中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 12 期: 3916 ~ 3928
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

从河流到海沟: 主动和被动陆缘沉积搬运的主控因素

曾乐田[1,2,3], 王策[1,2,3*], David A. FOSTER[4], 苏明[1,2,3], 崔贺旗[1,3], 贾俊民[1,3]

1. 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082;
3. 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 珠海 519082;
4. Department of Geological Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida 32611, USA
* 通讯作者, E-mail: wangce@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2024-07-11; 收修改稿日期: 2024-09-24; 接受日期: 2024-09-27; 网络版发表日期: 2024-11-12
国家自然科学基金项目(42172111)和南方海洋科学与工程广东实验室(珠海)项目(SML2021SP307)资助

摘要 主动和被动陆缘沉积物的输送存在显著差异, 然而定量研究这些特定沉积过程的机会相对较少. 南海东北部既包含主动陆缘, 也包含准被动陆缘, 为区分这两类陆缘沉积物物源和搬运过程提供了独特的研究区域. 本研究通过分析表层沉积物中的碎屑锆石U-Pb年龄来示踪南海东北部不同区域沉积物的物源, 揭示影响陆缘沉积物搬运的主要控制因素. 研究结果显示, 南海东北部从大陆架到马尼拉海沟的沉积物物源在空间上存在显著差异. 陆架区沉积物主要来源于华南东部的九龙江和台湾岛西南部的高屏溪, 沉积物搬运受被动陆缘地形和洋流的控制. 相比之下, 澎湖-高屏峡谷系统中的沉积物主要来自于台湾岛西部的高屏溪和浊水溪. 定量分析结果表明, 由于高屏峡谷与高屏溪直接相连, 该峡谷为马尼拉海沟提供了~86.2%的陆源碎屑物质. 基于物源分析结果, 本研究提出了不同类型陆缘的沉积物搬运模式. 在被动陆缘, 入海水系带来的沉积物进入大陆架后受洋流的影响显著, 而较高的地形会阻碍其搬运, 导致沉积物难以进入海沟系统. 相反, 在主动陆缘, 由于陆架较窄, 海底峡谷可与河口直接相连, 重力流能够将大量沉积物直接输送至海沟进行沉积. 该研究有助于揭示南海东北部沉积物从河流到海沟的搬运过程, 并探讨影响陆缘沉积物输送的主要控制因素.

关键词 沉积物搬运过程, 物源示踪, 碎屑锆石, 海底峡谷, 陆缘, 中国南海

1 引言

示踪沉积物从陆地(源)到海洋(汇)的过程是解读地球表生过程的关键内容之一(Martinsen等, 2010; Kuehl等, 2016; Cao等, 2021). 在陆缘源-汇系统中, 大量从陆地岩石中风化剥蚀的沉积物通过入海水系向海洋搬运(Liu等, 2016). 一旦河流沉积物到达海洋系统, 洋流和重力流会成为沉积物通过海底峡谷向深海平原扩散的主要驱动力(Liu等, 2013; Milliman和Farnsworth, 2013). 尽管现代海洋学观测可以有效揭示洋流

中文引用格式: 曾乐田, 王策, Foster D A, 苏明, 崔贺旗, 贾俊民. 2024. 从河流到海沟: 主动和被动陆缘沉积搬运的主控因素. 中国科学: 地球科学, 54(12): 3916–3928, doi: 10.1360/N072024-0193
英文引用格式: Zeng L, Wang C, Foster D A, Su M, Cui H, Jia J. 2024. Controls on sediment transport from rivers to trenches in passive and active continental margins. Science China Earth Sciences, 67(12): 3868–3880, https://doi.org/10.1007/s11430-024-1435-0

© 2024 《中国科学》杂志社

在各层的流速及流向(Wang等, 2011; Xie等, 2013; Zhu等, 2019), 但海洋沉积物的空间分布是多因素共同作用的结果, 包括沉积物输送量、海底搬运系统效率、海底地形变化以及洋流运动等(Holz等, 2004). 因此, 河流所携带的陆源碎屑物质在主动和被动陆缘存在不同的搬运与扩散模式.

作为西太平洋最大的边缘海, 南海是研究边缘海沉积物从源到汇搬运过程的天然实验室(Liu等, 2016). 南海东北部的澎湖-高屏峡谷系统(Penghu-Gaoping Canyon System, PGCS)处于准被动陆缘和主动陆缘的交汇区域, 拥有复杂的地形、洋流及丰富的沉积物供给, 是对比主动和被动陆缘沉积物对海底峡谷和海沟相对贡献差异的理想区域. 澎湖-高屏峡谷系统呈树枝状, 主要包括三个峡谷(台湾峡谷、澎湖峡谷和高屏峡谷)以及许多小型峡谷及水道(图1). 澎湖-高屏峡谷系统的沉积物主要由毗邻入海水系供给, 因此其地球化学性质与源区的母岩类型、规模和形成年龄密切相关(Wang等, 2014; Garzanti和Resentini, 2016; Cui等, 2019; Ma等, 2019).

通过对表层沉积物分析和区域地层的地球物理解释, 前人认为南海东北部主要存在三个潜在源区, 分别是华南东部(华夏地块)、台湾岛和吕宋岛(Liu等, 2016; Nayak等, 2021, 2022; Shen等, 2021; Garzanti等, 2023; 王策等, 2023). Liu Z等(2008)研究发现, 台湾岛对南海北部陆架和陆坡分别贡献了~29%和23%的黏土矿物, 而南下的北太平洋深层水(North Pacific Deep

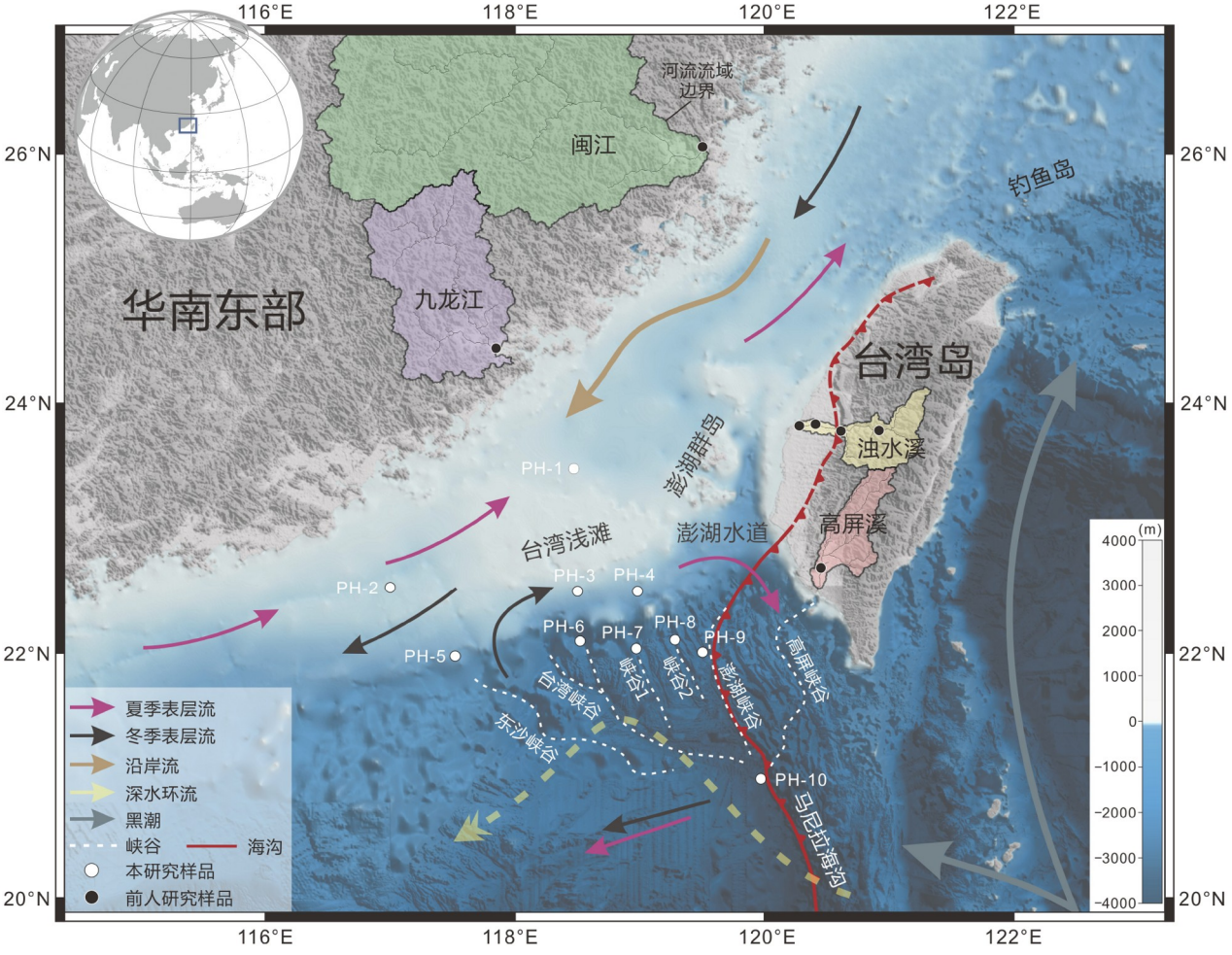

图 1　南海东北部地形及地质背景图

夏季和冬季表层流根据Feng等(2014)修改. 沿岸流根据Chen(2003)、Chen和Sheu(2006)修改. 深水洋流根据Qu等(2006)修改. 黑潮根据Nan等(2011, 2015)修改

Water, NPDW)和北上的黑潮(Kuroshio Current, KC)穿过巴士海峡的分支会搬运来自台湾岛的悬浮沉积物. Shen等(2021)通过分析沉积物组分、海底地形和表层洋流, 认为台湾岛河流对台湾浅滩南部贡献了~45%的砂质沉积物, 而华南东部河流是台湾海峡西南侧沉积物的主要来源. 此外, 学者们还提出台湾岛西南部近海的伊利石和绿泥石主要受河流相关的峡谷系统控制, 而蒙脱石则主要受到黑潮的影响(Nayak等, 2021, 2022). 尽管黏土矿物是研究沉积物物源的有效指标, 但其并不能有效记录沉积物中粗颗粒的物源信息. 前人的研究发现, 南海东北部澎湖-高屏峡谷系统沉积物中超过50%的组分为粉砂和砂(Zhong等, 2017). 因此, 分析沉积物中的重矿物对全面揭示南海东北部不同粒级沉积物的来源与搬运过程至关重要.

在过去几十年中, 重矿物在重建源区母岩类型和示踪沉积物物源方面发挥了“指纹”作用(Allen, 2008). 其中, 碎屑锆石广泛分布于各沉积系统, 被认为是示踪沉积物物源最有效的工具之一(Fedo等, 2003; Thomas, 2011). 由于碎屑锆石在沉积过程中受化学风化和成岩作用的影响较小, 其能较好地保留母岩的相关信息(Fedo等, 2003; Morton等, 2008). 碎屑锆石U-Pb年龄为揭示沉积物来源及其沉积过程提供了有用的方法(Morton等, 2008; Ramos-Vázquez和Armstrong-Altrin, 2021), 通过匹配沉积区与源区母岩及侵蚀区主要河流的锆石年龄, 可以确定沉积物的物源和搬运方向(Alizai等, 2011; Litty等, 2017; Armstrong-Altrin等, 2021; Wang等, 2022; Zhang等, 2023). 因此, 碎屑锆石U-Pb年代学是示踪沉积物来源和了解陆缘沉积物从源到汇搬运过程的有力工具.

本研究对南海东北部澎湖-高屏峡谷系统及其毗邻区域的10个沉积物样品开展了碎屑锆石U-Pb年代学分析, 旨在: (1) 示踪南海东北部沉积物的物源; (2) 估算各潜在源区的相对贡献; (3) 查明沉积物从河流到海沟搬运的主要控制因素; (4)对比主动和被动陆缘沉积过程的差异. 为了重建沉积物的搬运路径, 本研究以海底峡谷为分界将河流到海沟的源-汇系统划分为两个子系统: (1) 以河流为源、峡谷为汇的源-汇系统; (2) 以峡谷为源、海沟为汇的源-汇系统. 为了更全面地比较不同源区的贡献量, 本研究在物源分析中采用了碎屑锆石U-Pb年代学和基于K-S检验D值的Monte Carlo混合模型.

2 区域背景

华南地块的伸展始于晚白垩纪至早古新世, 标志着从古太平洋板块俯冲到新生代断裂的关键构造转变, 最终导致了南海的打开(Zhou等, 1995; Ye等, 2018). 由于南海海盆扩张, 南海北部发育的陆缘进入了扩展性被动陆缘阶段(Briais等, 1993; Lüdmann和Wong, 1999). 自中新世晚期以来, 欧亚板块与菲律宾海板块碰撞, 南海东北部受到挤压应力的影响, 在澎湖峡谷东边形成了台湾造山带(Sibuet和Hsu, 2004). 由于台湾岛的隆升, 澎湖-高屏峡谷系统成为了连接东侧主动陆缘与西侧准被动陆缘的特殊地带(Hsiung和Yu, 2013; Hsiung等, 2015; Su等, 2015).

澎湖-高屏峡谷系统北侧的大陆架发育了复杂的海底地形(图1), 如台湾浅滩、澎湖群岛和澎湖水道, 峡谷系统的尾端与马尼拉海沟相连, 构成了一个由河流、峡谷和海沟组成的沉积输送系统(Yu等, 2009; Hsiung和Yu, 2013; Hsiung等, 2015). 由澎湖峡谷、高屏峡谷及深水水道组成的峡谷系统, 不仅直接通过高屏峡谷向马尼拉海沟输送沉积物, 还通过水道侵蚀和重力流将其他区域的沉积物搬运至海沟进行沉积(Yu等, 2009; Hsiung等, 2015).

前人研究认为, 澎湖-高屏峡谷系统不同于被动陆坡单一运输方向的裂谷型沉积物扩散系统, 是一种在主动陆坡和准被动陆坡均存在沉积物运输的碰撞型沉积物扩散系统(Su等, 2015). 位于澎湖-高屏峡谷系统北侧的台湾海峡既是两侧河流沉积物的堆积场所, 同时也是沉积物输送的主要通道, 接收并运输大量来自华南东部和台湾岛河流的碎屑沉积物. 台湾海峡西侧的闽江和九龙江的沉积物输出量分别为7.5和2.5Mt a^{-1}, 而东侧的浊水溪和高屏溪则分别输送30~60和15~35Mt a^{-1}沉积物(Liu J P等, 2008).

3 实验方法

本研究共采集了10个南海东北部表层沉积物样品(每个1~2kg), 样品由抓斗或者箱式采样器获取, 具体位置见图1, 样品详细信息见附表S1(http://earthcn.sci-china.com). 沉积物样品主要由未固结的细粒至中粒砂、粉砂和泥组成. 采用重磁法从沉积物中提取锆石, 并通过人工随机挑选单颗粒晶体嵌入环氧树脂填充的

靶中, 经过抛光后进行激光剥蚀分析. 通过电子显微镜上的Mono CL3探测器拍摄的锆石的阴极发光图(CL图), 确定激光剥蚀区域, 以确保在剥蚀过程中避免裂缝、包裹体和蚀变区域.

碎屑锆石U-Pb年龄分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成. 使用与193-nm (ArF) Resonetics RESOlution M-50激光剥蚀(LA)系统相连的ELEMENT XR(Thermo Fisher Scientific) SF-ICP-MS对研究区表层沉积物中的碎屑锆石进行U、Th和Pb同位素测定. 具体的实验流程、数据筛选与处理等细节参考Zhang L等(2018). 实验分析选用Plešovice锆石作为校准U-Pb年龄数据的标准样品(Sláma等, 2008), 并使用Glitter软件进行数据处理. 对于小于1000Ma的数据, 采用$^{206}Pb/^{238}U$所对应的年龄, 而对于大于1000Ma的数据, 使用$^{207}Pb/^{206}Pb$所对应的年龄. 碎屑锆石U-Pb年龄的核密度估算(KDE)图由IsoplotR程序完成(Vermeesch, 2018), 选择30Ma为带宽和50Ma间隔的直方图以有效平滑分散的锆石年龄. 使用基于MATLAB软件的DZmds代码绘制多维标度分析(MDS)图(Saylor等, 2018), 通过迭代排序技术对比样本间的相对差异. MDS图中的转换失真程度通过应力值体现, 本研究应力值约为0.1(0.0908), 表明其拟合度较好(Vermeesch, 2013). 此外, 通过DZmix代码建立基于K-S检验D值的Monte Carlo混合模型, 用于约束沉积物的组分及各潜在源区的混合比例(Sundell和Saylor, 2017). 该模型的D值介于0.055至0.225之间, 表明模拟结果具有较高的可信度.

4　结果

本研究对10个沉积物样品开展碎屑锆石U-Pb定年, 共分析了1233颗锆石, 其U-Pb年龄分析结果和相对源区贡献比例结果分别见附表S2和附表S3. 图2展示了代表性锆石的CL图像, 可以看出研究区锆石形态多为长柱状或椭圆形. 大陆架的锆石呈现明显的棱角, 而其他样品的磨圆度随水深增加而变好. 此外, 锆石的粒径随水深增加而减小, 大陆架的锆石长度一般在100~200μm, 而陆坡和海沟锆石的长度通常不超过70μm(图2). 锆石Th/U值与年龄关系如图3所示, 结果显示只有少部分锆石是由变质作用形成的(Th/U<0.1), 而绝大多数锆石来源于火成岩(Th/U>0.4).

4.1　大陆架锆石U-Pb年龄

对南海东北部大陆架共5个沉积物样品进行锆石U-Pb定年(图1), 这些沉积物主要由黏土含量相对较低的中粒砂和小部分砾石组成(如样品PH-1和PH-5). 台湾浅滩北部沉积物(样品PH-1)的锆石U-Pb年龄KDE图显示(图4), 该区域锆石U-Pb年龄峰值分布于1000~100Ma之间, 主要年龄峰值约为127Ma. 台湾浅滩西部和南部沉积物(样品PH-2和PH-3)的KDE曲线变

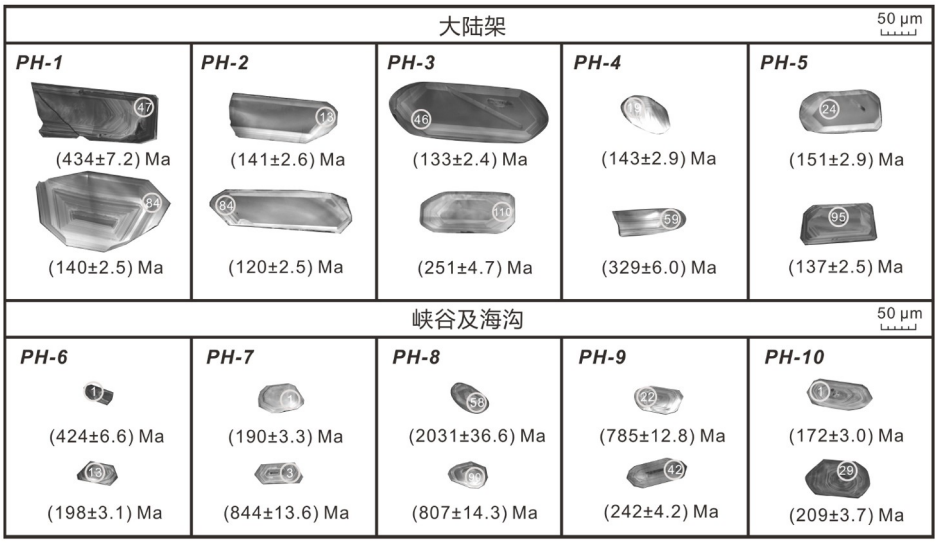

图 2　南海东北部表层沉积物代表性锆石颗粒阴极发光图

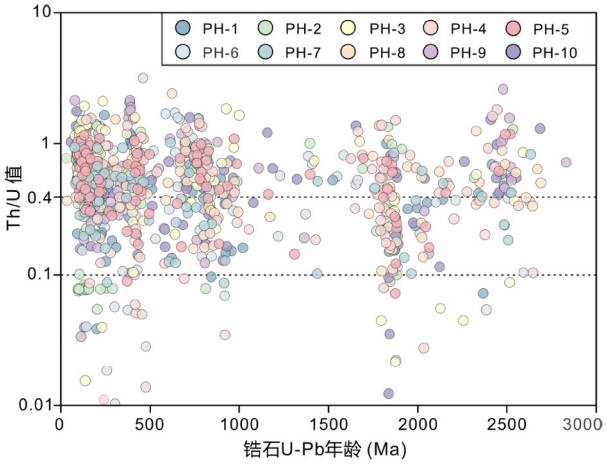

图 3　南海东北部表层沉积物中碎屑锆石Th-U比值与年龄关系图

化较为简单, 仅存在一个140~110Ma的峰值(图4). 尽管台湾浅滩东南部沉积物(样品PH-4)的锆石U-Pb年龄峰值分布于1000~100Ma之间, 但与上述区域相比, 该样品还存在位于~1800Ma和2426Ma的明显年龄峰值. 东沙峡谷头部沉积物(样品PH-5)中1900~1800Ma的锆石含量相对较少, 而其主要年龄峰为136Ma(图4).

4.2　海底峡谷和海沟的锆石U-Pb年龄

对南海东北部海底峡谷及马尼拉海沟5个沉积物样品进行锆石U-Pb定年(图1), 这些沉积物的含砂量较低, 主要由粉砂和黏土组成. 海底峡谷和海沟样品中的锆石U-Pb年龄主要介于晋宁期与燕山期之间, 有200~100Ma的主要年龄峰以及1000~200Ma的次要年龄峰. 台湾峡谷(样品PH-6)和峡谷1(样品PH-7)沉积物中吕梁期的锆石较少, 而澎湖峡谷(样品PH-9)在~2516Ma出现了较小的年龄峰(图5). 峡谷2(样品PH-8)显示较多的年龄峰, 其KDE图与台湾浅滩东南部较为相似, 在1900~1800Ma存在一个主要的年龄峰(图5). 与上述峡谷的结果相比, 马尼拉海沟北部(样品PH-10)的KDE曲线较为简单, 存在~125Ma的主要年龄峰, 以及~401和1856Ma两个次要年龄峰(图5).

5　讨论

5.1　潜在源区的锆石U-Pb年龄

河流沉积物中的锆石U-Pb年龄可以提供其母岩的重要信息, 并有效揭示其物源区内的重大构造和岩浆事件发生的时间(Thomas, 2011). 因此, 可以通过解析碎屑锆石主要年龄峰来识别沉积物的物源, 揭示区域构造-热演化历史. 研究区内的锆石年龄峰值一般对应南海北部周边区域主要构造事件发生的时间, 如燕山期构造山运动的年龄范围为180~90Ma(Zhou和Li, 2000), 印支期造山运动的年龄范围为270~195Ma (Wang等, 2005; Zhou等, 2006), 武夷-云开造山运动的年龄范围为465~415Ma(Feng等, 2014), 晋宁期造山运动的年龄范围为1000~750Ma(Ling等, 2003), 吕梁期造山运动的年龄范围为2400~1800Ma(Zhao等, 2005).

为了对比南海东北部沉积物物源, 本研究收集了来自华南东部和台湾岛西部主要水系的碎屑锆石U-Pb年龄(图6). 在四个水系中, 九龙江的锆石U-Pb年龄以燕山期的为主, 而闽江则存在~423Ma的年龄峰值, 但缺少1000~570Ma和2600~2300Ma的年龄数据. 此外, 与高屏溪相比, 浊水溪存在大量吕梁期的锆石颗粒, 表明台湾岛西部不同水系的碎屑锆石组成也存在一定的差异(图6).

华夏地块和扬子地块是华南东部的主要组成部分, 其中华夏地块东部和西部分别存在~133和~438Ma的主要年龄峰值, 而扬子地块显示~790和1855Ma两个主要年龄峰值(Zhao等, 2005; Li等, 2010; Feng等, 2014). 对比华南东部沿海两条代表性河流的碎屑锆石U-Pb年龄发现, 九龙江沉积物中的锆石存在~151和234Ma两个峰值, 而闽江有~141、227、423和1855Ma四个峰值, 珠江则显示~157、248和443Ma三个年龄峰值(图6).

吕宋岛位于菲律宾海与南海之间, 前人研究普遍认为吕宋岛在~50Ma前于赤道附近发育, 受板块运动和碰撞的影响在中新世末期形成了如今的吕宋岛(Deschamps和Lallemand, 2002; Hall, 2002; Zahirovic等, 2014). 因此, 吕宋岛主要河流的锆石U-Pb年龄通常小于50Ma, 前人研究揭示该区域河流的年龄峰值约为24Ma(Tsai等, 2019).

浊水溪发源于台湾岛的中央山脉, 是台湾岛向台湾海峡运输悬浮泥沙主要河流, 其输沙量约为54Mt a^{-1} (Dadson等, 2003). 如图6所示, 浊水溪的锆石U-Pb年龄KDE曲线呈现较大的波动, 其主要存在6个年龄峰, 分别为~133、227、415、790、1925和2497Ma (Deng等, 2017). 不难发现, 台湾海峡两侧河流存在一定的相似

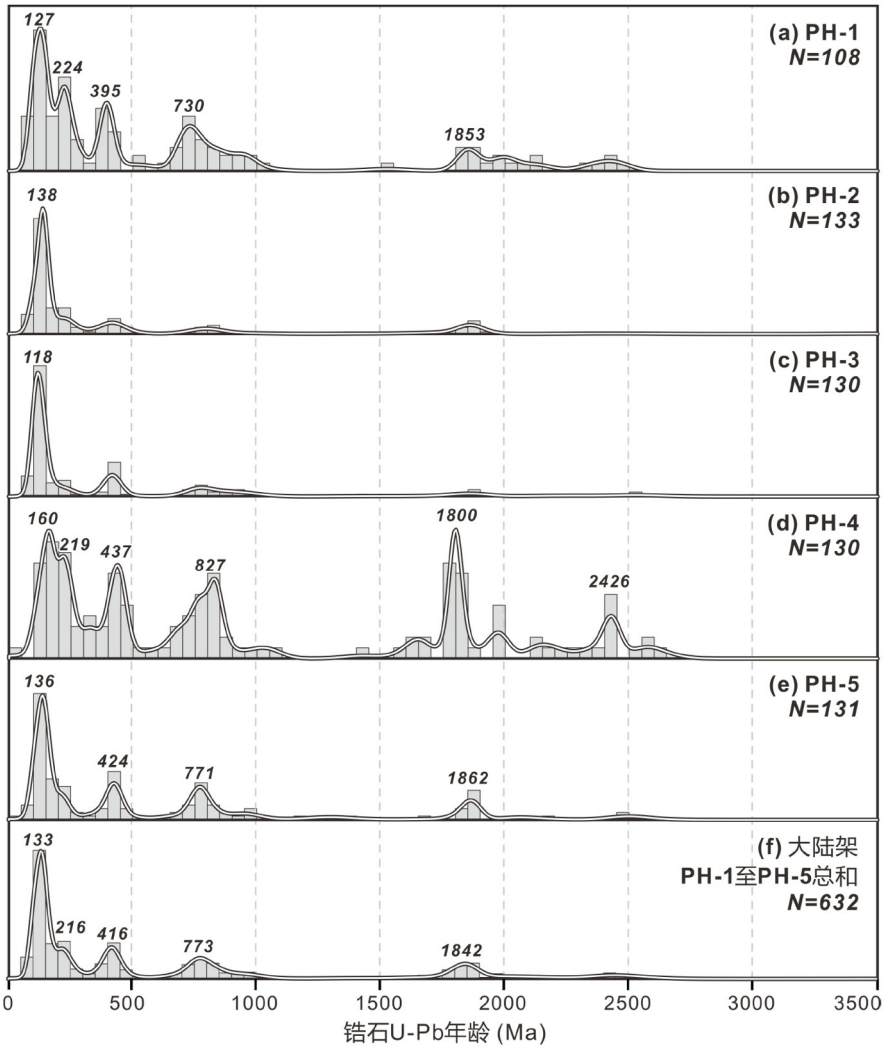

图 4　南海东北部大陆架沉积物中碎屑锆石U-Pb年龄核密度估计图

性，四条河流沉积物的锆石U-Pb年龄主要集中在180~90、270~195、465~415和2400~1800Ma. 前人研究认为，在中新世中期菲律宾海板块与中国南海碰撞导致台湾岛隆升之前(Chang等，2003；Beyssac等，2008)，来自华夏地块的沉积物被搬运至当时台湾岛所在的区域进行沉积(Deng等, 2017; Wang等, 2024).

5.2　南海东北部沉积物物源分析

如前文所述, 南海东北部存在多个潜在物源区, 主要沉积物贡献区为华南东部及台湾岛(Liu等，2010，2016；王策等，2023). 通过对比研究区与潜在物源区的锆石U-Pb年龄数据，可以有效揭示南海东北部不同位置沉积物物源在空间上的变化. 对比结果显示，陆架区台湾浅滩西部和南部沉积物(样品PH-2和PH-3，图4)的锆石年龄组成与九龙江相似(图6)，其主要年龄峰为151~118Ma. 相比之下，台湾浅滩东南部(样品PH-4，图4)和峡谷2 (样品PH-8，图5)沉积物中1850~1750和2450~2400Ma的锆石颗粒较多，与浊水溪的年龄组成相似(图6). 其余区域的年龄分布与高屏溪和闽江较为相似(图4~6)，这表明华南东部和台湾岛西南部均为澎湖-高屏峡谷系统提供了碎屑沉积物.

基于Kolmogorov-Smirnov (K-S)检验D值的Monte Carlo混合模型可以进一步验证物源分析的结果，并且能够定量估算不同源区的贡献比例(Sundell和Saylor,

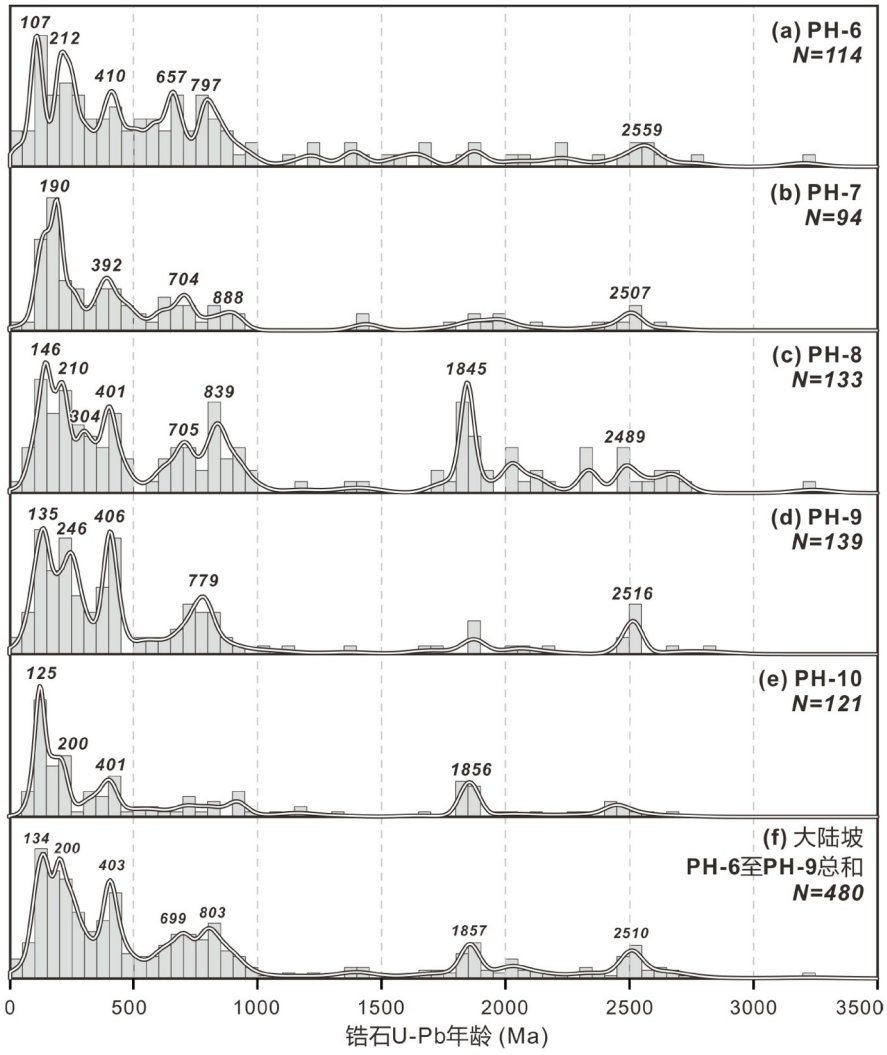

图 5　南海东北部大陆坡和海沟沉积物中碎屑锆石U-Pb年龄核密度估计图

2017). 图7展示了四个入海水系对研究区表层沉积物中锆石贡献占比的模拟结果, 具体数据见附表S3. 统计结果显示, 华南东部的九龙江是台湾浅滩西部和南部沉积物(样品PH-2和PH-3)的主要供给河流, 其贡献量分别高达~95.3%和95.7%(图7). 此外, 九龙江还对台湾浅滩北部(样品PH-1, 12.4%)、东沙峡谷头部(样品PH-5, 25.8%)、峡谷1(样品PH-7, 16.5%)和澎湖峡谷(样品PH-9, 14.1%)有明显的物质贡献. 对比九龙江, 闽江对大陆架样品PH-2和PH-3的贡献较小(不超过1.4%), 但对海底峡谷样品PH-6和PH-9的贡献较大, 分别为~14.7%和27.9%(图7). 台湾岛的浊水溪是台湾浅滩东南部(样品PH-4, 53.0%)和峡谷2(样品PH-8, 67.5%)沉积物中锆石的主要来源, 但对东沙峡谷(样品PH-5, 6.0%)、台湾峡谷(样品PH-6, 17.4%)和峡谷1(样品PH-7, 7.4%)的贡献相对较少. 除台湾浅滩西部(样品PH-2, 2.0%)和南部(样品PH-3, 3.0%)外, 高屏溪是其他大部分区域沉积物的重要来源(图7).

多维标度分析(MDS)图可以判断研究区沉积物与潜在源区的亲缘关系(Saylor等, 2018). 如图8所示, 台湾浅滩西部和南部(样品PH-2和PH-3)与九龙江位置接近(分别占~95.3%和95.7%, 图7), 台湾浅滩东南部(样品PH-4)和峡谷2(样品PH-8)较为接近且位置均靠近台湾岛西部的浊水溪, 浊水溪为这两个样品分别提供了~53.0%和67.5%的锆石颗粒(图7). 峡谷1(样品PH-7)有

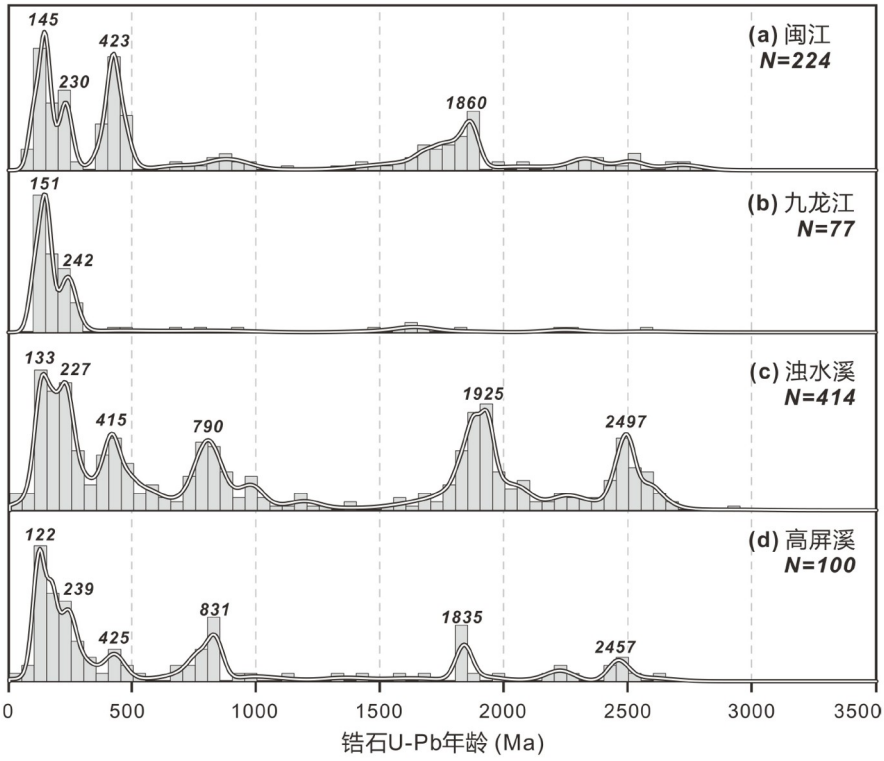

图 6　潜在源区河流沉积物碎屑锆石U-Pb年龄核密度估计图

闽江和九龙江数据来自Xu等(2014), 浊水溪数据来自Deng等(2017), 高屏溪数据来自王策等(2023)

~27.9%的锆石来自闽江，而其余样品与高屏溪的亲缘关系更为密切(图8)，高屏溪锆石占比介于~40.0%和96.0%之间(图7)．值得注意的是，马尼拉海沟北部(样品PH-10)与高屏溪的亲缘关系较近，该河流为海沟提供了~96.0%的锆石颗粒(图7)．王策等(2023)发现马尼拉海沟北部沉积物主要来源于高屏溪(~45.3%)，这与重力流驱动的沉积物搬运相关，而台湾岛东北部的兰阳溪(~24.0%)可能通过北太平洋深层水将沉积物穿过吕宋海峡搬运至马尼拉海沟．

5.3　沉积物从河流到海沟的搬运过程及控制因素

沉积物从河流到海沟的搬运过程受到各种因素的影响，包括河流沉积通量、沉积物类型、洋流的流速、流向以及海底地形等．对于南海东北部而言，这些因素至关重要，因为该区域的沉积物不仅受源区供应的影响，还受到洋流、重力流和其他海洋过程的共同作用．此外，独特的海底地形(如澎湖-高屏峡谷系统)对沉积物搬运也发挥了重要作用．研究沉积物的物源及其搬运路径可以揭示影响河流-峡谷-海沟系统内沉积物迁移和扩散的因素，从而加深对沉积物源-汇过程的理解．

河流的沉积通量是影响海洋沉积物分布的关键因素之一，因为较大的通量通常能够提供更丰富的陆源碎屑物质．台湾造山带的侵蚀速率高于华南东部(Resentini等，2017)，使得其能向南海东北部供给更多的沉积物．碎屑锆石分析结果显示，台湾浅滩北部(样品PH-1)沉积物主要来源于台湾岛西部河流，而研究区陆架大部分区域的陆源物质均由华南东部河流供给．这一发现表明，源区较高的侵蚀速率并非是控制中国南海东北部特别是陆架区沉积物分布的主导因素．当源区的多样性是在其他因素处于动态平衡状态下唯一的变量时，可以较为容易地确定多源沉积物的组成．然而，复杂的自然条件会打破这种平衡．物源研究结果表明，不同源区对陆架到海沟沉积物的贡献量存在明显差异(图7~8)．

水动力条件和地形可能是决定沉积物在海洋中运移的主要因素(Liu等, 2016)．黑潮对南海东北部沉积物运输有重要影响(Nayak等，2021)，其进入南海后会在

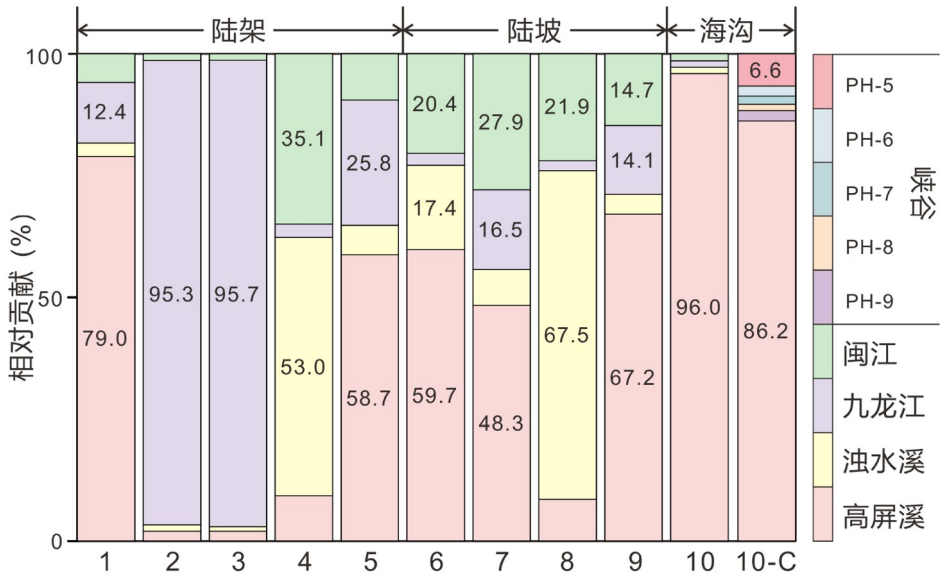

图 7　潜在源区河流对南海东北部沉积物的相对贡献图

计算结果来自基于K-S检验D值的Monte Carlo混合模型. 数字1~10分别对应样品PH-1至PH-10, 其中10-C代表不同海底峡谷对PH-10的贡献量

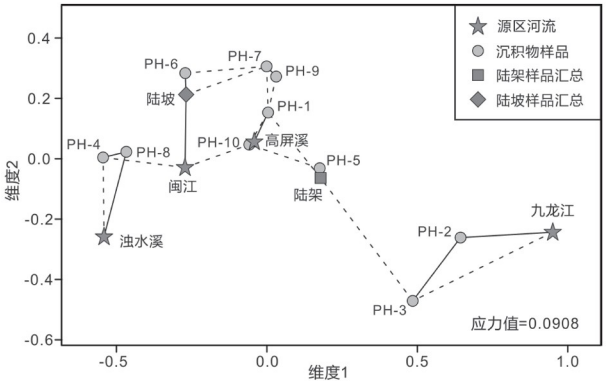

图 8　南海东北部表层沉积物与毗邻入海水系沉积物锆石U-Pb年龄多维标度分析图

台湾岛西南部形成多个分支, 其中一个分支向北流动, 另一个分支则转向西南侧进入澎湖-高屏峡谷系统(Nan等, 2011, 2015). 南下的沿岸流和北上的黑潮分支是台湾海峡的主要洋流, 而沿岸流对台湾海峡绝大部分区域的影响更为强烈(Chen, 2003; Chen和Sheu, 2006). 除水动力条件外, 南海东北部大陆架发育的复杂地形对沉积物搬运过程也有重要影响. 由于台湾海峡南部地形不规则, 澎湖群岛和台湾浅滩等相对较高的地形对沉积物运移形成阻挡. 相比之下, 澎湖水道是地形相对较低的区域, 可能更有利于台湾岛沉积物的搬运(图1). 此外, 重力流不仅在高屏峡谷发育较多(Liu等, 2012; Zhang Y等, 2018), 在马尼拉海沟也有许多报道(Liu等, 2023; Ren等, 2024), 它是沉积物从河流向海沟搬运最重要的驱动力.

在以河流为源、峡谷为汇的源-汇系统中, 台湾浅滩北部(样品PH-1)和东沙峡谷头部(样品PH-5)的沉积物主要来源于高屏溪, 而台湾浅滩西部(样品PH-2)和南部(样品PH-3)的沉积物则主要来源于九龙江(图7). 物源结果表明, 台湾浅滩和澎湖群岛是阻挡沉积物从一侧向另一侧迁移和混合的屏障. 台湾浅滩东南部(样品PH-4)是大陆架唯一以浊水溪为主要源区的区域(图7), 这一结果也证实了海底高地对沉积物输送的影响. 除峡谷2(样品PH-8)中浊水溪沉积物占比较高外, 绝大多数峡谷的主要物源为台湾岛西南部的高屏溪, 表明浊水溪沉积物的搬运主要通过澎湖水道进行且受到了台湾浅滩和澎湖群岛的阻挡. 此外, 闽江对所有峡谷均存在一定的影响, 而台湾峡谷(样品PH-6)和峡谷2(样品PH-8)与九龙江的亲缘关系较弱(图7), 可能代表闽江沉积物通过台湾浅滩和澎湖群岛之间发育的水道进入峡谷区. 来自华南东部准被动陆缘的沉积物主要由沿岸流搬运至南海东北部陆架, 在遇到台湾浅滩或澎湖群岛时, 一部分沉积物会通过它们之间较狭窄的水道被输送至峡谷区. 相比之下, 在台湾岛西南侧

发育的黑潮分支会将大量来自高屏溪的沉积物搬运至澎湖-高屏峡谷系统, 因此这可能也是沉积物从河流向峡谷搬运的主要动力之一. 此外, 台湾浅滩和澎湖群岛阻挡了台湾岛沉积物向西搬运, 只有少部分沉积物可以通过它们之间的小型水道运输. 前人研究指出, 狭窄的陆架更有利于沉积物从高屏溪通过高屏峡谷直接搬运至深海堆积(Huh等, 2009; Yu等, 2009; Garzanti等, 2023). 然而, 由澎湖峡谷、高屏峡谷、深水水道和马尼拉海沟组成的特殊扩散系统不仅能直接将沉积物从高屏峡谷输送至马尼拉海沟, 还可以通过水道侵蚀和重力流将沉积物从其他峡谷搬运至海沟进行沉积(Yu等, 2009; Hsiung和Yu, 2013; Hsiung等, 2015).

在以峡谷和水道为源、海沟为汇的源-汇系统中, 控制沉积物搬运的因素与上述结果存在较大差异. 黑潮的西南分支和深层洋流对马尼拉海沟沉积物的影响微乎其微, 这是因为物源的结果未能支持沉积物从西向东的大量迁移. 因此, 高密度流, 尤其是重力流, 可能是推动沉积物从峡谷到海沟搬运的主要机制(Talling等, 2012). 马尼拉海沟北部沉积物中86.2%的锆石来源于高屏溪也印证了这一结论(图7). 此外, 其他海底峡谷的锆石对海沟的贡献只有13.8%, 表明这些沉积物可能是在邻近的海底峡谷中沉积, 而没有被搬运至更远的区域(图7).

基于以上分析, 本研究提出了两个不同的模式来描述沉积物从河流(源)到海沟(汇)的搬运过程(图9). 在被动陆缘, 河流沉积物进入陆架后受洋流搬运, 然而较高的地形会阻碍这一过程, 从而限制了其往深水区的迁移. 因此, 在南海东北部这一特殊构造区域, 被动陆缘的沉积物倾向于在大陆架沉积, 对海沟的贡献较为有限(图9). 在主动陆缘, 典型的狭窄陆架使得峡谷或水道的头部能够与河口直接相连, 洋流对沉积物搬运的影响相对较小, 大量沉积物在重力流的作用下被搬运至更深的区域或海沟(图9).

对比这两个系统, 洋流是浅水区沉积物迁移的主要驱动力, 而较高的地形会成为沉积物搬运的障碍. 水道和峡谷等通道在沉积物向深海迁移的过程中发挥着重要作用, 特别是在主动陆缘, 它们可以直接与河口相连从而提高迁移效率. 因此, 尽管邻近的被动陆缘拥有更丰富的河流系统甚至大一个数量级的流域面积, 主动陆缘仍是海沟沉积物的主要供给源区.

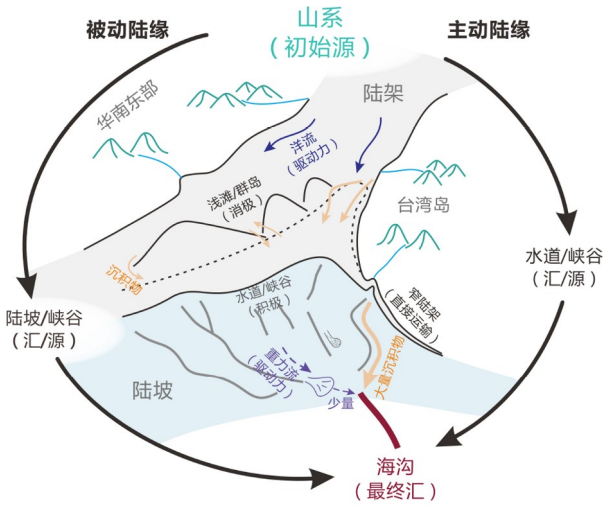

图 9　南海东北部河流-峡谷-海沟系统的模式图

根据锆石U-Pb数据分析划分为两种源-汇系统(被动和主动). 消极因素代表阻挡沉积物向深海搬运, 而积极因素代表有利于沉积物向深海搬运

6　结论

本研究选取南海东北部沉积物进行锆石U-Pb年代学分析, 示踪不同区域沉积物物源, 刻画沉积物从河流到海沟的搬运路径, 解析主动和被动陆缘沉积物运移的主要控制因素. 结果表明, 南海东北部大陆架沉积物主要来源于九龙江或高屏溪, 沉积物以洋流作为其搬运的主要驱动力. 台湾岛西部的高屏溪或浊水溪是澎湖-高屏海底峡谷沉积物的主要供给河流. 马尼拉海沟沉积物与高屏溪关系密切, 这与高屏峡谷的直接搬运有关. 南海东北部不同区域的沉积物组成存在明显差异, 研究基于物源结果提出了沉积物在主动和被动陆缘的运移模式. 在被动陆缘, 陆源碎屑沉积物进入大陆架后被洋流搬运, 但容易被较高的地形阻挡, 因此这些沉积物通常在大陆架滞留, 对海沟的影响较为有限. 相反, 主动陆缘的陆架较窄, 海底峡谷通常与河口直接相连, 大量沉积物在重力流的作用下通过峡谷被搬运至更深的水道和海沟. 陆缘沉积物的空间分布受到积极因素(驱动力如洋流、水道、峡谷和重力流)和消极因素(如相对较高的地形阻碍)的共同影响. 本研究利用锆石U-Pb年代学示踪了南海东北部沉积物的物质来源, 为不同类型陆缘沉积物的搬运和沉积过程研究提供了重要实例.

致谢 感谢中国科学院广州地球化学研究所张乐副研究员在碎屑锆石定年分析过程中提供的帮助, 感谢中国科学院南海海洋研究所颜文研究员的样品支持.

参考文献

王策, 崔贺旗, 曾乐田, 苏明. 2023. 马尼拉海沟北部沉积物物源示踪: 来自碎屑锆石年代学的评估. 中国科学: 地球科学, 53: 41–54

Armstrong-Altrin J S, Ramos-Vázquez M A, Hermenegildo-Ruiz N Y, Madhavaraju J. 2021. Microtexture and U-Pb geochronology of detrital zircon grains in the Chachalacas beach, Veracruz State, Gulf of Mexico. Geol J, 56: 2418–2438

Alizai A, Carter A, Clift P D, VanLaningham S, Williams J C, Kumar R. 2011. Sediment provenance, reworking and transport processes in the Indus River by U-Pb dating of detrital zircon grains. Glob Planet Change, 76: 33–55

Allen P A. 2008. From landscapes into geological history. Nature, 451: 274–276

Briais A, Patriat P, Tapponnier P. 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the south China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia. J Geophys Res, 98: 6299–6328

Beyssac O, Negro F, Simoes M, Chan Y C, Chen Y G. 2008. High-pressure metamorphism in Taiwan: from oceanic subduction to arc-continent collision? Terra Nova, 20: 118–125

Chang C P, Angelier J, Lee T Q, Huang C Y. 2003. From continental margin extension to collision orogen: Structural development and tectonic rotation of the Hengchun peninsula, southern Taiwan. Tectonophysics, 361: 61–82

Cao L, Jiang T, He J. 2021. Fingerprinting sand from Asian rivers to the deep central South China Sea since the Late Miocene. GSA Bull, 133: 1964–1978

Cao L, Shao L, van Hinsbergen D J, Jiang T, Xu D, Cui Y. 2023. Provenance and evolution of East Asian large rivers recorded in the East and South China Seas: A review. Geol Soc Am Bull, 135: 2723–2752

Chen C T A. 2003. Rare northward flow in the Taiwan Strait in winter: A note. Cont Shelf Res, 23: 387–391

Chen C-T A, Sheu D D. 2006. Does the Taiwan Warm Current originate in the Taiwan Strait in wintertime?. J Geophys Res Ocean, 111: C4005

Cui Y, Shao L, Qiao P, Pei J, Zhang D, Tran H. 2019. Upper Miocene–Pliocene provenance evolution of the Central Canyon in north-western South China Sea. Mar Geophys Res, 40: 223–235

Dadson S J, Hovius N, Chen H, Dade W B, Hsieh M L, Willett S D, Hu J C, Horng M J, Chen M C, Stark C P, Lague D, Lin J C. 2003. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. Nature, 426: 648–651

Deng K, Yang S, Li C, Su N, Bi L, Chang Y P, Chang S C. 2017. Detrital zircon geochronology of river sands from Taiwan: Implications for sedimentary provenance of Taiwan island and its source link with the east Chinese mainland. Earth-Sci Rev, 164: 31–47

Deschamps A, Lallemand S. 2002. The West Philippine Basin: An Eocene to early Oligocene back arc basin opened between two opposed subduction zones. J Geophys Res, 107: 2322

Fedo C M, Sircombe K N, Rainbird R H. 2003. Detrital Zircon Analysis of the Sedimentary Record. Rev Mineral GeoChem, 53: 277–303

Feng S J, Zhao K D, Ling H F, Chen P R, Chen W F, Sun T, Jiang S Y, Pu W. 2014. Geochronology, elemental and Nd-Hf isotopic geochemistry of Devonian A-type granites in central Jiangxi, South China: Constraints on petrogenesis and post-collisional extension of the Wuyi–Yunkai orogeny. Lithos, 206-207: 1–18

Garzanti E, Nayak K, Padoan M, Vezzoli G, Resentini A, Castelltort S, Lin A T S, Babonneau N, Ratzov G, Hsu S K, Huang K F. 2023. Fast-eroding Taiwan and transfer of orogenic sediment to forearc basins and trenches in the Philippine and South China seas. Earth-Sci Rev, 244: 104523

Garzanti E, Resentini A. 2016. Provenance control on chemical indices of weathering (Taiwan river sands). Sediment Geol, 336: 81–95

Hall R. 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations. J Asian Earth Sci, 20: 353–431

Holz C, Stuut J B W, Henrich R. 2004. Terrigenous sedimentation processes along the continental margin off NW Africa: implications from grain-size analysis of seabed sediments. Sedimentology, 51: 1145–1154

Hsiung K H, Yu H S. 2013. Sediment dispersal system in the Taiwan–South China Sea collision zone along a convergent margin: A comparison with the Papua New Guinea collision zone of the western Solomon Sea. J Asian Earth Sci, 62: 295–307

Hsiung K H, Su C C, Yu H S, Chang J H. 2015. Morphology, seismic characteristics and development of the sediment dispersal system along the Taiwan-Luzon convergent margin. Mar Geophys Res, 36: 293–308

Huh C A, Lin H L, Lin S, Huang Y W. 2009. Modern accumulation rates and a budget of sediment off the Gaoping (Kaoping) River, SW Taiwan: A tidal and flood dominated depositional environment around a submarine canyon. J Mar Syst, 76: 405–416

Kuehl S A, Alexander C R, Blair N E, Harris C K, Marsaglia K M, Ogston A S, Orpin A R, Roering J J, Bever A J, Bilderback E L,

Carter L, Cerovski-Darriau C, Childress L B, Reide Corbett D, Hale R P, Leithold E L, Litchfield N, Moriarty J M, Page M J, Pierce L E R, Upton P, Walsh J P. 2016. A source-to-sink perspective of the Waipaoa River margin. Earth-Sci Rev, 153: 301–334

Li Z X, Li X H, Wartho J A, Clark C, Li W X, Zhang C L, Bao C. 2010. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions. Geol Soc Am Bull, 122: 772–793

Ling W, Gao S, Zhang B, Li H, Liu Y, Cheng J. 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, South China: Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent. Precambrian Res, 122: 111–140

Litty C, Lanari P, Burn M, Schlunegger F. 2017. Climate-controlled shifts in sediment provenance inferred from detrital zircon ages, western Peruvian Andes. Geology, 45: 59–62

Liu J P, Liu C S, Xu K H, Milliman J D, Chiu J K, Kao S J, Lin S W. 2008. Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait. Mar Geol, 256: 65–76

Liu J T, Kao S J, Huh C A, Hung C C. 2013. Gravity Flows Associated with Flood Events and Carbon Burial: Taiwan as Instructional Source Area. Annu Rev Mar Sci, 5: 47–68

Liu J T, Wang Y H, Yang R J, Hsu R T, Kao S J, Lin H L, Kuo F H. 2012. Cyclone-induced hyperpycnal turbidity currents in a submarine canyon. J Geophys Res, 117: 2011JC007630

Liu M, Wang Z, Yu K, Xu J. 2023. Two distinct types of turbidity currents observed in the Manila Trench, South China Sea. Commun Earth Environ, 4: 108

Liu Z, Colin C, Li X, Zhao Y, Tuo S, Chen Z, Siringan F P, Liu J T, Huang C Y, You C F, Huang K F. 2010. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport. Mar Geol, 277: 48–60

Liu Z, Tuo S, Colin C, Liu J T, Huang C Y, Selvaraj K, Chen C T A, Zhao Y, Siringan F P, Boulay S, Chen Z. 2008. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan island to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation. Mar Geol, 255: 149–155

Liu Z, Zhao Y, Colin C, Stattegger K, Wiesner M G, Huh C A, Zhang Y, Li X, Sompongchaiyakul P, You C F, Huang C Y, Liu J T, Siringan F P, Le K P, Sathiamurthy E, Hantoro W S, Liu J, Tuo S, Zhao S, Zhou S, He Z, Wang Y, Bunsomboonsakul S, Li Y. 2016. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea. Earth-Sci Rev, 153: 238–273

Lüdmann T, Wong H K. 1999. Neotectonic regime on the passive continental margin of the northern South China Sea. Tectonophysics, 311: 113–138

Ma M, Chen G, Lyu C, Zhang G, Li C, Yan Y, Ma Z. 2019. The formation and evolution of the paleo-Pearl River and its influence on the source of the northern South China sea. Mar Pet Geol, 106: 171–189

Martinsen O J, Sømme T O, Thurmond J B, Helland-Hansen W, Lunt I. 2010. Source-to-sink systems on passive margins: Theory and practice with an example from the Norwegian continental margin. PGC, 7: 913–920

Milliman J D, Farnsworth K L. 2013. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis. Cambridge: Cambridge University Press

Morton A, Fanning M, Milner P. 2008. Provenance characteristics of Scandinavian basement terrains: Constraints from detrital zircon ages in modern river sediments. Sediment Geol, 210: 61–85

Nan F, Xue H, Chai F, Shi L, Shi M, Guo P. 2011. Identification of different types of Kuroshio intrusion into the South China Sea. Ocean Dyn, 61: 1291–1304

Nan F, Xue H, Yu F. 2015. Kuroshio intrusion into the South China Sea: A review. Prog Oceanography, 137: 314–333

Nayak K, Garzanti E, Lin A T S, Castelltort S. 2022. Taiwan river muds from source to sink: Provenance control, inherited weathering, and offshore dispersal pathways. Sediment Geol, 438: 106199

Nayak K, Lin A T S, Huang K F, Liu Z, Babonneau N, Ratzov G, Pillutla R K, Das P, Hsu S K. 2021. Clay-mineral distribution in recent deep-sea sediments around Taiwan: Implications for sediment dispersal processes. Tectonophysics, 814: 228974

Qu T, Girton J B, Whitehead J A. 2006. Deepwater overflow through Luzon Strait. J Geophys Res, 111: 2005JC003139

Ramos-Vázquez M A, Armstrong-Altrin J S. 2021. Provenance of sediments from Barra del Tordo and Tesoro beaches, Tamaulipas State, northwestern Gulf of Mexico. J Palaeog, 10: 382–398

Ren X, Xu J, Wang H, Liu M, Liu X, Li Y, Wu X. 2024. The depositional characteristics of turbidity current in Manila Trench: Sediment provenance, geochemical elements and organic carbon burial. J Asian Earth Sci, 264: 106074

Resentini A, Goren L, Castelltort S, Garzanti E. 2017. Partitioning sediment flux by provenance and tracing erosion patterns in Taiwan. J Geophys Res Earth Surf, 122: 1430–1454

Saylor J E, Jordan J C, Sundell K E, Wang X, Wang S, Deng T. 2018. Topographic growth of the Jishi Shan and its impact on basin and hydrology evolution, NE Tibetan Plateau. Basin Res, 30: 544–563

Thomas W A. 2011. Detrital-zircon geochronology and sedimentary provenance. Lithosphere, 3: 304–308

Shen X, Jian X, Li C, Liu J T, Chang Y P, Zhang S, Mei H, Fu H, Zhang W. 2021. Submarine topography-related spatial variability of

the southern Taiwan Strait sands (East Asia). Mar Geol, 436: 106495

Sibuet J C, Hsu S K. 2004. How was Taiwan created? Tectonophysics, 379: 159–181

Sláma J, Košler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hanchar J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N, Whitehouse M J. 2008. Plešovice zircon—A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. Chem Geol, 249: 1–35

Su M, Hsiung K H, Zhang C, Xie X, Yu H S, Wang Z. 2015. The linkage between longitudinal sediment routing systems and basin types in the northern South China Sea in perspective of source-to-sink. J Asian Earth Sci, 111: 1–13

Sundell K E, Saylor J E. 2017. Unmixing detrital geochronology age distributions. Geochem Geophys Geosyst, 18: 2872–2886

Talling P J, Masson D G, Sumner E J, Malgesini G. 2012. Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types. Sedimentology, 59: 1937–2003

Tsai C H, Shyu J B H, Chung S L, Ramos N T, Lee H Y. 2019. Detrital zircon record from major rivers of Luzon Island: Implications for Cenozoic continental growth in SE Asia. J Geol Soc, 176: 727–735

Vermeesch P. 2013. Multi-sample comparison of detrital age distributions. Chem Geol, 341: 140–146

Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. Geosci Front, 9: 1479–1493

Wang C, Liang X, Xie Y, Tong C, Pei J, Zhou Y, Jiang Y, Fu J, Dong C, Liu P. 2014. Provenance of Upper Miocene to Quaternary sediments in the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea: Evidence from detrital zircon U-Pb ages. Mar Geol, 355: 202–217

Wang C, Wei L, Chiang C S, Foster D A, Cui H, Su M. 2024. Linking Taiwan to the Cathaysia Block during the Cenozoic: Evidence from Pb isotopes in detrital K-feldspar. Glob Planet Change, 239: 104508

Wang G, Xie S P, Qu T, Huang R X. 2011. Deep South China Sea circulation. Geophys Res Lett, 38: L05601

Wang Y, Zhang Y, Fan W, Peng T. 2005. Structural signatures and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of the Indosinian Xuefengshan tectonic belt, South China Block. J Struct Geol, 27: 985–998

Wang Z, Lu K, Sun J, Zhang Y, Zhu X, Hu G, He M, Huang X, Mi B. 2022. Detrital zircon U-Pb age and provenance discrimination in sediments of the central mud area in the South Yellow Sea. Mar Geol Quater Geol, 42: 70–82

Xie Q, Xiao J G, Wang D X, Yu Y Q. 2013. Analysis of deep-layer and bottom circulations in the South China Sea based on eight quasi-global ocean model outputs. Chin Sci Bull, 58: 4000–4011

Xu Y, Sun Q, Cai G, Yin X, Chen J. 2014. The U–Pb ages and Hf isotopes of detrital zircons from Hainan Island, South China: Implications for sediment provenance and the crustal evolution. Environ Earth Sci, 71: 1619–1628

Ye Q, Mei L, Shi H, Camanni G, Shu Y, Wu J, Yu L, Deng P, Li G. 2018. The Late Cretaceous tectonic evolution of the South China Sea area: An overview, and new perspectives from 3D seismic reflection data. Earth-Sci Rev, 187: 186–204

Yu H S, Chiang C S, Shen S M. 2009. Tectonically active sediment dispersal system in SW Taiwan margin with emphasis on the Gaoping (Kaoping) Submarine Canyon. J Mar Syst, 76: 369–382

Zahirovic S, Seton M, Müller R D. 2014. The Cretaceous and Cenozoic tectonic evolution of Southeast Asia. Solid Earth, 5: 227–273

Zhang L, Ren Z Y, Xia X P, Wang C, Qian S P. 2018. An improved U-Pb age dating method for detrital zircon by LA-MC-ICP-MS. Geochem J, 52: 433–439

Zhang Y, Liu Z, Zhao Y, Colin C, Zhang X, Wang M, Zhao S, Kneller B. 2018. Long-term in situ observations on typhoon-triggered turbidity currents in the deep sea. Geology, 46: 675–678

Zhang Y, Chen X, Lin X, Li C, Liu H, Liu J. 2023. Early Cenozoic drainage evolution in the Jianghan Basin: Constraints from detrital zircon U-Pb ages of surface rivers and cores in the basin. Bull Geol Sci Tech, 42: 106–117

Zhao G, Sun M, Wilde S A, Sanzhong L. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. Precambrian Res, 136: 177–202

Zhong Y, Chen Z, Li L, Liu J, Li G, Zheng X, Wang S, Mo A. 2017. Bottom water hydrodynamic provinces and transport patterns of the northern South China Sea: Evidence from grain size of the terrigenous sediments. Cont Shelf Res, 140: 11–26

Zhou D, Ru K, Chen H. 1995. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region. Tectonophysics, 251: 161–177

Zhou X, Sun T, Shen W, Shu L, Niu Y. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. Episodes, 29: 26–33

Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. Tectonophysics, 326: 269–287

Zhu Y, Sun J, Wang Y, Li S, Xu T, Wei Z, Qu T. 2019. Overview of the multi-layer circulation in the South China Sea. Prog Oceanography, 175: 171–182

(责任编委: 李三忠)