

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2015.05.001

88 ka 以来冲绳海槽北部物源及沉积通量演化

朱爱美^{1,2,3}, 石学法^{3,4}, 邹建军^{3,4}, 吴永华^{3,4}, 张辉³, 白亚之³

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 国家海洋局第一海洋研究所 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 青岛 266061;

4. 青岛国家海洋科学技术实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061)

摘要:通过对 CSH1 岩心 131 个沉积物样品中的稀土元素进行分析, 恢复了冲绳海槽北部 88 ka 以来碎屑物质来源及古环境的演化历史。结果显示, 88 ka 以来稀土元素含量发生了剧烈的波动, 范围为 111~171.3 $\mu\text{g/g}$ (均值为 130.9 $\mu\text{g/g}$), 高值出现在 MIS2 期, 低值主要出现在 MIS1 期。在 MIS4 期存在显著的 Ce 负异常, 这与底层水体通风减弱相关。物源分析表明, 8 ka 以来冲绳海槽北部沉积物存在火山碎屑的贡献, MIS2—MIS5a 期以陆源碎屑为主。在 MIS2 期与 MIS4 期及末次冰消期早期和晚期沉积物来源存在显著差异。海平面与东亚夏季风是控制冲绳海槽北部陆源碎屑物质累积的主要因子。

关键词: 稀土元素; 沉积物源; Ce 负异常; 沉积通量演化; 冲绳海槽北部

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2015)05-0001-08

受青藏高原隆升和琉球岛弧阻隔的影响, 位于西太平洋边缘的冲绳海槽一直是大陆风化剥蚀产物搬运入海后的一个主要汇聚地, 而风化产物输运至冲绳海槽的动力较为复杂, 涉及河流、风、波浪及海流等。随着气候及海平面的波动, 冲绳海槽所接收的陆壳风化产物的来源和通量因输运方式和搬运强度的变化而改变, 这必然会对沉积地层的结构、组成及记录产生影响。很明显, 由于东亚大陆发育众多大小不一的河流, 风化物质主要由河流输运入海, 而风及海流的输运能力明显小于河流。然而, 在长时间尺度上, 风和洋流的贡献并不能被忽视。受冲绳海槽的阻隔, 东亚河流输运的陆源碎屑物质最终存储在冲绳海槽陆坡及其槽底。作为东亚河流物质向海输运的接收末端, 冲绳海槽海洋环境对于风化产物的形成、扩散和累积过程密切相关的气候及海平面变化十分敏感, 是开展沉积物“源—汇”研究的理想场所。

前人对晚更新世尤其是末次冰期以来冲绳海槽南部、中部及北部的古海洋学开展了深入的研究, 重

建了黑潮在冲绳海槽内的演化过程及其毗邻的东亚大陆植被和气候变化历史^[1-4], 识别出在记录冰心及北大西洋沉积岩心中类似的气候突变事件, 如 YD、BA、Hes 及 8.2 ka 冷事件。基于矿物学、地球化学和同位素指标, 已有的研究显示, 无论是空间(表层沉积物)还是时间上(沉积岩心), 冲绳海槽中部和南部沉积物的来源都发生过显著的变化^[5-8]。冲绳海槽表层沉积物分析结果表明, 南部以长江和台湾河流的贡献为主, 中部以长江贡献为主, 而北部则是长江、黄河及韩国河流的混合产物^[7]。冲绳海槽南部 1202 孔的研究结果表明, 28~19.5 ka 来自台湾西北部的沉积物贡献增加, 19.5~11.2 ka 沉积物主要来自中国东部, 全新世主要源于台湾东北部^[9]。冲绳海槽中部 DGKS9604 孔的研究表明, 31~8.2 ka 冲绳海槽中部的沉积物主要来自长江, 在 7.1 ka 以后黑潮输运的碎屑物质占优。冲绳海槽中部 MD012404 孔过去 10 万年的矿物学数据显示 24 ka 以前海槽中部为陆源物质, Al/Ti 比值表明 26 ka 以后, 来自台湾河流输运的物质显著增加^[5,10]。对冲绳海槽北部 A7 孔的研究结果显示, 在全新世还存在大量火山碎屑物质^[11]。

前人对冲绳海槽北部 Y127 孔^[11]和 MD982195 孔^[12]的物源进行了分析, 但是由于沉积物端元不明确, 对冲绳海槽北部沉积物贡献源的认识十分模糊。针对此问题, 本文选择冲绳海槽北部陆坡 CSH1 岩心作为研究对象, 对全样沉积物中的稀土元素进行

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(GY0213G23); 国家自然科学基金项目(41206059, 41420104005 和 40710069004); 亚洲大陆边缘“源—汇”过程与陆海相互作用(GASI-GEOGE-03)

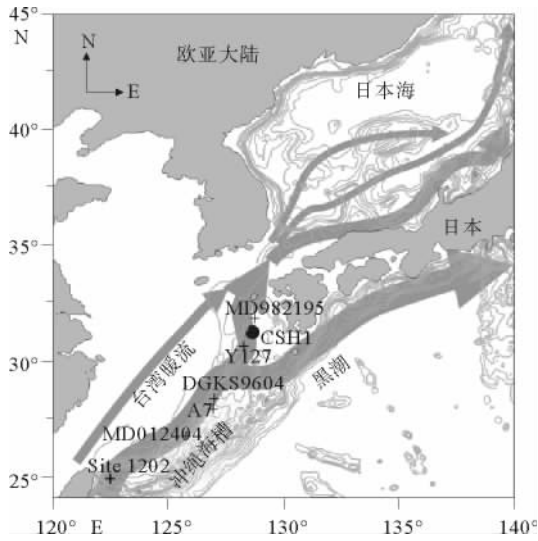
作者简介: 朱爱美(1982—), 女, 工程师, 主要从事分析化学及海洋地球化学研究, Email: zhuaimai@fio.org.cn

收稿日期: 2014-11-15; **改回日期:** 2015-02-13. 文凤英编辑

分析,结合 11 个 AMS ¹⁴C数据,揭示冲绳海槽北部过去 88 ka 以来沉积物来源及古环境演化过程。

1 材料与方 法

CSH1 孔(31°13. 7'N、128°43. 4'E) 采自冲绳海槽北坡,长 17. 3 m,水深 703 m,位于现代对马暖流主轴附近,是国家海洋局第一海洋研究所 1998 年 10 月利用向阳红 09 号考察船采集的活 塞岩心(图 1)。沉积物类型以黑灰色和灰色粉砂质泥和泥为主,在整个岩心都可见贝壳碎屑和大的有孔虫壳体^[13],并夹有 3 层火山灰,分别出现在 74~106 cm (K-Ah,6. 1~7. 5 ka),782~794 cm (AT,30~31 ka),以及 1 570~1 602 cm (77. 2~79 ka)。基于 AMS¹⁴C 定年数据和氧同素地层比 对,17. 3 m 长的岩心恢复了 88 ka 以 来的沉积记录^[14]。



“+”代表文中提到的岩心
“+”indicates the mentioned cores in the text
图 1 CSH1 岩心位置及东海黑潮流系

Fig. 1 The location of CSH1 core and the present Kuroshio Current in the East China Sea

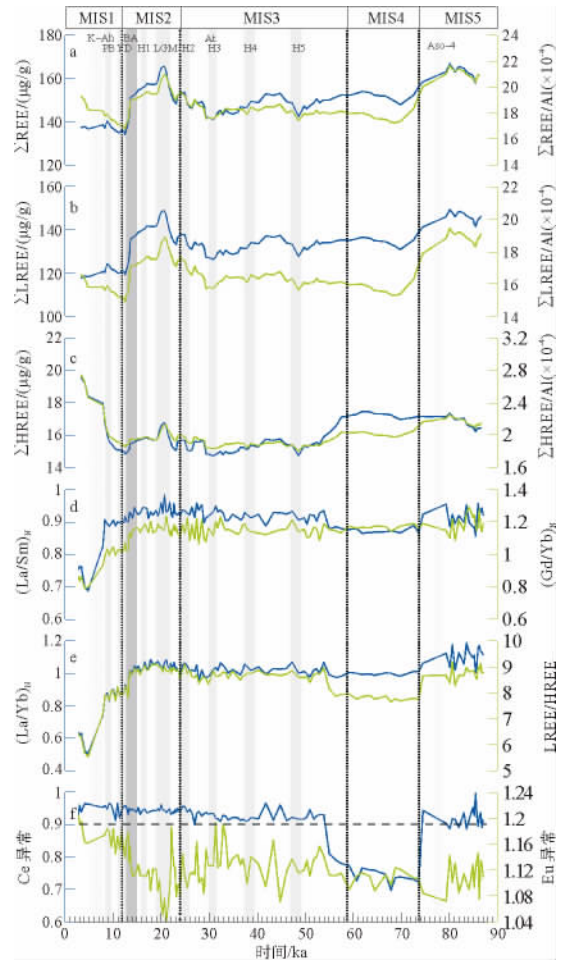
根据年龄模型框架,挑选 131 个样品在海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室进行主微量元素分析。挑选的样品冷冻干燥后,用玛瑙研磨成 200 目粉末。用于主微量元素及稀土元素分析的样品在密闭的 Telfon 罐中经 HNO₃-HF (1 : 1) 消解后,分别采用 ICP-OES(ICAP6300)和 ICP-MS (X Series II)进行分析测试。在实验分析过程中,采用空白样、GSD-9 标准物质和重复样品对分析过程进行质量监控。主微量元素及稀土元素的相对标准偏

差皆小于 5%。

2 结果

2.1 稀土元素

CSH1 岩心中稀土元素及其相关参数分布特征详见图 2。CSH1 岩心中 ΣREE 为 113. 7~174. 6 μg/g,均值为 149. 6 μg/g,低于黄河悬浮体(166. 2 μg/g)^[15]、台湾河流(152. 9~208. 1 μg/g)(Li等,



灰色条带指示重要气候事件。MIS1,2,3,4,5 分别代表氧同位 1,2,3,4,5 期。PB,YD,BA,LGM 及 H1-H5 分别指前北方期,新仙女木事件,Bolling/Allerod 事件,末次盛冰期及 Heinrich 1-5 事件。K-Ah,AT 及 Aso-4 分别代指 K-Ah,AT 及 Aso-4 火山灰层
Gray solid bars indicate the duration of important climate events. MIS 1, MIS 2, MIS 3, MIS4 and MIS5 represent marine isotope stage 1, 2, 3, 4 and 5 respectively. PB, YD, BA, LGM and H1 to H5 refer to Preboreal, Younger Dryas, Bolling/Allerod, Last Glacial Maximum, and Heinrich 1 to Heinrich 5, respectively. K-Ah, AT and Aso-4 indicate known ash layer

图 2 稀土元素含量及其参数时间序列
Fig. 2 Time series of ΣREEs concentration and parameters

2012)、长江 ($194.8 \mu\text{g/g}$)^[15]、PAAS ($184.8 \mu\text{g/g}$)^[16]及韩国河流(汉江、锦江、容山江)($186 \sim 305.2 \mu\text{g/g}$)^[17],高于日本河流沉积物($104.9 \mu\text{g/g}$)^[18]、日本上地壳($114.6 \mu\text{g/g}$) (Mikoshiba, 2006),与中国黄土($151.3 \mu\text{g/g}$)^[19]、上地壳($148.1 \mu\text{g/g}$)^[20]接近。 ΣLREE (La,Ce,Pr,Nd,Sm,Eu)含量为 $95 \sim 156.8 \mu\text{g/g}$,均值为 $133.5 \mu\text{g/g}$,高于 ΣHREE (Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm,Yb,Lu)的含量(均值为 $16.1 \mu\text{g/g}$,介于 $13.9 \sim 21.7 \mu\text{g/g}$)。LREE/HREE 比值为 8.4 (介于 $4.9 \sim 9.2$),低于上地壳(9.4)^[20]、长江(9.6)^[15]、黄河(9.4)^[15]、黄土(9.5)^[19]及台湾河流($8.3 \sim 9.2$)^[21],轻稀土显著富集。过去 88 ka, MIS1 期 ΣREE 含量明显低于其他时期的,在火山灰层处丰度显著减小(图 2a),明显受到火山碎屑物质的稀释。轻稀土(ΣLREE)剖面趋势与 ΣREE 一致(图 2b)。在全新世重稀土含量显著增加,剖面分布趋势与轻稀土存在显著差异(图 2c)。为了剔除粒度效应,用 Al 进行标准化,结果显示 $\Sigma\text{REE}/\text{Al}$ 比值与 ΣREE 含量呈现一致的变化趋势,表明 CSH1 岩心中稀土元素含量不受粒度的影响。

采用后太古代澳大利亚平均页岩(PAAS)对稀土元素进行标准化^[16]。轻/重稀土(La/Yb)_N分馏指标显示(图 2e),在末次冰期和末次冰消期 LREE 较 HREE 显著富集,在全新世 LREE 较 HREE 相对富集程度减小。在 MIS4 期,CSH1 岩心中存在显著 Ce 负异常($0.7 \sim 0.77$,均值为 0.74);在全新世 δEu 值明显增加($1.14 \sim 1.2$,均值为 1.17) (图 2d)。

3 讨论

3.1 冲绳海槽北部沉积物来源

稀土元素配分模式显示,8 ka 以来 CSH1 岩心中重稀土显著富集(图 3a),这也与此时期重稀土含量显著增加相互印证(图 2c)。图 4a 显示,8 ka 以来沉积物端元更接近火山岩,表明 8 ka 以来冲绳海槽北部沉积物存在火山碎屑物质的贡献。此时期增加的 δEu 正异常值(图 2f)也表明冲绳海槽北部沉积物存在来自地球深部物质的输入,即火山碎屑物质的贡献,这与其他时期碎屑物质的来源存在差异。前人在冲绳海槽北部 A7 孔全新世沉积物中发现大量火山玻屑^[11],进一步证实了我们的推断。

在 MIS2 至 MIS5a 期,稀土元素配分模式显著不同于汉江及日本河流,但是与上地壳、黄土、长江、黄河及台湾河流(兰阳溪、淡水河及头前溪)一致(图 3),表明 MIS2 至 MIS5a 期,冲绳海槽北部沉积物陆源碎屑物质主要来自中国地台。同时,图 3 显示,尽管 CSH1 岩心离韩国地台很近,但是并没有检测到来自韩国河流的信号。推测主要有两个原因:一是由于研究区不存在韩国地台的物质;二是存在少量源自韩国上地壳物质,但是物源示踪剂(稀土元素)的敏感度较低。图 4(b, d)表明,冲绳海槽北部碎屑物质来源在 LGM 期和 MIS4 期及末次冰消期早期与晚期可能存在较大的差异。引起这种差异的原因与当时的海平面及区域水动力条件有关。要想明确冲绳海槽北部不同时期陆源碎屑物质的主要贡献源,需要更为准确的端元信息和物源示踪剂。

冲绳海槽北部沉积物中另一个显著特点是在冰消期早期、LGM 期及 MIS3、MIS5a 期,冲绳海槽北

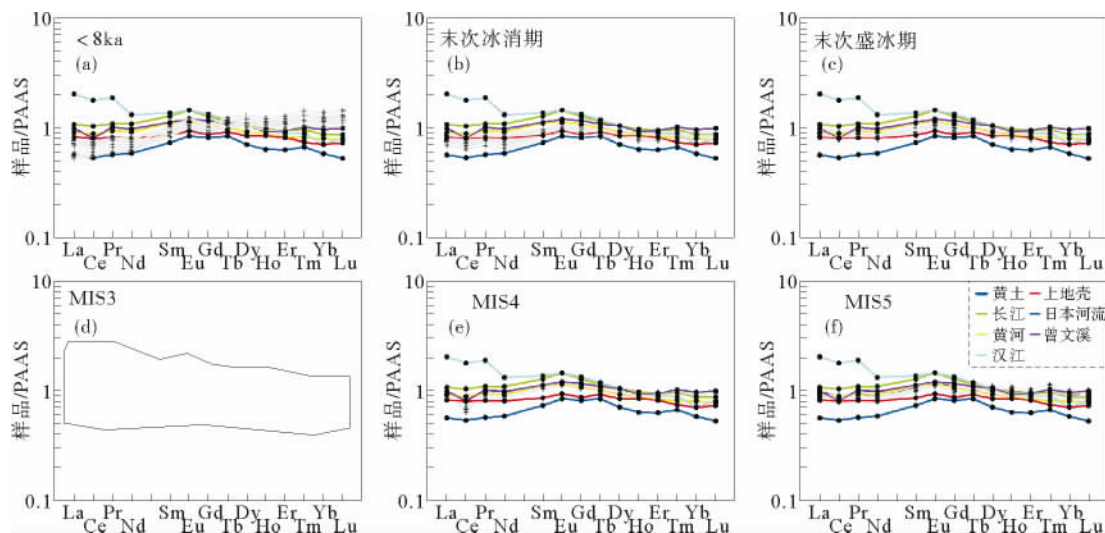


图3 后太古代澳大利亚页岩标准化稀土配分模式

Fig. 3 Post Archean Australian Shale (PAAS)-normalized rare earth patterns of the sediments in Core CSH1

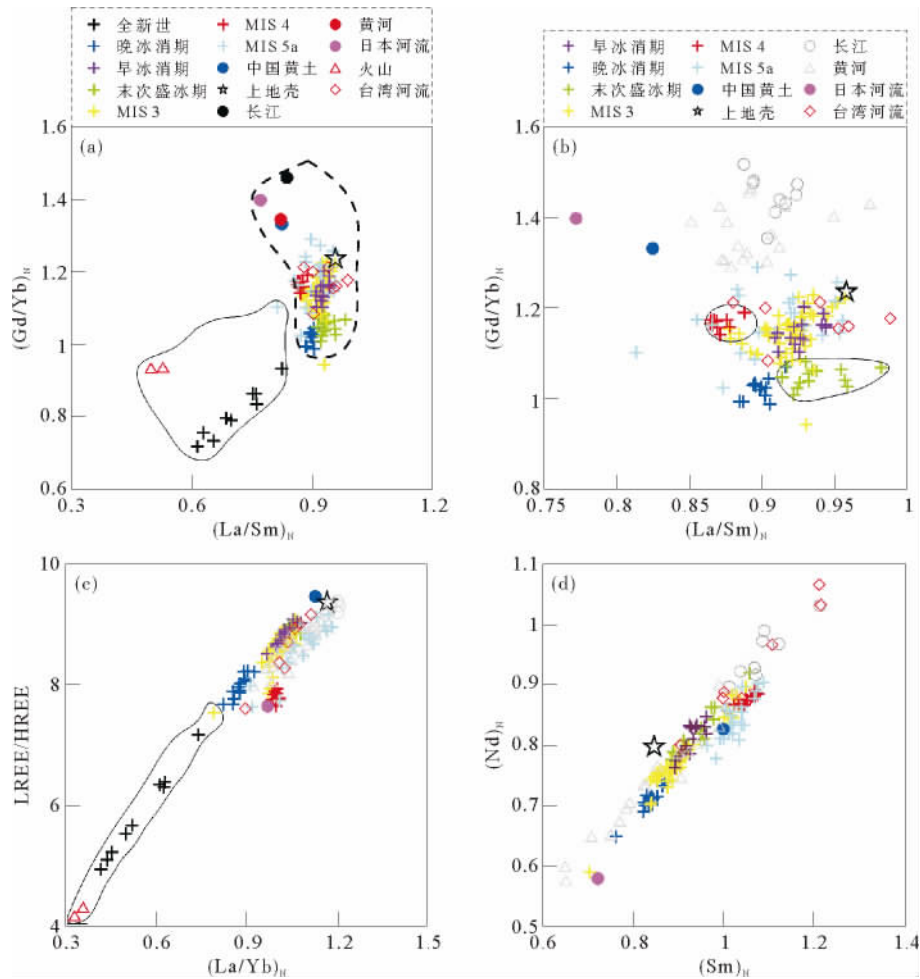


图4 CSH1岩心 $(La/Sm)_N$ vs $(Gd/Yb)_N$, $(La/Yb)_N$ vs LREE/HREE 相关散点图

Fig. 4 Scatter plots between $(La/Sm)_N$ vs $(Gd/Yb)_N$, $(La/Yb)_N$ vs LREE/HREE in core CSH1

部 CSH1 岩心中还检测出大量来自台湾河流物质输入的信号(图 4b,d)。由于冲绳海槽北部与台湾岛相距遥远,台湾陆壳风化物质向北运输的惟一方式是台湾河流运输的风化物质被黑潮捕获,向北运输。受冲绳海槽北部地形的制约,黑潮的一个分支(对马暖流)在爬升过程中,流速减缓,其裹挟的台湾陆壳风化物质发生沉降。前人在冲绳海槽中部^[5]和南部都发现了与黑潮有关的碎屑物质向北扩散的证据。黑潮作为台湾碎屑物质向北运输的主要动力,其主轴和强度在过去 88 ka 因海平面和气候而发生显著变化。一般认为 8 ka 以来黑潮再次进入冲绳海槽^[4]。在冰消期晚期、MIS3、MIS5a 期冲绳海槽北部陆坡检测到的台湾陆源碎屑物质信号,可能是由黑潮直接搬运或者埋藏在东海陆架的台湾河流物质,受潮汐或其他动力的影响,发生二次迁移再沉积。在全新世及冰消期晚期,CSH1 岩心中并没有检测到台湾陆源碎屑物质输入的信号,这可能与此时期沉积物中大量火山碎屑物质稀释了台湾源河流物质的信号有关。

3.2 δCe 负异常

尽管 CSH1 岩心沉积物主要源于上地壳,但是在 MIS4 期存在显著的 δCe 负异常(图 2f)。引起 Ce 异常的因素非常复杂,涉及沉积环境、成岩作用和底层水含氧量等众多因素,因此,对 Ce 异常指标的解释和应用务必谨慎^[22]。

前人对印度洋不同类型沉积物中的稀土元素进行了分析,发现经页岩标准化后,陆源沉积物页岩标准化模式平坦,硅质软泥中铈正异常,钙质沉积物中铈负异常^[23]。对太平洋开阔海域不同沉积物类型中稀土元素的分析也表明钙质软泥发育海域沉积物稀土元素存在显著的 Ce 负异常(平均页岩标准化),并指出钙质软泥铈负异常主要出现在富磷的沉积物中^[24]。在以硅酸盐为主的全样沉积物中,我们也没有观测到 Ce 异常的存在^[25-26]。

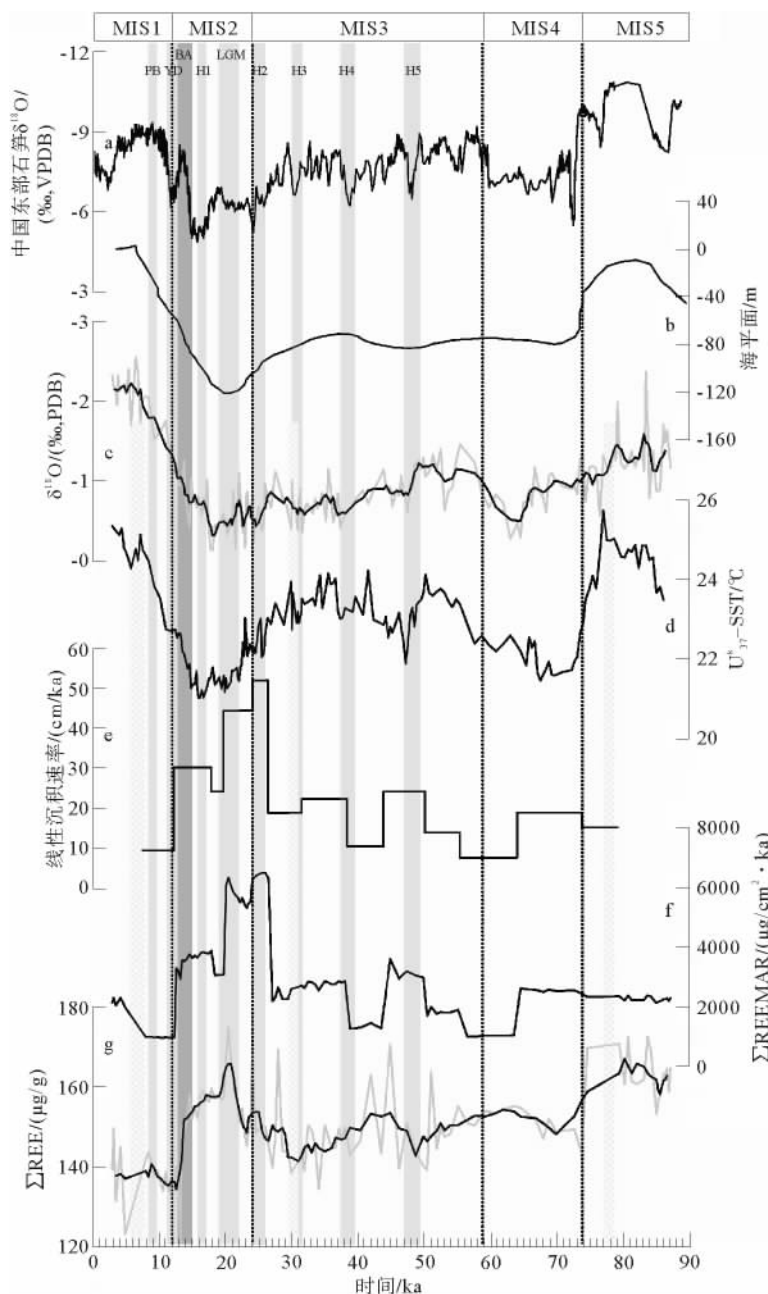
淋滤实验分析表明,Ce 正异常主要出现在铁锰相沉积物中^[27],表明 Ce 的富集与铁锰氧化物密切相关。一般认为,Ce 主要吸附在铁锰氧化物表面,

在缺氧水体中,伴随着颗粒态 Fe-Mn 氧化物的溶解,吸附在其表面的 Ce 也随之进入水体,导致沉积物中出现 Ce 负异常。CSH1 岩心中自生 Mo 含量在 MIS4 期显著增加,显示此时期底层水含氧量较低,这与此时期沉积物中 Ce 负异常相对应(未发表数据)。因此,我们认为 MIS4 期 Ce 负异常主要与底层水体贫氧有关。然而,冲绳海槽北部底层水含氧量减小并不仅发生在 MIS4 期,在末次冰消期也出现。但是在冰消期并未出现 Ce 负异常的现象。

这可能暗示,影响沉积物 Ce 富集、贫化的因素较为复杂,底层水贫氧并不是诱发 Ce 负异常的惟一因素,另一方面也说明末次冰消期早期和 MIS4 期沉积环境存在差异。

3.3 碎屑物质沉积通量演化

图 5 显示 ΣREE 质量累积速率呈现剧烈的波动。 ΣREE 质量累积速率高值主要出现在 20~26 ka, 低值主要出现在冷期向暖期过渡时期,如 MIS2/



灰色条带代表意义与图 2 一致

Gray bars are the same as those in Figure 2

图 5 ΣREE 含量及 ΣREE 质量累积速率时间序列剖面并与 CSH1 岩心线性沉积速率、 $U_{37}^k\text{-SST}$ 及 $\delta^{18}\text{O}_{\text{ruber}}$ 曲线^[14]、海平面^[29]曲线、葫芦和董哥洞穴石笋^[31-32]曲线进行对比

Fig. 5 Age versus contents and mass accumulation rate and comparison with linear sedimentation rate, $U_{37}^k\text{-SST}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{ruber}}$ curve of Core CSH1^[14], and sea level^[29] curve, and stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ curve of Donggedong and Hulu Cave^[31-32]

MIS1, MIS4/MIS3。20~8 ka, Σ REE 质量累积速率逐渐减小, 8 ka 以来又呈现逐渐增加的趋势。

与 MIS5a 期相比, MIS4 期海平面高度和东亚夏季风强度都显著减小。MIS5a 期的 Σ REE 质量累积速率略低于 MIS4 期的, 是两者共同作用的结果。在 MIS3 期早期, 海平面比现今低 70 m, 并呈现轻微的下降, 而较高的表层海水温度表明此时期东亚夏季风较强, 二者相互作用的结果是 Σ REE 质量累积速率逐渐增加。从 26 至 18 ka, 海平面逐渐下降并在末次盛冰期下降到最低值^[28-29]。随着海平面的下降, 与冲绳海槽毗邻的东海陆架裸露, 长江、黄河河口不断向冲绳海槽陆坡迁移。河流近距离的输运加上埋藏在东海陆架沉积物在波浪及潮汐的作用下再悬移, 导致大量陆源碎屑物质被输运至冲绳海槽北坡。此时期高 Σ REE 质量累积速率与海平面下降相对应。

18~8 ka, 随着海平面的上升, 长江、黄河河口快速后退, 减弱的东亚夏季风导致东亚河流向海输运的碎屑物质显著减少, 这与 Σ REE 质量累积速率快速下降相对应。在 BA 暖期东亚夏季风逐渐增强, 河流向海输运的陆源碎屑物质也在增加。但是此时期 CSH1 岩心 Σ REE 质量累积速率增加的幅度没有显著增加。在 YD 冷期, 东亚夏季风明显减弱, Σ REE 质量累积速率显著下降。 Σ REE 质量累积速率的变化表明, 东亚夏季风强度变化对陆源碎屑物质累积速率有着显著的影响。

8 ka 以来, 海平面上升到现今的位置, 对马暖流也发育成熟^[30], 并经对马海峡进入日本海。此时期, Σ REE 质量累积速率明显低于 LGM 期的, 但呈现逐渐增加的趋势。物源分析表明, 8 ka 以来 CSH1 岩心存在大量火山碎屑物质的贡献。此时期增加的 Σ REE 质量累积速率可能是由于火山碎屑物质引起。

4 结论

(1) 冲绳海槽北坡物质来源及古环境在过去 88 ka 发生了显著变化。物源分析表明, 在全新世, 冲绳海槽北部沉积物中存在火山源的贡献; 在 MIS2 至 MIS5a 期, 沉积物以陆源碎屑物质为主, 主要来自中国上地壳, 在 LGM 与 MIS4 期及冰消期早期和晚期沉积物来源存在差异。

(2) 冲绳海槽北部沉积物在 MIS4 期存在显著的 Ce 负异常, 底层水通风减弱是诱发 Ce 负异常的主要因素。

(3) 冲绳海槽北部高陆源碎屑累积主要发生在 LGM 期和 H2 期, 低值出现在 MIS1 期。

(4) 海平面和东亚夏季风是控制冲绳海槽北部陆源碎屑物质累积速率的主要因素。

参考文献 (References)

- [1] Kao S J, Dai M H, Wei K Y, et al. Enhanced supply of fossil organic carbon to the Okinawa Trough since the last deglaciation[J]. *Paleoceanography*, 2008, 23(2):PA2207, doi: 2210.1029/2007pa001440.
- [2] Sun Y B, Oppo D W, Xiang R, et al. Last deglaciation in the Okinawa Trough: Subtropical northwest Pacific link to Northern Hemisphere and tropical climate[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(4):PA4005, doi:4010.1029/2004pa001061.
- [3] Zheng Z, Yang S, Deng Y, et al. Pollen record of the past 60 kaBP in the middle Okinawa Trough: Terrestrial provenance and reconstruction of the paleoenvironment[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2011, 307(1-4):285-300.
- [4] Li T G, Sun R T, Zhang D Y, et al. Evolution and variation of the Tsushima warm current during the late Quaternary: Evidence from planktonic foraminifera, oxygen and carbon isotopes[J]. *Science in China (Series D)-Earth Sciences*, 2007, 50(5):725-735.
- [5] Dou Y, Yang S, Liu Z, et al. Provenance discrimination of siliciclastic sediments in the middle Okinawa Trough since 30 ka: Constraints from rare earth element compositions[J]. *Marine Geology*, 2010, 275(1-4):212-220.
- [6] Bentahila Y, Ben Othman D, Luck J-M. Strontium, lead and zinc isotopes in marine cores as tracers of sedimentary provenance: A case study around Taiwan orogen[J]. *Chemical Geology*, 2008, 248(1-2):62-82.
- [7] Jiang F, Li A, Li T. Sediment pathway of the East China Sea inferred from an R-mode factor analysis of surface sediments in the Okinawa Trough[J]. *Quaternary International*, 2011, 230(1-2):13-20.
- [8] Katayama H, Watanabe Y. The Huanghe and Changjiang contribution to seasonal variability in terrigenous particulate load to the Okinawa Trough[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(2):475-485.
- [9] 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.
- [10] Chen H F, Chang Y P, Kao S J, et al. Mineralogical and geochemical investigations of sediment-source region changes in the Okinawa Trough during the past 100 ka (IMAGES core MD012404)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(6):1238-1249.
- [11] 李军, 赵京涛. 冲绳海槽中部沉积物稀土元素地球化学特征及其在古环境变化研究的应用[J]. *自然科学进展*, 2009, 19

- (12):1333-1342. [LI Jun, ZHAO Jintao. Geochemical characteristics of rare earth elements in the sediments in the middle Okinawa Trough and its application in paleoenvironment study[J]. *Advances in Nature Science*, 2009, 19(12):1333-1342.]
- [12] Kawahata H, Nohara M, Aoki K, et al. Biogenic and abiogenic sedimentation in the northern East China Sea in response to sea-level change during the Late Pleistocene[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 53(1-2):108-121.
- [13] 葛淑兰, 石学法, 吴永华, 等. 冲绳海槽北部 CSH1 孔岩石磁学特征及其早期成岩作用的影响[J]. *海洋学报*, 2005, 27(6):56-64. [GE Shulan, SHI Xuefa, WU Yonghua, et al. The rock magnetic behavior of gravity core CSH1 from the northern Okinawa Trough and the effect of early diagenesis [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(6):56-64]
- [14] Shi X, Wu Y, Zou J, et al. Multiproxy reconstruction for Kuroshio responses to northern hemispheric oceanic climate and the Asian Monsoon since Marine Isotope Stage 5.1 (~88 ka)[J]. *Clim. Past*, 2014, 10(5):1735-1750.
- [15] Gaillardet J, Dupré B, Allègre C J. Geochemistry of large river suspended sediments: silicate weathering or recycling tracer? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(23-24):4037-4051.
- [16] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. 1 edn Blackwell Scientific Pub., Palo Alto, CA, 1985: 328.
- [17] Yang S, Li C, Lee C, et al. REE geochemistry of suspended sediments from the rivers around the Yellow Sea and provenance indicators[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(11): 1135-1139.
- [18] Mikoshiba M U, Imai N, Tachibana Y. Geochemical mapping in Shikoku, southwest Japan[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(8):1549-1568.
- [19] Liu C, Masuda A, Okada A, et al. A geochemical study of loess and desert sand in northern China; Implications for continental crust weathering and composition[J]. *Chemical geology*, 1993, 106(3-4):359-374.
- [20] Taylor S, McLennan S. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. 1 edn Oxford: Blackwell Scientific Publisher, 1985.
- [21] Li C S, Shi X F, Kao S J, et al. Rare earth elements in fine-grained sediments of major rivers from the high-standing island of Taiwan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69(0):39-47.
- [22] Pattan J N, Pearce N J G, Mislankar P G. Constraints in using Cerium-anomaly of bulk sediments as an indicator of paleo bottom water redox environment; A case study from the Central Indian Ocean Basin[J]. *Chemical Geology*, 2005, 221(3-4):260-278.
- [23] Nath B N, Roelandts I, Sudhakar M, et al. Rare-earth element patterns of the Central Indian Basin sediments related to their lithology[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(12):1197-1200.
- [24] Toyoda K, Nakamura Y, Masuda A. Rare earth elements of Pacific pelagic sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(4):1093-1103.
- [25] 邹建军, 石学法, 刘焱光, 等. 末次冰期以来日本海陆源沉积的地球化学记录及其对海平面和气候变化的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(2):75-86. [ZOU Jianjun, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Geochemical record of terrigenous sediments from the sea of Japan since last glacial and its response to sea level and climate change[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2010, 30(2):75-86]
- [26] 朱爱美, 刘季花, 张辉, 等. 东海内陆架泥质区表层沉积物稀土元素的分布特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(1):1-10. [ZHU Aimei, LIU Jihua, ZHANG Hui, et al. Distribution pattern of REES in the inner-shelf mud area of East China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(1):1-10]
- [27] Toyoda K, Masuda A. Chemical leaching of pelagic sediments: Identification of the carrier of Ce anomaly[J]. *Geochimical Journal*, 1991, 25:95-109.
- [28] Saito Y, Katayama H, Ikehara K, et al. Transgressive and highstand systems tracts and post-glacial transgression, the East China Sea[J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 122(1-4): 217-232.
- [29] Cutler K B, Edwards R L, Taylor F W, et al. Rapid sea-level fall and deep-ocean temperature change since the last interglacial period[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 206(3-4):253-271.
- [30] Li T, Liu Z, Hall M A, et al. Heinrich event imprints in the Okinawa Trough: evidence from oxygen isotope and planktonic foraminifera[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 176(1-4):133-146.
- [31] Wang Y, Cheng H, Edwards R, et al. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2001, 294(5550):2345-2348.
- [32] Wang Y, Cheng H, Edwards R, et al. Millennial-and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224 000 years[J]. *Nature*, 2008, 451(7182):1090-1093.

SEDIMENT PROVENANCE AND FLUXES IN THE NORTHERN OKINAWA TROUGH DURING THE LAST 88 KA

ZHU Aimei^{1,2,3}, SHI Xuefa^{3,4}, ZOU Jianjun^{3,4}, WU Yonghua^{3,4}, ZHANG Hui³, BAI Yazhi³

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. Key Laboratory of State Oceanic Administration for Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061;

4. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Functional Laboratory for Marine Geology and Environment, Qingdao 266071)

Abstract: The history of terrigenous detritus accumulation and paleoenvironment since the last 88 ka was reconstructed using the results of rare earth elements (REEs) from 131 samples from the Northern Okinawa Trough. The results show that the contents of Σ REEs vary between 111~171.3 $\mu\text{g/g}$ with an average value of 130.9 $\mu\text{g/g}$. The apex of Σ REEs occurs in MIS 2, while the low values exist in Holocene. Negative Cerium anomaly exists in MIS 4, which is mainly controlled by the ventilation of deep water. Provenance analysis suggests that the sediment components are dominated by terrigenous detritus during MIS 2 and MIS 5a, while the contribution of volcanic detritus significantly increases over the last 8 ka. There exists provenance difference between MIS 2-MIS4, and the early and late last deglacial periods. Both sea level and East Asian Summer Monsoon are the main controlling factors for terrigenous detritus accumulation in the northern Okinawa Trough.

Key words: rare earth elements; sediment provenance; Ce negative anomaly; sediment fluxes evolution; northern Okinawa Trough