

滇中峨山地区中元古代末期碱闪霓石正长岩体的发现及其对格林威尔造山的约束

刘军平^{1,2,3}, 关学卿^{4*}, 孙柏东², 李静⁵, 王小虎^{2,3}, 宋冬虎⁴

LIU Junping^{1,2,3}, GUAN Xueqing^{4*}, SUN Baidong², LI Jing⁵, WANG Xiaohu^{2,3}, SONG Donghu⁴

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216;

3. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650051;

4. 云南省国土规划设计院, 云南 昆明 650216;

5. 云南省地质调查局, 云南 昆明 650051

1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, Yunnan, China;

3. MNR Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Kunming 650051, Yunnan, China;

4. Yunnan Institute of Land and Resources Planning and Design, Kunming 650216, Yunnan, China;

5. Yunnan Bureau of Geological Survey, Kunming 650051, Yunnan, China

摘要:碱性岩通常形成于岩石圈拉张环境,其源于深部地幔物质的部分熔融,是深部地球动力学过程在地壳中的记录,也是探究地球深部物质组成、动力学过程及物理化学环境的良好对象。1:5万区域地质调查在峨山县甸中地区新发现一个正长岩岩体,岩性为碱闪霓石正长岩。系统的研究表明,碱闪霓石正长岩富硅($\text{SiO}_2 = 67.40\% \sim 67.79\%$)、富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 12.50\% \sim 12.73\%$)、贫镁($\text{MgO} = 0.10\% \sim 0.28\%$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.75 \sim 0.80$,属一套钠质碱性岩系列(大西洋型)。岩石富集K、Rb等大离子亲石元素及Ta、Zr、Hf等高场强元素,而亏损Ti、P、U等高场强元素及Sr、Ba等大离子亲石元素。稀土元素配分曲线也较特殊,轻稀土元素向右陡倾, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3.61 \sim 4.79$,重稀土元素向左缓倾, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.53 \sim 0.62$;具有中等程度的负Eu异常及弱负Ce异常, $\delta\text{Eu} = 0.41 \sim 0.43$, $\delta\text{Ce} = 0.74 \sim 0.88$,暗示岩浆可能形成于较高的氧逸度环境,总体上具有亏损中稀土元素的特点。LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 1007 ± 10 Ma ($\text{MSWD} = 2.3, n = 21$),属中元古代末期,为扬子板块上已知形成时代最早的碱性岩体,限定了滇中地区格林威尔造山运动结束的时限。在Th/Hf-Ta/Hf图解上,样品均落入地幔柱玄武岩区,暗示该碱性岩体可能为地幔柱成因,岩浆基本上未受到陆壳物质的混染,主体上可能属下地幔石榴子石橄榄岩的低程度部分熔融的产物;岩浆上升过程中可能与上地幔尖晶石橄榄岩发生了同化混染,重稀土元素含量快速升高;亏损中稀土元素、富Nb等特点暗示尖晶石地幔橄榄岩可能经历过俯冲流体的交代及中等程度的部分熔融。本次发现的碱闪霓石正长岩体应是格林威尔造山挤压作用向伸展作用转变的产物。

关键词:锆石U-Pb测年;峨山县甸中地区;碱闪霓石正长岩;碱性岩;格林威尔造山运动

中图分类号:P534.3;P588.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)12-2123-12

收稿日期:2020-05-06;修订日期:2020-10-15

资助项目:云南省自然资源厅地勘基金项目《云南省1:5万撒马基幅、因民幅、贵城幅、舒姑幅区域地质调查》(编号:YNGT[2019]-05)、中国地质调查局项目《云南区域地质调查片区总结与服务产品开发或全国陆域及海区地质图件更新及共享》(编号:121201102000150012-02)、《云南1:5万二街、易门县、鸣矣河、上浦贝幅区域地质调查》(编号:DD20160017)

作者简介:刘军平(1983-),男,在读博士生,高级工程师,从事基础地质调查研究工作。E-mail:271090834@qq.com

* **通信作者:**关学卿(1989-),男,工程师,从事矿产与规划研究工作。E-mail:237661300@qq.com

Liu J P, Guan X Q, Sun B D, Li J, Wang X H, Song D H. The discovery of Late Mesoproterozoic alkali hornblende-aegirite syenite in E' shan area of central Yunnan and its constraints on Greenwell orogeny. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40 (12): 2123-2134

Abstract: Alkaline rocks are usually formed in the lithosphere stretching environment, which is derived from the partial melting of deep mantle material. As a record of deep geodynamic processes in the earth's crust, it is a good exploration of the deep matter composition, dynamic process and physical and chemical environment of the earth. In the 1 : 50000 regional geological survey, a syenite rock mass was newly discovered in the Dianzhong area of E' shan County, and its lithology is alkali hornblende-aegirite-syenite. Systematic studies show that alkali hornblende-aegirite syenite rich in silicon ($\text{SiO}_2 = 67.40\% \sim 67.79\%$) and alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 12.50\% \sim 12.73\%$), depleted in magnesium ($\text{MgO} = 0.10\% \sim 0.28\%$) and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.75 \sim 0.80$, is a set of sodium alkaline rock series (Atlantic type). It is rich in large ion lithophile elements such as K and Rb, and high field strength elements such as Ta, Zr, and Hf, while depleted in high field strength elements such as Ti, P and U as well as large ion lithophile element, such as Sr, Ba. The rare earth distribution curve is also special, the light rare earth element is steeply inclined to the right, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.61 \sim 4.79$, and the heavy rare earth element is gently inclined to the left, $(\text{Ga}/\text{Yb})_N = 0.53 \sim 0.62$. The moderately negative Eu anomaly and weak negative Ce anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.41 \sim 0.43$, $\delta\text{Ce} = 0.74 \sim 0.88$) suggest that the magma may be formed in a higher oxygen fugacity environment and generally has the characteristics of depleted middle rare earth elements. LA-ICP-MS zircon U-Pb age is 1007 ± 10 Ma ($\text{MSWD} = 2.3$, $n = 21$), which belongs to the end of the Middle Proterozoic. It is the earliest alkaline pluton formed on the Yangtze plate, which defines the time limit for the end of the Greenville Orogenic Movement in Central Yunnan Province. On the Th/Hf-Ta/Hf diagram, the samples fell into the "Mantle Hot Pillar Basalt" area, suggesting that the pluton might be the cause of the mantle plume, indicating that the magma is basically not contaminated by the continental crust, and the pluton might be the product of low partial melting of lower mantle garnet peridotite. During magma rise, it might be assimilated and mixed with the upper mantle spinel peridotite, and the content of heavy rare earth elements increases rapidly. The characteristics of depleted middle rare earth elements and enriched Nb compositions suggest that the mantle spinel peridotite might have experienced the metasomatism of subduction fluid and moderate partial melting. The alkali hornblende-aegirite syenite found here is the product of the conversion from Greenville Orogenic compression to extension.

Key words: zircon U-Pb dating; Dianzhong area of E' shan County; alkali hornblende-aegirite syenite; alkaline rocks; Greenville Orogenic Movement

扬子板块西缘的元古宙构造-岩浆活动较强烈,出露大量的元古宙侵入岩,该期侵入岩以花岗岩类为主,含少量基性-超基性岩^[1-6],岩浆活动主要集中在晋宁期。由于其形成的构造环境对研究扬子板块大地构造格局和形成演化及 Rodinia 超大陆的恢复重建具有重要意义,受到广泛关注。大量元古宙岩浆岩成因及热源研究结果表明,扬子板块周缘经历了早期大洋板片俯冲作用(1160~930 Ma)和晚期大规模陆缘裂解(830~635 Ma)^[1-6]。近年,国内不断有中元古代末期岩浆活动及格林威尔造山运动的报道^[7-8],代表中国南方中元古代晚期-新元古代早期 Rodinia 超大陆聚合过程;而格林威尔运动之后,相较于稳定的克拉通东南缘,扬子板块西缘一直处于活动大陆边缘构造背景,且存在与 Rodinia 超大陆裂解事件相适应的由挤压构造到伸展构造体制转换的过程^[9-14],但由于未找到直接反映该过程的证据,使该地区的构造动力学背景和机制认识较薄弱。本次选择最新发现的

滇中峨山县甸中碱闪霓石正长岩体为研究对象,开展系统的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、岩石学和地球化学研究,并探讨其侵位时代、岩石成因、物质来源和构造背景。甸中碱闪霓石正长岩体记录了扬子板块西缘中元古代末期(约 1000 Ma)挤压作用向伸展作用转换的过程,为 Rodinia 超大陆在扬子板块的构造体制转换提供了关键性证据,也为扬子板块西缘中元古代构造-岩浆活动提供了新的约束。

1 地质背景

研究区位于滇中峨山县甸中地区,扬子陆块区之上扬子古陆块的康滇基底断隆带,地层区划隶属于华南地层大区扬子地层区康滇地层分区的昆明地层小区(图 1)。研究区出露地层有中元古界昆阳群黑山头组(Pt_2hs)、富良棚组(Pt_2f)、大龙口组(Pt_2d)、美党组(Pt_2m),上三叠统干海子组(T_3g)、舍资组(T_3s)及侏罗系禄丰群(JL)(图 1)。中元古界昆

阳群为一套浅变质的陆源碎屑-碳酸盐岩-火山岩建造;上三叠统干海子组为一套河湖相含煤碎屑岩建造,舍资组为一套湖泊砂岩-粉砂岩组合;侏罗系禄丰群为一套潮湿-干旱气候环境的红色碎屑岩建造^①。

2 样品采集及测试

2.1 样品采集

本次研究的样品采自易门-罗茨断裂以东,地点位于峨山县甸中镇大龙潭乡(图 1),地理坐标为东经 102°07'02"、北纬 24°25'15"。行政区划属甸中镇大龙潭乡管辖。甸中碱闪霓石正长岩体呈岩株状产出,出露面积约 2.5 km²,被后期的辉石岩岩枝侵入,野外侵入界面清楚,中部被北北西向断裂切割,岩体岩性为浅灰色细粒碱闪霓石正长岩,整个岩体由中心至边部矿物颗粒由中粒变为细粒。岩体侵入昆阳群大龙口组碳酸盐岩中(图 1),围岩普遍角岩化,岩石受后期构造影响仅发生碎裂岩化、绢云母化。采集的较新鲜浅灰色碱闪霓石正长岩(D0121),主要由钾长石(80%)、钠-更长石(15%)、霓石(4%)和碱性闪石(1%)组成,含少量黝方石、榍石、磷灰石(0~2%)。岩石具似斑状细粒

半自形粒状结构,主要由细粒半自形粒状钾长石组成(少量钾长石颗粒粒度较粗大,构成似斑晶),含少量碱性暗色矿物及钠-更长石。碱性暗色矿物以霓石为主,少部分可能为碱性闪石类矿物。岩石中浅色矿物自形程度较暗色矿物好,反映暗色矿物结晶顺序较浅色矿物晚,其结晶顺序为:钾长石-斜长石-碱性暗色矿物,符合多数碱性岩的矿物结晶顺序特征。其中,钾长石半自形板状,粒径为 0.3~1 mm,部分颗粒格子双晶,为微斜长石,部分具条纹结构,为条纹长石。粒径多在细粒范围内,少部分粒径较粗大,构成似斑晶。少部分颗粒见成分(钾长石-钠长石)环带构造。普遍见钠长石交代现象,边缘具钠长石净边结构。钠-更长石粒径为 0.1~1 mm,沿钾长石间隙充填、交代,其内普遍见斑块状钾长石残余。霓石粒径为 0.1~5 mm,主要呈他形粒状,少部分呈半自形柱状,具辉石式解理,干涉色被本身颜色掩盖,部分颗粒因颜色差异显示环带状构造,部分颗粒具榍石反应边。碱性闪石粒径为 0.5~0.8 mm,褐黄色,具闪石式解理和绿色霓石反应边。样品手标本及镜下特征见图 2。

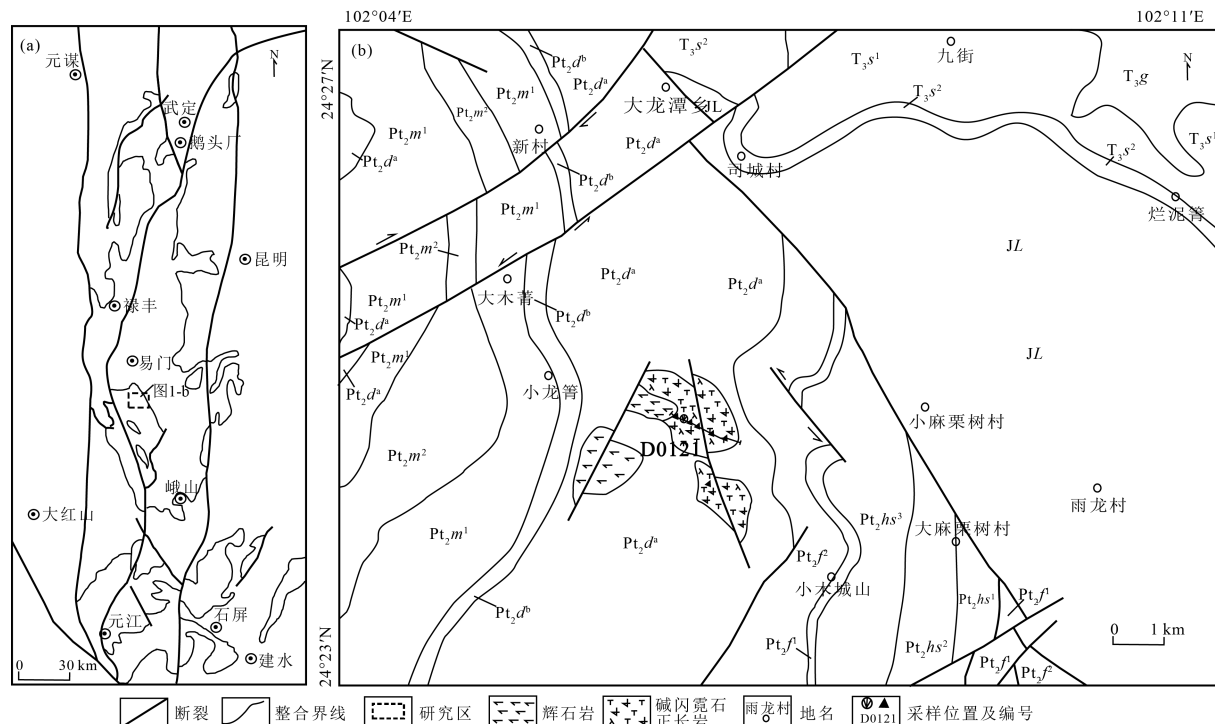


图 1 研究区地质简图(a)及采样位置图(b)

Fig. 1 Simplified geological map of study area (a) and sampling location (b)

Pt₂hs—中元古界昆阳群黑山头组;Pt₂f—中元古界昆阳群富良棚组;Pt₂d—中元古界昆阳群大龙口组;
Pt₂m—中元古界昆阳群美党组;T₃g—上三叠统干海子组;T₃s—上三叠统舍资组;JL—侏罗系禄丰群

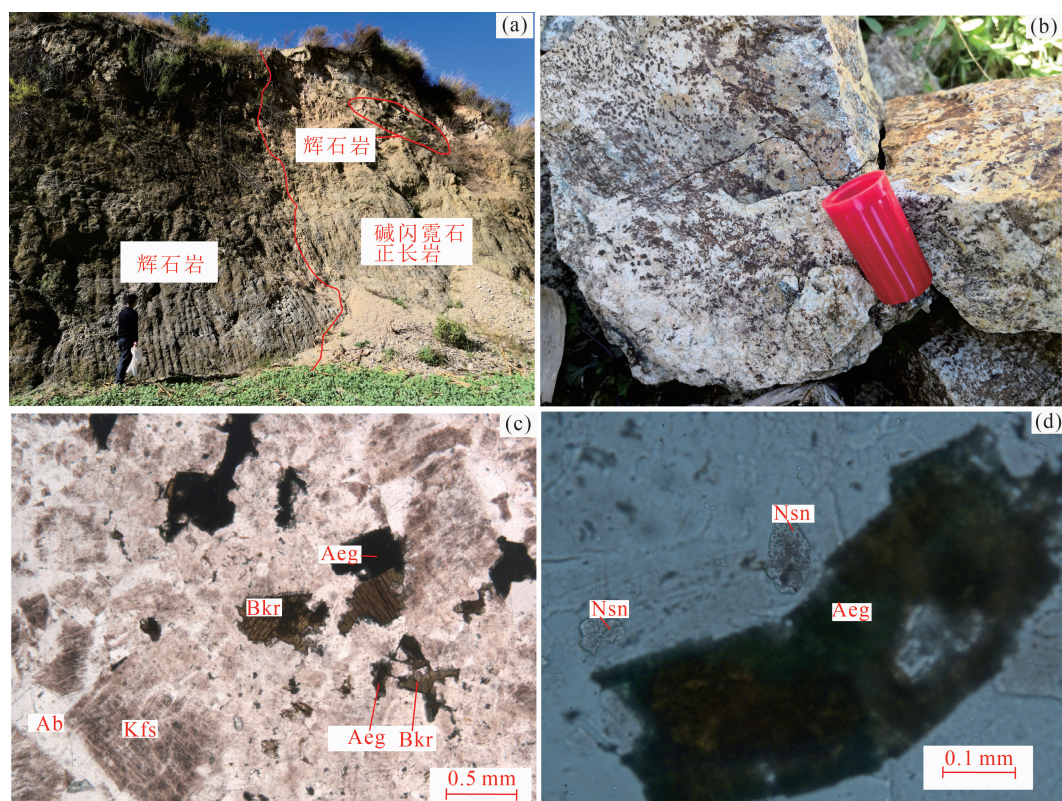


图2 碱闪霓石正长岩野外照片(a)、手标本(b)及典型结构显微照片(c,d)

Fig. 2 Outcrop photo(a), hand specimen (b) and micrographs (c,d) showing typical textures of alkali hornblende-aegirite syenite
Aeg—霓石; Bkr—棕闪石; Kfs—钾长石; Nsn—黝方石; Ab—钠长石

2.2 样品测试

碱闪霓石正长岩(D0122)锆石单矿物分选在南京宏创地质勘查技术服务有限公司实验室完成。原岩样品粉碎成200目的粉末,淘洗后除去轻矿物,将得到的重砂部分经电磁选后得到含少量杂质的锆石样品,最后在双目镜下挑选出锆石晶体,选择晶形较好、无裂隙的锆石颗粒(部分具磨蚀特征),制作成环氧树脂样品靶,打磨样品靶,使锆石的中心部位暴露出来,然后进行抛光。拍摄锆石颗粒的反射光、透射光、阴极发光(CL)图像和U-Pb同位素测定需根据其特点选取合适的颗粒及区域。

锆石U-Pb同位素定年在湖北省地质实验室测试中心重点实验室利用LA-ICP-MS分析完成。测试仪器采用由美国Coherent Inc公司生产的GeoLasPro全自动版193 nm ArF准分子激光剥蚀系统(LA)和美国Agilent公司生产的7700X型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)联用构成的激光剥蚀

电感耦合等离子体质谱分析系统(LA-ICP-MS)。激光剥蚀系统配置了由澳大利亚国立大学开发研制的匀化器,由10根长度不同的细PV管组成,激光剥蚀产生的细小粉末样品通过匀化器装置后,因通过长短不同的管道所需的时间略不同而使样品脉冲信号得到平滑,从而有效降低激光脉冲剥蚀样品而产生的信号波动^[15-16]。锆石微量元素含量利用NIST610作为外标,Si作为内标进行定量计算。锆石U-Pb定年分析采用锆石标准年龄物质91500作为外标进行同位素分馏校正,每分析6~8个样品点分析2次91500标样。样品测试时,背景信号采集10 s,样品剥蚀40 s,管路吹扫10 s,信号采集时间总共为60 s。样品的同位素比值和元素含量采用ICP MSDataCal 9.0进行处理分析,年龄加权平均值的计算及锆石年龄谱和图的绘制采用Isoplot 3.0^[17-19]完成。采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值的误差为 2σ , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄误差为95%置信度。

选择 5 件岩石样品在武汉上谱分析科技有限公司进行主量、稀土和微量元素分析。样品磨碎至 200 目。主量元素使用 X-射线荧光光谱仪 (XRF-1500) 法测试。用 0.6 g 样品和 6 g 四硼酸锂制成的玻璃片在 ShimadzuXRF-1500 上测定氧化物的质量分数值,精度优于 2%~3%。微量及稀土元素利用酸溶法制备样品,使用 ICP-MS (Element II) 测试,分析精度符合 GSR-1 和 GSR-2 国家标准,当元素质量分数值大于 10×10^{-6} 时,精度优于 5%,当质量分数值小于 10×10^{-6} 时,精度优于 10%。

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素

甸中正长岩岩体主体为浅灰色碱闪霓石正长

岩,主量元素含量见表 1。5 件样品的 SiO_2 含量为 67.40%~67.79%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为 12.50%~12.73%, MgO 为 0.10%~0.28%, ΣFeO 为 2.39%~2.72%, Al_2O_3 为 15.72%~16.11%, 具有显著的富碱、贫镁、贫铁的特点; $\text{A}/\text{CNK}=0.85\sim0.88$, 平均 0.87; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.75\sim0.79$, 属钠质碱性岩系列, 即大西洋型碱性岩。在 SiO_2 -alk 图解中, 样品点均位于碱性岩区(图略); 在 CIPW 标准矿物组合中出现了少量石英、透辉石、紫苏辉石分子, 未出现磁铁矿、刚玉、钙长石分子; 在 ANOR-Q' 分类图解(图 3-a) 中, 样品点均落入石英正长岩区域(6' 区), 与实际矿物命名有一定差异, 可能是标准矿物与实际矿物种类之间的差异造成的。5 件样品的 A/CNK 值为 0.85~0.88, 在 A/CNK - A/NK 图解(图 3-b) 中均落入过碱性岩区, 显示了明显的碱性岩特点。

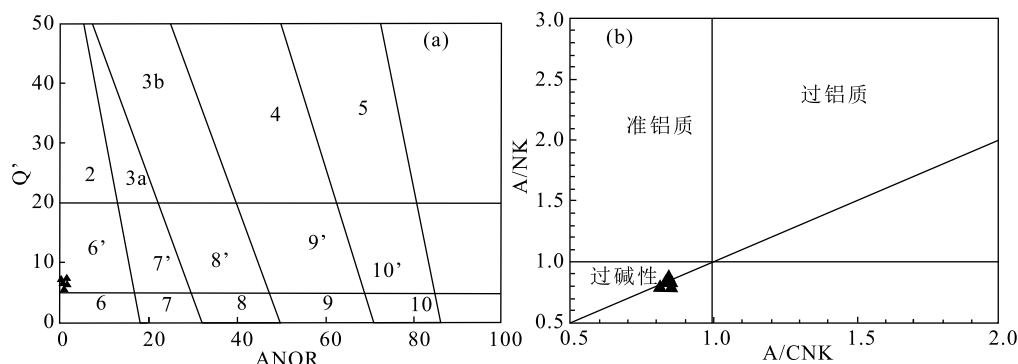


图 3 碱闪霓石正长岩 ANOR-Q' (a) 及 A/CNK-A/NK (b) 图解^[20]

Fig. 3 ANOR-Q' (a) and A/CNK-A/NK (b) diagrams of alkali hornblende-aegirite syenite

2—碱长花岗岩; 3a—正长花岗岩; 3b—二长花岗岩; 4—花岗闪长岩; 5—英云闪长岩; 6—石英碱长正长岩; 6'—石英正长岩; 7—石英二长岩; 7'—石英二长闪长岩、石英二长辉长岩; 8—二长岩; 8'—石英二长闪长岩、石英二长辉长岩; 9—二长闪长岩、二长辉长岩; 10—闪长岩、辉长岩、斜长岩; $Q' = Q / (Q + \text{Or} + \text{Ab} + \text{An}) \times 100$; $\text{ANOR} = \text{An} / (\text{Or} + \text{An}) \times 100$

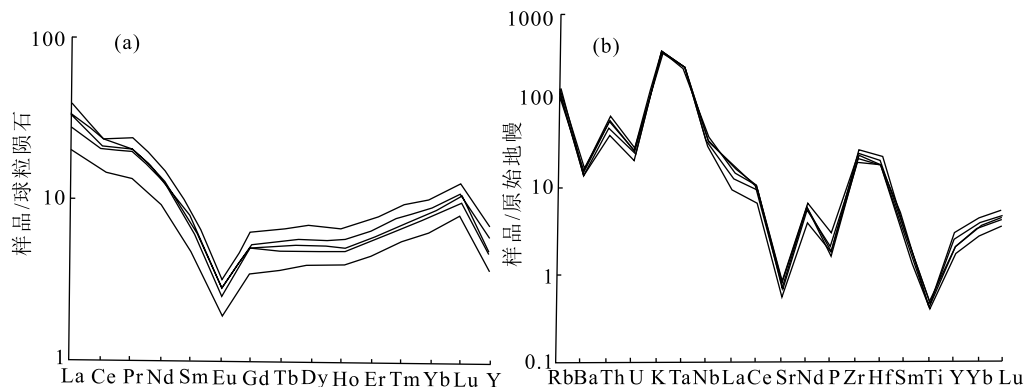


图 4 碱闪霓石正长岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图 (a) 及原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b)

(球粒陨石和原始地幔标准化数据参考文献[21])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized diagrams for trace elements (b) of alkali hornblende-aegirite syenite

表 1 碱闪霓石正长岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Major, trace element and REE compositions of alkali hornblende-aegirite syenite

样品编号	D0121-1	D0121-2	D0121-3	D0121-4	D0121-5	样品编号	D0121-1	D0121-2	D0121-3	D0121-4	D0121-5
SiO ₂	67.79	67.77	67.64	67.8	68.03	Tb	0.23	0.25	0.18	0.26	0.32
TiO ₂	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	Dy	1.61	1.71	1.29	1.89	2.30
Al ₂ O ₃	15.99	15.78	16.17	15.81	16.01	Ho	0.35	0.36	0.29	0.42	0.49
Fe ₂ O ₃	1.44	1.65	1.55	1.62	1.48	Er	1.19	1.24	0.98	1.41	1.67
FeO	1.10	1.24	1.19	1.21	1.14	Tm	0.22	0.24	0.19	0.27	0.31
MnO	0.10	0.10	0.08	0.11	0.11	Yb	1.74	1.83	1.41	1.97	2.27
MgO	0.28	0.10	0.20	0.11	0.10	Lu	0.33	0.36	0.28	0.37	0.43
CaO	0.53	0.38	0.42	0.36	0.40	Y	9.07	9.51	7.34	11.6	13.8
Na ₂ O	7.02	7.11	7.16	7.15	7.16	Rb	100.2	87.9	81.0	98.5	98.1
K ₂ O	5.51	5.66	5.39	5.61	5.39	Ba	87.1	94.2	93.5	105.2	116.6
P ₂ O ₅	0.07	0.03	0.04	0.03	0.04	Th	4.38	5.24	3.37	5.02	5.9
La	10.2	8.62	6.18	10.4	11.9	U	0.52	0.5	0.43	0.55	0.59
Ce	18.7	16.1	11.9	17.0	18.6	Nb	28.8	22.4	21.3	25.1	23.8
Pr	2.44	2.39	1.65	2.49	2.86	Ta	10.0	9.7	9.57	9.84	9.74
Nd	8.09	8.17	5.52	8.23	9.45	Hf	7.57	6.03	5.48	6.39	5.76
Sm	1.34	1.50	0.94	1.41	1.65	Sr	11.2	15.7	16.3	15.8	16.4
Eu	0.18	0.21	0.14	0.20	0.23	Zr	317.7	230.3	233.6	283.8	266.5
Gd	1.34	1.38	0.93	1.37	1.63	A/CNK	0.87	0.85	0.88	0.86	0.87

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10^{-6} ;主量元素原始分析数据首先按 11 项氧化物进行标准化,然后按里特曼法进行了全铁调整; $A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$

3.2 稀土元素

碱闪霓石正长岩的稀土元素含量如表 1 所示。其稀土元素总量 $\Sigma REE = 39.22 \times 10^{-6} \sim 67.91 \times 10^{-6}$, $\delta Eu = 0.41 \sim 0.46$, 平均值为 0.43, 显示了中等强度的负 Eu 异常; $\delta Ce = 0.74 \sim 0.88$, 平均值为 0.82, 表明岩浆形成于较高的氧逸度环境。该岩体的稀土元素配分模式(图 4-a)较少见,轻稀土元素分馏较强烈,曲线向右陡倾, $(La/Sm)_N = 3.61 \sim 4.79$, 平均为 4.34, 而重稀土元素部分向左缓倾, $(Gd/Yb)_N = 0.53 \sim 0.61$, 平均值为 0.58, 总体上显示了中稀土元素亏损的特点。

3.3 微量元素

碱闪霓石正长岩的微量元素含量如表 1 所示。5 件样品均显示了异常低的 Sr、Ni、Cr、Co 等含量及较高的 Nb 含量;在微量元素比值蛛网图(图 4-b)上,5 件样品具有非常相似的微量元素分布模型,表

现为 Rb、K 等大离子亲石元素(LILE)及 Th、Ta、Zr、Hf 等高场强元素(HSFE)的明显正异常,同时又显示了 Sr、Ba 等大离子亲石元素及 U、P、Ti 等高场强元素的明显亏损。这些相互矛盾的特点暗示,岩浆的源区或形成过程可能具有特殊性。5 件样品的 Nb 含量为 $21.3 \times 10^{-6} \sim 28.8 \times 10^{-6}$, 明显的富 Nb 特点暗示,岩浆源区可能受到了俯冲流体的交代作用。

4 锆石 U-Pb 年龄

本次用于锆石 U-Pb 年龄测试的样品采样位置见图 1, 样品分析数据见表 2。

样品锆石颗粒为无色透明或浅黄色,半自形—自形,形态呈长柱状、短柱状、粒状和不规则状,粒径大小在 $110 \sim 180 \mu m$ 之间,颗粒长宽比为 $1 \sim 4$ 。在阴极发光图像(图 5)上,锆石结构明显可分为 2

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb age data of alkali hornblende-aegirite syenite (D0121)

测点号	元素含量/ 10^{-6}		同位素比值						U-Pb 年龄/Ma				谐和度	Th/U	采用年 龄/Ma	
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ				
1	191.4	183.4	0.0013	0.0013	0.2808	0.0084	0.0008	0.0008	65	251	7	263	5	95%	1	263
2	174.8	485	0.001	0.001	1.6719	0.0311	0.0026	0.0026	30	998	12	1016	14	98%	0.4	1016
3	54.9	302.4	0.0008	0.0008	1.6647	0.0262	0.0022	0.0022	8	995	10	1009	12	98%	0.2	1009
4	36.6	60.2	0.0017	0.0017	1.7152	0.0397	0.003	0.003	44	1014	15	1043	16	97%	0.6	1043
5	54.3	248.3	0.0009	0.0009	1.7204	0.0302	0.0026	0.0026	25	1016	11	1035	14	98%	0.2	1035
6	205.4	446.2	0.0018	0.0018	1.6908	0.0478	0.0026	0.0026	54	1005	18	1005	14	99%	0.5	1005
7	109.8	428.2	0.0009	0.0009	1.688	0.0329	0.0025	0.0025	21	1004	12	1001	14	99%	0.3	1001
8	315.8	515.4	0.0012	0.0012	1.7908	0.0392	0.0032	0.0032	33	1042	14	1057	18	98%	0.6	1057
9	124.7	363.5	0.0009	0.0009	1.7067	0.0342	0.0028	0.0028	27	1011	13	1016	16	99%	0.3	1016
10	248.4	650.5	0.0009	0.0009	1.6514	0.0304	0.0022	0.0022	25	990	12	973	12	98%	0.4	973
11	62.7	207.3	0.0011	0.0011	1.7945	0.0421	0.0033	0.0033	31	1043	15	1046	18	99%	0.3	1046
12	190.7	549.6	0.0008	0.0008	1.7082	0.0275	0.0022	0.0022	22	1012	10	998	12	98%	0.3	998
13	101.7	623.3	0.001	0.001	1.699	0.0304	0.0025	0.0025	24	1008	11	987	14	97%	0.2	987
14	53.2	80.2	0.0018	0.0018	1.7521	0.0426	0.0028	0.0028	47	1028	16	1009	15	98%	0.7	1009
15	57.6	100.8	0.0013	0.0013	1.7566	0.0363	0.0027	0.0027	34	1030	13	1013	15	98%	0.6	1013
16	39.9	103.6	0.0017	0.0017	1.7906	0.0461	0.003	0.003	51	1042	17	1018	16	97%	0.4	1018
17	125.9	730.6	0.0011	0.0011	1.7272	0.0277	0.0022	0.0022	32	1019	10	977	12	95%	0.2	977
18	296.7	485.3	0.0014	0.0014	1.4131	0.0355	0.0026	0.0026	37	894	15	809	15	89%	0.6	809
19	413.8	919.7	0.0009	0.0009	1.8042	0.0313	0.0023	0.0023	23	1047	11	996	13	95%	0.4	996
20	261.7	1214.2	0.0012	0.0012	1.8197	0.0433	0.003	0.003	31	1053	16	994	17	94%	0.2	994
21	910.1	768	0.0011	0.0011	1.8883	0.0309	0.0023	0.0023	28	1077	11	1025	12	95%	1.2	1025
22	162.9	340.9	0.0014	0.0014	1.6238	0.0412	0.0041	0.0041	40	979	16	887	23	90%	0.5	887
23	259.9	539	0.0018	0.0018	1.8172	0.0682	0.0046	0.0046	47	1052	25	957	26	90%	0.5	957
24	791.8	1407.4	0.001	0.001	1.9624	0.0329	0.0027	0.0027	23	1103	11	1005	15	90%	0.6	1005
25	76.9	134.3	0.0014	0.0014	2.7851	0.0935	0.0068	0.0068	30	1352	25	1306	36	96%	0.6	1417
26	201.7	268.3	0.0013	0.0013	3.1119	0.0582	0.0039	0.0039	20	1436	14	1336	20	92%	0.8	1583
27	305.1	451	0.0012	0.0012	3.5897	0.0691	0.0039	0.0039	22	1547	15	1480	20	95%	0.7	1633
28	236	403.4	0.0018	0.0018	3.7442	0.0857	0.0047	0.0047	27	1581	18	1523	24	96%	0.6	1655
29	311.9	419.9	0.0013	0.0013	4.5104	0.0758	0.0043	0.0043	21	1733	14	1713	21	98%	0.7	1752
30	110	414.8	0.0012	0.0012	4.8624	0.0793	0.0044	0.0044	19	1796	14	1749	22	97%	0.3	1843
31	266.3	1038.3	0.0019	0.0019	8.2983	0.1683	0.0072	0.0072	24	2264	18	2292	33	98%	0.3	2235
32	159.4	889.9	0.0016	0.0016	8.5598	0.1293	0.0057	0.0057	19	2292	14	2264	26	98%	0.2	2313
33	177.2	519.2	0.0019	0.0019	9.0821	0.1805	0.0063	0.0063	22	2346	18	2342	28	99%	0.3	2343
34	38.3	97.3	0.0019	0.0019	12.9887	0.2095	0.0076	0.0076	18	2679	15	2671	32	99%	0.4	2679

种类型,一类锆石具核-边结构,核、边部具有环带结构(图 5-a),且 $\text{Th}/\text{U} \geq 0.2$,显示岩浆成因锆石特征;另一类锆石核部具扇形结构或椭圆状结构,且有一定磨圆,没有环带结构、呈暗色区或少量环带(图 5-b),显示继承性锆石特征。选择 34 粒锆石进行了定年分析,所有分析点都位于谐和线上或其附近(图 6-a),其中 21 粒锆石数据较集中, Th/U 值为 $0.2 \sim 2$,具有典型的振荡环带,为岩浆成因,且获得了较一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 1007 ± 10 Ma (MSWD=2.3, $n=21$,图 6-b),说明碱闪霓石正长岩形成年龄为中元古代末期。另有 10 个测点打在继承性锆石核部,获得了 2679~1417 Ma 的继承性锆石年龄。还有 3 粒锆石的表面年龄为 263 ± 5 Ma、 809 ± 15 Ma 及 887 ± 23 Ma,可能为后期构造热事件的年龄,前 2 粒锆石年龄与峨眉山幔柱事件、导致 Rodinia 超大陆裂解的南华纪地幔柱事件相对应,第 3 粒锆石可能为混合年龄^[15-19]。

5 讨 论

5.1 岩浆锆石、捕获锆石及变质锆石的指示意义

甸中正长岩岩体位于滇中中部区域,处于扬子板块西南缘,本文对岩体发育韵律环带的岩浆进行了锆石 U-Pb 同位素定年,结果为 1007 ± 10 Ma (MSWD=2.3, $n=21$),代表了甸中正长岩岩体的形

成年龄,即形成于中元古代末期,为扬子板块上已知形成时代最早的碱性岩体。

“云南 1:5 万二街幅等四幅区域地质调查项目”^①及《云南省区域地质志》(第二版,修编)^②对滇中地区的前寒武纪浅变质地层进行了大量的同位素研究,将中元古界东川群之下的浅变质地层重新厘定为中太古界元江群、新太古界普渡河群、古元古界易门群^[22-29]。本文在碱闪霓石正长岩中共获得了 34 个有效的 U-Pb 同位素年龄值。其中,年龄值大于 1046 Ma 的 10 颗锆石应为岩浆上升过程中捕获围岩的继承性锆石,年龄值范围为 2679~1417 Ma。结合最新的区域相关同位素研究资料,笔者认为:①1 粒锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 2679 ± 18 Ma,属新太古代晚期;②3 粒锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 2343~2235 Ma,与岔河花岗岩 2.35 Ga 的锆石 U-Pb 年龄相当,可能是 Kenorland 超大陆裂解初始阶段的岩浆活动年龄^[27];③1 粒锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 1843 ± 19 Ma,与易门群杉木箐组时代相当,可能与 Columbia 超大陆的汇聚时限一致^[23-25, 29];④4 粒锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 1752~1583 Ma,与 Columbia 超大陆的裂解时限大致相当^[27];⑤1 粒锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 1417 ± 30 Ma,与昆阳群黑山头组时代相当^[30]。年龄值小于 957 Ma 的锆石共 3 粒,其中 2 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 887~809

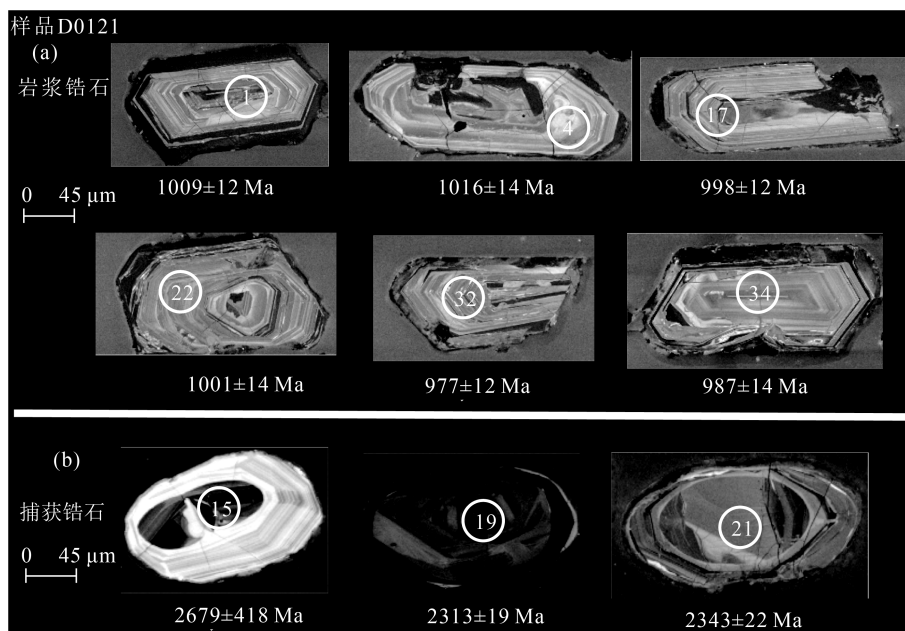


图 5 碱闪霓石正长岩代表性锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 5 The CL images of zircons from alkali hornblende-aegirite syenite

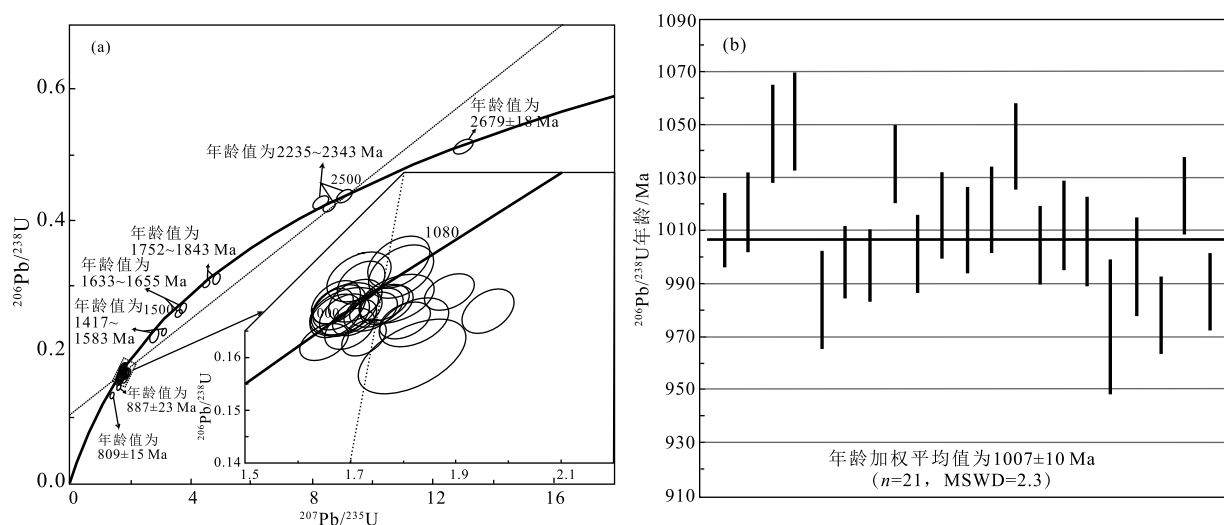


图 6 碱闪霓石正长岩(样品 D0121)锆石 U-Pb 年龄谐和图 (a) 与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谱图 (b)

Fig. 6 Concordia plot of U-Pb age data (a) and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age spectrum (b) of the zircons from alkali hornblende-aegirite syenite (Sample D0121)

Ma, 与 Rodinia 超大陆事件有关; 1 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 263 ± 5 Ma, 可能代表滇中地区中二叠世发生了一期重要的构造热事件, 与峨山山地幔柱事件时代较一致。以上捕获锆石及后期热事件改造的锆石年龄, 可与扬子陆块西缘重要的区域构造-热事件进行对比^[28-32]。

5.2 构造环境及其对格林威尔造山的指示

扬子板块前寒武纪碱性岩报道较少, 仅在秦岭造山带一带有 845~711 Ma 碱性正长岩的报道^[33-36]; 滇中地区也有少量南华纪碱性岩与基性-超基性岩^③、花岗岩等相伴产出^[32]。大量学者^[1-6, 32-36]认为, 这些记录是导致 Rodinia 超大陆裂解的地幔柱岩浆活动在扬子板块西缘的岩石学记录。

以往的 1:5 万区域地质调查^{①②④⑤}及近年来的《云南省区域地质志》(第二版、修编)^②的研究表明, 滇中地区存在较多约 1200 Ma 的格林威尔造山期花岗岩, 如元江县撮科花岗岩体 (1198 Ma)^②、峨山县纪母白花岗岩 (1336~1048 Ma)^④、元谋县那别村花岗岩体 (1086 Ma)^⑤等, 均指示格林威尔造山运动从 1200 Ma 已经开始, 但结束时间无定论。本次发现的甸中正长岩岩体形成于伸展构造环境, 地球化学与 A 型花岗岩相似 (富碱, 贫镁)^[37], 应为地壳伸展减薄构造背景形成, 说明滇中地区格林威尔造山运动在 1007 Ma 已经结束, 这也是目前扬子板块

上已知的年代最古老的碱性岩体, 暗示了扬子板块上的格林威尔造山运动在中元古代末期已经结束, 从 1007 Ma 开始, 区域地壳演化已由挤压背景转换为伸展构造背景^[32-39]。

《云南省区域地质志》(第二版、修编)^②的野外调查工作中, 在撮科-石屏一带出露 988~948 Ma 的高钛-富铁辉绿岩脉 (样品编号: D006、YWxhd-04), 地球化学分析表明其形成伸展背景。据 1:5 万区域地质调查资料^{③⑤⑥}, 峨山-塔甸一带侵入到昆阳群黑山头组、大龙口组中的高钛-富铁的辉绿岩获得 908 Ma 的 Pb 模式年龄^⑥。1:5 万塔甸幅中的玉河寨基性-超基性杂岩体出露于甸中碱性岩体南约 25 km 的同一条断裂带附近, 岩体侵位于昆阳群黑山头组中, 尽管缺乏同位素年代学资料, 但岩石地球化学特征 (富碱, 贫镁) 与甸中碱性正长岩岩体相似, 其侵位年代也可能在 1000 Ma 左右; 以上岩体的年龄及特征, 说明格林威尔造山运动在 1000 Ma 左右已经结束并向伸展作用转换。由此推断, 本次获得的 1007 Ma 应为格林威尔造山作用结束的时限。

综上所述, 在 1000~950 Ma, 扬子板块西缘的格林威尔造山运动结束后, 随即发育了一套“高钛-富铁”的基性-超基性岩-碱性岩组合^③。本文 5 件样品的 Nb 含量为 $21.3 \times 10^{-6} \sim 28.8 \times 10^{-6}$, 明显的富 Nb 特点暗示岩浆源区可能受到俯冲流体的交代作

用,与不协调的稀土元素配分模式相互印证,指向同一事实,即岩浆源区可能由于俯冲流体的交代,发生过一次中等程度的部分熔融作用(5%~7%),形成滇中地区“高钛-富铁”的基性岩岩浆。

5.3 岩浆起源及演化

近年对碱性岩的研究中,普遍认为碱性岩形成于岩石圈拉张环境,其源于深部地幔物质的部分熔融^[37-40],是深部地球动力学过程在地壳中的记录,也是探究地球深部物质组成、动力学过程及物理化学环境的良好研究对象。

由于碱性岩与基性岩类有类似的岩浆源区,本次采用研究玄武岩的图解对甸中碱性岩体进行研究。在 Ta/Hf-Th/Hf 图解(图 7)中,甸中岩体的 5 件碱闪霓石正长岩样品均落入地幔热柱玄武岩区;在 Nb/Yb-Th/Yb 图解(图 8)中,均位于地幔阵列内,并围绕洋岛玄武岩(OIB)分布。以上图解暗示,该碱性岩体可能为地幔柱成因,岩浆基本上未受到陆壳物质的混染,主体上可能属下地幔石榴子石橄榄岩的低程度部分熔融的产物。

现代地幔柱理论认为,俯冲洋壳经部分熔融后的固态残留物在约 660 km 地幔过渡带中堆积,形成较冷的难熔“巨石体”。由于重力作用,这些“巨石体”将进一步下沉到核-幔边界“D”层,同时发生钙钛矿→后钙钛矿的矿物相转变,这是一个强烈的放热反应,导致下地幔及俯冲板片堆积体自身的部分熔融,引起深部高温富铁-富钛的熔融体上涌进入地幔中,形成地幔柱。同时俯冲板块将水带到核-幔边界,与铁相互作用形成 FeO₂,FeO₂随地幔柱上升,由于减压发生分解,释放出氧气^[36-43],可造成地幔中局部的高氧逸度环境。甸中岩体碱闪霓石正长岩中普遍的负 Ce 异常可能就是这一机制所致。

综上所述,甸中岩体碱闪霓石正长岩的原始岩浆可能起源于核-幔边界的地幔柱岩浆活动,原始岩浆的部分熔融程度较低(1%~2%);随着地幔柱的上升,岩浆源区逐步向上迁移,由石榴子石地幔橄榄岩区向尖晶石地幔橄榄岩区过渡,形成“高钛-富铁”的基性岩浆。岩浆源区可能经历过中等程度的部分熔融作用,磷灰石等特别富集中稀土元素的矿物在部分熔融过程中消耗殆尽,残留的地幔橄榄岩亏损中稀土元素,由其熔出的岩浆也相对亏损中稀土元素。

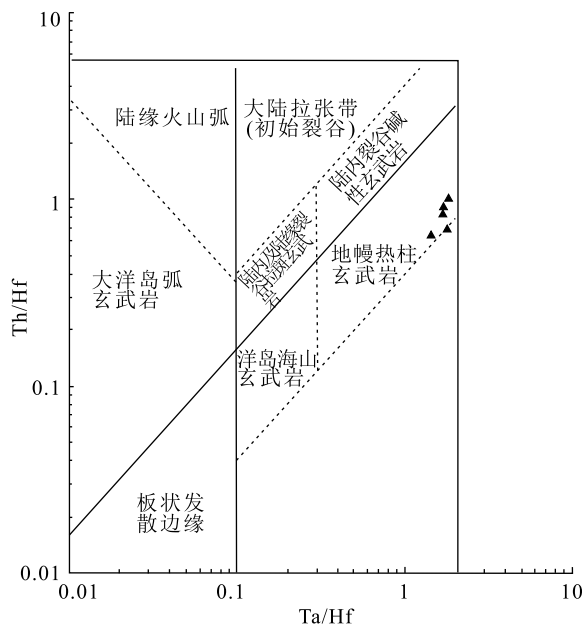


图 7 甸中岩体碱闪霓石正长岩 Ta/Hf-Th/Hf 图解
Fig. 7 Ta/Hf-Th/Hf diagram of alkali hornblende-aegirite syenite from Dianzhong pluton

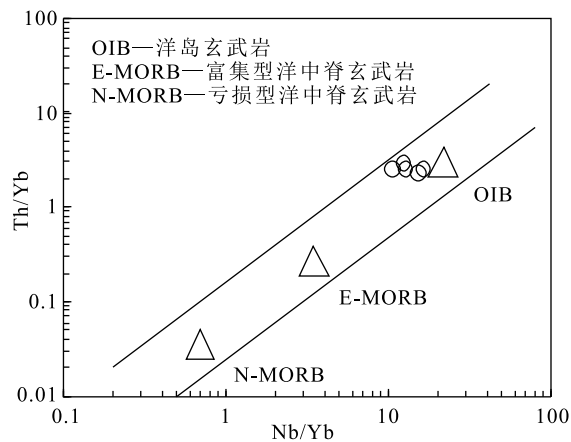


图 8 甸中岩体碱闪霓石正长岩 Nb/Yb-Th/Yb 图解
Fig. 8 Nb/Yb-Th/Yb diagram of alkali hornblende-aegirite syenite from Dianzhong intrusion

6 结 论

(1) 甸中碱闪霓石正长岩的岩浆侵位时代为 1007 ± 10 Ma, 形成于伸展构造背景, 明显晚于滇中地区格林威尔造山期花岗岩的侵位时代, 指示滇中地区格林威尔造山运动结束的时间不晚于中元古代末期。

(2) 甸中碱闪霓石正长岩体的岩石地球化学特

征表明该岩体属大西洋型碱性岩,原始岩浆是起始于核-幔边界的地幔柱岩浆,岩浆上升过程中与岩石圈地幔或软流圈地幔发生相互作用,形成了异常的稀土元素配分模式及微量元素分配形式。

(3)在甸中碱闪霓石正长岩岩浆侵位之前,岩石圈地幔或软流圈地幔发生过俯冲流体的交代作用及中等程度的部分熔融作用,证实扬子陆块西缘在中元古代晚期存在构造力学背景转换,即洋-陆俯冲转为陆内裂谷。

致谢:LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析和阴极发光照相得到南京宏创地矿袁秋云及湖北省地质实验测试中心朱丹、潘诗洋的帮助,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 裴先治,李佐臣,丁仁平,等.扬子地块西北缘轿子顶新元古代过铝质花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和岩石地球化学及其构造意义[J].地学前缘,2009,6(3): 232-249.
- [2] 刘树文,闫全人,李秋根,等.扬子克拉通西缘康定杂岩中花岗岩成因及其构造意义[J].岩石学报,2009,25(8): 1883-1896.
- [3] 李献华,周汉文,李正祥,等.扬子地块西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征[J].地球化学,2001,30(4): 315-322.
- [4] 李献华,王选策,李武显,等.华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义:从造山运动到陆内裂谷[J].地球化学,2008,37(4): 382-399.
- [5] 黎彤,袁怀雨,吴胜昔.中国花岗岩类和世界花岗岩类平均化学成分的对比研究[J].大地构造与成矿学,1998,22(1): 29-34.
- [6] 凌文黎,高山,程建萍,等.扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩 LA ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束[J].岩石学报,2006,22(2): 387-397.
- [7] 王生伟,廖震文,孙晓明,等.会东菜园子花岗岩的年龄、地球化学——扬子地台西缘格林威尔造山运动的机制探讨[J].地质学报,2013,87(1): 54-70.
- [8] 姜勇彪,张世红,吴怀春,等.华南地块西南缘格林威尔期区域构造解析[J].大地构造与成矿学,2006,30(2): 127-135.
- [9] 王梦玺,王焰,赵红军.扬子板块北缘周庵超镁铁质岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素特征:对源区性质和 Rodinia 超大陆裂解时限的约束[J].科学通报,2012,57(34): 3283-3294.
- [10] 颜丹平,周美夫,宋鸿林,等.华南在 Rodinia 古陆中位置的讨论——扬子地块西缘变质-岩浆杂岩证据及其与 Seychelles 地块的对比[J].地学前缘,2002,9(4): 249-256.
- [11] 朱维光,刘秉光,邓海琳,等.扬子地块西缘新元古代镁铁-超镁铁质岩研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2004,23(3): 255-264.
- [12] 杜利林,耿元生,杨崇辉,等.扬子地台西缘新元古代 TTG 的厘定及其意义[J].岩石矿物学杂志,2006,25(4): 273-281.
- [13] 李鹏春,陈广浩,许德如,等.湘东北新元古代过铝质花岗岩的岩石地球化学特征及其成因讨论[J].大地构造与成矿学,2007,31(1): 126-136.
- [14] 赵凤清,赵文平,左义成,等.陕西汉中地区新元古代岩浆岩 U-Pb 年代学[J].地质通报,2006,25(3): 383-389.
- [15] Hu Z C, Liu Y S, Gao S, et al. A "wire" signal smoothing device for laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2012, 78: 50-57.
- [16] 刘军平,胡绍斌,李静,等.滇西云县地区团梁子岩组变质岩锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J].地质通报,2018,37(11): 2079-2086.
- [17] Ludwig K R. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California, 2003.
- [18] 王海然,赵红格,乔建新,等.锆石 U-Pb 同位素测年原理及应用[J].地质与资源,2013,22(3): 229-242.
- [19] 吴元保,郑永飞.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J].科学通报,2004,49(16): 1589-1604.
- [20] Richwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22(4): 247-263.
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [22] 李静,刘桂春,刘军平,等.滇中地区早前寒武纪地质研究进展[J].地质通报,2018,37(11): 1957-1969.
- [23] 刘军平,曾文涛,徐云飞,等.滇中易门地区约 1.85Ga 凝灰岩的厘定及其地质意义[J].地质通报,2018,37(11): 2055-2062.
- [24] 刘军平,王小虎,关学卿,等. Columbia 超大陆汇聚在扬子陆块西南缘的响应——来自热液石英脉锆石 U-Pb 年龄的证据[J].中国地质,2021,48(5): 1653-1654.
- [25] 刘军平,李静,孙柏东,等.滇中易门地区发现化石新物种[J].沉积与特提斯地质,2018,38(1): 37-40.
- [26] 李静,刘军平,孙柏东,等.滇中易门地区元古界易门群亮山组多细胞生物的年代学约束[J].地质通报,2018,37(11): 2087-2098.
- [27] 刘军平,曾文涛,孙柏东,等.云南峨山地区东川群黑山组流纹质碎斑熔岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].沉积与特提斯地质,2018,38(3): 19-25.
- [28] 刘军平,夏彩香,孙柏东,等.滇中易门地区新元古代澄江组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].沉积与特提斯地质,2019,39(1): 14-21.
- [29] 刘军平,李静,王根厚,等.扬子板块西南缘基性侵入岩锆石定年及地球化学特征——Columbia 超级大陆裂解的响应[J].地质论评,2020,66(2): 350-364.
- [30] 刘军平,孙柏东,王晓峰,等.滇中禄丰地区中元古代早期球状玄武岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其大地构造意义[J].地质论评,2020,66(1): 35-51.
- [31] 陆松年,杨春亮,李怀坤,等.华北古大陆与哥伦比亚超大陆[J].地学前缘,2002,9(9): 226-233.
- [32] 刘军平,孙柏东,崔晓庄,等.云南安宁地区石虎山花岗岩年代学、地球化学特征和锆石 Hf 同位素组成及其成因[J].中国地质,2020,47(3): 693-708.
- [33] 包志伟,王强,白国典,等.东秦岭方城新元古代碱性正长岩形成时代及其动力学意义[J].科学通报,2008,53(6): 684-694.
- [34] Chen Z, Lu S, Li H, et al. Constraining the role of the Qinling orogen in the assembly and break-up of Rodinia: Tectonic implications for

- Neoproterozoic granite occurrences[J]. *J Asian Earth Sci.*, 2006, 28: 99–115.
- [35] 卢欣祥, 董有, 尉向东, 等. 东秦岭吐雾山 A 型花岗岩的时代及其构造意义[J]. *科学通报*, 1999, 44(9): 975–978.
- [36] 王德滋, 赵广涛, 邱检生. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约[J]. *高校地质学报*, 1995, 1(2): 13–21.
- [37] 张旗, 冉晔, 李承东. A 型花岗岩的实质是什么?[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 231(4): 621–626.
- [38] Mao H W, Hu Q Y, Yang L X, et al. When water meets iron at Earth's core–mantle boundary[J]. *National Science Review*, 2017, 4: 870–878.
- [39] 刘军平, 熊波, 李静, 等. 扬子西缘东川落雪地区元古宙地层中 3890Ma 锆石的发现[J]. *地质学报*, 2021, 95(5): 1606–1613.
- [40] 刘军平, 王晓峰, 王小虎, 等. 滇中甸中地区中二叠世晚期镁铁-超镁铁质岩体特征及其与峨眉地幔柱关系——来自锆石 U–Pb 年龄及岩石地球化学证据[J]. *地质论评*, 2020, 66(5): 1284–1298.
- [41] 任光明, 庞维华, 潘桂棠, 等. 扬子陆块西缘中元古代菜子园蛇绿混杂岩的厘定及其地质意义[J]. *地质通报*, 2017, 36(11): 2061–2075.
- [42] 刘军平, 宛胜, 李静, 等. 滇中易门地区古元古界易门群罗洼垭组火山岩锆石 U–Pb 年龄及其构造热事件[J]. *地质通报*, 2021, 40(7): 1024–1032.
- [43] 陈海福, 何书跃, 张爱奎, 等. 东昆仑卡尔却卡地区中志留世 A 型花岗岩岩石成因及构造环境[J]. *地质通报*, 2021, 40(8): 1380–1393.
- ① 云南省地质调查院. 云南 1 : 5 万二街、易门县等 4 幅区域地质调查报告. 2019.
- ② 云南省地质调查院. 《云南省区域地质志》(第二版, 修测). 2019.
- ③ 云南省地质调查院. 云南 1 : 5 万州城、米甸街等 4 幅区域地质调查报告. 2016.
- ④ 云南省地质矿产勘查开发局. 云南 1 : 5 万杨武幅、落水洞幅区域地质调查报告. 1998.
- ⑤ 云南省地质调查院. 云南 1 : 5 万下拉古、环州村等 5 幅区域地质调查报告. 2014.
- ⑥ 云南省地质矿产局. 云南 1 : 5 万塔甸幅、化念农场幅区域地质调查报告. 1990.