

张丹丹,曾志刚,殷学博. 冲绳海槽中部沉积物物质来源和沉积环境分析[J]. 海洋学报, 2017, 39(7): 92-101, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.07.009

Zhang Dandan, Zeng Zhigang, Yin Xuebo. Analysis on sediment provenance and environmental changes in the middle Okinawa Trough [J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(7): 92-101, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.07.009

冲绳海槽中部沉积物物质来源和沉积环境分析

张丹丹^{1,2,3}, 曾志刚^{1,2,3*}, 殷学博¹

(1.中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 260071; 2.青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266061; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文基于 AMS¹⁴C 高精度测年, 通过对柱状沉积物 HOBAB2-S2 的粒度、微量元素和稀土元素的分析, 对冲绳海槽中部区 5 300 a 以来的物质来源和沉积环境进行了研究。通过对该孔的稀土元素与微量元素的研究发现研究区沉积物具有陆源属性, 并且通过不同物源区沉积物的稀土元素散点图表明 5 300 a 以来沉积物主要来自于台湾。文中将粒度特征作为研究区域沉积环境, 尤其是水动力(黑潮)强弱的指示参数, 根据粒度变化曲线, 可将沉积过程分为 4 个阶段: 第一阶段(5.30~3.81 ka BP), 粒径由粗变细, 黑潮强度逐渐减小; 第二阶段(3.81~2.70 ka BP), 粒径波动较大, 无明显增大或减小趋势, 表明沉积环境处于相对波动状态, 水动力强弱不稳定; 第三阶段(2.70~0.97 ka BP), 粒径变化较小, 表明沉积环境处于相对稳定状态, 研究区的水动力条件较稳定; 第四阶段(从 0.97 ka BP 至今), 粒径逐渐变粗, 水动力条件增强。

关键词: 冲绳海槽; 物质来源; 微量元素; 粒度; 沉积环境

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2017)07-0092-10

1 引言

冲绳海槽位于东海大陆架和琉球岛弧之间, 是西太平洋边缘正在扩张的典型的弧后盆地(图 1), 是菲律宾板块向欧亚板块俯冲的结果^[3]。海槽内发育有连续的厚层沉积物, 包含着晚第四纪以来区域环境与气候变化的丰富信息, 使其成为研究沉积环境演化的理想区域。

由于冲绳海槽与我国大陆和西太平洋连接, 槽内火山、地震和热液活动频发^[4-8], 而且受到黑潮和沿

岸流(尤其是黄河和长江)的影响^[9-11], 造成了冲绳海槽地区复杂的沉积环境和多样的物质来源。前人对冲绳海槽的物质来源进行了大量的研究, 研究手段包括矿物学、古海洋学、环境地磁学以及地球化学等^[12-16], 指出该地区的沉积物主要为陆源物质, 对晚第四纪以来输入的陆源物质的来源有两种观点: 一种观点认为沉积物来自于中国大陆河流, 尤其是长江和黄河^[11] 以及东海陆架物质通过底流的侧向输入^[17-19], 另一种观点则认为沉积物质主要来自于台湾^[12,20], 特别是黑潮主轴重新进入冲绳海槽之后, 黑

收稿日期: 2016-10-08; 修订日期: 2016-12-15。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB429700); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA11030302); 国家自然科学基金项目(41325021); 泰山学者工程专项(ts201511061); 青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山人才”计划项目(2015ASTP-0S17); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2015ASKJ03)。

作者简介: 张丹丹(1990—), 女, 山东省德州市人, 主要从事海洋沉积学研究。E-mail: ddan_zhang@163.com

* 通信作者: 曾志刚, 研究员, 主要从事海洋地球化学研究。E-mail: zgzheng@ms.qdio.ac.cn

潮对陆架物质向冲绳海槽输送的阻隔使得中国东部物质很难搬运至海槽内^[21]。由于冲绳海槽地区的复杂性 with 物质来源的多样性,使物质来源问题仍存在争议,本文将根据稀土元素及微量元素等指标对冲绳海

槽中部柱状样 S2 进行深入的物源分析,并结合粒度数据,对该地区的沉积环境,尤其是水动力条件的强弱进行分析,对 5 300 a 以来冲绳海槽中部的沉积环境的变化提供沉积学依据。

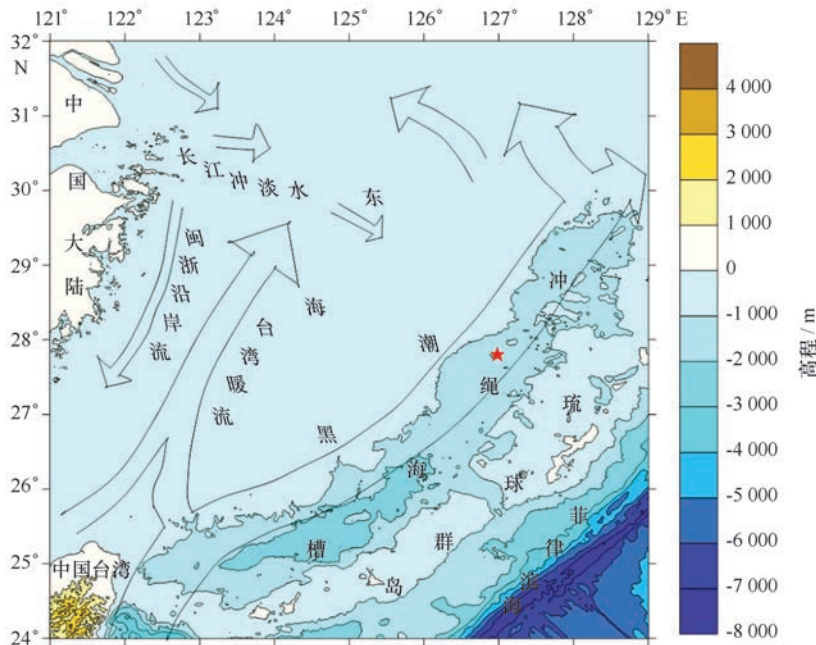


图1 沉积物岩心 HOBAB2-S2 的位置以及东海和冲绳海槽地区的洋流图(区域洋流情况改自 Huh 和 Su^[1] 及 Yu 等^[2])

Fig.1 Schematic of the location of Core HOBAB2-S2 and regional circulation in East China Sea and the middle Okinawa Trough.

(The regional circulation pattern in the East China Sea and the adjacent areas are sourced from Huh and Su^[1], Yu et al. ^[2])

2 材料与方法

2.1 材料

本文所研究的样品为柱状样岩心 HOBAB2-S2,是 2014 年在冲绳海槽中部地区由中国科学院海洋研究所(IOCAS)科考船“科学号”通过重力活塞取样器获取的。取样地点为 27°48′08.984″N, 126°58′59.979″E,水深 1 330 m,该区域水系条件复杂,受黑潮和其他洋流的影响(改自 Huh 和 Su^[1] 及 Yu 等^[2]) (图 1)。

柱状样沉积物 S2 全长 59 cm,可将其人为分成两段:0~13 cm 和 13~59 cm。上段为灰黄色,下段呈现灰绿色。在 16~17 cm 层,存在明显的裂隙,从 46~59 cm,含水量逐渐降低,详细样品描述见图 2。对图 2 中岩心 S2 沉积物样品以 1 cm 为间隔进行分样,共分得 59 个沉积物子样品。

2.2 实验方法

2.2.1 微量元素和稀土元素测试

微量元素和稀土元素测试分析以 1 cm 一个子样

品进行测试,将沉积物样品使用纯水清洗 3 次,然后在 105℃ 温度下烘干 24 h,然后使用玛瑙研钵研磨至大于 200 目,称取 40 mg 于 Teflon 罐中,加入硝酸和氢氟酸,加热,使其溶解为止,最后用 DDW(双蒸水)稀释至 40 g,使用 ICP-MS 上机测试。测试在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室进行,选取美国地质调查局和中国岩石与沉积物标准物质 BCR-2、BHVO-2、GBW07316 和 GBW07315 作为标准,每隔 10 个样品设置一个平行样,标准物质每隔 30 个样品重复测试,ICP-MS 的检出限为 $10^{-12} \sim 10^{-9}$ g/g,分析误差小于 5%。

2.2.2 粒度测试

粒度以 1 cm 一个子样品进行测试分析,共 59 个样品,每隔 10 个设置一个平行样。每个子样品取干样约 200~300 mg 于离心管中,使用 30% 的 H_2O_2 和 10% 的 CH_2COOH 分别去除沉积物中的有机质和碳酸盐。然后使用六偏磷酸钠将样品分散,上机测试。测试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粒度分析仪(Cilas 1190L)进行,粒度检测

范围为 $0.04 \sim 2\ 500\ \mu\text{m}$, 重复测量的相对误差小于 2%。

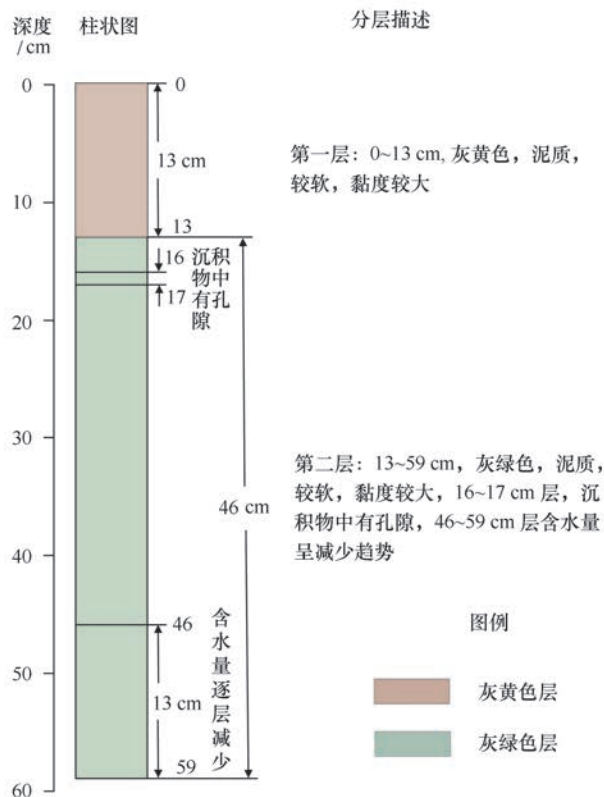


图 2 沉积物岩心的分层描述图

Fig.2 Profile of sediment Core HOBAB-S2

2.2.3 AMS¹⁴C 定年

根据粒度数据分析, 选取了 4 个特征层位, 进行有孔虫 AMS¹⁴C 定年。4 个层位分别为 12~13 cm、32~33 cm、46~47 cm 和 57~58 cm, 挑选每个层位沉积物中的浮游有孔虫混合种 (*Neogloboquadrina dutertrei*、*Globorotalia menardii* 和 *Globigerinoides sacculifer*), 不少于 10 mg, 将有孔虫壳体清洗干净, 且完整, 以保证定年数据的准确性。将样品送往美国 Beta 公司测试, 所得数据利用 Calib 7.1.0 程序^[22] 进行日历年龄校正。

3 结果

3.1 稀土元素组成特征

稀土元素(REE)由于物理和化学性质的差别, 可分为两组, 即轻稀土元素(LREE)和重稀土元素(HREE), 含量分别使用 $\sum\text{REE}$ 、 $\sum\text{LREE}$ 和 $\sum\text{HREE}$ 来表示稀土元素总含量、轻稀土元素含量和重稀土元素含量。REE 相关参数变化情况见图 3。可以看出,

S2 孔沉积物垂向上 $\sum\text{REE}$ 、 $\sum\text{LREE}$ 和 $\sum\text{HREE}$ 变化较大, 尤其是 $\sum\text{REE}$ 和 $\sum\text{LREE}$, 二者表现为高度的一致性变化趋势, 3 个参数的变化范围分别为 $135 \sim 155\ \mu\text{g/g}$ 、 $120 \sim 139\ \mu\text{g/g}$ 和 $14 \sim 18\ \mu\text{g/g}$ 。

经球粒陨石标准化^[23]后的配分模式, 如图 4a 所示, 总体上表现出轻稀土元素富集而重稀土元素一端较平稳的特征, δCe 平均值为 0.97, 无明显的 Ce 异常, δEu 平均值为 0.62, 表现为中度负异常^[24], 与典型的上陆壳平均物质相比, 如全球上地壳平均(UCC)^[25]、北美页岩(NASC)^[26], S2 孔的沉积物的 REE 配分形式与它们非常一致(图 4a), 表明冲绳海槽沉积物表现出较强的上陆壳物质组成特征。另外对 S2 孔的稀土元素进行上陆壳标准化(图 4b, 图 3), 从图 4b 可看出 S2 孔沉积物的 REEs 配分形式变化具有一致性, 其轻重稀土分馏($\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$)、轻稀土内部分馏 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{UCC}}$ 和重稀土内部分馏 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 的垂直变化如图 3 所示, 三者变化较大, 变化趋势几乎同步。

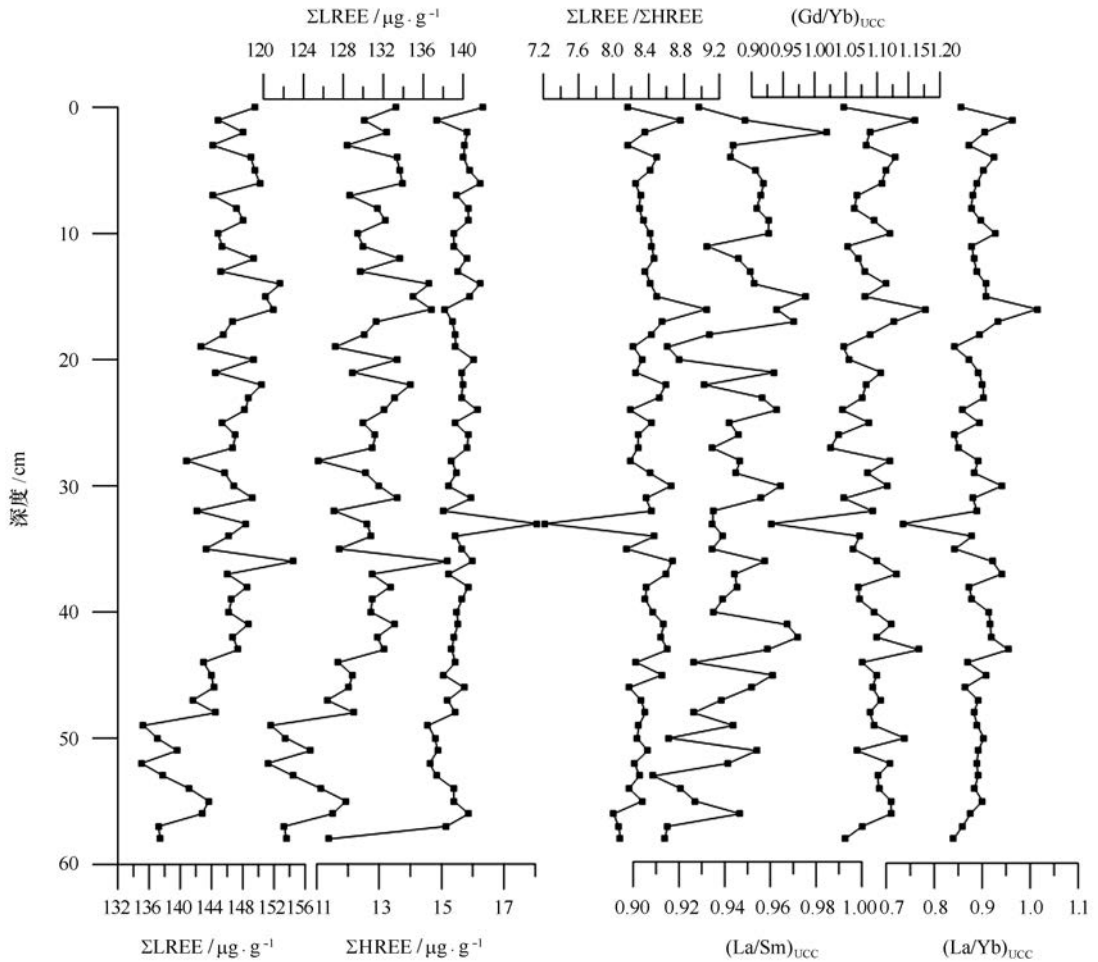


图3 HOBAB2-S2孔 REE 参数

Fig.3 Profile of REE parameters in Core HOBAB2-S2

3.2 AMS¹⁴C 定年数据

S2 孔岩心沉积物的年龄模式以测试的 4 个层位的年龄(表 1)为基础,使用线性内插方法确定其他层位的沉积物年龄,从而获得整个柱状样的沉积序列。岩心 S2 的 AMS¹⁴C 年代模式与沉积速率如图 5。S2 沉积物记录了约 5 300 a 以来冲绳海槽的沉积环境变

化历史,从 S2 的年龄测试可以看出,沉积速率变化较大,在 7.4~12.57 cm/ka 范围内波动,约 5.3~3.813 ka BP 以来,沉积速率最低,为 7.4 cm/ka,随后沉积速率增大至 12.57 cm/ka,2.699~0.972 ka BP 期间,沉积速率稍有降低,约为 11.58 cm/ka;从 0.972 ka BP 至今,沉积速率为 12.35 cm/ka。

表 1 HOBAB2-S2 孔 AMS¹⁴C 年代数据与样品分辨率Tab.1 AMS¹⁴C data of Core HOBAB2-S2 and their resolution

深度/m	样品	AMS ¹⁴ C 年龄/a	日历年龄/a	±1σ/a
12~13	planktonic foraminifer (mixed species)	1 440±30	972	919~1 015
32~33	planktonic foraminifer (mixed species)	2 930±30	2 699	2 658~2 747
46~47	planktonic foraminifer (mixed species)	3 870±30	3 813	3 745~3 879
57~58	planktonic foraminifer (mixed species)	4 970±30	5 300	5 247~5 360

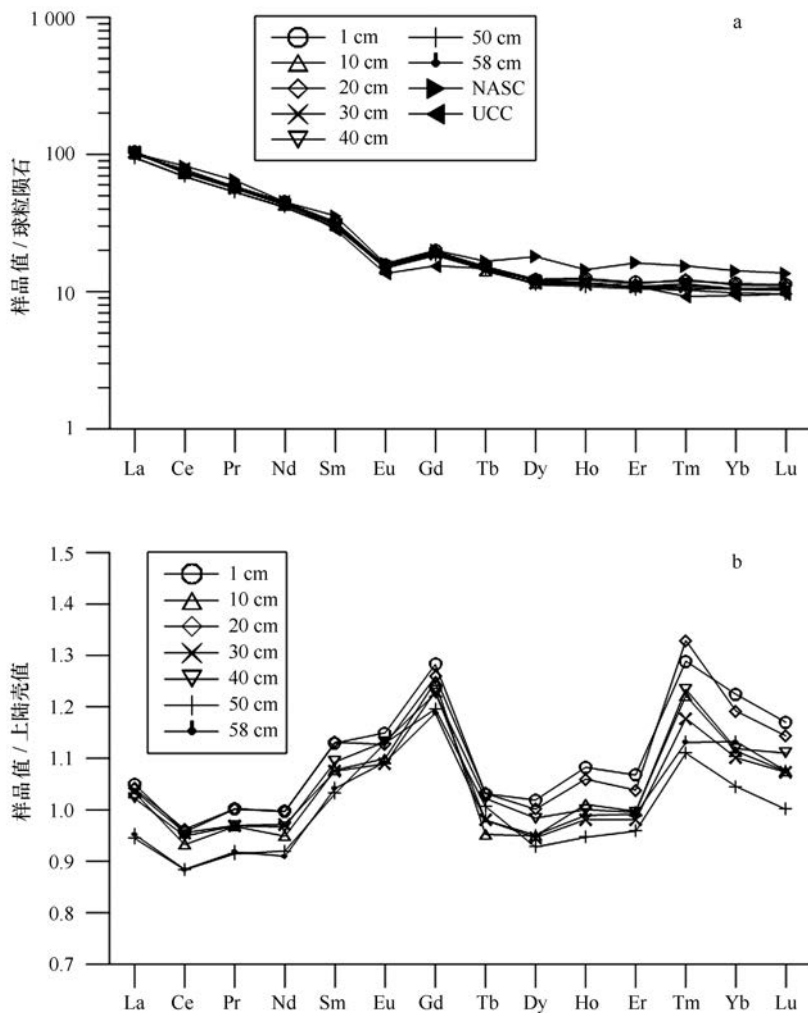


图 4 球粒陨石(a)和上陆壳(b)标准化的 REE 配分形式

Fig.4 Chondrite-normalized distribution patterns of REE (a) and UCC-normalized distribution patterns of REE (b) of the sediment core

3.3 粒度

将实验测试获得的原始粒度数据利用矩法公式^[27]计算,得到沉积物的平均粒径和分选系数等粒度参数(图 6),并根据 Udden—Wentworth^[28] 粒级分类标准,将沉积物组分划分为黏土、粉砂和砂(图 6)。从图中可以看出,平均粒径大约在 9.79~11.74 μm 之间变动,分选系数在 1.09~1.20 之间,组分组成为黏土和粉砂两种,其中粉砂占绝大部分,大于 80%。

岩心自下而上平均粒度由粗变细再逐渐变粗,大致可以分为 4 个层位。层位 1(59~46 cm),平均粒径由粗逐渐变细,分选系数相对稳定,波动范围较小,平均值为 1.13;层位 2(46~32 cm),平均粒径和分选系数都出现较明显的波动,平均粒径在 9.80~10.80 μm 范围波动,平均值为 10.29 μm ,未出现明显的增

大或减小趋势,分选系数在 1.10~1.14 范围,平均值为 1.12;层位 3(32~13 cm),平均粒径较细,波动性较小,分选系数稳定;层位 4(13~0 cm),平均粒径增大,分选系数也随之变大。黏土和粉砂的变化趋势与平均粒径、分选系数的变化阶段相吻合,具有一致的变化规律。

4 分析与讨论

4.1 物源分析

由于冲绳海槽中部地区的沉积物受到海平面变化、洋流(特别是黑潮)和东亚季风的影响^[29-32],除此之外,还会受到海底地震、火山活动以及热液活动等地质活动的作用^[2,33-34],因此冲绳海槽地区陆源沉积物的物质来源具有多样性,沉积物的沉积过程也变得

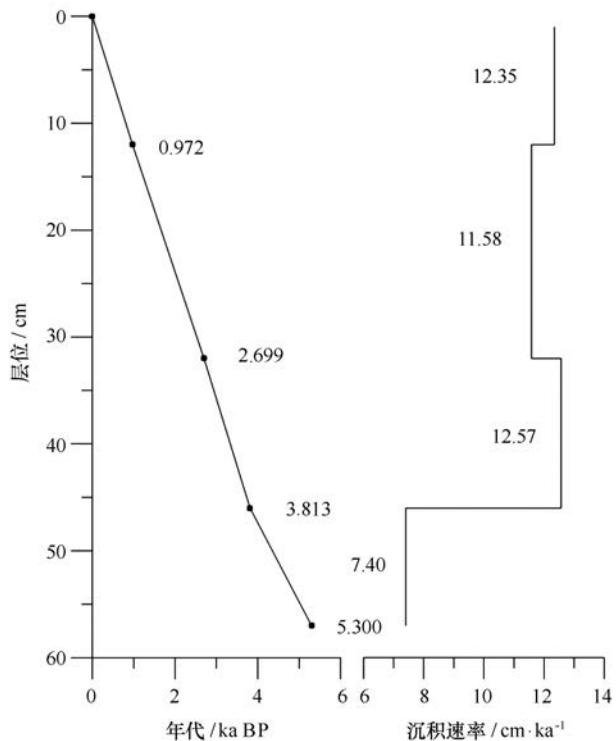


图5 沉积物岩心 HOBAB2-S2 沉积年代模式及沉积速率
Fig.5 Age-depth of Core HOBAB2-S2 and depositional rate

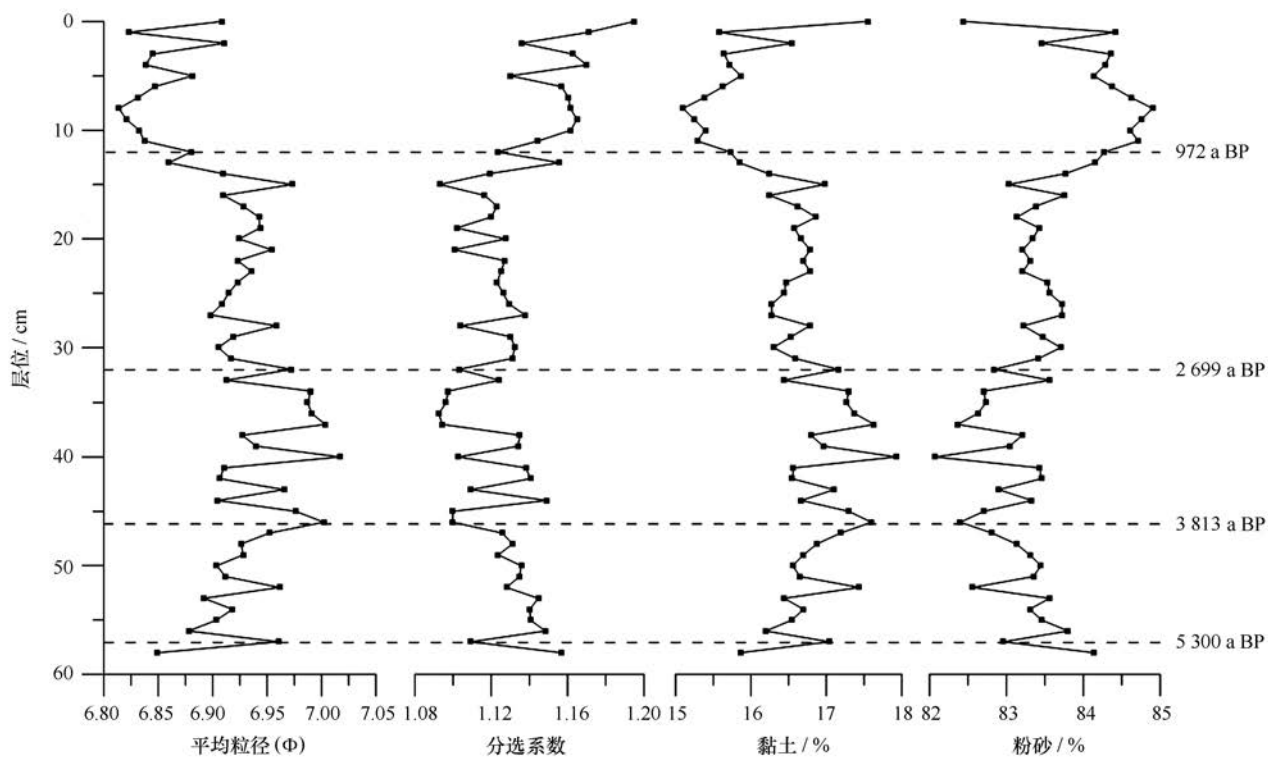


图6 沉积物岩心 HOBAB2-S2 粒度特征
Fig.6 Grain size of Core HOBAB2-S2

更加复杂。沉积物柱状样 S2 不论从直接观察还是地球化学特征方面均未表现出突发地质活动的记录,因而在此讨论仅考虑海平面变化、洋流和东亚季风的影响。海平面变化自晚全新世以来,海平面趋于稳定,波动范围很小^[35-36],对柱状样 S2 的影响可忽略不计。

根据沉积物平均粒度频率分布曲线(图 7)可以看出,不同层位的曲线形态几乎无变化,表现为不明显的双峰,可以推断出岩心沉积物物源区可能并未发生重大调整。

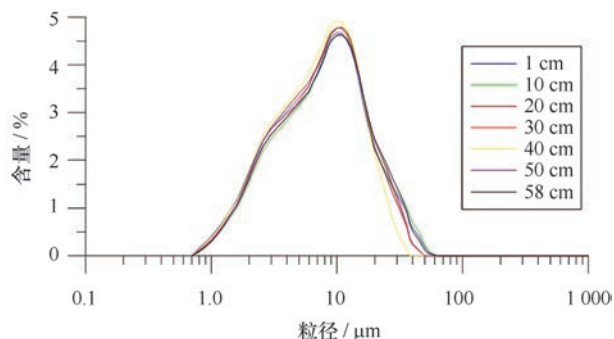


图 7 沉积物岩心 HOBAB2-S2 不同层位粒度正态分布曲线

Fig.7 Grain-size distribution curves of Core HOBAB2-S2 sediments at different depth

稀土元素因具有稳定的化学性质,其组成及分布模式受风化作用、搬运过程以及沉积成岩等作用的影响很小,因此常被用来示踪物质来源^[37-38]。由图 4 可得知沉积物的陆源属性,为了进一步验证沉积物的陆源属性,将稀土元素和陆源碎屑特征元素 Nb、Th^[39-40]进行了相关性分析(图 8),REE 与 Nb、Th 的相关系数 R^2 分别为 0.734 4、0.615 1,呈显著正相关,结果表明陆源物质对稀土元素具有控制作用,即 REE 来自陆源物质。

为了探明冲绳海槽中部区域沉积物的物质来源是长江^[41-42],黄河^[41-42]还是台湾^[43]物质,因此将研究区沉积物与 3 个潜在物源区的沉积物的稀土元素进行了上陆壳标准化,对稀土元素进行比值计算并投点(图 9),从散点图中可以看出,柱状样 S2 的样品点主要集中于台湾,表明自 5 300 a 以来,沉积物主要来自于台湾。

4.2 水动力强弱

沉积物粒度是描述沉积环境的重要参数之一,不同的沉积环境下具有不同的粒度特征,因此沉积物粒

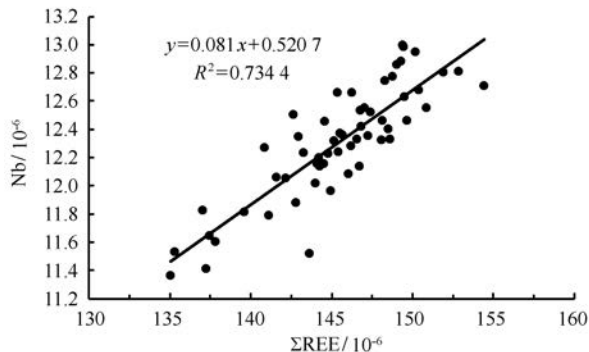
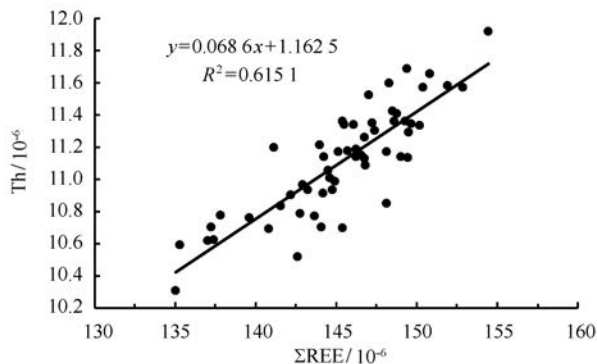


图 8 HOBAB2-S2 孔稀土元素与 Th、Nb 相关性

Fig.8 Correlations between REE and Th、Nb in Core HOBAB2-S2

度参数可以用来提取沉积环境信息,其中,利用粒径大小反演沉积时水动力条件已得到应用^[44]。由于研究区域的陆源物质主要来自台湾,而且自 7.3 ka BP 以来,黑潮又重新回到冲绳海槽内^[29],形成的“水障”作用阻止了中国东部陆架物质向海槽内的输送^[19],由此我们推断台湾物质主要是经黑潮(作为流经冲绳海槽主要的洋流)携带至海槽内的,因此黑潮的强弱对于沉积物的粒径大小具有立竿见影的作用,黑潮增强,沉积物的粒径变粗,黑潮减弱,则粒径相应变细。

文中对沉积物的粒径变化进行讨论,以此来说明沉积过程中的水动力条件的强弱变化。根据粒径垂向变化曲线(图 6)及年代数据(图 5),将沉积过程分为 4 个阶段,第一阶段(59~46 cm,即 5.30~3.81 ka BP 期间),粒径逐渐变细,表明沉积时水动力逐渐减弱,即黑潮的强度减弱,从分选系数可看出,此阶段分选系数较稳定,表明沉积环境处于相对稳定的状态;第二阶段(46~32 cm,即 3.81~2.70 ka BP 期间),沉积物粒径波动较大,无增大或减少趋势,表明沉积环境处于相对波动状态,黑潮强度无明显变化;第三阶段(32~13 cm,即 2.70~0.97 ka BP 期间),沉积物粒度较细,分选系数也比较稳定,表明沉积环境处于相

对稳定状态,黑潮强度变化不大;第四阶段(0.97 ka BP 至今),粒度变化较大,逐渐变粗,且分选系数波动

较大,表明沉积环境不稳定,水动力条件增强,即黑潮增强。

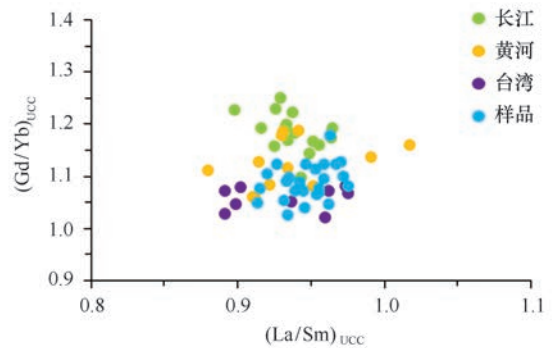
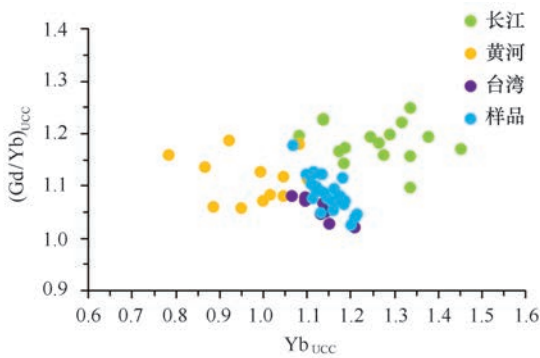


图9 $Yb_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}$ 和 $(La/Sm)_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}$ 散点图

Fig.9 $Yb_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}$ and $(La/Sm)_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}$ plots

5 结论

(1)通过对柱状样沉积物 HOBAB2-S2 稀土元素与微量元素的分析可得研究区,即冲绳海槽中部沉积物具有陆源属性,稀土元素与长江、黄河和台湾沉积物质的稀土元素散点图显示,陆源物质主要由台湾贡献,东海大陆物质次之。

(2)沉积物岩心 HOBAB2-S2 的粒度频率曲线显示,沉积物的物质来源稳定。

(3)粒度特征曲线将沉积环境分为 4 个阶段,在

不同阶段,水动力条件不尽相同。5.30~3.81 ka BP 期间,水动力减弱;3.81~2.70 ka BP 期间,沉积环境相对波动;2.70~0.97 ka BP 期间,沉积环境趋于稳定;从 0.97 ka BP 至今,水动力增强。

致谢:感谢中国科学院海洋研究所“科学”号的全体船员、科学家在 HOBAB2-S2 取芯中的辛苦工作;感谢样品处理与测试过程中所有的参与者与老师们;感谢审稿专家提供的宝贵意见和建议。

参考文献:

- [1] Huh C A, Su C C. Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ [J]. *Marine Geology*, 1999, 160(1): 183-196.
- [2] Yu Hua, Xiong Yingqian, Liu Zhenhua, et al. Evidence for the 8,200 a. b. p. cooling event in the middle Okinawa Trough[J]. *Geo-Marine Letters*, 2008, 28(3): 131-136.
- [3] Letouzey J, Kimura M. Okinawa Trough genesis structure and evolution of a backarc basin developed in a continent[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1985, 2(2): 111-130.
- [4] Glasby G P, Notsu K. Submarine hydrothermal mineralization in the Okinawa Trough, SW of Japan: an overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 2003, 23(3/4): 299-339.
- [5] Park J O, Tokuyama H, Shinohara M, et al. Seismic record of tectonic evolution and backarc rifting in the southern Ryukyu island arc system[J]. *Tectonophysics*, 1998, 294(1/2): 21-42.
- [6] Sibuet J-C, Letouzey J, Barbier F, et al. Back arc extension in the Okinawa Trough[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92: 14041-14063.
- [7] Sibuet J-C, Deffontaines B, Hsu S-K, et al. Okinawa trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B12): 30245-30267.
- [8] 黄培华, 苏维加, 陈金波. 冲绳海槽和琉球岛弧的地震活动与应力场[J]. *地震学报*, 1994, 16(4): 407-415.
Huang Peihua, Su Weijia, Chen Jinbo. Seismic activity and stress field of Okinawa Trough and Ryukyu Island Arc[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1994, 16(4): 407-415.
- [9] Andres M, Wimbush M, Park J H, et al. Observations of Kuroshio flow variations in the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C5): 763-763.
- [10] Hsin Y-C, Wu C-R, Shaw P-T. Spatial and temporal variations of the Kuroshio east of Taiwan, 1982-2005: A numerical study[J]. *Journal of*

- Geophysical Research, 2008, 113(C4):C04002.
- [11] 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*, 2003, 50(2): 475–485.
- [12] Dou Yanguang, Yang Shouye, Liu Zhenxia, et al. Provenance discrimination of siliciclastic sediments in the middle Okinawa Trough since 30ka: Constraints from rare earth element compositions[J]. *Marine Geology*, 2010, 275(1/4): 212–220.
- [13] Dou Yanguang, Yang Shouye, Liu Zhenxia, 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: 38–47.
- [14] Liu Jiang, Zhu Rixiang, Li Tiegang, et al. Sediment-magnetic signature of the mid-Holocene paleoenvironmental change in the central Okinawa Trough [J]. *Marine Geology*, 2007, 239(1/2): 19–31.
- [15] 孟宪伟, 杜德文, 刘焱光, 等. 冲绳海槽近 3.5 万年来陆源物质沉积通量及其对气候变化的响应[J]. *海洋学报*, 2007, 29(5): 74–80.
Meng Xianwei, Du Dewen, Liu Yanguang, et al. Terrestrial flux in sediments from the Okinawa Trough and its response to climate changes over the past 35000 a[J]. *Haiyang Xuebao*, 2007, 29(5): 74–80.
- [16] 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.
Zhao Debo, Wan Shiming. Research progress of tracing sediment sources in Okinawa Trough [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(2): 32–41.
- [17] Honda M C, Kusakabe M, Nakabayashi S, et al. Radiocarbon of sediment trap samples from the Okinawa Trough: lateral transport of ^{14}C -poor sediment from the continental slope [J]. *Marine Chemistry*, 2000, 68(3): 231–247.
- [18] 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 II*, 2003, 50(2): 457–473.
- [19] Oguri K, Matsumoto E, Yamada M. Sediment accumulation rates and budgets of depositing particles of the East China Sea [J]. *Deep-Sea Research II*, 2003, 50(2): 513–528.
- [20] 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.
Wang Jiaze, Li Anchun, Huang Jie. Sediment provenance and paleoenvironment records of the central Okinawa Trough for the last 17000 years [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(6): 105–114.
- [21] 郭志刚, 杨作升, 雷坤, 等. 冲绳海槽中南部及其邻近陆架悬浮体的分布、组成和影响因子分析[J]. *海洋学报*, 2001, 23(1): 66–72.
Guo Zhigang, Yang Zuosheng, Lei Kun, et al. The distribution and composition of suspended matters and their influencing factors in the central-southern area of Okinawa Trough and its adjacent shelf sea [J]. *Haiyang Xuebao*, 2001, 23(1): 66–72.
- [22] Reimer P J, Bard E, Bayliss a, et al. IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP [J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869–1887.
- [23] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2(2): 63–114.
- [24] 赵志根, 高良敏. δEu 、 δCe 计算方法的标准化问题 [J]. *标准化报道*, 1998, 19(5): 24–26.
Zhao Zhigen, Gao Liangmin. Discussion about standardization of methods to calculate δEu δCe [J]. *Reporting of Standardization*, 1998, 19(5): 24–26.
- [25] Rudnick R L, Gao S X. Composition of the Continental Crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003(3): 1–64.
- [26] Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, et al. The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 48(12): 2469–2482.
- [27] Mernan J. Grain size determination and interpretation [J]. *Techniques in Sedimentology*, 1988, 408: 63–85.
- [28] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377–392.
- [29] Jian Zhimin, Wang Pinxian, 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.
- [30] Xiang Rong, Sun Youbin, Li Tiegang, et al. Paleoenvironmental change in the middle Okinawa Trough since the last deglaciation: Evidence from the sedimentation rate and planktonic foraminiferal record [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 243(3/4): 378–393.
- [31] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon [J]. *Nature*, 2007, 445(7123): 74–77.
- [32] Zheng Xufeng, Li Anchun, Wan Shiming, et al. ITCZ and ENSO pacing on East Asian winter monsoon variation during the Holocene. Sedimentological evidence from the Okinawa Trough [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4410–4429.
- [33] Hsu S-C, Lin F-J, Jeng W-L, et al. Observed sediment fluxes in the southwesternmost Okinawa Trough enhanced by episodic events: flood runoff from Taiwan rivers and large earthquakes [J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2004, 51(7): 979–997.
- [34] Miyairi Y, Yoshida K, Miyazaki Y, et al. Improved ^{14}C dating of a tephra layer (AT tephra, Japan) using AMS on selected organic fractions [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2004, 223–224: 555–559.
- [35] 辛立国, 李广雪, 李西双, 等. 中国东海 2 万年来海平面变化分析 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(5): 699–704.
Xin Liguang, Li Guangxue, Li Xishuang, et al. Analysis of sea-level variation in the East China Sea since the Last Glacial Maximum [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(5): 699–704.
- [36] 金翔龙. 东海海洋地质 [J]. 北京: 海洋出版社, 1992: 1–524.

- Jin Xianglong. Marine Geology of East China Sea[J]. Beijing: China Ocean Press, 1992: 1—524.
- [37] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1989, 21(1): 169—200.
- [38] Murray R W, Buchholtzen B M R, Brumsack H J, et al. Rare earth elements in Japan Sea sediments and diagenetic behavior of Ce/Ce*: results from ODP Leg 127[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55(9): 2453—2466.
- [39] Liu Jian, Saito Y, Kong Xianghui, et al. Geochemical characteristics of sediment as indicators of post-glacial environmental changes off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(7): 846—855.
- [40] Youn J, Kim T-J. Geochemical composition and provenance of muddy shelf deposits in the East China Sea[J]. Quaternary International, 2011, 230(1/2): 3—12.
- [41] Yang Shouye, Jung H S, Man S C, et al. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2002, 41(5): 303—321.
- [42] 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物 REE 地球化学及示踪作用[J]. 地球化学, 1999, 28(4): 374—380.
Yang Shouye, Li Congxian. REE geochemistry and tracing application in the Yangtze River and the Yellow River sediments[J]. Geochimica, 1999, 28(4): 374—380.
- [43] Chen J-C, Lo C Y, Lee Y T, et al. Mineralogy and chemistry of cored sediments from active margin off southwestern Taiwan[J]. Geochemical Journal, 2007, 41(5): 303—321.
- [44] 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(1/2): 83—95.

Analysis on sediment provenance and environmental changes in the middle Okinawa Trough

Zhang Dandan^{1,2,3}, Zeng Zhigang^{1,2,3}, Yin Xuebo¹

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the data of grain size and trace elements coupled with high-precise AMS¹⁴C dating, this paper dealt with the provenance and sediment environment evolution of the middle Okinawa Trough for the last 5 300 a with the sample from the Core HOBAB2—S2. The analysis on REE and trace elements showed their affinities to the terrigenous sediments in the study area. In combination with REE parameters of potential sediment sources, the sediments were mainly originated from Taiwan. The grain size was used to be the indicators of sediment environment, especially the vigor of local current (the current was mainly referred to Kuroshio Current in this paper). The conclusions were summarized as follows. Four periods were divided. During the first period (5.30—3.81 ka BP), grain size was getting finer, which indicated the Kuroshio Current weakened gradually. In the period of 3.18—2.70 ka BP, the grain size showed distinct change and we can deduce that the sediments suffered a relative volatility period. During the third period, from 2.70 ka BP to 0.97 ka BP, the environment was stable inferred from the grain size with little changes. Since 0.97 ka BP, the sediments grain size was larger than before and indicated the enhance of the strength of Kuroshio Current.

Key words: Okinawa Trough; provenance; trace elements; grain size; sediment environment