

3.7 Ma 以来西菲律宾海 XT-4 孔沉积物元素特征及其古环境指示意义

王晨^{1,2}, 徐方建^{2,3}, 胡邦琦^{1,3,4}, 徐磊^{1,3}, 丁雪^{1,3,4}, 王飞飞^{1,3}, 黄威^{1,3}, 郭建卫^{1,3}

(1. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 3. 青岛海洋科学与技术试点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 266071; 4. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘要: 对西菲律宾海盆南部 XT-4 孔柱状沉积物进行了元素地球化学分析, 利用常量元素上地壳标准化图解和 R 型因子分析方法进行了物源探究, 利用因子分析得出的陆源因子得分变化探讨了物源区的古环境演化。结果表明: XT-4 常微量元素垂向上变化主要受控于亚洲内陆的风尘物质和周边火山物质的输入, 海洋自生物质也有一定的贡献。以 TiO₂ 和 K₂O 等元素为代表的陆源因子得分自 3.7 Ma BP 以来表现出阶段性上升的变化趋势, 与中国黄土和北太平洋 ODP 885/886 站沉积物记录的东亚冬季风演化记录有着良好的对比性, 同时与青藏高原主要的阶段性隆升时间相对应, 响应了晚新生代以来青藏高原隆升对东亚冬季风加强的作用。本研究丰富了西菲律宾海盆的风尘沉积研究, 为后续研究提供一定的认识基础。

关键词: 西菲律宾海盆; 物源; 风尘; 东亚季风; 青藏高原隆升

中图分类号: P736.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)08-0205-10

DOI: 10.11759/hyxx20191201001

菲律宾海位于西太平洋, 其地理位置特殊, 受季风、洋流、地型等因素影响, 是西太平洋典型的风尘汇集区^[1-4]。近年来, 诸多学者通过粒度、黏土矿物、地球化学等指标, 对西菲律宾海沉积物风尘组成特征、源区判别以及搬运动力等科学问题进行了大量研究^[1-5], 结果表明, 其沉积物主要为周边火山物质和亚洲风尘的双端元混合产物。然而, 目前针对菲律宾海沉积物的研究主要集中在第四纪时期, 新近纪晚上新世以来的研究较少。新近纪晚上新世以来, 全球发生了一系列重大事件, 气候方面有北极冰盖扩张^[6]、亚洲内陆干旱加剧^[7]等, 构造方面有集中在 3.6 Ma BP 时间段青藏高原隆升及其对周边环境演化的影响^[8-9], 东亚季风 3.6—2.6 Ma BP 期间快速增强^[10-11]。

东亚季风是现代气候系统的重要组成部分, 其变化控制了季节性的风力变化、降水、径流量以及陆地植被覆盖等气候环境特征^[12-13]。前人通过对中国黄土及海洋沉积物中风尘组分对亚洲干旱以及东亚季风演变开展了大量研究^[7, 14-16], 认为在构造时间尺度上青藏高原隆起是其可能的驱动因子^[10]。过去以菲律宾海沉积物为对象对亚洲风尘的研究更多关注点在冰期-间冰期时间尺度, 对其构造尺度上与季风演化

以及对青藏高原隆升响应的研究相对较少^[11, 17-18]。本文对西菲律宾海盆 XT-4 孔柱状沉积物进行地球化学元素测试, 利用 R 型因子分析, 提取出相应的陆源因子及其得分, 与中国黄土、北太平洋风尘通量演化以及晚新生代以来青藏高原阶段性隆升对比, 探讨了 3.7 Ma 以来西菲律宾海盆沉积物记录的亚洲风尘输入对东亚季风演化以及青藏高原隆升的响应。

1 材料与方法

1.1 研究区与样品

西菲律宾海盆位于菲律宾板块西部, 范围在

收稿日期: 2019-11-30; 修回日期: 2020-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(41976192); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(SKLLQG1707, SKLLQG1805); 中国地质调查局国家专项(DD20191010)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41976192; Open Fund of State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, No. SKLLQG1707, No. SKLLQG1805; National Project of China Geological Survey, No. DD20191010]

作者简介: 王晨(1995-), 男, 江苏盐城人, 硕士, 研究方向为海洋沉积与矿物学, E-mail: CWangforce180@163.com; 徐方建(1982-), 通信作者: 男, 山东青岛人, 博士, 副教授, 研究方向为海洋沉积与矿物学, E-mail: xufangjiang@163.com

120°E 到 137°E 和 0°N 到 31°N 之间^[19], 是菲律宾板块最主要的构造单元(图 1)。本研究所用 XT-4 孔沉积物于 2018 年在西菲律宾海盆南部使用重力采样器获取(16°04.3'N, 133°29.1'E, 水深 5 372 m)。样品长 4.28 m, 采用 4 cm 间隔取样。沉积物主要为深海黏土, 含有少量铁锰结核。

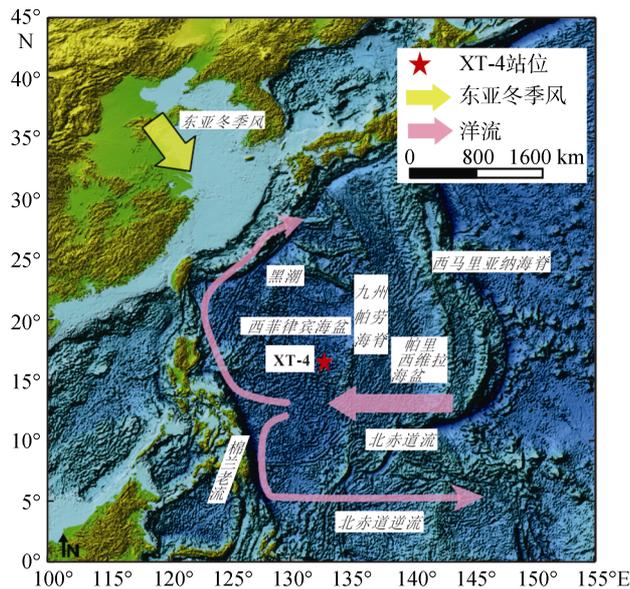


图 1 西菲律宾海盆位置及 XT-4 孔取样站位图

Fig. 1 Location of the West Philippine Basin and core XT-4

1.2 年代分析

本研究样品取自水深 5 000 m 以下, 位于碳酸盐补偿深度以下, 样品中钙质生物基本都被溶解, 难以用碳氧同位素来确定年代, 因此本研究采用古地磁学进行年代测定。用无磁性塑料 U 型槽(2 cm×2 cm×50 cm)取样, 获取了 424 cm 的定向样品。样品剩磁量用低温超导磁力仪(2G-755, 2G Enterprises, USA)进行测定, 其中磁力仪所在磁屏蔽室的余场强度小于 300 nT, 交变退磁最高外加场强为 90 mT, 间距为 5~10 mT, 测试间距为 2 cm。测量数据采用 Randolph J. Enkin 开发的 PGMSC (V4.2) 数据处理软件, 利用主成分分析法进行特征剩磁方向的计算。特征剩磁方向经过原点的线性拟合方式^[20]获得, 每次拟合利用不少于 4 个连续数据点进行, 且最大角偏差小于 15°。

1.3 常微量元素测试

以 4 cm 为间隔共采集了 107 个样品, 于 60°C 烘干后研磨至 200 目, 取 40 mg 样品放入 Teflon 罐中, 按顺序加入 1.5 mL HF 和 0.5 mL HNO₃, 加盖封好后

置于 150°C 的加热板加热 12 h, 样品完全溶解之后, 使用去离子水将样品稀释至 40 g, 再进行上机测试。常量元素使用 Thermo Icap6300 ICP-AES 进行测定, 微量元素使用 Perkin-Elmer ELAN DRC II ICP-MS 进行测定, 采用国家海洋沉积物一级标准物质 GBW07315、GBW07316 和美国地质调查局玄武岩标准物质 BCR-2 和 BHVO-2 作质量监控。

2 结果

2.1 年代

利用退磁矢量投影图对退磁数据进行评价、分析, 同时利用主成分分析法^[20]对退磁数据中不同磁成分进行有效分离。大部分样品表现为两种磁组分, 通过 10 mT 交变退磁步骤, 可以基本消除次生磁成分的影响。因此, 我们选用 20~60 mT 的区间剩磁分量, 利用“最小二乘法”拟合方法^[20]进行直线段拟合, 且所采用的退磁步骤不少于 4 个, 同时要求拟合的误差, 即最大角偏差(MAD)小于 15°。最终 197 个测试样点获得了稳定的特征剩磁分量, 占总测试样点的 93%。这些稳定的样点显示, XT-4 站的磁极性序列表现为 13 个磁极性区间, 分别为: 负极性 R1(54~78 cm)、R2(88~194 cm)、R3(238~282 cm)、R4(296~322 cm)和 R5(342~356 cm); 正极性 N1(0~54 cm)、N2(78~88 cm)、N3(194~238 cm)、N4(282~296 cm)、N5(322~342 cm)和 N6(356~424 cm)。由于沉积物岩性变化很小, 因此在无明显沉积间断的基础上, 将 XT-4 孔所得的磁极性区间变化与国际地层年表进行对比, 由此获得了 XT-4 孔的沉积年代学框架(图 2): 沉积柱样 54 cm 处对应于中更新世(781 ka BP)的开始, 第四纪底界位于 322 cm(2 581 ka BP)。

2.2 元素地球化学特征及分布模式

XT-4 孔的常微量元素含量如图 3、图 4 所示。从常微量元素的垂向变化上来看, 不同的元素在柱状沉积物中呈现出不同的变化趋势。总体上, 可大致分为 4 个阶段。3.7—3 Ma BP, SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、TiO₂、Cr、Ni 呈现上升趋势, MgO、Na₂O、MnO、Cu、Zn、Co、Cd 和 Pb 则相反, CaO、K₂O、P₂O₅ 变化较为稳定; 3—2.2 Ma BP 阶段, Cu、Zn、Ni 呈现出略微上升的趋势, 其余元素变化均较稳定; 2.2—1.3 Ma BP, SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、CaO、MgO、Na₂O、P₂O₅、Cu、Zn、Ni 在波动中表现为下降趋势, K₂O、TiO₂、MnO、Cr、Co、Cd、Pb 为

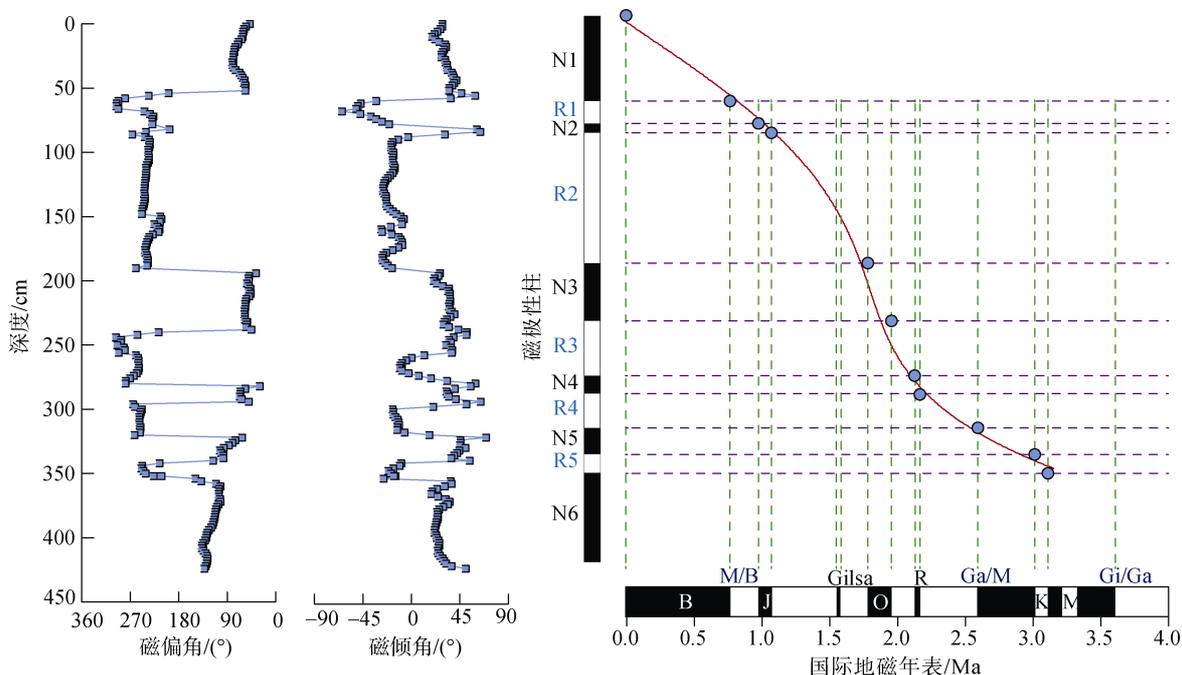


图2 XT-4孔磁极序列变化及其年代学框架

Fig. 2 The change of core XT-4 magnetic pole sequence and chronological framework

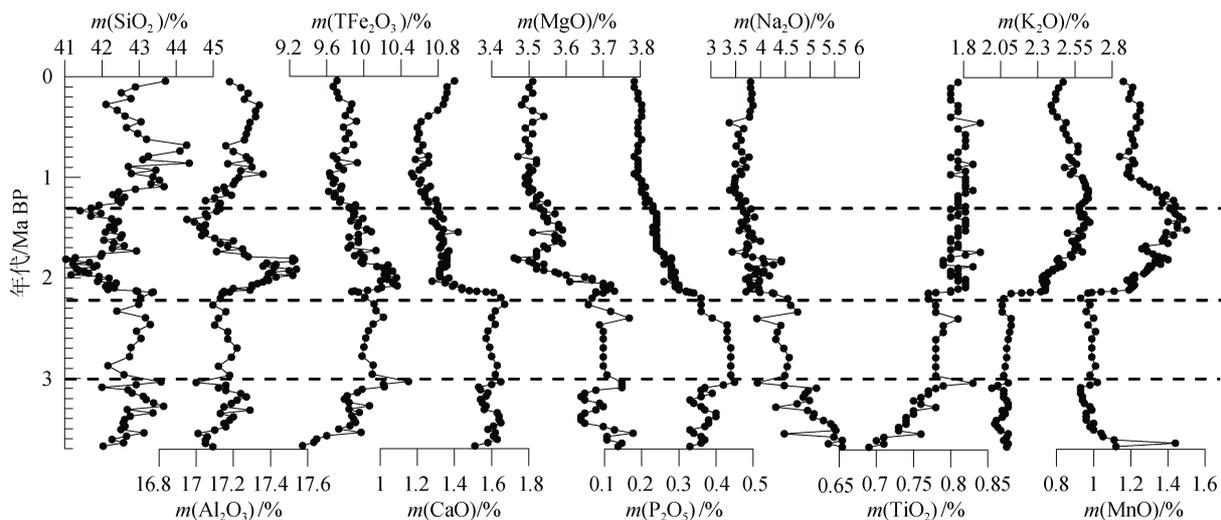


图3 XT-4孔常量元素垂向变化图

Fig. 3 Depth profiles of major elements of core XT-4

上升趋势; 1.3 Ma BP 至今, TFe_2O_3 、 MgO 、 P_2O_5 、 Na_2O 、 TiO_2 、 K_2O 、 MnO 、 Cd 、 Pb 、 Cr 趋于稳定, Cu 、 Zn 、 Ni 、 Co 等微量元素略微下降然后变化趋势也趋于稳定, SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 则在波动中略有上升。

利用 SPSS 23.0 软件对常量元素进行了 R 型因子分析, 依据特征值大于 1 的原则, 经方差极大正交旋转后得出 3 个因子(表 1), 累计方差为 81.52%。第

一主因子 F1 的贡献最大, 为 55.82%, 其组合为 K_2O 、 TiO_2 、 Pb 、 Cr 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 和 P_2O_5 , 其中正载荷组合为 K_2O 、 TiO_2 、 Pb 、 Cr 。F2 主因子贡献为 15.92%, 该因子组合为 CaO 、 MgO 、 P_2O_5 、 TFe_2O_3 、 Cu 、 Zn 、 Ni 和 Pb , 其中除了 Pb 为负载荷外, 都是正载荷。F3 主因子贡献为 9.78%, 该因子组合为 SiO_2 、 MnO 、 Cd , 其中 SiO_2 表现为负载荷, 其含量与其他元素基本都呈现负相关。

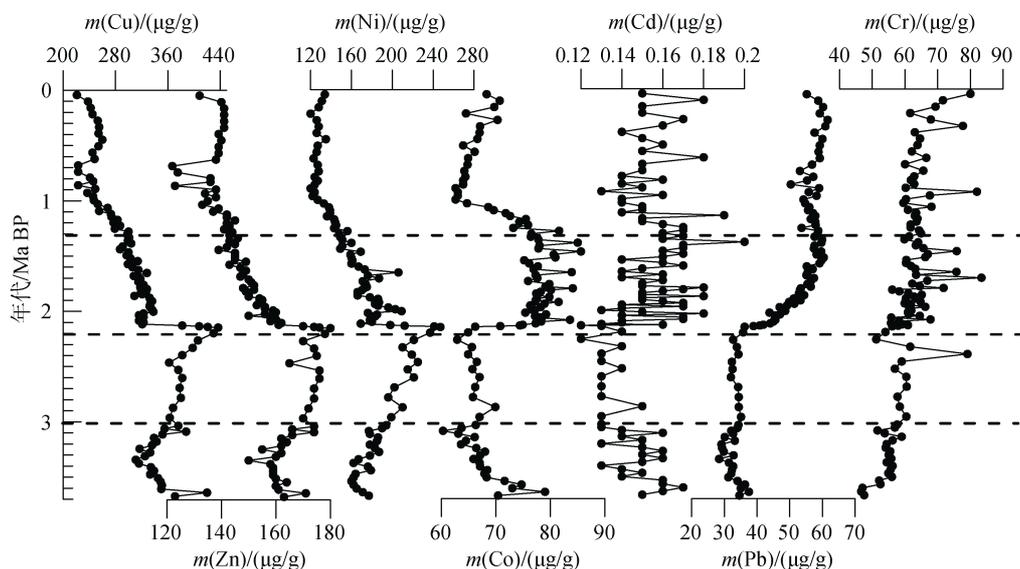


图 4 XT-4 孔微量元素垂向变化图

Fig. 4 Depth profiles of trace elements of core XT-4

表 1 XT-4 孔沉积物常量元素 R 型因子分析结果

Tab. 1 Results of R mode factor analysis for major and trace elements of Core XT-4

元素	R 型因子各因子分析结果		
	F1	F2	F3
SiO ₂	0.039	-0.178	-0.820
Al ₂ O ₃	0.123	-0.016	0.102
TFe ₂ O ₃	0.281	0.793	0.060
MgO	-0.555	0.673	-0.193
CaO	-0.706	0.579	-0.236
Na ₂ O	-0.952	0.183	-0.067
K ₂ O	0.770	-0.487	0.361
P ₂ O ₅	-0.626	0.697	-0.189
TiO ₂	0.960	-0.024	0.039
MnO	0.456	-0.337	0.705
Cu	-0.490	0.809	0.081
Pb	0.730	-0.528	0.375
Zn	-0.510	0.813	-0.074
Cr	0.720	-0.143	0.017
Ni	-0.254	0.905	0.003
Co	0.252	0.199	0.489
Cd	0.037	-0.408	0.679

注: 加粗下划线表示 R 型因子分析各因子正载荷元素分析结果

3 讨论

3.1 常微量组成与物源探究

与研究区附近的海域及全球标准物质相比可以发现, XT-4 孔沉积物常量元素组成具有深海沉积的

特点。前人研究表明, 菲律宾海沉积物主要是周边火山物质和亚洲风尘物质的二端元混合^[1-4, 21-22]。从表 2 可以看出, XT-4 孔沉积物常量元素也大都介于两个物质端元之间。

XT-4 孔沉积物常量元素上地壳标准化曲线与相邻东菲律宾海及帕里西维拉海盆相似(图 5), 表明研究区可能与相邻海区具有相同的物质来源。东菲律宾海、帕里西维拉海盆的沉积物主要来自邻近的火山物质, 其次为亚洲大陆风尘物质的贡献^[22, 29-30]。XT-4 孔的 Fe₂O₃、MgO、MnO、P₂O₅ 这 4 种常量元素较上地壳更加富集, 其中 MnO 的上地壳标准化值远远大于上地壳的值(~15 倍), 表明这 4 种常量元素不仅仅源自陆源物质。帕里西维拉海盆、西马利亚纳海脊、马里亚纳岛弧体系中发育着大量富含 Fe₂O₃ 和 MgO 的火山岩^[27, 31, 32]。这些物质经蚀变作用形成大量的蒙脱石、长石等矿物搬运沉积至西菲律宾海盆附近, 造成研究区沉积物相对富集 Fe₂O₃ 和 MgO。研究发现, 太平洋沉积物自生组分主要为铁锰结核^[33], MnO 的富集很可能与自生的铁锰结核有关。P₂O₅ 的富集可能与磷酸盐有关, 磷酸盐主要组成元素为 P 和 Ca。XT-4 孔的 P₂O₅ 和 CaO 具有较强的正相关性(相关系数为 0.85), 表明研究区 P₂O₅ 的富集很可能是受生物或者自生磷灰石的影响。UCC 标准化图解中, CaO 出现较大的亏损, 这是由于 XT-4 孔位于太平洋碳酸盐补偿深度(4 000~4 600 m) 以下^[34], 钙质生物几乎全部溶解。XT-4 孔的 Al₂O₃、

表 2 XT-4 孔柱状沉积物及附近区域常量元素组成

Tab. 2 Major elements abundances from core XT-4 sediments and surrounding areas

元素	元素质量分数/%								
	研究区	陆源风尘物	海洋沉积物		全球标准物质			附近火山物质	
	XT-4	质中国黄土	西菲律宾海	东菲律宾海	上陆壳	澳大利亚页岩	吕宋岛	九州-帕劳海脊	西马利亚纳海脊
SiO ₂	42.55	—	—	49.16	—	—	—	49.81	52.00
Al ₂ O ₃	17.21	11.88	14.06	15.64	15.20	18.90	18.25	14.43	17.80
TFe ₂ O ₃	9.93	4.18	5.99	9.36	5.00	7.22	8.55	13.33	9.43
MgO	3.60	2.36	2.84	3.58	2.20	2.20	4.61	6.23	4.86
CaO	1.40	7.80	11.75	2.47	4.20	1.30	8.68	9.66	10.26
Na ₂ O	4.11	1.77	3.37	4.24	3.90	1.20	3.42	3.13	3.08
K ₂ O	2.36	2.25	1.54	2.43	3.40	3.70	1.06	0.71	1.00
TiO ₂	0.79	0.60	0.59	0.78	0.50	1.00	0.76	1.18	0.67
MnO	1.20	0.06	0.20	1.09	0.08	0.11	0.17	0.21	0.17
P ₂ O ₅	0.28	0.15	0.03	0.29	—	0.16	0.28	0.12	0.16
参考文献		[23]	[24]	[25]	[26]	[26]	[27-28]	[27-28]	[27-28]

注：“—”表示文献中未进行该元素统计

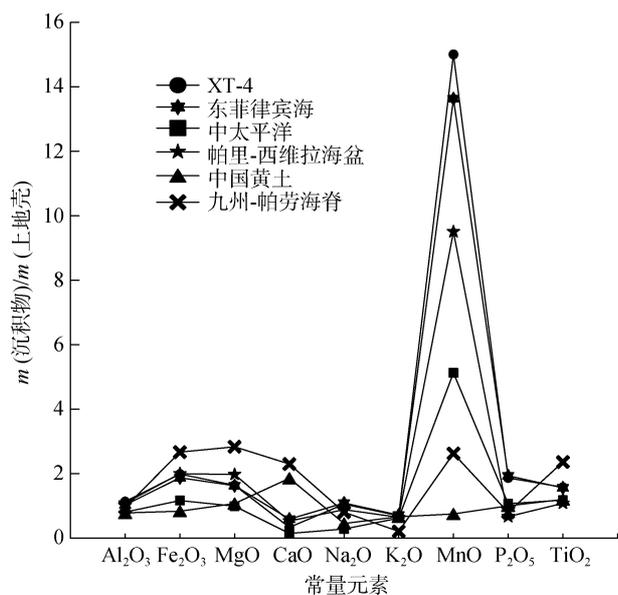


图 5 XT-4 孔沉积物及相关物质常量元素上地壳标准化图解
Fig. 5 UCC-normalized average major elemental concentrations of sediments from core XT-4

注：东菲律宾海数据引自文献[22]，中太平洋数据引自文献[38]，帕里西维拉海盆数据引自文献[29]，中国黄土数据引自文献[23]，九州-帕劳海脊数据引自文献[27-28]。

K₂O、TiO₂ 与上地壳丰度相当(图 5)。Ti 是典型的亲陆源碎屑元素，Al₂O₃ 和 K₂O 与陆源组分密切相关^[35, 36]。深海沉积物中常存在“过剩铝”问题^[37]，XT-4 孔沉

积物 $m(\text{Al})/m(\text{Ti})$ 平均值为 21.7，与中国黄土 ($m(\text{Al})/m(\text{Ti})=17.5$) 值很接近，表明 Al₂O₃ 为陆源输入。K 是惰性元素，在表生环境下较稳定，主要赋存在陆源碎屑矿物中^[38]。

R 型因子分析结果表明(表 1)，第一主因子 F1 的贡献最大，为 55.82%，说明其对沉积物常微量组成有很大影响。其正载荷组合为 K₂O、TiO₂、Pb、Cr。Ti 在海洋沉积物中是典型的保守陆源元素^[39]，而 K₂O 的富集往往与伊利石密切相关^[25]，因此该因子主要代表了陆源风尘物质的影响。F2 主因子贡献为 15.92%，是影响研究区常微量元素组成的第二大因素。该因子的正载荷组合为 CaO、MgO、P₂O₅、TFe₂O₃、Cu、Zn、Ni。Fe 和 Mg 主要存在于表生环境下化学性质较稳定的火山碎屑物质中，前人研究发现，九州-帕劳海脊西马利亚纳玄武岩中含有大量的 Fe 和 Mg^[27-28]。F2 因子中微量元素都与火山物质相关，Cu 通常是火山成因，Zn 多与热液活动相关，Ni 与海底火山有关^[35-36]。CaO 和 P₂O₅ 通常指示生物源物质，XT-4 孔沉积物处于碳酸盐补偿深度以下，钙质生物全部溶解，基本消除了海洋生物成因影响^[40]，因此该因子主要代表了火山源物质的影响。F3 主因子贡献为 9.78%，是影响研究区常微量元素组成的第三大因素。该因子正载荷组合为 MnO 和 Cd。影响 MnO 组成的主要因素有热液作用和海底沉积物早期成岩作用^[41]，MnO 含量总

体有较大的变化,同时与其他氧化还原环境敏感指标(如Cd)具有较好的相关性(相关系数为0.54)。因此,Cd和Mn一样,都是海洋沉积物中自生富集的过渡金属元素^[41],而且XT-4孔沉积物中发现了一定量的铁锰微结核,因此可以认为F3因子代表的是海洋自生物质。沉积物黏土矿物平均质量分数分别为伊利石38.7%,蒙脱石28.3%,高岭石15.3%,绿泥石17.7%(未发表数据),也指示着沉积物主要来自于陆源风尘物质和附近火山物质。

由上综合分析可知,研究区的常微量元素主要来自于陆源风尘物质和附近火山物质,海洋自生组分也占有一定的比重。

3.2 陆源物质变化对东亚冬季风演化及青藏高原隆升的响应

陆源风尘物质主要是被东亚冬季风所携带的东亚内陆干旱地区的碎屑沉积物^[1-4, 24]。季风演化的典型效应主要是影响风尘物质源区的物理风化作用的强度以及影响陆源地区的化学风化强度,从而影响海底沉积物陆源物质所占比例^[24, 42]。对于本研究区,主要季风影响为东亚冬季风,具体来讲:冬季风增强(减弱),风尘物质源区干旱程度及物理风化作用加强(减弱),造成风尘物质汇集区(如西太平洋边缘海和北太平洋)陆源物质的增多(减弱)^[24, 35-36]。

前人在南海地区用沉积物常量元素R型因子分析来指示与东亚季风相关的河流陆源碎屑物质输入演化^[42];徐兆凯等^[24]在菲律宾海利用该指标探讨了东亚冬季风以及与其密切相关的深海沉积物中陆源物质演化的历史。因此,XT-4孔沉积物陆源得分因子指示的陆源物质变化同样可以用来揭示东亚冬季风的演化历史。

西菲律宾海盆远离大陆,受大陆河流物质影响很小,因此西菲律宾海盆是开展陆源风尘物质变化对源区干旱程度以及物理风化程度响应的理想研究区^[2, 22]。对于XT-4孔沉积物而言,由于与源风尘物质密切相关的 K_2O 、 TiO_2 等因子都为正载荷,因此F1因子的增大(减小),意味着源区干旱程度和物理风化程度的增强(减弱),进而指示东亚冬季风的增强(减弱)。从图6可以看出,XT-4孔陆源得分因子呈现出阶段性上升的趋势,具体表现为:3.7—3 Ma BP,呈现快速上升趋势;3—2.5 Ma BP,整体有一定的起伏,仍呈现上升趋势;2.5—1.5 Ma BP,呈现出波动起伏的特征,整体呈现较缓的上升趋势;1.5—1 Ma BP,呈现出略微上升趋势;1 Ma BP至今,呈现出稳定的趋势。3.7—3 Ma BP期间,亚洲风尘对菲律宾海盆输入加强,可能指示着风尘源区相对干冷,增强的东亚冬季风可以携带更多的陆源碎屑至研究区;3—2.5 Ma BP时期,亚洲风尘对研究区输入仍在

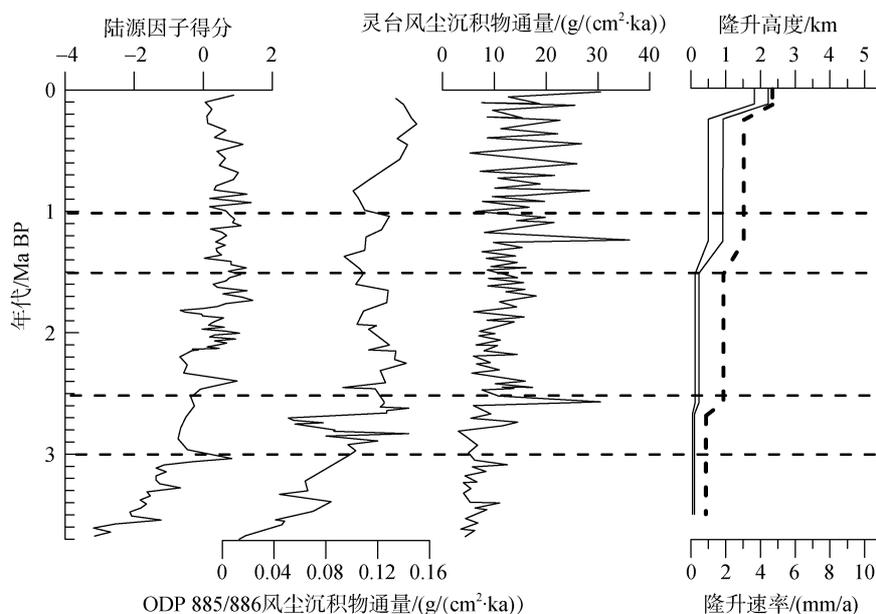


图6 XT-4孔陆源得分因子与中国黄土、北太平洋风尘沉积通量及青藏高原各主要隆升阶段对比

Fig. 6 Comparison of eolian dust factor of core XT-4 with mass accumulation rate of eolian dust of China loess and Site 885/886 and main uplift stages of Tibetan Plateau

注:灵台数据和OPP 885/886 站位风尘沉积通量引自文献[43],青藏高原晚上新世以来隆升高度和速率数据引自文献[44-46]。

增强, 不过幅度略微下降, 可能指示风尘源区相对干冷程度仍在上升, 东亚冬季风整体仍在增强, 但是增强的幅度略低; 2.5—1.5 Ma BP 阶段, 出现波动起伏的现象, 整体上可能指示着该阶段源区出现干冷和暖湿相对交替的情况, 东亚冬季风也对应着增强和减弱的情况; 1.5—1 Ma BP, 亚洲风尘对研究区输入略微增多, 但整体上变化很小, 可能指示东亚冬季风略微增强; 1 Ma BP 至今, 亚洲风尘对菲律宾海盆的输入整体趋于稳定, 可能指示该阶段东亚冬季风总体较为稳定。

中国黄土以及深海沉积物是国际上古气候研究的重要组成部分^[47]。在指示季风演化的众多沉积学指标中, 风尘通量由于其不受构造、洋流、海平面等因素影响, 且只反映运输风尘的东亚冬季风强度及相应风尘源区-亚洲内陆干旱程度的变化^[7, 11]。本文将 XT-4 孔沉积物 F1 陆源因子与中国灵台黄土沉积风尘通量以及 ODP 885/886 站风尘通量进行对比, 其中风尘通量值越大, 指示着东亚冬季风越强。对比结果显示, 三者整体上表现出一致的上升趋势, 大致上都表现出阶段性上升的特征。图 6 表明, XT-4 孔陆源得分因子指示东亚冬季风整体上呈现增强的趋势, 表明自 3.7 Ma BP 以来, 亚洲内陆整体是一个干旱程度相对增强的环境。ODP 885/886 孔风尘通量以及中国黄土风尘通量都呈现出阶段性上升的特征(图 6), 3.7—3 Ma BP 期间, ODP 885/886 孔风尘通量上升趋势是其各个阶段上升幅度最大的, 之后的几个阶段呈现出较缓的上升幅度, 这和 XT-4 孔的阶段性上升特征一致。2.5 Ma BP 至今, 中国黄土风尘通量变化和 XT-4 孔陆源因子得分所记录的变化特征十分接近。这都表明西菲律宾海盆 XT-4 孔沉积物陆源因子得分指示风尘源区干旱程度以及东亚冬季风变化的有效性。陆源得分因子与北太平洋沉积物以及中国黄土风尘通量在某些变化细节上存在着差异, 这可能是由于样品的分辨率较低所致。

研究表明, 青藏高原隆升会加强物理剥蚀, 提供大量碎屑物质形成沙漠^[10]; 另外, 青藏高原隆升会阻碍印度洋向亚洲大陆的水汽输入, 导致亚洲内陆干旱加剧^[7], 从而东亚冬季风可搬运更多碎屑物质至西太平洋地区^[7, 10]。前人将晚上新世以来青藏高原隆升大致分为 4 个阶段^[44-46, 48](图 6), XT-4 孔沉积物陆源因子得分阶段性上升总体上也与青藏高原各隆

升阶段有着良好的对应, 可能间接响应了晚新生代以来青藏高原隆升对东亚冬季风作用的加强。

4 结论

通过对西菲律宾海盆 XT-4 孔柱状沉积物进行常量元素组成、标准化配分模式及 R 型因子的综合分析, 探讨了近 3.7 Ma 以来研究区的物源和源区的古环境演化, 结果表明:

1) 西菲律宾海盆 XT-4 孔沉积物为典型的深海沉积物, 其沉积物平均上地壳标准化配分模式与帕里西维拉海盆、中太平洋标准化曲线具有一定的相似性, 研究区物质来源主要为陆源和火山源的混合。

2) R 型因子分析结果表明, 两个主要因子 F1(K₂O、TiO₂ 等)和 F2(MgO、TFe₂O₃ 等)反映了陆源风尘物质和附近火山物质对研究区的影响, 次要因子 F3(MnO 和 Co)代表的海洋自生组分影响较小。陆源因子 F1 得分(K₂O、TiO₂ 等)变化反映了沉积物中陆源物质组成的变化, 进一步可以用来揭示源区(亚洲内陆)干旱程度以及东亚冬季风的演化。陆源因子在 3.7—3 Ma BP、3—2.5 Ma BP、2.5—1.5 Ma BP 呈阶段性上升, 3.7—3 Ma BP 期间上升幅度最大, 是对该时期东亚冬季风增强以及青藏高原隆起的敏感响应。其阶段性变化与中国黄土、北太平洋 ODP 885/886 站沉积物中风尘通量以及青藏高原阶段性隆升有着良好的对比性。

致谢: 地球化学元素含量测试得到了中国科学院海洋研究所殷学博博士的大力支持和指导, 审稿专家和编辑老师提供的宝贵意见和建议使本文得以很大提高, 谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 秦蕴珊, 陈丽蓉, 石学法. 西菲律宾海风成沉积物的研究[J]. 科学通报, 1995, 40(17): 61-63.
Qin Yunshan, Chen Lirong, Shi Xuefa. Study on the aeolian sediments of the Western Philippines[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(17): 61-63.
- [2] Wan Shiming, Yu Zhaojie, Clift P D, et al. History of Asian eolian input to the West Philippine Sea over the last one million years[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 326-328(2): 152-159.
- [3] Jiang Fuqing, Frank M, Li Tiegang, 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.
- [4] Yu Zhaojie, Wan Shiming, Colin C, et al. Co-evolution of monsoonal precipitation in East Asia and the tropical

- Pacific ENSO system since 2.36 Ma: New insights from high-resolution clay mineral records in the West Philippine Sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 446: 45-55.
- [5] Seo I, Lee Y I, Yoo C M, et al. Sr-Nd isotope composition and clay mineral assemblages in eolian dust from the central Philippine Sea over the last 600 kyr: Implications for the transport mechanism of Asian dust[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere* hpmepage, 2014, 119(19): 11492-11504.
- [6] Zhang Qiang, Liu Qingsong, Roberts A P, et al. Mechanism for enhanced eolian dust flux recorded in North Pacific Ocean sediments since 4.0 Ma: Aridity or humidity at dust source areas in the Asian interior?[J]. *Geology*, 2020, 48(1): 77-81.
- [7] 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[J]. *Palaeogeography and Palaeoclimatology*, 1998, 13(3): 215-224.
- [8] 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. *中国科学 D 辑*, 1996, 26(4): 289-295.
Zhong Dalai, Ding Lin. Uplift process and mechanism of the Qinghai Tibet Plateau[J]. *Science in China, Ser.D*, 1996, 26(4): 289-295.
- [9] 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(5): 381-391.
Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian, et al. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 381-391.
- [10] An Zhisheng, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya: Betan plateau since Late Miocene times[J]. *Nature*, 2001, 411: 62-66.
- [11] 万世明, 李安春, Wstut J B, 等. 南海北部 ODP1146 站粒度揭示的近 20 Ma 以来东亚季风演化[J]. *中国科学*, 2007, 37(6): 761-770.
Wan Shiming, Li Anchun, Wstut J B, et al. The evolution of East Asian monsoon since 20 Ma revealed by ODP 1146 in the north of South China Sea[J]. *China Science*, 2007, 37(6): 761-770.
- [12] Wang Bin, Clemens S C, Liu Ping. Contrasting the Indian and East Asian monsoons: Implications on geologic timescales[J]. *Marine Geology*, 2003, 201(1-3): 5-21.
- [13] Clift P D, Plumb R A. *The Asian Monsoon: Causes, History and Effects*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [14] Hovan S A, Rea D K, Piasias N G, et al. A direct link between the China loess and marine $\delta^{18}\text{O}$ records: Aeolian flux to the north Pacific[J]. *Nature*, 1989, 340: 296-298.
- [15] Sun Youbin, An Zhisheng. Late Pliocene-Pleistocene changes in mass accumulation rates of eolian deposits on the central Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 10(D23): 101.
- [16] Zhang Wenfang, Chen Jun, Ji Junfeng, et al. Evolving flux of Asian dust in the North Pacific Ocean since the late Oligocene[J]. *Aeolian Research*, 2016, 23: 11-20.
- [17] Clemens S C, Murray D W, Prell W L. Nonstationary Phase of the Plio-Pleistocene Asian Monsoon[J]. *Science*, 1996, 274(5289): 943-948.
- [18] 汪品先, 翦知潜, 赵泉鸿, 等. 南海演变与季风历史的深海证据[J]. *科学通报*, 2003, 48(21): 2228-2239.
Wang Pinxian, Jian Zhimin, Zhao Quanhong, et al. The evolution of the South China Sea and the deep sea evidence of monsoon history[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(21): 2228-2239.
- [19] 李常珍, 李乃胜, 林美华. 菲律宾海的地势特征[J]. *海洋科学*, 2000, 24(6): 47-51.
Li Changzhen, Li Naisheng, Lin Meihua. Topography of the Philippine Sea[J]. *Marine Sciences*, 2000, 24(6): 47-51.
- [20] Kirschvink J L. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1980, 62(3): 699-718.
- [21] 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[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15(2): 12.
Shi Xuefa, Chen Lirong, Li Kunye, et al. Study on minerageny of the clay sediment in the West of Philippine Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1995, 15(2): 12.
- [22] 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[J]. *科学通报*, 2008, 53(6): 695-702.
Xu Zhaokai, Li Anchun, Jiang Fuqing, et al. Geochemical characteristics and material sources of sediments in the East Philippine Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(6): 695-702.
- [23] 文启忠, 刁贵仪, 耿安松. *中国黄土地球化学*[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-285.
Wen Qizhong, Diao Guiyi, Geng Ansong. *Geochemistry of Loess in China*[M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-285.
- [24] Xu Zhaokai, Li Tiegang, Yu Xinke, 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.

- [25] 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[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(6): 43-48.
Xu Zhaokai, Li Anchun, Li Tiegang, et al. Composition and geological significance of major elements in surface sediments of the East Philippine Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010, 30(6): 43-48.
- [26] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: its Composition and Evolution[M]. United States: Blackwell Scientific Publications, 1985: 1-312.
- [27] Wood D A, Matthey D P, Joron J L, et al. A geochemical study of 17 selected samples from basement cores recovered at Site 447, 448, 449, 450 and 451, Deep Sea Drilling Project Leg 59[R]. Kroenke L, Scott R B, Balshaw K: U.S. Govt. Printing Office, 1981.
- [28] Castillo P R, Newhall C G. Geochemical constraints on possible subduction components in Lavas of Mayon and Taal Volcanoes, Southern Luzon, Philippines[J]. Journal of Petrology, 2004, 45(6): 1089-1108.
- [29] 明洁, 李安春, 孟庆勇, 等. 东菲律宾海帕里西维拉海盆第四纪黏土矿物组合特征及物源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(4): 139-148.
Ming Jie, Li Anchun, Meng Qingyong, et al. Quaternary assemblage characteristic and provenance of clay minerals in the Parecevela Basin of the East Philippine Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(4): 139-148.
- [30] 徐兆凯, 李铁刚, 李安春. 东菲律宾海表层沉积物来源的稀土证据[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 27(2): 1-7.
Xu Zhaokai, Li Tiegang, Li Anchun. Provenance of surficial sediments of the East Philippine Sea: Evidence from rare earth elements[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, 27(2): 1-7.
- [31] Migdisov A A, Miklishanski A Z, Saveliev B V, et al. Neutron activation analysis of rare earth elements and some other trace elements in volcanic ashes and pelagic clays, Deep Sea Drilling Project Leg 59[R]. Kroenke L, Scott R B, Balshaw K: U.S. Govt. Printing Office, 1981.
- [32] 田丽艳, 赵广涛, 陈佐林, 等. 马里亚纳海槽热液活动区玄武岩的岩石地球化学特征[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(3): 405-412.
Tian Liyan, Zhao Guangtao, Chen Zuolin, et al. The preliminary study of petrological geochemistry of basalts from hydrothermal activity regions, Mariana Trough[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(3): 405-412.
- [33] 张富元, 李安春, 林振宏, 等. 深海沉积物分类与命名[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(6): 517-523.
Zhang Fuyuan, Li Anchun, Lin Zhenhong, et al. The preliminary study of petrological geochemistry of basalts from hydrothermal activity regions, mariana trough[J]. Oceanologia et limnologia Sinca, 2006, 37(6): 517-523.
- [34] Berger W H. Deep-Sea sedimentation[M]. Berlin Heidelberg: Springer 1974: 213-241.
- [35] Wei Gangjian, Li Xianhua, Liu Ying, et al. Geochemical record of chemical weathering and monsoon climate change since the early Miocene in the South China Sea[J]. Paleoceanography, 2006, 21(4): 1-11.
- [36] Wei Gangjian, Liu Ying, Li Xianhua, et al. Major and trace element variations of the sediments at ODP Site 1144, South China Sea, during the last 230 ka and their paleoclimate implications[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2004, 212(3): 331-342.
- [37] 韦刚健, 刘颖, 李献华, 等. 南海沉积物中过剩铝问题的探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 23-25.
Wei Gangjian, Liu Ying, Li Xianhua, et al. Excess Al in the Sediments from South China Sea[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2003, 22(1): 23-25.
- [38] 李国胜, 杨锐, 张洪瑞. 中太平洋 PC5222 孔岩芯地球化学特征及物源探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27(2): 26-36.
Li Guosheng, Yang Rui, Zhang Hongrui. Geochemistry and provenance of the PC5222 drill cores from the mid-Pacific Ocean[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(2): 26-36.
- [39] Goldberg E D, Arrhenius G O S. Chemistry of Pacific pelagic sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1958, 13(2-3): 153-198.
- [40] 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[J]. 热带地理, 2009, 29(3): 236-240, 273.
Shu Zhenhua, Yang Shouye, Dou Yanguang, et al. Geochemical compositions and paleoenvironmental implication of the residual fractions of core DGKS9604 sediments in the Middle Okinawa Trough[J]. Tropical Geography, 2009, 29(3): 236-240, 273.
- [41] 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 ODP1148 站钻孔沉积物记录为例[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 129-135.
Wei Gangjian, Li Xianhua, Liu Ying, et al. Transfer patterns of Mn, Cd and Mo in sediments during early diagenesis: Evidence from sediment cores at ODP Site 1148[J]. Geochimica, 2005, 34(2): 129-135.
- [42] 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[J]. 科学通报, 2010, 55(34): 3328-3332.
Meng Xianwei, Xia Peng, Zhang Jun, et al. Evolution of the East Asian monsoon and its response to uplift of the Tibetan Plateau since 1.8 Ma recorded by major ele-

- ments in sediments of the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(34): 3328-3322.
- [43] 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[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(9): 769-776.
Sun Youbin, An Zhisheng. The history and variability of aridity in the interior of Asia recorded by wind dust flux over the Loess Plateau in the last 7 Ma[J]. Science in China, Ser.D, 2001, 31(9): 769-776.
- [44] 李廷栋. 青藏高原隆升的过程和机制[J]. 地球学报, 1995, (1): 9.
Li Tingdong. The Uplifting Process and mechanism of the Qinhai-Tibet Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1995, (1): 9.
- [45] 高红山, 潘保田, 李吉均, 等. 青藏高原隆升过程与环境变化[J]. 青岛大学学报, 2004, 19(4): 40-47.
Gao Hongshan, Pan Baotian, Li Jijun, et al. Uplift process and environmental change of the Qinghai Tibet Plateau[J]. Journal of Qingdao University Engineering and Technology Edition, 2004, 19(4): 40-47.
- [46] 潘保田, 高红山, 李炳元, 等. 青藏高原层状地貌与高原隆升[J]. 第四纪研究, 2004, 24(1): 50-57, 133.
Pan Baotian, Gao Hongshan, Li Bingyuan, et al. Strati-form landforms and uplift of the Qinghai Tibet Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(1): 50-57, 133.
- [47] 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[J]. Nature, 2002, 416: 159-163.
- [48] Chen Zhongyuan, Stanley D J. Quaternary subsidence and river channel migration in the Yangtze Delta Plain, Eastern China[J]. Journal of Coastal Research, 1995, 11(3): 927-945.

Elemental geochemistry of Core XT-4 sediments from the western Philippines Sea since 3.7 Ma and its paleoenvironmental implications

WANG Chen^{1, 2}, XU Fang-jian^{2, 3}, HU Bang-qi^{1, 3, 4}, XU Lei^{1, 3}, DING Xue^{1, 3, 4},
WANG Fei-fei^{1, 3}, HUANG Wei^{1, 3}, GUO Jian-wei^{1, 3}

(1. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China; 4. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Received: Nov. 30, 2019

Key words: the West Philippine Basin; provenance; dust; East Asian monsoon; uplift of tibetan plateau

Abstract: Elemental geochemical analysis was performed on core XT-4 sediments in the southern part of the Western Philippines basin; with the help of standardized crustal normalization diagrams and R-type factor analysis methods, the provenance of the source was investigated; and by factor analysis, the change of the terrestrial factor scores obtained and the evolution of the paleoenvironment in the provenance area are discussed. The results show that the vertical change of XT-4 normal trace elements is mainly controlled by the input of wind and dust materials and surrounding volcanic materials in Asia, and in addition, the marine biomass also contributes to this change. The terrestrial factor scores represented by elements such as TiO₂ and K₂O have shown a gradual upward trend since 3.7 Ma Bp, and have formed a obvious contrast with the evolution of the East Asian winter monsoon recorded in the sediments of the Loess and North Pacific ODP 885/886 stations. In addition, these trends correspond to the major periodic uplift times of the Qinghai-Tibet Plateau, and respond to the strengthening of the East Asian winter monsoon since the late Cenozoic.

(本文编辑: 刘珊珊)