

东马利亚纳海盆表层沉积物元素地球化学特征及其指示意义

李国刚¹, 王亮², 李蕙新¹, 毕崇昊¹, 赵晟¹, 胡邦琦³

1. 自然资源部北海调查中心, 山东青岛 266061

2. 自然资源部第三海洋研究所, 福建厦门 361005

3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237

摘要 【目的】西太平洋东马利亚纳海盆是开展风尘沉积研究的理想区域, 但其沉积物研究仍然薄弱。

【方法】通过对采集于东马利亚纳海盆的 28 个表层沉积物开展元素地球化学研究, 探讨其影响因素及其指示意义, 旨在为该海区沉积物物源、海底矿产资源评价和气候环境研究等提供背景资料。【结果】与同处西太平洋邻近海区黏土沉积物相比, 研究区远洋黏土沉积物主量元素含量水平大致相当, 其中主量元素(氧化物)含量最高为 SiO₂, 平均为 49.14%, 其次为 Al₂O₃, 平均为 15.85%; 微量元素中含量最高是 Ba, 平均为 770×10⁻⁶, 其次为 Cu, 平均为 289×10⁻⁶; 总稀土元素含量 ΣREE 平均值为 284×10⁻⁶, 为轻稀土富集型, Ce、Nd 和 La 含量最高。对化学元素开展主成分分析, 元素组合可分为 4 类: 第一类与稀土元素关系密切, 包括稀土元素、P₂O₅、TiO₂ 等; 第二类与铁锰微结核有关, 包括 Fe₂O₃、MnO 以及 Cr、Co、Ni、Cu、Ba 等金属元素; 第三类与陆源碎屑有关, 包括 Al₂O₃、MgO、SiO₂、U、Hf、Th、Ce 等; 第四类与生物来源有关, 包括 Cd、CaO、Mo。【结论】元素组合指标进一步揭示了沉积物以陆源物质, 尤其以陆地风尘物质为主, 同时化学蚀变系数指示沉积物源区母岩处于低—中等化学风化条件, 氧化还原敏感元素则揭示研究区底层沉积环境为氧化—弱氧化环境。

关键词 东马利亚纳海盆; 表层沉积物; 元素地球化学; 沉积物源

第一作者简介 李国刚, 男, 1982 年出生, 硕士, 高级工程师, 海洋沉积, E-mail: 121012564@qq.com

通信作者 胡邦琦, 男, 研究员, E-mail: bangqihu@gmail.com

中图分类号 P595 **文献标志码** A

0 引言

西太平洋作为邻近我国的开阔大洋, 存在很多悬而未决的地球系统科学问题。西太平洋拥有全球最老的洋壳和最年轻的沟—弧—盆地体系, 是全球唯一可以同时观察到板块消减与增生的区域^[1], 其弧后盆地热液系统是独特的海底热液活动^[2]; 西太平洋拥有世界上能量流、物质流最强的“西太平洋暖池”, 对全球气候变化有重要影响^[3]; 西太平洋是全球海山最密集的区域, 其基底构造、形成年代与漂移轨迹、沉积物与环流系统、生物群落与生态系统

收稿日期: 2023-09-28; 收修改稿日期: 2023-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41976192); 中国地质调查项目(DD20230647); 中国海洋学会海洋调查委员会项目(201905)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41976192; China Geological Survey Project, No. DD20230647; Project of the Ocean Survey Committee of the Chinese Ocean Society, No. 201905]

都是当今研究的热点^[4-5]；西太平洋是全球深海矿产资源最富集的大洋之一，蕴含着丰富的多金属结核、结壳和稀土资源^[6-10]。此外，西太平洋还是亚洲风尘物质的主要沉降区，国内外学者对海盆、海山区沉积物开展了广泛的沉积环境和物源研究^[11-15]。

元素地球化学是海洋地质研究的基础手段，在沉积物源示踪、气候环境反演、矿产资源评价等方面有重要应用。前人对西太平洋沉积物元素地球化学研究主要集中于邻近大陆的边缘海海盆和国际海底矿区邻近的海山区域^[16-20]，而针对马里亚纳海沟岛弧以东的东马里亚纳海盆区研究仍然较少，迄今仅有大洋钻探 ODP 129 航次曾开展过 1 个航次的调查^[21-22]，其余报道鲜见，区域研究相对薄弱。本文基于在西太平洋东马里亚纳海盆中东部获取的 28 个表层沉积物样品，分析其元素地球化学特征，探讨其影响因素和指示意义，旨在为该海区沉积物物源、海底资源和气候环境研究等提供背景资料。

1 研究区概况

东马里亚纳海盆位于马里亚纳海沟以东、麦哲伦海山群以南、加罗林海山以北的热带西北太平洋海域（图 1）。海盆平均水深约 6 000 m，盆地地形相对平坦。从构造上划分，东马里亚纳海盆位于太平洋板块的西部，由于位于俯冲带前缘，其地壳为古老的大洋地壳，海盆基底由白垩纪中期的玄武岩组成^[24]。ODP 129 航次在东马里亚纳海盆获取的 802 孔揭示该区沉积层厚度达 500 m，顶部 15 m 均为远洋黏土^[21]，802 孔钻穿了 51 m 的玄武岩枕状熔岩及熔岩流，其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年达到 $114.6\pm 3.2\text{ Ma}$ ^[25]。

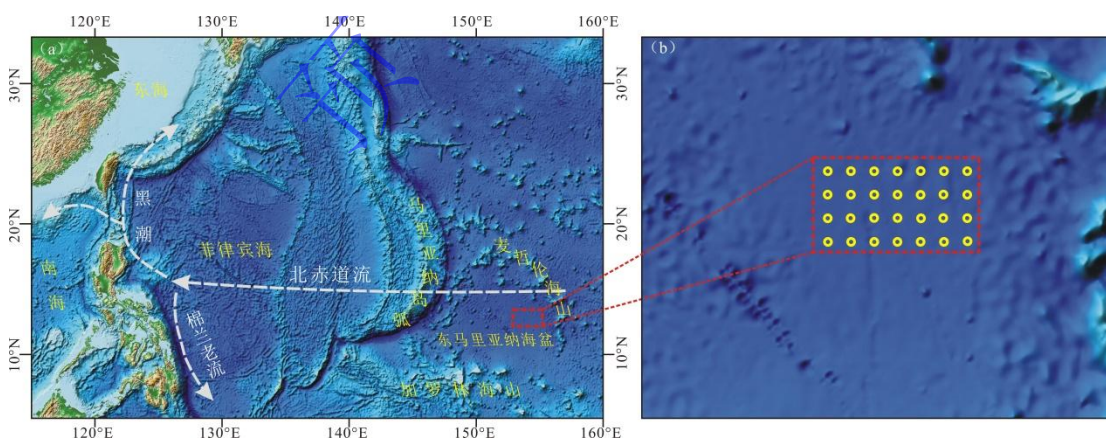


图 1 研究区地理位置

海洋环流据文献[23] 修改，地形底图来自 ETOPO 全球地形模型

Fig.1 Geographic location of the study area

ocean circulation modified from reference[23], and bathymetric base map is derived from ETOPO global relief model

东马里亚纳海盆所处海域远离西边界陆地，海流系统主要由赤道流控制。赤道流系是由南北半球信风带所控制的西向风成环流，在南北半球分别对应南赤道流和北赤道流^[23]，其

中北赤道流在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 自东向西流动，宽约 2 000 km，厚 200 m，流速约 0.5 m/s ^[18]。

由于海区远离大陆，又有海沟的阻隔，除了临近岛屿的物质能直接进入海盆沉积外，其余大量陆地物质被阻隔于海盆外，源自亚洲大陆的风尘物质可在大气环流（西风、季风、高空气流等）作用下输入扩散至太平洋深处^[13,15,26]，因此该海区沉积通量极低（矿物气溶胶通量小于 $10\text{ g/cm}^2\cdot\text{ky}$ ^[12]）。

2 样品和方法

2020 年，自然资源部北海局“向阳红 06”船在西太平洋东马里亚纳海盆采用箱式取样器、重力取样器开展海底底质调查，取得了东马里亚纳海盆中东部的 28 个表层沉积物（0~10 cm）（图 1）。研究区水深大、地形平坦，各站位多波束现场实测水深介于 5 980~6 080 m，均位于热带太平洋 4 800 m 的碳酸盐补偿深度（CCD）^[27] 以下，实验室沉积物涂片鉴定结果显示全部站位沉积物类型均为远洋黏土。

室内对沉积物分样并进行多指标测定，主量元素 Si 采用重量法，测试方法参照 GB/T 14506.3—2010，其余主量元素采用美国赛默飞 iCAP6300 全谱直读等离子体发射光谱（ICP-OES）测试，微量及稀土元素采用美国赛默飞 iCAP RQ 电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）进行测试，测试方法参照 GB/T 20260—2006 执行，以上测试在自然资源部第一海洋研究所海洋沉积与环境地质重点实验室测试中心完成。为保证测试精度，采用 GSD-9 标样和重复样对测试实施质量控制，每 10 个样品测试一个标样和重复样，结果表明主量元素的测试相对误差为 0.07%~3.68%，微量及稀土元素的测试相对误差为 0.03%~4.97%。

3 结果

3.1 主量元素组成

主量元素含量以氧化物质量分数表示，东马里亚纳海盆表层沉积物化学元素组成如表 1 所示。主量元素平均含量依次为 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{MnO} > \text{TiO}_2 > \text{P}_2\text{O}_5$ ，含量最高的主量元素是 SiO_2 （48.24%~54.18%，平均为 49.14%），其次为 Al_2O_3 （12.30%~16.68%，平均为 15.85%），其余元素含量均小于 10%，其中 MnO 、 TiO_2 、 P_2O_5 含量小于 1%。对比 28 个调查站位，主量元素站间差异较小，除 MnO 、 P_2O_5 含量变异系数（变异系数=标准偏差/平均值）稍大外（分别为 12.27%和 11.01%），其余均小于 10%。

与同处西太平洋的菲律宾海、马库斯—威克海山、麦哲伦海山等海区远洋黏土沉积物相比，各海区沉积物主量元素含量水平大致相当，表明具有相近的物质组成。与黄土、上地壳

相比，研究区沉积物具有较低的 Ca 含量，具有鲜明的远洋沉积物特征。与洋壳（基性玄武岩）和邻近的加罗林群岛（碱性玄武岩）基岩相比，各主量元素含量区分明显，尤其洋壳具有明显的高 Al、Ca、Fe 含量。

表 1 研究区及相关区域样品主量元素含量统计 (%)

Table 1 Statistics of major element content in the study area and related samples (%)

海区/样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	
东马里亚纳海盆/黏土 (本研究)	最小值	48.24	12.40	0.99	6.40	2.42	3.20	0.40	4.09	0.19	0.68
	最大值	54.18	16.68	1.72	9.08	2.95	3.67	1.02	6.23	0.36	0.95
	平均值	49.14	15.85	1.23	8.63	2.84	3.51	0.91	4.46	0.30	0.90
	标准偏差	1.06	0.77	0.12	0.49	0.09	0.09	0.11	0.40	0.03	0.05
	变异系数%	2.16	4.84	9.86	5.66	3.13	2.62	12.27	9.07	11.01	5.33
西菲律宾海/黏土 ^[19]		51.0	15.9	2.17	9.19	1.56	4.77	0.33	3.22	0.16	0.76
东菲律宾海/黏土 ^[16]		49.16	15.64	2.47	9.36	2.43	3.58	1.09	4.24	0.29	0.78
九州—帕劳海脊/样品平均 ^[18]		—	13.8	1.52	7.99	2.16	4.11	1.14	5.81	0.26	0.64
马库斯—威克海山/黏土 ^[20]		53.22	16.53	1.23	7.79	3.47	3.61	0.94	3.00	0.30	0.81
麦哲伦海山/黏土 ^[28]		48.26	15.75	2.13	9.30	2.95	3.41	0.91	4.47	0.58	1.19
中国黄土 ^[29]		54.66	11.45	7.87	6.74	1.96	3.44	—	1.70	—	—
加罗林群岛/碱性玄武岩 ^[30]		44.85	13.43	10.25	14.55	0.67	9.74	0.16	2.31	0.35	3.11
上地壳 ^[31]		65.89	15.17	4.19	9.98	3.39	2.2	0.07	3.89	0.2	0.5
洋壳/基性玄武岩 ^[32]		49.3	31.2	11.8	20.1	0.4	8.3	0.15	4.8	0.23	1.2

3.2 微量和稀土元素组成

东马里亚纳海盆沉积物微量及稀土元素含量结果如表 2 和表 3 所示。微量元素中含量最高是 Ba，平均为 770×10^{-6} ，其次为 Cu，平均为 289×10^{-6} ，另外 V、Co、Ni、Zn、Sr 和 Zr 等元素含量稍高，在 $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 之间，Cr、Y、Li、Pb、Sc、U 和 Th 等元素含量稍低，在 $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 之间。总稀土元素含量 ΣREE 介于 $202 \times 10^{-6} \sim 308 \times 10^{-6}$ ，平均为 284×10^{-6} ，其中轻稀土（LREE，La 至 Eu，不含 Pm）平均含量 240×10^{-6} ，重稀土（HREE，Gd 至 Lu）平均含量 45×10^{-6} ，为轻稀土富集型。稀土元素中含量前 3 的元素依次为 Ce、Nd 和 La，平均分别为 102×10^{-6} 、 55.7×10^{-6} 和 52.8×10^{-6} 。

与西太平洋周边海区表层黏土沉积物进行对比，研究区表层沉积物 ΣREE 显著大于菲律宾海表层黏土沉积物，但略小于麦哲伦海山、马尔库斯—威克海山丘陵区的远洋黏土。与代表陆地物质的黄土、上地壳相比，研究区表层沉积物 ΣREE 稍高，大部分微量元素也更加富集。研究区稀土总量 ΣREY （REE+Y）平均含量 355×10^{-6} ，小于深海富稀土沉积的边界值（ 700×10^{-6} ）^[33]。

表 2 研究区及相关区域样品微量元素含量统计 ($\times 10^{-6}$)

Table 2 Trace element content in the study area and related samples ($\times 10^{-6}$)

海区/样品	Li	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Hf	Pb	Th	U	Ba	Sr	Zr	Y	Mo
-------	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	---	----

	最小值	46.9	15.1	120	67.5	73.3	85.9	193	123	3.40	28.6	9.8	1.70	505	155	129	43.3	5.2
东马里亚纳海盆	最大值	69.0	20.9	192	93.4	117	186	408	158	4.85	44.6	13.8	2.45	1383	197	180	83.8	17.8
/黏土	平均值	63.3	19.3	179	87.5	109	170	289	151	4.48	41.3	12.2	2.25	770	185	172	70.2	12.4
(本研究)	标准偏差	4.2	1.1	13.4	4.9	7.9	18.2	31.5	6.1	0.26	2.8	0.7	0.15	210	7.3	9.2	8.0	2.8
	变异系数%	6.6	5.7	7.5	5.6	7.3	10.7	10.9	4.0	5.8	6.8	5.7	6.7	27.3	4.0	5.4	11.4	22.6
	中国黄土 ^[29]	38	12.5	99	47.6	21	39	25	79	6.05	30	12.2	3.15	510	164	230	—	0.59
	加罗林群岛/碱性玄武岩 ^[30]	4.45	26.1	351	344	64	286	109	113	3.84	1.13	1.43	0.39	187	518	152	22.6	—
	上地壳 ^[31]	20	13.6	107	85	17	44	25	71	5.8	20	10.7	2.8	550	350	190	22	1
	洋壳/基性玄武岩 ^[32]	8.8	40	252	317	45	144	81	78	2	—	0.19	0.12	43	134	85	29	—

表 3 研究区及相关区域样品稀土元素含量统计 (×10⁻⁶)

Table 3 Rare earth element content of the study area and related samples (×10⁻⁶)

海区/样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	
	最小值	36.0	80.8	9.44	37.1	7.99	1.98	7.98	1.32	8.12	1.53	4.39	0.66	4.12	0.66	202
	最大值	58.0	109	15.5	62.5	13.6	3.43	14.3	2.34	14.1	2.76	7.89	1.16	7.33	1.21	308
东马里亚纳海盆	平均值	52.8	102	13.8	55.7	12.1	3.03	12.5	2.05	12.5	2.38	6.83	1.03	6.44	1.05	284
/黏土 (本研究)	标准偏差	4.3	4.8	1.2	5.1	1.1	0.29	1.3	0.21	1.3	0.26	0.72	0.1	0.67	0.11	20.2
	变异系数%	8.1	4.7	8.7	9.2	9.1	9.6	10.4	10.2	10.4	10.9	10.5	9.7	10.4	10.5	7.1
	西菲律宾海/黏土 ^[19]	26.4	56.7	6.57	25.9	5.49	1.44	5.07	0.89	5.5	1.06	3.08	0.48	3.08	0.5	142
	马库斯—威克海山/黏土 ^[20]	56.3	115	14.5	58.9	12	2.76	11.3	2.04	11.9	2.44	6.47	1.14	7.49	1.12	303
	麦哲伦海山/黏土 ^[28]	65.08	85.25	16.80	73.49	16.14	4.17	17.21	2.77	17.96	3.63	9.89	1.45	8.73	1.44	324
	中国黄土 ^[29]	34.0	66.8	7.97	37.3	6.20	1.18	4.43	0.83	4.53	1.17	2.61	0.52	2.69	0.43	171
	加罗林群岛/碱性玄武岩 ^[30]	15.1	34.1	4.48	20.2	5.34	1.81	5.48	0.86	4.64	0.86	2.07	0.27	1.54	0.22	97
	上地壳 ^[31]	30	64	7.1	26	4.5	0.88	3.8	0.64	3.5	0.8	2.3	0.33	2.2	0.32	146
	洋壳/基性玄武岩 ^[31]	3.7	11.5	1.8	10.0	3.3	1.3	4.6	0.87	5.7	1.7	3.7	0.54	5.1	0.56	54

4 讨论

4.1 元素组合特征

沉积物化学元素组合通常用以反映元素之间的内在联系。对 28 个样品的化学元素等开展主成分分析, 经 Kaiser 标准化的正交旋转, 挑选特征值 > 1 的因子, 结果显示 4 个因子可以解释总方差的 92.56% (表 4)。

因子 1 的贡献为 69.72%, 对元素组成具有决定性影响, 此类元素主要由稀土元素 (Ce 除外)、P₂O₅、TiO₂ 组成, 均为正载荷。稀土元素包括镧系元素和 Y 等, 是一组化学性质相近的元素组合, 其在自然界密切共生。海洋中的 P₂O₅ 主要以磷酸盐形式 (磷灰石、独居石、磷钇矿) 存在, 研究表明深海稀土元素的富集主要与磷酸盐物质有关, 其中稀土元素最主要的赋存矿物为生物磷灰石^[33]。TiO₂ 主要以金红石的形式存在, 常与磷灰石及独居石、磷钇矿等富稀土矿物共生^[34]。由此, 因子 1 元素组合均与稀土元素关系密切。

表 4 研究区沉积物元素因子载荷矩阵

Table 4 Factor loading matrix of sediment elements in the study area

	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
Ho	0.953	0.208	0.203	0.064
Tb	0.946	0.233	0.211	0.066
Er	0.945	0.219	0.220	0.046
Y	0.941	0.291	0.084	0.116
Dy	0.936	0.237	0.238	0.067
Gd	0.936	0.226	0.223	0.112
Eu	0.936	0.240	0.229	0.097
Tm	0.932	0.256	0.237	0.035
Yb	0.932	0.252	0.248	0.020
Lu	0.924	0.281	0.238	-0.013
Sm	0.923	0.205	0.287	0.131
Nd	0.923	0.252	0.253	0.105
P ₂ O ₅	0.912	0.284	0.058	0.165
Pr	0.909	0.294	0.258	0.099
La	0.871	0.363	0.287	0.066
TiO ₂	0.671	0.499	0.505	0.071
Sc	0.118	0.904	0.137	0.180
Cr	0.113	0.896	0.252	0.199
Co	0.292	0.893	0.232	0.184
V	0.310	0.880	0.329	-0.023
MnO	0.451	0.767	0.428	-0.051
Fe ₂ O ₃	0.397	0.754	0.502	-0.079
Ni	0.243	0.744	0.396	0.372
Zn	0.453	0.740	0.158	0.364
Zr	0.363	0.716	0.547	0.020
Cu	0.272	0.699	0.107	0.032
Na ₂ O	-0.536	-0.688	-0.337	0.030
Ba	-0.572	-0.654	0.026	0.258
Pb	0.379	0.653	0.610	-0.007
K ₂ O	0.383	0.643	0.545	0.257
U	0.474	0.260	0.777	-0.215
MgO	0.048	0.286	0.773	0.159
Hf	0.433	0.424	0.759	-0.068
Th	0.362	0.105	0.744	0.417
Cs	0.159	0.656	0.683	0.062
Al ₂ O ₃	0.330	0.608	0.676	-0.052
Ce	0.451	0.509	0.644	0.219
SiO ₂	-0.486	-0.491	-0.506	-0.349
Sr	0.463	0.421	0.496	0.459

Cd	0.045	0.290	0.144	0.859
CaO	0.273	0.090	0.059	0.783
Mo	0.503	0.460	0.364	-0.580

注：提取方法：主成分。旋转法：具有 Kaiser 标准化的正交旋转法。

因子 2 贡献为 12.37%，元素组合主要包括 Fe_2O_3 、 MnO 等主量元素及 Cu、Cr、Co、Ni、Ba 等微量金属元素，此类元素大都为铁锰结核（铁锰氧化物或氢氧化物）的高含量元素，均直接来自海水^[35]。海水中的 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 氧化形成氧化物或氢氧化物胶体或颗粒，通过“清扫”作用吸收海水中的 Cu^{2+} 、 Cr^{2+} 、 Co^{2+} 等金属离子，导致金属元素的富集^[36]。海洋沉积物中 Ba 主要来源于陆源硅铝酸盐和生源重晶石，特别是开阔的远洋环境保存了大部分的生物重晶石^[37]，导致 Ba 含量远高于其他微量元素，研究表明铁锰氧化物是 Ba 的高效载体，呈吸附状态附着于铁锰结核^[38]，作为含量最高的微量元素，Ba 在本组合中为负载荷，与其他金属呈此消彼长的关系。由上推断，因子 2 组合元素与铁锰氧化物或氢氧化物有关，其在研究区表现为铁锰微结核（图 2）。

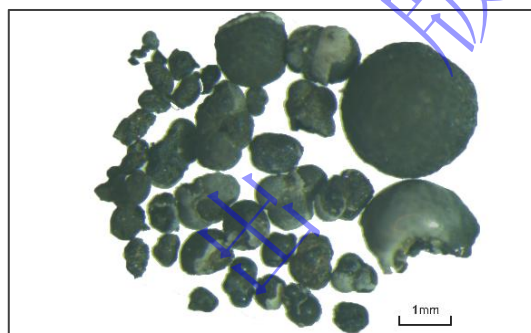


图 2 显微镜下的铁锰微结核颗粒

Fig.2 Fe-Mn micronodules under microscope

因子 3 贡献为 5.98%，此类元素包括 Al_2O_3 、 MgO 、 SiO_2 等主量元素和 U、Hf、Th、Ce 等微量、稀土元素，其中 SiO_2 为负载荷，其余为正载荷。Al 在表生环境下稳定，是硅铝酸盐矿物（黏土矿物）主要成分之一，一般被认为陆源物质代表^[39-40]，Mg 也是硅铝酸盐矿物中的常见元素^[41-42]，而深海中的硅铝酸盐以陆源供应为主^[36]。Si 在深海沉积中主要以石英碎屑、硅铝酸盐矿物和生物碎片（如硅藻、放射虫等）的形式存在^[43]，镜下观察沉积物生源物质含量极低，且鉴于 Si 与 Al 等大多数元素呈负相关（图 2），推断 Si 主要以石英碎屑形式存在，这也符合全岩矿物 XRF 扫描的结果（未发表）。Th、Hf 和稀土元素（如 Ce）等在水体中溶解度很低，在沉积物搬运和沉积成岩过程中基本保持不变，可反映陆源信息^[18]。海洋中的 U 也主要来自陆地，且易被黏土矿物富集^[44]。由上可知，本类元素组合与陆源碎屑关系密切。

因子 4 的贡献为 4.49%，仅包括 Cd、CaO 和 Mo，推断该类元素组合与生物源有关。

Ca 广泛存在于钙质生物壳体，通常指示钙质生源物质，但研究区水深普遍位于 CCD 以下，碳酸盐基本溶解，推测 Ca 可能以生物磷酸盐（如鱼牙）形式存在，全岩矿物粉末 XRD 数据也显示样品普遍存在约 10% 的磷灰石（未发表）。Cd 是一种类营养盐元素，有一定比例取代 Ca 离子进入生物壳体^[45]。Mo 也有类营养盐行为^[46]，在元素组合中为负载荷，其化学行为有待进一步研究。

4.2 元素的物源指示

海洋沉积物来源包括陆源、火山源、生物源和自生等不同来源，常选取不同元素组合来指示物质来源^[47-48]。利用元素与 Al 等稳定元素进行标准化比值，可消除沉积物中矿物和粒度变化对元素含量的影响^[49]，进而可以判断元素在海洋环境中的物质来源和转化。硅铝、铁铝比值是识别沉积物物源的有效指标，成功运用于太平洋沉积物物源研究。前人研究发现，典型的火山源 Si/Al 比值为 2.87，生物源比值为 7.39，太平洋陆源深海黏土特征值 3.19^[50]，研究区黏土沉积物 Si/Al 比值平均为 3.53，与太平洋陆源深海黏土接近。同样，研究区黏土沉积物 Fe/Al 比值平均为 0.41，接近于太平洋陆源黏土 0.61^[50] 和黄土 0.47^[29]，而区别于火山碎屑的 0.73 和胶体、生物组分的 1.56，均指示本区沉积物的陆源属性。

微量元素 Sc、Th、Zr、Hf 等在母岩风化、搬运与沉积过程中不易迁移，Zr/Hf、Th/Sc 等比值能保持很好的稳定性，可有效示踪^[18,51]，另外，稀土元素 La/Tb 和 La/Yb 比值也可反映沉积物物源^[52-53]，可应用于太平洋沉积物物源研究。在此尝试用上述特征元素比值区分物源，由表 5 所示，代表基性玄武岩的洋壳物质 La/Tb、Th/Sc 和代表碱性玄武岩的加罗林群岛岩石 Th/Sc 比值很低，研究区相关元素比值与西太邻近海区黏土沉积物相近，更接近于代表陆源的黄土、上陆壳，进一步说明了本区沉积物的陆源成因。

表 5 研究区及相关样品特征元素比值

Table 5 Ratio of characteristic elements of the study area and related samples

	东马利亚纳 海盆/黏土	马库斯—威克海 山/黏土 ^[20]	西菲律宾 海/黏土 ^[19]	中国黄土 ^[29]	加罗林群岛 碱性玄武岩 ^[30]	上陆壳 ^[31]	洋壳 ^[31]
La/Tb	25.78	27.60	29.66	40.96	17.60	46.88	4.25
La/Yb	8.22	7.52	8.57	12.64	9.81	13.64	0.73
Zr/Hf	38.27	26.12	—	38.00	39.46	32.76	32.00
Th/Sc	0.63	0.83	—	0.97	0.055	0.97	0.005 8

元素 La-Th-Sc 三角图解法也是示踪物源的有效手段，在太平洋沉积物物源研究中得到广泛应用^[11,54-55]。研究区沉积物 La-Th-Sc 图解投影与代表陆源风尘物质的黄土极为接近（图 3），而远离岩浆岩物质。另外，研究区样品在 La/Th-Hf 双变量图^[56]中也全部投影在长英质源区，以上均证实了研究区沉积物陆地风尘物质来源。

深海沉积物的陆源物质主要受大气环流控制，亚洲大陆的风尘物质主要在西风、季风、高空气流等作用下输入扩散至太平洋深处^[13,15,23,36]。太平洋深海沉积物研究表明，西自菲律宾海盆^[18-19,42]、帕里西维拉海盆^[16,41]，东至西北太平洋海山^[20,57]、东北太平洋海盆^[11]、东太平洋 CC 区^[36]，均揭示了亚洲风尘沉积的分布。与以上述海区相比，东马里亚纳海盆远离陆地，又有海沟阻隔，陆地物质难以通过河流直接输入，海盆区内海山分布少，火山、热液活动微弱，同时海盆主体位于 CCD 以下，缺少生物沉积，因此本区外生沉积物物源单一，陆源风尘物质构成了沉积物物源主体，本区也成为研究亚洲风尘沉积的理想区域。

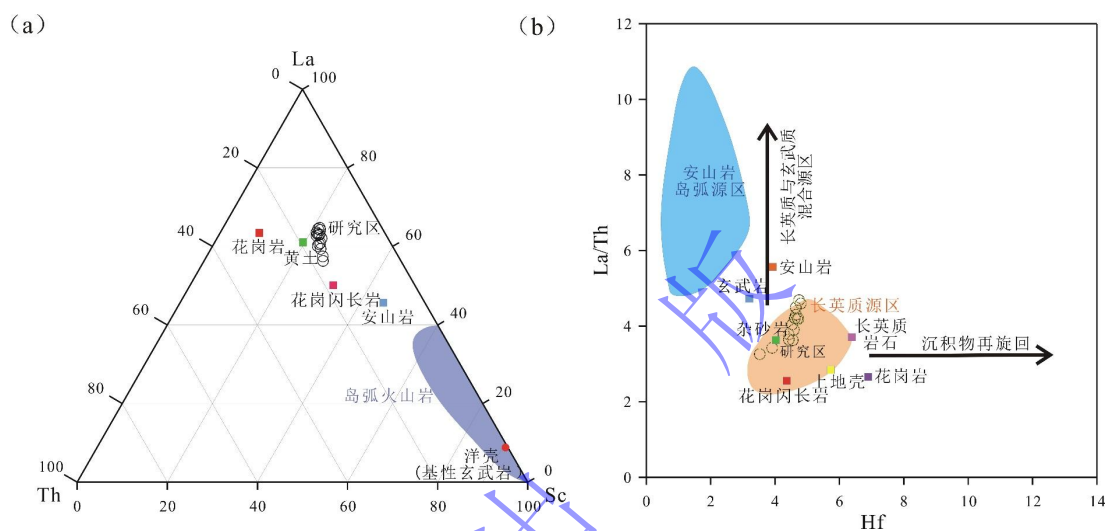


图3 La-Th-Sc 三角图 (a) 和 La/Th-Hf 双变量图 (b) (底图据文献[55-56]修改)

Fig.3 La-Th-Sc triangle diagram (a) and La/Th-Hf bivariate diagram (b) (base map is modified from references [55-56])

4.3 元素的环境指示

源区母岩遭受风化会导致 K、Na、Ca 等碱金属的淋失，同时 Al、Zr、Ti 等稳定元素趋于富集。为了评价母岩的化学风化程度和源区所处的气候环境，在此引入常用的化学蚀变系数 CIA (Chemical Index of Alteration) 指标，计算公式为：

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$$

式中：CaO*是指硅酸盐中的 CaO，其值依据 McLennan 法^[58]进行估算。CIA 值越大代表化学风化程度越强：CIA < 50 反映以物理剥蚀为主，未遭受化学风化；CIA 介于 50~65 反映寒冷、干燥条件下的弱化学风化；CIA 值介于 65~85，反映温暖、湿润条件下的中等化学风化；CIA 值介于 85~100 反映炎热、潮湿的特点条件下的强化学风化^[59]。研究区沉积物 CIA 介于 57.89~69.81，平均为 67.74，反映源区母岩均处于低—中等化学风化程度。研究区沉积物在 Al₂O₃-CaO*+Na₂O-K₂O 三角图 (A-CN-K) 的投影与黄土接近 (图 4)，进一步证实了上文关于样品陆源风尘来源的推论。

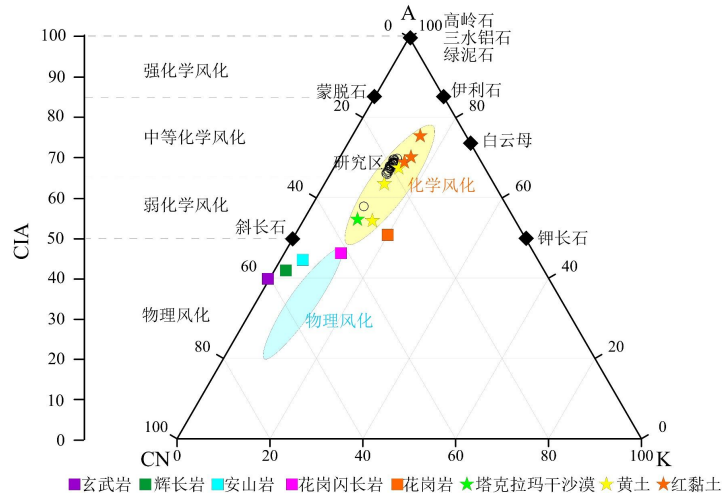


图 4 研究区沉积物 A-CN-K 三角图解 (底图据文献[11,18]修改)

Fig.4 A-CN-K triangle diagram of sediments in the study area (base map is modified from references[11,18])

沉积物中的一些元素，如微量元素 Cr、Co、Ni、V、U、Th、Mo 等，对底层氧化还原条件响应敏感，其比值如 Th/U、V/Cr 和 V/(V+Ni) 等可以指示水体氧化还原环境。前人研究表明^[60-63]，缺氧环境下 Th/U 值较小 (<2)，氧化环境下 Th/U 较大，强氧化环境下 Th/U 值可达 8；氧化环境下 V/Cr < 2，贫氧环境下 2 < V/Cr < 4.25，缺氧环境下 V/Cr > 4.25；V/(V+Ni) < 0.46 指示氧化环境，0.46 < V/(V+Ni) < 0.57 指示弱氧化环境，0.57 < V/(V+Ni) < 0.83 指示缺氧环境，0.83 < V/(V+Ni) < 1 指示硫化环境。研究区 Th/U 平均为 5.42，V/Cr 平均为 2.04，V/(V+Ni) 为 0.51，各参数指示结果一致，均指示研究区为氧化—弱氧化沉积环境。研究区处于低温富氧的南极底层水向北太平洋迁移路径区^[64]，周边海底普遍发育的多金属结核、结壳也印证了区域沉积环境的氧化特征^[9,65-66]。

5 结论

东马利亚纳海盆位于西太平洋深处，是研究亚洲大陆风尘沉积的理想区域。对采集于东马利亚纳海盆的远洋黏土表层沉积物开展元素地球化学测定，主量元素氧化物含量依次为 $SiO_2 > Al_2O_3 > Fe_2O_3 > Na_2O > MgO > K_2O > CaO > MnO > TiO_2 > P_2O_5$ ，含量最高为 SiO_2 ，平均为 49.14%，其次为 Al_2O_3 ，平均为 15.85%；微量元素中含量最高是 Ba，平均为 770×10^{-6} ，其次为 Cu，平均为 289×10^{-6} ；稀土总量 ($\sum REE$) 平均值为 284×10^{-6} ，其中 Ce、Nd 和 La 含量最高，为轻稀土富集型。对化学元素开展主成分分析，元素组合可分为 4 类：第一类与稀土元素关系密切，包括稀土元素、 P_2O_5 、 TiO_2 等；第二类与铁锰氧化物有关，包括 Fe_2O_3 、 MnO 以及 Cr、Co、Ni、Cu、Ba 等金属元素；第三类与陆源碎屑有关，包括 Al_2O_3 、 MgO 、 SiO_2 、U、Hf、Th、Ce 等；第四类与生物源有关，包括 Cd、CaO、Mo。各种元素组合指标

进一步揭示了沉积物以陆源物质，尤其是以陆地风尘物质为主，同时化学蚀变系数指示沉积物源区母岩处于低一中等化学风化条件，氧化还原敏感元素揭示研究区沉积环境为氧化—弱氧化环境。本研究对了解亚洲大陆风尘物质对东马利亚纳海盆物源影响，揭示海盆沉积环境和海底资源分布具有参考意义。

致谢 感谢自然资源部北海局“向阳红06”船全体参航人员在底质取样期间的辛勤付出，感谢自然资源部第一海洋研究所朱爱美高级工程师、自然资源部第三海洋研究所王凤工程师在样品测试方面提供的帮助，感谢北海调查中心郭泽华博士对本文提出的建议，感谢两位审稿专家的宝贵意见。

参考文献 (References)

- [1] 秦蕴珊, 尹宏. 西太平洋: 我国深海科学研究的优先战略选区[J]. 地球科学进展, 2011, 26(3): 245-248. [Qin Yunshan, Yin Hong. Western Pacific: The strategic priority in China deep-sea research[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(3): 245-248.]
- [2] Barker P F, Hill I A. Asymmetric spreading in back-arc basins[J]. *Nature*, 1980, 285(5767): 652-654.
- [3] Webster P J. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions[J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32(4): 427-476.
- [4] Wessel P, Sandwell D T, Kim S S. The global seamount census[J]. *Oceanography*, 2010, 23(1): 24-33.
- [5] Staudigel H, Clague D A. The geological history of deep-sea volcanoes: Biosphere, hydrosphere, and lithosphere interactions[J]. *Oceanography*, 2010, 23(1): 58-71.
- [6] Takaya Y, Yasukawa K, Kawasaki T, et al. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 5763.
- [7] Mimura K, Nakamura K, Yasukawa K, et al. Significant impacts of pelagic clay on average chemical composition of subducting sediments: New insights from discovery of extremely rare-earth elements and yttrium-rich mud at Ocean Drilling Program Site 1149 in the western North Pacific Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 186: 104059.
- [8] Yasukawa K, Kino S, Azami K, et al. Geochemical features of Fe-Mn micronodules in deep-sea sediments of the western North Pacific Ocean: Potential for co-product metal extraction from REY-rich mud[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 127: 103805.
- [9] Hyeong K, Kim J, Yoo C M, et al. Cenozoic history of phosphogenesis recorded in the ferromanganese crusts of central and western Pacific seamounts: Implications for deepwater circulation and phosphorus budgets[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 392: 293-301.
- [10] Ren Y Z, Sun X M, Guan Y, et al. Distribution of rare earth elements plus yttrium among major mineral phases of marine Fe-Mn crusts from the South China Sea and western Pacific Ocean: A comparative study[J]. *Minerals*, 2019, 9(1): 8.
- [11] Zhang Q, Liu Q S, 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.
- [12] Duce R A, Liss P S, Merrill J T, et al. The atmospheric input of trace species to the world ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5(3): 193-259.
- [13] Maher B A. The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance[J]. *Aeolian Research*, 2011, 3(2): 87-144.
- [14] 万世明, 徐兆凯. 西太平洋风尘沉积记录研究进展[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1208-1219. [Wan Shiming, Xu Zhaokai. Research progress on eolian dust records in the West Pacific[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(6): 1208-1219.]
- [15] Wan S M, Sun Y B, Nagashima K. Asian dust from land to sea: Processes, history and effect from modern observation to geological records[J]. *Geological Magazine*, 2020, 157(5): 701-706.

- [16] 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. Major element compositions of surface sediments in the East Philippine Sea and its geological implication[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(6): 43-48.]
- [17] 石学法, 陈丽蓉. 西菲律宾海晚第四纪沉积地球化学特征[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(2): 124-131. [Shi Xuefa, Chen Lirong. Late Quaternary sedimentary geochemical characteristics of the West Philippines sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 26(2): 124-131.]
- [18] 丁雪, 胡邦琦, 赵京涛, 等. 九州一帕劳海脊南段及邻近海域表层沉积物元素地球化学特征及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(1): 61-70. [Ding Xue, Hu Bangqi, Zhao Jingtao, et al. Elemental geochemical characteristics of surface sediments from the southern Kyushu-Palau Ridge and their geological significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(1): 61-70.]
- [19] 褚征, 胡宁静, 刘季花, 等. 西菲律宾海表层沉积物稀土元素地球化学特征及物源指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(5): 53-62. [Chu Zheng, Hu Ningjing, Liu Jihua, et al. Rare earth elements in sediments of West Philippine sea and their implications for sediment provenance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(5): 53-62.]
- [20] 邱忠荣, 马维林, 张霄宇, 等. 西北太平洋表层沉积物地球化学特征及其物源指示意义[J]. 浙江大学学报(理学版), 2020, 47(3): 345-354, 369. [Qiu Zhongrong, Ma Weilin, Zhang Xiaoyu, et al. Geochemical characteristics of surface sediments in Northwest Pacific and their indication of material sources[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2020, 47(3): 345-354, 369.]
- [21] Karl S M, Wandless G A, Karpoff A M. Sedimentological and geochemical characteristics of Leg 129 siliceous deposits[M]//Larson R L, Lancelot Y, Fisher A, et al. Proceedings of the ocean drilling program, scientific results. College Station, Texas: Ocean Drilling Program, 1992, 129: 31-79.
- [22] Karpoff A M, France-Lanord C, Lothe F, et al. Miocene tuff from Mariana Basin, Leg 129, Site 802: A first deep-sea occurrence of thaumasite[M]//Larson R L, Lancelot Y, Fisher A, et al. Proceedings of the ocean drilling program, scientific results. College Station, Texas: Ocean Drilling Program, 1992, 129: 119-135.
- [23] Hu D X, Wu L X, Cai W J, et al. Pacific western boundary currents and their roles in climate[J]. Nature, 2015, 522(7556): 299-308.
- [24] 李三忠, 曹现志, 王光增, 等. 太平洋板块中—新生代构造演化及板块重建[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 642-677. [Li Sanzhong, Cao Xianzhi, Wang Guangzeng, et al. Meso-Cenozoic tectonic evolution and plate reconstruction of the Pacific Plate[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 642-677.]
- [25] Pringle M S. Radiometric ages of basaltic basement recovered at Sites 800, 801, and 802, Leg 129, western Pacific Ocean[M]//Larson R L, Lancelot Y, Fisher A, et al. Proceedings of the ocean drilling program, scientific results. College Station, Texas: Ocean Drilling Program, 1992, 129: 389-404.
- [26] Prospero J M, Ginoux P, Torres O, et al. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product[J]. Reviews of Geophysics, 2002, 40(1): 2-1-2-31.
- [27] 齐泽坤, 徐继尚, 李广雪, 等. 热带西太平洋碳酸盐溶跃深度及其变化规律[J]. 地质学报, 2020, 94(12): 3852-3863. [Qi Zekun, Xu Jishang, Li Guangxue, et al. The variation of carbonate lysocline depth in the western tropical Pacific Ocean[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(12): 3852-3863.]
- [28] Bi D J, Shi X F, Huang M, et al. Geochemical and mineralogical characteristics of deep-sea sediments from the western North Pacific Ocean: Constraints on the enrichment processes of rare earth elements[J]. Ore Geology Reviews, 2021, 138: 104318.
- [29] 文启忠, 等. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-285. [Wen Qizhong, et al. Chinese loess geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-285.]
- [30] 赵晗, 张国良, 张吉, 等. 卡罗琳地幔柱活动减弱过程中岩浆成因和源区组成演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(4): 122-134. [Zhao Han, Zhang Guoliang, Zhang Ji, et al. Magma genesis and evolution of source composition during the weakening of Caroline mantle plume activity[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(4): 122-134.]

- [31] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 312.
- [32] Wedepohl K H. Tholeiitic basalts from spreading ocean ridges the growth of the oceanic crust[J]. *Naturwissenschaften*, 1981, 68(3): 110-119.
- [33] 石学法, 毕东杰, 黄牧, 等. 深海稀土分布规律与成矿作用[J]. *地质通报*, 2021, 40 (2/3): 195-208. [Shi Xuefa, Bi Dongjie, Huang Mu, et al. Distribution and metallogenesis of deep-sea rare earth elements[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2/3): 195-208.]
- [34] 汪双双, 吴春俊, 李艳广, 等. 西秦岭阳山金矿带花岗岩中独居石的矿物学特征及成因指示[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37 (3): 529-538. [Wang Shuangshuang, Wu Chunjun, Li Yanguang, et al. Mineralogical characteristics and their genetic implication of monazite in granite porphyries from the Yangshan gold metallogenic belt, West Qinling Mountains[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, 37(3): 529-538.]
- [35] Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, et al. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high-and green-technology applications: Comparison with land-based resources[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 51: 1-14.
- [36] 姜柳青, 汪卫国, 梁积伟, 等. 太平洋 CC 区西部沉积物地球化学特征及其成因[J]. *沉积学报*, 2021, 39 (5): 1185-1197. [Jiang Liuqing, Wang Weiguo, Liang Jiwei, et al. Geochemical characteristics and genetic mechanisms of sediments from western Clarion-Clipperton zone, Pacific Ocean[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(5): 1185-1197.]
- [37] 邹亮, 韦刚健, 李军. 海洋沉积物中生物成因 Ba 的海洋生产力研究[J]. *第四纪研究*, 2011, 31 (2): 307-315. [Zou Liang, Wei Gangjian, Li Jun. Review on ocean productivity by using biogenic Ba in marine sediments[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(2): 307-315.]
- [38] Dymond J, Suess E, Lyle M. Barium in deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity[J]. *Paleoceanography*, 1992, 7(2): 163-181.
- [39] 杨锐, 李国胜, 张洪瑞. 中太平洋 CC 区表层沉积物的地球化学[J]. *地质与资源*, 2007, 16 (3): 200-208. [Yang Rui, Li Guosheng, Zhang Hongrui. Analysis on the geochemical characteristics and material origin of the surface sediments in the mid-Pacific Ocean[J]. *Geology and Resources*, 2007, 16(3): 200-208.]
- [40] 吴旻哲, 乔培军, 邵磊. 西太平洋 807A 孔的元素地球化学特征及其对中更新世气候转型期的记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30 (2): 67-74. [Wu Minzhe, Qiao Peijun, Shao Lei. Element geochemical record of the western Pacific Ocean site ODP807A: Implication for the Middle Pleistocene climate transition[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(2): 67-74.]
- [41] 靳宁, 李安春, 刘海志, 等. 帕里西维拉海盆西北部表层沉积物中黏土矿物的分布特征及物源分析[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38 (6): 504-511. [Jin Ning, Li Anchun, Liu Haizhi, et al. Clay minerals in surface sediment of the northwest Parece Vela Basin: Distribution and provenance[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(6): 504-511.]
- [42] 石学法, 陈丽蓉, 李坤业, 等. 西菲律宾海西部海域黏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): 61-72. [Shi Xuefa, Chen Lirong, Li Kunye, et al. Study on minerageny of the clay sediment in the west of Philippine Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15(2): 61-72.]
- [43] Li G G, Bu R Y, Yi L, et al. Geochronology and paleoenvironmental changes of Late Pleistocene sediments in the Ross Sea, Antarctica[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 863336.
- [44] 刘季花, 梁宏锋, 姚德, 等. 东太平洋沉积物 U 的地球化学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16 (1): 59-67. [Liu Jihua, Liang Hongfeng, Yao De, et al. Geochemistry of uranium in deep sea sediments from East Pacific Ocean[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16(1): 59-67.]
- [45] 凤羽, 田军. Cd 元素的古海水化学性质及有孔虫壳体 Cd/Ca 比值的古海洋学意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38 (5): 122-129. [Feng Yu, Tian Jun. Hydrochemical behaviors of Cd in paleoceans and a review of Cd/Ca ratio in foraminifera shells as a paleoceanographic proxy[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(5): 122-129.]
- [46] Howarth R W, Cole J J. Molybdenum availability, nitrogen limitation, and phytoplankton growth in natural waters[J]. *Science*, 1985, 229(4714): 653-655.

- [47] Yang S Y, Jung H S, Lim D I, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 63(1/2): 93-120.
- [48] Cho Y G, Lee C B, Choi M S. Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea[J]. *Marine Geology*, 1999, 159(1/2/3/4): 111-129.
- [49] Adamo P, Arienzo M, Imperato M, et al. Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port[J]. *Chemosphere*, 2005, 61(6): 800-809.
- [50] Bischoff J L, Heath G R, Leinen M. Geochemistry of deep-sea sediments from the Pacific manganese nodule province: DOMES sites A, B, and C[M]//Bischoff J L, Piper D Z. *Marine geology and oceanography of the Pacific manganese nodule province*. Boston: Springer, 1979: 379-436.
- [51] 马英军, 刘丛强. 化学风化作用中的微量元素地球化学: 以江西龙南黑云母花岗岩风化壳为例[J]. *科学通报*, 1999, 44(22): 2433-2437. [Ma Yingjun, Liu Congqiang. Trace element geochemistry during chemical weathering: As exemplified by the weathered crust of granite, Longnan, Jiangxi[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(22): 2433-2437.]
- [52] 沈华梯. 深海沉积物中的稀土元素[J]. *地球化学*, 1990(4): 340-348. [Shen Huati. Rare earth elements in deep-sea sediments[J]. *Geochimica*, 1990(4): 340-348.]
- [53] 刘季花. 太平洋东部深海沉积物稀土元素地球化学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1992, 12(2): 33-42. [Liu Jihua. Geochemistry of REE of deep sea sediments in the East Pacific Ocean[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1992, 12(2): 33-42.]
- [54] Olivarez A M, Owen R M, Rea D K. Geochemistry of eolian dust in Pacific pelagic sediments: Implications for paleoclimatic interpretations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(8): 2147-2158.
- [55] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [56] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531-542.
- [57] 谢一璇, 杨小强, 张伙带, 等. 西太平洋深海沉积物记录的~80ka 以来风尘物质输入与东亚冬季风强度[J]. *古地理学报*, 2019, 21(5): 855-868. [Xie Yixuan, Yang Xiaoqiang, Zhang Huodai, et al. Eolian input and East Asian winter monsoon records in deep-sea sediment from western Pacific since ~80ka[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2019, 21(5): 855-868.]
- [58] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [59] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [60] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A.[J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1/2/3): 65-82.
- [61] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/2/3/4): 111-129.
- [62] Wignall P B, Twitchett R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction[J]. *Science*, 1996, 272(5265): 1155-1158.
- [63] Rimmer S M. Geochemical paleoredox indicators in Devonian–Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA)[J]. *Chemical Geology*, 2004, 206(3/4): 373-391.
- [64] Hu R, Piotrowski A M. Neodymium isotope evidence for glacial-interglacial variability of deepwater transit time in the Pacific Ocean[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4709.
- [65] Deng X Z, He G W, Xu Y, et al. Oxidic bottom water dominates polymetallic nodule formation around the Caiwei Guyot, northwestern Pacific Ocean[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 143: 104776.
- [66] Hu R, Chen T Y, Ling H F. Late Cenozoic history of deep water circulation in the western North Pacific: Evidence from Nd isotopes of ferromanganese crusts[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(31): 4077-4086.

Geochemical Characteristics of Elements in Surface Sediments of the East Mariana Basin and Their Indicative Implications

LI GuoGang¹, WANG Liang², LI YiXin¹, BI ChongHao¹, ZHAO Sheng¹, HU BangQi³

1. North China Sea Survey Center, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266061, China

2. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen, Fujian 361005, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao, Shandong 266237, China

Abstract: **[Objective]** The East Mariana Basin of the West Pacific Ocean, which is located east of the Mariana Trench, south of the Magellan Seamounts, and north of the Caroline Seamounts, is an ideal area for the study of Asian aeolian dust deposits, but the sediment research of the East Mariana Basin is still weak. To reveal the sediment geochemical characteristics and provide background data for further sediment provenance, seabed mineral resource evaluation and climate-environment evolution research, the element geochemistry of surface sediments in the East Mariana Basin was studied. **[Methods]** Based on 28 pelagic clay surface sediment (0–10 cm) samples collected in the eastern section of the East Mariana Basin using the box and gravity samplers, contents of major, trace, and rare earth elements of the sediments were analyzed using inductively coupled plasma optical emission and mass spectroscopy methods. Then, elements geochemical characteristics were analyzed, and their influencing factors and indicative significance were discussed. **[Results]** The results show that the contents of major elements in the pelagic clay sediments in the study area are roughly the same as those in the neighboring sea areas of the West Pacific Ocean. The distribution pattern of major elements (oxides) in sediments follows $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{MnO} > \text{TiO}_2 > \text{P}_2\text{O}_5$. SiO_2 has the highest content of all major elements, with an average of 49.14%, followed by Al_2O_3 , with an average of 15.85%. The trace element with the highest content was Ba, with an average of 770×10^{-6} , followed by Cu, with an average of 289×10^{-6} . The average of total rare earth elements ($\sum\text{REE}$) is 284×10^{-6} , which is light rare earth-rich type, with the highest Ce, Nd, and La contents. **[Discussions]** Principal component analysis of elements shows that the composition of chemical elements can be divided into four categories: The first type is closely related to rare earth elements, including most rare earth elements (except Ce), P_2O_5 , and TiO_2 , the second type is related to Fe-Mn micronodules, including Fe_2O_3 , MnO, Cr, Co, Ni, Cu, and Ba, the third type is related to terrigenous debris, including Al_2O_3 , MgO, SiO_2 , U, Hf, Th, and Ce, and the fourth type is related to biological sources, including Cd, CaO, and Mo. **[Conclusion]** The element combination indices (Si/Al, Fe/Al, La/Tb, Th/Sc, etc.) and projection diagrams (La-Th-Sc triangle diagram and La/Th-Hf bivariate diagram) further revealed that the sediments sources were dominated by terrigenous materials, particular terrestrial aeolian dust materials. Furthermore, the Chemical Index of Alteration (CIA) indicates that the parent rocks in the sediment source area are in low-medium chemical weathering conditions. The redox sensitive elemental (Cr, Ni, V, U, Th, etc.) combination reveals that the bottom sedimentary environment in the study area was oxidation-weak oxidation environment. This study has reference significance for understanding the influence of the Asian aeolian dust on the sediment provenance of the East Mariana Basin, revealing the sedimentary environment characteristics of the basin and the distribution of seabed mineral resources.

Key words: East Mariana Basin; surface sediment; element geochemistry; sediment provenance