

丁雪, 胡邦琦, 赵京涛, 等. 九州-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.

九州-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

丁雪¹, 胡邦琦^{1,2}, 赵京涛^{1,2}, 王飞飞^{1,2}, 黄威^{1,2}, 李攀峰^{1,2}, 刘佳^{1,3}, 郭建卫¹, 崔汝勇¹

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 崂山实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

3. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

摘要: 菲律宾海地理位置特殊, 蕴含着丰富的前沿地球科学问题, 是研究地球多圈层相互作用的天然实验室。近年来, 菲律宾海中部九州-帕劳海脊南段已成为研究热点, 但对其表层沉积物物质来源和沉积环境了解尚存在不足。本文通过对采集于九州-帕劳海脊南段水深为 3900~6100 m 的 69 个站位样品开展沉积地球化学研究, 旨在判别沉积物的物质来源和沉积环境空间变化特征。结果表明: 研究区底质类型为远洋黏土和硅质软泥, 不同类型沉积物的碎屑组分化学风化程度均较低, 受分选和再循环的影响较小, 是亚洲风尘物质和岛弧火山物质的混合产物, 且以亚洲风尘物质为主; 研究区不同类型站位的沉积环境基本一致, 整体处于氧化沉积环境, 底层水体氧化还原条件不是研究区沉积物中过渡金属 (如 Mo) 元素富集的控制因素, 铁锰 (氢) 氧化物是连接水体-沉积物中过渡金属元素源-汇过程的重要纽带。此外, 底部氧化还原条件可能不是该海域硅藻席沉积保存的必要条件。

关键词: 表层沉积物; 元素地球化学; 源汇过程; 氧化还原敏感元素; 九州-帕劳海脊

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022122402

Elemental geochemical characteristics of surface sediments from the southern Kyushu-Palau Ridge and their geological significance

DING Xue¹, HU Bangqi^{1,2}, ZHAO Jingtao^{1,2}, WANG Feifei^{1,2}, HUANG Wei^{1,2}, LI Panfeng^{1,2}, LIU Jia^{1,3}, GUO Jianwei¹, CUI Ruyong¹

1. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266237, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The Philippine Sea, with its special geographical location, is rich in frontier geoscience issues and is a natural laboratory for studying the Earth multi-layer interactions. In recent years, the southern section of the Kyushu-Palau Ridge in the central Philippine Sea has become a hot spot for geoscience research, but its surface sediment provenance and sedimentary environment are not yet well understood. The sediment geochemistry of 69 stations collected from the southern section of the Kyushu-Palau Ridge at water depths of 3900-6100m was studied to identify the spatial variability of sediment provenance and depositional environments. The results show that the sediment types in the study area are pelagic clay and siliceous ooze, and the clastic components of sediment are less chemically weathered, less affected by sorting and recycling, and are mixed products of Asian dust materials and island-arc volcanic materials, of which Asian dust materials are dominated; and the different types of sediment in the study area are basically in an oxidative depositional environment, and the bottom water redox conditions are not a controlling factor for the enrichment of transition metal (e.g., Mo) elements in the sediments, indicating that Fe-Mn (oxyhydr)oxides are an important link between the source-sink processes of transition metal elements at the water-sediment interface. In addition, bottom redox

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“菲律宾海盆底层水体性质对中更新世气候转型的响应机制”(41976192); 中国地质调查局地质调查二级项目 (DD20191010, DD20221720); 黄土与第四纪国家重点实验开放基金 (SKLLQG1805); 中国科学院 B 类战略性先导科技专项 (XDB40000000)

作者简介: 丁雪 (1986—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事海洋沉积与矿物地球化学研究, E-mail: dingxue@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 胡邦琦 (1983—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋沉积与矿产资源调查评价, E-mail: bangqihu@gmail.com

收稿日期: 2022-12-24; **改回日期:** 2023-01-09. 周立君编辑

conditions may not be necessary for the preservation of diatom mats.

Key words: surface sediment; elemental geochemistry; sediment provenance; redox sensitive element; Kyushu-Palau Ridge

菲律宾海位于欧亚板块和太平洋板块之间,是西太平洋最大的边缘海之一,海底地形十分复杂,海脊、海沟、岛弧、海山、海盆、裂谷等地形俱全^[1](图 1)。菲律宾海地理位置特殊,地质、海洋与地球动力学背景突出,深刻蕴含丰富的前沿地球科学问题,是地球系统科学理论创新的天然研究基地和实验场^[2-3]。国际上针对菲律宾海域已经开展了 25 个航次、98 个站位、218 口科学钻探工作,揭示了边缘海盆的演化过程和动力机制、探讨了俯冲动力学机制与致灾机理等重大科学问题,但仍有一些关键的科学问题制约着对菲律宾海及邻域构造沉积过程的全面认识^[3-4]。此外,菲律宾海是亚洲风尘主要沉降区之一,前人对菲律宾海新生代沉积物中风尘物质贡献、搬运动力机制、生物地球化学作用等方面开展了深入研究^[5-6],但大多局限于菲律宾海吕宋岛附近海域(如班哈姆隆起)^[7-9],对菲律宾海远离吕宋岛的深海沉积物物质来源和沉积环境研究尚不多见,主要集中于帕里西维拉海盆^[10-12]。

九州-帕劳海脊位于菲律宾海中部,呈反转“S”形从北部九州岛向南延伸至帕劳群岛,海脊一般比两侧海盆高 2000~3000 m,海脊两侧“东陡西缓”(图 1A)。近年来,中国地质调查局青岛海洋地质研究所组织多个航次对九州-帕劳海脊南段及邻近海域开展综合地质地球物理调查,获取了海量地球物理资料和多种类型的实物样品,揭示了九州-帕劳海脊南段及邻近海域的地形地貌特征和构造成因

机制^[13],刻画了九州帕劳海脊和中央裂谷三联点附近的地形及重磁场特征^[14],探讨了九州-帕劳海脊及其东西两侧盆地的构造沉积特征及地壳结构^[15]。此外,还通过地质取样、海底摄像等手段在九州-帕劳海脊南段及邻近海域发现了铁锰结核-结壳赋存区,探讨了结核结壳的成因类型、金属富集规律和制约因素^[16-18]。本文对九州-帕劳海脊南段及邻近海域的表层沉积物样品开展元素地球化学测试分析工作(图 1B),通过多指标交叉验证揭示该区沉积物组成和碎屑组分来源,探讨沉积环境的空间变化及机制,以期为古环境重建、构建成矿地质模型等提供佐证。

1 区域地质背景

菲律宾海南北跨越 0~35°N,东西横跨 124°~147°E,面积为 $5.4 \times 10^6 \text{ km}^2$,水深 3000~6000 m,平均约为 4500 m,总体表现为“西部深、东部浅”的特点,海盆整体位于菲律宾海板块之上,周边环境岛弧与深海沟俯冲带(图 1A)。以菲律宾海盆中央南北走向的九州-帕劳海脊为界,西部是西菲律宾海盆,东部有西菲律宾海盆和帕里西维拉海盆等。其中,西菲律宾海盆形成时间最早,以中央断裂为界分为 3 部分:北部西北次海盆、南部南次海盆以及中间中央裂谷盆地^[15]。

菲律宾海的表层海流系统主要是北赤道流和

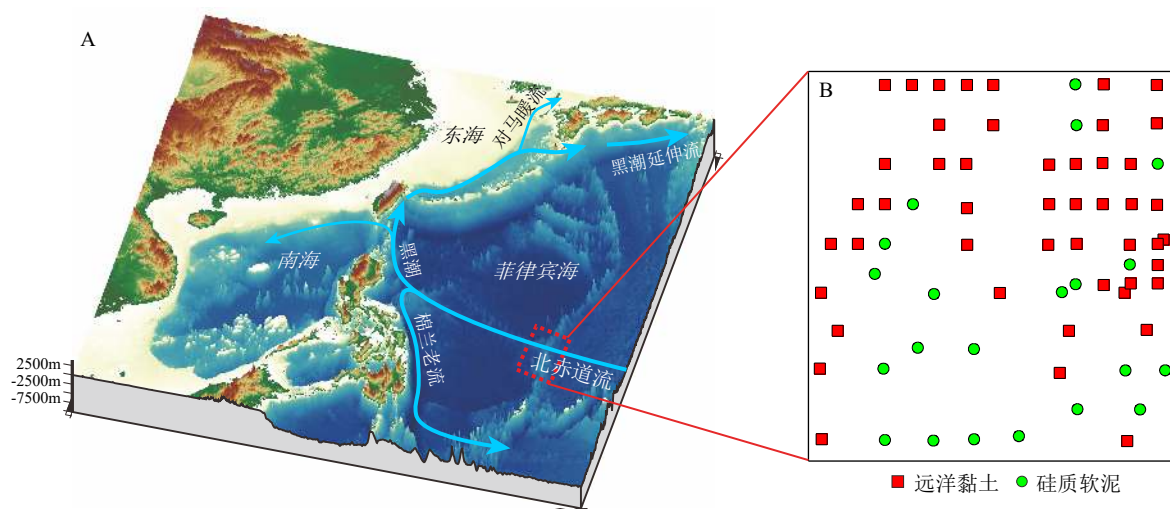


图 1 菲律宾海地理位置及表层环流体系(红色虚线框为研究区)(A)和表层沉积物站位分布图(B)

Fig.1 Geographical location and surface circulation system of the Philippine Sea (the red dotted box is the study area) (A) and the distribution of surface sediment sampling sites (B)

黑潮流系^[19-20]。北赤道流在 10°~20°N 自东向西流动, 宽度约为 2000 km, 厚度为 200 m, 流速约为 0.5 m/s。北赤道流到达菲律宾群岛海岸, 受地形的阻挡, 分为南、北两支, 南向分支为棉兰老流, 北向分支为黑潮。黑潮具有高温、高盐特征, 在台湾岛以东的宽度约为 300 km, 厚度为 400~500 m, 流速为 1.5~2 m/s, 在日本群岛附近又分支成向西北的对马暖流和向东北的黑潮延伸流^[20]。

2 材料和方法

样品于 2018—2019 年在九州-帕劳海脊南段使用箱式取样器和重力柱取样器获得, 取其表层沉积物(0~5 cm)作为研究对象, 水深范围为 3900~6 100 m, 共 69 个样品, 其中 21 件样品为硅质软泥, 其余 48 件样品为远洋黏土(图 1B)。

元素地球化学成分测试分析工作在自然资源部海洋地质实验检测中心完成, 采用 X 射线荧光光谱仪分析 Si、Al、Fe、Ca、Mg、K、Na、P、Mn、Ti 等主量元素含量, 采用等离子体质谱仪测定 Co、Ni、Cu、Mo 和 REY 等微量元素含量, 测试分析过程中为确保准确度和精密度, 按照国标《GB/T20260—2006 海底沉积物化学分析方法》的要求, 分别进行 20% 的重复样分析以及国家一级标准物质(GBW07314)同步分析, 元素含量检测相对误差均小于 5%, 表明分析结果准确可靠。

3 结果

九州-帕劳海脊南段及邻近海域表层沉积物常量元素氧化物含量如表 1 所示。研究区表层沉积物的常量元素氧化物主要由 SiO₂、Al₂O₃、CaO、TFe₂O₃、K₂O、MgO、Na₂O 等组成, 除了 SiO₂(部分样品未测试, 故未列出)外, Al₂O₃ 含量最高, 平均值为 13.8%; TFe₂O₃、Na₂O、MgO、K₂O、CaO 的平均值分别为 7.99%、5.81%、3.16%、2.16%、1.52%; TiO₂、MnO 和 P₂O₅ 含量较低, 平均值分别为 0.64%、1.14% 和 0.26%。与上地壳(UCC)标准值^[21]相比, Al₂O₃、K₂O、TiO₂ 与 UCC 标准值相当, CaO、Na₂O 略有亏损, MgO、P₂O₅、TFe₂O₃ 轻度富集, MnO 存在明显富集(图 2A)。

九州-帕劳海脊南段及邻近海域表层沉积物微量元素含量如表 1 所示。Ba 质量分数最高, 平均值为 1 106 μg/g, 其次为 Cu, 平均值为 268 μg/g。Zn、Ni、Sr、V 和 Zr 元素质量分数的平均值为 121~

表 1 研究区表层沉积物常量元素氧化物含量和微量元素含量

Table 1 Contents of major and trace elements of the surface sediments of this study

	组分	最小值	最大值	平均值	上地壳 ^[21]
常量元素/%	Al ₂ O ₃	2.46	17.4	13.8	15.4
	CaO	0.45	2.51	1.52	3.59
	MgO	0.21	4.11	3.16	2.48
	K ₂ O	0.43	2.87	2.16	2.8
	Na ₂ O	3.16	16.2	5.81	3.27
	TiO ₂	0.04	0.84	0.64	0.64
	P ₂ O ₅	0.04	0.56	0.26	0.15
	MnO	0.03	6.62	1.14	0.1
	TFe ₂ O ₃	0.87	12.4	7.99	5.04
微量元素/(μg/g)	Cu	28.2	842	268	28
	Pb	5.1	299	57.7	17
	Zn	18.1	292	138	67
	Cr	12.3	105	69.2	92
	Ni	11.5	1 160	181	47
	Co	4.08	384	75.3	17.3
	Cd	0.03	3.31	0.42	0.09
	Li	8.35	73.6	50	21
	Rb	12.8	106	72	84
	Cs	0.78	9.5	6.62	4.9
	Mo	0.63	70.9	18.7	1.1
	Sr	48.2	709	196	320
	Ba	244	2 280	1 106	624
	V	19.1	251	164	97
	Sc	2.51	25.4	19.7	14
	Zr	9.9	223	121	193
	Hf	0.6	4.53	3.11	5.3
	U	0.39	3.13	1.84	2.7
	Th	1.19	16.3	9	10.5
	La	5.81	77.4	39.0	31.0

196 μg/g。Cd、Cs、Hf、U 和 Th 元素质量分数较低, 平均值为 0.42~9.00 μg/g。研究区表层沉积物微量元素含量与 UCC 标准值相比, 具有相对低的 Cr、Rb、Sr、Zr、Hf、U、Th 含量, 而 Cu、Pb、Zn、Ni、Co、Cd、Li、Mo、Ba、V、Sc 等元素含量高于 UCC 平均值, 其中 Mo 在不同类型表层沉积物中的含量均比

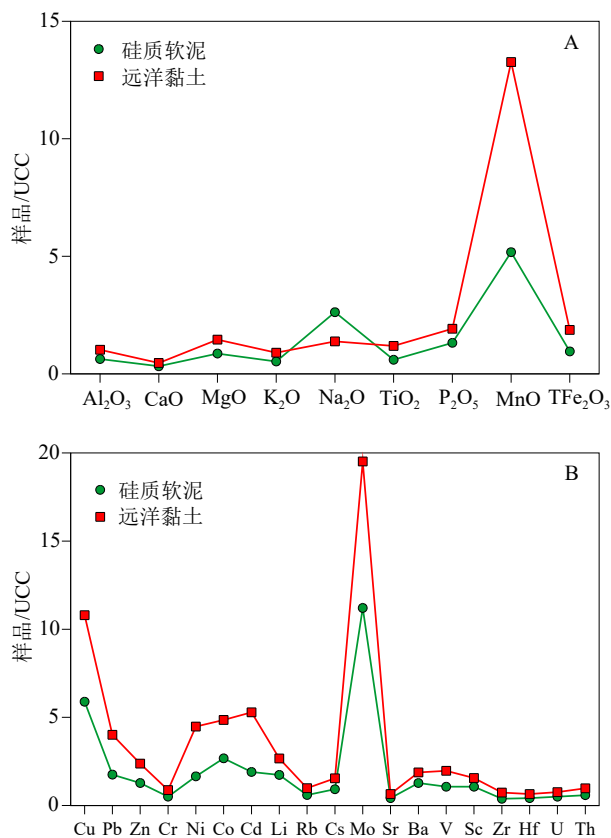


图2 不同类型沉积物常量元素氧化物 (A) 和微量元素 (B) 分布图
UCC 为上地壳标准值^[21]。

Fig.2 UCC-normalized diagrams of the major and trace element contents of the different types of surface sediments from the study area

UCC is the Upper Crust Content^[21]

上地壳标准值富集 10 倍以上, 而 Sr 含量平均值 $196 \mu\text{g/g}$, 约比上地壳平均值 $320 \mu\text{g/g}$ 亏损一半, 可能与研究区表层沉积物碳酸盐矿物的剧烈溶解作用有关(图 2B)。

4 讨论

4.1 碎屑组分物源判别

源区母岩风化蚀变过程中, 随着易迁移的碱金属元素氧化物(K_2O 、 CaO 、 Na_2O 和 MgO 等)以离子形式随地表流体逐渐流失, 相对稳定的氧化物(Al_2O_3 、 ZrO_2 、 TiO_2 等)在风化产物中所占的摩尔分数越来越大。化学蚀变指数 (Chemical Index of Alteration, CIA) 是常用的定量衡量源区岩石化学风化强度指标^[22], 计算公式为: $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times 100]$, 其中 CaO^* 指的是硅酸盐中

的 CaO , 因此需要排除磷酸盐 (磷灰石) 和碳酸盐 (方解石、白云石) 中的 CaO 。本文采用 McLennan^[23] 提出的校正方法估算硅酸盐中 CaO 含量: (1) 消除磷灰石中的 CaO [$\text{CaO}_R = \text{CaO} - (\text{P}_2\text{O}_5 \times 10/3)$]; (2) 当 $\text{CaO}_R \leq \text{Na}_2\text{O}$, 则 CaO_R 值 = CaO^* ; 当 $\text{CaO}_R > \text{Na}_2\text{O}$, 则 $\text{CaO}^* = \text{Na}_2\text{O}$ 。CIA 值与化学风化强度正相关, 其值越高表明源区的化学风化作用越强烈。此外, 通过 CIA 结合 A-CN-K 图解, 可以更有效评估化学风化趋势、风化程度、风化过程中的矿物成分变化和源区组成^[24]。

研究区样品 CIA 值变化范围较大 (11~62, 均值为 48 ± 12), 高于九州-帕劳海脊南部火山岩 CIA 值^[25], 低于黄土 CIA 值^[26], 与塔克拉玛干沙漠 CIA 值相当^[27], 暗示两者物源相关性较强。在部分硅质软泥站位 (图 3A), CIA 异常低值的可能原因有两个: 一是硅质软泥样品中 Si 含量极高, 稀释了其他常量元素含量, 二是硅质软泥中可能含火山物质较多 (图 3C), 两者均可导致 CIA 异常低值。远洋黏土的 CIA 值为 41~61, 均值为 54 ± 11 , 略低于西北太平洋 ODP 885A 孔更新世以来样品 CIA 值^[28]。在 A-CN-K 图解中, 大部分样品在斜长石-钾长石基线以上, 同时大致平行于 A-CN 连线, 表明碎屑组分仅经历初级化学风化 (即早期脱 Ca-Na 阶段), 化学风化趋势也完全遵循预测的风化趋势 (即斜长石风化趋势), 而钾长石基本不受风化作用的影响 (即没有钾交代的发生), 进一步证明源区化学风化程度较低。

沉积物除受化学风化作用以外, 搬运过程中矿物分选作用也会改变其地球化学特征, Th/Sr-Zr/Sc 二元图解是反映沉积物分选和再循环作用的常用手段^[29] (图 3B)。沉积分选及再循环易导致沉积物中某些稳定重矿物的富集 (如锆石), 从而引起一些元素 (比如 Zr) 富集, 因此 Zr/Sc 比值可用于反映由于分选和再循环等沉积过程导致的锆石增加; 而 Th/Sc 比值可有效地指示岩浆化学分异过程, 用于辨别沉积物的长英质与铁镁质来源。Th/Sc 和 Zr/Sc 值在初始沉积循环的沉积物中表现为正相关关系, 大致沿着岩浆成分趋势线呈线性分布, 而对于经历强烈分选和再循环的沉积物而言, Zr/Sc 值大幅度增加, 但 Th/Sc 值没有显著变化, 即沿着代表分选作用和再循环沉积的趋势线分布。研究区样品 Zr/Sc 和 Th/Sc 值分别为 1.8~13.7 和 0.15~1.0, 在 Th/Sc-Zr/Sc 二元图解 (图 3B) 中靠近岩浆成分趋势线呈线性分布, 具有显著正相关性 ($r=0.82, p<0.001$), 表明碎屑组分是由初次循环形成的 (来源于长英质与玄武质混合源区), 受分选和再循环的影响较小。

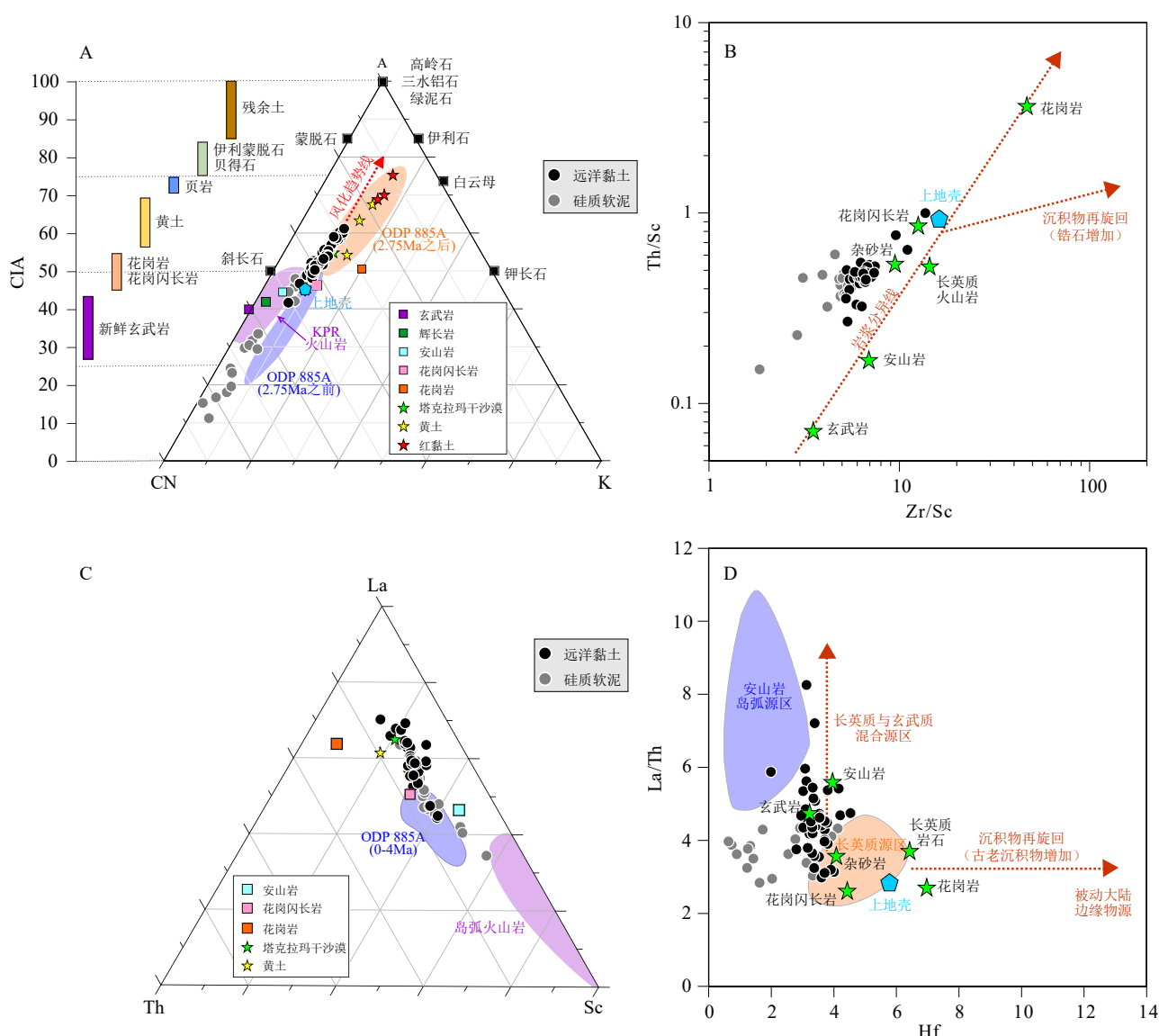


图 3 源区风化强度和沉积分选再循环评价图

A: A-CN-K 图解^[24], B: Th/Sc-Zr/Sc 双变量图^[29], C: La-Th-Sc 三角图解^[30], D: La/Th-Hf 双变量图^[31]。底图均据引用文献重新绘制。

Fig.3 Evaluation of the weathering intensity in the source regions and the sedimentary sorting and recycling

A: A-CN-K ternary diagram^[24], B: Th/Sc-Zr/Sc diagram^[29], C: La-Th-Sc ternary diagram^[30], D: La/Th-Hf diagram^[31].

微量元素 Sc、Th、Zr、Hf 和稀土元素(如 La)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,可用于物源示踪。La-Th-Sc 三角图解^[30]是物源识别和构造背景分析的经典方法,已被广泛应用(图 3C),如南海^[32-33]和西太平洋^[34]。最近, Zhang 等^[28]分析了西北太平洋 ODP 885A 孔的沉积物 La-Th-Sc 元素特征,认为 4 百万年以来该钻孔沉积物主要是亚洲风尘贡献,火山物质影响较小(图 3C)。研究区样品的 La-Th-Sc 图解(图 3C)表现为明显的双端元混合,即亚洲风尘物质和岛弧火山物质的混合产物,与前人利用黏土矿物^[10-12, 35]、元素地球化学^[36-37]和 Sr-Nd 同位素^[38-39]等多种示踪

方法获得结果一致。此外,与西北太平洋 ODP 885A 孔^[28]相比,研究区样品更加靠近塔克拉玛干沙漠和黄土等潜在风尘源区,暗示研究区亚洲风尘物质的贡献相对更高。另外从 La/Th-Hf 双变量图^[31]可以发现大部分样品都位于玄武岩和长英质混合源区(图 3D),进一步证实了研究区沉积物物质来源的双端元混合结构。

4.2 底层沉积环境分析

根据水体的氧含量水平从有到无,将氧化还原环境分为 4 类:氧化(Oxic)、亚氧化(Suboxic)、缺氧(Anoxic)和硫化缺氧(Sulfidic Anoxic 或 Euxinic)^[40]。

等富集 ($1 < EF < 10$), Mo 元素整体表现为高度富集 ($EF > 10$), 而 Cr 和 U 却表现为亏损 ($EF < 1$) (图 4A)。开阔大洋环境中, U、V 在亚氧化条件下的沉积物中比 Mo 优先富集, 随着沉积环境从缺氧环境向硫化环境发展时, Mo 会逐步发生富集^[44] (图 4B)。然而, 研究区样品 U、V 富集不明显, $EF(U) = 0.84 \pm 0.6$ 、 $EF(V) = 1.87 \pm 0.33$, 但大部分站位 Mo 表现出中等和强烈富集, $EF(Mo) = 18.8 \pm 14.1$, 同时研究区表层沉积物中 U、V、Cr 等元素含量的空间分布趋势较为一致, 但与 Mo 元素存在较大差异, 表明研究区底层水体氧化还原条件可能并不是 Mo 富集的控制因素。尽管自生 U 的吸附主要发生在底层水-沉积物界面或其以下, 但自生 Mo 并不一定如此。水柱中铁锰

(氢)氧化物颗粒生成并下沉的过程中, 会强烈吸附海水中的 Mo (图 5A), 并迅速将其转移到底层水-沉积物界面中, 由于 U、V 在氧化条件下不会随着颗粒物发生运移, 因此相对于 Mo, U、V 富集受到限制 (图 5B-C)^[41, 44-45]。研究区深层水体来自南大洋的高溶解氧水团, 通过强烈氧化作用形成铁锰(氢)氧化物并沉淀, 同时“捕获或清扫”周边海水中离子形式 (Co^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 和 Zn^{2+}) 以及部分氧化物和氢氧化物形式 (MoO_4^{2-} 、 $Cr(OH)^{2+}$ 、 VO^{2+}) 的过渡金属元素, 在海底沉积物中富集或形成自生微结核埋藏^[46-47] (图 4B)。因此, 本文结果表明铁锰(氢)氧化物是连接水体-沉积物中过渡金属元素源-汇过程的重要纽带。

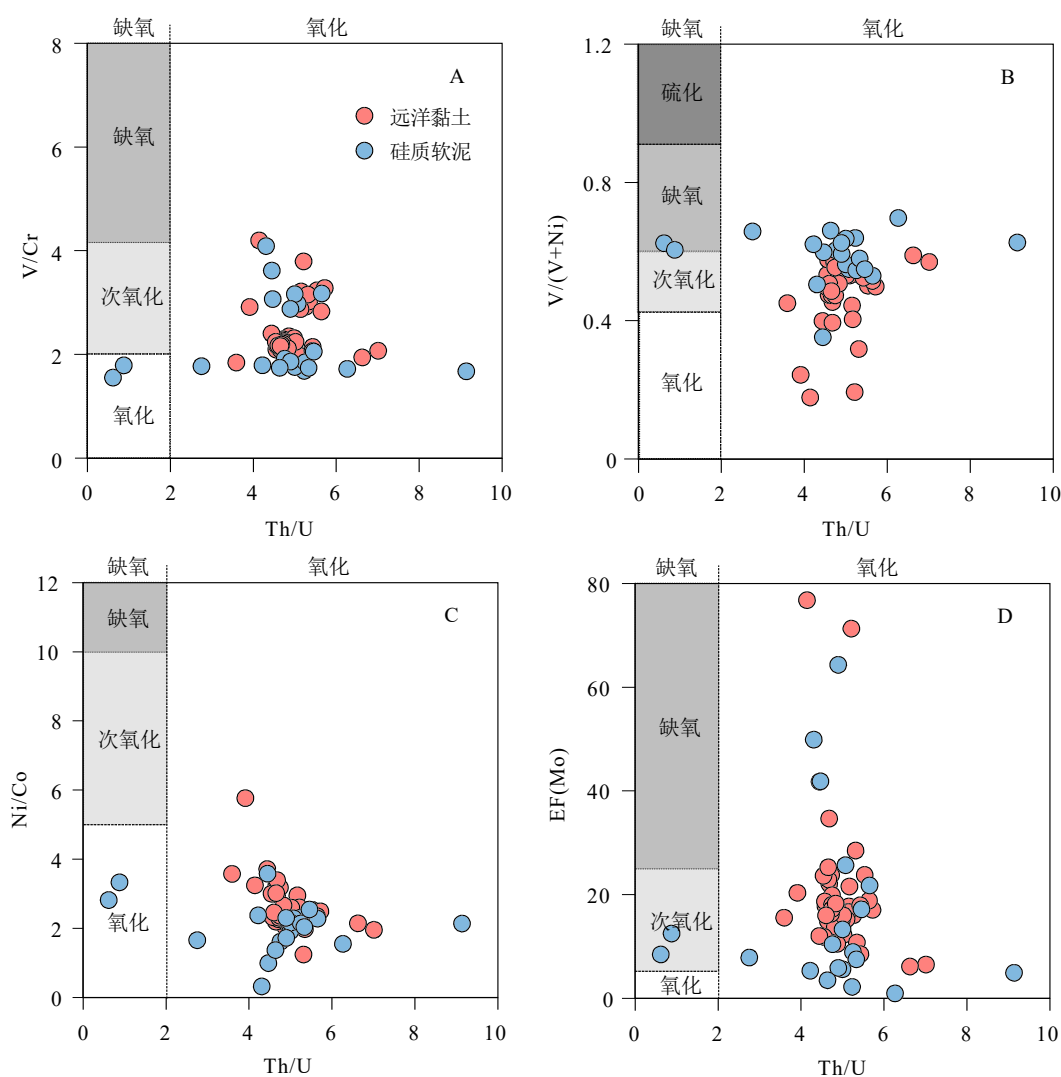


图 6 研究区底层水体氧化还原环境识别图

A: V/Cr-Th/U 协变图, B: V/(V + Ni)-Th/U 协变图, C: Ni/Co-Th/U 协变图, D: EF(Mo)-Th/U 协变图。其中 V/Cr、Th/U 和 Ni/Co 的含氧量临界值参考文献 [49-50]。

Fig.6 Diagrams of redox environment of bottom water

A: V/Cr-Th/U; B: V/(V + Ni)-Th/U; C: Ni/Co-Th/U; D: EF(Mo)-Th/U. Critical oxygen content of V/Cr, Th/U, and Ni/Co ratios are from references [49-50].

除了RSE富集程度可以作为底层水体氧化还原状态的替代指标之外,某些微量元素比值也能够用来指示底层水体的氧化还原环境,如Th/U、V/Cr、Ni/Co和V/(V+Ni)比值等^[48-51](图6)。缺氧环境下Th/U值为0~2,但强氧化环境下Th/U值可达8。类似的,V/Cr<2指示氧化环境,2<V/Cr<4.25指示贫氧环境,V/Cr>4.25指示缺氧环境;Ni/Co>7指示缺氧-厌氧环境,5<Ni/Co<7指示贫氧环境,Ni/Co<5指示氧化环境;V/(V+Ni)<0.46指示氧化环境,0.46<V/(V+Ni)<0.57为弱氧化环境,0.57<V/(V+Ni)<0.83为缺氧环境,0.83<V/(V+Ni)<1为硫化环境。研究区样品Th/U值为0.6~9.1,除2个硅质软泥样品Th/U值小于2(分别为0.62和0.88)以外,不同类型样品Th/U值并无显著区别。V/Cr值为1.5~4.2,均值为2.4±0.6;Ni/Co值变化范围较大(0.3~5.8),均值为2.4±0.7;V/(V+Ni)值波动于0.18~0.70,均值为0.52±0.1,其中硅质软泥站位的V/(V+Ni)值较为均一,而多个远洋黏土站位的V/(V+Ni)值明显偏低(<0.46)。综合上述多种指标,研究区不同类型沉积物的沉积环境基本一致,整体处于氧化沉积环境(图6),与RSE富集系数及其共变约束的结果基本一致(图4)。前人研究表明东菲律宾海^[52]和马里亚纳海沟^[53]的硅藻席沉积于亚氧化底层水和硫化缺氧孔隙水条件下,本文结果表明底部氧化还原条件可能不是硅藻席沉积保存的必要条件,这种区域差异可能与复杂多变的海底地形有关,需要下一步工作加以佐证。

5 结论

九州-帕劳海脊南段及邻近海域的表层沉积物类型主要为远洋黏土和硅质软泥,两者空间分布差异明显。地球化学特征表明沉积物碎屑组分仅经历初级化学风化,受分选和再循环的影响较小,是亚洲风尘物质和岛弧火山物质的混合产物,且以亚洲风尘物质为主。氧化还原敏感元素特征指示研究区底层水体整体处于氧化沉积环境,底层水体氧化还原条件不是Mo、V、Ni、Co等过渡金属元素富集的控制因素,相反铁锰(氢)氧化物是连接水体-沉积物中过渡金属元素源-汇过程的重要纽带。此外,底部氧化还原条件可能不是硅藻席沉积保存的必要条件,需要进一步工作加以佐证。研究结果对理解九州-帕劳海脊南段沉积物源-汇过程、开展铁锰结核(壳)资源预测、建立成矿地质模型等方面具有参考意义。

参考文献 (References)

- [1] 宋维宇, 刘娅楠, 胡邦琦, 等. 基于DEM数据的菲律宾海典型区地貌类型划分[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(1): 192-198. [SONG Weiyu, LIU Yanan, HU Bangqi, et al. Landform classification for the Philippine Sea based on DEM data [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(1): 192-198.]
- [2] 张国伟, 李三忠. 西太平洋-北印度洋及其洋陆过渡带: 古今演变与论争[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(4): 1-17. [ZHANG Guowei, LI Sanzhong. West Pacific and North Indian Oceans and their ocean-continent connection zones: Evolution and debates [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(4): 1-17.]
- [3] 李春峰, 周多, 李刚, 等. 西太平洋地球动力学问题与未来大洋钻探目标[J]. 地球科学, 2021, 46(3): 759-769. [LI Chunfeng, ZHOU Duo, LI Gang, et al. Geodynamic problems in the Western Pacific and future scientific drill targets [J]. Earth Science, 2021, 46(3): 759-769.]
- [4] 杜学鑫, 祝文君, 牟明杰, 等. 菲律宾海板块俯冲与岛弧演化的钻探靶区研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 199-210. [DU Xuexin, ZHU Wenjun, MOU Mingjie, et al. Study on drilling target area of subduction of Philippine Sea plate and island arc evolution [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 199-210.]
- [5] 万世明, 徐兆凯. 西太平洋风尘沉积记录研究进展[J]. 海洋与湖泊, 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.]
- [6] Xu Z K, Wan S M, Colin C, et al. Enhanced terrigenous organic matter input and productivity on the western margin of the Western Pacific Warm Pool during the Quaternary sea-level lowstands: Forcing mechanisms and implications for the global carbon cycle [J]. Quaternary Science Reviews, 2020, 232: 106211.
- [7] Xu Z K, Li T G, Clift P D, et al. Quantitative estimates of Asian dust input to the western Philippine Sea in the mid-late Quaternary and its potential significance for paleoenvironment [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, 16(9): 3182-3196.
- [8] Jiang F Q, Zhou Y, Nan Q Y, et al. Contribution of Asian dust and volcanic material to the western Philippine Sea over the last 220 kyr as inferred from grain size and Sr-Nd isotopes [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(9): 6911-6928.
- [9] Jiang F Q, Frank M, Li T G, 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.
- [10] 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 & Quaternary Geology, 2012, 32(4): 139-148.]
- [11] 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]. 海洋与湖泊, 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.]
- [12] 黄杰, 万世明, 张国良, 等. 海底地形特征对东菲律宾海表层黏土矿物分布的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37 (1): 77-85. [HUANG Jie, WAN Shiming, ZHANG Guoliang, et al. Impact of sea-floor topography on distribution of clay minerals in the East Philippines Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37 (1): 77-85.]
- [13] Qin X W, Luo W D, Li P F, et al. Topographic and geomorphological features and tectogenesis of the southern section of the Kyushu-Palau Ridge (KPR) and its adjacent areas [J]. *China Geology*, 2021, 4 (4): 571-584.
- [14] Shang L N, Li P F, Du R L, et al. Structural characteristics of the KPR-CBR triple-junction inferred from gravity and magnetic interpretations, Philippine Sea Plate [J]. *China Geology*, 2021, 4 (4): 541-552.
- [15] 侯方辉, 秦轲, 陆凯, 等. 九州-帕劳海脊中段及两侧盆地构造沉积特征及俯冲起始: 多道反射地震综合研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42 (5): 187-198. [HOU Fanghui, QIN Ke, LU Kai, et al. Tectono-sedimentary characteristics and subduction initiation in the middle Kyushu-Palau Ridge and adjacent basins: A comprehensive study of multichannel seismic reflection profiles [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42 (5): 187-198.]
- [16] 黄威, 胡邦琦, 宋维宇, 等. 九州-帕劳海脊南部13°20'N海山铁锰结壳关键金属富集规律及制约因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42 (5): 137-148. [HUANG Wei, HU Bangqi, SONG Weiyu, et al. Enrichment and constraints of critical metals in ferromanganese crusts from 13°20'N seamount of the southern Kyushu-Palau Ridge [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42 (5): 137-148.]
- [17] 黄威, 胡邦琦, 徐磊, 等. 帕里西维拉海盆西缘中段铁锰结核的地球化学特征和成因类型[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41 (1): 199-209. [HUANG Wei, HU Bangqi, XU Lei, et al. Geochemical characteristics and genesis of the ferromanganese nodules in the middle western margin of the Parece Vela Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41 (1): 199-209.]
- [18] 宋维宇, 李超, 孟祥君, 等. 九州-帕劳海脊南段共生多金属结核与富钴结壳地球化学特征及其资源意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42 (5): 149-157. [SONG Weiyu, LI Chao, MENG Xiangjun, et al. Geochemical characteristics and resource significance of polymetallic nodules and cobalt-rich crusts in the southern Kyushu-Palau ridge [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42 (5): 149-157.]
- [19] Kawabe M, Fujio S. Pacific ocean circulation based on observation [J]. *Journal of Oceanography*, 2010, 66 (3): 389-403.
- [20] 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.
- [21] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [M]//Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Elsevier: Oxford, 2014: 1-51.
- [22] 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.
- [23] McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101 (2): 295-303.
- [24] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48 (7): 1523-1534.
- [25] Ishizuka O, Taylor R N, Yuasa M, et al. Making and breaking an island arc: A new perspective from the Oligocene Kyushu-Palau arc, Philippine Sea [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12 (5): Q05005.
- [26] Sun J M, Zhu X K. Temporal variations in Pb isotopes and trace element concentrations within Chinese eolian deposits during the past 8 Ma: Implications for provenance change [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 290 (3-4): 438-447.
- [27] Chen B, Yang X P, Jiang Q D, et al. Geochemistry of aeolian sand in the Taklamakan Desert and Horqin Sandy Land, northern China: Implications for weathering, recycling, and provenance [J]. *CATENA*, 2022, 208: 105769.
- [28] 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.
- [29] McLennan S M, Hemming S R, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [J]. *Special Papers-Geological Society of America*, 1993, 284: 21-40.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Shao L, Li X H, Wei G J, et al. Provenance of a prominent sediment drift on the northern slope of the South China Sea [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 44 (10): 919-925.
- [33] Wei G J, Liu Y, Ma J L, et al. Nd, Sr isotopes and elemental geochemistry of surface sediments from the South China Sea: Implications for Provenance Tracing [J]. *Marine Geology*, 2012, 319-322: 21-34.
- [34] 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.
- [35] 丁雪, 胡邦琦, 徐方建, 等. 晚上新世以来菲律宾海盆XT4孔黏土矿物特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41 (1): 42-51. [DING Xue, HU Bangqi, XU Fangjian, et al. Evolution of clay minerals assemblages since Late Pliocene and its paleoenvironmental implications: Evidence from Core XT4 of the Philippine Sea Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41 (1): 42-51.]
- [36] 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): 923-931. [XU Zhaokai, LI Anchun, JIANG Fuqing, et al. Geochemical character and material source of sediments in the eastern Philippine Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53 (6): 923-931.]

- [37] 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.]
- [38] 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: Atmospheres*, 2014, 119(19): 11492-11504.
- [39] Jiang F Q, Zhu X, Li T G, et al. Increased dust deposition in the Parece Vela Basin since the mid- Pleistocene inferred from radiogenic Sr and Nd isotopes [J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 173: 83-95.
- [40] Tribouvillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update [J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1-2): 12-32.
- [41] Tribouvillard N, Algeo T J, Baudin F, et al. Analysis of marine environmental conditions based on molybdenum-uranium covariation—Applications to Mesozoic paleoceanography [J]. *Chemical Geology*, 2012, 324-325: 46-58.
- [42] Bennett W W, Canfield D E. Redox-sensitive trace metals as paleoredox proxies: A review and analysis of data from modern sediments [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 204: 103175.
- [43] Algeo T J, Li C. Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 287: 8-26.
- [44] Algeo T J, Tribouvillard N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation [J]. *Chemical Geology*, 2009, 268(3-4): 211-225.
- [45] Morford J L, Emerson S R, Breckel E J, et al. Diagenesis of oxyanions (V, U, Re, and Mo) in pore waters and sediments from a continental margin [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(21): 5021-5032.
- [46] Krishnaswami S. Authigenic transition elements in Pacific pelagic clays [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1976, 40(4): 425-434.
- [47] Piper D Z. The metal oxide fraction of pelagic sediment in the equatorial North Pacific Ocean: A source of metals in ferromanganese nodules [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(8): 2127-2145.
- [48] 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(1-3): 65-82.
- [49] 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(1-4): 111-129.
- [50] Wignall P B, Twitchett R J. Oceanic anoxia and the end permian mass extinction [J]. *Science*, 1996, 272(5265): 1155-1158.
- [51] Rimmer S M. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA) [J]. *Chemical Geology*, 2004, 206(3-4): 373-391.
- [52] Xiong Z F, Li T G, Algeo T, et al. Paleoproductivity and paleoredox conditions during late Pleistocene accumulation of laminated diatom mats in the tropical West Pacific [J]. *Chemical Geology*, 2012, 334: 77-91.
- [53] Luo M, Algeo T J, Tong H P, et al. More reducing bottom-water redox conditions during the Last Glacial Maximum in the southern Challenger Deep (Mariana Trench, western Pacific) driven by enhanced productivity [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2018, 155: 70-82.