



· 青年编委专刊(地球科学) ·

腾冲地块昔马地区早始新世富角闪石镁铁质岩石成因及锆石记录的岩浆演化过程

赵少伟¹, 杨子豪¹, 方肖雨¹, 文泰¹, 陈璟元¹, 赖绍聪², 李佐臣¹

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

2. 西北大学 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要 陆缘弧地壳中富角闪石镁铁质岩石是探索岛弧岩浆深部分异和演化的重要载体。选取腾冲地块昔马地区富角闪石镁铁质岩石系列, 利用岩相学、全岩主微量和 Sr-Nd 同位素、锆石 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素和微量元素特征, 探讨其成因和演化过程。分析结果表明, 昔马镁铁质岩石是早始新世(51.2 ~ 52.7 Ma) 同源岩浆堆晶和分异的产物, 辉长岩和角闪辉长岩是以堆晶矿物及少量粒间熔体固结的产物, 其中, 辉长岩以单斜辉石、斜长石和磁铁矿为主要堆晶矿物, 角闪辉长岩以斜长石、单斜辉石、磷灰石和榍石为主要堆晶矿物, 而闪长岩则是以演化熔体为主的固结产物, 并且在堆晶分异过程中, 批次岩浆补给导致堆晶矿物(如斜长石)的溶解-再沉淀。锆石形态学、矿物包裹体组合和微量元素特征表明, 镁铁质岩浆中早期结晶的斜长石±斜方辉石有助于锆石在镁铁质岩浆中的结晶, 且较大的锆石结晶温度范围指示了锆石长时间的结晶, 其微量元素有规律的变化表明镁铁质岩浆中结晶的锆石能够有效记录岩浆的结晶和分异演化过程。

关键词 富角闪石镁铁质岩石; 堆晶和分异; 锆石; 腾冲地块

中图分类号: P588.15 DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbr.2025-03-007

Petrogenesis and magmatic evolution recorded by zircon for Early Eocene hornblende-rich mafic rocks in Xima area, Tengchong Block

ZHAO Shaowei¹, YANG Zihao¹, FANG Xiaoyu¹, WEN Tai¹,
CHEN Jingyuan¹, LAI Shaocong², LI Zuochen¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract The hornblende-rich mafic rocks exposed in the continental arc is a key object to research differentiation and evolution of arc magmatism in the depth. This paper selected a series of hornblende-rich mafic rocks in Xima area, Tengchong Block to discuss their petrogenesis and evolved process, using the petrography, whole rock major and trace elements, Sr-Nd isotopic compositions, zircon U-Pb dating, Lu-Hf isotopic compositions and trace elements. The age data and isotopic compositions show that the mafic rocks in Xima area are accumulation and differentiation products of homogeneous magma in the Early Eocene (51.2 ~ 52.7 Ma). The accumulated minerals of gabbro are dominated by clinopyroxene, plagioclase and magnetite; and

收稿日期: 2024-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(42272052, 41902046); 陕西高校青年创新团队。

第一作者: 赵少伟, 男, 博士, 副教授, 从事岩浆岩岩石学研究, shwzhaoqx@163.com。

the plagioclase, clinopyroxene, titanite and apatite are the major of accumulated minerals for hornblende gabbro. The diorite is predominated by crystallization of crystal-poor evolved melt. The recharge of batch magma resulted in the dissolution and reprecipitation of accumulated minerals during the differentiation, such as plagioclase. The morphology, mineral inclusions and trace element of zircons suggest the early crystallization of plagioclase $\pm$ orthopyroxene assemblage in the mafic magma could promote the crystallization of zircon in the interaction face between mineral and melt. The wide range of zircon crystallization temperature shows long-time crystallization and the regular variations of trace elements reflect that zircon crystallized in mafic magma could record crystallization and differentiation processes of mafic magma efficiently.

Keywords hornblende-rich mafic rocks; accumulate and differentiation; zircon; Tengchong Block

岛弧岩浆作用控制了大陆地壳的增生及垂向分异过程,形成了地球上区别于其他行星的长英质上地壳。但幔源岩浆为玄武质,与大陆地壳的安山质平均组分明显相悖。因此,大量研究关注弧岩浆最终演化为成熟大陆壳的机制,现阶段主要认识有两种:①岛弧玄武质初始岩浆中-高压,富水($>2\%$)条件下结晶分异形成安山质的组分,这些偏基性的岩浆结晶分异演化出安山质的组分,密度更大的堆晶体由于重力不稳而拆沉返回地幔^[1-5];②通过岛弧下地壳物质的部分熔融,形成地壳上部的花岗质的成分,而岛弧下地壳的麻粒岩相或榴辉岩相的镁铁质物质也可能发生拆沉作用^[6-8]。这些过程可以使岛弧地壳总体演变形成安山质组分^[1],最终使岛弧地壳组分与陆壳组分相匹配。这种岩浆过程主要是发生在深部弧地壳,甚至弧根部位^[9-10],且岛弧穿地壳岩浆系统模型认为,弧岩浆的形成和演化是通过一系列以冷储存方式储存并相连的富晶体的岩浆储库进行堆晶和分异演化^[11]。因此,出露的岛弧深部或记录深部演化的岩石是探讨深部岩浆演化过程的重要载体。岛弧岩浆深部堆晶的产物主要为辉石岩和角闪石岩^[5,10,12],因此辉石和角闪石在岛弧岩浆演化过程中起到了至关重要的作用,是诱发幔源岩浆逐渐向长英质组分演化的重要矿物相^[13-15],并且角闪石的深部结晶分异过程也可能是控制岛弧岩浆氧逸度变化的重要因素^[16]。但在全球的火山熔岩中,仅发现有少量的角闪石斑晶存在,大部分的斑晶为辉石^[14],这与深成岩中普遍存在角闪石以及在一些陆缘弧地区出现富角闪石的超镁铁质-镁铁质岩石明显相悖,这可能与深部岩浆演化过程中角闪石替代反应密切相关^[12,17-18]。因此,对岛弧地区出现的富角闪石深成岩的研究,有助于理解深部地壳层次的弧岩浆的形成与分异过程。此外,锆石作为岩浆岩中常

见的副矿物,能够揭示年龄信息和长英质岩浆演化过程^[19],但对于镁铁质岩中的锆石的矿物化学特征是否能够反映岩浆演化的研究则相对较少。因此,本文为探讨深部镁铁质岩浆的演化过程,选取腾冲地块与新特提斯洋俯冲闭合相关的早始新世昔马地区的富角闪石的镁铁质岩,通过岩相学、主微量元素和全岩 Sr-Nd、锆石 U-Pb、Lu-Hf 同位素和微量元素来探讨镁铁质岩石系列的深部演化过程。

1 地质背景与岩相学

腾冲地块位于青藏高原东南部,东以高黎贡带和保山地块相连,西以实皆断裂和抹谷变质带与西缅地块相接,被认为是在早二叠世从冈瓦纳大陆东部分离的微陆块^[20-21](见图1)。腾冲地块基底为高黎贡山群,主要岩石为片麻岩、云母石英片岩、大理岩及石英岩^[20],但越来越多的年代学证据表明,高黎贡山群中的花岗质片麻岩和黑云母斜长片麻岩具有更年轻的年龄,甚至是早始新世^[20,22-25]。古地磁研究结果表明,腾冲地块是拉萨地块在早始新世(约40 Ma)经南迦巴瓦旋转近90°后向东南延伸的部分^[26],并且自早古生代以来,腾冲地块与拉萨地块具有相似的幕式岩浆活动特征^[27-29]。经历了多阶段的洋陆俯冲和大洋闭合事件,腾冲地块发育的早古生代(518 ~ 456 Ma)岩浆活动零星分布在陆块东侧及高黎贡山带内,与原特提斯洋的俯冲-闭合相关^[28,30];中晚三叠世—早侏罗世(264 ~ 196 Ma)的岩浆活动分布在地块中部,是古特提斯洋分支洋盆俯冲-闭合的产物^[18,31];早白垩世(130 ~ 115 Ma)岩浆活动主要分布在腾冲地块东侧,与班公-怒江洋俯冲闭合和腾冲-保山板块的碰撞相关^[28,32-34];晚白垩世—早始新世(76 ~ 50 Ma)的岩浆活动主要分布

在腾冲地块中西部,是与新特提斯洋俯冲和印度—亚洲大陆碰撞相关的大陆边缘弧的产物^[23-25,34-39]。新生代岩浆活动以安山玄武岩-玄武岩熔岩喷发为主,与印度大陆持续俯冲至缅甸-腾冲地块之下有关^[40]。

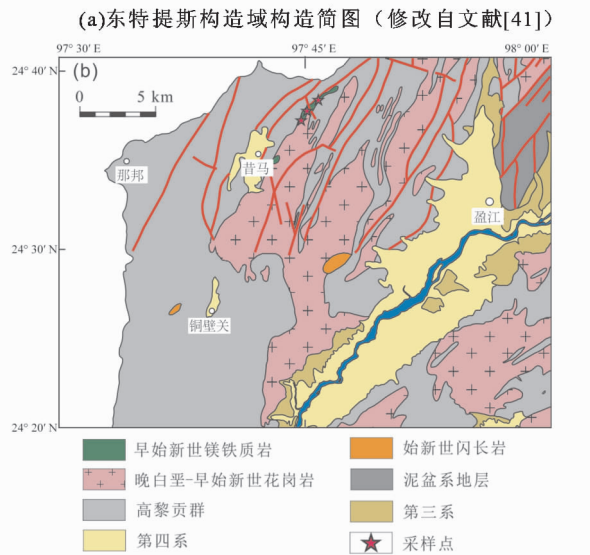
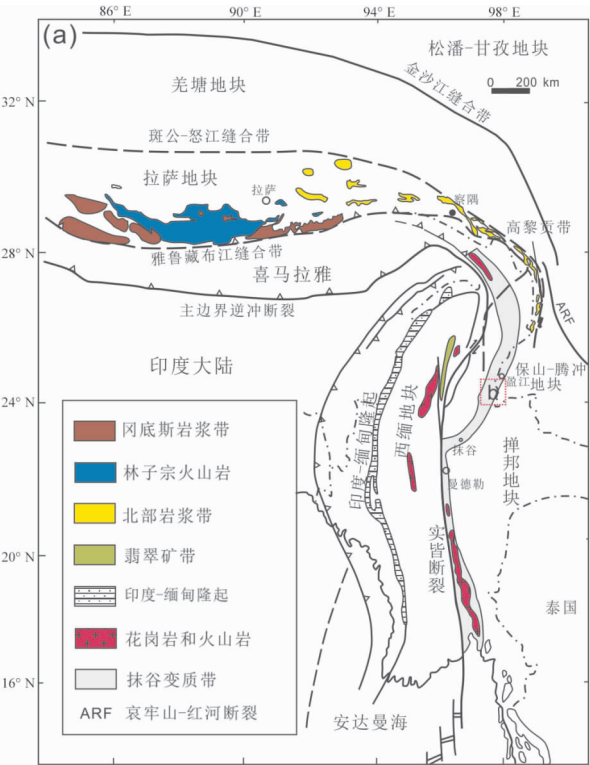


图 1 东特提斯域与腾冲地块构造简图

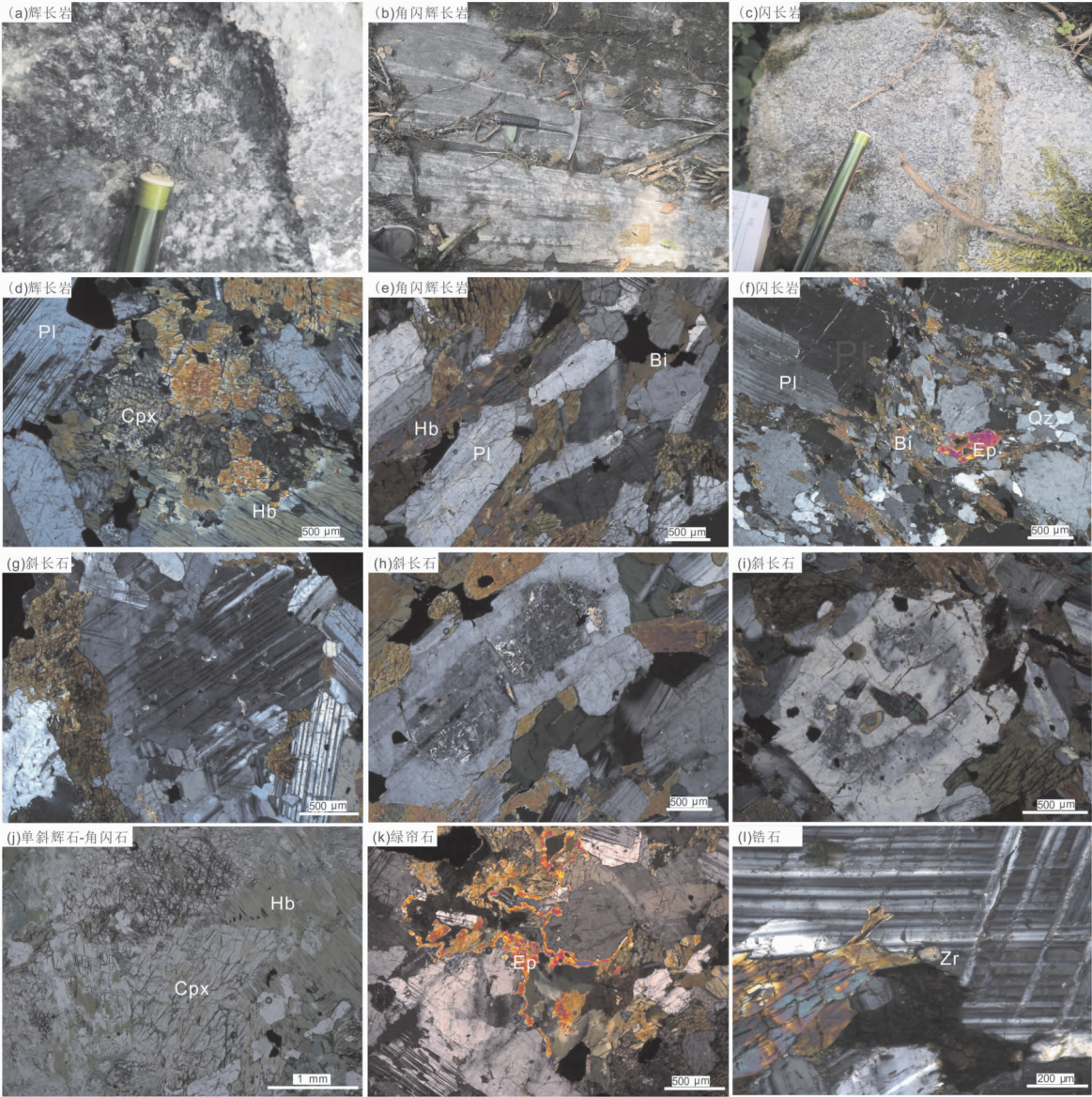
Fig.1 Simplified geological map of Eastern Tethyan tectonic domain and Tengchong Block

腾冲地块晚白垩世—早始新世以长英质岩浆活动为主,但在早始新世时,出现大量镁铁质岩石,并且这些镁铁质岩石主要出露于腾冲地块西

侧,常以岩株状产出,与花岗岩密切共生。早始新世长英质岩石与镁铁质岩石均表现出由西向东逐渐富集的特征^[23,36,41]。腾冲地块早始新世镁铁质岩石系列以富角闪石的角闪石岩、角闪辉长岩和闪长岩为主,集中形成于 55 ~ 50 Ma,是陆缘弧中下-中上地壳的产物^[23-24,36,38]。本文选取的镁铁质岩石出露在昔马-铜壁关岩体的西北侧(见图 2),以小岩株状产出,其围岩为高黎贡山群的变质基性岩和片麻岩。腾冲地块西侧那邦地区出露的变质基性岩石在早始新世发生明显的中高压麻粒岩相和高角闪岩相变质作用,那邦西地区出露的变质基性岩经历了始新世早期中-高压基性麻粒岩相变质(8 ~ 10 kbar)和晚期高角闪岩相(5.9 ~ 8 kbar)退变质作用^[42-43],那邦以东地区出露斜长角闪岩经历了始新世早期高角闪岩相变质(8.9 ~ 9.7 kbar)和晚期低角闪岩相(4.1 ~ 6.8 kbar)退变质作用^[44],说明腾冲地块西侧的早始新世镁铁质岩石是侵位至岛弧地壳的下部甚至是弧根部位。昔马镁铁质岩石主要岩石类型为辉长岩、角闪辉长岩和闪长岩[见图 2(a) ~ (c)]。辉长岩中存在较大的粒状的角闪石自形晶体,粒径可达 2 cm,岩石主要由单斜辉石(0 ~ 5%)、角闪石(50% ~ 55%)、斜长石(40% ~ 45%)组成(为了与下文角闪辉长岩区分,将其定名为辉长岩),单斜辉石常呈自形-半自形粒状,部分单斜辉石被包裹在角闪石中,斜长石常呈自形板状晶形,角闪石晶体常呈自形-半自形粒状,部分角闪石包裹斜长石和单斜辉石自形晶,斜长石、角闪石和单斜辉石的自形晶常形成聚晶或相互接触形成晶体格架;角闪辉长岩主要由斜长石(45% ~ 50%)、角闪石(30% ~ 35%)和黑云母(10% ~ 15%)组成,主要矿物具有定向特征,斜长石以半自形-自形板状为主,角闪石成柱状半自形-自形晶,黑云母呈半自形片状;闪长岩主要由斜长石(75% ~ 80%)、黑云母(15% ~ 20%)和少量石英(<5%)组成,斜长石呈半自形板状晶,黑云母呈细小鳞片状,与他形粒状石英充填于斜长石的粒间[见图 2(d) ~ (f)]。辉长岩和角闪辉长岩中斜长石具有明显的环带结构,根据其环带结构可至少分为 3 种类型:①自形的具有核边结构;②为自形的具有核幔边结构;③为半自形-他形的无环带斜长石[见图 2(g) ~ (k)]。斜长石的环带特征表明了镁铁质岩石复杂的演化过程。3 种岩石中的副矿物为锆石、榍石、磷灰石、绿帘石、磁铁矿[见图 2

(j) ~ (l)]。但辉长岩中缺少磷灰石,并且绿帘石以他形围绕在斜长石或角闪石边部,榍石以他形包壳状包裹磁铁矿,锆石几乎都被包裹在斜长石和角闪石中〔见图 2(l)〕。而在角闪辉长岩和

闪长岩中,磷灰石被包裹于斜长石、角闪石和黑云母中,榍石呈自形晶,绿帘石呈他形粒状,且磁铁矿含量明显减少,闪长岩中的绿帘石自形程度明显高于角闪辉长岩中的绿帘石。



(a) ~ (f)野外和显微镜下矿物组成照片;(g) ~ (i)辉长岩和角闪辉长岩中斜长石的核边和核幔边环带特征;
(j)辉长岩中单斜辉石的角闪石边;(k)角闪辉长岩中他形的绿帘石;(l)被包裹在斜长石中的锆石

图2 腾冲地块昔马镁铁质岩石岩相学特征

Fig. 2 Petrography characteristics of mafic rocks in the Xima area, Tengchong Block

2 分析方法

本文样品的测试分析均在武汉上谱分析科技有限公司完成,具体方法如下,全岩主量元素分析采用 ZSX Primus II 型长色散 X 射线荧光光谱仪,测试相对标准偏差 <2%。微量元素使用 Agi-

lent 7700e 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析,精度和准确度均优于 5%。全岩 Sr-Nd 同位素的分析首先是将 200 目样品进行烘干、熔样,再用 AG50W 树脂和 LN 树脂进行分离,分别收集 Sr 和 Nd 溶液,再在 MC-ICP-MS(Neptune Plus)上进行测试,流程监控标样采用 BCR-2 和 RGM-2,准确度优于 0.05‰,详细实验流程参见文献

[45]。锆石单矿物在双目镜下分选后,置于环氧树脂进行剖光,利用电子显微扫描电镜上完成锆石 CL 图像分析,再利用 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统以及 Agilent 7900 组成的 LA-ICP-MS 进行锆石 U-Pb 同位素和微量元素同时分析,使用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,分析激光斑束为 32 μm ,频率为 5 Hz,同位素和微量元素分馏校正使用外标为 91500 和 NIST610,数据处理软件采用 ICPMSDataCal^[46]。锆石原位 Lu-Hf 同位素测试是在激光剥蚀多接收等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)上完成。激光剥蚀系统为 Geolas HD, MC-ICP-MS 为 Neptune Plus,为确保分析数据的可靠性,Plešovice、91500 和 GJ-1 这 3 个国际锆石标准与实际样品同时分析,分析的激光斑束为 44 μm ,脉冲速率为 8 Hz,详细流程参见文献[47]。

3 分析结果

3.1 主量元素和微量元素

本文挑选辉长岩、角闪辉长岩和闪长岩各 3 件样品进行主微量元素的测试,结果见表 1,3 种岩性主微量元素显示出较大的变化范围。辉长岩具有低的 SiO₂(42.06% ~ 42.29%)、K₂O(0.64% ~ 0.72%)、Na₂O(1.35% ~ 1.41%)和 P₂O₅(0.04% ~ 0.05%)质量含量,高的 MgO(6.37% ~ 6.83%)、Fe₂O₃T(15.06% ~ 15.92%)、Al₂O₃(18.51% ~ 19.60%)和 CaO(12.16% ~ 12.29%)质量含量,相对低的 Mg[#](48 ~ 51)值。

表 1 腾冲地块昔马镁铁质岩石系列主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Tab. 1 Analytical results of major (%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements of mafic rocks in Xima area, Tengchong Block

	辉长岩			闪长岩			角闪辉长岩		
	KC23-9a	KC23-9b	KC23-9c	KC23-10a	KC23-10b	KC23-10c	KC23-11a	KC23-11b	KC23-11c
SiO ₂	42.12	42.06	42.29	61.82	60.10	60.06	46.43	46.80	46.32
TiO ₂	1.06	1.28	1.17	0.62	0.83	0.83	1.30	1.29	1.38
Al ₂ O ₃	19.60	18.51	18.52	16.06	17.81	16.72	20.25	20.36	19.84
Fe ₂ O ₃ T	15.06	15.92	15.35	5.81	5.95	6.62	11.53	11.50	12.14
MnO	0.14	0.15	0.15	0.11	0.07	0.09	0.17	0.16	0.18
MgO	6.47	6.37	6.83	3.29	2.66	3.10	4.37	4.33	4.62
CaO	12.28	12.29	12.16	5.65	4.60	4.77	9.06	9.03	9.12
Na ₂ O	1.37	1.35	1.41	3.40	3.87	3.53	3.39	3.50	3.28
K ₂ O	0.72	0.65	0.64	1.88	2.53	2.48	1.51	1.54	1.49
P ₂ O ₅	0.04	0.05	0.04	0.21	0.30	0.26	0.44	0.47	0.41
LOI	1.13	1.14	1.27	1.14	0.91	0.90	0.84	0.79	0.64

相比辉长岩,角闪辉长岩具有略高的 SiO₂(46.32% ~ 46.80%)、K₂O(1.49% ~ 1.54%)、Na₂O(3.28% ~ 3.50%)、Al₂O₃(19.84% ~ 20.36%)和 P₂O₅(0.41% ~ 0.47%),明显低的 MgO(4.33% ~ 4.37%)、Fe₂O₃T(11.50% ~ 12.14%)和 CaO(9.03% ~ 9.12%)质量含量,低的 Mg[#](47)值。闪长岩具有最高的 SiO₂(60.06% ~ 61.82%)和 K₂O(1.88% ~ 2.53%),最低的 MgO(2.66% ~ 3.29%)、Fe₂O₃T(5.81% ~ 6.62%)、Al₂O₃(16.06% ~ 17.81%)和 CaO(4.60% ~ 5.65%)质量含量,相对低的 P₂O₅(0.21% ~ 0.30%)和 Mg[#](51 ~ 57)值。在 TAS 图中,3 种岩石分别落入橄榄辉长岩、辉长岩和闪长岩区域,而在 MgO-FeOt-Na₂O + K₂O 图中,岩石系列逐渐从拉斑系列向钙碱性系列演化(见图 3)。

微量元素结果表明,3 种岩石总体上富集大离子亲石元素(Rb、Ba 和 K),亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr 等),但在辉长岩中,Ti 出现了明显的富集特征[见图 4(a)]。稀土元素总体显示右倾的配分模式,相比辉长岩和角闪辉长岩,闪长岩轻重稀土的分馏更加明显,具有高的(La/Yb)_N(9 ~ 20)比值[见图 4(b)]。辉长岩无明显的 Eu 异常或弱的正异常, δEu 值为 1.02 ~ 1.10,但角闪辉长岩和闪长岩具有微弱的 Eu 负异常,角闪辉长岩 δEu 为 0.80 ~ 0.87,闪长岩 δEu 为 0.75 ~ 0.96,其中,闪长岩的 1 个样品表现出明显的 Eu 正异常($\delta\text{Eu} = 1.59$)。

续表 1

	辉长岩			闪长岩			角闪辉长岩		
	KC23-9a	KC23-9b	KC23-9c	KC23-10a	KC23-10b	KC23-10c	KC23-11a	KC23-11b	KC23-11c
SUM	99.99	99.76	99.83	99.98	99.63	99.36	99.29	99.79	99.43
Li	15.3	8.61	10.8	18.4	27.7	26.2	24.4	24.9	23.1
Be	0.34	0.38	0.39	1.59	1.66	1.75	1.36	1.38	1.48
Sc	27.2	33.6	31.8	27.6	3.51	17.0	21.7	22.1	25.9
V	525	576	531	81.6	87.8	95.8	212	210	227
Cr	6.63	5.99	6.24	16.5	10.4	21.0	2.86	3.26	2.70
Co	76.4	64.0	79.5	42.5	91.6	50.5	63.7	63.6	44.5
Ni	11.7	8.77	11.2	15.9	16.9	13.7	11.4	9.55	6.54
Cu	84.0	90.2	97.4	5.45	9.19	9.43	45.0	43.4	40.6
Zn	91.5	84.3	84.9	62.9	65.7	81.0	92.4	87.8	89.5
Ga	21.0	20.2	19.6	18.0	19.8	21.0	22.6	22.7	22.0
Rb	21.7	13.0	12.9	69.5	106.0	105.0	51.3	51.7	47.9
Sr	686	606	601	591	657	607	839	845	790
Y	8.86	13.4	10.8	24.4	5.23	14.0	31.0	29.6	34.0
Zr	22.2	22.8	22.9	32.8	27.6	29.3	86.8	172	84.4
Nb	1.49	1.68	1.70	8.87	9.49	10.8	8.01	7.05	7.51
Sn	0.71	0.76	0.70	2.37	1.18	2.15	1.77	1.63	1.96
Cs	1.88	1.12	1.15	3.73	5.82	5.67	2.46	2.69	2.45
Ba	136	327	130	608	664	643	492	493	441
La	3.67	4.07	3.90	45.2	13.6	16.1	22.4	22.9	22.6
Ce	7.75	8.84	8.69	80.6	25.6	33.3	52.1	53.1	55.8
Pr	1.17	1.46	1.39	9.14	2.64	3.97	7.28	6.78	7.07
Nd	5.59	7.24	6.62	31.7	9.82	17.5	30.9	29.9	32.3
Sm	1.58	2.09	1.87	6.64	1.78	3.73	6.93	6.94	7.51
Eu	0.60	0.75	0.65	1.52	0.83	1.11	1.93	1.81	1.89
Gd	1.75	2.36	2.03	5.79	1.43	3.32	6.61	6.27	7.03
Tb	0.27	0.38	0.33	0.88	0.19	0.51	1.02	0.91	1.05
Dy	1.65	2.33	2.00	5.03	1.04	2.81	5.89	5.49	6.16
Ho	0.35	0.49	0.41	0.98	0.20	0.53	1.15	1.11	1.27
Er	0.93	1.32	1.10	2.49	0.50	1.42	3.15	3.03	3.38
Tm	0.13	0.18	0.15	0.32	0.070	0.19	0.41	0.42	0.46
Yb	0.83	1.19	1.02	2.14	0.47	1.29	2.76	2.74	3.07
Lu	0.12	0.17	0.14	0.28	0.070	0.18	0.38	0.41	0.45
Hf	0.72	0.87	0.82	1.16	0.71	0.94	2.37	4.07	2.38
Ta	0.91	0.62	0.91	1.35	3.22	2.29	1.53	1.60	1.02
Tl	0.130	0.089	0.089	0.400	0.580	0.580	0.340	0.330	0.330
Pb	3.78	3.89	3.72	9.29	9.54	9.28	5.81	5.61	5.29
Th	0.63	0.80	0.76	5.75	1.36	2.12	0.75	0.78	0.73
U	0.25	0.34	0.35	1.13	3.51	3.74	0.32	0.44	0.34
δEu	1.10	1.03	1.02	0.75	1.59	0.96	0.87	0.84	0.80
Dy/Dy*	0.94	1.00	0.96	0.68	0.58	0.74	0.83	0.77	0.81

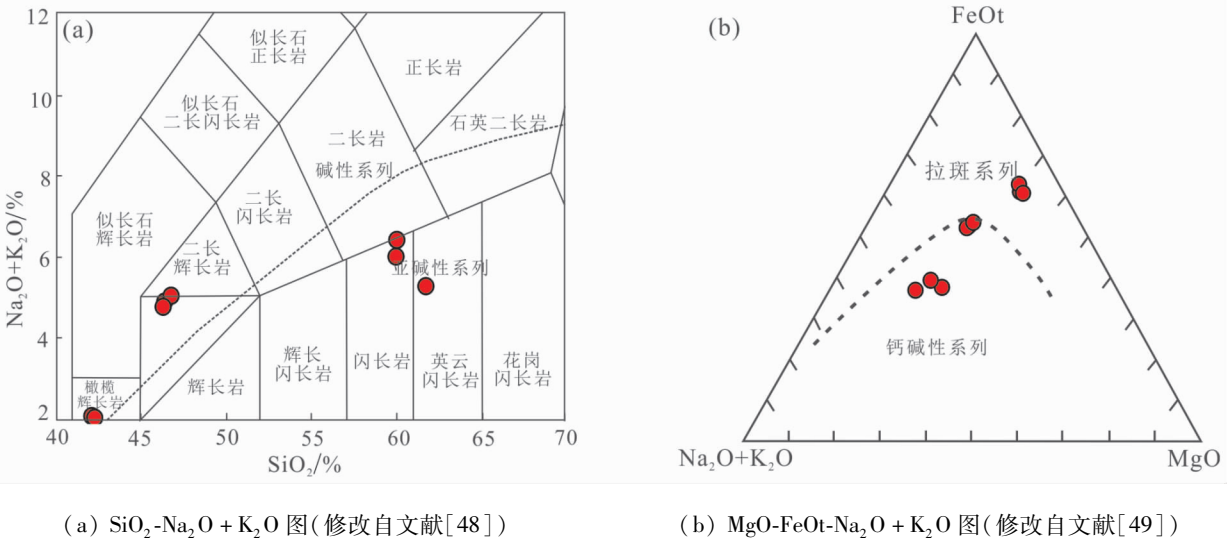


图 3 腾冲地块昔马镁铁质岩石主元素图解

Fig. 3 The major element diagrams of Xima mafic rocks in Tengchong Block

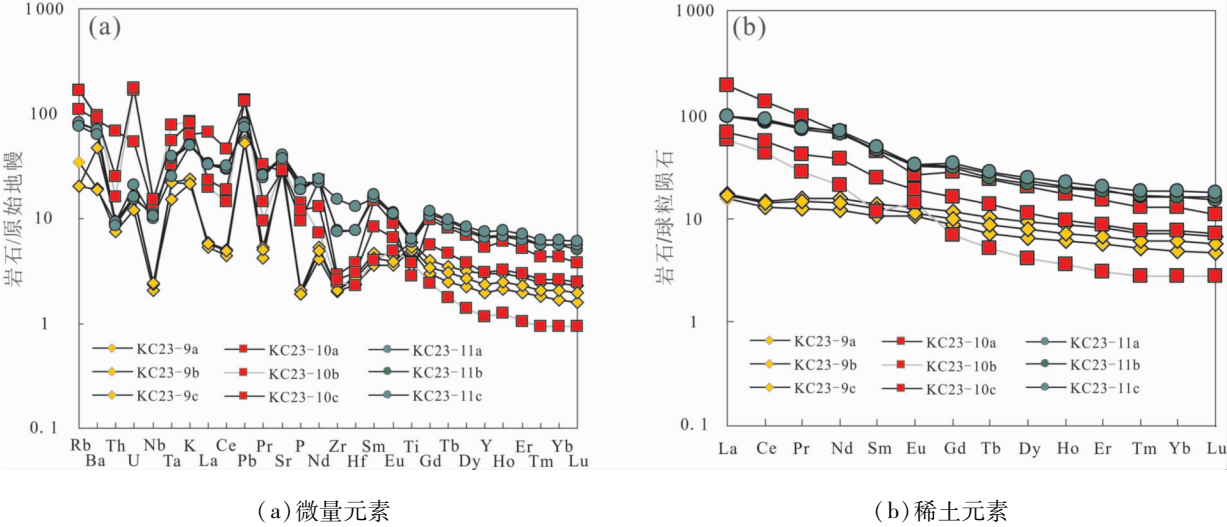


图 4 腾冲地块昔马镁铁质岩石系列微量元素蛛网图和稀土元素配分图(修改自文献[50])

Fig. 4 Primitive mantle normalized trace element spider and chondrite-normalized REE pattern diagrams for mafic rocks in Xima area of Tengchong Block

3.2 锆石 U-Pb 年代学

本文挑选辉长岩、角闪辉长岩和闪长岩各 1 个样品进行锆石形态学、U-Pb 同位素和微量元素的分析,结果见表 2、3 和图 5。形态学以及锆石的内部结构分析结果表明,3 种岩石中的锆石均为无色透明状,但 3 种岩石中的锆石形态特征和内部结构明显不同。

辉长岩(KC23-9)中的锆石大小不均一,粒径为 50 ~ 180 μm ,并且,结合 CL 图像可以将其分为 2 组,一组为小颗粒,形浑圆状,粒径集中在 50 ~ 100 μm ,长宽比近 1: 1,在 CL 图像中发育明显的核边结构,核部发光性弱,为黑色或深灰色,深灰色核部具有扇状分带,边部发光性强,具有弱环带

或无环带特征;另一组锆石呈自形-半自形晶,无核边结构,粒径较大,集中在 100 ~ 180 μm ,长宽比近 2: 1,整体以宽缓环带为特征,与具有核边结构锆石的亮边相似。2 组锆石 U-Pb 年龄一致,无明显差异,32 个分析点获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 48.3 ~ 53.8Ma,加权平均年龄为(51.2 ± 0.4) Ma (MSWD=3.1)。

角闪辉长岩(KC23-11)中锆石大小均一,粒径为 150 ~ 200 μm ,长宽比为 1: 1.5 ~ 1: 2, CL 图像中锆石发光性强,呈明显的扇状分带或宽缓的环带特征。角闪辉长岩中的 25 个分析点获得²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 50.8 ~ 54.6 Ma,加权平均年龄为(52.7 ± 0.7) Ma (MSWD=0.49)。

闪长岩(KC23-10)中的锆石明显更大,粒径为180~200 μm。根据CL图像,闪长岩中的锆石被分为3种,第一种是具有核边结构的锆石,与辉长岩中具核边的锆石结构相似,锆石核部为黑色或深灰色,边部发光性较强,具有弱的环带特征;第二种为亮锆石,具有弱的环带特征,与核边结构锆石的边部相似;第三种为具细窄振荡环带特征的锆石,自形程度较高,长宽比更大。3

种锆石的 U-Pb 年龄无明显差异,对 31 个点进行定年分析,其中 29 个点获得²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为(52.2 ±0.6) Ma (MSWD = 3.3),剩余 2 个点为捕获锆石年龄,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分别为 1 535 Ma 和 1 711 Ma。

以上结果表明腾冲地块昔马地区镁铁质岩石系列形成于同一时代,年龄为 51.2 ~ 52.7 Ma,属于早始新世。

表 2 腾冲地块昔马镁铁质岩石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学数据

Tab. 2 Data of LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of mafic rocks in Xima area, Tengchong Block

点号	锆石特征	同位素比值						年龄/Ma					
		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ
KC23-9													
KC23-9-01	亮边	0.053 9	0.002 8	0.008 4	0.000 1	0.002 9	0.000 2	53.3	2.7	53.8	0.9	59.4	3.1
KC23-9-02	黑核	0.050 1	0.001 5	0.007 9	0.000 1	0.002 5	0.000 0	49.6	1.5	50.8	0.5	49.9	0.9
KC23-9-03	亮边	0.052 7	0.002 0	0.008 2	0.000 1	0.002 6	0.000 1	52.2	2.0	52.6	0.6	52.1	1.5
KC23-9-04	黑核	0.053 1	0.001 4	0.007 9	0.000 1	0.002 7	0.000 1	52.5	1.4	50.6	0.5	55.3	1.2
KC23-9-05	亮边	0.053 4	0.002 7	0.008 2	0.000 1	0.002 7	0.000 1	52.8	2.6	52.6	0.8	54.4	2.1
KC23-9-06	亮边	0.050 6	0.002 8	0.007 7	0.0001	0.002 5	0.000 2	50.1	2.7	49.2	0.6	50.4	3.2
KC23-9-07	亮边	0.053 9	0.003 4	0.008 3	0.000 1	0.002 5	0.000 1	53.3	3.2	53.6	0.8	49.8	2.5
KC23-9-08	亮锆石	0.049 0	0.003 7	0.007 5	0.000 1	0.002 5	0.000 2	48.6	3.6	48.3	0.8	50.0	3.9
KC23-9-09	亮锆石	0.051 0	0.002 7	0.007 8	0.000 1	0.002 4	0.000 2	50.5	2.6	50.0	0.8	47.5	3.6
KC23-9-10	亮锆石	0.050 8	0.002 4	0.007 9	0.000 1	0.002 5	0.000 1	50.4	2.3	50.5	0.6	49.8	2.0
KC23-9-11	黑核	0.053 7	0.001 9	0.008 0	0.000 1	0.002 5	0.000 0	53.1	1.9	51.6	0.7	49.9	1.0
KC23-9-12	黑核	0.049 9	0.003 1	0.007 8	0.000 1	0.002 4	0.000 1	49.5	3.0	50.0	0.7	49.0	2.3
KC23-9-13	亮边	0.047 7	0.002 0	0.008 0	0.000 1	0.002 5	0.000 1	47.3	2.0	51.6	0.6	50.3	1.3
KC23-9-14	亮锆石	0.050 5	0.002 1	0.007 9	0.000 1	0.002 5	0.000 1	50.0	2.0	50.5	0.6	51.5	1.7
KC23-9-15	亮边	0.054 2	0.004 2	0.008 0	0.000 1	0.002 6	0.000 2	53.6	4.0	51.4	0.9	52.6	3.4
KC23-9-16	黑核	0.046 6	0.003 3	0.007 6	0.000 1	0.002 4	0.000 2	46.2	3.2	48.8	0.7	48.0	3.9
KC23-9-17	亮边	0.051 8	0.003 2	0.008 1	0.000 1	0.002 4	0.000 1	51.2	3.1	51.9	0.6	49.2	2.3
KC23-9-18	亮锆石	0.053 0	0.002 1	0.008 1	0.000 1	0.002 6	0.000 1	52.4	2.0	52.1	0.6	52.9	1.1
KC23-9-19	黑核	0.052 9	0.001 4	0.008 1	0.000 1	0.002 7	0.000 1	52.3	1.4	52.0	0.5	54.1	1.1
KC23-9-20	黑核	0.055 9	0.002 8	0.007 9	0.000 1	0.002 8	0.000 1	55.3	2.7	50.4	0.8	56.7	3.0
KC23-9-21	黑核	0.051 5	0.001 6	0.007 8	0.000 1	0.002 7	0.000 1	51.0	1.5	50.0	0.5	54.0	1.7
KC23-9-22	黑核	0.052 7	0.002 3	0.008 0	0.000 1	0.002 4	0.000 1	52.2	2.2	51.7	0.6	48.9	1.9
KC23-9-23	亮锆石	0.054 6	0.002 7	0.008 0	0.000 1	0.002 6	0.000 1	54.0	2.6	51.6	0.7	51.8	2.1
KC23-9-24	黑核	0.053 3	0.001 8	0.008 1	0.000 1	0.002 7	0.000 1	52.7	1.7	52.1	0.7	54.6	1.1
KC23-9-25	亮锆石	0.052 2	0.003 4	0.007 9	0.000 1	0.002 4	0.000 2	51.6	3.2	50.6	0.7	49.1	3.0
KC23-9-26	黑核	0.052 4	0.002 3	0.008 0	0.000 1	0.002 6	0.000 1	51.9	2.2	51.2	0.6	51.8	1.6
KC23-9-27	黑核	0.055 8	0.002 2	0.008 0	0.000 1	0.002 7	0.000 1	55.1	2.1	51.4	0.7	54.9	2.8
KC23-9-28	黑核	0.053 5	0.002 4	0.008 1	0.000 1	0.002 6	0.000 1	52.9	2.3	51.9	0.6	52.1	1.8
KC23-9-29	亮锆石	0.054 0	0.003 5	0.008 2	0.000 2	0.002 6	0.000 1	53.4	3.4	52.6	1.0	51.9	1.8
KC23-9-30	亮锆石	0.052 1	0.002 1	0.008 0	0.000 1	0.002 4	0.000 1	51.5	2.1	51.4	0.5	49.3	1.4
KC23-9-31	亮锆石	0.057 2	0.004 3	0.008 3	0.000 1	0.002 5	0.000 1	56.5	4.1	53.0	0.9	50.3	2.2
KC23-9-32	亮锆石	0.056 4	0.002 1	0.007 9	0.000 1	0.002 6	0.000 1	55.7	2.0	50.6	0.7	51.9	1.8
KC23-10													
KC23-10-01	亮边	0.050 6	0.004 4	0.007 9	0.000 2	0.002 4	0.000 2	50.1	4.3	50.8	1.4	48.9	3.1
KC23-10-02	亮锆石	0.051 1	0.004 0	0.007 8	0.000 2	0.002 6	0.000 1	50.6	3.8	50.3	1.1	52.9	1.8
KC23-10-03	亮边	0.059 9	0.004 9	0.008 4	0.000 2	0.002 6	0.000 2	59.0	4.7	53.7	1.2	52.7	3.6
KC23-10-04	亮锆石	0.054 6	0.004 7	0.008 5	0.000 2	0.002 7	0.000 2	54.0	4.5	54.6	1.3	55.0	3.3
KC23-10-05	捕获锆石	4.198 3	0.063 1	0.269 0	0.001 7	0.078 0	0.001 0	1674	12.4	1535	8.9	1519	19.0
KC23-10-06	亮锆石	0.050 6	0.005 8	0.008 2	0.000 2	0.002 1	0.000 2	50.1	5.7	52.7	1.4	43.0	4.3

续表 2

点号	锆石特征	同位素比值						年龄/Ma					
		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ
KC23-10-07	黑核	0.055 3	0.002 5	0.008 0	0.000 1	0.002 7	0.000 1	54.7	2.4	51.7	0.7	53.8	1.1
KC23-10-08	黑核	0.053 9	0.002 4	0.008 3	0.000 1	0.002 5	0.000 1	53.3	2.3	53.2	0.6	51.2	1.1
KC23-10-09	振荡环带	0.057 0	0.004 1	0.008 3	0.000 1	0.002 3	0.000 1	56.3	3.9	53.3	0.9	46.8	1.9
KC23-10-10	亮锆石	0.055 1	0.005 2	0.007 9	0.000 3	0.003 3	0.000 2	54.5	5.0	50.9	1.9	66.6	4.1
KC23-10-11	黑核	0.055 3	0.002 5	0.008 1	0.000 1	0.002 5	0.000 1	54.6	2.4	52.0	0.6	50.5	1.3
KC23-10-12	亮锆石	0.054 5	0.004 0	0.007 9	0.000 2	0.002 6	0.000 1	53.9	3.9	50.9	1.1	53.5	2.2
KC23-10-13	振荡环带	0.055 8	0.004 5	0.008 2	0.000 3	0.002 4	0.000 2	55.1	4.3	52.6	1.6	48.0	3.2
KC23-10-14	振荡环带	0.054 0	0.004 9	0.008 3	0.000 2	0.002 6	0.000 1	53.4	4.7	53.2	1.1	51.8	2.7
KC23-10-15	亮锆石	0.053 6	0.003 4	0.008 2	0.000 1	0.002 5	0.000 1	53.1	3.3	52.4	0.9	49.6	2.2
KC23-10-16	亮边	0.053 3	0.004 1	0.008 1	0.000 1	0.002 5	0.000 1	52.7	3.9	52.0	0.8	50.5	1.4
KC23-10-17	亮锆石	0.053 4	0.003 9	0.008 2	0.000 2	0.002 5	0.000 1	52.9	3.8	52.4	1.0	51.0	2.3
KC23-10-18	振荡环带	0.051 2	0.004 4	0.007 9	0.000 2	0.002 6	0.000 1	50.7	4.3	50.8	1.3	51.7	2.8
KC23-10-19	黑核	0.051 0	0.003 3	0.007 8	0.000 1	0.002 6	0.000 1	50.5	3.2	50.2	0.7	52.8	1.7
KC23-10-20	黑核	0.053 5	0.002 9	0.007 9	0.000 1	0.002 6	0.000 1	52.9	2.8	50.9	0.6	52.3	1.5
KC23-10-21	亮锆石	0.058 1	0.004 3	0.008 2	0.000 1	0.002 5	0.000 1	57.3	4.1	53.0	0.9	50.9	2.4
KC23-10-22	振荡环带	0.063 2	0.004 6	0.008 9	0.000 3	0.003 2	0.000 3	62.2	4.4	57.0	1.8	64.2	5.1
KC23-10-23	振荡环带	0.056 6	0.004 5	0.008 5	0.000 2	0.002 6	0.000 1	55.9	4.3	54.3	1.1	53.1	2.6
KC23-10-24	黑核	0.053 5	0.003 8	0.008 3	0.000 1	0.002 6	0.000 1	53.0	3.6	53.0	0.8	52.1	1.4
KC23-10-25	黑核	0.050 8	0.002 4	0.008 4	0.000 1	0.002 8	0.000 1	50.3	2.3	53.9	0.8	55.6	1.5
KC23-10-26	亮边	0.049 9	0.003 4	0.008 2	0.000 1	0.002 4	0.000 1	49.4	3.3	52.5	0.8	47.7	1.7
KC23-10-27	亮锆石	0.050 5	0.006 5	0.008 4	0.000 6	0.003 2	0.000 3	50.0	6.3	54.1	3.8	64.6	7.0
KC23-10-28	黑核	0.053 9	0.001 6	0.007 9	0.000 1	0.002 5	0.000 0	53.3	1.6	50.4	0.4	50.0	0.7
KC23-10-29	振荡环带	0.059 5	0.002 8	0.008 7	0.000 1	0.002 8	0.000 1	58.6	2.7	55.6	0.8	57.4	1.4
KC23-10-30	捕获锆石	4.848 9	0.074 3	0.304 0	0.002 8	0.087 6	0.001 1	1793	13.0	1711	13.8	1697	20.2
KC23-10-31	黑核	0.055 8	0.001 9	0.008 2	0.000 1	0.002 5	0.000 1	55.1	1.8	52.9	0.5	51.3	1.0
KC23-11													
KC23-11-01	亮锆石	0.053 9	0.005 5	0.008 4	0.000 3	0.002 4	0.000 2	53.3	5.3	53.7	1.6	49.4	3.4
KC23-11-02	亮锆石	0.057 4	0.005 1	0.008 5	0.000 3	0.002 6	0.000 2	56.7	4.9	54.6	1.9	53.3	4.3
KC23-11-03	亮锆石	0.056 5	0.004 2	0.008 5	0.000 2	0.002 8	0.000 2	55.8	4.0	54.5	1.5	56.5	3.1
KC23-11-04	亮锆石	0.053 3	0.004 8	0.008 1	0.000 2	0.002 7	0.000 2	52.7	4.6	52.0	1.3	55.5	4.0
KC23-11-05	亮锆石	0.058 2	0.014 1	0.008 2	0.000 4	0.003 0	0.000 3	57.4	13.5	52.7	2.6	59.6	5.2
KC23-11-06	亮锆石	0.055 8	0.005 4	0.008 3	0.000 3	0.003 0	0.000 2	55.1	5.2	53.1	1.7	60.3	3.6
KC23-11-07	亮锆石	0.053 8	0.008 1	0.008 1	0.000 3	0.002 8	0.000 3	53.2	7.8	51.9	2.0	57.2	6.3
KC23-11-08	亮锆石	0.053 0	0.004 7	0.008 2	0.000 2	0.002 4	0.000 1	52.4	4.5	52.8	1.2	48.7	2.2
KC23-11-09	亮锆石	0.050 9	0.010 1	0.008 2	0.000 4	0.002 8	0.000 3	50.4	9.8	52.6	2.5	55.7	5.4
KC23-11-10	亮锆石	0.055 5	0.009 7	0.008 1	0.000 4	0.002 2	0.000 2	54.8	9.3	51.7	2.7	44.7	4.4
KC23-11-11	亮锆石	0.051 4	0.005 1	0.007 9	0.000 3	0.002 8	0.000 3	50.9	5.0	50.8	1.9	56.7	5.9
KC23-11-12	亮锆石	0.056 2	0.005 6	0.008 2	0.000 3	0.002 6	0.000 2	55.5	5.4	52.7	1.8	51.9	4.5
KC23-11-13	亮锆石	0.053 6	0.005 7	0.008 0	0.000 3	0.002 8	0.000 3	53.1	5.5	51.4	1.7	57.0	6.8
KC23-11-14	亮锆石	0.051 4	0.006 5	0.007 9	0.000 2	0.002 6	0.000 2	50.9	6.3	50.9	1.4	53.3	3.2
KC23-11-15	亮锆石	0.054 8	0.003 9	0.008 2	0.000 2	0.002 4	0.000 1	54.2	3.7	52.5	1.1	48.2	1.9
KC23-11-16	亮锆石	0.057 2	0.005 6	0.008 5	0.000 2	0.002 7	0.000 2	56.4	5.3	54.3	1.6	55.2	3.8
KC23-11-17	亮锆石	0.056 3	0.006 0	0.007 9	0.000 3	0.003 3	0.000 3	55.6	5.8	51.0	1.7	65.9	6.2
KC23-11-18	亮锆石	0.057 1	0.007 1	0.008 5	0.000 2	0.003 0	0.000 2	56.4	6.8	54.3	1.4	61.2	4.1
KC23-11-19	亮锆石	0.054 9	0.006 1	0.008 1	0.000 3	0.003 0	0.000 2	54.3	5.9	52.2	1.6	60.6	5.0
KC23-11-20	亮锆石	0.057 4	0.006 0	0.008 0	0.000 3	0.002 7	0.000 2	56.7	5.8	51.5	1.7	54.0	4.3
KC23-11-21	亮锆石	0.052 8	0.006 7	0.008 1	0.000 3	0.003 3	0.000 3	52.2	6.5	52.2	2.0	66.9	5.8
KC23-11-22	亮锆石	0.055 4	0.005 6	0.008 3	0.000 2	0.003 2	0.000 3	54.8	5.4	53.3	1.5	65.5	5.1
KC23-11-23	亮锆石	0.058 5	0.006 6	0.008 5	0.000 4	0.002 7	0.000 2	57.7	6.3	54.3	2.4	54.8	4.5
KC23-11-24	亮锆石	0.056 6	0.011 5	0.008 3	0.000 4	0.003 0	0.000 3	55.9	11.1	53.2	2.4	60.4	5.7
KC23-11-25	亮锆石	0.056 8	0.009 9	0.008 3	0.000 4	0.003 2	0.000 3	56.1	9.5	53.3	2.5	65.3	6.1

表 3 腾冲地块昔马镁铁质岩石中锆石的原位微量元素

Tab.3 In-situ trace elements of zircons from mafic rocks in Xima area, Tengchong Block																					单位: ×10 ⁻⁶			
点号	锆石特征	P	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U	Eu *
KC23-9																								
KC23-9-01	亮边	146	4.73	359	0.16	0.05	11.3	0.14	1.44	1.91	0.99	8.11	2.57	29.5	11.6	51.7	12.5	130	26.0	6 822	0.21	790	903	0.77
KC23-9-02	黑核	262	9.02	1128	0.36	0.01	18.2	0.23	2.62	3.87	3.10	23.5	8.26	99.8	38.0	174	40.5	413	80.3	6 035	0.26	3952	2911	1.00
KC23-9-03	亮边	148	3.91	141	0.09	0.01	5.08	0.01	0.25	0.48	0.25	2.40	0.80	10.2	4.50	22.6	5.79	63.2	13.8	5 343	0.11	541	1634	0.71
KC23-9-04	黑核	161	3.11	285	0.17	0.01	3.87	0.03	0.32	0.68	0.52	3.69	1.50	20.4	9.19	48.0	12.9	151	35.0	6 238	0.13	984	3685	1.02
KC23-9-05	亮边	184	3.14	371	0.18	0.00	4.05	0.01	0.44	0.46	0.49	5.12	1.92	27.0	12.1	60.6	15.2	170	37.6	7 980	0.11	467	1338	0.99
KC23-9-06	亮边	153	1.17	66.5	0.09	0.01	1.74	0.01	0.03	0.00	0.07	0.68	0.28	4.12	2.15	10.6	3.28	40.9	9.96	5 609	0.080	125	1625	
KC23-9-07	亮边	115	3.24	65.7	0.08	0.00	2.59	0.00	0.09	0.23	0.11	0.76	0.30	4.04	1.90	10.1	2.99	35.4	8.56	7 569	0.10	196	738	0.77
KC23-9-08	亮锆石	100	0.71	139	0.06	0.01	1.50	0.00	0.09	0.16	0.19	1.17	0.57	9.55	4.45	22.8	6.93	87.0	22.2	5 084	0.040	141	1089	1.34
KC23-9-09	亮锆石	111	1.87	51.5	0.06	0.00	2.16	0.00	0.12	0.06	0.06	0.45	0.22	3.22	1.56	8.61	2.57	32.0	8.08	7 788	0.060	116	878	1.05
KC23-9-10	亮锆石	123	2.46	73.2	0.10	0.00	1.37	0.00	0.04	0.14	0.15	1.04	0.49	5.48	2.35	11.9	3.19	39.6	8.70	5 660	0.054	206	1011	1.24
KC23-9-11	黑核	191	6.01	326	0.18	0.00	6.86	0.03	0.36	0.87	0.51	5.34	1.86	24.2	10.7	51.2	12.9	142	30.1	4 724	0.24	1116	1970	0.73
KC23-9-12	黑核	124	1.40	238	0.08	0.00	2.57	0.02	0.40	1.10	0.55	4.32	1.47	18.6	7.86	38.3	9.84	110	25.8	5 836	0.043	327	1539	0.77
KC23-9-13	亮边	168	4.67	273	0.14	0.01	3.82	0.02	0.29	0.76	0.58	5.27	1.88	22.4	9.03	41.5	10.6	110	23.4	8 565	0.21	634	1303	0.88
KC23-9-14	亮锆石	166	3.35	76.3	0.15	0.00	2.25	0.00	0.08	0.17	0.13	1.29	0.42	5.52	2.41	12.5	3.40	38.0	8.37	5 992	0.16	283	1138	0.84
KC23-9-15	亮边	163	3.43	68.7	0.16	0.00	2.28	0.01	0.00	0.20	0.06	0.94	0.32	4.77	2.02	10.7	3.03	35.7	8.23	9 286	0.31	122	482	0.44
KC23-9-16	黑核	132	2.01	171	0.14	0.00	1.82	0.00	0.06	0.27	0.21	1.67	0.80	10.7	4.90	28.2	7.64	92.0	22.2	6 172	0.13	219	1598	0.95
KC23-9-17	亮边	145	2.35	71.5	0.14	0.01	1.74	0.01	0.02	0.10	0.07	0.95	0.38	4.79	2.48	12.2	3.31	39.8	9.61	7 907	0.16	277	1209	0.70
KC23-9-18	亮锆石	181	4.78	217	0.17	0.00	7.25	0.02	0.18	0.62	0.43	3.82	1.31	17.5	6.92	33.1	8.24	96.0	20.4	6 575	0.11	1124	1255	0.85
KC23-9-19	黑核	181	4.96	248	0.21	0.01	6.95	0.02	0.37	0.53	0.55	3.42	1.25	18.9	7.79	39.1	9.96	111	24.3	6 195	0.20	1061	3201	1.25
KC23-9-20	黑核	111	1.51	120	0.09	0.00	1.99	0.00	0.09	0.18	0.12	1.45	0.59	8.37	3.48	19.6	5.33	66.2	16.6	5 670	0.12	180	1811	0.71
KC23-9-21	黑核	139	2.26	245	0.11	0.00	3.25	0.03	0.45	0.91	0.58	5.37	1.57	18.4	7.17	36.0	9.52	108	24.6	7 730	0.32	500	3129	0.80
KC23-9-22	黑核	124	3.08	148	0.07	0.00	1.90	0.01	0.14	0.22	0.16	1.66	0.71	9.87	4.58	24.7	6.75	79.4	18.5	6 215	0.059	197	1004	0.82
KC23-9-23	亮锆石	128	2.31	132	0.05	0.00	2.06	0.00	0.04	0.22	0.19	1.77	0.73	9.26	4.34	21.7	5.50	64.9	14.5	7 139	0.077	233	632	0.95
KC23-9-24	黑核	221	4.75	645	1.00	0.01	18.6	0.06	0.62	1.54	0.67	7.32	2.89	40.0	18.4	99.3	29.7	377	90.9	10 323	1.58	868	2085	0.61
KC23-9-25	亮锆石	132	2.25	35.2	0.07	0.00	1.52	0.00	0.07	0.10	0.03	0.26	0.15	2.05	1.05	6.05	1.66	21.5	4.89	7 224	0.052	73.0	697	0.52
KC23-9-26	黑核	131	3.94	116	0.17	0.00	2.92	0.01	0.16	0.25	0.22	1.78	0.62	8.56	3.42	17.5	5.03	58.3	13.4	9 339	0.39	391	1404	1.00
KC23-9-27	黑核	117	2.21	72.4	0.09	0.00	1.38	0.00	0.06	0.10	0.07	0.80	0.31	4.81	2.25	12.1	3.46	44.2	10.5	5 767	0.039	177	911	0.79
KC23-9-28	黑核	119	2.73	180	0.08	0.00	2.60	0.02	0.17	0.52	0.35	2.96	1.03	14.2	5.71	28.6	7.42	84.4	19.1	9 273	0.27	417	1184	0.87
KC23-9-29	亮锆石	264	9.06	418	0.27	0.01	6.53	0.01	0.27	0.88	0.51	5.56	2.35	28.4	12.7	65.2	17.2	200	43.3	6 259	0.19	445	587	0.70
KC23-9-30	亮锆石	140	2.90	167	0.10	0.00	2.05	0.01	0.15	0.39	0.30	2.02	0.87	11.1	5.06	28.1	7.80	95.7	22.7	6 357	0.080	308	1303	1.05
KC23-9-31	亮锆石	152	4.96	180	0.14	0.01	4.10	0.00	0.19	0.23	0.32	3.22	0.99	12.9	5.66	29.0	7.42	85.4	18.4	6 813	0.15	259	473	1.14
KC23-9-32	亮锆石	159	2.51	85.5	0.10	0.01	1.97	0.00	0.05	0.14	0.13	1.09	0.41	6.00	2.64	13.0	3.57	41.1	9.31	7 093	0.082	203	944	1.03
KC23-10																								
KC23-10-01	亮边	214	1.08	397	1.18	0.01	13.90	0.01	0.31	1.09	0.34	6.30	2.16	30.7	12.8	63.0	16.1	168	33.9	12 040	1.09	140	283	0.40
KC23-10-02	亮锆石	525	2.46	962	2.20	0.01	23.0	0.04	1.00	2.07	1.10	17.5	5.83	77.8	31.2	149	36.3	382	76.9	10 602	1.46	364	594	0.56
KC23-10-03	亮边	172	1.95	200	0.82	0.00	8.18	0.01	0.07	0.29	0.09	2.25	0.89	13.4	5.98	30.9	8.37	97.2	20.1	12 074	0.94	63.9	253	0.33
KC23-10-04	亮锆石	226	4.26	605	1.61	0.00	11.9	0.04	0.78	1.52	0.82	10.3	3.65	47.4	19.0	92.6	22.5	245	47.4	11 529	0.89	84.8	268	0.64
KC23-10-06	亮锆石	155	0.90	206	1.06	0.00	6.42	0.00	0.15	0.30	0.16	2.70	1.13	14.8	6.69	33.0	8.63	95.4	20.7	13 533	0.90	47.9	266	0.53
KC23-10-07	黑核	637	6.28	3026	4.93	0.07	64.8	0.47	6.48	12.3	5.12	61.3	21.4	243	97.1	442	105	1077	223	10 004	2.36	1276	1617	0.57
KC23-10-08	黑核	386	2.05	926	2.93	0.01	33.9	0.08	1.36	3.02	0.98	16.0	6.07	75.1	30.4	144	33.6	343	72.6	13 021	2.90	663	1020	0.43
KC23-10-09	振荡环带	432	3.91	936	3.16	0.00	21.5	0.04	1.06	2.92	0.50	15.9	5.92	75.9	30.7	146	34.4	346	69.9	10 751	1.50	172	317	0.22
KC23-10-10	亮锆石	263	5.26	480	0.81	0.01	9.16	0.02	0.41	1.14	0.51	7.59	2.94	37.6	15.6	76.6	19.5	200	42.8	11 290	0.42	36.9	91.8	0.53
KC23-10-11	黑核	294	2.48	738	3.60	0.01	33.4	0.06	1.31	2.49	1.18	12.7	4.59	55.8	23.3	117	29.9	331	73.8	12 117	2.44	853	1375	0.64
KC23-10-12	亮锆石	260	3.01	466	1.66	0.00	17.7	0.01	0.36	0.93	0.44	8.45	3.15	36.6	16.3	74.8	18.2	189	38.8	12 536	1.27	203	397	0.48
KC23-10-13	振荡环带	316	3.86	992	1.33	0.00	16.9	0.12	2.32	5.50	1.20	23.1	7.66	88.4	34.6	156	35.5	351	70.3	10 518	0.62	115	167	0.33
KC23-10-14	振荡环带	388	5.32	898	2.20	0.00	17.7	0.07	1.13	3.01	0.69	17.8	6.12	74.3	30.2	144	34.7	344	70.9	10 620	1.12	115	229	0.29
KC23-10-15	亮锆石	354	2.06	805	1.97	0.00	22.8	0.05	0.65	1.91	0.69	12.2	4.09	59.9	24.9	129	34.0	375	83.1	11 294	1.44	289	674	0.44
KC23-																								

续表 3

点号	锆石特征	P	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U	Eu *
KC23-11-08	亮锆石	1350	6.57	1503	1.36	1.58	18.1	0.91	5.56	7.87	2.89	36.2	11.0	124	48.5	222	53.2	496	106	7 131	0.45	181	193	0.52
KC23-11-09	亮锆石	381	8.92	1200	2.40	0.01	14.2	0.10	1.31	2.87	1.23	16.8	6.56	80.0	36.7	184	47.1	497	107	8 530	0.70	118	220	0.54
KC23-11-10	亮锆石	1577	10.7	1093	1.50	8.39	30.2	2.28	10.4	4.08	1.80	16.9	6.11	76.9	32.7	164	42.6	437	97.8	8 550	0.58	88.4	166	0.66
KC23-11-11	亮锆石	440	11.5	1319	2.03	0.00	14.4	0.10	1.85	3.27	1.66	20.0	7.51	96.5	40.7	195	48.6	505	108	7 816	0.56	133	210	0.63
KC23-11-12	亮锆石	344	3.98	701	0.73	0.00	7.61	0.10	1.27	1.97	1.09	13.3	4.30	51.0	21.2	102	27.5	285	64.3	7 433	0.33	58.9	104	0.65
KC23-11-13	亮锆石	420	9.37	898	0.87	0.01	8.71	0.19	2.50	4.05	1.65	20.8	6.44	70.1	28.6	131	33.5	348	76.4	7 161	0.30	76.8	116	0.55
KC23-11-14	亮锆石	255	5.18	597	1.07	0.02	7.69	0.05	0.58	1.77	0.72	9.14	2.96	40.6	17.6	91.9	23.7	266	59.6	8 346	0.46	44.3	110	0.55
KC23-11-15	亮锆石	348	6.48	810	1.40	0.00	9.20	0.06	1.35	1.99	0.95	11.2	4.40	56.0	24.2	123	32.4	348	78.2	7 941	0.45	67.0	145	0.62
KC23-11-16	亮锆石	335	7.64	724	1.43	0.00	9.58	0.06	0.75	1.83	0.76	10.8	3.80	48.4	21.5	113	30.6	332	75.7	9 602	0.59	56.3	144	0.52
KC23-11-17	亮锆石	439	8.07	1125	2.66	0.01	11.9	0.05	1.95	2.82	1.19	16.4	6.15	79.6	34.9	172	43.3	459	101	7 631	0.60	102	184	0.54
KC23-11-18	亮锆石	515	11.3	2283	1.96	0.06	24.1	0.30	4.95	8.10	3.66	47.7	16.9	188	74.1	340	78.6	768	156	7 675	0.72	304	322	0.57
KC23-11-19	亮锆石	335	7.66	1036	1.36	0.02	10.6	0.18	2.31	4.88	1.69	20.0	6.90	78.3	33.2	159	39.8	413	89.6	8 392	0.44	95.6	159	0.52
KC23-11-21	亮锆石	268	5.67	732	1.41	0.00	10.9	0.06	1.34	2.64	0.73	10.6	3.86	50.2	21.5	115	30.8	338	76.0	9 522	0.66	60.8	152	0.42
KC23-11-22	亮锆石	404	7.86	959	1.22	0.00	10.7	0.06	1.59	2.12	1.06	13.3	5.22	68.0	29.7	153	37.8	405	89.2	8 029	0.53	83.0	155	0.61
KC23-11-23	亮锆石	369	5.60	867	1.53	0.00	10.0	0.05	1.44	2.16	0.95	12.4	4.27	58.8	26.3	135	34.4	376	86.1	8 698	0.60	68.1	155	0.56
KC23-11-24	亮锆石	462	6.44	1048	1.24	0.01	10.4	0.08	1.29	3.49	1.43	17.7	6.18	79.2	33.1	158	39.9	412	88.0	7 650	0.47	100	157	0.56
KC23-11-25	亮锆石	263	2.64	332	0.70	0.02	6.42	0.04	0.23	0.75	0.23	4.63	1.70	22.1	10.5	54.1	14.4	158	35.6	10 655	0.34	39.3	98.2	0.38
KC23-11-26	亮锆石	454	10.1	1254	2.10	0.00	14.1	0.08	1.47	2.52	1.43	17.8	6.82	93.9	40.3	192	48.4	500	107	7 231	0.69	127	213	0.65
KC23-11-27	亮锆石	467	5.13	1100	1.63	0.05	11.9	0.11	1.92	3.29	1.18	15.5	6.04	77.1	34.9	167	43.2	470	102	8 670	0.64	93.0	181	0.51
KC23-11-28	亮锆石	371	7.57	752	1.11	0.00	8.87	0.08	0.87	2.37	1.19	11.1	3.97	49.8	23.3	117	31.4	339	76.1	9 202	0.56	53.7	125	0.71
KC23-11-30	亮锆石	464	8.84	1165	2.01	0.00	13.1	0.05	1.07	2.77	1.13	17.2	6.25	80.8	37.5	176	45.0	484	106	7 098	0.51	109	198	0.50

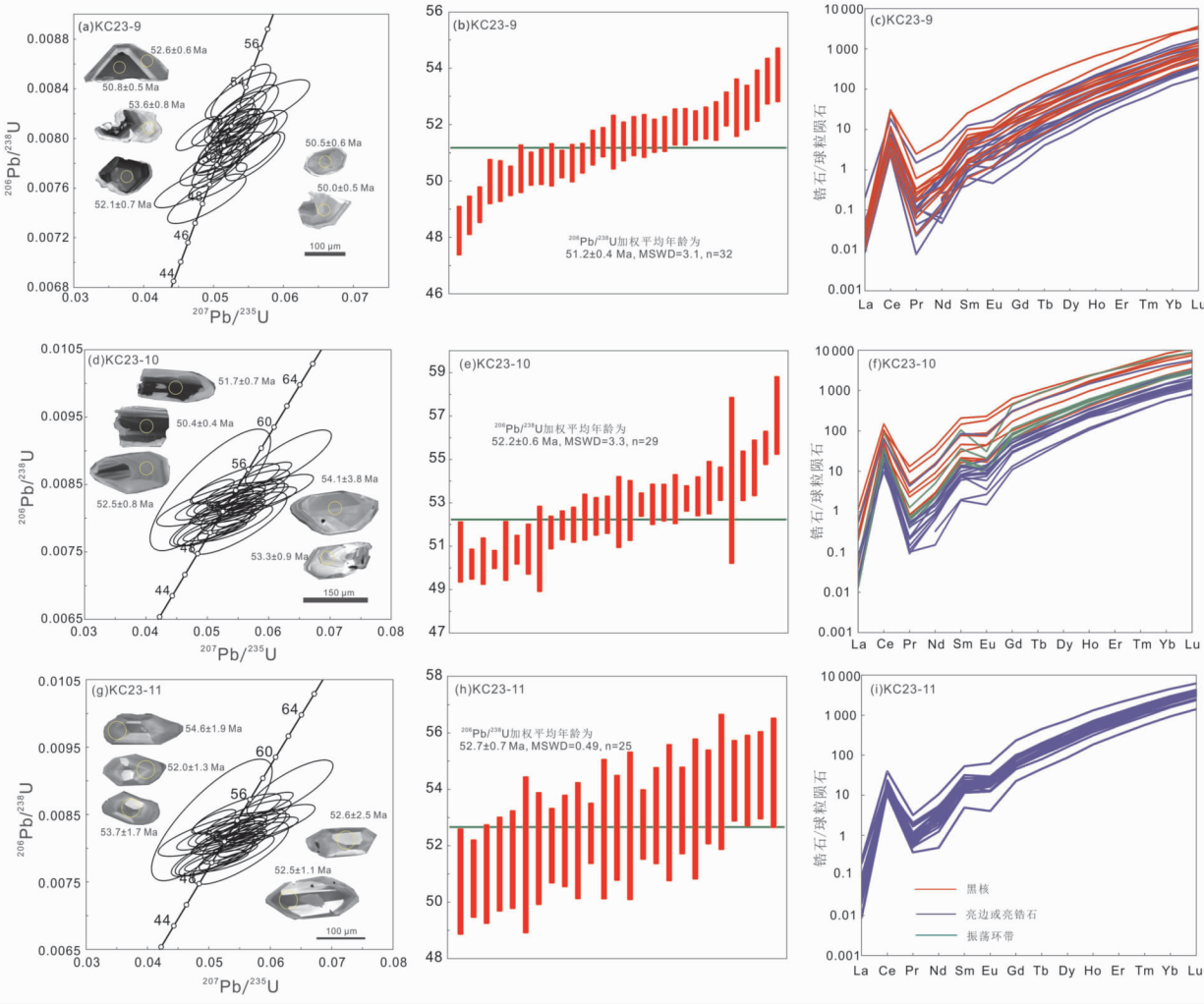


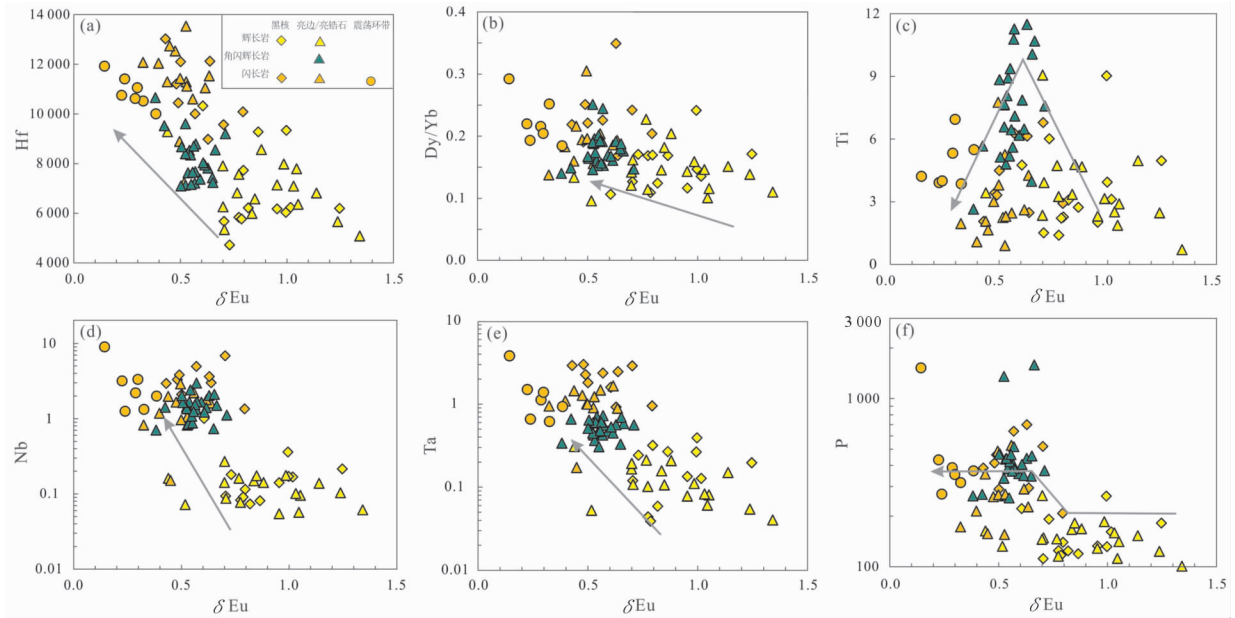
图 5 腾冲地块昔马镁铁质岩石锆石 U-Pb 年龄谐和图及代表性锆石 CL 图像、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值和锆石稀土元素配分图 (修改自文献 [50])

Fig. 5 The diagrams of zircon U-Pb concordia with CL images of representative zircon, and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted mean age and rare earth elements patterns for mafic rocks in Xima area of Tengchong Block

3.3 锆石微量元素

3 种岩石中锆石的微量元素表现出明显的系统变化特征,总体上从辉长岩到角闪辉长岩至闪长岩,锆石的 δEu 逐渐减小, Hf 、 Dy/Yb 、 Nb 、 Ta 逐渐升高, P 和 Ti 的变化则表现出复杂的变化趋势,随着 δEu 的降低,辉长岩中的 P 无明显变化,在角闪辉长岩和闪长岩中明显升高,但在这 2 种岩石中的锆石 P 含量基本一致,而 Ti 的含量则在

角闪辉长岩的亮锆石中最高(见图 6)。另外,在辉长岩和闪长岩中,暗色的锆石核部相比较亮边具有更高的 Th 和 U 含量。锆石的稀土配分模式显示出明显的富集重稀土的特征,但不同特征的锆石稀土含量不同,具核幔结构锆石的黑色核部的稀土元素明显高于亮边和亮锆石,而具振荡环带特征的锆石具有更加明显的 Eu 负异常和高的稀土含量(见图 5)。



(a) δEu - Hf ; (b) δEu - Dy/Yb ; (c) δEu - Ti ; (d) δEu - Nb ; (e) δEu - Ta ; (f) δEu - P

图 6 镁铁质岩石系列中不同类型锆石微量元素与 δEu 的协变关系

Fig. 6 Diagrams of trace elements versus δEu for different zircons of mafic rocks

3.4 全岩 Sr-Nd 同位素和锆石原位 Lu-Hf 同位素

本文挑选辉长岩、角闪辉长岩和闪长岩各 1 件样品进行了全岩 Sr-Nd 同位素分析,结果见表 4。初始同位素组分的计算使用 LA-ICP-MS 锆石

U-Pb 测年结果, $t = 53 \text{ Ma}$ 。计算结果表明不同岩石类型具有相似的 Sr-Nd 同位素特征, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 为 $0.707\,014 \sim 0.707\,103$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-2.8 \sim -3.4$ 。

表 4 腾冲地块昔马镁铁质岩石全岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Tab. 4 Whole rock Sr-Nd isotopic compositions for mafic rocks in Xima area, Tengchong Block

样品号	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2sm	$\text{Sr}/(\times 10^{-6})$	$\text{Rb}/(\times 10^{-6})$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2sm	$\text{Nd}/(\times 10^{-6})$	$\text{Sm}/(\times 10^{-6})$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$
KC23-9a	0.707 131	0.000 005	686	21.7	0.512 484	0.000 007	5.59	1.58	-2.8	0.707 066
KC23-10a	0.707 344	0.000 006	591	69.5	0.512 443	0.000 004	31.7	6.64	-3.4	0.707 103
KC23-11a	0.707 140	0.000 006	839	51.3	0.512 445	0.000 008	30.9	6.93	-3.4	0.707 014

本文分别对 3 个锆石进行了原位 Lu-Hf 同位素分析,结果见表 5。辉长岩中黑色锆石核部的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $1.1 \sim -1.4$, 亮的边部和亮锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $1.1 \sim -0.3$ 。角闪辉长岩中亮锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-0.5 \sim -1.6$ 。闪长岩中黑色锆石核部的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $1.6 \sim 0.2$, 亮的锆石边和亮锆石的

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $2.3 \sim -0.5$, 具有振荡环带的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-0.3 \sim -2.2$ 。不同岩石类型的锆石 Hf 同位素基本一致,同时,同一岩石中不同的锆石的 Hf 同位素组成也是一致的,代表了同源岩浆演化的结果。

表 5 腾冲地块昔马镁铁质岩石锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
Tab.5 Zircon Lu-Hf isotopic compositions for mafic rocks in Xima area, Tengchong Block

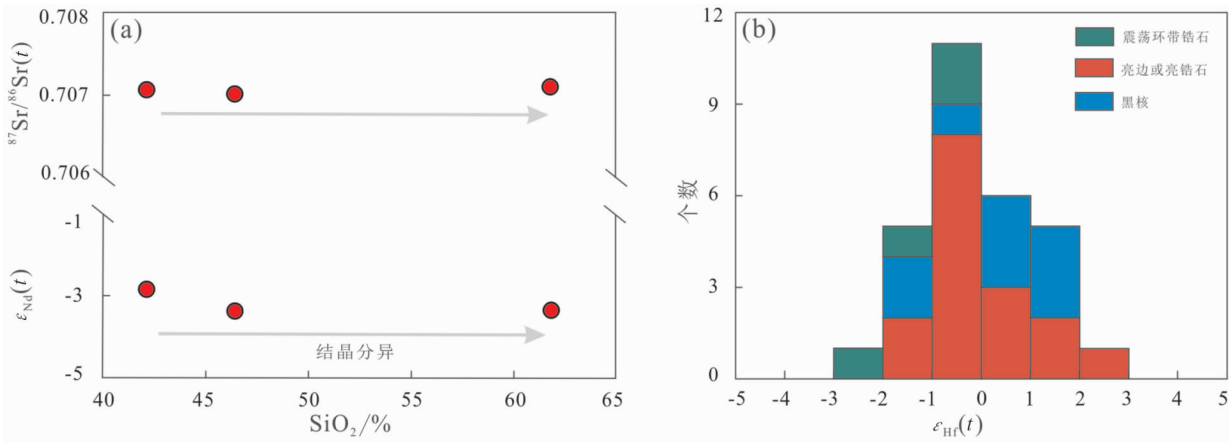
点号	年龄/Ma	锆石特征	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	f _{Lu/Hf}	e _{Hf} (t)
KC23-9-01	50.8	黑核	0.031 886	0.000 371	0.001 115	0.000 012	0.282 750	0.000 016	-0.97	0.3
KC23-9-02	52.6	亮边	0.013 199	0.000 195	0.000 532	0.000 011	0.282 734	0.000 019	-0.98	-0.2
KC23-9-03	53.6	亮边	0.003 963	0.000 021	0.000 167	0.000 001	0.282 752	0.000 012	-0.99	0.5
KC23-9-04	50.0	黑核	0.015 296	0.000 088	0.000 618	0.000 003	0.282 771	0.000 016	-0.98	1.1
KC23-9-05	50.5	亮锆石	0.008 165	0.000 075	0.000 335	0.000 004	0.282 739	0.000 013	-0.99	-0.1
KC23-9-06	51.4	亮边	0.004 812	0.000 073	0.000 197	0.000 004	0.282 731	0.000 010	-0.99	-0.3
KC23-9-07	52.0	黑核	0.021 547	0.000 442	0.000 864	0.000 016	0.282 740	0.000 016	-0.97	0.0
KC23-9-08	50.0	黑核	0.013 157	0.000 157	0.000 560	0.000 011	0.282 705	0.000 016	-0.98	-1.3
KC23-9-09	52.1	黑核	0.051 067	0.000 783	0.002 041	0.000 030	0.282 702	0.000 015	-0.94	-1.4
KC23-9-10	50.6	亮锆石	0.002 904	0.000 015	0.000 118	0.000 001	0.282 761	0.000 011	-1.00	0.7
KC23-9-11	52.6	亮锆石	0.023 031	0.000 397	0.000 894	0.000 015	0.282 771	0.000 013	-0.97	1.1
KC23-10-01	50.8	亮锆石	0.032 795	0.000 475	0.001 219	0.000 018	0.282 805	0.000 010	-0.96	2.3
KC23-10-02	50.3	亮锆石	0.037 051	0.000 343	0.001 331	0.000 013	0.282 775	0.000 011	-0.96	1.2
KC23-10-03	52.7	亮锆石	0.032 650	0.000 833	0.001 199	0.000 029	0.282 726	0.000 010	-0.96	-0.5
KC23-10-04	51.7	黑核	0.067 306	0.003 004	0.002 429	0.000 099	0.282 763	0.000 013	-0.93	0.7
KC23-10-05	53.2	黑核	0.029 330	0.000 067	0.001 042	0.000 003	0.282 746	0.000 010	-0.97	0.2
KC23-10-06	53.3	振荡环带	0.028 665	0.000 209	0.000 998	0.000 006	0.282 706	0.000 011	-0.97	-1.2
KC23-10-07	50.9	亮锆石	0.040 877	0.002 201	0.001 435	0.000 076	0.282 748	0.000 011	-0.96	0.2
KC23-10-08	52.6	振荡环带	0.035 790	0.000 907	0.001 238	0.000 029	0.282 731	0.000 012	-0.96	-0.3
KC23-10-09	53.2	振荡环带	0.055 303	0.000 663	0.001 852	0.000 021	0.282 679	0.000 012	-0.94	-2.2
KC23-10-10	54.3	振荡环带	0.022 813	0.000 649	0.000 816	0.000 020	0.282 718	0.000 012	-0.98	-0.7
KC23-10-11	53.9	黑核	0.041 012	0.000 218	0.001 513	0.000 012	0.282 769	0.000 012	-0.95	1.0
KC23-10-12	50.4	黑核	0.047 729	0.002 834	0.001 750	0.000 101	0.282 789	0.000 012	-0.95	1.6
KC23-11-01	53.7	亮锆石	0.053 557	0.000 663	0.002 012	0.000 022	0.282 719	0.000 014	-0.94	-0.8
KC23-11-02	54.6	亮锆石	0.022 505	0.000 876	0.000 881	0.000 031	0.282 712	0.000 011	-0.97	-1.0
KC23-11-03	52.0	亮锆石	0.051 566	0.001 010	0.001 915	0.000 036	0.282 707	0.000 012	-0.94	-1.2
KC23-11-04	52.6	亮锆石	0.037 255	0.000 492	0.001 413	0.000 017	0.282 724	0.000 013	-0.96	-0.6
KC23-11-05	51.7	亮锆石	0.050 522	0.000 695	0.001 844	0.000 022	0.282 698	0.000 012	-0.94	-1.6
KC23-11-06	52.5	亮锆石	0.057 544	0.002 408	0.002 066	0.000 079	0.282 727	0.000 015	-0.94	-0.5

4 讨论

4.1 早始新世镁铁质岩浆的分异演化过程

腾冲地块早始新世的镁铁质岩集中形成于 50 ~ 55 Ma^[23-24,36,38],是新特提斯洋俯冲末期印度-亚洲大陆同碰撞时期的岛弧岩浆活动的产物。昔马镁铁质岩具有相对富集的同位素组分特征,高的初始 Sr(0.707 014 ~ 0.707 103)和富集的 Nd [$\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.8 \sim -3.4$]和 Hf [$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 2.3 \sim -2.2$]同位素组成,是其地幔源区受到长期俯冲流体/熔体的交代所致。但这些镁铁质岩石的地球化学特征具有较大的变化范围,如 SiO₂ 含量为 42.06% ~ 61.82%, MgO 含量为 6.83% ~ 2.66%,低的 Mg[#] 比值(47 ~ 57),表明这些镁铁质

岩石与岛弧地幔橄榄岩部分熔融形成的高 MgO (10% ~ 12%) 和低 SiO₂ (47% ~ 49%) 熔体不平衡^[51-52]。因此,这些镁铁质岩石是在弧根部位以及侵位至地壳过程中经历地壳混染、结晶分异和/或矿物堆晶-熔体抽离等壳内的演化过程。一般来讲,地壳混染会引起同位素的富集,大离子亲石元素的升高,但随着 SiO₂ 的升高或者 MgO 的降低,昔马镁铁质岩石系列中闪长岩更加富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba 等),而不同岩石单元的放射性同位素组分保持不变(见图 7),说明了地壳混染对镁铁质岩浆演化的影响可以忽略不计,整个岩石系列的成分变化主要受控于壳内的堆晶和分异过程。



(a) Sr-Nd 同位素与 SiO_2 变化图

(b) 锆石 Hf 同位素柱状图

图 7 腾冲地块昔马镁铁质岩石系列同位素变化特征

Fig. 7 Diagrams for isotopic compositions of mafic rocks in Xima area of Tengchong Block

昔马镁铁质岩石的主微量元素随着 SiO_2 的升高,其他主量元素和微量元素表现出明显非线性的协变关系(见图 8),表明了岩浆演化是多阶段的堆晶和分异过程^[4,53]。岩相学的观察表明,辉长岩和角闪辉长岩中自形的斜长石、角闪石和单斜辉石相互接触、叠瓦状排列或形成聚晶,是晶体在沉降过程中的聚集,代表了堆晶的结构特征^[54-55]。根据矿物之间的相互接触关系,整个镁铁质岩石的结晶序列依次为斜长石+单斜辉石+磁铁矿-角闪石+磷灰石+榍石-黑云母-石英。Wen 通过早始新世镁铁质岩石中角闪石-熔体的 Fe-Mg 交换系数也确定了这些镁铁质岩石为不同矿物比例的堆晶或以抽离熔体为主结晶的产物^[38],并且在岛弧穿地壳岩浆系统不同深度的岩浆储库演化过程中,形成大量堆晶成因的侵入岩^[11]。因此,本文将通过地球化学的变化来探讨岩浆堆晶和分异的演化过程。

从辉长岩到角闪辉长岩,随着 SiO_2 含量的升高, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值、CaO 和 MgO 的降低,而 Al_2O_3 和碱含量的上升,说明了分异矿物相为单斜辉石。但单斜辉石为硅饱和矿物,其分异会引起残余熔体中 SiO_2 含量的降低或者不变,但从辉长岩到角闪辉长岩, SiO_2 含量略有升高, δEu 降低,说明基性斜长石也是主要的结晶分离相。此外,随着 SiO_2 的升高 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{T}$ 的降低, P_2O_5 和 TiO_2 的升高,说明磁铁矿是主要的分离相,而岩石中主要的含 Ti 矿物是榍石,含 P 矿物是磷灰石,榍石在辉长岩中以他形粒状包裹磁铁矿,说明是晚期结晶相,不参与早期的结晶分异过程,并且辉长岩中不含磷灰石,说明 P 是不饱和的,这与

地球化学演化趋势一致。因此,早期镁铁质岩浆是以单斜辉石+斜长石+磁铁矿结晶分异为主。虽然辉长岩和角闪辉长岩中的暗色矿物是以角闪石为主的,但是其分异的暗色矿物主要为单斜辉石,并非角闪石,这也能够被 Dy/Dy^* 和 Dy/Yb 随 Si 的变化来证实。 Dy/Dy^* 是稀土元素配分曲线限定的一个重要参数,而单斜辉石和角闪石是引起 Dy/Dy^* 降低的重要矿物相^[56]。由于角闪石更加富集中稀土,从橄榄岩到流纹岩角闪石和熔体 $\text{D}_{\text{Dy}}/\text{D}_{\text{Yb}}$ 为 1.32 ~ 2.35,因此,角闪石的分异会引起熔体中的 Dy/Yb 的降低,但从橄榄岩到流纹岩中单斜辉石的 $\text{D}_{\text{Dy}}/\text{D}_{\text{Yb}}$ 为 0.72 ~ 1.38,尤其是在玄武岩中是小于 1,因此,单斜辉石的分异可能会导致 Dy/Yb 的升高^[56]。随着 Si 的升高,昔马镁铁质岩石中的 Dy/Yb 升高,而 Dy/Dy^* 降低说明了分异矿物为单斜辉石。但这与岩相学观察到以角闪石为主的暗色矿物明显不符,这是由于在弧岩浆演化过程中发生了替代反应,早期结晶的不含水的镁铁矿物(单斜辉石±斜方辉石±橄榄石)与含水熔体的反应形成了含水暗色矿物角闪石。昔马辉长岩中部分单斜辉石形成了角闪石的边也证实了替代反应的发生(见图 2),这种替代反应现象普遍出现在岛弧地壳下部或根部^[17,57],已被火山岩中的捕虏体和镁铁质侵入岩的研究所证实,并且替代反应也解释了火山熔岩中角闪石的斑晶明显少于单斜辉石斑晶,且侵入岩中出现大量角闪石现象。因此,辉长岩应是以单斜辉石+斜长石+磁铁矿为主的堆晶体,并且在演化过程发生替代反应,单斜辉石转变为角闪石。从角闪辉长岩到闪长岩,随着 SiO_2 的升高, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

比值、 MgO 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 Dy/Dy^* 的降低以及 Dy/Yb 的升高,也说明了结晶分异相主要为单斜辉石和斜长石, P 和 Ti 的降低说明了磷灰石和榍石的结晶分异。虽然斜长石发生分异,但 δEu 在角闪辉长岩和闪长岩中的无明显变化,且闪长岩中的 1 个样品出现明显的正的 Eu 异常,这可能是由于局部斜长石的堆晶或深部富斜长石堆晶体的重熔导致抽离熔体中产生 Eu 的正异常。斜长石的岩相学特征也指示了堆晶体的重熔和再

沉淀过程,在辉长岩和角闪辉长岩中,自形斜长石具有不同的环带特征,尤其是核边和核幔边的环带结构(见图 2)。根据不同结构斜长石的主微量及原位 Sr 同位素变化,Wen 将这种斜长石的结构解释为同源岩浆多批次侵位补给过程导致早期结晶并堆晶的斜长石发生不同程度溶解和再沉淀的结果^[38]。堆晶体中的斜长石的熔融会导致演化熔体中 Eu 的更大负异常被模糊化,甚至是出现正异常^[58]。

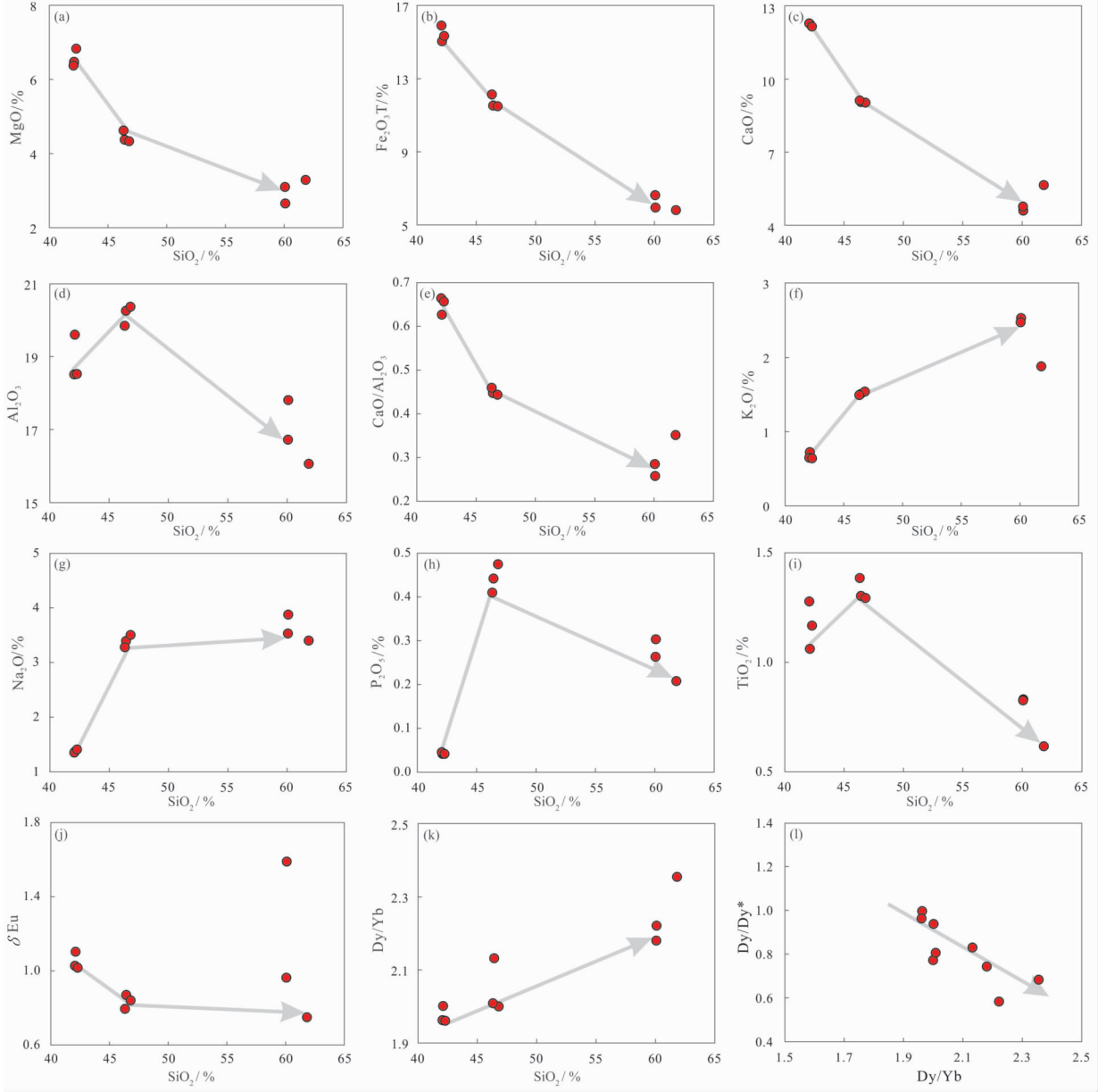


图 8 昔马镁铁质岩石系列主微量元素协变关系图

Fig. 8 Diagrams for major and trace elements variation for mafic rocks in Xima area of Tengchong Block

综上,本文认为昔马早始新世镁铁质岩石系列辉长岩和角闪辉长岩主要是晶体堆积成因,而

闪长岩主要是演化熔体固结的产物,并且多批次岩浆补给引起早期堆晶体的溶解和再沉淀。其

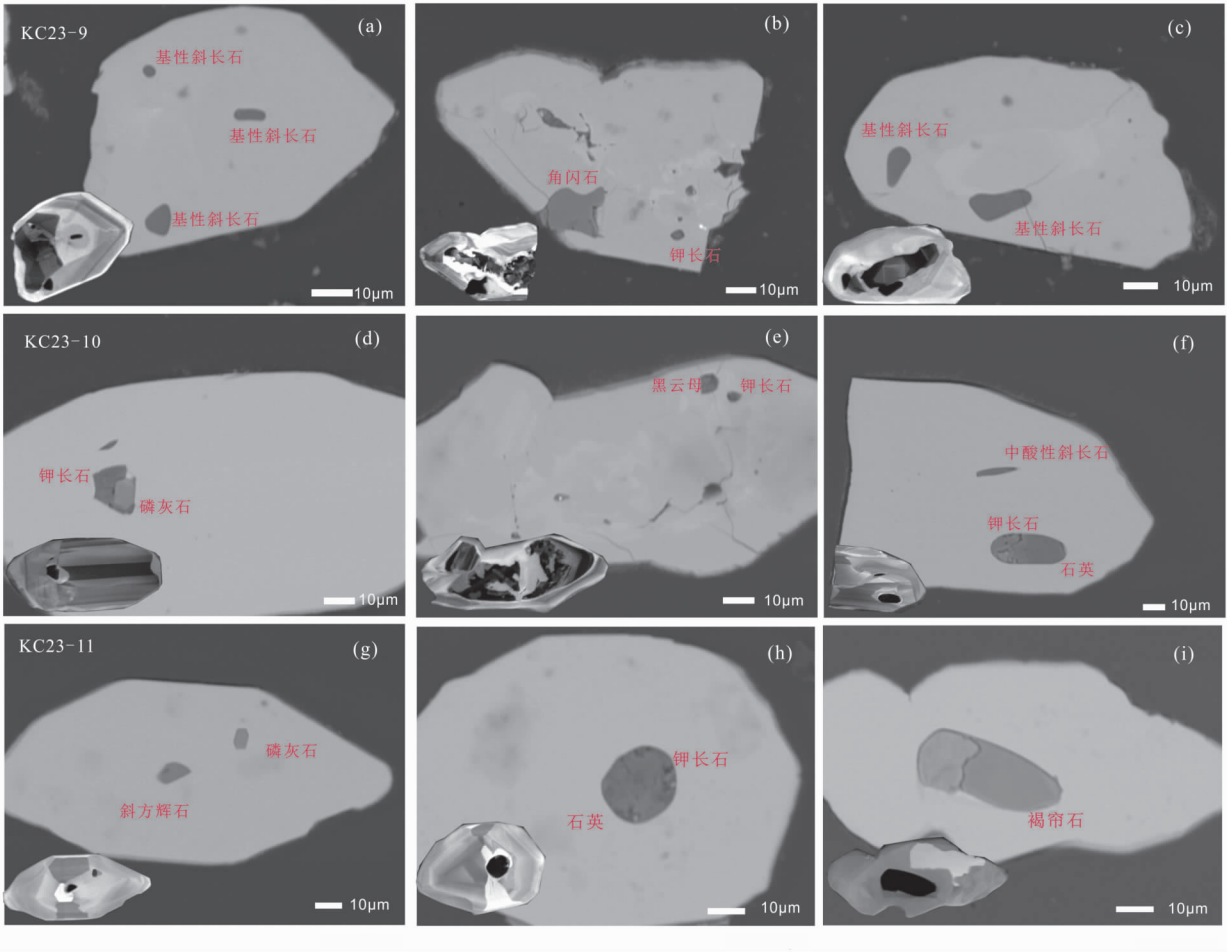
中,辉长岩以单斜辉石+斜长石+磁铁矿为主要堆晶矿物,角闪辉长岩以斜长石+单斜辉石+磷灰石+榍石为主要矿物的堆晶产物。

4.2 锆石记录的镁铁质岩浆分异演化过程

镁铁质岩浆中普遍低的 Zr 含量无法达到锆饱和点^[59],因此,镁铁质岩浆中是否能结晶锆石一直存在争议。但越来越多的镁铁质-超镁铁质侵入体中发现了岩浆成因锆石,说明锆石可以直接从镁铁质岩浆中结晶,比如辉长岩、角闪石岩、MORB 镁铁质杂岩中均有岩浆成因锆石^[5,60]。实验结果显示,Zr 在硅酸盐熔体中的溶解度是随着 Si 的降低而升高,因此,对于镁铁质岩浆中结晶的锆石,被认为是岩浆演化的末期,在局部粒间相熔体演化到中酸性组分并达到锆饱和和结晶出锆石^[61-62]。但这与岩相学的观察并不一致,镁铁质岩石中的锆石往往被包裹在自形的基性斜长石、单斜辉石、角闪石等早期结晶矿物相中^[63]这说明锆石结晶比较早。Bea 通过实验模拟和自然样品的观察认为,如果早期不含锆的矿物结晶,在镁铁质岩浆达到一定结晶度时,会在晶体-熔体界面的扩散边界层出现富集 Zr 和其他不相容元素(如 Th、U)的熔体,结晶出锆石,并且锆石的结晶温度范围可以变化较大,一直持续结晶至最后演化的长英质熔体^[63]。本文通过昔马镁铁质岩石中锆石的矿物包裹体的研究,发现包裹体的矿物组合也表现出较大的结晶温度变化范围,辉长岩中锆石的包裹体为基性斜长石+角闪石+钾长石,角闪辉长岩锆石中的包裹体为斜方辉石+斜长石+磷灰石+钾长石+石英+绿帘石,闪长岩锆石中的包裹体为中酸性斜长石+钾长石+石英+黑云母+磷灰石(见图9),说明锆石在镁铁质岩石系列中具有较长的结晶时间。另外,本文以辉长岩中的锆石形态和微量元素特征探讨和分析其结晶机制,辉长岩中的部分锆石具有典型的核边结构,核部为黑色或深灰色,相比较边部,核部具有高的稀土含量,并且辉长岩锆石中的矿物包裹体分布也显示出一定的规律性,基性斜长石分布在黑核与亮边的界面,并且有富 Th 矿物的出现,而角闪石和钾长石分布在亮色边部(见图5和9)。另外在角闪辉长岩锆石中出现斜方辉石的包裹体,说明锆石在镁铁质岩浆中的结晶可能是由于早期不含 Zr 的矿物(斜长石+斜方辉石)结晶,在矿物-

熔体的反应界面达到 Zr 锆饱和,并且在此界面也富集其他不相容元素,进而结晶富稀土和 Th、U 的黑色锆石核部,亮色边部的结晶则是在熔体演化至中酸性(钾长石包裹体)时结晶。角闪辉长岩中的锆石无明显的黑色核部可能是由于在堆晶体溶解-再沉淀过程中,早期形成的黑色锆石核部被分解,扇形结构的锆石形成于相对演化的高温熔体中。闪长岩部分锆石也具有核边结构,形成机制类似于辉长岩,但闪长岩中出现具振荡环带的锆石,这些锆石相比较亮锆石,具有高的稀土含量和更低的 Th 和 U,是岩浆演化到晚期结晶的产物。

锆石在镁铁质岩石系列中有较长的结晶历史,因此,也能记录整个的岩浆演化过程。Itano 利用富角闪石的超镁铁质岩石中的锆石黑色核部和亮色边部定年发现,岛弧下地壳镁铁质岩浆储库可有约 10 Ma 的长期演化历史^[64]。虽然本文对不同特征的锆石进行定年发现其年龄并无明显差别,集中在 51.2~52.7 Ma,但矿物包裹体组合和微量元素特征仍记录了岛弧镁铁质岩浆演化过程。从辉长岩到闪长岩,锆石的 δEu 降低、Hf 升高,说明了斜长石的结晶分异趋势,而 Nb、Ta、Dy/Yb 升高说明分异暗色矿物应为单斜辉石而非角闪石(见图6)。P 在辉长岩锆石中最低,但在角闪辉长岩和闪长岩锆石中升高且保持不变,说明辉长岩锆石结晶时 P 不饱和,不出现磷灰石包裹体,而在角闪辉长岩和闪长岩中锆石结晶时 P 达到饱和,锆石中出现磷灰石包裹体,这与岩相学观察到的结果一致,磷灰石只在角闪辉长岩和闪长岩中以副矿物的形式出现,而辉长岩中则是不含磷灰石。Ti 在角闪辉长岩的锆石中含量最高,有2种可能:①角闪辉长岩中的锆石结晶温度较高,由于角闪辉长岩经历了多批次的高温岩浆补给,长期处于较高温的环境,斜长石的核幔边和核边结构指示了该过程;②岩石中主要含 Ti 相为榍石,而榍石在辉长岩是晚期结晶相,当演化到角闪辉长岩时达到饱和,其中结晶的锆石则具有高 Ti 的特征。这些过程与岩相学和主要造岩矿物对岩浆演化过程的分析一致,因此,镁铁质岩浆中锆石的结晶是伴随着岩浆演化,同时也能够记录着岩浆的结晶分异演化过程。



(a) ~ (c) 辉长岩中锆石矿物包裹体组合; (d) ~ (f) 闪长岩中锆石矿物包裹体组合; (g) ~ (i) 角闪辉长岩矿物包裹体组合

图 9 昔马镁铁质岩石中锆石的矿物包裹体

Fig. 9 Mineral inclusions in zircons for mafic rocks in Xima area of Tengechong Block

5 结论

1) 昔马镁铁质岩石形成于 51.2 ~ 52.7 Ma, 是新特提斯洋闭合后印度亚洲大陆碰撞的岩浆产物, 富集的同位素特征说明其源区长期受到俯冲介质的交代作用。

2) 镁铁质岩石的成分变化受控于岩浆储库的堆晶和熔体分离, 并在演化过程中经历批次岩浆的补给, 引起堆晶矿物的溶解和再沉淀。辉长岩是以单斜辉石 + 斜长石 + 磁铁矿为主要堆晶矿物的产物, 角闪辉长岩是以单斜辉石 + 斜长石 + 榍石 + 磷灰石为主要堆晶矿物的产物, 闪长岩则是以抽离熔体为主固结的产物。辉长岩和角闪辉长岩中暗色矿物以角闪石为主, 这是由于在岩浆储库演化过程中发生了单斜辉石向角闪石转变的替代反应。

3) 镁铁质侵入岩中可以结晶锆石, 并且锆石具有较大的结晶温度变化, 不同岩石中结晶的锆石矿物包裹体组合具有明显差异, 并且锆石的微量元素记录了岩浆的演化过程。因此, 镁铁质岩石中的锆石能够反映岩浆的固结历史。

参考文献

[1] JAGOUTZ O, SCHRNI DT M W. The formation and bulk composition of modern juvenile continental crust: The Kohistan arc[J]. Chemical Geology, 2012, 298: 79-96.

[2] JAGOUTZ O, SCHRNI DT M W. The composition of the foundered complement to the continental crust and a re-evaluation of fluxes in arcs[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013, 371: 177-190.

[3] LEE C A, BACHMANN O. How important is the role of crystal fractionation in making intermediate magmas? Insights from Zr and P systematics [J]. Earth and

- Planetary Science Letters, 2014, 393: 266-274.
- [4] MÜNTENER O, ULMER P. Arc crust formation and differentiation constrained by experimental petrology [J]. American Journal of Science, 2018, 318(1): 64-89.
 - [5] TASSARA S, AGUE J J, VALENCIA V. The deep magmatic cumulate roots of the Acadian Orogen, eastern North America[J]. Geology, 2021, 49(2): 168-173.
 - [6] JULI M, KELEMEN P B. On the conditions for lower crustal convective instability[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2001, 106(B4): 6423-6446.
 - [7] TATSUMI Y, SHUKUNO H, TANI K, et al. Structure and growth of the Izu-Bonin-Mariana arc crust-mantle transformation and the transparent Moho in arc crust evolution[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2008, 113(B2): B02203.
 - [8] KELEMEN P B, BEHN M D. Formation of lower continental crusta by relamination of buoyant arc lavas and plutons[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(3): 197-205.
 - [9] JAGOUTZ O. Arc crustal differentiation mechanisms [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 396: 267-277.
 - [10] LEE C A, ANDERSON D L. Continental crust formation at arcs, the arclogite “delamination” cycle, and one origin for fertile melting anomalies in the mantle [J]. Science Bulletin, 2015, 60(13): 1141-1156.
 - [11] CASHMAN K V, SPARKS R S J, BLUNDY J D. Vertically extensive and unstable magmatic system: A unified view of igneous processes [J]. Science, 2017, 355: 3055.
 - [12] XU W, ZHU D C, WANG Q, et al. Cumulate mush hybridization by melt invasion: Evidence from compositionally diverse amphiboles in ultramafic-mafic arc cumulates within the eastern Gangdese batholith, Southern Tibet [J]. Journal of Petrology, 2021, 62(11): 1-17.
 - [13] MÜNTENER O, KELEMEN P B, GROVE T L. The role of H₂O during crystallization of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites: An experimental study[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2021, 141(6): 643-658.
 - [14] DAVISON J, TURNER S, HANDLEY H, et al. Amphibole ‘sponge’ in arc crust? [J]. Geology, 2007, 35(9): 787-790.
 - [15] NANDEDKAR R H, ULMER P, MÜNTENER O. Fractional crystallization of primitive, hydrous arc magmas: An experimental study at 0.7 GPa [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2014, 167(6): 1015.
 - [16] ZHANG J B, WANG R, HONG J. Amphibole fractionation and its potential redox effect on arc crust: Evidence from the Kohistan arc cumulates [J]. American Mineralogist, 2022, 107(9): 1779-1788.
 - [17] SMITH D J. Clinopyroxene precursors to amphibole sponge in arc crust [J]. Nature Communications, 2014, 5: 4329.
 - [18] ZHAO S W, YANG C, LAI S C, et al. Multistage fractional crystallization in the continental arc magmatic system: Constraints from the appinites in Tengchong Block, Southeastern extension of Tibet [J]. Lithosphere, 2021, 2021(1): 3367816.
 - [19] TAVAZZANI L, WOTZLAW J F, ECONOMOS R, et al. High-precision zircon age spectra record the dynamics and evolution of large open-system silicic magma reservoirs [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2023, 623: 118432.
 - [20] LI D P, CHEN Y L, HOU K J, et al. Origin and evolution of the Tengchong block, southeastern margin of the Tibetan Plateau: Zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic evidence from the (meta-) sedimentary rocks and intrusions [J]. Tectonophysics, 2016, 687: 245-256.
 - [21] METCALFE I. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and Palaeogeographic evolution of eastern Tethys [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 1-33.
 - [22] 李再会, 林仕良, 丛峰, 等. 滇西高黎贡山群变质岩的锆石年龄及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1529-1541.
LI Z H, LIN S L, CONG F, et al. U-Pb ages of zircon from metamorphic rocks of the Gaoligongshan Group in western Yunnan and its tectonic significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(5): 1529-1541.
 - [23] WANG Y J, ZHANG L M, CAWOOD P A, et al. Eocene supra-subduction zone mafic magmatism in the Sibumasu block of SW Yunnan: Implications for Neotethyan subduction and India-Asia collision [J]. Lithos, 2014, 206: 384-399.
 - [24] WANG Y J, LI S B, MA L Y, et al. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of Early Eocene metagabbroic rocks in Nabang (SW Yunnan) and its implications on the Neotethyan slab subduction [J]. Gondwana Research, 2015, 27(4):

- 1474-1486.
- [25] MA L Y, WANG Y J, FAN W M, et al. Petrogenesis of the early Eocene I-type granites in west Yingjiang (SW Yunnan) and its implication for the eastern extension of the Gangdese batholiths[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 401-419.
 - [26] KORNFELD D, ECKERT S, APPEL E, et al. 2014. Cenozoic clockwise rotation of the Tengchong block, southeastern Tibetan Plateau: A paleomagnetic and geochronologic study[J]. *Tectonophysics*, 2014, 628: 105-122.
 - [27] XIE J C, ZHU D C, DONG G C, et al. Linking the Tengchong Terrane in SW Yunnan with the Lhasa Terrane in southern Tibet through magmatic correlation [J]. *Gondwana Research*, 2016, 39: 217-229.
 - [28] ZHAO S W, LAI S C, QIN J F, et al. Tectono-magmatic evolution of the Gaoligong belt, southeastern margin of the Tibetan plateau: Constraints from granitic gneisses and granitoid intrusions[J]. *Gondwana Research*, 2016, 35: 238-256.
 - [29] XU Z Q, WANG Q, CAI Z H, et al. Kinematics of Tengchong Terrane in SE Tibet from the late Eocene to early Miocene: Insights from coeval mid-crustal detachments and strike-slip shear zones [J]. *Tectonophysics*, 2015, 665: 127-148.
 - [30] ZHAO S W, LAI S C, GAO L, et al. Evolution of the Proto-Tethys in the Baoshan Block along the East Gondwana margin: Constraints from early Palaeozoic-magmatism[J]. *International Geology Review*, 2017, 59(1): 1-15.
 - [31] ZHU R Z, LAI S C, QIN J F, et al. Petrogenesis of Late Paleozoic to Early Mesozoic granitoids and metagabbroic rocks of the Tengchong Block, SW China: Implications for the evolution of the eastern Paleo-Tethys [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2018, 107: 431-457.
 - [32] ZHU R Z, LAI S C, QIN J F, et al. Early Cretaceous highly fractionated I-type granites from the northern Tengchong block, western Yunnan, SW China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 100: 145-163.
 - [33] ZHU R Z, LAI S C, QIN J F, et al. Genesis of high-potassium calc-alkaline peraluminous I-type granite: New insights from the Gaoligong belt granites in southeastern Tibet Plateau [J]. *Lithos*, 2020, 354: 105343.
 - [34] ZHAO S W, LAI S C, QIN J F, et al. Petrogenesis of Eocene granitoids and microgranular enclaves in the western Tengchong Block: Constraints on eastward subduction of the Neo-Tethys[J]. *Lithos*, 2016, 264: 96-107.
 - [35] ZHAO S W, LAI S C, QIN J F, et al. Geochemical and geochronological characteristics of Late Cretaceous to Early Paleocene granitoids in the Tengchong Block, Southwestern China: Implications for crustal anatexis and thickness variations along eastern Neo-Tethys subduction zone [J]. *Tectonophysics*, 2017, 694: 87-100.
 - [36] ZHAO S W, LAI S C, PEI X Z, et al. Compositional variations of granitic rocks in continental margin arc: Constraints from the petrogenesis of Eocene granitic rocks in the Tengchong Block, SW China[J]. *Lithos*, 2019, 326: 125-143.
 - [37] ZHAO S W, LAI S C, PEI X Z, et al. Neo-Tethyan evolution in the southeastern extension of Tibet: Constraints from early Paleocene to Early Eocene granitic rocks with associated enclaves in Tengchong Block [J]. *Lithos*, 2020, 364: 105551.
 - [38] WEN T, ZHAO S W, FANG X Y, et al. Continental arc accumulation mafic rocks in the mid-upper crust: Constraints from the Early Eocene hornblende gabbrodiorite in the Tengchong Block, Southeastern extension of Tibet[J]. *Lithosphere*, 2024(1): 319.
 - [39] 赵少伟, 赖绍聪, 秦江锋, 等. 腾冲地块梁河早始新世花岗岩成因机制及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2017, 33(1): 191-203.
- ZHAO S W, LAI S C, QIN J F, et al. The Petrogenesis and implications of the Early Eocene granites in Lianghe area, Tengchong Block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(1): 191-203.
- [40] WANG Y, ZHANG X M, JIANG C S, et al. Tectonic controls on the late Miocene-Holocene volcanic eruptions of the Tengchong volcanic field along the southeastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 30(2): 375-389.
 - [41] XU Y G, YANG Q J, LAN J B, et al. Temporal-spatial distribution and tectonic implications of the batholiths in the Gaoligong-Tengliang-Yingjiang area, western Yunnan: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53: 151-175.
 - [42] 季建清, 钟大赉, 陈昌勇. 滇西南那邦变质基性岩地球化学与俯冲板片裂离[J]. *岩石学报*, 2000, 16(3): 433-442.
 - JI J J, ZHONG D L, CHEN C Y. Geochemistry and genesis of Nabang metamorphic basalt, southwest Yun-

- nan, China: Implications for the subducted slab break-off[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(3): 433-442.
- [43] 李建清, 钟大赉, 丁林, 等. 中缅边界那邦变质基性岩的两期变质作用及其构造意义[J]. *岩石学报*, 1998, 14(2): 163-175.
- JI J J, ZHONG D L, DING L, et al. Study on Metamorphism of granulitefacies metamorphic rocks Discovered in the Nabang area on the border between China and Burma[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(2): 163-175.
- [44] MA L Y, CAWOOD P A, DING W, et al. Cenozoic retrogression and exhumation of the amphibolites in the eastern Gangdese Belt, SW China[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2021, 205: 104574.
- [45] LI C F, LI X H, LI Q L, et al. Rapid and precise determination of Sr and Nd isotopic ratios in geological samples from the same filament loading by thermal ionization mass spectrometry employing a single-step separation scheme[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2012, 727(10): 54-60.
- [46] LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [47] HU Z C, LIU Y S, GAO S, et al. Improved *in situ* Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2012, 27(9): 1391-1399.
- [48] MIDDLEMOST E A. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [49] IRVINE T N, BARAGAR W R. A guide to the chemical classification of the common igneous rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8(5): 523-548.
- [50] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [51] NYE C J, REID M R. Geochemistry of primary and least fractionated lavas from Okmok volcano, central Aleutias: Implications for arc magmagenesis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91: 10271-10287.
- [52] EGGINS S M. Origin and differentiation of picritic arc magma, Ambae (Aoba), Vanuatu[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1993, 114(1): 79-100.
- [53] RIVERA M, MARTIN H, LE PENNEC J L, et al. Petro-geochemical constraints on the source and evolution of magmas at El Misti volcano (Peru)[J]. *Lithos*, 2017, 268/271: 240-259.
- [54] LATYPOV R M, CHISTYAKOVA S Y, NAMUR O, et al. Dynamics of evolving magma chambers: Textural and chemical evolution of cumulates at the arrival of new liquidus phases[J]. *Earth Science Reviews*, 2020, 210: 103388.
- [55] MA J F, WANG X L, YANG A Y, et al. 2023. Tracking crystal-melt segregation and accumulation in the intermediate magma reservoir[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(10): e2022GL102540.
- [56] DAVIDSON J, TURNER S, PLANK T. Dy/Dy*: Variations arising from mantle sources and petrogenetic processes[J]. *Journal of Petrology*, 2013, 54(3): 527-537.
- [57] CHANG J, AUDETAT A, LI J W. *In situ* reaction-replacement origin of hornblendites in the Early Cretaceous Laiyuan complex, North China Craton, and implications for its tectono-magmatic evolution[J]. *Journal of Petrology*, 2021, 62(5): 505-539.
- [58] WOLFF J A, FORNI F, ELLIS B S, et al. Europium and barium enrichments in compositionally zoned felsic tuffs: A smoking gun for the origin of chemical and physical gradients by cumulate melting[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 540: 116251.
- [59] SHAO T B, XIA Y, DING X, et al. Zircon saturation in terrestrial basaltic melts and its geological implications[J]. *Solid Earth Sciences*, 2019, 4(1): 27-42.
- [60] ARANOVICH L Y, BORTNIKOV N S, ZINGER T F, et al. Morphology and impurity elements of zircon in the oceanic lithosphere at the Mid-Atlantic ridge axial zone (6° ~ 13° N): Evidence of specifics of magmatic crystallization and postmagmatic transformations[J]. *Petrology*, 2017, 25(4): 339-364.
- [61] WATSON E B, HARRISON T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64(2): 295-304.
- [62] BORISOV A, ARANOVICH L. Zircon solubility in silicate melts: New experiments and probability of zircon crystallization in deeply evolved basic melts[J]. *Chemical Geology*, 2019, 510: 103-112.
- [63] BEA F, BORTNIKOV N, CAMBESSES A, et al. Zircon crystallization in low-Zr mafic magmas: Possible or

impossible? [J]. Chemical Geology, 2022, 602: 120898.

[64] ITANO K, TAKEHARA M, HORIE K, et al. A long-lived mafic magma reservoir: Zircon evidence from a hornblende peridotite in the Hida Belt, Japan[J]. Geology, 2024, 52(1): 3-6.

(编辑 李 波)

作者简介



赵少伟,长安大学地球科学与资源学院副教授,硕士生导师,主要从事岩浆岩岩石学教学与科研工作,长期聚焦特提斯构造域滇西南地区中新生代岩浆岩岩石成因及岩浆系统演化研究,主持国家自然科学基金面上项目 1 项、青年项目 1 项,省部级项目 2 项,发表学术论文 50 余篇,出版学术专著 1 部,获陕西省自然科学一等奖 1 项、陕西省自然科学优秀学术论文二等奖 1 项。