

唐荣, 冯秀丽, 冯利, 等. 南海台西南盆地南部海域 19 ka 以来沉积物物源与运输机制分析[J]. 海洋学报, 2021, 43(8): 54–65, doi:10.12284/hyxb2021090

Tang Rong, Feng Xiuli, Feng Li, et al. Analysis on the provenance and transport mechanism of sediments in the southern area of Southwest Taiwan Basin, South China Sea over the last 19 ka[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(8): 54–65, doi:10.12284/hyxb2021090

# 南海台西南盆地南部海域 19 ka 以来沉积物 物源与运输机制分析

唐荣<sup>1,2,3</sup>, 冯秀丽<sup>2,3\*</sup>, 冯利<sup>2,3</sup>, 肖晓<sup>2,3</sup>, 刘爽<sup>2,3</sup>

(1. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180; 2. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 3. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 通过对南海台西南盆地南部海域 TS6 岩芯沉积物样品稀土元素地球化学特征和黏土矿物组合进行分析, 探讨了研究区近 19 ka (末次冰消期) 以来沉积物物质来源、运输机制及物源变化特征。物源综合分析结果显示, 台湾河流是研究区沉积物的主要源区, 其中台湾西部河流较东部河流贡献更大, 珠江也为研究区输送了部分沉积物。由于各源区物质主要黏土矿物种类及含量存在较大差异, 推测研究区沉积物黏土矿物中的伊利石和绿泥石主要由台湾河流提供, 高岭石主要由珠江提供, 含量较少的蒙脱石由东南部的吕宋岛提供。末次冰消期以来, 研究区陆源物质输入量受控于海平面变化而逐渐减少, 黏土矿物组合反映的物源变化主要受控于气候和洋流变化, 还可能叠加了多种因素的影响。

**关键词:** 台西南盆地; 末次冰消期; 物源; 运输机制; 陆源输入量

中图分类号: P736.21<sup>+</sup>2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)08-0054-12

## 1 引言

研究表明, 海洋沉积物中的元素及矿物能提供丰富的古气候环境信息, 特定的元素、矿物组合可以获取特定的环境及其成因信息<sup>[1]</sup>。微量元素中, 稀土元素 (Rare Earth Element, REE) 由于具有相对稳定的化学性质, 经过风化、搬运、沉积后, 能够保持源岩的信息<sup>[2]</sup>, 常被用于示踪沉积物的物源和分析源区气候环境变化。黏土矿物作为海洋细粒陆源碎屑沉积物中的主要成分<sup>[3]</sup>, 由于其易悬浮及在搬运和沉积过程中基本保留源区特征且不受后期成岩作用的影响的特性, 在沉积物运输、洋流变化、沉积环境演变及物源判别等研究中也发挥了重要作用<sup>[4-5]</sup>。

南海地理位置与地形条件特殊复杂, 其北部具有

宽广的陆架、陆坡区、盆地和海底峡谷等多种地貌单元, 是众多学者研究的热点区域<sup>[6-8]</sup>。区域源-汇问题<sup>[9-11]</sup>一直以来都是海洋沉积学研究的重点, 围绕这一区域开展的相关研究也较多<sup>[12-13]</sup>。近几十年众多学者研究发现<sup>[14-17]</sup>, 华南大陆东部、西部沿海河流和台湾西部河流被认为是南海北部陆架区的 3 大主要沉积物源区, 但在不同区域各源区及物源供应量有所不同。此外, 该区域物质来源还受沉积环境变化影响 (海平面升降及其引起的古海岸线变化、裸露的陆架区河流重组、早期沉积物质再重组等)<sup>[18-19]</sup>。受多重因素影响, 南海北部沉积物来源相对复杂, 需分区讨论。台西南盆地临近台湾岛、华南大陆和巴士海峡, 沉积物源区及水流体系较复杂, 相关研究较少<sup>[20]</sup>。本文以南海台西南盆地南部海域 TS6 岩芯为研究材料,

收稿日期: 2020-09-01; 修订日期: 2020-11-02。

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0306703); 中国地震局第一监测中心科技创新主任基金 (FMC2020003)。

作者简介: 唐荣 (1993—), 女, 安徽省马鞍山市人, 助理工程师, 从事第四纪沉积与环境变迁研究。E-mail: candy.sp@foxmail.com

\* 通信作者: 冯秀丽 (1962—), 女, 博士, 教授, 主要从事海洋沉积与工程环境研究。E-mail: fengxiuli@ouc.edu.cn

对沉积物的稀土元素和黏土矿物组合进行综合分析,探讨了研究区 19 ka 以来的物质来源、输运机制及变化特征,为下一步还原源区古环境古气候演变过程奠定了基础,对预测未来全球气候环境变化也具有重要指导意义。

## 2 材料与方法

本文实验材料 TS6 岩芯利用重力取样器于南海东北部下陆坡与海盆交界处、台西南盆地南部海域(图 1)取得,取样水深为 3 008 m。岩芯长为 400 cm,岩性相对均一,全部为青灰色黏土质粉砂,未见明显扰动。

对岩芯进行连续取样,地球化学元素测试取样间隔为 2 cm,共获得 200 份样品,烘干后研磨至 200 目以下后采用四酸消解法进行预处理,步骤如下:(1)取 50 mg 60℃ 低温烘干后的样品于 Bomb 溶解器中并加入 1 mL 1:1 HNO<sub>3</sub> 充分反应;(2)加入 3 mL 纯 HF,放入自动控温电热板上(温度设定为 160~180℃)加热 48 h,蒸发至快干后加入 1 mL 纯化过的 HClO<sub>4</sub>,蒸至白烟冒尽;(3)冷却后加 2 mL HCl,同样蒸至近干;(4)加入 2 mL 1:1 HNO<sub>3</sub>,蒸至近干后继续加入 1.5 mL HNO<sub>3</sub>,加热溶解 12 h 后冷却至室温;(5)加入 0.5 mL 铈内标溶液,置于电热板上保温 12 h

后冷却至室温;(6)将配好的溶液倒入 50 mL 容量瓶中,用 1:1 HNO<sub>3</sub> 定容并摇匀待。样品在澳实分析检测(广州)有限公司实验室进行上机测试,稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析误差小于 5%。

黏土矿物测试取样间隔为 6 cm,共获得 66 个样品,采用 X 射线衍射方法(XRD)进行测试,主要实验步骤如下:(1)取 5~10 g 沉积物样品于 500 mL 烧杯中,加入适量 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 并稀释,去除有机质;(2)反应完全后,加入 0.1 mol/L 的六偏磷酸钠分散剂进行分散;(3)静置过夜后,将样品倒入量筒中并加入蒸馏水定容至 1 L,搅拌均匀后静置,根据斯托克斯(Stokes)定律提取粒径小于 2 μm 的组分,将多次提取到的混合物离心浓缩、去除上清液、制成定向薄片;(4)定向薄片经过自然干燥后,放入烘箱用乙二醇蒸汽在 60℃ 温度下饱和 48 h,使其充分饱和和后再上机测试。样品在中国科学院青岛生物能源与过程研究所公共实验室的德国 Bruker 公司生产的 D8 Advance X 射线衍射仪上完成上机测试。测试得到的黏土矿物数据通过 JADE6.5 软件进行分析处理。各黏土矿物的含量采用改进的 Biscaye<sup>[21]</sup> 方法计算。

关于岩芯沉积物粒度分布和定年等情况参见文献[20],在此不再赘述。

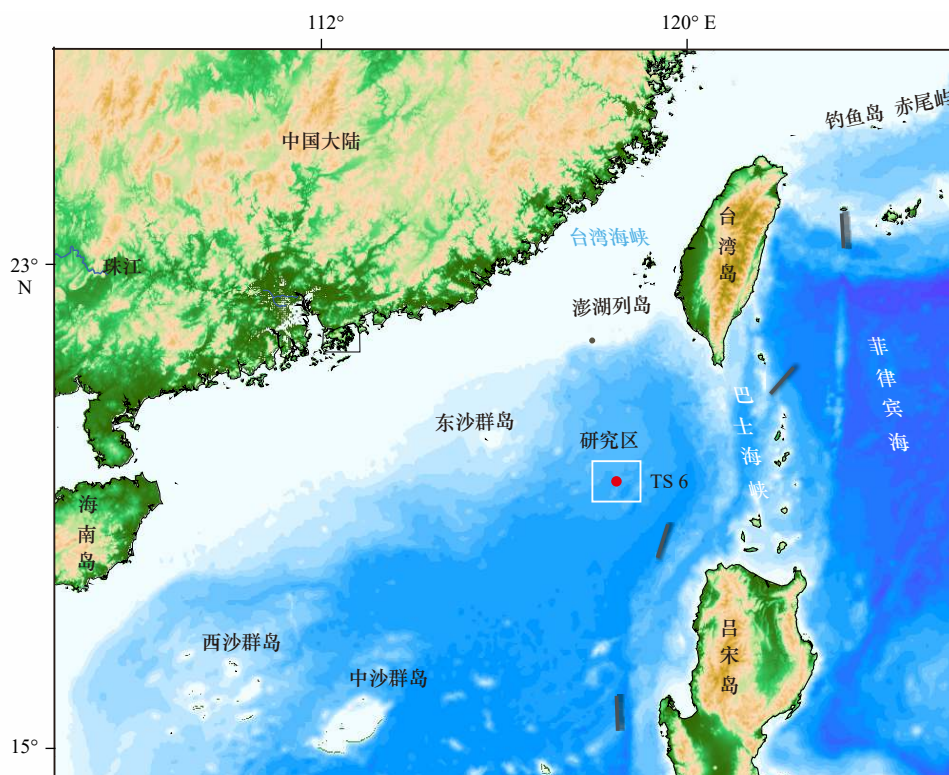


图 1 TS6 孔站位示意图

Fig. 1 Map showing the location of Core TS6

### 3 实验结果

#### 3.1 REE 含量及参数特征

TS6 岩芯沉积物稀土总量  $\Sigma\text{REE}$  平均值为  $129.56 \times 10^{-6}$ , 其中轻稀土 ( $\Sigma\text{LREE}$ , La~Eu) 平均含量为  $119.20 \times 10^{-6}$ ; 重稀土 ( $\Sigma\text{HREE}$ , Gd~Lu) 平均含量为

$10.36 \times 10^{-6}$ ; 轻重稀土比值 (LREE/HREE) 介于 9.55~12.92, 表现为明显的轻稀土富集状态 (表 1)。垂向分布来看 (图 2), 轻重稀土变化趋势基本一致,  $\Sigma\text{REE}$  变化幅度与  $\Sigma\text{LREE}$  相同, 9.2 ka BP 和 6 ka BP 前后出现明显的峰值, LREE/HREE 呈现出末次冰消期高全新世降低的特征。

表 1 TS6 岩芯 REE 含量及相关参数

Table 1 REE content and related parameters of Core TS6

参数	$\Sigma\text{REE}$ 含量/ $10^{-6}$	$\Sigma\text{LREE}$ 含量/ $10^{-6}$	$\Sigma\text{HREE}$ 含量/ $10^{-6}$	LREE/HREE	(La/Yb) <sub>UCC</sub>	(La/Sm) <sub>UCC</sub>	(Gd/Yb) <sub>UCC</sub>	$\delta\text{Ce}$ 值	$\delta\text{Eu}$ 值
最大值	158.47	146.98	12.22	12.92	1.89	0.96	1.80	1.03	0.72
最小值	112.21	101.76	8.59	9.55	1.13	0.81	1.34	0.94	0.59
平均值	129.56	119.20	10.36	11.52	1.49	0.89	1.48	0.98	0.66

注: UCC 为 上地壳。

$\delta\text{Ce}$  和  $\delta\text{Eu}$  ( $\delta\text{Ce}=2\text{Ce}_N/(\text{La}_N+\text{Pr}_N)$ ,  $\delta\text{Eu}=2\text{Eu}_N/(\text{Sm}_N+\text{Gd}_N)$ ) 是反映环境的重要参数, 可以指示源区母岩风化程度, (La/Yb)<sub>UCC</sub>、(La/Sm)<sub>UCC</sub> 和 (Gd/Yb)<sub>UCC</sub> 比值是研究稀土元素分馏的重要参数<sup>[2]</sup>, TS6 岩芯沉积物  $\delta\text{Ce}$  值为 0.94~1.03, 没有出现明显的 Ce 异常,  $\delta\text{Eu}$  平均值为 0.66, 垂向变化不大, 表现为 Eu 负异常 (表 1)。(La/Yb)<sub>UCC</sub>、(La/Sm)<sub>UCC</sub> 和 (Gd/Yb)<sub>UCC</sub> 在 18.9 ka BP 至 15.8 ka BP 值较大, 随后比值稍减小, 全新世 6 ka BP 前后出现了较明显的峰值 (图 2)。

#### 3.2 黏土矿物组成特征

TS6 岩芯沉积物中小于 2  $\mu\text{m}$  的粒级主要由伊利石、绿泥石、高岭石和蒙脱石 4 种矿物组成。伊利石含量最高, 平均含量为 64.94%; 绿泥石和高岭石次之; 蒙脱石含量最低, 平均含量为 4.90% (表 2)。伊利石结晶度为乙二醇饱和测定曲线 1 nm 半峰高, 该值越低代表结晶度越高, 说明源区水解作用越弱<sup>[22]</sup>; 伊利石化学风化指数为 0.5 nm/1 nm 峰面积比, 该值大于 0.5 说明为富 Al 伊利石 (白云母), 代表水解作用强烈, 反之则说明为富 Fe-Mg 伊利石 (黑云母、云母类), 代表以物理风化为主<sup>[5]</sup>。研究区沉积物伊利石结晶度平均值为 0.29 $\Delta 2\theta$ , 结晶度较低; 伊利石风化指数平均值为 0.36, 说明物理风化占主导地位。各黏土矿物含量及参数垂向变化如图 3 所示, 蒙脱石在 13.5 ka BP 至 12.9 ka BP 前后出现了明显的低值, 含量几乎为 0, 高岭石在末次冰消期的平均含量高于全新世时期。

### 4 讨论

#### 4.1 物质来源综合分析

##### 4.1.1 沉积物 REE 分布模式与参数特征

由于 REE 活动性较低, 主要赋存于碎屑矿物的

晶格中, 可以基本保留原岩的属性特征, 因此, 物质来源是影响沉积物中 REE 组成最重要的影响因素<sup>[23]</sup>, 但是, REE 在沉积物搬运过程中会受到粒度分选、化学风化和矿物吸附等因素的影响而发生分馏<sup>[24]</sup>, 在用 REE 进行沉积物物源分析前需要综合评估这些因素的影响。前期分别对研究区沉积物 CIA 指数与 REE 分异参数、黏土矿物含量与  $\Sigma\text{REE}$  含量、(TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MnO) 质量分数/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 质量分数与  $\Sigma\text{REE}$  质量分数、CaO 含量与  $\Sigma\text{REE}$  含量进行相关性分析, 计算结果显示各相关系数绝对值均较小, 初步判断源区化学风化作用、沉积物粒度分布、海洋自生铁锰氧化物和碳酸盐等因素对 REE 组成影响较小。

TS6 岩芯的  $\Sigma\text{REE}$  平均含量为  $129.56 \times 10^{-6}$ , 高于大洋玄武岩的 REE 总含量 ( $58.64 \times 10^{-6}$ )<sup>[25]</sup>, 但又远低于深海黏土的 REE 总含量 ( $411 \times 10^{-6}$ )<sup>[26]</sup>, 与上地壳 REE 丰度<sup>[27]</sup> ( $\Sigma\text{REE}$  含量为  $146.37 \times 10^{-6}$ ) 和南海大陆架的  $\Sigma\text{REE}$  含量平均值 ( $166.36 \times 10^{-6}$ )<sup>[28]</sup> 相近。沉积物 LREE 明显富集, HREE 含量相对均一, 具有明显的  $\delta\text{Eu}$  负异常, 这些都是陆源物质区别于火山源和生物源物质的典型特征, 表明研究区沉积物以陆源物质为主。

TS6 岩芯与周边潜在物源区沉积物 REE 上地壳 (UCC) 标准化分布模式如图 4 所示, 研究区沉积物在末次冰消期和全新世两个阶段的各稀土元素分布变化趋势基本相同, 其中 REE 丰度和其他地区相比稍偏低, 轻稀土 (La~Nd) 和重稀土 (Er~Lu) 曲线段较平缓, 中稀土 (Sm~Ho) 曲线段较陡, 具有中等程度的 Dy 正异常、轻微的 Eu 正异常和 Ce 负异常, 与其具有相似特征的有台湾西部河流和台湾东部河流, 说明它们可能是研究区的主要物源区。湄公河和红河

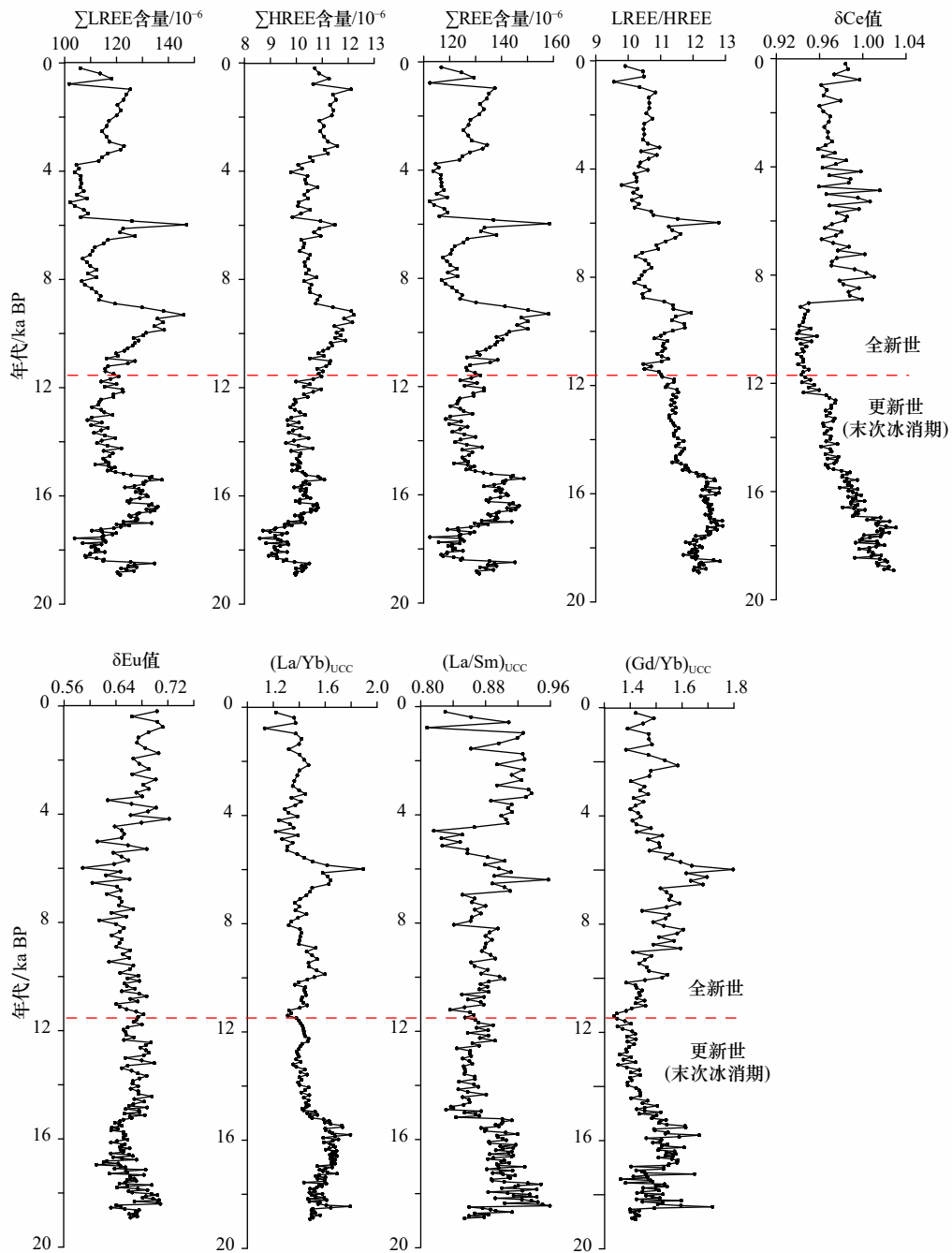


图2 TS6岩芯REE参数垂向变化

Fig. 2 Vertical change of REE parameters of Core TS6

表2 TS6岩芯黏土矿物含量及相关参数

Table 2 Clay mineral content and related parameters of Core TS6

黏土矿物	伊利石含量/%	绿泥石含量/%	高岭石含量/%	蒙脱石含量/%	伊利石结晶度/ $^{\circ}\Delta 2\theta$	伊利石风化指数
最大值	68.71	24.04	11.27	7.19	0.31	0.47
最小值	62.37	18.75	7.76	0.15	0.26	0.29
平均值	64.94	20.78	9.38	4.90	0.29	0.36

沉积物具有较典型的Ce正异常,这一特征与其他区域都不同,而海南岛土壤和吕宋岛北部沉积物曲线形

态和研究区相差很大,结合地理位置远近和地形阻隔关系,初步判断这些地方应该对研究区沉积物供给影

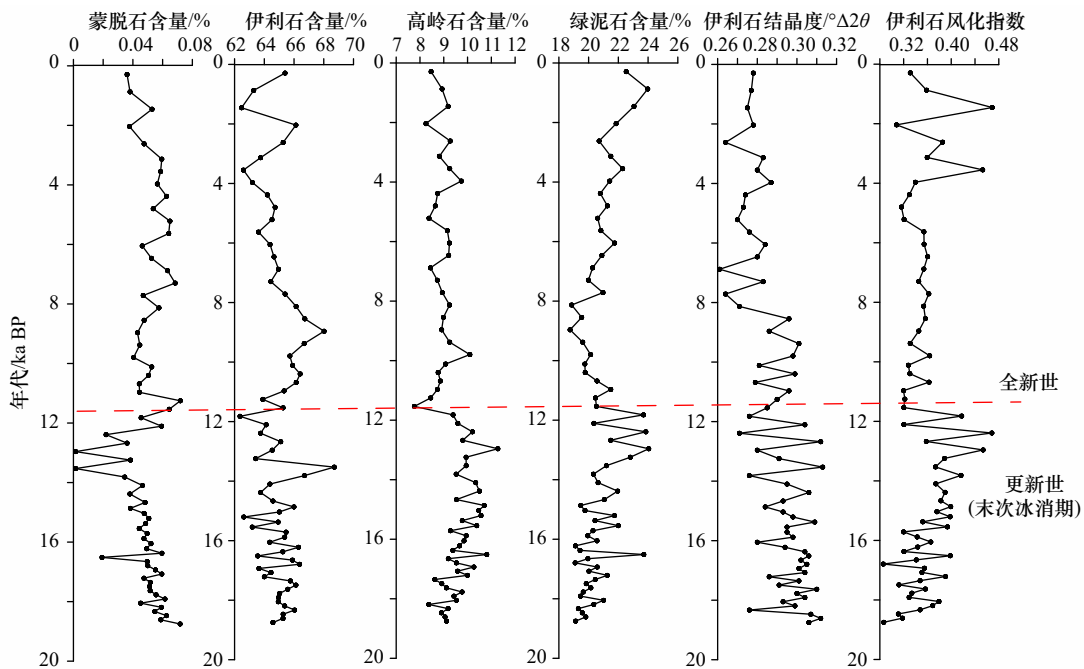


图3 黏土矿物含量及相关参数垂向变化

Fig. 3 Vertical change of clay mineral content and related parameters

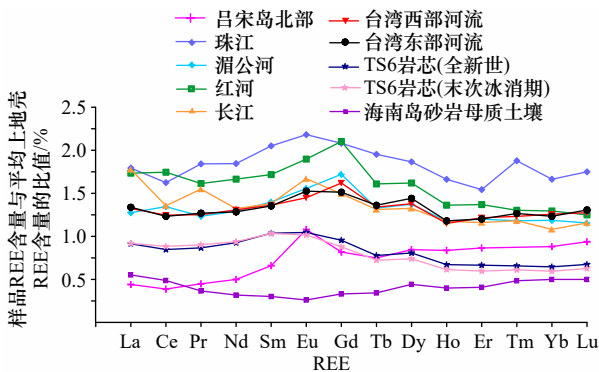


图4 TS6岩芯沉积物与潜在物源区REE上地壳标准化分布

Fig. 4 REE upper crust standardized distribution of Core TS6 sediments and potential provenance area

台湾河流数据引自文献 [29], 吕宋岛北部数据引自文献 [30], 珠江数据引自文献 [31], 红河和湄公河数据引自文献 [32], 长江数据引自文献 [33], 海南岛数据引自文献 [34]

The data of rivers in Taiwan are cited from reference [29], the data of northern Luzon Island are cited from reference [30], the data of Zhujiang River are cited from reference [31], the data of Red River and Mekong River are cited from reference [32], the data of Changjiang River are cited from reference [33], the data of Hainan Island are cited from reference [34]

响较小。

REE 分异参数已被广泛用于物源判别<sup>[23-24,33]</sup>。δCe 值和 δEu 值可以反映源区的母岩风化程度, (La/Sm)<sub>ucc</sub> 和 (Gd/Lu)<sub>ucc</sub> 分别代表 LREE 和 HREE 的分馏程度, 将珠江、台湾西部河流、台湾东部河流、长江等地区

的 REE 分异参数与 TS6 岩芯沉积物进行对比, δC-δEu 判别图 (图 5a) 显示, 珠江和长江物质的 δCe 值大多比研究区和台湾河流低, 说明更亏损 Ce, 有关学者认为, 这可能与水体与土壤的交换或河流可溶相的氧化清扫作用有关<sup>[35]</sup>。台湾河流中, 西部河流沉积物中的 δCe 值和 δEu 值与研究区更接近。(La/Sm)<sub>ucc</sub>-(Gd/Lu)<sub>ucc</sub> 判别图 (图 5b) 中, 珠江和长江沉积物的 (Gd/Lu)<sub>ucc</sub> 值比研究区稍低, 研究区沉积物表现出明显的中稀土富集。图 6 是珠江、台湾河流和 TS6 岩芯沉积物轻重稀土及其与上地壳标准化值的分布对比, 所有地区沉积物 LREE 和 HREE 都表现出相似的正相关关系, TS6 岩芯沉积物轻重稀土比其他地区稍偏低, 分布相比于珠江更接近台湾河流。以上分析表明, 各区域沉积物 REE 分异参数差异较明显, 总体来看, TS6 岩芯沉积物的 REE 分异参数与台湾西部河流更相近一些, 表明台湾西部河流应该为研究区输送了大部分的沉积物, 而台湾东部河流也应该提供了部分物源。

#### 4.1.2 黏土矿物组合变化及各源区贡献

高岭石-(伊利石+绿泥石)-蒙脱石三角端元图 (图 7) 显示, TS6 岩芯各层位沉积物黏土矿物组成及含量基本相同, 指示研究区在末次冰消期以来的物源供给区没有发生大的改变。潜在物源区中, 台湾河流、长江、红河、湄公河和珠江沉积物黏土矿物组合与研究区相对接近, 这些区域沉积物黏土矿物组合中蒙脱石平均含量均小于 10%。

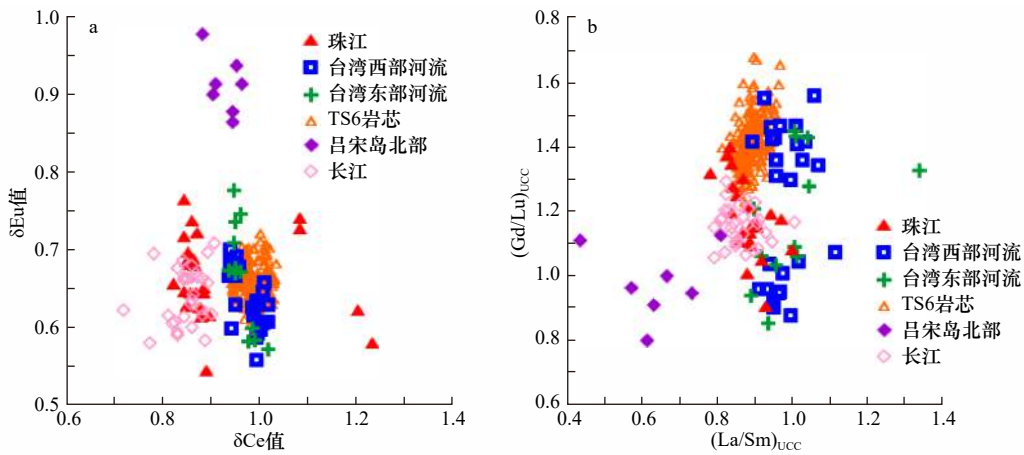


图5 TS6岩芯沉积物与潜在物源区的REE分异参数对比

Fig. 5 Comparison of REE differentiation parameters between Core TS6 sediments and potential provenance areas

台湾河流数据引自文献 [29], 吕宋岛北部数据引自文献 [30], 珠江数据引自文献 [31], 长江数据引自文献 [33]

The data of rivers in Taiwan are cited from reference [29], the data of northern Luzon Island are cited from reference [30], the data of Zhujiang River are cited from reference [31], the data of Changjiang River are cited from reference [33]

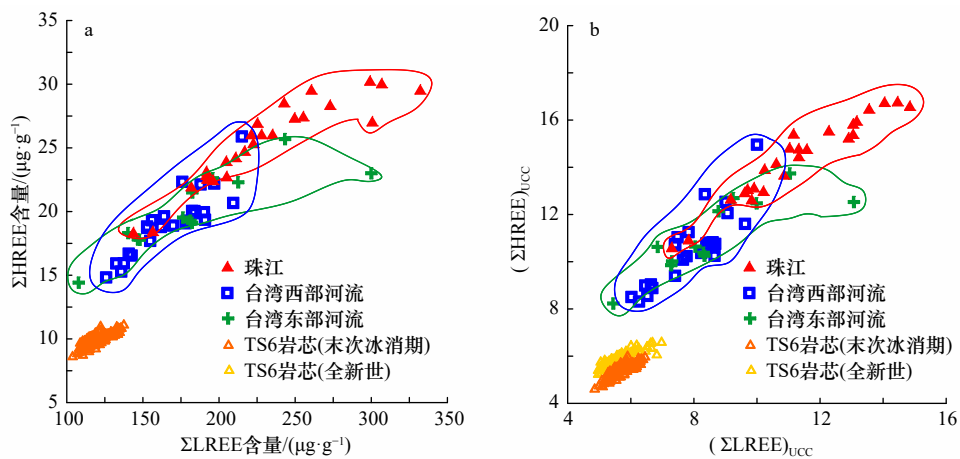


图6 TS6岩芯沉积物与潜在物源区的轻重稀土及其上地壳标准化值分布对比

Fig. 6 Comparison of the light and heavy rare earth elements and their normalized value distribution of Core TS6 sediments and potential provenance areas

台湾河流数据引自文献 [29], 珠江数据引自文献 [31]

The data of rivers in Taiwan are cited from reference [29], the data of Zhujiang River are cited from reference [31]

具体分析, 珠江河流的表层沉积物高岭石含量约占黏土矿物总量的一半, 根据有关学者研究结果<sup>[40]</sup>可知, 南海北部陆坡高岭石主要由珠江提供, 沿珠江口向外海直至北部陆坡3个ODP站位(ODP1144、ODP1145和ODP1146)高岭石含量迅速降低至7%左右, 由于黏土矿物的分异性特征会出现自河流向海洋高岭石和蒙脱石含量一降一升的现象, 但细粒物质的抗絮凝作用会削弱这种分异性沉降作用, 因此产生这种差异的原因主要是物源供给量的变化。研究区高岭石含量较低(平均值为9.38%), 但稍高于台湾河流沉积物(接近0)<sup>[36]</sup>, 与北部陆坡含量相近, 因此珠江可能是研

究区高岭石的主要输送源区。珠江流域的高岭石平均含量为45.58%, 假设研究区沉积物的高岭石全部来自珠江, 则珠江高岭石的供应比最大为20.5%, 因此初步定量推断珠江对研究区的黏土矿物贡献不超过20.5%。研究表明, 珠江流域表层沉积物的伊利石风化指数大于0.5, 代表强烈的水解作用<sup>[9]</sup>, 而研究区伊利石风化指数小于0.3(表2), 指示以物理风化作用为主, 说明研究区伊利石与珠江流域来源不同。相关研究也指出, 南海北部陆坡ODP1146孔沉积物中绿泥石和伊利石不是主要由珠江提供<sup>[41]</sup>, 结合研究区与珠江和南海北部陆坡的相对位置, 推断珠江流域不是

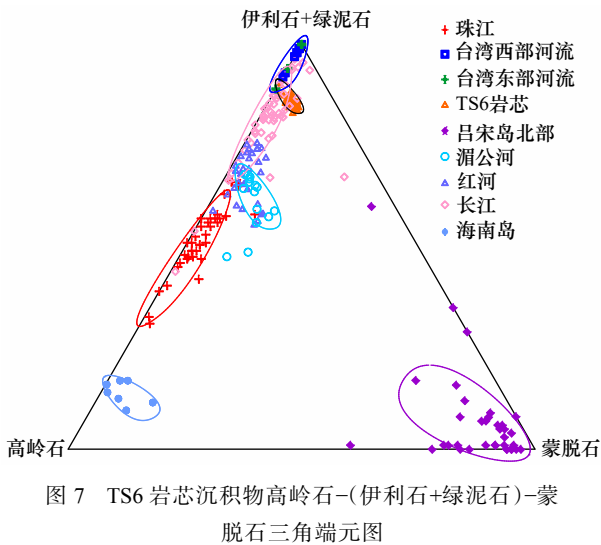


图 7 TS6 岩芯沉积物高岭石-(伊利石+绿泥石)-蒙脱石三角端元图

Fig. 7 Kaolinite-(illite+chlorite)-montmorillonite triangular end member diagram of Core TS6 sediments

台湾河流数据引自文献 [36], 珠江数据引自文献 [37], 吕宋岛数据引自文献 [38], 湄公河和红河数据引自文献 [39], 长江数据引自文献 [40], 海南岛数据引自文献 [12]

The data of rivers in Taiwan are cited from reference [36], the data of Zhujiang River are cited from reference [37], the data of northern Luzon Island are cited from reference [38], the data of Red River and Mekong River are cited from reference [39], the data of Changjiang River are cited from reference [40], the data of Hainan Island are cited from reference [12]

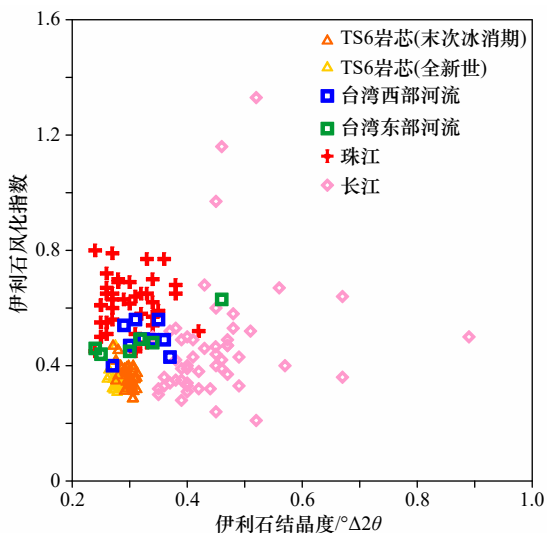


图 8 TS6 岩芯沉积物伊利石结晶度与伊利石风化指数判别图

Fig. 8 Illite crystallinity-illite chemical index discriminant diagram of Core TS6 sediments

台湾河流数据引自文献 [36], 珠江数据引自文献 [37], 长江数据引自文献 [40]

The data of rivers in Taiwan are cited from reference [36], the data of Zhujiang River are cited from reference [37], the data of Changjiang River are cited from reference [40]

研究区伊利石和绿泥石的主要源区。

台湾河流向南海北部地区输送了大量物质<sup>[15,40,42]</sup>。台湾地区地处亚热带气候区,但其河流沉积物中的伊利石风化指数却比几乎同纬度的珠江流域低,这是因为台湾地区地壳运动比较活跃,频发地震和火山活动,出露地表的岩石来不及发生充分的化学风化作用就被河流冲刷带走,导致该地区物理风化作用十分强烈<sup>[36]</sup>。伊利石结晶度-伊利石风化指数判别图(图 8)显示,台湾河流的伊利石结晶度和伊利石风化指数与 TS6 岩芯沉积物相近,两指标都指示源区水解作用较弱,以物理风化作用为主。由于台湾地区广泛出露页岩、板岩和砂岩等沉积岩,它们在强烈的物理风化作用下可以形成伊利石和绿泥石,综合 REE 分析结果,推断 TS6 岩芯沉积物中的伊利石和绿泥石主要由台湾河流提供,最大贡献率在 80% 以上。台湾主要入海河流中,西南部河流的数量、径流量与输沙量都显著大于东部河流<sup>[40]</sup>,前人研究<sup>[15,43]</sup>多认为,南海北部沉积物主要由台湾西南部河流提供,本文分析后认为,虽然台湾东部入海河流较少,沉积物入海方向远离南海北部,但在洋流的作用下可以被运输到研究区,也可为研究区提供部分陆源碎屑物质。

台湾岛、珠江、吕宋岛、长江、海南岛、红河、湄公河沉积物中的蒙脱石含量都极低,因此 TS6 岩芯沉积物中的蒙脱石应该不是由这些地区提供。吕宋岛沉积物黏土矿物以高含量的蒙脱石(85% 以上)为特征,其离研究区较近,因此极有可能是 TS6 岩芯沉积物中的蒙脱石主要源区。

#### 4.2 细颗粒物物质运输机制

研究区位于南海东北部下陆坡与南海海盆交界处,沉积物中的黏土矿物组合及变化特征受控于物源区物质的供应和洋流的搬运作用。南海的表层洋流主要受东亚季风控制,过去学者们多认为,季节风向的变化造成了表层洋流在夏季和冬季流向相反,而后续深入研究发现,表层洋流并不完全随季风变化而反向流动,尤其是在下陆坡和深海盆的广大海域更是如此<sup>[44]</sup>,表层洋流在这些区域流向在冬夏季基本一致。如图 9 所示,季风驱动的表层洋流在进入南海东北部时受地形和黑潮南海分支流等因素的影响发生不同程度的转向,黑潮南海分支沿巴士海峡进入南海北部后一部分向北转变成南海暖流,它们都可将台湾西部河流的黏土矿物运输到研究区,西太平洋深海流的分支沿台湾东部进入南海,也可以将台湾东南部河流的细颗粒物搬运到研究区。研究区蒙脱石可能主要由黑潮南海分支流和表层洋流在东北部形成的西北吕宋涡流搬运。

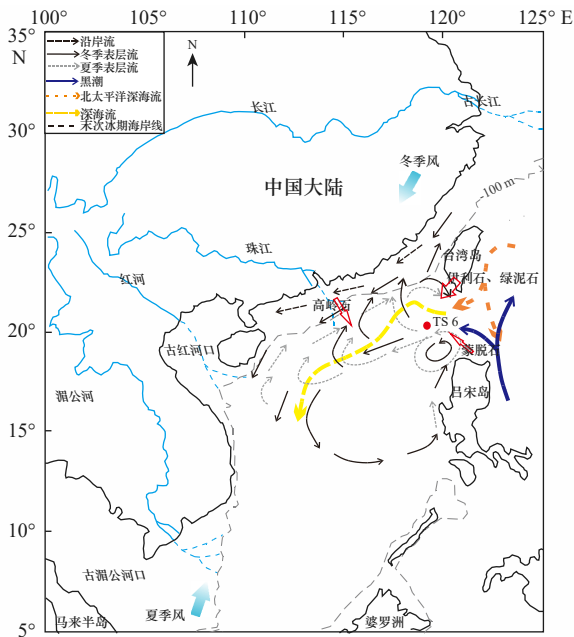


图9 研究区周边洋流分布及黏土矿物输运模式  
Fig. 9 Ocean current distribution and clay mineral transport mode around the study area

洋流模式参考文献 [12]

The model of ocean current is cited from reference [12]

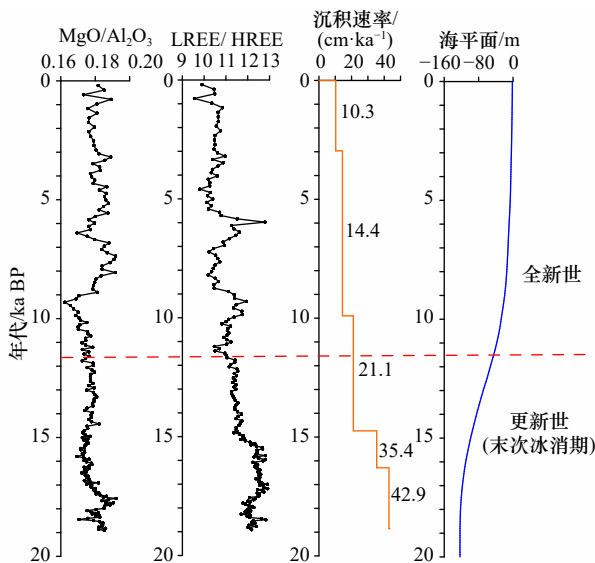


图10 TS6岩芯沉积物部分参数比值、沉积速率和南海海平面随时间的变化

Fig. 10 Parameter ratio, deposition rate and changes of the South China Sea sea level over time of Core TS6 sediments

#### 4.3 陆源输入量与物源变化

基于4.1节分析基本确定研究区沉积物主要来源于周边大陆入海河流,因此陆源物质的输入量直接决定该区域的沉积速率。如图10所示,近19 ka以来,研究区沉积速率呈现逐渐减小的趋势,在末次冰消期阶段最大沉积速率能够达到约42 cm/ka,进入全新世

后,减小至不到20 cm/ka。这表明末次冰期结束后,陆源物质显著减少;沉积物中指示陆源物质输入量变化的 $MgO/Al_2O_3$ 值<sup>[45]</sup>在进入全新世后增大,也表明陆源成分的减少。全球自进入全新世后,气温普遍升高,中国黄土记录表明进入全新世以来东亚夏季风强盛,冬季风衰弱<sup>[46]</sup>,气候温暖湿热,降水增加,从而导致河流的搬运和输送能力增强,为海洋沉积物带来更多陆源物质。研究区沉积物中指示源区化学风化作用强度的LREE/HREE值<sup>[47]</sup>也指示,进入全新世以来源区的化学风化作用明显增强,这与研究区陆源输入量变化不一致,推断源区化学风化作用强度不是影响研究区陆源输入量变化的主要因素。需要考虑第四纪以来南海海平面的变化特征,末次冰消期后,南海海平面从19 ka BP的距现代海平面-120 m先急速上升至-40 m(约10 ka BP),然后缓慢上升至与现代海平面持平,这一过程直接影响到源区沉积物向研究区的输运过程。海平面上升后,大量陆源物质被河流三角洲和大陆架捕获,使得到达下陆坡边缘孔位处的沉积物减少,海平面快速上升与研究区沉积物沉积速率快速下降阶段基本一致,因此推断研究区陆源输入量主要受控于海平面变化。

进一步分析细颗粒物指示的各源区物质供应变化,如图3所示,高岭石在全新世时期的含量明显低于末次冰消期时期,由于物源分析初步判断珠江是研究区高岭石的主要输送源区,说明进入全新世后,珠江对研究区的物质供应出现了明显的减少,这种变化可能是由于全新世时期东亚夏季风普遍增强、气候明显转暖、海平面快速上升使得珠江口离研究区更远,在沿岸流的影响和源区位置的相对变化共同作用下,河流物质更难被输运到研究区。

研究区蒙脱石在末次冰消期时期的含量稍低于全新世时期,吕宋岛物源在全新世以来比重增加,气候变暖引起的源区物质供应增多和洋流增强都可能是造成这一变化的原因。由于研究区洋流分布及变化情况相对复杂(图9),表层流形成的西北吕宋涡流方向在夏季和冬季都是逆时针方向<sup>[12]</sup>,但强度大小尚不明确,加上可能叠加了黑潮南海分支流的影响,导致吕宋岛对研究区的物源供应变化原因存在多解性,尚需更多的数据资料进行分析讨论。

研究区伊利石和绿泥石在末次冰消期和全新世时期的含量变化不大,二者的总含量占到了研究区全部黏土矿物含量的80%以上,前文分析认为,台湾河流是该区伊利石和绿泥石的主要源区,它们主要通过南海表层洋流进行搬运,由于研究区附近海域表层洋

流并不完全随东亚季风季节性变化而反向流动,导致冬夏季表层洋流方向基本一致。表层流可将台湾西部河流物质源源不断地输送到研究区,西太平洋深海流的分支也可以将台湾东南部河流的细粒物质搬运到研究区。东亚季风影响下,物理风化作用占主导的源区物质供应和研究区表层洋流方向的稳定性可能是导致台湾河流物质输送量较大且在末次冰消期和全新世时期贡献量随气候变化变动较小的主要原因。

## 5 结论

(1) TS6 孔沉积物 REE 分析结果显示,台湾河流是研究区沉积物的主要源区,其中台湾西部河流应该为研究区输送了大部分的沉积物,台湾东部河流的物质贡献相对小一些,珠江也向研究区输送了部分沉积物;黏土矿物组合分析进一步表明,研究区沉积物黏土矿物中的伊利石和绿泥石主要由台湾河流提供;高岭石主要由珠江提供,含量较少的蒙脱石由东南部的吕宋岛提供。

(2) 气候变化影响下,研究区黏土矿物组合及变化特征受控于物源区物质的供应和洋流的搬运作用。季风驱动的表层洋流、黑潮南海分支及北太平洋深海流分支可将台湾河流物质输运到研究区,研究区蒙脱石可能主要由黑潮南海分支流和表层洋流在东北部形成的西北吕宋涡流搬运。

(3) 自 19 ka BP 以来,研究区陆源输入量受海平面变化的影响逐渐减少。物理风化作用占主导的源区物质供应和研究区表层洋流方向的稳定性可能是导致台湾河流物质输送量较大且在末次冰消期和全新世时期贡献量随气候变化变动较小的主要原因;珠江对研究区的物质供应在全新世时期明显减少,可能与气候明显转暖引起海平面上升导致的源区相对位置变远有关;黑潮南海分支流和表层洋流在东北部形成的西北吕宋涡流可将吕宋岛物质搬运至研究区,其供应量变化原因可能叠加了多种因素的影响,尚需综合其他资料讨论。

## 参考文献:

- [1] 梅西,张训华,李日辉,等.南黄海北部晚更新世以来常量元素记录的化学风化作用[J].沉积学报,2014,32(5):846-854.  
Mei Xi, Zhang Xunhua, Li Rihui, et al. Chemical weathering recorded by major element of Northern South Yellow Sea since Late Pleistocene[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(5): 846-854.
- [2] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[M]/Lipin B R, Mckay G A. Reviews of Mineralogy. Washington DC: Mineralogical Society of America, 1989, 21: 169-200.
- [3] 赵德博,万世明.南海沉积物中黏土矿物及其在古气候中的应用研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2014,34(4):163-171.  
Zhao Debo, Wan Shiming. Research progress of clay minerals in sediments of the South China Sea and its application to paleoclimatic reconstruction[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(4): 163-171.
- [4] Rateev M A, Gorbunova Z N, Lisitzyn A P, et al. The distribution of clay minerals in the oceans[J]. Sedimentology, 1969, 13(1/2): 21-43.
- [5] Gingele F X, De Deckker P, Hillenbrand C D. Clay mineral distribution in surface sediments between Indonesia and NW Australia-source and transport by ocean currents[J]. Marine Geology, 2001, 179(3/4): 135-146.
- [6] 周庆杰,李西双,刘乐军,等.基于Chirp数据和Biot-Stoll模型反演南海北部陆坡海底表层沉积物物理性质[J].海洋学报,2020,42(3):72-82.  
Zhou Qingjie, Li Xishuang, Liu Lejun, et al. Physical properties of the seabed inverted based on Chirp data and the Biot-Stoll model in the northern continental slope of the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(3): 72-82.
- [7] 刘丛舒,丁巍伟,殷绍如,等.南海北部陆坡区海底峡谷地貌、沉积特征及控制因素[J].海洋学研究,2019,37(2):28-43.  
Liu Congshu, Ding Weiwei, Yin Shaoru, et al. Geomorphology, sedimentary characteristics and controlling factors of submarine canyons in the northern continental slope of the South China Sea[J]. Journal of Marine Sciences, 2019, 37(2): 28-43.
- [8] 周航,刘乐军,徐元芹,等.南海北部陆坡区DLW3101孔沉积物特征及古环境意义[J].海洋学报,2018,40(7):103-115.  
Zhou Hang, Liu Lejun, Xu Yuanqin, et al. Sediment characteristics and paleoenvironmental significance of Core DLW3101 from northern slope of the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(7): 103-115.
- [9] 朱筱敏,谈明轩,董艳蕾,等.当今沉积学研究热点讨论——第20届国际沉积学大会评述[J].沉积学报,2019,37(1):1-16.  
Zhu Xiaomin, Tan Mingxuan, Dong Yanlei, et al. Current hot topics of sedimentology: comment on the 20th international sedimentological congress[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(1): 1-16.
- [10] 杨守业,印萍.自然环境变化与人类活动影响下的中小河流沉积物源汇过程[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(1):1-10.  
Yang Shouye, Yin Ping. Sediment source-to-sink processes of small mountainous rivers under the impacts of natural environmental changes and human activities[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(1): 1-10.
- [11] 董爱国.黄、东海海域沉积物的源汇效应及其环境意义[D].青岛:中国海洋大学,2011.

- Dong Aiguo. Source, sink and its environmental record of sediments in Yellow Sea and East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [12] Liu Zhifei, Zhao Yulong, Colin C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238–273.
- [13] Cao Li, Liu Jianguo, Shi Xuefa, et al. Source-to-sink processes of fluvial sediments in the northern South China Sea: constraints from river sediments in the coastal region of South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 185: 104020.
- [14] Yang Shouye, Yim W W S, Huang Guangqing. Geochemical composition of inner shelf Quaternary sediments in the northern South China Sea with implications for provenance discrimination and paleoenvironmental reconstruction[J]. *Global & Planetary Change*, 2008, 60(3/4): 207–221.
- [15] Wan Shiming, Li Anchun, Clift P D, et al. Increased contribution of terrigenous supply from Taiwan to the northern South China Sea since 3 Ma[J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1/4): 115–121.
- [16] Liu Zhifei, Colin C, Li Xiajing, et al. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport[J]. *Marine Geology*, 2010, 277(1/4): 48–60.
- [17] Hu Dengke, Böning P, Köhler C M, et al. Deep sea records of the continental weathering and erosion response to East Asian monsoon intensification since 14 ka in the South China Sea[J]. *Chemical Geology*, 2012, 326–327: 1–18.
- [18] Liu Chang, Clift P D, Carter A, et al. Controls on modern erosion and the development of the Pearl River drainage in the late Paleogene[J]. *Marine Geology*, 2017, 394: 52–68.
- [19] Liu Jianguo, Steinke S, Vogt C, et al. Temporal and spatial patterns of sediment deposition in the northern South China Sea over the last 50, 000 years[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 465: 212–224.
- [20] 唐荣, 冯秀丽, 冯利, 等. 南海台西南盆地南部海域TS6孔常量元素地球化学特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(2): 58–69.
- Tang Rong, Feng Xiuli, Feng Li, et al. Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of the major elements in the sediments of core TS6 from the southern part of Southwest Taiwan Basin of the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(2): 58–69.
- [21] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76(7): 803–832.
- [22] Ehrmann W. Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 139(3/4): 213–231.
- [23] Dou Yanguang, Yang Shouye, Liu Zhenxia, et al. Provenance discrimination of siliciclastic sediments in the middle Okinawa Trough since 30 ka: constraints from rare earth element compositions[J]. *Marine Geology*, 2010, 275(1/4): 212–220.
- [24] 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.
- Dou Yanguang, Li Jun, Li Yan. Rare earth element compositions and provenance implication of surface sediments in the eastern Beibu Gulf[J]. *Geochimica*, 2012, 41(2): 147–157.
- [25] Frey F A, Haskin L. Rare earths in oceanic basalts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(4): 775–780.
- [26] 沈华梯. 深海沉积物中的稀土元素[J]. *地球化学*, 1990(4): 340–348.
- Shen Huati. Rare earth elements in deep-sea sediments[J]. *Geochimica*, 1990(4): 340–348.
- [27] Taylor S R, McLennan S M, Armstrong R L, et al. The composition and evolution of the continental crust: Rare earth element evidence from sedimentary rocks [and discussion][J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1981.
- [28] 郑凯清. 南海HX132柱状沉积物稀土元素特征及其沉积环境意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- Zheng Kaiqing. The distribution characteristics of rare earth elements of HX132 columnar sediment in South China Sea and its sedimentary environment significance[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [29] Li Chuanshun, Shi Xuefa, Kao S J, et al. Rare earth elements in fine-grained sediments of major rivers from the high-standing island of Taiwan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69: 39–47.
- [30] Marini J C, Chauvel C, Maury R C. Hf isotope compositions of northern Luzon arc lavas suggest involvement of pelagic sediments in their source[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 2005, 149(2): 216–232.
- [31] Xu Zhifang, Han Guilin. Rare earth elements (REE) of dissolved and suspended loads in the Xijiang River, South China[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(9): 1803–1816.
- [32] 童胜琪. 珠江、红河及湄公河流域表层沉积物元素地球化学研究[D]. 上海: 同济大学, 2007: 21–22.
- Tong Shengqi. Element geochemistry for surface sediments of Pearl, Red and Mekong rivers[D]. Shanghai: Tongji University, 2007: 21–22.
- [33] 蓝先洪, 张宪军, 赵广涛, 等. 南黄海NT1孔沉积物稀土元素组成与物源判别[J]. *地球化学*, 2009, 38(2): 123–132.
- Lan Xianhong, Zhang Xianjun, Zhao Guangtao, et al. Distributions of rare earth elements in sediments from Core NT1 of the South Yellow Sea and their provenance discrimination[J]. *Geochimica*, 2009, 38(2): 123–132.

- [34] 王月, 沈建伟, 王旭, 等. 海南岛三亚小东海岸礁礁坪沉积物的稀土元素分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(5): 59–66.  
Wang Yue, Shen Jianwei, Wang Xu, et al. REE distribution pattern in the Xiaodonghai fringing reef-flat sediments off Sanya, Hainan Island and its environmental implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(5): 59–66.
- [35] Chaillou G, Anschutz P, Lavaux G, et al. Rare earth elements in the modern sediments of the Bay of Biscay (France)[J]. Marine Chemistry, 2006, 100(1/2): 39–52.
- [36] 李传顺, 石学法, 高树基, 等. 台湾河流沉积物的黏土矿物组成特征与物质来源[J]. 科学通报, 2012, 57(6): 673–681.  
Li Chuanshun, Shi Xuefa, Gao Shuji, et al. Clay mineral composition and their sources for the fluvial sediments of Taiwanese rivers[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(6): 673–681.
- [37] 刘志飞, Colin C, 黄维, 等. 珠江流域盆地表层沉积物的黏土矿物及其对南海沉积物的贡献[J]. 科学通报, 2007, 52(8): 1101–1111.  
Liu Zhifei, Colin C, Huang Wei, et al. Clay minerals in surface sediments of the Pearl River drainage basin and their contribution to the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(8): 1101–1111.
- [38] Liu Zhifei, Zhao Yulong, Colin C, et al. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments[J]. Applied Geochemistry, 2009, 24(11): 2195–2205.
- [39] Liu Zhifei, Colin C, Huang Wei, et al. Climatic and tectonic controls on weathering in South China and Indochina Peninsula: clay mineralogical and geochemical investigations from the Pearl, Red, and Mekong drainage basins[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2007, 8(5): Q05005.
- [40] 何梦颖, 郑洪波, 黄湘通, 等. 长江流域沉积物黏土矿物组合特征及物源指示意义[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 544–551.  
He Mengying, Zheng Hongbo, Huang Xiangtong, et al. Clay mineral assemblages in the Yangtze drainage and provenance implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 544–551.
- [41] Liu Z F, Trentesaux A, Clemens S C, et al. Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years[J]. Marine Geology, 2003, 201(1/3): 133–146.
- [42] Xu Fangjian, Hu Bangqi, Dou Yanguang, et al. Sediment provenance and paleoenvironmental changes in the northwestern shelf mud area of the South China Sea since the mid-Holocene[J]. Continental Shelf Research, 2017, 144: 21–30.
- [43] 刘芳, 杨楚鹏, 常晓红, 等. 南海东北部下陆坡20 ka以来稀土元素沉积地球化学特征变化及其对物源的指示[J]. 海洋学报, 2018, 40(9): 148–158.  
Liu Fang, Yang Chupeng, Chang Xiaohong, et al. Sedimentary geochemistry properties of rare earth elements from the continental lower slope of the northeastern South China Sea over the last 20 ka and its implication for provenance[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(9): 148–158.
- [44] 刘志飞, 李夏晶, Colin C, 等. 南海北部末次冰盛期以来高分辨率黏土矿物记录及其时间序列物源区分析[J]. 科学通报, 2010, 55(35): 4058–4068.  
Liu Zhifei, Li Xiajing, Colin C, et al. A high-resolution clay mineralogical record in the northern South China Sea since the Last Glacial Maximum, and its time series provenance analysis[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(35): 4058–4068.
- [45] 颜文, 古森昌, 陈忠, 等. 南海97–37柱样的主元素特征及其潜在的古环境指示作用[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 75–83.  
Yan Wen, Gu Senchang, Chen Zhong, et al. Characteristics of major elements of sediments in core 97–37 from southern South China Sea and its potential implications to paleoenvironment[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2002, 21(2): 75–83.
- [46] An Zhisheng, Kukla G, Porter S C, et al. Late quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau[J]. Catena, 1991, 18(2): 125–132.
- [47] 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): 164–167.  
Yang Shouye, Li Congxian. Research progress in REE tracer for sediment source[J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(2): 164–167.

## **Analysis on the provenance and transport mechanism of sediments in the southern area of Southwest Taiwan Basin, South China Sea over the last 19 ka**

Tang Rong<sup>1,2,3</sup>, Feng Xiuli<sup>2,3</sup>, Feng Li<sup>2,3</sup>, Xiao Xiao<sup>2,3</sup>, Liu Shuang<sup>2,3</sup>

(1. *The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjing 300180, China*; 2. *College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 3. *Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China*)

**Abstract:** Based on the analysis of the rare earth element (REE) geochemical characteristics and clay mineral assemblages of Core TS6 sediment samples in the southern area of Southwest Taiwan Basin, South China Sea, the provenance and characteristics of its changes, material transport mechanism of sediments in the study area over the last 19 ka (the last deglaciation) are discussed. The comprehensive analysis of provenance shows that the rivers in Taiwan are the main provenance of sediments in the study area. The rivers in the west of Taiwan contribute more than the rivers in the east, and the Zhujiang River also transports part of sediments to the study area. Due to the large differences on the types and contents of the main clay minerals in different provenance areas, it is judged that the illite and chlorite of the clay minerals in the study area are mainly provided by the rivers in Taiwan; the kaolinite is mainly provided by the Zhujiang River and the less content of montmorillonite is provided by Luzon Island in the southeast. Since the last deglacial period, the input of terrigenous materials in the study area has been gradually reduced under the control of sea level changes. The provenance changes reflected by the combination of clay minerals are mainly controlled by changes in climate and ocean currents, and the influence of multiple factors may be superimposed.

**Key words:** Southwest Taiwan Basin; the last deglaciation; provenance; transport mechanism; the input of terrigenous materials