



近 700 ka 来西菲律宾海沉积物来源和东亚冬季风演化的常量元素记录

徐兆凯^①, 李铁刚^{①*}, 于心科^①, 李安春^①, 唐正^②, CHOI JinYong^③, 南青云^①

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 青岛海洋地质研究所, 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071;

③ Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan, 573-701, Korea

* 联系人, E-mail: tgli@qdio.ac.cn

2012-05-22 收稿, 2012-09-28 接受, 2013-03-28 网络版发表

海洋公益性行业科研专项(201005003)、中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金、国家自然科学基金(41106043, 41230959)、国家重点基础研究发展计划(2007CB815903)和中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-221)资助

摘要 为系统了解西菲律宾海 700 ka 以来柱状沉积物的常量元素组成特征及其物源和古环境指示意义, 对本哈姆高原上 MD06-3047 孔的 221 个样品进行了粒度 and 常量元素组成分析, 并测试了其中 16 个典型沉积物中碎屑态的常量元素含量. 物源判别图解及 R 型因子分析结果均表明钻孔中主要氧化物含量在垂向上的变化主要受控于附近火山碎屑物质沉积作用和陆源风尘物质输入, 而海洋生物沉积作用及热液活动的影响较小. 特别是以 Al_2O_3 和 K_2O 为代表的陆源风尘因子的得分变化表现出明显的冰期-间冰期旋回特征, 并与南极冰芯的古温度记录及中国黄土的东亚冬季风记录间具有良好可比性, 进而为揭示东亚冬季风强度及风尘源区干湿条件制约下的研究区内陆源风尘物质输入演化历史提供了新的替代性指标.

关键词

常量元素
物源
风尘物质
东亚冬季风
西菲律宾海

菲律宾海位于西太平洋, 其地理位置特殊, 构造复杂. 菲律宾海板块位于全球最大的大陆板块——欧亚板块和最大的大洋板块——太平洋板块之间, 并对中国大陆东南部和菲律宾群岛具有重要的挤压变形作用. 此外, 全球闻名的黑潮暖流也起源于菲律宾海西部. 该海区的重要地质意义早在 20 世纪 70 年代就引起了全球科学家们的高度关注, 至今已进行了 6 个航次的深海钻探和大洋钻探研究. 然而, 除深海钻探和大洋钻探所进行的大时间尺度(构造尺度)研究外, 迄今为止, 对西菲律宾海黑潮源区柱状沉积物较高分辨率地球化学方面的系统研究仍缺失^[1,2].

东亚季风是全球气候系统的重要组成部分, 受亚洲大陆与西太平洋暖池之间差异加热驱动, 并具有季节性变化的风力、降雨量和径流量等气候环境特征^[3].

其中冬季风以大陆变冷、亚洲北部发育高压和东北风穿过西菲律宾海为特征, 而夏季风则呈相反变化^[3,4]. 在过去的几十年里, 众多科学家已尝试通过对亚洲大陆黄土及海洋(如南海、北太平洋及赤道太平洋)沉积物中风尘物质组成特征等对东亚冬季风演化和亚洲内陆干旱化历史等科学问题开展了大量研究工作^[5~8], 然而其中的常量元素指标研究却很少见. 对于菲律宾海而言, 尽管中外科学家们通过黏土矿物、地球化学及孢粉指标的研究推断来自亚洲内陆干旱地区的风尘物质也会影响其沉积物组成及表层海水营养状况^[1,2,9~11], 然而这些研究都缺乏精确和较高分辨率的年代标尺, 进而严重限制了相关研究工作的深入开展. 特别是对于晚第四纪时间段内黑潮源区这一重要位置处陆源风尘物质输入的演化历史问题

引用格式: 徐兆凯, 李铁刚, 于心科, 等. 近 700 ka 来西菲律宾海沉积物来源和东亚冬季风演化的常量元素记录. 科学通报, 2013, 58: 1048–1056

英文版见: 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. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5538-8

迄今仍不明了。

前人的研究成果已经证实常量元素组成及其赋存状态和基于常量元素含量的 R 型因子分析是探讨海底沉积物成因、物源和输运路径等的有效手段^[1,2,12~15]。本研究希望通过对 221 个沉积物全样及 16 个典型样品碎屑态中常量元素组成的综合分析,并结合之前对研究区以东的东菲律宾海表层沉积物的前期研究成果^[9,12,15],进而揭示西菲律宾海柱状沉积物的常量元素组成特征及其物源和古环境指示意义。

1 材料和方法

1.1 区域地质概况和样品采集

MD06-3047 孔(17°00.44'N, 124°47.93'E)位于吕宋岛岸外的本哈姆高原上,系 2006 年由中法合作 Marco Polo 2 航次用 Calypso 取样器采得。该孔总长为 8.9 m, 取样水深为 2510 m。由于西菲律宾海自南向北的黑潮及附近散布的海底深海沟(槽)的阻隔作用,再加上研究区远离陆地和较大岛屿,从而使中国大陆和日本群岛的河流来源物质难以大量进入研究区^[1,2,9,10]。

MD06-3047 岩芯沉积连续,未见明显的沉积间断和浊流沉积层出现。该岩芯主要由黄色粉砂质泥组成,并夹杂有多层明显的黑色火山灰层。由于取样水深处于碳酸盐溶跃面(3400 m)之上,因而沉积物中钙质生物化石的保存程度较高^[16]。

1.2 样品处理与测试

357 个沉积物样品经 50℃低温烘干后,每样用 5%双氧水去除有机质并过 63 μm 铜筛冲洗获取有孔虫壳体。然后从中挑选 3~8 枚大于 300 μm 的底栖有孔虫单种 *C. wuellerstorfi* 进行氧同位素的测试工作,所用仪器为中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室的 GV Isoprime 质谱仪,该仪器对 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析误差小于 0.08‰。最后经国际 NBS19 标准将所测 $\delta^{18}\text{O}$ 数据校正为 PDB 标准。

常量元素、典型微量元素(V 和 Cd)及稀土元素分析样品的取样间距多为 4 cm,共取得测试样品 221 个。待测沉积物样品经 50℃低温烘干后研磨至小于 200 目,送交中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室用电感耦合等离子体发射光谱仪

(ICP-OES)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行测定,其准确度由同时测试国家一级标准物质 GSD-9 来控制,所有测量误差均低于 4%。

本文所用元素赋存状态研究的分级提取方法基于文献[9,12]并有所简化。在经过一系列优级纯化学试剂(去离子水、醋酸钠、醋酸、盐酸羟胺及硝酸+双氧水)的连续性提取后,可以得到 2 个具有不同活动性和物质组分的相态,即碎屑态和非碎屑态(包括孔隙水、吸附态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物态和有机结合态^[9,12])。该方法对大部分碎屑成因的常量元素(如 Fe, Mg 和 K)的回收率较高(95%~105%)。对于 16 个来自典型冰期、间冰期阶段沉积物样品中碎屑态的常量元素含量,也由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室用 ICP-OES 进行测定,其测量误差不超过 3%。

此外,我们还对这 221 个样品进行了粒度测试,共获得有效粒度数据 220 组(其中一个样品已在常量元素测试过程中耗尽)。每个待测样品先去除有机质和碳酸盐,然后在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室用法国产 Cilas 940L 型激光粒度仪进行粒度测试,其测量范围为 0.5~2000 μm,重复测试的相对误差小于 2%。

2 结果

在将我们的底栖有孔虫单种(*C. wuellerstorfi*) $\delta^{18}\text{O}$ 数据与 LR04 标准 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线进行细致对比的基础上^[17],并结合所研究柱状样中 160 cm 处出现的具有确定形成年龄(120 ka)的西太平洋粉红色红拟抱球虫绝灭界线^[18],即可获知所研究岩芯的时间跨度为 696 ka,即氧同位素阶段(MIS)1~17(图 1),其时间分辨率平均为 0.78 ka cm⁻¹。此外,该年龄框架的有效性还得到了钙质超微化石地层学事件识别结果的验证^[16]。

本研究中所获得的柱状沉积物样品及附近地区相关物质的常量元素组成如表 1 所示。其中 Na₂O, MnO 和 P₂O₅ 的波动较大、变化规律不显著,而其余常量元素则表现出较明显的冰期-间冰期旋回变化特征(图 2)。此外,我们还利用 SPSS11.0 软件进行了常量元素 R 型因子分析,根据特征值大于 1 的原则,经方差极大正交旋转后得出了代表不同元素组合的 4 个因子(表 2),其累计方差贡献为 83.95%,表明此次因子分析的效果较为理想^[14,15]。而对其中 16 个典型

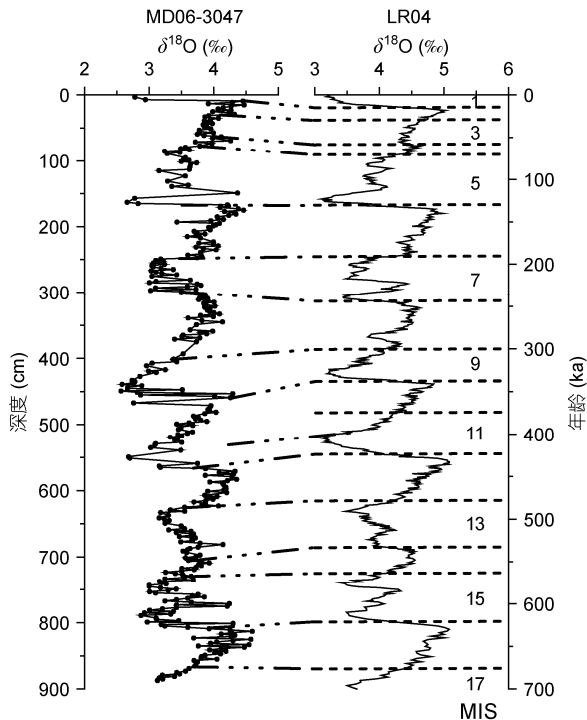


图 1 MD06-3047 孔 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线与 LR04 标准 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线^[17] 间对比结果

样品元素赋存状态的分析结果则表明：沉积物中的大部分常量元素(Al, Fe, Mg, K 和 P)主要赋存于碎屑态中，其平均值最小为 76.1%；而 Mn 和 Ca 元素则主要赋存于非碎屑态中，其在碎屑态中的平均值分别为 36.0%和 14.9%(表 3).

3 讨论

3.1 常量元素组成与典型比值

与研究区附近的东菲律宾海沉积物及全球标准物质(上陆壳和后太古代澳大利亚页岩)相比，所研究沉积物的常量元素组分具有深海沉积特点(表 1)^[15]. 之前对西菲律宾海柱状沉积物及东菲律宾海表层沉积物常量元素组成的研究结果表明，附近火山物质及源自东亚大陆的风尘物质是其主要物源端元^[11,12,15]. 而从表 1 也可以看出，所研究沉积物中的绝大多数常量元素含量均介于这 2 个物源端元之间.

Al 元素在海洋沉积物中一般不参与生物介质，主要赋存于铝硅酸盐碎屑矿物中，基本代表碎屑来源物质，且在沉积过程中相对稳定. 元素赋存状态分

表 1 MD06-3047 孔沉积物及附近地区相关物质的常量元素组成对比(%)

	MD06-3047		海洋沉积物	全球标准物质		附近火山物质 ^[20-22]			陆源风尘物质 ^[23,24]
	平均	标准偏差	东菲律宾海 ^[15]	上陆壳 ^[19]	后太古代 澳大利亚页岩 ^[19]	吕宋岛	九州-帛琉 海脊	西马利亚纳 海脊	中国黄土
Al ₂ O ₃	14.06	0.912	15.64	15.20	18.90	18.25	14.43	17.80	11.88
TFe ₂ O ₃	5.99	0.631	9.36	5.00	7.22	8.55	13.33	9.43	4.18
MgO	2.84	0.318	3.58	2.20	2.20	4.61	6.23	4.86	2.36
CaO	11.75	2.335	2.47	4.20	1.30	8.68	9.66	10.26	7.80
Na ₂ O	3.37	0.368	4.24	3.90	1.20	3.42	3.13	3.08	1.77
K ₂ O	1.54	0.164	2.43	3.40	3.70	1.06	0.71	1.00	2.25
TiO ₂	0.59	0.061	0.78	0.50	1.00	0.76	1.18	0.67	0.60
MnO	0.20	0.109	1.09	0.08	0.11	0.17	0.21	0.17	0.06
P ₂ O ₅	0.03	0.003	0.29	—	0.16	0.28	0.12	0.16	0.15

表 2 MD06-3047 孔沉积物常量元素 R 型因子分析结果

公因子	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	方差(%)
F1	0.30	0.97	0.85	-0.13	-0.27	-0.34	0.89	-0.02	0.20	34.84
F2	0.88	0.16	-0.11	-0.81	0.28	0.69	0.23	0.13	0.14	30.81
F3	0.02	-0.02	-0.23	-0.33	0.73	0.46	0.16	0.11	0.80	10.45
F4	0.03	0.02	-0.15	-0.12	-0.10	0.17	0.14	0.95	0.29	7.85

表 3 MD06-3047 孔 16 个典型沉积物样品碎屑态中常量元素在全样中的相对百分含量(%)

	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
最小值	80.3	95.2	82.7	8.2	37.0	82.1	8.4	59.4
最大值	99.5	106.3	95.4	26.6	68.1	92.1	68.1	86.5
平均值	88.2	101.3	87.6	14.9	48.8	86.6	36.0	76.1
标准偏差	4.46	3.04	3.87	5.60	9.04	2.62	19.27	8.52

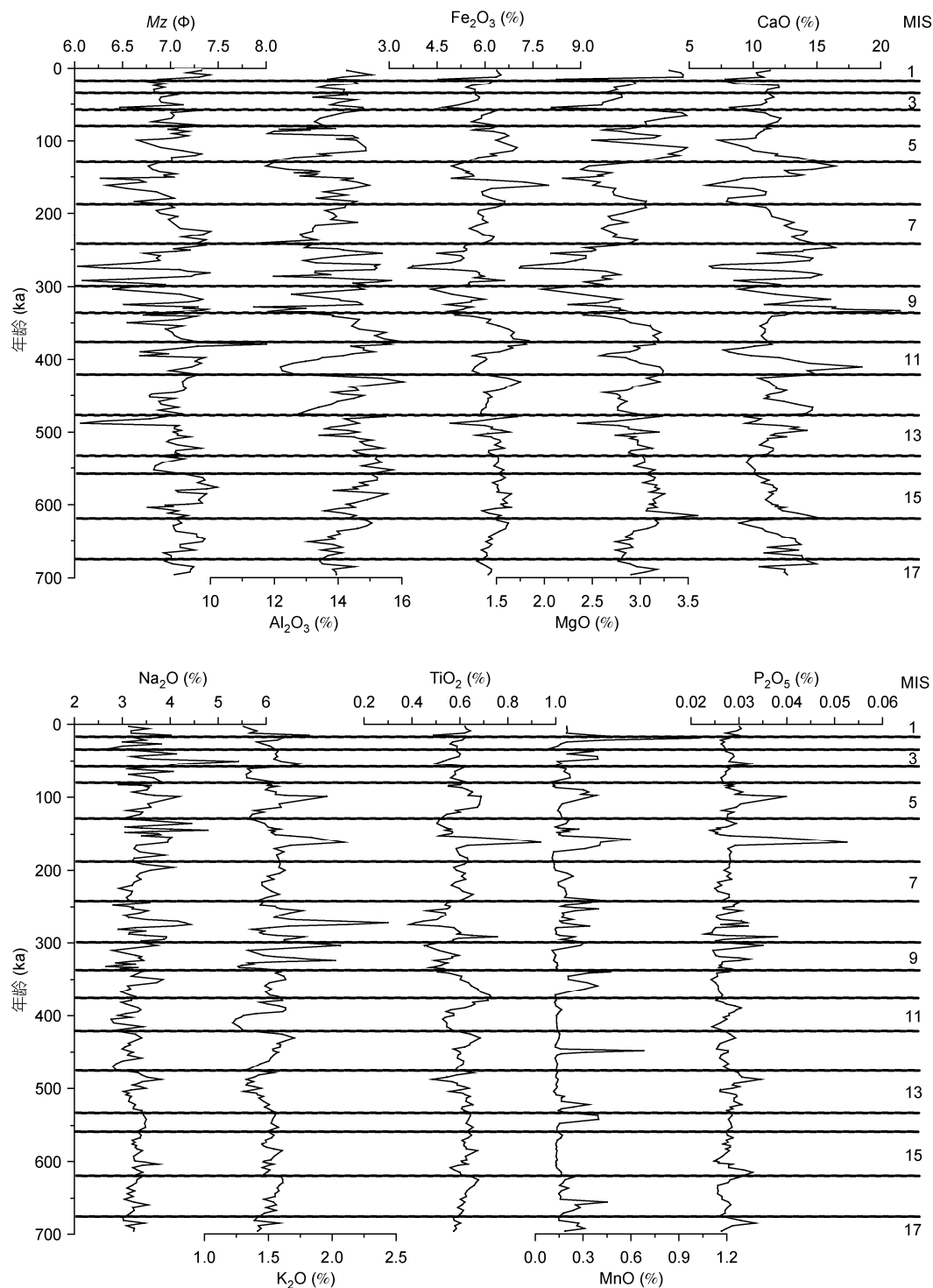


图 2 MD06-3047 孔平均粒径(M_z)和主要氧化物含量垂向变化

析结果也表明 16 个典型样品中的 Al 均主要赋存在碎屑态中, 其对全样中 Al 的贡献比例平均高达 88.2% (表 3). 因此, 利用某元素与 Al 的比值可以消除沉积物中矿物和粒度变化对该元素含量的影响, 进而判

断此元素在海洋环境中的物源和转化过程^[15,25,26]. 由于所研究沉积物的平均粒径与 9 种氧化物含量间的相关性都差(图 2), 表明粒度并非控制 MD06-3047 孔沉积物中常量元素组成的重要因素. 金属元素比值

(如 Fe/Al 和 V/Al) 已被成功应用于识别西太平洋海底沉积物的来源^[15,25,26]. 从图 3 可以看出, 所研究沉积物样品中的绝大部分落在 2 个可能主要物源端元(吕宋岛火山物质和风尘物质)之间, 并且其 Fe/Al 比值平均值(0.57)也处于陆源风尘物质(平均值为 0.44)与吕宋岛火山物质(平均值为 0.62)范围内^[20,21,23,24]. 而太平洋沉积物中生物吸附成分的特征 Fe/Al 比值为 1.56^[25], 明显不同于所研究沉积物(图 3), 从而排除了生物来源物质为所研究沉积物主要物源的可能性. 此外, 元素赋存状态分析结果也表明非碎屑态只对个别常量元素(Mn 和 Ca)有较大贡献(表 3).

菲律宾海沉积物中的稀土元素主要赋存于碎屑态中, 且其含量基本不受生物成因物质(如碳酸盐)影

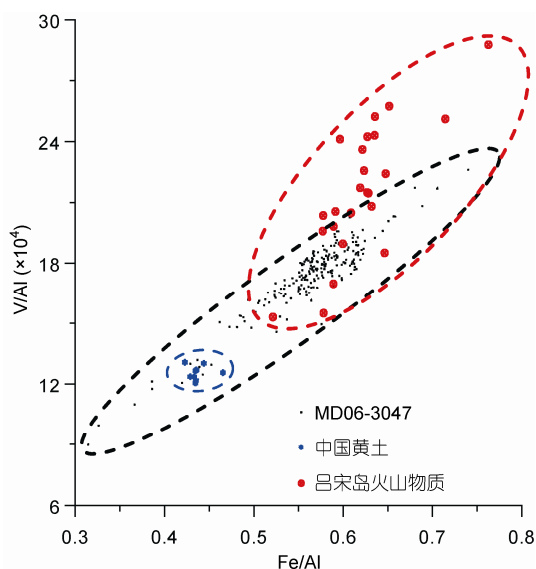


图3 Fe/Al 和 V/Al 比值散点图及其揭示的沉积物来源
吕宋岛火山物质及中国黄土数据来自文献[21~24]

响, 因而是可靠的物源示踪剂^[9,12]. 所研究沉积物的稀土元素页岩标准化配分模式具有明显的轻稀土(La-Eu)亏损、重稀土(Gd-Y)富集和 Eu 正异常特征(图 4), 并且所研究沉积物的轻稀土亏损特征与具有相近形成年代的典型吕宋岛火山物质非常相似(图 4), 表明附近火山物质应为所研究沉积物的主要物源^[9,12]. 而对于另一种可能物源——中国黄土而言, 它具有相对平坦的稀土元素配分模式及与所研究沉积物略近的重稀土含量(图 4), 表明它对所研究沉积物的贡献相对较小. 在菲律宾海沉积物的可能主要物源中, 只有附近的玄武岩具有典型的 Eu 正异常特征, 而中国黄土则无 Eu 异常, 那么所研究沉积物中 Eu 的正异常也应该是受附近火山物质的影响而形成的^[9,12]. 特别是稀土元素可被用于定量估算亚洲内陆来源风尘物质及当地火山物质对北太平洋沉积物的贡献大小^[27], 相应可推知 MD06-3047 孔顶部沉积物中风尘物质的贡献比例为 27.5%, 其物质堆积速率为 $143.2 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$ (徐兆凯, 未发表数据). 基于 MD06-3047 孔附近一个表层沉积物(NGC8, $16^{\circ}19.76'\text{N}$, $137^{\circ}59.30'\text{E}$)的 Sr 同位素组成数据及相应的物源端元计算公式^[2,28], 其风尘物质含量约为 26.4%, 与我们的估算结果非常相似. 此外, MD06-3047 孔柱表沉积物中风尘物质的堆积速率也落在前人对研究区风尘物质堆积速率的估计范围($100\sim1000 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$)之内^[29].

综上所述, 附近火山物质及风尘物质是所研究沉积物的 2 个主要物源端元, 而这也与之前对东菲律宾海表层沉积物的研究结论相一致^[9,12,15]. 其中位于研究区以西的吕宋岛上的火山物质可能由河流或洋流携带而来^[30,31], 而位于研究区以东的九州-帛琉海脊和西马里亚纳海脊上的火山物质的搬运载体则可

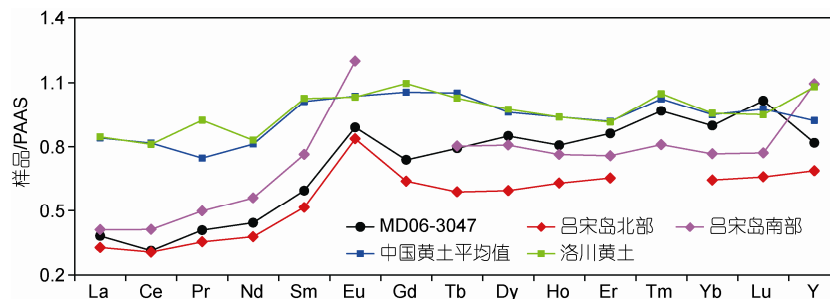


图4 MD06-3047 孔沉积物、吕宋岛北部火山物质、吕宋岛南部火山物质和中国黄土的稀土元素后太古代澳大利亚页岩(PAAS)标准化配分模式对比

吕宋岛火山物质及中国黄土数据来自文献[21~24]

能为自西往东的北赤道流^[9]。例如,吕宋岛这一菲律宾群岛中最大的岛屿是一个中-基性的火山岛弧,具有构造活动活跃、高地形起伏、大降雨量(年降雨量为 1900~2100 mm)和高温的特征(23~34 °C, <http://www.worldweather.org>),从而使其上的火山物质经历着强烈的化学风化作用,如其河流沉积物中黏土粒级组分(<2 μm)正在经历的中-强程度的化学风化作用^[32]。吕宋岛上强化学风化作用形成的细粒火山物质可能以悬浮物的形式进入研究区^[31],而源于东亚大陆干旱地区的风尘物质则可以被东亚冬季风携带而至^[9~11]。

3.2 R 型因子分析

根据上述常量元素组成特征及物源判别分析结果,可知所研究沉积物主要来源于附近火山碎屑物质及陆源风尘物质,而两者均为碎屑成因。为了进一步验证我们的上述物源推论,我们对 221 个样品的常量元素含量进行了 R 型因子分析(表 2)。

F1 主因子的方差贡献最大,为 34.84%,表明它对所研究沉积物常量元素组成具有最重要的影响,其组合是 TFe_2O_3 、 MgO 和 TiO_2 ,且均为正载荷。由于 Fe、Mg 和 Ti 主要赋存于表生环境下地球化学性质比较稳定的火山碎屑物质中(如吕宋岛、九州-帛琉海脊及西马利亚纳海脊上的玄武岩)^[20~22],而元素赋存状态分析结果也表明它们在碎屑态中的平均赋存比例最低值也高达 87.6%(表 3)。再结合我们上面的分析及之前对东菲律宾海表层沉积物的相关研究成果^[15],可知 F1 因子主要代表了附近火山碎屑物质的影响。而这一点也可以从表 1 中附近火山碎屑物质中这些元素相对于所研究样品——MD06-3047 孔沉积物的明显富集及其在另一物质端元——陆源风尘中的低含量得到证实。

F2 因子的方差贡献为 30.81%,是影响所研究沉积物常量元素含量的第二大因素。该因子的元素组合为正载荷的 Al_2O_3 和 K_2O ,并且它们也主要赋存在碎屑态中(相应平均值分别为 88.2%和 86.6%)。由于它们的富集往往与海洋沉积物中的某些黏土矿物(如伊利石、绿泥石和白云母)密切相关^[15],前人对附近柱状沉积物中伊利石化学组成的分析结果也表明其富含 Al_2O_3 (平均为 36.36%)和 K_2O (平均为 5.97%)^[30],加之菲律宾海的伊利石主要为风尘成因^[10,30],因而该因子主要代表了陆源风尘物质的影响。此外,所研

究柱状沉积物的 F2 因子得分、 Al_2O_3 含量、 K_2O 含量均与基于稀土元素数据获得的风尘物质贡献大小成正比,其相关系数均高于 0.49(徐兆凯,未发表数据)。而该因子对研究区以东的东菲律宾海表层沉积物常量元素组成的方差贡献为 14.79%,明显低于本次研究结果,从而表明陆源风尘物质对 MD06-3047 孔的影响要高于东菲律宾海。这也和东菲律宾海相对研究区更远离风尘物质源区——东亚大陆干旱地区的地理位置相吻合^[5,9,10,30]。值得关注的是, F2 因子中还包含有负载荷的 CaO ,可能指示着生物成因碳酸盐对陆源风尘物质的稀释作用^[15]。

F3 因子的方差贡献为 10.45%,是影响所研究沉积物常量元素组成的第三大因素。该因子的元素组合为 Na_2O 和 P_2O_5 ,它们均为正载荷。根据前人的相关研究成果可知, Na_2O 峰值往往对应着火山活动的影响,而后者则可能由生物有机质提供^[13,15],因此该因子主要代表了附近火山活动和生物作用的共同影响。

F4 因子的方差贡献最小,仅为 7.85%。该因子的正载荷元素组合为 MnO 。前人对附近地区的相关研究成果表明,影响沉积物中 MnO 组成的主要因素可能包括热液作用^[13]和/或早期成岩作用^[14,33]。根据 MD06-3047 岩芯中 MnO 含量总体较小的波动范围及未见明显的富集-亏损界面出现的现象(图 2),加之其主要赋存于水成成因的非碎屑态中(平均值为 64.0%),可以推断热液作用为控制该因子的主要因素。而 MD06-3047 孔沉积物中 Mn 含量与其他氧化-还原环境敏感指标(如 Fe、Cd 和 Ce 含量异常)^[9,12,33]间很差的相关性(相关系数分别为 0.02, 0.04 和 0.17)则进一步排除了其变化受控于成岩作用的可能性。

由上面的因子分析结果可知,所研究沉积物的常量元素主要来自附近火山碎屑物质及陆源风尘物质,而生物作用及热液活动的影响则相对较小。

3.3 陆源风尘因子的古环境指示意义

东亚季风演化的典型效应之一就是影响着风尘物质源区的物理风化作用强度,及其所携带物质汇聚地区海洋沉积物中陆源风尘物质的贡献大小。具体来讲,当冬季风增强时,风尘源区干旱程度及物理风化作用加剧,引起其携带物质汇聚区(如北太平洋和西太平洋边缘海)海洋沉积物中陆源风尘物质比例的增加,反之亦然。然而尽管近来已有在南海地区利用沉积物常量元素含量 R 型因子分析来指示与东亚

夏季风密切相关的河流携带陆源碎屑物质贡献及其历史变迁的探索性研究工作^[14],但利用该指标来探讨深海沉积物中与东亚冬季风密切相关的陆源风尘物质输入演化历史则迄今未见。

由于与南海处于相同纬度且同样受到东亚季风控制^[4],并因远离大陆从而受河流输入陆源碎屑物质的影响明显比南海地区弱,因而西菲律宾海应该也是开展海洋沉积物中陆源风尘物质输入变迁及其对风尘物质源区干旱程度和东亚冬季风强度响应的理想之地^[9,10]。对于 MD06-3047 孔沉积物而言,由于与陆源风尘物质密切相关的 Al_2O_3 和 K_2O 在 F2 因子中均为正载荷,因此 F2 因子得分的增大(或减小)则意味着所研究沉积物中陆源风尘物质贡献比例的增加(或减少),进而指示风尘源区干旱程度的增大(或减小)和东亚冬季风的增强(或减弱)。从图 5 中可以看出,MD06-3047 孔陆源风尘因子得分呈现出明显的冰期-间冰期旋回特征,并与该孔底栖有孔虫氧同位素曲线的变化总体一致,具体表现为:在冰期时,陆源风

尘物质对当时所形成海洋沉积物的贡献增大,而在间冰期时则呈现出相反的变化趋势。进而说明,在冰期时,风尘源区(亚洲内陆干旱地区)相对干冷,增强的东亚冬季风能剥离更多的陆源碎屑物质并将其携带至研究区;而在间冰期时,风尘源区相对暖湿,减弱的东亚冬季风只能将较少的陆源物质带入研究区,从而体现了冰期-间冰期旋回对东亚冬季风演化的制约作用。

中国黄土、深海沉积物和极地冰芯一起构成国际古气候变化研究的三大支柱^[5-7,34-36]。其中中国黄土序列具有粒度细、沉积速率高和连续性好等特征,是蕴含古环境信息最为丰富的晚新生代陆相沉积物之一;而极地冰芯则可以提供晚第四纪以来最直接和高分辨率的大气变化信息。为了进一步验证利用陆源风尘因子得分来指示东亚冬季风强弱变化的可信性,我们将本次计算结果与中国黄土高原宝鸡剖面沉积物的 Md 值及南极冰芯的 δD 值进行了系统对比(图 5),其中黄土较低的 Md 值代表着较粗的粒径进

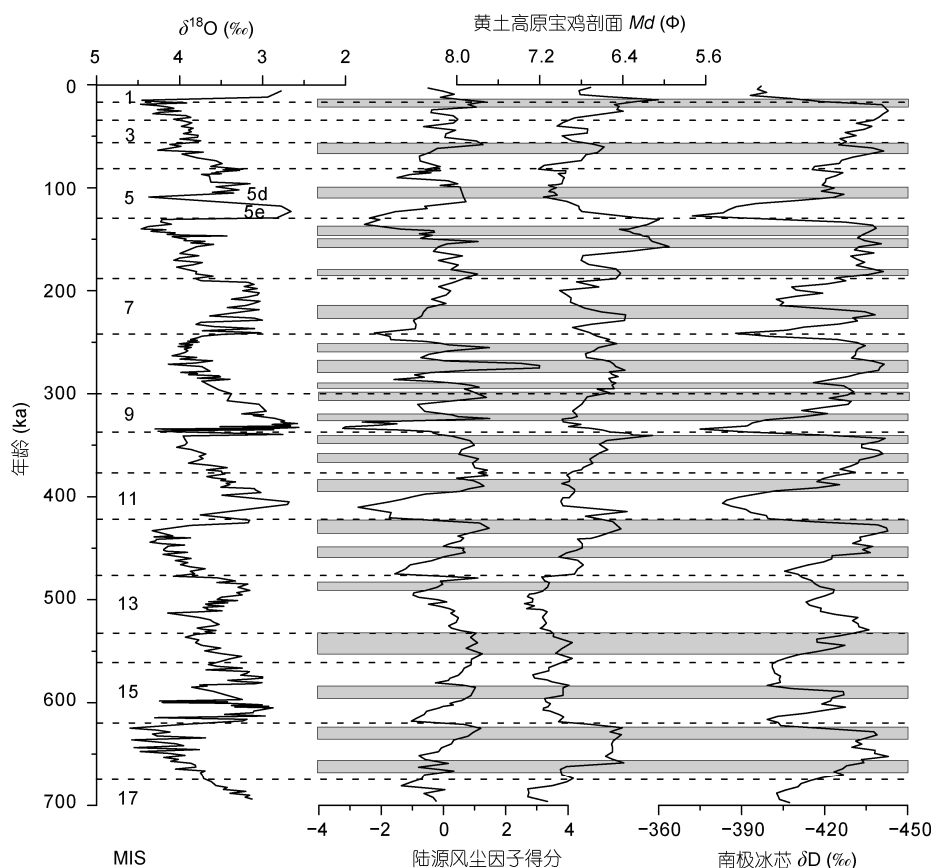


图5 MD06-3047 孔沉积物陆源风尘因子得分及其与冰期-间冰期旋回和东亚冬季风演化间的对比
黄土高原宝鸡剖面中值粒径(Md)及南极冰芯 δD 数据来自文献[34,35]

而指示着较强的东亚冬季风强度,而南极冰芯记录中较小的 δD 值则对应着较干冷的古气候环境.对比结果显示它们的变化趋势总体上很一致,均表现出明显的冰期-间冰期旋回特征(图 5).前人对同纬度的附近地区——南海沉积物常量元素含量 R 型因子分析结果也表明~600 ka 来的东亚夏季风演化进入受冰期-间冰期旋回制约的主旋律^[14].并且自 600 ka 以来,MD06-3047 孔陆源风尘因子得分指示的东亚冬季风强度较之前明显增加,这可以从 MIS14 期及其以后的冰期中所对应的明显高于 MIS16 期冰期的陆源风尘因子得分得到证实(图 5),而对北太平洋沉积物中风尘物质和中国黄土高原的研究也表明过去 600 ka 的风尘物质堆积速率是晚新生代中最高的阶段^[5,36],表明亚洲内陆的干旱环境早在 600 ka 前就已形成.尤其值得注意的是,不同指标的绝大多数峰值间都吻合得很好(图 5 中的阴影部分),例如, MIS5 间冰期中部(~MIS5.4)的较高陆源风尘因子得分与此时底栖有孔虫较重的 $\delta^{18}O$ 值及南极冰芯所记录的较冷气候相一致;又如, MIS8 冰期中陆源风尘因子得分的 3 个峰值与宝鸡剖面黄土 Md 值及南极冰芯 δD 值间也一一对应.这都表明了本文中我们提出的利用陆源风尘因子得分来指示东亚冬季风强度及风尘源区干湿程度的有效性,并且有望为解决研究区及附近地区的关键科学问题(如东菲律宾海沉积物中硅藻席的成因是否与风尘输入密切相关等)提供新的契机.当然,需要指出的是,陆源风尘因子得分指标和底栖有孔虫氧同位素曲线、黄土粒度及南极冰芯 δD 值之间在某些变化细节上仍然有一定的差异(图 5).这可能是由于所用样品的时间分辨率不同及不同指标所受到

的区域性影响因素的差异引起的.事实上,对于分析样品量较少进而具有较低时间分辨率的 MIS1 期(4 个样)、MIS2 期(6 个样)和 MIS4 期(4 个样)这 3 个阶段,其陆源风尘因子得分与另外几个指标间的可比性明显比分析样品数量较多从而具有较高时间分辨率的其他期次要差(图 5).

4 结论

通过对西菲律宾海 MD06-3047 孔沉积物进行常量元素组成、元素赋存状态及 R 型因子综合分析,并结合典型元素比值及稀土元素后太古代澳大利亚页岩标准化配分模式,探讨了西菲律宾海 700 ka 来的物源演化和古环境变迁,初步得到以下主要结论:

(1) 附近火山碎屑物质及陆源风尘物质为所研究沉积物的 2 个主要物源端元.

(2) R 型因子分析结果表明,两大主要因子 F1(TFe_2O_3 , MgO 和 TiO_2)和 F2(Al_2O_3 和 K_2O)分别反映了附近火山碎屑物质及陆源风尘物质对所研究沉积物常量元素组成的影响,而次要因子 F3(Na_2O 和 P_2O_5)及 F4(MnO)则指示着来自附近火山活动、生物作用及热液活动的较小影响.

(3) 陆源风尘因子(Al_2O_3 和 K_2O)得分的变化具有明显的冰期-间冰期旋回特征,反映了所研究沉积物中陆源风尘物质贡献比例的波动,进而能够揭示风尘源区(亚洲内陆干旱地区)干湿程度及东亚冬季风强度的演变过程.而它与所研究岩芯氧同位素曲线、黄土高原宝鸡剖面粒度参数及南极冰芯古温度记录间的良好可比性则进一步证实了该新指标对西菲律宾海风尘物质输入及其驱动机制的良好指示作用.

致谢 研究样品由中法合作 MARCO POLO 2 航次取得,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室的马更田副主任和中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室的王红莉老师在样品测试中给予了极大的帮助,谨此一并致谢.

参考文献

- 1 石学法,陈丽蓉.西菲律宾海晚第四纪沉积地球化学特征.海洋与湖沼,1995,26:124-131
- 2 Asahara Y, Tanaka T, Kamioka H, et al. Asian continental nature of $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios in north central Pacific sediments. Earth Planet Sci Lett, 1995, 133: 105-116
- 3 Clift P D, Plumb R A. The Asian Monsoon: Causes, History and Effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2008
- 4 Liu T-H, Tsai F, Hsu S-C, et al. Southeastward transport of Asian dust: Source, transport and its contributions to Taiwan. Atmos Environ, 2009, 43: 458-467
- 5 Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere. Paleoclimatology, 1998, 15: 215-224

- 6 Patterson D B, Farley K A, Norman M D. ^4He as a tracer of continental dust: A 1.9 million year record of aeolian flux to the west equatorial Pacific Ocean. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63: 615–625
- 7 Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416: 159–163
- 8 Wang P X, Clemens S, Beaufort L, et al. Evolution and variability of the Asian monsoon system: state of the art and outstanding issues. *Quat Sci Rev*, 2005, 24: 595–629
- 9 徐兆凯, 李安春, 蒋富清, 等. 东菲律宾海沉积物的地球化学特征与物质来源. *科学通报*, 2008, 53: 695–702
- 10 Wan S M, Yu Z J, Clift P D, et al. History of Asian eolian input to the West Philippine Sea over the last one million years. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2012, 326–328: 152–159
- 11 戴璐, 翁成郁. 西太平洋海域冬季花粉传播观测及其在东亚季风研究中的意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2010, 40: 893–902
- 12 徐兆凯, 李安春, 徐方建, 等. 东菲律宾海表层沉积物中元素的赋存状态. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27: 51–58
- 13 束振华, 杨守业, 窦衍光, 等. 冲绳海槽 DGKS9604 孔酸不溶相中常量元素组成及环境指示意义. *热带地理*, 2009, 29: 236–240, 273
- 14 孟宪伟, 夏鹏, 张俊, 等. 近 1.8 Ma 以来东亚季风演化与青藏高原隆升关系的南海沉积物常量元素记录. *科学通报*, 2010, 55: 3328–3332
- 15 徐兆凯, 李安春, 李铁刚, 等. 东菲律宾海表层沉积物常量元素组成及地质意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30: 43–48
- 16 孙晗杰, 李铁刚, 孙荣涛, 等. 西菲律宾海第四纪钙质超微化石及微玻陨石地层学. *科学通报*, 2011, 56: 1749–1755
- 17 Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 2005, 20, PA1003, doi: 10.1029/2004PA001071
- 18 Thompson P R, Be A W H, Duplessy J-C, et al. Disappearance of pink-pigmented *Globigerina ruber* at 120000 yr BP in the Indian and Pacific Oceans. *Nature*, 1979, 280: 554–558
- 19 Taylor S R, McLennan S H. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1985
- 20 Wood D A, Matthey D P, Joron J L, et al. A geochemical study of 17 selected samples from basement cores recovered at sites 447, 448, 449, 450, and 451, Deep Sea Drilling Project Leg 59. In: Kroenke L, Scott R B, Balshaw K, et al., eds. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 59*. U.S. Govt. Printing Office, 1981. 743–752
- 21 Castillo P R, Newhall C G. Geochemical Constraints on Possible Subduction Components in Lavas of Mayon and Taal Volcanoes, Southern Luzon, Philippines. *J Petrol*, 2004, 45: 1089–1108
- 22 Marini J C, Chauvel C, Maury R C. Hf isotope compositions of northern Luzon arc lavas suggest involvement of pelagic sediments in their source. *Contrib Mineral Petrol*, 2005, 149: 216–232
- 23 文启忠, 刁桂仪, 耿安松, 等. *中国黄土地球化学*. 北京: 地质出版社, 1989. 36–114
- 24 Gallet S, Jahn B-M, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications. *Chem Geol*, 1996, 133: 67–88
- 25 Bischoff J L, Heath G R, Leinen M. Geochemistry of deep-sea sediments from the Pacific manganese nodule province: DOMES sites A, B, C. In: Bischoff J L, Piper D Z, eds. *Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province*. New York: Plenum Press, 1979. 397–436
- 26 Cha H-J, Choi M S, Lee C-B, et al. Geochemistry of surface sediments in the southwestern East/Japan Sea. *J Asian Earth Sci*, 2007, 29: 685–697
- 27 Shigemitsu M, Narita H, Watanabe Y W, et al. Ba, Si, U, Al, Sc, La, Th, C and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in a sediment core in the western subarctic Pacific as proxies of past biological production. *Mar Chem*, 2007, 106: 442–455
- 28 Faure E. *Principles of Isotope Geology*. New York: Wiley, 1986. 141–153
- 29 Duce R A, Liss P S, Merrill J T, et al. The atmospheric input of trace species to the world ocean. *Glob Biogeochem Cycle*, 1991, 5: 193–259
- 30 石学法, 陈丽蓉, 李坤业, 等. 西菲律宾海西部海域粘土沉积物的成因矿物学研究. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15: 61–72
- 31 Ge S L, Shi X F, Yang G, et al. Rock magnetic response to climatic changes in west Philippine Sea for the last 780 ka: Discussion based on relative paleointensity assisted chronology. *Front Earth Sci China*, 2008, 2: 314–326
- 32 Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments. *Appl Geochem*, 2009, 24: 2195–2205
- 33 韦刚健, 李献华, 刘颖, 等. 沉积物成岩蚀变过程中的 Mn、Cd 和 Mo 元素活动特征: 以 ODP 1148 站钻孔沉积物记录为例. *地球化学*, 2005, 34: 129–135
- 34 Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record. *Paleoceanography*, 2002, 17, doi: 10.1029/2001PA000725
- 35 EPICA community members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 2004, 429: 623–628
- 36 孙有斌, 安芷生. 最近 7 Ma 黄土高原风尘通量记录的亚洲内陆干旱化的历史和变率. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31: 769–776