements in the Amazon River estuary[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57(10): 2181-2190.
- [37] 葛坦,田野,王强.北海半岛水体混合过程的稀土元素分布特征[J].中国稀土学报,2008,26(6):753-759.
- [38] 刘涛,黎广钊.北部湾广西沿岸全新世海侵过程的区域差 异[J].海洋学报,2015,37(3):70-76.
- [39] 莫永杰.北部湾北部浅海沉积物的粒度类型[J].热带海洋, 1990,9(1):87-93.

# Palimpsest sediments in Sanniang Bay, Guangxi: evidence from end-member and rare earth elements

YAN Kun<sup>1,2</sup>, PANG Guotao<sup>1</sup>, XING Xinli<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, YANG Yuanzhen<sup>1\*</sup>, BAO Kuanle<sup>1</sup>

(1 Yantai Geological Survey center of Coastal Zone, China Geological Survey, Yantai 264000, China;

2 School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430000, China)

**Abstract:** Relict sediments record the key information of transgression and regression, and it is also a powerful evidence for the reconstruction of paleogeography. In the marine geological survey in October 2019, a set of gravelly sediments was collected in the area in more than 10 m depth in the Sanniang Bay, Qinzhou, Guangxi. To understand the causes of formation and provenance, grain size analysis and geochemical test were conducted, and the end-member analysis model and rare earth element discrimination diagram were used. The information of Sanniang Bay sediment could be characterized by four end-member (EM). EM1 represents the characteristics of reciprocating tidal current in Qinzhou Bay, EM2 is the high-energy scouring environment of Dafeng River estuary, EM3 reflects the mixing action of relict sediments and wave, and EM4 signifies the original river deposition of relict sediments. The characteristics of rare earth elements (REE) show that the relict sediments has the characteristics of low  $\Sigma REE$  and high  $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ . After the normalization of REE to the upper crust, it shows obvious  $\delta Ce$  positive anomaly and  $\delta Eu$  negative anomaly, which indicates the characteristics of the source of sand shale and sandstone. It is similar to the nearshore sediments in the Sanniang Bay is the relict product of the latest large-scale transgression in the Beibu Gulf, and is transformed by ocean current and tide. The result provides key information for the identification and evolution of ancient coastline in the Beibu Gulf.

Key words: Sanniang Bay; palimpsest sediments; end-member analysis; rare earth element