

# 缅甸茂奇钨锡矿床电气石花岗岩地球化学、锆石年代学、Hf 同位素组成及地质意义\*

梁慧敏<sup>1,2</sup>, 杨永飞<sup>1,2\*\*</sup>, 赵德坤<sup>3</sup>, 段瑶瑶<sup>1,2</sup>, 郭林楠<sup>1,2</sup>, 张彬<sup>1,2</sup>, 曾祥婷<sup>1,2</sup>, AUNG Min<sup>4</sup>  
(1 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218; 2 中国—东盟地学合作中心, 四川 成都 610218; 3 四川西冶工程设计咨询有限公司, 四川 成都 610051; 4 缅甸地质调查与矿产勘查局, 缅甸 内比都 100604)

**摘要** 缅甸东部克耶邦茂奇钨锡矿床位于东南亚锡钨成矿带西缘, 地处印支板块与滇缅泰马地块交汇部位, 是该区重要的钨锡多金属矿床之一。矿体主要赋存于始新世花岗岩与石炭系—二叠统茂奇群变质沉积岩的北西-南东向断裂系统中, 成矿作用与中始新世花岗岩密切相关。文章对与成矿相关的电气石花岗岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素分析, 结果表明, 花岗岩锆石 U-Pb 加权平均年龄为  $(43.20 \pm 0.49)$  Ma (MSWD=2.3), 属中始新世。锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-6.0 \sim -3.5$ , 二阶段模式年龄 ( $T_{\text{DM2}}$ ) 为  $1.56 \sim 1.72$  Ga, 指示其源区为中元古代地壳物质部分熔融。岩石地球化学特征显示其为强分异的过铝质花岗岩, 具高 Ga/Al 比值和显著的稀土元素四分组效应, 并表现为 Rb、U、Th、Pb 富集, Ba、Sr、Nb、P、Ti 亏损。结合区域构造演化, 文章认为茂奇钨锡矿床形成于新特提斯洋俯冲消减后的陆内伸展阶段, 是中元古代地壳部分熔融、岩浆高分异演化以及 W-Sn 元素富集成矿的响应。

**关键词** 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 元素地球化学; 茂奇钨锡矿床; 缅甸

中图分类号: P618.44; P618.67

文献标志码: A

## Geochemistry, zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes of tourmaline granite in Mawchi tungsten-tin deposit, Myanmar and their geological implications

LIANG HuiMin<sup>1,2</sup>, YANG YongFei<sup>1,2</sup>, ZHAO DeKun<sup>3</sup>, DUAN YaoYao<sup>1,2</sup>, GUO LinNan<sup>1,2</sup>, ZHANG Bin<sup>1,2</sup>, ZENG XiangTing<sup>1,2</sup> and AUNG Min<sup>4</sup>

(1 Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610218, Sichuan, China; 2 China-ASEAN Geosciences Cooperation Center, Chengdu 610218, Sichuan, China; 3 Sichuan Xiye Engineering Design and Consulting Corporation Limited, Chengdu 610051, Sichuan, China; 4 Department of Geological Survey and Mineral Exploration, Naypyitaw 100604, Myanmar)

### Abstract

The Mawchi tin-tungsten deposit in Kayah State, eastern Myanmar, is situated at the western margin of the Southeast Asia Sn-W metallogenic belt, where is the junction of the Indochina plate and the Sibumasu block, representing one of the significant tungsten-tin polymetallic deposits in the region. The ore bodies primarily occur within the NW-SE trending fault systems between Eocene granites and metamorphosed sedimentary rocks of the Carboniferous—Early Permian Mawchi Group, with mineralization closely related to the Middle Eocene granites. This study presents LA-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotope analyses of zircons in tourmaline granite which is genetically linked to mineralization at Mawchi. The results yield a zircon U-Pb weighted mean age of  $(43.20 \pm 0.49)$  Ma (MSWD=2.3), indicating a Middle Eocene age. Zircon  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values range from  $-6.0$  to  $-3.5$ , with  $T_{\text{DM2}}$  of

\* 本文得到“地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项”课题(编号:2025ZD1007002)、中国地质调查局项目“东南亚和南亚国际合作地质调查”(编号:DD20230127)和“东南亚和南亚地区国际合作地质调查(2026~2028)”(编号:DD2026091013)联合资助

第一作者简介 梁慧敏,女,1986年生,高级工程师,主要从事基础地质、矿床地质研究工作。Email: lianghm\_cugb@126.com

\*\* 通讯作者 杨永飞,男,1984年生,高级工程师,从事东南亚地质矿产调查与成矿规律研究。Email: yyf6811@163.com

收稿日期 2025-10-31;改回日期 2026-01-06。秦思婷编辑。

1.56~1.72 Ga, suggesting derivation from partial melting of Mesoproterozoic crustal material. Petrogeochemical data indicate a strongly fractionated peraluminous granite, characterized by high Ga/Al ratios and a pronounced rare earth element tetrad effect, with enrichments in Rb, U, Th, Pb and depletions in Ba, Sr, Nb, P, Ti. In conjunction with regional tectonic evolution, it is interpreted that the Mawchi tungsten-tin deposit formed during the intracontinental extensional stage following the subduction of the Neo Tets Ocean, representing a response to partial melting of Mesoproterozoic crust, highly fractionated magmatic evolution, and the enrichment and mineralization of tungsten-tin elements.

**Key words:** zircon U-Pb dating, Hf isotope, element geochemistry, Mawchi tungsten-tin deposit, Myanmar

东南亚锡钨成矿带是全球最重要的锡钨资源富集区之一,其成矿作用与中生代—新生代花岗岩浆活动密切相关(Zaw, 1990)。缅甸东部克耶邦茂奇钨锡矿床位于该成矿带西段,是该带内典型的与花岗岩有关的热液型钨锡矿床,长期受到广泛关注(Gardiner et al., 2016; Myint et al., 2014)。前人针对该矿床开展了地质特征、矿化类型及成矿流体等方面的研究(Mitchell et al., 2012; Zaw et al., 2017),但对其成岩成矿时代、岩浆源区性质及构造背景仍缺乏高精度年代学与地球化学约束。本文以缅甸茂奇钨锡矿床为研究对象,在详细野外地质调查基础上,对与成矿相关的花岗岩体开展锆石U-Pb定年、Hf同位素及全岩地球化学分析,旨在精确限定成矿岩体的形成时代,揭示成矿岩浆的源区性质及演化过程,探讨矿床形成的成矿动力学背景,为完善区域成矿模型及指导找矿勘探提供科学依据。

## 1 区域地质背景

东南亚锡矿带,长2800 km,宽400 km,南起印尼比利顿岛,穿过马来西亚半岛,经泰国、缅甸,延伸到中国云南。根据花岗岩的矿物组合、地球化学特征、形成时代,可将东南亚锡矿带划分为东、中、西3个花岗岩省,均与钨锡成矿密切相关(Cobbing et al., 1986)。其中,东部花岗岩省出露于老挝北部、泰国中东部和马来西亚东部,主要由二叠纪—三叠纪的I型花岗岩组成(Ng et al., 2015a; 2015b);中部花岗岩省贯穿滇西、缅甸东部、泰国西部和马来西亚半岛西部,主要由三叠纪S型花岗岩组成(Ng et al., 2015a; 2015b);西部花岗岩省从中国滇西经缅甸中部延伸到泰国半岛,主要由白垩纪—始新世I型和S型花岗岩混合组成(Cobbing et al., 1986; Barley et al., 2003)。

缅甸,是东南亚锡钨成矿带的核心区域,境内已发现约400处锡钨矿床、矿点及矿化点,是全球主要

产锡国之一,贡献了全球6.2%的锡储量和18.6%的锡产量。本文研究区茂奇钨锡矿床,在第二次世界大战前,曾是世界上最大的锡和钨的产地之一,其潜在矿石储量可能达到3100万吨(Nyunt et al., 2023)。

区域内大地构造格局复杂,自西向东可分为7个南北向展布的构造单元,包括印缅山脉、缅甸中央盆地、翡翠矿带、达贡—密支那带、抹谷变质带、板岩带、掸邦高原(图1a、b)(Metcalf, 2011)。本文研究区位于缅甸东部抹谷变质带东缘与板岩带的过渡部位,其西侧以大型右行走滑实皆断裂与西缅甸地块相邻(图1a)。矿区地层以石炭系—二叠系茂奇群浅变质沉积岩系为主(岩性包括千枚岩、板岩、变质砂岩等),其上被二叠纪高原灰岩不整合覆盖,构成重要的容矿围岩(图1c, Myint et al., 2017, )。区内岩浆活动强烈,与钨锡成矿密切相关的是晚白垩世—始新世花岗岩,其就位受新特提斯洋俯冲及印度—欧亚碰撞构造背景控制(Gardiner et al., 2016)。矿区侵入岩以中始新世黑云母花岗岩、电气石花岗岩为主,共同构成含矿岩体(Myint et al., 2017)。矿化主要受南北向断裂系统控制,赋存于电气石花岗岩及外接触带茂奇群变质岩中;主要矿化类型为石英脉型,次为云英岩型及少量矽卡岩型(接触带)。矿体多呈陡倾脉状产出,延伸稳定。矿石矿物以锡石、黑钨矿为主,共伴生辉钼矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物;脉石矿物主要为石英、电气石、白云母、萤石和铁榴石(Myint et al., 2017)。围岩蚀变强烈且分带明显,主要包括电气石化、云英岩化、绢云母化和硅化,其中,电气石化与锡石—黑钨矿化关系最为密切(Myint et al., 2017)。

## 2 样品采集及分析方法

本次研究选取的样品为电气石花岗岩,采自缅甸东部克耶邦茂奇锡矿区,地理坐标:18°49.322'N,

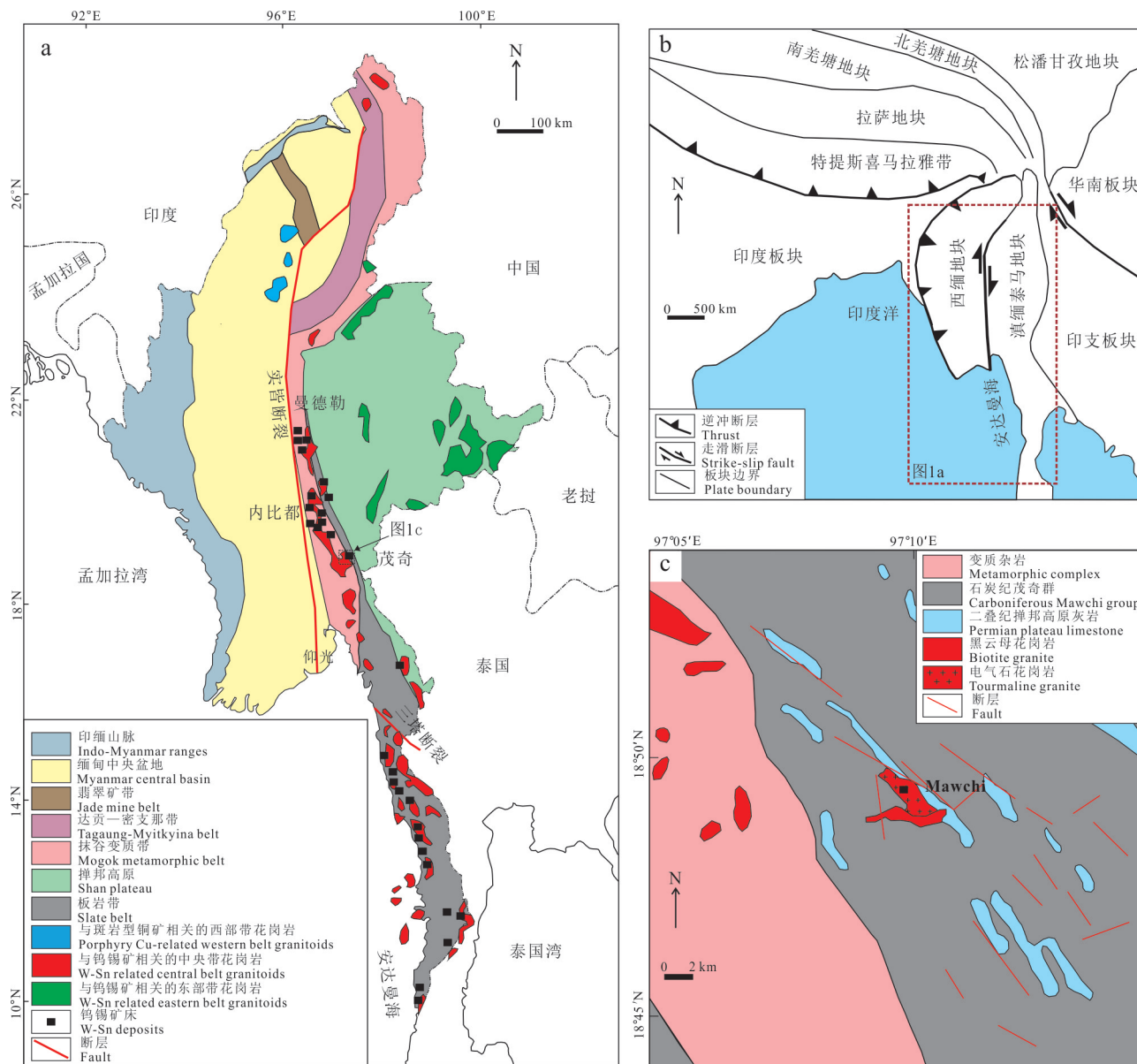


图 1 缅甸及邻区的构造格架图(a)、大地构造位置图(b)和茂奇钨锡矿床地质简图(c)

Fig. 1 Schematic maps showing the tectonic framework (a) and tectonic location (b) of Myanmar and its adjacent area, and geological sketch map of the Mawchi deposit (c)

97°09.598'E, 为矿区近矿的电气石花岗岩。该岩石呈灰白色, 具中细粒花岗结构, 块状构造, 矿物组成为石英(30%)、长石(20%)、云母(10%), 石英呈半自形-他形粒状, 粒径 0.3~3.0 mm; 长石呈半自形板状, 粒径 0.5~5.0 mm, 副矿物有锆石、电气石等(图 2a~d)。

主微量元素在国土资源部西南矿产资源监督检查中心完成。主量元素分析采用 ICAP6300 全谱直读等离子光谱仪、AXIOSAXIOS-X 荧光光谱仪测

定, 微量元素用等离子质谱仪(X-Series)分析。

电气石花岗岩的锆石挑选在河北省廊坊诚信地质服务公司完成。测试样品经过人工破碎成约 80 目, 将粉末用清水淘洗, 得到重砂部分, 再经过电磁选分离出锆石, 而后在双目镜下挑出晶型较好的锆石。锆石制靶和阴极发光照像在武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 将挑选好的锆石粘在双面胶上, 用无色透明环氧树脂固定, 固化之后抛光, 然后在显微镜下进行透反射和阴极发光照像, 结合这些图像

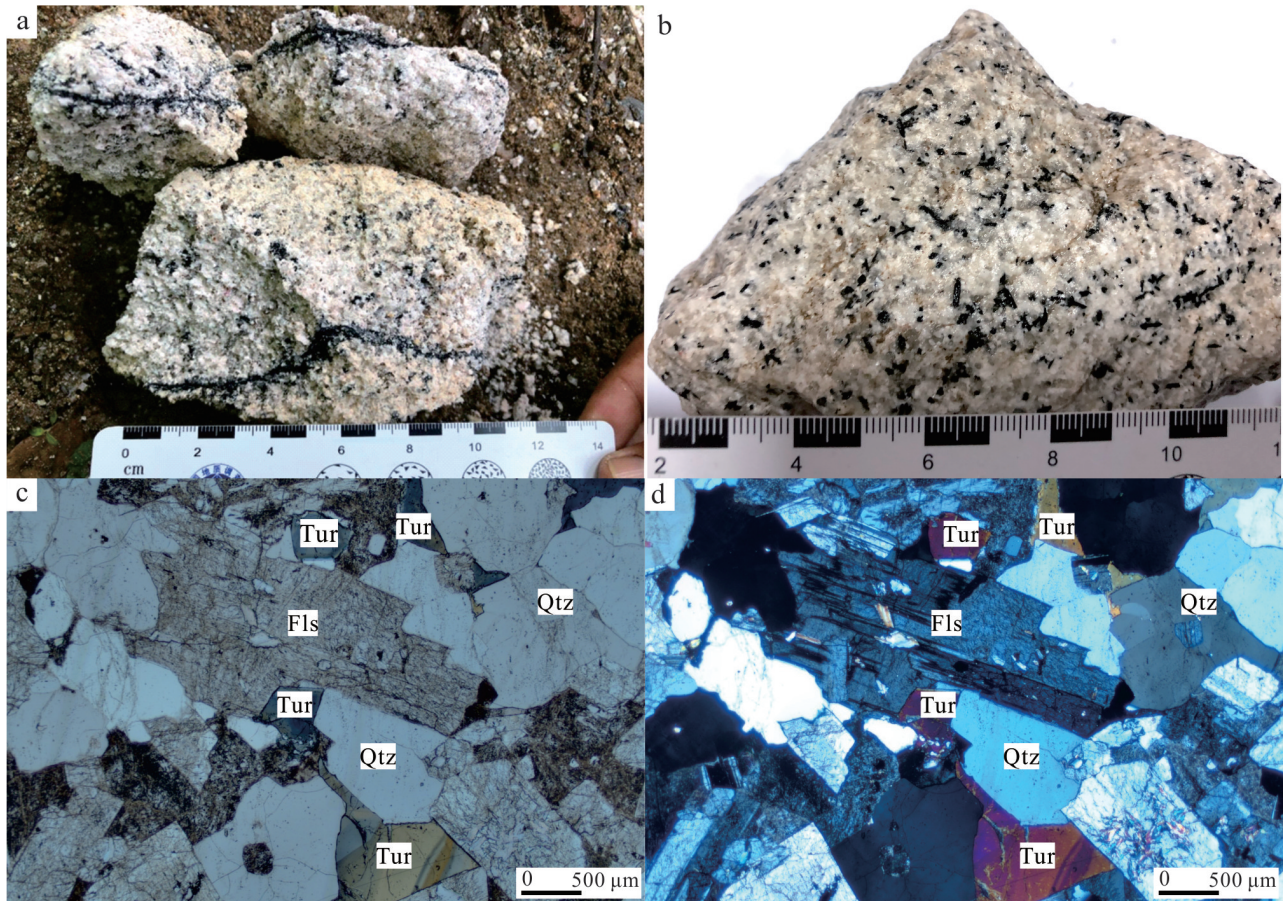


图2 缅甸茂奇钨锡矿花岗岩岩石标本(a,b)及镜下照片(c,d)

a. 电气石脉穿切黑云母花岗岩; b. 电气石花岗岩; c. 电气石花岗岩(单偏光); d. 电气石花岗岩(正交偏光)  
Fls—长石; Tur—电气石; Qtz—石英

Fig. 2 Photographs (a, b) and microphotographs (c, d) of the tourmaline granite in the Mawchi deposit  
a. Biotite granite crosscut by the tourmaline vein; b. Tourmaline granite; c. Tourmaline granite (single-polarized light);  
d. Tourmaline granite (cross-polarized light)  
Fls—Feldspar; Tur—Tourmaline; Qtz—Quartz

选择适宜的点位进行测试。

锆石原位 U-Pb 年龄分析和微量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,应用激光剥蚀系统(GeoLas HD)和安捷伦电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7900)联机完成。采用高纯氦气作为剥蚀物质的载气,激光剥蚀束斑直径 32  $\mu\text{m}$ , 频率 5 Hz, 锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为校正标准样品,微量元素含量采用 NIST6100 作为校正标准样品。详细测试流程及流程见文献(Liu et al., 2008; 2010)。

锆石 U-Pb 年龄测试完毕后,在武汉上谱分析科技有限责任公司进行 Hf 同位素原位分析,使用仪器为美国 Resonetic 公司生产的 Neptune Plus 型多接受等离子质谱仪(MC-ICPMS),激光剥蚀系统为 GeoLas HD,详细激光剥蚀参数如下:分析时激光束斑直

径为 44  $\mu\text{m}$ , 激光输出能量为 10 J/cm<sup>2</sup>, 采用 He 和少量 N<sub>2</sub> 作为气体介质,前背景时间、激光剥蚀时间及冲扫时间分别为 30 s、30 s、5 s, 频率为 8 Hz。测试过程采用 Penglai 锆石作为标样(Li et al., 2010), 数据标准化根据  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.7325$  校正。为了对仪器漂移进行监控,用标准锆石 GJ-1 与锆石样品交叉分析。最终本文获得标样 GJ-1 的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  同位素比值为  $0.282014 \pm 0.000013 (2\sigma)$ , 与实验室测定的平均值在误差范围内结果一致。

### 3 分析结果

#### 3.1 岩石地球化学特征

茂奇电气石花岗岩的主量元素分析结果见表 1,

表 1 茂奇电气石花岗岩主量元素 (w(B)/%) 分析结果

Table 1 Major elements (w(B)/%) compositions of the tourmaline granite in the Mawchi deposit

组分	DMQ03-N1	DMQ03-N2	DMQ04-b6
SiO <sub>2</sub>	75.74	73.67	73.96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.89	13.78	14.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.61	0.52	0.47
FeO	0.30	0.45	0.76
CaO	0.51	0.79	0.83
MgO	0.10	0.23	0.07
K <sub>2</sub> O	4.92	5.43	4.09
Na <sub>2</sub> O	3.69	3.45	4.61
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.02	0.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.02
MnO	0.05	0.08	0.06
烧失量	0.65	1.24	0.88
总和	99.50	99.68	99.92
ALK	8.61	8.88	8.70
K/Na	1.33	1.57	0.89
TFeO/MgO	9.10	4.22	17.32
D.I.	97.85	97.35	97.71
A/NK	1.13	1.19	1.18
A/CNK	1.04	1.06	1.05

注: 比值单位为 1。

电气石花岗岩  $w(\text{SiO}_2)$  为 67%~75.74%, 较高碱含量, 全碱  $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  为 8.61%~8.88%, 在 TAS 图解 (图 3a) 中, 落入花岗岩范围,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 12.89%~13.78%, 铝饱和指数 (A/CNK) 值为 1.04~1.06, 在 A/NK-A/CNK 分类图解 (图 3b) 中, 落入过铝质范围内。相对富钾,  $w(\text{K}_2\text{O})$  为 4.09%~5.43%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值为 1.33~1.57, 比值大于 1, 属于高钾钙碱性-钾玄岩系列花岗岩 (图 3c)。 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{MnO})$ 、 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  低,  $w(\text{TFeO})$  略偏高, 且 TFeO/MgO 值 (4.22~17.32) 较高。综上所述, 主量元素特征显示茂奇电气石花岗岩为高钾钙碱性-钾玄岩系列过铝质花岗岩。

微量元素在一般的地质作用及岩浆分异过程中地球化学性质比较稳定, 为研究岩浆源区演化、成矿物质来源、构造环境的有力工具。茂奇电气石花岗岩的微量元素和稀土元素分析结果具体见表 2, 在原始地幔标准化蛛网图 (图 4a) 中, 富集 Rb、U、Ta、Pb, 亏损 Ba、Nb、La、Ce、Sr、Eu, 且  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  较高, 为 4.03~4.52。稀土元素总量较低,  $\Sigma\text{REE}$  为  $158.21 \times 10^{-6}$ ~ $183.86 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 为 0.88~1.05。在稀土元素球粒陨石标准化图解 (图 4b) 中, 显示“燕式”

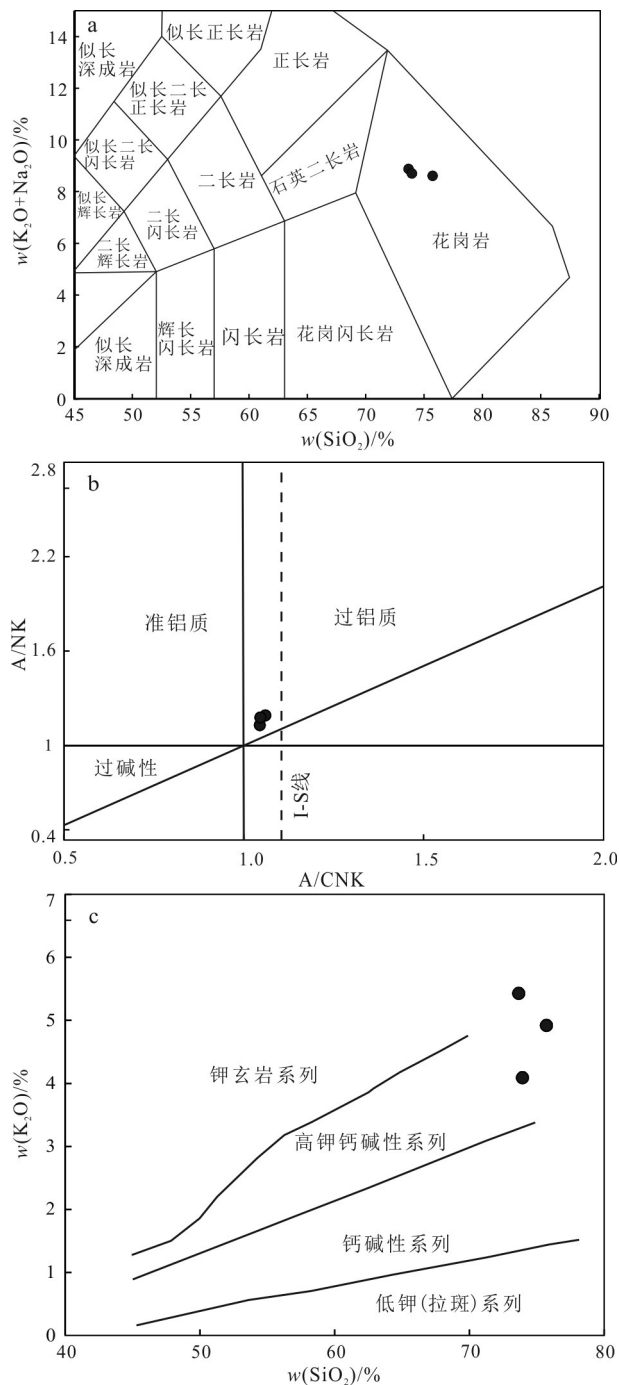


图 3 茂奇电气石花岗岩地球化学图解

a.  $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  图解 (据 Middlemost, 1994); b. A/CNK-A/NK 图解 (据 Peccerillo et al., 1976); c.  $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O})$  图解 (据 Rickwood, 1989)

Fig. 3 Geochemical diagrams of the tourmaline granite in the Mawchi deposit

a.  $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  diagram (after Middlemost, 1994); b. A/CNK-A/NK diagram (after Peccerillo et al., 1976); c.  $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O})$  diagram (after Rickwood, 1989)

配分型式, LREE、HREE 均呈近平坦型, 总体表现

表2 茂奇电气石花岗岩微量元素( $w(B)/10^{-6}$ )分析结果Table 2 Trace elements ( $w(B)/10^{-6}$ ) compositions of the tourmaline granite in the Mawchi deposit

组分	DMQ03-N1	DMQ03-N2	DMQ04-b6	组分	DMQ03-N1	DMQ03-N2	DMQ04-b6
Sc	4.64	3.4	6.24	Dy	25	21.6	25
V	6.7	3.8	3.9	Ho	5.32	4.5	5.23
Cr	3.12	2.94	3.22	Er	17.4	14.4	18
Co	0.14	0.16	0.24	Tm	2.87	2.32	3.2
Be	19.2	29.6	22.2	Yb	21.4	16.9	26
Li	53.6	37.7	40.4	Lu	3.2	2.54	4.07
Cs	27.7	28.8	24.7	W	198	127	14.6
Rb	1040	971	740	Sn	356	149	25.2
Ba	35.4	69.2	27.7	La	12.8	12.4	15.2
Th	21.1	21.2	15.5	Ce	32.6	33	35.8
U	18.5	23.2	21	Y	165	138	191
Nb	33.4	18.6	20.5	Ga	30.8	29.4	31.4
Ta	26.4	18.2	11.6	F	2720	2620	3340
La	12.8	12.4	101	Cu	2.28	5.79	1.2
Ce	32.6	33	6.24	Zn	74.5	135	86.4
Pb	95.2	133	3.9	Ni	2.08	2.04	2.24
Pr	4.96	4.77	4.63	Cd	0.06	0.76	0.026
Sr	2.3	12.1	3.8	Mo	0.12	0.29	0.1
Nd	21.7	20.9	20.4	B	685	491	818
Zr	71.3	65.3	56.1	Bi	5.22	5.12	0.39
Hf	5.59	5.88	6.14	ΣREE	173.882	158.21	182.86
Sm	10.4	9.92	9.58	LREE	82.492	81.03	85.64
Eu	0.032	0.04	0.032	HREE	91.39	77.18	97.22
Gd	12.7	11.8	12.4	LREE/HREE	0.90	1.05	0.88
Tb	3.5	3.12	3.32				

注:比值单位为1。

轻、重稀土元素没有明显的分异性,均显示Eu具有明显的负异常( $\delta Eu=0.21\sim 0.26$ )。

### 3.2 锆石 U-Pb 定年结果

根据野外地质观察,并结合岩石学和矿物学特征,本次研究选取了典型的茂奇电气石花岗岩进行SIMS U-Pb定年,对发育茂奇钨锡矿的花岗岩岩体的形成时代进行了精确的厘定。电气石花岗岩样品中锆石呈浅黄色-浅玫瑰色,多呈柱状,晶体粒径一般为60~200  $\mu m$ ,长短轴比大多为2:1~3:1,少量为4:1~5:1。阴极发光图像显示大部分锆石裂纹不发育,具有清晰的岩浆韵律环带(图5a),显示岩浆成因特征。电气石花岗岩中锆石 $w(U)$ 为 $472\times 10^{-6}\sim 13312\times 10^{-6}$ , $w(Th)$ 为 $218\times 10^{-6}\sim 1767\times 10^{-6}$ , $Th/U$ 为0.13~0.70,平均0.37,显示出岩浆锆石的特点(Belousova et al., 2002; 吴元保等, 2004)。锆石 U-Pb 年龄数据见表3,本次共所获得15个锆

石年龄数据,其中12个锆石的年龄较为一致,表明锆石为同期岩浆结晶形成。 $^{206}Pb/^{238}U$ - $^{207}Pb/^{235}U$ 谐和年龄图(图5b)表现为较好的谐和性, $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均值年龄为 $(43.20\pm 0.49) Ma$ ( $MSWD=2.3$ )。

### 3.3 锆石 Hf 同位素分析结果

本次共选择15个测试点进行原位Hf同位素分析,具体分析结果见表4,Hf同位素演化图解如图6所示。电气石花岗岩锆石的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值均很低( $<0.002$ ),表明锆石在形成后具有较低放射性成因的Hf积累,因而可以用初始 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值代表锆石形成时 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值(Amelin et al., 1999; 吴福元等, 2007)。电气石花岗岩初始 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值为0.282 484~0.282 550(平均0.282 511), $\epsilon_{Hf}(t)$ 从-6.0~-3.5,二阶段模式年龄( $T_{DM2}$ )为1.56~1.72 Ga(表4,图6)。

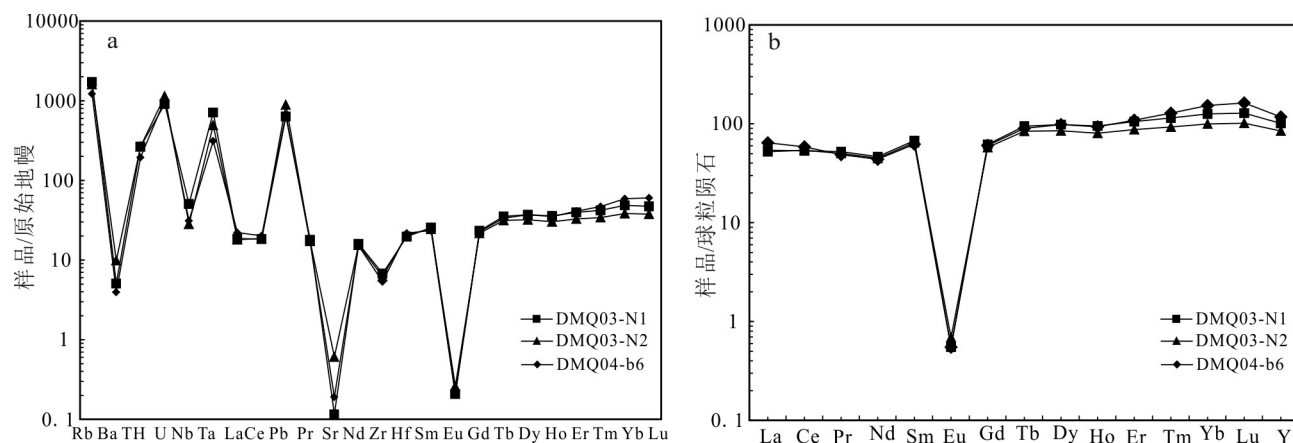


图 4 茂奇电气石花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分图(b)(原始地幔和球粒陨石标准化数值据 Sun et al., 1989)

Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) for the tourmaline granite in the Mawchi deposit (normalized values of primitive mantle and chondrites after Sun et al., 1989)

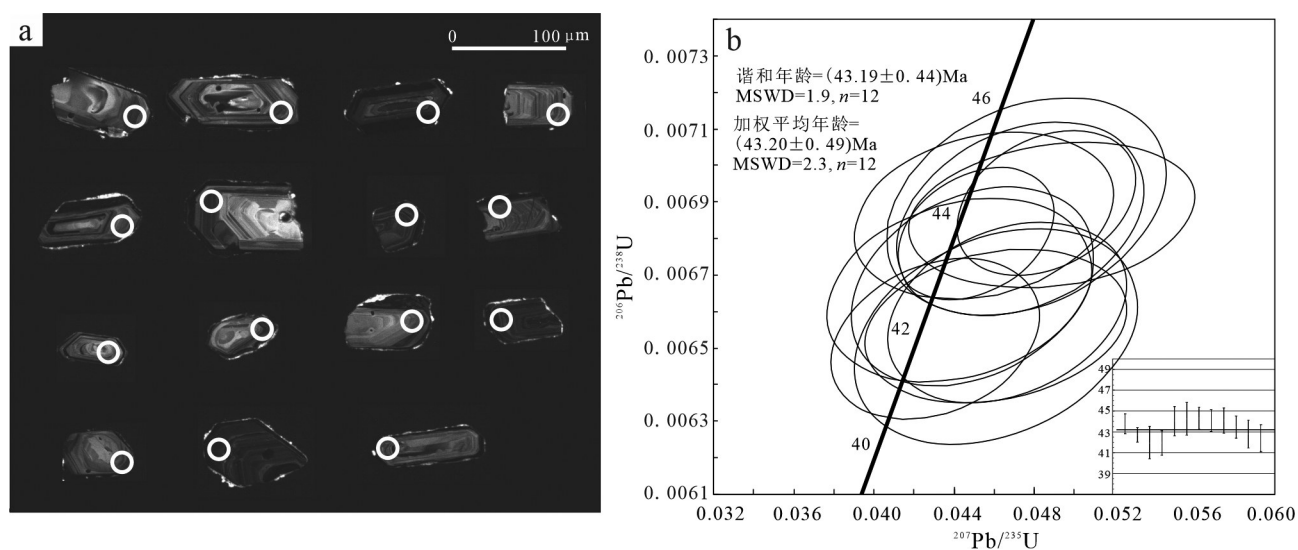


图 5 茂奇电气石花岗岩锆石 CL 图像(a)和 U-Pb 同位素年龄(b)

Fig. 5 Representative CL images (a) and U-Pb ages (b) of zircon grains in tourmaline granite from the Mawchi deposit

## 4 讨论分析

### 4.1 茂奇电气石花岗岩体的形成时代

前人针对茂奇花岗岩开展了多种年代学研究, 主要方法为锆石/锡石 U-Pb、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、Re-Os 法, 获得的年龄 40.14~43.53 Ma (Myint et al., 2018; Liang et al., 2024)。

笔者选取茂奇锡矿区近矿电气石花岗岩, 采用

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年法, 获得其加权平均年龄为  $(43.20 \pm 0.49) \text{ Ma}$  (MSWD=2.3) (图 5b), 与前人结果基本一致, 表明成岩时代为中始新世。

### 4.2 茂奇电气石花岗岩体的成因及来源

近年来, 花岗岩按成因类型可划分为 I 型、S 型、M 型和 A 型 (Bonin, 2007), 不同类型花岗岩可以揭示不同的岩浆源区和岩石成因。M 型花岗岩是由俯冲大洋地壳或者上覆地幔衍化而来,  $w(\text{K}_2\text{O})$  通常  $< 1\%$ , 主要分布在大洋中脊 (Healy et al., 2005; 舒

表3 茂奇电气石花岗岩锆石U-Pb同位素定年结果

Table 3 U-Pb isotope analytical results of zircons in tourmaline granite from the Mawchi deposit

测点号	$w(B)/10^{-6}$			同位素比值						同位素年龄/Ma				谐和度/%
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	
DMQ03-N2-18	21.57	816	2719	0.0474	0.0026	0.0394	0.0022	0.0060	0.0001	39.2	2.1287	38.3	0.4247	97
DMQ03-N2-17	37.09	973	5096	0.0487	0.0015	0.0423	0.0013	0.0063	0.0001	42.0	1.2614	40.4	0.3935	96
DMQ03-N2-01	21.65	810	2759	0.0493	0.0019	0.0461	0.0018	0.0067	0.0001	45.7	1.7160	43.3	0.4654	94
DMQ03-N2-04	12.20	678	1571	0.0469	0.0023	0.0426	0.0021	0.0066	0.0001	42.4	2.0255	42.2	0.5513	99
DMQ03-N2-10	27.41	880	3528	0.0518	0.0018	0.0482	0.0016	0.0067	0.0001	47.8	1.5318	43.3	0.4324	90
DMQ03-N2-13	12.09	666	1428	0.0513	0.0025	0.0489	0.0024	0.0069	0.0001	48.4	2.2870	44.4	0.5449	91
DMQ03-N2-15	11.95	685	1442	0.0516	0.0026	0.0482	0.0023	0.0068	0.0001	47.8	2.2434	43.8	0.6074	91
DMQ03-N2-22	10.25	799	1140	0.0464	0.0027	0.0440	0.0026	0.0070	0.0001	43.8	2.4924	45.0	0.9333	97
DMQ03-N2-24	12.61	616	1535	0.0469	0.0024	0.0453	0.0024	0.0070	0.0001	45.0	2.3153	45.0	0.6317	99
DMQ03-N2-26	7.71	391	930	0.0507	0.0030	0.0473	0.0026	0.0068	0.0001	46.9	2.5539	43.6	0.6299	92
DMQ03-N2-27	12.64	826	1476	0.0522	0.0025	0.0492	0.0023	0.0069	0.0001	48.8	2.1934	44.4	0.7487	90
DMQ03-N2-29	3.84	218	472	0.0529	0.0045	0.0477	0.0036	0.0067	0.0001	47.3	3.4540	43.3	0.8873	90
DMQ03-N2-05	18.58	527	2557	0.0538	0.0026	0.0472	0.0020	0.0063	0.0001	46.8	1.9879	40.6	0.4243	85
DMQ03-N2-30	26.81	812	3449	0.0549	0.0019	0.0503	0.0017	0.0066	0.0001	49.8	1.6062	42.6	0.3704	84
DMQ03-N2-23	23.48	630	2382	0.0532	0.0066	0.0512	0.0065	0.0065	0.0001	50.7	6.2349	41.8	0.5109	80
DMQ03-N2-07	14.04	803	1844	0.0597	0.0027	0.0508	0.0022	0.0062	0.0001	50.3	2.1193	39.9	0.4839	76
DMQ03-N2-19	104.5	1767	13312	0.0596	0.0032	0.0493	0.0027	0.0059	0.0001	48.9	2.6124	38.2	0.3875	75

表4 茂奇电气石花岗岩锆石Hf同位素测试数据

Table 4 In situ Hf isotopic data of zircons in tourmaline granite from the Mawchi deposit

测点	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2 $\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2 $\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2 $\sigma$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}/\text{Ma}$	$T_{\text{DM2}}/\text{Ma}$
DMQ03-N2-01	43.3	0.048171	0.000304	0.001726	0.000011	0.282529	0.000014	-9.0	-4.4	1042	1609
DMQ03-N2-02	41.8	0.026085	0.000210	0.000928	0.000008	0.282550	0.000013	-8.3	-3.5	991	1563
DMQ03-N2-04	42.2	0.031775	0.000570	0.001132	0.000018	0.282479	0.000013	-10.8	-6.0	1096	1721
DMQ03-N2-07	39.9	0.040114	0.000828	0.001384	0.000027	0.282541	0.000015	-8.6	-3.8	1016	1584
DMQ03-N2-09	43.7	0.034232	0.000534	0.001155	0.000018	0.282519	0.000013	-9.4	-4.7	1042	1632
DMQ03-N2-12	41.6	0.047997	0.001489	0.001658	0.000049	0.282522	0.000017	-9.3	-4.7	1051	1627
DMQ03-N2-13	44.4	0.036341	0.000591	0.001276	0.000024	0.282524	0.000015	-9.2	-4.5	1038	1621
DMQ03-N2-14	41.2	0.034438	0.001420	0.001200	0.000051	0.282495	0.000014	-10.3	-5.6	1076	1687
DMQ03-N2-16	43.8	0.033050	0.000700	0.001131	0.000025	0.282488	0.000018	-10.5	-5.9	1084	1700
DMQ03-N2-21	43.1	0.036305	0.000520	0.001297	0.000022	0.282516	0.000014	-9.5	-4.8	1049	1638
DMQ03-N2-23	41.8	0.043610	0.000771	0.001573	0.000037	0.282499	0.000012	-10.1	-5.3	1081	1677
DMQ03-N2-24	45	0.055439	0.000552	0.001913	0.000021	0.282510	0.000013	-9.7	-5.1	1075	1651
DMQ03-N2-27	44.4	0.025844	0.000357	0.000889	0.000013	0.282502	0.000013	-10.0	-5.3	1057	1668
DMQ03-N2-29	43.3	0.020571	0.000099	0.000705	0.000003	0.282506	0.000016	-9.9	-5.1	1047	1660
DMQ03-N2-30	42.6	0.039808	0.000485	0.001385	0.000017	0.282484	0.000015	-10.6	-6.0	1097	1710

徐洁, 2014)。I型花岗岩是由火山岩或变火山岩为岩浆源区,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  一般低于1, 铝饱和指数(A/CNK) < 1.1 (Clemens et al., 2011; Chappell et al., 2012)。S型花岗岩岩浆源区为变沉积岩,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  一般高于1, 铝饱和指数(A/CNK) > 1.1。A型花岗岩形成于非造山期、裂谷环境或稳定大陆壳, 常通过构造背景与地球化学特征(如高Ga/Al、四分组效应等)

识别(Robert, 2006; Grebennikov, 2014)。

茂奇电气石花岗岩属于准铝质-弱过铝质, 碱性含量较高的高钾钙碱性-钾玄岩系列花岗岩(图3b、c); 矿物成分上以石英、碱性长石、钾长石、黑云母为主; 微量元素特征为富硅( $w(\text{SiO}_2)=73.67\%\sim 75.74\%$ )、富碱( $w(\text{Na}_2\text{O})=3.45\%\sim 4.61\%$ ,  $w(\text{K}_2\text{O})=4.09\%\sim 5.43\%$ ), 较高TFeO/(TFeO + MgO)比值(0.80~0.94)、较高

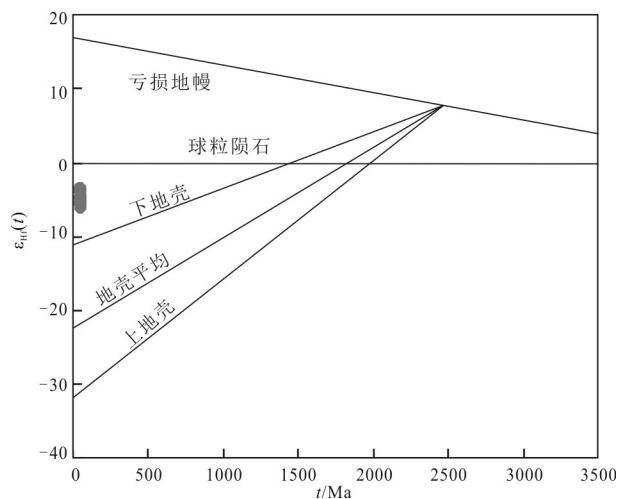


图 6 茂奇电气石花岗岩 Hf 同位素图解

Fig. 6 Hf diagram of zircons in tourmaline granite from the Mawchi deposit

10000Ga/Al 值 (4.03~4.52), 低  $w(\text{MgO})$  (0.071%~0.23%), 低  $w(\text{CaO})$  (0.51%~0.83%); 稀土元素呈现明显的四分组效应; 这些均是 A 型花岗岩的典型特征 (肖庆辉等, 2009)。

一般认为, 当 A 型花岗岩受到结晶分异作用影响时, 会与高分异的 I 型花岗岩具有相似的地球化学特征 (King et al., 1997)。茂奇电气石花岗岩矿物中见电气石等含挥发分的矿物, 有较高  $w(\text{Rb})$ 、高 Rb/Sr、Rb/Ba 比值, 以及较低  $w(\text{Ba})$ 、 $w(\text{Sr})$ 、 $w(\text{P})$ 、 $w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{Ti})$ , 低  $\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  (0.059~0.095)、Zr/Hf (9.13~12.75)

和 Nb/Ta (1.02~1.76) 比值, 且 Eu 负异常强烈, 进一步证实其经历了高度结晶分异作用。

茂奇电气石花岗岩 10000Ga/Al 值在 4.03~4.52 之间, 明显高于世界 I 和 S 型花岗, 而与典型 A 型花岗岩 3.75 的比值接近 (Whalen et al., 1987)。研究表明, 相对于高分异的 I 型花岗岩, A 型花岗岩具有更高的 TFeO/MgO 和 TFeO/(TFeO+MgO), 这可作为判别其类型的关键指标 (Whalen et al., 1987; Frost et al., 2001)。在本研究中, 电气石花岗岩 TFeO/MgO 为 4.22~17.32, TFeO/(TFeO+MgO) 为 0.80~0.94, 2 个比值均相对较高。并且, 在 10000Ga/Al- $w(\text{Nb})$  图解 (图 7a) 和 10000Ga/Al-TFeO/MgO 图解 (图 7b) 中, 电气石花岗岩的这 2 项比值均落在 A 型花岗岩范围内, 进一步支持其属于 A 型花岗岩属性。

锆石原位 Hf 同位素是示踪花岗岩浆源区的有效手段 (Griffin et al., 2002; 吴福元等, 2007)。本文电气石花岗岩样品的锆石 Hf 同位素研究显示,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -6.0~-3.5, 二阶段模式年龄 ( $T_{\text{DM}2}$ ) 为 1.56~1.72 Ga, 在  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和 U-Pb 年龄图解 (图 8) 中, 样品都落于球粒陨石及下地壳 Hf 同位素分异演化线之间下地壳区域, 表明茂奇电气石花岗岩主要来源于中元古代地壳基底 (Griffin et al., 2004)。在对过铝质花岗岩的研究中, 沉积岩 (如泥砂岩、砂屑岩等) 通常被认为是其主要源区 (Williamson et al., 1996; Sylvester, 1998)。CaO/Na<sub>2</sub>O 可作为判断其源区的重要标志 (Sylvester, 1998), 富黏土源区的过铝-强过铝质

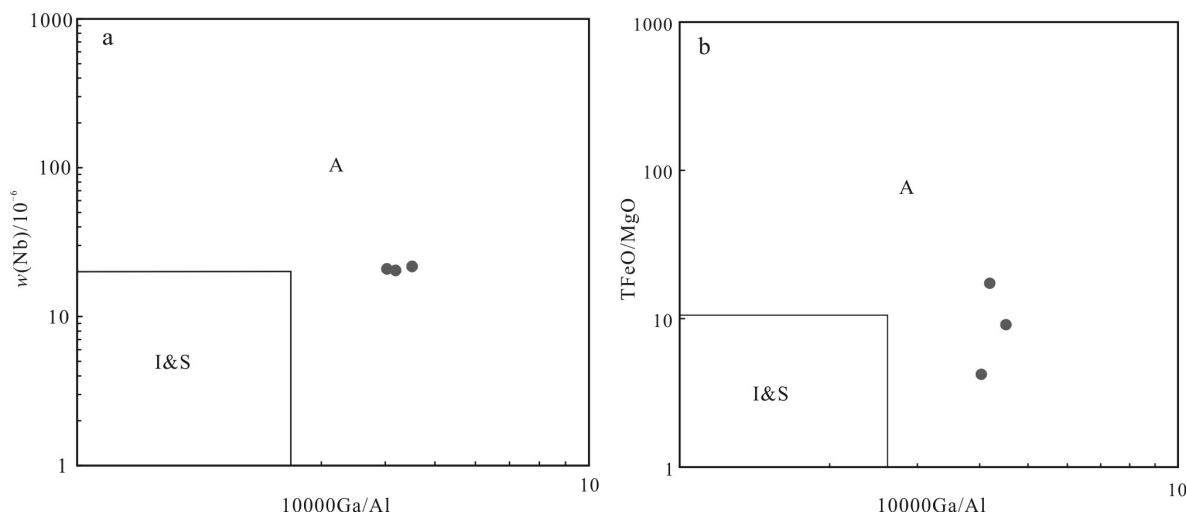


图 7 茂奇电气石花岗岩成因判别图解 (据 Whalen et al., 1987)

a. 10000Ga/Al- $w(\text{Nb})$  图解; b. 10000Ga/Al-TFeO/MgO 图解

Fig. 7 Discrimination diagrams for the genetic types of the tourmaline granite in the Mawchi deposit (after Whalen et al., 1987)

a. 10000Ga/Al- $w(\text{Nb})$  diagram; b. 10000Ga/Al-TFeO/MgO diagram

花岗岩的  $CaO/Na_2O < 0.3$ , 比值较低; 而富斜长石、贫黏土碎屑岩源区的过铝-强过铝质花岗岩  $CaO/Na_2O > 0.3$ 。本次测试3件样品的  $CaO/Na_2O$  均小于0.3, 指示其源区成分以泥质岩为主。此外, 过铝质花岗岩的 Rb-Sr-Ba 系统比值显示, 样品的 Rb/Sr-Rb/Ba 值均分布于富黏土源岩区域(图8), 进一步证实其源岩为富黏土的泥岩(Sylvester, 1998)。综上所述, 笔者认为茂奇电气石花岗岩源于中元古代富黏土的古老地壳物质部分熔融, 并在岩浆上升过程中经历了强烈的结晶分异作用, 最终形成高硅、富碱、高分异的A型花岗岩。

4.3 构造环境

茂奇电气石花岗岩的地球化学特征(富硅、富碱、高铁镁比, 强烈亏损 Sr、Eu、P、Ti, 高 10000Ga/Al 值, 显著四分组效应)及高度结晶分异标志(如高 Rb/Sr、低 Ba/Sr), 均指示其形成于伸展构造背景(King et al., 1997; Bonin, 2007)。

印度—欧亚大陆碰撞作为新生代以来最重要的构造事件之一, 一直是地质学研究的核心课题。多数学者认为, 2个大陆的强烈碰撞发生于约 55 Ma (Ding et al., 2001; 莫宣学等, 2006), 主碰撞结束并进入后碰撞的时间为 50~41 Ma (Rowley, 1996; De-Celles et al., 2002)。结合本文获得的茂奇花岗岩形成时代( $43.20 \pm 0.49$ )Ma (MSWD=2.3) 及区域构造演化背景, 笔者认为该岩体与印度—亚洲大陆主碰撞后发生的板片断离及岩石圈伸展事件具有明确的成因联系(Gardiner et al., 2016), 即印度—欧亚板块碰撞首先发生于西藏地区, 随后逐渐向西和向东扩

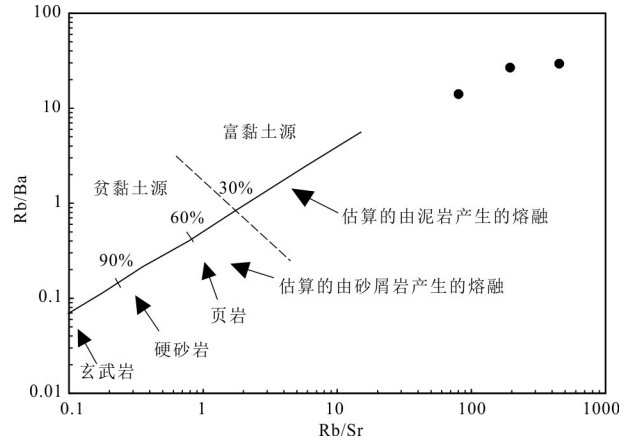


图8 茂奇电气石花岗岩 Rb/Sr-Rb/Ba 图解(据 Sylvester, 1998)

Fig. 8 Rb/Sr-Rb/Ba diagram of the tourmaline granite in the Mawchi deposit(after Sylvester, 1998)

展, 并在约 50 Ma 时, 其构造效应传递至缅甸地区(Wu et al., 2014; Zhang et al., 2022)。陆陆碰撞阻碍了持续的洋壳俯冲, 导致新特提斯俯冲板片发生撕裂和断离(Atherton et al., 2002)。板片断离后, 热的软流圈地幔物质通过板片窗上涌, 不仅为地壳熔融提供了重要热源, 也引发了强烈的岩浆活动(Gardiner et al., 2016)。目前, 在滇缅泰马地体, 已发现 50~40 Ma 期间大规模的岩浆活动记录, 如腾冲来利山、梁河及缅甸茂奇等多处的花岗岩侵位(金灿海等, 2013; 高永娟等, 2014; 林进展等, 2015; Myint et al., 2018; Liang et al., 2024)。同时, 在 Pearce(1996)提出的花岗岩构造环境判别图解(图9a、b)中, 显示茂

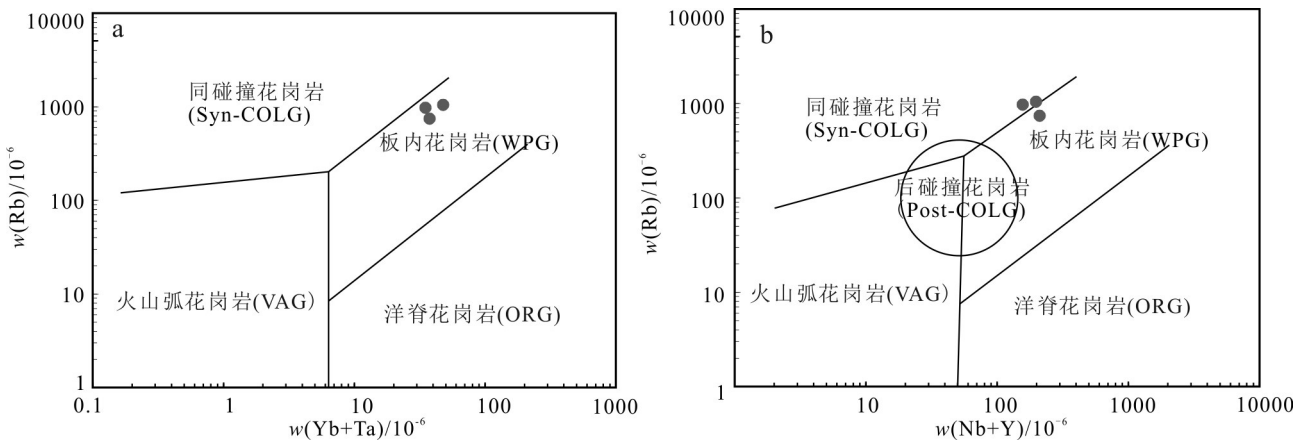


图9 茂奇电气石花岗岩  $w(Yb+Ta)-w(Rb)$  图解(a)和  $w(Nb+Y)-w(Rb)$  图解(b)(据 Pearce, 1996)

Fig. 9  $w(Yb+Ta)-w(Rb)$  diagram (a) and  $w(Nb+Y)-w(Rb)$  diagram (b) of the tourmaline granite in the Mawchi deposit (after Pearce, 1996)

奇电气石花岗岩主要落入同碰撞至板内花岗岩区域及其边界附近,进一步支持其形成于同碰撞向后碰撞过渡的构造背景。

综合地球化学特征与区域构造背景,笔者认为茂奇电气石花岗岩形成于印度—欧亚大陆碰撞后的伸展阶段,是由中元古代富黏土的老地壳物质发生部分熔融,并经历高度结晶分异所形成的A型高分异花岗岩。该岩体的形成与区域伸展背景下的岩浆活动密切相关,为理解东南亚锡钨成矿带的成矿动力学机制提供了关键证据。

## 5 结 论

(1) 茂奇电气石花岗岩的地球化学特征与Hf同位素组成指示其为A型花岗岩,岩浆主要来源于以泥质成分为主的古老地壳部分熔融,并经历了显著的结晶分异作用。

(2) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为  $(43.20 \pm 0.49) \text{Ma}$  ( $\text{MSWD}=2.3$ ), 表明岩体侵位于中始新世。

(3) 综合区域构造演化背景,判定茂奇电气石花岗岩形成于印度—亚洲大陆碰撞后的伸展构造环境。

## References

Amelin Y, Lee D C, Halliday A N and Pidgeon R T. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 399(6733): 252-255.

Atherton M P and Ghani A A. 2002. Slab breakoff: A model for Caledonian, late granite syn-collisional magmatism in the orthotectonic (metamorphic) zone of Scotland and Donegal, Ireland[J]. *Lithos*, 62(3): 65-85.

Barley M E, Pickard A L, Zaw K, Rak P and Doyle M G. 2003. Jurassic to Miocene magmatism and metamorphism in the Mogok metamorphic belt and the India-Eurasia collision in Myanmar[J]. *Tectonics*, 22(3): 1-11.

Belousova E A, Walters S, Griffin W L, O'Reilly S Y and Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 143(5): 602-622.

Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 97(1-2): 1-29.

Chappell B W, Bryant C J and Wyborn D. 2012. Peraluminous I-type granites[J]. *Lithos*, 153(8): 142-153.

Clemens J D, Stevens G and Farina F. 2011. The enigmatic sources of I-type granites: The peritectic connection[J]. *Lithos*, 126(3-4): 174-181.

Cobbing E J, Mallick D I J, Pitfield P E J and Teoh L H. 1986. The granites of the Southeast Asian tin belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 143(3): 537-550.

DeCelles P G, Robinson D M and Zandt G. 2002. Implications of shortening in the Himalayan fold-thrust belt for uplift of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 21(6): 12p.

Ding L, Zhong D L, Yin A, Kapp P and Harrison T M. 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 423-438.

Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J and Frost C D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033-2048.

Gao Y J, Lin S L, Cong F, Zou G F, Xie T, Tang F W, Li Z H and Liang T. 2014. Zircon U-Pb dating, Hf isotope and geochemistry of Paleogene granites in the Tengchong-Lianghe area, western Yunnan: Implications for the geological evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(1): 63-71(in Chinese).

Gardiner N J, Searle M P and Morley C K. 2016. The closure of Paleotethys in eastern Myanmar and northern Thailand: New insights from zircon U-Pb and Hf isotope data[J]. *Gondwana Research*, 39(1): 401-422.

Grebennikov A V. 2014. A-type granites and related rocks: Petrogenesis and classification[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 55(11): 1353-1366.

Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X and Zhou X. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3): 237-269.

Griffin W L, Belousova E A, Shee S R and O'Reilly S Y. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 131(4): 231-282.

Healy B, Collins W J and Richards S W. 2005. A hybrid origin for Lachlan S-type granites: The Murrumbidgee batholith example[J]. *Lithos*, 78(1): 197-216.

Jin C H, Fan W Y, Zhang H, Zhang H and Shen Z W. 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geological significance of syenogranite in the Lailishan tin deposit, western Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1211-1220(in Chinese).

King P L, White A J R, Chappell B W and Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371-391.

Li X H, Long W G, Li Q L, Liu Y, Zheng Y F, Yang Y H, Chamberlain K R, Wan D F, Guo C H, Wang X C and Tao H. 2010. Penglai zir-

- con megacrysts: A potential new working reference material for microbeam determination of Hf-O isotopes and U-Pb age[J]. *Geo-standards & Geoanalytical Research*, 34(2): 117-134.
- Liang H M, Yang Y F, Liu S S, Zhang B, Guo L N, Duan Y Y and Zhao D K. 2024. Zircon and cassiterite U-Pb age of the Mawchi Sn-W deposit, Kayah State, eastern Myanmar[J]. *China Geology*, 8: 1-4 (online publishing).
- Lin J Z, Cao H W, Zhang S T, Liu R P, Xiao C X and Yang K. 2015. Geochemical characteristics, zircon U-Pb dating and tectonic significance of A-type granites in the Lailishan area, southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(5): 207-219(in Chinese).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G and Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571.
- Metcalf I. 2011. Palaeozoic-Mesozoic history of SE Asia[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 355(1): 7-35.
- Middlemost E. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215-224.
- Mitchell A H G, Htay M T, Htun K M, Win M N, Oo T and Hlaing T. 2012. The Modi Taung-Nankwe gold district, Slate Belt, Central Myanmar: Mesothermal veins in a Mesozoic orogen[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 56: 1-16.
- Mo X X and Pan G T. 2006. Constraints from tectonic-magmatic events on the formation of the Tibetan Plateau from the Tethys[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 1-20(in Chinese with English abstract).
- Myint A Z, Zaw K, Swe Y M, Yonezu K, Cai Y, Manaka T and Watanabe K. 2017. Geochemistry and geochronology of granites hosting the Mawchi Sn-W deposit, Myanmar: Implications for tectonic setting and emplacement[J]. *Geological Society Memoirs*, 48(1): 385-400.
- Myint A Z, Zaw K and Yonezu K. 2018. Geology, geochemistry, and geochronology of the Mawchi Sn-W deposit, Myanmar: Implications for the timing of mineralization and tectonic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 95: 1027-1047.
- Ng S W P, Chung S L, Robb L J, Searle M P, Ghani A A, Whitehouse M J, Oliver G J H, Sone M, Gardiner N J and Roselee M H. 2015a. Petrogenesis of Malaysian granitoids in the Southeast Asian tin belt: Part 1. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 127(9-10): 1209-1237.
- Ng S W P, Whitehouse M J, Searle M P, Robb L J, Ghani A A, Chung S L, Oliver G J H, Sone M, Gardiner N J and Roselee M H. 2015b. Petrogenesis of Malaysian granitoids in the Southeast Asian tin belt: Part 2. U-Pb zircon geochronology and tectonic model[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 127(9-10): 1238-1258.
- Nyunt T T, Moe A K, Zaya K and Sone S P. 2023. Some critical mineral and element occurrences and potential in Myanmar[J]. *Thai Geoscience Journal*, 4(5): 11-32.
- Pearce J A. 1996. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19(4): 120-125.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247-263.
- Robert J L. 2006. Pegmatites and granites: Results from open-system fenitization-type reactions in an extensional environment[J]. *Lithos*, 91(1): 125-136.
- Rowley D B. 1996. Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 145(1-4): 1-13.
- Shu X J. 2014. Petrogenesis and crustal evolution of Mesozoic granites in the Nanling region, South China[D]. Nanjing: Nanjing University. 156p(in Chinese).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1-4): 29-44.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419.
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220. (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Ji W Q, Wang J G, Liu C Z, Chung S L and Clift P D. 2014. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the onset time of India-Asia collision[J]. *American Journal of Science*, 314(2): 548-579.
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Zircon genesis mineralogy and its constraints on the interpretation of U-Pb ages[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604(in Chinese).
- Xiao Q H, Wang T, Deng J F, Mo X X, Lu X X, Hong D W, Xie C F, Luo Z H, Qiu R Z and Wang X X. 2009. Granitoids and continental growth of key orogenes in China[M]. Beijing: Geology Publishing House. 528p(in Chinese).
- Zaw K. 1990. Geological, petrological and geochemical characteristics of granitoid rocks in Burma: With special reference to the associ-

ated W-Sn mineralization and their tectonic setting[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 4(4): 293-335.

Zaw K, Meffre S, Lai C K, Burrett C and Santosh M. 2014. Tectonics and metallogeny of mainland Southeast Asia—A review and contribution[J]. *Gondwana Research*, 26(1): 5-30.

Zhang Q, Zhao K D, Li W Q, Palmer M R, Jiang S Y, Jiang H, Zhang W, Zhang D and Hussain A. 2022. Timing and tectonic setting of tin mineralization in southern Myanmar: Constraints from cassiterite and wolframite U-Pb ages[J]. *Mineralium Deposita*, 57(6): 977-999.

#### 附中文参考文献

高永娟, 林仕良, 丛峰, 邹光富, 谢韬, 唐发伟, 李再会, 梁婷. 2014. 滇西腾冲-梁河古近纪花岗岩锆石 U-Pb 定年, Hf 同位素及地球化学[J]. *地质学报*, 88(1): 63-71.

金灿海, 范文玉, 张海, 张航, 沈战武. 2013. 滇西来利山锡矿正长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地质学报*, 87(9): 1211-1220.

林进展, 曹华文, 张寿庭, 刘瑞萍, 肖常先, 杨宽. 2015. 青藏高原东南缘腾冲来利山 A 型花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 39(5): 959-971.

莫宣学, 潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. *地学前缘*, 13(6): 43-51.

舒徐洁. 2014. 华南南岭地区中生代花岗岩成因与地壳演化[D]. 南京: 南京大学. 156 页.

吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 23(2): 185-220.

吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 49(16): 1589-1604.

肖庆辉, 王涛, 邓晋福, 莫宣学, 卢欣祥, 洪大卫, 谢才富, 罗照华, 邱瑞照, 王晓霞. 2009. 中国典型造山带花岗岩与大陆地壳生长研究[M]. 北京: 地质出版社. 528 页.