

保山地块漕涧花岗伟晶岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其地质意义*

禹丽 王庆飞** 李龚健 高磊

YU Li, WANG QingFei**, LI GongJian and GAO Lei

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2015-04-02 收稿, 2015-06-03 改回.

Yu L, Wang QF, Li GJ and Gao L. 2015. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology of granitic pegmatites from Caojian area in the northern Baoshan block, and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11):3281–3296

Abstract To explore the genetic relationship between granitic pegmatites and granites from Caojian area in the northern Baoshan block, and the tectonic setting, this paper presents the bulk geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotopic composition of the granitic pegmatites. These samples are characterized by high silica ($\text{SiO}_2 = 73.02\% \sim 75.35\%$), alkali-rich ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 9.10\% \sim 10.79\%$), peraluminous ($A/\text{CNK} = 1.05 \sim 1.13$) and shoshonitic. Granitic pegmatites are distinctively enriched in Rb, U, Ta and Pb, but depleted in Ba, Sr, Ti, Th and Nb. They have lower rare-elements contents ($\sum \text{REE} = 3.99 \times 10^{-6} \sim 17.29 \times 10^{-6}$), and show light REE enriched characters in the chondrite-normalized REE patterns, with obvious positive Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 2.92 \sim 14.7$). Zircon morphology and in situ trace element composition suggest that: Zircon grains varied in size from 150 to 400 μm , dark brown and opaque; CL images display oscillatory zoning rim and spongy texture in the center of zircons, with weak cathodoluminescence (CL); lower Th/U ratios in the range of 0.004 to 0.009 and enriched in heavy rare-elements. All $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages varied from 84Ma to 54Ma, and those spots from the rims with clear oscillatory zoning, yield concordant age of $73.44 \pm 1.0\text{Ma}$ (MSWD = 1.03) and $67.12 \pm 1.60\text{Ma}$ (MSWD = 4.2) respectively. Other spots yielding concordant ages of 61Ma to 57Ma. Their zircons have concentrated negative $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ($-6.7 \sim -5.7$) and Hf isotopic crust model ages ($t_{\text{DM}}^{\text{C}} = 1260 \sim 1565\text{Ma}$). These geochemical characteristics of granitic pegmatites suggest that, pegmatites and granites from Caojian area have genetic relationship, they produced by the remelting of the Proterozoic basement materials within the Baoshan block via the regional extension of the previously thickened continental crust, and formed in the late subduction stage of Neo-Tethys ocean to subsequent earlier stage of the collision between the India-Asia continent.

Key words Granitic pegmatites; Geochemistry; Zircon trace elements; Zircon U-Pb dating; Zircon Hf isotope; Baoshan block

摘要 本文对出露于保山地块北部漕涧地区的花岗伟晶岩脉进行了全岩元素地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成研究, 旨在揭示与紧邻的漕涧花岗岩体间的成因关系及其形成环境。伟晶岩样品表现出高硅 ($\text{SiO}_2 = 73.02\% \sim 75.35\%$)、富碱 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 9.10\% \sim 10.79\%$)、过铝质 ($A/\text{CNK} = 1.05 \sim 1.13$) 特征, 在 SiO_2 - K_2O 岩石判别图解上属钾玄岩系列; 微量元素原始地幔标准化配分曲线上, 花岗伟晶岩显示清晰的 Rb、U、Ta 和 Pb 正异常, Ba、Sr、Ti、Th 和 Nb 负异常; 稀土元素含量很低, 总量 $3.99 \times 10^{-6} \sim 17.29 \times 10^{-6}$, 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现为轻稀土富集型, 具有明显的正 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 2.92 \sim 14.7$)。锆石形态学与原位稀土元素组成显示: 锆石颗粒粗大 (颗粒长约 150 ~ 400 μm), 阴极发光强度较弱, 内部为海绵状结构, 边部发育韵律环带; 锆石 Th/U 比值低, 主要介于 0.004 ~ 0.009, 重稀土元素富集。通过图解 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ -La 和 $\text{Ce}^*/\text{Ce}^* - (\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$, 判断锆石具有岩浆锆石与热液锆石过渡的特征。2 件样品单颗粒锆石 U-Pb 年龄变化于 85 ~ 54Ma, 测点位于锆石边部韵律环带发育的微区所得出的谐和年龄分别为 $73.44 \pm 1.0\text{Ma}$ (MSWD = 1.03) 和 $67.12 \pm 1.60\text{Ma}$ (MSWD = 4.2); 其

* 本文受国家重点基础研究发展计划 (2015CB452602、2009CB421008)、北京市优秀博士学位论文指导老师科研项目 (20111141501) 和北京市青年英才计划 (yctp0666) 联合资助。

第一作者简介: 禹丽, 女, 1989 年生, 博士生, 矿物学, 岩石学, 矿床学专业, E-mail: yuli1211@163.com

** 通讯作者: 王庆飞, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 矿床学专业, E-mail: wqf@cugb.edu.cn

余测点的谐和年龄为 61~57Ma。花岗伟晶岩脉中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布范围为 -10.1~-4.7(集中于 -6.7~-5.7), 分布较为集中, 对应的 Hf 同位素地壳模式年龄 t_{DM}^{C} 为 1260~1565Ma(集中于 1310~1360Ma)。这些地化特征综合表明漕涧花岗伟晶岩脉与花岗岩体有着亲缘关系, 共系保山地块先存加厚地壳元古代基底物质的减压熔融的产物, 其形成于新特提斯洋俯冲末期至随后发生的印度欧亚大陆碰撞初期的构造背景下。

关键词 花岗伟晶岩; 地球化学; 锆石微量元素; 锆石 U-Pb 年代学; 锆石 Hf 同位素; 保山地块

中图法分类号 P588.131; P597.3

1 引言

滇西特提斯域处于三江特提斯构造带西南端, 是三江特提斯构造演化的典型缩影, 也是特提斯多旋回构造的典型发育地区。滇西特提斯构造带在古生代至新生代期间, 经历了古-中-新特提斯洋开启、扩张、消减与闭合的过程以及随后的印度-欧亚大陆碰撞造山过程(邓军等, 2011, 2012; Deng *et al.*, 2014a, b, 2015a, b)。滇西特提斯构造域至西向东包括腾冲地块、保山地块与思茅地块, 以及分布其间的古特提斯潞西裂谷带与昌宁-孟连缝合带(钟大赟, 1998; Metcalfe, 2013)。该区域岩浆活动频繁, 岩石类型丰富, 区内广泛分布着早古生代至新生代的岩体(莫宣学等, 1993; Liang *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2012; Dong *et al.*, 2013, 2014b; Wang *et al.*, 2014a; Li *et al.*, 2015), 这些岩体的形成是古特提斯洋、中特提斯洋和新特提斯洋打开、俯冲、消减和之后陆陆碰撞的岩浆响应。不少学者已经对滇西地区花岗岩岩体的地球动力学背景进行了深入研究(杨启军等, 2009; Deng *et al.*, 2010b, 2014a; 杨立强等, 2010, 2011; Xu *et al.*, 2012; 李龚健等, 2013; Wang *et al.*, 2014b; Deng and Wang, 2015)。伟晶岩作为一种特殊的岩石类型, 不但在岩石成因与成矿方面占有不可忽视的地位, 而且在示踪物源与追溯形成构造环境中同样意义突出(Liu *et al.*, 2010a)。滇西地区伟晶岩脉分布较为广泛, 稀有金属、宝石级矿物主要赋存于伟晶岩中(李再会等, 2014)。目前为止, 国内外对腾冲-保山地块的伟晶岩研究较弱, 以往的工作也主要集中在伟晶岩的典型矿物与矿化特征描述等方面, 系统的伟晶岩元素地球化学、年代学与同位素组成资料匮乏, 伟晶岩脉与紧邻花岗岩的成因联系及其形成的构造背景报导较少。

鉴于上述问题, 本文通过系统的全岩主微量、锆石微量元素分析、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素地球化学分析技术, 以保山地块北部漕涧地区出露的花岗伟晶岩脉为研究对象, 旨在探讨花岗伟晶岩的形成时代、岩石成因以及同漕涧花岗岩的时空、成因联系。

2 地质背景与样品

保山地块是滇西特提斯构造域的一个重要的地体, 在大地构造位置上位于 SIBUMASU(滇缅泰马)地块的北部, 向南与掸邦地块相连, 东以昌宁-孟连缝合带为界, 与兰坪-思茅地

块相连, 西以高黎贡山带-潞西裂谷带为界, 与腾冲地块相接, 北部于澜沧江和怒江断裂的汇拢处而消失(图 1b)。保山地块被认为是晚古生代晚期与羌塘地块、拉萨地块解离自冈瓦纳大陆北缘(Metcalfe, 2011, 2013)。昌宁-孟连缝合带曾经为古特提斯主洋, 开启于中泥盆世, 于中三叠闭合(Sone and Metcalfe, 2008)。高黎贡山带为中特提斯洋于早白垩世闭合后保山、腾冲地块的碰撞而形成。

保山地块东西两侧岩浆活动强烈, 不同类型的花岗岩广泛分布, 以南北向延伸的临沧花岗岩基和腾冲火山岩带规模最大。保山地块内部共记录了早古生代、中二叠世、中三叠世、早白垩世和晚白垩世五期岩浆活动。出露面积最大的是位于地块西南部的平河花岗岩基, 锆石 U-Pb 年龄为 502~466Ma(Chen *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2009; 董美玲等, 2012; Wang *et al.*, 2013); 形成于晚古生代的岩体有木厂花岗岩, 耿马岩体。其中木厂 A 型花岗岩的锆石 U-Pb 年龄约为 266Ma(Ye *et al.*, 2010), 地块东南缘的耿马岩体年龄为 232~230Ma(聂飞等, 2012); 形成于新生代的岩体主要有地块北部的志本山岩体, 漕涧花岗岩及柯街岩体。志本山花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 127Ma(陶琰等, 2009, 2010); 在志本山岩体东南部出露晚白垩世岩体, 锆石 U-Pb 年龄约 72Ma(廖世勇等, 2013; 禹丽等, 2014)。保山地块东缘出露古元古代崇山群变质岩系, 地块内部出露奥陶系-三叠系的一套台地浅海相碎屑岩、灰岩, 在石炭系-三叠系地层中夹有中基性火山岩。杨学俊等(2012)获得了公养河群火山岩的锆石 U-Pb 年龄为 499Ma, 表明保山地块存在早古生代基底。

本文研究的花岗伟晶岩脉出露面积甚小, 地理坐标 25°39'20"N, 99°05'52"E, 具体采样位置参见图 1c, 与漕涧二云母花岗岩有明显的接触界限(图 2a)。花岗伟晶岩呈灰白色, 粗粒结构, 主要矿物为石英、斜长石、白云母和黑云母(图 2b)。石英为不规则粒状, 波状消光。斜长石粒径可达 5cm, 主要为自形的板状, 发育聚片双晶。黑云母为半自形或他形, 黑褐色, 白云母的自形程度较高, 主要为片状, 鲜艳的二级干涉色, 并且白云母存在着明显的定向构造, 反映经受了后期构造剪切作用(图 2c-d)。

3 分析方法

本文选择新鲜、无蚀变的样品进行测试分析。主微量元素分析是在国家地质实验测试中心完成。主量元素分析是采用 X 射线荧光光谱仪(PW4400)测定, 测试精度优于 2%。

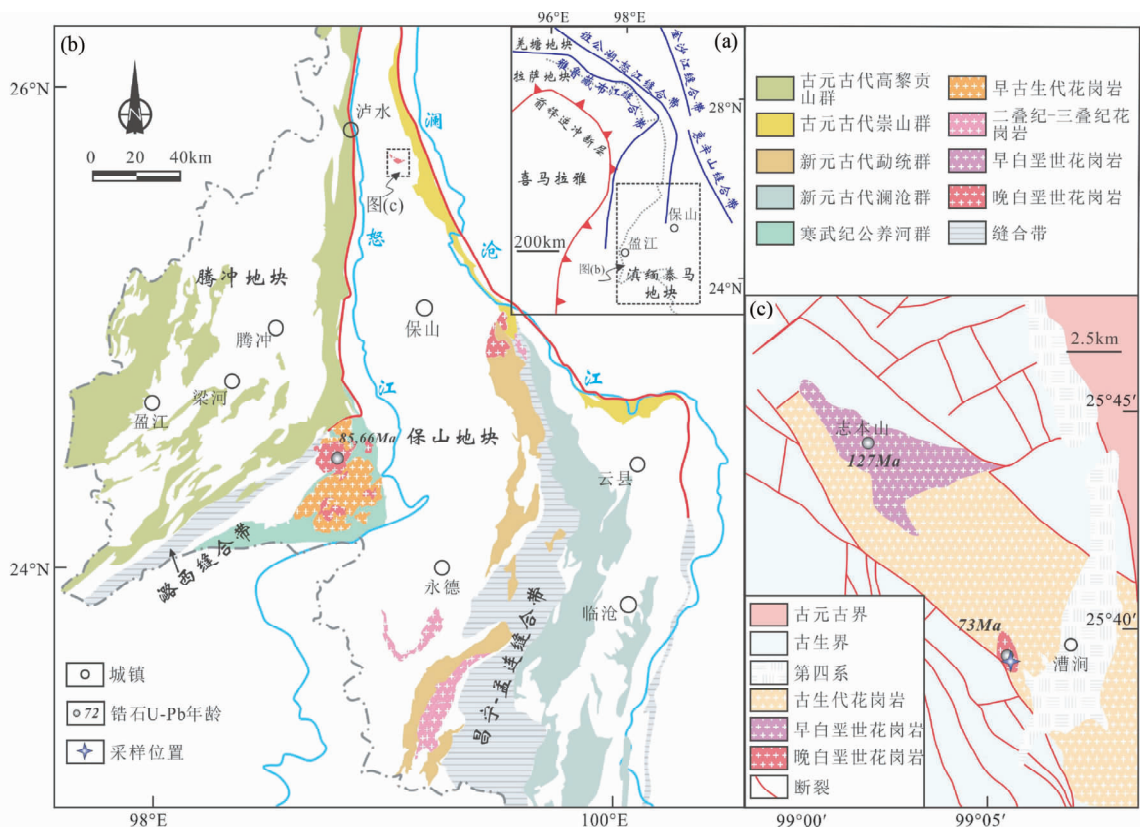


图1 青藏高原和滇西地区大地构造简图(a, 据 Xu *et al.*, 2012 修改)、滇西地区构造岩浆分布图(b, 据云南省地质矿产局, 1990; Deng *et al.*, 2014a 修改)和保山地块澜沧地区地质简图(c, 据云南省地质调查院, 2004^①; 廖世勇等, 2013 修改)

保山地块南部花岗岩类锆石 U-Pb 年龄引自董美玲等, 2013; 保山地块北部志本山花岗岩类锆石 U-Pb 年龄引自陶琰等, 2010; 保山地块澜沧花岗岩锆石 U-Pb 年龄引自禹丽等, 2014

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Tibetan Plateau and western Yunnan (a, modified after Xu *et al.*, 2012), distribution of tectonics and granitoids of the Tethyan belt in western Yunnan (b, modified after BGMRY, 1990; Deng *et al.*, 2014a) and simplified geological map of the Caojian area, Baoshan block (c, modified after Liao *et al.*, 2013)

实验过程中先将样品磨至 200 目, 在 XRF 分析专用溶剂的作用下, 于熔样机中高温烧制熔片。之后将烧制好的熔片置于 X 射线荧光光谱仪中测试分析。微量元素分析利用等离子质谱仪(X-series)测定, 测试精度优于 5%。测试过程中首先将样品粉碎至 200 目, 以 HF 和 HNO₃ 在密封容器中熔样, 之后加入内标溶液, 置于离心管中, 在 ICP-MS 仪器中测定样品中元素含量。

锆石分选由廊坊地勘探技术服务有限公司完成, 通过电磁与重液法分选, 最后在双目镜下挑出。将挑好的锆石置于环氧树脂内固定、抛光, 将制好的靶样进行透、反射光照相并采集阴极发光(CL)图像。制靶和阴极发光图像的采集均由北京锆领航科技服务公司完成。根据锆石 CL 图像判断锆石成因, 结合透、反射照片, 选择无包体、无裂隙的锆石微区圈定激光剥蚀区域。锆石微量元素微区分析、U-Pb 同位

素定年以及 Hf 同位素分析均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。锆石微量元素微区分析、U-Pb 同位素定年采用 Agilent 7500a 电感耦合等离子质谱与 Geolas 2005 激光剥蚀系统完成, 激光剥蚀斑束直径一般为 32 μm, 剥蚀深度在 20 ~ 40 μm 间。激光剥蚀过程中采用 He 气作载气, 采样方式为单点剥蚀。锆石微量元素含量利用多个 USGS 参考玻璃(BCR-2G, BIR-1G)作为外标、Si 作内标的方法进行定量计算; U-Pb 同位素定年采用标准锆石 91500 作外标进行同位素分馏校正。实验数据的处理(样品和空白信号选择、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等定量计算)采用软件 ICPMSDataCal 9.0 完成。详细的实验过程与数据处理方法参照 Liu *et al.* (2008, 2010b, c)。锆石协和年龄图的绘制利用 Isoplot 3.0 软件完成(Ludwig, 2003)。

① 云南省地质调查院, 2004. 1:25 万大理幅区域地质图

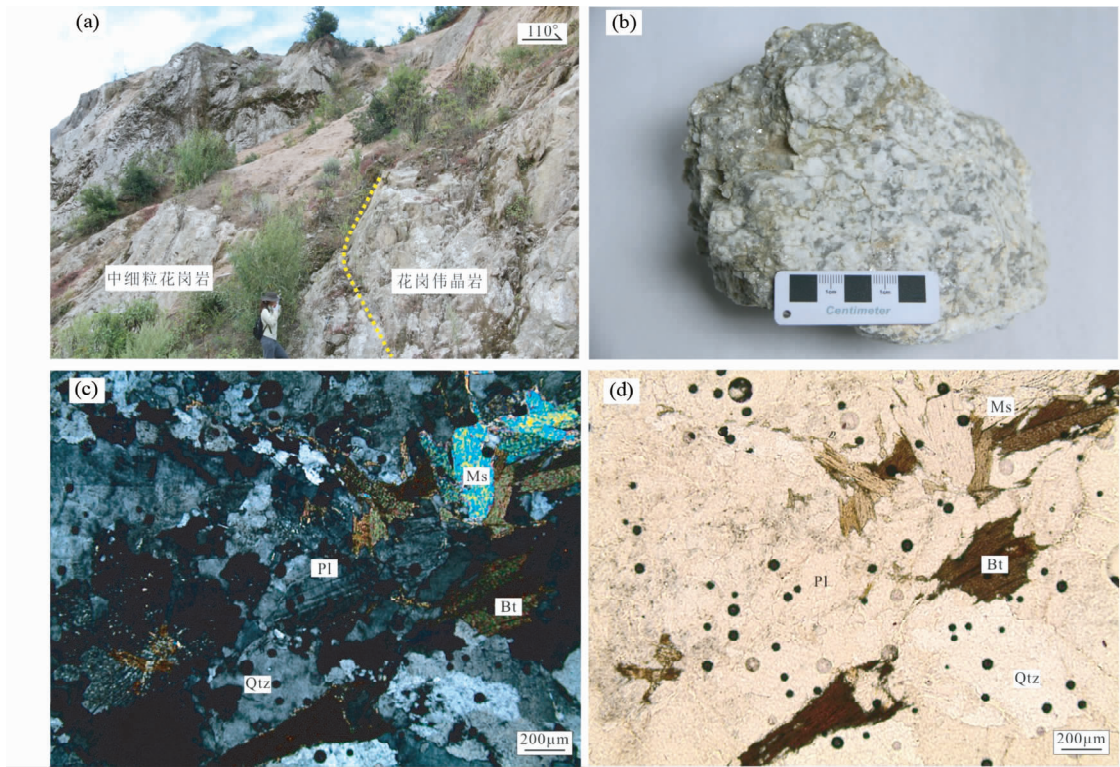


图2 漕涧花岗伟晶岩野外与显微照片

Qtz-石英; Pl-斜长石; Bt-黑云母; Ms-白云母

Fig. 2 Field photographs and photomicrographs of the Caojian granitic pegmatites

在锆石 U-Pb 定年的基础上,选择协 and 度较好的年龄点,在与年龄点相同的微区圈定 Hf 同位素点。锆石 Hf 同位素分析利用 Neptune Plus 多接收等离子质谱完成,激光剥蚀斑束直径一般为 $44\mu\text{m}$,仪器详细参数见 Hu *et al.* (2012)。样品测试过程中以 91500 作为标样,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282308 \pm 12(2\sigma)$,数据的处理利用软件 ICPMSDataCal 9.0 完成。实验过程及数据处理方法见 Liu *et al.* (2010b)。

4 分析结果

4.1 全岩地球化学特征

漕涧花岗伟晶岩样品主微量元素分析结果、标准矿物及主要指标列于表 1。结果显示:花岗伟晶岩样品高硅, SiO_2 含量为 73.02% ~ 75.35%, 平均 73.76%; 富铝, Al_2O_3 的含量为 13.81% ~ 14.89%, 平均 14.28%; 富碱(K_2O 的含量为 6.51% ~ 9.02%, 平均 8.19%; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 的含量为 9.10% ~ 10.79%, 平均 10.27%); 高钾, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 2.51% ~ 5.10%, 平均 4.10%。在花岗岩 TAS 图中(图 3),样品除 CJ-12-11 落入亚碱性系列花岗岩区,其他样品均落入碱性系列花岗岩区。 SiO_2 - K_2O 岩石判别图解中(图 4a),样品均投点于钾玄岩系列。铝饱和指数 A/CNK 为 1.05 ~ 1.13, 平均为 1.10, 为铝饱和系列。分异指数 DI 为 95.29 ~ 97.80, 平均

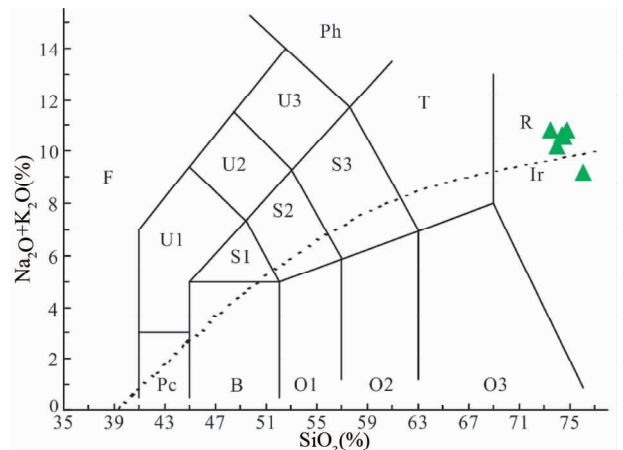


图3 漕涧花岗伟晶岩 TAS 图解

Pc-苦橄玄武岩; B-玄武岩; O1-玄武安山岩; O2-安山岩; O3-英安岩; R-流纹岩; S1-粗面玄武岩; S2-玄武质粗面安山岩; S3-粗面安山岩; T-粗面岩、粗面英安岩; F-副长石岩; U1-碱玄岩、碧玄岩; U2-响岩质碱玄岩; U3-碱玄质响岩; Ph-响岩; Ir-Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性

Fig. 3 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ - SiO_2 plot of granitic pegmatites from Caojian area

96.49, 表明花岗伟晶岩分异程度较高。在标准矿物计算结果中, 出现标准刚玉分子, 含量在 0.90% ~ 1.83% 间(表 1),

表 1 漕涧花岗伟晶岩全岩主量元素 (wt%) 及微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果Table 1 Whole rock major elements (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) data of granitic pegmatites from Caojian area

样品号	CJ-12-11	CJ-12-12	CJ-12-13	CJ-12-15	CJ-12-17A	CJ-12-17B
SiO ₂	75.35	73.65	73.43	73.02	74.03	73.1
TiO ₂	0.02	0.02	0.01	0.04	0.02	0.03
Al ₂ O ₃	13.82	14.21	14.35	14.57	13.81	14.89
Fe ₂ O ₃ ^T	0.07	0.09	0.06	0.24	0.08	0.17
MnO	<0.01	0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01
MgO	0.06	0.06	0.05	0.09	0.05	0.08
CaO	0.63	0.3	0.29	0.6	0.28	0.31
Na ₂ O	2.59	1.79	2.16	2.38	1.77	1.77
K ₂ O	6.51	8.65	8.34	7.69	8.95	9.02
P ₂ O ₅	0.04	0.05	0.04	0.08	0.08	0.07
LOI	0.41	0.32	0.37	0.52	0.29	0.47
Total	99.49	99.14	99.1	99.23	99.35	99.91
A/CNK	1.11	1.11	1.09	1.09	1.05	1.12
A/NK	1.22	1.15	1.14	1.19	1.10	1.17
Na ₂ O + K ₂ O	9.10	10.44	10.50	10.07	10.72	10.79
K ₂ O/Na ₂ O	2.51	4.83	3.86	3.23	5.06	5.10
石英(Q)	34.34	29.85	28.71	28.9	29.29	27.79
钙长石(An)	2.89	1.18	1.19	2.49	0.87	1.09
钠长石(Ab)	22.12	15.33	18.51	20.4	15.12	15.06
正长石(Or)	38.83	51.73	49.92	46.04	53.39	53.61
刚玉(C)	1.48	1.49	1.35	1.45	0.9	1.83
紫苏辉石(Hy)	0.2	0.26	0.17	0.29	0.17	0.33
钛铁矿(Il)	0.04	0.04	0.02	0.08	0.04	0.06
磁铁矿(Mt)	0.01	0.01	0.03	0.17	0.03	0.07
磷灰石(Ap)	0.09	0.12	0.09	0.19	0.19	0.16
Li	10.7	11.6	9.63	17.8	9.03	14.6
Be	6.16	2.65	2.6	5.32	2.79	2.63
Sc	0.99	0.95	0.72	1.53	0.61	1.03
V	0.76	1.2	0.7	2.4	0.72	1.8
Cr	7.57	1.36	6.35	1.75	3.24	2.51
Co	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Ni	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Cu	3.16	2.07	2.62	1.68	1.86	2.45
Zn	3.48	1.62	2.33	5.01	1.81	3.65
Ga	11.6	10.2	10.1	13.4	9.59	11.1
Rb	345	462	455	438	474	469
Sr	41.2	37.8	47.1	53	45	54.4
Y	2.01	1.43	1.2	2.9	1.98	3.68
Zr	23.2	26.9	7.93	21.8	14.8	17
Nb	0.85	1.14	0.61	2.44	0.61	1.57
Cs	7.92	11.5	9.84	11.5	11.7	13.4
Ba	415	493	431	556	615	789
La	4.19	1.1	1.29	3.92	1.58	2.99
Ce	6.31	0.78	1.39	6.38	1.7	4.39
Pr	0.78	0.16	0.2	0.8	0.27	0.57
Nd	2.55	0.52	0.67	2.79	0.97	2.15
Sm	0.56	0.13	0.16	0.71	0.25	0.48
Eu	0.52	0.61	0.58	0.66	0.67	0.77
Gd	0.47	0.12	0.18	0.65	0.27	0.5
Tb	0.09	<0.05	<0.05	0.12	0.06	0.12
Dy	0.44	0.24	0.2	0.63	0.39	0.72
Ho	0.08	0.05	<0.05	0.11	0.07	0.13
Er	0.21	0.14	0.12	0.29	0.21	0.38
Tm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
Yb	0.19	0.14	0.11	0.23	0.17	0.32
Lu	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Hf	1.04	1.27	0.37	0.83	0.69	0.7
Ta	0.24	0.26	0.13	0.5	0.15	0.24
Pb	39.4	42.5	40.7	48.8	41.1	49.2
Th	3.68	0.83	0.95	2.54	0.98	2.1
U	1.38	0.43	0.3	0.69	0.54	1.96
∑REE	16.39	3.99	4.90	17.29	6.61	13.57
LREE/HREE	10.1	4.78	7.03	7.52	4.65	5.11
(La/Yb) _N	15.8	5.64	8.41	12.2	6.67	6.70
δEu	3.02	14.7	10.4	2.92	7.84	4.77

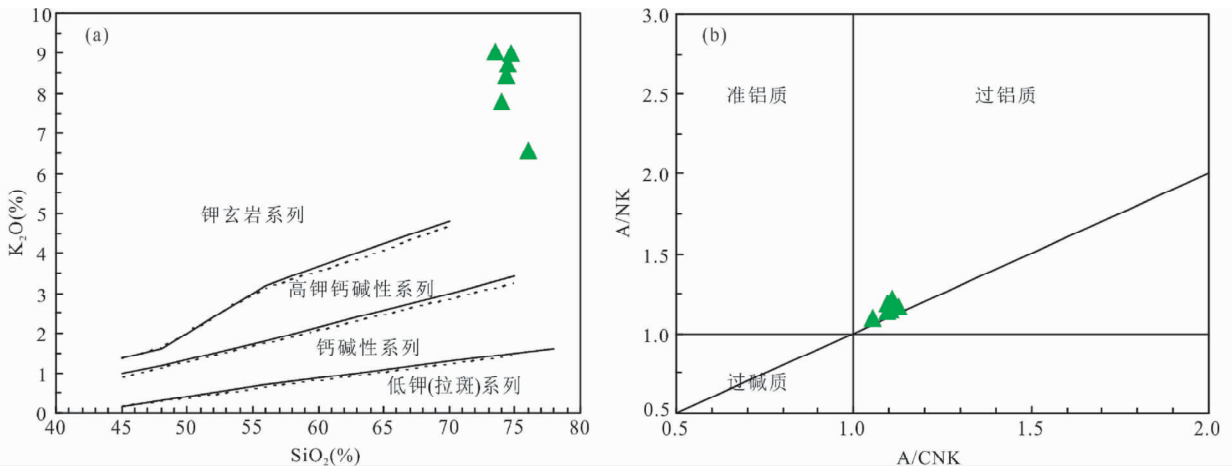


图4 漕涧花岗伟晶岩的 K_2O-SiO_2 图解(a, 实线据 Peccerillo and Taylor, 1976; 虚线据 Middlemost, 1985)及 $A/CNK-A/NK$ 图解(b, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 4 K_2O-SiO_2 (a, solid line after Peccerillo and Taylor, 1976; dash line after Middlemost, 1985) and $A/CNK-A/NK$ (b, after Maniar and Piccoli, 1989) plots for granitic pegmatites from Caojian area

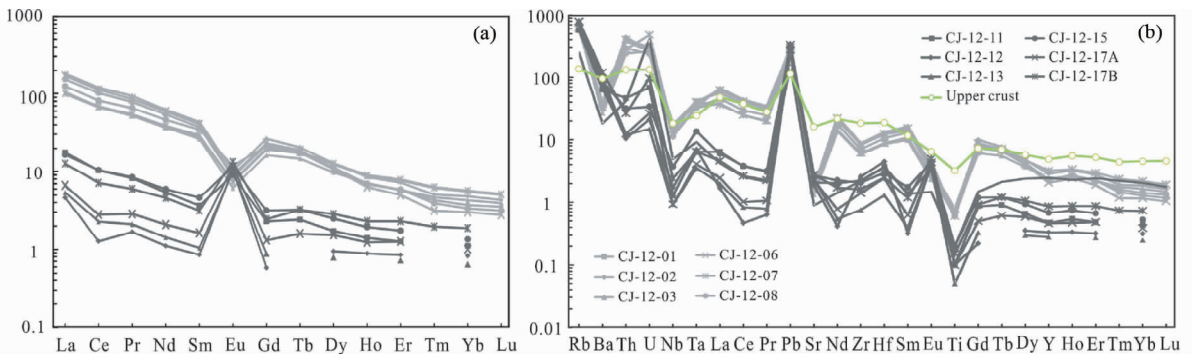


图5 漕涧花岗伟晶岩的球粒陨石标准化稀土元素配分图(a, 标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)及原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 标准化数值据 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values after Sun and McDonough, 1989) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b, normalization values after McDonough and Sun, 1995) for granitic pegmatites from Caojian area

综合表明花岗伟晶岩属于过铝质岩浆岩。

漕涧花岗伟晶岩稀土总量(ΣREE)很低,样品 CJ-12-11、15 和 17B($\Sigma REE = 13.57 \times 10^{-6} \sim 17.29 \times 10^{-6}$)的稀土总量高于样品 CJ-12-12、13 和 17A($\Sigma REE = 3.99 \times 10^{-6} \sim 6.61 \times 10^{-6}$)。轻重稀土比值(LREE/HREE)为 4.6 ~ 10.1, 平均值为 6.5, $(La/Yb)_N$ 为 5.64 ~ 15.8(表 1)。稀土元素球粒陨石标准化图解中(图 5a), 样品均有着相近的变化趋势, 显示轻微的右倾, 属于轻稀土富集型, Eu 正异常显著($\delta Eu = 2.92 \sim 14.7$)。样品具有典型的 M 型稀土元素四分组效应, 第二组 Pm-Sm-Eu-Gd、第三组 Gd-Tb-Dy-Ho 四分组效应比较明显。微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 5b), 样品的微量元素含量比上地壳低一个数量级, 总体上显示富集 Rb、U 等大离子亲石元素(LILE)和 Pb, 相对亏损 Nb、Ti 等高场

强元素(HFSE)。

4.2 锆石微量元素特征

本文对漕涧地区的 2 件花岗伟晶岩样品(CJ-12-11 和 CJ-12-15)进行了锆石 LA-ICP-MS 微量元素微区分析, 测试数据结果见表 2。

CJ-12-11: 锆石颗粒粗大(长约 150 ~ 400 μm , 长宽比 1.5 : 1 ~ 4 : 1), 不透明, 多为长柱状, 部分短柱状, 为自形或半自形晶体。锆石阴极发光(CL)图像中大部分锆石内部呈海绵状, 边部发育韵律环带(图 6)。锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线总体表现为左倾式(重稀土元素富集)(图 7), 除测点 09 外($\delta Ce = 1.09$), 其他测点显示明显的 Ce 正异常($\delta Ce = 1.44 \sim 14.5$, 平均 5.43), Eu 负异常($\delta Eu = 0 \sim 0.08$,

表 2 漕涧地区花岗伟晶岩中锆石 LA-ICP-MS 微量元素分析结果 ($\times 10^{-6}$)Table 2 Rare elements in zircon grains of granitic pegmatites from Caojian area ($\times 10^{-6}$)

测点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	δ Ce	δ Eu
CJ-12-11																	
1	0.0022	3.14	0.21	3.95	13.1	0.26	109	48.2	750	297	1476	294	3007	487	6490	4.65	0.01
2	0.13	1.45	0.26	3.05	6.25	0.54	38.6	22.8	348	113	554	130	1504	218	2941	2.35	0.01
3	0.025	0.44	0.036	0.036	1.77	0.12	23.9	16.3	301	123	724	187	2479	430	4288	1.44	0.08
4	0.040	0.43	0.019	0.25	2.55	0.33	29.8	21.1	394	166	988	275	3906	699	6483	2.96	0.03
5	0.014	0.30	0.0042	0.0000	0.58	0.055	13.2	8.79	171	71.7	430	114	1490	260	2560	3.76	0.07
6	0.035	0.43	0.012	0.25	1.87	0.0000	18.0	14.2	256	87.6	452	109	1293	182	2415	9.21	0.03
7	0.055	0.90	0.097	1.23	7.00	0.12	80.8	51.3	843	315	1604	343	3886	608	7740	5.22	
8	0.047	0.26	0.030	0.47	0.98	0.0000	9.00	7.93	145	52.6	279	69.5	858	124	1547	1.63	
9	0.46	1.94	0.37	3.66	5.41	0.29	27.6	14.6	231	81.4	473	133	1831	310	3114	1.09	0.06
10	0.015	0.48	0.044	0.15	0.43	0.054	11.0	8.38	155	67.4	396	105	1337	228	2309	2.97	0.03
11	0.019	0.82	0.056	0.73	4.80	0.064	46.3	34.0	571	189	933	227	2706	375	5087	3.95	0.01
12	0.054	0.59	0.0074	0.39	2.51	0.21	27.2	19.0	339	137	792	219	3026	523	5085	6.25	0.05
13	0.028	0.32	0.0000	0.14	1.28	0.017	12.6	9.90	184	73.6	420	108	1366	228	2404	8.79	0.01
14	0.020	0.46	0.022	0.0000	0.86	0.081	14.9	10.9	212	90.0	534	139	1755	297	3054	4.85	0.04
15	0.042	0.38	0.0073	0.065	0.95	0.044	12.1	8.65	167	68.9	412	110	1423	239	2443	4.90	0.02
16	0.054	0.60	0.064	0.34	2.20	0.20	25.6	17.1	317	132	790	216	3039	527	5066	2.17	0.05
17	0.010	0.47	0.022	0.35	1.01	0.0007	15.4	11.1	211	88.4	510	135	1751	277	3000	5.60	0.00
18	0.0066	0.46	0.029	0.30	1.15	0.059	11.1	8.03	150	62.4	381	102	1341	222	2278	4.47	0.03
19	0.022	0.43	0.0097	0.28	1.42	0.032	14.0	10.2	199	82.1	465	123	1593	260	2749	7.29	0.01
20	0.024	0.54	0.017	0.26	2.06	0.13	27.5	19.1	344	138	785	210	2830	477	4835	6.24	0.03
21	0.0000	0.66	0.014	0.25	2.17	0.064	24.8	18.6	315	124	701	175	2200	350	3912	14.5	0.02
22	0.020	0.42	0.018	0.28	1.47	0.10	18.7	13.0	237	97.4	577	155	2066	342	3509	5.11	0.03
23	0.0000	0.57	0.021	0.38	1.89	0.071	24.2	16.8	299	119	650	164	2035	322	3633	8.41	0.02
24	0.0099	0.33	0.0087	0.25	1.86	0.14	23.6	16.6	295	120	688	184	2397	396	4123	8.07	0.04
CJ-12-15																	
1	0.010	0.44	0.0000	0.11	1.51	0.13	15.5	11.5	210	89.4	516	131	1658	275	2908	32.4	0.05
2	0.025	0.60	0.056	0.52	1.74	0.19	23.8	15.3	280	111	628	164	2100	351	3675	2.82	0.05
3	0.053	0.64	0.0047	0.33	2.23	0.049	24.1	18.0	336	128	704	178	2154	332	3877	7.67	0.01
4	0.15	1.60	0.30	3.48	5.50	0.36	50.5	28.5	473	187	1027	260	3269	543	5850	1.38	0.04
5	0.025	0.68	0.047	0.43	2.11	0.16	30.3	20.3	369	149	855	214	2680	448	4769	3.73	0.03
6	0.014	0.37	0.017	0.31	1.90	0.15	26.5	17.4	341	142	867	249	3551	634	5831	5.04	0.04
7	0.0070	0.55	0.0000	0.42	1.47	0.13	16.5	11.9	217	93.9	546	142	1818	311	3159	61.2	0.05
8	0.0000	0.44	0.0032	0.023	0.89	0.084	13.1	8.67	175	75.5	444	113	1418	243	2493	42.7	0.04
9	0.0000	0.64	0.027	0.44	3.13	0.27	35.5	25.5	476	191	1133	329	4748	816	7759	7.38	0.05
10	0.0000	1.03	0.017	0.57	5.33	0.100	57.8	40.4	725	263	1402	365	4598	725	8184	19.3	0.01
11	0.094	0.73	0.064	0.34	0.93	0.14	14.3	10.5	200	85.9	496	128	1633	269	2840	2.22	0.06
12	0.11	0.55	0.028	0.74	2.26	0.16	23.1	14.8	272	111	639	171	2245	383	3863	2.36	0.04
13	0.033	0.52	0.015	0.24	1.27	0.060	18.6	13.5	250	100	573	153	1954	326	3389	5.83	0.02
14	0.031	0.34	0.011	0.16	1.93	0.23	21.9	15.4	291	117	671	184	2449	425	4177	4.52	0.07
15	0.0000	0.43	0.021	0.13	2.29	0.17	24.7	17.3	314	127	734	204	2705	457	4586	6.55	0.04
16	0.0000	0.14	0.021	0.062	0.89	0.078	14.2	12.0	214	77.8	410	104	1214	175	2222	2.07	0.04
17	0.0000	0.48	0.0000	0.10	1.92	0.030	30.0	21.5	379	134	685	179	2219	315	3965		0.01
18	0.062	0.95	0.053	1.44	4.19	0.21	37.9	23.6	421	167	926	238	2921	476	5217	3.82	0.03
19	0.012	0.40	0.014	0.030	1.37	0.013	15.2	12.5	229	88.0	479	127	1566	239	2757	6.50	0.01
20	0.0000	0.56	0.0076	0.12	1.80	0.059	28.4	20.7	376	145	802	213	2736	435	4759	22.8	0.01
21	0.0000	0.44	0.0071	0.22	2.23	0.091	34.1	27.4	460	152	766	203	2508	354	4508	19.3	0.02
22	0.0000	0.41	0.0037	0.22	1.92	0.12	26.7	18.8	354	142	799	217	2890	490	4939	35.2	0.03
23	0.47	1.05	0.10	0.97	3.45	0.24	30.7	23.1	369	109	483	110	1234	172	2536	1.13	0.05
24	0.32	2.14	0.54	4.39	9.77	0.49	51.5	23.7	359	128	674	177	2316	390	4137	0.99	0.05
25	0.014	0.53	0.022	0.14	2.53	0.041	32.7	23.0	413	143	771	201	2550	367	4505	6.05	0.01
26	0.024	0.67	0.020	0.39	1.04	0.11	21.9	14.2	265	103	578	157	2051	331	3522	7.07	0.03

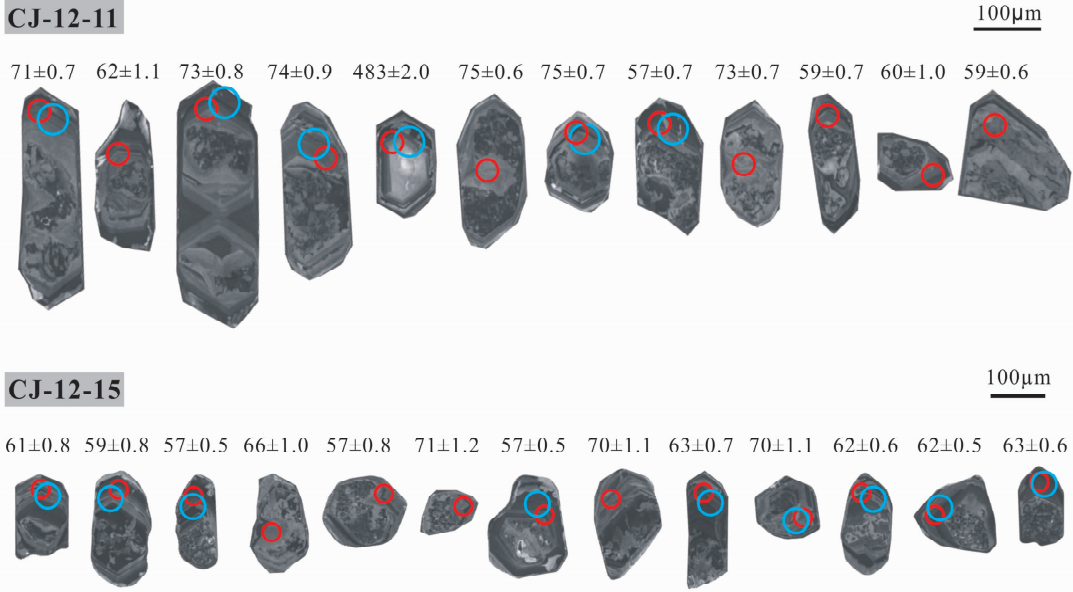


图6 漕涧花岗伟晶岩典型锆石的阴极发光图像

Fig. 6 Cathodoluminescence images of representative zircon of granitic pegmatites from Caojian area

锆石 U 的质量分数较高, $U = 1644 \times 10^{-6} \sim 33212 \times 10^{-6}$, $Th = 37 \times 10^{-6} \sim 309 \times 10^{-6}$ 。所有测点的 Th/U 比值都很低, 介于 0.004 ~ 0.020, 绝大多数变化于 0.004 ~ 0.009 (图 8)。

CJ-12-15: 锆石颗粒较大 (长约 150 ~ 300 μm , 长宽比 1.5 : 1 ~ 3 : 1), 不透明, 短粗柱状, 为自形或半自形晶体。锆石阴极发光特征显示: 锆石颗粒内部多呈海绵状, 边部大多发育清晰的环带结构 (图 6)。锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线看到, 锆石重稀土元素强烈富集, 轻稀土亏损 (图 7)。除测点 23, 24 外 (δCe 分别为 1.13, 0.99), 其他测点显示强烈的 Ce 正异常 ($\delta\text{Ce} = 1.37 \sim 61.2$, 平均 13.4), Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.01 \sim 0.07$, 平均 0.03)。26 颗结晶锆石的 U、Th 值变化于较大的范围, 且锆石 U 的质量分数较高, $U = 7801 \times 10^{-6} \sim 36385 \times 10^{-6}$, $Th = 53 \times 10^{-6} \sim 406 \times 10^{-6}$ 。Th/U 比值非常低, 介于 0.004 ~ 0.01 之间, 绝大多数在 0.004 ~ 0.009 之间 (图 8)。

4.3 锆石 U-Pb 年代学

花岗伟晶岩 (CJ-12-11 和 CJ-12-15) 锆石 LA-ICP-MS 测年数据见表 3。

样品 CJ-12-11 共分析了 24 个测点, 测点选在锆石边部清晰的环带或其阴极发光强度较弱的微区。分析点均落在一致曲线上或其附近, 显示出很好的谐和性。2 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 420Ma、483Ma, 剩余 22 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 85 ~ 54Ma, 跨度较大。12 个位于锆石边部清晰环带的分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 85 ~ 64Ma, 其 $U = 6474 \times 10^{-6} \sim 13861 \times 10^{-6}$, $Th = 37 \times 10^{-6} \sim 148 \times 10^{-6}$ 。22 颗结晶锆石的 U、Th 含量结果表明, Th/U 比值在 0.005 ~

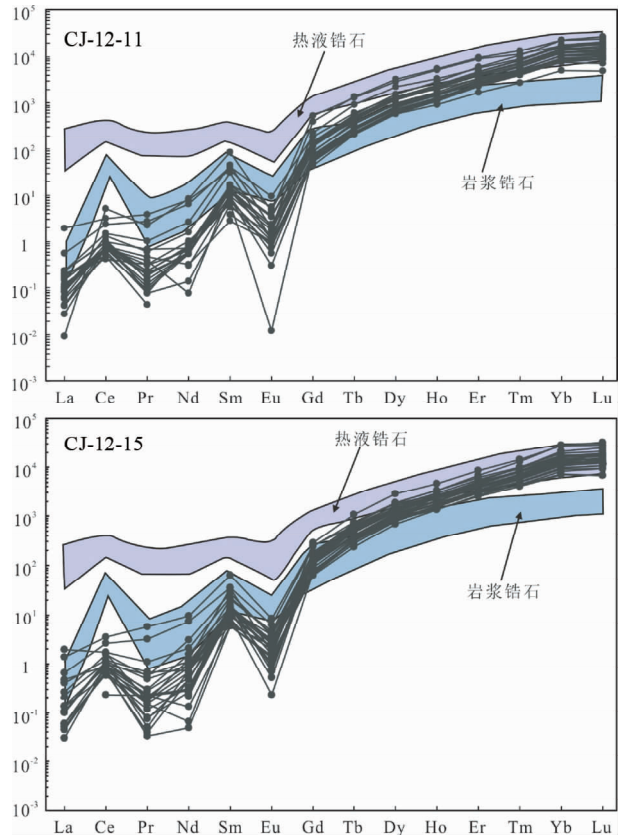


图7 漕涧花岗伟晶岩锆石的球粒陨石标准化 REE 配分图 (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

典型岩浆锆石和热液锆石数据据 Hoskin and Ireland, 2000; Hoskin, 2005

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns for zircons of granitic pegmatites from Caojian area (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

表 3 漕涧地区花岗伟晶岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析结果

Table 3 LA-ICP-MS Zircon U-Pb data of granitic pegmatites from Caojian area

测点号	U	Th	Pb	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$
	$(\times 10^{-6})$				Ratio		Ratio		Ratio		Age (Ma)		Age (Ma)		Age (Ma)	
CJ-12-11																
1	1644	295	169	0.179	0.0553	0.0016	0.5203	0.0222	0.0674	0.0019	433	67	425	15	420	11.5
2	13861	148	118	0.011	0.0478	0.0013	0.0732	0.0021	0.0111	0.0001	87	65	72	2	71	0.7
3	13697	77	97	0.006	0.0461	0.0013	0.0614	0.0019	0.0096	0.0002	400	(328)	61	2	62	1.1
4	21415	101	142	0.005	0.0484	0.0011	0.0576	0.0013	0.0086	0.0001	120	54	57	1	55	0.4
5	8504	52	65	0.006	0.0482	0.0013	0.0756	0.0020	0.0114	0.0001	109	63	74	2	73	0.8
6	10735	58	84	0.005	0.0484	0.0011	0.0772	0.0019	0.0116	0.0001	117	52	76	2	74	0.9
7	5334	236	364	0.044	0.0563	0.0008	0.6070	0.0091	0.0778	0.0004	465	30	482	6	483	2.4
8	6474	37	52	0.006	0.0490	0.0015	0.0785	0.0024	0.0116	0.0001	146	72	77	2	75	0.6
9	8703	88	100	0.010	0.0502	0.0012	0.0916	0.0022	0.0132	0.0001	211	54	89	2	85	0.6
10	7766	41	64	0.005	0.0483	0.0012	0.0706	0.0018	0.0106	0.0001	122	57	69	2	68	0.7
11	33212	309	257	0.009	0.0483	0.0007	0.0635	0.0008	0.0095	0.0001	122	31	63	1	61	0.4
12	20221	94	122	0.005	0.0477	0.0007	0.0551	0.0009	0.0084	0.0000	83	39	54	1	54	0.3
13	8832	73	71	0.008	0.0456	0.0012	0.0736	0.0020	0.0117	0.0001	error		72	2	75	0.7
14	9703	49	69	0.005	0.0460	0.0011	0.0636	0.0017	0.0100	0.0001	error		63	2	64	0.9
15	7087	48	52	0.007	0.0446	0.0013	0.0673	0.0022	0.0109	0.0002	error	error	66	2	70	1.0
16	14569	64	87	0.004	0.0459	0.0010	0.0566	0.0014	0.0089	0.0001	error		56	1	57	0.7
17	8894	73	73	0.008	0.0450	0.0012	0.0694	0.0019	0.0111	0.0001	error		68	2	71	0.9
18	7159	55	58	0.008	0.0487	0.0013	0.0763	0.0020	0.0113	0.0001	200	60	75	2	73	0.7
19	8850	74	74	0.008	0.0446	0.0012	0.0713	0.0019	0.0116	0.0001	error	error	70	2	74	0.8
20	20287	129	125	0.006	0.0443	0.0010	0.0540	0.0013	0.0088	0.0001	error	error	53	1	56	0.6
21	17996	168	117	0.009	0.0467	0.0011	0.0598	0.0015	0.0092	0.0001	32	56	59	1	59	0.7
22	13585	53	86	0.004	0.0459	0.0012	0.0589	0.0017	0.0093	0.0002	error		58	2	60	1.0
23	16816	145	112	0.009	0.0465	0.0010	0.0589	0.0013	0.0091	0.0001	33	43	58	1	59	0.5
24	17220	70	105	0.004	0.0465	0.0009	0.0560	0.0011	0.0087	0.0001	33	44	55	1	56	0.5
CJ-12-15																
1	12754	72	93	0.006	0.0474	0.0011	0.0680	0.0018	0.0104	0.0002	78	54	67	2	67	1.0
2	13967	95	93	0.007	0.0491	0.0010	0.0645	0.0016	0.0095	0.0001	150	48	64	2	61	0.8
3	14740	121	109	0.008	0.0476	0.0009	0.0619	0.0012	0.0094	0.0001	80	44	61	1	60	0.5
4	24771	140	148	0.006	0.0474	0.0006	0.0564	0.0008	0.0086	0.0000	78	33	56	1	55	0.3
5	18882	123	120	0.007	0.0488	0.0009	0.0612	0.0012	0.0090	0.0001	139	47	60	1	58	0.4
6	15196	68	90	0.004	0.0447	0.0008	0.0565	0.0013	0.0091	0.0001	error	error	56	1	59	0.8
7	12935	57	82	0.004	0.0453	0.0009	0.0596	0.0014	0.0095	0.0001	error		59	1	61	0.7
8	7801	65	66	0.008	0.0444	0.0010	0.0700	0.0017	0.0114	0.0001	error	error	69	2	73	0.6
9	20972	109	129	0.005	0.0468	0.0009	0.0571	0.0011	0.0088	0.0001	39	44	56	1	57	0.5
10	36385	406	252	0.011	0.0467	0.0007	0.0607	0.0010	0.0094	0.0001	32	46	60	1	60	0.4
11	10729	53	74	0.005	0.0466	0.0012	0.0662	0.0019	0.0103	0.0002	33	54	65	2	66	1.0
12	14243	60	86	0.004	0.0473	0.0012	0.0581	0.0016	0.0089	0.0001	65	(140)	57	2	57	0.8
13	11900	106	89	0.009	0.0491	0.0013	0.0749	0.0023	0.0110	0.0002	154	56	73	2	71	1.2
14	17030	66	113	0.004	0.0498	0.0012	0.0612	0.0016	0.0089	0.0001	187	57	60	2	57	0.5
15	17895	73	105	0.004	0.0484	0.0011	0.0573	0.0014	0.0086	0.0001	120	54	57	1	55	0.5
16	9973	62	72	0.006	0.0489	0.0013	0.0735	0.0022	0.0108	0.0002	146	63	72	2	69	1.1
17	21683	237	154	0.011	0.0470	0.0010	0.0632	0.0014	0.0097	0.0001	56	46	62	1	62	0.7
18	21540	121	133	0.006	0.0488	0.0011	0.0601	0.0014	0.0089	0.0001	200	52	59	1	57	0.5
19	10565	75	83	0.007	0.0488	0.0014	0.0727	0.0022	0.0108	0.0002	139	64	71	2	69	1.1
20	18179	166	131	0.009	0.0475	0.0013	0.0629	0.0017	0.0096	0.0001	72	97	62	2	61	0.6
21	25357	271	179	0.011	0.0489	0.0011	0.0653	0.0015	0.0096	0.0001	143	54	64	1	62	0.5
22	17970	91	109	0.005	0.0489	0.0012	0.0602	0.0014	0.0089	0.0001	143	56	59	1	57	0.5
23	17508	202	148	0.012	0.0511	0.0013	0.0700	0.0016	0.0099	0.0001	243	56	69	2	64	0.5
24	16272	116	108	0.007	0.0478	0.0012	0.0585	0.0014	0.0088	0.0001	87	56	58	1	57	0.4
25	25312	305	179	0.012	0.0489	0.0010	0.0659	0.0013	0.0097	0.0001	143	45	65	1	63	0.6
26	13057	121	92	0.009	0.0493	0.0012	0.0705	0.0022	0.0102	0.0002	161	56	69	2	66	1.1

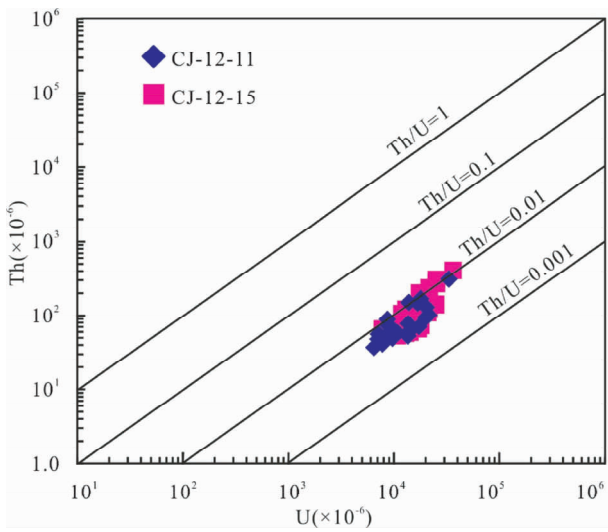


图8 漕涧花岗伟晶岩锆石 Th/U 比值图解

Fig. 8 Th/U ratio plot for zircons of granitic pegmatites from Caojian area

0.01 之间。点号 02、05、06、08、13 和 18 的年龄值集中, 锆石 U-Pb 谐和年龄为 73.44 ± 1.0 Ma (MSWD = 1.03) (图 9a); 另外一组 11 个分析点主要位于锆石边部阴极发光较弱区域, 环带不显著, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 62 ~ 54 Ma, 其 $U = 13585 \times 10^{-6} \sim 33212 \times 10^{-6}$, $\text{Th} = 53 \times 10^{-6} \sim 309 \times 10^{-6}$, Th/U 比值在 0.004 ~ 0.009 之间, 其中 5 个年龄较为集中的分析点 (点号 03、16、21、22 和 23) 锆石 U-Pb 谐和年龄为 58.79 ± 1.0 Ma (MSWD = 2.5) (图 9a)。

样品 CJ-12-15 共分析了 26 个测点, 均落在 U-Pb 年龄谱和曲线上及其附近, 年龄变化于 73 ~ 55 Ma 间, 跨度较大。7 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 73 ~ 66 Ma, 其中 6 个位于锆石边部清晰环带的分析点 (点 01、11、13、16、19、26), 其

$U = 7801 \times 10^{-6} \sim 13057 \times 10^{-6}$, $\text{Th} = 53 \times 10^{-6} \sim 121 \times 10^{-6}$, Th/U 比值在 0.004 ~ 0.009 之间, 给出的锆石 U-Pb 谐和年龄为 67.12 ± 1.60 Ma (MSWD = 4.2) (图 9b); 另外一组 19 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 64 ~ 55 Ma, 其 $U = 12935 \times 10^{-6} \sim 36385 \times 10^{-6}$, $\text{Th} = 58 \times 10^{-6} \sim 406 \times 10^{-6}$, Th/U 比值在 0.006 ~ 0.011 之间, 可以得出 2 组锆石 U-Pb 谐和年龄, 分别为 61.23 ± 0.66 Ma, MSWD = 1.7 (分析点 02、03、07、10、17、20、21、25) 和 57.19 ± 0.60 Ma, MSWD = 3.3 (分析点 05、06、12、14、18、22、24)。

文中测定的 U-Pb 年龄结果可以得出, 样品锆石谐和年龄为 73 ~ 67 Ma, 代表花岗伟晶岩的形成年龄, 另外一组锆石 U-Pb 谐和年龄为 61 ~ 57 Ma, 可能是气水热液长期活动的结果。

4.4 锆石 Hf 同位素

本文对两件花岗伟晶岩样品 (CJ-12-11, 15) 中的 30 颗锆石进行了 Hf 同位素分析, 结果见表 4。样品分析点 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 的比值均小于 0.002, 表明由 ^{176}Lu 衰变而形成放射性成因的 Hf 极少, 因此可用 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的值 (吴福元等, 2007)。样品分析点的年龄跨度大, 主要变化于 85 ~ 55 Ma 间, 其 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 为 0.282442 ~ 0.282601, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布范围为 -10.1 ~ -4.7, 集中于 -6.7 ~ -5.7, 对应的 Hf 同位素地壳模式年龄 t_{DM}^{c} 为 1492 ~ 1565 Ma, 集中于 1310 ~ 1360 Ma; 样品 CJ-12-11 一个继承锆石 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 420 Ma) 的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 为 0.282447, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 -2.2, Hf 同位素地壳模式年龄 t_{DM}^{c} 为 1548 Ma; 另外一个继承锆石 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 483 Ma) 的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 为 0.282364, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 -3.8, Hf 同位素地壳模式年龄 t_{DM}^{c} 为 1695 Ma (表 4, 图 10)。

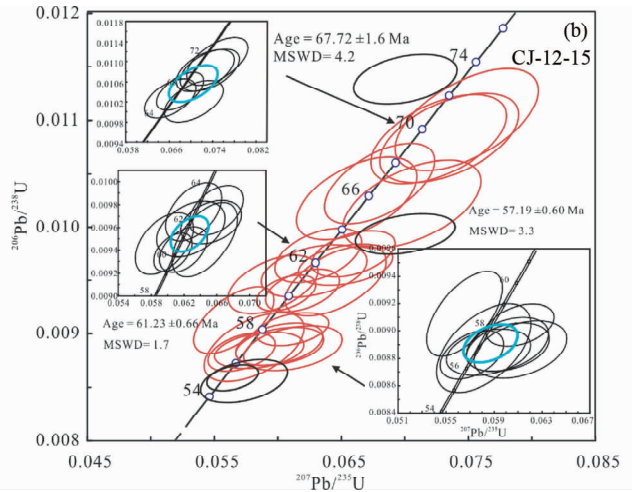
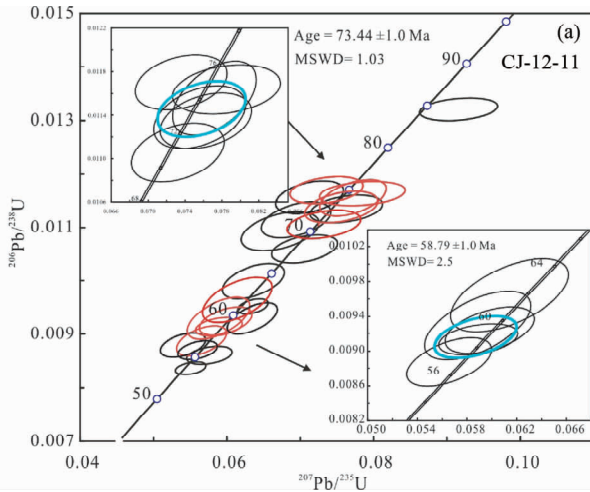


图9 漕涧花岗伟晶岩的 U-Pb 谐和年图

Fig. 9 U-Pb concordia plots of granitic pegmatites from Caojian area

表4 漕涧花岗伟晶岩锆石 Hf 同位素数据

Table 4 Zircon Hf isotopic date of granitic pegmatites from Caojian area

测点号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
CJ-12-11											
1	420	0.051135	0.001688	0.282461	0.000026	0.282447	-11.0	-2.2	1139	1548	-0.95
2	71	0.071399	0.002195	0.282445	0.000039	0.282442	-11.6	-10.1	1177	1783	-0.93
3	55	0.044885	0.001599	0.282568	0.000021	0.282566	-7.2	-6.1	984	1516	-0.95
4	73	0.024598	0.000841	0.282522	0.000020	0.282521	-8.9	-7.3	1029	1607	-0.97
5	74	0.017405	0.000493	0.282502	0.000020	0.282502	-9.5	-7.9	1046	1649	-0.99
6	483	0.056192	0.001735	0.282380	0.000021	0.282364	-13.9	-3.8	1256	1695	-0.95
7	85	0.031124	0.001080	0.282463	0.000028	0.282462	-10.9	-9.1	1117	1731	-0.97
8	68	0.020043	0.000710	0.282542	0.000023	0.282541	-8.1	-6.7	997	1564	-0.98
9	61	0.015875	0.000476	0.282480	0.000017	0.282480	-10.3	-9.0	1076	1707	-0.99
10	54	0.027724	0.000952	0.282578	0.000020	0.282577	-6.9	-5.7	953	1492	-0.97
11	75	0.016081	0.000520	0.282511	0.000023	0.282510	-9.2	-7.6	1035	1629	-0.98
12	64	0.032423	0.001113	0.282562	0.000021	0.282560	-7.4	-6.1	980	1523	-0.97
13	57	0.032318	0.001186	0.282580	0.000019	0.282579	-6.8	-5.6	956	1487	-0.96
14	71	0.023586	0.000820	0.282546	0.000018	0.282545	-8.0	-6.5	994	1553	-0.98
15	56	0.022962	0.000731	0.282535	0.000018	0.282535	-8.4	-7.2	1007	1586	-0.98
16	56	0.032652	0.001141	0.282555	0.000021	0.282554	-7.7	-6.5	990	1543	-0.97
CJ-12-15											
1	61	0.045848	0.001585	0.282602	0.000024	0.282601	-6.0	-4.7	934	1435	-0.95
2	55	0.029831	0.001057	0.282541	0.000021	0.282540	-8.2	-7.0	1007	1574	-0.97
3	58	0.033689	0.001189	0.282570	0.000021	0.282568	-7.2	-5.9	971	1509	-0.96
4	59	0.018227	0.000612	0.282551	0.000020	0.282550	-7.8	-6.6	982	1550	-0.98
5	61	0.019626	0.000722	0.282559	0.000017	0.282558	-7.5	-6.2	974	1531	-0.98
6	57	0.062139	0.002140	0.282575	0.000022	0.282572	-7.0	-5.8	988	1500	-0.94
7	57	0.041021	0.001515	0.282565	0.000018	0.282564	-7.3	-6.1	985	1520	-0.95
8	55	0.031274	0.001096	0.282586	0.000020	0.282585	-6.6	-5.4	944	1473	-0.97
9	62	0.020136	0.000519	0.282485	0.000019	0.282485	-10.1	-8.8	1070	1694	-0.98
10	69	0.020292	0.000627	0.282527	0.000021	0.282526	-8.7	-7.2	1016	1597	-0.98
11	61	0.047641	0.001610	0.282564	0.000020	0.282562	-7.4	-6.1	990	1521	-0.95
12	62	0.029561	0.000926	0.282516	0.000019	0.282515	-9.0	-7.7	1039	1626	-0.97
13	57	0.057764	0.001943	0.282563	0.000020	0.282561	-7.4	-6.2	1000	1526	-0.94
14	63	0.033257	0.001027	0.282504	0.000019	0.282503	-9.5	-8.1	1058	1653	-0.97

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10^4 \times \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$. $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln | 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$. $t_{\text{DM}}^{\text{C}} = t_{\text{DM}} - (t_{\text{DM}} - t) \times [(f_{\text{cc}} - f_{\text{s}}) / (f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})]$. $f_{\text{Lu}/\text{Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$. 其中: $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}$ (Söderlund *et al.*, 2004); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测量值; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} = 0.282772$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997; Griffin *et al.*, 2002); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} = 0.015$; $f_{\text{cc}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; $f_{\text{s}} = f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$; $f_{\text{DM}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; t 为锆石结晶年龄

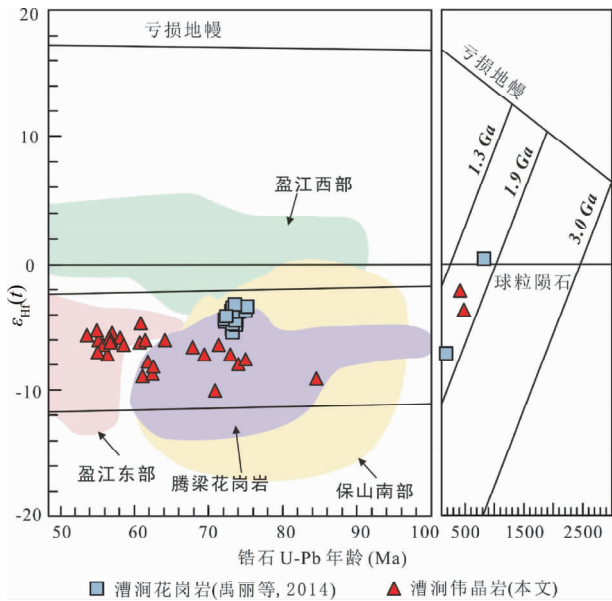


图 10 花岗伟晶岩体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图解

腾梁以及盈江花岗岩数据引用 Xu *et al.*, 2012; 保山南部花岗岩数据引自董美玲等, 2013

Fig. 10 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. ages plot for granitic pegmatites from Caojian area

5 讨论

5.1 花岗伟晶岩的锆石成因

漕涧地区花岗伟晶岩样品 (CJ-12-11 和 CJ-12-15) 的锆石在形态和阴极发光特征上表现出岩浆锆石与热液蚀变锆石过渡特征。稀土元素球粒陨石标准化图解中 (图 7), 花岗伟晶岩锆石重稀土元素强烈富集, 轻稀土元素含量比典型的

岩浆锆石低 1 个数量级左右, 且具有明显的正 Ce 异常和负 Eu 异常, 与岩浆锆石相似, 然而锆石极低的 Th/U 比值 ($\text{Th}/\text{U} = 0.004 \sim 0.02$), 又明显不同于岩浆锆石 (Hoskin and Black, 2000)。对于热液成因的锆石, 锆石稀土元素表现为轻稀土元素富集, 其又明显不同于典型的热液锆石 (图 7)。通过图解 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}-\text{La}$ 和 $\text{Ce}/\text{Ce}^*-(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ (Hoskin, 2005) 可以判断锆石的成因。根据图 11, 花岗伟晶岩锆石绝大多数的分析点落于岩浆锆石和热液锆石的过渡区域, 表明锆石形成于岩浆与热液的过渡阶段。

5.2 花岗伟晶岩的成因以及同漕涧花岗岩的时空和成因联系

在空间上, 通过野外观察, 漕涧花岗伟晶岩体与二云母花岗岩呈逐渐过渡的关系 (图 2a); 在时间上, 2 件花岗伟晶岩脉样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄集中于两组, 分别为 73 ~ 67 Ma, 61 ~ 57 Ma, 漕涧二云母花岗岩的结晶年龄为 73 Ma (禹丽等, 2014), 说明花岗伟晶岩较之二云母花岗岩近于同时形成或略晚于花岗岩, 反映伟晶岩脉是由中粒花岗岩进一步演化形成, 在形成过程中受气水热液长期连续活动的结果。地球化学方面, 花岗伟晶岩与漕涧花岗岩表现出相似的特征, 主量元素分析结果显示高硅、富碱、过铝质与钾玄质。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线上, 显示明显的正 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 2.92 \sim 14.7$), 属于轻稀土富集型。岩脉稀土元素含量很低 (总量 $3.99 \times 10^{-6} \sim 17.29 \times 10^{-6}$), 从花岗伟晶岩到二云母花岗岩, 稀土元素除了 Eu 之外, 含量明显降低, 其可能与岩浆演化过程中副矿物的结晶分离作用有关, 如磷灰石等。这些副矿物对残余熔体稀土元素的分配系数较高, 影响稀土元素含量。图 12 反映文中花岗伟晶岩稀土元素含量的变化可能受磷灰石与褐帘石等的分异造成。

锆石 Hf 同位素在地质演化与岩浆岩物源示踪方面具有

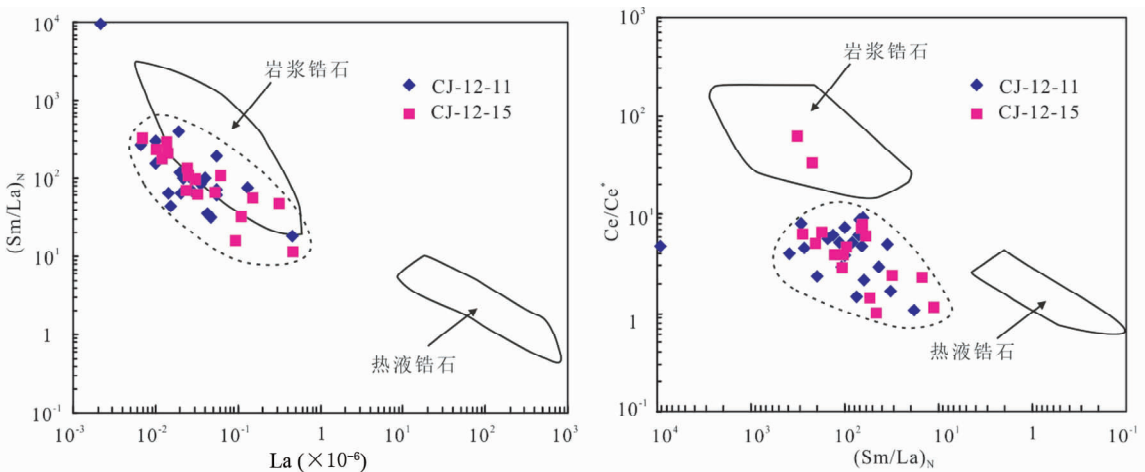


图 11 花岗伟晶岩体锆石的 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}-\text{La}$ (a) 和 $\text{Ce}/\text{Ce}^*-(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ (b) 判别图解 (据 Hoskin, 2005)

Fig. 11 Discrimination diagrams of $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ vs. La (a) and Ce/Ce^* vs. $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ (b) for zircons from Caojian granitic pegmatites (after Hoskin, 2005)

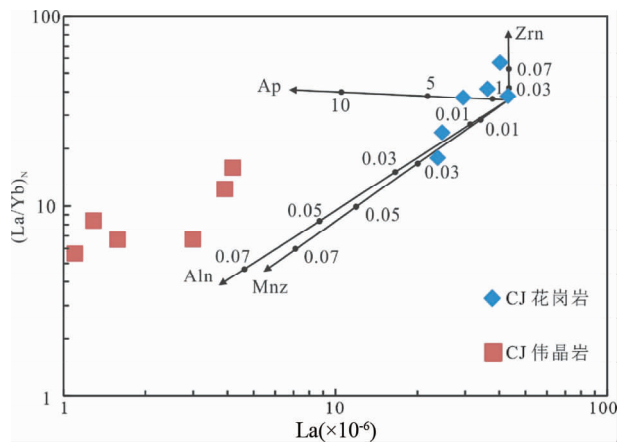


图 12 漕涧花岗伟晶岩的 $(La/Yb)_N$ -La 图解

磷灰石分配系数数据 Fujimaki, 1986; 锆石和褐帘石分配系数数据 Mahood and Hildreth, 1983; 独居石分配系数数据 Yurimoto *et al.*, 1990. Pl-斜长石; Kf-钾长石; Bt-黑云母; Aln-褐帘石; Mnz-独居石; Ap-磷灰石; Zrn-锆石

Fig. 12 $(La/Yb)_N$ vs. La plot of the Caojian granitic pegmatites

很好的优越性(吴福元等, 2007)。本次研究的花岗伟晶岩脉的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值显示集中的负值, 变化范围为 $-10.1 \sim -4.7$, 集中在 $-6.7 \sim -5.7$ 之间(图 10)。负的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值表明形成伟晶岩脉的岩浆源区通常为地壳物质的熔融(Hawkesworth and Kemp, 2006), 集中的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值说明了岩浆源区的单一性。Hf 同位素组成的演化图中, 分析点分布于球粒陨石演化线之下, 相比之下花岗伟晶岩较二云母花岗岩($\varepsilon_{Hf}(t) = -5.0 \sim -3.5$) (禹丽等, 2014) 具有相对较低的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值范围, 在测试的误差范围之内(4σ ; Wu *et al.*, 2006), 对应的 Hf 同位素地壳模式年龄 t_{DM}^C 为 $1260 \sim 1565$ Ma, 集中于 $1310 \sim 1360$ Ma, 与花岗岩的 Hf 同位素地壳模式年龄(t_{DM}^C 为 $1352 \sim 1496$ Ma) 较为一致。花岗伟晶岩相对于母体花岗岩, $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值略偏低, 该原因有待进一步研究。

通过对比可发现, 花岗伟晶岩与花岗岩有着亲缘关系。阴极发光特征、Th、U 比值以及锆石稀土元素特征表明岩体经历了长期的气水热液活动。一般认为, 花岗伟晶岩是由富含挥发份的花岗质母岩的残余岩浆结晶分异产生(Fuertes-Fuente *et al.*, 2000)。文中花岗伟晶岩稀土元素含量突变可能与磷灰石、褐帘石的分异有关(图 12)。因此, 我们推断漕涧地区花岗伟晶岩与中粒花岗岩存在密切的关系, 为花岗岩体后期岩浆演化的结果。

5.3 形成环境

腾冲-保山地块晚白垩世和古近纪花岗岩(岩石类型主要以 S 型花岗岩为主), 岩体锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值大都为负值, 且变化范围很大(图 10), 岩体物质来源几乎囊括整个上、下地壳。漕涧花岗伟晶岩脉锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值分布范围集中于 -6.7

~ -5.7 , Hf 同位素地壳模式年龄 t_{DM}^C 集中于 $1310 \sim 1360$ Ma, 暗示了岩体可能来源于中元古代地壳的重熔作用。根据样品的测年结果, 伟晶岩锆石 U-Pb 年龄与其紧邻的漕涧花岗岩形成时代大致相当, 其记录的形成环境也与漕涧花岗岩相似。早白垩世, 中特提斯洋(介于拉萨地块和羌塘地块之间的怒江缝合带被普遍认为是中特提斯主洋)的闭合(Zhu *et al.*, 2013), 导致腾冲地块和保山地块拼合, 继而进入陆陆碰撞造山阶段(Deng *et al.*, 2010a, 2014a; Metcalfe, 2011, 2013; Zhu *et al.*, 2013), 腾冲-保山地块西侧地壳增厚。介于印度地块和拉萨地块之间的印度河-雅江缝合带系新特提斯主洋, 其开启时间与怒江洋伊始俯冲时间几乎同步(Metcalfe, 2013; 邓军等, 2013), 洋盆最终闭合于 ~ 55 Ma (Najman *et al.*, 2010)。新特提斯洋片回撤, 导致弧后地区处于拉张的背景下, 引起先存加厚地壳(早白垩世中特提斯洋闭合后的碰撞过程以及新特提斯洋俯冲消减均会对保山地块地壳增厚产生影响)的减压熔融, 使得在腾冲-保山地块形成了分布广泛的花岗岩。漕涧花岗伟晶岩形成时间为 $73 \sim 67$ Ma, 与新特提斯洋东向俯冲的构造背景有着密切关系。在雅江洋俯冲消减之后, 印度板块向北运动与欧亚板块碰撞(Chatterjee *et al.*, 2013)。印度-欧亚陆陆碰撞承接新特提斯的俯冲而发生, 三江地区遭受挤压褶皱, 这次碰撞不仅引起喜马拉雅山脉的形成, 还造成腾冲-保山微陆块内部地壳的强烈缩短, 导致地壳的加厚, 同时形成了分布广泛的花岗岩, 拉萨地块与滇西高黎贡山群变质锆石也记录了该期构造事件(李再会等, 2012)。本文漕涧花岗伟晶岩得到的 $61 \sim 57$ Ma 的年龄值形成于印支-欧亚板块的碰撞环境下。

6 结论

(1) 保山地块北部漕涧地区花岗伟晶岩体锆石 LA-ICP-MS 同位素定年结果表明, 漕涧花岗伟晶岩的年龄值集中于两组, 分别为 $73 \sim 67$ Ma、 $61 \sim 57$ Ma, 属晚白垩世和古新世。锆石 CL 图像、Th/U 比值以及稀土元素特征均表明锆石结晶于岩浆期后热液活动环境中。

(2) 花岗伟晶岩体具有富碱、过铝质与钾玄质的特征; 稀土总量较低, 稀土分配曲线上表现出强烈的 Eu 正异常; 与漕涧地区花岗岩相比, 二者存在在密切的关系, 由花岗岩体后期岩浆热液作用形成花岗伟晶岩。

(3) 花岗伟晶岩体锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 显示较为集中的负值($-10.1 \sim -4.7$)。漕涧花岗伟晶岩与保山地块先存加厚地壳元古代基底物质的减压熔融有关, 其形成于新特提斯洋俯冲末期至随后发生的印亚大陆碰撞初期的构造背景下。

致谢 实验室工作得到中国地质大学(武汉)胡兆初教授、童喜润博士和林琳博士的帮助; 野外工作和文章撰写过程中得到了马楠博士、江露露硕士的帮助。作者一并对他们表示最诚挚的感谢!

References

- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243 – 258
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Yunnan Province (BGMRY). 1990. *Regional Geology of Yunnan Province*. Beijing: Geological publishing House, 1 – 658 (in Chinese)
- Chatterjee S, Goswami A and Scotese CR. 2013. The longest voyage: Tectonic, magmatic, and paleoclimatic evolution of the Indian plate during its northward flight from Gondwana to Asia. *Gondwana Research*, 23(1): 238 – 267
- Chen FK, Li XH, Wang XL, Li QL and Siebel W. 2007. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China. *International Journal of Earth Sciences*, 96(6): 1179 – 1194
- Deng J, Xiao CH, Wang QF, Zhou XZ, Yang LQ, Zhang J and Zhao Y. 2010a. Influence of the Chuxiong Yao' an earthquake on the mineralization of hot springs in the Tengchong geothermal area, southwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 1391 – 1400
- Deng J, Wang QF, Yang LQ, Wang YR, Gong QJ and Liu H. 2010b. Delineation and explanation of geochemical anomalies using fractal models in the Heqing area, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 105(3): 95 – 105
- Deng J, Yang LQ and Wang CM. 2011. Research advances of superimposed orogenesis and metallogenesis in the Sanjiang Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2501 – 2509 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang CM and Li GJ. 2012. Style and process of the superimposed mineralization in the Sanjiang Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1349 – 1361 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Ge LS and Yang LQ. 2013. Tectonic dynamic system and compound orogeny: Additionally discussing the temporal-spatial evolution of Sanjiang orogeny, Southwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1099 – 1114 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang QF, Li GJ, Li CS and Wang CM. 2014a. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China. *Gondwana Research*, 26(2): 419 – 437
- Deng J, Wang QF, Li GJ and Santosh M. 2014b. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China. *Earth-Science Reviews*, 138: 268 – 299
- Deng J and Wang QF. 2015. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework. *Gondwana Research*, doi:10.1016/j.gr.2015.10.003
- Deng J, Wang QF, Li GJ, Hou ZQ, Jiang CZ and Danyushevsky L. 2015a. Geology and genesis of the giant Beiya porphyry-skarn gold deposit, northwestern Yangtze Block, China. *Ore Geology Reviews*, 70: 457 – 485
- Deng J, Wang QF, Li GJ and Zhao Y. 2015b. Structural control and genesis of the Oligocene Zhenyuan orogenic gold deposit, SW China. *Ore Geology Reviews*, 65: 42 – 54
- Dong GC, Mo XX, Zhao ZD, Zhu DC, Goodman RC, Kong HL and Wang S. 2013. Zircon U-Pb dating and the petrological and geochemical constraints on Lincang granite in western Yunnan, China; Implications for the closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 282 – 294
- Dong ML, Dong GC, Mo XX, Zhu DC, Nie F, Xie XF, Wang X and Hu ZC. 2012. Geochronology and geochemistry of the Early Palaeozoic granitoids in Baoshan block, western Yunnan and their implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1453 – 1464 (in Chinese with English abstract)
- Dong ML, Dong GC, Mo XX, Zhu DC, Nie F, Yu JC, Wang P and Luo W. 2013. The Mesozoic-Cenozoic magmatism in Baoshan Block, western Yunnan and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3901 – 3913 (in Chinese with English abstract)
- Fuertes-Fuente M, Martin-izard A, Boiron MC and Viñuela M. 2000. P-T path and fluid evolution in the Franqueira granitic pegmatite, Central Galicia, northwestern Spain. *The Canadian Mineralogist*, 38(5): 1163 – 1175
- Fujimaki H. 1986. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between zircon, apatite, and liquid. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94(1): 42 – 45
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson NJ, O'Reilly SY, Xu X and Zhou X. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3): 237 – 269
- Hawkesworth CJ and Kemp AIS. 2006. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chemical Geology*, 226(3–4): 144 – 162
- Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423 – 439
- Hoskin PWO and Ireland TR. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28(7): 627 – 630
- Hoskin PWO. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637 – 648
- Hu ZC, Liu YS, Gao S, Liu WG, Zhang W, Tong XR, Lin L, Zong KQ, Li M, Chen HH, Zhou L and Yang L. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391 – 1399
- Li GJ, Wang QF, Yu L, Hu ZC, Ma N and Huang YH. 2013. Closure time of the Ailaoshan Paleo-Tethys ocean; Constraints from the zircon U-Pb dating and geochemistry of the Late Permian granitoids. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3883 – 3900 (in Chinese with English abstract)
- Li GJ, Wang QF, Huang YH, Gao L and Yu L. 2015. Petrogenesis of Middle Ordovician peraluminous granites in the Baoshan block: Implications for the Early Paleozoic tectonic evolution along East Gondwana. *Lithos*, doi: 10.1016/j.litho.2015.10.012
- Li ZH, Tang FW, Lin SL, Cong F, Xie T and Zhou GF. 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology of the beryl-bearing pegmatite and its geological significance, western Yunnan, Southwest China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(2): 554 – 565 (in Chinese with English abstract)
- Liang YH, Chung SL, Liu DY, Xu YG, Wu FY, Yang JH, Wang YB and Lo CH. 2008. Detrital zircon evidence from Burma for reorganization of the eastern Himalayan river system. *American Journal of Science*, 308(4): 618 – 638
- Liao SY, Wang DB, Tang Y, Yin FG, Sun ZM and Sun J. 2013. LA-ICP-MS U-Pb age of two-mica granite in the Yunlong tin-tungsten metallogenic belt in Three River region and its geological implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(4): 450 – 462 (in Chinese with English abstract)
- Liu FL, Robinson PT, Gerdes A, Xue HM, Liu PH and Liou JG. 2010a. Zircon U-Pb ages, REE concentrations and Hf isotope compositions of granitic leucosome and pegmatite from the north Sulu UHP terrane in China; Constraints on the timing and nature of partial melting. *Lithos*, 117(1–4): 247 – 268
- Liu S, Hu RZ, Gao S, Feng CX, Huang ZL, Lai SC, Yuan HL, Liu XM, Coulson IM, Feng GY and Wang T. 2009. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and origin of Early Palaeozoic I-type granite from the Tengchong-Baoshan block, western Yunnan Province, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(2–3): 168 – 182
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34 – 43
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010b.

- 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. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010c. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535-1546
- Ludwig KR. 2003. *ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. California: Berkeley, Berkeley Geochronology Center
- Mahood G and Hildreth W. 1983. Large partition coefficients for trace elements in high-silica rhyolites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(1): 11-30
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223-253
- Metcalfe I. 2011. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland. *Gondwana Research*, 19(1): 3-21
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1-33
- Middlemost EAK. 1985. *Magma and Magmatic Rocks*. London: Longman, 1-266
- Mo XX, Lu FX, Shen SY, Zhu QW, Hou ZQ and Yang KH. 1993. *Sanjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization*. Beijing: Geological Publishing House, 1-267 (in Chinese)
- Najman Y, Appel E, Boudagher, Fadel M, Bown P, Carter A, Garzanti E, Godin L, Han JT, Liebke U, Oliver G, Parrish R and Vezzoli G. 2010. Timing of India-Asia collision: Geological, biostratigraphic, and palaeomagnetic constraints. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 115(B12): 10.1029/2010JB007673
- Nie F, Dong GC, Mo XX, Zhu DC, Dong ML and Wang X. 2012. Geochemistry, zircon U-Pb chronology of the Triassic granites in the Changning-Menglian suture zone and their implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1465-1476 (in Chinese with English abstract)
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3): 311-324
- Sone M and Metcalfe I. 2008. Parallel Tethyan Sutures in mainland SE Asia: New insights for Palaeo-Tethys closure. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2-3): 166-179
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345
- Tao Y, Zhu FL, Ma YS, Ye L and Chen ZT. 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Zhibenshan granite from Baoshan block. *Acta Mineralogica Sinica*, (Suppl. 1): 329 (in Chinese)
- Tao Y, Hu RZ, Zhu FL, Ma YS, Ye L and Chen ZT. 2010. Ore-forming age and the geodynamic background of the Hetanping lead-zinc deposit in Baoshan, Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1760-1772 (in Chinese with English abstract)
- Wang CM, Deng J, Carranza EJM, and Santosh M. 2014a. Tin metallogenesis associated with granitoids in the southwestern Sanjiang Tethyan Domain: Nature, deposit types, and tectonic setting. *Gondwana Research*, 26(2): 576-593
- Wang QF, Deng J, Li CS, Li GJ, Yu L and Qiao L. 2014b. The boundary between the Simao and Yangtze blocks and their locations in Gondwana and Rodinia: Constraints from detrital and inherited zircons. *Gondwana Research*, 26(2): 438-448
- Wang YJ, Xing XW, Cawood PA, Lai SC, Xia XP, Fan WM, Liu HC and Zhang FF. 2013. Petrogenesis of early Paleozoic peraluminous granite in the Sibumasu Block of SW Yunnan and diachronous accretionary orogenesis along the northern margin of Gondwana. *Lithos*, 182-183: 67-85
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1-2): 105-126
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Yang QJ, Lan JB, Luo ZY, Huang XL, Shi YR and Xie LW. 2012. Temporal-spatial distribution and tectonic implications of the batholiths in the Gaoligong-Tengliang-Yingjiang area, western Yunnan: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 151-175
- Yang LQ, Liu JT, Zhang C, Wang QF, Ge LS, Wang ZL, Zhang J and Gong QJ. 2010. Superimposed orogenesis and metallogenesis: An example from the orogenic gold deposits in Ailaoshan gold belt, Southwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1723-1739 (in Chinese with English abstract)
- Yang LQ, Deng J, Zhao K and Liu JT. 2011. Tectono-thermochronology and gold mineralization events of orogenic gold deposits in Ailaoshan orogenic belt, Southwest China: Geochronological constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2519-2532 (in Chinese with English abstract)
- Yang QJ, Xu YG, Huang XL, Luo ZY and Shi YR. 2009. Geochronology and geochemistry of granites in the Tengliang area, western Yunnan: Tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1092-1104 (in Chinese with English abstract)
- Yang XJ, Jia XC, Xiong CL, Bai XZ, Huang BX, Luo G and Yang CB. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of metamorphic basic volcanic rock in Gongyanghe Group of southern Gaoligong Mountain, western Yunnan Province, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 31(2): 264-276 (in Chinese with English abstract)
- Ye L, Gao W, Cheng ZT, Yang YL and Tao Y. 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb geochronology and petrology of the Muchang alkali granite, Zhenkang County, western Yunnan Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 1488-1499
- Yu L, Li GJ, Wang QF and Liu XF. 2014. Petrogenesis and tectonics significance of the Late Cretaceous magmatism in the northern of the Baoshan block: Constraints from bulk geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic composition. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2709-2724 (in Chinese with English abstract)
- Yurimoto H, Duke EF, Papike JJ and Shearer CK. 1990. Are discontinuous chondrite-normalized REE patterns in pegmatitic granite systems the results of monazite fractionation? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(7): 2141-2145
- Zhong DL. 1998. *The Paleo-Tethys Orogenic Belt in West of Sichuan and Yunnan*. Beijing: Science Press, 1-230 (in Chinese)
- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL, Mo XX, Chung SL, Hou ZQ, Wang LY and Wu FY. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1-2): 241-255
- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL, Dilek Y, Hou ZQ and Mo XX. 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 23(4): 1429-1454

附中文参考文献

- 邓军, 杨立强, 王长明. 2011. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展. *岩石学报*, 27(9): 2501-2509
- 邓军, 王长明, 李龚健. 2012. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程. *岩石学报*, 28(5): 1349-1361
- 邓军, 葛良胜, 杨立强. 2013. 构造动力体制与复合造山作用——

- 兼论三江复合造山带时空演化. 岩石学报, 29(4): 1099 - 1114
- 董美玲, 董国臣, 莫宣学, 朱弟成, 聂飞, 谢许峰, 王霞, 胡兆初. 2012. 滇西保山地块早古生代花岗岩类的年代学、地球化学及意义. 岩石学报, 28(5): 1453 - 1464
- 董美玲, 董国臣, 莫宣学, 朱弟成, 聂飞, 于峻川, 王鹏, 罗微. 2013. 滇西保山地块中-新生代岩浆作用及其构造意义. 岩石学报, 29(11): 3901 - 3913
- 李龚健, 王庆飞, 禹丽, 胡兆初, 马楠, 黄钰涵. 2013. 哀牢山古特提斯洋缝合时限: 晚二叠世花岗岩类锆石 U-Pb 年代学与地球化学制约. 岩石学报, 29(11): 3883 - 3900
- 李再会, 唐发伟, 林仕良, 丛峰, 谢韬, 邹光富. 2014. 滇西含绿柱石伟晶岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 44(2): 554 - 565
- 廖世勇, 王冬兵, 唐渊, 尹福光, 孙志明, 孙洁. 2013. “三江”云龙锡(钨)成矿带晚白垩世二云母花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 32(4): 450 - 462
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 朱勤文, 侯增谦, 杨开辉. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1 - 267
- 聂飞, 董国臣, 莫宣学, 朱弟成, 董美玲, 王霞. 2012. 滇西昌宁-孟连带三叠纪花岗岩地球化学、年代学及其意义. 岩石学报, 28(5): 1465 - 1476
- 陶琰, 朱飞霖, 马言胜, 叶霖, 程增涛. 2009. 保山地块志本山花岗岩锆石 La-ICP-MS 分析. 矿物学报, (S1): 329
- 陶琰, 胡瑞忠, 朱飞霖, 马言胜, 叶霖, 程增涛. 2010. 云南保山核桃坪铅锌矿成矿年龄及动力学背景分析. 岩石学报, 26(6): 1760 - 1772
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185 - 220
- 杨立强, 刘江涛, 张闯, 王庆飞, 葛良胜, 王中亮, 张静, 龚庆杰. 2010. 哀牢山造山型金成矿系统: 复合造山构造演化与成矿作用初探. 岩石学报, 26(6): 1723 - 1739
- 杨立强, 邓军, 赵凯, 刘江涛. 2011. 哀牢山造山带金成矿时序及其动力学背景探讨. 岩石学报, 27(9): 2519 - 2532
- 杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 罗震宇, 石玉若. 2009. 滇西腾冲-梁河地区花岗岩的年代学、地球化学及其构造意义. 岩石学报, 25(5): 1092 - 1104
- 杨学俊, 贾小川, 熊昌利, 白宪洲, 黄柏鑫, 罗改, 杨朝碧. 2012. 滇西高黎贡山南段公养河群变质基性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 31(2): 264 - 276
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 - 658
- 禹丽, 李龚健, 王庆飞, 刘学飞. 2014. 保山地块北部晚白垩世岩浆岩成因及其构造指示: 全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约. 岩石学报, 30(9): 2709 - 2724
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社, 1 - 230