



西南印度洋中脊27洋脊段新火山脊岩浆深部过程研究—来自斜长石斑晶的制约

王聪浩, 刘佳, 陶春辉, 李伟

Deep magmatic process of new volcano ridge in Segment 27, Southwest Indian Ridge: Constraints from plagioclase phenocrysts

WANG Conghao, LIU Jia, TAO Chunhui, and LI Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022040101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究

A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 126

基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用

Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 221

西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 12

科学计量：中国海洋地质40年发展历程与研究热点分析

Forty years development of marine geology in China: Evidence from scientometrics

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 1

珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

海洋环境中甲烷好氧氧化过程的研究进展

A review on microbial aerobic methane oxidation in marine environment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 67



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王聪浩, 刘佳, 陶春辉, 等. 西南印度洋中脊 27 洋脊段新火山脊岩浆深部过程研究—来自斜长石斑晶的制约 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(6): 11-20.

WANG Conghao, LIU Jia, TAO Chunhui, et al. Deep magmatic process of new volcano ridge in Segment 27, Southwest Indian Ridge: Constraints from plagioclase phenocrysts[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(6): 11-20.

西南印度洋中脊 27 洋脊段新火山脊岩浆深部过程研究 —来自斜长石斑晶的制约

王聪浩^{1,2}, 刘佳³, 陶春辉², 李伟²

1. 成都理工大学沉积地质研究院 成都 610059

2. 自然资源部第二海洋研究所海底科学重点实验室, 杭州 310012

3. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310027

摘要: 前人对超慢速扩张西南印度洋脊 (SWIR) 玄武岩的研究多基于全岩粉末样品, 而对能够记录更多岩浆过程的矿物斑晶开展的工作则较为匮乏。本文对西南印度洋脊断桥热液区所在的 27 段洋脊富含斜长石斑晶的玄武岩进行了全岩和单矿物的地球化学研究。玄武岩样品 (34IV-TVG07 和 30III-TVG14) SiO₂ 含量为 49.16% 和 49.50%, MgO 含量分别为 6.76% 和 6.52%。全岩微量元素总体上和 N-MORB (normal mid-ocean ridge basalts) 类似。电子探针测试结果显示, 斜长石的 An 值范围变化较大 (76.2~87.9), 且绝大部分的斜长石斑晶 An 值都在 80 以上, 比 SWIR 64°E 的 Mount Jourdanne 火山斜长石超斑玄武岩中的斜长石 An 值高得多 (<70), 暗示斜长石的成因不同于 Mount Jourdanne, 不是由下洋壳辉长岩中的斜长石被后期岩浆直接机械捕获携带上升而形成。运用 Petrolog3 软件计算模拟也显示斜长石无法由其寄主岩浆直接结晶产生。结合实验岩石学结果以及西南印度洋中脊地幔中存在古老地幔楔熔融残余的多方面地球化学证据推测, 断桥区玄武岩中的高 An 值斜长石斑晶最有可能由软流圈地幔中的古老、亏损的岛弧地幔楔残余熔融形成的岩浆结晶形成。

关键词: 玄武岩; 斜长石斑晶; 岛弧地幔; 西南印度洋中脊

中图分类号:P744

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022040101

Deep magmatic process of new volcano ridge in Segment 27, Southwest Indian Ridge: Constraints from plagioclase phenocrysts

WANG Conghao^{1,2}, LIU Jia³, TAO Chunhui², LI Wei²

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

3. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: Most previous geochemical studies on basalts from the Southwest Indian Ridge (SWIR) were based on the analysis of bulk rocks, and those on phenocrysts are rare. We conducted bulk rock and mineral analyses of two rock samples of plagioclase-rich basalts from Segment 27, SWIR, where the Duanqiao hydrothermal field is located. The SiO₂ and MgO contents of the two samples (34IV-TVG07 and 30III-TVG14) are 49.16% and 6.76%, and 49.50 and 6.52%, respectively. Their trace elemental patterns are similar to typical N-MORB (normal mid-ocean ridge basalts). The EPMA analysis show that the An (% of anorthite) of the plagioclase phenocrysts vary in the range of 76.2 to 87.9, and most are above 80, which is significantly greater than those of plagioclase in the Mount Jourdanne basalts, indicating that the An-rich plagioclase phenocrysts at 50.4°E are not derived from the lower oceanic crust of the Mount Jourdanne. In addition, the Petrolog3 modeling shows that they could not crystallize directly from the mother magma. By combining the experimental constrains and previous evidence for ancient mantle wedge-like component entrained beneath this ridge, we believe that the An-rich plagioclase in Segment 27 basalts were most likely crystallized from magma due to partial melting of an ancient depleted sub-arc mantle.

Key words: basalts; plagioclase phenocryst; sub-arc mantle; southwest Indian Ridge

资助项目:国家重点研发课题“超慢速扩张洋脊局部岩浆供给的深部过程及其成矿效应研究”(2018YFC0309902)

作者简介:王聪浩(1996—),男,硕士,主要从事洋中脊岩浆作用研究, E-mail: 2863689642@qq.com

收稿日期:2022-04-01; 改回日期:2022-04-27。 张现荣编辑

西南印度洋脊(SWIR)是南极洲板块和非洲板块的分界线,东起罗德里格斯三联点,西至布维三联点,是世界上扩张速率最缓慢的洋脊之一(扩张速率约为1.2~1.8 cm/a)^[1-2]。SWIR整体上具有超慢速洋脊的一般特征:岩浆活动匮乏,平均洋壳厚度较薄,拆离断层等构造活动较为发育^[3]。然而,最近的地球物理观测结果发现,位于Indomed和Gallieni转换断层之间的27洋脊段(约50.6°E)具有超厚的洋壳(>10 km)^[4](图1a),并且发育尚未固结的岩浆房^[5](图2)。中国大洋航次历年海底热液调查发现该洋脊段存在活动的中高温热液活动和多金属硫化物矿化现象(即断桥热液区)。最近,Chen等^[6]通过综合地球物理探测对27洋脊段(50°28'E)的地形构造进行了解译,发现该区域发育多个岩浆单元,总体具有高频岩浆喷发和低构造应变的特征,经历了两次间隔约300 Ka的岩浆旋

回。Yang等^[7]发现该洋脊段存在一类高铝的玄武岩,具有不相容元素亏损而同位素富集的特征,如高²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb(17.990~18.277)、低¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd(0.512983~0.513002),并且这种富集的同位素组成和洋脊南侧的克洛泽洋岛玄武岩值接近。作者认为该类玄武岩的形成与洋脊-克洛泽热点相互作用有关,且深部熔体与下部洋壳存在强烈相互作用。而Yu和Dick^[8]则认为此类同位素组成富集而微量元素配分亏损的地球化学特征可能与冈瓦纳大陆裂解后残留在印度洋上地幔中的古老的富集地幔残块有关。玄武岩中的矿物斑晶(如橄榄石,单斜辉石,斜长石等)能够记录更多的岩浆过程,或可以为讨论岩浆深部过程、地幔源区性质等提供更多的证据。前人的工作多集中于全岩粉末样品,基于斑晶的工作较为匮乏。本文选取SWIR 27洋脊段(50.4°E)中富含长石斑晶的两个玄武岩样品为研究对象,报道

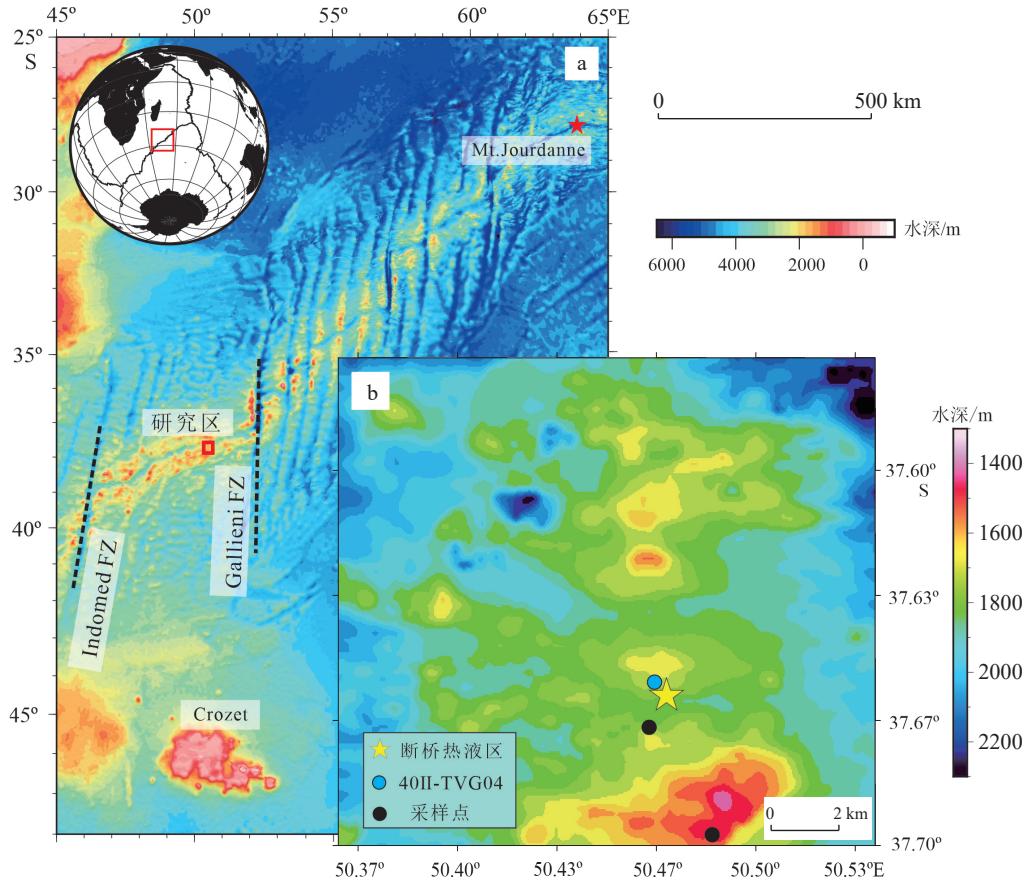
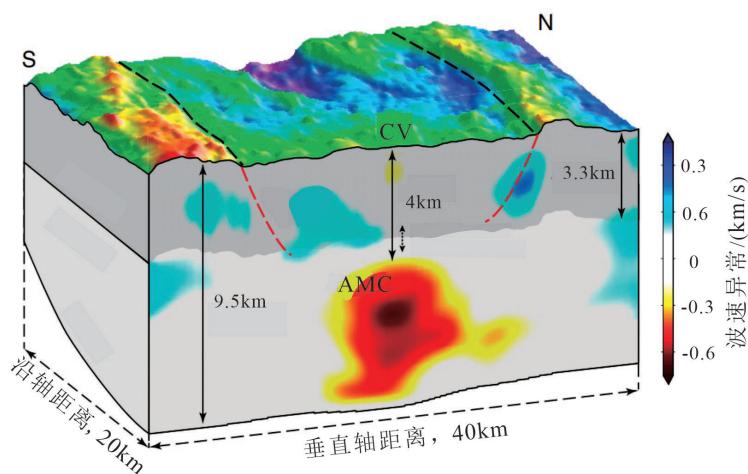


图1 研究区水深图

a.西南印度洋中脊(SWIR)中心水深图,Crozet群岛在Indomed和Gallieni转换断层以南约900 km(IFZ-GFZ用黑色虚线表示),红色五角星表示Mount Jourdanne火山位置;b.为a中红色矩形标出的区域,为西南印度洋中脊(SWIR)50.4°E水深图。

Fig.1 Bathymetry of the study areas

a. Bathymetry of the central Southwest Indian Ridge (SWIR). Crozet Archipelago is located ~900 km south of the Indomed and Gallieni FZs (IFZ-GFZ, denoted by the black dashed lines). The red star represents the location of the Mount Jourdanne volcanic; b. bathymetry of SWIR (50.4°E) marked by the red rectangle in figure a.

图 2 西南印度洋中脊 (SWIR) 27 段岩浆房示意图^[5]Fig.2 Schematic diagram of magma chamber in Segment 27 of SWIR^[5]

了全岩主微量元素和斜长石斑晶的矿物化学特征, 据此探讨其对该洋脊段深部岩浆过程以及地幔源区属性等方面的指示意义。

1 样品和分析方法

1.1 样品

本文研究的样品是由中国大洋第 30 和第 34 航次在西南印度洋脊 27 段通过电视抓斗采集获取, 采样位置如图 1b 所示。岩石样品呈灰黑色, 致密块状构造, 斑状结构发育, 斑晶多具有新鲜核部, 表面因与海水接触而遭受不同程度蚀变。玄武岩样品中斑晶主要为斜长石, 大多数斑晶具有自形结构, 粒径 0.5~7.0 mm。镜下可见长石多具有聚片双晶结构和熔体包裹体, 部分长石斑晶发育环带(图 3)。基质成分主要为斜长石, 辉石次之, 此外还有少量玻璃质, 橄榄石斑晶更少, 镜下观察较为新鲜, 无明显蚀变现象。

1.2 分析方法

首先去除岩石样品表面的蚀变部分, 选取新鲜块体进行破碎处理, 然后将破碎好的岩石放入盛有去离子水的烧杯中, 置入超声波清洗器清洗至去离子水不再浑浊, 烘干后用玛瑙研钵磨至小于 200 目, 以供分析测试。样品的主微量元素组成测试通过波长色散 X 射线荧光光谱仪进行, 在武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 仪器型号为 ZSXPrimus II。测试选取安山岩、玄武岩、花岗闪长岩和辉长岩标样(GSR-2、GSR-3、GSR-9、GSR-

10) 进行标控, 分析结果表明, 主量元素组成的精准度 >5%。使用安捷伦 7700e ICP-MS 仪器对溶解的样品溶液进行微量元素分析, 测试选取安山岩、玄武岩、花岗闪长岩和辉长岩标样(GSR-2、GSR-3、GSR-9、GSR-10) 进行标控, 分析结果表明, 微量元素组成的精准度高于 5%。主微量元素分析结果见表 1、表 2。

玄武岩中的斜长石斑晶背散射图像采集和化学组成在自然资源部第二海洋研究所海底科学重点实验室采用 JEOL-JXA-8100 型电子探针分析获取。分析条件为: 加速电压 15 kV、试样电流 20 nA 和聚焦光束 1 μm。分析中采用的天然和合成标准用于指定元素: 橄榄石(Si、Mg)、磷灰石(Ca、P)、赤铁矿(Fe)、钠长石(Na、Al)、正长石(K)、红白云石(Mn)、金红石(Ti) 和 Tugtupite(Cl)。使用 ZAF 校正对原始数据进行校正。长石探针分析结果见表 3。

2 结果

此次测试的两块玄武岩(34IV-TVG07 和 30III-TVG14) 样品 SiO₂ 含量分别为 49.16% 和 49.50%, MgO 含量分别为 6.76% 和 6.52%。样品烧失量为负, 表明分析样品非常新鲜。相比该区其它玄武岩来说^[8], 两个样品具有高 Al 的特征, Al₂O₃ 含量分别为 18.25% 和 17.83%(表 1)。34IV-TVG07 和 30III-TVG14 的全岩 Mg# (Mg#=Mg/(Mg+Fe)×100) 分别为 61.4 和 58.5, 低于原生岩浆含量(约 72)^[9-10], 说明样品经历了显著的结晶分异作用。玄武岩的球粒陨石标准化稀土元素在图 4 中给出, 且全部落在前人的数据范围之内(图 4)。样品的 REE 具有轻稀土

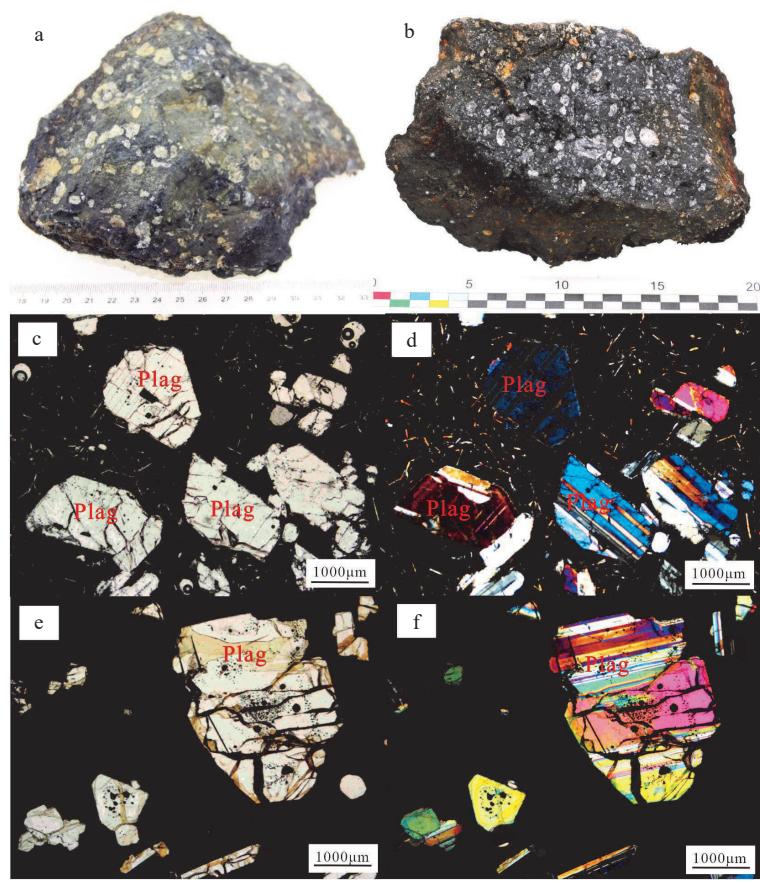


图 3 玄武岩手标本和镜下照片

a. 30III-TVG14 手标本; b. 34IV-TVG07 手标本; c. 30III-TVG14 镜下单偏光; d. 30III-TVG14 镜下正交偏光; e. 34IV-TVG07 镜下单偏光; f. 34IV-TVG07 镜下正交偏光; Plag: 斜长石。

Fig.3 Pictures of the basalt samples in this study

a. Photo of sample 30III-TVG14; b. photo of 34IV-TVG07; c. single polarization light photo of 30III-TVG14; d. crossed polarized light photo of 30III-TVG14; e. single polarization light photo of 34IV-TVG07; f. crossed polarized light photo of 34IV-TVG07. plag: plagioclase.

表 1 西南印度洋中脊 27 段含长石斑晶玄武岩的主量元素含量
Table 1 Major element concentrations of plagioclase-hosted basalt from Segment 27, SWIR

样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	SUM
30III-TVG14	49.50	1.30	17.83	10.28	0.16	6.52	11.98	2.65	0.20	0.12	-0.28	100.25
34IV-TVG07	49.16	0.98	18.25	9.43	0.15	6.76	12.90	2.53	0.12	0.09	-0.45	99.93

注: 主量元素单位: wt%。

亏损的特征, 34IV-TVG07 和 30III-TVG14 的 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值分别为 0.49 和 0.54, $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 值分别为 0.61 和 0.72, $(\text{Sm}/\text{Yb})_N$ 比值分别为 0.99 和 1.04(N 代表球粒陨石标准化, 球粒陨石数据来自 Sun 和 McDonough^[11]), 与典型的 N-MORB 类似, 表明 LREE 和 HREE 之间的分异程度较低。两个样品的 Eu^* ($\text{Eu}^*=2\text{Eu}_{\text{CH}}/(\text{Sm}_{\text{CH}}+\text{Gd}_{\text{CH}})$, CH 代表球粒陨石标准化) 值分别为 0.98 和 0.95。

电子探针测试结果显示斜长石的 An 值范围变化较大(76.2~87.9)(表 3)。斜长石种类为培长石,

与典型的大洋拉斑玄武岩特征相符合。 Na_2O 含量为 1.32%~2.61%(平均 1.80%); Al_2O_3 含量为 31.84%~33.96%(平均 33.26%); CaO 含量为 15.25%~17.42%(平均 16.57%)。绝大部分的斜长石斑晶 An 值基本都在 80 以上, 根据斜长石 An 值的核-边成分变化, 可以将斜长石斑晶分为 3 类: 第 1 类, 从核到边 An 值逐渐增加, 如斑晶 34IV-TVG07(2)9(图 5 a), 第 2 类, 从核到边 An 值逐渐减少, 如斑晶 34IV-TVG07(2)6(图 5 b), 第 3 类, 斜长石斑晶 An 值从核部到边部呈现震荡现象, 如斑晶 30-

表 2 西南印度洋中脊 27 段含长石斑晶玄武岩微量元素含量
Table 2 Trace element concentrations of plagioclase-hosted basalt from Segment 27, SWIR

样品编号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y
30III-TVG14	4.32	0.50	37.60	264.25	204.30	39.54	69.00	60.43	79.91	17.85	2.03	141.39	32.82
34IV-TVG07	4.25	0.37	38.90	231.06	272.04	36.67	62.96	60.60	67.28	16.16	1.05	134.49	24.60
样品编号	Zr	Nb	Sn	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
30III-TVG14	86.88	1.53	0.95	0.03	10.10	2.51	8.39	1.45	8.60	3.01	1.13	4.34	0.86
34IV-TVG07	56.77	0.97	0.62	0.03	6.77	1.72	5.59	1.01	5.85	2.29	0.88	3.25	0.64
样品编号	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Tl	Pb	Th	U	
30III-TVG14	5.55	1.12	3.35	0.48	3.23	0.49	2.40	0.12	0.08	0.72	0.12	0.11	
34IV-TVG07	4.24	0.89	2.64	0.39	2.55	0.37	1.58	0.06	0.05	0.50	0.08	0.11	

注: 微量元素单位: wt/ 10^{-6} 。

表 3 斜长石斑晶电子探针分析结果
Table 3 Major element concentrations for plagioclase phenocrysts

分析点号	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO	Total	An
30-III-TVG14(2)1-边	45.79	1.59	0.02	0.34	33.63	0.20	16.92	—	0.02	0.05	—	98.54	85.41
30-III-TVG14(2)1-幔	45.31	1.38	0.02	0.40	33.47	0.18	16.98	0.04	0.05	0.01	0.01	97.84	87.06
30-III-TVG14(2)1-核	46.21	1.52	0.01	0.29	33.01	0.21	16.78	—	0.04	0.04	—	98.11	85.87
30-III-TVG14(2)2-边	46.55	1.73	0.01	0.36	32.91	0.22	16.81	0.02	—	0.04	0.01	98.66	84.26
30-III-TVG14(2)2-幔	46.32	1.59	0.01	0.39	33.20	0.23	16.78	—	0.01	0.01	0.01	98.56	85.29
30-III-TVG14(2)2-核	46.90	1.80	0.03	0.36	33.10	0.23	16.64	—	0.01	0.04	—	99.11	83.52
30-III-TVG14(2)3-边	46.57	1.62	0.02	0.30	33.39	0.21	16.80	—	0.03	0.03	—	98.97	85.05
30-III-TVG14(2)3-幔	47.08	1.79	0.00	0.32	33.36	0.23	16.82	—	0.01	0.02	—	99.63	83.85
30-III-TVG14(2)3-核	46.64	1.73	0.03	0.32	33.13	0.22	16.61	0.03	—	0.04	0.00	98.73	84.00
30-III-TVG14(2)4-边	47.31	1.87	0.02	0.33	33.12	0.22	16.44	0.03	—	—	—	99.34	82.83
30-III-TVG14(2)4-幔	46.07	1.41	0.02	0.30	33.90	0.16	17.23	0.01	0.01	0.01	—	99.11	87.04
30-III-TVG14(2)4-核	46.86	1.50	0.01	0.31	33.81	0.17	17.13	—	0.07	0.02	0.02	99.91	86.23
30-III-TVG14(2)5-边	47.34	1.80	0.03	0.33	33.39	0.25	16.60	0.01	0.01	0.02	0.02	99.80	83.45
30-III-TVG14(2)5-幔	47.40	1.76	0.03	0.37	33.04	0.20	16.50	0.05	0.01	0.04	—	99.39	83.68
30-III-TVG14(2)5-核	47.29	1.80	0.02	0.33	33.34	0.22	16.60	—	—	—	0.03	99.64	83.45
30-III-TVG14(2)6-边	47.44	1.88	0.01	0.34	33.18	0.23	16.65	0.01	0.05	0.01	0.01	99.81	82.95
30-III-TVG14(2)6-幔	47.04	1.74	0.03	0.34	33.14	0.21	16.47	—	0.02	—	—	98.97	83.83
30-III-TVG14(2)6-核	47.49	1.88	0.01	0.35	33.42	0.21	16.42	0.02	0.05	0.01	—	99.85	82.76
30-III-TVG14(2)7-边	47.25	1.80	0.03	0.33	33.45	0.21	16.66	0.03	0.02	—	0.01	99.77	83.54
30-III-TVG14(2)7-幔	47.25	1.86	0.02	0.34	33.42	0.21	16.66	—	0.01	—	0.00	99.77	83.11
30-III-TVG14(2)7-核	46.78	1.73	0.03	0.29	33.56	0.22	16.76	0.05	0.07	0.07	—	99.54	84.17
30-III-TVG14(2)8-边	47.05	1.82	0.02	0.36	33.26	0.22	16.73	0.03	—	—	0.03	99.52	83.47
30-III-TVG14(2)8-幔	46.77	1.70	0.03	0.38	33.52	0.20	16.79	0.01	—	—	0.02	99.42	84.37
30-III-TVG14(2)8-核	46.83	1.72	0.02	0.33	33.42	0.20	16.77	0.03	0.02	0.07	0.01	99.43	84.23
34IV-TVG07(1)13-边	47.74	1.90	0.01	0.41	33.22	0.19	16.46	—	0.03	0.02	0.01	99.98	82.72

续表 3

分析点号	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO	Total	An
34IV-TVG07(1)13-幔	47.34	1.79	0.02	0.40	33.43	0.16	16.63	—	0.01	—	—	99.78	83.57
34IV-TVG07(1)13-核	47.50	1.78	0.02	0.38	33.49	0.18	16.57	0.01	0.06	—	—	99.99	83.65
34IV-TVG07(1)12-边	47.28	1.70	0.03	0.36	33.84	0.19	16.83	—	0.04	—	—	100.28	84.42
34IV-TVG07(1)12-幔	47.41	1.57	0.02	0.32	33.70	0.21	16.88	0.00	0.06	—	—	100.18	85.53
34IV-TVG07(1)12-核	47.45	1.74	0.03	0.36	33.70	0.21	16.84	—	0.04	—	—	100.36	84.10
34IV-TVG07(1)11-边	47.85	1.86	0.02	0.35	33.55	0.17	16.59	0.07	—	—	—	100.45	83.04
34IV-TVG07(1)11-幔	46.53	1.67	0.01	0.39	33.60	0.16	16.89	0.02	0.00	—	0.01	99.29	84.79
34IV-TVG07(1)11-核	46.44	1.68	0.01	0.34	33.75	0.17	16.91	—	0.04	—	0.03	99.37	84.74
34IV-TVG07(1)10-边	47.86	2.12	0.01	0.35	32.73	0.20	16.14	—	0.06	0.03	—	99.51	80.73
34IV-TVG07(1)10-幔	49.05	2.61	0.03	0.35	32.12	0.26	15.26	0.03	0.02	—	—	99.74	76.23
34IV-TVG07(1)10-核	49.20	2.42	0.02	0.28	32.48	0.20	15.59	0.02	0.07	—	0.04	100.32	77.99
34IV-TVG07(1)9-边	46.94	1.71	0.01	0.35	33.93	0.17	16.98	—	—	0.05	0.01	100.14	84.57
34IV-TVG07(1)9-幔	47.08	1.75	0.02	0.35	34.08	0.18	16.93	—	—	0.04	—	100.42	84.13
34IV-TVG07(1)9-核	46.77	1.63	0.01	0.35	33.73	0.19	17.01	0.02	—	—	—	99.71	85.17
34IV-TVG07(1)8-边	47.24	1.63	0.01	0.37	33.70	0.16	16.83	0.00	0.04	0.02	0.02	100.01	85.02
34IV-TVG07(1)8-幔	47.95	2.15	0.01	0.37	33.25	0.21	16.20	0.03	0.06	—	—	100.24	80.59
34IV-TVG07(1)8-核	47.59	2.06	0.02	0.35	33.02	0.26	16.25	0.02	0.05	—	—	99.62	81.23
34IV-TVG07(1)7-边	46.97	1.64	0.01	0.37	33.19	0.20	16.67	0.01	—	—	—	99.05	84.87
34IV-TVG07(1)7-幔	46.27	1.77	0.06	0.44	33.54	0.18	16.60	—	—	0.01	0.01	98.87	83.54
34IV-TVG07(1)7-核	46.96	1.71	0.02	0.35	33.78	0.15	17.01	—	0.02	—	0.03	100.03	84.51
34IV-TVG07(1)5-边	48.20	2.44	0.02	0.37	32.19	0.22	15.55	—	0.03	0.04	—	99.05	77.81
34IV-TVG07(1)5-幔	47.75	2.22	0.02	0.41	32.55	0.17	16.02	0.01	0.03	0.07	0.01	99.26	79.81
34IV-TVG07(1)5-核	47.69	1.98	0.03	0.39	33.01	0.15	16.24	0.01	0.01	—	—	99.52	81.76
34IV-TVG07(1)4-边	47.25	1.96	0.02	0.38	32.86	0.16	16.36	—	0.02	0.02	—	99.03	82.05
34IV-TVG07(1)4-幔	47.96	2.01	0.01	0.39	32.71	0.20	15.99	0.01	0.01	0.01	—	99.31	81.41
34IV-TVG07(1)4-核	46.51	1.82	0.01	0.35	33.30	0.14	16.66	0.03	0.06	—	0.01	98.89	83.43
34IV-TVG07(1)3-边	46.32	1.60	0.02	0.35	33.78	0.20	16.83	0.03	0.02	—	0.02	99.16	85.24
34IV-TVG07(1)3-幔	46.45	1.52	0.01	0.36	33.88	0.17	17.15	—	0.03	—	0.05	99.62	86.11
34IV-TVG07(1)3-核	46.03	1.38	0.02	0.29	34.08	0.17	17.37	0.05	0.02	—	—	99.40	87.35
34IV-TVG07(1)2-边	47.26	1.97	0.01	0.38	33.26	0.18	16.48	0.00	0.02	0.06	—	99.62	82.17
34IV-TVG07(1)2-幔	46.61	1.77	0.04	0.41	33.33	0.19	16.69	0.03	0.03	0.01	—	99.09	83.73
34IV-TVG07(1)2-核	47.32	1.73	0.01	0.36	33.41	0.18	16.76	0.02	0.03	—	—	99.82	84.17
34IV-TVG07(1)1-边	46.41	1.52	0.02	0.40	33.79	0.18	17.00	0.01	0.07	0.07	0.01	99.47	86.01
34IV-TVG07(1)1-幔	47.07	1.70	0.03	0.36	33.63	0.17	16.80	0.03	0.06	0.03	—	99.87	84.41
34IV-TVG07(1)1-核	47.24	1.74	0.03	0.43	33.87	0.18	17.11	—	0.02	—	—	100.61	84.36
34IV-TVG07(2)1-边	47.83	1.97	0.02	0.40	33.34	0.19	16.48	—	0.00	0.02	—	100.24	82.09
34IV-TVG07(2)1-幔	47.14	1.93	0.02	0.41	32.85	0.18	16.32	—	0.01	0.02	—	98.89	82.24

续表 3

分析点号	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO	Total	An
34IV-TVG07(2)1-核	46.91	1.62	0.03	0.36	33.96	0.16	16.94	—	—	—	0.01	99.99	85.10
34IV-TVG07(2)2-边	45.90	1.54	0.02	0.34	33.26	0.13	16.60	0.05	—	0.01	—	97.86	85.55
34IV-TVG07(2)2-幔	45.94	1.32	0.02	0.36	33.86	0.14	17.42	—	—	—	—	99.06	87.86
34IV-TVG07(2)2-核	44.94	1.42	0.03	0.37	32.44	0.16	16.41	0.03	0.04	0.02	0.03	95.87	86.32
34IV-TVG07(2)3-边	47.75	2.21	0.02	0.35	32.39	0.19	16.01	—	0.03	—	—	98.94	79.96
34IV-TVG07(2)3-幔	49.03	2.60	0.00	0.34	31.84	0.24	15.25	0.06	0.06	0.03	0.05	99.49	76.42
34IV-TVG07(2)3-核	48.17	2.28	0.03	0.43	32.22	0.21	15.62	0.01	—	0.04	0.01	99.01	78.98
34IV-TVG07(2)4-边	47.10	1.97	0.02	0.39	32.75	0.20	16.01	0.02	—	0.01	—	98.46	81.72
34IV-TVG07(2)4-幔	46.56	1.50	0.04	0.41	33.07	0.15	16.72	0.04	0.09	—	0.01	98.59	85.85
34IV-TVG07(2)4-核	47.21	1.89	0.02	0.45	33.03	0.19	16.23	0.04	0.01	—	—	99.07	82.47
34IV-TVG07(2)5-边	47.02	1.53	0.02	0.38	33.76	0.20	17.02	0.03	0.01	0.03	—	100.00	85.94
34IV-TVG07(2)5-幔	46.37	1.62	0.02	0.37	33.42	0.22	16.88	—	0.02	0.01	—	98.90	85.14
34IV-TVG07(2)5-核	46.81	1.60	0.02	0.38	33.26	0.20	16.88	0.01	—	0.01	—	99.16	85.23
34IV-TVG07(2)6-边	46.90	1.64	0.02	0.43	33.44	0.19	16.88	—	0.01	—	—	99.50	84.95
34IV-TVG07(2)6-幔	46.89	1.54	0.01	0.38	33.64	0.16	16.97	0.04	0.01	—	—	99.65	85.81
34IV-TVG07(2)6-核	46.61	1.52	0.02	0.39	33.79	0.16	17.06	—	0.02	0.03	—	99.59	86.05
34IV-TVG07(2)6-幔	46.93	1.67	0.01	0.39	33.57	0.16	16.83	0.03	0.02	—	0.04	99.64	84.74
34IV-TVG07(2)6-核	47.01	1.51	0.02	0.37	33.22	0.16	16.85	—	0.03	0.01	—	99.17	85.94
34IV-TVG07(2)7-边	47.48	1.78	0.02	0.48	33.34	0.21	16.26	—	0.02	0.06	0.02	99.66	0.83
34IV-TVG07(2)7-幔	48.94	2.42	0.04	0.45	32.29	0.22	15.34	—	—	—	—	99.69	0.78
34IV-TVG07(2)7-核	47.58	1.98	0.01	0.45	33.02	0.21	16.35	0.01	—	0.05	—	99.66	0.82
34IV-TVG07(2)7-幔	47.65	1.68	0.03	0.42	33.03	0.20	16.33	—	0.01	—	—	99.33	0.84
34IV-TVG07(2)7-核	48.36	2.10	0.02	0.39	32.90	0.19	15.86	0.01	0.00	0.01	—	99.84	0.81
34IV-TVG07(2)8-边	46.24	1.38	0.02	0.31	33.65	0.15	17.10	0.02	0.05	—	—	98.93	0.87
34IV-TVG07(2)8-幔	46.34	1.66	0.03	0.35	33.47	0.20	16.62	0.02	0.04	—	0.01	98.74	0.85
34IV-TVG07(2)8-核	46.87	1.74	0.03	0.39	33.58	0.20	16.72	0.03	0.03	—	—	99.59	0.84
34IV-TVG07(2)10-边	47.06	1.78	0.02	0.36	33.40	0.17	16.55	0.02	0.01	0.05	0.01	99.42	0.84
34IV-TVG07(2)10-幔	46.67	1.62	0.02	0.35	33.25	0.17	16.77	—	0.01	0.02	—	98.87	0.85
34IV-TVG07(2)10-核	45.81	1.69	0.03	0.37	33.11	0.16	16.69	—	0.05	—	—	97.91	0.84

注: 主量元素单位: wt%。

III-TVG14(2)4, 这些环带特征可能与岩浆多期次的注入和混合有关。

3 讨论

3.1 断桥热液区玄武岩长石斑晶的高 An 值

前人对超慢速扩张西南印度洋脊玄武岩长石

斑晶成分的系统分析较少。Li 等^[13]报道了西南印度洋洋中脊 64°E 处的 Mount Jourdanne 火山斜长石超斑状玄武岩中的长石组成。此火山玄武岩中的长石斑晶粒径可达 1 cm 以上, 其 An 值为 60~69。根据长石微量元素和熔体包裹体成分, Li 等^[13]认为 Mount Jourdanne 超斑玄武岩中的长石是由前期岩浆在下部洋壳深度结晶, 然后由后期的岩浆机械分离捕获并喷发携带来上。本文所报道的 50.4°E

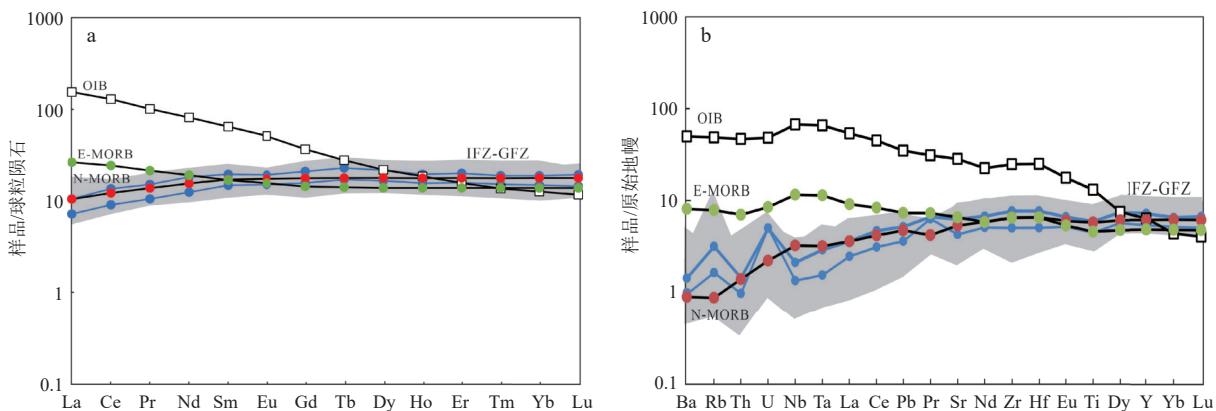


图 4 西南印度洋中脊 27 洋脊段玄武岩微量元素图

a. 稀土元素球粒陨石标准化图; b. 微量元素原始地幔标准化蛛网图灰色阴影区域表示来自 IFZ-GFZ 段 MORB 的文献数据^[7-8], 球粒陨石数据来自文献 [11], 原始地幔数据来自文献 [12], OIB, N-MORB 和 E-MORB 来自文献 [11]。

Fig.4 Trace element distribution of basalts from segment 27, SWIR

a. Chondrite normalized rare earth element (REE); b. primitive mantle normalized trace element patterns of the basalts from Segment 27. Grey shaded fields represent MORB data in the literature form the IFZ-GFZ section^[7-8], chondrite data are from reference [11], primitive mantle data are from reference [12], OIB, N-MORB, and E-MORB are from reference [11].

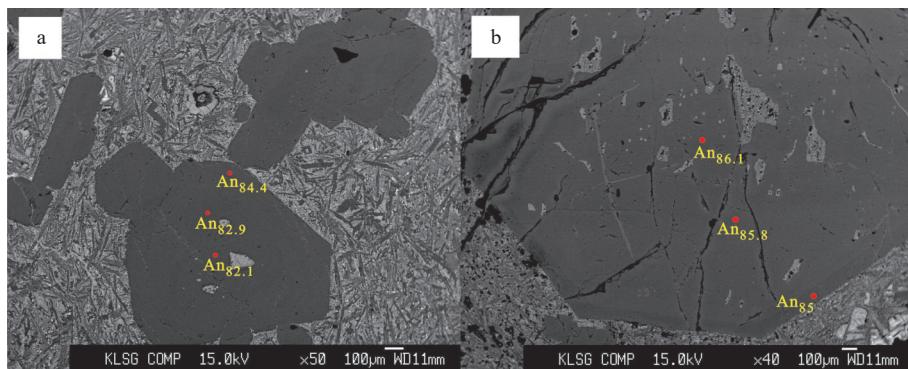


图 5 斑晶电子探针分析点位

a. 斑晶 34IV-TVG07(2)9 分析点位; b. 斑晶 34IV-TVG07(2)6 分析点位。

Fig.5 Electron Microprobe Analysis points of phenocrysts

a. Analysis points of phenocryst 34IV-TVG07(2)9; b. analysis points of phenocryst 34IV-TVG07(2)6.

玄武岩中的长石 An 最高值达 87.9(图 6), 平均值可达 83.6, 显著高于 Mount Jourdanne 超斑玄武岩斜长石斑晶的 An 范围, 暗示了与其不同的成因模式。

3.2 洋中脊高 An 值长石的可能成因及对地幔属性的指示意义

高 An 值斜长石可以在岛弧高铝玄武岩和某些靠近热液影响区域的大洋中脊玄武岩中出现^[14-17]。形成高 An 值斜长石斑晶的可能原因通常包括:① 岩浆富水^[18]; ② 岩浆结晶压力较高; ③ 岩浆具有高 Al_2O_3 的特征^[14]; ④ 母岩浆具有异常高的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ ^[19]。

高水含量可以显著提高斜长石的 An 值, 这可能是岛弧玄武岩中存在高 An 值斜长石的原因, 但

是大洋中脊环境下水含量很难达到岛弧玄武岩的水平^[20]。Wang 等^[21]和 Liu 等^[22]报道了西南印度洋 $48^\circ \sim 52^\circ\text{E}$ 玄武岩淬火玻璃的水含量, 其最高值也并未超过 0.5%。因此, 原始岩浆高含水量不是造成本文样品高 An 值的原因。考虑到 50.4°E 洋脊段具有比相邻洋脊段更厚的洋壳厚度, 较高的结晶压力是潜在的成因。然而, 根据 Panjasawatwong 等^[23]的长石结晶实验结果, 增加熔体的 $\text{Ca}^{\#}(\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na}) \times 100)$ 和 $\text{Al}^{\#}(\text{Al}/(\text{Al}+\text{Si}) \times 100)$ 会增加斜长石的含量, 但在更高压下的结晶实际上会起到相反的作用, 即在更高压力下结晶出的长石反而比在低压下结晶的长石 An 值更低。

为了更好地了解高 An 值斜长石结晶过程, 我

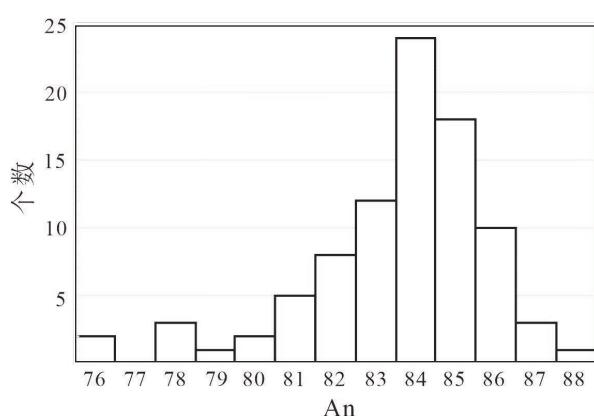


图 6 斜长石斑晶 An 值

Fig.6 Statistical histogram of An-rich plagioclase

表 4 Petrolog3 结晶分异模拟计算结果

Table 4 Results of Petrolog3 simulation

样品编号	模拟压力	最高An值
30III-TVG14	1Kbar	78.2
	3Kbar	74.8
	5Kbar	71.3
	7Kbar	67.9
34IV-TVG07	1Kbar	80.5
	3Kbar	77.1
	5Kbar	73.7
	7Kbar	70.3
40II-TVG04	1Kbar	75.4
	3Kbar	71.9
	5Kbar	68.5
	7Kbar	65.1

注: 橄榄石、斜长石、单斜辉石模型均来自文献[19]。

们用 Petrolog3 软件进行了结晶模拟计算^[24]。表 4 展示了分别采用本文报道的两个样品和本洋脊段具有最高 MgO 含量的样品(40II-TVG04, MgO 为 10.49%)的成分作为岩浆初始成分进行模拟计算获得的最高长石 An 值。可以看到, 这几种成分的岩浆在不同压力下都无法直接结晶形成 An 值大于 81 的斜长石斑晶。因此, 这些斜长石并非由其寄主岩浆直接结晶产生。

通过上述分析, 初步排除了高水含量和高压结晶造成 50.4°E 玄武岩长石高 An 值的可能性, 唯一的可能解释是形成高 An 值长石的原始母岩浆本身具有特殊性。Panjasawatwong 等^[23]的实验结果表明, 如果原始熔体具有高的 CaO/Na₂O 比值(>10),

在低水含量的情况下也可以结晶出高 An 值的斜长石。而这类熔体可以由亏损的或者难熔的地幔橄榄岩部分熔融产生。一般来说, 经历过早期熔体提取的地幔可具有这种亏损岩浆组成(低的 Na₂O 含量, 高的 CaO/Na₂O)^[22]。实际上, 无论是 Yang 等^[7]还是 Yu 和 Dick^[8]都认为西南印度洋洋中脊 48°~52°E 地幔中存在过古老的地幔熔体抽取事件, 不同之处在于前者认为该熔体抽取是克洛泽地幔柱的部分熔融, 而后者认为是残存于冈瓦纳大陆裂解之前的大洋岩石圈地幔中的古老亏损地幔。Gao 等^[25]对西南印度洋 53°E 处直接出露在洋底的橄榄岩进行的元素模拟计算显示, 龙骨区地幔经历过古老、富水岛弧环境下的部分熔融。这些古老的亏损型地幔在印度洋打开后, 零星分布于上地幔软流圈中, 之后因地幔对流被输送到洋中脊下方^[8]。最近, Liu 等^[22]对 SWIR 龙旗超级洋脊段(48°~52°E)的玄武岩玻璃进行了水含量、微量元素和 H-B 等多同位素分析, 结果表明, 本研究的 27 洋脊段玄武岩具有异常高的 H₂O/Ce 比值(>1000), 而一般的洋中脊玄武岩 H₂O/Ce 比值最高仅为 200^[26], 此外, 27 洋脊段的岩浆具有较高的 δD 和较低的 Ce/Pb 比值特征^[22], 均指向了富水的岛弧地幔成因。也就是说, 多个方面的地球化学证据显示了西南印度洋洋中脊下存在古老的岛弧环境相关的亏损地幔楔残余, 这种岛弧特征属性在断桥热液区所在的 27 洋脊段尤其显著^[22]。本文所报道的高 An 值长石斑晶推测正是由此类地幔发生部分熔融产生的岩浆结晶形成, 从而为 SWIR 地幔源区的属性提供了间接佐证。

4 结论

超慢速扩张西南印度洋超慢速洋脊断桥热液区所在的洋脊段(50.4°E)发育有含大量长石斑晶的玄武岩。大多数斜长石斑晶具有自形结构, An 值较高(76.2~87.9), 斜长石斑晶存在正、反和韵律成分环带结构。相比西南印度洋 64°E 的 Mount Jourdanne 火山中的斜长石超斑玄武岩来说, 断桥区的样品斜长石斑晶具有高 An 特征, 表明了其斜长石不是由类似的下洋壳辉长岩中的斜长石被后期岩浆直接机械捕获携带上升而形成。Petrolog3 软件的模拟也显示了这些斜长石无法由其寄主岩浆直接结晶产生。结合实验岩石学结果, 以及西南印度洋洋中脊地幔中存在古老地幔楔熔融残余的多方面地球化学证据, 认为断桥区玄武岩中的高 An 值斜长石斑晶成因是由于地幔源区存在古老亏损的岛

弧地幔楔残余,这些不均一的亏损地幔物质熔融形成的原始岩浆随后发生结晶分异,形成了断桥区的高 An 值斜长石。

参考文献 (References)

- [1] Sauter D, Cannat M. The ultraslow spreading Southwest Indian ridge [M]//Rona P A, Devey C W, Dyment J, et al. Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2010, 88: 153-173.
- [2] 孙国洪,田丽艳,李小虎,等.西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究 [J].海洋地质与第四纪地质,2021,41(5): 126-138. [[SUN Guohong, TIAN Liyan, LI Xiaohu, et al. A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(5): 126-138.]
- [3] Dick H J B, Lin J, Schouten H. An ultraslow-spreading class of ocean ridge [J]. *Nature*, 2003, 426(6965): 405-412.
- [4] Li J B, Jian H C, Chen Y J, et al. Seismic observation of an extremely magmatic accretion at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(8): 2656-2663.
- [5] Jian H C, Singh S C, Chen Y J, et al. Evidence of an axial magma chamber beneath the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge [J]. *Geology*, 2017, 45(2): 143-146.
- [6] Chen J, Cannat M, Tao C H, et al. 780 thousand years of upper - crustal construction at a melt-rich segment of the ultraslow spreading southwest Indian Ridge 50°28'E [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(10): e2021JB022152.
- [7] Yang A Y, Zhao T P, Zhou M F, et al. Isotopically enriched N-MORB: A new geochemical signature of off - axis plume - ridge interaction—A case study at 50°28'E, Southwest Indian Ridge [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(1): 191-213.
- [8] Yu X, Dick H J B. Plate-driven micro-hotspots and the evolution of the Dragon Flag melting anomaly, Southwest Indian Ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 531: 116002.
- [9] 李伟.西南印度洋中脊玄武岩岩石地球化学特征:对超慢速扩张的启示[D].中国地质大学博士学位论文,2017. [LI Wei. Petrogeochemical characteristics of basalts from Southwest Indian Ridge: Implications for magmatic processes at ultra-slow spreading ridge[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2017.]
- [10] 初凤友,陈建林,马维林,等.中太平洋海山玄武岩的岩石学特征与年代[J].海洋地质与第四纪地质,2005,25(4): 55-59. [CHU Fengyou, CHEN Jianlin, MA Weilin, et al. Petrologic characteristics and ages of basalt in Middle Pacific mountains [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(4): 55-59.]
- [11] 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.
- [12] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3-4): 223-253.
- [13] Li W, Tao C H, Zhang W, et al. Melt inclusions in plagioclase macrocrysts at mount Jourdanne, southwest Indian ridge (~64°E): implications for an enriched mantle source and shallow magmatic processes [J]. *Minerals*, 2019, 9(8): 493.
- [14] Beard J S, Borgia A. Temporal variation of mineralogy and petrology in cognate gabbroic enclaves at Arenal volcano, Costa Rica [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1989, 103(1): 110-122.
- [15] Crawford A J, Falloon T J, Eggins S. The origin of island arc high-alumina basalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 97(3): 417-430.
- [16] Sinton C W, Christie D M, Coombs V L, et al. Near-primary melt inclusions in anorthite phenocrysts from the Galapagos Platform [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 119(4): 527-537.
- [17] Stoltz A J, Varne R, Wheller G E, et al. The geochemistry and petrogenesis of K-rich alkaline volcanics from the Batu Tara volcano, eastern Sunda arc [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 98(3): 374-389.
- [18] Kudo A M, Weill D F. An igneous plagioclase thermometer [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1970, 25(1): 52-65.
- [19] Duncan R A, Green D H. The genesis of refractory melts in the formation of oceanic crust [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 96(3): 326-342.
- [20] Hirschmann M M. Water, melting, and the deep Earth H₂O cycle [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2006, 34: 629-653.
- [21] Wang W, Kelley K A, Li Z G, et al. Volatile element evidence of local MORB mantle heterogeneity beneath the southwest Indian ridge, 48°-51°E [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2021, 22(7): e2021GC009647.
- [22] Liu J, Tao C H, Zhou J P, et al. Water enrichment in the mid-ocean ridge by recycling of mantle wedge residue [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 584: 117455.
- [23] Panjasawatwong Y, Danyushevsky L V, Crawford A J, et al. An experimental study of the effects of melt composition on plagioclase-melt equilibria at 5 and 10 kbar: implications for the origin of magmatic high-An plagioclase [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1995, 118(4): 420-432.
- [24] Danyushevsky L V. The effect of small amounts of H₂O on crystallisation of mid-ocean ridge and backarc basin magmas [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2001, 110(3-4): 265-280.
- [25] Gao C G, Dick H J B, Liu Y, et al. Melt extraction and mantle source at a Southwest Indian Ridge Dragon Bone amagmatic segment on the Marion Rise [J]. *Lithos*, 2016, 246-247: 48-60.
- [26] Michael P. Regionally distinctive sources of depleted MORB: Evidence from trace elements and H₂O [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 131(3-4): 301-320.