

# 莺歌海盆地东方区晚中新世粗粒与细粒沉积物源汇系统特征及成因分析

何小胡<sup>1,3,4</sup>, 姜涛<sup>2\*</sup>, 冯婧姿<sup>2</sup>, 张亚震<sup>3,4</sup>, 袁丙龙<sup>3,4</sup>, 刘国昌<sup>1</sup>, 何杰<sup>2</sup>

1) 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京, 102249

2) 中国地质大学海洋地质资源湖北省重点实验室, 湖北武汉, 430074

3) 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南海口, 570312

4) 中国海油南海油气能源院士工作站, 海口, 570312

**摘要:** 为了解莺歌海盆地东方区黄流组一段粗粒与细粒沉积物源汇系统的差异特征, 综合运用矿物学、锆石 U-Pb 年代学和 Sr-Nd 同位素分析方法, 分别对莺歌海盆地东方区黄流组一段粗粒与细粒沉积物的物源特征进行定量分析。结果表明: 莺歌海盆地东方区晚中新世粗粒沉积物的红河物源平均供源占比可达约 65%, 越南中部物源平均供源占比约为 16%, 海南岛物源平均供源占比约为 19%; 细粒沉积物的红河物源平均供源占比约为 44%, 越南中部物源平均供源占比约为 37%, 海南岛物源平均供源占比约为 19%。粗粒沉积物比细粒沉积物具有更高的红河物源和更少的越南中部物源, 推测是受晚中新世青藏高原快速隆升, 红河断裂反转的影响。此外, 粗粒与细粒沉积物源汇系统特征的差异还受到沉积物中较低的重矿物和较高的泥质含量的影响。

**关键词:** 莺歌海盆地; 源汇系统; 重矿物; 锆石 U-Pb 年代学; Sr-Nd 同位素

**中图分类号:** P618

**收稿日期:** 2025-09-18

**Abstract:** In order to understand the different characteristics of the source-sink system of the first member of the Huangliu Formation in the eastern part of the Yinggehai Basin, the provenance characteristics of coarse-grained and fine-grained sediments in the first member of Huangliu Formation in the eastern part of Yinggehai Basin were quantitatively analyzed by means of mineralogy, zircon U-Pb chronology and Sr-Nd isotope analysis. The results show that the average source proportion of the late Miocene coarse-grained sediments in the eastern part of Yinggehai Basin can reach ~65%, that in central Vietnam is ~16%, and that in Hainan Island is ~19%. The average source of fine sediment is ~44% in Red River, ~37% in central Vietnam and ~19% in Hainan Island. Coarse-grained sediments have higher Red River provenance and less central Vietnam provenance than fine-grained sediments, presumably due to the rapid uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and the reversal of the Red River Fault Zone in the Late Miocene. Furthermore, the differences in the characteristics of the source-sink systems of coarse-grained and fine-grained sediment are also influenced by the lower content of heavy minerals and the higher content of mud in the sediments.

**Key words:** Yinggehai Basin; Source-sink system; Heavy minerals; Zircon U-Pb chronology; Sr-Nd isotope

**基金项目:** 本文为海南省院士创新平台科研项目(编号 YSPTZX202302)、海南省重点研发项目专项研究基金(编号 ZDYF2024GXJS293)和国家自然科学基金项目(编号 42276073, 42202119)联合资助的成果。

**作者简介:** 何小胡(1982-), 男, 高级工程师, 研究方向: 南海西部石油天然气勘探综合研究与管理. E-mail: hexh@cnooc.com,

**\*通讯作者:** 姜涛(1979-), 男, 教授, 研究方向: 海洋地质与资源. ORCID: 0000 - 0001 - 8845 - 8582. E-mail: taojiang@cug.edu.cn,

## 0 引言

南海作为西太平洋最大的边缘海, 拥有复杂的构造特征与沉积背景, 发育了极其丰富的油气与矿产资源, 多年来一直是我国勘探开发的重点区域(谢玉洪等, 2015; Wang et al., 2019)。莺歌海盆地是南海西北部被动大陆边缘的新生代含油气盆地, 紧邻印度—澳大利亚板块与欧亚板块, 其构造演化受多板块活动的影响(谢玉洪等, 2015; Fyhn et al., 2019)。目前莺歌海盆地天然气勘探工作取得了较大突破, 发现了多个浅层、中深层气田以及多个含油气构造, 拥有良好的油气勘探前景(张建新等, 2019)。物源分析作为储层预测与评价的核心基础, 对于油气勘探开发工作具有重要的指导意义, 是其顺利开展的重要前提。

莺歌海盆地新生代经历了多期构造-沉积演化阶段, 期间存在数个方向的物源供给, 其潜在物源区主要有: 盆地西北侧的红河水系物源、西侧的越南中部物源和东侧的海南岛物源(谢玉洪等, 2009; Wang et al., 2015; Fyhn et al., 2019; 王华等, 2022; 张旭友等, 2024)。红河水系是莺歌海盆地最大的陆源碎屑供应带, 受红河断裂带阶段性活动影响, 红河物源区包含多种沉积岩与高级变质岩, 且发育多时代岩浆岩。红河物源规模大、搬运距离长, 区域主要河流有红河、沱江和泸江(谢海洋等, 2025)。越南中部物源控制莺西斜坡的沉积物供给, 地层出露较为齐全, 母岩岩性以碎屑岩、灰岩为主, 夹杂基性、酸性喷出岩和花岗岩, 分布少部分高级变质岩, 整体上与红河物源的锆石 U-Pb 年龄特征相似。越南中部是莺歌海盆地西部物源的主要碎屑来源, 主要河流由北至南依次为马江、蓝江、宋河、贤良河、东河、香江和秋盆河。海南岛以印支期和燕山期中酸性侵入岩为特点, 出露岩石主要为岩浆岩, 是近岸莺东斜坡的重要物源区, 海南岛西部的主要河流有珠碧江、昌化江、北黎河、感恩河、望楼河、宁远河(Wang et al., 2015; Fyhn et al., 2019; 曹立成, 2014; 王策, 2016)。

Yan et al. (2011)首次将锆石 U-Pb 测年方法应用到对莺歌海盆地东侧物源的研究中, 并肯定了海南岛物源的贡献; 李慧明(2012)通过分析重矿物组合特征认为莺歌海盆地越南方向的物源随地层变浅而增加, 而海南岛物源始终为主要的物源区; 曹立成(2014)通过重矿物组合以及锆石 U-Pb 年龄分析认为晚中新世越东物源对莺歌海盆地东方区的供源增强; 王策(2016)通过碎屑锆石 U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素研究认为莺歌海盆地东方区晚中新世的主要物源为红河物源, 并通过 Sr-Nd 同位素分析进一步肯定了红河物源对莺歌海盆地的贡献, 但是因缺少越南中部和海南岛物源区的 Sr 同位素数据并没有进一步分析各源区贡献; 黄银涛等(2018)综合砂岩碎屑组分、重矿物、古水流以及岩石元素地球化学分析认为西部昆崙隆起提供了盆地浅海重力流沉积体系的物质来源。前人认为红河物源与越南中部物源对莺歌海盆地东方区的影响较大, 同时海南岛也是主要源区之一。

前人从重矿物、锆石 U-Pb 测年与地球化学等方面对莺歌海盆地的物源进行了大量研究, 然而并没有针对不同粒径的沉积物物源差异进行分析。并且前人研究重点主要放在砂质沉积物上, 对于泥质沉积物的源汇系统研究还存在不少空白。本文基于前人工作, 通过重矿物组合与碎屑锆石 U-Pb 测年对以砂岩为主的粗粒沉积物的物源信息进行分析; 同时利用 Sr-Nd 同位素分析粉砂岩、泥岩等细粒沉积物的物源, 旨在探究莺歌海盆地东方区粗粒与细粒物源的供应差异, 细化盆地源-汇体系, 为更好服务于海洋石油勘探与开发提供了理论依据。

1 区域地质背景

莺歌海盆地东临海南岛，西靠越南，北接河内凹陷和北部湾盆地，东南与琼东南盆地相连，盆地呈 NW-SE 向条带展布，西北部收缩狭窄，中南部宽广平缓，整体为菱形，总面积约为  $11.2\times 10^4\text{km}^2$ （谢玉洪，2015；黄银涛等，2016；王华等，2022；胡高伟等，2024）。莺歌海盆地受板块俯冲、块体逃逸、地幔挤压和地壳伸展等多种板块构造活动的影响，平均地温梯度较高，发育强烈的泥底辟活动以及异常高温高压地层系统等地质现象，具有地壳薄、沉降深、沉积快、地温梯度高和天然气积累丰富的特征（姜涛等，2005；谢玉洪等，2015）。莺歌海盆地油气成藏体系复杂，油气资源以天然气为主，石油地质条件较好，具备优良的生储盖组合配置（谢玉洪等，2015）。

莺歌海盆地基底主要由花岗岩、变质岩、砂岩、灰岩、白云岩等沉积岩构成，盆地内充填始新统以上完整的新时代沉积地层。莺歌海盆地沉积充填序列自下至上依次为渐新统的崖城组和陵水组，中新统的三亚组、梅山组和黄流组，上新统的莺歌海组以及更新统的乐东组（Wang et al., 2015；Meng et al., 2023；李亚茹等，2022；党亚云等，2023）。

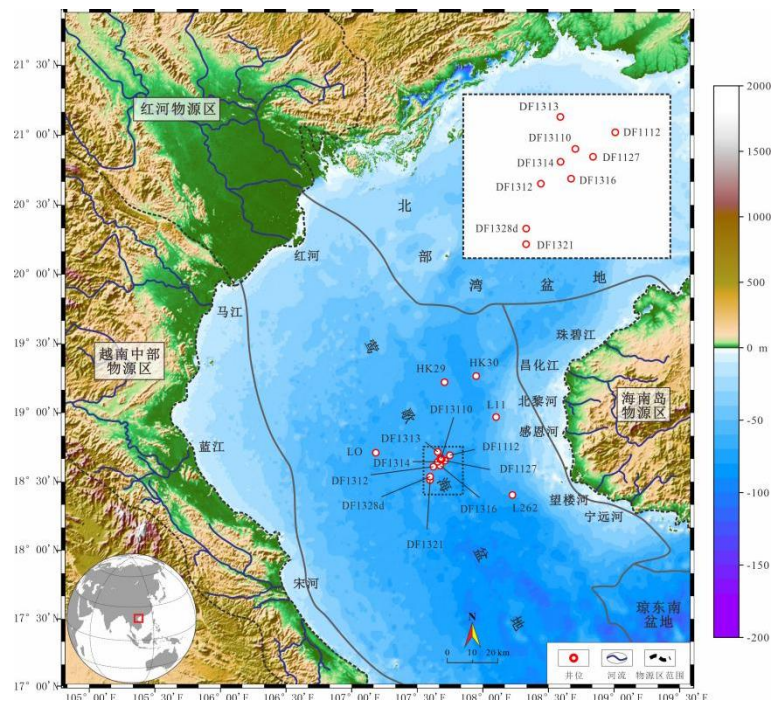


图 1 莺歌海盆地及周缘水系位置

Fig.1 Location of the Yinggehai Basin and surrounding water system

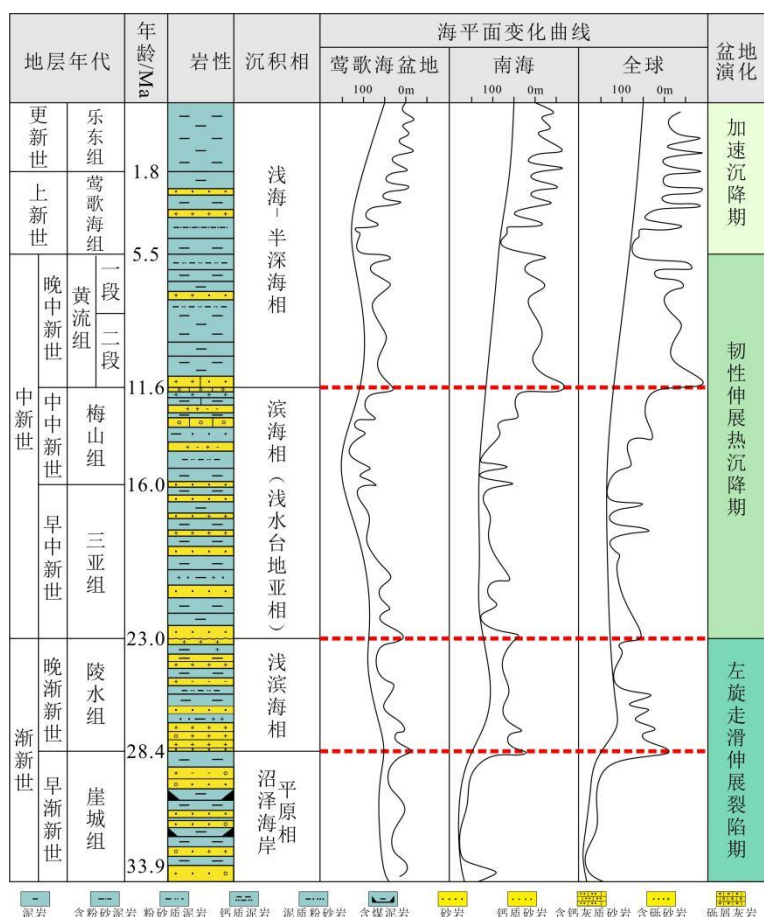


图 2 莺歌海盆地地层系统

Fig.2 Stratigraphic system of the Yinggehai Basin

## 2 样品与研究方法

### 2.1 重矿物分析

重矿物是指沉积岩中相对密度大于  $2.9\text{g/cm}^3$  的陆源碎屑矿物，其在沉积岩中的质量分数通常低于 1%。重矿物种类丰富，由于其化学性质稳定且抗风化能力较强，对于揭示岩石的来源、成分以及地质历史具有重要的指示作用 (Morton et al., 2011)。

本研究井位重矿物资料来自中海石油 (中国) 有限公司海南分公司，涵盖 15 口钻井，同时引用了 10 条已发表的现代河流重矿物数据。为充分利用数据、减小误差、凸显重矿物对比结果，本文选取了锆石、电气石、金红石、石榴石、帘石类、角闪石、榍石、十字石、锐钛矿、板钛矿、辉石、独居石、尖晶石、磷钇矿等 14 种相对含量较高的透明重矿物。

### 2.2 锆石 U-Pb 测年

U-Pb 测年是通过测量矿物中铀 (U) 同位素衰变成铅 (Pb) 同位素的比值来确定岩石或矿物的形成年龄。锆石物理化学特征稳定，富含 U 和 Th 以及低普通 Pb 含量，因此通常会对样品进行单颗粒锆石 U-Pb 年龄测定，可以得到目标盆地沉积物的 U-Pb 年龄频谱。年龄频谱中的多个频率峰值可以反映源区的地质事件特征，从而判断物源组成 (Vermeesch et al., 2012; 曹立成, 2014; 王策, 2016; 崔宇驰等, 2018; Wang et al., 2020)。

本文引用已发表的莺歌海盆地 8 口井以及 10 条现代河流的锆石 U-Pb 测年数据。本文处

理碎屑锆石 U-Pb 测年数据时采取 Compston 的计算方法，对于年龄小于 1000Ma 的样品选取  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  得出的年龄，对于年龄大于 1000Ma 的样品选取  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  得出的年龄，并且仅选取谐和度大于 90%的数据（Compston, 1992）。

2.3 Sr-Nd 同位素测试

Sr 同位素具有低溶解度和弱活动性的特点，基本不会随温压与生物扰动变化；Nd 同位素能够反映物质在地壳的停留时间（黄思静等，2001；毛光周等，2011；王策，2016；张磊等，2022）。将 Sr-Nd 同位素与 Rstudio 的 simmr 应用包（Parnell et al., 2013）中的贝叶斯混合模型相结合，可以对沉积物各源区占比进行定量计算。

本研究根据中海石油（中国）有限公司提供的岩心、岩屑样品对 DF1313、DF1314、DF13110、DF1322、DF1328d、DF1127 等 6 口井黄一段的泥岩/泥质粉砂岩进行了采集并进行 Sr-Nd 同位素检测。此外，文章引用了王策（2016）发表的 4 口井 Sr-Nd 同位素测试数据。

Sr-Nd 同位素分析在武汉上谱科技有限责任公司实验室使用 MC-ICP-MS 进行测试。首先将沉积物样品在约 50℃的低温下进行干燥，然后进行研磨并使用稀盐酸去除样品中碳酸钙与其他自生成分。再使用  $\text{HNO}_3$  和  $\text{HF}$  溶解，利用阳离子交换树脂 AG50-G8 在 2N HCl 溶液中分离 Sr 和 Nd，使用 Ln 阳离子交换树脂分离 Sm 和 Nd。在武汉上谱科技有限责任公司实验室的多接收质谱仪（MC-ICP-MS）上进行了 Nd 和 Sr 同位素测量。在测量期间的质量分馏效应采用  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.1194$  校正 Sr 同位素质量偏差，采用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$  校正 Nd 同位素质量偏差。为监测测定的精密度和准确度，用国际标样 NBS987 和 Jndi-1 分别对 Sr 同位素和 Nd 同位素进行监控，其中 NBS987 标样中  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710252\pm0.000006(2\sigma)$ ，Jndi-1 标样中  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512096\pm0.000007(2\sigma)$ 。 $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$  的计算公式为： $\epsilon_{\text{Nd}(0)}=[((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{测试值}}/0.512638))-1]\times10000$ 。Sr 和 Nd 详细的测试方法可参阅 Wei et al.(2004)、梁细荣等(2003)和杨岳衡等(2005，2007)。

数据引用详情如表 1 所示：

表 1 沉积物样品数据类型及来源  
Table 1 Reference sample type and source

| 位置  | 数据类型    | 原始编号     | 来源                | 位置     | 数据类型      | 原始编号    | 来源              |
|-----|---------|----------|-------------------|--------|-----------|---------|-----------------|
| 红河  | 重矿物     | R5938    | He et al.,2022    | DF1316 | Sr-Nd 同位素 | D1316-2 | 王策，2016         |
| 红河  | 重矿物     | M5942    | He et al.,2022    | DF1316 | Sr-Nd 同位素 | D1316-3 | 王策，2016         |
| 红河  | 重矿物     | L5947    | He et al.,2022    | DF1316 | Sr-Nd 同位素 | D1316-4 | 王策，2016         |
| 马江  | 重矿物     | S6052    | He et al.,2023    | DF1316 | Sr-Nd 同位素 | D1316-5 | 王策，2016         |
| 蓝江  | 重矿物     | S6058    | He et al.,2023    | DF1316 | Sr-Nd 同位素 | D1316-6 | 王策，2016         |
| 蓝江  | 重矿物     | S6054    | He et al.,2023    | 红河     | Sr-Nd 同位素 | R5937   | He et al.,2022  |
| 珠碧江 | 重矿物     | 2012HT01 | 王策等，2014          | 红河     | Sr-Nd 同位素 | R5939   | He et al.,2022  |
| 昌化江 | 重矿物     | 2012CH01 | 王策等，2014          | 红河     | Sr-Nd 同位素 | R5940   | He et al.,2022  |
| 北黎河 | 重矿物     | 2012DT01 | 王策等，2014          | 红河     | Sr-Nd 同位素 | L5945   | He et al.,2022  |
| 通天河 | 重矿物     | 2012TT01 | 王策等，2014          | 红河     | Sr-Nd 同位素 | L5947   | He et al.,2022  |
| 感恩河 | 重矿物     | 2012GE01 | 王策等，2014          | 红河     | Sr-Nd 同位素 | M5942   | He et al.,2022  |
| 望楼河 | 重矿物     | 2012WL01 | 王策等，2014          | 红河     | Sr-Nd 同位素 | C5949   | He et al.,2022  |
| 宁远河 | 重矿物     | 2012YC01 | 王策等，2014          | 红河     | Sr-Nd 同位素 | D5943   | He et al.,2022  |
| 红河  | 锆石 U-Pb | 527832   | Fyhn et al. ,2019 | 红河     | Sr-Nd 同位素 | RS03    | Liu et al.,2007 |
| 红河  | 锆石 U-Pb | HUN-1    | Wang et al. ,2018 | 红河     | Sr-Nd 同位素 | RS11    | Liu et al.,2007 |

|        |           |            |                    |    |           |            |                   |
|--------|-----------|------------|--------------------|----|-----------|------------|-------------------|
| 红河     | 锆石 U-Pb   | Red River  | Clift et al.,2006  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | RS16       | Liu et al.,2007   |
| 红河     | 锆石 U-Pb   | RS0702     | Hoang et al.,2009  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | RS23       | Liu et al.,2007   |
| 红河     | 锆石 U-Pb   | VN05060801 | Hoang et al.,2009  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | RS26       | Liu et al.,2007   |
| 红河     | 锆石 U-Pb   | VN07060501 | Hoang et al.,2009  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | RS32       | Liu et al.,2007   |
| 红河     | 锆石 U-Pb   | WHT-1      | Wang et al. ,2018  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | RS35       | Liu et al.,2007   |
| 红河     | 锆石 U-Pb   | VN05061101 | Hoang et al.,2009  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060701 | Clift et al.,2008 |
| 红河     | 锆石 U-Pb   | BLR-1      | Wang et al. ,2018  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060702 | Clift et al.,2008 |
| 马江     | 锆石 U-Pb   | 527831     | Fyhn et al. ,2019  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060703 | Clift et al.,2008 |
| 马江     | 锆石 U-Pb   | MA-1       | Wang et al. ,2018  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060704 | Clift et al.,2008 |
| 蓝江     | 锆石 U-Pb   | 527830     | Fyhn et al. ,2019  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060705 | Clift et al.,2008 |
| 蓝江     | 锆石 U-Pb   | CA-1       | Wang et al. ,2018  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060706 | Clift et al.,2008 |
| 蓝江     | 锆石 U-Pb   | M03-21B    | Usuki et al.,2013  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060707 | Clift et al.,2008 |
| 蓝江     | 锆石 U-Pb   | M03-24B    | Usuki et al.,2013  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060710 | Clift et al.,2008 |
| 宋河     | 锆石 U-Pb   | 12061704   | Jonell et al.,2017 | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060801 | Clift et al.,2008 |
| 宋河     | 锆石 U-Pb   | 12061703   | Jonell et al.,2017 | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060802 | Clift et al.,2008 |
| 宋河     | 锆石 U-Pb   | 12061711   | Jonell et al.,2017 | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060804 | Clift et al.,2008 |
| 宋河     | 锆石 U-Pb   | 12061712   | Jonell et al.,2017 | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060805 | Clift et al.,2008 |
| 宋河     | 锆石 U-Pb   | 14052801   | Jonell et al.,2017 | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060806 | Clift et al.,2008 |
| 宋河     | 锆石 U-Pb   | 12061801   | Jonell et al.,2017 | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060807 | Clift et al.,2008 |
| 宋河     | 锆石 U-Pb   | 14052705   | Jonell et al.,2017 | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060808 | Clift et al.,2008 |
| 宋河     | 锆石 U-Pb   | 12061807   | Jonell et al.,2017 | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05060809 | Clift et al.,2008 |
| 宋河     | 锆石 U-Pb   | 12061804   | Jonell et al.,2017 | 红河 | Sr-Nd 同位素 | VN05061101 | Clift et al.,2008 |
| 珠碧江    | 锆石 U-Pb   | HL5        | Gong et al.,2021   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H1         | Duan et al.,2023  |
| 珠碧江    | 锆石 U-Pb   | 2012HT01   | Wang et al.,2015   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H2         | Duan et al.,2023  |
| 昌化江    | 锆石 U-Pb   | HL4        | Gong et al.,2021   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H8         | Duan et al.,2023  |
| 昌化江    | 锆石 U-Pb   | 2012CH01   | Wang et al.,2015   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H9         | Duan et al.,2023  |
| 昌化江    | 锆石 U-Pb   | 2012CH02   | Wang et al.,2015   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H12        | Duan et al.,2023  |
| 北黎河    | 锆石 U-Pb   | 2012DT01   | Wang et al.,2015   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H15        | Duan et al.,2023  |
| 感恩河    | 锆石 U-Pb   | 2012GE01   | Wang et al.,2015   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H16        | Duan et al.,2023  |
| 望楼河    | 锆石 U-Pb   | 2012WL01   | Wang et al.,2015   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H19        | Duan et al.,2023  |
| 宁远河    | 锆石 U-Pb   | NY-02      | Chen et al.,2021   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H20        | Duan et al.,2023  |
| 宁远河    | 锆石 U-Pb   | 2012YC01   | Wang et al.,2015   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H22        | Duan et al.,2023  |
| L11    | 锆石 U-Pb   | L11-5      | Wang et al.,2019   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H24        | Duan et al.,2023  |
| L262   | 锆石 U-Pb   | L262-1     | Wang et al.,2015   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H28        | Duan et al.,2023  |
| LO     | 锆石 U-Pb   | LO-9       | Wang et al. ,2018  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H29        | Duan et al.,2023  |
| LO     | 锆石 U-Pb   | LH1        | Jiang et al.,2015  | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H30        | Duan et al.,2023  |
| DF1112 | 锆石 U-Pb   | DF1112-2   | Wang et al.,2014   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H34        | Duan et al.,2023  |
| DF1312 | 锆石 U-Pb   | DF1312-9R  | Wang et al.,2014   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H35        | Duan et al.,2023  |
| DF1312 | 锆石 U-Pb   | DF13       | Cao et al.,2015    | 红河 | Sr-Nd 同位素 | H39        | Duan et al.,2023  |
| DF1313 | 锆石 U-Pb   | DF1313-4R  | Wang et al.,2014   | 红河 | Sr-Nd 同位素 | Su2        | Duan et al.,2023  |
| HK29   | 锆石 U-Pb   | H2912-2    | 王策, 2016           | 红河 | Sr-Nd 同位素 | Su3        | Duan et al.,2023  |
| HK30   | 锆石 U-Pb   | H3031A-3   | 王策, 2016           | 红河 | Sr-Nd 同位素 | Su4        | Duan et al.,2023  |
| LO     | Sr-Nd 同位素 | L1X-6      | 王策, 2016           | 红河 | Sr-Nd 同位素 | Su5        | Duan et al.,2023  |
| LO     | Sr-Nd 同位素 | L1X-7      | 王策, 2016           | 红河 | Sr-Nd 同位素 | Su7        | Duan et al.,2023  |

|        |           |         |          |     |           |       |                  |
|--------|-----------|---------|----------|-----|-----------|-------|------------------|
| LO     | Sr-Nd 同位素 | L1X-8   | 王策, 2016 | 红河  | Sr-Nd 同位素 | Su12  | Duan et al.,2023 |
| DF1112 | Sr-Nd 同位素 | D1112-1 | 王策, 2016 | 红河  | Sr-Nd 同位素 | Su16  | Duan et al.,2023 |
| DF1112 | Sr-Nd 同位素 | D1112-2 | 王策, 2016 | 红河  | Sr-Nd 同位素 | Su17  | Duan et al.,2023 |
| DF1112 | Sr-Nd 同位素 | D1112-3 | 王策, 2016 | 红河  | Sr-Nd 同位素 | Su18  | Duan et al.,2023 |
| DF1112 | Sr-Nd 同位素 | D1112-4 | 王策, 2016 | 红河  | Sr-Nd 同位素 | Su19  | Duan et al.,2023 |
| DF1312 | Sr-Nd 同位素 | D1312-1 | 王策, 2016 | 马江  | Sr-Nd 同位素 | S6052 | He et al.,2023   |
| DF1312 | Sr-Nd 同位素 | D1312-2 | 王策, 2016 | 蓝江  | Sr-Nd 同位素 | S6054 | He et al.,2023   |
| DF1312 | Sr-Nd 同位素 | D1312-3 | 王策, 2016 | 蓝江  | Sr-Nd 同位素 | S6058 | He et al.,2023   |
| DF1312 | Sr-Nd 同位素 | D1312-4 | 王策, 2016 | 昌化江 | Sr-Nd 同位素 | CH02  | Wan et al.,2022  |
| DF1316 | Sr-Nd 同位素 | D1316-1 | 王策, 2016 |     |           |       |                  |

### 3 粗粒与细粒沉积物源汇系统特征及差异

#### 3.1 粗粒沉积物源汇系统特征

莺歌海盆地黄流组一段重矿物组合特征与平面分布如图 3 和图 4 所示。整体上来看，不同井位角闪石、辉石和独居石含量差异明显，DF141 和 DF13114 井辉石-角闪石含量明显较高，表现为高级变质岩与基性火山岩的组合特征，结合其地理位置推测井位附近受红河物源影响较大。研究区南部的井位普遍表现出电气石-石榴石-独居石含量高的特征（图 4），指示高级变质岩与岩浆岩，符合红河物源与越南中部物源的岩性特征，且多数井位 ZTR 值较高，推测搬运距离相对较远，说明研究区南部大多数井位主要受红河与越南中部物源影响。DF531 井具有高锆石低石榴石含量的特点，表明研究区东部依然受海南岛物源影响。

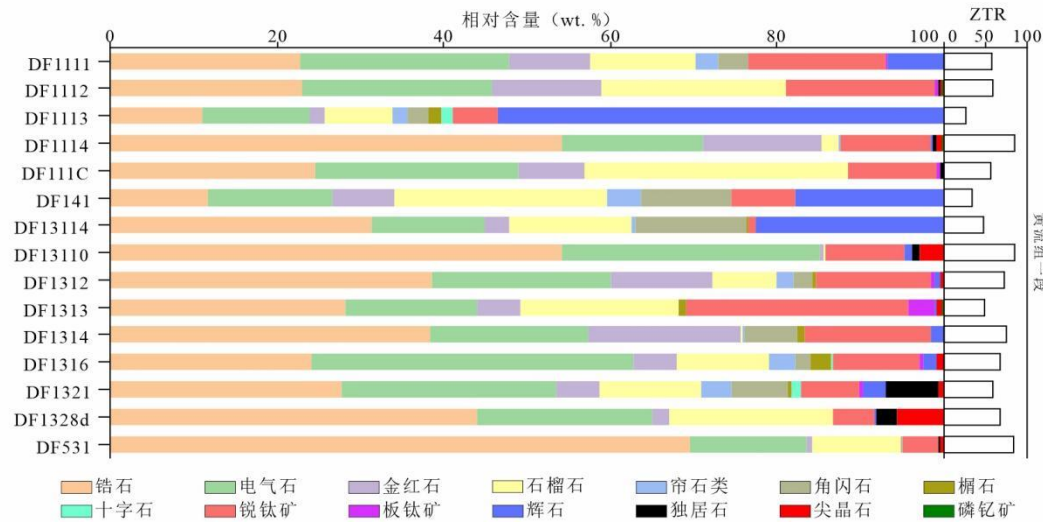


图 3 莺歌海盆地黄流组一段重矿物组合特征

Fig.3 Characteristics of heavy mineral association in the first member of Huangliu Formation, Yinggehai Basin



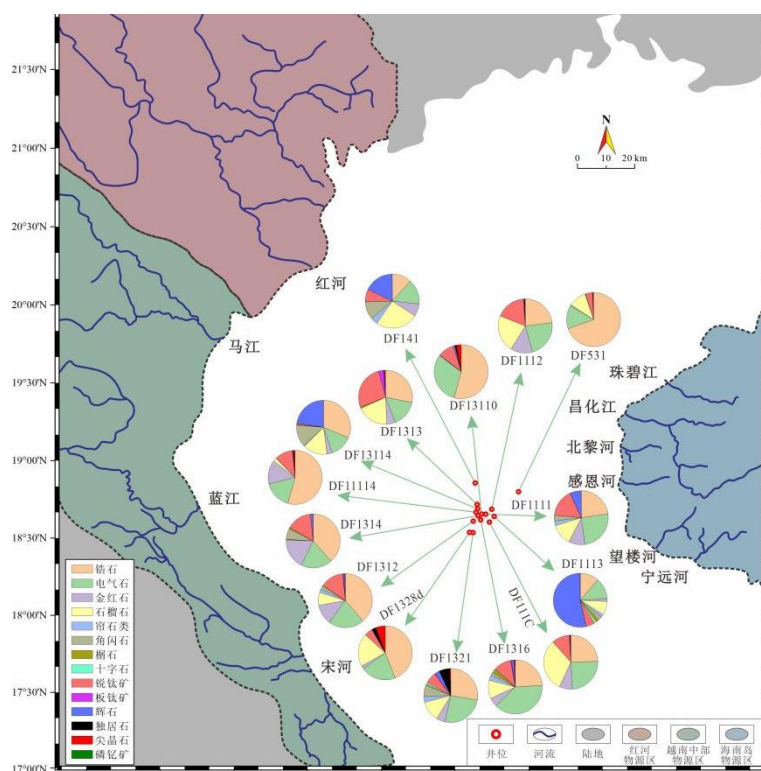


图 4 莺歌海盆地黄流组一段重矿物组合平面分布

Fig.4 Plane distribution of heavy mineral assemblage in Huangliu Formation, Yinggehai Basin

各物源区主要河流的沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系图如图 5 所示。本文选取的井样品均为黄一段，各井样品的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系图如图 6 所示。

结果表明：红河的锆石主要年龄峰值有 249、418Ma，处于印支期和加里东期；次级年龄峰值有 29、82、111、761、952、1872 和 2922Ma，在喜马拉雅期、燕山期、晋宁期、吕梁期和扬子期都有分布。马江、蓝江和宋河的主要年龄峰值分别为 242、249、245Ma，处于印支期；马江在加里东期和晋宁期也有较弱年龄峰值；蓝江和宋河的次级年龄峰值在加里东期、晋宁期和扬子期均有分布，除此之外蓝江还有一个 29Ma 的次级年龄峰值，处于喜马拉雅期；宋河也有一个位于吕梁期的 1833Ma 的次级年龄峰值。来自海南岛的 6 条河流中，珠碧江、昌化江与北黎河的锆石年龄峰值较为相似，主要年龄峰值分别为 249、232、230Ma，位于印支期，次级年龄峰值分别为 98、103、99Ma，位于燕山期；感恩河仅有一条主要年龄峰值为 235Ma，处于印支期；望楼河与宁远河的主要年龄峰值分别为 108Ma 和 98Ma，位于燕山期，次级年龄峰值分别为 230、237Ma，均位于印支期。综合来说，红河物源区的锆石年龄在各地质活动时期均有分布，其中突出的为印支期和加里东期；来自越南中部物源区三条河流的锆石年龄主要集中在印支期，在加里东期、晋宁期和扬子期有少量分布；来自海南岛物源区六条河流的锆石年龄基本集中在燕山期和印支期。



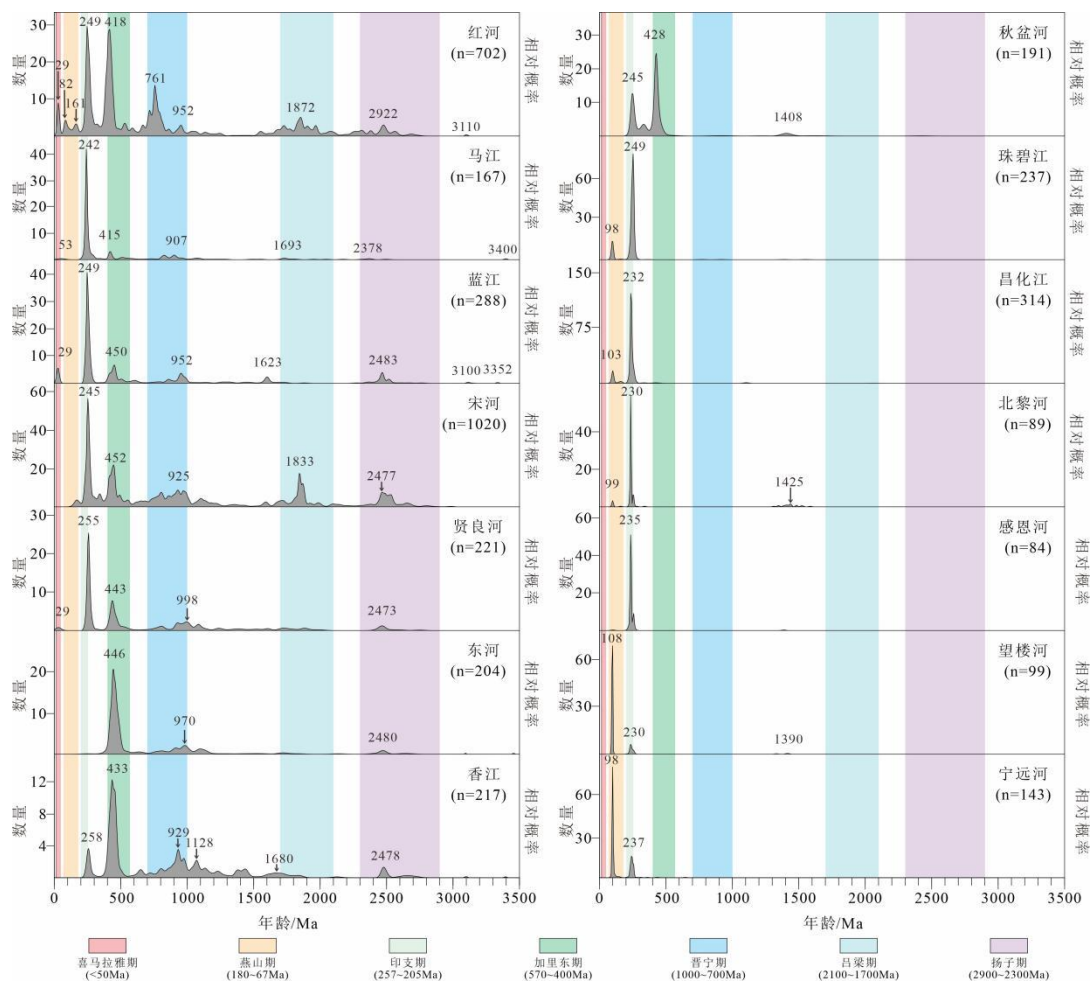


图 5 莺歌海盆地周缘主要现代河流河口沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系图

Fig.5 Detrital zircon U-Pb age pedigree of estuarine sediments of major modern rivers in the periphery of Yinggehai Basin

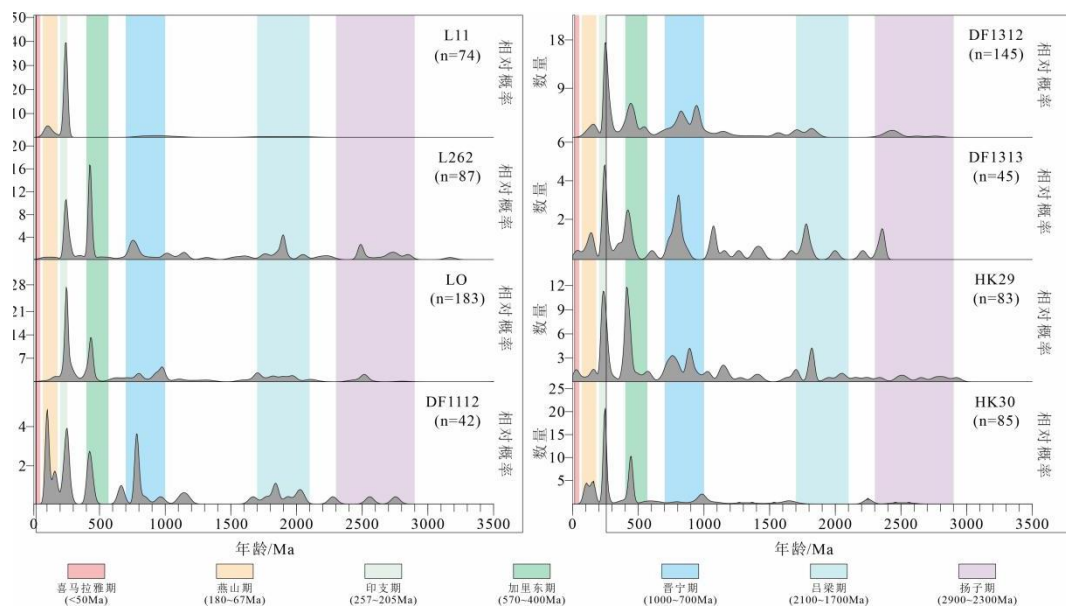


图 6 莺歌海盆地黄流组一段沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系图

Fig.6 U-Pb age pedigree of detrital zircon from the first member of Huangliu Formation, Yinggehai Basin

可以发现 L11 井的锆石年龄分布主要集中在印支期，在燕山期也有少量分布，与珠碧江、昌化江和北黎河的锆石年龄特征吻合较好；L262 井主要与次要年龄峰值分别为加里东期和印支期，与红河的锆石年龄特征较为相似；LO 井的锆石年龄表现出红河与蓝江的组合特征；DF1112 井在晋宁期有明显年龄峰值为 776Ma，考虑受红河物源影响较大；DF1312 和 DF1313 井的锆石年龄在多个地质活动时期均有分布，推断两个井位均受红河与越南中部物源影响，其中 DF1313 井在晋宁期有较高峰值，推测 DF1313 井有更多红河物源影响；HK29 井的锆石主要年龄峰值表现出与红河极为类似的双主峰特征，且在其他地质时期均表现出次峰值分布，证明此时来自红河的物源供给占据较大优势；HK30 井的锆石主要年龄峰值都位于印支期，次级年龄峰值位于燕山期和加里东期，表现为红河与海南岛混合供源特点。

在分析各样品锆石 U-Pb 年龄谱系图的基础上，结合各井位与河流位置，使用逆蒙特卡罗模型对各井的物源组成进行数值拟合与定量分析（Saylor et al., 2016; Sundell et al., 2017），拟合结果见图 7，各源区现代河流相对贡献分布如图 8 所示。

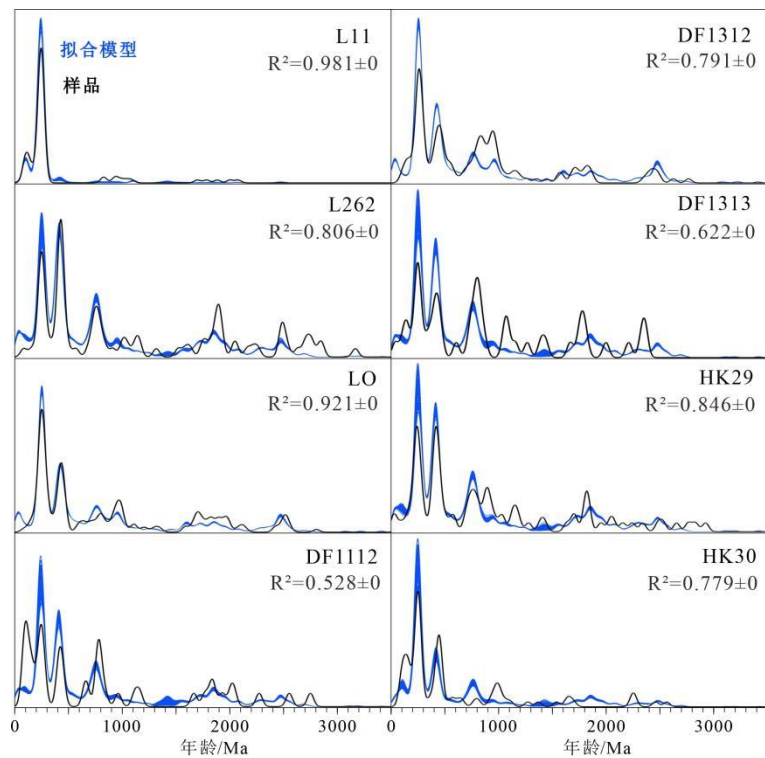


图 7 莺歌海盆地黄流组一段样品碎屑锆石 U-Pb 年龄基于蒙特卡罗混合模型分析结果

Fig.7 The U-Pb age of detrital zircon from the first member of Huangliu Formation in Yinggehai Basin is based on the Monte Carlo model

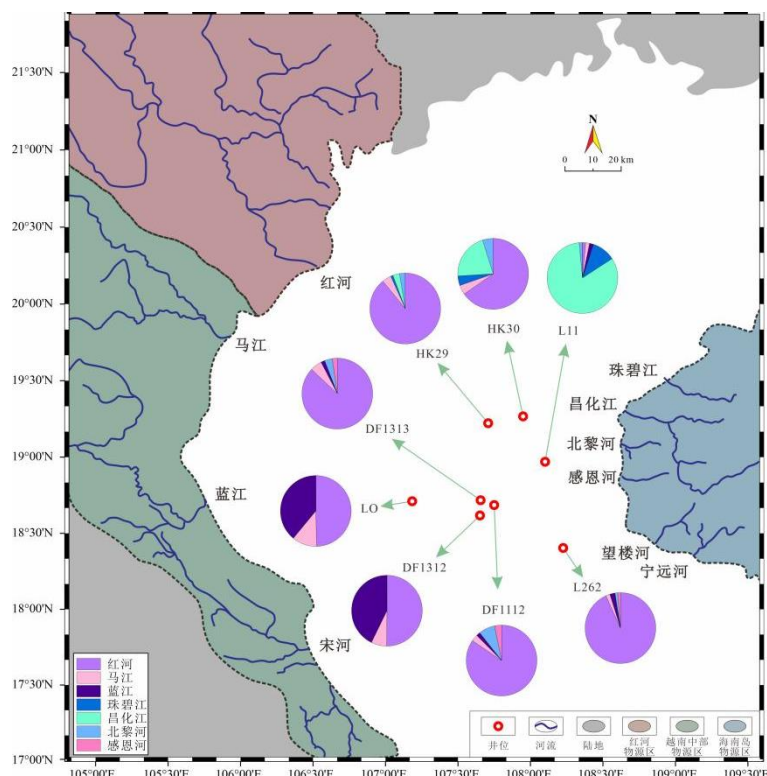


图 8 莺歌海盆地黄流组一段样品的各河流相对贡献

Fig.8 The relative contribution of each river to the sample of the first section of Huangliu Formation in Yinggehai Basin

可以看出，莺歌海盆地东方区整体来自红河流域的物源占比最高。红河物源占比为2%~93%，平均值为65%；越南中部物源占比为4%~50%，平均值为16%；海南岛物源占比为1%~95%，平均值为19%。研究区北部（如HK29）的主要物源来自红河；研究区东侧越贴近海南岛的位置，海南岛物源的相对含量更高，如HK30比HK29包含更多来自昌化江的物源；靠近越南中部的井位如LO、DF1312则在主要物源供应为红河的基础上，次级物源供应为蓝江与马江；研究区南部井位的主要碎屑来源依旧为红河，夹杂少量其他源区供应。

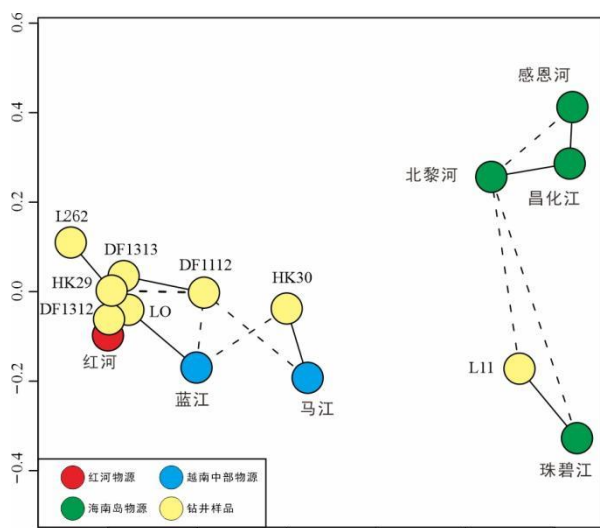


图 9 莺歌海盆地黄流组一段样品与现代潜在物源河流的碎屑锆石年龄的 MDS 图

Fig.9 MDS plot of detrital zircon ages of the first member of the Huangliu Formation in Yinggehai Basin and modern potential provenance rivers

为进一步验证结论的准确性，对盆地黄流组一段样品与现代潜在物源河流的碎屑锆石年龄进行半定量分析得到非度量多维标度（MDS）图（图 9），可以看到：L11 井与珠碧江物源的亲缘关系较为紧密；盆地东方区整体上物源以红河物源为主，与重矿物特征结论相符。

### 3.2 细粒沉积物源汇系统特征

通过对莺歌海盆地各井位黄一段样品进行 Sr-Nd 同位素检测，可以发现： $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值范围为 0.712119~0.719524，平均值为 0.715590； $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  变化范围为 0.51204~0.512084；对应  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$  均为负值，范围介于 -11.66515~-10.80684。结合前期认识，红河物源区的样品范围为现代红河及其支流， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值跨度范围较大， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  范围为 0.713146~0.767424，平均值为 0.728814； $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  对应  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$  范围介于 -14.45464~-8.54040。越南中部物源区的样品范围为马江和蓝江， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  处于 0.714874~0.724133 之间，平均值为 0.72093； $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$  范围介于 -14.14253~-11.86022。海南岛物源区则为昌化江， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.728425，对应  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$  值为 -9.3243185。

由  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  图解（图 10）可以看出，整体上  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$  和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值有负相关的趋势。莺歌海盆地黄一段井样品的散点分布相对紧密，井样品的散点区域与红河物源的散点重合度最高，其次与越南中部物源的散点较为接近。

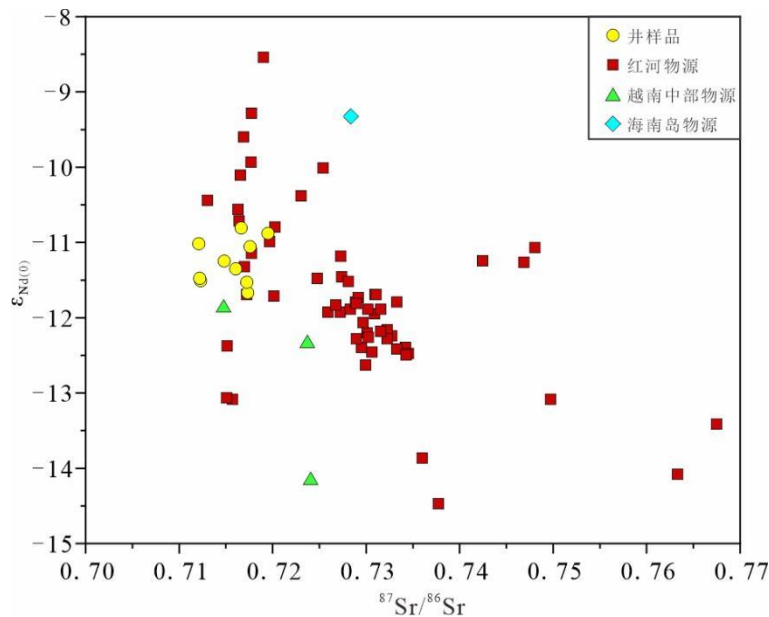


图 10 莺歌海盆地黄流组一段样品  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  图解

Fig.10 Diagram of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$  of the first member of the Huangliu Formation in Yinggehai Basin

基于 Rstudio 软件使用 simmr 应用包建立贝叶斯混合模型(Parnell et al., 2013)计算 DF1313、DF1314、DF13110、DF1322、DF1328d、DF1127、DF1112、DF1312 和 DF1316 等 9 口井黄流组一段各端元组分泥质沉积物的贡献比例，结果如表 2 所示：

表 2 莺歌海盆地黄流组一段井样品各物源占比

Table 2 Source proportion of samples from well 1 of Huangliu Formation in Yinggehai Basin

| 数据来源     | 井名      | 取样平均    |     | 岩性               | 取样部位  | 红河物源 | 越南中部 | 海南岛物源 |
|----------|---------|---------|-----|------------------|-------|------|------|-------|
|          |         | 深度      | 层位  |                  |       | 含量   | 物源含量 | 含量    |
|          |         | (m)     |     |                  |       |      |      |       |
| 本研究      | DF1313  | 2910.25 | 黄一段 | 泥岩/泥质粉砂岩         | 块状泥岩  | 0.41 | 0.42 | 0.18  |
| 本研究      | DF1314  | 2870.00 | 黄一段 | 泥岩/泥质粉砂岩         | 块状粉砂岩 | 0.44 | 0.35 | 0.21  |
| 本研究      | DF13110 | 2914.46 | 黄一段 | 泥岩/泥质粉砂岩         | 块状粉砂岩 | 0.34 | 0.48 | 0.18  |
| 本研究      | DF1322  | 3067.60 | 黄一段 | 泥岩/泥质粉砂岩         | 泥质条带  | 0.38 | 0.40 | 0.21  |
| 本研究      | DF1328D | 3092.00 | 黄一段 | 泥岩/泥质粉砂岩         | 块状粉砂岩 | 0.34 | 0.39 | 0.26  |
| 本研究      | DF1127  | 2779.50 | 黄一段 | 泥岩/泥质粉砂岩         | 泥质条带  | 0.36 | 0.46 | 0.19  |
| 王策（2016） | DF1112  | 2682.50 | 黄一段 | 泥质细砂岩/细砂岩        | 全岩    | 0.55 | 0.31 | 0.15  |
| 王策（2016） | DF1312  | 3053.75 | 黄一段 | 粉细砂岩/粉砂泥岩        | 全岩    | 0.55 | 0.30 | 0.15  |
| 王策（2016） | DF1316  | 2872.00 | 黄一段 | 细砂岩/粉细砂岩<br>/岩屑泥 | 全岩    | 0.59 | 0.26 | 0.15  |

由表 1 可以看出各样品红河物源含量波动较大，位于 34%~59%之间，平均值为 44%；越南中部物源含量变化较大，位于 31%~48%之间，平均值为 37%；而海南岛物源的细颗粒供源相对稳定，占比位于 15%~26%之间，平均值为 19%。同时可以发现：DF1314、DF1112、DF1312 和 DF1316 等 4 口井的红河物源含量占主导地位，而 DF1313、DF13110、DF1322、DF1328d 和 DF1127 等 5 口井的越南中部物源占比最大。其中值得注意的是，出来 DF1314 井样品岩性为泥岩/泥质粉砂岩外，DF1112、DF1312 和 DF1316 等 3 口井样品的岩性均为泥质细砂岩/细砂岩/粉砂泥岩等，DF1313、DF13110、DF1322、DF1328d 和 DF1127 等 5 口井样品岩性都为泥岩/泥质粉砂岩。由此可见，沉积物颗粒越细，红河物源占比越少，越南中部物源占比越强。将各物源区占比可视化到平面图上得到图 11，可以发现：莺歌海盆地东方区细颗粒沉积物主要物源来自红河地区与越南中部，海南岛供应整体较少。

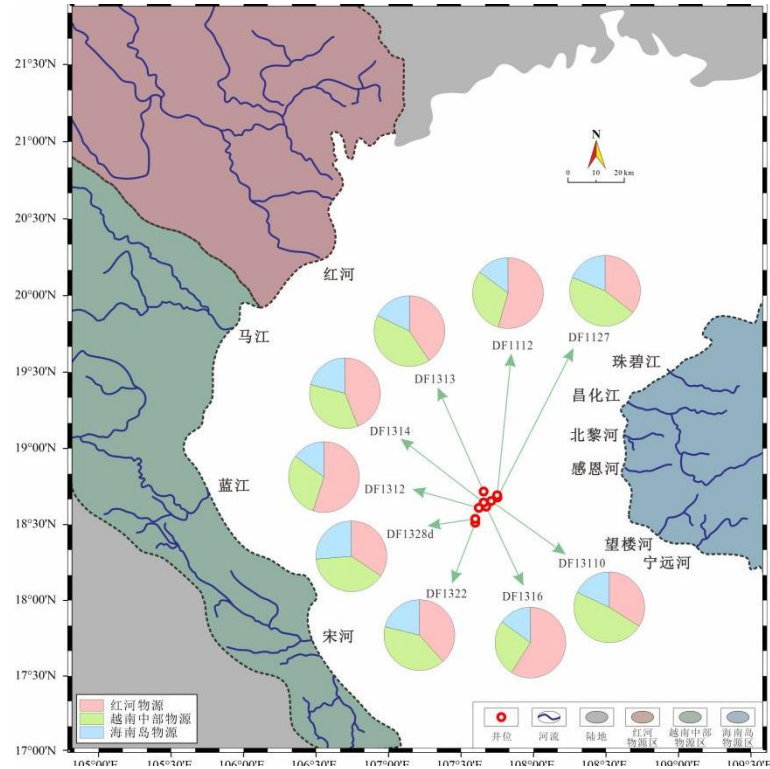


图 11 莺歌海盆地黄流组一段样品的各物源区相对贡献



Fig.11 The relative contribution of each provenance area to the sample of the first section of Huangliu Formation in Yinggehai Basin

#### 4 粗粒与细粒沉积物源汇系统差异成因分析

首先,基于前人关于古水系和古地理研究表明,在晚中新世黄流组一段沉积时期,红河、越南中部与海南岛河流的形态与古地理已经达到与现代格局相近(He et al., 2023),所以本研究中的源汇系统分析结果受水系演化和古地理演化的影响较小。整体上来看,粗粒沉积物的红河物源占比较高,但不同区域物源供给差别较大:在研究区西侧越南中部物源占比可达 50%,而在其他位置含量则较低;研究区东侧井位的海南岛物源占比最高可达 93%,但在其他位置含量较少。与此相对,细粒沉积物的物源相对稳定,整体上依然为红河物源主导:红河物源的平均占比减少,而越南中部物源的平均占比增高,海南岛物源的平均占比值虽然没有变化,但可以由图 11 看出来自海南岛物源的细粒沉积物分布较为均匀,因此整体上细粒沉积物的海南岛物源是比粗粒高的。不同位置井位的细粒沉积物各物源占比没有较大差距,各物源占比变化较小。

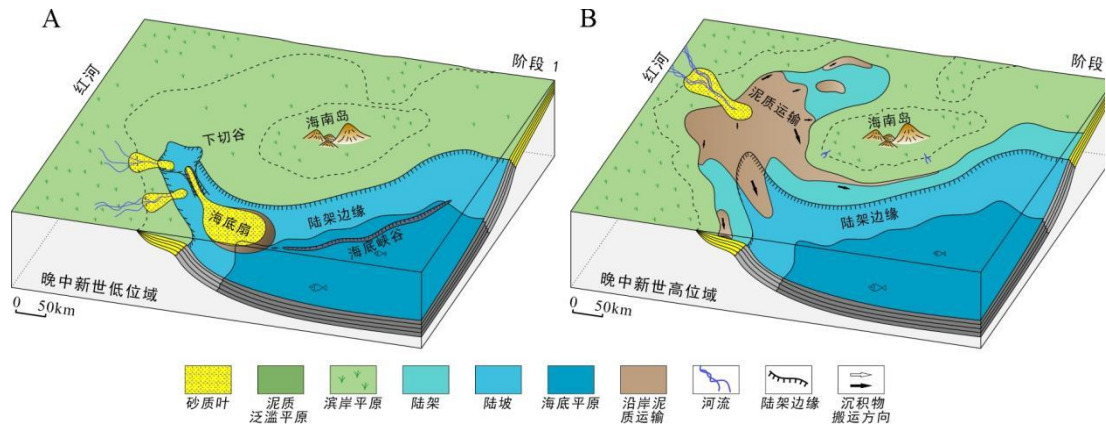


图 12 莺歌海盆地黄流组一段低位体系域(A)和高位体系域(B)时期沉积物模式图(赵睿, 2020)

Fig.12 Depositional pattern diagrams of the lowstand (A) and highstand (B) system tracts of first section of Huangliu Formation in Yinggehai Basin (Zhao, 2020)

通过调研晚中新世莺歌海盆地的构造演化与沉积背景,推测是由于晚中新世青藏高原的快速隆升引起了莺歌海盆地粗粒与细粒沉积物的物源差异。王大伟等(2016)推断红河断裂反转过程中最剧烈的构造活动发生在~5.5Ma,也就是晚中新世时期,由于青藏高原的快速隆升,红河断裂右旋速率减小,走滑反转,同时中南半岛的隆升加速剥蚀,向南海西部输送大量陆源碎屑形成红河海底扇(赵睿, 2020)。本文推测在这一过程中,在晚中新世黄流组一段低位体系域时期,由于红河水系活动剧烈,导致对莺歌海盆地东方区形成冲刷,带走大量越南中部以及海南岛物源沉积,并在琼东南盆地形成大型海底滑坡(图 12A)。因此莺歌海盆地东方区有较高比例红河物源,且由于水动力条件较强,被带走的粗粒沉积物多于细粒。在黄流组一段高位体系域时期,莺歌海盆地物源以红河提供大量细粒沉积物为主,越南中部与海南岛细粒沉积物流失较少,从而占据了细粒沉积物较大来源(图 12B)。此外,粗粒沉积物的



源汇分析主要是基于沉积物中的重矿物和碎屑锆石，但是这些重矿物在总沉积物中占的比例很小，而基于细粒沉积物源汇分析主要是基于泥质沉积物的 Sr-Nd 同位素分析，泥质沉积物在总沉积物通量中占的比例较高（Liang et al., 2025）。以上论述都解释了为什么同一区域不同粒径沉积物的物源占比会有如此差异，不过由于样品分布与数量限制，未能划分更详细的区域结合构造演化分别探讨沉积过程与差异成因，采样研究与测试分析这方面需要更深入的工作。

5 结论

- 1. 莺歌海盆地东方区晚中新世整体上粗粒物源贡献度最高的为红河物源，平均供源占比可达 65%（越南中部物源平均供源占比为 16%；海南岛物源平均供源占比为 19%）；不同区域的物源供源占比有所差异，局部变化大：靠近海南岛的东部区域有更高相对含量的海南岛物源，研究区西部的区域则含有更多的越南中部物源。
- 2. 莺歌海盆地东方区晚中新世细粒沉积物物源以红河与越南中部物源为主（红河物源平均供源占比为 44%；越南中部物源平均供源占比为 37%；海南岛物源平均供源占比为 19%）相对粗粒物源，红河供源占比相大幅降低，越南中部物源占比升高，海南岛物源平均占比不变但整体上含量升高。同时也发现样品岩性与物源占比结果之间也存在关联，沉积物颗粒越细，红河物源占比越少，越南中部物源占比越强。
- 3. 莺歌海盆地东方区黄流组一段粗粒与细粒沉积物源汇系统差异推断是受到晚中新世青藏高原的快速隆升的影响，中南半岛的加速隆升导致红河断裂剧烈反转，红河水系水动力增强，对东方区形成剧烈冲刷带走较多粗粒沉积物，因此来自红河物源的粗粒沉积物含量比细粒高，来自越南中部和海南岛物源的粗粒沉积物含量比细粒低，同时还受沉积物中的重矿物和泥质含量差异的影响。

**利益冲突声明/ Statement of Conflict of Interest:** 所有作者声明无利益冲突/ The authors declare that no competing interests exist.

**作者贡献/Author Contribution:**

|      |                         |
|------|-------------------------|
| 作者 1 | 资料整理与分析、图表制作、撰写初稿       |
| 作者 2 | 负责项目进度安排、样品采集、数据分析、修改论文 |
| 作者 3 | 样品处理、实验分析               |
| 作者 4 | 样品处理、文献整理               |
| 作者 5 | 样品处理、实验分析               |
| 作者 6 | 提供指导与监督                 |
| 作者 7 | 实验分析                    |

References

Cao, L., Jiang, T., Wang, Z., et al., 2015. Provenance of Upper Miocene Sediments in the Yinggehai and

- Qiongdongnan Basins, Northwestern South China Sea: Evidence from REE, Heavy Minerals and Zircon U–Pb Ages. *Marine Geology*, 361: 136-146.
- Cao, L. C., 2014. Provenance Evolution since Neogene in the Yinggehai and Qiongdongnan Basins: Evidence from REE, Heavy Mineral and Zircon U-Pb Ages(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., Meng, J., Liu, H., et al., 2022. Detrital Zircons Record the Evolution of the Cathaysian Coastal Mountains along the South China Margin. *Basin Research*, 34(2): 688-701.
- Clift, P. D., Sun, Z., 2006. The Sedimentary and Tectonic Evolution of the Yinggehai–Song Hong Basin and the Southern Hainan Margin, South China Sea: Implications for Tibetan Uplift and Monsoon Intensification. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B6).
- Clift, P. D., Long, H. V., Hinton, R., et al., 2008. Evolving East Asian River Systems Reconstructed by Trace Element and Pb and Nd Isotope Variations in Modern and Ancient Red River-Song Hong Sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(4).
- Compston, W., Williams, I., Kirschvink, J., et al., 1992. Zircon U-Pb Ages for the Early Cambrian Time-scale. *Journal of the Geological Society*, 149(2): 171-184.
- Cui, Y. C., Cao, L. C., Qiao, P. J., et al., 2018. Provenance Evolution of Paleogene Sequence (Northern South China Sea) Based on Detrital Zircon U-Pb Dating Analysis. *Earth Science*, 43(11): 4169-4179 (in Chinese with English abstract).
- Dang, Y. Y., 2023. Seismic Sedimentology of Submarine Fan System in the 1st Member of the Huangliu Formation, Dongfang Area, Yinggehai Basin, China. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(06):118-128 (in Chinese with English abstract).
- Duan, Z., Li, C., Guo, Y., et al., 2023. Sr-Nd Isotopic Fingerprints of Red River Sediments and Its Implication for Provenance Discrimination in the South China Sea. *Marine Geology*, 457: 106997.
- Fyhn, M. B. W., Thomsen, T. B., Keulen, N., et al., 2019. Detrital Zircon Ages and Heavy Mineral Composition along the Gulf of Tonkin-implication for Sand Provenance in the Yinggehai-Song Hong and Qiongdongnan Basins. *Marine and Petroleum Geology*, 101: 162-179.
- Gong, Y., Pease, V., Wang, H., et al., 2021. Insights into Evolution of A Rift Basin: Provenance of the Middle Eocene-lower Oligocene Strata of the Beibuwan Basin, South China Sea from Detrital Zircon. *Sedimentary Geology*, 419: 105908.
- He, J., Garzanti, E., Jiang, T., et al., 2022. Mineralogy and Geochemistry of Modern Red River Sediments (North Vietnam): Provenance and Weathering Implications. *Journal of Sedimentary Research*, 92(12): 1169-1185.
- He, J., Garzanti, E., Jiang, T., et al., 2023. Evolution of Eastern Asia River Systems Reconstructed by the Mineralogy and Detrital-zircon Geochronology of Modern Red River and Coastal Vietnam River Sand. *Earth-Science Reviews*, 104572.
- Hoang, L. V., Wu, F. Y., Clift, P. D., et al., 2009. Evaluating the Evolution of the Red River System Based on in Situ U-Pb Dating and Hf Isotope Analysis of Zircons. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(11).
- Hu, G. W., Liu, X. T., Chen, Y., et al., 2024. Comprehensive Identification of Sediment Source in the First Member of Huangliu Formation in Yinggehai Basin. *Marine Geology Frontiers*, 40(06):62-7 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S. J., Shi, H., Liu, J., et al., 2001. Progress in Strontium Isotope Stratigraphy. *Advances in Earth Science*, (02):194-200 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. T., Yao, G. Q., Zhou, F. D., 2016. Provenance Analysis and Petroleum Geological Significance

- of Shallow-Marine Gravity Flow Sandstone for Huangliu Formation of Dongfang Area in Yinggehai Basin, the South China Sea. *Earth Science*, 41(09):1526-1538 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. T., Wen, L., Yao, G. Q., et al., 2018. Geochemical Characteristics and the Significance of Submarine Fan Sandstones from Upper Miocene Huangliu Formation in Yinggehai Basin, China. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 37(04):90-99 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, T., Cao, L., Xie, X., et al., 2015. Insights from Heavy Minerals and Zircon U–Pb Ages into the Middle Miocene–Pliocene Provenance Evolution of the Yinggehai Basin, Northwestern South China Sea. *Sedimentary Geology*, 327: 32-42.
- Jiang, T., Xie, X. N., 2005. Effects of High Temperature and Overpressure on Reservoir Quality in the Yinggehai Basin, South China Sea. *Earth Science*, (02):215-220 (in Chinese with English abstract).
- Jonell, T. N., Clift, P. D., Hoang, L. V., et al., 2017. Controls on Erosion Patterns and Sediment Transport in a Monsoonal, Tectonically Quiescent Drainage, Song Gianh, Central Vietnam. *Basin Research*, 29: 659-683.
- Li, H. M., 2012. Provenance and Sedimentary Evolution in Neogene of Yinggehai Basin(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. R., Li, H., Yang, Z. Q., et al., 2022. Reservoir Architecture of the Huangliu Formation Submarine Fan in Yinggehai Basin, South China Sea. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 24(03):556-567 (in Chinese with English abstract).
- Liang, W., Hu, X., Garzanti, E., et al., 2025. Contrasting Provenance Budgets for Suspended Load and Bedload of the Yarlung Tsangpo, Tibet: Lhasa Block or Himalaya?. *Geology*, 53(4): 333-337.
- Liang, X. R., Gang, J., Li, X. H., et al., 2003. Precise Measurement of  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and Sm/Nd Ratios Using Multiple-collectors Inductively Coupled Plasma-mass Spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32(1):91-96 (in Chinese with English abstract).
- 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(5).
- Mao, G. Z., Liu, C. Y., 2011. Application of Geochemistry in Provenance and Depositional Setting Analysis. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(04):337-348 (in Chinese with English abstract).
- Meng, F., Gan, H., Wang, H., et al., 2023. Detrital Zircon U–Pb Age Constraints on the Provenance of Submarine Channels in Ledong Area, Yinggehai Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 150: 106098.
- Morton, A. C., Meinhold, G., Howard, J. P., et al., 2011. A heavy Mineral Study of Sandstones from the Eastern Murzuq Basin, Libya: Constraints on Provenance and Stratigraphic Correlation. *Journal of African Earth Sciences*, 61(4): 308– 330.
- Parnell, A. C., Phillips, D. L., Bearhop, S., et al., 2013. Bayesian Stable Isotope Mixing Models. *Environmetrics*, 387-399.
- Saylor, J. E., Sundell, K. E., 2016. Quantifying Comparison of Large Detrital Geochronology Data Sets. *Geosphere*, 12(1): 203-220.
- Sundell, K. E., Saylor, J. E., 2017. Unmixing Detrital Geochronology Age Distributions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(8): 2872-2886.
- Usuki, T., Lan, C. Y., Wang, K. L., et al., 2013. Linking the Indochina Block and Gondwana During the Early Paleozoic: Evidence from U–Pb Ages and Hf Isotopes of Detrital Zircons. *Tectonophysics*, 586: 145-159.

- Vermeesch, P., 2012. On the Visualisation of Detrital Age Distributions. *Chemical Geology*, 312: 190-194.
- Wan, S., Toucanne, S., Clift, P. D., et al., 2015. Human Impact Overwhelms Long-term Climate Control of Weathering and Erosion in Southwest China. *Geology*, 43(5): 439-442.
- Wang, C., 2016. Provenance Discrimination of Upper Miocene to Pleistocene reservoirs in the Yinggehai Basin: Constrains from Detrital zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Sedimentary rocks (Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Liang, X., Xie, Y., et al., 2014. Provenance of Upper Miocene to Quaternary Sediments in the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Ages. *Marine Geology*, 355: 202-217.
- Wang, C., Liang, X., Xie, Y., et al., 2015. Late Miocene Provenance Change on the Eastern Margin of the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea: Evidence from U-Pb Dating and Hf Isotope Analyses of Detrital Zircons. *Marine and Petroleum Geology*, 61: 123-139.
- Wang, C., Liang, X., Foster, D. A., et al., 2019. Detrital Zircon Ages: A Key to Unraveling Provenance Variations in the Eastern Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea. *AAPG Bulletin*, 103(7): 1525-1552.
- Wang, C., Liang, X., Foster, D. A., et al., 2019. Linking Source and Sink: Detrital Zircon Provenance Record of Drainage Systems in Vietnam and the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea. *Bulletin*, 131(1-2): 191-204.
- Wang, C., Liang, X. Q., Tong, C. X., et al., 2014. Characteristics and Geological Implications of Heavy Minerals from Seven Rivers in Adjacent Areas of Northeastern Yinggehai Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(02):228-237 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Liang, X. Q., Zhou, Y., et al., 2015. Construction of Age Frequencies of Provenances on the Eastern Side of the Yinggehai Basin: Studies of LA-ICP-MS U-Pb Ages of Detrital Zircons from Six Modern Rivers, Western Hainan, China. *Earth Science Frontiers*, 22(04):277-289 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Zeng, L., Lei, Y., et al., 2020. Tracking the Detrital Zircon Provenance of Early Miocene Sediments in the Continental Shelf of the Northwestern South China Sea. *Minerals*, 10(9): 752.
- Wang, H., Chen, S., Liu, E. T., et al., 2022. Typical Gravity Flow Sedimentary Features and Provenance System in Yinggehai-Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(05):5-18 (in Chinese with English abstract).
- Wei, G. J., Liu, Y., Tu, X. L., et al., 2004. Separation of Sr, Sm and Nd in Mineral and Rock Samples Using Selective Specific Resins. *Rock and Mineral Analysis*, 23(1): 11-14.
- Xie, H. Y., Shi, G. Z., Wang, H., 2025. Characteristics of Oligocene Fault Activity in the Yinggehai Basin and Its Relationship with Left-Lateral Motion on the Ailao Shan-Red River Shear Zone. *Earth Science*, 50(08):3034-3051 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. H., Li, X. S., Tong, C. X., et al., 2015. High Temperature and High Pressure Gas Enrichment Condition, Distribution Law and Accumulation Model in Central Diapir Zone of Yinggehai Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 27(04):1-12 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Y., Carter, A., Palk, C., et al., 2011. Understanding Sedimentation in the Song Hong-Yinggehai Basin, South China Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(6).
- Yang, Y. H., Zhang, H. F., Wu, F. Y., et al., 2005. Accurate Measurement of Strontium Isotopic Composition by Neptune Multiple Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry.

- Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 26(4):215-221 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. H., Zhang, H. F., Xie, L. W., et al., 2007. Accurate Measurement of Neodymium Isotopic Composition Using Neptune Multiple Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 35(1):71-74 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Fan, C. W., Tan, J. C., et al., 2019. Evolution Characteristics of Sedimentary System in Yinggehai Basin in Miocene and Its Exploration Significance. Bulletin of Geological Science and Technology, 38(06):51-59 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Mai, F. H., Wang, C. Q., et al., 2022. Sr-Nd Isotopic Composition and Provenance Tracing of Late Cenozoic Sediments in the Northern Hainan Island. Geological Bulletin of China, 41(11):1996-2006 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. Y., Fan, C. W., Guo, X. W., et al., 2024. Overpressure Mechanisms and Quantitative Evaluation of Relative Contribution for Yinggehai Formation in Ledong Area of Central Diapir Zone, Yinggehai Basin. Earth Science, 49(10):3547-3558 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R., 2020. Far-Field Responses of the Petroliferous Basins Evolution to the Plate Movement: Cases Study of Tectonic and Sedimentary Phenomena in the Bohai Bay Basin, Qaidam Basin, and Qiongdongnan Basin(Dissertation).China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 曹立成,2014.莺歌海—琼东南盆地新近纪物源演化研究(硕士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 崔宇驰,曹立成,乔培军,等,2018.南海北部古近纪沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及物源演化.地球科学,43(11):4169-4179.
- 梁亚云,2023.莺歌海盆地东方区黄流组一段海底扇地震沉积学研究.地质科技通报,42(06):118-128.
- 胡高伟,刘显童,陈杨,等,2024.莺歌海盆地黄流组一段沉积物源综合识别.海洋地质前沿,40(06):62-74.
- 黄思静,石和,刘洁,等,2001.锆同位素地层学研究进展.地球科学进展, 02):194-200.
- 黄银涛,姚光庆,周锋德,2016.莺歌海盆地黄流组浅海重力流砂体物源分析及油气地质意义.地球科学,41(09):1526-1538.
- 黄银涛,文力,姚光庆,等,2018.莺歌海盆地上中新统黄流组海底扇砂岩元素地球化学特征及地质意义.地质科技情报,37(04):90-99.
- 姜涛,解习农,2005.莺歌海盆地高温超压环境下储层物性影响因素.地球科学,(02):215-220.
- 李慧明,2012.莺歌海盆地新近系物源分析与沉积演化特征(硕士学位论文).北京:中国地质大学.
- 李亚茹,李华,杨朝强,等,2022.南海莺歌海盆地黄流组海底扇储层构型特征.古地理论,24(03):556-567.
- 梁细荣, 刚健,李献华,等,2003.利用 MC—ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  和 Sm/Nd 比值.地球化学,32(1):91-96.
- 毛光周,刘池洋,2011.地球化学在物源及沉积背景分析中的应用.地球科学与环境学报,33(04):337-348.
- 王策,梁新权,童传新,等,2014.莺歌海盆地东北部邻区 7 条主要入海河流重砂矿物特征及其地质意义.沉积学报,32(02):228-237.
- 王策,梁新权,周云,等,2015.莺歌海盆地东侧物源年龄标志的建立:来自琼西 6 条主要河流碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的研究.地学前缘,22(04):277-289.
- 王策,2016.莺歌海盆地上中新统一更新统储层物源识别: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学和地球化学



- 制约(博士学位论文).广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所).
- 王华,陈思,刘恩涛,等.南海北部莺-琼盆地典型重力流沉积特征与物源体系.地质科技通报,2022,41(05):5-18.
- 谢海洋,史冠中,王华,等,2025.渐新世-早中新世莺歌海盆地断层活动特征以及与红河断裂带耦合关系.地球科学,50(08):3034-3051.
- 谢玉洪,李绪深,童传新,等,2015.莺歌海盆地中央底辟带高温高压天然气富集条件、分布规律和成藏模式.中国海上油气,27(04):1-12.
- 杨岳衡,张宏福,吴福元,等,2005.Neptune 多接收器等离子体质谱精确测定锶同位素组成.质谱学报,26(4):215-221.
- 杨岳衡,张宏福,谢烈文,等,2007.多接收器电感耦合等离子质谱精确测定钕同位素组成.分析化学,35(1):71-74.
- 张建新,范彩伟,谭建财,等.莺歌海盆地中新世沉积体系演化特征及勘探意义.地质科技情报,2019,38(06):51-59.
- 张磊,麦发海,王超群,等,2022.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.地质通报,41(11):1996-2006.
- 张旭友,范彩伟,郭小文,等,2024.莺歌海盆地中央底辟带乐东区莺歌海组超压成因及相对贡献定量评价.地球科学,49(10):3547-3558.
- 赵睿,2020.含油气盆地演化对板块运动的远程响应(博士学位论文).武汉:中国地质大学.