

朱博文, 曾志刚. 冲绳海槽南部沉积物碎屑锆石 U-Pb 年代学特征及物源示踪意义[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(1): 14-23.

ZHU Bowen, ZENG Zhigang. Characteristic of detrital zircon U-Pb geochronology in the southern Okinawa Trough and its implication for sediment provenance[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(1): 14-23.

冲绳海槽南部沉积物碎屑锆石 U-Pb 年代学特征及物源示踪意义

朱博文^{1,2}, 曾志刚^{1,2,3*}

(1 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 青岛海洋科学与技术国家试点实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237)

摘要: 冲绳海槽南部作为冲绳海槽全新世以来沉积速率最快的区域, 其沉积物记录了物源区、黑潮及东亚季风演化等多方面的信息。通过碎屑锆石年代学, 对冲绳海槽南部 H4-S2 孔沉积物开展了物源示踪研究。结合核密度估计图解 (Kernel Density Estimation, KDE)、累积年龄分布 (Cumulative Age Distribution, CAD) 及其相关性分析, 进行了研究层位和潜在物源区的可视化分析与相似性检验, 揭示了研究样品中 2 个层位碎屑锆石的年代学特征及物质来源。物源分析结果显示, 近 200 a 来冲绳海槽南部沉积物中的碎屑锆石记录了东海陆架、长江以及兰阳河来源的物质, 指示了除兰阳河外, 东海陆架及长江在晚全新世对冲绳海槽南部的沉积物质来源具有重要贡献。

关键词: 冲绳海槽; 碎屑锆石; U-Pb 年代学; 物源示踪

中图分类号: P736; P313

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.190

0 引言

作为西太平洋的边缘海之一, 东海自全新世以来接受了大量来源于长江和黄河的沉积物^[1]。冲绳海槽是发育在东海东南部的地质构造体^[2], 是西太平洋典型的弧后盆地, 具有频繁的岩浆作用和热液活动^[3-16], 海底沉积及热液环境中生物分布广泛^[17-20]。冲绳海槽发育了巨厚的沉积层, 记录了晚第四纪以来东亚大陆边缘沉积物源、海平面、黑潮、东亚季

风及人类活动等多方面的演化历史^[21-24], 是开展海-陆相互作用、海洋沉积物“源-汇”过程研究的重要区域^[22,25]。前人通过矿物学、地球化学及环境磁学等方法, 对冲绳海槽地区沉积物来源与沉积环境演化等科学问题进行了大量的研究工作^[26-32]。先前的观点认为, 长江、黄河及台湾河流对冲绳海槽发育的陆源碎屑物质具有显著贡献, 同时, 东海外陆架沉积物也是冲绳海槽沉积物质的重要来源之一^[21-22,31,33-40]。除河流沉积物的主要贡献外, 冲绳海槽的沉积物还来源于火山活动产物、海底热液活动产物、风尘物质及由地震触发的浊流所供给的内源物质等^[30,41-45]。

由于冲绳海槽南部具有复杂的水动力条件和较快的沉积速率(最快可达到 10 m/ka)^[31], 其沉积物来源备受关注。前人通过黏土矿物、全岩地球化学特征进行的物源示踪研究结果虽然指示了冲绳海槽南部在全新世以来的沉积物源主要为台湾河流^[23-24,31], 但使用的示踪指标都存在端元重合的问题: 如长江沉积物与台湾河流沉积物在微量元素组成上难以区分, 台湾西部河流和台湾东部河流(兰

收稿日期: 2020-12-01

资助项目: 国家自然科学基金“西太平洋俯冲体系中岩浆活动及其对热液物质供给的制约”(91958213); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目“冲绳海槽热液活动成矿机理及其沉积效应”(133137KYSB20170003); 山东省泰山学者工程专项“特聘专家资助计划项目”(ts201511061); 中国大洋协会项目课题“海底多金属硫化物及金属软泥的成矿机理”(DY135-G2-1-02)

作者简介: 朱博文(1994—), 男, 在读博士, 主要从事海洋沉积学方面的研究工作。E-mail: zhubowen@qdio.ac.cn

* 通讯作者: 曾志刚(1968—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事海洋地质学方面的研究工作。E-mail: zgzeng@ms.qdio.ac.cn

表2 H4-S2 样品粒度特征

Table 2 Grain-size parameters of H4-S2

样品号	深度/cm	沉积年代	分选系数	偏度	峰度	平均粒径/ μm	黏土含量/%	粉砂含量/%	砂含量/%
OTS-1	26~66	1954-1993年	1.34	1.01	5.17	17.36	11.9	88.0	0.2
OTS-2	112~152	1828-1879年	1.49	0.67	4.23	22.20	11.4	82.9	5.7

粒度测试工作在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室使用 Cilas 940L 激光粒度分析仪进行。检出限于 0.04~2 500 μm , 测试时间在 1 min 内, 仪器的测量重复性和分析精度分别为 0.5% 和优于 2%。根据粒度分类, 计算了黏土(<4 μm), 粉砂(4~63 μm)和砂(> 63 μm)的体积百分含量, 结果如表 2 所示。

从沉积物中挑选重矿物及锆石样品的具体分离步骤为: 用去离子水对样品进行淘洗并烘干, 再利用三溴甲烷(密度 2.89 g/cm^3)进行轻、重矿物分离; 对于重矿物部分, 用强磁铁选出强磁部分, 剩余的用电磁仪选出电磁部分和重无磁部分, 分别包装。然后利用体式显微镜、偏光显微镜对分离好的重无磁、电磁及强磁 3 种矿物组分进行定性和半定量鉴定, 同时挑选锆石这一目标矿物, 每一个样品中挑选出的碎屑锆石数量均多于 1 000 粒。碎屑锆石挑选由廊坊地科勘探服务有限公司按照行业标准及本研究要求完成。

随后对挑选出的锆石进行制靶。在双目镜下随机挑选出 400 粒锆石, 固定于环氧树脂靶并抛光使其核心暴露。完成制靶后, 进行透反射及阴极发光(CL)图像拍摄, 用以获取锆石的内部结构以便进行测年点位的选取。上述工作在河北省地质测绘院岩矿实验测试中心及中国地质科学院资源研究所完成。

锆石 U-Pb 定年在中国地质科学院地质研究所矿物/包裹体微区分析实验室使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)完成。激光剥蚀平台采用 NWR 193uc 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统(Elemental Scientific Lasers, 美国)。质谱仪采用 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(Agilent, 美国)。测量前, 使用外置能量计测量到达样品池的实际能量, 以保证到达样品表面的实际能量与预设的能量密度相一致。将锆石靶置于超纯水中超声清洗, 分析前用分析纯甲醇擦拭样品表面。采用 5 个激光脉冲对每个剥蚀区域进行预剥蚀(剥蚀深度为 0.3 μm), 以去除样品表面可能的污染。由于本研究中的碎屑锆石粒径较细, 故在束斑直径 25 μm 、剥蚀频率 5 Hz、能量密度 2 J/cm^2 的激

光条件下分析样品。数据处理采用 Iolite 程序, 锆石 91 500 作为主标, GJ-1、Plesovice 作为副标, 每隔 10~12 个样品点分析 2 个 91 500 标样及 1 个 GJ-1、Plesovice 标样。通常采集 20 s 的气体空白, 35~40 s 的信号区间进行数据处理, 按指数方程进行深度分馏校正。以 NIST 610 作为外标, 91Zr 作为内标计算微量元素含量。本次实验过程中测定的 91 500 (1 061.5 \pm 3.2 Ma, 2 σ)、GJ-1 (604 \pm 6 Ma, 2 σ)、Plesovice(340 \pm 4 Ma, 2 σ)年龄在不不确定范围内与推荐值一致。

通过上述方法所获取的实验数据, 利用 ICPMSDataCal9.2 进行处理, 对于²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄 <1 000 Ma 的碎屑锆石选用谐和度>80% 的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄, 对于²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄>1 000 Ma 的碎屑锆石选用谐和度>90% 的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄^[61-62]。

为了识别 H4-S2 中碎屑锆石的不同来源, 本研究对冲绳海槽南部沉积物潜在物源区长江口^[53-54]、兰阳河口、浊水溪口^[58,60]、闽江口、瓯江口及东海陆架东南侧^[55-56]的碎屑锆石数据进行了整理, 年龄数据的选取标准与 OTS-1、OTS-2 一致, 潜在物源区共计获取 1 063 个年龄数据, 各潜在物源区的位置如图 1、表 3 所示。

表3 潜在物源区地理位置及数据来源

Table 3 Location and data source of potential provenance area

潜在物源区	经度(E)	纬度(N)	数据来源
兰阳河口	121.80°	24.70°	文献[58,60]
浊水溪口	120.20°	23.80°	文献[58,60]
长江口	121.98°	31.19°	文献[53]
东海陆架-1	122.16°	26.79°	文献[55]
东海陆架-2	121.82°	26.45°	文献[55]
东海陆架-3	121.06°	25.80°	文献[55]
瓯江口	118.00°	24.50°	文献[56]
闽江口	119.60°	26.00°	文献[56]

2 结果及讨论

2.1 H4-S2 沉积物碎屑锆石 U-Pb 年代学特征

锆石的 Th、U 质量分数、Th/U 值及岩相学特

征可以指示其不同的成因类型。一般来说, 岩浆锆石具有较高的 Th、U 质量分数、 >0.3 的 Th/U 值以及环带状、长柱状的阴极发光特征; 变质锆石具有较低的 Th、U 质量分数、 <0.1 的 Th/U 值及弱分带、冷杉叶状的阴极发光特征。本研究中碎屑锆石的 Th/U 值大多 >0.3 , 仅有少数 <0.1 , 并且大量的锆石颗粒表现为环带状的阴极发光特征(图 2、3), 如上结果指示了本研究中的碎屑锆石大多为岩浆成因, 选用岩浆成因的锆石可以用来准确反映锆石颗粒的结晶年龄。

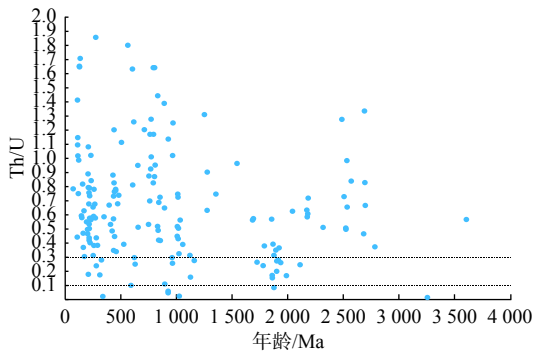


图 2 H4-S2 沉积物碎屑锆石 Th/U 值

Fig.2 Plot of Th/U ratios versus U-Pb ages of detrital zircons from the H4-S2

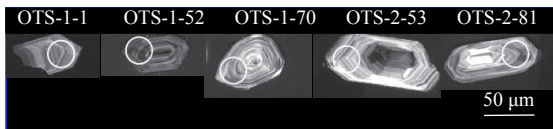


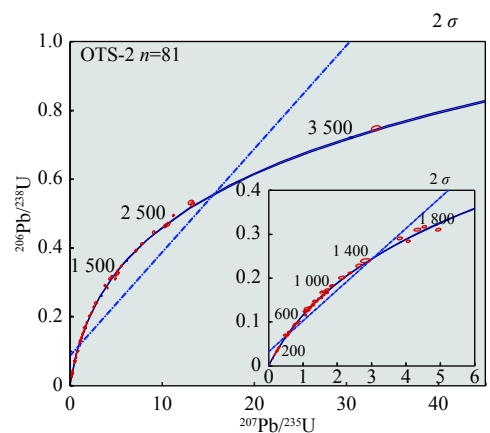
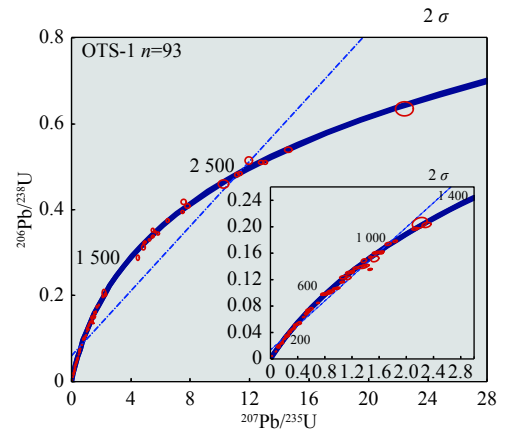
图 3 H4-S2 沉积物中碎屑锆石阴极发光照片

Fig.3 Cathodoluminescence of detrital zircon in H4-S2

此外, H4-S2 沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图(图 4)指示了 90% 及以上的碎屑锆石 U-Pb 年龄均谐和, 本研究使用的锆石年龄均为谐和年龄。

基于获取的 H4-S2 中 2 个层位的碎屑锆石年龄数据及潜在物源区的年龄数据, 本研究使用核密度估计图解(Kernel Density Estimation, KDE)方法绘制其年龄谱^[63-65](图 5)。结果显示, H4-S2 中 2 个层位的碎屑锆石年龄呈多峰态的分布特征, 年龄分布区间较为一致, 表现为 6 个主要的年龄区间: 200~100 Ma、300~200 Ma、500~300 Ma、1 100~600 Ma、2 200~1 700 Ma 和 2 800~2 400 Ma。此外, OTS-1 层位碎屑锆石的主要年龄峰值出现在 120 Ma、221 Ma 和 1 870 Ma, OTS-2 的主要年龄峰值则出现在 217 Ma、435 Ma 和 700 Ma。

为了更好地表现 2 个研究层位与潜在物源区锆石年龄组成的差异, 本研究统计了其分布区间的占比(表 4)。整体来看, 2 个层位的碎屑锆石



2σ 为数据点椭圆误差, n 为碎屑锆石 U-Pb 年龄的统计数量。图右下角小图分别为 OTS-1 样品中的碎屑锆石 U-Pb 年龄在 0~1 400 Ma 内的谐和图和 OTS-2 样品中的碎屑锆石 U-Pb 年龄在 0~1 800 Ma 内的谐和图。

图 4 H4-S2 沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图

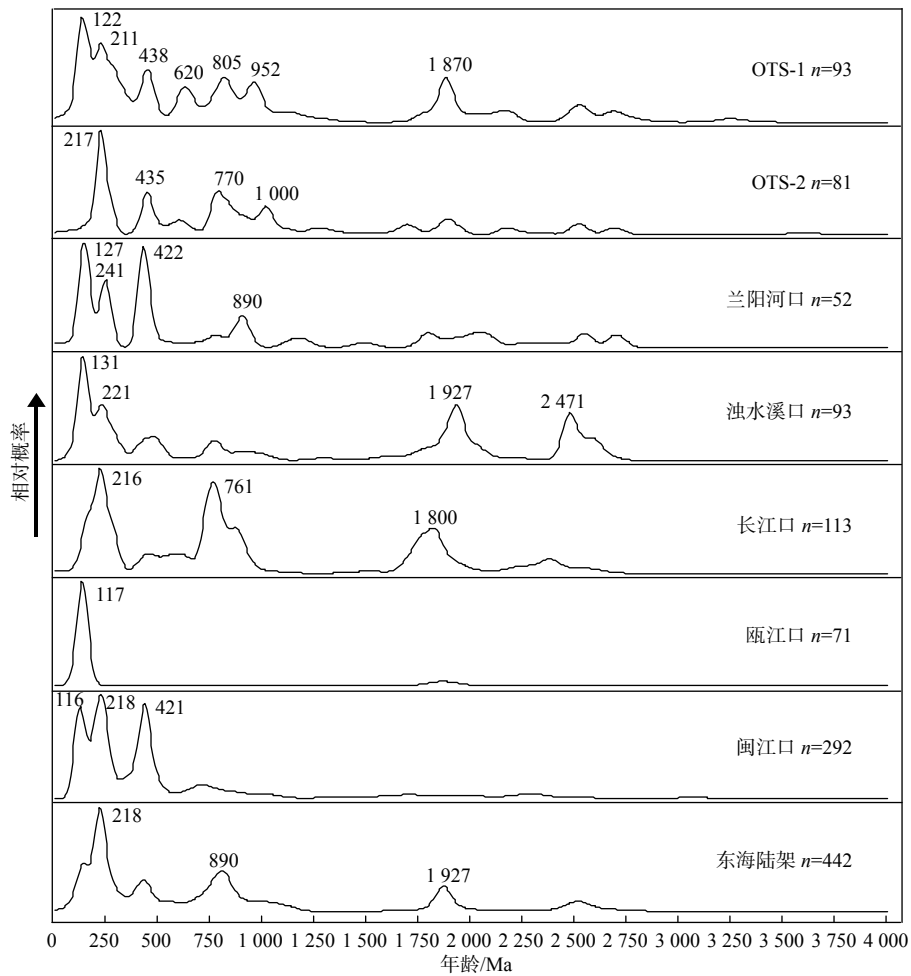
Fig.4 Concordia diagram of the single zircon grains from H4-S2

主要分布在显生宙和新元古代, 而老于古元古代的碎屑锆石较少。其中, 二者在 500~300 Ma 及 2 800~2 400 Ma 范围内的比例近似相同, 但 OTS-1 比 OTS-2 有更多的锆石年龄分布在 200~100 Ma (17.24%) 和 2 200~1 700 Ma (16.09%) 区间内, OTS-2 则在 300~200 Ma (26.09%) 和 1 100~600 Ma (37.68%) 区间内具有更高比例的锆石。

2.2 潜在物源区沉积物碎屑锆石 U-Pb 年代学特征

作为冲绳海槽南部的潜在物源区, 台湾河流(兰阳河口和浊水溪口)、长江口、闽江口、甌江口及东海陆架沉积物中碎屑锆石的 U-Pb 年代学特征具有明显的差异(图 5、表 4)。

由图 5、表 4 可知, 浊水溪口与长江口以更高比例的老于古元古代的碎屑锆石颗粒为特征, 而兰



兰阳河口与浊水溪口数据引自 [58, 60]; 长江口数据引自 [53-54]; 东海陆架、
闽江口及瓯江口数据引自 [55-56]; *n* 为碎屑锆石 U-Pb 年龄的统计数量。

图 5 H4-S2 及潜在物源区碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱

Fig.5 U-Pb age distribution of sediment core H4-S2 and potential provenances

表 4 H4-S2 与潜在物源区碎屑锆石年龄主要分布区间占比

Table 4 Percentage of the major zircon U-Pb age groups of the H4-S2 and potential provenance area

样品号	主要年龄分布区间及比例					
	200~100 Ma	300~200 Ma	500~300 Ma	1100~600 Ma	2200~1700 Ma	2800~2400 Ma
OTS-1	17.24%	14.94%	13.79%	28.74%	16.09%	9.20%
OTS-2	5.80%	24.64%	11.59%	37.68%	11.59%	8.70%
兰阳河口	22.22%	15.56%	22.22%	15.56%	15.56%	8.89%
浊水溪口	20.69%	13.79%	9.20%	11.49%	25.29%	19.54%
长江口	11.22%	20.41%	5.05%	39.39%	20.20%	3.03%
瓯江口	86.57%	1.49%	0.00%	0.00%	12.31%	0.00%
闽江口	28.63%	20.78%	31.13%	13.23%	4.67%	1.17%
东海陆架	18.05%	21.55%	13.78%	29.32%	10.78%	6.52%

阳河口、瓯江口、闽江口及东海陆架则含有更多的显生宙及新元古代碎屑锆石颗粒。具体来看,在 200~100 Ma 区间,长江口仅有 11.22% 的颗粒,兰阳河口、浊水溪口及东海陆架的占比均为约 20%,而闽江口和瓯江口的占比相对较高(分别为

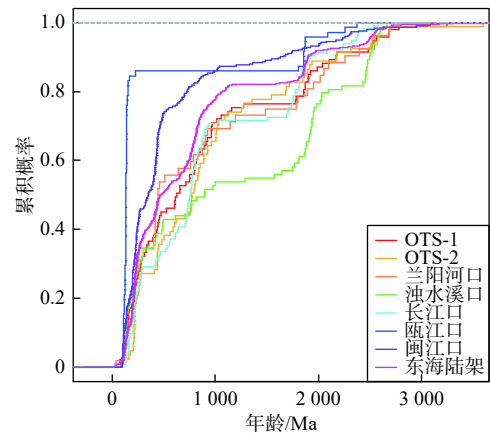
28.63% 和 86.57%); 在 300~200 Ma 区间,除瓯江口(1.49%)外,其余各物源区含量大致相似;在 500~300 Ma 区间,各物源区之间有较大差异:瓯江口为 0%,长江口为 5.05%,浊水溪口为 9.2%,东海陆架为 13.78%,而占比较高的物源区为兰阳河口

(22.22%)和闽江口(31.13%);在 1 100~600 Ma 区间,各物源区之间亦有较大差异:瓯江口为 0%,浊水溪口、闽江口和兰阳河口占比较为类似(分别 11.49%、13.23% 和 15.56%),东海陆架和长江口占比最高(分别为 29.32% 和 39.39%);在 2 200~1 700 Ma 区间内,各物源区的分布比例也各有不同,但都低于 30%,其中浊水溪口和长江口最高(分别为 25.29% 和 20.20%),兰阳河口、瓯江口及东海陆架次之(分别为 15.56%、12.31% 和 10.78%),闽江口最低(4.67%);在 2 800~2 400 Ma 区间,除浊水溪口外(19.54%),其他所有物源区占比均低于 10%。

2.3 H4-S2 沉积物碎屑锆石的物源判别

依据不同潜在物源区沉积物碎屑锆石 U-Pb 年代学特征,并通过累积年龄分布图进行验证其年龄分布情况^[63-65],本研究样品表现为与长江口、兰阳河口以及东海陆架具有相类似的年龄分布,可认为其物质来源受到长江、兰阳河及东海陆架的共同影响(图 5、6)。

其中,OTS-1 样品在 200~100 Ma、500~300 Ma 和 1 100~600 Ma 区间内的比例与东海陆架类似;在 300~200 Ma 区间内,与兰阳河口和浊水溪口相似;在 2 200~1 700 Ma 和 2 800~2 400 Ma 区间,均与兰阳河口类似。OTS-2 与 OTS-1 在年龄组成上具有较大差异。在 200~100 Ma、300~200 Ma 区间与各潜在物源区差异较大;在 500~300 Ma 区



兰阳河口、浊水溪口数据引自 [58, 60]; 长江口数据引自 [53-54]; 东海陆架、闽江口及瓯江口数据引自 [55-56]。

图 6 H4-S2 及潜在物源区碎屑锆石 U-Pb 年龄累积分布图

Fig.6 The cumulative age distribution for U-Pb age of sediment core H4-S2 and potential provenances

间内,其组成情况与东海陆架类似;在 1 100~600 Ma 区间,与长江口更为类似;在 2 200~1 700 Ma 区间与东海陆架相近;在 2 800~2 400 Ma 区间,则表现为与兰阳河口相近的分布特征。

此外,本研究通过相关性分析进一步揭示了研究区与潜在物源区碎屑锆石年龄区间比例的相关关系(表 5),相关系数 0.1~0.3 为弱相关,0.3~0.5 为中等相关,0.5~1.0 为强相关。由其结果可知,OTS-1 与长江口和东海陆架为强相关,与兰阳河口及闽江口为弱相关;OTS-2 与长江口和东海陆架为强相关,并与其他潜在物源区均无相关关系。

表 5 H4-S2 与潜在物源区碎屑锆石年龄分布相关性分析结果

Table 5 Correlation analysis results of age distribution for detrital zircon between H4-S2 and potential provenance areas

	OTS-1	OTS-2	兰阳河口	浊水溪口	长江口	瓯江口	闽江口	东海陆架
OTS-1	1.00							
OTS-2	0.78	1.00						
兰阳河口	0.21	-0.17	1.00					
浊水溪口	-0.30	-0.55	-0.27	1.00				
长江口	0.91	0.88	-0.07	-0.18	1.00			
瓯江口	0.04	-0.47	0.54	0.42	-0.18	1.00		
闽江口	0.10	-0.08	0.90	-0.53	-0.15	0.42	1.00	
东海陆架	0.87	0.83	0.28	-0.53	0.82	0.04	0.36	1.00

综上所述,H4-S2 中近 200 年来的碎屑锆石主要来源于东海陆架和长江,兰阳河、闽江对 H4-S2 亦有物质贡献。

前人对于冲绳海槽南部沉积物的研究工作,提出早全新世以来(约 7.2 ka),以高温、高盐、高流速为特征的黑潮将台湾河流沉积物带入冲绳海槽并

且隔绝了东海陆架和长江物质,从而将冲绳海槽南部沉积物的主要物源由古长江和东海陆架演变为台湾河流的观点^[22-24]。ODP-1202B 孔沉积物的 Sr-Nd-Pb 特征指示了台湾西部河流沉积物可能在台湾沿岸流的作用下到达冲绳海槽南部^[22-24]。不同的是,我们研究指示了近 200 a 来,海槽南部记录了一

定的东海陆架及长江来源的物质,而台湾河流沉积物对研究区的物质贡献并不显著。根据前人的研究结果,长江来源的碎屑锆石在长江冲淡水及闽浙沿岸流的作用下可以广泛分布在东海陆架中^[55]。本研究中的相关性分析也指示了长江口与东海陆架的碎屑锆石年龄组成具有极高的相关性(表5),指示了东海陆架沉积物中的碎屑锆石受到长江的显著影响。此外,研究样品与闽江口的碎屑锆石年龄分布具有弱相关性,表明部分闽江沉积物能够进入冲绳海槽南部;海槽南部槽底沉积物的重矿物组成特征也与长江物质及东海陆架类似^[66],均指示了长江/东海陆架的沉积物可以通过一定的运移机制到达海槽南部。值得注意的是,冲绳海槽南部在近年来的调查研究中发现了海底热液活动和火山活动,但南部海底热液活动的产物以方铅矿、闪锌矿及黄铁矿为主^[67],未见有关锆石的相关报道。同时,海槽南部处于初步扩张阶段,研究区周围存在的火山活动产物主要为基性岩^[68]。一般认为,岩浆演化至中酸性时才会产生锆石^[69],而在基性火山岩中,锆石并不发育。因此,冲绳海槽南部存在的热液活动与火山活动及其产物对本研究中碎屑锆石的来源不会造成影响,换言之,本研究中的碎屑锆石均为陆源碎屑物质。

前人的研究结果认为冲绳海槽南部在近200a来发生了多次浊流事件^[40]。因此,本研究样品记录的长江来源的沉积物可能是通过长江冲淡水和闽浙沿岸流的共同作用,搬运至东海陆架,在重力流的输运下,通过海底峡谷进入海槽南部。由此可知,在冲绳海槽南部的不同区域,其沉积物质来源及物质运输机制可能存在显著差异。浊水溪与研究区样品的负相关表明台湾西部河流对冲绳海槽南部的碎屑锆石不具有物质贡献(表5),这也指示了台湾沿岸流对砂粒级组分沉积物的搬运能力有限。需要着重强调的是,碎屑锆石可能仅指示了砂粒级组分的来源,与前人进行的黏土矿物、全岩地球化学等工作存在认识上的差异并不意味着绝对的物源差异,具体结果仍需要通过结合其他指标进行综合分析。

碎屑锆石的“源-汇”关系表明,东海陆架既是长江沉积物的“汇”,又是冲绳海槽南部沉积物的“源”。如何在冲绳海槽南部沉积物中区分东海陆架和长江口的物源信号,需要进一步的探讨。

3 结论

(1)冲绳海槽南部沉积物岩芯 H4-S2 中 OTS-1 与 OTS-2 层位的碎屑锆石年龄呈多峰态分布特征,年龄分布区间较为一致,表现为6个主要的年龄区间:200~100 Ma、300~200 Ma、500~300 Ma、1100~600 Ma、2200~1700 Ma 和 2800~2400 Ma。

(2)对冲绳海槽南部沉积物岩芯 H4-S2 中2个层位及潜在物源区的碎屑锆石进行物源判别,认为 H4-S2 样品在近200a来记录了一定的东海陆架及长江来源的物质,同时台湾河流沉积物对该样品亦有物质贡献。

(3)近200a来东海陆架及长江物质在冲绳海槽南部的出现,指示了该区域存在多种沉积物运输机制,重力流可能是将东海陆架及长江物质由东海陆架搬运至冲绳海槽南部的原因。东海陆架既是长江沉积物的“汇”,也是冲绳海槽南部沉积物的“源”。

(4)碎屑锆石作为判别现代海洋沉积物质来源的“指针”,因其丰度不高、端元组分不完善,在示踪边缘海沉积物质来源的研究中存在一定困难,但其指示了海洋沉积物中砂粒级组分的物质来源,可能具有特殊的物源指示意义。该“指针”在冲绳海槽南部的应用可以有效结合先前进行的黏土矿物、全岩地球化学等指标的研究结论,有望形成对冲绳海槽南部沉积物质来源的整体认识。

参考文献:

- [1] 杨守业,韦刚健,石学法.地球化学方法示踪东亚大陆边缘源汇沉积过程与环境演变[J].*矿物岩石地球化学通报*,2015,34(5):902-910.
- [2] ZHANG L, LUAN X W, ZENG Z G, et al. Key parameters of the structure and evolution of the Okinawa Trough: modelling results constrained by heat flow observations[J]. *Geological Journal*, 2019, 54: 3542-3555.
- [3] ZENG Z G, QIN Y S, ZHAI S K. He, Ne and Ar isotope compositions of fluid inclusions in massive sulfides from the Jade hydrothermal field, Okinawa Trough[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 23(4): 655-661.
- [4] ZENG Z G, YU S X, YIN X B, et al. Element enrichment and U-series isotopic characteristics of the hydrothermal sulfides at Jade site in the Okinawa Trough[J]. *Science in China (Ser. D)*, 2009, 52(7): 913-924.
- [5] ZENG Z G, YU S X, WANG X Y, et al. Geochemical and isotopic characteristics of volcanic rocks from the northern East China

- Sea shelf margin and the Okinawa Trough[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(4): 48-61.
- [6] HOU Z Q, ZAW K, LI Y H, et al. Contribution of magmatic fluid to the active hydrothermal system in the JADE Field, Okinawa Trough: evidence from fluid inclusions, oxygen and helium isotopes[J]. *International Geology Review*, 2005, 47(4): 420-437.
- [7] ZHANG Y X, ZENG Z G, LI X H, et al. High-potassium volcanic rocks from the Okinawa Trough: implications for a cryptic potassium-rich and DUPAL-like source[J]. *Geological Journal*, 2017, 53(5): 1755-1766.
- [8] ZHANG Y X, ZENG Z G, CHEN S, et al. New insights into the origin of the bimodal volcanism in the middle Okinawa Trough: not a basalt-rhyolite differentiation process[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2018, 12(2): 325-338.
- [9] SHU Y C, NIELSEN G S, ZENG Z G, et al. Tracing subducted sediment inputs to the Ryukyu Arc-Okinawa Trough system: evidence from thallium isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 217: 462-491.
- [10] SHU Y C, ZENG Z G, YIN X B, et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on the origin of volcanic rocks from the northern Okinawa Trough[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(6): 3304-3313.
- [11] CHEN Z X, ZENG Z G, YIN X B, et al. Petrogenesis of highly fractionated rhyolites in the southwestern Okinawa Trough: constraints from whole-rock geochemistry data and Sr-Nd-Pb-O isotopes[J]. *Geological Journal*, 2019, 54: 316-332.
- [12] GUO K, ZHAI S K, YU Z H, et al. Geochemical characteristics of major and trace elements in the Okinawa Trough basaltic glass[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(2): 14-24.
- [13] GUO K, ZHAI S K, WANG X Y, et al. The dynamics of the southern Okinawa Trough magmatic system: new insights from the microanalysis of the an contents, trace element concentrations and Sr isotopic compositions of plagioclase hosted in basalts and silicic rocks[J]. *Chemical Geology*, 2018, 497: 146-151.
- [14] LI X H, ZENG Z G, CHEN SI, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of volcanic rocks from Iheya Ridge, the middle Okinawa Trough: implications for petrogenesis and a mantle source[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(1): 1-16.
- [15] LI X H, ZENG Z G, WANG X Y, et al. Petrogenesis of basalt from the middle Okinawa Trough: new insights from olivine-hosted melt inclusions[J]. *Geological Journal*, 2018, 53: 3129-3146.
- [16] LI X H, ZENG Z G, YANG H X, et al. Geochemistry of silicate melt inclusions in middle and southern Okinawa Trough rocks: implications for petrogenesis and variable subducted sediment component injection[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(3): 1160-1189.
- [17] ZENG Z G, CHEN S, MA Y, et al. Chemical compositions of mussels and clams from the Tangyin and Yonaguni Knoll IV hydrothermal fields in the southwestern Okinawa Trough[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 87: 172-191.
- [18] ZENG Z G, MA Y, WANG X Y, et al. Elemental compositions of crab and snail shells from the Kueishantao hydrothermal field in the southwestern Okinawa Trough[J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 180: 90-101.
- [19] ZHANG J, SUN Q L, ZENG Z G, et al. Microbial diversity in the deep-sea sediments of Iheya North and Iheya Ridge, Okinawa Trough[J]. *Microbiological Research*, 2015, 177: 43-52.
- [20] SUN Q L, ZENG Z G, CHEN S, et al. First comparative analysis of the community structures and carbon metabolic pathways of the bacteria associated with alvinocarid longirostris in a hydrothermal vent of Okinawa Trough[J]. *Plos One*, 2016, 11(4): e0154359.
- [21] 李铁刚, 常凤鸣. 冲绳海槽古海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [22] DOU Y G, YANG S Y, LIU Z X, et al. Clay mineral evolution in the central Okinawa Trough since 28 ka: implications for sediment provenance and paleoenvironmental change[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2010, 288(4): 108-117.
- [23] DOU Y G, YANG S Y, LIU Z X, et al. Sr-Nd isotopic constraints on terrigenous sediment provenances and Kuroshio Current variability in the Okinawa Trough during the late Quaternary[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2012, 365/366(9): 38-47.
- [24] DOU Y G, YANG S Y, SHI X F, et al. Provenance weathering and erosion records in southern Okinawa Trough sediments since 28 ka: geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic evidences[J]. *Chemical Geology*, 2016, 425: 93-109.
- [25] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [26] 赵一阳, 鄢明才. 黄河、长江、中国浅海沉积物化学元素丰度比较[J]. *科学通报*, 1992, 37(13): 1202-1204.
- [27] 蒋富清, 李安春, 李铁刚. 冲绳海槽南部柱状沉积物地球化学特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(3): 11-17.
- [28] 蒋富清, 孟庆勇, 徐兆凯, 等. 冲绳海槽北部15ka B. P. 以来沉积物源及控制因素: 稀土元素的证据[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(2): 112-118.
- [29] 刘娜, 孟宪伟. 冲绳海槽中段表层沉积物中稀土元素组成及其物源指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4): 37-43.
- [30] LIU J P, LIU C S, XU K H, et al. Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait[J]. *Marine Geology*, 2008, 256(1): 65-76.
- [31] DIEKMANN B, HOFMANN J, HENRICH R, et al. Detrital sediment supply in the southern Okinawa Trough and its relation to sea-level and Kuroshio dynamics during the late Quaternary[J]. *Marine Geology*, 2008, 255(1): 83-95.
- [32] HUANG X, CHEN S, ZENG Z G, et al. Characteristics of hydrocarbons in sediment core samples from the northern Okinawa Trough[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 115(1): 507-514.

- [33] CHUNG Y C, HUNG G W. Particulate fluxes and transports on the slope between the southern East China Sea and the South Okinawa Trough[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(4): 571-597.
- [34] ISEKI K, OKAMURA K, KIYOMOTO Y. Seasonality and composition of downward particulate fluxes at the continental shelf and Okinawa Trough in the East China Sea[J]. *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(2): 457-473.
- [35] WANG W J, JIANG W S. Study on the seasonal variation of the suspended sediment distribution and transportation in the East China seas based on SeaWiFS data[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2008, 7(4): 385-392.
- [36] JIAN Z M, WANG P X, SAITO Y, et al. Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 184(1): 305-319.
- [37] KATAYAMA H, WATANABE Y. The Huanghe and Changjiang contribution to seasonal variability in terrigenous particulate load to the Okinawa Trough[J]. *Deep-Sea Research II*, 2013, 50: 475-485.
- [38] XU K H, MILLIMAN J D, LI A C, et al. Yangtze- and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(18): 2240-2256.
- [39] 王佳泽, 李安春, 黄杰. 17000年以来冲绳海槽中部沉积物物源演化及其古环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 105-114.
- [40] 杨娅敏. 冲绳海槽南部浊流沉积层中的硫化物特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [41] ZHAI S K, XU S M, YU Z H. Two possible hydrothermal vents in the northern Okinawa Trough[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(11): 943-945.
- [42] MIYAIRI Y, YOSHIDA K, MIYAZAKI Y, et al. Improved ¹⁴C dating of a tephra layer (AT tephra, Japan) using AMS on selected organic fractions[J]. *Nuclear Inst and Methods in Physics Research B*, 2004, 223-224: 555-559.
- [43] HUH C A, SU C C, LIANG W T, et al. Linkages between turbidites in the southern Okinawa Trough and submarine earthquakes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(12): 261-268.
- [44] LEE S Y, HUH C A, SU C C, et al. Sedimentation in the Southern Okinawa Trough: enhanced particle scavenging and teleconnection between the Equatorial Pacific and western Pacific margins[J]. *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*, 2004, 51(11): 1769-1780.
- [45] 赵德博, 万世明. 冲绳海槽沉积物物源示踪研究进展[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(2): 32-41.
- [46] MOLLER A, O'BRIEN P J, KENNEDY A, et al. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: an example from the ultrahigh-temperature granulites of Rogaland (SW Norway) [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 2003, 220(1): 65-81.
- [47] MOECHEER D P, SAMSON S D. Differential zircon fertility of source terranes and natural bias in the detrital zircon record: implications for sedimentary provenance analysis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 247(3): 252-266.
- [48] THOMAS W A. Detrital-zircon geochronology and sedimentary provenance[J]. *Lithosphere*, 2011, 3(4): 304-308.
- [49] 谢静, 吴福元, 丁仲礼. 浑善达克沙地的碎屑锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成及其源区意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 523-528.
- [50] 谢静, 杨石岭, 丁仲礼. 黄土物源碎屑锆石示踪方法与应用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012(6): 133-143.
- [51] STEVENS T, PALK C, CARTER A, et al. Assessing the provenance of loess and desert sediments in northern China using U-Pb dating and morphology of detrital zircons[J]. *Geriatrics and Gerontology International*, 2010, 12(s1): 88-102.
- [52] 杨蓉, SEWARD D, 周祖翼. 长江流域现代沉积物碎屑锆石U-Pb年龄物源探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(6): 73-83.
- [53] HE M Y, ZHENG H B, BOOKHAGEN B, et al. Controls on erosion intensity in the Yangtze River basin tracked by U-Pb detrital zircon dating[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 136(3): 121-140.
- [54] HE M Y, ZHENG H B, CLIFT P D. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotope data from the Yangtze River sands: implications for major magmatic events and crustal evolution in central China[J]. *Chemical Geology*, 2013, 360/361(1): 186-203.
- [55] HUANG X T, SONG J Z, YUE W, et al. Detrital zircon U-Pb ages in the East China Seas: implications for provenance analysis and sediment budgeting[J]. *Minerals*, 2020, 10(5): 398.
- [56] XU Y H, WANG C Y, ZHAO T P. Using detrital zircons from river sands to constrain major tectono-thermal events of the Cathaysia Block, SE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 124: 1-13.
- [57] ZHONG L F, LI G, YAN W, et al. Using zircon U-Pb ages to constrain the provenance and transport of heavy minerals within the northwestern shelf of the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 134: 176-190.
- [58] 邓凯, 杨守业, 李超, 等. 台湾山溪型小河流碎屑锆石年代学和粒径分析[J]. *地质学报*, 2015, 89(s1): 7-8.
- [59] SHAO L, CAO L C, PANG X, et al. Detrital zircon provenance of the Paleogene syn - rift sediments in the northern South China Sea[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2016, 17(2): 255-269.
- [60] DENG K, YANG S Y, LI C, et al. Detrital zircon geochronology of river sands from Taiwan: implications for sedimentary provenance of Taiwan and its source link with the east China mainland[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 164: 31-47.
- [61] WEISLOGEL A L, GRAHAM S A, CHANG E Z, et al. Detrital zircon provenance of the Late Triassic Songpan-Ganzi complex: sedimentary record of collision of the North and South China blocks[J]. *Geology*, 2006, 42(2): 97-100.
- [62] COMPSTON W. Zircon U-Pb ages for the early Cambrian time-

- scale[J]. *Journal of the Geological Society*, 1992, 149(2): 171-184.
- [63] VERMEESCH P, RESENTINI A, GARZANTI E. An R package for statistical provenance analysis[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 336: 14-25.
- [64] VERMEESCH P. Multi-sample comparison of detrital age distributions[J]. *Chemical Geology*, 2013, 341(2): 140-146.
- [65] VERMEESCH P. On the visualisation of detrital age distributions[J]. *Chemical Geology*, 2012, 312/313(3): 190-194.
- [66] 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [67] YANG B J, LIU J H, SHI X F, et al. Mineralogy and sulfur isotope characteristics of metalliferous sediments from the Tangyin hydrothermal field in the southern Okinawa Trough[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 120: 103464.
- [68] YAN Q S, SHI X F. Petrologic perspectives on tectonic evolution of a nascent basin (Okinawa Trough) behind Ryukyu Arc: a review[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(4): 1-12.
- [69] KELLER C B, SCHOENE B, BARBONI M, et al. Volcanic-plutonic parity and the differentiation of the continental crust[J]. *Nature*, 2015, 523(7560): 301-307.

Characteristic of detrital zircon U-Pb geochronology in the southern Okinawa Trough and its implication for sediment provenance

ZHU Bowen^{1,2}, ZENG Zhigang^{1,2,3*}

(1 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: The southern Okinawa Trough is the area with the fastest deposition rate since the Holocene, and its sediments record the evolution of provenance, Kuroshio and the East Asian monsoon. In this paper, detrital zircon U-Pb geochronology is used to study the provenance of H4-S2 sediments in the southern Okinawa Trough. By means of Kernel Density Estimation (KDE), Cumulative Age Distribution (CAD) and correlation analysis, the visual analysis and similarity test for potential provenances of two layers of sediments are carried out for the trough, and thus the chronology and provenance of detrital zircon revealed. The provenance analysis suggests that the detrital zircon in the sediments from the southern Okinawa Trough are sourced from the East China Sea shelf, Yangtze River and Lanyang River during the last 200 years, which means that the East China Sea shelf and Yangtze River dominated the provenance of the Late Quaternary sediments in the southern Okinawa Trough.

Key words: Okinawa Trough; detrital zircon; U-Pb geochronology; provenance tracing