

韩卓尘,高抒,李艳平. 菲律宾海北部四国海盆全新世沉积物源分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(2): 11—24, doi:10. 3969/j. issn. 0253-4193. 2015. 02. 002

Han Zhuochen, Gao Shu, Li Yanping. Analysis on the Holocene sediment supply to the Shikoku Basin, northern Philippine Sea[J].

Haiyang Xuebao, 2015, 37(2): 11—24, doi:10. 3969/j. issn. 0253-4193. 2015. 02. 002

菲律宾海北部四国海盆全新世沉积物源分析

韩卓尘¹, 高抒^{1,2*}, 李艳平²

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 对 IODP333 航次四国海盆北部地区 C0011 站位表层样品进行粒度和 Sr-Nd 同位素分析, 并与前人发表的邻近海域同位素数据进行比较。经分离自生碳酸盐组分, 四国海盆全新世沉积物呈现较好的陆源、火山源二端元组分特征。从地理位置看, 四国海盆北部主要物质来源包括伊豆一小笠原海脊火山物质、日本列岛西南部的混合型沉积物以及由西向风或河流入海洋流输送而来的亚洲陆地沉积物, 且日本列岛西南部对于该区域物质贡献最大。对四国海盆北部而言, 与海盆中部沉积及日本海沉积相比, 源自亚洲大陆的碎屑沉积物具有更多的贡献。沉积物中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 ϵ_{Nd} 、平均粒径的负相关关系反映了沉积物中陆源物质的相对贡献按时间顺序呈现增加、减小、增加、减少的多周期变化趋势。

关键词: 全新世沉积; Sr-Nd 同位素特征; 粒度特征; 物质来源; 四国海盆

中图分类号: P736. 2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2015)02-0011-14

1 引言

位于菲律宾海东北部的四国海盆, 是太平洋板块向欧亚板块俯冲而形成的弧后盆地的一部分。该海盆目前属于菲律宾海板块, 向四国岛的俯冲仍然活跃, 成为本区强震的发源地之一。该地区深海第四纪沉积较为连续、完整, 因此了解该地区沉积物物质来源信息, 对西北太平洋古海洋环境和生态系统演变等问题的探讨具有重要意义^[1]。长期以来, 海洋沉积物粒度分析在阐明海底沉积物来源、沉积环境类型的识别和物质输运方式的判定有广泛的应用^[2-4]。在同一沉积环境中, 底质粒度分布的时间变化反映了多种动力搬运综合作用的结果^[5-6]。在

同一沉积岩心中, 沉积物粒度组成的时间变化则多与沉积古环境演化和物源变化密切相关^[7-8]。而 Sr、Nd 同位素则是示踪细粒沉积物来源的有效示踪物质^[9-10]。因为不同的矿物和岩石具有不同的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值, 所以将 Sr-Nd 同位素联合起来可以有效地确定沉积物来源^[11-12]。颗粒物中 Nd 同位素组成相对稳定, 在表生地球过程中基本不发生变化^[13], 其组成只与源岩有关, 因此是了解沉积物源区最有效的示踪剂之一。而沉积物中 Sr 同位素组成不仅受控于源岩^[14], 而且也与化学风化过程和颗粒物大小有关^[15]; 许多研究者将 Sr-Nd 同位素结合起来共同示踪沉积物来源^[16-18], 同时也可以获得古环境演化信息。

收稿日期: 2014-04-02; 修订日期: 2014-05-19。

基金项目: 国家高技术研究发展计划重点项目“大洋钻探站位调查关键技术研究”(2008AA093001); 国家自然科学基金面上项目(41373002)。

作者简介: 韩卓尘(1991—), 男, 内蒙古乌海市人, 主要从事海洋沉积动力学研究。E-mail: michaelhzc@126.com

* 通信作者: 高抒(1956—), 男, 浙江省杭州市人, 教授, 主要从事海洋沉积动力学、动力地貌学研究。E-mail: shugao@nju.edu.cn

对于西北太平洋海域,国内外学者对海洋沉积物来源问题进行了一系列探讨^[19-24],普遍得到西太平洋物源特征为亚欧大陆陆源物质和海底火山物质的二端元组分。四国海盆地区作为热点研究区域,成为深海大洋钻探计划(DSDP)、大洋钻探计划(ODP)和综合大洋钻探计划(IODP)的一个集中钻探区域工作,研究者们在该地区采集了较多数量的沉积物岩芯,并对四国海盆形成机制、构造、沉积环境演化历史、沉积物输运系统等进行了多方面的研究^[1,25]。其中 IODP 333 航次主要研究陆坡、海沟底部和海山脊部的第四纪沉积过程^[26]。

本文拟采用 Sr-Nd 同位素分析与粒度分析结合的方法,对于四国海盆地区全新世沉积物质来源变化特征进行探讨,为了解海盆全新世时期演化历史提供依据。

2 研究区概况

菲律宾海盆是西太平洋最大、最深的弧后盆地,大约在中新世早、中期之间开始扩张^[27]。其边缘被活动的岛弧和深海沟环绕,菲律宾海呈 NNE-SSW 方向延伸的菱形。两条近南北方向的向东凸出水下的弧形海岭,即九州-帕劳海脊和伊豆-小笠原海脊,将菲律宾海划分为 3 个盆地,西部为西菲律宾海盆,中部为四国海盆和帕里西维拉海盆,东部为小笠原-马里亚纳海沟。从西到东,盆地面积由大变小,海水深度由浅变深。四国海盆北部通过南海海槽与日本列岛相连,东西两侧分别为伊豆-小笠原海脊和九州海脊,南部直接与帕里西维拉海盆相连(见图 1)。在经向上,北部介于 134°~138°E 之间;南部介于 136°~141°E 之间;纬度介于 25°~32°N 之间。海盆近 NNW-SSE 走向,南北长约 1 200 km,东西宽约 500 km,北宽南窄,北部比南部宽 200 km 左右。水深约为 4 600 m,海底起伏较大,总体上是东浅西深^[28]。四国海盆和帕里西维拉海盆呈对称状分布,平行于太平洋板块向亚欧板块的俯冲带^[29]。对于南海海槽,由于本州岛弧与伊豆岛海脊的碰撞抬升以及碎屑组分的侵蚀导致该地区的高速堆积^[30]。南海海槽东部沉积物经南海海峡通过浊流搬运而来^[31]。海盆北部,越接近日本四国地区的海岸带沉积物越厚,在南海海槽附近超过了 1 000 m;而海盆中央位置沉积物较薄,两边部位厚,向南沉积物也减薄变窄,呈楔形。在 27°N 以南的中央区域,几乎没有沉积物覆盖。

3 材料与方法

3.1 样品获取与年代框架信息

所有样品均来自于 IODP 333 航次所得样品。航次中利用“水力活塞钻孔系统”(Hydraulic Piston Coring System, HPCS)的钻井方法获得了 C0011 站位钻孔样品(相当于第四纪时期的沉积),该站位位于 Kashinosaki 海山的西北前端的海沟区,具体经纬度为 32°49.7' N、126°52.9' E,采样站位见图 1。在钻孔柱状样中,用 U 形塑料采样管获取柱状子样,样品包装采用加热法封口^[26]。用于本次研究分析的样品为表层 20 cm 层样品,为全新世时期的深海沉积。

所获样品编号为 C0011C-1H 岩心。对其进行沉积物定性描述,并对其利用特制的切片每隔 2 mm 切割一次,共切出 94 个初步样品。按每隔 4 个样品的间隔(深度间隔为 8 mm)取出其中的 24 个样品分中心样和边样分别装入两个样品袋中,分别用于同位素地球化学分析和粒度分析。其余样品作为保留样,为后续研究使用。

通过 IODP 319 航次在此处的 LWD(Logging while drilling,即随钻测井技术)数据^[32]以及 ODP 808、1173、1174 和 1177 站位在四国海盆上部采集柱样的类比,同时 IODP 333 航次报告^[33]中根据生物地层学钙质微体古生物化石事件得到,C0011-1H 段样品沉积速率为 1.87 cm/ka。IODP 333 航次报告中显示,在晚第四纪时期该研究区沉积过程连续,以层理的形式存在,并无断层、低角度断层以及剪切带,也没有 MTDs(Mass transport deposits,即块体搬运沉积)、浊流或火山爆发的堆积层。样品深度为 2~21 cmbsf(cmbsf 表示自海底以下以厘米计的深度单位),对应样品年代大致为距今 1.1~11.2 ka,属于全新世沉积。

3.2 实验方法

C0011C-1H 钻孔切割后的 24 个样品进行粒度分析和 Sr-Nd 同位素地球化学分析。粒度分析采用 Mastersizer 2000 型激光衍射粒度仪,粒度参数使用矩值法计算^[34]。加 10 mL 15% HCl 浸泡 24 h,离心后加入 10 mL 10% H₂O₂,再浸泡 24 h,上机测试前加入适量六偏磷酸钠([NaPO₃]₆),使颗粒分散后测量,测试 2~3 次以保证分析结果的可靠性。对沉积物 Sr-Nd 同位素地球化学分析采用多接收等离子体质谱(MC-ICP-MS)^[35]。样品均经过 2 mL 1 mol/L 的 HAc 处理^[36],将碎屑组分和碳酸盐组分分离。将两

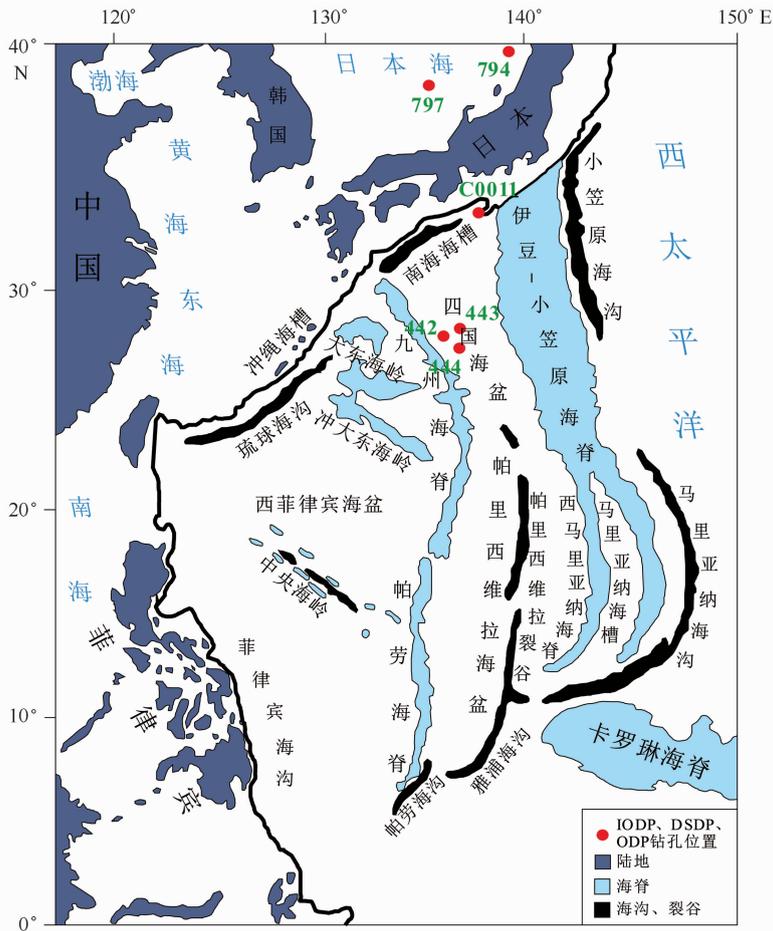


图1 研究区海底地貌特征,据靳宁^[37]修改

Fig. 1 Submarine geomorphological features of the study area, revised from Jin Ning^[37]

组分用 $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ 消解^[36], 经过两套 Bio-Rad 50WX8 阳离子交换树脂将 Rb/Sr 和 Sm/Nd 分离分别测试碳酸盐和碎屑组分中的 Sr 同位素组成及碎屑组分中的 Nd 同位素组成。 Sr - Nd 同位素样品测量在南京大学内生金属矿床国家重点实验室进行。测试中标样溶液均用体积比为 3% 的 HNO_3 溶液稀释, 浓度分别为 250 ng/mL 和 50 ng/mL 。对 TUNE Nd 同位素标准样和 NBS987 Sr 标样的测试值分别为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = (0.511\ 725 \pm 5)$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (0.710\ 25 \pm 3)$ 。 Nd 同位素的组成通常表达为 ϵ_{Nd} , 其计算方式如下:

$$\epsilon_{\text{Nd}}(0) = \left(\frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{sample}}}{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}} - 1 \right) \times 10\ 000, \quad (1)$$

式中, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}$ 为球粒陨石中的比值, 一般取值为 0.512 638^[38]。

4 分析结果

四国海盆全新世沉积物样品粒度分析和同位素

分析结果列于表 1, 其中粒度参数使用矩值法^[35]计算。

在钻孔样品中, 粒度成分中砂质成分含量范围为 6.3%~43.0%, 粉砂质成分含量范围为 54.2%~86.0%, 而黏土质成分含量范围为 2.8%~7.7% (见图 2)。在砂质成分中, 又以细砂和极细砂为主, 因此该段沉积物性质主要为细砂质粉砂或者极细砂质粉砂。从粒度参数来看, 平均粒径 M_z 变化范围为 4.7~6.0 Φ , 分选系数 σ 变化范围为 1.5~2.2, 分选性差; 偏态 SK 变化范围为 -0.04~0.20, 正负偏都较小; 峰态 K_g 变化范围为 0.94~1.3 近于常态和尖锐之间。从粒度频率分布曲线来看 (见图 3), 总体呈微弱的双峰, 主峰峰值较高, 各样本不相同, 均值在 4~6 Φ 左右, 次级峰峰值很低, 约 10~11 Φ , 且主峰含量远远高于次峰 (见图 3)。

碎屑组分的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 0.708 108 ~ 0.711 284 之间, 平均值 0.709 871; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 变化

也较小,介于 0.512 266~0.512 364 之间,平均值 0.512 301, $\epsilon_{Nd}(0)$ 变化范围为-5.30~-7.22 之间,平均值为-6.54。根据 23 个样品数据,碳酸盐 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值在钻孔不同深度的样品之间变化较小,介于 0.709 148~0.709 257 之间,平均值 0.709 184,与现代海水中 Sr 同位素组成(0.709 211 \pm 37)^[39]相似。

图 2 中根据灰色和白色样带范围可以看出,碎屑组分 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 的变化趋势与 $\epsilon_{Nd}(0)$ 、平均粒径均呈现较为明显的负相关关系。按照深度由深到浅的顺序,

在地质年龄最老的一段 21.5~17.3 cmbsf, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值逐渐增加, $\epsilon_{Nd}(0)$ 、平均粒径则逐渐减小;17.3~14.0 cmbsf, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值逐渐减小, $\epsilon_{Nd}(0)$ 、平均粒径逐渐增加;14.0~8.5 cmbsf, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值逐渐增加, $\epsilon_{Nd}(0)$ 、平均粒径逐渐减小;8.5~2.0 cmbsf, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值逐渐减小, $\epsilon_{Nd}(0)$ 、平均粒径逐渐增加。除变化趋势外,可以发现在 4.5 cmbsf、8.5 cmbsf、11.9 cmbsf 及 18.5 cmbsf 这些 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 、 $\epsilon_{Nd}(0)$ 的突变点两者都有很好的负相关对应关系。

表 1 C0011C-1H 钻孔 Sr-Nd 同位素和粒度数据

Tab. 1 The data sets derived from Sr-Nd isotope and grain size analyses, for C0011-1H core samples

样品深度 /cm	碎屑组分			碳酸盐 $^{87}Sr/^{86}Sr$	平均粒径 / Φ	中值粒径 / Φ	分选系数	偏态	峰态
	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$\epsilon_{Nd}(0)$						
2.0~2.2	0.708 744	0.512 335	-5.87	0.709 158	4.98	4.82	2.11	0.10	1.06
2.8~3.0	0.709 951	0.512 326	-6.05	0.709 148	5.35	5.21	1.96	0.10	1.22
3.6~3.8	0.709 137	0.512 322	-6.13	0.709 177	5.19	5.16	2.13	0.01	1.19
4.4~4.6	0.708 109	0.512 364	-5.30	0.709 174	5.57	5.54	2.10	0.01	1.19
5.2~5.4	0.709 180	0.512 285	-6.84	0.709 219	5.85	5.76	1.99	0.06	1.14
6.0~6.2	0.709 441	0.512 288	-6.79	0.709 179	5.52	5.48	2.20	0.03	0.99
6.8~7.0	0.710 287	0.512 304	-6.47	0.709 201	5.40	5.45	2.08	-0.03	0.94
7.6~7.8	0.708 939	0.512 304	-6.47	0.709 184	5.53	5.58	2.15	-0.04	1.13
8.4~8.6	0.710 878	0.512 266	-7.22	0.709 187	5.65	5.63	2.20	0.01	1.09
9.2~9.4	0.710 694	0.512 287	-6.80	0.709 178	5.97	5.94	1.96	0.02	1.28
10.0~10.2	0.710 009	0.512 297	-6.62	0.709 190	5.65	5.64	2.08	-0.01	1.21
10.8~11.0	0.709 700	0.512 294	-6.66	0.709 195	5.68	5.66	2.12	0.01	1.06
11.6~11.8	0.711 113	0.512 276	-7.03	0.709 172	5.49	5.42	2.13	0.06	0.96
12.4~12.6	0.709 432	0.512 301	-6.54	0.709 190	4.84	4.71	1.95	0.09	1.09
13.2~13.4	0.709 293	0.512 313	-6.31	0.709 181					
14.0~14.2	0.710 017	0.512 307	-6.42	0.709 257	4.72	4.55	1.94	0.11	1.13
14.8~15.0	0.709 997	0.512 334	-5.90	0.709 202	5.07	4.86	1.91	0.15	1.15
15.6~15.8	0.710 461	0.512 320	-6.16	0.709 173	5.45	5.33	1.98	0.08	1.15
16.4~16.6	0.710 652	0.512 267	-7.20	0.709 168	5.77	5.64	1.93	0.10	1.13
17.2~17.4	0.711 284	0.512 273	-7.08	0.709 203	5.73	5.52	1.50	0.20	1.18
18.0~18.2	0.710 288	0.512 306	-6.44	0.709 159	4.95	4.76	1.91	0.13	1.12
18.8~19.0	0.709 758	0.512 287	-6.81	0.709 190	4.91	4.77	1.84	0.10	1.22
19.6~19.8	0.709 170	0.512 299	-6.57	0.709 155	4.99	4.86	1.77	0.09	1.25
20.4~20.6	0.709 348	0.512 320	-6.17		5.25	5.18	2.03	0.04	1.20

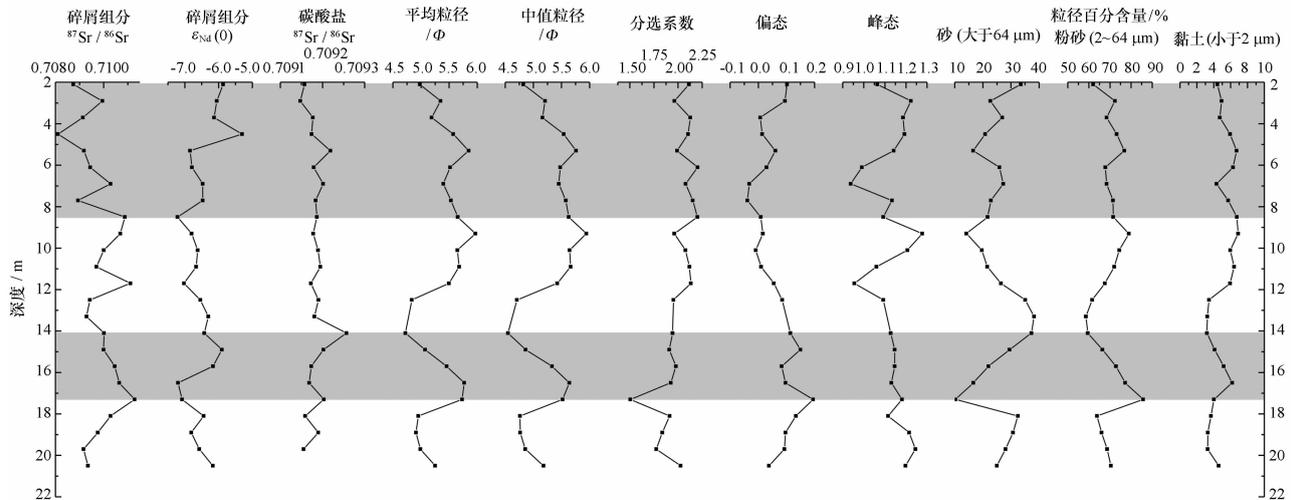


图2 C0011C-1H 岩心样品 Sr-Nd 同位素及粒度特征组成变化图

Fig. 2 Down-core variations of Sr-Nd isotope and grain size characteristics, for C0011C-1H core samples

灰色、白色间隔样带代表 Sr-Nd 同位素特征增减的变化对比趋势,表明碎屑组分中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 、平均粒径之间均呈现较为明显的负相关关系,其中平均粒径、中值粒径的单位为 Φ ,按 Φ 值表述变化趋势与粒径本身变化趋势相反

The gray and white bands represent the increasing and decreasing trends of Sr-Nd isotope characteristics, respectively, indicating that both $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and mean grain size show apparently negative correlation for the detrital components. The unit of mean and median grain sizes is Φ , thus the vertical trend expressed by Φ is the opposite with regard to the trend of grain size expressed in mm

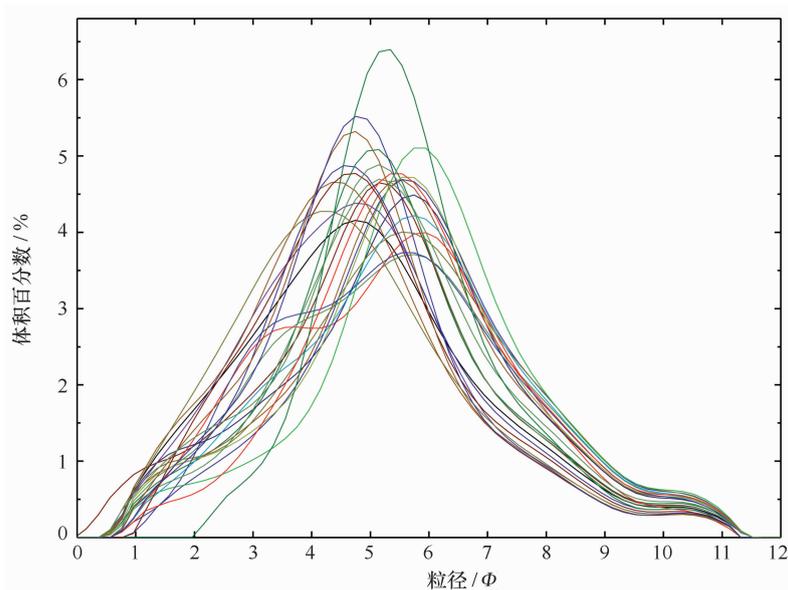


图3 C0011C-1H 站位样品粒度频率分布曲线

Fig. 3 Grain size frequency distribution curves of C0011C-1H samples

5 讨论

5.1 不同物源的同位素特征比较

任何一个盆地 Sr、Nd 同位素的变化范围都是物源区地质演化的结果,因此深海细颗粒沉积物同位素

特征是对盆地区分和物源判定的良好指示物。不同的地壳成分来源具有不同的同位素特征,盆地内同位素特征则是不同来源的同位素特征混合后的平均结果。西北太平洋沉积物主要有 3 种来源:陆源($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值大约为 0.720, $M_{\text{陆}}$)、火山源($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值

大约为 0.704, $M_{\text{火}}$) 和生物源(以海洋自生生物成矿作用形成的碳酸盐组分, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值大约为 0.708, $M_{\text{生}}$)^[40]。即:

$$M_{\text{陆}} + M_{\text{火}} + M_{\text{生}} = 100\% \quad (2)$$

本文研究中使用 1 mol/L HAc 处理沉积物样品, 分离了自生碳酸盐组分, 剩余用于讨论的碎屑组分($M_{\text{剩}}$) 主要为火山源和陆源, 可以认为是二端元混合物, 即:

$$M_{\text{剩}} = 1 - M_{\text{陆}} + M_{\text{火}} = 100\% - M_{\text{生}} \quad (3)$$

分离碳酸盐组分后, 剩余碎屑组分又使用 HF、 HNO_3 消解, 所以下面主要讨论酸溶相碎屑组分的同位素特征。当 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较高时, 代表大量陆源物质在四国海盆沉积, 包括风成沉积、河流沉积物等物质的输入^[41]; 在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 较低时, 物质贡献主要由海底火山物质(即大洋火山岩)补给^[42]。按照地壳类型划分, 物质范围可以粗略的分成 3 部分, 并可以利用 Nd 同位素划定大致界限: (1) 古老的硅铝质陆相物质, ($\epsilon_{\text{Nd}} < -6$)^[14]; (2) 过渡性地壳 ($-6 < \epsilon_{\text{Nd}} < +5$)^[43]; (3) 年轻的以火山物质为主的地壳 ($\epsilon_{\text{Nd}} > +5$)^[43]。四国海盆中同位素特征主要代表了由于不同碎屑物质来源的物质混合后的变化情况, 同位素特征值随年代的波动情况反映了源区细颗粒沉积物供给的变化。

从现有的研究来看, ϵ_{Nd} 的变化范围介于 $-15 \sim 0$ 之间, 而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的绝对范围介于 0.706 0 ~ 0.716 0 之间。样品中较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(大于 0.710 0) 和较低的 ϵ_{Nd} 值(小于 -6.00) 表明老的陆相物质是影响该地区同位素特征范围的主要因素; 而样品中较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(小于 0.710 0) 和较高的 ϵ_{Nd} 值(大于 -6.00) 表明过渡性地壳和以火山物质为主的地壳物质的比重增加, 反映的陆源物质输入通量的减少和火山物质的输入通量增加。

四国海盆北部, ϵ_{Nd} 的变化范围介于 $-5.3 \sim -7.4$ 之间, 平均值 -6.5 ; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 介于 0.708 108 ~ 0.711 469 之间, 平均值 0.709 871, 总体 ϵ_{Nd} 的值更为负偏(见图 2)。这一负偏特征体现了年龄较老的陆源物质具有较多的贡献。根据图 1 的 C0011 钻孔空间位置, 影响研究区同位素特征的近缘成分包括北侧日本西南部物质、东侧伊豆一小笠原海脊火山物质, 以及西侧九州一帕劳海脊火山物质。海盆东由以火山物质组成的伊豆一小笠原海脊火山物质组成多年来基本没有发生较大的变化, 其 ϵ_{Nd} 值介于 $+8 \sim +9$ 之间^[44-45]; 北侧日本列岛西南部形成时期较为年轻, 普遍认为发育于中国东南部造山运动过程^[46], 具有

典型陆源物质、火山物质共同组成的混合型沉积物特征, 其 ϵ_{Nd} 值介于 $-6 \sim +4$ 之间^[47-50]; 西侧九州一帕劳海脊火山物质的 ϵ_{Nd} 值介于 $+7.1 \sim +7.5$ 之间^[51]。假定我们按照三者 1 : 1 : 1 的配比粗算, ϵ_{Nd} 范围应该处于 $+3 \sim +7$ 之间。事实上实测的 Sr-Nd 同位素比值代表海水 Sr、Nd 和碎屑组分中 Sr、Nd 同位素比值的混合结果。然而相比陆源沉积物中 Sr、Nd 的浓度, 海水中 Sr、Nd 同位素浓度(Sr 浓度大约 8×10^{-6}) 非常小, 所以海水中 Sr、Nd 同位素组分对于整个沉积物中的同位素特征影响很小^[52]。因此, 原钻孔中 ϵ_{Nd} 值应稍低于估测值。但这与我们测量的海盆北部 ϵ_{Nd} 的范围 $-5 \sim -7$ 仍相差很大, 所以推论仍有重要的远端物源组分对该区域的物质贡献。已有研究表明, 由于中高纬度的气候冷却导致的大气环流强度增加, 自晚更新世起有大量的风成沉积物通量进入西太平洋海盆中^[53-54]。这些风成碎屑物的一大部分来自于中国黄土高原和沙漠地区^[19, 54-55], 并且可以用 Nd 同位素加以特征化($\epsilon_{\text{Nd}} \approx -10$)^[55]。这些物质通过盛行西风及东亚季风被输送至西太平洋地区, 由于大气环流在 30°N 的变化而沉降入海, 在垂直沉降过程随着不同深度的洋流作用在水平方向被搬运, 最终沉积于四国海盆地区。位于西北侧的亚洲老的陆相物质总体来讲 $\epsilon_{\text{Nd}} < -15$ ^[56], 很可能是四国海盆 ϵ_{Nd} 值强烈负偏的原因。但是仅从同位素特征来看, 很难区分陆源风成碎屑物质和河流入海并经洋流输送导致的陆源物质。

对于四国海盆中部的同位素特征, Mahoney^[57] 利用 DSDP 442、443、444 钻孔(见图 1) 得到 ϵ_{Nd} 值变化基本介于 $-5.2 \sim -9.6$ 之间, 平均值 -7.3 ; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 0.709 29 ~ 0.714 98 之间, 平均值 0.712 35。总体上讲, 与四国海盆北部相比 ϵ_{Nd} 值更为负偏, 同时 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较四国海盆北部更大。一般而言, 空间越近的两个地理空间的相似性越大^[58]。四国海盆中部钻孔位置距离海盆北侧的日本列岛较海盆北部钻孔更远, 显然日本西南部以火山物质和陆相物质结合的混合型沉积物对海盆中部的贡献率更小, 相对来说伊豆一小笠原海脊的物质贡献应该更大。按伊豆一小笠原海脊(ϵ_{Nd} 值介于 $+8 \sim +9$ 之间) 如此高的 ϵ_{Nd} 正偏估算应该是海盆中部的 ϵ_{Nd} 值较北部更为正偏, 但这与实测数据恰恰相反。这说明海盆中部的物质来源可能更多的来自于陆源物质。

从四国海盆海流特征来看(见图 4), 表层洋流主要是黑潮。黑潮分为两支, 一支主要沿南海海槽以北

运输,另一支跨南海海槽,在海盆东北部转弯经过。黑潮在表层 1 000 m 水深范围内都对细颗粒物物质输运有重要作用^[59]。中层主要为南极中层水呈逆时针环流运动。此外各日本列岛西南部、伊豆本州碰撞带及伊豆一小笠原海脊边缘发育大量浊流和重力流^[60]。另外粒度特征显示沉积物为细颗粒物物质(见表 1),远端陆源物质可以被长距离搬运。因此,可能的陆源沉积物输运路径:经西风和季风搬运的风成碎屑沉积物以及由黑潮搬运的亚洲地区河流入海带来

的陆源物质,主要由海盆北部缓慢沉降。当沉降至中层水时由于南极中层水的环流作用,导致陆源物质被搬运到海盆中部地区并最终沉降,这也是可能导致中部沉积物 ϵ_{Nd} 值更为负偏的原因。而对于近缘的日本列岛西南部混合型物质及伊豆一小笠原海脊火山物质而言,区域较大的坡度及较为强烈的碰撞运动形成的沉积物重力流是导致近缘沉积物搬运并堆积在四国海盆的重要原因^[61-62]。

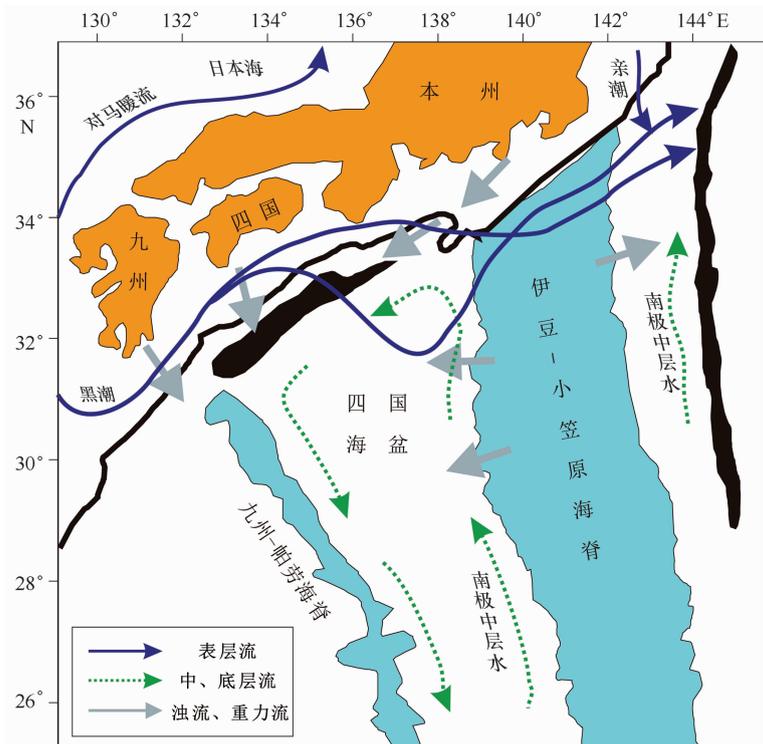


图 4 四国海盆附近海流示意图,据 Underwood 等^[60]修改

Fig. 4 Schematic diagram showing the oceanic currents associated with the Shikoku Basin, modified from Underwood et al^[60]

关于靠近日本列岛东北部的日本海同位素特征, Mahoney^[57]对 ODP 794、795、797 钻孔(见图 1)进行分析得到 ϵ_{Nd} 值变化基本介于 $-3.4 \sim -8.8$ 之间,平均值 -6.3 ; $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值介于 $0.70895 \sim 0.71590$ 之间,平均值 0.71194 。与四国海盆北部相比较, ϵ_{Nd} 值基本处于相同范围,但是 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值范围相差较大,较四国海盆北部更大。日本海东侧的 ϵ_{Nd} 值强烈负偏反映了包括来自亚洲大陆老陆壳的碎屑物贡献($\epsilon_{Nd} \ll -15$)^[56],来自大和隆升的大陆块断裂($\epsilon_{Nd} \ll -3$)^[49],来自日本列岛西南部的年轻的以火山灰和火山碎屑为主要成分的

碎屑物(ϵ_{Nd} 值介于 $-6 \sim +4$ 之间)^[47-50],以及日本西北侧的陆源-火山源混合型岛弧物质贡献(ϵ_{Nd} 值介于 $+5 \sim +6$ 之间)^[44]。在相同的 ϵ_{Nd} 值情况下, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值较四国海盆北部大,所以陆相成分相对多于四国海盆北部。从地理位置上看,由于日本海距离亚洲大陆较近,更多的来自亚洲大陆老的陆壳的风成碎屑和河流入海物质经由对马暖流等(图 4)输运并在该地区沉积。但是 Mahoney^[57]对比四国海盆中部和日本海的同位素特征发现,在相同的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值情况下,四国海盆中部的 ϵ_{Nd} 值略低于日本海。

通过 3 个地区的综合比较可以发现(见图 5),日

本列岛西南部物质源区对于四国海盆本身北部和中部以及日本海都有一定的影响;三地区 ϵ_{Nd} 值都强烈负偏,表明亚洲大陆陆源物质对于 3 个地区都有重要的物质贡献;伊豆-小笠原海脊对于四国海盆的物质贡献与日本列岛东北部对于日本海地区的物质贡献

相似。从三者数据点分散密集程度来看,四国海盆北部和中部的物质来源具有一定的区别;而仅仅从同位素特征定性的来看,海盆北部和日本海的同位素特征相对更为相似。

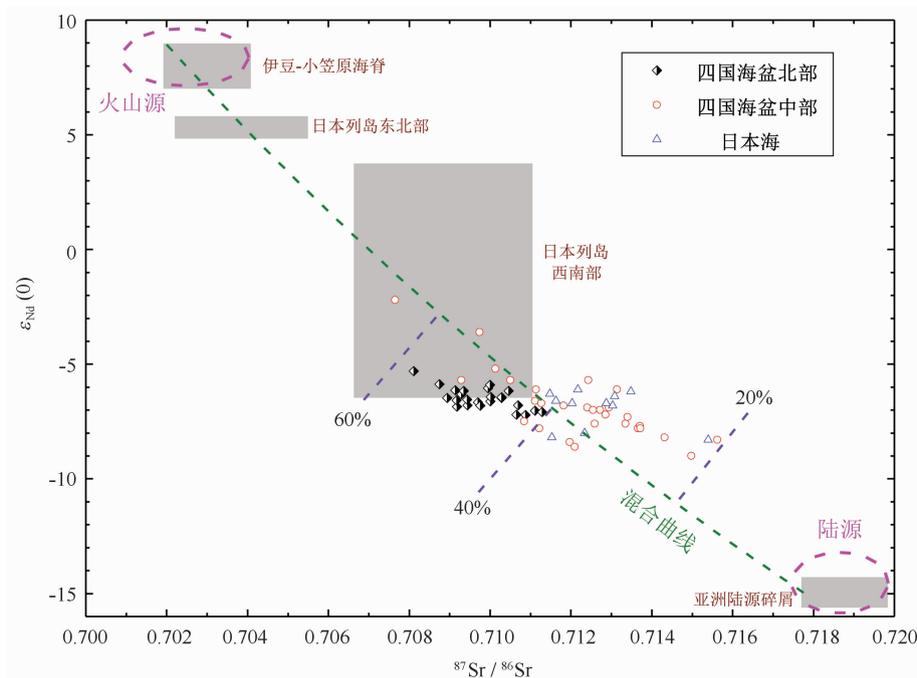


图 5 研究区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 ϵ_{Nd} 关系

Fig. 5 The relationship between $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and ϵ_{Nd} , for the study area

图中四国海盆北部数据是本次实验所测数据,四国海盆中部与日本海数据引自 Mahoney^[57]; 亚洲陆源碎屑范围引自文献[20—21,56];日本列岛西南部范围引自文献[47,50];日本列岛东北部范围引自文献[44];伊豆-小笠原海脊范围引自文献[63];火山源和陆源的同位素范围引自文献[57,64]。混合曲线两端元取值为陆源^[20—21,56]; $\text{Sr}_A = 135 \times 10^{-6}$, $\text{Nd}_A = 24.3 \times 10^{-6}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_A = 0.7218$, $\epsilon_{Nd}(0)_A = 7.10$; 火山源^[63]; $\text{Sr}_B = 147 \times 10^{-6}$, $\text{Nd}_B = 52.8 \times 10^{-6}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_B = 0.7190$, $\epsilon_{Nd}(0)_B = -14.3$

Data of the northern Shikoku Basin are from the present study; the data of the central Shikoku Basin and the Japan Sea are quoted from Mahoney^[57]; the range of Asian terrestrial detritus isotope characteristics is quoted from Lan et al. ^[56] and Asahara et al. ^[20—21]; the range of the isotope characteristics for the northwestern Japanese islands is from Nohda^[44]; the range of the Izu-Bonin Arc isotope characteristics is from Pearce et al. ^[63]; and the range of the volcanic source and the terrestrial source isotope characteristics is from Mahoney (2005) and Meng et al. ^[57,64]. The terrestrial source values of two end members of the mixing curve are: $\text{Sr}_A = 135 \times 10^{-6}$, $\text{Nd}_A = 24.3 \times 10^{-6}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_A = 0.7218$, and $\epsilon_{Nd}(0)_A = 7.10$; and the volcanic source values are: $\text{Sr}_B = 147 \times 10^{-6}$, $\text{Nd}_B = 52.8 \times 10^{-6}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_B = 0.7190$, and $\epsilon_{Nd}(0)_B = -14.3$

5.2 四国海盆全新世沉积物特征

二端元混合过程研究中发现,Sr 和 Nd 混合过程发生的同时伴随着同位素之间的协同变化关系^[52]。Langmuir^[65]给出的任意 Sr-Nd 同位素组成关系的双曲线方程为:

$$aX + bXY + cY + d = 0, \quad (4)$$

式中,

$$a = \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_B \text{Nd}_B \text{Sr}_A - \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_A \text{Nd}_A \text{Sr}_B,$$

$$b = \text{Nd}_A \text{Sr}_B - \text{Nd}_B \text{Sr}_A,$$

$$a = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right)_B \text{Nd}_B \text{Sr}_A - \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right)_A \text{Nd}_A \text{Sr}_B,$$

$$d = \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_A \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right)_B \text{Nd}_A \text{Sr}_B -$$

$$\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_A \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right)_A \text{Nd}_B \text{Sr}_A,$$

式中,X、Y 分别代表混合源沉积物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值;A、B 分别代表两个独立的端元;

Sr_A 、 Sr_B 、 Nd_A 、 Nd_B 分别代表 A、B 端元的 Sr、Nd 元素含量。

由于 X 取值必为正, 式(4)中 Y 可以表达为 X 的函数。将式(4)与式(1)联立, 可得:

$$\epsilon_{Nd}(0) = - \left[\frac{(aX + d)/(bX + c)}{^{143}Nd/^{144}Nd_{CHUR}} + 1 \right] \times 10\ 000. \quad (5)$$

当我们知道两端元组分 A 和 B 中 Nd/Sr 元素比, 就可以得到两同位素的协同关系, 进而半定量的判断物质来源。

以中国大陆硅酸盐物质作为陆源 A, 以伊豆一小笠原物质为火山源 B, 进行二端元混合估算, 参数估计如下:

陆源 A^[20-21, 56]: $Sr_A = 135 \times 10^{-6}$, $Nd_A = 24.3 \times 10^{-6}$, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_A = 0.721\ 8$, $\epsilon_{Nd}(0)_A = 7.10$;

火山源 B^[63]: $Sr_B = 147 \times 10^{-6}$, $Nd_B = 52.8 \times 10^{-6}$, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_B = 0.719\ 0$, $\epsilon_{Nd}(0)_B = -14.3$ 。

根据上述参数估计, 可以得到式(5)的数学表达式, 图 5 中混合曲线即为式(5)的函数图像。可以看出, 日本海盆北部、中部和日本海都基本位于混合曲线的两侧, 表明 3 个地区均是亚洲陆源碎屑物和火山物质(火山源)二端元组成的混合物。使用混合曲线估算法^[66]可得, 整个四国海盆地区陆源碎屑物质贡献大致为 20%~60%, 仅就本次研究所测数据而言, 四国海盆全新世沉积物陆源碎屑物质贡献大致为 40%~60%。然而对于本次研究所测 C0011 站位数据, 发现基本均位于曲线左下方, 表明该地区可能除了主要的二端元组分外, 仍有其他组分的贡献, 需要进一步研究。

四国海盆全新世沉积物上的粒度特征反映了沉积动力环境的波动。C0011 钻孔全新世段从粒度数据上看可以分为 4 部分, 总体来说沉积物粒度比较均一(见图 2), 按照沉积物粒度分类, 以细砂质粉砂沉积物为主。相对于以粉砂、黏土质粉砂、黏土为主的典型深海平原沉积物, 该区域沉积物粒度稍粗, 符合陆坡沉积物特征。C0011 站位于陆坡区域下端, 该区域又有浊流、重力流分布(见图 4), 表明沉积物的确有很大一部分来自于上部陆坡区域。可能输入到四国海盆的细颗粒物的来源有多种, 主要受岛弧火山物质、来自东亚大陆的大气沉降物以及周边陆源输入和水层中生成的颗粒物沉降的影响。四国海盆地区距离亚欧大陆较近, 同时由于季风和西风条件的支撑, 很容易有远源的陆源粉尘沉降于此。所以极小的次级

峰可以作为陆源风成碎屑沉积物源的佐证。

沉积物 Sr-Nd 同位素特征能够反应沉积物物质来源, 而粒度却能作为影响沉积物 Sr 同位素特征的重要因素。Douglas 等^[67]研究发现 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值随着河流沉积物粒度的减小而减小; 但是 Asahara 等^[68]和 杨杰东等^[41]的研究却表明在加酸处理后, 随着酸不溶物粒度的减小, 沉积物中 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值却逐渐增大, 且在黏土粒级物质中比值最高。所以, 采自于同一地点的四国海盆全新世沉积物的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值不同, 有可能反映了在粒度组成上的差异。该站位 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和沉积物平均粒径随深度的变化(见图 2)具有良好的负相关关系: 随着 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值的增大, 沉积物平均粒径逐渐减小(Φ 值逐渐增加); 而随着 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值的减小, 沉积物平均粒径逐渐增加(Φ 值逐渐减小)。平均粒径能够反映沉积过程中的水动力条件变化和物源变化。 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值增加, 代表亚洲大陆老的陆源成分对于沉积物贡献增加, 但是平均粒径逐渐减小, 表明在 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值增加时, 可能是陆源风成碎屑物质对于沉积物组分贡献逐渐增加, 而相对来说在沉积物粒径最大时, 水动力条件的加强可能代表了相应地质事件(例如火山活动)导致的火山灰、火山碎屑等年轻地壳或者转换型地壳导致的快速沉积过程。另外, 陆相物质在输运过程中的分选作用可能会改变 Sr/Nd 元素的比值, 进而影响混合曲线, Feng 等^[69]给出粒度结果对于亚洲风尘的 Sr/Nd 元素的比值具有大约 $\pm 20\%$ 的影响。所以在考虑端元模型估算比值时, 如果加上粒度的影响因素, 整体四国海盆北部全新世陆源碎屑物质组分含量大致为 $(40\% \pm 8\%) \sim (60\% \pm 12\%)$ 。

从整个全新世时期 Sr-Nd 同位素及粒度参数的变化规律来看(见图 2), $^{87}Sr/^{86}Sr$ 与 ϵ_{Nd} 、平均粒径的负相关关系反映了沉积物中陆源物质的相对贡献呈现增加→减小→增加→减少的多周期变化趋势。已有研究表明, 粒度指标和许多同位素指标有对气候变化具有一定指示意义^[70-72]。因此, 本次研究得到的 Sr-Nd 同位素和粒度指标与古气候指标的对应关系, 以及是否对于全新世气候具有指示意义, 可以进一步加以研究。

5.3 生物及自生矿物组分对于物源的影响

沉积物中生物源是一项重要的物源贡献, 生物在沉积物中的运动以及生物死亡后介壳在沉积物中的保留都会对沉积物中同位素特征造成影响^[73-74]。岩心进行 X 射线照相可以观察生物的穿透深度等^[74],

进而可以了解研究区生物扰动现象。IODP 333 航次报告^[33]中岩芯照片显示,表层沉积物层理保存较为完好,并没有明显的生物洞穴等特征。Harada 和 Shibamoto^[75]使用²¹⁰Pb 方法研究表明,四国海盆地区生物扰动作用非常微弱。此外,生物扰动作用引起沉积物的扩散混合和非原地混合,平滑沉积物记录和古海洋信息。Xu 等^[76]研究表明,西菲律宾海地区沉积物中生物作用导致的沉积很少。本次研究数据表明,C0011 站位表层沉积物样品同位素和粒度特征变化显著,并无平滑特征。因此,研究中选取的 8 mm 采样间隔是能够反应得到较为准确的沉积记录,反应全新世时期该区域的沉积物物质来源的变化。

此外,沉积物样品前处理过程对生物源物质的分离方法也有多种。国内外学者曾经运用多种浓度的 HCl(0.1、0.5、1、2.5 mol/L)和 HAc(0.5、1 mol/L)处理不同沉积物样品^[21,41,64,77-78]。考虑到沉积物 Sr 同位素组成容易受到自生矿物的影响,实验过程中我们用 1 mol/L HAc 处理样品,用于分离碳酸盐组分和碎屑组分。盛雪芬等^[79]在利用实验方法分析了黄土和沉积岩中不同浓度盐酸和醋酸对于碳酸盐物质的淋溶情况,表明 1 mol/L 的 HAc 基本与 1 mol/L 的 HCl 溶解的 CaO、MgO 物质相同,同时不会破坏黏土矿物(尤其是硅酸盐矿物)的结构而使过多的 Sr 同位素释放出来。该实验同时表明,1 mol/L 的 HAc 对于沉积物中的 Fe、Mn 类物质有较好的析出作用。Mao 等^[36]在探讨长江下游悬浮物 Sr-Nd 同位素组成时使用 0.5 mol/L 的醋酸分离了碳酸盐组分。IODP 333 航次报告中矿物分析显示,C0011C-1H 样品中 SiO₂ 含量超过 60%,而 Fe₂O₃ 含量不足 6%,MnO 含量仅为 0.06%,表明该钻孔沉积物种自生 Fe、Mn 组分对于 Sr-Nd 同位素特征值影响有限^[33]。本次研究中碳酸盐组分的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值基本位于 0.709 2 左右,与现代大洋的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值基本相同,证实自生 Fe、Mn 组

分对于 Sr 同位素的影响非常小,该海区全新世时期沉积物中碳酸盐岩组分代表了当时海水自生沉积矿物的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 组成。所以残留物的 Sr-Nd 同位素比值可近似为硅酸盐碎屑组分的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值^[68]。

6 结论

(1)在分离自生碳酸盐组分后,四国海盆全新世沉积物呈现较好的陆源、火山源二端元组分特征。

(2)四国海盆北部沉积物与海盆中部沉积物、日本海沉积物对比,海盆中部沉积物 ϵ_{Nd} 值较其他两者更为负偏,反应更多的亚洲大陆陆源碎屑沉积物贡献。海盆北部与日本海沉积物 Nd 同位素特征近似,而⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 范围日本海样品较四国海盆北部更高,反应相对更多的亚洲大陆陆相沉积物的体现。

(3)⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 ϵ_{Nd} 、平均粒径的负相关关系反映了沉积物中陆源物质的相对贡献呈现增加、减小、增加、减少的多周期变化趋势。

(4)从地理位置看,四国海盆北部主要物质来源包括伊豆一小笠原海脊火山物质、日本列岛西南部的混合型沉积物以及由西向风或河流入海洋流输送带来的亚洲大陆陆相沉积物。仅从同位素特征看,日本列岛西南部对于该区域物质贡献最大。

致谢:IODP 333 航次全体科学家及“地球号”科学钻探船全体船员和技术人员为样品采集和航次报告付出了辛勤的努力;南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室濮巍工程师对 Sr-Nd 同位素实验操作过程提供了帮助;周亮、冯晗、赵秧秧、王丹丹、李润祥、朱冬、许振在论文讨论和写作过程中给予了宝贵的意见和建议;审稿专家对本文初稿提出了建设性的修改意见。谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 许淑梅,张晓东,翟世奎. 四国海盆起源与沉积环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质,2004,24(2): 119-123.
Xu Shumei, Zhang Xiaodong, Zhai Shikui. The origin and sedimentary environment evolution of the Shikoku Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(2): 119-123.
- [2] Russell R D. Effects of transportation on sedimentary particles[J]. Recent Marine Sediments. The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1939; 32-47.
- [3] Doeglas D J. Grain-size indices, classification and environment[J]. Sedimentology, 1968, 10(2): 83-100.
- [4] Visser G S. Grain size distributions and depositional processes[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1969, 39(3): 1074-1106.
- [5] McLaren P. An interpretation of trends in grain size measures[J]. Journal of Sedimentary Research, 1981, 51(2): 611-624.
- [6] Gao S, Collins M B. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments[J]. Journal of Coastal Research, 1994, 10(1): 70-78.

- [7] An Z S, Kukla G, Porter S C, et al. Late Quaternary dust flow on the Chinese loess plateau[J]. *Catena*, 1991, 18(2): 125—132.
- [8] Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 156(1): 245—284.
- [9] McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[J]. *Special Papers-Geological Society of America*, 1993, 284: 21—40.
- [10] Goldstein S L, Hemming S R. Long-lived isotopic tracers in oceanography, paleoceanography, and ice-sheet dynamics[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 6: 453—489.
- [11] Grousset F E, Biscaye P E, Zindler A, et al. Neodymium isotopes as tracers in marine sediments and aerosols: North Atlantic[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 87(4): 367—378.
- [12] Chen J, Li G, Yang J, et al. Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: Implications for the provenances of Asian dust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(15): 3904—3914.
- [13] Grousset F E, Biscaye P E. Tracing dust sources and transport patterns using Sr, Nd and Pb isotopes[J]. *Chemical Geology*, 2005, 222(3/4): 149—167.
- [14] Taylor S R, McLennan S M. *The continental crust: its composition and evolution*[M]. London: Blackwell, 1985.
- [15] Castillo P R. Origin of the adakite-high-Nb basalt association and its implications for postsubduction magmatism in Baja California, Mexico[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, 120(3/4): 451—462.
- [16] Walter H J, Hegner E, Diekmann B, et al. Provenance and transport of terrigenous sediment in the South Atlantic Ocean and their relations to glacial and interglacial cycles: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(22): 3813—3827.
- [17] Kessarkar P M, Rao V P, Ahmad S M, et al. Clay minerals and Sr-Nd isotopes of the sediments along the western margin of India and their implication for sediment provenance[J]. *Marine Geology*, 2003, 202(1): 55—69.
- [18] Rao W B, Chen J, Tan H B, et al. Sr-Nd isotopic and REE geochemical constraints on the provenance of fine-grained sands in the Ordos deserts, north-central China[J]. *Geomorphology*, 2011, 132(3): 123—138.
- [19] Nakai S, Halliday A N, Rea D K. Provenance of dust in the Pacific Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 119(1/2): 143—157.
- [20] Asahara Y, Tanaka T, Kamioka H, et al. Provenance of the north Pacific sediments and process of source material transport as derived from Rb-Sr isotopic systematics[J]. *Chemical Geology*, 1999, 158(3): 271—291.
- [21] Asahara Y. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variation in north Pacific sediments: a record of the Milankovitch cycle in the past 3 million years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171(3): 453—464.
- [22] 孟宪伟, 杜德文, 吴金龙. 冲绳海槽中段表层沉积物物质来源的定量分离: Sr-Nd 同位素方法[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(3): 319—326.
Meng Xianwei, Du Dewen, Wu Jinlong. Quantitative partition of mixed surface sediments from the middle Okinawa Trough into their end-members using Sr-Nd isotope[J]. *Oceanologica et Limnologica Sinica*, 2001, 32(3): 319—326.
- [23] Li T, Masuzawa T, Kitagawa H. Seasonal variations in settling fluxes of major components in the oligotrophic Shikoku Basin, the western North Pacific: coincidence of high biogenic flux with Asian dust supply in spring[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 91(1): 187—210.
- [24] Amakawa H, Nozaki Y, Alibo D S, et al. Neodymium isotopic variations in Northwest Pacific waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(4): 715—727.
- [25] Shipboard Scientific Party. Leg 190 Preliminary Report: Deformation and fluid flow processes in the Nankai Trough accretionary prism[R]. ODP Prelim. 2000; 190.
- [26] 高抒, 全体船上科学家. IODP 333 航次: 科学目标, 钻探进展与研究潜力[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(12): 1290—1299.
Gao Shu, Shipboard Scientific Party. IODP 333: Scientific objectives, drilling progress and research potentials[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(12): 1290—1299.
- [27] Karig D E. Basin genesis in the Philippine Sea[R]. *Initial Reports of the Deep sea Drilling Project*, 1975, 31: 857—879.
- [28] 吴时国, 喻普之. *海底构造学导论*[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Wu Shiguo, Yu Puzhi. *Introduction to the Seabed Tectonics*[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [29] Kobayashi K, Nakada M. Magnetic anomalies and tectonic evolution of the Shikoku interarc basin[J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1978, 26: 391—402.
- [30] Taira A, Niitsuma N. Turbidite sedimentation in the Nankai Trough as interpreted from magnetic fabric, grain size, and detrital modal analyses [C]. *Init. Repts. DSDP, 87: Washington (U. S. Govt. Printing Office)*, 1986: 611—632.
- [31] Shimamura K. Sedimentation and Tectonics of Zenisu Ridge, Eastern Nankai Trough and Suruga Trough Regions[J]. *The Science Reports of the Tohoku University. Second series, Geology*, 1988, 58(2): 107—167.
- [32] Saito S, Underwood M B, Kubo Y, et al. NanTroSEIZE Stage 2: subduction inputs[C]. *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, vol. 322. Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., Tokyo*, 2009.
- [33] Henry P, Kanamatsu T, Moe K, et al. *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, volume 333 Expedition reports. NanTroSEIZE stage 2: subduction inputs 2 and heat flow. Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., Tokyo*, 2012.
- [34] Jia J J, Wang Y P, Gao S, et al. Interpreting grain-size trends associated with bedload transport on the intertidal flats at Dafeng, central Jiangsu coast[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(3): 341—351.

- [35] 蒋少涌,凌洪飞,杨競红,等. 热液成矿作用同位素示踪与定年[C]//同位素地质新进展: 技术,方法,理论与应用学术研讨会论文集(摘要)集,2003.
Jiang Shaoyong,Ling Hongfei,Yang Jinghong,et al. Hydrothermal mineralization and isotopic tracer dating[C]//Isotope Geology Progress: technology,methods,theories and applications Symposium Proceedings (abstracts),2003.
- [36] Mao C P,Chen J,Yuan X Y,et al. Seasonal variations in the Sr-Nd isotopic compositions of suspended particulate matter in the lower Changjiang River: Provenance and erosion constrains[J]. Chinese Science Bulletin,2011,56(22): 2371-2378.
- [37] 靳宁. 帕里西维拉海盆西北部海域粘土矿物分布特征研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所,2006.
Jin Ning. Clay mineral distribution in the sediments of the northwest Parece Vela Basin[D]. Qingdao:Institute of Oceanology,Chinese Academy of Sciences,2006.
- [38] Depaolo D J,Wasserburg G J. Nd isotopic variations and petrogenetic models[J]. Geophysical Research Letters,1976,3(5): 249-252.
- [39] Palmer M R,Edmond J M. The strontium isotope budget of the modern ocean[J]. Earth and Planetary Science Letters,1989,92(1): 11-26.
- [40] Pettke T,Halliday A N,Hall C M,et al. Dust production and deposition in Asia and the north Pacific Ocean over the past 12 Myr[J]. Earth and Planetary Science Letters,2000,178(3): 397-413.
- [41] 杨杰东,陈骏,张兆峰,等. 距今 7 Ma 以来甘肃灵台剖面 Nd 和 Sr 同位素特征[J]. 地球化学,2005,34(1): 1-6.
Yang Jiedong,Chen Jun,Zhang Zhaofeng,et al. Variations in $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of Lingtai profile over the past 7 Ma[J]. Geochimica, 2005,34(1): 1-6.
- [42] 沈渭州. 同位素地质学教程[M]. 北京: 原子能出版社,1994.
Shen Weizhou. Isotope Geology Tutorial[M]. Beijing:Automic Energy Press,1994.
- [43] Depaolo D J,Linn A M,Schubert G. The continental crustal age distribution; methods of determing mantle separation ages from Sr-Nd isotopic data and application to the southwestern United States[J]. Journal of Geophysical Research,1991,96(B2): 2071-2088.
- [44] Nohda S,Wasserburg G J. Nd and Sr isotopic study of volcanic rocks from Japan[J]. Earth and Planetary Science Letters,1981,52(2): 264-276.
- [45] Straub S M,Goldstein S L,Class C,et al. Slab and Mantle controls on the Sr-Nd-Pb-Hf isotope evolution of the post 42 Ma Izu-Bonin volcanic arc [J]. Journal of Petrology,2010,51(5): 993-1026.
- [46] Jahn B M. Accretionary orogen and evolution of the Japanese Islands: Implications from a Sr-Nd isotopic study of the Phanerozoic granitoids from SW Japan[J]. American Journal of Science,2010,310(10): 1210-1249.
- [47] Morris P A,Kagami H. Nd and Sr isotope systematics of Miocene to Holocene volcanic rocks from Southwest Japan: volcanism since the opening of the Japan Sea[J]. Earth and Planetary Science Letters,1989,92(3/4): 335-346.
- [48] Isozaki Y,Maruyama S,Furuoka F. Accreted oceanic materials in Japan[J]. Tectonophysics,1990,181(1/4): 179-205.
- [49] Nakamura E,Mcculloch M T,Campbell I H. Chemical geodynamics in the back-arc region of Japan based on the trace element and Sr-Nd isotopic compositions[J]. Tectonophysics,1990,174(3): 207-233.
- [50] Kagami H,Iizumi S,Tainosho Y,et al. Spatial variations of Sr and Nd isotope ratios of Cretaceous-Paleogene granitoid rocks,Southwest Japan Arc [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology,1992,112(2/3): 165-177.
- [51] Hickey-Vargas R. Basalt and tonalite from the Amami Plateau,northern West Philippine Basin: New Early Cretaceous ages and geochemical results,and their petrologic and tectonic implications[J]. Island Arc,2005,14(4): 653-665.
- [52] Faure G. Principles of Isotope Geology[M]. New York: John Wiley & Sons,1977.
- [53] Janecek T R,Rea D K. Eolian deposition in the northeast Pacific Ocean; Cenozoic history of atmospheric circulation[J]. Geological Society of America Bulletin,1983,94(6): 730-738.
- [54] Rea D K,Leinen M,Janecek T R. Geologic approach to the long-term history of atmospheric circulation[J]. Science,1985,227(4688): 721-725.
- [55] Jones C E,Halliday A N,Rea D K,et al. Neodymium isotopic variations in North Pacific modern silicate sediment and the insignificance of detrital REE contributions to seawater[J]. Earth and Planetary Science Letters,1994,127(1/4): 55-66.
- [56] Lan C Y,Lee T,Zhou X H,et al. Nd isotopic study of Precambrian basement of South Korea; Evidence for Early Archean crust? [J]. Geology, 1995,23(3): 249-252.
- [57] Mahoney J B. Nd and Sr isotopic signatures of fine-grained clastic sediments: A case study of western Pacific marginal basins[J]. Sedimentary Geology,2005,182(1/4): 183-199.
- [58] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography,1970,46: 234-240.
- [59] Nagano A,Ichikawa K,Ichikawa H,et al. Volume transports proceeding to the Kuroshio Extension region and recirculating in the Shikoku Basin [J]. Journal of Oceanography,2013,69(3): 285-293.
- [60] Underwood M B,Steurer J F. Composition and sources of clay from the trench slope and shallow accretionary prism of Nankai Trough[C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program,Scientific Results,2003,190/196: 1-28.
- [61] Utsunomiya A,Jahn B,Okamoto K,et al. Intra-oceanic island arc origin for Iratsu eclogites of the Sanbagawa belt,central Shikoku,southwest Japan[J]. Chemical Geology,2011,280(1/2): 97-114.
- [62] Pickering K T,Underwood M,Saito S,et al. T11A-2520: Depositional architecture,provenance and tectonic setting of Miocene submarine fans in the Shikoku Basin; Results from IODP Expedition 322[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. London,United Kingdom.

- [63] Pearce J A, Kempton P D, Nowell G M, et al. Hf-Nd element and isotope perspective on the nature and provenance of mantle and subduction components in Western Pacific arc-basin systems[J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40(11): 1579–1611.
- [64] 孟宪伟, 杜德文, 陈志华, 等. 长江、黄河流域泛滥平原细粒沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr空间变异的制约因素及其物源示踪意义[J]. *地球化学*, 2000, 29(6): 562–570.
- Meng Xianwei, Du Dewen, Chen Zhihua, et al. Factors controlling spatial variations of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr in the fine-grained sediments from the overbanks of the Yellow River and Yangtze River and its implication for provenance of marins sediments[J]. *Geochimica*, 2000, 29(6): 562–570.
- [65] Langmuir C H, Vocke Jr R D, Hanson G N, et al. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 37(3): 380–392.
- [66] Jiang F, Frank M, Li T, et al. Asian dust input in the western Philippine Sea: Evidence from radiogenic Sr and Nd isotopes[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(5): 1538–1551.
- [67] Douglas G B, Gray C M, Hart B T, et al. A strontium isotopic investigation of the origin of suspended particulate matter (SPM) in the Murray-Darling River system, Australia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(18): 3799–3815.
- [68] Asahara Y, Tanaka T, Kamioka H, et al. Asian continental nature of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios in north central Pacific sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 133(1): 105–116.
- [69] Feng J L, Zhu L P, Zhen X L, et al. Grain size effect on Sr and Nd isotopic compositions in eolian dust: Implications for tracing dust provenance and Nd model age[J]. *Geochemical Journal*, 2009, 43(2): 123–131.
- [70] Grootos P M, Stulvor I V I, Whltoi J W C. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores[J]. *Nature*, 1993, 366(6455): 552–554.
- [71] Von Grafenstein U, Erlenkeuser H, Brauer A, et al. A mid-European decadal isotope-climate record from 15,500 to 5000 years BP[J]. *Science*, 1999, 284(5420): 1654–1657.
- [72] Vandenberghe J, Zhisheng A, Nugteren G, et al. New absolute time scale for the Quaternary climate in the Chinese loess region by grain-size analysis[J]. *Geology*, 1997, 25(1): 35–38.
- [73] 孟宪伟, 杜德文, 程振波. 冲绳海槽有孔虫壳体的微量元素 Sr-Nd 同位素地球化学[J]. *海洋学报*, 2001, 23(2): 62–68.
- Meng Xianwei, Du Dewen, Cheng Zhenbo. Trace elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of foraminifera shell of the Okinawa Trough[J]. *Haiyang Xuebao*, 2001, 23(2): 62–68.
- [74] 杨群慧, 周怀阳, 季福武, 等. 海底生物扰动作用及其对沉积过程和记录的影响[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 932–941.
- Yang Qunhui, Zhou Huaiyang, Ji Fuwu, et al. Bioturbation in seabed sediments and its effects on marine sedimentary processes and records[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 932–941.
- [75] Harada K, Shibamoto Y. Excess ²¹⁰Pb in the sediment and benthic biological activity in the western North Pacific[C]//Proceedings of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu, Japan: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002: 407–412.
- [76] Xu Z K, Li T G, Yu X K, et al. Sediment provenance and evolution of the East Asian winter monsoon since 700 ka recorded by major elements in the West Philippine Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(9): 1044–1052.
- [77] Borg L E, Banner J L. Neodymium and strontium isotopic constraints on soil sources in Barbados, West Indies[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(21): 4193–4206.
- [78] Galy A, France-Lanord C, Derry L A. The strontium isotopic budget of Himalayan rivers in Nepal and Bangladesh[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(13): 1905–1925.
- [79] 盛雪芬, 杨杰东, 李春雷, 等. 黄土和沉积岩中分离方解石和白云石的方法实验[J]. *岩矿测试*, 2000, 19(4): 264–267.
- Sheng Xuefen, Yang Jiedong, Li Chunlei, et al. A method for separation of calcite and dolomite on loess and sedimentary rocks[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2000, 19(4): 264–267.

Analysis on the Holocene sediment supply to the Shikoku Basin, northern Philippine Sea

Han Zhuochen¹, Gao Shu^{1,2}, Li Yanping²

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory for Coast and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Grain size and Sr-Nd isotope analyses are carried out for the core C0011 samples, the northern Shikoku

Basin, obtained from the IODP Expedition 333. The results are used for a comparative study with the isotope data obtained from adjacent areas. The Holocene sediment in the Shikoku Basin shows the characteristics of two-end member mixing processes, i. e., the terrestrial constituent and the volcanic source. In terms of the geographical location, the material supply to the Shikoku Basin mainly consists of volcanic materials from the Izu-Bonin Arc, the mixing-type sediment from the northwest Japanese islands, and terrestrial sediment transported by the prevailing westerly winds, monsoon or rivers from the Asian mainland. In general, the materials from the northwest Japanese islands represent the largest contribution. In comparison with the sediment from the central Shikoku Basin and the Japan Sea, the sedimentary materials from the northern Basin display a relatively large contribution by terrestrial sources. Based upon the negative correlation between $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and ϵ_{Nd} , together with the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and mean grain size, the relative contribution of terrestrial sources indicates a multi-periodic variation pattern as increase, decrease, increase, decrease, according to the chronological sequence.

Key words: Holocene deposits; Sr-Nd isotope characteristics; grain size; sediment supply; Shikoku Basin