

# 珠江口盆地深水区物源与运移机制分析：基于稀土元素和Sr-Nd同位素的研究

王子雯<sup>1,2,3\*</sup>, 吴学万<sup>4</sup>, 汪贵锋<sup>2,3</sup>, 韩宗珠<sup>1</sup>, 黄仕锐<sup>1,2,3#</sup>, 李培鹏<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛

<sup>2</sup>海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海南 海口

<sup>3</sup>海南省海洋地质调查院, 海南 海口

<sup>4</sup>中山大学海洋科学学院, 广东 珠海

收稿日期: 2024年1月9日; 录用日期: 2024年3月24日; 发布日期: 2024年3月31日

## 摘要

边缘海沉积物对于研究气候变化、古海洋演化和大陆的剥蚀与抬升等方面具有非常重要的指示意义。本研究通过对珠江口盆地深水区Z8站位沉积重力柱的粒度、稀土元素和Sr-Nd同位素的分析, 发现研究区沉积粒度较不稳定, 平均粒径在19.70  $\mu\text{m}$ 左右变化, 沉积物成分主要是粉砂, 其次是黏土, 砂的含量最少。根据沉积粒径可将沉积分为三个阶段: 表层的沉积较不稳定阶段、中层的沉积稳定阶段与底层的沉积环境动荡阶段; 稀土元素 $\Sigma\text{REE}$ 平均值为141.50  $\mu\text{g/g}$ , 呈现出Eu负异常, 轻稀土占总稀土绝大部分比例(均超过75%);  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值为0.723722,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 平均值为0.512023, 随深度的增加,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $\epsilon\text{Nd}$ 均呈现出先增大再减小最后保持稳定的趋势。与不同潜在物源区的稀土元素特征和Sr-Nd同位素的对比分析表明, 近万年来, 台湾岛为珠江口盆地深水区最大物源, 黑潮和深海环流对台湾岛的沉积物运移起到了至关重要的作用; 此外, 红河、海南岛和湄公河也对研究区的物源有着一定贡献, 这主要是依靠东亚季风驱动的表层环流和沿岸流对沉积物进行运移的。值得注意的是, 由于珠江是距离Z8站位最近的大陆水系, 因此也不能忽略珠江的物源贡献。

## 关键词

物源, 运移机制, 珠江口盆地, 稀土元素, Sr-Nd同位素

## The Provenance and Transport Mechanism of Sediments in the Deep-Water Area of the Pearl River Mouth Basin: Based on the Rare Earth Elements and Sr-Nd Isotopes

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王子雯, 吴学万, 汪贵锋, 韩宗珠, 黄仕锐, 李培鹏. 珠江口盆地深水区物源与运移机制分析: 基于稀土元素和 Sr-Nd 同位素的研究[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(3): 321-334. DOI: 10.12677/ag.2024.143030

Ziwen Wang<sup>1,2,3\*</sup>, Xuewan Wu<sup>4</sup>, Guifeng Wang<sup>2,3</sup>, Zongzhu Han<sup>1</sup>, Shirui Huang<sup>1,2,3#</sup>, Peipeng Li<sup>4</sup>

<sup>1</sup>College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Key Laboratory of Marine Geology Resources and Environment of Hainan Province, Haikou Hainan

<sup>3</sup>Marine Geological Survey of Hainan Province, Haikou Hainan

<sup>4</sup>School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai Guangdong

Received: Jan. 9<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2024; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

The sediments of marginal seas play a very important role in the study of climate change, paleo-ocean evolution and uplift denudation of continents. This study has studied the grain size, rare earth elements and Sr-Nd isotopes of the sedimentary gravity core at the Z8 site in the deep-water area of the Pearl River Mouth Basin and found that the sedimentary particle size in the study area was relatively unstable, with an average particle size of 19.70  $\mu\text{m}$ ; the sediment composition was mainly composed of silt, followed by clay, with the least sand content. Sedimentation can be divided into three stages based on the particle size of the sediments: The unstable stage of surface sedimentation, the stable stage of middle sedimentation, and the turbulent stage of bottom sedimentation environment; the average value of the  $\Sigma\text{REE}$  (rare earth element) is 141.50  $\mu\text{g/g}$ . There was a negative anomaly of Eu on the REE distribution curve. In addition,  $\Sigma\text{LREE}$  (light rare earth element) accounted for the vast majority of  $\Sigma\text{REE}$  (over 75%). The average value of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio was 0.723722, and the mean value of  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  was 0.512023, as the depth increases, both  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $\epsilon\text{Nd}$  show a trend of first increasing, then decreasing, and finally maintaining stability. Comparative analysis of REE characteristics and Sr-Nd isotopes with different potential sources showed that Taiwan Island was the largest source in the deep-water area of the Pearl River Mouth Basin over the past ten thousand years, and the Kuroshio and deep-sea current played a crucial role in the sediment migration of Taiwan Island. What's more, the Red River, Hainan Island and Mekong River also contributed to the provenance of the study area, which were mainly due to the sediment transport by the surface current and coastal current driven by the East Asian monsoon. It is worth noting that since the Pearl River is the nearest continental water system to Z8 station, the material source contribution of the Pearl River cannot be ignored.

## Keywords

Sediment Provenance, Transport Mechanism, Pearl River Mouth Basin, Rare Earth Elements, Sr-Nd Isotopes

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

探明沉积物的物源对理解盆地演化、沉积物扩散模式的解释和古地理历史以及评估储层质量至关重要[1] [2] [3]。边缘海是连接深海与陆地的关键场所，由于具有更容易进行沉积物的收支平衡与运移机制研究的特征，所以是研究海陆相互作用理想的场所[4]。边缘海的海洋沉积物在气候变化、古海洋演化和

大陆的剥蚀与抬升方面具有非常重要的作用[5]。南海作为太平洋西部最大的边缘海,周围的大陆和岛屿每年向其输送了大约 700 Mt 的沉积物[6]。南海沉积物对于研究东亚季风演化以及古海洋的演变具有至关重要的意义,是研究陆源沉积物从源到汇以及运移过程的理想场所[7] [8]。南海入海的沉积物来源较多,海洋沉积物来源和运输受到河流流量变化,海平面变化,构造运动等因素的影响,且南海地形较为复杂,导致了南海不同区域的物源具有较大差异[6]。前人研究表明,南海北部最主要的沉积物来源于台湾河流(176 Mt/yr)、珠江(102 Mt/yr)和红河(138 Mt/yr.)。此外,湄公河向南海输送的沉积物速率高达 166 Mt/yr [9]。南海不同的河流携带的沉积物物质成分具有差异,沉积过程复杂,因此,多种地球化学方法进行沉积物来源的示踪是非常有必要的。稀土元素(REE)在环境中具有相对稳定的地球化学性质,在风化、搬运和沉积过程中很少发生分异,混合沉积物的稀土元素特征可反应原岩特征。Sr 同位素随温度、压力和微生物作用的变化而产生分馏较小,而 Nd 同位素受化学风化和沉积物迁移的影响较小,其变化主要取决于母岩岩性和地质年龄,因此稀土元素和 Sr-Nd 同位素分析是近些年来示踪物源的可靠指标。珠江口盆地沉积物源研究主要包括矿物学、地球化学数据和地震方法,前人研究表明珠江口盆地沉积物主要来源于珠江和台湾河流输送的泥沙[3] [10]。曾智伟等人利用地震资料、碎屑锆石数据和以往的物源数据发现白云凹陷古近纪恩平组物源主要包含盆内隆起源(中生代火成岩)和华南地块的盆外隆起源(前寒武纪 - 古生代变质岩和岩浆岩) [10],韦刚健等人的研究也表明台湾岛河流携带的泥沙是 ODP1144 站位(20°3'10.8"N, 117°25'8.4"E)较大的物源来源[8]。但是对于珠江口盆地白云凹陷深水区表层沉积物来源和运移机制的研究仍不够深入,因此我们采集珠江口盆地深水区的沉积重力柱样品,进行粒度、稀土元素和 Sr-Nd 同位素分析,并与不同潜在物源对比,旨在进一步探明珠江口盆地深水区沉积物来源及运移途径。

## 2. 区域地质背景

南海位于太平洋构造域与特提斯构造域中间,由于欧亚板块、印度 - 澳大利亚板块和菲律宾海板块三大板块相互作用从而在新生代发生裂谷作用和海底扩张而形成[11]。南海海域自然海域面积约 350 万平方千米,为中国近海中面积最大、最深的海区,平均水深 1212 米,最大深度 5559 米。南海是典型的复合 - 叠加边缘盆地,旋回总体经历了古南海张开阶段、古南海萎缩和新南海张开阶段与古南海消失和新南海萎缩阶段[12]。

珠江口盆地是形成于南海北部陆架和陆坡上的一个大型新生代沉积为主的伸展盆地,沉积厚度大于 10,000 米,沿东北方向延升,珠江口盆地包括北部褶皱隆起带和南部褶皱拗陷带,区域结构以拗隆交替分布为特征,自北向南可划分为北部隆起带、珠一拗陷、珠三拗陷、中央隆起、珠二拗陷、南部隆起、潮汕拗陷 7 个构造单元。珠江口盆地基底较为年轻,以中生界火成岩和沉积岩为主,花岗岩同位素年龄为 70.5~130 Ma,是华南地块的延伸[13]。珠江口沉积在裂陷期是陆相沉积体系,裂后期是海相沉积体,是大陆边缘伸展盆地中的一种常见现象。古近纪时期该地区通过裂谷作用形成了大量的地堑和地垒构造,周围的沉积物填充了地堑。随着裂谷作用的继续,孤立的地堑逐渐连接起来形成一个统一的盆地。之后大面积海侵结果形成了海相沉积。珠江口盆地大规模海侵始于渐新世[14]。

## 3. 样品与方法

### 3.1. 样品

Z8 站位样品依托于国家自然科学基金“2021 年南海中部共享航行计划科学考察实验研究”,搭乘厦门大学的“嘉庚号”从珠江口盆地获得的。Z8 (19°48'21.60"N, 115°55'17.04"E, 全长 563 cm)沉积物岩心采集于白云凹陷东洼区域。岩芯中的沉积物主要由深灰色松散的粉砂组成。抽取孔隙水后,取样间隔为 5 cm,装入塑料袋后冷冻保藏。

### 3.2. 方法

我们首先对 Z8 站位的沉积重力柱样品进行了粒度测试,每隔 5 cm 进行取样,一共得到了 113 样品。测试的前处理如下:取 0.2 g 新鲜沉积物于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 的  $H_2O_2$ ,充分混合并静置 5 分钟以去除有机物后加入 10 mL HCl 充分混匀,在 40°C 恒温水浴中静置 24 小时去除自生碳酸盐岩成分。加入纳米纯水,待水清澈,轻轻除去透明的上覆水。加入 5 mL  $(NaPO_3)_6$ ,超声振摇 15 min。前处理结束以后使用马尔文公司生产的 Mastersizer3000 激光粒度仪进行测试,测试结束以后,使用 Folk 公式计算平均粒径、中值粒径等参数[15]。粒度预处理和粒度测试均在南方海洋与工程实验室(珠海)完成。

每隔 20 cm 取一个沉积物样品,加入硼酸锂( $LiBO_2/Li_2B_4O_7$ )熔剂,混合均匀后在熔炉中于 1025°C 熔融。待熔融液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸消解并定容,然后用 Agilent7900 等离子体质谱仪进行稀土元素的测试分析,一共有 28 个样品进行了稀土元素的分析。

每隔 60 cm 取样进行 Sr-Nd 同位素的分析,在超净化学实验室完成样品前处理工作,使用马弗炉在 600°C 去除有机质,然后称取~100 mg 左右的粉末样品,放置于 Teflon 消解罐中,依次加入硝酸和氢氟酸,在 190°C 的高温条件下的烘箱中放置 48 h 后放置于电热板上蒸干,加入硝酸赶氢氟酸后,将样品转移成硝酸介质,在 120°C 温度条件下反应 12 小时,溶解好的样品转移成相应介质,离心待分离;Sr 同位素使用 Sr spec 树脂进行分离纯化,Nd 同位素使用 LN 树脂进行分离纯化。Sr 同位素使用热电离子质谱仪(TIMMS)进行测定,而 Nd 同位素使用多通道电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)进行测定。为防止测试过程对测试结果造成影响,加入标样 JNdi-1 和 NBS987-1 进行一起测试。Sr-Nd 同位素的分离及测定均在南方海洋与工程实验室(珠海)完成。Nd 同位素测试结果用  $\epsilon Nd = [((^{143}Nd/^{144}Nd_{meas})/0.512638) - 1] \times 10,000$  进行表示[16]。

## 4. 结果

### 4.1. 粒度

粒度结果显示,随深度增加,中值粒径和平均粒径整体上都呈现出逐渐增加的趋势,在纵向上变化较大(图 1)。Z8 站位沉积物平均粒径处于 9.40  $\mu m$  和 34.42  $\mu m$  之间,平均值为 19.70  $\mu m$ 。沉积物中值粒径的最大值为 11.44  $\mu m$ ,最小值为 4.97  $\mu m$ ,平均值为 7.93  $\mu m$ 。沉积物成分主要是粉砂,其次是黏土,砂的含量最少。整体而言,沉积物粒径较小。其中,黏土含量从 21.86%到 41.83%变化(平均值为 29.33%);粉砂含量从 54.57%到 70.37%变化(平均值为 63.48%);砂含量从 1.97%到 16.86%变化(平均值为 7.18%) (表 1)。此外,沉积物粒径的偏态较不稳定,但是数值上均大于 2.5,属于正偏态,沉积环境一直在变化。沉积中层的峰度比沉积下层和沉积上层高,沉积更稳定。

**Table 1.** The table of mean particle size, median particle size, and clay, silt, and sand content of sediments at different depths of Z8 site

**表 1.** Z8 站位不同深度沉积物平均粒径、中值粒径及黏土、粉砂和砂含量表

沉积分层	深度/ bfscm	数据 类型	平均粒径/ $\mu m$	中值粒径/ $\mu m$	黏土含量/%	粉砂含量/%	砂含量/%
沉积上层	0~85 bfscm	最大值	21.92	8.26	36.37	70.37	8.01
		最小值	11.20	5.76	22.03	58.79	2.83
		平均值	15.74	6.50	31.55	63.19	5.26
沉积中层	85~265 bfscm	最大值	17.32	7.35	40.93	66.20	5.70
		最小值	9.40	5.02	29.19	57.03	1.97
		平均值	12.81	6.17	34.03	62.44	3.53

续表

沉积底层	265~563 bfscm	最大值	34.42	11.44	33.13	69.95	16.86
		最小值	13.30	6.74	21.86	60.02	3.04
		平均值	23.36	9.33	25.89	64.42	9.69
-	0~563 bfscm	最大值	34.42	11.44	41.83	70.37	16.86
		最小值	9.40	4.98	21.86	54.57	1.97
		平均值	18.89	7.90	29.36	63.55	7.09

## 4.2. 稀土元素含量与特征

总稀土元素(从 La 到 Lu)含量, 轻稀土元素(从 La 到 Eu)含量, 重稀土元素(从 Gd 到 Lu)含量的变化在纵向上具有相似性, 都呈现出随深度的增加数值逐渐增加的现象, 且数值的变化范围都较大。总稀土元素含量最小值为 113.41  $\mu\text{g/g}$ , 最大值为 158.93  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为 141.50  $\mu\text{g/g}$ ; 轻稀土含量最小值为 100.39  $\mu\text{g/g}$ , 最大值为 142.80  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为 126.19  $\mu\text{g/g}$ ; 而重稀土元素含量最小值为 13.02  $\mu\text{g/g}$ , 最大值为 17.15  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为 15.31  $\mu\text{g/g}$ 。轻稀土占了总稀土含量的绝大部分比例。为了进一步研究稀土元素的分馏特征, 我们对沉积物的球粒陨石归一化稀土元素进行了分析, 其中 Ce 和 Eu 的异常( $\delta\text{Ce}$  和  $\delta\text{Eu}$ )是通过比较 Ce 和 Eu 的浓度及其相邻元素的浓度得出的:

$$\delta\text{Ce} = \text{Ce}_N / (\text{La}_N \times \text{Pr}_N)^{1/2} \quad (1)$$

$$\delta\text{Eu} = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2} \quad (2)$$

其中  $N$  是球粒陨石的归一化。计算得到的  $\delta\text{Ce}$  从 0.97 到 1.06 变化, 平均值为 1.01;  $\delta\text{Eu}$  从 0.64 到 0.73 变化, 平均值为 0.68。 $\delta\text{Ce}$  和  $\delta\text{Eu}$  整体在纵向变化较小, 都呈现出较为稳定的趋势。样品的详细稀土元素参数如表 2 所示。

**Table 2.** Comparison of rare earth element data between sediments at Z8 site and different potential source areas.

**表 2.** Z8 站位沉积物与不同潜在物源区稀土元素数据

样品名称	数据类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma\text{REES}$	$\Sigma\text{LREE}$	$\Sigma\text{HREE}$	LREE/HREE	$\delta\text{Ce}$	$\delta\text{Eu}$	(La/Yb) $_N$	数据来源
Z8 沉积表层 (0~85bfscm)	最大值	26.70	51.30	6.07	22.80	4.17	0.93	4.08	0.67	3.83	0.80	2.17	0.33	2.06	0.32	126.21	111.97	14.24	7.86	1.00	0.70	9.39	本文
	最小值	23.50	46.10	5.46	20.60	3.76	0.85	3.79	0.59	3.51	0.71	1.96	0.30	1.85	0.30	113.41	100.39	13.02	7.48	0.97	0.68	8.77	本文
	平均值	24.78	47.88	5.72	21.58	3.93	0.90	3.94	0.62	3.71	0.75	2.07	0.31	1.98	0.31	118.48	104.79	13.69	7.65	0.99	0.69	8.99	本文
Z8 沉积中层 (86~265bfscm)	最大值	30.70	63.00	7.24	26.40	4.85	1.08	4.63	0.73	4.30	0.86	2.31	0.36	2.23	0.36	148.92	133.25	15.67	8.56	1.04	0.73	10.11	本文
	最小值	27.40	54.60	6.36	23.80	4.32	0.96	4.18	0.65	3.90	0.78	2.11	0.32	2.06	0.32	132.25	117.57	14.37	8.01	1.00	0.64	9.32	本文
	平均值	28.99	58.23	6.79	25.08	4.57	1.02	4.40	0.69	4.07	0.82	2.19	0.34	2.15	0.33	139.68	124.68	15.00	8.31	1.02	0.70	9.67	本文
Z8 沉积底层 (265~563bfscm)	最大值	32.50	68.20	7.71	28.40	5.17	1.16	4.98	0.78	4.70	0.94	2.55	0.39	2.43	0.38	158.93	142.83	17.15	8.87	1.06	0.70	10.09	本文
	最小值	28.70	57.60	6.82	25.40	4.57	0.95	4.35	0.66	4.11	0.83	2.24	0.34	2.15	0.33	139.21	124.14	15.07	8.12	1.00	0.64	9.50	本文
	平均值	31.04	62.69	7.30	27.21	4.95	1.04	4.67	0.73	4.37	0.88	2.38	0.37	2.29	0.36	150.26	134.23	16.03	8.37	1.02	0.66	9.74	本文
Z8 (0~563bfscm)	最大值	32.50	68.20	7.71	28.40	5.17	1.16	4.98	0.78	4.70	0.94	2.55	0.39	2.43	0.38	158.93	142.83	17.15	8.87	1.06	0.73	10.11	本文
	最小值	23.50	46.10	5.46	20.60	3.76	0.85	3.79	0.59	3.51	0.71	1.96	0.30	1.85	0.30	113.41	100.39	13.02	7.48	0.97	0.64	8.77	本文
	平均值	29.32	58.76	6.87	25.58	4.66	1.01	4.46	0.70	4.17	0.84	2.27	0.35	2.19	0.34	141.50	126.19	15.31	8.23	1.01	0.68	9.59	本文
珠江	平均值	19.25	27.80	4.50	19.89	3.78	1.31	4.64	0.61	3.58	0.80	2.39	0.32	1.90	0.29	91.05	76.53	14.52	4.97	0.66	1.03	7.23	[26]

续表

海南岛	平均值	25.00	56.60	5.84	21.90	3.78	0.62	2.64	0.44	2.49	0.49	1.47	0.24	1.41	0.23	123.12	113.73	9.39	12.28	1.15	0.60	13.27	[26]
台湾岛	平均值	41.08	81.38	9.18	34.48	6.24	1.31	6.07	0.88	5.02	0.95	2.85	0.43	2.83	0.43	193.12	173.67	19.46	8.88	1.03	0.66	10.40	[27]
红河	平均值	40.36	73.74	8.10	28.51	4.93	0.95	4.36	0.73	4.01	0.83	2.49	0.37	2.51	0.38	172.26	156.58	15.67	9.67	0.99	0.63	11.67	[28]
湄公河	平均值	41.89	78.59	9.17	35.49	6.69	0.89	6.01	0.94	5.11	1.06	3.11	0.48	3.27	0.52	193.21	172.72	20.49	8.24	0.99	0.57	9.50	[28]
吕宋	平均值	13.32	26.71	3.38	13.99	3.17	1.03	3.26	0.51	2.95	0.62	1.86	0.27	1.78	0.29	73.13	61.59	11.54	5.22	0.97	1.05	5.13	[29]

### 4.3. Sr-Nd 同位素特征

Sr-Nd 同位素结果如图 1 所示,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  从 0.721537 到 0.725322 变化, 平均值为 0.723722;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  从 0.512008 到 0.512045 变化, 平均值为 0.512023, 计算得到的  $\epsilon\text{Nd}$  范围为 -12.289374 到 -11.567617 (平均值为 -11.996770)。随深度的增加,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $\epsilon\text{Nd}$  均呈现出先增大再减小最后保持稳定的趋势, 沉积物不同深度的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $\epsilon\text{Nd}$  详细数据如表 3 所示。对于  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  数值而言, 沉积上层最低, 沉积中层高于沉积下层, 而且呈现出沉积中层波动程度强于其他沉积层的现象。而  $\epsilon\text{Nd}$  在数值上呈现出与  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  刚好相反的趋势。

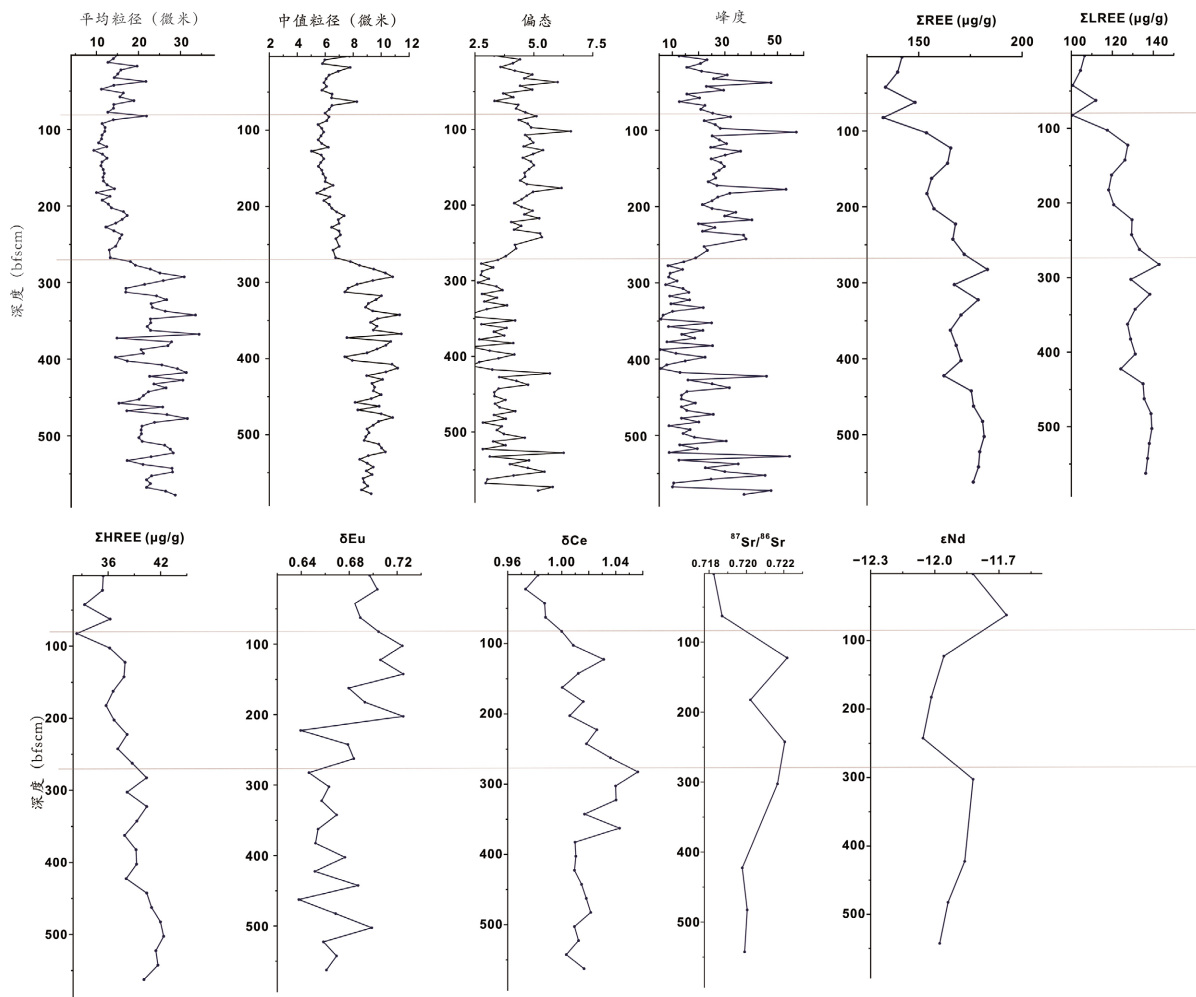


Figure 1. The test results  
图 1. 测试结果

**Table 3.** The Sr-Nd isotope data of Z8 site sediment and different potential source areas  
**表 3.** Z8 站位沉积物与不同潜在物源区 Sr-Nd 同位素数据

站位	深度/bfscm	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon\text{Nd}$	数据来源
Z8	0~5	0.718251	0.512032	-11.82120717	本文
Z8	60~65	0.718695	0.51204	-11.66515163	本文
Z8	120~125	0.722177	0.512025	-11.95775577	本文
Z8	180~185	0.720213	0.512022	-12.01627659	本文
Z8	240~245	0.722049	0.51202	-12.05529048	本文
Z8	300~305	0.721661	0.512032	-11.82120717	本文
Z8	420~425	0.719778	0.51203	-11.86022105	本文
Z8	480~485	0.720040	0.512026	-11.93824882	本文
Z8	540~545	0.719902	0.512024	-11.97726271	本文
海南岛	-	0.725435	0.512145	-9.618316	[32]
台湾岛	-	0.716789	0.512027	-11.923332	[33]
珠江	-	0.733727	0.512034	-11.782193	[34]
红河	-	0.724090	0.512031	-11.832354	[34]
湄公河	-	0.7212512	0.512106	-10.37769342	[34]
吕宋	-	0.704880	0.512191	6.725000	[7]

## 5. 讨论

### 5.1. 沉积特征分析

周斌等人通过对南海北部 MD05-2905 号钻孔位置(20°08'010.2"N, 117°21'36.6"E)的沉积物进行了 AMS<sup>14</sup>C 定年并得出结果[17] (表 4), 由于 Z8 站位与 MD05-2905 距离较近, 地形较为接近, 所以我们利用 MD05-2905 站位相同深度的年龄约束 Z8 站位沉积物的年龄, 我们通过对其年龄进行拟合后计算得到 Z8 站位 563 cm 处的年龄大约为 12,000 aB.P., 计算得出 Z8 站位的平均沉降速度约为 47 cm/ka。

**Table 4.** The dating results of AMS<sup>14</sup>C  
**表 4.** AMS<sup>14</sup>C 定年结果

序号	站位	深度/cm	样品性质	测试结果/aB.P.	年龄范围/aB.P. ( $\pm 1\sigma$ )
1	MD05-2905	99~100	G.ruber	4429	4237~4373
2	MD05-2905	199~200	G.ruber	6600	6538~6659
3	MD05-2905	299~300	G.ruber	8431	8372~8482
4	MD05-2905	399~400	G.ruber 和 G.sacculifer	10,175	10,135~10,221
5	MD05-2905	499~500	G.ruber	11,203	11,167~11,232
6	MD05-2905	599~600	G.ruber	13,249	13,204~13,293
7	Z8	563	/	-12,000	/

样品粒度组分表明, 砂含量低于 10%, 粉砂含量介于 50%~65%, 而黏土含量低于 20%, 而细粒沉积物(<63  $\mu\text{m}$ )超过 90%。从平均粒径和中值粒径纵向上的变化表明, 在 0~85 bfscm 时粒度较不稳定(图 1), 平均粒径在 11.20~21.92  $\mu\text{m}$  范围内变化, 平均黏土含量, 粉砂含量和砂含量分别为 31.55%, 63.19%和 5.26%, 波动较大, 这可能与突然的水动力条件的变化有关[18]。而在 85~265 bfscm 深度范围内, 中值粒

径(从 5.02 到 7.35  $\mu\text{m}$ , 平均值为 6.17  $\mu\text{m}$ )和平均粒径(从 9.40 到 17.32  $\mu\text{m}$ , 平均值为 12.81  $\mu\text{m}$ )变化较小, 沉积粒径较为稳定(图 1)。而 265 bfscm 以深的位置, 平均粒径(从 13.30 到 34.42  $\mu\text{m}$ , 平均值为 23.36  $\mu\text{m}$ )与中值粒径(从 6.74 到 11.44  $\mu\text{m}$ , 平均值为 9.33  $\mu\text{m}$ )变化幅度最大, 水动力条件的改变强(图 1)。因此, 我们将 Z8 站位沉积重力柱的沉积过程分为三段: 表层的沉积较不稳定阶段、中层的沉积稳定阶段与底层的沉积环境动荡阶段, 每个分段的详细参数如表 1 所示。此外, 海平面升降导致沉积物源在海洋中的运移距离发生改变时也会对沉积粒径产生影响[19]。我们推测 Z8 站位距离珠江距离较近, 沉积特征受到珠江流量和物源输入变化的影响较大。

## 5.2. 物源来源分析

稀土元素在从源到汇的迁移过程, 主要有碎屑态、吸附态和溶解态三种形式, 由于所有稀土元素均形成稳定的三价阳离子而且离子半径相近, 而具有相似的物理与化学特征, 因此在任何地质体中都更倾向于成组出现[20]。源岩性质、化学风化、矿物学、粒度和成岩作用等都会对沉积物中稀土元素的组成带来影响, 其中, 源岩性质被认为是稀土元素特征的控制因素[21] [22]。前人的研究表明稀土元素在岩石风化、运移和沉淀等过程中相对保持稳定, 没有选择性损失[23], REE 参数对探讨沉积物的形成条件、源区性质和气候环境具有重要意义。在过去的研究中, 稀土元素配分曲线被用作沉积物物源和环境的判别手段[24] [25]。因此不同来源的沉积物的稀土元素特征的差异性有助于进行物源示踪。

稀土元素配分曲线常被用于沉积物物源的判别, 相同物源沉积物的稀土元素配分曲线往往具有相似的形态特征[20]。Z8 站位沉积物样品的 $\Sigma\text{REE}$ 、 $\Sigma\text{LREE}$  和 $\Sigma\text{HREE}$  随深度的变化都呈现出类似的变化趋势(图 1), 且 $\Sigma\text{LREE}$  占了 $\Sigma\text{REE}$  的绝大部分比例。此外,  $\Sigma\text{REE}$  的平均值为 141.50  $\mu\text{g/g}$ , 与上地壳的 $\Sigma\text{REE}$  (146.4  $\mu\text{g/g}$ )相接近[30], 表明物源类型属于典型的陆源贡献。为了探明不同河流的沉积陆源贡献, 我们收集了台湾岛、吕宋、珠江、海南岛、红河与湄公河所携带沉积物的稀土元素数据, 并结合 Z8 站位沉积物进行对比分析。我们首先对不同沉积物的稀土元素使用大洋玄武岩进行标准化[31], 然后对球粒陨石归一化分布曲线进行分析(图 2)。

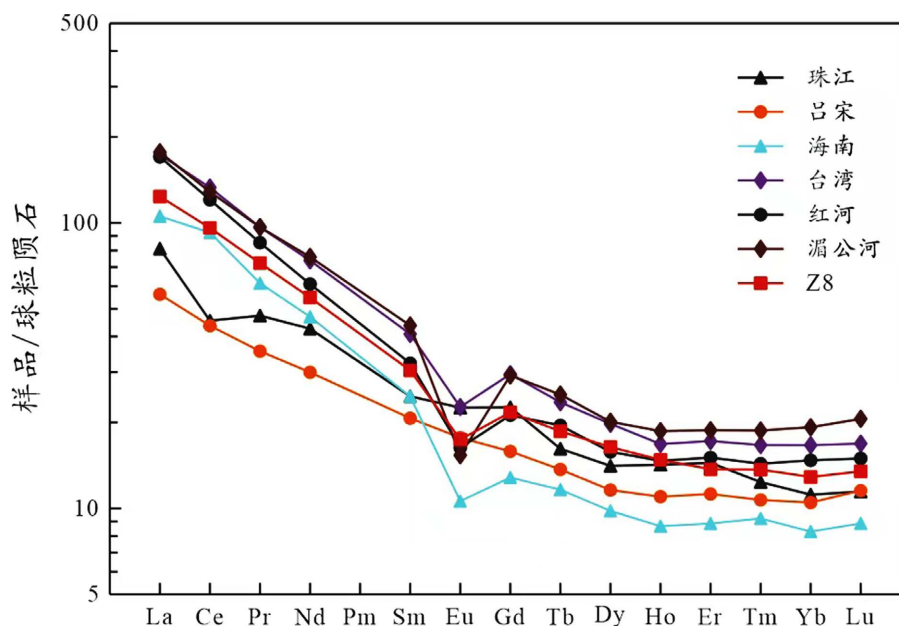


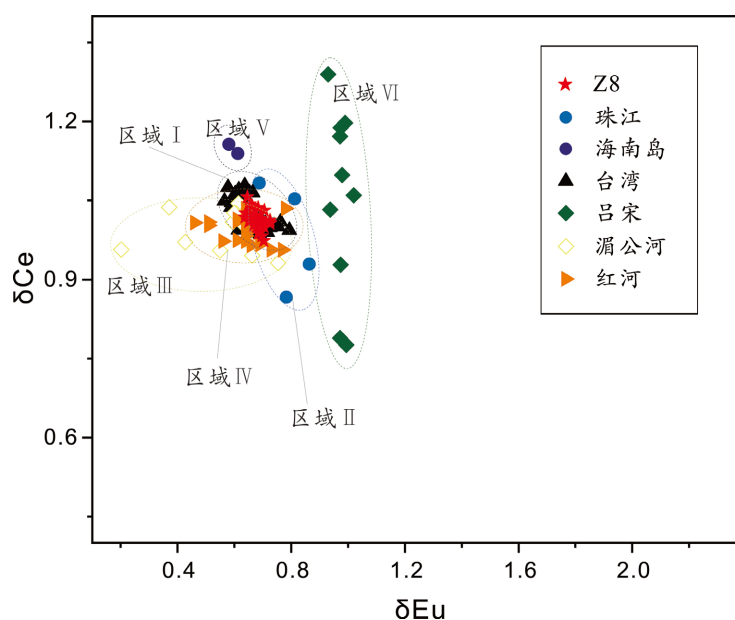
Figure 2. Chondrite-normalized distribution model of REEs

图 2. 球粒陨石均一化标准曲线



我们发现 Z8 站位沉积物有着 LREE 高 HREE 低的特征，轻、重稀土具较强的分异作用，并且有着一定程度的 Eu 负异常，从 La 到 Lu 除了 Eu 外整体呈现出逐渐减小的趋势。在源岩的风化过程中，由于 HREE 络合作用强，因此在溶液中更容易形成碳酸氢盐和有机络合物，导致了 HREE 更容易溶解和迁移；而 LREE 优先吸附在细颗粒表面，尤其是黏土的表面，所以岩石的分化过程会导致 LREE 和 HREE 分化，使得 LREE 相对富集，HREE 贫化[18]。台湾岛与红河沉积物球粒陨石归一化标准曲线除了数值上较 Z8 站位样品较高外，整体变化的趋势与 Z8 站位样品的沉积物变化基本一致；湄公河整体趋势上与 Z8 相近，但是呈现出更强的 Eu 负异常；海南岛较 Z8 站位相比，LREE 占 REE 更大比例。前人研究认为，在解释沉积物的稀土元素标准化配分模式时判别的依据是几何形态，而不是其绝对丰度[24]，说明台湾岛、红河、海南岛和湄公河都是 Z8 站位的潜在物源。但吕宋岛的标准配分曲线与我们样品存在着较大的差距。

$\delta\text{Eu}$  和  $\delta\text{Ce}$  异常是研究沉积区氧化还原条件变化和源区风化程度变迁的重要指标[24]。在弱酸性风化过程中，岩石中的  $\text{Ce}^{4+}$  更容易水解和沉淀而滞留在原地，导致 Ce 负异常。相反，在强碱性条件下， $\text{Ce}^{4+}$  易发生浸出分离导致损失。与此同时，沉积体系中  $\delta\text{Eu}$  的变化是由源碎屑的组成决定的。在风化过程中，一些化学风化可以优先去除  $\text{Eu}^{2+}$ ，导致 Eu 的负异常。因此，我们结合  $\delta\text{Eu}$  和  $\delta\text{Ce}$  对潜在的不同物源区进行对比分析(图 2)，发现 Z8 站位的数据分布在区域 I(台湾岛)、区域 II(珠江)、区域 III(湄公河)和区域 IV(红河)的重叠位置，表明了研究区沉积物为混合来源，台湾岛、珠江、湄公河和红河的沉积物输入均对 Z8 站位的沉积物供给有着较大的贡献。此外，台湾岛的数据与样品的数据基本完全重合，表明台湾岛物源为最大物源，而珠江、湄公河与红河均与研究区样品有着不同程度的重叠。



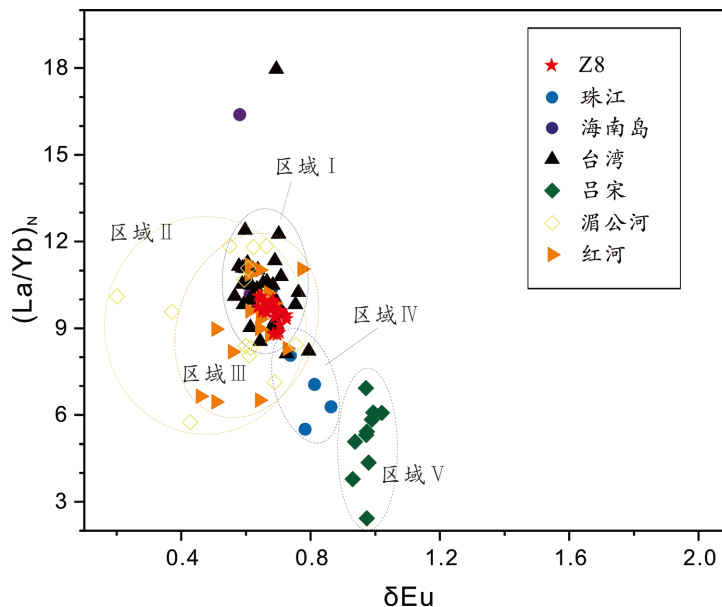
**Figure 3.** The correlation plots of  $\delta\text{Ce}$  with  $\delta\text{Eu}$  parameters in Z8 site and different potential source areas. (Area I: Taiwan, Area II: the Pearl River, Area III: the Mekong River, Area IV: the Red River, Area V: Hainan Island, Area VI: Luzon)

**图 3.** Z8 站位和不同物源区  $\delta\text{Ce}$ - $\delta\text{Eu}$  图(区域 I: 台湾岛, 区域 II: 珠江, 区域 III: 湄公河, 区域 IV: 红河, 区域 V: 海南岛, 区域 VI: 吕宋)

由于 REE 在表生地球化学环境中具有较高稳定性，河流沉积物不同的 REE 分异特征可以用来示踪判别这些河流携带的沉积物。REE 分异参数  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  反映了轻、重稀土的分异程度，结合  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  与  $\delta\text{Eu}$  作图(图 4)，可以发现与  $\delta\text{Ce}$ - $\delta\text{Eu}$  图(图 3)类似，Z8 站位样品数据与区域 I(台湾岛)几乎完全重叠，与区域

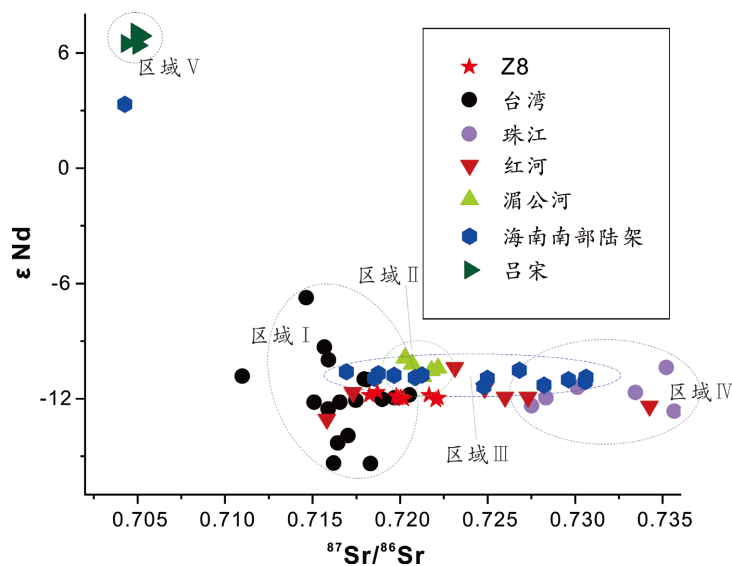
III (红河)和区域 II (湄公河)大面积重合, 与区域 IV (珠江)较为邻近, 与海南岛的数据也有重叠。

综合稀土元素分析, 我们判断台湾岛对研究区沉积物来源贡献最大, 其次是红河和湄公河, 海南岛也对 Z8 站位沉积物有贡献, 但是贡献不大。



**Figure 4.** The correlation plots of  $(La/Yb)_N$  with  $\delta Eu$  parameters in Z8 site and different potential source areas. (Area I: Taiwan, Area II: the Mekong River, Area III: the Red River, Area IV: the Pearl River, Area V: Luzon)

**图 4.** Z8 站位和不同物源区  $(La/Yb)_N-\delta Eu$  图 (区域 I: 台湾岛, 区域 II: 湄公河, 区域 III: 红河, 区域 IV: 珠江, 区域 V: 吕宋)



**Figure 5.** The correlation plots of  $\epsilon Nd$  with  $^{87}Sr/^{86}Sr$  parameters in Z8 site and different potential source areas. (Area I: Taiwan, Area II: the Mekong River, Area III: Hainan Southern Shelf, Area IV: the Red River, Area V: the Pearl River, Area VI: Luzon)

**图 5.** Z8 站位和不同物源区  $\epsilon Nd-^{87}Sr/^{86}Sr$  图 (区域 I: 台湾岛, 区域 II: 湄公河, 区域 III: 海南南部陆架, 区域 IV: 红河, 区域 V: 珠江, 区域 VI: 吕宋)

前人研究表明, Sr 同位素(如  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )不会随温度、压力和微生物作用的变化而产生分馏, 此外, Nd 同位素受化学风化和沉积物迁移的影响较小, 其变化主要取决于母岩岩性和地质年龄, 因此可作为示踪物源的可靠指标[6] [7] [35]。Z8 站位沉积物具有较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值(平均值为 0.723722), 较低的  $\epsilon\text{Nd}$  值(平均值为 -11.996770), 表明样品主要是古老的大陆岩石风化的产物[36]。为了进一步探明研究区沉积物与潜在物源区的关系, 我们收集了台湾岛、珠江、红河、湄公河、海南南部陆架和吕宋岛沉积物的 Sr-Nd 同位素数据, 进行对比分析。如图 5 所示, Z8 站位沉积物的 Sr-Nd 同位素较为集中, 落在多个区域的重叠区域范围内, 再一次表明研究区沉积物为混合来源这一特征。此外, 样品数据较多分布在区域 I (台湾岛)范围内, 与区域 II (湄公河)、区域 III (海南岛)和红河数据区域较为接近, 表明台湾岛较红河、湄公河与台湾岛对研究区的物源供给占有更大的比例。

前人研究表明, 台湾河流每年向南海输入 176 Mt 沉积物, 而珠江和红河每年泥沙输入量为 102 Mt 和 138 Mt, 此外, 湄公河向南海输送的沉积物速率高达 166 Mt/yr [9], 结合 REE 与 Sr-Nd 同位素特征分析, 我们认为研究区绝大部分的物源供给来源于台湾岛。而湄公河、红河和海南岛的 REE 与 Sr-Nd 同位素与研究区沉积物具有吻合之处, 但是由于湄公河入海口距离 Z8 站位较远, 红河沉积物受到了北部湾大陆架的遮挡, 海南岛河流输沙量较低, 我们认为湄公河、红河和海南岛对 Z8 站位的物源有一定供给, 但是不多。此外, 珠江年均输沙量为 69 Mt, 但是其沉积物大都在沿岸流影响下沉积在华南海岸内陆架[37], 而我们的研究区域为珠江口盆地的深水区, 所以珠江携带的沉积物对 Z8 站位有着较小的贡献, 这与我们的 REE 与 Sr-Nd 同位素数据相吻合。

### 5.3. 运移机制

海洋沉积物主要受到来源和运移过程的影响, 同时沉积环境的变化、海平面、海岸线和河流的变化以及早期沉积物的转化过程也会对沉积物造成影响[38]。南海洋流主要包括由东亚季风驱动的沿岸流和表层流, 黑潮和深海环流[18] [39] [41]。

红河输沙量达 136 Mt/yr, 这些沉积物沿着哀牢山 - 红河断裂带流经青藏高原东南部边缘, 向东南汇入南海, 到达琼东南盆地和北部湾盆地[42], 前人研究表明, 红河的沉积物可以沿西南方向运移到达西沙海槽[43]。在东亚季风的影响下, 冬季时, 表层流由东北季风驱动向西南流动[44], 表层流可以将一定量的台湾岛的沉积物携带向西南方向移动到达研究区域; 而在夏季, 表层流则由西南季风驱动向东北流动[44], 表层流将湄公河携带进入南海的泥沙向东北方向移动, 但是由于距离较远, 导致湄公河较少的沉积物能够运移到达珠江口盆地, 此外, 表层流还会将一部分的由红河和海南岛汇入南海中部的细粒级碎屑物质向东北方向运输, 到达 Z8 站位。前人研究表明, 珠江携带的泥沙输入大陆架以后在大陆架大量沉降[37], 此外, 在沿岸流和表层环流驱动下, 珠江携带的泥沙部分向东北或者西南方向移动, 但是由于珠江是距离 Z8 站位最近的大陆水系, 因此不能忽略珠江的影响。

黑潮起源于北赤道流, 是北太平洋一个主要的西边界流, 黑潮沿着菲律宾东部海岸向北流动。当向北移动的黑潮流经吕宋海峡时, 由于吕宋海峡有一个 300 多公里的缺口, 导致了黑潮顺时针弯曲, 并入侵南海东北部, 显著影响南海的温度、盐度、环流和涡流[45] [46]。黑潮到达南海以后, 由于受到南海地形和风力等因素的影响, 在台湾岛西南部形成南海分支。黑潮入侵对下层 SCS 环流产生了至关重要的影响, 黑潮能够影响约 300~500 m 水层的次表层水[18] [47], 驱动的次表层水向西南方向移动时, 将大量的台湾岛沉积物运移到珠江口盆地 Z8 站位。来自太平洋的深海洋流通过吕宋海峡进入南海, 向西北方向移动, 然后沿大陆边缘转向西南[40], 在进入中沙海域以后, 深海环流分为两支, 一支在南海中部深盆和海山周围形成气旋环流; 另一股水流沿 3500 m 等深线连续流动。台湾河流每年向南海输入 176 Mt 沉积物, 这些沉积物绝大部分由深海环流向西南方向移动。

## 6. 结论

通过对珠江口盆地深水区 Z8 站位沉积重力柱的粒度、稀土元素和 Sr-Nd 同位素的分析, 并与不同潜在物源进行对比, 取得了以下结论:

- 1) 珠江口盆地深水区沉积物主要为陆源供给, 且属于混合来源。
- 2) 台湾岛为研究区最大的物源贡献者, 红河、湄公河和海南岛对研究区沉积物有着较少的物源供给。
- 3) 深水环流和黑潮将大部分的台湾岛沉积物向西南方向运移到达 Z8 站位, 季风驱动的表层环流和沿岸流将一定量的红河、湄公河和海南岛向东北方向运移到达沉积区。

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目“琼东南盆地冷泉差异发育的流体动力学特征及其深部控制机理”(项目编号: 42000-41030152), 海南省科技专项资助项目“琼东南盆地天然气水合物资源评价与目标优选”(项目编号: ZDYF2023GXJS008)。

## 参考文献

- [1] Marensi, S.A., Net, L.I. and Santillana, S.N. (2002) Provenance, Environmental and Paleogeographic Controls on Sandstone Composition in an Incised-Valley System: The Eocene La Meseta Formation, Seymour Island, Antarctica. *Sedimentary Geology*, **150**, 301-321. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00201-9](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00201-9)
- [2] Smyth, H.R., Morton, A., Richardson, N., et al. (2014) Sediment Provenance Studies in Hydrocarbon Exploration and Production: An Introduction. *Sediment Provenance Studies in Hydrocarbon Exploration and Production*, **386**, 1-6. <https://doi.org/10.1144/SP386.21>
- [3] Wang, C., Wen, S., Liang, X., et al. (2018) Detrital Zircon Provenance Record of the Oligocene Zhuhai Formation in the Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, **98**, 448-461. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.08.032>
- [4] Hu, Z., Huang, B., Geng, L., et al. (2022) Sediment Provenance in the Northern South China Sea since the Late Miocene. *Open Geosciences*, **14**, 1636-1649. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0454>
- [5] Steven, A.K. and Charles, A.N. (2011) Exploring the Transfer of Earth Surface Materials from Source to Sink. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **92**, 188. <https://doi.org/10.1029/2011EO220007>
- [6] Cai, G.Q., Li, S., Zhong, L.F., et al. (2020) Clay Minerals, Sr-Nd Isotopes and Provenance of Sediments in the Northwestern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, **202**, Article ID: 104531. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104531>
- [7] Liu, Z., Zhao, Y., Colin, C., et al. (2016) Source-to-Sink Transport Processes of Fluvial Sediments in the South China Sea. *Earth-Science Reviews*, **153**, 238-273. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.08.005>
- [8] Wei, G.J., Liu, Y. and Ma, J.L. (2012) Nd, Sr Isotopes and Elemental Geochemistry of Surface Sediments from the South China Sea: Implications for Provenance Tracing. *Marine Geology*, **319-322**, 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.05.007>
- [9] John, D.M., Katherine, L.F. and Christina, S.A. (1999) Flux and Fate of Fluvial Sediments Leaving Large Islands in the East Indies. *Journal of Sea Research*, **41**, 97-107. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(98\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(98)00040-9)
- [10] Zeng, Z., Zhu, H., Yang, X., et al. (2019) Using Seismic Geomorphology and Detrital Zircon Geochronology to Constrain Provenance Evolution and Its Response of Paleogene Enping Formation in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea: Implications for Paleo-Pearl River Drainage Evolution. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **177**, 663-680. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.02.051>
- [11] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 1-9.
- [12] 张功成, 谢晓军, 王万银, 等. 中国南海含油气盆地构造类型及勘探潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 611-627.
- [13] 张功成. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 528-533.
- [14] Li, P.L. and Rao, C. (1994) Tectonic Characteristics and Evolution History of the Pearl River Mouth Basin. *Tectonophysics*, **235**, 13-25. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90014-0)
- [15] Jaijel, R., Tchernov, B.N., Biton, E., et al. (2021) Optimizing a Standard Preparation Procedure for Grain Size Analysis of Marine Sediments by Laser Diffraction (MS-PT4SD: Marine Sediments-Pretreatment for Size Distribution). *Deep*

*Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **167**, Article ID: 103429.

<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103429>

- [16] Jacobsen, S. and Wasserburg, G. (1980) Sm-Nd Isotopic Evolution of Chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, **50**, 139-155. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90125-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90125-9)
- [17] 周斌, 郑洪波, 杨文光, 等. 末次冰期以来南海北部物源及古环境变化的有机地球化学记录[J]. 第四纪研究, 2008, 28(3): 407-413.
- [18] Huang, Q.T., Hua, Y.J., Zhang, C.L., *et al.* (2023) Provenance and Transport Mechanism of Gravity Core Sediments in the Deep-Water Area of the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Marine Geology*, **459**, Article ID: 107043. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2023.107043>
- [19] Clift, P.D., Wan, S. and Blusztajn, J. (2014) Reconstructing Chemical Weathering, Physical Erosion and Monsoon Intensity since 25 Ma in the Northern South China Sea: A Review of Competing Proxies. *Earth-Science Reviews*, **130**, 86-102. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.01.002>
- [20] 李辉, 韩宗珠, 闫天浩, 等. 稀土元素配分曲线的相似性度量算法及其在黄海沉积物物源判别中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(12): 88-97.
- [21] Dou, Y., Yang, S., Liu, Z., *et al.* (2010) Provenance Discrimination of Siliciclastic Sediments in the Middle Okinawa Trough since 30 Ka: Constraints from Rare Earth Element Compositions. *Marine Geology*, **275**, 212-220. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.06.002>
- [22] Yang, S.Y., Jung, H.S., Choi, M.S., *et al.* (2002) The Rare Earth Element Compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) River Sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, **201**, 407-419. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00715-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00715-X)
- [23] Awasthi, N. (2017) Provenance and Paleo-Weathering of Tertiary Accretionary Prism-Forearc Sedimentary Deposits of the Andaman Archipelago, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, **150**, 45-62. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.10.005>
- [24] 严杰, 高建华, 李军, 等. 鸭绿江河口外海域柱状沉积物稀土元素的分布特征及物源指示[J]. 海洋通报, 2013, 32(6): 601-609.
- [25] 张霄宇, 张富元, 高爱根, 等. 稀土元素在长江口及邻近陆架表层沉积物中的分布及物源示踪研究[J]. 中国稀土学报, 2009, 27(2): 282-288.
- [26] Xu, Z. and Han, G. (2009) Rare Earth Elements (REE) of Dissolved and Suspended Loads in the Xijiang River, South China. *Applied Geochemistry*, **24**, 1803-1816. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.06.001>
- [27] Li, C., Shi, X., Kao, S., *et al.* (2013) Rare Earth Elements in Fine-Grained Sediments of Major Rivers from the High-Standing Island of Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, **69**, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.03.001>
- [28] Borges, J.B., Huh, Y., Moon, S., *et al.* (2008) Provenance and Weathering Control on River Bed Sediments of the Eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East. *Chemical Geology*, **254**, 52-72. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.002>
- [29] Tam, T.A., Yumul, G.P., Ramos, E., *et al.* (2005) Rare Earth Element Geochemistry of the Zigzag-Klondyke Sedimentary Rock Formations: Clues to the Evolution of the Baguio Mineral District (Luzon), Philippines. *Resource Geology*, **55**, 217-224. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2005.tb00243.x>
- [30] Taylor, S.R. and McLennan, S.M. (1981) The Composition and Evolution of the Continental Crust: Rare Earth Element Evidence from Sedimentary Rocks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **301**, 381-398.
- [31] Sun, S.-S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society of London Special Publication*, **42**, 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- [32] 张磊, 麦发海, 王超群, 等. 海南岛北部晚新生代沉积物 Sr-Nd 同位素组成及其物源示踪[J]. 地质通报, 2022, 41(11): 1996-2006.
- [33] Chen, C.H., Jahn, B., Lee, T., *et al.* (1990) Sm-Nd Isotopic Geochemistry of Sediments from Taiwan and Implications for the Tectonic Evolution of Southeast China. *Chemical Geology*, **88**, 317-332. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90096-P](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90096-P)
- [34] Liu, Z., Colin, C., Huang, W., *et al.* (2007) 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. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **8**, Q05005. <https://doi.org/10.1029/2006GC001490>
- [35] Hu, B., Li, J., Zhao, J., *et al.* (2018) Sr-Nd Isotopic Geochemistry of Holocene Sediments from the South Yellow Sea:

- Implications for Provenance and Monsoon Variability. *Chemical Geology*, **479**, 102-112.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.12.033>
- [36] Depaolo, D.J. and Johnson, R.W. (1979) Magma Genesis in the New Britain Island-Arc; Constraints from Nd and Sr Isotopes and Trace-Element Patterns. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **70**, 367-379.  
<https://doi.org/10.1007/BF00371044>
- [37] Liu, Y., Gao, S., Wang, Y.P., *et al.* (2014) Distal Mud Deposits Associated with the Pearl River over the Northwestern Continental Shelf of the South China Sea. *Marine Geology*, **347**, 43-57. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.10.012>
- [38] Liu, C., Clift, P.D., Carter, A., *et al.* (2017) Controls on Modern Erosion and the Development of the Pearl River Drainage Fa in the Late Paleogene. *Marine Geology*, **394**, 52-68. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.07.011>
- [39] Liang, W.D., Tang, T.Y., Yang, Y.J., *et al.* (2003) Upper-Ocean Currents around Taiwan. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, **50**, 1085-1105. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(03\)00011-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(03)00011-0)
- [40] Qu, T.D., Girton, J.B. and Whitehead, J.A. (2006) Deepwater Overflow through Luzon Strait. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, **111**, C01002. <https://doi.org/10.1029/2005JC003139>
- [41] Wang, G., Xie, S., Qu, T., *et al.* (2011) Deep South China Sea Circulation. *Geophysical Research Letters*, **38**, L05601.  
<https://doi.org/10.1029/2010GL046626>
- [42] 赵增祥, 万世明, 鞠梦珊, 等. 末次冰期以来南海西北部沉积物源和风化演变的 Sr-Nd 同位素与稀土元素证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2023, 42(4): 702-716.
- [43] Li, M., Ouyang, T., Zhu, Z., *et al.* (2019) Rare Earth Element Fractionations of the Northwestern South China Sea Sediments, and Their Implications for East Asian Monsoon Reconstruction during the Last 36 Kyr. *Quaternary International*, **525**, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.09.007>
- [44] Fang, G., Fang, W., Fang, Y., *et al.* (1998) A Survey of Studies on the South China Sea Upper Ocean Circulation. *Acta Oceanographica Taiwanica*, **37**, 1-16.
- [45] Hsueh, Y. (2000) The Kuroshio in the East China Sea. *Journal of Marine Systems*, **24**, 131-139.  
[https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(99\)00083-4](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00083-4)
- [46] 刘玉民, 张志伟, 张新城, 等. 基于卫星高度计资料的黑潮入侵南海流经的时间变化规律研究[J]. 海洋与湖沼, 2023, 54(4): 951-962.
- [47] Liu, J., Xiang, R., Chen, M., *et al.* (2011) Influence of the Kuroshio Current Intrusion on Depositional Environment in the Northern South China Sea: Evidence from Surface Sediment Records. *Marine Geology*, **285**, 59-68.  
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.05.010>