

· 专题研究 ·

喜马拉雅造山带亚东地区多期构造热事件 ——锆石和独居石 U-Th-Pb 年代学证据

董 昕, 田作林

(自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘 要: 喜马拉雅造山带是研究板块构造的天然实验室, 位于造山带核心部位的大喜马拉雅岩系是揭示碰撞造山过程和造山带演化的关键。本文主要对亚东地区大喜马拉雅岩系中的花岗质片麻岩进行了岩相学、锆石和独居石 U-Th-Pb 年代学以及全岩主微量地球化学研究。野外和显微结构特征观察表明, 花岗质片麻岩的矿物组合为斜长石 + 钾长石 + 石英 + 黑云母 + 石榴石, 岩石发生了部分熔融, 经历了高角闪岩相至麻粒岩相的变质作用。年代学和全岩地球化学研究表明, 花岗质片麻岩的原岩包括新元古代 (~800 Ma) 的花岗闪长岩和志留纪 (~440 Ma) 的花岗岩, 二者均在中新世 (~16 Ma) 发生了变质作用。新元古代花岗闪长岩具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-16.4 ~ -12.2), 地壳 Hf 模式年龄为 3.11 ~ 2.79 Ga, 说明其起源于古老下地壳物质的部分熔融。新元古代花岗闪长岩和志留纪花岗岩具有相似的弧花岗质岩石地球化学特征, 即具有高场强元素 Nb、Ta、P 和 Ti 的负异常。本次研究表明大喜马拉雅岩系经历了多期构造热事件, 其不仅记录了新生代的碰撞造山作用, 还记录了与新元古代与罗迪尼亚超大陆演化相关的岩浆热事件以及古生代冈瓦纳大陆拼合后的周缘安第斯型造山作用。

关键词: 锆石和独居石; U-Th-Pb 定年; 多期构造热事件; 亚东; 喜马拉雅造山带

中图分类号: P597^{+.3}; P588.34⁺⁵

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)04-0431-22

Multistage tectono-thermal events in the Yadong area of the Himalayan orogenic belt: Evidence from zircon and monazite U-Th-Pb geochronology

DONG Xin and TIAN Zuo-lin

(Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Himalayan orogenic belt is a natural laboratory for studying plate tectonics. Located at the core of the Himalayan orogen, the Greater Himalayan Sequence (GHS) is the key to revealing the collisional orogenesis and orogenic evolution. This paper presents the petrography, zircon and monazite U-Th-Pb chronology and geochemistry of the GHS granitic gneisses from the Yadong area. The field survey and microstructure show that these rocks have the mineral assemblage of plagioclase + K-feldspar + quartz + biotite + garnet, and have experienced a metamorphism of the upper-amphibolite to granulite facies with partial melting. Chronology and geochemistry indicate that the protoliths of granitic gneisses include the Neoproterozoic (~800 Ma) granodiorite and the Silurian (~440 Ma) granite, both of which experienced metamorphism in Miocene (~16 Ma). The Neoproterozoic granodiorite has negative $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -16.4 ~ -12.2, and crust model ages t_{DM}^{C} of 3.11 ~ 2.79 Ga,

收稿日期: 2019-01-08; 接受日期: 2019-04-05; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41872070); 国家留学基金项目(201809110024); 中国地质调查局地质调查项目(12120114022801, 12120115026801, DD20160022, DD20160201)

作者简介: 董 昕(1982-), 女, 博士, 副研究员, 从事岩石学和地球化学研究工作, E-mail: dongxin5811935@163.com; 通讯作者: 田作林(1986-), 男, 博士, 副研究员, 从事变质岩石学和相平衡模拟研究工作, E-mail: zuolin.tian@gmail.com。

suggesting that the rock was derived from partial melting of the ancient lower crust. The Neoproterozoic granodiorite and Silurian granite have similar geochemical characteristics to arc granitic rocks, with negative anomalies of high field strength elements Nb, Ta, P and Ti. The present study reveals that the Greater Himalayan Sequence has experienced multistage tectono-thermal events, including not only the Cenozoic collisional orogeny but also the Neoproterozoic magmatism associated with the evolution of the supercontinent Rodinia as well as the surrounding Andean orogeny after the Paleozoic formation of Gondwana.

Key words: zircon and monazite; U-Th-Pb dating; multistage tectono-thermal event; Yadong; Himalayan orogenic belt

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41872070); China Scholarship Foundation (201809110024); Geological Survey Project of China Geological Survey (12120114022801, 12120115026801, DD20160022, DD20160201)

喜马拉雅造山带位于青藏高原南部,由印度与亚洲大陆的新生代碰撞和汇聚作用形成,是世界上最年轻且仍在活动的碰撞造山带。由于没有受到后期构造热事件的叠加和改造,它是研究造山作用的天然实验室。位于造山带核部的大喜马拉雅岩系主要由中高级变质岩组成,其记录了印度大陆地壳俯冲至下地壳底部并折返的信息,是揭示碰撞造山带构造演化的关键,是国内外地质学家研究的焦点。近20年来,大喜马拉雅岩系新生代变质作用的研究取得了重要进展(如 Kohn, 2014 和其中参考文献)。但是,大喜马拉雅岩系的原岩、物质组成和构造归属仍存在诸多争议。基于寒武纪-奥陶纪岩浆作用的大量报道(Johnson *et al.*, 2001; Miller *et al.*, 2001; Gehrels *et al.*, 2003, 2006a, 2006b; 许志琴等, 2005; Cawood and Buchan, 2007; Cawood *et al.*, 2007; 张泽明等, 2008; 王晓先等, 2011; Wang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012a; 高利娥等, 2015), 通常认为,喜马拉雅造山带普遍经历了泛非期造山作用,该期岩浆岩是大喜马拉雅岩系原岩的主要组成部分,但是其构造环境还存在陆-陆碰撞或洋壳俯冲等争论。此外,随着部分基性(Cottle *et al.*, 2009)和中酸性(Ding and Zhang, 2016; Wang *et al.*, 2017)高级变质岩约 800 Ma 原岩的报道,新元古代的岩浆热事件也逐渐引起学者们关注。但是,相较于古生代岩浆作用,新元古代岩浆岩由于出露规模小、报道少,其研究程度还相对较低。

本文对出露于亚东地区大喜马拉雅岩系的花岗质片麻岩进行了锆石和独居石 U-Th-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素和全岩主微量地球化学研究,欲为喜马拉雅造山带的物质组成和演化历史提供了进一步的限定。

1 地质背景和样品

喜马拉雅造山带位于青藏高原南部,由印度与亚洲大陆的新生代碰撞和汇聚作用形成。从北至南,造山带主要由特提斯喜马拉雅岩系(THS)、大喜马拉雅岩系(GHS)和小喜马拉雅岩系(LHS)3个构造单元组成(图1, Yin and Harrison, 2000)。通常认为特提斯喜马拉雅岩系由晚元古代至中生代沉积岩系组成,未变质至低角闪岩相变质,其北界为印度-雅鲁藏布缝合带,代表了印度与亚洲大陆之间的新特提斯洋残留,其南界为一系列剪切带和脆性断层组成的藏南拆离系(STD)。位于藏南拆离系之下的大喜马拉雅岩系,是造山带的核心部分,由元古宙至古生代的沉积岩系和不同类型的岩浆岩组成,经历了麻粒岩相到榴辉岩相变质作用,并伴随着广泛的部分熔融。位于主中央逆冲断裂(MCT)之下的小喜马拉雅岩系主要由元古宙的沉积岩系和岩浆岩组成,经历了绿片岩相到角闪岩相变质作用(Kohn, 2014)。此外,喜马拉雅造山带发育两条淡色花岗岩带,一条位于大喜马拉雅岩系上部,另一条位于特提斯喜马拉雅岩系中部(图1, 吴福元等, 2015; 王晓先等, 2016)。

研究区亚东位于喜马拉雅造山带中南部,出露岩石主要包括特提斯喜马拉雅岩系、大喜马拉雅岩系和侵入其中的淡色花岗岩。其中,特提斯喜马拉雅岩系包括寒武系至古近系始新统的全部地层。刘文灿等(2004)报道该区存在寒武纪地层,但由于出露面积小、构造变形复杂,未进行深入调查,至今没有确切的寒武纪化石依据,缺乏年代学证据。大喜马拉雅岩系包括片麻岩、片岩、石榴辉石岩/石榴角

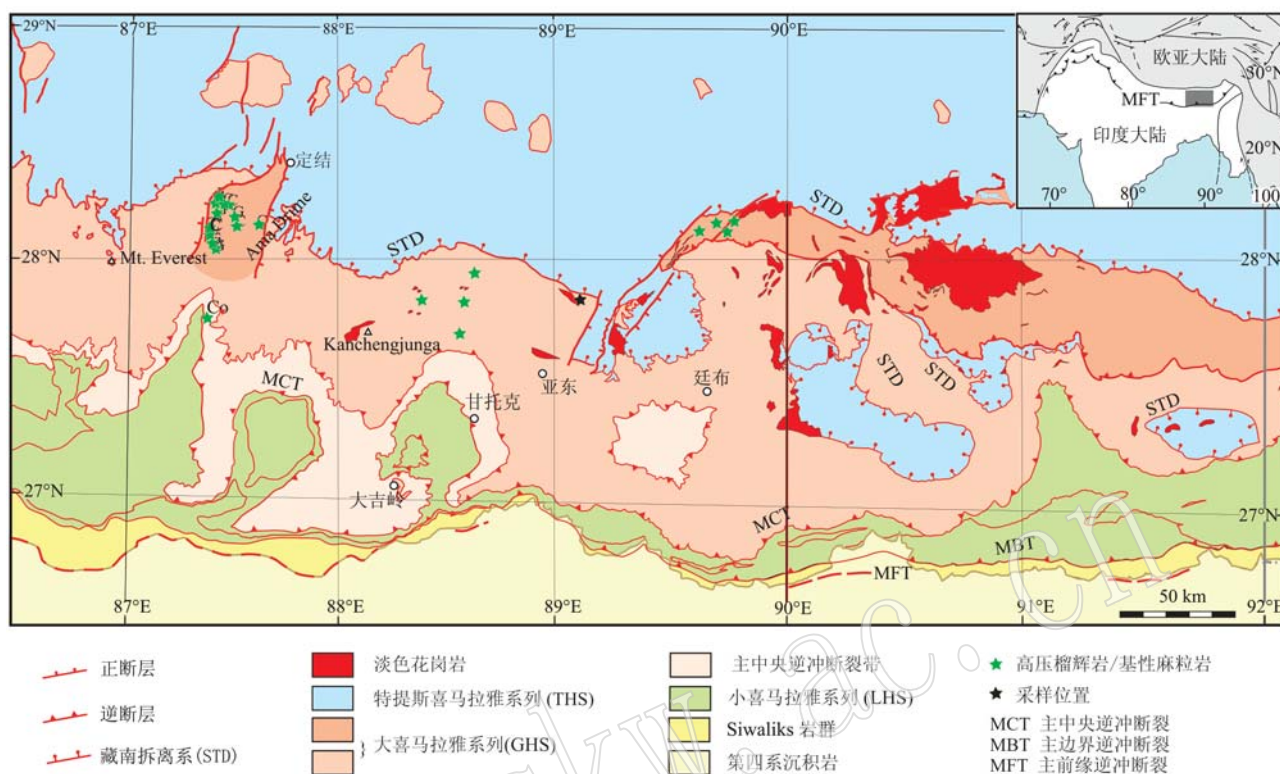


图1 喜马拉雅造山带中部地质简图[据 Grujic 等(2011)修改]

Fig. 1 Geological map of the central Himalayan orogenic belt (after Grujic *et al.*, 2011)

闪岩、石英岩、大理岩和钙硅酸盐岩,岩石普遍经历了部分熔融作用和混合岩化。刘文灿等(2004)将分布在亚东地区的大喜马拉雅岩系划分为两部分:上部主要为变质表壳岩组合,相当于聂拉木岩群;下部以混合岩和片麻岩为主,命名为亚东岩群。二者原岩时代均为前寒武纪,未做进一步划分。早期研究表明,亚东地区的变质岩经历了角闪岩相的变质作用(张祥信等, 2005)。而最近的研究表明,亚东地区的泥质岩经历了高压-高温麻粒岩相变质作用(峰期温、压条件为 $800 \sim 845^{\circ}\text{C}$ 、 $1.2 \sim 1.4 \text{ GPa}$)和近等温降压退变质过程,泥质麻粒岩可能经历了长期的部分熔融作用,从约 31 Ma 持续到 20 Ma,熔体体积可达 30% (Zhang *et al.*, 2017)。

本文样品采自亚东地区大喜马拉雅岩系的最上部,包括含石榴石花岗质片麻岩(92-1)和含石榴石淡色花岗岩(92-2)。在露头处可见,含石榴石花岗质片麻岩发生部分熔融,形成的浅色体平行岩石片麻理,宽约 $1 \sim 5 \text{ cm}$ 不等;含石榴石淡色花岗岩与含石榴石花岗质片麻岩共同发生了变形(图2)。

显微镜下观察发现,含石榴石花岗质片麻岩具



图2 亚东地区花岗质片麻岩的野外照片

Fig. 2 Field views of the granitic gneisses from the Yadong area

鳞片粒状变晶结构,主要由斜长石、钾长石和石英组成,并含有少量黑云母、石榴石和磷灰石以及锆石、独居石等副矿物(图3)。显微结构特征表明,岩石发生了部分熔融,证据包括:①石榴石边部通常呈不规则状,部分被黑云母、石英和斜长石替代(图3a~3c),可能代表了降温过程中熔融反应的逆反应($\text{Grt} +$

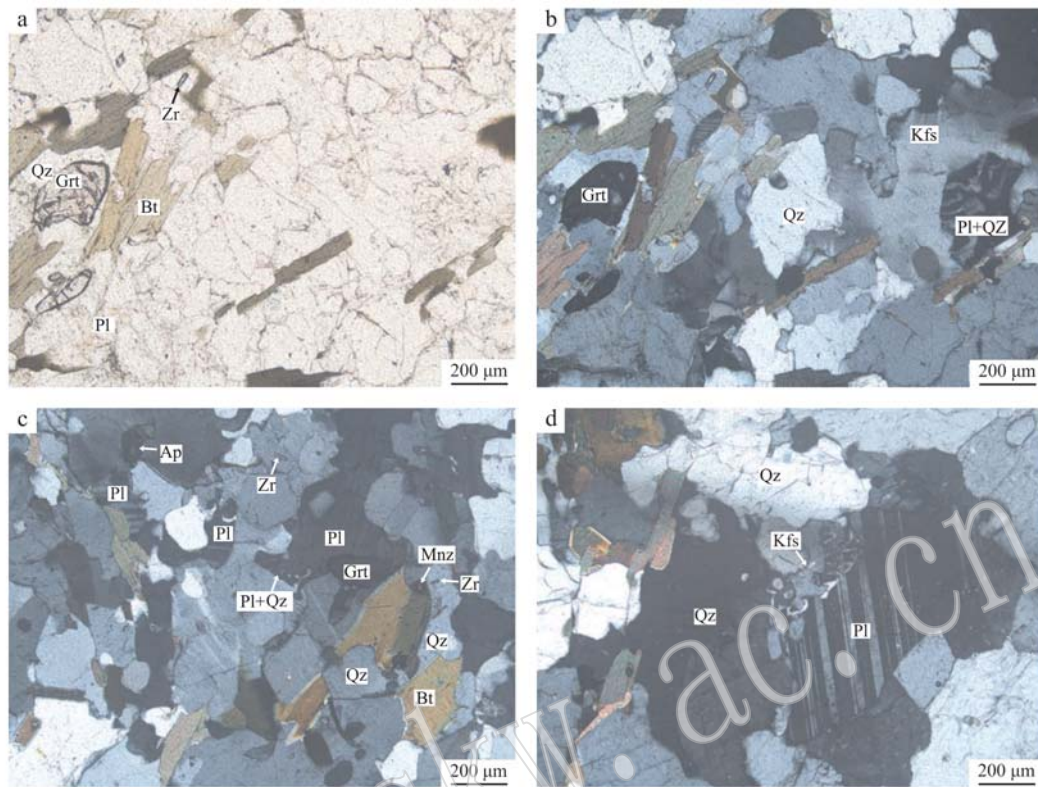


图3 样品92-1的显微照片

Fig. 3 Photomicrographs of sample 92-1

$\text{Kfs} + \text{melt} = \text{Bt} + \text{Pl} + \text{Qz}$; 魏春景等, 2016; Zhang *et al.*, 2017); ② 长石颗粒呈半自形-他形, 具有非常小的二面角(图 3c、3d); ③ 斜长石和石英构成蠕虫结构, 是之前熔体的结晶产物(图 3b、3c); ④ 钾长石具有非常小的二面角, 填充在斜长石和石英之间, 代表了曾经存在的熔体假像(图 3d)(Holness and Clemens, 1999; Holness and Sawyer, 2008; Yu *et al.*, 2015)。

含石榴石浅色花岗岩具花岗变晶结构, 主要由斜长石、钾长石和石英组成, 并含有少量黑云母、石榴石和磷灰石(图 4)。斜长石和石英构成的蠕虫体围绕在大颗粒的钾长石边部(图 4a), 可能代表之前形成的熔体(Bartoli *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2017)。石榴石被斜长石、黑云母和石英替代(图 4b)。岩相学观察表明, 样品均发生了部分熔融, 经历了高角闪岩相至麻粒岩相的变质作用。因此, 含

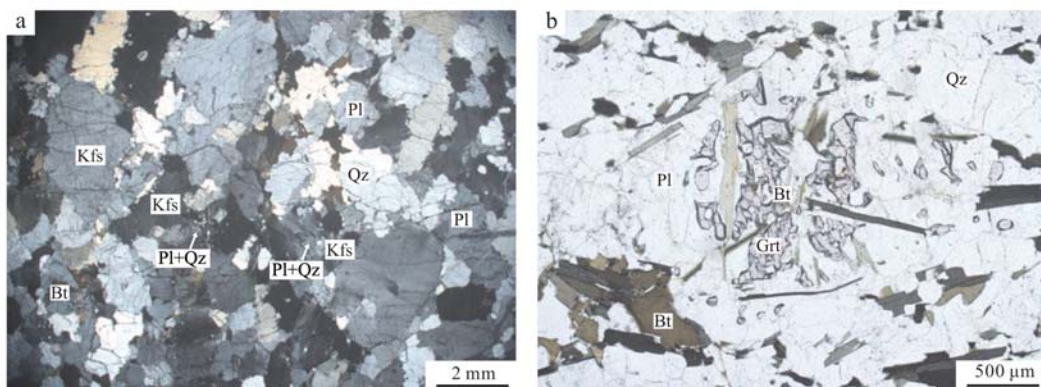


图4 样品92-2的显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of sample 92-2

石榴石淡色花岗岩(92-2)也应该定名为含石榴石花岗质片麻岩,为了与样品 92-1 相区别,本文暂称之为含石榴石淡色花岗岩。

本文所使用矿物代号据 Whitney 和 Evans (2010)。

2 分析方法

全岩主、微量元素化学成分分析在国家地质实验测试中心完成。主量元素采用 XRF(X-ray fluorescence)方法进行测定,分析精度优于 5%。微量元素采用等离子质谱仪 ICP-MS(inductively coupled plasma mass spectrometry)方法进行测定,含量大于 10×10^{-6} 的元素测试精度为 5%,而小于 10×10^{-6} 的元素测试精度为 10%。

锆石阴极发光成像在中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室完成。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 和微量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。详细的仪器参数和分析流程见 Zong 等(2017)。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。本次分析的激光束斑和频率分别为 32 μm 和 5 Hz。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。定年、微量元素含量测试和处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作为外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010)完成。测试过程中标样 91500 测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $1\,062.5 \pm 5.4\text{ Ma}$ ($n=18$, MSWD = 0.093) 和 $1\,062.5 \pm 6.5\text{ Ma}$ ($n=14$, MSWD = 0.20)。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003) 完成。

锆石 Hf 同位素比值测试在武汉上谱分析科技有限责任公司利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成。激光剥蚀系统为 Geolas HD (Coherent), MC-ICP-MS 为 Neptune Plus (Thermo Fisher Scientific)。采用单点剥蚀模式,束斑为 44 μm 。详细仪器操作条件和分析方法可参照 Hu 等(2015)。分析数据的离线处理(包括对样品和空白

信号的选择、同位素质量分馏校正)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2010) 完成。分析过程中锆石标准 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\,308\,1 \pm 0.000\,006\,1$ (2σ , $n=10$)。计算初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值时, Lu 的衰变常数采用 $1.865 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Scherer *et al.*, 2001), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算时采用球粒陨石 Hf 同位素值 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.033\,6$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\,785$ (Bouvier *et al.*, 2008)。在 Hf 的地幔模式年龄计算中,亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 现在值采用 0.283 25, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值采用 0.038 4 (Griffin *et al.*, 2000), 地壳模式年龄计算时采用平均地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ (Griffin *et al.*, 2002)。

独居石背散射(BSE)图像在中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室完成。独居石 U-Th-Pb 同位素定年和微量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。Geolas-Pro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。本次分析的激光束斑直径和频率分别为 16 μm 和 1 Hz。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。测试和处理中采用独居石标准物质 44069 和玻璃标准物质 NIST610 作为外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010) 完成。两个样品测试过程中标样 44069 测试点的 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 加权平均年龄分别为 $425.0 \pm 1.2\text{ Ma}$ ($n=20$, MSWD = 0.55) 和 $425.0 \pm 1.4\text{ Ma}$ ($n=12$, MSWD = 1.06)。独居石样品的 U-Th-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003) 完成。独居石是富 Th 元素矿物,由于年轻的独居石中 ^{230}Th 衰变致使 ^{206}Pb 过剩,导致 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄比真实年龄老 (Schärer, 1984)。因此,本文采用独居石 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 的加权平均年龄。

3 全岩主、微量元素地球化学

全岩地球化学分析结果表明,含石榴石花岗质片麻岩(92-1)的原岩为酸性岩, SiO_2 含量为 68.04%, Al_2O_3 含量为 16.94%, CaO 含量为 3.80%, 全碱含量为 5.64% (表 1), 在侵入岩的 TAS 图解中

表 1 全岩主量($w_B/\%$)和微量($w_B/10^{-6}$)元素化学成分分析结果
Table 1 Whole rock major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element compositions

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	LOI	全碱
92-1	68.04	0.41	16.94	1.07	2.34	0.04	1.26	3.80	4.03	1.61	0.13	0.54	0.45	5.64
92-2	74.43	0.24	13.56	0.90	1.11	0.03	0.53	1.47	2.65	4.70	0.10	0.00	0.28	7.35
样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
92-1	57.0	110.0	12.3	48.6	9.24	0.95	7.50	1.27	6.77	1.34	3.73	0.53	3.60	0.50
92-2	21.0	37.2	4.08	16.1	2.91	0.63	2.07	0.35	1.78	0.32	0.88	0.12	0.81	0.12
样品号	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	Pb	Sr	Hf	Zr	Y	(La/Yb) _N	δEu	
92-1	153	289	37.0	7.93	21.3	2.11	20.7	221	6.10	186	38.40	11.36	0.34	
92-2	274	653	13.8	3.17	12.6	1.01	41.4	101	4.68	136	9.74	18.60	0.75	

(Middlemost, 1994),落入花岗闪长岩区域(图略)。含石榴石淡色花岗岩(92-2)SiO₂含量为 74.43%, Al₂O₃含量为 13.56%, CaO 含量为 1.47%, 全碱含量为 7.35% (表 1), 在 TAS 图解中 (Middlemost, 1994),落入花岗岩区域(图略)。

在球粒陨石标准化图解上,含石榴石花岗质片麻岩(92-1)和含石榴石淡色花岗岩(92-2)轻、重稀

土元素(HREE)分馏显著[(La/Yb)_N = 11.36 和 18.60,图 5a],前者具有明显的 Eu 元素负异常(δEu = 0.34),后者具弱的 Eu 元素负异常(δEu = 0.75);原始地幔标准化图解上,两个样品均具有大离子亲石元素 Rb 的正异常,高场强元素 Nb、Ta、P 和 Ti 的负异常(图 5b)。

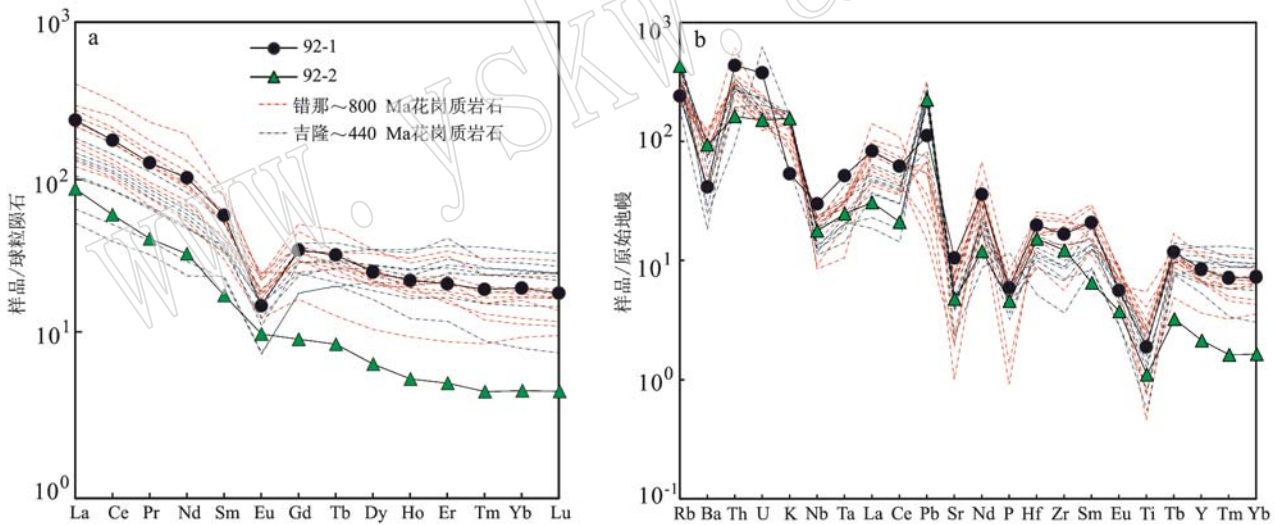


图 5 亚东地区花岗质片麻岩的稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化图解(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergrams (b) of the granitic gneisses from the Yadong area

球粒陨石和原始地幔数据标准化值据 Sun 和 McDonough (1989), 错那 ~800 Ma 花岗质岩石微量元素数据引自 Ding 等(2016)和 Wang 等 (2017); 吉隆 ~440 Ma 花岗质岩石微量元素数据引自高利娥等(2015)

Normalization values after Sun and McDonough, 1989; data of ~800 Ma Cona granitic rocks after Ding *et al.*, 2016 and Wang *et al.*, 2017; data of ~440 Ma Gyirong granitic rocks after Gao Li'e *et al.*, 2015

4 锆石 U-Pb 年代学、稀土元素和 Hf 同位素特征

对含石榴石花岗质片麻岩(92-1)和含石榴石淡色花岗岩(92-2)进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

和稀土元素含量分析,测试结果见表 2 和表 3。

样品 92-1 中的锆石半自形-自形长柱状,无色,颗粒长径约为 100 ~ 200 μm。阴极发光图像表明,锆石具有核-边结构,核部具有岩浆锆石典型的振荡环带;边部较窄(<10 μm),不具环带(图 6a)。分析

Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data for spot analysis

点号	点位	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值			rho	同位素年龄/Ma				
		Pb _{total}	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U			²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U			
							1σ	1σ			1σ	1σ		
样品 92-1														
92-1-01	核部	771	570	3 901	0.146	1.176 16	0.020 25	0.131 08	0.001 24	0.6	789.5	9.5	794.0	7.1
92-1-02	核部	654	625	2 595	0.241	1.177 16	0.021 60	0.131 62	0.00 112	0.5	790.0	10.1	797.1	6.4
92-1-03	核部	225	86	1 512	0.057	1.185 37	0.022 83	0.131 48	0.001 36	0.5	793.8	10.6	796.3	7.8
92-1-04	核部	854	670	4 245	0.158	1.180 52	0.020 26	0.132 05	0.001 16	0.5	791.6	9.5	799.5	6.6
92-1-05	核部	790	628	3 847	0.163	1.185 06	0.023 91	0.132 11	0.001 53	0.6	793.7	11.1	799.9	8.7
92-1-06	核部	1 901	1 453	9 618	0.151	1.177 70	0.020 25	0.132 09	0.001 26	0.6	790.2	9.5	799.8	7.2
92-1-07	核部	516	302	2 951	0.102	1.192 74	0.019 65	0.132 17	0.000 99	0.5	797.2	9.1	800.2	5.7
92-1-08	核部	741	562	3 676	0.153	1.194 88	0.021 51	0.132 21	0.001 07	0.4	798.2	10.0	800.5	6.1
92-1-09	核部	627	390	3 507	0.111	1.201 12	0.025 00	0.132 17	0.00 123	0.4	801.1	11.5	800.2	7.0
92-1-10	核部	458	186	3 037	0.061	1.237 43	0.022 43	0.133 58	0.001 06	0.4	817.7	10.2	808.3	6.1
92-1-11	核部	522	414	2 579	0.161	1.207 17	0.019 92	0.132 13	0.000 95	0.4	803.9	9.2	800.0	5.4
92-1-12	核部	462	346	2 275	0.152	1.241 64	0.022 69	0.132 13	0.000 99	0.4	819.6	10.3	800.0	5.6
92-1-13	核部	476	135	3 489	0.039	1.228 45	0.022 18	0.132 84	0.000 94	0.4	813.6	10.1	804.0	5.4
92-1-14	核部	630	506	3 142	0.161	1.206 99	0.020 31	0.132 05	0.001 03	0.5	803.8	9.4	799.5	5.9
92-1-15	核部	505	420	2 337	0.180	1.224 82	0.021 68	0.133 00	0.001 10	0.5	812.0	9.9	805.0	6.3
92-1-16	核部	1 079	990	4 858	0.204	1.181 46	0.021 00	0.132 36	0.001 04	0.4	792.0	9.8	801.3	5.9
92-1-17	核部	813	706	3 830	0.184	1.187 86	0.019 93	0.133 13	0.000 90	0.4	795.0	9.3	805.7	5.2
92-1-18	核部	529	606	1 451	0.418	1.199 40	0.022 95	0.132 16	0.001 33	0.5	800.3	10.6	800.2	7.6
92-1-19	核部	344	234	1 792	0.130	1.164 58	0.019 06	0.132 90	0.001 12	0.5	784.1	9.0	804.4	6.4
92-1-20	核部	633	523	2 727	0.192	1.179 97	0.021 87	0.132 95	0.001 31	0.5	791.3	10.2	804.7	7.5
92-1-21	核部	798	498	4 335	0.115	1.166 64	0.022 02	0.132 45	0.001 45	0.6	785.1	10.3	801.8	8.3
92-1-22	核部	444	274	2 389	0.115	1.169 18	0.021 05	0.132 43	0.001 32	0.6	786.3	9.9	801.7	7.5
92-1-23	核部	593	368	3 009	0.122	1.183 05	0.022 83	0.132 08	0.001 43	0.6	792.7	10.6	799.7	8.2
92-1-24	核部	403	58	3 230	0.018	1.189 47	0.019 77	0.132 04	0.001 36	0.6	795.7	9.2	799.5	7.7

续表 2
Continued Table 2

样品号	点 位	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值			同位素年龄/Ma		
		Pb _{total}	^{232}Th	^{238}U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ
样品 92-2										
92-2-01	幔部	187	77	2 830	0.541 87	0.010 27	0.070 71	0.000 69	39.7	6.8
92-2-02	幔部	227	130	3 209	0.545 09	0.009 77	0.071 00	0.000 60	441.8	6.4
92-2-03	幔部	238	141	3 368	0.540 77	0.010 32	0.070 51	0.000 63	438.9	6.8
92-2-04	幔部	255	129	3 684	0.550 32	0.011 15	0.070 44	0.000 70	445.2	7.3
92-2-05	幔部	196	86	2 816	0.561 07	0.011 60	0.072 21	0.000 74	452.2	7.6
92-2-06	幔部	180	52	2 651	0.587 94	0.013 54	0.071 47	0.001 02	469.6	8.7
92-2-07	幔部	266	126	3 815	0.543 83	0.009 93	0.070 51	0.000 60	440.9	6.5
92-2-08	幔部	201	80	3 045	0.551 95	0.010 89	0.068 70	0.000 55	446.3	7.1
92-2-09	幔部	201	65	3 024	0.558 63	0.010 26	0.071 25	0.000 60	450.6	6.7
92-2-10	幔部	224	109	3 233	0.541 33	0.009 55	0.070 74	0.000 57	439.3	6.3
92-2-11	幔部	239	127	3 329	0.548 27	0.010 54	0.071 59	0.000 66	443.9	6.9
92-2-12	幔部	336	155	4 940	0.535 75	0.009 07	0.069 82	0.000 63	435.6	6.0
92-2-13	幔部	177	58	2 638	0.570 06	0.011 96	0.072 08	0.000 77	458.1	7.7
92-2-14	边部	13	8	5 780	0.016 70	0.000 63	0.002 58	0.000 03	16.8	0.6
92-2-15	边部	12	4	4 309	0.018 88	0.001 00	0.002 69	0.000 05	19.0	1.0
92-2-16	边部	20	11	4 366	0.027 67	0.002 04	0.002 69	0.000 05	27.7	2.0
92-2-17	边部	13	12	4 689	0.018 46	0.000 79	0.002 91	0.000 04	18.6	0.8
92-2-18	边部	13	35	5 867	0.017 51	0.000 64	0.002 54	0.000 03	17.6	0.6
92-2-19	边部	13	40	5 858	0.016 23	0.000 65	0.002 60	0.000 03	16.3	0.7
92-2-20	边部	15	15	6 986	0.016 32	0.000 67	0.002 63	0.000 04	16.4	0.7
92-2-21	边部	11	6	4 945	0.017 58	0.000 80	0.002 63	0.000 03	17.7	0.8
92-2-22	边部	15	13	6 697	0.017 68	0.000 63	0.002 54	0.000 03	17.8	0.6
92-2-23	边部	12	8	5 187	0.017 97	0.000 69	0.002 60	0.000 03	18.1	0.7
92-2-24	边部	13	19	5 048	0.017 78	0.000 90	0.002 53	0.000 03	17.9	0.9

表3 锆石 LA-ICP-MS 稀土元素分析结果
Table 3 Rare earth element compositions of zircon grains

 $w_B/10^{-6}$

点号	点位	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
样品 92-1																
92-1-01	核部	0.07	5.18	0.12	1.90	6.71	0.13	53.88	23.89	313.41	122.51	596.17	119.91	1 170.32	212.76	2626.96
92-1-02	核部	0.48	7.12	0.39	3.76	10.16	0.33	71.57	27.14	343.90	128.56	600.21	120.08	1 147.11	205.45	2 666.28
92-1-03	核部	0.42	4.10	0.40	1.87	3.08	0.08	15.64	7.06	100.87	43.09	226.37	51.56	560.76	110.86	1 126.15
92-1-04	核部	0.05	7.45	0.09	2.08	7.00	0.30	56.63	23.12	315.20	122.31	596.57	120.88	1 166.12	210.90	2 628.68
92-1-05	核部	0.08	18.64	0.06	1.91	5.05	0.21	34.61	14.51	193.51	77.09	364.36	75.00	768.46	141.70	1 695.20
92-1-06	核部	0.03	25.27	0.07	2.18	8.55	0.13	63.28	27.79	372.82	145.45	709.44	146.37	1 433.75	261.47	3 196.60
92-1-07	核部	0.01	3.62	0.03	0.84	5.32	0.14	40.88	17.97	247.19	98.19	489.55	102.28	1 021.91	178.18	2 206.11
92-1-08	核部	0.03	5.38	0.12	2.16	7.21	0.18	60.46	24.60	335.24	126.38	602.62	124.58	1 218.48	207.14	2 714.55
92-1-09	核部	0.00	3.84	0.08	1.28	4.32	0.11	39.84	18.54	258.01	100.77	495.91	107.63	1 054.95	179.34	2 264.64
92-1-10	核部	0.03	2.86	0.06	0.30	3.09	0.01	24.48	12.64	185.22	76.51	385.52	88.44	923.22	148.59	1 850.99
92-1-11	核部	0.02	4.37	0.07	1.88	6.18	0.19	46.61	20.18	264.02	101.13	489.42	101.35	976.77	173.33	2 185.52
92-1-12	核部	0.12	3.76	0.20	2.46	9.09	0.36	71.91	28.59	373.67	141.73	668.84	140.63	1 343.13	233.58	3 018.07
92-1-13	核部	0.10	2.06	0.12	0.73	2.59	0.08	22.91	11.66	189.68	78.36	424.11	101.71	1 132.91	211.02	2 178.02
92-1-14	核部	0.30	6.10	0.20	2.65	6.63	0.16	54.14	23.87	311.61	118.51	576.84	115.97	1 126.79	198.39	2 542.17
92-1-15	核部	—	5.44	0.08	2.16	5.54	0.25	44.92	19.00	243.15	90.03	442.84	90.49	886.38	153.30	1 983.58
92-1-16	核部	—	20.89	0.09	2.23	6.04	0.17	44.11	17.79	235.83	88.29	426.66	88.07	859.91	155.20	1 945.28
92-1-17	核部	0.02	16.92	0.03	2.32	4.68	0.10	35.93	14.64	198.20	75.31	373.79	76.79	768.45	134.76	1 701.93
92-1-18	核部	—	21.13	0.20	3.84	6.84	0.58	44.53	14.96	182.28	62.55	286.58	56.40	534.64	93.86	1 308.39
92-1-19	核部	0.09	2.66	0.15	2.47	7.54	0.26	55.87	22.52	298.30	111.56	534.87	113.03	1 131.03	175.77	2 456.13
92-1-20	核部	0.01	12.6	0.04	0.92	2.93	0.17	22.00	8.97	126.67	49.14	234.77	51.80	550.63	90.26	1 150.90
92-1-21	核部	0.02	3.85	0.05	1.19	5.27	0.13	45.88	20.52	283.93	107.84	522.31	114.06	1 162.54	179.90	2 447.50
92-1-22	核部	0.28	4.21	0.15	1.68	3.82	0.18	30.40	13.39	181.49	70.28	342.53	76.73	850.38	129.31	1 704.83
92-1-23	核部	0.33	4.56	0.10	2.08	5.77	0.17	44.03	17.84	236.04	89.11	442.79	96.75	998.10	145.89	2 083.55
92-1-24	核部	0.00	0.64	0.02	0.42	1.64	0.04	15.26	8.18	123.93	49.34	267.07	72.18	902.06	152.00	1 592.78
样品 92-2																
92-2-01	幔部	0.01	2.23	0.01	0.14	0.79	0.06	5.95	3.56	64.20	30.06	175.95	45.92	499.00	106.61	934.48
92-2-02	幔部	—	3.30	—	0.28	0.56	0.15	9.68	4.93	83.92	39.50	219.95	52.80	550.24	116.97	1 082.29
92-2-03	幔部	0.10	3.79	0.03	0.23	0.79	0.02	10.21	5.73	97.18	47.54	270.86	65.03	677.55	142.02	1 321.06
92-2-04	幔部	—	3.11	0.01	0.07	0.98	0.13	10.64	5.54	95.56	43.65	244.20	58.75	624.27	130.36	1 217.25
92-2-05	幔部	0.01	2.29	0.00	0.08	0.58	0.09	8.63	4.61	82.60	38.36	211.95	53.76	595.77	124.44	1 123.17
92-2-06	幔部	0.02	1.19	0.01	0.07	0.30	0.03	6.23	3.49	55.29	24.26	134.64	36.62	423.82	82.63	768.60
92-2-07	幔部	—	2.63	—	0.04	0.63	0.05	9.08	4.80	74.61	33.10	176.82	42.08	444.36	89.97	878.18
92-2-08	幔部	—	2.06	0.01	0.06	0.31	0.08	7.91	3.86	66.84	30.77	179.05	45.71	514.01	103.47	954.14
92-2-09	幔部	0.02	1.82	—	0.09	0.42	0.11	5.85	3.33	54.14	25.30	146.03	38.61	450.16	93.84	819.72
92-2-10	幔部	0.00	3.22	0.00	0.13	0.68	0.05	9.54	5.67	99.27	47.35	271.04	66.11	729.95	150.03	1 383.04
92-2-11	幔部	0.10	3.51	0.01	0.07	0.67	0.09	10.48	6.33	105.40	48.95	274.14	66.56	701.31	141.94	1 359.56
92-2-12	幔部	0.01	2.39	0.00	0.10	1.14	0.15	8.76	4.12	61.16	24.13	125.13	28.49	302.99	62.16	620.74
92-2-13	幔部	—	1.80	0.00	0.06	0.59	0.05	6.57	3.55	59.44	28.91	170.09	45.97	517.49	105.33	939.85
92-2-14	边部	0.00	0.53	—	0.02	0.21	0.19	2.25	1.19	15.55	5.65	24.69	4.31	37.35	6.12	98.06
92-2-15	边部	—	0.34	0.01	0.08	—	0.05	1.09	0.74	10.19	3.80	18.63	3.20	29.66	5.06	72.84
92-2-16	边部	0.12	0.81	0.02	0.07	0.26	0.19	2.56	1.74	23.85	9.67	41.20	7.43	66.29	11.72	165.94
92-2-17	边部	—	0.63	0.00	0.14	0.46	0.07	3.11	2.28	37.43	16.21	80.96	17.88	188.03	34.22	381.44
92-2-18	边部	0.01	1.39	—	0.08	0.45	0.22	4.58	1.98	23.01	6.29	21.22	3.49	29.29	4.90	96.91
92-2-19	边部	0.01	1.59	—	0.02	0.20	0.27	5.55	2.25	22.70	6.75	21.54	3.58	26.99	4.67	96.11
92-2-20	边部	—	0.80	—	0.05	0.21	0.27	3.29	1.81	25.81	8.82	36.02	6.67	53.69	8.86	146.29
92-2-21	边部	—	0.42	—	0.11	0.13	0.10	1.76	0.84	12.69	4.32	19.19	3.45	28.11	4.72	75.85
92-2-22	边部	0.00	0.60	—	—	0.04	0.19	2.44	1.45	17.16	6.30	26.66	4.80	42.63	6.81	109.09
92-2-23	边部	0.02	0.47	0.00	0.03	0.10	0.13	2.27	1.08	16.15	5.80	23.89	4.33	35.49	5.91	95.64
92-2-24	边部	0.01	1.03	—	—	0.36	0.17	6.14	3.82	58.95	23.27	110.98	22.81	214.85	39.74	482.13

—表示低于检出限。

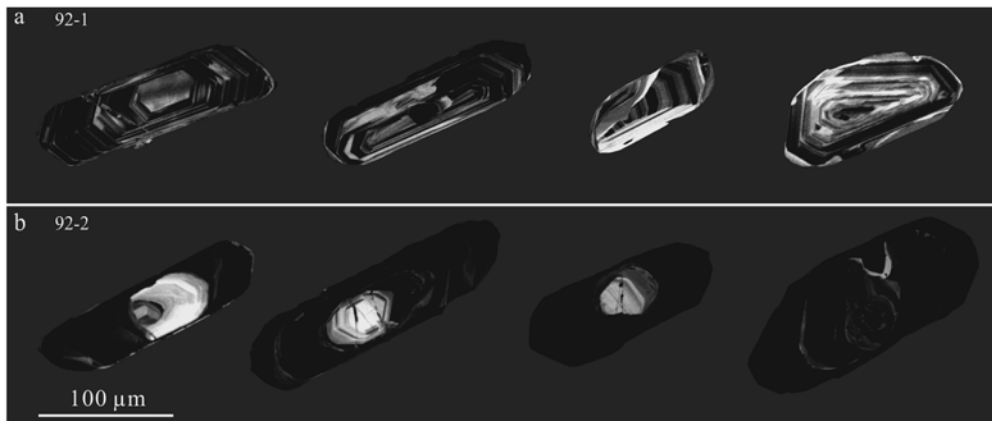


图6 亚东地区花岗质片麻岩中代表性锆石的阴极发光图像
Fig. 6 CL images of representative zircon grains of the granitic gneisses from the Yadong area

结果表明,岩浆锆石核部获得24个谐和的年龄点, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为808~794 Ma(表2),加权平均年龄为 801.3 ± 2.6 Ma (MSWD=0.24,图7a),

Th/U值范围为0.02~0.42(表2)。锆石核部的稀土元素配分模式图表现为轻稀土元素亏损,重稀土元素富集,具明显的Ce元素正异常和Eu元素负异常

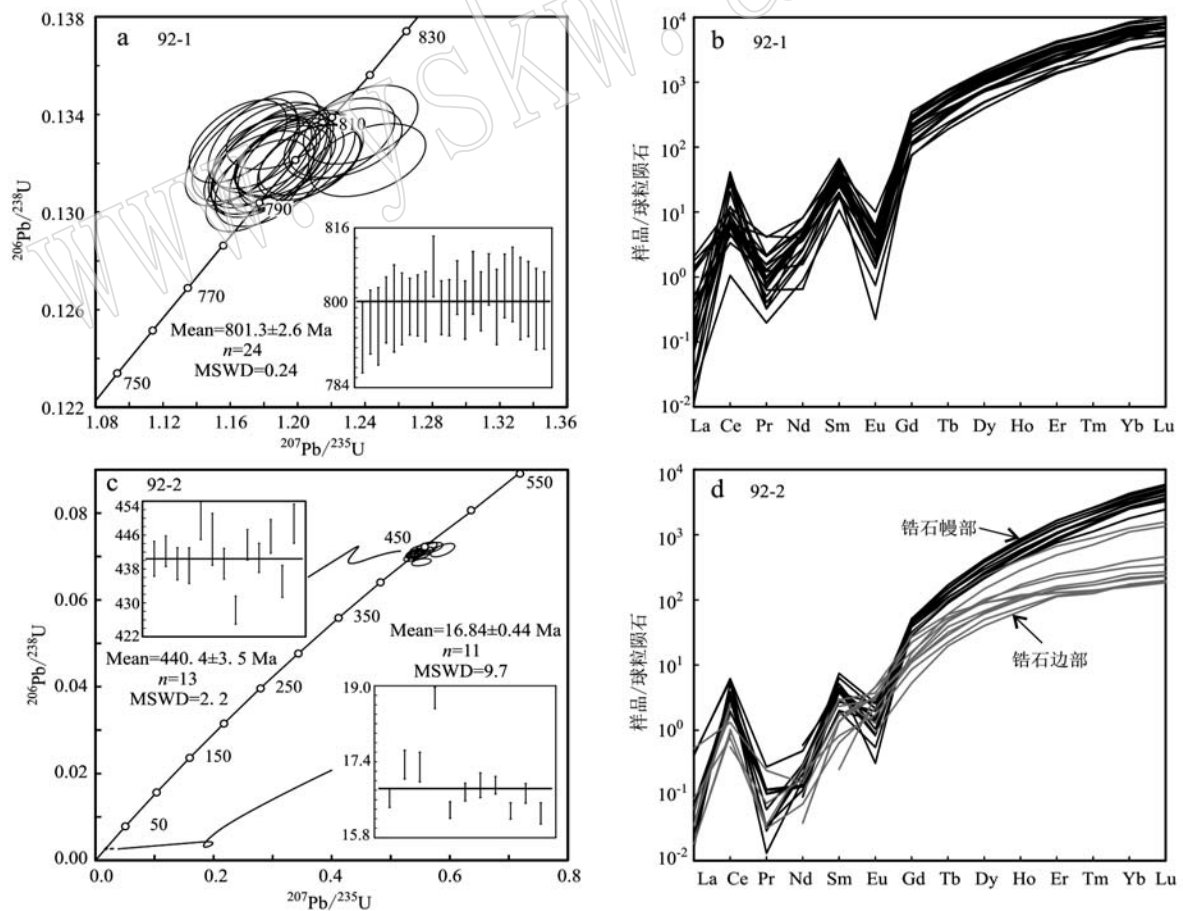


图7 亚东地区花岗质片麻岩中锆石的U-Pb年龄谐和图(a和c)和稀土元素球粒陨石标准化图解(b和d)
(标准化值据Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Zircon U-Pb age concordia diagrams (a and c) and chondrite-normalized REE patterns (b and d) of the granitic gneisses from the Yadong area (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

常(图 7b), 稀土元素总量较高, 范围为 $1\ 126 \times 10^{-6} \sim 3\ 197 \times 10^{-6}$ (表 3)。含石榴石花岗质片麻岩样品 92-1 中的锆石核部 Hf 同位素分析结果表明, 锆石核部的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值非常相似, 范围为

$0.281\ 816 \sim 0.281\ 936$ (表 4), 相应的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-16.4 \sim -12.2$ (表 4、图 8), 地壳 Hf 模式年龄为 $3.11 \sim 2.79\ \text{Ga}$ (表 4、图 8)。

样品 92-2 中的锆石半自形-自形长柱状, 无色,

表 4 锆石 Hf 同位素组成

Table 4 Hf isotopic data of zircon grains

点号	t/Ma	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	2σ	$t_{\text{DM}}^c/\text{Ga}$
92-1-01	794	0.281 965	0.000 023	0.002 672	0.085 053	0.281 926	-12.7	0.8	2.83
92-1-02	797	0.281 890	0.000 019	0.002 963	0.101 038	0.281 845	-15.4	0.7	3.04
92-1-03	796	0.281 910	0.000 020	0.002 152	0.068 445	0.281 878	-14.3	0.7	2.95
92-1-04	800	0.281 929	0.000 029	0.002 215	0.076 251	0.281 896	-13.6	1.0	2.90
92-1-05	800	0.281 892	0.000 017	0.001 288	0.042 970	0.281 872	-14.4	0.6	2.96
92-1-06	800	0.281 839	0.000 019	0.001 556	0.051 274	0.281 816	-16.4	0.7	3.11
92-1-07	800	0.281 898	0.000 017	0.001 654	0.054 310	0.281 873	-14.4	0.6	2.96
92-1-08	800	0.281 899	0.000 017	0.002 126	0.072 818	0.281 867	-14.6	0.6	2.98
92-1-09	800	0.281 900	0.000 018	0.001 965	0.065 123	0.281 870	-14.5	0.6	2.97
92-1-10	808	0.281 877	0.000 018	0.002 741	0.090 705	0.281 836	-15.5	0.6	3.05
92-1-11	800	0.281 870	0.000 026	0.002 538	0.087 473	0.281 832	-15.9	0.9	3.07
92-1-12	804	0.281 902	0.000 016	0.001 918	0.061 517	0.281 873	-14.3	0.6	2.96
92-1-13	800	0.281 959	0.000 016	0.001 520	0.046 447	0.281 936	-12.2	0.6	2.79
92-1-14	805	0.281 920	0.000 020	0.002 527	0.085 278	0.281 882	-14.0	0.7	2.93
92-1-15	800	0.281 881	0.000 015	0.001 505	0.049 569	0.281 858	-14.9	0.5	3.00
92-1-16	804	0.281 914	0.000 020	0.002 355	0.078 604	0.281 879	-14.1	0.7	2.94

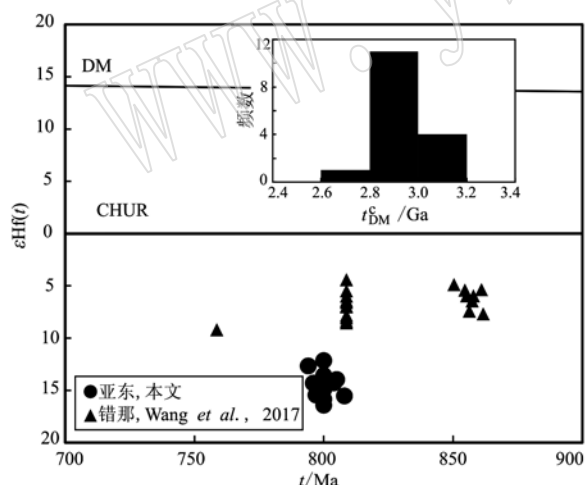


图 8 亚东地区 ~800 Ma 花岗质片麻岩的锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ -U-Pb 年龄图解(插图为锆石的地壳 Hf 模式年龄直方图)
Fig. 8 Diagram of zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values versus U-Pb ages of ~800 Ma granitic gneiss from the Yadong area (the inserted is zircon crustal-model ages histogram)

颗粒长径约为 $100 \sim 200\ \mu\text{m}$ 。阴极发光图像表明, 锆石具有核-幔-边结构, 核部成因复杂, 为形状不规则的继承性锆石, 部分具有振荡环带, 部分具有海绵状分带; 幔部表现为具弱振荡环带、暗色的发光特

征; 边部表现为不具环带、发光更暗的特征(图 6b)。分析结果表明, 锆石幔部获得 13 个谐和的年龄点, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 $449 \sim 428\ \text{Ma}$ (表 2), 加权平均年龄为 $440.4 \pm 3.5\ \text{Ma}$ (MSWD = 2.2, 图 7c); 锆石边部获得 11 个近谐和的年龄点, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 $18.7 \sim 16.3\ \text{Ma}$, 加权平均年龄为 $16.84 \pm 0.44\ \text{Ma}$ (MSWD = 9.7, 图 7c)。锆石幔部和边部的稀土元素配分模式图均表现为轻稀土元素亏损、重稀土元素富集, 幔部较边部具有更显著的 Eu 元素负异常(图 7d)和含量更高的重稀土元素总量(表 3)以及高的 Th/U 值(幔部 Th/U 值范围为 $0.020 \sim 0.042$, 边部为 $0.001 \sim 0.007$)。

5 独居石 U-Th-Pb 年代学和微量元素特征

本文对含石榴石花岗质片麻岩(92-1)和含石榴石淡色花岗岩(92-2)进行了独居石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 定年和微量元素分析, 测试结果见表 5 和表 6。样品 92-1 中的独居石呈无色至浅黄色, 粒径约为 $80 \sim 200\ \mu\text{m}$ 。背散射图像显示, 大多数独居石包含两个不同的发光域, 部分颗粒均匀无分带(图 9b)。分

表5 独居石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 定年结果

Table 5 Monazite LA-ICP-MS U-Th-Pb data for spot analysis

点号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值				rho	同位素年龄/Ma			
	Pb _{total}	²³² Th	²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
样品 92-1												
92-1-01	86.0	111 251	11 099	0.000 827	0.000 007	0.002 709	0.000 030	0.3	17.4	0.2	16.7	0.1
92-1-02	90.8	122 542	10 406	0.000 798	0.000 007	0.002 745	0.000 028	0.2	17.7	0.2	16.1	0.1
92-1-03	70.3	84 557	9 854	0.000 834	0.000 007	0.002 718	0.000 029	0.2	17.5	0.2	16.9	0.1
92-1-04	82.8	100 964	11 716	0.000 822	0.000 007	0.002 723	0.000 033	0.3	17.5	0.2	16.6	0.1
92-1-05	76.0	96 404	10 444	0.000 807	0.000 008	0.002 624	0.000 029	0.2	16.9	0.2	16.3	0.2
92-1-06	59.1	73 592	7 861	0.000 843	0.000 008	0.002 659	0.000 035	0.2	17.1	0.2	17.0	0.2
92-1-07	75.9	99 125	9 831	0.000 797	0.000 008	0.002 684	0.000 029	0.2	17.3	0.2	16.1	0.2
92-1-08	65.9	86 706	8 713	0.000 792	0.000 007	0.002 587	0.000 036	0.3	16.7	0.2	16.0	0.1
92-1-09	70.9	89 656	9 761	0.000 808	0.000 007	0.002 673	0.000 034	0.3	17.2	0.2	16.3	0.2
92-1-10	72.8	96 165	9 025	0.000 824	0.000 007	0.002 739	0.000 034	0.2	17.6	0.2	16.7	0.1
92-1-11	71.3	96 021	8 410	0.000 810	0.000 007	0.002 633	0.000 037	0.3	17.0	0.2	16.4	0.1
92-1-12	76.8	96 717	10 191	0.000 829	0.000 007	0.002 649	0.000 034	0.3	17.1	0.2	16.7	0.1
92-1-13	80.0	106 624	9 642	0.000 812	0.000 007	0.002 634	0.000 035	0.3	17.0	0.2	16.4	0.1
92-1-14	86.8	114 166	10 716	0.000 810	0.000 008	0.002 645	0.000 030	0.3	17.0	0.2	16.4	0.2
92-1-15	67.9	84 279	9 625	0.000 805	0.000 008	0.002 650	0.000 030	0.3	17.1	0.2	16.3	0.2
92-1-16	77.2	99 171	10 438	0.000 803	0.000 006	0.002 635	0.000 030	0.3	17.0	0.2	16.2	0.1
92-1-17	81.3	100 084	10 604	0.000 837	0.000 006	0.002 866	0.000 034	0.3	18.5	0.2	16.9	0.1
92-1-18	56.9	73 116	8 131	0.000 795	0.000 008	0.002 600	0.000 034	0.3	16.7	0.2	16.1	0.2
92-1-19	82.4	105 666	10 976	0.000 812	0.000 007	0.002 640	0.000 030	0.2	17.0	0.2	16.4	0.1
92-1-20	64.0	81 199	8 905	0.000 808	0.000 008	0.002 598	0.000 028	0.2	16.7	0.2	16.3	0.2
92-1-21	58.3	73 053	8 688	0.000 794	0.000 007	0.002 591	0.000 033	0.2	16.7	0.2	16.0	0.1
92-1-22	78.6	100 990	10 649	0.000 817	0.000 007	0.002 595	0.000 031	0.3	16.7	0.2	16.5	0.1
92-1-23	66.2	84 442	9 073	0.000 813	0.000 007	0.002 709	0.000 032	0.2	17.4	0.2	16.4	0.1
92-1-24	77.8	91 584	11 980	0.000 818	0.000 007	0.002 628	0.000 034	0.3	16.9	0.2	16.5	0.1
92-1-25	76.3	99 189	9 927	0.000 801	0.000 007	0.002 745	0.000 032	0.2	17.7	0.2	16.2	0.1
92-1-26	65.1	79 555	9 363	0.000 823	0.000 008	0.002 664	0.000 029	0.2	17.2	0.2	16.6	0.2
92-1-27	88.5	114 491	11 300	0.000 821	0.000 007	0.002 730	0.000 032	0.3	17.6	0.2	16.6	0.1
92-1-28	83.1	104 667	11 267	0.000 808	0.000 008	0.002 673	0.000 030	0.2	17.2	0.2	16.3	0.2
92-1-29	75.9	89 992	11 568	0.000 803	0.000 007	0.002 663	0.000 029	0.3	17.1	0.2	16.2	0.1
92-1-30	68.3	87 171	9 023	0.000 803	0.000 007	0.002 673	0.000 030	0.3	17.2	0.2	16.2	0.1
92-1-31	59.2	67 991	9 626	0.000 816	0.000 007	0.002 634	0.000 028	0.2	17.0	0.2	16.5	0.2
92-1-32	67.4	81 768	10 014	0.000 815	0.000 007	0.002 666	0.000 029	0.2	17.2	0.2	16.5	0.1
92-1-33	96.9	128 668	11 949	0.000 827	0.000 008	0.002 697	0.000 032	0.3	17.4	0.2	16.7	0.2
92-1-34	81.6	99 274	11 626	0.000 825	0.000 008	0.002 753	0.000 033	0.3	17.7	0.2	16.7	0.2
92-1-35	39.9	49 451	5 666	0.000 811	0.000 009	0.002 641	0.000 036	0.2	17.0	0.2	16.4	0.2
92-1-36	80.4	101 826	10 579	0.000 807	0.000 008	0.002 701	0.000 032	0.2	17.4	0.2	16.3	0.2
92-1-37	63.4	78 187	9 129	0.000 821	0.000 008	0.002 648	0.000 033	0.2	17.0	0.2	16.6	0.2
92-1-38	70.5	81 825	11 175	0.000 809	0.000 007	0.002 661	0.000 029	0.3	17.1	0.2	16.4	0.1
92-1-39	84.9	91 147	15 885	0.000 798	0.000 007	0.002 578	0.000 026	0.3	16.6	0.2	16.1	0.1
92-1-40	80.2	88 448	14 802	0.000 806	0.000 007	0.002 550	0.000 026	0.3	16.4	0.2	16.3	0.1
样品 92-2												
92-2-01	70.7	82 783	12 229	0.000 830	0.000 009	0.002 657	0.000 034	0.3	17.1	0.2	16.8	0.2
92-2-02	84.2	98 980	13 726	0.000 827	0.000 007	0.002 813	0.000 031	0.3	18.1	0.2	16.7	0.1
92-2-03	92.6	105 809	15 857	0.000 820	0.000 008	0.002 820	0.000 031	0.3	18.2	0.2	16.6	0.2
92-2-04	86.8	96 575	16 458	0.000 804	0.000 008	0.002 681	0.000 029	0.3	17.3	0.2	16.2	0.2
92-2-05	89.5	93 132	17 144	0.000 812	0.000 008	0.002 804	0.000 026	0.2	18.0	0.2	16.4	0.2

续表 5

Continued Table 5

点号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值				rho	同位素年龄/Ma			
	Pb _{total}	²³² Th	²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ
92-2-06	84.5	106 423	13 712	0.000 802	0.000 008	0.002 580	0.000 031	0.3	16.6	0.2	16.2	0.2
92-2-07	51.4	61 906	8 050	0.000 834	0.000 009	0.002 660	0.000 044	0.3	17.1	0.3	16.8	0.2
92-2-08	106	106 909	20 111	0.000 812	0.000 008	0.002 848	0.000 028	0.3	18.3	0.2	16.4	0.2
92-2-09	89.7	105 762	14 094	0.000 819	0.000 008	0.002 775	0.000 031	0.3	17.9	0.2	16.6	0.2
92-2-10	89.7	103 032	14 936	0.000 806	0.000 008	0.002 767	0.000 029	0.3	17.8	0.2	16.3	0.2
92-2-11	94.8	109 094	16 308	0.000 799	0.000 008	0.002 707	0.000 030	0.3	17.4	0.2	16.1	0.2
92-2-12	78.3	105 319	9 835	0.000 826	0.000 008	0.002 649	0.000 034	0.3	17.1	0.2	16.7	0.2
92-2-13	101	105 551	19 356	0.000 794	0.000 006	0.002 784	0.000 029	0.3	17.9	0.2	16.0	0.1
92-2-14	79.6	103 033	11 523	0.000 809	0.000 008	0.002 593	0.000 038	0.3	16.7	0.2	16.4	0.2
92-2-15	91.7	106 904	14 786	0.000 826	0.000 008	0.002 730	0.000 029	0.2	17.6	0.2	16.7	0.2
92-2-16	78.9	95 860	12 483	0.000 811	0.000 008	0.002 737	0.000 032	0.3	17.6	0.2	16.4	0.2
92-2-17	79.2	99 960	11 418	0.000 821	0.000 007	0.002 723	0.000 031	0.2	17.5	0.2	16.6	0.1
92-2-18	91.7	109 667	15 074	0.000 806	0.000 007	0.002 686	0.000 029	0.3	17.3	0.2	16.3	0.1
92-2-19	96.6	117 879	13 859	0.000 827	0.000 008	0.002 832	0.000 030	0.3	18.2	0.2	16.7	0.2
92-2-20	80.3	96 937	12 594	0.000 799	0.000 008	0.002 754	0.000 035	0.3	17.7	0.2	16.1	0.2
92-2-21	85.1	99 698	13 850	0.000 798	0.000 008	0.002 729	0.000 031	0.3	17.6	0.2	16.1	0.2
92-2-22	91.0	123 922	10 731	0.000 810	0.000 008	0.002 768	0.000 031	0.2	17.8	0.2	16.4	0.2
92-2-23	84.6	98 100	13 880	0.000 797	0.000 008	0.002 764	0.000 034	0.3	17.8	0.2	16.1	0.2
92-2-24	76.2	94 292	11 190	0.000 823	0.000 009	0.002 626	0.000 035	0.3	16.9	0.2	16.6	0.2

表 6 独居石 LA-ICP-MS 微量元素分析结果

 $w_B/10^{-6}$

Table 6 Trace element compositions of monazite grains

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ HREE	Y
样品 92-1																
92-1-01	131 589	219 695	25 271	99 201	16 911	457	11 516	1 078	3 177	290	320	17.6	49.1	3.98	681	6 744
92-1-02	130 141	214 269	24 791	94 748	16 209	444	11 095	1 060	3 187	289	323	17.5	48.0	3.48	682	6 804
92-1-03	135 490	229 004	26 283	101 272	16 957	473	11 424	1 108	3 329	303	324	16.9	42.9	3.36	690	7 092
92-1-04	130 121	220 346	25 314	97 355	16 947	473	11 712	1 147	3 465	322	351	18.6	50.3	3.58	746	7 539
92-1-05	135 508	223 717	25 573	96 690	16 378	555	11 181	1 131	3 514	329	361	19.6	50.6	3.44	764	7 783
92-1-06	139 115	237 951	27 373	103 363	16 848	492	10 999	1 119	3 582	347	402	22.5	60.9	4.69	838	8 128
92-1-07	140 513	224 977	25 297	95 756	15 952	464	11 120	1 120	3 544	347	395	21.6	63.3	4.67	832	8 176
92-1-08	133 709	229 218	26 654	101 851	17 421	488	11 763	1 198	3 781	359	393	21.3	58.6	4.40	836	8 323
92-1-09	136 929	229 099	26 596	101 384	17 123	516	11 647	1 191	3 771	369	420	23.9	66.4	4.59	883	8 592
92-1-10	134 966	230 565	26 564	101 468	16 383	485	11 065	1 125	3 721	374	440	24.7	68.3	4.95	912	8 839
92-1-11	130 832	225 025	26 020	100 761	16 874	516	11 580	1 189	3 819	377	454	26.8	81.0	6.05	945	8 843
92-1-12	132 964	225 884	25 829	100 008	17 054	497	12 085	1 226	3 910	377	431	24.2	65.9	5.04	903	8 850
92-1-13	129 283	219 972	25 465	99 147	17 020	485	11 865	1 200	3 870	375	440	25.5	71.0	4.87	916	8 906
92-1-14	130 172	215 479	24 712	95 428	16 757	463	12 004	1 236	3 973	383	437	25.2	68.9	5.07	919	9 100
92-1-15	139 488	231 057	26 036	94 844	16 150	454	10 930	1 171	3 852	380	440	24.8	69.2	5.09	919	9 166
92-1-16	132 966	224 774	26 060	99 492	16 833	515	11 733	1 201	3 942	399	465	26.7	75.2	5.19	971	9 345
92-1-17	132 640	227 561	25 878	96 177	15 714	493	10 669	1 104	3 758	399	495	30.7	92.8	6.63	1 024	9 731
92-1-18	136 704	235 214	27 274	105 162	17 187	499	11 725	1 234	4 131	411	488	27.6	75.6	5.72	1 008	9 756
92-1-19	130 284	224 462	25 420	95 835	16 588	467	11 633	1 244	4 174	414	478	27.4	73.5	5.12	998	9 810
92-1-20	133 334	232 613	27 140	104 976	17 891	504	12 443	1 292	4 280	426	507	28.2	80.5	5.38	1 047	10 099
92-1-21	135 239	234 193	27 135	105 357	17 425	502	12 018	1 286	4 224	424	507	28.5	84.3	6.09	1 050	10 151
92-1-22	129 485	222 148	25 722	99 554	17 312	486	12 219	1 284	4 288	434	500	28.4	81.0	6.12	1 049	10 163
92-1-23	135 091	230 590	26 382	103 650	17 206	514	11 956	1 254	4 186	437	537	31.0	89.4	6.69	1 101	10 401
92-1-24	128 919	225 027	25 752	97 145	16 692	506	11 385	1 274	4 394	457	568	35.5	103.4	7.96	1 172	10 878

续表 6
Continued Table 6

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣHREE	Y
92-1-25	132 107	224 734	25 890	99 591	16 518	515	11 501	1 231	4 244	453	581	35.5	104.0	7.74	1 181	10 889
92-1-26	131 993	229 409	26 580	102 908	17 521	504	12 122	1 317	4 455	461	552	31.1	88.7	6.52	1 139	10 907
92-1-27	125 377	217 087	25 239	96 042	16 542	461	11 811	1 268	4 430	470	579	33.9	100.8	7.33	1 191	11 149
92-1-28	127 780	219 291	25 280	95 436	17 058	508	12 165	1 325	4 603	492	597	36.0	105.2	8.19	1 238	11 454
92-1-29	129 468	225 843	26 025	97 236	16 671	485	11 175	1 262	4 465	469	608	38.1	116.1	8.60	1 240	11 534
92-1-30	130 572	227 027	26 171	100 178	17 330	506	12 327	1 341	4 725	526	664	41.8	120.1	9.12	1 361	12 379
92-1-31	142 214	236 354	26 502	98 898	16 674	489	11 758	1 323	4 798	539	731	48.4	150.9	11.09	1 480	12 599
92-1-32	132 688	228 984	26 729	103 250	17 582	483	12 435	1 373	4 871	525	659	39.0	113.9	8.19	1 346	12 721
92-1-33	122 271	210 551	24 558	94 093	16 805	464	12 362	1 360	4 827	533	694	43.5	134.3	10.66	1 415	12 791
92-1-34	129 606	221 688	25 541	94 911	16 374	505	11 752	1 325	4 795	529	698	43.1	135.4	9.52	1 415	12 793
92-1-35	139 094	239 086	27 723	106 786	19 438	708	13 508	1 587	5 609	567	690	39.4	109.0	6.88	1 412	13 055
92-1-36	126 400	219 382	25 640	97 771	17 449	461	12 443	1 377	4 897	553	731	45.2	143.8	11.07	1 484	13 369
92-1-37	133 564	230 807	26 770	104 534	18 370	533	13 152	1 472	5 214	575	744	45.4	132.0	9.39	1 506	13 933
92-1-38	129 809	224 504	26 000	99 556	17 673	531	13 064	1 507	5 570	632	828	52.6	155.5	11.83	1 681	15 257
92-1-39	120 579	214 798	25 283	97 717	17 500	400	13 306	1 636	6 349	717	897	53.5	145.3	10.51	1 824	17 357
92-1-40	125 702	218 212	25 597	98 912	17 303	350	12 915	1 556	6 250	741	1 003	64.3	196.2	13.89	2 018	18 313
样品 92-2																
92-2-01	137 719	227 119	26 424	93 475	17 066	327	11 455	1 220	4 324	446	540	32.7	88.4	6.85	1 114	10 937
92-2-02	137 941	222 187	24 820	87 371	15 186	350	10 408	1 152	4 204	433	521	31.6	90.3	5.85	1 082	10 760
92-2-03	134 109	211 547	24 021	86 971	15 494	326	11 169	1 286	4 628	482	592	36.0	95.3	6.41	1 212	11 964
92-2-04	124 775	204 290	23 339	82 482	16 140	311	12 635	1 842	8 926	1 238	2 070	165.4	558.3	48.25	4 080	30 928
92-2-05	132 433	214 110	24 295	87 663	16 324	288	12 695	1 622	6 573	752	966	59.6	175.3	12.09	1 965	18 329
92-2-06	132 043	205 037	22 388	79 922	14 336	309	11 141	1 542	7 841	1 109	1 827	141.4	481.1	39.37	3 597	27 270
92-2-07	149 408	240 203	27 207	97 270	16 635	340	11 125	1 125	3 744	368	450	26.7	79.1	6.29	931	8 736
92-2-08	125 990	208 308	24 322	87 398	16 844	318	13 075	1 653	6 474	717	904	57.5	164.9	12.71	1 856	17 594
92-2-09	136 178	219 336	24 570	86 461	15 044	358	10 488	1 175	4 262	453	550	33.0	91.8	7.43	1 135	11 130
92-2-10	139 394	219 173	24 438	85 651	15 061	336	10 588	1 187	4 355	459	563	33.6	95.3	7.08	1 158	11 210
92-2-11	123 657	204 705	23 154	82 670	16 437	285	13 296	1 808	7 907	972	1 376	91.8	277.6	20.71	2 738	23 878
92-2-12	144 078	229 988	26 300	92 771	15 760	533	8 555	609	1 416	107	105	5.1	14.3	0.87	232	2 148
92-2-13	126 950	210 107	23 752	85 750	16 812	313	13 147	1 641	6 660	745	952	60.2	171.5	13.16	1 942	18 412
92-2-14	143 914	222 657	24 674	85 132	14 671	521	9 490	1 022	3 791	435	594	37.7	118.6	9.19	1 195	10 489
92-2-15	134 027	216 663	24 064	84 312	15 099	367	10 667	1 251	4 662	479	585	34.7	100.1	6.63	1 206	11 908
92-2-16	136 681	219 807	24 083	85 783	14 449	340	9 674	1 017	3 593	363	436	26.5	73.3	4.66	903	8 838
92-2-17	137 551	219 646	23 635	84 014	14 034	498	9 206	966	3 309	337	429	28.7	94.7	7.85	897	8 303
92-2-18	129 644	207 377	23 020	83 009	14 383	310	10 149	1 197	4 422	462	552	33.8	93.2	6.66	1 147	11 245
92-2-19	126 248	206 727	23 021	83 516	14 784	370	10 815	1 119	3 815	352	391	22.0	62.5	3.90	831	8 786
92-2-20	133 810	217 377	23 632	84 614	14 438	414	9 713	1 091	3 836	386	449	26.6	69.0	5.02	936	9 326
92-2-21	133 636	217 274	23 452	84 577	14 425	339	9 945	1 130	4 162	443	555	33.7	92.6	7.18	1 131	10 743
92-2-22	138 088	213 033	22 668	81 036	13 190	426	8 693	822	2 619	247	276	16.1	40.7	2.80	583	5 916
92-2-23	133 876	214 878	23 649	85 410	14 220	342	10 021	1 134	4 143	436	546	32.5	95.7	7.20	1 117	10 376
92-2-24	137 204	222 455	24 184	85 511	14 358	550	9 149	900	2 803	247	255	13.0	32.9	2.30	550	5 913

析结果表明,获得的40个分析点无论发光强弱或均匀,其 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄均较集中,范围为17.0~16.0 Ma(表5),加权平均年龄为 16.42 ± 0.08 Ma(MSWD = 2.8,图9a)。稀土元素配分模式图均表现为轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,具有显著的Eu元素负异常(图9b)。除年龄值外,发光不同的域在微量元素含量上也没有系统差别。分析点具有可变的HREE总量($681 \times 10^{-6} \sim 2\,018 \times 10^{-6}$)和

Y元素含量($6\,744 \times 10^{-6} \sim 18\,313 \times 10^{-6}$)(表6)。

样品92-2中独居石无色,粒径约为50~150 μm 。背散射图像显示,大多数独居石无环带结构,发光均匀(图9d)。分析结果表明,24个分析点的 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄均较集中,范围为16.8~16.0 Ma(表5),加权平均年龄为 16.41 ± 0.10 Ma(MSWD = 2.4,图9c)。稀土元素配分模式图均表现为轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,具有显著的Eu元素负

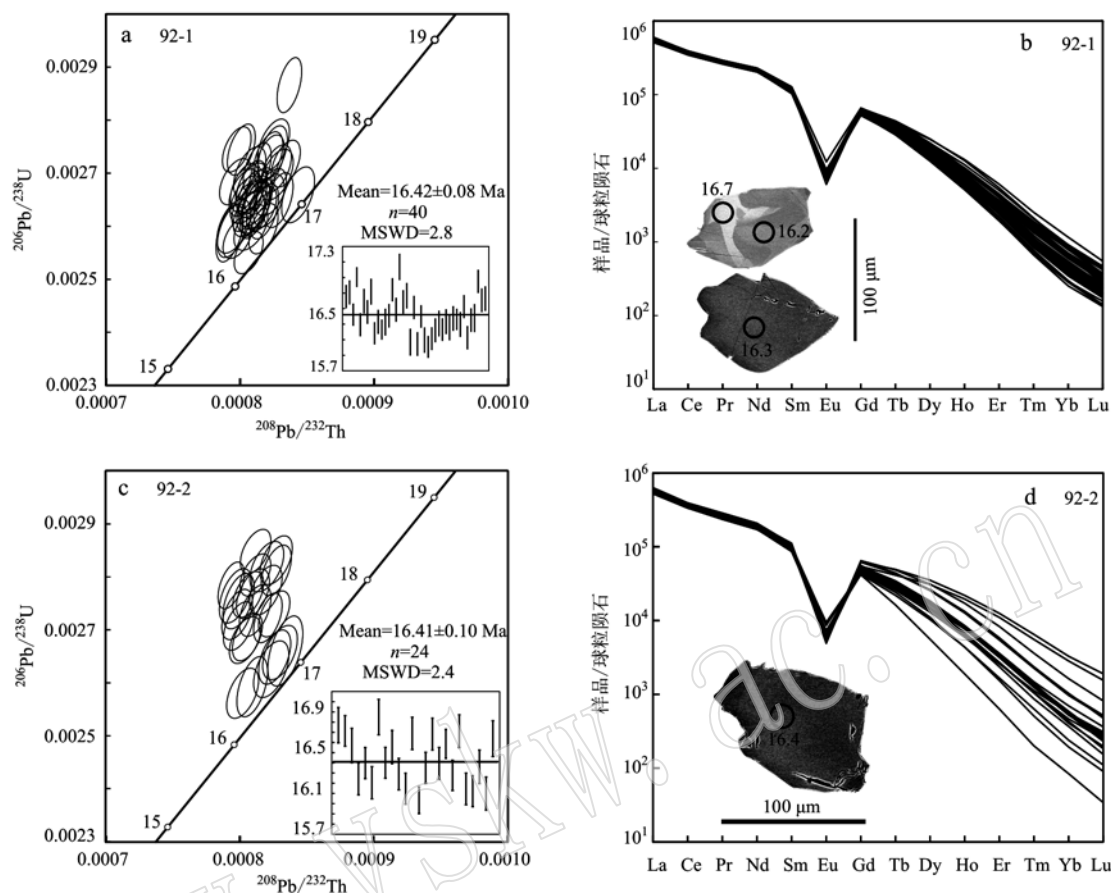


图9 亚东地区花岗质片麻岩中独居石的 U-Pb 年龄谐和图(a和c)和稀土元素球粒陨石标准化图解(b和d)
(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9 Monazite U-Th-Pb age concordia diagrams (a and c) and chondrite-normalized REE patterns (b and d) of the granitic gneisses from the Yadong area (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

异常(图9d)。分析点具有强烈变化的 HREE 总量($232 \times 10^{-6} \sim 4\,080 \times 10^{-6}$)和 Y 元素含量($2\,148 \times 10^{-6} \sim 30\,928 \times 10^{-6}$)(表6)。

6 讨论与结论

6.1 年代学解释

通过锆石和独居石定年,本次样品获得了多期年龄:~800 Ma、~440 Ma 和 ~16 Ma。下文将对这3期年龄进行地质学解释。

根据锆石的内部结构和微量元素特征,含石榴石花岗质片麻岩(92-1)中的锆石具有核-边结构,锆石边部较窄($< 10\,\mu\text{m}$)无法进行测试,锆石核部具有岩浆锆石典型的振荡环带,稀土元素配分模式图中重稀土元素陡峭,含量较高,具有显著的 Eu 元素负异常,此外 Th/U 值较高(大于 0.01,图10),上述特征均表明锆石核部为岩浆成因(Hoskin and

Schaltegger, 2003),因此,获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄~801 Ma 为含石榴石花岗质片麻岩原岩的结晶年龄。含石榴石淡色花岗岩(92-2)中的锆石具有核-幔-边结构,核部为成因复杂的继承性锆石,幔部具振荡环带,由于发光较暗不明显,在稀土元素配分模式图中,锆石幔部的重稀土元素陡峭,较锆石边部含量高,具有明显的 Eu 元素负异常,此外 Th/U 值较高(大于 0.01,图10),说明锆石幔部为岩浆成因(Hoskin and Schaltegger, 2003),所获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄~440 Ma 为含石榴石淡色花岗岩的形成年龄;样品 92-2 的锆石边部不具环带,发光较幔部更暗,稀土元素配分模式图中可见重稀土元素含量逐渐变化(由于测试点数量有限,未见与年龄值明显趋势),且不具明显的 Eu 元素负异常,此外 Th/U 值较低(小于 0.01,图10),说明锆石边部为变质成因(Rubatto, 2002),因此,获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄~16 Ma 为含石榴石淡色花岗岩的变质年龄。

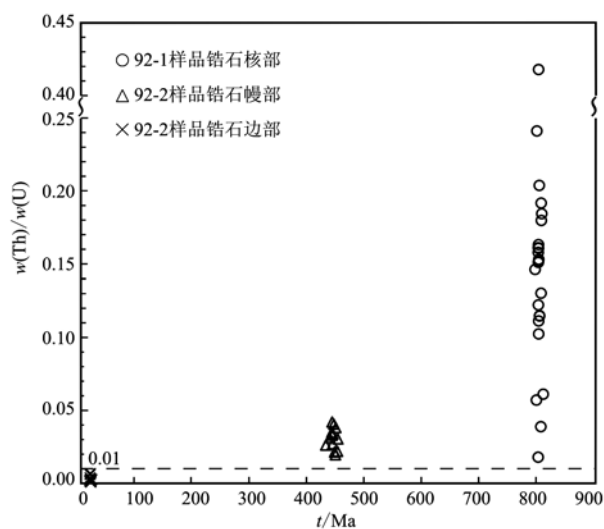


图 10 亚东地区花岗质片麻岩中锆石的 Th/U 值-
U-Pb 年龄图解

Fig. 10 Diagrams of zircon Th/U ratios versus U-Pb ages
of the granitic gneisses from the Yadong area

含石榴石花岗质片麻岩(92-1)和含石榴石淡色花岗岩(92-2)中的独居石,尽管部分在 BSE 图像中具有不同的发光分带,但是,分析结果表明,不同的发光区域在微量元素含量(例如 Th、U 和 Y 元素)和定年结果上没有明显差别。通常,BSE 图像中高原子系数的元素较低原子系数的元素发光明亮(例如 Gibson *et al.*, 2004),通过 BSE 图像区分独居石的成分环带实际上反映的是晶体的平均原子序数差异。由于独居石中含有大量的 Th 元素(高原子序数元

素, $Z = 90$),因此 BSE 图像中的环带应该主要反映 Th 元素的分布特征。然而,BSE 图像中的环带也会被其他元素(例如 U 元素, $Z = 92$; Ce 元素, $Z = 58$; La 元素, $Z = 57$)强烈影响(Gibson *et al.*, 2004)。此外,由于 BSE 图像反映的是平均原子序数的显著不同,当平均原子序数的改变低于测试体系的灵敏度时,BSE 图像也有可能无法有效地揭示独居石内部成分改变的分布特征(Williams *et al.*, 2007)。已有部分研究也表明 BSE 图像的环带与年龄结果缺乏相关性(Cocherie *et al.*, 1998; Rubatto *et al.*, 2001)。分析结果表明,本文样品中的独居石轻稀土元素富集且一致,重稀土元素亏损且分散,Y 元素含量随年龄变小而增加(图 11),说明独居石的形成与石榴石的分解有关,而石榴石的分解通常发生在退变质降温过程中,与岩相学观察到的石榴石与熔体的逆反应一致。此外,样品具有明显的 Eu 元素负异常,说明独居石形成过程中有长石类矿物共同生长(例如 Bea *et al.*, 1994; Pyle *et al.*, 2001),上述特征表明样品中的独居石形成于退变质熔体结晶过程中,获得的 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 加权平均年龄 ~ 16.4 Ma 代表退变质年龄。

根据年代学研究结果,本文推测晚新元古代(~ 800 Ma)形成的花岗闪长岩(92-1)被早志留世(~ 440 Ma)花岗岩(92-2)侵入,二者在中新世(~ 16 Ma)发生角闪岩相-麻粒岩相的变质作用,并经历部分熔融过程。

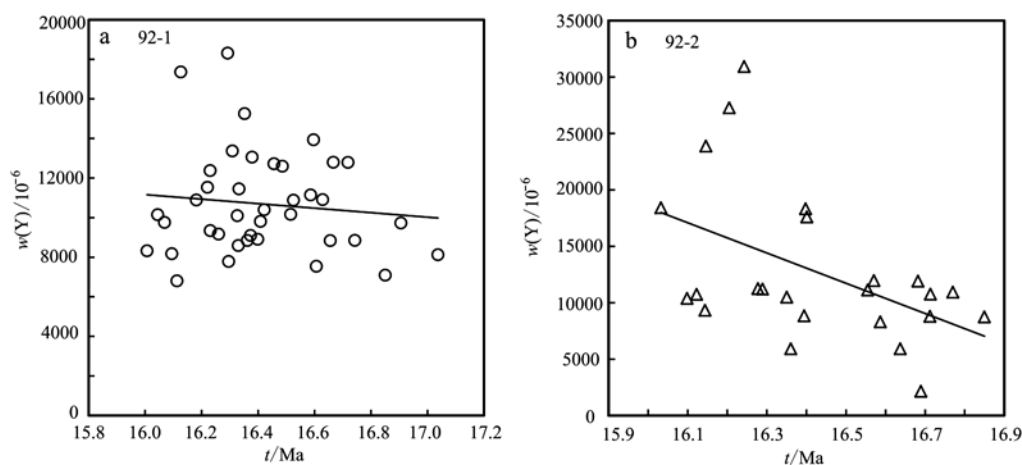


图 11 亚东地区花岗质片麻岩中独居石的 Y 元素含量- U-Th-Pb 年龄图解

Fig. 11 Diagrams of monazite Y content versus U-Th-Pb ages of the granitic gneisses from the Yadong area

6.2 多期构造热事件

本文和已有的研究表明,青藏高原-喜马拉雅带广泛存在新元古代的岩浆热事件。本文采自亚东地区大喜马拉雅岩系中的含石榴石花岗质片麻岩(92-1)结晶年龄为新元古代的 801 Ma,原岩为钙碱性花岗闪长岩,样品具有显著的 Eu 元素负异常说明岩石经历了长石的分离结晶作用,锆石 Hf 同位素组成一致, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值均为负值($-16.4 \sim -12.2$),地壳 Hf 模式年龄平均为 2.97 Ga,说明它们的原岩来自古老下地壳物质的部分熔融。除此之外,大喜马拉雅西段 Black Mountain 地区 ~ 823 Ma 的花岗质片麻岩(DiPietro and Isachsen, 2001)、Peshawar 地区 ~ 816 Ma 的结晶基底(Ahmad *et al.*, 2013),中东段不丹、中国错那地区 855 $\sim$ 808 Ma 的眼球状花岗片麻岩(Thimm *et al.*, 1999; Richards *et al.*, 2006; Ding and Zhang, 2016; Wang *et al.*, 2017)以及东段 Hapoli 地区的 ~ 837 Ma 的正片麻岩(Yin *et al.*, 2010)都有报道,小喜马拉雅 Chor 地区也有 823 Ma 的花岗闪长岩报道(Singh *et al.*, 2002)。此外,印度 Malani 火成岩省的岩浆作用年龄也为 ~ 800 Ma (Gregory *et al.*, 2009),拉萨地体安多地区(Zhang *et al.*, 2012b)和纳木错地区(Dong *et al.*, 2011)也存在同期的岩浆事件。除上述地区外,新元古代的岩

浆作用在全球包括澳大利亚东南缘、扬子、华夏地块和 Laurentia 大陆也广泛发育,最具有代表性的就是在大陆裂谷环境中形成的基性侵入岩,通常认为这期岩浆作用与导致罗迪尼亚超大陆裂解的地幔柱活动有关(图 12, Heaman *et al.*, 1992; Zhao *et al.*, 1994; Park *et al.*, 1995; Li *et al.*, 1999, 2002, 2006, 2008; Frimmel *et al.*, 2001; Shellnutt *et al.*, 2004; Maruyama *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2009)。然而,也有研究表明部分新元古代的岩浆作用,包括产出在 Seychelles、E. Madagascar 和印度西北部 Malani 以及拉萨地体安多和纳木错地区的岩浆岩,形成于大陆弧构造环境,与活动大陆边缘的安第斯型造山作用有关(Torsvik *et al.*, 1996; Tucker *et al.*, 2001; Meert and Torsvik, 2003; Rino *et al.*, 2008; Gregory *et al.*, 2009; Bybee *et al.*, 2010; Dong *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012b)。本文采自亚东地区大喜马拉雅岩系的含石榴石花岗质片麻岩与错那地区同期的花岗岩类具有相似的弧花岗质岩石地球化学特征,具有高场强元素 Nb、Ta、P 和 Ti 的负异常,无 Zr、Hf 元素的负异常(图 5b)。因此,本文认为大喜马拉雅的新元古代岩浆作用与安第斯型造山作用有关,但是,相关的认识还需要进一步的研究工作来证明。

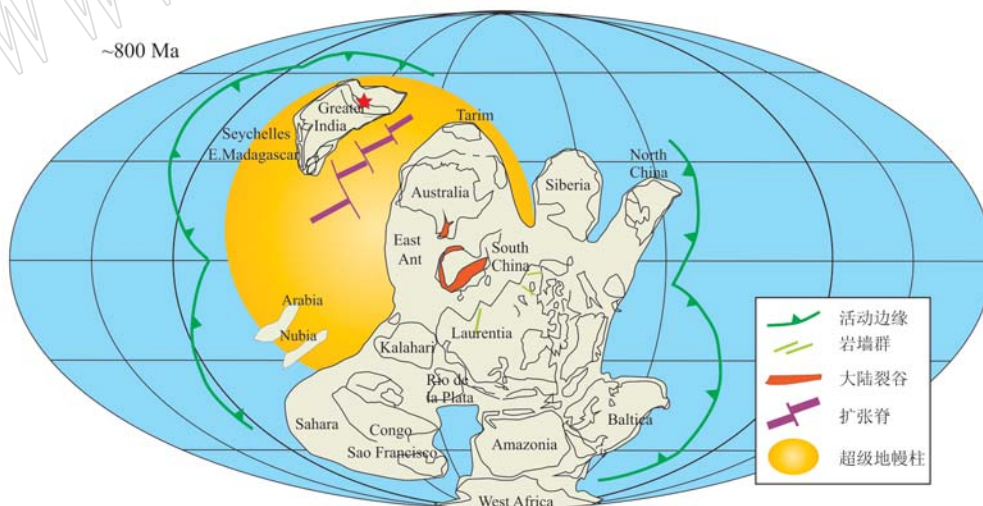


图 12 罗迪尼亚超大陆 ~ 800 Ma 裂解示意图[据 Li 等(2008)修改]

Fig. 12 Schematic diagram showing the ~ 800 Ma breakup of Rodinia (after Li *et al.*, 2008)

通常认为,喜马拉雅带具有印度大陆亲缘性,起源于东冈瓦纳大陆,经历了广泛的泛非期造山作用。冈瓦纳大陆的拼合过程并不是一蹴而就的,而是经历了一系列造山过程,统称为泛非造山作用(570 $\sim$

520 Ma)。其中,东冈瓦纳大陆包括澳大利亚、印度、马达加斯加、东南极和卡拉哈利地块(Rogers and Santosh, 2003; Cawood *et al.*, 2007),它们的拼合过程包括卡拉哈利、马达加斯加和印度地块之间的

Kuunga 造山作用(560 ~ 530 Ma)以及澳大利亚-马达加斯加和印度地块之间的 Pinjarra 造山作用(560 ~ 520 Ma)。随着冈瓦纳大陆的拼合,其周缘开始形成新的俯冲带和增生造山作用,冈瓦纳大陆周缘转变为活动大陆边缘,南部边缘由于原太平洋的俯冲,形成从澳大利亚东部、新西兰、南极洲、南非到美洲西南海岸的 Terra-Australis 造山带(530 ~ 490 Ma);北部边缘由于原特提斯洋的俯冲,在印度地块北部形成 Bhimpedian 造山带(530 ~ 470 Ma)(Cawood *et al.*, 2007)。已有研究表明,青藏高原保存了大量的泛非期及其周缘造山记录,包括:①喜马拉雅带和拉萨地体中发育的古生代寒武-奥陶纪的岩浆事件(Cawood *et al.*, 2007; Lee and Whitehouse, 2007; Liu *et al.*, 2007; Quigley *et al.*, 2008; 郭亮等, 2008; Dong *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2012a; Zhu *et al.*, 2012)和变质事件(Kohn *et al.*, 2004; Gehrels *et al.*, 2006a, 2006b; Zhang *et al.*, 2012a);②喜马拉雅带和拉萨地体的地层中含有大量 ~ 500 Ma 的碎屑锆石(DeCelles, 2000; Hodges, 2000; Gehrels *et al.*, 2006a, Dong *et al.*, 2010; Myrow *et al.*, 2010; Gehrels *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2014);③喜马拉雅带、中拉萨地体申扎和滇西地区早古生代与前寒武纪地层的角度不整合接触(Funakawa, 2001; Miller *et al.*, 2001; 李才等, 2010; 黄勇等, 2012; 蔡志慧等, 2013)。本文采自亚东地区的含石榴石淡色花岗岩(92-2)形成年龄为 440 Ma,考虑到洋壳俯冲到陆陆碰撞可以持续 150 Ma(新特提斯洋俯冲始于 ~ 200 Ma,到印度-欧亚大陆碰撞 ~ 55 Ma),认为这期岩浆作用可能是冈瓦纳周缘安第斯型造山作用的延续。此外,志留纪的岩浆作用在喜马拉雅带的吉隆地区也有报道,高利娥等(2015)认为这期志留纪的岩浆-变质热事件是东冈瓦纳大陆北缘与周缘微陆块陆-陆碰撞作用的产物。

野外观察表明,本文采自亚东地区大喜马拉雅岩系的新元古代花岗质片麻岩(92-1)和早志留世淡色花岗岩(92-2)共同发生变形,均含有厘米级的浅色体,镜下可观察到熔体假像等结构,说明研究样品经历了高角闪岩相-麻粒岩相的变质作用,并发生了部分熔融。锆石和独居石 U-Th-Pb 年代学研究表明,样品 92-1 中的锆石保留了变质边部,得到了 16.8 Ma 的变质(退变质)年龄。两个样品中独居石记录了 16.4 Ma 的退变质年龄。这期变质年龄在喜马拉雅造山带有广泛报道(张泽明等, 2017),通常认为

28 ~ 13 Ma 是喜马拉雅造山过程中大喜马拉雅岩系的退变质折返时间(Zeiger *et al.*, 2015)。最近研究表明,大喜马拉雅岩系内部由不同的构造岩片组成,其变质和部分熔融时间很可能是不同的,例如部分学者认为尼泊尔地区的大喜马拉雅岩系,从上部到下部构造层位,变质与部分熔融时间是逐渐减小的(Kohn, 2014; Wang *et al.*, 2016)。Zhang 等(2017)的研究表明,亚东地区的泥质麻粒岩在从约 31 Ma 到 20 Ma 的进变质/峰期变质过程中经历了部分熔融。而本文采自亚东地区的花岗质片麻岩记录了约 16 Ma 的退变质时间,说明或者亚东地区的大喜马拉雅岩系经历了快速的折返过程,或者亚东地区的大喜马拉雅岩系内部存在不同的构造岩片。

综上所述,大喜马拉雅岩系不仅记录了新生代碰撞造山作用,还记录了新元古代与罗迪尼亚超大陆形成演化相关的岩浆热事件以及古生代冈瓦纳大陆拼合后的周缘安第斯型造山作用。

致谢 中国地质科学院地质研究所梁风华博士在实验过程中和苟正彬博士、刘国威硕士在野外样品采集中提供了帮助,两位匿名评审人提出了宝贵意见,在此一并表示感谢!

References

- Ahmad I, Shuhab K, Thomas L, *et al.* 2013. Isotopic ages for alkaline igneous rocks, including a 26 Ma ignimbrite, from the Peshawar plain of northern Pakistan and their tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 414 ~ 424.
- Bartoli O, Tajčmanová L, Cesare B, *et al.* 2013. Phase equilibria constraints on melting of stromatic migmatites from Ronda (S. Spain): Insights on the formation of peritectic garnet[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 31: 775 ~ 789.
- Bea F, Pereira M D and Stroh A. 1994. Mineral/leucosome trace element partitioning in a peraluminous migmatite (a laser ablation-ICP-MS study)[J]. *Chemical Geology*, 117: 291 ~ 312.
- Bouvier A, Vervoort J D and Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273: 48 ~ 57.
- Bybee G M, Ashwal L D and Wilson A H. 2010. New evidence for a volcanic arc on the western margin of a rifting Rodinia from the ultramafic intrusions in the Andriamena region, north-central Madagascar

- [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 293: 42 ~ 53.
- Cai Zhihui, Xu Zhiqin, Duan Xiangdong, *et al.* 2013. Early stage of Early Paleozoic orogenic event in western Yunman Province, south-eastern margin of Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2 013 ~ 2 140(in Chinese with English abstract).
- Cawood P A, Johnson M R W and Nemchin A A. 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 255: 70 ~ 84.
- Cawood P A and Buchan C. 2007. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly[J]. *Earth Science Review*, 82: 217 ~ 256.
- Cocherie A, Legendre O, Peucat J J, *et al.* 1998. Geochronology of poly-genetic monazites constrained by in situ electron microprobe Th-U total lead determination: Implications for lead behaviour in monazite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 2 475 ~ 2 497.
- Cottle J M, Jessup M J, Newell D L, *et al.* 2009. Geochronology of granulitized eclogite from the Ama Drime Massif: Implications for the tectonic evolution of the South Tibetan Himalaya[J]. *Tectonics*, 28: TC1002.
- Decelles P G. 2000. Tectonic Implications of U-Pb Zircon Ages of the Himalayan Orogenic Belt in Nepal[J]. *Science*, 288: 497 ~ 499.
- Ding H X and Zhang Z M. 2016. Neoproterozoic granitoids in the eastern Himalayan orogen and their tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 285: 1 ~ 9.
- DiPietro J A and Isachsen C E. 2001. U-Pb zircon ages from the Indian plate in northwest Pakistan and their significance to Himalayan and pre-Himalayan geologic history[J]. *Tectonics*, 20: 510 ~ 525.
- Dong X, Zhang Z M and Santosh M. 2010. Zircon U-Pb Chronology of the Nyingtri Group, Southern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau: Implications for Grenvillian and Pan-African Provenance and Mesozoic-Cenozoic metamorphism[J]. *The Journal of Geology*, 118: 677 ~ 690.
- Dong X, Zhang Z M, Santosh M, *et al.* 2011. Late Neoproterozoic thermal events in the northern Lhasa terrane, south Tibet: Zircon chronology and tectonic implications[J]. *Journal of Geodynamics*, 52: 389 ~ 405.
- Frimmel H E, Zartman R and Späth E. 2001. The Richtersveld igneous complex, South Africa: U-Pb zircon and geochemical evidence for the beginning of Neoproterozoic continental breakup[J]. *Journal of Geology*, 109: 493 ~ 508.
- Funakawa S. 2001. Lower Paleozoic Tethys sediments from the Kathmandu nappe, Phulchauki area, central Nepal[J]. *Journal of Nepal Geological Society*, 25: 123 ~ 134.
- Gao Li'e, Zeng Lingsen, Xu Zhiqin, *et al.* 2015. Himalaya in the Caledonia time: A record from the Malashan-Gyirong area, southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1 200 ~ 1 218(in Chinese with English abstract).
- Gehrels G E, Decelles P G, Martin A, *et al.* 2003. Initiation of the Himalayan orogen as an early Paleozoic thin-skinned thrust belt [J]. *GSA Today*, 13: 4 ~ 9.
- Gehrels G E, Decelles P G, Ojha T P, *et al.* 2006a. Geologic and U-Th-Pb geochronologic evidence for early Paleozoic tectonism in the Kathmandu thrust sheet, central Nepal Himalaya[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 118: 185 ~ 198.
- Gehrels G E, Decelles P G, Ojha T P, *et al.* 2006b. Geologic and U-Pb geochronologic evidence for early Paleozoic tectonism in the Dadeldhura thrust sheet, far-west Nepal Himalaya[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 385 ~ 408.
- Gehrels G E, Kapp P, DeCelles P, *et al.* 2011. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen[J]. *Tectonics*, 30: TC5016.
- Gibson H D, Carr S D, Brown R L, *et al.* 2004. Correlations between chemical and age domains in monazite, and metamorphic reactions involving major pelitic phases: An integration of ID-TIMS and SHRIMP geochronology with Y-Th-U X-ray mapping[J]. *Chemical Geology*, 211: 237 ~ 260.
- Gregory L C, Meert J G, Bingen B, *et al.* 2009. Paleomagnetism and geochronology of the Malani Igneous Suite, Northwest India: Implications for the configuration of Rodinia and the assemblage of Gondwana[J]. *Precambrian Research*, 170: 13 ~ 26.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 133 ~ 147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon geochemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237 ~ 269.
- Grujic D, Warren C J and Wooden J L. 2011. Rapid synconvergent exhumation of Miocene-aged lower orogenic crust in the eastern Himalaya [J]. *Lithosphere*, 3: 346 ~ 366.
- Guo Liang, Zhang Hongfei and Xu Wangchun. 2008. U-Pb zircon ages of migmatite and granitic gneiss from Duoxiongla in eastern Himalayan syntaxis and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 421 ~ 429(in Chinese with English abstract).
- Guo L, Zhang H F, Harris N, *et al.* 2012. Paleogene crustal anatexis and metamorphism in Lhasa terrane, eastern Himalayan syntaxis: Evidence from U-Pb zircon ages and Hf isotopic compositions of the Nyingchi Complex[J]. *Gondwana Research*, 21: 100 ~ 111.
- Heaman L M, LeCheminant A N and Rainbird R H. 1992. Nature and

- timing of Franklin igneous events, Canada: Implications for a Late Proterozoic mantle plume and the breakup of Laurentia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 109: 117 ~ 131.
- Hodges K V. 2000. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 112: 324 ~ 350.
- Holness M B and Sawyer E W. 2008. On the pseudomorphing of melt-filled pores during the crystallization of migmatites[J]. *Journal of Petrology*, 49: 1 343 ~ 1 363.
- Holness M B and Clemens J D. 1999. Partial melting of the Appin quartzite driven by fracture-controlled H₂O infiltration in the aureole of the Ballachulish Igneous Complex, Scottish Highlands[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 136: 154 ~ 168.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 27 ~ 62.
- Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, *et al.* 2015. "Wave" signal smoothing and mercury removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS analysis: Application to lead isotope analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 87: 1 152 ~ 1 157.
- Huang Yong, Hao Jiaxu, Bai Long, *et al.* 2012. Stratigraphic and petrologic response to Late Pan-African movement in Shidian area, western Yunnan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(2 ~ 3): 306 ~ 313(in Chinese with English abstract).
- Johnson M, Oliver G, Parrish R R, *et al.* 2001. Synthrusting metamorphism, cooling, and erosion of the Himalayan Kathmandu Complex, Nepal[J]. *Tectonics*, 20: 394 ~ 415.
- Kohn M J. 2014. Himalayan metamorphism and its tectonic implications [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42: 381 ~ 419.
- Lee J and Whitehouse M J. 2007. Onset of mid-crustal extensional flow in southern Tibet: Evidence from U-Pb zircon ages[J]. *Geology*, 35: 45 ~ 48.
- Li Cai, Wu Yanwang, Wang Ming, *et al.* 2010. Significant progress on Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in Qinghai-Tibet Plateau: Discovery of Pan-African orogenic unconformity and Cambrian System in the Gangdese area, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29: 1 733 ~ 1 736(in Chinese with English abstract).
- Li G W, Sandiford M, Liu X, *et al.* 2014. Provenance of Late Triassic sediments in central Lhasa terrane, Tibet and its implication[J]. *Gondwana Research*, 25: 1 680 ~ 1 689.
- Li X H, Li Z X, Wingate M T D, *et al.* 2006. Geochemistry of the 755 Ma Mundine Well dyke swarm, northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? [J]. *Precambrian Research*, 146: 1 ~ 15.
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, *et al.* 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 160: 179 ~ 210.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, *et al.* 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 173: 171 ~ 181.
- Li Z X, Li X H, Zhou H, *et al.* 2002. Grenville-aged continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for Rodinia configuration[J]. *Geology*, 30: 163 ~ 166.
- Liu Wencan, Wan Xiaoqiao, Liang Dingyi, *et al.* 2004. New achievements and main progress in geological survey of the Gyangze and Yadong sheets[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(5 ~ 6): 444 ~ 450(in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Siebel W, Massonne H J, *et al.* 2007. Geochronological and petrological constraints for tectonic evolution of the central Greater Himalayan Sequence in the Kharta area, southern Tibet[J]. *The Journal of Geology*, 115: 215 ~ 230.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 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 of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537 ~ 571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 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: 34 ~ 43.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 39.
- Maruyama S, Santosh M and Zhao D. 2007. Superplume, supercontinent, and postperovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core-mantle boundary[J]. *Gondwana Research*, 11: 7 ~ 37.
- Meert J G and Torsvik T H. 2003. The making and unmaking of a supercontinent: Rodinia revisited[J]. *Tectonophysics*, 375: 261 ~ 288.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 37: 215 ~ 224.
- Miller C, Thöni M, Frank W, *et al.* 2001. The Early Palaeozoic magmatic event in the Northwest Himalaya, India: Source, tectonic setting and age of emplacement[J]. *Geological Magazine*, 138: 237 ~ 251.
- Myrow P M, Hughes N C, Goodge J W, *et al.* 2010. Extraordinary transport and mixing of sediment across Himalayan central Gondwana during the Cambrian-Ordovician[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122: 1 660 ~ 1 670.
- Park J K, Buchan K L and Harlan S S. 1995. A proposed giant radiating dyke swarm fragmented by the separation of Laurentia and Australia based on paleomagnetism of ca. 780 Ma mafic intrusions in western

- North America[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 132: 129 ~ 139.
- Pyle J M, Spear F S, Rudnick R L, *et al.* 2001. Monazite-xenotime-garnet equilibrium in metapelites and a new monazite-garnet thermometer[J]. *Journal of Petrology*, 42: 2 083 ~ 2 107.
- Quigley M C, Liangjun Y, Gregory C, *et al.* 2008. U-Pb SHRIMP zircon geochronology and T-t-d history of the Kampa Dome, southern Tibet [J]. *Tectonophysics*, 446: 97 ~ 113.
- Richards A, Parrish R, Harris N, *et al.* 2006. Correlation of lithotectonic units across the eastern Himalaya, Bhutan[J]. *Geology*, 34: 341 ~ 344.
- Rino S, Kon Y, Sato W, *et al.* 2008. The Grenvillian and Pan-African orogens: World's largest orogenies through geologic time, and their implications on the origin of superplume[J]. *Gondwana Research*, 14: 51 ~ 72.
- Rogers J J and Santosh M. 2003. Supercontinents in Earth history[J]. *Gondwana Research*, 6: 357 ~ 368.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 184: 123 ~ 138.
- Rubatto D, Williams I S and Buick I S. 2001. Zircon and monazite response to prograde metamorphism in the Reynolds Range, central Australia [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140: 458 ~ 468.
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock[J]. *Science*, 293: 683 ~ 687.
- Schärer U. 1984. The effect of initial ^{230}Th disequilibrium on young U-Pb ages: The Makalu case, Himalaya[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 67: 191 ~ 204.
- Shellnutt J G, Dostal J and Keppie J D. 2004. Petrogenesis of the 723 Ma Coronation sills, Amundsen basin, Arctic Canada: Implications for the breakup of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 129: 309 ~ 324.
- Singh S, Barley M E, Brown S J, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb in zircon geochronology of the Chor granitoid: Evidence for Neoproterozoic magmatism in the Lesser Himalayan granite belt of NW India[J]. *Precambrian Research*, 18: 285 ~ 292.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. Sanders A D and Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins*[C]. Geological Society of London, Special Publication, 42: 313 ~ 345.
- Thimm K A, Parrish R R, Hollister L S, *et al.* 1999. New U-Pb data from the MCT and Lesser and Greater Himalayan Sequences in Bhutan[J]. *Terra Nostra*, 2: 155.
- Torsvik T H, Smethurst M A, Meert J G, *et al.* 1996. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic—A tale of Baltica and Laurentia[J]. *Earth-Science Reviews*, 40: 229 ~ 258.
- Tucker R D, Ashwal L D and Torsvik T H. 2001. U-Pb geochronology of Seychelles granitoids: A Neoproterozoic continental arc fragment [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 187: 27 ~ 38.
- Wang J M, Zhang J J, Liu K, *et al.* 2016. Spatial and temporal evolution of Tectonometamorphic discontinuities in the central Himalaya: Constraints from P-T paths and geochronology[J]. *Tectonophysics*, 679: 41 ~ 60.
- Wang X X, Zhang J J, Santosh M, *et al.* 2012. Andean-type orogeny in the Himalayas of south Tibet: Implications for early Paleozoic tectonics along the Indian margin of Gondwana[J]. *Lithos*, 154: 248 ~ 262.
- Wang Xiaoxian, Zhang Jinjiang, Yan Shuyu, *et al.* 2016. Zircon U-Pb and muscovite ^{40}Ar - ^{39}Ar chronology of the Chongba leucogranites in south Tibet and its geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35 (2): 242 ~ 251 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxian, Zhang Jinjiang, Yang Xiongying, *et al.* 2011. Zircon SHRIMP U-Pb ages, Hf isotopic features and their geological significance of the Greater Himalayan Crystalline Complex gneiss in Gyirong Area, south Tibet [J]. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 127 ~ 139 (in Chinese with English abstract).
- Wang X C, Li X H, Li W X, *et al.* 2009. Variable involvements of mantle plumes in the genes of mid-Neoproterozoic basaltic rocks in South China: A review[J]. *Gondwana Research*, 15: 381 ~ 395.
- Wang Y H, Zeng L S, Gao L E, *et al.* 2017. Neoproterozoic magmatism in eastern Himalayan terrane[J]. *Science Bulletin*, 62: 39 ~ 48.
- Wei Chunjing and Zhu Wenping. 2016. Granulite facies metamorphism and petrogenesis of granite (I): Metamorphic phase equilibria for HT-UHT metapelites/greywackes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32 (6): 1 611 ~ 1 624 (in Chinese with English abstract).
- Whitney D L and Evans B W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals[J]. *American Mineralogist*, 95: 185 ~ 187.
- Williams M L, Jercinovic M J and Hetherington C J. 2007. Microprobe monazite geochronology: Understanding geologic processes by integrating composition and chronology[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35: 137 ~ 175.
- Wu Fuyuan, Liu Zhichao, Liu Xiaochi, *et al.* 2015. Himalayan leucogranites: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift[J]. *Acta Petrologica Sinica* 31(1): 1 ~ 36 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Liang Fenghua, *et al.* 2005. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (1): 1 ~ 21 (in Chinese with English abstract).
- Yin A, Dubey C S, Kelty T K, *et al.* 2010. Geologic correlation of the

- Himalayan orogen and Indian craton: Part 2. Structural geology, geochronology, and tectonic evolution of the Eastern Himalaya[J]. GSA Bulletin, 122: 360 ~ 395.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211 ~ 280.
- Yu S Y, Z J X, Sun De Y, *et al.* 2015. Anatexis of ultrahigh-pressure eclogite during exhumation in the North Qaidam ultrahigh-pressure terrane: Constraints from petrology, zircon U-Pb dating, and geochemistry[J]. Geological Society of America Bulletin, 127: doi: 10.1130/B31162. 1.
- Zeiger K, Gordon S M, Long S P, *et al.* 2015. Timing and conditions of metamorphism and melt crystallization in Greater Himalayan rocks, eastern and central Buhtan: Insight from U-Pb zircon and monazite geochronology and trace-element analyses[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 169: 47.
- Zhang Xiangxin, Liu Wencan, Zhou Zhiguang, *et al.* 2005. The foundation of the Precambrian Yadong Rock Group and its characteristics in the Yadong area, Southern Tibet[J]. Geoscience, 19(3): 341 ~ 347(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zeming, Dong Xin, Ding Huixia, *et al.* 2017. Metamorphism and partial melting of the Himalayan orogen [J]. Acta Petrologica Sinica, 33(8): 2 313 ~ 2 341(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Dong X, Liu F, *et al.* 2012b. Tectonic evolution of the Amdo terrane, central Tibet: Petrochemistry and zircon U-Pb geochronology[J]. Journal of Geology, 120: 431 ~ 451.
- Zhang Z M, Dong X, Santosh M, *et al.* 2012a. Petrology and geochronology of the Namche Barwa Complex in the eastern Himalayan syntaxis, Tibet: Constraints on the origin and evolution of the north-eastern margin of the Indian Craton[J]. Gondwana Research, 21: 123 ~ 137.
- Zhang Zeming, Wang Jinli, Shen Kun, *et al.* 2008. Paleozoic circum-Gondwana orogens: Petrology and geochronology of the Namche Barwa Complex in the eastern Himalayan syntaxis, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(7): 1 627 ~ 1 637(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Xiang H, Dong X, *et al.* 2017. Oligocene HP metamorphism and anatexis of the Higher Himalayan Crystalline Sequence in Yadong region, east-central Himalaya[J]. Gondwana Research, 41: 173 ~ 187.
- Zhao J X, McCulloch M T and Korsch R J. 1994. Characterisation of a plume-related ~800 Ma magmatic event and its implications for basin formation in centralsouthern Australia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 121: 349 ~ 367.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, *et al.* 2012. Cambrian bimodal volcanism in the Lhasa Terrane, southern Tibet: Record of an early Paleozoic Andean-type magmatic arc in the Australian proto-Tethyan margin [J]. Chemical Geology, 328: 290 ~ 308.
- Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, *et al.* 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB)[J]. Precambrian Research, 290: 32 ~ 48.

附中中文参考文献

- 蔡志慧, 许志琴, 段向东, 等. 2013. 青藏高原东南缘滇西早古生代早期造山事件[J]. 岩石学报, 29(6): 2 123 ~ 2 140.
- 高利娥, 曾令森 许志琴, 等. 2015. 喜马拉雅造山带加里东期构造作用: 以马拉山-吉隆构造带为例[J]. 岩石学报, 31(5): 1 200 ~ 1 218.
- 郭亮, 张宏飞, 徐旺春. 2008. 东喜马拉雅构造结多雄拉混合岩和花岗岩麻岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(3): 421 ~ 429.
- 黄勇, 郝家桐, 白一龙, 等. 2012. 滇西施甸地区晚泛非运动的地层学和岩石学响应[J]. 地质通报, 31(2~3): 306 ~ 313.
- 李才, 吴彦旺, 王明, 等. 2010. 青藏高原泛非-早古生代造山事件研究重大进展——冈底斯地区寒武系和泛非造山不整合的发现[J]. 地质通报, 29(12): 1 733 ~ 1 736.
- 刘文灿, 万晓樵, 梁定益, 等. 2004. 江孜县幅、亚东县幅地质调查新成果及主要进展[J]. 地质通报, 23(5): 444 ~ 450.
- 王晓先, 张进江, 闫淑玉, 等. 2016. 藏南冲巴淡色花岗岩锆石 U-Pb、白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(2): 242 ~ 251.
- 王晓先, 张进江, 杨雄英, 等. 2011. 藏南吉隆地区早古生代大喜马拉雅片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 地学前缘, 18(2): 127 ~ 139.
- 魏春景, 朱文萍. 2016. 麻粒岩相变质作用与花岗岩成因-I: 变质泥质岩/杂砂岩高温-超高温变质相平衡[J]. 岩石学报, 32(6): 1 611 ~ 1 624.
- 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 等. 2015. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. 岩石学报, 31(1): 1 ~ 36.
- 许志琴, 杨经绥, 梁风华, 等. 2005. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄记录[J]. 岩石学报, 21(1): 1 ~ 12.
- 张祥信, 刘文灿, 周志广, 等. 2005. 藏南亚东地区前寒武纪亚东岩群的建立及其特征[J]. 现代地质, 19(3): 341 ~ 347.
- 张泽明, 董昕, 丁慧霞, 等. 2017. 喜马拉雅造山带的变质作用与部分熔融[J]. 岩石学报, 33(8): 2 313 ~ 2 341.
- 张泽明, 王金丽, 沈昆, 等. 2008. 环东冈瓦纳大陆周缘的古生代造山作用: 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群的岩石学和年代学证据[J]. 岩石学报, 24(7): 1 627 ~ 1 637.