

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018060701

西太平洋新不列颠海沟表层沉积物的地球化学特征及其物源指示

林刚¹, 陈琳莹¹, 罗敏^{1,2}, 陈多福¹

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海深渊科学技术研究中心, 上海 201306

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061

摘要: 海沟通常拥有全球最深的区域——深渊, 由于地理位置、地形地貌和气候等差异, 海沟沉积物可能有不同的物质来源。因此, 为进一步了解海沟深渊区的物质组成与来源, 选取近陆的新不列颠海沟作为研究对象, 通过分析其海底表层沉积物的地球化学特征, 追踪新不列颠海沟不同水深与区域的沉积物来源。研究发现不论位于半深海、深海, 乃至深渊区域, 新不列颠“八字型”海沟的表层沉积物主要来自于周边岛屿的火山物质, 但“八字型”海沟的西支和东支有差异, 西支主要为新不列颠岛东部 Rabaul 火山和北部火山群及所罗门群岛的火山物质, 其中在西支的最北站位新不列颠岛北部火山物质的比例最高。与西支相比, 东支还受到了更多来源于 TLTF (Tabar, Lihir, Tanga 和 Feni 火山) 火山链物质的影响, 海沟东西支物源的差异与该地区复杂的洋流密切相关。此外, 西支海沟轴部(最底端)站位更多来源于岛屿河流沉积物, 受火山物质影响相对较小。

关键词: 常量元素; 微量元素; 稀土元素; 物源示踪; 新不列颠海沟

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

The geochemical characteristics of the surface sediments in the New Britain Trench of the Western Pacific Ocean and their implications for provenance

LIN Gang¹, CHEN Linying¹, LUO Min^{1,2}, CHEN Duofu¹

1. Shanghai Engineering Research Center of Hadal Science and Technology, College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Laboratory for Marine Geology and Environment, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

Abstract: Most of the world trenches belongs to the hadal zone, the deepest part of the earth. The sources of sediments in the trenches are always different due to the difference in geographic location, topography, climate and others. In order to further understand the composition and sources of sediments in hadal trenches, the New British Trench, which is close to land, is chosen as the research object of this paper. By analyzing the geochemical characteristics of the bottom sediments of the trench, we studied the sources of sediments in different depths and regions of the trench. It is found that the bottom sediments of the New Britain Trench shaped like a reversed V are mainly derived from the surrounding volcanogenic materials, no matter they are located in the bathyal zone, abyssal zone, or even hadal zone. However, the materials in the western part of the reversed V shaped trench are rather different from those in its east. The western part of the New British Trench is mainly affected by volcanogenic materials from the Rabaul Volcano in the east of the New Britain Island, the northern part volcanoes of the New Britain Island, and the Solomon Islands, and the proportion of volcanogenic materials is the highest in the northeast stations from the northern part volcanoes of the New Britain Island. Compared to the western part, the eastern part of the New British Trench is more strongly affected by the TLTF volcanic chain (volcanoes Tabar-Lihir-Tanga-Feni). It is believed that the different sources of the New British Trench are related to the complex ocean currents between the western part and the eastern part of the trench. Furthermore, the bottom (the deepest) of the western part of the trench is dom-

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目“近陆深渊区海底沉积有机质源汇研究——以新不列颠海沟为例”(41703077); 青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金项目“马里亚纳海沟和新不列颠海沟有机质来源、降解和堆积对比研究”(QNL2016ORP0208); 中科院战略性先导科技专项(B类)“板块俯冲、构造活动与海斗深渊的地质特征-课题1 深渊蛇纹岩化和海底流体活动研究”(XDB06030102)

作者简介: 林刚(1994—), 男, 硕士生, 主要从事海洋沉积地球化学研究, E-mail: lin_gang@126.com

通讯作者: 陈多福(1962—), 男, 研究员, 主要从事海洋沉积地球化学研究, E-mail: dfchen@shou.edu.cn

收稿日期: 2018-06-07; **改回日期:** 2018-07-22. 文凤英编辑

inated by river sediments but less influenced by volcanogenic materials.

Key words: New Britain Trench; major elements; trace elements; rare earth elements; sediment provenances

海沟通常形成于构造俯冲带,拥有世界上最深、独特和孤立的狭长区域。水深超过 6000m 的海沟区被称为“深渊”,尽管其总面积仅占全球海底面积的 1%~2%,但其垂直深度构成了大洋深度范围的 45%左右^[1,2]。除了洋中脊以外,深渊海沟也是地球内部与表层连通的一个窗口,通过它可以获得地球表层与深部物质及能量交换等方面的信息^[3],海沟底部的沉积物可能记录了这些信息。因此,认识海沟沉积物的特征对于理解海沟区域能量与物质交换有着重要作用^[4]。然而,目前对海沟沉积物的研究多集中于沉积物与构造关系的研究^[5-6],对海沟内沉积环境和特征等方面研究较少。但要了解海沟沉积环境和特征,就必须研究深渊海沟的沉积物来源,如此才能正确地解释其中所蕴含的信息。

目前,国内外对于深渊海沟沉积物的研究多集中于远离陆地岛屿且位于大洋内部的马里亚纳海沟^[7-9],对其他深渊海沟研究较少。新不列颠海沟位于西太平洋赤道偏南的所罗门海域,地处于西太平洋暖池区。西太平洋暖池平均表层水温常年在 28℃ 以上,吸收太阳辐射最多、表层水温最高、季风环流最活跃,是全球海气交换最强烈的地区。同时新不列颠海沟因其位于赤道和亚洲、大洋洲以及太平洋交界地区,是西太平洋暖池区的核心区域,对周围地区乃至整个全球气候变化都有重要作用^[10-11]。因此,新不列颠海沟沉积物可能也蕴含了丰富的西太平洋暖池季风与环境演变的信息。

深海沉积物的来源通常较为复杂,主要有陆源物质、生源物质、火山灰以及自生氧化物和黏土等^[12,13]。有学者从地球化学、矿物学等角度探讨这一片海区的物质来源和组成及其对气候和环境的响应,发现除个别地区以海相自生沉积为主外,大部分地区都不同程度地受到了火山物质的影响^[14-16]。然而,此前的研究对这些火山物质并没有进行详细的物源示踪,而且研究区域也主要位于近岸与海盆区,或海台周边,而对该地区众多狭长的海沟研究十分缺乏。

研究海洋沉积物中元素地球化学,对揭示海洋沉积物来源、形成条件、物源区特征和气候变化等具有重要意义^[17-19]。因此,本文对新不列颠海沟表层沉积物进行了常量、微量和稀土元素分析,研究它们在海沟不同深度和区域的分布特征,探讨其主要来源和可能蕴含的环境信息。

1 区域地质背景

新不列颠海沟位于西太平洋赤道偏南的所罗门海北部,由呈“八”字型的两个狭长海沟组成,西支为东北—西南走向,东支为东南—西北走向,全长约 840km(图 1),是由于所罗门板块向南俾斯麦板块和太平洋板块俯冲而形成^[20]。海沟北部紧邻新不列颠岛,北偏东有新爱尔兰岛,东部紧邻布干维尔岛,东南部为所罗门群岛,西部为周边最大的岛屿——新几内亚岛。除了上述岛屿,附近还有许多较小的岛屿(图 1)。

新不列颠海沟位于多个板块交界处,周围海底地形较为复杂。在始新世太平洋板块向印度—澳大利亚板块俯冲^[21],随后开始形成所罗门海^[22,23],同时新不列颠岛、新爱尔兰岛和所罗门群岛等岛屿火山活动开始发育,于渐新世形成连续的岛弧^[24],至今很多火山仍非常活跃。这些岛屿的岩石组合主要以中—基性火成岩和第四纪沉积为主,同时还伴有中—基性侵入岩和变质岩^[25]。

新不列颠海沟所在的所罗门海域及其周边地区,每年 11 月到次年 4 月盛行西风或西北季风,而 5—10 月吹东南风^[26-28](图 1)。相对于季风,该地区的洋流格局则较为复杂,主要的洋流为南赤道流(SEC),且由于受地形的影响,可分为表层洋流和次表层洋流^[29-33](图 1)。表层洋流受季风变化的影响较大,11 月至次年 4 月为东南向流动,5—10 月为西北向流动,如新几内亚沿岸流(NGCC)^[32]。次表层洋流受外部影响则较小,由 SEC 分为大堡礁潜流(GBRUC)、新几内亚沿岸潜流(NGCUC)、新西兰沿岸潜流(NICUC)、圣乔治潜流(SGUC)等次表层洋流,整体上由南往北流动。除了这些主要的洋流外,所罗门海域还存在从西太平洋向南或向西南流入所罗门海北部的洋流^[34]。

2 材料与方法

本文研究的沉积物样品分别通过 2016 年和 2017 年两个“张謇号”科考航次,利用深渊着陆器、箱式取样器和重力柱取样器获得,取其中的表层沉积物(0~5cm)作为研究对象,共 31 个样品(表 1)。

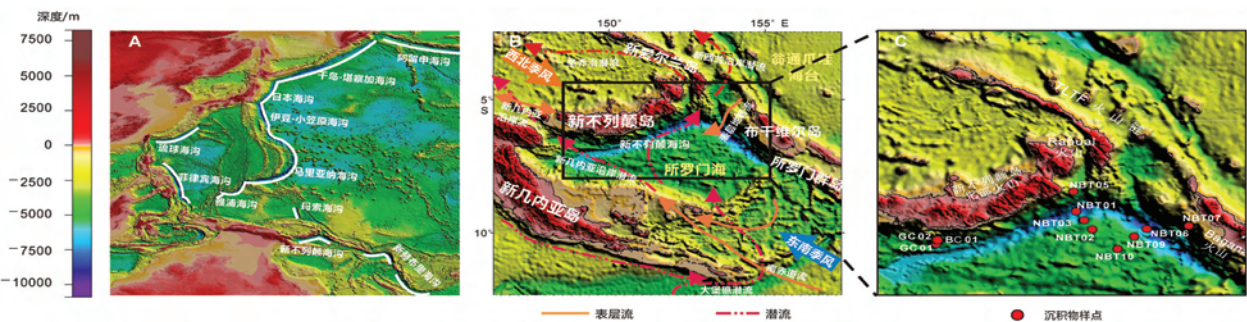


图 1 新不列颠海沟表层沉积物站位位置及其附近区域自然环境背景

A.西太平洋深渊海沟分布;B.新不列颠海沟环境背景;C.表层沉积物站位位置

Fig.1 Environmental setting and location of study sites in the New Britain Trench and adjacent area

A.The distribution of Hadal Trench in the west Pacific Ocean;

B. Environmental setting in the New Britain Trench; C. The location of surface sediments sampling sites

表 1 新不列颠海沟表层沉积物站位信息

Table 1 Locations of surface sediment samples in the New Britain Trench

站位	经度	纬度	水深/m	位置	时间
GC01	149°45.53'E	6°40.84'S	4524	西支岛坡	2016
GC02	149°45.46'E	6°36.89'S	3908	西支岛坡	2016
BC01	149°45.48'E	6°36.83'S	3900	西支岛坡	2016
NBT01	152°24.67'E	5°53.08'S	8225	西支海沟轴部	2017
NBT02	152°43.01'E	6°19.99'S	4675	西支洋坡	2017
NBT03	152°33.89'E	6°06.10'S	5925	西支洋坡	2017
NBT05	152°21.17'E	5°24.06'S	3826	西支岛坡	2017
NBT06	153°44.79'E	6°19.21'S	8931	东支海沟轴部	2017
NBT07	154°32.29'E	6°14.49'S	1553	东支岛坡	2017
NBT09	153°30.15'E	6°30.17'S	5653	东支洋坡	2017
NBT10	153°11.54'E	6°48.40'S	4639	东支洋坡	2017

采集的沉积物样品在冷冻干燥后,用玛瑙研钵研磨均匀至 200 目以下,在中国科学院地球化学研究所进行常量、微量和稀土元素分析。取 50mg 研磨后的粉末状沉积物样品放入特氟龙杯中,加入提纯 0.8mL 的 HNO₃、0.1mL 的 HCl 和 0.2mL 的 HF,密封后加热至 180℃,溶样 12h 以上,之后在电热板上蒸酸至近干。添加 1mL 内标浓度为 500×10⁻⁹的 Rh 和 2mL 的 HNO₃ 与 3mL 的去离子水到特氟龙杯中,密封后加热至 140℃回溶 5h 以上。最后取 100μL 溶解液体添加 1.8mL 去离子水稀释后上机测试。常量元素在最后的稀释步骤前,还需添加 1mL 内标浓度为 600×10⁻⁹的 Cd,然后取 200μL 的样品添加去离子水稀释至 1.7mL 后上机测试。微量、稀土元素的测试采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,仪器型号:Perkin-Elmer

ELAN 6000),常量元素测试采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES,仪器型号:Varian Vista Pro),测试前对空白样、重复样和若干标准样(GSR-1、OU-6、1633-a、GXR-2、GXR-5)进行分析,以控制样品的测试精度和准确度,常量元素含量的相对标准偏差<3%,微量、稀土元素含量的相对标准偏差<10%。稀土元素的铈异常 $\delta Ce = Ce_N / [(La_N + Pr_N) / 2]$,铈异常 $\delta Eu = Eu_N / [(Sm_N + Gd_N) / 2]$,其中 N 表示球粒陨石标准化,标准化值据文献[35]。

本文将使用多元统计软件 SPSS 对新不列颠海沟的表层沉积物的地球化学元素进行因子分析和相关性分析。其中因子分析以主成分分析的方法采用 Kaiser 标准化方差极大旋转法(Varimax),求得影响其地球化学元素的主要因素。

3 结果

3.1 常量元素

新不列颠海沟表层沉积物常量元素(表 2)与上地壳(UCC)相比,MgO、TiO₂、MnO 和 Fe₂O₃ 在所有的样品中均较为富集,其中位于海沟轴部的 NBT01 表层沉积物 MgO 强烈富集,而 K₂O 则在所有样品中均为亏损(图 2)。其他常量元素 Na₂O、Al₂O₃、P₂O₅ 和 CaO 接近于上地壳值^[36-37](图 2)。

新不列颠海沟表层沉积物微量元素含量的平均值大部分高于洋中脊玄武岩(MORB)^[50](表 3 和图 3)。其中大离子亲石元素相对于 MORB 均显示为明显的富集,而高场强元素则各有差异,与 NBT05 站位的海底表层沉积物相比 MORB 呈轻微亏损,其他站位的 Ta、Nb、Zr 和 Hf 相对 MORB 略富集或与之大体相似,而 Y 和 Yb 则略微亏损。此外,海沟轴部站位 NBT01 样品相比其他站位,Ba 富集程度较小,而 Th 则更为富集。整体而言,新不列颠海沟不同水深表层沉积物的微量元素特征基本相似,而个别站位则有所不同。

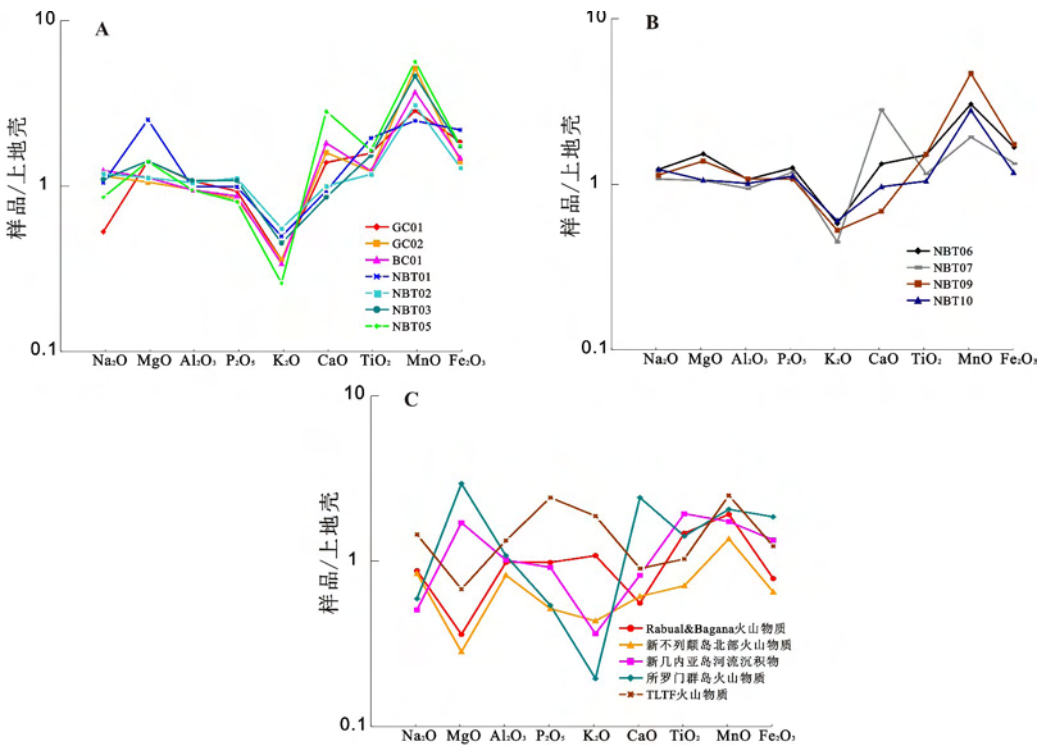


图 2 新不列颠海沟西支(A)和东支(B)表层沉积物及周边岛屿的常量元素分布图(C)^[38-49]

Fig.2 Major element distribution patterns of surface sediments in the western part (A) and the eastern part (B) of the New Britain Trench and their possible sources (C)

表 2 新不列颠海沟各区域的表层沉积物主量元素值

Table 2 The major element contents for surface sediments in the New Britain Trench									%
样品编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
GC01-1	2.26	3.08	16.47	0.21	1.20	4.77	0.78	0.24	8.27
GC01-3	1.84	3.16	16.24	0.16	1.23	6.87	0.80	0.15	8.57
GC02-1	4.04	2.29	14.54	0.17	1.20	6.78	0.62	0.37	6.43
GC02-3	4.91	2.36	14.45	0.16	1.23	6.62	0.60	0.35	6.39
BC01-1	5.13	2.53	14.18	0.17	1.15	7.56	0.62	0.26	6.84
BC01-2	4.95	2.48	14.38	0.18	1.14	7.74	0.62	0.24	6.69
BC01-5	4.48	2.38	14.47	0.17	1.16	7.61	0.62	0.28	6.67
NBT01-1	4.17	5.68	15.17	0.20	1.73	3.92	0.98	0.21	10.06

续表 2

样品编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
NBT01-2	4.34	5.68	15.10	0.20	1.70	3.44	0.98	0.16	10.02
NBT01-3	3.71	5.33	15.09	0.20	1.61	4.37	0.98	0.15	9.59
NBT02-1	4.93	2.40	15.78	0.22	1.95	4.20	0.57	0.21	5.64
NBT02-2	4.61	2.46	15.88	0.22	1.88	4.17	0.59	0.21	5.92
NBT02-3	4.37	2.58	15.95	0.23	1.81	4.17	0.61	0.23	6.13
NBT03-1	4.54	3.16	16.33	0.22	1.53	3.64	0.76	0.31	7.88
NBT03-2	4.25	3.16	16.27	0.22	1.54	3.61	0.77	0.33	7.95
NBT03-3	3.99	3.08	16.57	0.21	1.55	3.49	0.78	0.33	7.88
NBT05-1	3.58	2.93	13.35	0.15	0.82	13.45	0.77	0.23	7.44
NBT05-2	3.19	3.11	14.11	0.16	0.88	11.90	0.83	0.36	7.90
NBT05-3	3.22	3.27	15.68	0.17	0.92	10.25	0.87	0.61	8.67
NBT06-1	4.72	3.30	16.06	0.26	1.95	5.98	0.73	0.21	7.34
NBT06-2	4.79	3.31	16.34	0.25	1.99	5.86	0.76	0.22	7.27
NBT06-3	4.81	3.49	16.48	0.25	1.95	4.80	0.77	0.21	7.74
NBT07-1	4.07	2.46	14.62	0.24	1.47	11.79	0.62	0.14	6.62
NBT07-2	4.55	2.31	14.38	0.23	1.56	11.85	0.56	0.14	5.68
NBT07-3	3.96	2.19	14.15	0.24	1.54	11.92	0.54	0.13	5.57
NBT09-1	4.69	3.09	16.31	0.23	1.81	2.78	0.76	0.36	7.68
NBT09-2	4.39	3.06	16.23	0.23	1.81	2.81	0.77	0.27	7.78
NBT09-3	4.21	2.98	16.50	0.20	1.74	3.01	0.74	0.35	7.81
NBT10-1	4.93	2.43	15.62	0.24	2.04	4.36	0.53	0.20	5.48
NBT10-2	4.92	2.33	15.76	0.23	2.13	3.96	0.53	0.21	5.47
NBT10-3	4.53	2.23	14.89	0.20	1.95	3.83	0.50	0.18	4.88

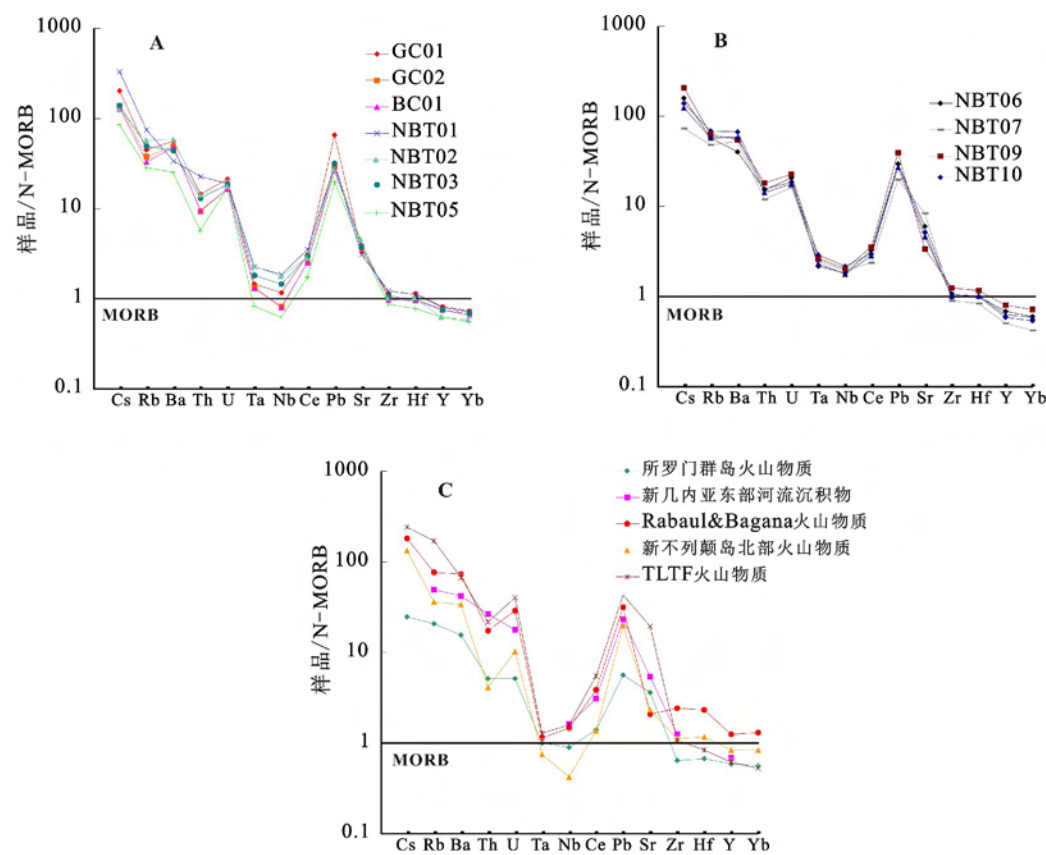


图 3 新不列颠海沟西支(A)和东支(B)表层沉积物微量元素蛛网图及其潜在物质来源(C)^[26-28,40-49,51-53]
Fig.3 Trace elemental spider diagram of surface sediments in the western part (A) and the eastern part (B) of the New Britain Trench and their possible sources (C)

表 3 新不列颠海沟各区域的表层沉积物微量元素值

Table 3 The trace element contents for surface sediments in the New Britain Trench												10 ⁻⁶	
编号	Cs	Rb	Ba	Th	U	Ta	Nb	Pb	Sr	Zr	Hf	Y	Sc
GC01-1	1.35	25.1	333	1.60	0.96	0.19	2.56	26.0	277	81.0	2.25	22.0	22.5
GC01-3	1.51	25.9	377	1.86	1.06	0.20	2.92	13.3	327	88.5	2.43	24.1	25.1
GC02-1	1.01	21.9	313	1.14	0.80	0.14	1.98	8.97	346	79.1	2.10	21.3	21.3
GC02-3	0.95	20.6	308	1.10	0.78	0.21	1.83	8.28	335	75.1	2.00	20.6	19.5
BC01-1	0.96	18.7	309	1.12	0.80	0.26	1.93	8.20	357	72.5	1.98	20.6	21.5
BC01-2	0.90	18.2	298	1.12	0.78	0.12	1.77	8.06	359	71.2	1.91	20.7	19.8
BC01-5	0.90	18.5	309	1.17	0.76	0.13	1.90	7.58	359	71.6	1.98	21.0	20.8
NBT01-1	2.21	39.6	197	2.61	0.87	0.28	4.01	8.85	258	85.4	2.22	21.2	26.3
NBT01-2	2.63	47.4	241	3.06	0.93	0.34	5.02	10.1	301	98.9	2.57	25.4	28.4
NBT01-3	2.04	38.5	197	2.45	0.89	0.28	4.06	8.10	267	83.9	2.10	21.4	25.8
NBT02-1	0.83	32.9	371	1.71	0.84	0.32	4.28	7.83	438	76.5	2.05	16.6	14.6
NBT02-2	0.83	30.4	366	1.73	0.84	0.30	4.00	8.12	420	73.4	2.04	17.9	14.3
NBT02-3	0.94	32.5	377	1.72	0.86	0.30	4.16	8.61	399	79.2	2.14	17.9	15.7
NBT03-1	0.95	27.5	272	1.57	0.84	0.24	3.33	9.49	337	77.6	2.02	20.2	21.1
NBT03-2	0.90	25.5	266	1.51	0.88	0.23	3.11	9.55	327	74.2	2.02	20.9	20.4
NBT03-3	1.10	29.0	297	1.61	0.91	0.26	3.70	9.59	347	83.5	2.06	21.6	21.5
NBT05-1	0.60	15.2	156	0.63	0.86	0.10	1.39	6.06	355	62.3	1.52	16.8	25.7
NBT05-2	0.56	15.1	154	0.66	0.78	0.10	1.40	5.58	340	65.5	1.68	17.9	25.7
NBT05-3	0.59	16.3	162	0.74	0.74	0.12	1.57	5.91	305	67.0	1.63	17.9	26.6
NBT06-1	1.03	31.6	257	1.79	0.92	0.28	4.13	9.09	554	79.5	2.00	19.0	18.9
NBT06-2	1.12	32.6	260	1.88	1.01	0.30	4.44	9.21	554	81.5	2.04	18.7	17.7
NBT06-3	1.16	31.7	248	1.85	1.01	0.29	4.10	8.61	508	78.7	2.12	19.5	19.1
NBT07-1	0.54	28.2	335	1.48	0.79	0.34	4.60	6.27	746	67.9	1.84	13.9	12.6
NBT07-2	0.54	27.3	343	1.44	0.78	0.33	4.50	5.97	762	68.2	1.71	13.7	11.7
NBT07-3	0.48	25.6	318	1.34	0.72	0.30	4.59	5.73	749	63.2	1.59	14.2	14.6
NBT09-1	1.41	34.3	341	2.07	1.01	0.34	4.64	11.1	297	93.7	2.37	21.2	20.0
NBT09-2	1.49	36.8	343	2.24	1.09	0.37	4.97	12.0	307	91.3	2.38	22.4	23.1
NBT09-3	1.43	34.7	347	2.22	1.08	0.34	4.58	12.3	304	89.9	2.40	23.1	22.3
NBT10-1	0.98	38.3	418	1.83	0.84	0.38	4.99	9.12	487	74.2	2.09	16.5	13.5
NBT10-2	1.00	40.1	432	1.95	0.89	0.40	5.25	9.10	456	76.0	2.09	16.5	14.1
NBT10-3	0.94	36.8	414	1.84	0.86	0.36	4.94	8.26	460	66.4	1.94	15.9	13.0

新不列颠海沟表层沉积物稀土元素总量 (ΣREE) 较低 (表 4), 其范围为 $(39.7 \sim 84.5) \times 10^{-6}$ (平均 61.1×10^{-6}), 样品的轻重稀土比值 ($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$) 为 $3.0 \sim 5.3$ (平均 4.3), 球粒陨石 REE 标准化值的 δCe 为 $0.91 \sim 1.04$ (平均 0.98), δEu 为 $0.84 \sim 1$ (平均 0.92)。新不列颠海沟表层沉积物稀土元素配分模式基本一致, 呈现出轻稀土富集, 重稀土分异程度较低, Ce 和 Eu 无明显异

常或微弱的负异常 (图 4)。整体相似的稀土配分模式可能显示出较为相似的来源, 但海沟中不同区域或不同水深的沉积物来源具有一定的细微差异, 如位于海沟东南部的站位 NBT02、NBT07 和 NBT10 相对其他站位重稀土相对更亏损一些, 而位于海沟中部偏北的岛坡站位 NBT05 相对其他站位轻稀土富集程度相对较小。

表 4 新不列颠海沟各区域的表层沉积物稀土元素平均值($\times 10^{-6}$)及相关参数
Table 4 The average rare earth element contents and related parameters for surface sediments in the different areas of the New Britain Trench ($\times 10^{-6}$)

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	LREE/HREE	δCe^*	δEu^*	TOC/%
GC01-1	10.20	22.37	2.77	12.28	3.15	0.95	3.40	0.53	3.71	0.79	2.18	0.31	2.19	0.35	65.18	3.84	1.00	0.88	0.54
GC01-3	11.29	24.28	2.97	13.47	3.35	0.98	3.63	0.57	3.92	0.85	2.42	0.33	2.28	0.35	70.70	3.92	0.99	0.86	0.52
GC02-1	9.13	19.48	2.48	11.52	2.81	0.89	3.12	0.54	3.30	0.78	2.05	0.32	2.09	0.34	58.82	3.70	0.97	0.91	0.40
GC02-3	8.80	18.81	2.40	11.04	2.82	0.84	3.16	0.51	3.28	0.75	2.10	0.29	2.09	0.31	57.20	3.58	0.97	0.86	
BC01-1	8.58	19.15	2.37	11.34	2.90	0.83	3.13	0.53	3.36	0.71	1.94	0.28	2.05	0.32	57.50	3.67	1.01	0.84	
BC01-2	9.04	18.59	2.36	11.10	2.94	0.90	3.22	0.52	3.25	0.74	2.04	0.29	2.00	0.32	57.32	3.63	0.95	0.89	
BC01-5	8.96	18.89	2.42	11.17	2.93	0.88	3.08	0.53	3.43	0.72	2.07	0.30	1.99	0.30	57.66	3.64	0.96	0.88	
NBT01-1	11.08	24.80	3.04	13.10	3.52	1.06	3.51	0.57	3.49	0.76	2.09	0.30	2.05	0.31	69.68	4.33	1.01	0.91	0.98
NBT01-2	13.37	29.91	3.62	16.42	4.20	1.22	4.24	0.69	4.36	0.93	2.35	0.36	2.42	0.35	84.45	4.38	1.02	0.88	0.87
NBT01-3	10.76	24.83	2.99	13.42	3.38	1.03	3.76	0.55	3.58	0.75	2.04	0.29	2.04	0.30	69.73	4.24	1.04	0.88	
NBT02-1	10.91	21.20	2.49	10.70	2.41	0.78	2.46	0.41	2.69	0.57	1.71	0.23	1.73	0.25	58.55	4.82	0.94	0.97	0.34
NBT02-2	11.25	21.90	2.55	11.15	2.62	0.86	2.78	0.44	2.78	0.61	1.73	0.26	1.75	0.26	60.95	4.74	0.95	0.97	
NBT02-3	11.14	21.09	2.57	11.07	2.59	0.83	2.63	0.47	2.86	0.61	1.78	0.25	1.87	0.27	60.03	4.58	0.92	0.96	0.38
NBT03-1	10.04	21.67	2.56	11.34	2.81	0.91	3.06	0.51	3.31	0.71	2.07	0.28	2.00	0.31	61.59	4.03	1.00	0.95	0.54
NBT03-2	10.09	21.91	2.61	11.56	3.00	0.93	3.24	0.52	3.51	0.73	2.14	0.29	2.06	0.32	62.91	3.91	1.00	0.90	
NBT03-3	10.82	23.07	2.78	12.10	3.14	0.92	3.47	0.55	3.59	0.78	2.15	0.30	2.19	0.32	66.18	3.95	0.99	0.85	0.44
NBT05-1	5.67	12.33	1.66	7.45	2.13	0.71	2.34	0.41	2.67	0.58	1.82	0.23	1.62	0.25	39.67	3.08	0.96	0.96	1.25
NBT05-2	5.77	12.98	1.69	8.16	2.21	0.75	2.64	0.44	2.94	0.62	1.75	0.26	1.75	0.27	42.22	2.96	0.99	0.95	
NBT05-3	5.88	13.75	1.73	8.16	2.36	0.76	2.67	0.47	2.89	0.61	1.76	0.26	1.78	0.26	43.33	3.05	1.03	0.93	1.00
NBT06-1	11.75	24.34	2.96	12.78	2.98	1.02	3.22	0.52	3.14	0.66	1.88	0.27	1.77	0.28	67.56	4.75	0.97	1.00	0.57
NBT06-2	11.30	24.66	2.91	12.37	3.06	1.01	3.17	0.51	3.23	0.66	1.89	0.27	1.81	0.28	67.14	4.67	1.01	0.99	
NBT06-3	11.28	24.55	2.98	12.95	3.04	0.99	3.28	0.51	3.18	0.68	1.94	0.28	1.87	0.28	67.82	4.64	1.00	0.95	0.59
NBT07-1	9.26	17.96	2.12	8.50	2.12	0.67	2.09	0.34	2.17	0.45	1.27	0.18	1.33	0.19	48.65	5.07	0.94	0.96	
NBT07-2	9.43	17.76	2.08	8.69	2.10	0.66	2.12	0.33	2.11	0.44	1.29	0.19	1.21	0.21	48.63	5.15	0.93	0.95	
NBT07-3	9.45	18.15	2.16	8.76	2.08	0.69	2.24	0.34	2.09	0.46	1.32	0.19	1.32	0.20	49.46	5.06	0.93	0.97	0.34
NBT09-1	11.79	25.26	2.97	12.35	2.98	0.94	3.25	0.54	3.44	0.71	2.11	0.29	2.04	0.32	68.99	4.43	1.00	0.92	
NBT09-2	12.54	27.16	3.19	13.34	3.29	0.98	3.53	0.58	3.70	0.77	2.30	0.33	2.27	0.34	74.32	4.38	1.01	0.87	
NBT09-3	13.03	27.07	3.21	14.03	3.35	1.01	3.67	0.59	3.86	0.81	2.26	0.35	2.26	0.33	75.83	4.36	0.98	0.88	
NBT10-1	11.84	22.32	2.59	10.82	2.55	0.80	2.68	0.41	2.63	0.55	1.56	0.22	1.64	0.24	60.84	5.13	0.93	0.93	0.33
NBT10-2	11.94	23.03	2.66	10.82	2.49	0.75	2.72	0.42	2.65	0.54	1.59	0.24	1.68	0.25	61.81	5.12	0.94	0.88	
NBT10-3	11.47	21.23	2.56	10.59	2.39	0.77	2.41	0.39	2.50	0.52	1.46	0.22	1.60	0.23	58.34	5.26	0.91	0.96	

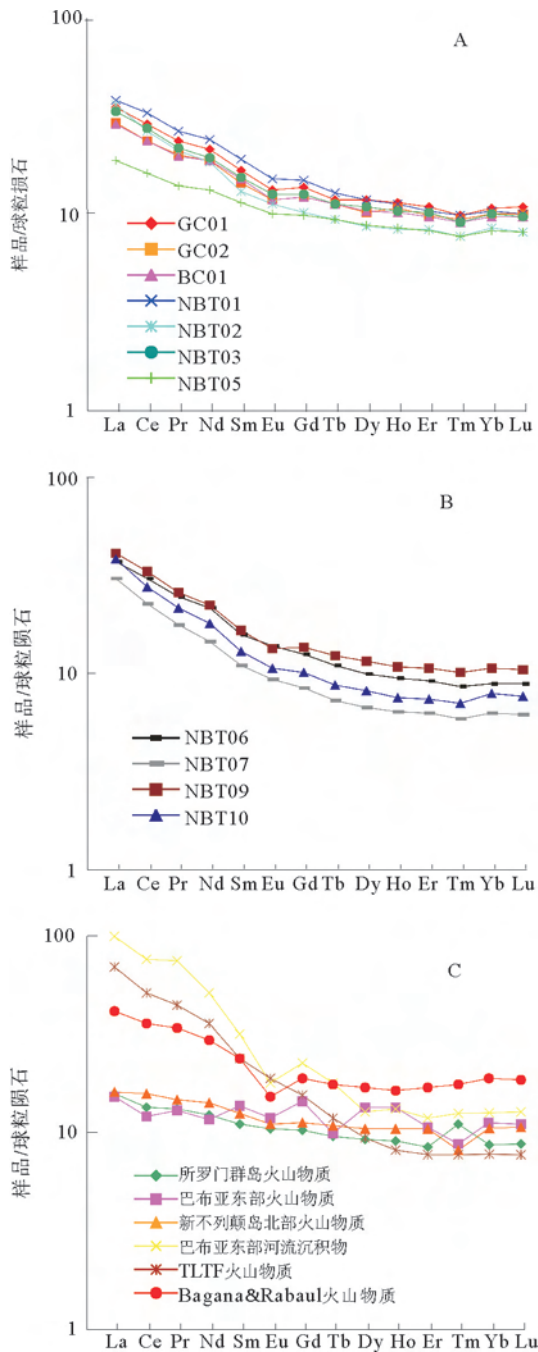


图 4 新不列颠海沟西支(A)和东支(B)表层沉积物球粒陨石标准化 REE 的配分模式及其潜在物质来源(C) [26-28,40-49,51-55]

Fig.4 Chondrite-normalized REE distribution patterns for surface sediments in the western part (A) and the eastern part (B) of the New Britain Trench and their possible sources (C)

4 讨论

4.1 沉积物地球化学元素组合特征和控制因素

海洋沉积物在搬运和沉积过程中,通常会受到

各种物理、化学作用的影响,从而也将影响到元素的特征^[17]。对新不列颠海沟表层沉积物的元素进行了因子分析和相关性分析(表 5),发现主要受 3 个因子影响。

F1 因子的方差贡献为 43.4%,其主要元素组合为 Hf、Zr、Y、REE 和 CaO,除了 CaO 为负载荷外,其余均为正载荷。深海沉积物 Ca 常与生源 CaCO_3 有关,但由于本文研究站位大部分位于碳酸盐补偿深度附近或之下,所以钙质含量较低。同时 CaO 与 REE 呈现明显的负相关,而且亲生物元素的 Ca 与 Sr 均为较高的负载荷,说明研究样品的 REE 富集与生源 Ca 无关。与 REE 同为正载荷的几个主要元素(Hf、Zr 和 Y)均为高场强元素,而高场强元素与稀土元素化学性质稳定,溶解度也较低,在岩石风化、剥蚀、搬运、沉积以及成岩作用过程中变化极小,主要受源区母岩的控制^[56]。因此,F1 因子主要反映沉积物的 REE 与母岩特征,而非生源 CaCO_3 。

F2 因子方差贡献为 27.62%,其主要元素组合为 P_2O_5 、Nb、 K_2O 和 Ta,均为正载荷。Nb 和 Ta 在岛弧岩浆岩中,常常呈现出相对亏损,而新不列颠海沟附近遍布岛弧,并且火山活动活跃,说明 Nb 和 Ta 元素可能与周围岛弧火山物质有关。Nb 和 Ta 为高场强元素,主要富集在岩浆岩的副矿物中,而 P_2O_5 和 K_2O 与 Nb、Ta 同为 F2 因子的主要元素,同时它们之间的相关性也很高,表明 F2 因子很可能反映周围岛屿火山物质副矿物特征。

F3 因子的方差贡献为 10.23%,其主要元素组合为 TiO_2 、 MgO 、 Fe_2O_3 与 Ba,其中 Ba 为负载荷,其余皆为正载荷。 TiO_2 、 MgO 、 Fe_2O_3 通常赋存于表生环境下地球化学性质较为稳定的碎屑物中,因此 F3 因子可能是反映附近岛屿的碎屑物。

虽然沉积物中高场强元素与稀土元素的化学性质稳定,其变化主要受源区母岩特征控制^[56],但也有研究发现这些不活泼元素可能会受化学风化影响,可以改变其母岩的信息^[57,58]。Ti 常被作为惰性元素,通过 Ti 标准化可以示踪化学风化和搬运过程中元素变化,以及海洋自身组分对元素的稀释作用^[59,60]。本文所研究的新不列颠海沟表层沉积物的 Th/Ti 、 Sc/Ti 、 Hf/Ti 和 $\sum \text{REE}/\text{Ti}$ 比值与水深间没有明显的相关性,说明这些元素并没有受到化学风化和海流搬运以及海洋自身组分的影响,其可以反映母岩的信息。

此外,在海洋环境中,有机质在吸附海水中的 REE 中也起着重要作用^[61,62],但本文样品的 REE

含量与有机质的关系图显示两者间几乎不存在着相关性(图 5)。因此,表层沉积物的元素特征可以作

为良好的物源示踪指标。

表 5 新不列颠海沟表层沉积物地球化学元素因子分析与相关性分析

Table 5 The results factor and correlation analysis for surface sediments from the New Britain Trench

元素	F1	F2	F3		P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Ta	Nb	Sr	ΣREE
Na ₂ O	0.044	0.382	-0.302	Na ₂ O	0.41	0.53	-0.27	0.46	0.34	0.26	0.10
MgO	0.384	0.121	0.885	MgO	-0.05	0.08	-0.29	0.04	0.15	-0.42	0.53
Al ₂ O ₃	0.467	0.525	0.015	Al ₂ O ₃	0.51	0.55	-0.74	0.38	0.44	-0.22	0.64
P ₂ O ₅	-0.119	0.936	-0.111	P ₂ O ₅	1.00	0.82	-0.32	0.74	0.80	0.59	0.29
K ₂ O	0.274	0.911	-0.170	K ₂ O	0.82	1.00	-0.65	0.88	0.90	0.28	0.55
CaO	-0.822	-0.407	0.071	CaO	-0.32	-0.65	1.00	-0.49	-0.48	0.48	-0.83
TiO ₂	0.304	-0.098	0.921	TiO ₂	-0.21	-0.20	-0.16	-0.24	-0.12	-0.55	0.39
MnO	0.043	-0.449	0.095	MnO	-0.42	-0.42	-0.02	-0.48	-0.52	-0.50	-0.20
Fe ₂ O ₃	0.379	-0.155	0.871	Fe ₂ O ₃	-0.26	-0.24	-0.18	-0.26	-0.16	-0.58	0.44
Cs	0.783	0.159	0.521	Cs	-0.02	0.27	-0.60	0.26	0.31	-0.53	0.84
Rb	0.500	0.778	0.136	Rb	0.59	0.85	-0.68	0.84	0.89	0.02	0.73
Ba	0.265	0.357	-0.847	Ba	0.36	0.51	-0.37	0.59	0.50	0.27	0.21
Th	0.653	0.637	0.284	Th	0.45	0.71	-0.71	0.70	0.77	-0.14	0.87
U	0.607	0.387	0.141	U	0.27	0.43	-0.59	0.37	0.42	-0.29	0.75
Ta	0.222	0.870	-0.208	Ta	0.74	0.88	-0.49	1.00	0.95	0.37	0.47
Nb	0.190	0.932	-0.072	Nb	0.80	0.90	-0.48	0.95	1.00	0.40	0.51
Pb	0.539	-0.003	-0.100	Pb	0.06	0.04	-0.45	0.04	0.05	-0.38	0.50
Sr	-0.688	0.500	-0.280	Sr	0.59	0.28	0.48	0.37	0.40	1.00	-0.37
Zr	0.852	0.276	0.279	Zr	0.15	0.38	-0.72	0.35	0.40	-0.47	0.92
Hf	0.926	0.253	0.042	Hf	0.14	0.43	-0.80	0.40	0.41	-0.47	0.93
Y	0.840	-0.296	0.320	Y	-0.35	-0.14	-0.54	-0.20	-0.18	-0.78	0.73
ΣREE	0.861	0.402	0.184	ΣREE	0.29	0.55	-0.83	0.47	0.51	-0.37	1.00
方差贡献	43.4	27.62	10.23								
累积方差贡献	43.4	71.02	81.25								

4.2 沉积物的物源分区及其指示意义

新不列颠海沟表层沉积物 REE 总量(表 4)与周围岛屿火山物质的值接近($< 100 \times 10^{-6}$)^[40-49,51-54],与周围的岛屿河流第四纪沉积物的值(180.4×10^{-6})差别较大^[55],球粒陨石 REE 标准化配分模式呈现出轻稀土富集,重稀土相对亏损,与周围岛屿的火山物质的配分模式非常相似,而与附近岛屿河流第四纪沉积物不同(图 4),表明表层沉积物可能主要来源于周围岛屿的火山物质。

此外,由于元素分异作用使稀土元素 Eu 在上地壳缺失,在下地壳富集,所以来自上地壳或酸性岩的沉积物中均呈现 Eu 元素的负异常,而来自下地

壳基性岩的沉积物 Eu 元素则呈现正异常,来自中性岩的沉积物 Eu 元素则没有异常的特性^[63]。同时,河流沉积物在河流搬运的过程中可以充分混合,使其稀土元素配分模式与上地壳的平均值很相似。新不列颠海沟表层沉积物的稀土配分模式显示 Eu 元素无明显异常或微弱负异常,表明该海沟的沉积物可能来源于中性岩和河流沉积物或酸性岩(图 4 和表 4)。新不列颠海沟附近岛屿的地质背景显示,这些岛屿多为中—基性喷出岩和第四纪沉积,而没有酸性岩^[25],说明新不列颠海沟表层沉积物可能来自于周边岛屿的中性火山物质与河流第四纪沉积物质的混合物,但火山物质影响可能相对较强。

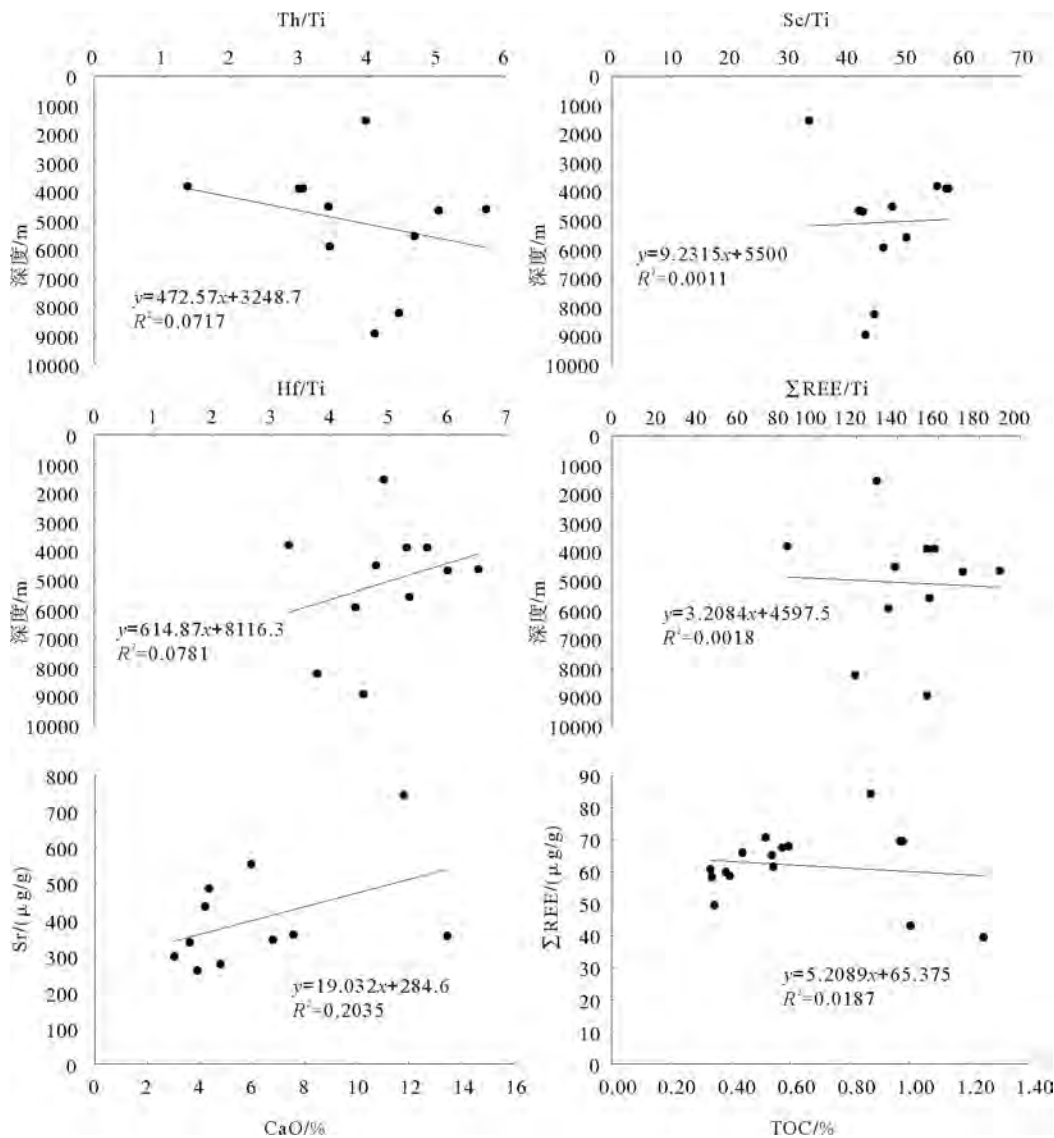


图 5 新不列颠海沟表层沉积物元素比值与深度及稀土元素与有机质关系图

Fig.5 Relationship between element ratios and water depth, Σ REE and organic matter of surface sediments in the New Britain Trench

在 Hf-La/Th 相关图上^[64],可以发现新不列颠海沟的表层沉积物大部分样品都位于中性物源区,而站位 NBT01 位于中性物源区和长英质物源区之间(图 6),这可能是由于站位 NBT01 位于海沟轴部且靠近海沟东西两支交汇位置,海沟“漏斗状”的地形使海沟轴部容易接受周围滑坡或浊流带来的物质^[65],显示出周围中—基性火山物质和第四纪沉积的复杂混合来源。但整体而言新不列颠海沟表层沉积物主要受到了火山物质的影响。

以上元素地球化学证据均表明新不列颠海沟表层沉积物主要受到附近岛屿的火山物质影响。然而,新不列颠海沟位于 3 个板块的交界处,构造活动频繁,为了进一步了解新不列颠海沟各海域间表层沉积物来源的差异,通过海沟表层沉积物的 La-Th-Sc

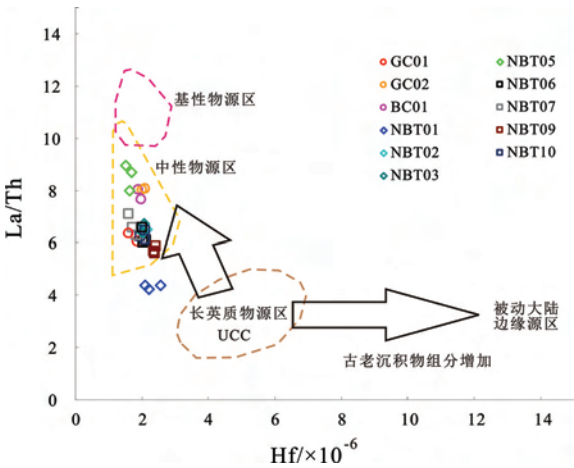


图 6 新不列颠海沟表层沉积物 Hf-La/Th 物质判别图
Fig.6 The Hf-La/Th for provenance study for surface sediments in the New Britain Trench

三角图判别各站位物源的构造环境^[66],显示所有样品全部落入大洋岛弧范围,并且不同的站位间存在着差异(图7)。在 La-Th-Sc 三角图上可以显示两个不同的分布区,A1 区主要有 GC01、GC02、BC01、NBT01、NBT03 和 NBT05 站位,而 A2 区主要有

NBT02、NBT06、NBT07、NBT09 和 NBT10 站位。从图中可以发现 A1 区的 NBT05 站位的投影位置距离其他站位较远,位于大洋岛弧区的边缘,可能说明 NBT05 站位的物质来源与其他 A1 区站位的物质有所差别。

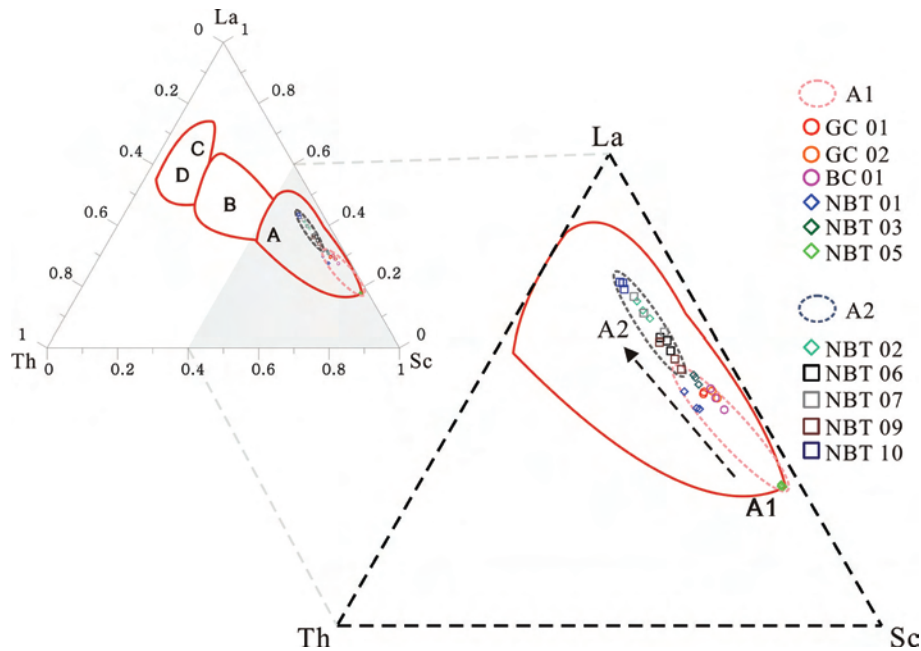


图7 新不列颠海沟表层沉积物构造环境三角图

A.大洋岛弧,B.大陆岛弧,C.活动大陆边缘,D.被动大陆边缘

Fig.7 Triangular diagram of tectonic environment study of surface sediments in the New Britain Trench

A. Oceanic Island arc, B. Continental Island arc, C. Active continental margin, D. Passive continental margin

新不列颠海沟表层沉积物虽然均受火山物质影响较大,但不同区域间的物质来源还是有所不同,这与周边岛屿各火山物质源区之间的差异有关。TLTF 火山链的火山物质的大离子亲石元素(如 K、Cs、Rb、Ba、Pb 等)和轻稀土最为富集,其次为 Rabual 和 Bagana 火山的火山物质,而新不列颠岛北部和所罗门群岛的火山物质的大离子亲石元素和轻稀土富集程度较低^[26-28,40-49,51-55]。此外,与岛弧火山物质密切相关的高场强元素 Ta 和 Nb 也是区分新不列颠海沟火山物质来源的重要判别元素,新不列颠岛北部火山物质的 Ta 和 Nb 甚至相比 MORB 还亏损,所罗门群岛的火山物质则与 MORB 分布相似,而 TLTF 火山链和 Rabual 与 Bagana 火山的火山物质相比 MORB 略为富集^[26-28,40-53]。

为了进一步了解新不列颠海沟表层沉积物的具体火山物源,在稀土元素三组分图中同样可以划分出 A1 和 A2 两个区(图8),其两个源区所包含的站

位与之前的 La-Th-Sc 构造环境三角图相一致,说明新不列颠海沟表层沉积物主要有两个重要的物质源区。在稀土元素三组分图中,A1 源区均主要受到所罗门群岛和新不列颠岛东部 Rabual 火山的火山物质以及新不列颠岛北部火山物质的影响。根据不同火山物质的范围可以推测,在 A1 源区内的 NBT05 站位更接近新不列颠岛北部火山物质的范围,而且它们的稀土元素配分模式显示 A1 源区的 NBT05 站位与新不列颠岛北部火山物质更为相似(图3),说明 NBT05 站位相比 A1 源区的其他站位受到新不列颠岛北部火山物质的影响也更多。而与 A1 区相比,A2 区受到 Tabar、Lihir、Tanga 和 Feni (TLTF)火山链更多的影响,A2 源区的分布范围介于 TLTF 火山链和所罗门群岛火山之间。此外,从 A1 至 A2 源区, $\Sigma \text{La-Nd}$ 值逐渐增加, $\Sigma \text{Er-Lu}$ 值逐渐减小,表明从 A1 至 A2 源区轻稀土相对越来越富集,而重稀土则相反。

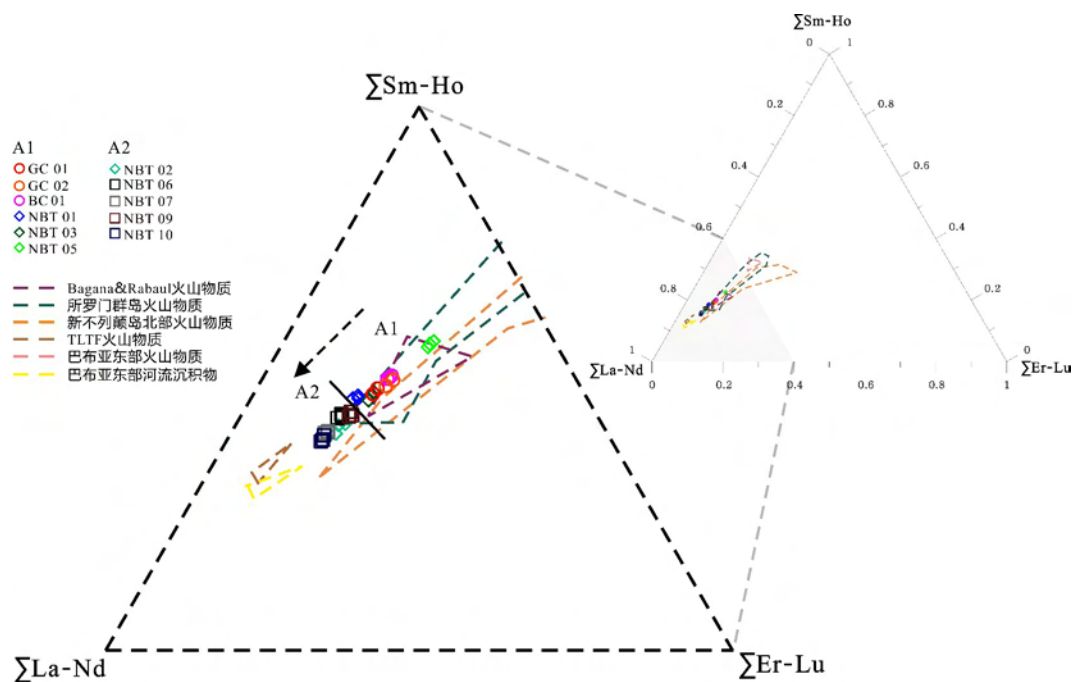


图 8 新不列颠海沟表层沉积物稀土元素三组分图及其潜在物质来源^[26-28,40-49,51-55]

Fig.8 Triangular diagram of REE of surface sediments in the New Britain Trench and their possible sources

在图 2 的常量元素分布图和图 3 的微量元素的蛛网图中,显示出与稀土元素三组分图相似的结果,即 A1 源区站位的分布特征与 A2 源区有所不同。因子分析中,推测 F2 因子反映的可能是周围岛屿火山物质的副矿物特征,而 P_2O_5 和 K_2O 与 Nb、Ta 为 F2 因子的主要元素,因此我们可以尝试通过这些元素对不同的火山物质源区加以区分。A1 源区的 P_2O_5 和 K_2O 相比 A2 源区较为亏损,而新不列颠岛东部 Rabaul 火山以及新不列颠岛北部火山物质的 P_2O_5 和 K_2O 相比 TLTF 火山链的火山物质更为亏损,表明在火山物质影响中,A1 源区相比 A2 源区可能受 Rabaul 火山以及新不列颠岛北部火山物质影响较大,而 A2 源区受 TLTF 火山链的火山物质的影响较大。此外,A1 源区中的大离子亲石元素相比 A2 源区富集程度相对较低。A1 源区高场强元素(Ta、Nb)相比 A2 源区富集程度明显更小,其中 NBT05 站位相比 MORB 甚至还亏损。在几个潜在物质源区中,TLTF 火山链的火山物质大离子亲石元素相比其他火山物质更为富集,而新不列颠岛北部的火山物质 Ta 与 Nb 相比 MORB 明显亏损。由此说明在混合的物质来源中,A2 源区可能受到 TLTF 火山链的火山物质影响更大,而 A1 源区中的 NBT05 站位相比其他站位受到新不列颠岛北部火山物质的影响更大。

因此,在新不列颠海沟沉积物中火山物质来源

存在一定差异,可能与本地区的自然环境条件有关。该地区普遍为小型高山河流,而其高山河流往往是主动型大陆边缘的地貌特征,强烈的降雨量、活跃的构造活动、易分化剥蚀的岩性特征,以及河流海拔落差大、搬运距离短、汇水面积小等因素,造成极强的机械剥蚀作用^[67],岛屿上的剥蚀物质容易被带入海洋中。

同时,结合该地区复杂的洋流系统,附近的岛屿因而可以为新不列颠深渊海沟提供丰富的物源。不同岛屿的火山物质也通过这复杂的洋流分别传播到新不列颠海沟的不同地区。在靠近新不列颠海沟东部,介于新爱尔兰岛和布干维尔岛之间,表层地转流还存在着一支由太平洋流向所罗门海的洋流^[34]。通过该表层地转流,新爱尔兰岛东部的 TLTF 火山链的火山物质可以被搬运入所罗门海并首先搬运至距离较近新不列颠海沟东部(A2 源区)。同时由南赤道流分化形成的洋流自南向北流动,使得南部岛屿的物质可以被搬运至所罗门海北部的新不列颠海沟。因此,南部所罗门群岛的火山物质经由这些自南向北的洋流被搬运至新不列颠海沟各处,使得整个新不列颠海沟的沉积物质都在不同程度上受到所罗门群岛火山物质的影响。而与海沟紧邻的新不列颠岛虽然离海沟很近,但由于其位于海沟的北部而该地区的洋流普遍为自南向北流,同时新不列颠岛的火山活跃地区位于岛屿的北部^[40,51],岛屿中部有

板块碰撞形成的山脉阻挡,使得新不列颠岛的火山物质对南部的不列颠海沟影响有限。由此说明,所罗门群岛的火山物质几乎影响着整个不列颠海沟,其中 A1 源区由于靠近新不列颠岛,所以东部 Rabaul 火山和新不列颠岛北部的火山物质对它们影响较大,而 A2 源区位于海沟东部,相比 A1 源区受到 TLTF 火山链的火山物质影响较大。

综上所述,新不列颠海沟的表层沉积物主要来源于周边岛屿的火山物质,但海沟轴部的 NBT01 站位的常量元素分布模式与周围岛屿的河流沉积物更相似,尤其是与陆源物质密切相关的 TiO_2 ,其数值与周围岛屿的河流沉积物非常相似(图 2)。在 Hf-La/Th 相关图上也显示,其受到长英质的陆源碎屑影响也相对更强(图 6)。此外,微量元素蛛网图也有一些区别,其 Ba 的富集程度相对较小,而 Th 的富集程度相对较高,整体分布特征与岛屿河流沉积物的特征较为相似(图 3)。因此,海沟轴部的 NBT01 站位相比其他站位受第四纪沉积的影响更为强烈,这可能是因为该地区的基岩主要为中—基性火山物质和第四纪沉积,河流沉积物还会一定程度上含有火山物质的影响,所以 NBT01 站位受到了中—基性火山物质和第四纪沉积的混合影响,但相对其他站位更受陆源河流沉积的影响。结合海沟“漏斗状”的地形和 NBT01 站位位于海沟轴部的地理位置,可能是附近岛屿的河流沉积物被河流带入所罗门海时,部分沉积物通过岛坡峡谷直接搬运至海沟轴部,而处于板块交界处的新不列颠海沟,地震频发,容易激发浊流或块体搬运的现象。

5 结论

新不列颠海沟海底表层沉积物来源于周围岛屿火山物质和陆源河流的沉积物,但整体上主要来源于中性火山物质。其主要来源于新不列颠岛东部的 Rabaul 火山,新不列颠岛北部的活跃火山群,新爱尔兰岛东边的 TLTF 火山链和所罗门群岛的火山物质。在来源上可以主要划分为西支海沟的 A1 源区,以 Rabaul 火山为主,而其中岛坡最浅处的 NBT05 站位受到新不列颠岛北部火山群的影响相对更明显。东支海沟的 A2 源区,与 A1 源区相比,它受到 TLTF 火山链的影响更大。与此同时,该地区由南向北的主要洋流流向,限制了新不列颠岛(尤其是岛屿北部)的物质向南进一步传播,而一支由太平洋流向所罗门海的表层地转流加强了 TLTF 火山链的物质对海沟东支的影响。此外,西支海沟轴

部的 NBT01 站位受河流沉积物影响更大,可能是受海沟“漏斗状”地形的影响,周围岛屿河流沉积物通过峡谷直接搬运至海沟底部的结果。

致谢:沉积物样品由上海海洋大学上海深渊科学技术研究中心“张謇号”科考船采集获得,感谢全体船员与同行在样品采集过程中的帮助,同时感谢中国科学院地球化学研究所漆亮研究员在常量、微量及稀土元素测试方面的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Wolff T. The concept of the hadal or ultra-abyssal fauna [J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1970, 17 (6): 983-1003.
- [2] Jamieson A J, Fujii T, Mayor D J, et al. Hadal trenches: the ecology of the deepest places on Earth [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25 (3): 190-197.
- [3] Jamieson A J, Fujii T. Trench connection [J]. Biology Letters, 2011, 7(5): 641-643.
- [4] 肖春晖,王永红,林间.海沟沉积物研究进展[J].热带海洋学报,2017,36(6): 27-38. [XIAO Chunhui, WANG Yonghong, LIN Jian. Research progress on ocean trench sedimentation [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2017, 36 (6): 27-38.]
- [5] Heuret A, Conrad C P, Funicello F et al. Relation between subduction megathrust earthquakes, trench sediment thickness and upper plate strain [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39 (5): L05304.
- [6] Smith G L, McNeill C, Wang Kelin, et al. Thermal structure and megathrust seismogenic potential of the Makran subduction zone [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40 (8): 1528-1533.
- [7] 王汾连,何高文,王海峰,等.马里亚纳海沟柱状沉积物稀土地球化学特征及其指示意义[J].海洋地质与第四纪地质,2016, 36 (4): 67-75. [WANG Fenlian, HE Gaowen, WANG Haifeng et al. Geochemistry of rare earth elements in a core from mariana trench and its significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36 (4): 67-75.]
- [8] Turnewitsch R, Falahat S, Stehlikova J, et al. Recent sediment dynamics in hadal trenches: Evidence for the influence of higher-frequency (tidal, near-inertial) fluid dynamics [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2014, 90: 125-138.
- [9] Luo M, Thomas J A, 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 II, 2017, doi:10.1016/j.dsr2.2017.01.006.
- [10] 李克让,周春平,沙万英.西太平洋暖池基本特征及其对气候的影响[J].地理学报,1998,53(6): 511-519. [LI Kerang, ZHOU Chunping, SHA Wanying. Basic features of the warm pool in the western pacific and its impact on climate [J]. Acta

- Geographica Sinica, 1998, 53(6): 511-519.]
- [11] Lea D W, Pak D K, Spero H J. Climate impact of late quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations [J]. Science, 2000, 289: 1719-1724.
- [12] Howell D G, Murray R W. A budget for continental growth and denudation [J]. Science, 1986, 233 (4762): 446-449.
- [13] Hay W W, Sloan J L, Wold C N. Mass/age distribution and composition of sediments on the ocean floor and the global rate of sediment subduction [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 1998, 93 (B12): 14933-14940.
- [14] 颜文, 陈木宏, 李春娣, 等. 西太平洋暖池近 3 万年来的沉积序列及其环境特征—WP92-3 柱样的 REE 记录 [J]. 矿物学报, 2006, 26 (1): 22-28. [YAN Wen, CHEN Muhong, LI Chundi, et al. The sedimentary sequences during last 30 ka revealed by REE records in core WP92-3 from West Pacific Warm Pool and their environmental implications [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2006, 26 (1): 22-38.]
- [15] 路波, 李铁刚, 于心科, 等. 赤道西太平洋翁通爪哇海台西南部 25 万年以来的火山活动: 来自沉积物元素地球化学的证据 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, 37: 125-133. [LU Bo, LI Tiegang, YU Xinke, et al. Past 250 ka volcanic activities in southwest Ontong Java Plateau, West Equatorial Pacific: Evidences from element geochemistry [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2012, 37: 125-133.]
- [16] 吴家望, 刘志飞, 周超. 西太平洋暖池晚第四纪黏土矿物的冰期旋回和岁差周期 [J]. 科学通报, 2012, 57 (23): 2145-2157. [WU Jiawang, LIU Zhifei, ZHOU Chao. Late Quaternary glacial cycle and precessional period of clay mineral assemblages in the Western Pacific Warm Pool [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57 (23): 2145-2157.]
- [17] Cullers R L. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, from uplifted continental block in Colorado to platform sediment in Kansas, USA [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 55: 4955-4972.
- [18] Munksgaard N C, Lim K, Parry D L. Rare earth elements as provenance indicators in North Australian estuarine and coastal marine sediments [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57(3): 399-409.
- [19] 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.]
- [20] Cooper P, Taylor B. Seismotectonics of New Guinea: A model for arc reversal following arc-continent collision [J]. Tectonics, 1987, 6 (1): 53-67.
- [21] Johnson R. Geotectonics and volcanism in Papua New Guinea: a review of the late Cainozoic [J]. BMR Journal of Australian Geology and Geophysics, 1979, 4: 181-207.
- [22] Davies H L, Price R C. Basalts from the Solomon and Bismarck Seas [J]. Geo-Marine Letters, 1987, 6 (4): 193-202.
- [23] Kamenov G D, Perfit M R, Mueller P A, et al. Controls on magmatism in an island arc environment: study of lavas and sub-arc xenoliths from the Tabar-Lihir-Tanga-Feni island chain, Papua New Guinea [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2008, 155 (5): 635-656.
- [24] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20 (4): 353-431.
- [25] Commission for the Geological Map of the World. Geological World Atlas, Scale 1:10000000 [M]. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1975.
- [26] Kaars S V D, Kershaw P, Wang X, et al. A Late Quaternary palaeoecological record from the Banda Sea, Indonesia: Patterns of vegetation, climate and biomass burning in Indonesia and northern Australia [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2000, 155: 135-153.
- [27] Mackey D J, O'Sullivan J E O, Watson R J. Iron in the western Pacific: A riverine or hydrothermal source for iron in the Equatorial Undercurrent [J]. Deep-Sea Research Part I, 2002, 49: 877-893.
- [28] Kershaw A P, Kaars S V D, Moss P T. Late Quaternary Milankovitch-scale climatic change and variability and its impact on monsoonal Australasia [J]. Marine Geology, 2003, 201: 81-95.
- [29] Lindstrom E, Lukas R, Fine R, et al. The Western Equatorial Pacific Ocean Circulation study [J]. Nature, 1987, 330: 533-537.
- [30] Tsuchiya M, Lukas R, Fine R, et al. Source waters of the Pacific Equatorial Undercurrent [J]. Progress Oceanography, 1989, 23: 101-147.
- [31] Butt J, Lindstrom E. Currents off the East coast of New Ireland, Papua New Guinea, and their relevance to Regional Undercurrents in the Western Equatorial Pacific Ocean [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1994, 99: 12503-12514.
- [32] Fine R A, Lukas R, Bingham F M, et al. The Western Equatorial Pacific: A water mass crossroads [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1994, 99: 25063-25080.
- [33] Cresswell G R. Coastal currents of northern Papua New Guinea, and the Sepik River outflow [J]. Marine & Freshwater Research, 2000, 51: 553-564.
- [34] Cravatte S, Ganachaud A, Duong Q P, et al. Observed circulation in the Solomon Sea from SADC data [J]. Progress in Oceanography, 2011, 88: 116-130.
- [35] William V Boynton. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies [J]. Developments in Geochemistry, 1984, 2: 63-114.
- [36] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Blackwell, Malden, 1985: 312.

- [37] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental-crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33: 241-265.
- [38] Whitmore G P, Crook K A W, Johnson D P. Grain size control of mineralogy and geochemistry in modern river sediment, New Guinea collision, Papua New Guinea [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 171: 129-157.
- [39] Hettler J, Irion G, Lehmann B. Environmental impact of mining waste disposal on a tropical lowland river system: a case study on the Ok Tedi Mine, Papua New Guinea [J]. *Mineralium Deposita*, 1997, 32: 280-291.
- [40] Woodhead J D, Johnson R W. Isotopic and trace-element profiles across the New Britain island arc, Papua New Guinea [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1993, 113: 479-491.
- [41] Bultitude R J, Johnson R W, Chappell B W. Andesites of Bagana Volcano, Papua New Guinea: Chemical stratigraphy, and a reference andesite composition [J]. *Journal of Biomolecular Nmr*, 2001, 21 (2).
- [42] Wallace D A, Johnson R W, Chappell B W, et al. Cainozoic volcanism of the Tabar, Lihir, Tanga and Feni Islands, Papua New Guinea: Geology, whole-rock analyses, and rock-forming mineral compositions[M]. Bureau Mineral Resources Report 243, Australian Government Publishing Service, 1983: 62.
- [43] Kennedy A K, Grove T L, Johnson R W. Experimental and major element constraints on the evolution of lavas from Lihir Island, Papua New Guinea [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1990a, 104: 722-734.
- [44] Kennedy A K, Hart S R, Frey F A. Composition and isotopic constraints on the petrogenesis of alkaline arc lavas: Lihir Island, Papua New Guinea [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1990b, 95: 6929-6942.
- [45] Gill J B, Morris J D, Johnson R W. Timescale for producing the geochemical signature of island arc magmas: U-Th-Po and Be-B systematics in recent Papua New Guinea lavas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 4269-4283.
- [46] Wood C P, Nairn I A, McKee C O, et al. Petrology of the Rabaul Caldera area, Papua New Guinea [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1995, 69: 285-302.
- [47] Stracke A, Hegner E. Rifting-related volcanism in an oceanic post-collisional setting: The Tabar-Lihir-Tanga-Feni (TLTF) island chain, Papua New Guinea [J]. *Lithos*, 1998, 45: 545-560.
- [48] Woodhead J D, Eggins S M, Johnson R W. Magma genesis in the New Britain island arc: Further insights into melting and mass transfer processes [J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39: 1641-1668.
- [49] Müller D, Franz L, Herzig P M, et al. Potassic igneous rocks from the vicinity of epithermal gold mineralization, Lihir Island, Papua New Guinea [J]. *Lithos*, 2001, 57: 163-186.
- [50] Pearce, J.A., Parkinson, I.J., 1993. Trace element models for mantle melting: Application to volcanic arc petrogenesis [J]. *Magmatic Processes and Plate Tectonics*, 1993, 76: 373-403.
- [51] Herzig P, Hannington M, Stoffers P, et al. Volcanism, hydrothermal processes and biological communities at shallow submarine volcanoes of the New Ireland forearc (Papua New Guinea)[R]//Cruise Report SONNE-133, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 1998:146.
- [52] Chadwick J, Perfit M, McInnes B, et al. Arc lavas on both sides of a trench: Slab window effects at the Solomon Islands triple junction, SW Pacific [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 279: 293-302.
- [53] Heming R F, Rankin P C. Ce-anomalous lavas from Rabaul caldera, Papua New Guinea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43: 1351-1355.
- [54] Horz K H, Worthington T J, Winn K, et al. Late Quaternary tephra in the New Ireland Basin, Papua New Guinea [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 132: 73-95.
- [55] Hannigan R E, Sholkovitz E R. The development of middle rare earth element enrichments in freshwaters: weathering of phosphate minerals [J]. *Chemical Geology*, 2001, 175: 495-508.
- [56] Rollinson, Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation Interpretation [M]. Longman Scientific Technical, 1993, 352.
- [57] Condie K C, Dengate J, Cullers R L. Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 279-294.
- [58] Sharma A, Rajamani V. Major element, REE and other trace element behavior in amphibolite weathering under semiarid conditions in Southern India [J]. *Journal of Geology*, 2000, 108: 487-496.
- [59] Wei G J, Liu Y, Li X H, et al. High-resolution elemental records from the South China Sea and their paleoproductivity implications [J]. *Paleoceanography*, 2003, 18: 1054-1065.
- [60] Nesbitt H W, Markovics G. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1997, 61 (8): 1653-1670.
- [61] Byrne R H, Kim K H. Rare earth element scavenging in seawater [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1990, 54 (10): 2645-2656.
- [62] Freslon N, Bayon G, Toucanne S, et al. Rare earth elements and neodymium isotopes in sedimentary organic matter [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2014, 140: 177-198.
- [63] 吴梦霜, 邵磊, 庞雄等. 南海北部深水区沉积物稀土元素特征及其物源指示意义 [J]. *沉积学报*, 2012, 30 (4): 672-678. [WU Mengshuang, SHAO Lei, PANG Xiong, et al. REE geochemical characteristics of sediments and its implications in the deepwater area of the northern South China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30 (4): 672-678.]

- [64] 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 of London, 1987, 144: 531-542.
- [65] Nozaki Y, Ohta Y. Rapid and frequent trubidite accumulation in the bottom of Izu-Ogasawwara Trench: chemical and radiochemical evidence [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 120: 345-360.
- [66] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic discrimination of sedimentary basins [J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1986, 92, 181-193.
- [67] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/Tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers [J]. Journal of Geology, 1992, 100: 525-544.