

张保辉, 曾志刚, 曾志斌, 等. 马里亚纳海槽火山岩中斜长石熔体包裹体的均一温度及其对岩浆演化的指示意义[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(2): 53-67.

ZHANG Baohui, ZENG Zhigang, ZENG Zhibin, et al. Homogeneous temperature of plagioclase melt inclusions in volcanic rocks from the Mariana Trough and its implication to magma evolution[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(2): 53-67.

马里亚纳海槽火山岩中斜长石熔体包裹体的均一温度及其对岩浆演化的指示意义

张保辉^{1,2,3}, 曾志刚^{2,3*}, 曾志斌⁴, 杨小双⁴, 王晓媛², 齐海燕², 殷学博², 陈帅², 陈祖兴^{2,3}, 韩超¹

(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, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071;

3 中国科学院大学海洋学院, 青岛 266400; 4 河南省第五地质勘查院, 郑州 450001)

摘要: 马里亚纳海槽南部安山岩 (H5-T3-2) 中斜长石结晶温度主要集中在 1 050~1 150 °C, 未受到后期岩浆演化的影响。马里亚纳海槽中部玄武质安山岩 (H5-T1-3) 中斜长石结晶温度主要集中在 900~1 050 °C; 英安岩 (H5-T1-1) 中斜长石结晶温度主要集中在 1 050~1 150 °C。马里亚纳海槽 18°N 附近玄武岩 (H5-T2-2、H5-T2-3) 斜长石中熔体包裹体的均一温度主要集中在 1 050~1 150 °C, 并呈连续降温趋势, 只有少部分在 1 000~1 050 °C 的较低温度结晶, 边缘部 An 值骤降则反映岩浆喷出快速冷却的过程; 玄武质安山岩 (H5-T2-1) 斜长石中熔体包裹体的均一温度具有“双峰”式特征, 主要分布在 850~950 °C 和 1 050~1 150 °C 2 个温度范围。结合斜长石的环带特征及其 An 值变化特征, 分析结果表明, 该斜长石有 2 个明显不同的结晶阶段, 发生了岩浆混合作用, 且在马里亚纳海槽浅部可能存在温度约为 850~950 °C 的岩浆房, 岩浆到达浅部岩浆房后发生岩浆混合, 最终喷出洋底。马里亚纳海槽 18°N 附近的岩浆演化过程较为复杂, 发生了不同周期的岩浆演化过程。

关键词: 马里亚纳海槽; 斜长石; 熔体包裹体; 均一温度; 岩浆演化

中图分类号: P736.22+1; Q915

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.038

0 引言

熔体包裹体^[1-2] 在发生岩浆活动时被保存在海底热液区的火山岩斑晶矿物中, 熔体包裹体演化过

收稿日期: 2024-02-25

资助项目: 国家自然科学基金“深海界面过程和化能生态系统”“冲绳海槽与马里亚纳海槽的热液烟羽体特征及其对流体演化的指示”“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”(42221005, 42330409, 91958213); 中国科学院战略性先导科技专项子课题“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(ts201511061)

第一作者: 张保辉(1999—), 男, 在读硕士, 主要从事海底岩石学方面的研究工作. E-mail: 1148969010@qq.com

* 通讯作者: 曾志刚(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海底热液活动及成矿方面的研究工作. E-mail: zgzen@qdio.ac.cn

程相对独立, 不易受到岩浆混合、分离结晶等作用的影响^[3]。通过保存原始岩浆的数据, 可以更深入地研究岩浆的性质、演化历程以及岩浆源区特征^[4]。已知熔体包裹体在斜长石斑晶中发育, 而斜长石是海底热液区火山岩中主要的造岩矿物^[5], 其化学成分变化可能记录了岩浆形成、上升运移直至喷出地表固结成岩等全部岩浆过程中的重要信息^[6]。

马里亚纳海槽属于洋内边缘海盆, 大陆地壳及陆源物质对其干扰较小^[7]。马里亚纳俯冲带是典型“洋-洋”俯冲作用产物的代表, 近年来, 国内外学者主要对马里亚纳海槽的火山岩全岩及矿物开展了研究^[8-10], 由于受到后期不同岩浆作用的影响, 海槽内岩石的地球化学组成发生不同程度的改变, 造成对原始岩浆的性质及演化过程的研究会有一定的偏差^[10-17]。通过测定火山岩中熔体包裹体的均一温度, 可以了解熔体在形成时岩浆房的温度状态,

进而分析岩浆熔体的性质,探讨岩浆的演化过程^[18],但针对马里亚纳海槽内火山岩中熔体包裹体的相关研究少之又少。因此,本文对马里亚纳海槽火山岩中斜长石斑晶的熔体包裹体进行研究,并基于熔体包裹体均一温度数据、斜长石环带特征及 An 值变化特征,结合前人研究的成果进一步探讨马里亚纳海槽的岩浆演化过程。

1 地质背景

马里亚纳海槽位于菲律宾海板块与太平洋板块之间,现今仍处于自南向北扩张的活跃状态,是研究板块运动和弧后扩张的理想区域。在菲律宾海板块主要有4个弧后盆地,马里亚纳海槽是最年轻、面积最小的海盆^[19]。海槽南北距离较长,约

1 200 km,海槽东西平均宽度约为 110 km,最大宽度可达 250 km(143°—145°E、18°N 附近,图 1),分为北、中、南3段。北马里亚纳海槽(22°—24°N)处于弧后盆地形成初期,以地壳伸展减薄为主。中马里亚纳海槽(17.6°—22°N)为成熟的弧后扩张中心,火山活动局限在主扩张轴上。南马里亚纳海槽(12.5°—17.6°N)类似快速扩张洋脊,轴深约 3 km^[20-21]。马里亚纳火山弧和西马里亚纳残留脊分别位于海槽东西两侧,交汇在海槽最北端,马里亚纳海沟挑战者深渊位于海槽南部^[22]。马里亚纳海槽地形高低不平,水深最浅 2 km,最深处可达 5 km,一般水深为 3.5~4.5 km,比典型大洋中脊区深^[23]。马里亚纳海槽与岛弧均有海底热液活动分布,其海底热液区的基底分别由英安岩、安山岩、玄武质安山岩和玄武岩构成^[24-25]。

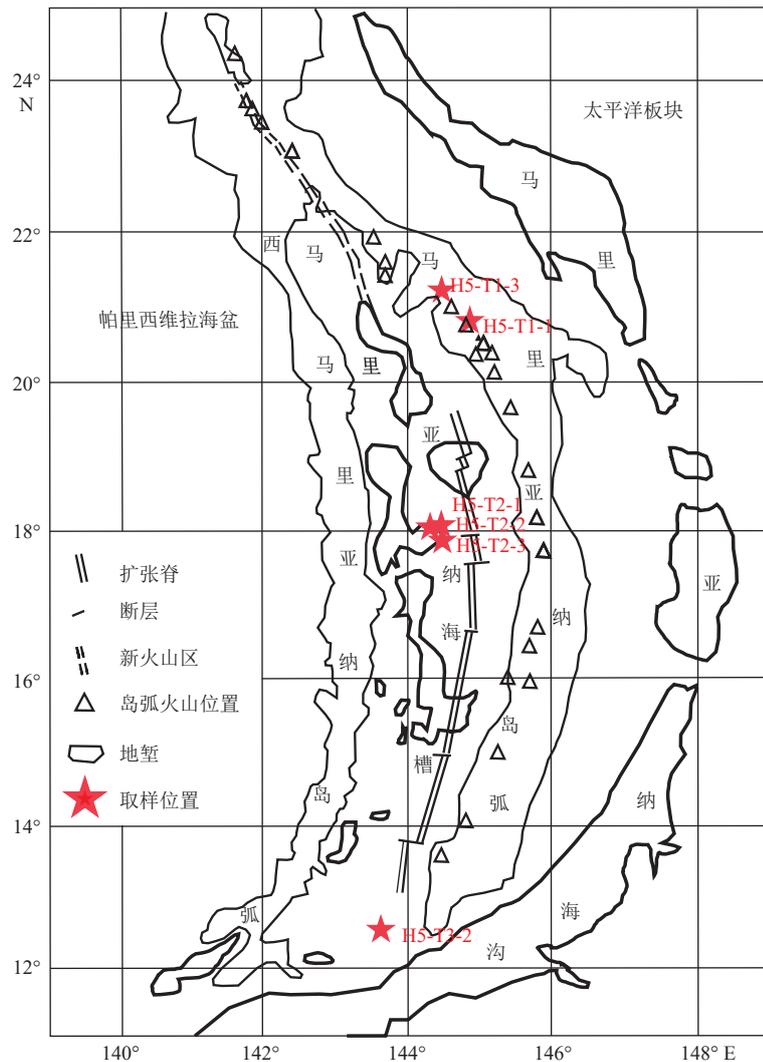


图 1 马里亚纳海槽岩石取样位置

Fig.1 The sampling location in the Mariana Trough

2 研究样品与分析方法

研究样品来自“科学”号 HOBAB5(2018 年西太平洋热液活动综合调查航次), 样品取自马里亚纳海槽 21°N、18°N、12°50'N 附近, 岩石块状样品站位信息见表 1。样品均为新鲜火山岩, 棱角分明, 磨圆度较低, 由此可以判断火山岩样品为原位基岩。

表 1 马里亚纳海槽火山岩样品取样信息

Table 1 Sampling information of the Mariana Trough volcanic rock samples

样品编号	纬度	经度	水深/m
HOBAB5-T3-2	12°54'42.400"N	143°38'58.136"E	2 974
HOBAB5-T2-1	18°12'37.372"N	144°42'22.521"E	3 659
HOBAB5-T2-2	18°02'47.637"N	144°45'11.925"E	3 854
HOBAB5-T2-3	18°00'56.720"N	144°45'00.101"E	4 038
HOBAB5-T1-1	21°19'29.319"N	144°11'44.657"E	418
HOBAB5-T1-3	21°29'15.150"N	144°02'29.908"E	1 604

样品前处理: 取新鲜火山岩样品进行清洗, 再用切割机将样品切成小块, 用水清洗后放入烘箱烘干, 之后将烘干的样品放入岩石粉碎机, 粉碎成 4 mm 大小的碎块, 接着放入超纯水中进行超声波清洗, 多次换水直到水清澈。样品碎块用烘箱烘干后放入无水乙醇中浸泡, 同时进行超声波清洗, 去除样品中的有机质。然后将再次烘干的样本置于 1 mol/L 的稀盐酸溶液中, 并在水浴中加热 2 h(温度为 60 °C)。之后再次进行超声波清洗, 多次更换超纯水直到水变得清澈。最终使用玛瑙研钵将样品磨成 200 目的粉末, 以进行全岩分析测试。此外, 在偏光显微镜下挑选完整、且体积较大的熔体包裹体进行标记, 将包裹体片在无水乙醇中泡 24 h 以去除表面树脂胶, 将熔体包裹体片破碎成小块, 保证标记区域的完整度。

火山岩全岩主量元素的分析测试是使用顺序

表 3 马里亚纳海槽火山岩全岩主量元素数据

Table 3 Whole-rock principal element data of volcanic rocks from Mariana Trough

样品编号	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SiO ₂	LOI	总值
H5-T3-2	15.07	6.46	10.39	0.58	2.72	0.20	4.22	0.24	1.64	56.78	1.35	99.65
H5-T2-1	16.48	10.17	9.15	0.57	5.76	0.16	3.02	0.18	1.05	52.15	0.73	99.42
H5-T2-2	16.95	10.85	8.18	0.37	7.11	0.15	2.94	0.16	1.11	51.29	0.24	99.35
H5-T2-3	18.19	10.79	7.94	0.44	6.23	0.14	3.05	0.17	1.13	51.11	0.22	99.41
H5-T1-1	15.02	4.50	6.57	2.20	1.68	0.15	4.02	0.28	0.73	63.40	0.93	99.49
H5-T1-3	14.59	11.62	9.28	0.73	7.61	0.16	1.85	0.16	0.65	52.40	0.55	99.60

式 X 射线荧光光谱仪 XRF-1500 在青岛斯八达分析测试有限公司完成, 测试分析的相对标准偏差(RSD)为 0.1%~1%。

火山岩中斜长石斑晶的熔体包裹体均一温度实验在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室完成, 实验过程中升温速率设置如表 2 所示, 显微冷热台型号为 Linkam-TS1400XY。

表 2 熔融包裹体均一温度实验升温速率设置

Table 2 The experimental setup of heating rate for homogenization temperature in melt inclusions

速率/(°C/min)	温度上限/°C	恒温时间/min
30	600	30
10	650	10
10	700	10
10	750	10
10	800	10
10	850	10
10	900	10
10	950	10
10	1000	10
5	1050	10
5	1100	10
5	1150	10
5	1200	10

火山岩中斜长石矿物的电子探针成分分析测试在中国科学院海洋研究所完成, 电子探针分析仪器型号为日本 JEOL 公司 JXA-8230。仪器工作的加速电压为 15 kV, 电子束流约为 2×10^{-8} A, 束斑直径为 1 μ m。以钾长石、钠长石、钙长石及氧化物组合为标样, 测试结果用 ZAF 方法校正。测试分析的相对标准偏差(RSD)为 -2%~2%。

本文所用到的斜长石, 其寄主岩石的全岩主量数据列于表 3, 斜长石中熔体包裹体的均一温度数据列于表 4, 电子探针分析结果列于表 5, 典型环带斜长石斑晶成分列于表 6。

表4 马利亚纳海槽火山岩斜长石斑晶中熔体包裹体的均一温度数据

Table 4 Homogeneous temperature data of melt inclusions in plagioclase phenocrysts of volcanic rocks from Mariana Trough

												℃	
样品号						H5-T2-1							
编号	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2	4.1		
均一温度	1115	880	1135	900	935	1125	1085	1015	1085	1055	940		
编号	5.1	5.2	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	7.1	7.2	7.3		
均一温度	945	1135	920	1145	885	1110	990	1135	905	860	935		
编号	8.1	9.1	9.2	9.3	10.1	10.2	10.3	10.4	11.1	11.2	12.1		
均一温度	895	1095	925	1155	1075	1110	1090	1135	1005	960	1185		
样品号						H5-T2-2							
编号	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	4.1	4.2	4.3	4.4		
均一温度	1155	1100	1085	1145	1120	1035	1005	1130	1145	1145	1110		
编号	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	6.1	6.2	7.1	7.2	8.1		
均一温度	1155	1095	1130	1090	1070	1055	1165	1130	1010	1045	1100		
编号	9.1	9.2	10.1										
均一温度	1090	1155	1090										
样品号						H5-T2-3							
编号	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	4.1	5.1		
均一温度	1050	1095	1080	1050	1065	1085	1125	1120	1130	1145	1120		
编号	5.2	5.3	6.1	7.1	7.2	7.3	7.4	8.1	8.2	9.1	9.2		
均一温度	1100	1125	1075	1050	1075	1070	1025	1085	1095	1115	1100		
编号	10.1	10.2	11.1	11.2	11.3								
均一温度	1135	1165	1145	1115	1130								
样品号						H5-T1-1							
编号	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	4.1	5.1		
均一温度	955	995	1030	1060	1055	1085	1125	1120	1130	1045	1020		
编号	5.2	5.3	6.1	7.1	7.2	7.3	7.4	8.1	8.2				
均一温度	1100	1125	1075	980	1040	1110	1025	1035	1095				
样品号						H5-T1-3							
编号	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	4.1	5.1		
均一温度	955	975	950	995	1015	935	970	1105	1030	1090	965		
编号	5.2	5.3	6.1	7.1	7.2	7.3	7.4						
均一温度	990	1005	1085	955	935	910	1095						
样品号						H5-T3-2							
编号	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2			
均一温度	1055	1135	1080	1090	1060	1135	1105	1030	1085	1080			

表5 电子探针分析斜长石的平均成分

Table 5 The average composition of plagioclase analyzed by electron microprobe

样品号	测点个数		Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SiO ₂	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	总值	An	
														平均值	范围
H5-T3-2	30	AVE	4.78	0.05	11.84	53.58	0.71	0.10	28.33	0.07	0.01	0.01	99.47	57.6	55.0~62.0
		STD	0.25	0.02	0.39	0.51	0.05	0.01	0.40	0.02	0.02	0.01	0.27	0.02	
H5-T2-1	22	AVE	3.95	0.12	13.19	52.41	0.99	0.37	28.74	0.08	0.03	0.01	99.88	64.4	54.6~72.9
		STD	0.58	0.09	1.19	1.66	0.38	0.33	1.69	0.07	0.08	0.01	0.43	0.05	
H5-T2-2	29	AVE	3.28	0.07	14.77	50.66	0.54	0.21	30.85	0.05	0.01	0.01	100.45	71.0	63.6~74.2
		STD	0.24	0.02	0.48	0.58	0.13	0.07	0.60	0.02	0.02	0.01	0.44	0.02	
H5-T2-3	29	AVE	3.45	0.06	14.25	50.88	0.73	0.18	30.33	0.07	0.02	0.01	99.97	69.3	61.7~73.5
		STD	0.36	0.02	0.65	0.92	0.12	0.05	0.74	0.03	0.02	0.01	0.69	0.03	

续表 5

样品号	测点个数		Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SiO ₂	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	总值	An	
														平均值	范围
H5-T1-1	31	AVE	4.85	0.22	11.47	54.37	0.62	0.07	28.05	0.03	0.01	0.01	99.70	55.9	51.0~66.4
		STD	0.64	0.09	1.50	6.73	0.10	0.02	3.51	0.03	0.01	0.01	12.42	0.03	
H5-T1-3	29	AVE	1.86	0.07	16.97	47.29	0.80	0.13	32.58	0.03	0.03	0.01	99.76	83.1	72.3~86.3
		STD	0.42	0.02	0.80	1.13	0.06	0.03	0.85	0.02	0.07	0.01	0.55	0.04	

注: AVE 为平均值, 单位wt%; STD 为标准差。

表 6 典型环带斜长石斑晶成分

Table 6 The composition of typical banded plagioclase phenocryst

样品	测点	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SiO ₂	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	总值	wt%
													An
H5-T2-1	1	3.03	0.06	14.96	49.97	0.75	0.17	30.98	0.04	0.01	0.00	99.96	72.91
	2	3.35	0.07	14.40	50.45	0.82	0.23	30.26	0.03	0.00	0.02	99.62	70.12
	3	3.94	0.11	13.57	51.97	0.77	0.19	29.44	0.03	0.04	0.00	100.07	65.16
	4	3.39	0.09	14.47	50.41	0.62	0.22	30.36	0.04	0.02	0.02	99.62	69.89
	5	3.97	0.10	13.01	52.35	1.27	0.56	28.14	0.08	0.04	0.00	99.51	64.06
	6	3.47	0.09	14.16	50.78	0.68	0.18	30.12	0.03	0.01	0.00	99.53	68.90
	7	3.94	0.11	13.57	51.97	0.77	0.19	29.44	0.03	0.04	0.00	100.07	65.16
	8	5.02	0.14	11.13	55.21	1.19	0.39	26.73	0.06	0.39	0.00	100.25	54.62
H5-T2-2	1	2.92	0.06	15.46	49.94	0.50	0.19	31.55	0.06	0.01	0.00	100.69	74.25
	2	3.09	0.04	15.19	49.90	0.49	0.20	31.46	0.06	0.00	0.00	100.43	72.93
	3	3.26	0.05	14.98	50.70	0.52	0.24	31.12	0.08	0.06	0.01	101.01	71.54
	4	3.22	0.05	14.81	50.81	0.52	0.21	30.88	0.07	0.05	0.00	100.62	71.53
	5	3.37	0.07	14.70	50.78	0.55	0.19	30.93	0.06	0.00	0.01	100.64	70.39
	6	4.08	0.10	13.13	52.99	1.10	0.52	28.31	0.07	0.00	0.00	100.30	63.64
H5-T1-1	1	5.08	0.21	11.18	54.63	0.66	0.08	27.69	0.08	0.04	0.02	99.66	54.20
	2	4.81	0.21	11.63	54.03	0.70	0.08	28.09	0.04	0.01	0.00	99.60	56.51
	3	5.10	0.30	10.86	55.42	0.68	0.08	27.31	0.04	0.03	0.00	99.82	53.12
	4	4.65	0.20	11.90	53.73	0.59	0.08	28.33	0.01	0.02	0.01	99.53	57.87
	5	4.64	0.23	11.82	54.34	0.60	0.07	28.14	0.02	0.00	0.01	99.88	57.68
	6	5.22	0.23	10.95	54.91	0.63	0.09	27.55	0.04	0.03	0.01	99.64	52.96
	7	4.94	0.24	11.45	54.21	0.66	0.07	27.91	0.07	0.00	0.01	99.57	55.38

3 结果

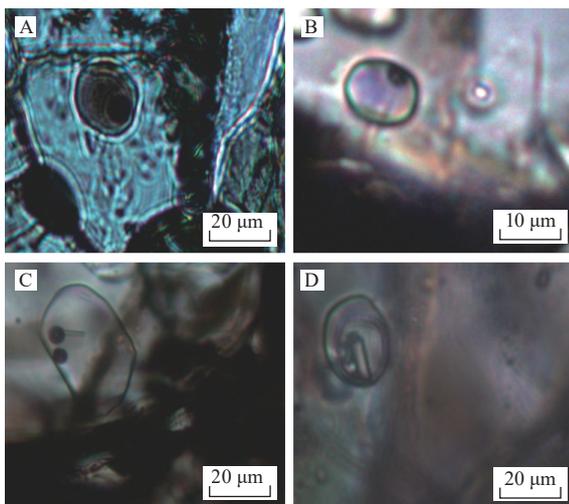
3.1 熔体包裹体的镜下特征

马里亚纳火山岩中斜长石的熔体包裹体发育大量玻璃质熔体包裹体。熔体包裹体的大小、形态各不相同, 直径主要分布在 10~50 μm, 形状呈椭圆形或近圆形。熔体包裹体颜色主要为不均匀黄褐色、棕色、无色和浅黄色。如图 2 所示, 结晶质熔体包裹体呈不规则状, 子矿物发育, 熔体包裹体与斜长石斑晶矿物之间界限比较模糊, 说明熔体包裹体在形成之后冷却过程较为缓慢, 经历了复杂的演化

过程, 演化程度较高^[16]。玻璃质熔体包裹体呈圆形或近圆形, 质地均一, 与斜长石斑晶界限比较明显, 说明包裹体形成之后冷却过程比较迅速, 演化程度较低^[16]。

3.2 火山岩的全岩地球化学特征

马里亚纳海槽火山岩全岩主量元素数据列于表 3, 将分析数据中的 LOI 剔除, 总量重新换算成 100%, 再利用校正后的数据绘制了岩石分类图解(图 3)。如图 3a 所示, 样品 H5-T2-2、H5-T2-3 为玄武岩, 样品 H5-T2-1、H5-T1-3 为玄武质安山岩, 样品 H5-T3-2 为安山岩, 样品 H5-T1-1 为英安岩。6 块



(A、B)玻璃质熔体包裹体;(C、D)结晶质熔体包裹体
图2 马里亚纳海槽火山岩中斜长石斑晶矿物的
不同类型熔体包裹体

Fig.2 Different types of melt inclusions in plagioclase phenocrysts of volcanic rocks from Mariana Trough

样品均落在亚碱性序列区域 (SiO_2 : 51.11wt%~63.40wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$: 2.58wt%~6.22wt%)。样品(H5-T3-2、H5-T1-1、H5-T1-3、H5-T2-1、H5-T2-2)均落在中钾区域(SiO_2 : 51.29wt%~56.78wt%, K_2O : 0.374wt%~2.20wt%), 样品 H5-T2-3 落在中钾与低钾之间的区域(SiO_2 : 51.11wt%, K_2O : 0.44wt%), 如图 3b 所示。

3.3 熔体包裹体的均一温度特征

在测量熔体包裹体的均一温度实验过程中, 主要有 3 种不同的情况:

(1) 熔体包裹体形态保持不变达到均一的温度即均一温度。实验过程中熔体包裹体中的气泡随着温度的升高, 逐渐变大、变小, 最后达到均一, 不再发生变化(图 4)。

(2) 熔体包裹体中的气泡随着温度的升高, 逐渐变大、变小, 当温度达到 1 200 °C 时, 恒温 25 min 后无法达到稳定的状态, 由于实验的安全性以及对仪器的保护, 不能继续升高温度, 无法获得准确的均一温度数据。

(3) 由于熔体包裹体气泡破裂, 成分泄露、改变。熔体包裹体中的气泡随着温度的逐渐升高, 形态始终没有发生改变, 因而无法获得均一温度数据。

根据熔体包裹体的均一温度数据(表 4)绘制熔体包裹体均一温度频次图(图 5)。从图 5 中可以看出, 玄武岩(H5-T2-2)斜长石中熔体包裹体的均一

温度为 1 005~1 165 °C(平均为 1 102.20 °C)。玄武岩(H5-T2-3)斜长石中熔体包裹体的均一温度为 1 025~1 165 °C(平均为 1 098.89 °C)。玄武质安山岩(H5-T1-3)斜长石中熔体包裹体的均一温度为 935~1 105 °C(平均为 997.78 °C)。玄武质安山岩(H5-T2-1)斜长石中熔体包裹体的均一温度有 2 个比较明显的峰值范围: 较低温度范围为 850~950 °C(平均为 910.42 °C), 较高温度范围为 1 050~1 150 °C(平均为 1 108.67 °C)。安山岩(H5-T3-2)斜长石中熔体包裹体的均一温度为 1 030~1 135 °C(平均为 1 085.5 °C)。英安岩(H5-T1-1)斜长石中熔体包裹体的均一温度为 955~1 130 °C(平均为 1 060.25 °C)。

3.4 斜长石斑晶的化学成分及结晶温度

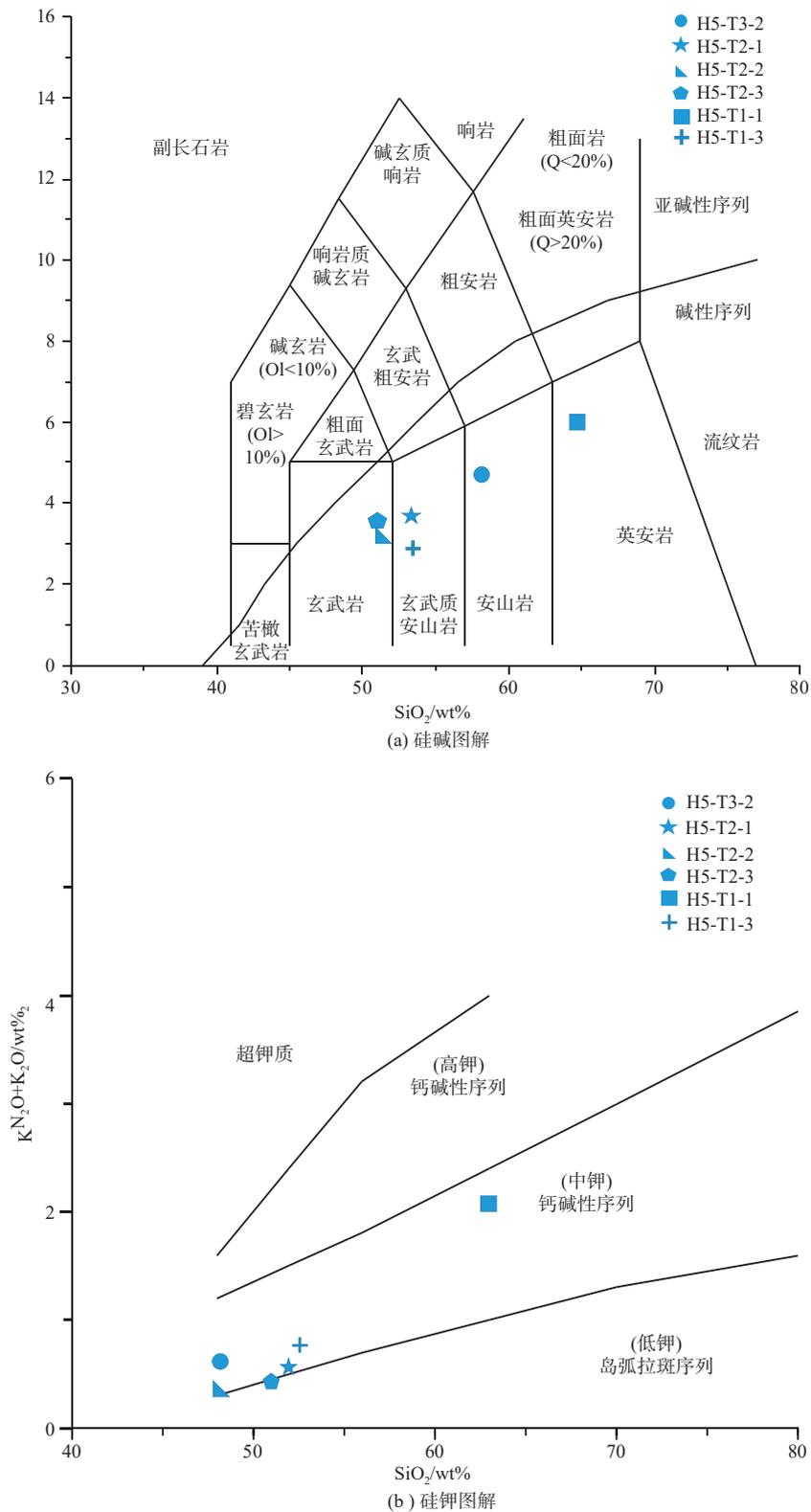
3.4.1 斜长石斑晶的化学成分

利用电子探针对马里亚纳火山岩中典型斜长石斑晶成分进行测试分析。由斜长石电子探针分析成分表(表 5)和斜长石化学成分分类图(图 6)可以看出, 安山岩样品(H5-T3-2)中斜长石斑晶的 An 值范围为 55.0~62.0, 平均为 57.6, 属于拉长石。玄武质安山岩样品(H5-T2-1)中斜长石斑晶的 An 值范围为 54.6~72.9, 平均为 64.4, 属于拉长石-培长石, 主要为拉长石。玄武岩样品(H5-T2-2)中斜长石斑晶的 An 值范围为 63.6~74.2, 平均为 71.0, 属于拉长石-培长石, 以拉长石为主。玄武岩样品(H5-T2-3)中斜长石斑晶的 An 值范围为 61.7~73.5, 平均为 69.3, 属于拉长石-培长石, 主要为拉长石。玄武质安山岩样品(H5-T1-3)中斜长石斑晶的 An 值范围为 72.3~86.3, 平均为 83.1, 属于倍长石。英安岩样品(H5-T1-1)中斜长石斑晶的 An 值范围为 51.0~66.4, 平均为 55.9, 属于拉长石^[5]。

根据典型环带斜长石斑晶成分(表 6)绘制了马里亚纳海槽火山岩中典型斜长石斑晶的 An 值变化图(图 6)。玄武质安山岩(H5-T2-1)中斜长石斑晶的 An 值从核部到边部先减小后增大、再减小再增大, 且边缘的 An 值明显减小, 说明其环带结构存在反环带, 最外侧为正环带(图 7a)。玄武岩(H5-T2-2)中斜长石斑晶的 An 值逐渐降低, 而其边缘部的 An 值骤降(图 7b)。英安岩(H5-T1-1)中斜长石斑晶的成分从核部到边部变化较小, 部分斜长石存在震荡环带(图 7c)^[26]。

3.4.2 斜长石的结晶温度

岩浆在熔融过程中所经历的温压条件是制约



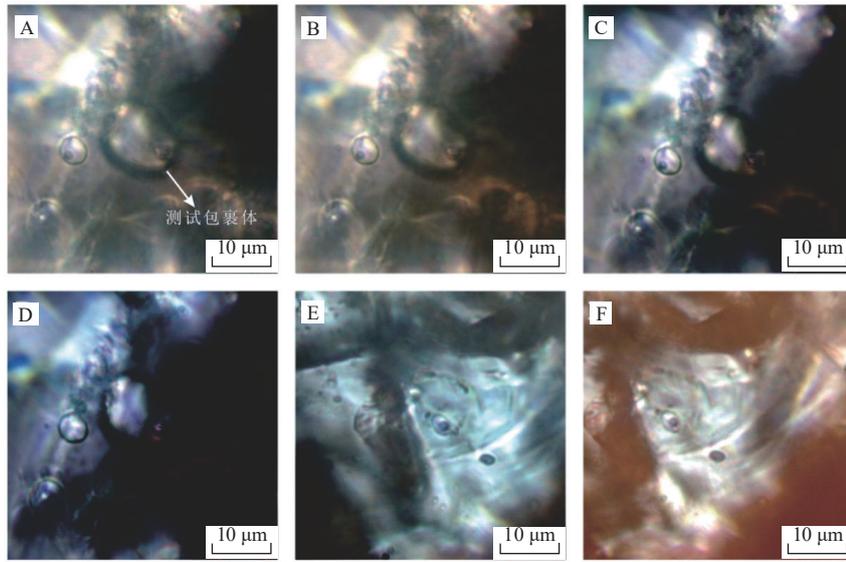
硅碱图数据引自文献 [28], 硅钾图数据引自文献 [29]

图 3 马里亚纳海槽火山岩主量元素图解

Fig.3 Discrimination of major elements in volcanic rocks from the Mariana Trough

岩浆迁移与演化模式的重要制约因素, 斜长石化学成分变化可能反映了岩浆演化过程^[27]。斜长石+

熔体温度计是最早被应用估计岩浆系统温度的地质温度计之一^[30-33]。为此, 本文利用 KUDO 和



(A) 30 °C; (B) 300 °C; (C) 500 °C; (D) 900 °C; (E) 1 000 °C; (F) 1 170 °C

图 4 马里亚纳海槽玄武岩斜长石中熔体包裹体的均一实验变化过程

Fig.4 Experimental observation on homogenization of melt inclusions in basalt plagioclase from the Mariana Trough

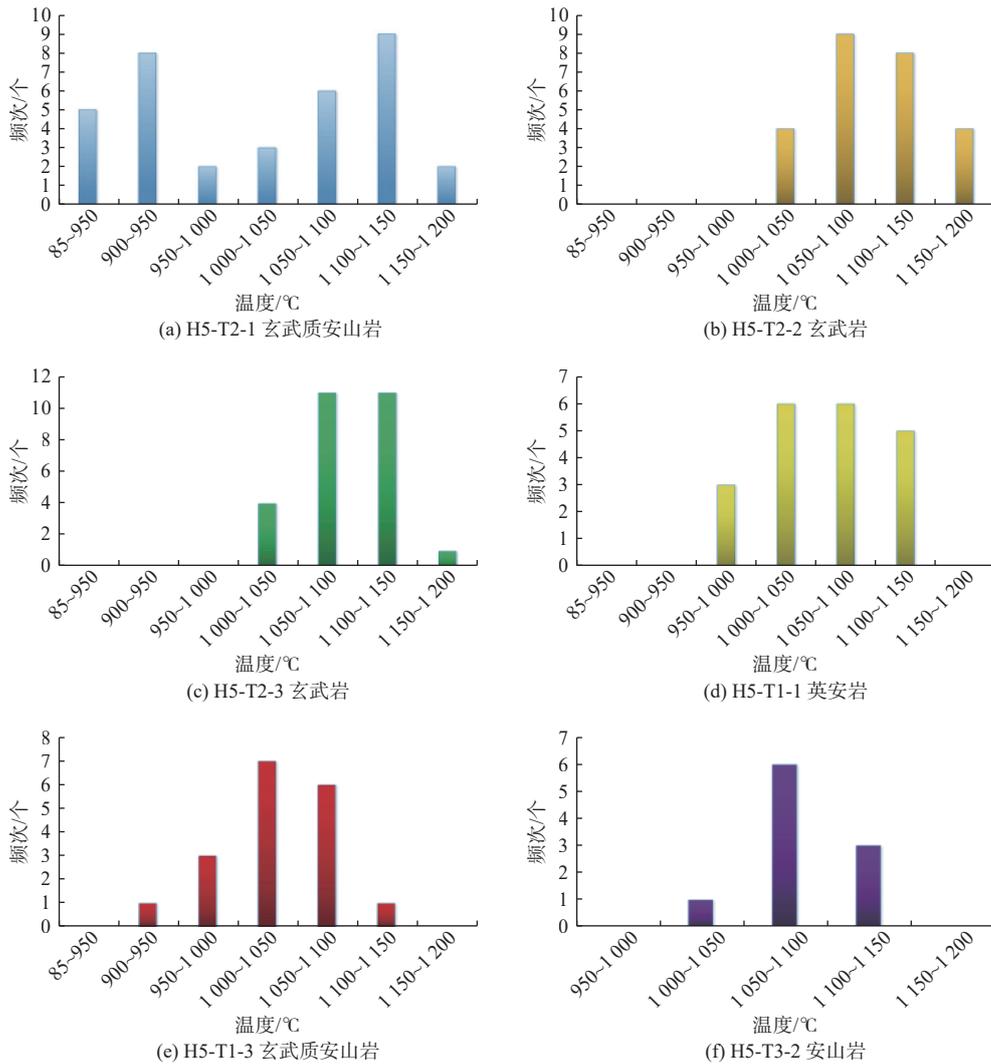


图 5 熔体包裹体均一温度频次

Fig.5 Diagram of homogenization temperature of melt inclusions vs frequency

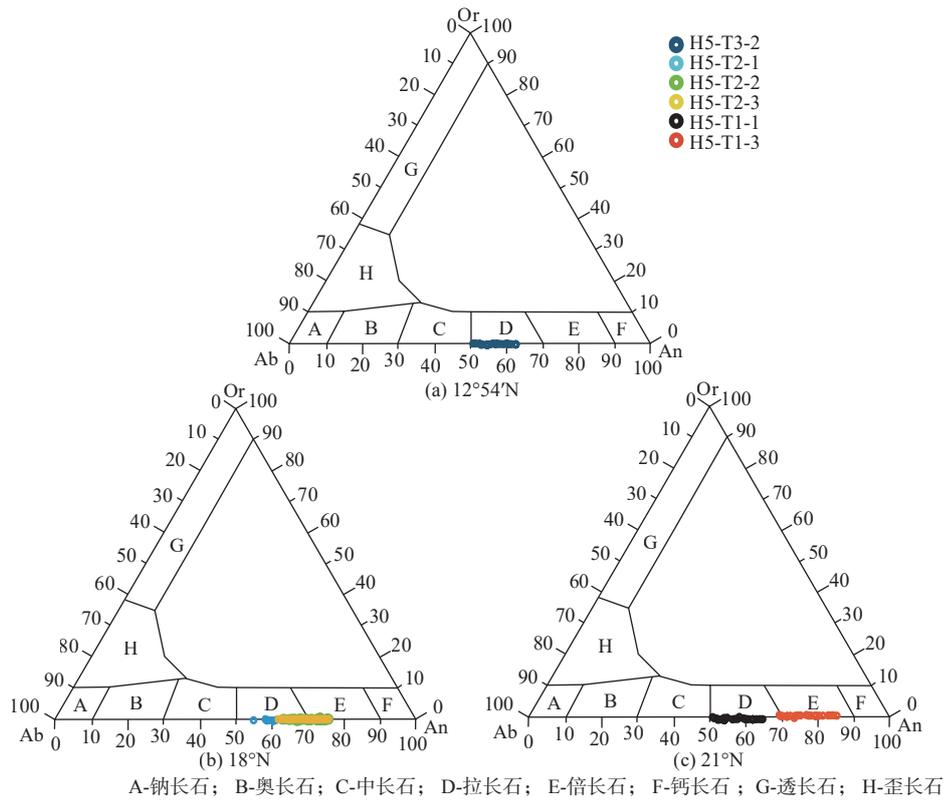


图 6 斜长石化学成分分类图

Fig.6 Classification of chemical composition of plagioclase

WEILL^[34] 的斜长石温度标定公式来计算马里亚纳海槽火山岩中斜长石斑晶矿物的结晶温度, 结合熔体包裹体均一温度结果探讨岩浆演化过程。结晶温度计算公式为:

$$\frac{\ln \lambda}{\sigma} + 1.29 \times \frac{10^4 \varphi}{T} = 11.05 \times 10^{-3} - 17.86 (P = 0.05 \text{ GPa})$$

式中: $\lambda = (X_{\text{Na}} \times X_{\text{Si}}) / (X_{\text{Ca}} \times X_{\text{Al}})$ 熔体;

$$\varphi = X_{\text{Ca}} + X_{\text{Al}} - X_{\text{Na}} - X_{\text{Si}};$$

$$\sigma = X_{\text{Ab}} / X_{\text{An}};$$

T 为热力学温度, K。

熔体成分数据采用寄主岩石的全岩化学成分。计算斜长石结晶的温度, 并换算为摄氏度(°C), 平均值列于表 7。玄武质安山岩(H5-T2-1)中斜长石的结晶温度为 1 121~1 182 °C(平均为 1 149.01 °C), 玄武岩(H5-T2-2)中斜长石的结晶温度为 1 144~1 172 °C(平均为 1 162.19 °C), 玄武岩(H5-T2-3)中斜长石的结晶温度为 1 154~1 179 °C(平均为 1 168.59 °C), 安山岩(H5-T3-2)中斜长石的结晶温度为 1 113~1 180 °C(平均为 1 136.42 °C), 英安岩(H5-T1-1)中斜长石的结晶温度为 1 058~1 189 °C(平均为 1 115.62 °C), 玄武质安山岩(H5-T1-3)中斜长

石的结晶温度为 981~1 038 °C(平均为 998.80 °C)。

4 讨论

4.1 斜长石中熔体包裹体均一温度指示不同结晶阶段

此前, 有研究利用矿物成分计算马里亚纳海槽火山岩中斜长石的结晶温度, 并根据温度变化情况探讨了马里亚纳海槽地区岩浆演化过程(表 8)。孙海青等^[35] 根据马里亚纳海槽玄武岩化学成分计算斜长石的结晶温度结果为(1 200±25)°C, 比包裹体均一温度结果高 150 °C 左右, 反映了结晶过程中的温度差异。张平阳等^[7] 计算马里亚纳海槽玄武岩斜长石结晶温度范围为 975~1 212 °C。如表 8 所示, 矿物温度计计算得到的温度数据较高, 且其结果往往误差较大, 不能精确反应矿物结晶温度。熔体包裹体均一温度能够反映寄主矿物的均一温度, 能够更准确地反映岩浆演化过程中矿物的不同结晶阶段^[36-37]。本研究利用包裹体均一温度实验数据结合斜长石环带特征探讨马里亚纳海槽火山岩中斜长石不同结晶阶段。

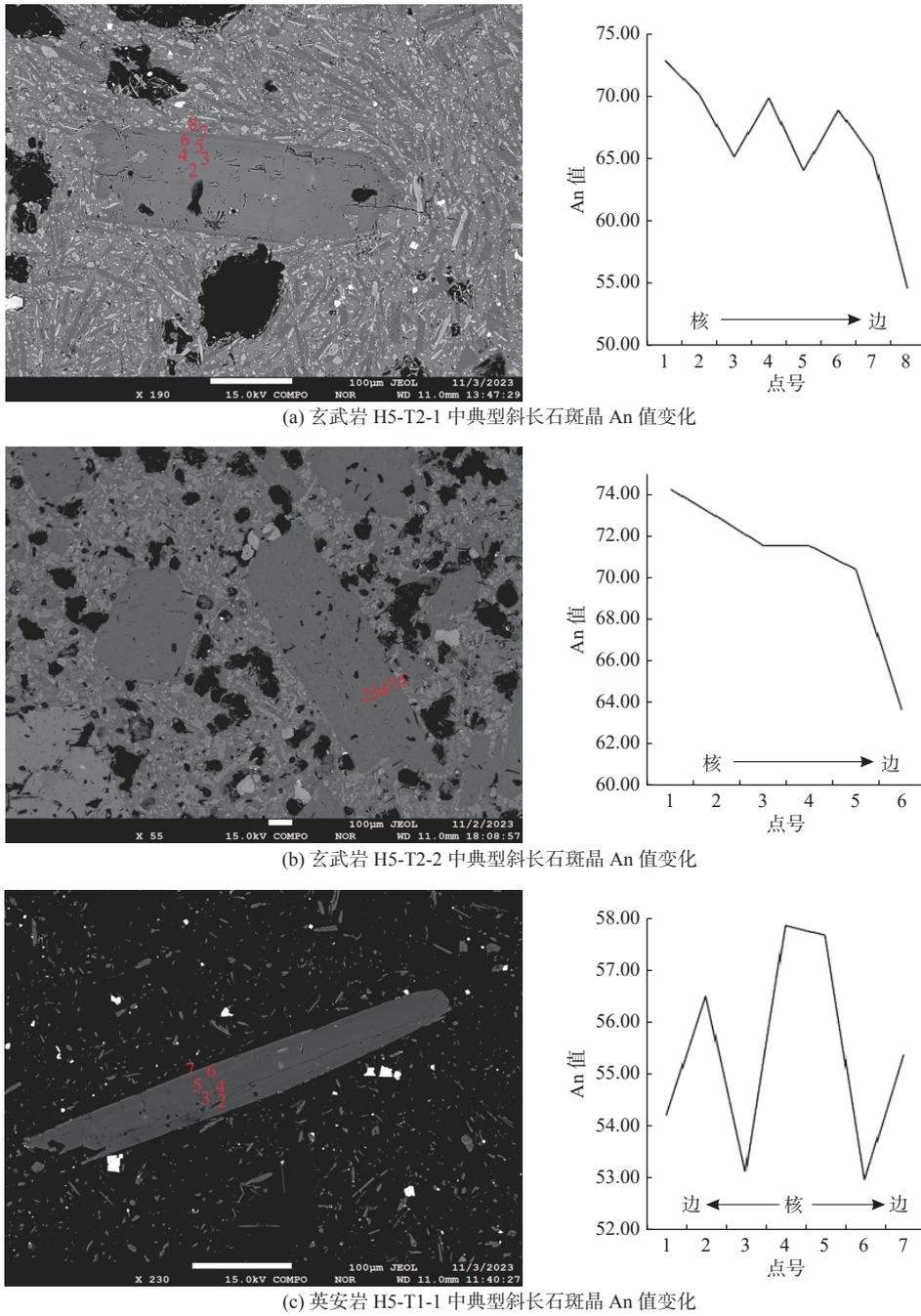


图 7 马里亚纳海槽火山岩典型斜长石斑晶的 An 值变化

Fig.7 Variation of An values from centre to edge of typical plagioclase phenocryst of volcanic rocks from Mariana Trough

表 7 根据 KUDO 和 WEILL 标定公式^[34] 计算的斜长石结晶温度

Table 7 The crystallization temperature of plagioclase determined by KUDO and WEILL methods^[35]

样品号	测点个数	温度/℃	
		平均值	范围
H5-T3-2	30	1 136.42	1 113~1 180
H5-T2-1	22	1 149.01	1 121~1 182
H5-T2-2	29	1 162.19	1 144~1 172
H5-T2-3	29	1 168.59	1 154~1 179
H5-T1-1	31	1 115.62	1 058~1 189
H5-T1-3	29	998.80	981~1 038

4.1.1 马里亚纳海槽南部火山岩

安山岩(H5-T3-2)斜长石中熔体包裹体的均一温度主要集中在 1 050~1 150 ℃(图 8), 结合电子探针分析数据以及图像分析可知, 斜长石 An 值较低(55.0~62.0)(表 5), 无明显环带, 说明安山岩(H5-T3-2)斜长石主要是在 1 050~1 150 ℃ 高温环境下发生结晶^[33], 由于安山岩(H5-T3-2)斜长石中熔体包裹体数量较少, 数据不能完全代表该区域特征, 还需进行深入研究, 才能得到更有说服力的认识。

表 8 马里亚纳海槽火山岩中斜长石结晶温度对比

Table 8 Comparison in crystallization temperatures of plagioclase in volcanic rocks from Mariana Trough

地区	岩性	取样位置	斜长石结晶温度/℃	数据来源	
马里亚纳海槽安山岩	玄武岩	18°N附近	1 005~1 165	包裹体均一温度	
	玄武质安山岩	18°N附近	850~950, 1 050~1 150		
		21°N附近	935~1 105		
	安山岩	12°50'N附近	1 030~1 135		
	英安岩	21°N附近	910~1 130		
	玄武岩	玄武岩	18°N附近	1 144~1 179	矿物-熔体温度计公式
		玄武质安山岩	18°N附近	1 121~1 182	
			21°N附近	981~1 038	
		安山岩	12°50'N附近	1 113~1 180	
		英安岩	21°N附近	1 058~1 189	
玄武岩		18°N附近	1 200±25	文献[35]	
玄武岩	18°N附近	975~1 212	文献[7]		

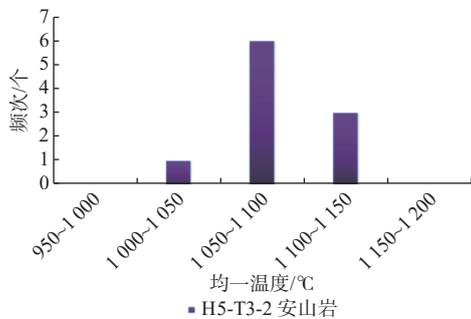


图 8 马里亚纳海槽南部火山岩中斜长石熔体包裹体均一温度频次

Fig.8 Homogeneous temperature vs frequency of melt inclusions in plagioclase of volcanic rocks from the southern Mariana Trough

4.1.2 马里亚纳海槽中部火山岩

玄武岩(H5-T2-2、H5-T2-3)斜长石中熔体包裹体的均一温度主要集中在 1 050~1 150 °C, 并呈连续降温趋势, 只有少部分在 1 000~1 050 °C 的较低温度结晶(表 4), 结合电子探针分析数据以及图像分析, 可以看出斜长石斑晶矿物部分具有环带结构。典型斜长石斑晶核部 An 值较高到边部 An 值较低, 且边缘部的 An 值明显下降则反映岩浆喷发后快速冷凝成岩(图 7)^[33], 这表明玄武岩(H5-T2-2、H5-T2-3)斜长石主要结晶阶段为 1 050~1 150 °C。

玄武质安山岩(H5-T1-3)斜长石中熔体包裹体的均一温度主要集中在 900~1 050 °C(表 4), 结合电子探针分析数据以及图像分析可以看出, 斜长石无明显环带特征, An 值较高(72.3~86.3), 说明玄武质安山岩(H5-T1-3)中斜长石主要结晶阶段为 900~1 050 °C。

玄武质安山岩(H5-T2-1)斜长石中熔体包裹体的均一温度具有“双峰”式特征(图 9), 均一温度主

要分布在 850~950 °C 和 1 050~1 150 °C 2 个温度范围(表 4), 结合电子探针分析数据以及图像分析, 可以看出斜长石具有明显环带结构。典型斜长石斑晶 An 值从核部到边部先减小后增大再减小再增大, 边缘部的 An 值明显减小(图 7), 说明其环带结构存在反环带, 最外侧为正环带。熔体包裹体均一温度特征及斜长石环带特征表明, 岩浆演化过程中, 斜长石有 2 个明显不同结晶阶段, 发生了岩浆混合作用^[33]。

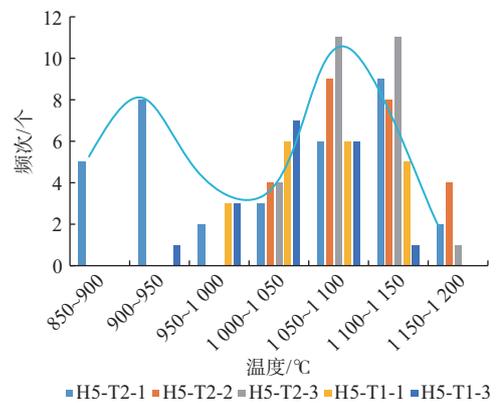


图 9 马里亚纳海槽中部火山岩中斜长石熔体包裹体均一温度频次

Fig.9 Homogeneous temperature vs frequency of plagioclase melt inclusions in volcanic rocks from the central Mariana Trough

英安岩(H5-T1-1)斜长石中熔体包裹体的均一温度主要集中在 1 050~1 150 °C(表 4)。结合电子探针分析数据以及图像分析可以看出, 斜长石环带结构多为正环带, 典型斜长石斑晶 An 值从核部到边部变化较小, 为振荡环带, 表明没有明显的岩浆混合现象, 振荡环带可能与岩浆房内岩浆对流有关^[38]。

4.2 熔体包裹体的“双峰”式均一温度对岩浆演化的启示

马里亚纳海槽 18°N 玄武质安山岩(H5-T2-1)斜长石中熔体包裹体的均一温度具有“双峰”式特征(图 5),且前人对马里亚纳海槽玄武岩中斜长石熔体平衡温度、压力进行计算,发现马里亚纳海槽 18°N 附近存在多期岩浆房^[38]。不仅如此,具环带结构的斜长石斑晶,其 An 值变化图(图 6)显示至少具有 2 个以上的反环带结构,反映了斜长石斑晶具有岩浆混合现象^[33]。我们认为在岩浆演化过程早期,在幔源地区形成斜长石的过程中,其斜长石核部发育的熔体包裹体均一温度较高,其对应的结晶温度为 1 050~1 150 °C(表 4)。此外,幔源处开始结晶的矿物,其结晶温度反映了幔源岩浆的温度,且幔源岩浆上升,分离结晶作用可导致岩浆成分向酸性发展,进入浅部岩浆房,与岩浆房内发育的岩浆发生混合^[33],斜长石中发育的熔体包裹体均一温度较低,其对应的岩浆房温度为 850~950 °C。最终,岩浆喷出、快速冷却则导致斜长石边缘部 An 值骤降^[39]。马里亚纳海槽 18°N 玄武岩(H5-T2-2、H5-T2-3)斜长石中熔体包裹体均一温度无“双峰”式特征(图 5),均一温度主要集中在 1 050~1 150 °C(表 4),其边缘部 An 值骤降反映了岩浆喷出快速冷却的过程^[39]。

由此可见,马里亚纳海槽 18°N 附近的岩浆演化过程较为复杂,发生了不同周期的岩浆演化过程。在岩浆活动早期,幔源岩浆沿着多个岩浆上涌通道上升。岩浆上升速度较快,结晶程度较低,未生成浅部岩浆房,岩浆上升并喷出洋底,与渗入的海水相遇发生快速冷却,形成玄武岩^[16];在岩浆活动晚期,岩浆上升过程中,随着温度压力的降低,岩浆发生结晶作用,部分岩浆被捕获在斜长石斑晶中形成熔体包裹体,熔体包裹体的均一温度反映了源区温度。岩浆到达浅部岩浆房(850~950 °C)后发生岩浆混合,再次发生结晶作用,斜长石斑晶中发育熔体包裹体,熔体包裹体的均一温度反映了岩浆房温度。岩浆最终喷出洋底,形成玄武质安山岩^[16]。

5 结论

本文对马里亚纳海槽岩石样品斜长石中熔体包裹体均一温度以及寄主矿物斜长石环带特征和

结晶温度进行研究,主要得出以下结论:

(1)马里亚纳海槽南部安山岩(H5-T3-2)中斜长石中的熔体包裹体均一温度主要集中在 1 050~1 150 °C,斜长石 An 值较低(55~62),无明显环带,说明安山岩(H5-T3-2)中斜长石结晶温度主要集中在 1 050~1 150 °C。

(2)马里亚纳海槽中部玄武质安山岩、英安岩、玄武岩斜长石中发育大量熔体包裹体。玄武质安山岩(H5-T1-3)中斜长石中熔体包裹体均一温度集中在 900~1 050 °C,斜长石 An 值较高(76~82),无明显环带现象,说明玄武质安山岩(H5-T1-3)中斜长石结晶温度主要集中在 900~1 050 °C;英安岩(H5-T1-1)斜长石中熔体包裹体的均一温度主要集中在 1 050~1 150 °C,部分斜长石具有振荡环带,没有明显的岩浆混合现象,振荡环带可能是岩浆房内岩浆对流形成,说明英安岩(H5-T1-1)中斜长石结晶温度主要集中在 1 050~1 150 °C。玄武岩(H5-T2-2、H5-T2-3)斜长石中熔体包裹体的均一温度均 >1 050 °C,并有连续降温趋势,只有少部分在较低温度结晶(1 000~1 050 °C),其边缘部的 An 值骤降则反映了岩浆喷出快速冷却的过程。玄武质安山岩(H5-T2-1)斜长石中熔体包裹体的均一温度具有“双峰”式特征,均一温度主要分布在 850~950 °C 和 1 050~1 150 °C 2 个温度范围,结合斜长石的环带特征及其 An 值变化特征,表明该斜长石有 2 个明显不同的结晶阶段,发生了岩浆混合作用。

(3)在岩浆活动早期,幔源岩浆(1 050~1 150 °C)沿着多个岩浆上涌通道快速上升,未生成浅部岩浆房,岩浆上升并喷出洋底,与渗入的海水相遇发生快速冷却形成玄武岩,因此马里亚纳海槽 18°N 附近玄武岩(H5-T2-2、H5-T2-3)斜长石中熔体包裹体均一温度无“双峰”式特征;在岩浆活动晚期,幔源岩浆(1 050~1 150 °C)岩浆上升过程中,随着温度压力的降低,岩浆发生结晶作用,岩浆到达浅部岩浆房(850~950 °C)后发生岩浆混合,再次发生结晶作用,最终岩浆喷出海底形成玄武质安山岩,因而马里亚纳海槽 18°N 附近玄武质安山岩(H5-T2-1)中斜长石的熔体包裹体呈现“双峰”式均一温度特征。由此可见,马里亚纳海槽 18°N 附近的岩浆演化过程较为复杂,发生了不同周期的岩浆演化过程。

致谢:感谢 HOBAB5 航次期间“科学”号所有船队员为样品采集所作出的贡献及帮助!感谢青岛斯八达分析测试有限公司和南京宏创地质勘察

技术有限公司研究人员对本研究中样品的测试分析工作给予支持和帮助!

参考文献:

- [1] ROEDDER E. Origin and significance of magmatic inclusions[J]. *Bulletin de Minéralogie*, 1979, 102(5): 487-510.
- [2] SORBY H C. On the microscopical, structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks[J]. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 1858, 14(1/2): 453-500.
- [3] KENT A J R. Melt inclusions in basaltic and related volcanic rocks[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2008, 69(1): 273-331.
- [4] 李霓, 孙嘉祥. 火山岩中熔体包裹体研究进展 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37(3): 414-423, 560.
- LI N, SUN J X. Research progress on melt inclusions in volcanic rocks[J]. *Mineral and Rock Geochemistry Bulletin*, 2018, 37(3): 414-423, 560.
- [5] 陈小明, 谭清泉, 赵广涛. 海底玄武岩中斜长石研究及其岩石学意义 [J]. *岩石学报*, 2002, 18(4): 482-488.
- CHEN X M, TAN Q Q, ZHAO G T. Study on plagioclase in submarine basalt and its petrological significance[J]. *Chinese Journal of Petrologica Sinica*, 2002, 18(4): 482-488.
- [6] 鄢全树, 石学法, 刘季花, 等. 南海新生代碱性玄武岩中斜长石矿物的化学成分及意义 [J]. *矿物学报*, 2008, 28(2): 135-142.
- YAN Q S, SHI X F, LIU J H, et al. Chemical composition and significance of plagioclase minerals in the Cenozoic alkaline basalt of the South China Sea[J]. *Mineralogical Journal*, 2008, 28(2): 135-142.
- [7] 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(2): 234-248.
- ZHANG P Y, YAN Q S. Chemistry and significance of plagioclase minerals in the Mariana Trench basalt[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 234-248.
- [8] 曾志刚, 张松梅, 常丽华. 东海陆架边缘北部玄武岩的矿物及化学特征 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(3): 47-52.
- ZENG Z G, ZHANG S M, CHANG L H. Mineral and chemical characteristics of basalt in the northern margin of the East China Sea continental shelf[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2002, 22(3): 47-52.
- [9] 石学法, 鄢全树. 西太平洋典型边缘海盆的岩浆活动 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 737-750.
- SHI X F, YAN Q S. Magmatic activity in typical marginal basins of the western Pacific[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2013, 28(7): 737-750.
- [10] ZAJACZ Z, HALTER W. LA-ICPMS analyses of silicate melt inclusions inco-precipitated minerals: quantification, data analysis and mineral/melt partitioning[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(4): 1021-1040.
- [11] PETTKE T, HALTER W E, WEBSTER J D, et al. Accurate quantification of melt inclusion chemistry by LA-ICPMS: a comparison with EMP and SIMS and advantages and possible limitations of these methods[J]. *Lithos*, 2004, 78(4): 333-361.
- [12] HALTER W E, PETTKE T, HEINRICH C A, et al. Major to trace element analysis of melt inclusions by laser-ablation ICP-MS: methods of quantification[J]. *Chemical Geology*, 2002, 183(1/4): 63-86.
- [13] SOBOLEV A V, HOFMANN A W, NIKOGOSIAN I K. Recycled oceanic crust observed in 'ghost plagioclase' within the source of Mauna Loa lavas[J]. *Nature*, 2000, 404(6781): 986-990.
- [14] SAAL A E, HART S R, SHIMIZU N, et al. Pb isotopic variability in melt inclusions from oceanic island basalts, Polynesia[J]. *Science*, 1998, 282(5393): 1481-1484.
- [15] SOBOLEV A V, CHAUSSIDON M. H₂O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-ocean ridges: implications for H₂O storage and recycling in the mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 137(1/4): 45-55.
- [16] 丁一, 刘吉强, 宗统, 等. 熔体包裹体挥发分应用的研究进展 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2019, 38(6): 897-913.
- DING Y, LIU J Q, ZONG T, et al. Research progress on the application of volatiles from melt inclusions[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2019, 38(6): 897-913.
- [17] 任钟元, 张乐, 吴亚东, 等. 熔体包裹体在镁铁质火山岩成因研究中的应用 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37(3): 395-413.
- REN Z Y, ZHANG L, WU Y D, et al. Application of melt inclusions in the genetic research of mafic volcanic rocks[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. 2018, 37(3): 395-413.
- [18] 李晓辉, 杨慧心, 曾志刚. 西太平洋弧后盆地火山岩中熔体包裹体研究进展 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(1): 166-179.
- LI X H, YANG H X, ZENG Z G. Research progress on melt inclusions in volcanic rocks in the western Pacific back arc basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(1): 166-179.
- [19] LAI Z Q, ZHAO G T, HAN Z Z. The magma plumbing system in the Mariana Trough back arc basin at 18°N[J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 180: 132-139.
- [20] MARTÍNEZ 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.
- [21] 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.
- [22] STERN R J, FOUCH M J, KLEMPERER S L. An overview of the Izu-Bonin-Mariana subduction factory[J]. *Inside the Subduction Factory*, 2003, 138: 175-222.
- [23] KARIG D E, ANDERSON R N, BIBEE L D. Characteristics of back arc spreading in the Mariana Trough[J]. *Journal of Geo-*

- physical Re-search: Solid Earth, 1978, 83(B3): 1213-1226.
- [24] PEARCE, J A, Stern R J. Origin of back-arc basin magmas: trace element and isotope perspectives[J]. *Back-arc Spreading Systems: Washington DCA merican Geophysical Union Geophysical Monograph*, 2006, 166: 63-86.
- [25] TIAN L, ZHAO G, ZHAO G, et al. Geochemistry of basaltic lavas from the Mariana Trough: evidence for influence of subduction component on the generation of backarc basin magmas[J]. *International Geology Review*, 2005, 47(4): 387-397.
- [26] 吴平霄, 吴金平, 李才伟, 等. 斜长石韵律环带的结晶速率方程及其动力学机制 [J]. *岩石学报*, 1998, 14(3): 388-394.
WU P X, WU J P, LI C W, et al. Crystalline velocity equation and kinetics mechanism of plagioclase oscillatory zoning[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(3): 388-394.
- [27] MATHEZ E A. Refinement of the Kudo-Weill plagioclase thermometer and its application to basaltic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1973, 41(1): 61-72.
- [28] LEBAS M J, LEMAITRE R W, 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.
- [29] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 1976, 58(1): 63-81.
- [30] SUGAWARA T. Ferric iron partitioning between plagioclase and silicate liquid: thermodynamics and petrological applications[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141(6): 659-686.
- [31] GHIORSO M S, SACK R O. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1995, 119(2/3): 197-212.
- [32] GHIORSO M S, HIRSCHMANN M, REINERS P W, et al. The pMELTS: a revision of MELTS for improved calculation of phase relations and major element partitioning related to partial melting of the mantle to 3 GPa[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, 3(5): 1-35.
- [33] 张国良. 东太平洋海隆 13°N 附近玄武岩特征及其对岩浆作用的指示 [D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2010.
ZHANG G L. Characteristics of basalt near 13°N on the East Pacific Rise and its indication of magmatic activity[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [34] KUDO A M, WEILL D F. An igneous plagioclase thermometer [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1970, 25(1): 52-65.
- [35] 孙海青, 高爱国, 倪培, 等. 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, 22(3): 292-298.
SUN H Q, GAO A G, NI P, et al. Preliminary study on melt inclusions in the Mariana Trench basalt[J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(3): 292-298.
- [36] LI X H, ZENG Z G, YANG H X, et al. Integrated major and trace element study of clinopyroxene in basic, intermediate and acidic volcanic rocks from the middle Okinawa Trough: insights into petrogenesis and the influence of subduction component[J]. *Lithos*, 2020, 352/353: 105320.
- [37] LI X H, ZENG Z G, YANG H X, et al. Geochemistry of silicate melt inclusions in middle and southern Okinawa Trough rocks: implications for petrogenesis and variable subducted sediment component injection[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(3): 1160-1189.
- [38] 李雪丽, 曾志刚, 李晓辉, 等. 冲绳海槽西南部火山岩熔体包裹体的均一温度及对岩浆混合的指示意义 [J]. *海洋科学*, 2021, 45(11): 82-95.
LI X L, ZENG Z G, LI X H, et al. Homogeneous temperature study of melt inclusions in volcanic rocks from the southwestern Okinawa Trough: insights into magma mixing processes[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(11): 82-95.
- [39] ZHANG G L, ZENG Z G, YIN X B, et al. Periodic mixing of magma near 13°N East Pacific Rise: simulation and plagioclase evidence[J]. *Chinese Science: Earth Sciences*, 2009(1): 35-50.

Homogeneous temperature of plagioclase melt inclusions in volcanic rocks from the Mariana Trough and its implication to magma evolution

ZHANG Baohui^{1,2,3}, ZENG Zhigang^{2,3*}, ZENG Zhibin⁴, YANG Xiaoshuang⁴, WANG Xiaoyuan², QI Haiyan²,
YIN Xuebo², CHEN Shuai², CHEN Zuxing^{2,3}, HAN Chao¹

(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; 3 College of Marine Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266400, China; 4 Henan Provincial Fifth Geological Exploration Institute, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The crystallization temperatures of plagioclase melt inclusions in volcanic rocks from the Mariana Trough was studied. Results show that those in andesite (H5-T3-2) from the southern Mariana Trough are mainly in 1 050~1 150 °C and did not affected by later magmatic evolution; those in basaltic andesite (H5-T1-3) from the central Mariana Trough are mainly 900~1 050 °C; and those in dacite (H5-T1-1) are mainly 1 050~1 150 °C. The homogenization temperatures of melt inclusions in basalt (H5-T2-2, H5-T2-3) plagioclase near 18°N in the Mariana Trough are mainly 1 050~1 150 °C, showing a continuous cooling trend, and only a small part crystallizes at a lower temperature of 1 000~1 050 °C, and the sudden drop in the An value at the edge of plagioclase phenocryst reflects a rapid cooling of the magma ejection. In addition, the homogenization temperature of the melt inclusions in basalt andesite (H5-T2-1) plagioclase showed the characteristics of "bimodal" pattern of 850~950 °C and 1 050~1 150 °C. The banding characteristics and the An value variation of plagioclase indicate that the plagioclase experienced two distinct crystallization stages and magma mixing, and there might be a magma chamber in the shallow part of the Mariana Trough, where the magma chamber temperature is about 850~950 °C. The magmatic evolution process near 18°N in the Mariana Trough is complex, and different periods of magmatic evolution may occur.

Key words: Mariana Trough; plagioclase feldspar; melt inclusions; uniform temperature; magmatic evolution