

滇东南个旧白云山碱性岩年代学和地球化学及成因意义

黄文龙^{1,2}, 许继峰^{3,4,5}, 陈建林^{1,4}, 黄 丰³, 皮桥辉⁵, 李政林⁵

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 5. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 报道了滇东南个旧超大型锡多金属矿区西区北部白云山碱性岩新的锆石 U-Pb 年龄、全岩地球化学和 Sr-Nd 同位素数据。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 白云山碱性正长岩形成于晚白垩世(80.0 ± 0.6 Ma), 与个旧地区的中基性岩及花岗岩均为同一次构造岩浆事件的产物; 碱性正长岩与霞石正长岩具有相似的主微量元素地球化学特征及 Sr-Nd 同位素组成, 暗示二者很可能是源于同一富集地幔源区并经历了不同程度演化的产物。结合已有的元素和同位素组成结果, 认为碱性岩、中基性岩和成矿花岗岩很可能分别源自富集的岩石圈地幔、正常的岩石圈地幔和地壳源区。在晚白垩世伸展构造背景控制下, 源于不均一岩石圈地幔的碱性和中基性的岩浆底侵, 促使中下地壳岩石部分熔融形成花岗质熔体, 在上升至近地表过程中引起构造活动带成矿物质的富集, 从而形成个旧超大型锡多金属矿床的矿化格局。可以说, 源于富集地幔的碱性岩浆在含矿花岗质岩浆的成岩成矿过程中, 应不只是提供热量的贡献。

关键词: 碱性岩; 年代学; 地球化学; 地幔岩浆; 锡矿化; 个旧; 滇东南

中图分类号: P595; P597; P588.15

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)05-0716-17

Geochronology, geochemistry and genesis of the Baiyunshan alkalic rocks in Gejiu area of southeastern Yunnan Province

HUANG Wen-long^{1,2}, XU Ji-feng^{3,4,5}, CHEN Jian-lin^{1,4}, HUANG Feng³, PI Qiao-hui⁵ and LI Zheng-lin⁵

(1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China; 5. School of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In this paper, the authors report new zircon U-Pb ages, whole-rock major and trace elements composition and Sr-Nd isotopic data for the Baiyunshan alkalic rocks in the northern part of the western area of the Gejiu tin-polymetallic ore district. The Late Cretaceous age (80.0 ± 0.6 Ma) using the zircon LA ICP-MS U-Pb dating for the alkalic syenites indicates that they occurred with the contemporaneous gabbrodiorites and granites. This suggests that these rocks were all formed during the same magmatic-tectonic event. The geochemical characteristics and Sr-

收稿日期: 2017-11-24; 接受日期: 2018-03-27

基金项目: 国家“973”项目(2015CB452602); 国家重点研发计划项目(2016YFC0600305); 国家自然科学基金(41373030, 41573024, 41603033); 广西八桂学者项目(2013, 有色金属成矿理论与勘查技术)

作者简介: 黄文龙(1988-), 男, 博士生, 研究方向: 同位素地球化学, E-mail: wenlonghuang999@gmail.com; 通讯作者: 许继峰(1963-), E-mail: jifengxu@cugb.edu.cn; 陈建林(1971-), E-mail: lzdxcchen@gig.ac.cn。

Nd isotopic compositions indicate that the alkaline syenite and the nepheline syenite were derived from an enriched mantle, and subsequently underwent different evolution processes. Combined with the previous studies, the authors hold that the alkali rocks, intermediate-mafic rocks and ore-related granites were derived from the enriched lithospheric mantle, the normal lithospheric mantle and the crust source, respectively. In the Late Cretaceous, the parental melts of the alkali rocks and gabbrodiorite magmas were formed by partial melting of the heterogeneity of the lithosphere mantle triggered by an extensional tectonic setting. Uprising of the above mantle melts promoted the partial melting of middle-lower crust and formed the granitic melts. These Late Cretaceous magmatism caused the activity and enrichment of the ore-forming material within a mutual tectonic belt, and then formed the superlarge tin-polymetallic deposit in the Gejiu ore district. It can be said that the enriched mantle-derived alkaline magmatism not only offered energy during the formation and mineralization of the ore-bearing granitic magma but also played some other roles.

Key words: alkalic rocks; geochronology; geochemistry; mantle magma; tin mineralization; Gejiu; southeastern Yunnan Province

Fund support: Chinese Major State Basic Research Program (2015CB452602); Chinese National Key Research and Development Program (2016YFC0600305); Chinese National Science Foundation (41373030, 41573024, 41603033); Bagui Scholar Innovation Project of Guangxi (2013, ore-forming theory and exploration technique)

碱性岩因其明显富含不相容元素并经常与成矿有密切的关系而备受关注 (Müller and Groves, 2016), 它们的形成过程通常与陆壳岩石圈后碰撞或者板内伸展有关, 可为人们探讨地球深部物质组成、演化和地球动力学等提供重要信息 (Whalen *et al.*, 1987; Sylvester, 1989)。碱性岩体内常常包含一系列的岩石类型, 如霞石正长岩、碱性正长岩、辉长岩以及花岗岩, 相互共生或者伴生, 但它们与 U、REE、Zn、Sn 等成矿作用之间的关系目前尚不清楚 (Bowden, 1985; Kovalenko and Yarmolyuk, 1995; Eby *et al.*, 1998; Yang *et al.*, 2012; Möller and Williams-Jones, 2016; Wu *et al.*, 2016; Graham *et al.*, 2017)。前人研究认为, 锡矿床的成因与伴生的高演化花岗岩关系密切 (Lehmann, 1987; Hedenquist and Lowenstern, 1994), 并且由于锡矿区同时伴生有与花岗岩同期的碱性岩, 幔源岩浆对锡的富集过程可能具有非常关键的作用 (Condie *et al.*, 2001; Romer and Kroner, 2015b)。因此, 对这些与成矿岩体有紧密联系的碱性岩开展年代学、岩石学和地球化学组成特征的研究, 不仅有助于阐明岩浆源区的地幔物质组成, 而且也可寻找与碱性岩相关的矿产资源提供重要的线索。

滇东南个旧地区锡多金属资源储量丰富, 矿区内的岩浆活动以晚白垩世花岗岩为主, 同时也发育

有一些碱性岩和钙碱性中基性岩 (Cheng *et al.*, 2013a, 2013b; Zhao *et al.*, 2015; 黄文龙等, 2016)。由于区内锡多金属矿床的形成主要与花岗岩有关, 使得这些花岗岩一直成为地质学者关注的对象, 而对区内同样发育的钙碱性中基性岩和碱性岩的研究则相对比较薄弱 (Cheng *et al.*, 2013b)。个旧锡矿区内碱性岩主要分布于花岗质杂岩体北部的白云山林场一带 (图 1), 岩石类型主要有碱性正长岩和霞石正长岩。前期资料表明, 碱性正长岩和霞石正长岩稀土元素配分型式总体相似, 但高场强元素 (HFSE) 存在差异 (虞裕如, 1993; Cheng *et al.*, 2013b)。由于前人对碱性岩、中基性岩、花岗岩以及成矿作用之间的关系缺乏详细的研究, 使得区内碱性岩与中基性岩、花岗岩的源区及其相互演化关系以及它们对成矿物质的贡献, 目前仍不清楚。同时, 对碱性岩形成时代也存在争议, 有晚于花岗岩 (62 ~ 60 Ma, 冶金工业部西南冶金地质勘探公司, 1984) 和与花岗岩同期 (80 Ma 左右, 汪志芬, 1983; Cheng *et al.*, 2013b) 两种观点, 从而制约了对区内岩浆成因的深入理解。本文结合前人研究资料, 在对个旧地区白云山碱性岩进行地质调查的基础上, 开展了详细的锆石年代学、同位素和主微量地球化学分析, 进而深入探讨其源区特点、岩石成因及其与锡多金属成矿的贡献。

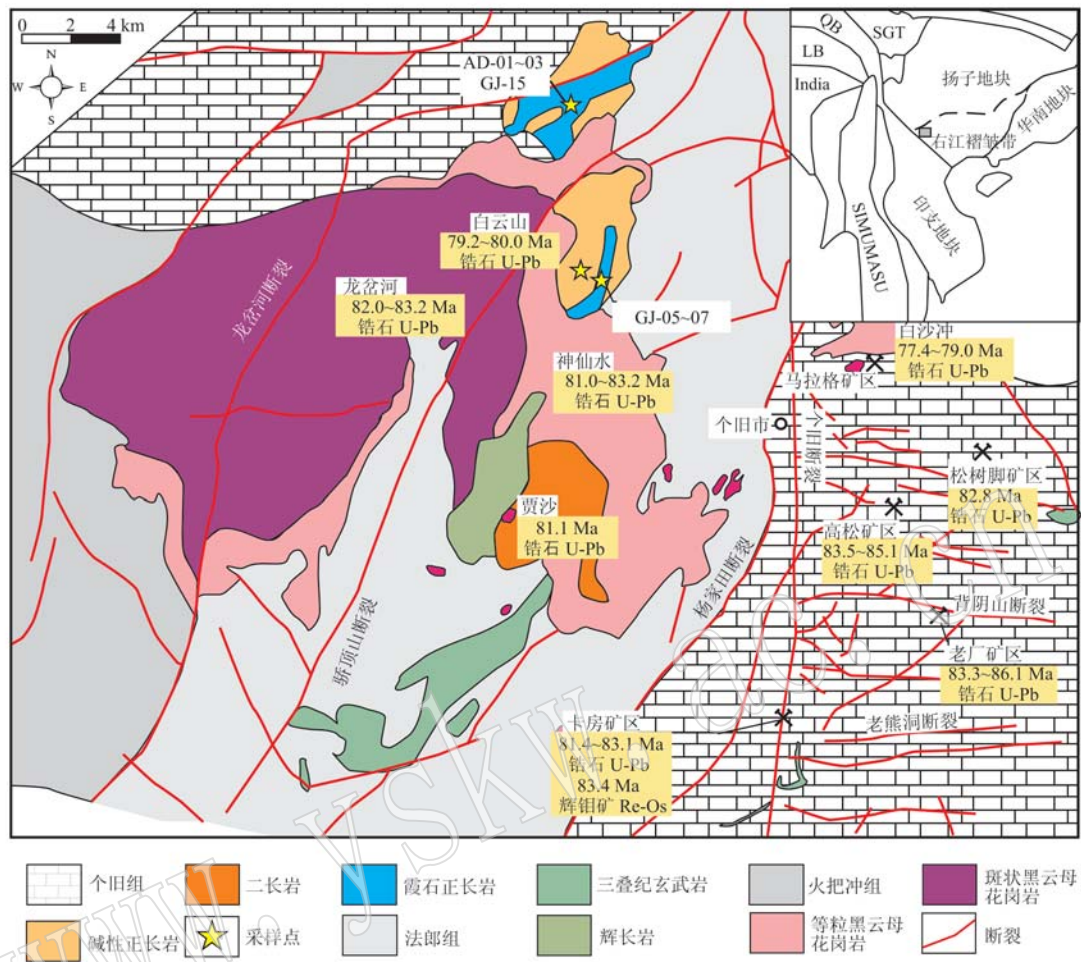


图 1 个旧白云山地区地质图(据冶金工业部西南冶金地质勘探公司, 1984)

Fig. 1 Geological map of Baiyunshan in Gejiu area (after SMGPC, 1984)

年龄数据引自杨宗喜等(2008)、Cheng 和 Mao(2010)、Cheng 等(2013b)、黄文龙等(2016)和 Guo 等(2018)

Age data after Yang Zongxi *et al.*, 2008; Cheng and Mao, 2010; Cheng *et al.*, 2013b; Huang Wenlong *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2018

1 地质概况

1.1 地质背景

个旧超大型锡多金属矿区位于扬子地块西南缘, 紧邻华南褶皱系西缘的右江盆地 (Chen and Jahn, 1998; Zhou *et al.*, 2002), 具有太古宙 (Qiu *et al.*, 2000) 和古元古代 (Chen and Jahn, 1998) 的结晶基底, 早期经历了时限约为 970 Ma (Zhou and Zhao, 1991; Li and McCulloch, 1996) 的碰撞事件。位于桂西、滇东南和黔南交界地带的右江盆地 (图 1) 为晚古生代-中三叠世在夷平的加里东造山带之上再生裂隙而发育的大陆边缘盆地 (杜远生等, 2009, 2013)。滇东南的个旧铜锡矿床、都龙锡矿

床、白牛厂银锡矿床和广西大厂锡矿床等一批世界级锡钨多金属矿床, 均分布于该盆地内 (Fu *et al.*, 1991; 程彦博等, 2010; Xu *et al.*, 2015; Cheng *et al.*, 2016)。在泥盆纪古特提斯洋的打开过程中, 右江盆地开始形成, 其后在晚古生代经历了碳酸盐台地沉积和浅水相沉积 (Liu *et al.*, 2002; 杜远生等, 2013)。右江盆地西北部分布有中三叠世浅海相碳酸盐岩, 与中部的中三叠世浊积岩以坡坪逆冲断层分隔, 西北部被认为是中三叠世扬子被动大陆边缘的一部分 (韩至钧等, 1999; Chen *et al.*, 2011)。在中三叠世, 由于古特提斯洋的封闭, 右江盆地成为前陆盆地, 在早期的碳酸盐岩台地上沉积了深水粉砂岩、砂岩和浊积岩 (Liu *et al.*, 2002; Enos, 2006)。在印支期-燕山早期, 区内发育大规模的由南东向北

西的推覆构造(Yan *et al.*, 2003),使地壳加厚,其后由于地壳调整,在地块内部形成了一系列北东-南西向的伸展断陷盆地,在中生代末期至新生代全区发生区域性伸展构造活动(陈跃辉等, 1996; 舒良树等, 1998; 梁新权等, 2003),并发育大规模的中基性、酸性及碱性岩浆作用和钨锡多金属成矿作用。

1.2 个旧复式侵入岩体

个旧地区岩浆活动以燕山期为主,基性、中酸性和碱性岩石皆有出露(Cheng *et al.*, 2013b; 黄文龙等, 2016)。该地区岩浆活动主要分为东、西两区。其中,西区出露中酸性和碱性岩体,包括龙岔河花岗岩、贾沙辉长岩、白云山碱性岩及神仙水花岗岩等;东区大规模岩体隐伏于地下,马松和老卡两个花岗岩岩株为矿山采矿坑道系统所揭露。东区的燕山期花岗岩与锡多金属成矿关系密切,如卡房和老厂矿区的老卡岩体即处在主要矿体的底部或核部,围岩为中三叠统个旧组(T_2g)中下部的碳酸盐岩(冶金工业部西南冶金地质勘探公司, 1984)。

1.3 白云山碱性岩

区内碱性岩位于西区个旧复式岩体的北部(图1),分布在白云山林场及长岗岭两个片区,中间被中细粒黑云母花岗岩分隔。岩体整体呈纺锤状,其产出受北东向龙岔河断裂及南北向轿顶山断裂的控制。岩性主要为霞石正长岩和碱性正长岩,碱性正长岩位于霞石正长岩的外带,霞石正长岩相对位于碱性岩的内带或核部,两者之间呈渐变过渡关系(冶金工业部西南冶金地质勘探公司, 1984; 虞裕如, 1993)(图1)。

本次采集的碱性岩样品包括碱性正长岩和霞石正长岩两类。其特征简述如下:

(1) 碱性正长岩:呈灰褐色,为中粒至粗粒结构(图2a),主要造岩矿物有钾长石(40%~50%)、钠长石(20%~30%)、钙闪石(10%~20%)和黑云母(2%~3%),副矿物有磁铁矿、榍石等(图2b、2c)。钾长石在镜下呈半自形板状,可见两组完全解理,发育卡式双晶;钠长石呈板状,见有聚片双晶;角闪石呈自形-半自形柱状结构,部分具菱形和六边形轮廓,正交偏光镜下为褐黄色,长石类矿物充填于角闪石之间,说明角闪石的形成早于长石类矿物;黑云母呈片状或粒状产出,可见一组极完全解理。

(2) 霞石正长岩:呈灰绿色,为中粒至粗粒结构(图2d),主要造岩矿物有霞石(40%~50%)、钾长石(10%~20%)、钠闪石(10%~20%)、钙霞石

(3%~5%)和黑云母(2%~3%),副矿物主要为磁铁矿等(图2e、2f)。霞石多为板片状,它形晶,正交偏光镜具不均匀的淡黄至灰白干涉色,解理不发育;钾长石为半自形-自形板片状,发育卡式双晶;角闪石为半自形柱状,部分具明显菱形或六边形轮廓,正交偏光镜下为深绿至深蓝,为富钠角闪石;钙霞石呈细柱状产于霞石颗粒间隙之中;黑云母呈片状粒状,一组极完全解理。可见具有聚片双晶的斜长石呈较好的自形,霞石呈半自形围绕斜长石($An=70$)整齐的边界生长(图2e),说明斜长石的形成要早于霞石。斜长石和霞石的先后产出也说明,两者都是岩浆阶段形成的矿物,排除了霞石为后期热液改造斜长石形成的可能,因而适宜于开展岩石学示踪研究。

2 分析方法

用于锆石 U-Pb 测年的岩石样品先进行粗碎和淘洗前处理,使用重磁筛选法分选出锆石晶体,粘于环氧树脂制靶并拍摄阴极发光图像(CL)和透反射光照片,以方便观察锆石内部结构及矿物表面,选择合适的测试部位进行年代学分析。锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)进行,采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)进行测试。激光剥蚀光斑直径为 32 μm ,激光剥蚀系统为 GeoLas 2005 系统(配备 193 nm 准分子激光器),ICP-MS 型号为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中载气为氦气,使用氩气为补偿气调节灵敏度。详细的仪器操作条件见 Hu 等(2008)。数据处理采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2010)。

全岩主、微量元素和 Sr-Nd 同位素的测定均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。选取新鲜的待测样品,在无污染条件下磨成 200 目粉末,样品预处理均严格按操作流程进行。全岩主量元素含量测定仪器为 Rigaku 100e 型 X 射线荧光光谱仪(XRF),分析精度优于 2%;微量元素分析仪器为 Thermo JCAP Qc 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),相关参数和分析流程见刘颖等(1996),分析精度优于 5%。全岩 Sr-Nd 同位素分离的流程如下:准确称取 0.1 g 左右岩石样品粉末置于溶样杯中,加入 HF 和 HNO_3 在低温电热板上(120℃)保温 7 d,确保样品完全溶解。利用阳离子树脂分离出 Sr 和稀土元素,在分离出的稀土

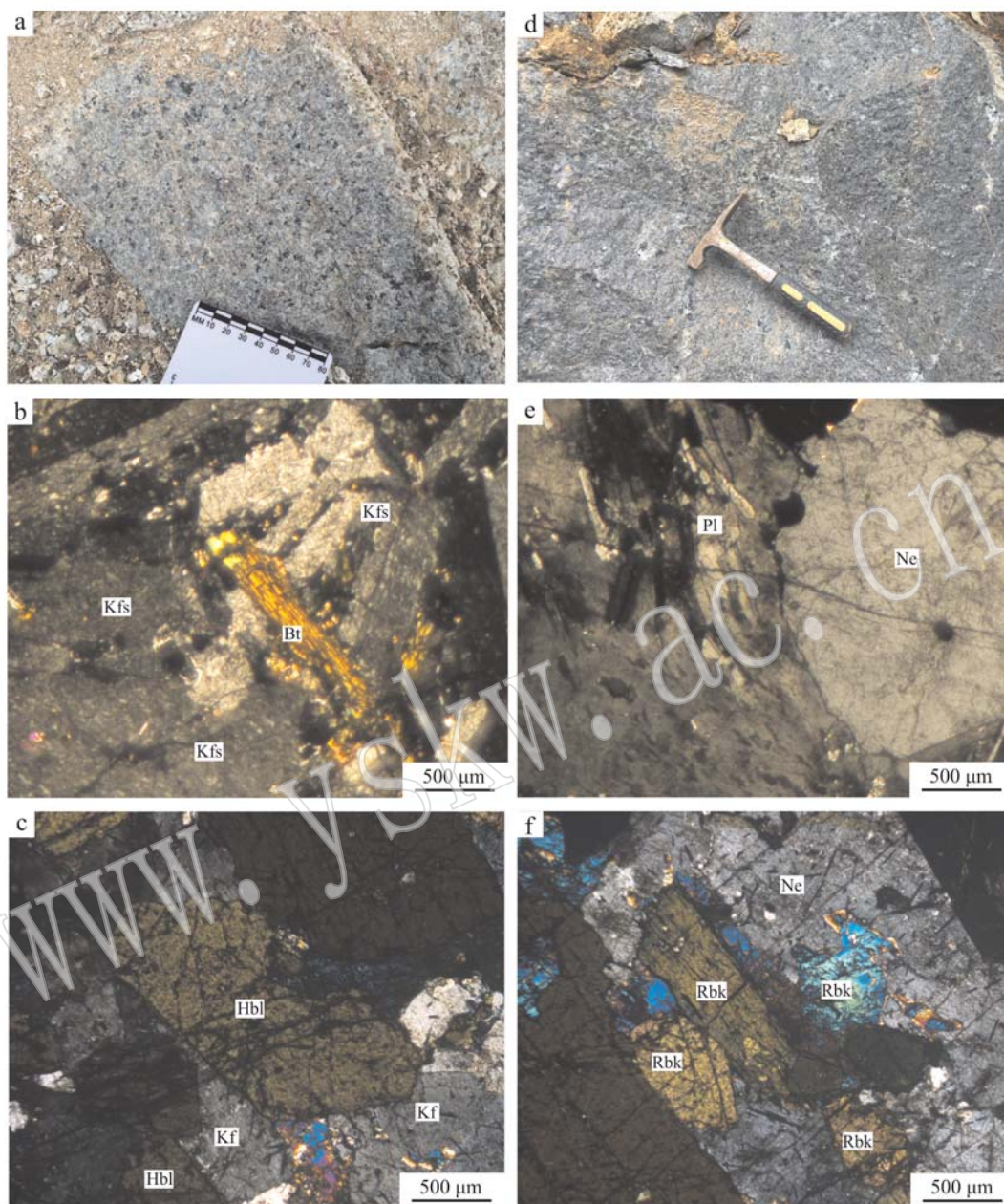


图2 个旧白云山碱性岩野外照片及岩相学特征

Fig. 2 Field photographs and representative petrographic images of the Baiyunshan alkaline rocks in Gejiu ore district

a—碱性正长岩野外照片; b、c—代表性碱性正长岩样品显微照片(正交偏光); d—霞石正长岩野外照片; e、f—代表性霞石正长岩样品显微照片(正交偏光); Bt—云母; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Hbl—角闪石; Rbk—钠闪石; Ne—霞石

a—field photographs of alkalic syenite; b, c—microphotograph of the representative alkalic syenite sample under crossed nicols; d—field photographs of nepheline syenite; e, f—microphotograph of the representative nepheline syenite sample under crossed nicols; Bt—biotite; Kfs—potassic-feldspar; Pl—plagioclase; Hbl—hornblende; Rbk—riebeckite; Ne—nepheline

元素中再次利用 HDEHP 树脂分离 Nd。获得的 Sr 溶液蒸干后利用 $1\ \mu\text{L}\ 1\text{N}\ \text{HNO}_3$ 溶解后点在高纯度的 Re 带上,前后各夹 $1\ \mu\text{L}$ 激发剂,蒸干样品和激发剂后将 Re 带放于 Triton 系列热电离质谱仪(TIMS)上测试,详细的分析流程及仪器分析情况见 Wei 等

(2002)以及 Huang 等(2017)。Nd 同位素利用 Micromass Isoprobe 型多接受器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)测试,分析流程和参数见 Li 等(2004)。Sr、Nd 同位素比值的质量分馏校正参数为 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.119\ 4$, $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\ 9$ 。

3 实验结果

3.1 锆石 U-Pb 定年分析结果

用于锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年的样品采自个旧白云山林场的碱性正长岩(GJ-15),野外未见变形变

质。锆石晶形呈短柱状并具有明显的振荡环带,其 Th/U 值(0.26 ~ 1.15)远大于变质锆石的 Th/U 比值(<0.1)(Gebauer, 1996; 陈道公等, 2004),属于典型的岩浆成因锆石(Williams *et al.*, 1996),样品的 10 个分析点均落在谐和线上或其附近(图 3)。锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 80.0 ± 0.6 Ma (MSWD =

表 1 个旧白云山碱性正长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb results for the Baiyunshan alkalic syenite in the Gejiu ore district

编号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Pb	Th	U		比值	1 σ	比值	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ
GJ-15-1	11	422	649	0.65	0.087 9	0.005 5	0.012 5	0.000 1	85.5	5.2	79.9	0.9
GJ-15-2	60	1 472	3 790	0.39	0.085 0	0.003 8	0.012 4	0.000 1	82.8	3.5	79.7	0.9
GJ-15-3	29	1 388	1 640	0.85	0.088 8	0.005 3	0.012 4	0.000 2	86.4	4.9	79.3	1.3
GJ-15-4	26	456	1 782	0.26	0.085 9	0.004 2	0.012 6	0.000 2	83.7	3.9	80.6	1.6
GJ-15-5	15	405	977	0.41	0.081 9	0.005 1	0.012 4	0.000 2	79.9	4.8	79.4	1.0
GJ-15-6	32	1 688	1 810	0.93	0.088 5	0.003 3	0.012 5	0.000 2	86.1	3.0	80.1	1.3
GJ-15-7	35	1 460	2 118	0.69	0.089 2	0.003 3	0.012 5	0.000 1	86.8	3.1	80.2	0.8
GJ-15-8	31	834	1 985	0.42	0.089 4	0.003 8	0.012 5	0.000 2	86.9	3.5	80.1	1.2
GJ-15-9	40	1 726	2 359	0.73	0.091 5	0.003 1	0.012 6	0.000 1	88.9	2.9	80.4	0.9
GJ-15-10	29	1 847	1 603	1.15	0.084 3	0.005 3	0.012 4	0.000 2	82.1	5.0	79.4	1.2

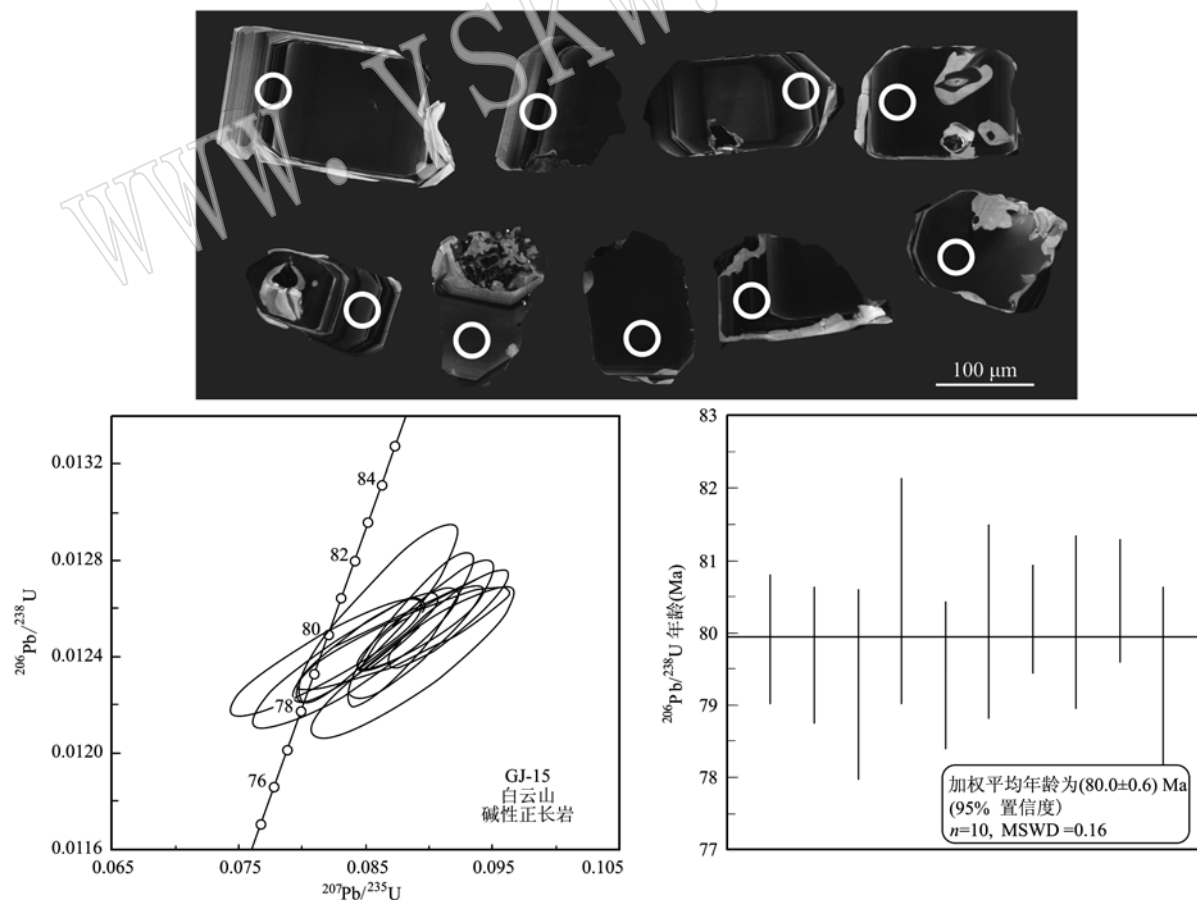


图 3 个旧白云山碱性正长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图、加权平均年龄和阴极发光(CL)图像(圆圈为打点位置)
Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram, weighted average age and cathodoluminescence (CL) images for the Baiyunshan alkalic syenites in the Gejiu ore district (round circle showing the spot position)

2.1),代表了岩浆侵位年龄。

量元素分析结果见表2。

3.2 全岩主量元素组成特征

个旧白云山地区的碱性正长岩和霞石正长岩主

碱性正长岩样品具有较高的SiO₂(56.69% ~ 61.89%,平均59.58%)、Al₂O₃(18.13% ~ 21.86%,

表2 个旧白云山碱性岩主量元素(w_B/%)和微量元素(w_B/10⁻⁶)分析结果

Table 2 Major (w_B/%) and trace elements (w_B/10⁻⁶) analytical results of the Baiyunshan alkalic rocks in the Gejiu ore district

岩性	碱性正长岩					霞石正长岩					
样品号	GJ-01	GJ-02	GJ-03	GJ-04	LY-01	GJ-05	GJ-06	GJ-07	AD-01	AD-02	AD-03
SiO ₂	59.78	59.76	59.75	61.89	56.69	54.79	54.72	53.98	53.29	54.19	53.89
TiO ₂	0.51	0.51	0.51	0.28	0.29	0.11	0.11	0.18	0.32	0.27	0.22
Al ₂ O ₃	19.55	19.48	19.53	18.13	21.86	21.87	21.72	21.36	21.71	21.78	21.22
Fe ₂ O ₃ ^T	4.50	4.55	4.52	2.24	3.38	3.23	3.34	3.80	4.28	3.40	3.64
MnO	0.15	0.15	0.15	0.09	0.11	0.16	0.16	0.19	0.21	0.16	0.16
MgO	0.64	0.64	0.64	0.26	0.37	0.06	0.05	0.09	0.12	0.15	0.16
CaO	1.82	1.84	1.84	3.19	4.43	1.96	1.99	2.79	2.89	2.48	3.90
Na ₂ O	3.62	3.62	3.63	4.19	3.50	8.44	8.37	8.71	8.65	8.84	7.61
K ₂ O	8.62	8.64	8.63	9.04	9.30	8.74	8.90	8.31	7.95	8.73	9.01
P ₂ O ₅	0.13	0.13	0.13	0.09	0.11	0.08	0.08	0.10	0.08	0.05	0.10
LOI	1.44	1.34	1.32	2.52	4.43	0.94	0.71	1.01	0.79	0.76	1.25
Total	100.76	100.68	100.66	101.94	104.48	100.37	100.16	100.52	100.28	100.81	101.16
Mg [#]	25	25	25	22	20	4	4	5	6	10	9
Sc	2.4	2.3	2.4	1.8	1.6	1.5	1.5	1.6	1.4	1.5	1.6
V	31.7	31.2	31.1	19.3	36.1	15.2	16.6	25.5	39.4	24.6	30.1
Cr	19.0	19.2	20.3	10.2	10.5	4.2	4.8	3.9	15.4	13.8	27.2
Co	4.5	4.5	4.4	2.1	3.7	1.9	2.0	2.2	3.3	2.2	2.8
Ni	1.8	1.8	1.8	1.7	2.7	1.2	1.3	1.4	2.2	1.3	1.7
Ga	23.7	23.5	23.2	20.3	21.4	25.3	26.3	25.9	25.6	22.9	22.5
Rb	420.2	416.1	414.0	475.9	217.3	189.0	191.6	179.6	217.6	261.6	228.1
Ba	510.4	501.6	500.0	897.2	990.9	45.1	46.1	45.5	347.6	368.7	394.4
Sr	679.8	669.8	660.9	1 534.2	2 576.6	904.3	916.2	896.1	1 120.8	1 013.6	1 292.0
Y	32.6	32.1	32.1	18.0	18.5	29.8	31.2	46.4	37.2	27.5	61.7
Th	116.1	114.2	113.3	69.8	66.9	140.2	149.6	167.9	191.8	136.4	171.6
U	13.3	13.2	12.9	15.0	14.1	65.5	66.3	79.7	70.2	44.5	99.3
Pb	128.0	126.1	126.4	98.6	161.7	126.6	132.8	102.9	204.8	36.6	109.0
Nb	83.3	82.5	82.0	45.3	65.6	145.7	144.2	171.5	144.2	91.5	146.5
Ta	4.5	4.4	4.4	2.5	3.5	3.0	3.0	3.8	3.5	2.4	3.1
Zr	508.9	478.5	485.9	411.3	472.1	1 232.9	1 232.2	1 609.9	981.2	629.9	1 378.4
Hf	10.8	10.3	10.5	7.7	6.5	13.5	13.5	17.5	13.0	7.7	14.3
La	236.10	232.40	230.70	126.00	203.50	277.10	295.70	356.10	323.70	274.20	305.00
Ce	377.50	379.50	376.00	200.80	288.50	388.90	421.40	509.80	482.60	387.40	503.20
Pr	40.13	39.58	39.24	18.91	24.93	31.83	33.98	41.61	41.67	32.59	44.91
Nd	126.10	123.40	123.40	57.80	71.15	82.00	85.87	107.00	115.00	87.57	130.50
Sm	16.72	16.26	16.15	7.33	7.49	7.75	8.10	11.11	12.85	9.36	15.93
Eu	2.99	2.92	2.90	1.54	1.71	1.58	1.65	2.35	2.68	1.98	3.40
Gd	12.25	11.97	12.03	5.66	6.36	7.48	7.75	10.41	11.86	8.19	13.28
Tb	1.42	1.39	1.37	0.64	0.59	0.67	0.70	1.06	1.11	0.81	1.53
Dy	6.64	6.44	6.51	3.11	2.74	3.33	3.45	5.46	5.40	3.81	7.91
Ho	1.19	1.17	1.16	0.60	0.52	0.71	0.74	1.19	1.09	0.76	1.63
Er	2.93	2.87	2.88	1.60	1.44	2.39	2.44	3.75	3.09	2.21	4.89
Tm	0.41	0.40	0.40	0.25	0.23	0.44	0.45	0.66	0.50	0.36	0.83
Yb	2.64	2.58	2.60	1.66	1.64	3.49	3.55	5.07	3.50	2.51	6.10
Lu	0.40	0.38	0.39	0.26	0.26	0.61	0.63	0.85	0.53	0.39	0.95
(La/Yb) _N	89.30	90.08	88.80	75.90	124.31	79.40	83.32	70.29	92.54	109.37	50.02

续表 2

Continued Table 2

岩性	碱性正长岩					霞石正长岩					
样品号	GJ-01	GJ-02	GJ-03	GJ-04	LY-01	GJ-05	GJ-06	GJ-07	AD-01	AD-02	AD-03
ΣREE	827.41	821.26	815.74	426.15	611.05	808.28	866.40	1 056.42	1 005.56	812.13	1 040.06
LREE	799.54	794.06	788.39	412.38	597.28	789.16	846.70	1 027.97	978.50	793.10	1 002.94
HREE	27.88	27.20	27.35	13.77	13.77	19.12	19.70	28.45	27.06	19.03	37.11
LREE/HREE	28.68	29.20	28.83	29.94	43.38	41.28	42.98	36.13	36.16	41.69	27.03
δEu	0.64	0.64	0.64	0.73	0.76	0.63	0.64	0.67	0.66	0.69	0.72
Nb/Ta	18.7	18.6	18.4	17.9	18.6	47.8	47.3	45.3	41.1	38.6	47.5
Zr/Hf	47.2	46.3	46.3	53.4	72.2	91.4	91.2	92.0	75.4	82.1	96.7
Th/U	8.8	8.6	8.8	4.7	4.8	2.1	2.3	2.1	2.7	3.1	1.7
Nb/La	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.5
(Th/Nb) _N	11.7	11.6	11.6	12.9	8.6	8.1	8.7	8.2	11.2	12.5	9.9
Zr/Y	15.6	14.9	15.1	22.8	25.5	41.3	39.4	34.7	26.4	22.9	22.4
σ	8.93	8.97	8.99	9.27	11.97	25.04	25.45	26.36	26.80	27.60	25.39
Alk	12.24	12.27	12.27	13.24	12.80	17.18	17.27	17.02	16.60	17.58	16.62
Na ₂ O/K ₂ O	0.42	0.42	0.42	0.46	0.38	0.97	0.94	1.05	1.09	1.01	0.84

注: $Mg^{\#} = 100 \times Mg / (Mg + \Sigma Fe)$; 全碱 $ALK = Na_2O + K_2O$; 里特曼指数 $\sigma = [(K_2O + Na_2O)^2 / (SiO_2 - 43)]$; 铝饱和度 $A/CNK = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$, $A/NK = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$; $\delta Eu = Eu_N / [(Sm_N + Gd_N)^{0.5}]$ 。

平均 19.71%)、 Na_2O (3.50% ~ 4.19%, 平均 3.71%)、 K_2O (8.62% ~ 9.30%, 平均 8.85%) 和全碱含量 ($K_2O + Na_2O = 12.24\% \sim 13.24\%$, 平均 12.56%), 同时具有较低的 MgO (0.26% ~ 0.64%, 平均 0.51%)、 TiO_2 (0.28% ~ 0.51%) 含量以及 $Mg^{\#}$ 值 (20 ~ 25)。在 TAS 图解上 (图 4), 主要分布于

碱性和过碱性系列的正长岩区域。

同碱性正长岩相比, 霞石正长岩样品具有相似的 SiO_2 (53.29% ~ 54.79%)、 K_2O (7.95% ~ 9.01%) 和 Al_2O_3 (21.22% ~ 21.87%) 含量, 同时具有较高的 Na_2O (7.61% ~ 8.84%, 平均 8.44%)、全碱含量 (16.60% ~ 17.58%, 平均 17.05%)、 Na_2O/K_2O 值 (0.84 ~ 1.09 之间, 平均 0.98) 和里特曼指数 σ (25.04 ~ 27.60, 平均 26.11), 具有较低的 $Mg^{\#}$ 值 (3.63 ~ 9.59) 和较低的 TiO_2 含量 (0.11% ~ 0.32%)。

3.3 全岩微量元素组成特征

个旧白云山地区的碱性正长岩和霞石正长岩微量元素分析结果见表 2。同霞石正长岩相比, 碱性正长岩具有相对较低的稀土元素含量 (图 5b)。

在球粒陨石标准化稀土元素模式图中, 两类碱性岩的配分曲线基本一致, 均向右陡倾, 表现为轻稀土元素强富集, 轻重稀土元素发生了明显的分异, 具有弱的 δEu 负异常 (0.63 ~ 0.76)。相对碱性正长岩, 霞石正长岩具有较高的重稀土元素含量。在原始地幔标准化蛛网图中两类碱性岩均表现向右倾斜的特征 (图 5), 样品以亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素 (HFSE) 和亏损 Ba、Sr、Eu 等大离子亲石元素 (LILE) 为特征。两类岩石虽然在矿物组成上存在差异, 但微量元素配分模式相似 (图 5)。

3.4 全岩 Sr-Nd 同位素组成特征

Sr-Nd 同位素分析结果见表 3。利用所获得的

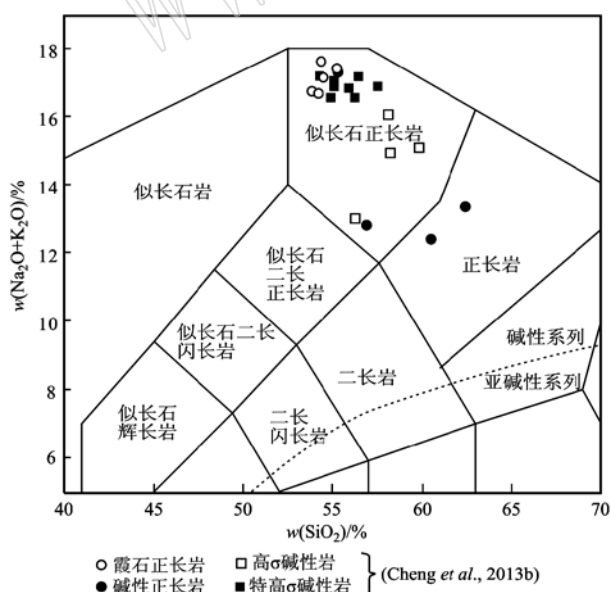


图 4 个旧白云山碱性岩全碱-硅 (TAS) 图解

(据 Middlemost, 1994)

Fig. 4 TAS diagram for the Baiyunshan alkalic rocks in the Gejiu ore district (after Middlemost, 1994)

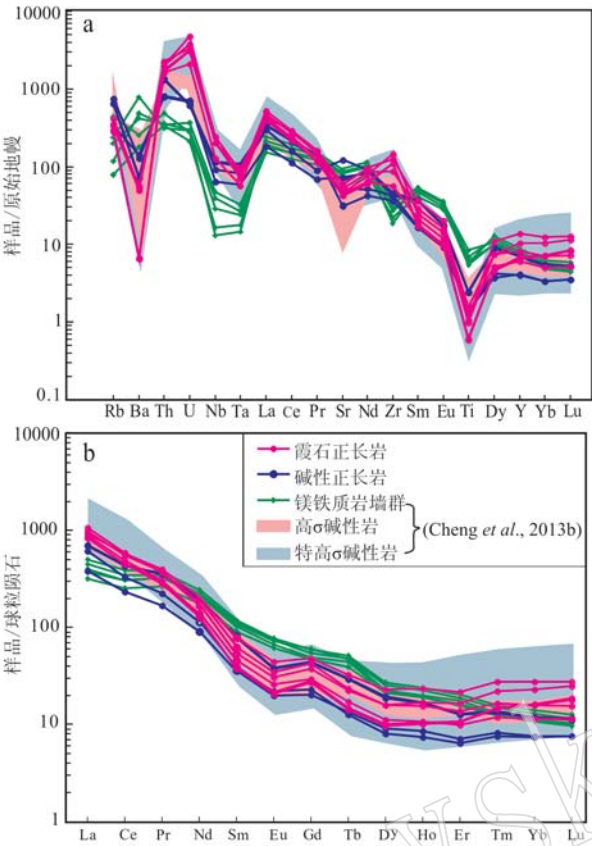


图 5 白云山碱性岩和个旧中性岩微量元素原始地幔标准化图解(a)与稀土元素球粒陨石标准化图解(b)(原始地幔与球粒陨石值据 Sun and McDonough (1989))

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) for Baiyunshan alkalic rocks and Gejiu grabbrodiorites (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

U-Pb 年龄计算得到的碱性正长岩和霞石正长岩具有分布范围相似的初始⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 值(分别为 0.709 403 ~0.710 381 和 0.709 863 ~0.709 846)、εNd(*t*) 值(分别为 -7.12 ~ -6.62 和 -6.71 ~ -6.49)以及 *t*_{DM2}(表 3)。上述 Sr-Nd 同位素分析结果与前人报道的白云山碱性岩的 Sr-Nd 同位素数据较为一致(Cheng *et al.*, 2013b)。

4 讨论

4.1 碱性岩的形成时代

前人使用多种方法对白云山碱性岩的形成年代进行测定,但年龄数据差异较大。如冶金工业部西南冶金地质勘探公司(1984)最早获得的长石 K-Ar 法年龄为 62 ~60 Ma,因其时代相对花岗岩较晚且具有较高的 K、Na 含量,一度被认为是花岗岩演化后期分异的产物。另外一些研究者认为,区内碱性岩形成于晚白垩世时期,但所获得的年龄变化范围较大。如伍勤生等(1986)测定的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 94.3 ±2.4 Ma;谢应雯等(1984)用 K-Ar 法测定碱性岩为 75 Ma;汪志芬等(1983)测定黑云母⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄为 79.9 ±0.5 Ma。这些差异较大的年龄显然不能反映岩体的形成时代。

岩浆锆石不易遭受后期热事件的干扰,其年龄可以反映岩浆的侵位结晶年龄。为此,Cheng 等(2013b)测定碱性岩中锆石 U-Pb 年龄为 79.2 ±1.1 Ma;黄文龙等(2016)对个旧复式岩体中的花岗岩、

表 3 白云山碱性岩 Sr-Nd 同位素分析结果
Table 3 The Sr-Nd isotopic compositions of the Baiyunshan alkalic rocks at Gejiu district

样品号	岩性	年龄	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	±2σ	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	εNd (<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM2} /Ga	数据来源
15GJ-15	碱性正	80	0.901	0.710 427	12	0.512 211	8	0.709 403	0.512 170	-7.12	1.41	本文
15GJ-14	长岩	80	1.880	0.712 518	11	0.512 237	8	0.710 381	0.512 196	-6.62	1.37	
15GJ-17	霞石正	80	0.624	0.710 572	9	0.512 222	9	0.709 863	0.512 191	-6.71	1.38	
15GJ-18	长岩	80	0.595	0.710 522	11	0.512 235	6	0.709 846	0.512 203	-6.49	1.36	
CYB0807025	碱性岩	79	0.712	0.710 654	14	0.512 245	12	0.709 900	0.512 206	-6.5	1.41	Cheng <i>et al.</i> , 2013b
CYB0807026		79	0.707	0.710 649	9	0.512 235	10	0.709 900	0.512 198	-6.6	1.42	
CYB0807027		79	0.878	0.710 812	19	0.512 240	11	0.709 900	0.512 212	-6.4	1.40	
CYB0807028		79	0.898	0.710 793	10	0.512 241	12	0.709 800	0.512 212	-6.4	1.40	
CYB0807029		79	1.410	0.711 286	12	0.512 228	12	0.709 700	0.512 198	-6.6	1.42	

中基性岩、霞石正长岩进行了同一批次的高精度 U-Pb 锆石测年,获得的上述 3 类岩性侵位年龄在误差范围内一致,认为它们岩性为同期岩浆活动产物。本次研究补充采集了白云山地区的碱性正长岩,获得的锆石 U-Pb 年龄为 80.0 ± 0.6 Ma,其结果与前述锆石 U-Pb 年龄在误差范围内是一致的。这进一步表明,白云山地区的碱性正长岩和霞石正长岩与个旧地区的中基性岩、成矿花岗岩是同一次构造岩浆事件的产物。

4.2 碱性岩的岩浆源区特征

碱性岩一般产于碰撞后、裂谷或者板内伸展构造环境下(Eby, 1992; Nedelec and Stephens, 1996)。个旧地区白云山碱性岩的原始地幔标准化配分型式显示出较明显的 Nb、Ta、Ti 负异常,这种负异常可能为弧岩浆或者壳源物质混染的结果(夏林圻等, 2007)。但它们均一的 Sr-Nd 同位素组成(初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 $0.7094 \sim 0.7104$, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 为 $-7.12 \sim -6.4$ [图 6, 本文及 Cheng 等(2013b)数据],说明本区岩浆熔体受到壳源物质混染的程度相对较小;并

且白云山碱性岩较高的 Zr 含量($411 \times 10^{-6} \sim 1610 \times 10^{-6}$)及 Zr/Y 值($14.9 \sim 41.3$),明显高于正常弧岩浆的 Zr 含量($< 130 \times 10^{-6}$)及 Zr/Y 值(< 4)(Xia *et al.*, 2013)。因此,原始地幔标准化配分型式显示的 Nb、Ta、Ti 负异常及相关微量元素比值应该为源区特有的地球化学特征。个旧白云山碱性岩具有相对较高的 SiO_2 ($56.69\% \sim 61.89\%$)、 MgO ($0.26\% \sim 0.64\%$, 平均 0.51%)、 TiO_2 ($0.28\% \sim 0.51\%$)含量以及 $\text{Mg}^\#$ 值($20 \sim 25$),表明其原生岩浆在上升和就位过程中经历了镁铁质矿物的结晶分异作用。稀土元素配分图解上没有显示明显的 Eu 负异常,因此本文认为岩浆演化过程中没有经历大量的斜长石结晶分异作用。

碱性岩一般以具中低含量的 SiO_2 、高含量的碱性金属元素(Na、K)和稀土元素(REE)为特点(Kogarko, 1987, 1990; Upton and Emeleus, 1987; Sørensen, 1992; Le Maitre *et al.*, 2002; Möller and Williamsjones, 2016),其成因主要有以下几种观点:①长英质壳源物质在高压下部分熔融形成原生岩浆后

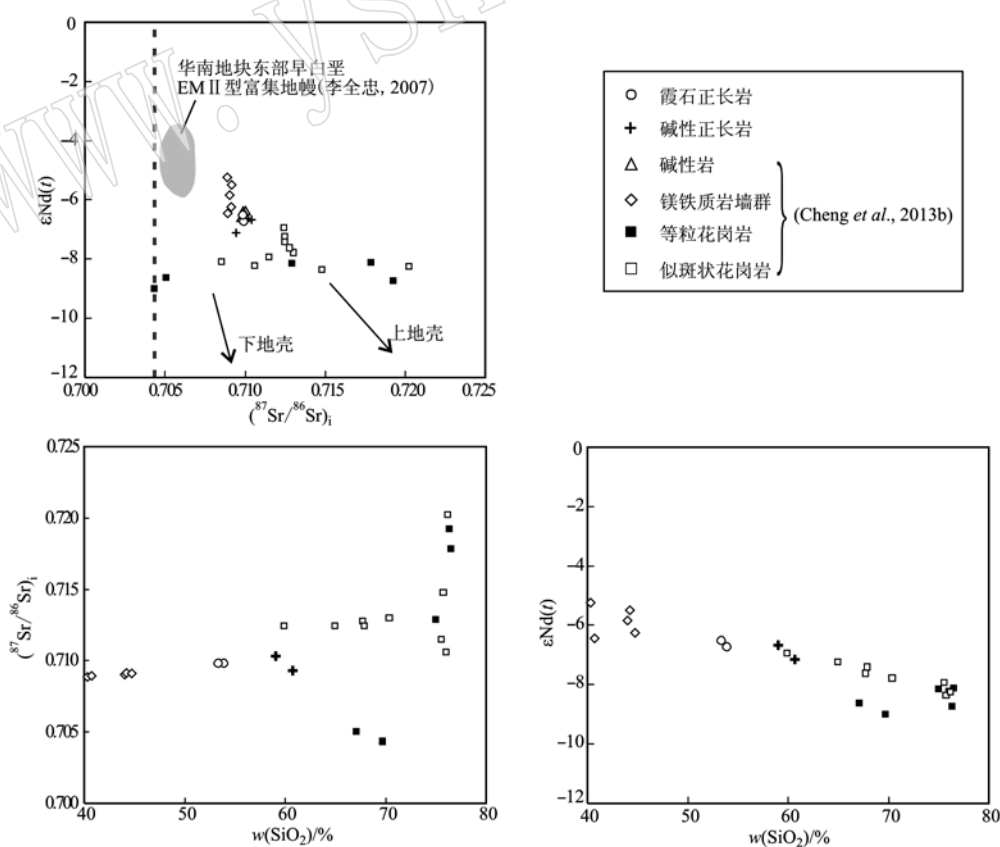


图 6 白云山碱性岩、个旧中基性岩和花岗岩初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - SiO_2 与 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ - SiO_2 图解

Fig.6 Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - SiO_2 and $\varepsilon\text{Nd}(t)$ - SiO_2 diagrams for Baiyunshan alkalic rocks, grabbrodiorites and granites in the Gejiu ore district

分异形成 (Huang and Wyllie, 1981; Lubala *et al.*, 1994); ② 富集岩石圈地幔部分熔融形成初始的碱性玄武质岩浆, 然后经历结晶分异而形成 (Brown and Becker, 1986; Yang *et al.*, 2005); ③ 幔源物质上侵地壳形成长英质岩浆, 然后幔源物质分异的玄武质岩浆与长英质岩浆混合形成碱性岩的原生岩浆 (Barker *et al.*, 1975; Litvinovsky *et al.*, 2002; Rishuus *et al.*, 2005; 杨进辉等, 2007); ④ 基性下地壳部分熔融产生的原生岩浆经历结晶分异形成碱性岩浆 (Tchameni *et al.*, 2001; Downes *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2010)。

个旧白云山地区碱性岩由碱性和过碱性正长岩组成 (图4)。实验岩石学表明, 古老的长英质地壳的部分熔融只能形成比长英质地壳 (57.1% ~ 64.5%) 更高 SiO_2 及更低 MgO 含量的熔体 (Gao *et al.*, 1998; Rudnick and Gao, 2003)。同上述研究结果相比, 白云山碱性岩中具有较低的 SiO_2 含量 (最低含量为 53.29%), 因此长英质地壳物质部分熔融难以形成类似的产物 (Yang *et al.*, 2012)。其次, 根据 Rudnick 等 (2003) 和黄方等 (2010) 通过下地壳基性麻粒岩和榴辉岩包体的化学成分总结的数据, 基性下地壳具有较低的 Na_2O 和 K_2O 含量 (分别为 2.40% 和 0.38%) 和稀土元素含量 (REE 总量约 65×10^{-6})。同时根据黄方等 (2010) 的基性下地壳包体 K_2O 分布概率图, 可知基性下地壳的 K_2O 含量一般低于 2%。这样的源区通过部分熔融形成本文具有较高 Na_2O 、 K_2O 含量 (分别为 6%、9%) 和稀土元素总量 (平均为 870×10^{-6}) 的个旧碱性岩样品是比较困难的。另外, 由基性下地壳部分熔融形成的正长岩和粗面岩 (Tchameni *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2005), 其主微量和同位素特征与周围的基性麻粒岩或花岗岩相近, 并且碱性岩周围没有出露同时代的幔源岩石, 因此这些正长岩和粗面岩被认为是来自基性下地壳部分熔融的源区。个旧白云山碱性岩周围没有出露有基性麻粒岩或相关包体, 但出露有同时代的中基性岩, 碱性岩与中基性岩相近的 REE 总量和 Sr-Nd 同位素特征表明了碱性岩的幔源特征 (图6)。因此, 本文的数据不支持基性下地壳部分熔融形成个旧白云山碱性岩的观点。

白云山地区碱性岩的 Sr-Nd 同位素组成集中在一个较小的范围之内 (图6), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.709 4 ~ 0.710 4, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 为 -7.12 ~ -6.4, 而壳幔物质混

合会使同位素分布范围扩大 (Saunders *et al.*, 1992; Downes *et al.*, 2005), 因此研究区碱性岩均一的同位素特征表明熔体中壳源物质加入比较有限。白云山碱性岩轻重稀土元素明显分异, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 73.1 \sim 92.0$, 不相容元素蛛网图与个旧中基性岩相似 (图5), 结合其具有的高碱富钠、 Dy/Yb 值 (1 ~ 2) 以及相对平缓的 HREE 配分模式 (图5) 的特征, 推测碱性岩的原生岩浆可能来自于富含角闪石尖晶石-石榴子石过渡区的岩石圈地幔源区, 并且初始熔体在上升分异过程中, 并未受到大量地壳物质混染的影响。

个旧白云山地区的碱性岩主要包括碱性正长岩和霞石正长岩, 哈克图解上, 它们显示了类似的分布范围 (图7、图8), 同时具有较为一致的微量元素分配特征, 均具有亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素 (HFSE) 和 Ba、Sr、Eu 等大离子亲石元素 (LILE) 的特征 (图5a、5b), 结合其一致的 Sr-Nd 同位素组成 (图6a), 本文初步认为这两套碱性岩石具有一致的原生岩浆成分。由白云山碱性岩较高 Na_2O 和 K_2O 含量 (分别为 6% 和 9%) 和稀土元素含量 (REE 总量平均为 870×10^{-6}) 可知, 源区产生的原生岩浆也应具有较高的 Na_2O 、 K_2O 和稀土元素含量。结合中等的 SiO_2 含量 (56.69% ~ 61.89%)、较低的 MgO (0.26% ~ 0.64%, 平均 0.51%) 和 TiO_2 含量 (0.28% ~ 0.51%) 以及 $\text{Mg}^\#$ (20 ~ 25) 这些特征, 本文推断碱性岩的原生岩浆很可能是来自岩石圈富集地幔的碱性玄武质岩浆, 其通过镁铁质矿物的不同的结晶分异形成了现在的霞石正长岩和碱性正长岩。

在个旧地区, 碱性岩与中基性岩及花岗岩相互伴生产出。高精度的锆石 U-Pb 年代学结果表明, 三者是同一次岩浆-构造事件的产物。同研究区碱性岩相比, 中基性岩具有相对亏损的 Sr-Nd 同位素组成 (图6), 说明后者源于一个比前者相对亏损的源区, 而这一假设也与这些中基性岩较高的 Fe_2O_3^T 、 MgO 、 TiO_2 以及无明显的富集特征相一致。花岗岩则表现为地壳源区的 Sr-Nd 同位素特征。本文中碱性岩具更高的 SiO_2 含量, 表明相对于中基性岩石, 它们经历了更高程度的演化作用。综上所述, 本区碱性正长岩与霞石正长岩很可能是源于同一富集地幔源区并经历不同程度演化产物, 中基性岩同研究区碱性岩相比则源于一个相对亏损的源区, 而成矿花岗岩来自地壳源区。

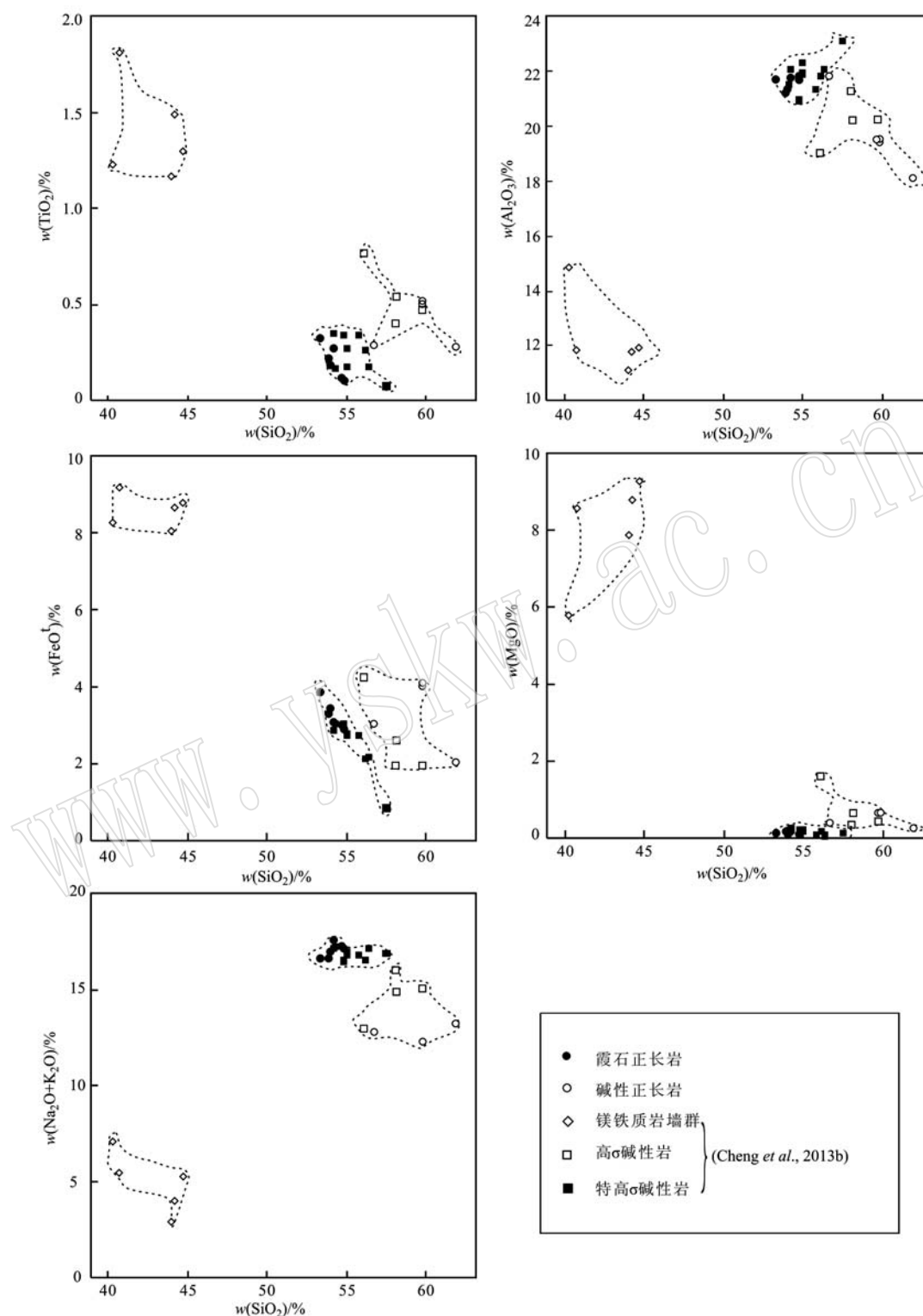


图 7 白云山碱性岩及个旧中基性岩的主量元素哈克图解

Fig. 7 Harker diagrams for major elements of Baiyunshan alkaline rocks and grabbrodiorites in the Gejiu ore district

4.3 碱性岩对锡多金属成矿的贡献

研究表明,大型锡矿床的形成需要具备下列条

件: ① 成矿物质在强烈化学风化条件下运移至低洼处,初步沉积形成富锡原岩; ② 伴随构造运动,沉积

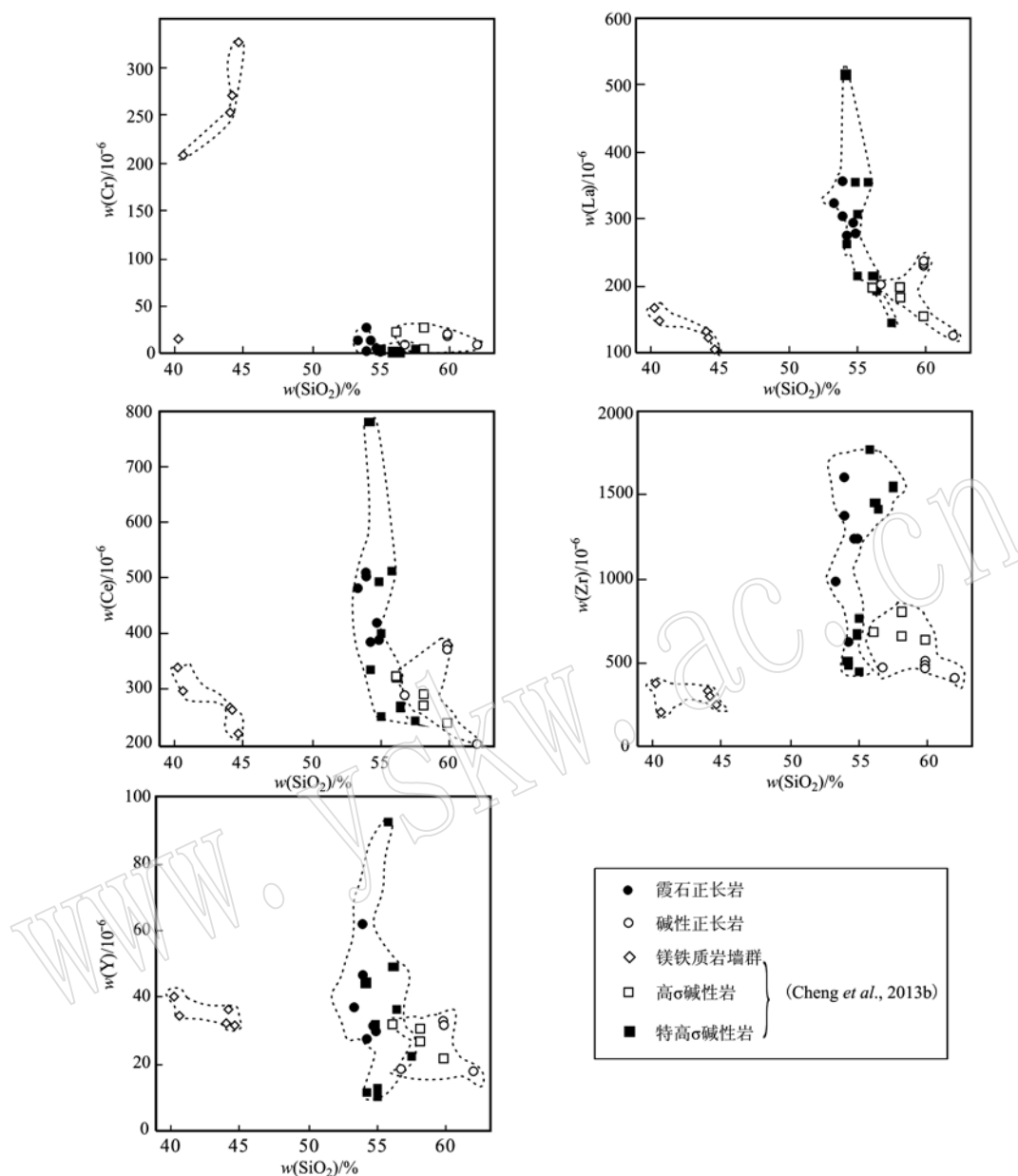


图8 白云山碱性岩及个旧中基性岩微量元素哈克图解

Fig. 8 Haker diagrams for trace elements of Baiyunshan alkalic rocks and grabbrodiorites in the Gejiu ore district

原岩物质进一步运移到板块边缘,促使成矿物质进一步聚集;③富集锡、钨等金属的地质体遭受高热物质的加热,产生锡、钨富集的熔体,并在有利部位排泄成矿(Romer and Kroner, 2015a)。由于低温的沉积岩难以自发熔融而形成富含锡、钨的熔体,必然需要外部施加的高温,而来自地幔的热能为最终矿化提供了能量基础(Chesley *et al.*, 1993; Condie *et al.*, 2001; Romer and Kroner, 2015b)。由上述讨论可知,本区形成于伸展构造背景中的源于富集地幔的碱性岩、区域内同期发育的中基性以及成矿有

关花岗岩的地质关系,指示碱性岩和中基性岩代表的不均一幔源物质的部分熔融具有的潜在高温对个旧地区的成矿至少都提供或增加了成矿的热能。

综上所述,滇东南个旧地区在燕山期板内伸展构造背景下,岩石圈地幔因伸展而发生不同富集程度的地幔物质发生部分熔融,形成研究区的钙碱性中基性岩和碱性岩的原生岩浆,这些熔体通过构造薄弱带上升并发生了不同程度的分异作用,形成了研究区的钙碱性中基性岩和碱性岩,而幔源熔体伴随的热能诱发中下地壳部分熔融形成花岗质熔体。

上述几种岩浆上升至近地表,激发活化构造活动带中富集锡钨的沉积岩,使成矿物质在有利部位富集成矿。因此,幔源物质在锡多金属成矿过程的能量供给方面发挥了重要的作用,但其是否直接提供了成矿物质,尚需进一步探究。

5 结论

(1) 滇东南个旧地区西区北部的白云山碱性正长岩形成于晚白垩世(80.0 ± 0.6 Ma),其与霞石正长岩、中基性岩、成矿花岗岩均是同一次构造岩浆事件的产物。

(2) 白云山碱性正长岩与霞石正长岩为源于同一富集地幔源区并经历演化的产物。

(3) 在个旧矿区,源于富集地幔的碱性岩浆为花岗岩质岩体的成岩成矿作用提供了重要的热量贡献。

致谢 在野外工作中云锡集团各个部门工作人员提供了大力支持和帮助,在此表示万分感谢!感谢审稿人为本文提出的宝贵修改意见,作者谨致以衷心的感谢!

References

- Barker F, Wones D R, Sharp W N, *et al.* 1975. The Pikes Peak batholith, Colorado Front Range and a model for the origin of the gabbro-anorthosite-syenite-potassic granite suite[J]. *Precambrian Research*, 2(2): 97 ~ 160.
- Bowden P. 1985. The geochemistry and mineralization of alkaline ring complexes in Africa (a review)[J]. *Journal of African Earth Sciences* (1983), 3(1 ~ 2): 17 ~ 39.
- Brown P E and Becker S M. 1986. Fractionation, hybridisation and magma-mixing in the Kialineq centre East Greenland[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(1): 57 ~ 70.
- Chen Daogong and Ni Tao. 2004. Zircon U, Th and Pb characteristics of high-grade metamorphic rocks from Dabie-Sulu orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 999 ~ 1 006(in Chinese with English abstract).
- Chen Jiangfeng and Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*, 284(1): 101 ~ 133.
- Chen Jianlin, Xu Jifeng, Kang Zhiqiang, *et al.* 2010. Origin of Cenozoic alkaline potassic volcanic rocks at Konglong Xiang, Lhasa terrane, Tibetan Plateau: Products of partial melting of a mafic lower-crustal source? [J]. *Chemical Geology*, 273(3): 286 ~ 299.
- Chen Maohong, Mao Jingwen, Frank B, *et al.* 2011. Structural features and metallogenesis of the Carlin-type Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 217 ~ 234.
- Chen Yuehui, Chen Zuyi, Cai Yuqi, *et al.* 1996. Meso-Cenozoic extensional tectonic types and their main characteristics in southeastern China[J]. *Uranium Geology*, 12: 257 ~ 264 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yanbo and Mao Jingwen. 2010. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan province, SW China: Constraints on their petrogenesis and tectonic setting[J]. *Lithos*, 120: 258 ~ 276.
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Chang Zhaoshan, *et al.* 2013a. The origin of the world class tin-polymetallic deposits in the Gejiu district, SW China: Constraints from metal zoning characteristics and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 50 ~ 62.
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen and Liu Peng. 2016. Geodynamic setting of Late Cretaceous Sn-W mineralization in southeastern Yunnan and northeastern Vietnam[J]. *Solid Earth Sciences*, 1(3): 79 ~ 88.
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen and Spandler C. 2013b. Petrogenesis and geodynamic implications of the Gejiu igneous complex in the western Cathaysia block, South China[J]. *Lithos*, 175 ~ 176: 213 ~ 229.
- Cheng Yanbo, Tong Xiang, Wu Junde, *et al.* 2010. Geochronology framework of the W-Sn mineralization granites in western South China and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 809 ~ 818(in Chinese with English abstract).
- Chesley J T, Halliday A N, Snee L W, *et al.* 1993. Thermochronology of the Cornubian batholith in southwest England: Implications for pluton emplacement and protracted hydrothermal mineralization [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(8): 1 817 ~ 1 835.
- Condie K C, Des M D and Abbott D. 2001. Precambrian superplumes and supercontinents: A record in black shales, carbon isotopes and paleoclimates? [J]. *Precambrian Research*, 106(3): 239 ~ 260.
- Downes H, Balaganskaya E, Beard A, *et al.* 2005. Petrogenetic processes in the ultramafic, alkaline and carbonatitic magmatism in the Kola Alkaline Province: A review[J]. *Lithos*, 85(1 ~ 4): 48 ~ 75.
- Du Yuansheng, Huang Hongwei, Huang Zhiqiang, *et al.* 2009. Basin translation from Late Paleozoic to Triassic of Youjiang basin and its tectonic signification[J]. *Geological Science and Technology Information*, 28(6): 10 ~ 15(in Chinese with English abstract).
- Du Yuansheng, Huang Hu, Yang Jianghai, *et al.* 2013. The basin translation from Late Paleozoic to Triassic of the youjiang basin and its tectonic signification[J]. *Geological Review*, 59(1): 1 ~ 10(in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641.
- Eby G N, Woolley A, Din V, *et al.* 1998. Geochemistry and Petrogenesis of Nepheline Syenites: Kasungu-Chipala, Ilomba and Ulindi Neph-

- line Syenite Intrusions, North Nyasa Alkaline Province, Malawi[J]. *Journal of Petrology*, 39(8): 1 405 ~ 1 424.
- Enos P. 2006. Triassic Evolution of the Yangtze Platform in Guizhou Province, People's Republic of China[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 417: 1 ~ 105.
- Fu M, Changkakoti A, Krouse H R, *et al.* 1991. An oxygen, hydrogen, sulfur and carbon isotope study of carbonate-replacement (skarn) tin deposits of the Dachang tin field, China[J]. *Economic geology*, 86(8): 1 683 ~ 1 703.
- Gao Shan, Zhang Benren, Jin Zhenmin, *et al.* 1998. How mafic is the lower continental crust? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1): 101 ~ 117.
- Gebauer D. 1996. A P-T-t path for an (Ultra? -) high-pressure ultramafic/mafic rock-association and its felsic country-rocks based on SHRIMP-dating of magmatic and metamorphic zircon domains. Example: Alpe Arami (Central Swiss Alps)[J]. *Physica Status Solidi Applied Research*, 204(11): 3 662 ~ 3 675.
- Graham S D, Holwell D A, McDonald I, *et al.* 2017. Magmatic Cu-Ni-PGE-Au sulfide mineralisation in alkaline igneous systems: An example from the Sron Garbh intrusion, Tyndrum, Scotland[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 961 ~ 984.
- Guo Jia, Zhang Rongqing, Li Congying, *et al.* 2018. Genesis of the Gaosong Sn-Cu deposit, Gejiu district, SW China: Constraints from in situ LA-ICP-MS cassiterite U-Pb dating and trace element fingerprinting[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 627 ~ 642.
- Han Zhijun, Wang Yangeng, Feng Jizhou, *et al.* 1999. *Geology and Exploration of Sedimentary-rock-hosted Disseminated gold Deposits in Southwestern Guizhou*[M]. Guiyang: Guizhou Sci. and Tech. Pub. House (in Chinese).
- Hedenquist J W and Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Nature*, 370(6 490): 519 ~ 527.
- Hu Zhaochu, Gao Shan, Liu Yongsheng, *et al.* 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23: 1 093 ~ 1 101.
- Huang Fang and He Yongsheng. 2010. Partial melting of the dry mafic continental crust: Implications for petrogenesis of C-type adakites[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 55: 1 255 ~ 1 267 (in Chinese with English abstract).
- Huang Feng, Xu Jifeng, Zeng Yunchuan, *et al.* 2017. Slab breakoff of the Neo-Tethys ocean in the Lhasa Terrane inferred from contemporaneous melting of the mantle and crust[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(11): 4 074 ~ 4 095.
- Huang Wenlong, Xu Jifeng, Chen Jianlin, *et al.* 2016. Geochronology and geochemistry of the Gejiu complex in the Yunnan Province, SW China: Petrogenesis and contributions of mantle-derived melts to tin mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2 330 ~ 2 346 (in Chinese with English abstract).
- Huang Wuliang and Wyllie P J. 1981. Phase relationships of S-type granite with H₂O to 35 kbar: Muscovite granite from Harney Peak, South Dakota[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11): 10 515 ~ 10 529.
- Kogarko L N. 1987. Alkaline rocks of the eastern part of the Baltic Shield (Kola Peninsula)[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 30(1): 531 ~ 544.
- Kogarko L N. 1990. Ore-forming potential of alkaline magmas[J]. *Lithos*, 26(1 ~ 2): 167 ~ 175.
- Kovalenko V I and Yarmolyuk V V. 1995. Endogenous rare metal ore formations and rare metal metallogeny of Mongolia[J]. *Economic Geology*, 90(3): 520 ~ 529.
- Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B, *et al.* 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Lehmann B. 1987. Tin granites, geochemical heritage, magmatic differentiation[J]. *Geologische Rundschau*, 76(1): 177 ~ 185.
- Li Quanzhong. 2007. Pb-Sr-Nd Isotopic Characteristics of the Early Cretaceous Mafic Rocks from Eastern China: The Contribution of the Lower Crust to the Mantle Source (Doctoral Dissertation)[D]. Hefei: University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua and McCulloch M T. 1996. Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozoic sediments from the southern margin of the Yangtze Block: Evidence for a Proterozoic continental collision in southeast China[J]. *Precambrian Research*, 76(1): 67 ~ 76.
- Li Xianhua, Liu Dunyi, Sun Min, *et al.* 2004. Precise Sm-Nd and U-Pb isotopic dating of the supergiant Shizhuyuan polymetallic deposit and its host granite, SE China[J]. *Geochemical Magazine*, 141(2): 225 ~ 231.
- Liang Xinquan and Guo Dingliang. 2003. The Mesozoic orogenic process in Hunan Province: The orogenic belt around the South China block[J]. *Land & Resources Herald*, 22(1): 15 ~ 18 (in Chinese with English abstract).
- Litvinovsky B A, Jahn B, Zandvilevich A N, *et al.* 2002. Petrogenesis of syenite-granite suites from the Bryansky Complex (Transbaikalia, Russia): Implications for the origin of A-type granitoid magmas[J]. *Chemical Geology*, 189(1): 105 ~ 133.
- Liu Jianming, Ye Jie, Ying Hanlong, *et al.* 2002. Sediment-hosted micro-disseminated gold mineralization constrained by basin paleotopographic highs in the Youjiang basin, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(5): 517 ~ 533.
- Liu Ying, Liu Haichen and Li Xianhua. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS[J]. *Geochimica*, 25(6): 552 ~ 558 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, *et al.* 2010. Continental and o-

- ceanic crust recycling-Induced melt peridotite interactions in the Trans-North China orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537 ~ 571.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, *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.
- Lubala R T, Frick C, Rogers J H, *et al.* 1994. Petrogenesis of syenites and granites of the Schiel Alkalic complex, Northern Transvaal, South Africa[J]. *The Journal of Geology*, 102(3): 307 ~ 316.
- Middlemost E A. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3 ~ 4): 215 ~ 224.
- Möller V and Williams-Jones A E. 2016. Petrogenesis of the Nechalacho Layered Suite, Canada: Magmatic evolution of a REE-Nb-rich nepheline syenite intrusion[J]. *Journal of Petrology*, 57(2): 229 ~ 276.
- Müller D and Groves D I. 2016. Potassic Igneous Rocks and Associated Gold-copper Mineralization [M]. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag.
- Nedelec A and Stephens W E. 1996. The Panafrican stratoid Granites of Madagascar: Alkaline magmatism in a post-collisional extensional setting[J]. *Journal of Petrology*, 36(5): 1367 ~ 1391.
- Qiu Yumin, Gao Shan, McNaughton N J, *et al.* 2000. First evidence of ≥ 3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. *Geology*, 28(1): 11 ~ 14.
- Riisshuus M S, Peate D W, Tegner C, *et al.* 2005. Petrogenesis of syenites at a rifted continental margin: Origin, contamination and interaction of alkaline mafic and felsic magmas in the Astrophyllite Bay Complex, East Greenland[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(3): 350 ~ 371.
- Romer R L and Kroner U. 2015a. Phanerozoic tin and tungsten mineralization—Tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting[J]. *Gondwana Research*, 31: 60 ~ 95.
- Romer R L and Kroner U. 2015b. Sediment and weathering control on the distribution of Paleozoic magmatic tin-tungsten mineralization[J]. *Mineralium Deposita*, 50(3): 327 ~ 338.
- Rudnick R L and Gao Shan. 2003. Composition of the continental crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1 ~ 64.
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, *et al.* 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 68(1): 41 ~ 60.
- Shu Liangshu, Sun Yan, Wang Dezi, *et al.* 1998. Mesozoic doming extensional tectonics of Wugongshan, South China[J]. *Science in China (Series D)*, 28(5): 431 ~ 438 (in Chinese with English abstract).
- Sørensen H. 1992. Agpaitic nepheline syenites: A potential source of rare elements[J]. *Applied Geochemistry*, 7(5): 417 ~ 427.
- Southwest Geological Exploration Corporation. 1984. *Geology of Tin Deposits in Gejiu* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Publishing House (in Chinese).
- Sun Shensu and McDonough W. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313 ~ 345.
- Sylvester P J. 1989. Post-collisional alkaline granites[J]. *The Journal of Geology*, 97(3): 261 ~ 280.
- Tchameni R, Mezger K, Nsifa N, *et al.* 2001. Crustal origin of Early Proterozoic syenites in the Congo craton (Ntem complex), South Cameroon[J]. *Lithos*, 57(1): 23 ~ 42.
- Upton B G J and Emeleus C H. 1987. Mid-Proterozoic alkaline magmatism in southern Greenland: The Gardar province[J]. *Geological Society of London*, 30(1): 449 ~ 471.
- Wang Zhifen. 1983. Some problems on the mineralization of tin deposits in Gejiu, Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2: 154 ~ 162 (in Chinese with English abstract).
- Wei Gangjian, Liang Xirong, Li Xibao, *et al.* 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP) MC-ICPMS[J]. *Geochimica*, 31: 35 ~ 42.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407 ~ 419.
- Williams I S, Buick I S and Cartwright I. 1996. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(1): 29 ~ 47.
- Wu Bin, Wang Rucheng, Yang Jinhui, *et al.* 2016. Zr and REE mineralization in sodic lujavrite from the Saima alkaline complex, north-eastern China: A mineralogical study and comparison with potassic rocks[J]. *Lithos*, 262: 232 ~ 246.
- Wu Qingsheng and Liu Qinglian. 1986. Study on the genesis evolution and mineralization of tin-bearing granite complex in Gejiu area[J]. *Journal of Guilin University of technology*, 6(3): 229 ~ 238 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77 ~ 89 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2013. Late Paleoproterozoic rift-related magmatic rocks in the North China Craton: Geological records of rifting in the Columbia supercontinent[J]. *Earth-Science Reviews*, 125(Supplement C): 69 ~ 86.
- Xie Yingwen, Zhang Yuquan and Hu Guoxiang. 1984. A preliminary study on geochemical characteristics and mineralization specificity of alkali-rich

- intrusive belt in Ailaoshan-Jinshajiang[J]. Journal of Kunming College of Technology, 4: 1~17(in Chinese with English abstract).
- Xu Bin, Jiang Shaoyong, Wang Rong, *et al.* 2015. Late Cretaceous granites from the giant Dulong Sn-polymetallic ore district in Yunnan Province, South China: Geochronology, geochemistry, mineral chemistry and Nd-Hf isotopic compositions[J]. Lithos, 218~219: 54~72.
- Yan Danping, Zhou Meifu, Song Honglin, *et al.* 2003. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China)[J]. Tectonophysics, 361(3): 239~254.
- Yang Jinhui, Chung Sunlin, Wilde S A, *et al.* 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence[J]. Chemical Geology, 214(1): 99~125.
- Yang Jinhui, Sun Jinfeng, Zhang Min, *et al.* 2012. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension[J]. Chemical Geology, 328: 149~67.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Xie Liewen, *et al.* 2007. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdonggou syenites in the Liaodong Peninsula, East North China Craton: Constraints from in-situ zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 263~276 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zongxi, Mao Jingwen, Chen Maolong, *et al.* 2008. Re-Os dating of molybdenite from the Kafang skarn copper (tin) deposit in the Gejiu tin polymetallic ore district and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(8): 1 937~1 944(in Chinese with English abstract).
- Yu Yuru. 1993. Ree characteristics of alkaline rock boby in Baiyunshan, Gejiu [J]. Yunnan Geology, 12(3): 277~289 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jiangnan, Zuo Renguang, Chen Shouyu, *et al.* 2015. Application of the tectono-geochemistry method to mineral prospectivity mapping: A case study of the Gaosong tin-polymetallic deposit, Gejiu district, SW China[J]. Ore Geology Reviews, 71: 719~734.
- Zhou Guoqing and Zhao Jianxin. 1991. Sm-Nd isotopic systematics of the NE Jiangxi ophiolite (NEJXO), SE margin of the Yangtze Craton, south China[J]. Chinese Science Bulletin, 16: 1 374~1 379.
- Zhou Meifu, Yan Danping, Kennedy A K, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 196(1): 51~67.
- Th 和 Pb 化学组成特征统计[J]. 岩石学报, 20(5): 999~1 006.
- 陈跃辉, 陈祖伊, 蔡煜琦, 等. 1996. 华东南中生代伸展构造类型及其主要特征[J]. 铀矿地质, 5: 257~264.
- 程彦博, 童 祥, 武俊德, 等. 2010. 华南西部地区晚中生代与 W-Sn 矿有关花岗岩的年代学格架及地质意义[J]. 岩石学报, 26(3): 809~818.
- 杜远生, 黄宏伟, 黄志强, 等. 2009. 右江盆地晚古生代-三叠纪盆地转换及其构造意义[J]. 地质科技情报, 28(6): 10~15.
- 杜远生, 黄 虎, 杨江海, 等. 2013. 晚古生代-中三叠世右江盆地的格局和转换[J]. 地质论评, 59(1): 1~10.
- 韩至钧, 王砚耕, 冯济舟, 等. 1999. 黔西南金矿地质与勘探[M]. 贵阳: 贵州科技出版社.
- 黄 方, 何永胜. 2010. 干的基性大陆下地壳部分熔融: 对 C 型埃达克岩成因的制约[J]. 科学通报, 55: 1 255~1 267.
- 黄文龙, 许继峰, 陈建林, 等. 2016. 云南个旧杂岩体年代学与地球化学: 岩石成因和幔源岩浆对锡成矿贡献[J]. 岩石学报, 32(8): 2 330~2 346.
- 李全忠. 2007. 中国东部早白垩世基性岩 Pb-Sr-Nd 同位素特征: 下地壳对其地幔源区的贡献(博士论文)[D]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 梁新权, 郭定良. 2003. 湖南中生代造山过程-华南陆块周缘造山带之影响[J]. 国土资源导刊, 22(1): 15~18.
- 刘 颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 6: 552~558.
- 舒良树, 孙 岩, 王德滋, 等. 1998. 华南武功山中生代伸展构造[J]. 中国科学(D 辑), 28(5): 431~438.
- 汪志芬. 1983. 关于个旧锡矿成矿作用的几个问题[J]. 地质学报, 2: 154~162.
- 伍勤生, 刘青莲. 1986. 个旧含锡花岗岩浆杂岩体的成因演化及成矿[J]. 桂林冶金地质学院学报, (3): 229~238.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 77~89.
- 谢应雯, 张玉泉, 胡国相. 1984. 哀牢山-金沙江富碱侵入带地球化学与成矿专属性初步研究[J]. 昆明工学院学报, 4: 1~17.
- 杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 等. 2007. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义: 锆石原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 23(2): 263~276.
- 杨宗喜, 毛景文, 陈懋弘, 等. 2008. 云南个旧卡房砂卡岩型铜(锡)矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(8): 1 937~1 943.
- 冶金工业部西南冶金地质勘探公司. 1984. 个旧锡矿地质[M]. 北京: 冶金工业出版社.
- 虞裕如. 1993. 个旧白云山碱性岩体的稀土元素特征研究[J]. 云南地质, (3): 277~289.

附中文参考文献

陈道公, 倪 涛. 2004. 大别-苏鲁造山带高级变质岩中锆石微区 U、