



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

马里亚纳海槽中部、南部火山岩地球化学特征及源区地幔性质

赵思旭, 曾志刚

Petrogeochemical characteristics of mantle sources of volcanic rocks in the southern and middle Mariana Trough

ZHAO Sixu and ZENG Zhigang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022112101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[伊豆-小笠原-马里亚纳俯冲带地震成因](#)

TRIGGERING CAUSES OF EARTHQUAKES ALONG THE IZU-BONIN-MARIANA SUBDUCTION ZONE

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(4): 83

[马里亚纳“沟盆”深水沉积环境稀土元素特征与物源约束](#)

Characteristics of rare earth elements in deep-water sediments in Mariana “Trench–Basin” system and their provenance constraints

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 102

[马里亚纳弧前Quaker蛇纹岩泥火山自生烟囱生长模式](#)

Formation model of authigenic chimneys on the Quaker serpentinite mud volcano in the Mariana forearc

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 15

[伊豆博宁马里亚纳岛弧地壳厚度分布及其对岩浆活动的指示](#)

Crustal thickness variations of the Izu–Bonin–Mariana Arc and their implications for arc magmatism

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 158

[西太平洋弧后盆地火山岩中熔体包裹体研究进展](#)

Advances in melt inclusion studies in back-arc basin volcanic rocks in Western Pacific

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 166

[大洋地幔化学组成不均一性成因研究回顾及展望](#)

GEOCHEMICAL HETEROGENEITY OF OCEANIC MANTLE: A REVIEW

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 1



关注微信公众号，获得更多资讯信息

赵思旭,曾志刚.马里亚纳海槽中部、南部火山岩地球化学特征及源区地幔性质[J].海洋地质与第四纪地质,2023,43(5): 73-84.
ZHAO Sixu, ZENG Zhigang. Petrogeochemical characteristics of mantle sources of volcanic rocks in the southern and middle Mariana Trough[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(5): 73-84.

马里亚纳海槽中部、南部火山岩地球化学特征及源区地幔性质

赵思旭¹,曾志刚²

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590

2. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

摘要:马里亚纳海槽作为正在活动的典型弧后盆地,是研究俯冲作用对岩浆作用和壳幔动力学影响的理想场所。通过对采自该海槽中南部的样品进行系统的岩石地球化学特征对比与研究,并结合前人已发表的岩石地球化学数据,探讨了马里亚纳海槽中南部的地幔富集(亏损)程度、地幔熔融程度、地幔熔融深度以及俯冲物质的加入程度。结果表明:(1)马里亚纳海槽中南部主要发育一套中低钾钙碱性系列玄武岩、玄武质安山岩;(2)海底岩石富集了大离子亲石元素、轻稀土元素,亏损高场强元素、重稀土元素;(3)将马里亚纳海槽沿扩张中心分为三段,对每段地幔熔融的程度和深度进行计算并且消除地幔不均一性的影响,发现在15°N和18°N附近二者呈现负相关关系,其余地区则呈现正相关关系,证明海槽存在两种地幔熔融模式;(4)微量元素比值显示海槽受多种俯冲组分影响,并且马里亚纳海槽南部的南段可能存在另一个富水熔体端元,可能是导致海槽扩张速率较快的原因。对俯冲物质的加入程度进行计算,发现靠近15°N与18°N俯冲组分的影响变弱,这进一步表明,马里亚纳海槽火山岩的变化可能是由于类似N-MORB的地幔源区与类似岛弧的地幔源区混合造成的;俯冲物质是控制地幔熔融程度的主要因素,并且扩张速率与地幔富集/亏损程度等也发挥了重要作用。

关键词:俯冲作用;地幔熔融程度;地幔熔融深度;马里亚纳海槽

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2022112101](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022112101)

Petrogeochemical characteristics of mantle sources of volcanic rocks in the southern and middle Mariana Trough

ZHAO Sixu¹, ZENG Zhigang²

1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2. The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: The Mariana Trough, as a typical active back-arc basin, is an ideal place to study the effects of subduction on magmatism and crust-mantle dynamics. The petrogeochemical characteristics of the samples from two areas of the trough were revealed based on the published petrogeochemical data, from which the degree of mantle enrichment/depletion, the degree of mantle melting, the depth of mantle melting, and the degree of subduction material incorporation in the southern and middle Mariana Trough were clarified. Results show that a set of medium-low potassium calc-alkaline series basalt and basaltic andesite occur in the southern and middle Mariana Trough. The volcanic rocks are rich in large ionic lithophile elements (LILE) and light rare earth elements (LREE) while deficient in high field strength elements (HFSE) and heavy rare earth elements (HREE). The Mariana Trough could be divided into three sectors along spreading center, and the mantle-melting degree and the depth of each sector were calculated and the effect of mantle heterogeneity eliminated. The correlation between mantle-melting degree and the depth in each sector was found negative near 15°N and 18°N, but positive in the other areas, which proves that there are two mantle-melting modes in the trough. Volcanic rocks in the southern and middle Mariana Trough are influenced by multiple subduction-components and there may be another water-rich melt end-member in the southern part of the trough that may be resulted from the faster spreading rate of the trough. Calculations of the extent of subduction accretion show that the influence of subduction components weakens near 15°N and 18°N. The

资助项目:国家自然科学基金项目“西太平洋俯冲体系中岩浆活动及其对热液物质供给的制约”(91958213);中国科学院战略性先导科技专项(B类)项目子课题“热液/冷泉区岩浆物质贡献与流体化学过程”(XDB42020402);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“典型弧后盆地热液活动及其成矿机理”(2013CB429700);泰山学者工程专项“特聘专家资助计划项目”(ts201511061)

作者简介:赵思旭(1998—),男,硕士研究生,主要从事海底岩石学研究, E-mail: zhaosixu@qdio.ac.cn

通讯作者:曾志刚(1968—),男,博士,研究员,从事海底热液活动及成矿研究, E-mail: zgzeng@qdio.ac.cn

收稿日期:2022-11-21; **改回日期:**2022-12-14. 周立君编辑

variation of volcanic rocks in the Mariana Trough may be caused by the mixing of an N-MORB-like mantle source involved with an island arc-like mantle source. Therefore, subduction material is an important factor on mantle-melting degree, and spreading rate and mantle enrichment/depletion degree are also play an essential roles.

Key words: subduction; mantle-melting degree; mantle melting depth; Mariana Trough

俯冲带是全球物质循环与热交换的重要场所, 俯冲板块在海沟俯冲至地幔深处, 促使了复杂的壳幔相互作用的形成和成矿物质的迁移与富集。俯冲带中的弧后盆地扩张中心既属于拉张环境, 又受到了俯冲物质的影响^[1-2]。因此, 研究弧后盆地的火山岩对了解汇聚板块边缘岩浆来源及演化、地幔动力学过程等具有重要意义^[3]。

马里亚纳海槽作为正在活跃的、典型的洋内弧后盆地, 前人已经开展了相当多的工作^[4-9]。Taylor 等^[4]利用 Na_8 、 Fe_8 、 Ti_8 、 H_2O 和 Ba/La 之间的关系, 建立了马里亚纳弧后扩张的模型; Pearce 等^[2]和 Yan 等^[5]利用微量元素之间的关系, 计算了整个马里亚纳海槽中俯冲流体在未经影响的源区地幔的偏移量; 张平阳等^[6]和 Lai 等^[7]对海槽中部 18°N 的斜长石复杂晶体的化学成分进行研究, 发现了复杂的岩浆通道系统; Newman 等^[8]和孙海青等^[9]通过研究海槽北部与中部熔体包裹体结晶温度和挥发分的特征, 发现 H_2O 和 CO_2 的含量呈负相关, 进而说明原始岩浆的成分变化是由于贫 H_2O 的 N-MORB 型源区组分与富 H_2O 的俯冲板片组分的混合物的熔融造成的。尽管如此, 由于马里亚纳海槽复杂的地质背景, 不同区域的岩石可能拥有不同的源区, 在演化过程中还可能遭受不同的后期作用影响, 所以其岩浆演化过程和地幔源区组成一直存在争议, 如马里亚纳岛弧岩浆作用是否在海槽扩张期间停止, 马里亚纳海槽早期岩浆的性质是否与后期一致等。

同时, 前人的工作大多集中在马里亚纳海槽中部与北部, 对南部快速扩张区域的岩浆活动研究较少。基于上述问题, 本文通过对海槽中南部火山岩主量、微量元素组成的对比与分析, 结合该区域内已发表的岩石地球化学数据, 对马里亚纳海槽岩石进行了详细的岩石学和地球化学研究, 为更好地理解马里亚纳海槽岩浆演化及岩浆的地幔源区特征提供支撑。

1 区域背景

马里亚纳海槽位于菲律宾海板块东部, 南北长约 1300 km , 东西最宽处约 240 km , 平均宽约 110 km , 呈向东凸出的新月形(图 1)。马里亚纳海槽东部紧

邻马里亚纳火山岛弧, 西部与已经停止活动的西马里亚纳残留脊相邻^[10-11]。马里亚纳海槽的扩张速率从北部亚格里罕岛附近的 15 mm/a 到南部关岛附近的 45 mm/a 逐渐增加^[12]。Pearce 等^[13]将马里亚纳海槽分为 3 部分: 北马里亚纳海槽(Northern Mariana Trough, NMT $22^\circ\text{~}24^\circ\text{N}$)、中马里亚纳海槽(Central Mariana Trough, CMT $17.6^\circ\text{~}22^\circ\text{N}$)和南马里亚纳海槽(Southern Mariana Trough, SMT $12.5^\circ\text{~}17.6^\circ\text{N}$)。其中, 北部处于弧后盆地形成初期, 以地壳伸展减薄为主^[14], 中部马里亚纳海槽为成熟的弧后扩张中心, 火山活动局限在主扩张轴上, 最南部($11.5^\circ\text{~}13.4^\circ\text{N}$)类似快速扩张洋脊, 轴深约 3 km ^[15]。

2 材料与方法

2.1 样品

研究样品是“科学”号于 2018 年执行 HOBAB5

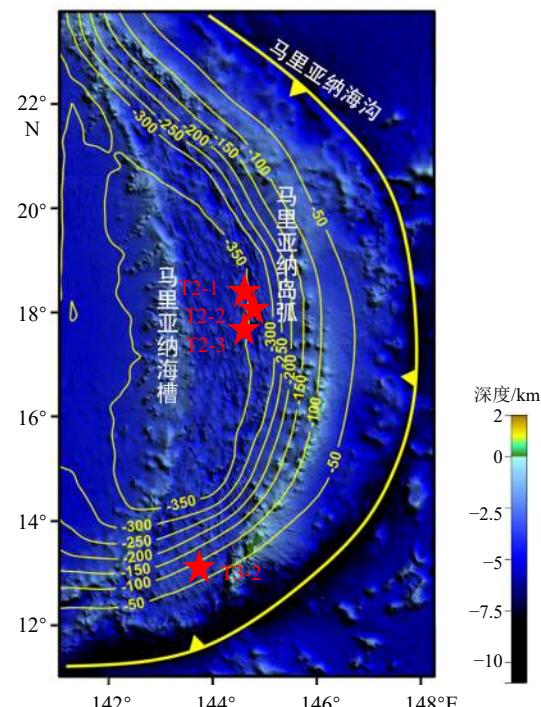


图 1 马里亚纳海槽岩石取样位置
黄线为马里亚纳下部俯冲板块深度等高线。

Fig.1 Location of the sampling in the Mariana Trough
The yellow line is the depth contour of the lower Mariana subduction plate.

航次, 在马里亚纳海槽中部和南部通过电视抓斗获得的火山岩, 样品棱角分明, 磨圆度较低, 代表样品属于原位基岩, 站位信息及样品描述见表 1。

表 1 马里亚纳海槽火山岩样品的取样信息

Table 1 Sampling information of volcanic rocks in the Mariana Trough

样品编号	纬度	经度	水深/m	样品描述
T2-1	18°02'N	144°42'E	3 659	OI + Cpx + Opx + Pl
T2-2	18°02'N	144°45'E	3 854	OI + Cpx + Opx + Pl
T2-3	18°00'N	144°45'E	4 038	OI + Cpx + Pl
T3-2	12°54'N	143°38'E	2 974	OI + Cpx + Opx + Pl

注: OI为橄榄石, Cpx为单斜辉石, Opx为斜方辉石, Pl为斜长石。

2.2 实验与方法

2.2.1 样品前处理

在进行全岩主微量元素分析前先对样品进行前处理, 流程如下: 取新鲜火山岩清洗后, 利用切割机切割成小块, 清洗、烘干, 并利用岩石粉碎机将样品粉碎成小于 4 mm 的碎块, 再用超纯水进行超声波清洗, 换水, 直至水清澈。烘干后用无水乙醇浸泡, 并将其放入超声波清洗机内, 去除样品有机质。随后将样品放入 1 mol/L 的稀盐酸溶液中, 再置于 60℃ 水浴加热 2 h, 去除次生碳酸盐和铁锰氧化物等, 再次用超纯水进行超声波清洗, 换水, 烘干。最后利用玛瑙研钵将样品磨成 200 目的粉末, 用于全岩分析测试。

2.2.2 全岩主量元素分析

全岩主量元素分析测试在核工业北京地质研究所使用 X 射线衍射光谱仪 (Rigaku RIX2000, 测试精度小于 5%), 以 Li2B4O7-LiNO3 为助熔剂, 采用熔融玻璃片进样方式测得。马里亚纳海槽全岩样品主量元素数据见表 2。

2.2.3 全岩微量元素分析

首先将样品粉末烘干, 取 40 mg 粉末, 加入特氟龙消解罐中, 向罐中依次加入 1.5 L 浓氢氟酸和 0.5 mL 浓硝酸, 封盖并放在加热板至 150 ℃ 加热 24 h。放凉至液体不会喷出, 打开盖子将剩余液体加热蒸干, 然后加入 1 mL 浓硝酸和 1 mL 超纯水, 封盖, 放在加热板至 150 ℃ 加热 24 h 至样品完全溶解, 再加入超纯水定容至 40 g。然后, 将样品在青岛斯八达分析测试有限公司使用 ELAN9000 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 进行测试分析。外部标样包括 GBW07314、GBW07315、GBW07316、BHVO-2、BCR-2, 测试精度小于 5%。全岩微量元素数据见表 2。

3 结果

3.1 全岩主量元素地球化学特征

为了更加详细地了解马里亚纳海槽中、南部岩浆活动的差异, 我们将马里亚纳海槽南部分为南段 (Southern Segment of the Southern Mariana Trough, SSMT 12°~15°N) 和北段 (Northern Segment of the Southern Mariana Trough, NSMT 15°~17.6°N)。从图 2 中可以看出, CMT 主要发育中低钾钙碱性系列玄武岩、玄武质安山岩, NSMT 主要发育一套低钾岛弧拉斑系列玄武岩, 少量玄武质安山岩, SSMT 主要发育一套中低钾钙碱性系列玄武质安山岩, 外加少量玄武岩、安山岩。总体而言, NSMT 的岩石较 CMT 来说更偏基性, SSMT 的岩石酸性程度最高。

与洋中脊玄武岩 (N-MORB) 相比, 马里亚纳海槽玄武岩、玄武质安山岩的 Na₂O (平均值为 3.157%)、K₂O (平均值为 0.399%) 含量更高, 说明源区有俯冲组分的加入; 较高的 FeO* (平均值为 9.388%)、TiO₂ (平均值为 1.311%) 含量说明母岩浆具有较低的氧逸度。对比海槽的不同区域, SSMT 样品的 SiO₂、Na₂O、K₂O、P₂O₅ 含量的平均值最高, 其次为 CMT, NSMT 最低。另外, 排除磁铁矿分异的影响后, CMT 的 Al₂O₃ 最高, FeO*、TiO₂ 含量最低, NSMT 的 FeO*、TiO₂ 含量最高, Al₂O₃ 位于二者之间, SSMT 的 Al₂O₃ 含量最低, FeO*、TiO₂ 含量位于二者之间 (表 2)。

3.2 全岩微量元素地球化学特征

马里亚纳海槽火山岩的微量元素分布如图所示。CMT、NSMT、SSMT 火山岩的球粒陨石标准化稀土元素分布模式相似, 表现出明显的右倾型及轻稀土 (LREE) 富集、重稀土 (HREE) 分馏不明显的特征 (图 3)。CMT、NSMT、SSMT 玄武岩样品的 (La/Yb)_N 值分别为 0.90~3.71、0.48~2.03、0.81~1.11, 玄武质安山岩分别为 1.07~2.62、1.57、0.60~7.82。总的来说, NSMT 稀土配分模式更为平坦, SSMT 轻稀土富集程度最高, CMT 位于两者之间, 并不呈现出由南向北递减的变化, 这可能与地幔亏损/富集程度有关^[19]。

将样品微量元素数据进行原始地幔 (Primitive Mantle, PM) 标准化后做蜘蛛图解。图 3 中显示, 海槽中、南部岩石的微量元素分布模式相似, 均表现为富集 Ba、Rb、U、Pb 以及 Sr 等大离子亲石元素

表 2 马里亚纳海槽火山岩的主量元素和微量元素组成
Table 2 Major and trace element compositions of the volcanic rocks from the Mariana Trough

	样品	T2-1-01	T2-1-02*	T2-1-03*	T2-2-01	T2-2-02*	T2-3-01	T2-3-02*	T3-2-01	T3-2-02*	T3-2-03*
主量元素/%	SiO ₂	51.81	52.75	53.67	47.27	52.03	48.86	51.09	56.55	56.55	56.57
	TiO ₂	1.08	1.08	1.04	1.28	1.14	1.2	1.1	1.56	1.64	1.6
	Al ₂ O ₃	16.7	16.17	15.58	16.16	16.32	17.71	18.19	15.05	14.98	14.88
	Fe ₂ O ₃ T	9.15	9.36	9.21	9.46	8.42	8.33	8.02	10.09	10.3	10.12
	MnO	0.159	0.16	0.16	0.156	0.14	0.142	0.14	0.194	0.19	0.19
	MgO	5.59	5.67	5.63	6.62	6.94	6.24	6.67	2.74	2.78	2.83
	CaO	10.27	10.25	9.92	12.82	10.86	11.68	10.88	6.02	6.51	6.41
	Na ₂ O	3.09	2.98	2.99	3.78	2.74	3.35	2.9	3.85	4.02	3.97
	K ₂ O	0.634	0.6	0.49	0.548	0.5	0.529	0.44	0.93	0.86	0.82
	P ₂ O ₅	0.156	0.17	0.16	0.141	0.15	0.149	0.16	0.23	0.24	0.24
微量元素/ 10^{-6}	LOI	0.83	0.8	1.05	1.17	0.65	1.23	0.32	2.27	1.9	2.3
	总量	99.47	99.99	99.9	99.41	99.9	99.42	99.9	99.48	99.97	99.92
	Li	3.86	3.46	6.01	2.67	3.41	4.62	3.41	2.85	5.65	6.53
	Be	0.854	0.648	0.694	0.470	0.615	0.789	0.588	0.544	0.865	0.92
	Sc	29.4	33.5	33.4	27.4	35.6	21.4	30.2	27.9	22.7	25.4
	V	239	263	263	199	247	157	218	204	171	169
	Cr	24.5	30.2	29.7	165	244	23.4	217	184	1.83	1.78
	Co	25.4	33.2	32.9	20.4	33.6	16.8	31.7	22.9	18.8	19.2
	Ni	19.3	27.5	26.7	45.1	85.9	10.5	92.6	56.6	3.16	3.19
	Cu	33.1	42.3	42.8	30.1	55.8	21.4	41.8	30.0	20.9	21.2
微量元素/ 10^{-6}	Zn	62.3	68.9	69	47.1	62.3	82.3	58.8	50.9	101	107
	Ga	15.8	16.6	16.5	13.6	16.2	17.4	16.3	14.8	20	21.2
	Rb	13.8	9.93	9.94	4.39	6.73	7.43	6.07	5.05	8.95	8.89
	Sr	251	233	230	153	208	137	235	193	161	165
	Y	21.1	24.8	24.7	17.6	26.2	34.1	24.2	19.2	48.7	49.2
	Zr	79.0	81.3	80.8	67.4	93.1	133	91.1	76.1	161	159
	Nb	3.51	2.98	2.98	2.49	3.26	3.48	2.74	2.40	4.39	4.5
	Cs	0.215	0.148	0.141	0.069	0.0907	0.123	0.101	0.086	0.154	0.163
	Ba	129	64.9	64.5	27.5	39.6	51.8	46.1	36.2	70.4	71.5
	La	11.4	7.05	7.05	4.20	5.38	6.08	5.55	4.91	7.26	7.15
微量元素/ 10^{-6}	Ce	22.4	16	16	10.1	13.6	16.0	13.9	11.9	20.1	19.8
	Pr	3.07	2.41	2.41	1.57	2.14	2.56	2.18	1.84	3.24	3.26
	Nd	13.9	11.5	11.5	7.93	10.6	13.4	10.7	9.50	16.7	16.8
	Sm	3.50	3.3	3.25	2.47	3.18	4.24	3.12	2.79	5.3	5.5
	Eu	1.21	1.2	1.2	0.905	1.17	1.43	1.14	1.03	1.79	1.8
	Gd	3.69	3.95	3.92	2.75	3.94	4.74	3.76	3.06	6.93	6.78
	Tb	0.641	0.675	0.673	0.527	0.697	0.950	0.653	0.576	1.24	1.27
	Dy	3.75	4.16	4.14	3.21	4.33	6.01	4.09	3.55	7.9	7.74
	Ho	0.889	0.883	0.88	0.779	0.933	1.46	0.861	0.854	1.72	1.64
	Er	2.27	2.5	2.51	2.00	2.64	3.82	2.45	2.19	4.99	4.84
微量元素/ 10^{-6}	Tm	0.348	0.386	0.381	0.317	0.408	0.614	0.374	0.335	0.774	0.754
	Yb	2.20	2.36	2.35	1.99	2.52	3.88	2.32	2.11	4.82	4.69
	Lu	0.349	0.364	0.364	0.316	0.385	0.611	0.358	0.334	0.757	0.75
	Hf	1.96	2.03	2.02	1.74	2.24	3.19	2.18	1.94	4.09	4.12
	Ta	0.184	0.183	0.18	0.160	0.207	0.213	0.179	0.154	0.284	0.32
	Pb	1.73	1.07	1.05	1.37	0.856	1.39	0.989	1.03	1.39	1.4
	Th	1.29	0.668	0.675	0.357	0.427	0.476	0.47	0.427	0.537	0.505
微量元素/ 10^{-6}	U	0.443	0.426	0.241	0.139	0.243	0.197	0.184	0.162	0.233	0.243

注: *数据来自文献[16]。

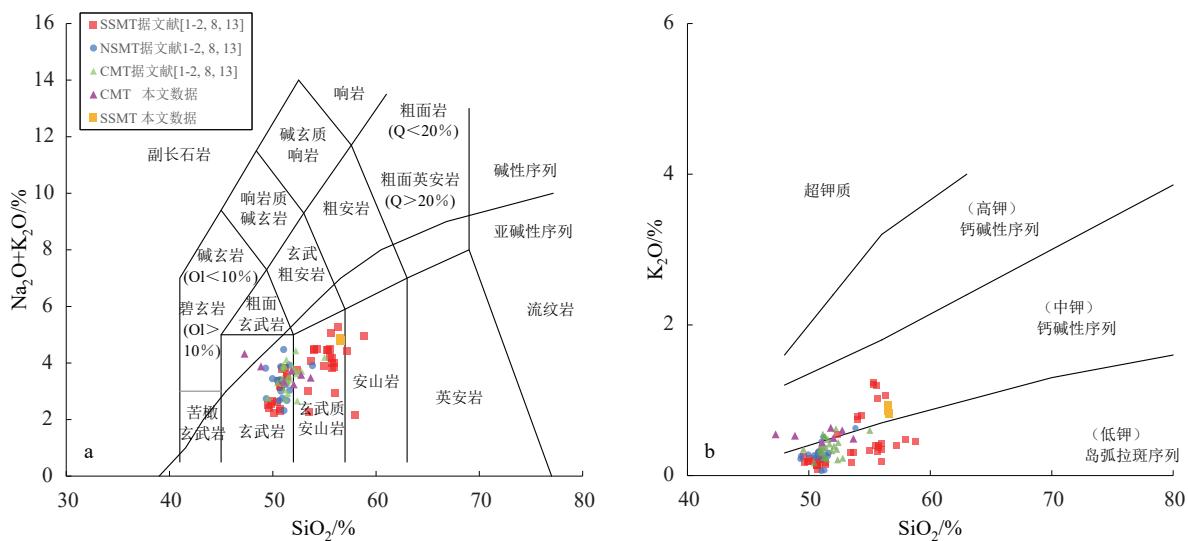


图 2 马里亚纳海槽火山岩分类图解

a: 马里亚纳海槽样品硅碱图, 底图改自文献 [17-18]; b: 马里亚纳海槽样品硅钾图, 底图改自文献 [18]。

Fig.2 Petrological diagrams of bulk rocks in the Mariana Trough

a: The TAS classification of Mariana Trough sample [(Na₂O+K₂O)(wt.%) vs SiO₂(wt.%)]; the base map is modified from references [17-18]; b: plot of K₂O vs SiO₂ [K₂O(wt.%) vs SiO₂(wt.%)]; the base map is modified from reference [18].

(LILE)而亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE), 并呈现出 K 的峰值等特征, 具有典型的岛弧玄武岩特征^[20]。

4 讨论

研究表明, H₂O 在岛弧与洋中脊具有不同的性质, 在洋中脊 H₂O 是“被动”加入的, 因此随着 H₂O 的加入, 地幔熔融程度降低, 但起始的熔融深度和熔融范围会增加^[21-22]。在岛弧中, H₂O 是“助熔剂”, 促进了地幔熔融程度, 但并不会增加地幔的起始熔融深度^[23-24]。在弧后盆地中, 其岩浆活动既具有类似洋中脊的绝热减压熔融过程的熔融模式, 又受到了俯冲作用的影响, 具有类似岛弧的加水熔融的熔融模式^[23,25-26]。因此研究俯冲流体在不同阶段弧后盆地的性质对更全面地了解俯冲板片的物质循环提供了帮助。

马里亚纳海槽作为正在活跃的弧后盆地, 具有显著的弧后扩张中心, 扩张速率由北向南逐渐增加, 而扩张速率作为控制洋中脊岩浆作用的主要因素, 与地幔熔融程度、熔融范围密切相关^[27]。进一步, 海槽与洋中脊不同, 其岩浆作用的强度不仅受扩张速率控制, 而且与俯冲作用有关^[28-32]。因此研究扩张速率与俯冲作用对马里亚纳海槽岩浆作用的影响, 对了解弧后扩张中心洋壳的增生模式具有重要意义。

4.1 地幔源区性质

弧后盆地岩浆作用不仅受到俯冲流体的控制, 而且其本身的源区地幔性质更是研究俯冲物质与地幔相互作用的基础^[1-2,23,33]。

4.1.1 地幔源区富集/亏损程度

高场强元素以及重稀土元素因为其主要赋存于一些稳定矿物中所以被视为俯冲不活动元素, 且无法通过俯冲作用进入源区地幔^[1-2,25,33]。尽管如此, Hf 由于俯冲沉积物中的变质锆石发生部分熔融导致 Hf 的释放和迁移, 所以 Hf 可能为俯冲活动元素^[34-38]。因此, 选择 Zr/Nb 比值来反映地幔的富集/亏损程度。

由简单批式熔融模型和 Zr、Nb 分配系数可得^[39]:

$$C_{\text{Zr}}^{\text{l}} / C_{\text{Nb}}^{\text{l}} = C_{\text{Zr}}^0 / C_{\text{Nb}}^0 \times [(0.9966F + D_{\text{Nb}}) / (0.967F + D_{\text{Zr}})] \quad (1)$$

式中, $C_{\text{Zr}}^{\text{l}} / C_{\text{Nb}}^{\text{l}}$ 代表原始岩浆的 Zr/Nb 比值, $C_{\text{Zr}}^0 / C_{\text{Nb}}^0$ 代表地幔的 Zr/Nb 比值, F 代表熔融程度, D 代表元素的分配系数。由公式(1)可知, 岩浆的 Zr/Nb 比值主要取决于地幔的 Zr/Nb 比值, 样品的 Zr/Nb 比值可以近似地作为源区地幔的 Zr/Nb 比值。

从 Zr/Nb 比值与纬度变化关系(图 4)可以看出, 由 SSMT 到 NSMT 有一个明显的先升高再降低的趋势, NSMT 到 CMT 再逐渐下降至 18°N 左右, 向北部缓慢上升, 前人认为, 这可能与海槽由南向北的

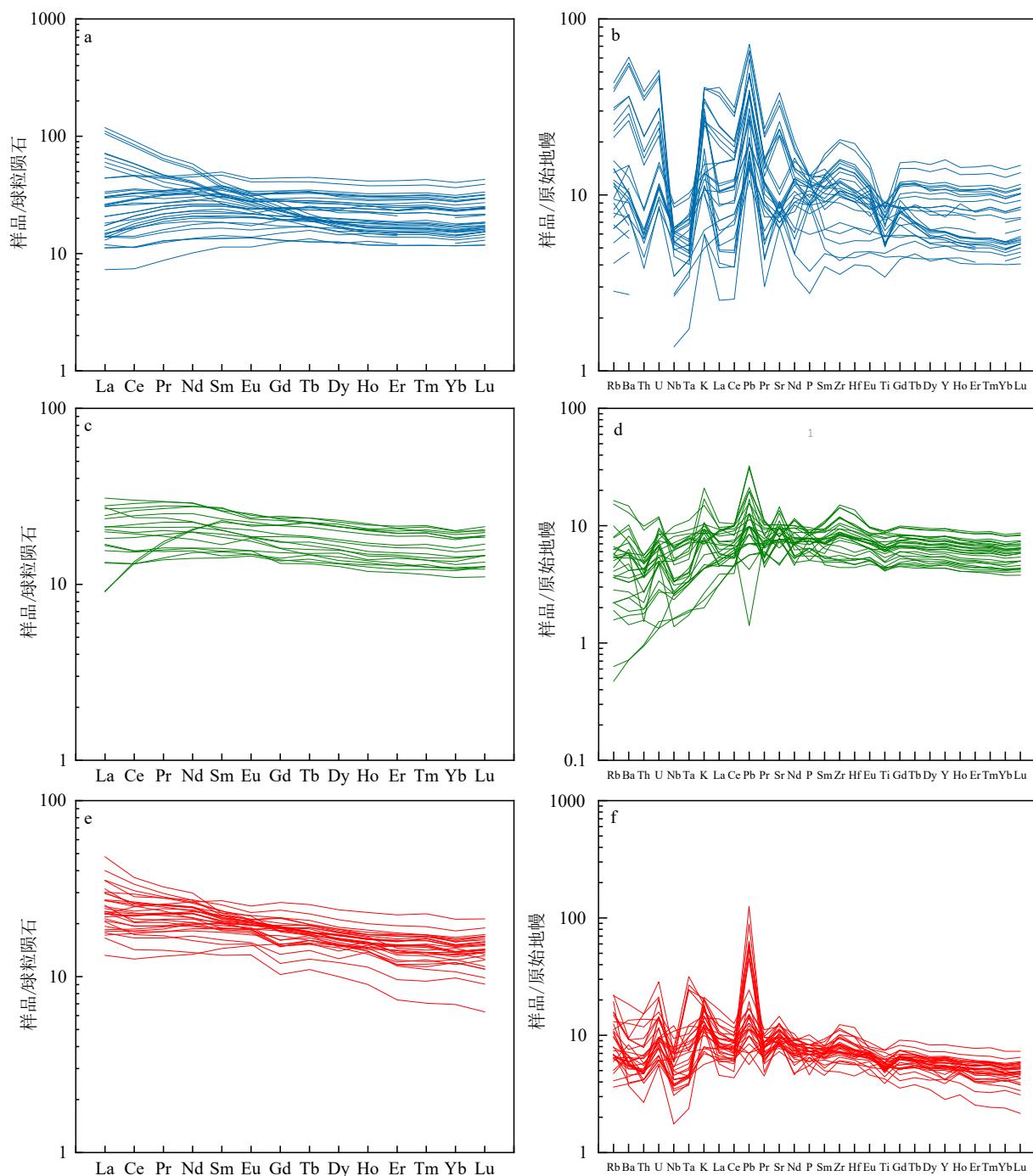


图 3 马里亚纳海槽火山岩原始地幔标准化的微量元素蛛网图 (a, c, e) 和球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图 (b, d, f)
标准化数据引自文献 [19], 本文研究区域的前人微量元素数据据文献 [1-2,8,13]。

Fig.3 Trace element of volcanic rocks from the Mariana Trough (a,c,e) and REE distribution patterns from the Mariana Trough (b,d,f)

Normalized data are from reference [19]. The previous trace element data in this study area are from the reference [1-2,8,13].

扩张有关^[2,40], 且 SSMT 地幔最为亏损, CMT 地幔较 N-MORB 更为富集, NSMT 位于二者之间, 展现了明显的地幔不均一性。

4.1.2 地幔熔融程度

目前了解地幔的熔融程度主要有两种方法, 一种通过上地幔熔融残留物的化学成分进行直接计算^[39,41], 另一种是利用地幔熔融产物的化学组成进

行反演^[39]。本文样品的绝大多数为玄武岩和玄武质安山岩等中-基性岩石, 因此需要进行反演计算。在弧后盆地, 由于俯冲作用的影响, 对于地幔熔融程度的计算普遍选择俯冲过程中迁移能力较弱的弱不相容元素(如 Ti 和 Yb 等)。本文选择了 Ti 元素对地幔熔融程度进行计算。

前人大多是利用 Fe_8/Ti_8 等来对地幔熔融程度

进行计算, 但是有些学者认为, 在 $MgO=8\%$ 时不能代表原始的地幔组成, 需要进一步的校正^[42]。因此本文采用与 $Fo=90$ (即橄榄石 $Mg/(Mg+Fe)$ 的比值)平衡时的原始岩浆的 Ti 和 Fe 元素的含量用于计算。

计算之前, 首先需要将样品校正到原始岩浆的成分, 本文选用 PRIMELT3MEGA.XLSM 软件^[43]进行校正, 首先选择 $MgO>6.5\%$ 的样品, 这一步是尽量消除斜长石和钛铁氧化物结晶分异的影响, 之后计算出与 $Fo=90$ 时平衡的原始岩浆的组成。最后利用批式熔融公式 $F=[(C^0_{Ti}/C^1_{Ti})*D_{Ti}]/(1-D_{Ti})$ 计算得到部分熔融程度, 其中 C^0_{Ti} 代表地幔源区 Ti 的含量, C^1_{Ti} 代表原始岩浆 Ti 的含量, D_{Ti} 代表元素 Ti 的分配系数。根据上述 Zr/Nb 比值, 相对 N-MORB 更为亏损的 SSMT 和部分 NSMT 选择利用 Workman 和 Hart^[44] 的更为亏损的亏损地幔中 Ti 的含量 ($C^0_{Ti}=650\times10^{-6}$), 其余选择正常的亏损地幔值 ($C^0_{Ti}=716.3\times10^{-6}$), 从而消除了地幔不均一的影响。

沿扩张中心, 在熔融程度-纬度图解中(图 5), 部分熔融程度并不随着扩张速率的增加而增加, 这说明马里亚纳海槽的地幔熔融程度不仅受扩张速率的控制, 而且可能还存在其他的影响因素, 猜测这可能与俯冲作用有关。

4.1.3 地幔熔融深度

前人认为, 利用轻重稀土的配分模式可以大致区分岩浆的起源深度^[45-46], 在球粒陨石标准化 $(Tb/Yb)_N-(La/Sm)_N$ 图解中(图 6), 本研究中所有的样品均位于尖晶石橄榄岩范围内 $(Tb/Yb)_N<1.5$ 。

Fe 由于具有较大的原子量, 长期处于深源岩浆中, 难以迁移, 所以 $Fe_{(Fo90)}$ 可以近似反映地幔熔融深度^[47-49]。有的学者认为, 靠近弧侧的地幔, 受流体影响, 起始熔融深度增大^[50]; 还有的学者认为, 靠近弧侧的地幔, 受到了板片冷传导的影响, 起始熔融深度降低^[23,39]。利用 $Fe_{(Fo90)}$ -纬度作图(图 7), 我们可以观察到, 由于海槽由南到北, 扩张中心到岛弧的距离呈现先增加后减小的趋势(18°N 附近海槽最宽), $Fe_{(Fo90)}$ 并没有随着扩张中心与岛弧距离的变化而变化, 而是呈现出升高—降低—升高的一个趋势, 且越靠近岛弧, 起始熔融深度越大。

4.1.4 地幔熔融程度与熔融深度的关系

利用 $Ti_{(Fo90)}-Fe_{(Fo90)}$ 作图(图 8), MNT、SSMT 和 NSMT 的样品在 $Ti_{(Fo90)}-Fe_{(Fo90)}$ 图解上具有一定的相关性。除部分 18°N 附近样品, CMT 地区和 SSMT 地区 $Ti_{(Fo90)}-Fe_{(Fo90)}$ 具有较好的负相关关系, 说明随着熔融深度的增加, 熔融程度越大, 接近岛弧的熔融模式, 深度的增加可能是因为俯冲流体的

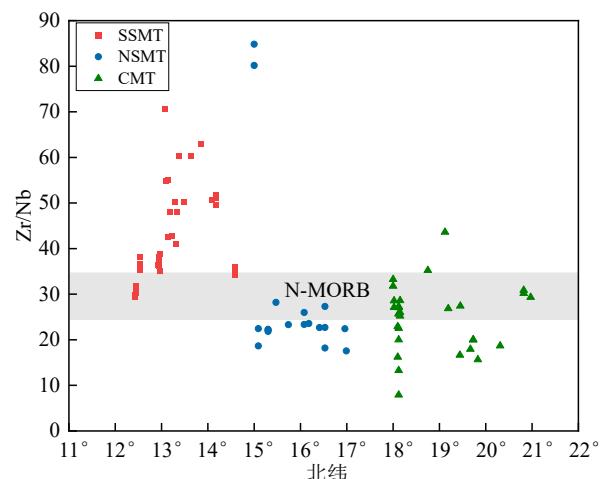


图 4 马里亚纳海槽火山岩的 Zr/Nb 比值随纬度变化图解
Fig.4 Latitude variation of Zr/Nb ratios in volcanic rocks from the Mariana Trough

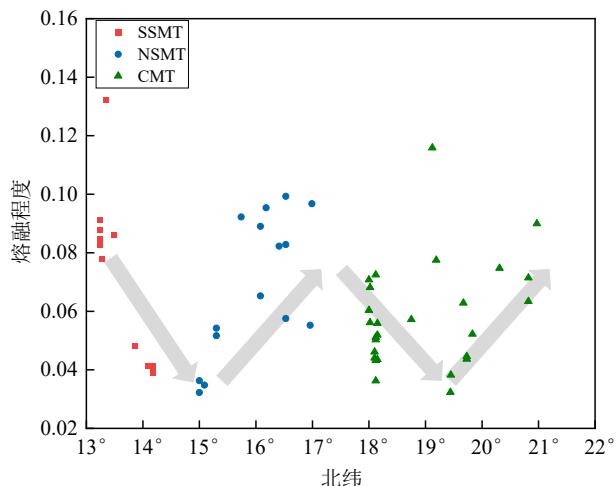


图 5 马里亚纳海槽火山岩熔融程度随纬度变化图解
Fig.5 Latitude variation of volcanic melting degree in the Mariana Trough

加入使固相线温度降低所致^[50]。在 NSMT 地区, 部分的样品随着熔融深度的增加, 其熔融程度越小, 且熔融程度与熔融深度呈现负相关, 为典型的洋中脊地幔熔融模式^[51]。前人已经证明, 马里亚纳海槽 18°N 地区, 由于距离俯冲带距离较远, 受到的俯冲作用较弱, 甚至部分样品不受到俯冲作用的影响, 所以具有洋中脊的特征。但 NSMT 作为靠近岛弧的弧后盆地, 为何其熔融模式具有洋中脊的性质, 我们将在下面进行讨论。

4.2 俯冲板块的影响

前人认为, 俯冲带岩浆作用是源区地幔性质与俯冲作用共同影响的结果^[2,23,33,39]。因此, 研究俯冲物质的加入程度与性质, 对了解俯冲带岩浆作用具有重要意义。

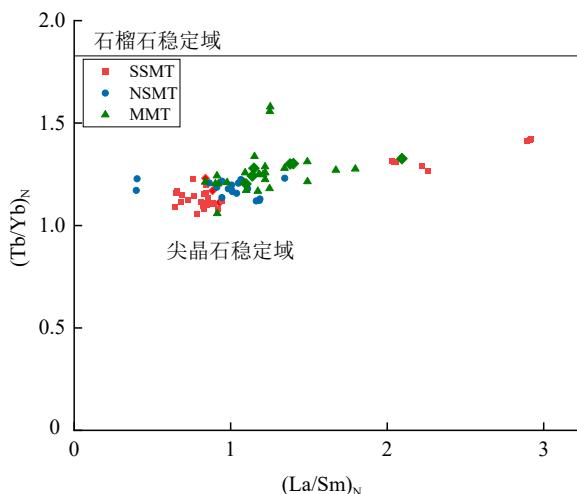


图 6 马里亚纳海槽火山岩 $(\text{Tb}/\text{Yb})_N$ - $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 图解
底图改自文献 [46], 分界线数据引自文献 [45]。

Fig.6 $(\text{Tb}/\text{Yb})_N$ - $(\text{La}/\text{Sm})_N$ diagram of volcanic rocks in the Mariana Trough

The base map is changed from reference [46]. Data of the demarcation line are from the reference [45].

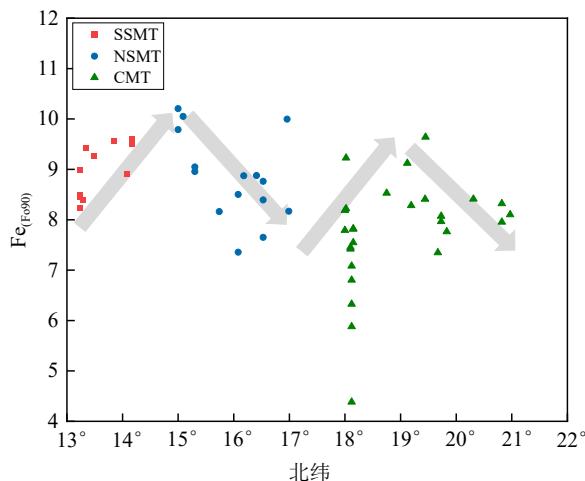


图 7 马里亚纳海槽火山岩熔融深度随纬度变化图解
Fig.7 Diagram of latitudinal variation of melting depth of volcanic rocks in the Mariana Trough

4.2.1 俯冲组分的识别

洋壳在俯冲过程中,发生脱水和部分熔融等变质作用,而太平洋板块拥有古老的洋壳,在俯冲过程中只发生脱水反应,基本不发生部分熔融作用^[52-54]。

Pb、Ba 均属于流体迁移元素, Ce、Th 均属于熔体迁移元素,因此 Ce/Pb 与 Ba/Th 比值均用于指示富水流体的微量元素比值^[2,3]。研究区样品的 Ce/Pb 与 Ba/Th 比值均高于 N-MORB,对于 SMT 样品来说,它们具有相对 N-MORB 更为亏损的地幔,因此 Ce/Pb 与 Ba/Th 均继承于俯冲流体。对于 CMT 区域来说,虽然 Ce/Pb 与 Ba/Th 比值较 N-MORB 更

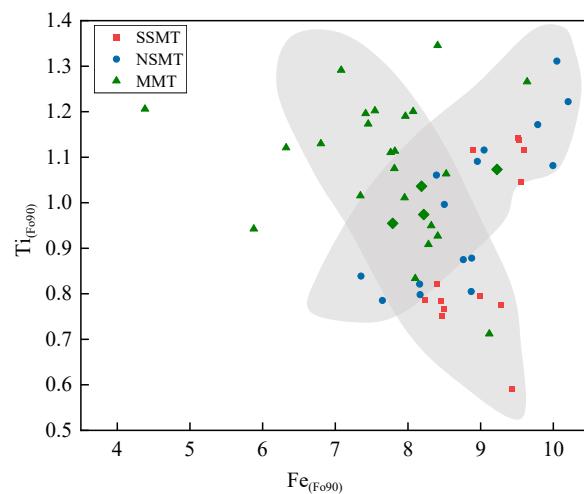


图 8 马里亚纳海槽火山岩 $\text{Ti}_{(\text{Fo}90)}$ - $\text{Fe}_{(\text{Fo}90)}$ 图解
Fig.8 $\text{Ti}_{(\text{Fo}90)}$ - $\text{Fe}_{(\text{Fo}90)}$ diagram of volcanic rocks in the Mariana Trough

为富集,但是除了俯冲流体外,源区的地幔性质也有可能导致 Pb 和 Ba 的富集,该部分将在下面进行讨论。在 Ce/Pb 与 Ba/Th 比值图中(图 9),两者都显示出较好的相关性,且具有相同的俯冲端元。

除了洋壳外,俯冲沉积物也是俯冲带的重要组成部分。在俯冲过程中,沉积物不仅发生脱水反应,富集 LILE,而且发生了部分熔融作用,富集 Th 和 LREE 等在富水流体中溶解度低的元素^[55-57]。

例如 La/Sm 与 Th/Nd 等熔体迁移元素之间比值通常被用于指示富水熔体。本文与前文数据一致,绝大多数样品均受到了富水熔体的影响且 CMT 受到了更强烈的富水熔体的影响。同时, SMT 存在较 CMT 更为富集的个别样品,且发现这些样品全部位于 SMT 南部的快速扩张区域,说明该区域存在俯冲沉积物的高程度熔融。在 Ba/Th-Ba/Nb 图解中(图 10),也同样支持上述观点,在 Ba/Th 比值相同时,SSMT 的 Ba/Nb 值变化范围很大且不具有明显的连续性,说明该区域可能存在一个以富水熔体为主的端元。

4.2.2 俯冲流体的加入程度

Pearce^[13]认为利用微量元素之间的比值可以计算出俯冲物质加入源区地幔的程度。首先他利用西菲律宾海盆始新世 MORB 和 OIB 的样品,来定义一个未受明显俯冲作用影响的地幔,之后总结出关于源区元素比值之间的经验公式:

$$\log(\text{Ba}/\text{Yb}) = 1.09 \log(\text{Ta}/\text{Yb}) + 1.98 \quad (2)$$

$$\log(\text{Th}/\text{Yb}) = 1.07 \log(\text{Ta}/\text{Yb}) + 0.12 \quad (3)$$

$$\log(\text{Nb}/\text{Yb}) = 1.05 \log(\text{Ta}/\text{Yb}) + 1.23 \quad (4)$$

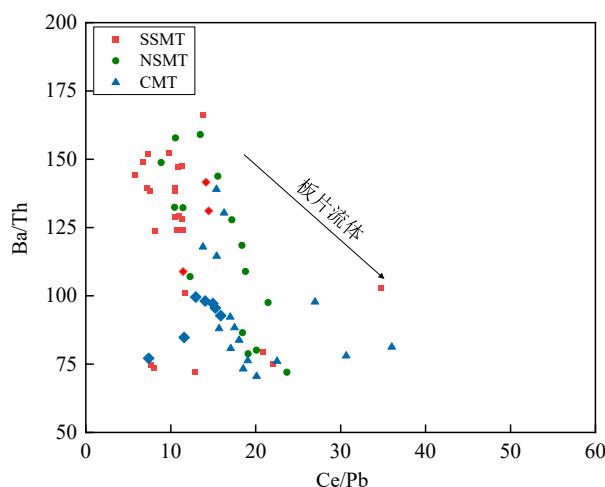


图 9 马里亚纳海槽火山岩 Ce/Pb-Ba/Th 图解

Fig.9 Ce/Pb-Ba/Th diagram of volcanic rocks in the Mariana Trough

$$\log(\text{Ba}/\text{Yb}) = 1.07 \log(\text{Th}/\text{Yb}) + 1.97 \quad (5)$$

若 Ta 与 Yb 在俯冲作用下不发生改变, 那么就可以利用 Ta、Yb 的值来计算没有发生俯冲作用下样品应该具有的 Ba、Th 等俯冲活动元素的值, 即:

$$(\text{Ba}/\text{Yb})_e = 10^{(1.09 \log(\text{Ta}/\text{Yb}) + 1.98)} \quad (6)$$

之后利用实测的数据减去计算出来的没有俯冲影响的数据, 再除以实测的数据我们就可以知道由俯冲添加的该元素在样品中所占的百分含量为:

$$X_{\text{Ba}}^{\text{SZ}} = [(\text{Ba}/\text{Yb})_o - (\text{Ba}/\text{Yb})_e]/(\text{Ba}/\text{Yb})_o \quad (7)$$

式中, e 代表样品中没经历过俯冲的元素比值, o 代表样品实测的值, $X_{\text{Ba}}^{\text{SZ}}$ 代表俯冲添加的 x 元素所占的质量分数近似为俯冲组分的相对浓度。

利用富水流体添加的 Ba、富水熔体添加的 Th 与纬度作图(图 11), 可以得到俯冲作用影响程度沿

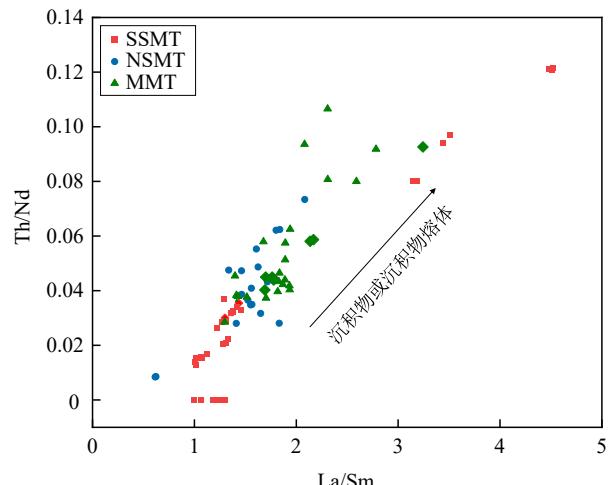


图 10 马里亚纳海槽火山岩 La/Sm-Th/Nd 和 Ba/Th-Ba/Nb 图解

Fig.10 La/Sm-Th/Nd and Ba/Th-Ba/Nb diagram of volcanic rocks in the Mariana Trough

纬度的变化, 总体呈现从南到北降低的趋势, 但在 15°N 附近, 存在一个异常区, 且 SSMT、NSMT 靠近 15°N 附近俯冲作用逐渐变弱。

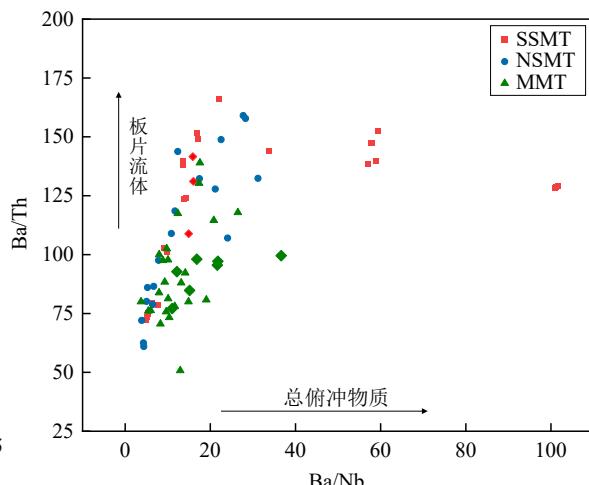
4.2.3 俯冲流体与源区地幔的相互作用

由上述多个地球化学指标-纬度图可以发现, $\text{Ti}_{(\text{Fo}90)}$ 与 Ba(富水流体)、Th(富水熔体)在研究区域具有良好的相关性, 说明了俯冲作用是影响马里亚纳海槽地幔熔融程度的关键因素。

利用 $\text{Ti}_{(\text{Fo}90)}$ 、 $\text{Fe}_{(\text{Fo}90)}$ 与 Ba(富水流体)作图(图 12)。在 $\text{Fe}_{(\text{Fo}90)}$ -Ba 图解中, Ba 为负数时, 二者呈正相关关系, 为正数时, 二者相关性不明显。 $\text{Ti}_{(\text{Fo}90)}$ -Ba 图解中, Ba 为负数时, 二者呈正相关关系; 为正数时, 二者负相关。 $\text{Fe}_{(\text{Fo}90)}$ 越高, 起始熔融深度越深; $\text{Ti}_{(\text{Fo}90)}$ 越高, 地幔熔融程度越低。当 Ba 为负数时, 随着俯冲流体的加入, 熔融深度逐渐增加, 熔融程度减小; Ba 为正数时, 随着俯冲流体的加入, 熔融程度增加, 与熔融深度不相关。假设当 Ba 为负数时, 代表洋中脊的熔融模式, 为正数时, 代表岛弧的熔融模式, 可以观察到与前人在洋中脊与岛弧对 H_2O 性质的研究一致, 说明马里亚纳海槽既存在洋中脊的熔融模式又存在岛弧的熔融模式, 靠近 15°N 与 18°N 时, 俯冲组分逐渐变少, 地幔熔融程度逐渐减弱, 且具有高的地幔熔融深度, 进一步说明马里亚纳海槽火山岩的变化可能是由于类似 N-MORB 的地幔源区与类似岛弧的地幔源区混合造成的。

5 结论

(1) 马里亚纳海槽中、南部火山岩主要为一套中低钾钙碱性系列岩石, 按演化程度排序为 SSMT>



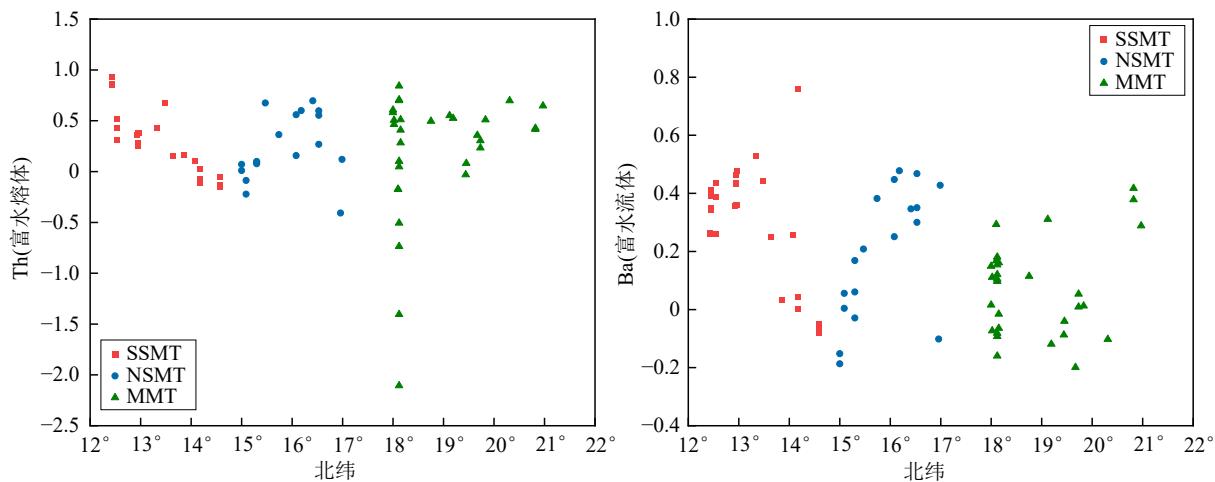


图 11 马里亚纳海槽俯冲流体加入程度随纬度变化图解
Fig.11 Latitudinal variation of subduction fluid addition in the Mariana Trough

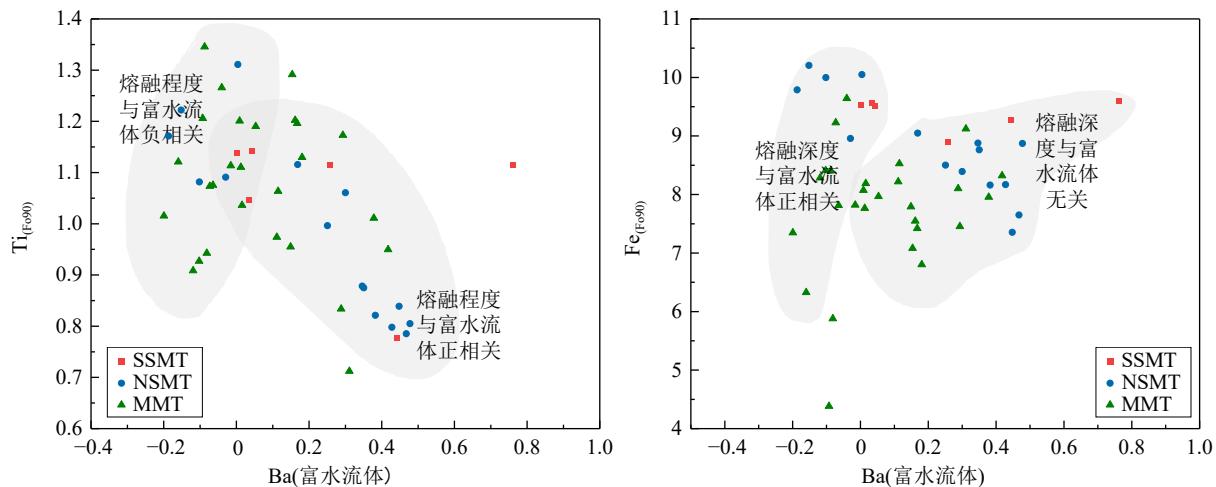


图 12 马里亚纳海槽火山岩 $Ti_{(Fo90)}$ -Ba (富水流体) 与 $Fe_{(Fo90)}$ -Ba (富水流体) 图解
Fig.12 $Ti_{(Fo90)}$ -Ba (water-rich fluid) and $Fe_{(Fo90)}$ -Ba (water-rich fluid) diagram of volcanic rocks in the Mariana Trough

CMT>NSMT。与洋中脊玄武岩相比,海槽火山岩富集 LILE、LREE 等,亏损 HFSE、HREE 等。

(2) 地幔熔融程度从 SSMT 到 CMT 并不呈现连续的下降,而是在 15°N 附近存在一个异常区,靠近异常区地幔熔融程度变低,与前人认为的由南向北地幔熔融程度逐渐变小不同。此外,可以观察到异常区附近地幔熔融程度与地幔熔融深度呈现负相关,表现出与洋中脊相似的地幔熔融模式,且远离异常区的样品则更接近岛弧的熔融模式。

(3) 利用微量元素之间的比值对俯冲物质进行识别,发现 SSMT、NSMT、CMT 具有相同的俯冲端元,且 SSMT 可能还存在一个富集富水熔体的端元。进一步观察到海槽 15°N、18°N 附近俯冲组分的影响变弱。

(4) 在俯冲加入的 Ba 为正值时,俯冲流体加入程度与地幔熔融程度负相关,与起始熔融深度正相

关。在俯冲加入的 Ba 为正值时,俯冲流体加入程度与地幔熔融程度正相关,与起始熔融深度无关。同时,俯冲流体是控制弧后盆地地幔熔融程度的重要因素,且弧后盆地存在两种各异的地幔熔融模式。

(5) 马里亚纳海槽中、南部火山岩的变化可能是由于类似 N-MORB 的地幔源区与类似岛弧的地幔源区混合造成的,且马里亚纳海槽中、南部地幔熔融程度受地幔富集/亏损程度、俯冲流体加入程度、扩张速率等因素的共同影响。

致谢: 感谢 HOBAB 5 航次期间“科学”号所有船队员为样品采集所作出的贡献。

参考文献 (References)

- [1] Fryer P. Basaltic glasses from the Mariana Trough [J]. Init. Rep. Deep

- Sea Drill. Proj., 1981, 60: 601-609.
- [2] Pearce J A, Stern R J. Origin of back-arc basin magmas: trace element and isotope perspectives [J]. Geophysical Monograph-American Geophysical Union, 2006, 166: 63.
- [3] Yan Q, Shi X. Petrologic perspectives on tectonic evolution of a nascent basin (Okinawa Trough) behind Ryukyu Arc: A review [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(4): 1-12.
- [4] Taylor B, Martinez F. Back-arc basin basalt systematics [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210(3-4): 481-497.
- [5] Yan Q, Zhang P, Metcalfe I, et al. Geochemistry of axial lavas from the mid-and southern Mariana Trough, and implications for back-arc magmatic processes [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2019, 113(6): 803-820.
- [6] 张平阳, 鄢全树. 马里亚纳海槽玄武岩中斜长石矿物化学及意义[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(02): 234-248. [ZHANG Pingyang, YAN Quanshu. Compositions of Plagioclase Hosted by Basaltic Rocks Form the Mariana Trough and Their Petrogenesis Significances [J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(02): 234-248.]
- [7] Lai Z, Zhao G, Han Z, et al. The magma plumbing system in the Mariana Trough back-arc basin at 18° N [J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 180: 132-139.
- [8] Newman S, Stolper E, Stern R. H₂O and CO₂ in magmas from the Mariana arc and back arc systems [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2000, 1(5).
- [9] 孙海青, 高爱国, 倪培, 张德玉. 马里亚纳海槽玄武岩中熔融包裹体的初步研究[J]. *海洋科学进展*, 2004(03): 292-298. [SUN Haiqing, GAO Aiguo, NI Pei, et al. A Preliminary study on melt inclusions in basalts from the Mariana trough [J]. *Advances in Marine Science*, 2004(03): 292-298.]
- [10] Karig D E, Anderson R N, Bibee L D. Characteristics of back arc spreading in the Mariana Trough [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1978, 83(B3): 1213-1226.
- [11] Stern R J, Fouch M J, Klemperer S L. An overview of the Izu-Bonin-Mariana subduction factory [J]. GEOPHYSICAL MONOGRAPH-AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, 2003, 138: 175-222.
- [12] Kato T, Beavan J, Matsushima T, et al. Geodetic evidence of back-arc spreading in the Mariana Trough [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12).
- [13] Pearce J A, Stern R J, Bloomer S H, et al. Geochemical mapping of the Mariana arc - basin system: Implications for the nature and distribution of subduction components [J]. *Geochemistry, geophysics, geosystems*, 2005, 6(7).
- [14] Martinez F, Fryer P, Baker N A, et al. Evolution of backarc rifting: Mariana Trough, 20–24 N [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B3): 3807-3827.
- [15] Martinez F, Fryer P, Becker N. Geophysical characteristics of the southern Mariana Trough, 11 50' N–13 40' N [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B7): 16591-16607.
- [16] Li X, Yan Q, Zeng Z, et al. Across-arc variations in Mo isotopes and implications for subducted oceanic crust in the source of back-arc basin volcanic rocks [J]. *Geology*, 2021, 49(10): 1165-1170.
- [17] BAS M J L E, Maitre R W L, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27(3): 745-750.
- [18] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian journal of earth sciences*, 1971, 8(5): 523-548.
- [19] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [20] Niu Y, O'Hara M J. Origin of ocean island basalts: A new perspective from petrology, geochemistry, and mineral physics considerations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B4).
- [21] Asimow P D, Langmuir C H. The importance of water to oceanic mantle melting regimes [J]. *Nature*, 2003, 421(6925): 815-820.
- [22] Cushman B, Sinton J, Ito G, et al. Glass compositions, plume-ridge interaction, and hydrous melting along the Galápagos Spreading Center, 90.5°W to 98°W [J]. John Wiley and Sons, Ltd, 2004(8).
- [23] Langmuir C H, Bezios A, Escrig S, et al. Chemical systematics and hydrous melting of the mantle in back-arc basins [J]. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 2006, 166: 87.
- [24] Parman S W, Grove T L, Kelley K A, et al. Along-arc variations in the pre-eruptive H₂O contents of Mariana arc magmas inferred from fractionation paths [J]. *Journal of Petrology*, 2011, 52(2): 257-278.
- [25] Stolper E, Newman S. The role of water in the petrogenesis of Mariana trough magmas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 121(3-4): 293-325.
- [26] Kelley K A, Plank T, Newman S, et al. Mantle melting as a function of water content beneath the Mariana Arc [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(8): 1711-1738.
- [27] Niu Y. Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges: evidence from abyssal peridotites [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(8): 1047-1074.
- [28] Turner I M, Peirce C, Sinha M C. Seismic imaging of the axial region of the Valu Fa Ridge, Lau Basin—The accretionary processes of an intermediate back-arc spreading ridge [J]. *Geophysical Journal International*, 1999, 138(2): 495-519.
- [29] Martinez F, Taylor B. Mantle wedge control on back-arc crustal accretion [J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 417-420.
- [30] Martinez F, Taylor B. Controls on back-arc crustal accretion: insights from the Lau, Manus and Mariana basins [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2003, 219(1): 19-54.
- [31] Arai R, Dunn R A. Seismological study of Lau back arc crust: Mantle water, magmatic differentiation, and a compositionally zoned basin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 390: 304-317.
- [32] Jacobs A M, Harding A J, Kent G M. Axial crustal structure of the Lau back-arc basin from velocity modeling of multichannel seismic data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 259(3-4): 239-255.
- [33] Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas [J]. *Annual review of Earth and planetary sciences*, 1995, 23: 251-286.
- [34] Woodhead J D, Herdt J M, Davidson J P, et al. Hafnium isotope evidence for ‘conservative’ element mobility during subduction zone processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 331-346.
- [35] Duggen S, Portnyagin M, Baker J, et al. Drastic shift in lava geochem-

- istry in the volcanic-front to rear-arc region of the Southern Kamchatkan subduction zone: Evidence for the transition from slab surface dehydration to sediment melting [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71 (2) : 452-480.
- [36] Todd E, Gill J B, Wysoczanski R J, et al. Sources of constructional cross-chain volcanism in the southern Havre Trough: New insights from HFSE and REE concentration and isotope systematics [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(4).
- [37] Yogodzinski G M, Vervoort J D, Brown S T, et al. Subduction controls of Hf and Nd isotopes in lavas of the Aleutian island arc [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 300 (3-4) : 226-238.
- [38] Nebel O, Vroon P Z, van Westrenen W, et al. The effect of sediment recycling in subduction zones on the Hf isotope character of new arc crust, Banda arc, Indonesia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 303 (3-4) : 240-250.
- [39] 李正刚. 西南太平洋Lau盆地后岩浆作用及地幔动力学研究[D]. 浙江大学, 2015. [LI Zhenggang. Magmatism and mantle dynamics in the Lau back-arc basin, SW Pacific [D]. Zhejiang University, 2015.]
- [40] 张平阳. 马里亚纳海槽玄武岩特征及对弧后盆地岩浆作用的指示意义[D]. 国家海洋局第一海洋研究所, 2017. [ZHANG Pingyang. Petrological and Geochemical Studies on Mariana Trough lavas: Implications for Back-arc Basin Magmatic Processes [D]. The First Institute of Oceanography, 2017.]
- [41] Hellebrand E, Snow J E, Dick H J B, et al. Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites [J]. *Nature*, 2001, 410 (6829) : 677-681.
- [42] Niu Y, O'Hara M J. Global correlations of ocean ridge basalt chemistry with axial depth: a new perspective [J]. *Journal of Petrology*, 2008, 49 (4) : 633-664.
- [43] Herzberg C, Asimow P D. PRIMELT 3 MEGA. XLSM software for primary magma calculation: peridotite primary magma MgO contents from the liquidus to the solidus [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16 (2) : 563-578.
- [44] Workman R K, Hart S R. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 231 (1-2) : 53-72.
- [45] Wang K, Plank T, Walker J D, et al. A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B1): ECV 5-1-ECV 5-21.
- [46] 李敏. EPR和SWIR玄武岩岩石地球化学特征对比及其对岩浆过程的指示意义[D]. 中国海洋大学, 2014. [LI Min. Petrogeochemical characteristics comparison and implications for magmatic processes of the MORBs between EPR and SWIR [D]. Ocean University of China, 2014.]
- [47] Niu Y, Hekinian R. Spreading-rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges [J]. *Nature*, 1997, 385 (6614) : 326-329.
- [48] Niu Y, Waggoner D G, Sinton J M, et al. Mantle source heterogeneity and melting processes beneath seafloor spreading centers: the East Pacific Rise, 18–19°S [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101 (B12) : 27711-27733.
- [49] Niu Y, Batiza R. An empirical method for calculating melt compositions produced beneath mid ocean ridges: Application for axis and off axis (seamounts) melting [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96 (B13) : 21753-21777.
- [50] Kelley K A, Plank T, Grove T L, et al. Mantle melting as a function of water content beneath back-arc basins [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B9).
- [51] Emily M. Klein, Charles H. Langmuir. Local versus global variations in ocean ridge basalt composition: A reply [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B4).
- [52] Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust [J]. *Earth and planetary science letters*, 1994, 121 (1-2) : 227-244.
- [53] Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone [J]. *Contributions to mineralogy and petrology*, 1996, 123 (3) : 263-281.
- [54] Cai Y, LaGatta A, Goldstein S L, et al. Hafnium isotope evidence for slab melt contributions in the Central Mexican Volcanic Belt and implications for slab melting in hot and cold slab arcs [J]. *Chemical Geology*, 2014, 377: 45-55.
- [55] Plank T, Langmuir C H. Tracing trace elements from sediment input to volcanic output at subduction zones [J]. *Nature*, 1993, 362 (6422) : 739-743.
- [56] Elliott T, Plank T, Zindler A, et al. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102 (B7) : 14991-15019.
- [57] Elliott T. Tracers of the slab [J]. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 2003, 138: 23-46.