



· 显生宙地球生命演化 ·

华南板块西南缘个旧碱性杂岩体地球化学特征及深部动力学意义

林立航,朱韧之,赖绍聪,刘 鹏,刘 敏,秦江锋,杨 航

(西北大学 地质学系/大陆演化与早期生命全国重点实验室,陕西 西安 710069)

摘要 为了探究华南板块西南缘大陆岩石圈的演化过程,该研究编译、总结华南板块西南缘晚白垩世个旧碱性杂岩体已报道的全岩主微量元素($n=76$)、全岩 Sr-Nd-Pb 同位素($n=54$)及锆石 Hf 同位素数据($n=113$),对个旧碱性杂岩体的地球化学特征和成因模型进行重建。地球化学特征显示,研究区个旧碱性杂岩体分为3组岩石组合:第一组为钾玄质霞石正长岩,具有高全碱质量分数(12.76%~17.57%)和总稀土元素含量($134\times 10^{-6}\sim 1764\times 10^{-6}$)、低 Ba/La 比值,以及富集的 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素特征,指示了其源区为经历过俯冲熔体交代的富集地幔;第二组为钾玄质二长辉长岩-二长岩组合,二者具有极高的 Ba($1\ 619\times 10^{-6}\sim 4\ 640\times 10^{-6}$)和 Sr($970\times 10^{-6}\sim 1\ 690\times 10^{-6}$)含量、低的 Th/Yb 比值,具有与霞石正长岩相似的 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素特征,表明其起源于俯冲流体交代的富集地幔;第三组为二长花岗岩-钾长花岗岩组合,其具有高的 Th($30.7\times 10^{-6}\sim 68.3\times 10^{-6}$)和 U($4.11\times 10^{-6}\sim 23.2\times 10^{-6}$)含量、与下地壳一致的 Nb/U 比值及相似的微量元素分布特征,表明其起源于不同深度的下地壳。二长花岗岩发育有暗色包体及相关幔源地球化学特征,指示源区经历过幔源岩浆注入并发生壳幔岩浆混合。华南板块岩石圈晚白垩时期,在新特提斯洋俯冲过程的影响下发生了东西向的伸展,进而诱发岩石圈伸展背景下的软流圈物质上涌,导致大陆岩石圈物质再造;同时,大量幔源物质注入下地壳促进了大陆地壳生长。

关键词 个旧碱性杂岩体;晚白垩世;富集地幔;大陆岩石圈伸展;大陆地壳生长

中图分类号:P588.15 **DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbr.2025-02-003

Geochemical signatures and geodynamic significance of Gejiu alkaline complex in southwestern South China Block

LIN Lihang, ZHU Renzhi, LAI Shaocong, LIU Peng,
LIU Min, QIN Jiangfeng, YANG Hang

(State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life/Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract To investigate the evolution of the continental lithosphere of the southwestern South China Block, this study compiled previously whole-rock major and trace elements ($n=76$), whole-rock Sr-Nd-Pb isotopes ($n=54$) and in-situ zircon Hf isotopes data ($n=113$) of late Cretaceous Gejiu alkaline complex in South Chi-

收稿日期:2024-11-09

基金项目:国家自然科学基金(42472085,42172056)

第一作者:林立航,男,从事岩石地球化学研究,linlihang420@163.com。

通信作者:朱韧之,男,副教授,博士生导师,从事岩浆岩岩石学研究,renzhi@nwu.edu.cn。

na Block, to reconstruct the geochemical signature and petrological model. According to its geochemical characteristics of the alkaline complex, which can be divided into three groups. Group one, shoshonitic nepheline syenites that show notably high total alkali ($12.76\% \sim 17.57\%$) and total REE contents ($134 \times 10^{-6} \sim 1764 \times 10^{-6}$), low Ba/La ratios, and enriched Sr-Nd-Pb-Hf, indicating the enriched lithospheric mantle metasomatized by subduction-related melts. Group two, shoshonitic monzogabbro-monzonite suite has strongly high Ba ($1619 \times 10^{-6} \sim 4640 \times 10^{-6}$) and Sr ($970 \times 10^{-6} \sim 1690 \times 10^{-6}$) contents, low Th/Yb ratios, similar to Sr-Nd-Pb-Hf isotopic components in nepheline syenite, indicating the enriched lithospheric mantle metasomatized by subduction-related fluids. Group three, monzogranite-K-feldspar granite suite shows high Th ($30.7 \times 10^{-6} \sim 68.3 \times 10^{-6}$) and U ($4.11 \times 10^{-6} \sim 23.2 \times 10^{-6}$) contents, and consistently Nb/U ratios of the lower crust and its trace element characteristics, indicating that they could be derived from the lower crust at variable depth. The MME and mantle-derived geochemical signatures are very developed in monzogranites, which indicate that their sources have experienced mantle-derived magma injection and crust-mantle magma mixing. During the Late Cretaceous, the South China Block occurred the lithospheric extension in the east-west direction that was influenced by the Neo-Tethys tectonic system, then the upwelling of asthenosphere material resulted into the reworking of the lithosphere, where a large amount of mantle-derived magma was injected into the lower crust and supported continental crust growth.

Keywords Gejiu alkaline complex; Late Cretaceous; enriched mantle; continental lithospheric extension; continental crust growth

碱性杂岩体主要由同一时空背景下的各类火成岩组成,普遍记录碱性岩浆作用,并且,多数杂岩体记录有镁铁质与长英质岩浆活动信息,是研究壳幔相互作用的重要窗口^[1]。碱性杂岩体在世界范围内分布较广,但出露较少,主要形成于岩石圈伸展构造背景,一般分为非地幔柱成因的后碰撞造山带环境和陆内伸展背景,以及与地幔柱相关的板内裂谷环境^[2-9]。在后碰撞造山带背景下,由挤压向伸展的构造应力转换过程中使得岩石圈减薄,诱发软流圈地幔物质上涌,导致岩石圈发生熔融,形成一系列具有碱性特征的岩浆产物,例如,新生代墨西哥 San Carlos-Cruillas 岩体,辽宁赛马、云南卓潘等具有俯冲交代介质地球化学特征的碱性杂岩体^[2-4]。在陆内伸展背景下,由于地幔对流或岩石圈地幔拆沉,导致地幔物质上涌,进而使富集岩石圈地幔部分熔融,产生富碱、贫硅的碱性岩浆,例如辽西凌源河坎子碱性杂岩体^[5]。此外,碱性杂岩体与地幔柱控制的板内裂谷环境密切相关,在板内地幔柱活动区内,地幔柱携带大量物质上涌并提供大量的热,导致岩石圈发生伸展减薄,进而形成位于大陆内部的罗马尼亚 Ditrău 岩体和中元古代的印度 Khariar 岩体等^[6-7],以及洋岛环境中的夏威夷碱性杂岩体^[8]。因此,岩石圈伸展背景下形成的碱性杂岩体代表了深部地球动力学过程在浅部地壳的直接表现和

历史记录,为研究大陆岩石圈演化和壳幔相互作用等岩浆系统的演化过程提供了重要窗口。

碱性杂岩体内岩性单元根据地球化学特征可大致划分为3组:碱性岩性单元(霞石正长岩等),基性—超基性岩性单元(辉石岩、角闪石岩等),中性酸性岩性单元(正长岩、二长岩、花岗岩等)。其中,碱性岩与基性—超基性岩性单元出露较少,且部分地区未见出露,但这些具有不同地球化学特征的岩石均与同期的岩浆活动密切相关^[2-9]。研究表明,碱性杂岩体成因机制与壳幔相互作用有着密切的联系,主要分为以下3种成因模式:①富集岩石圈地幔部分熔融,产生镁铁质岩浆,经历不同程度的岩浆分异演化过程所形成^[4];②由于岩石圈地幔的不均一性,富集岩石圈地幔部分熔融,产生多种性质不同的幔源岩浆,这些幔源岩浆再经历不同程度的岩浆演化过程形成碱性杂岩体^[2];③富集岩石圈地幔部分熔融,产生幔源岩浆注入地壳,引发地壳物质熔融,形成具有壳幔混合特征的碱性杂岩体^[6]。由此可见,碱性杂岩体通常都经历了复杂的岩浆分异演化过程,并且,其成因机制与富集地幔源区的属性密切相关。因此,开展碱性杂岩体源区的研究是揭示杂岩体成因机制及其深部动力学意义的关键。同时,碱性杂岩体中,碱性岩石通常含有特殊的矿物组合(如霞石、异性石、氟铈钛矿等),这些矿物组

合富含如 P、U 和稀土元素(REE)等,具有一定的成矿潜力和经济价值^[10-11]。

华南板块西南缘个旧碱性杂岩体与大型锡铜共生矿床有密切的时空分布关系,近年来得到了众多研究者的关注^[11]。个旧碱性杂岩体由白云山霞石正长岩、贾沙二长辉长岩-二长岩以及龙岔河二长花岗岩和神仙水钾长花岗岩组成。前人分别针对白云山霞石正长岩、贾沙二长辉长岩和龙岔河-神仙水花岗岩进行了锆石年代学、锆石 Lu-Hf 同位素和全岩地球化学研究,认为个旧碱性杂岩体形成于大陆岩石圈伸展构造背景^[12-25],碱性岩浆主要起源于富集岩石圈地幔,而花岗质岩浆是陆内物质再造的产物。但是,目前对于个旧碱性杂岩体成因的认识仍缺乏系统研究,比如个旧碱性杂岩体不同岩相单元的地球化学特征之间是否具有成因关系、构成碱性杂岩体的不同岩石组合的成因机制尚不明确。为了全面系统地探究个旧碱性杂岩体的地球化学特征、岩浆深部过程和地球动力学机制,本研究充分收集已有的研究数据,充分利用个旧碱性杂岩体的全岩主微量元素、全岩 Sr-Nd-Pb 同位素和锆石 Hf 同位素等数据,重建个旧碱性杂岩体的地球化学组成特征,揭示不同岩石组合形成的深部过程和成因机制,更好地理解大陆岩石圈伸展背景下的不同特征岩浆活动规律和深部动力学过程。

1 地质背景与岩相学特征

1.1 区域地质背景

云南个旧位于华南板块西南缘右江盆地内,该盆地为泥盆至三叠纪时期形成的大陆边缘盆地,具有经历早期碰撞记录的结晶基底^[26]〔见图 1(a)〕。其西侧与扬子板块以师宗-弥勒断裂带和哀牢山断裂带为界,南侧与越北古陆相邻。盆地在古生代至中生代早期广泛接受碳酸盐岩沉积,零星出露加里东期火山岩和火山碎屑岩^[27],在断裂带边缘广泛发育燕山期岩浆活动,岩性主要为黑云母二长花岗岩,并且伴生有少量基性岩和碱性岩^[28-29],其动力学机制可归因于陆内岩石圈伸展引起的岩石圈部分熔融^[12-22]〔见图 1(a)〕。

个旧地区主要受两条断裂带控制,分别为东西向的红河断裂带和南北向的个旧断裂带,其中个旧断裂将个旧地区分为东、西两个区域。个旧

东区零星出露小面积与成矿有关的花岗岩体,而西区大面积出露燕山期侵入岩,且岩相复杂多样,前人将其视为碱性杂岩体并开展大量地球化学研究^[11-22],发现其碱性杂岩体主要由白云山碱性侵入体、贾沙中基性侵入体、龙岔河花岗岩体及神仙水花岗岩体构成〔见图 1(b)〕。本研究以燕山晚期个旧碱性杂岩体为研究对象,通过汇编大量个旧碱性杂岩体的锆石 U-Pb-Hf、全岩主微量元素、全岩 Sr-Nd-Pb 数据,对其地球化学特征、成因及各侵入体间的岩浆演化关系进行探讨与刻画。

1.2 岩相学特征

白云山碱性岩体位于个旧西区的东北侧,呈南北向不规则分布,主要发育霞石正长岩。霞石正长岩为灰褐色,块状构造,中粗粒结构,主要由碱性长石(45%~65%)、霞石(20%~30%)、霓辉石(1%~5%)、石榴子石(1%~3%)及少量黑云母构成,副矿物发育锆石、磷灰石、榍石、萤石及钛铁矿等。

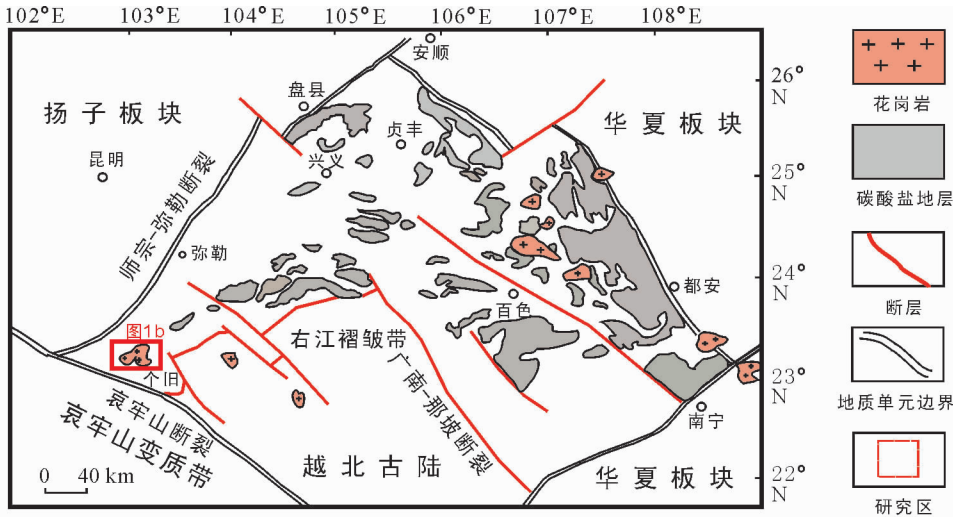
贾沙侵入体位于龙岔河花岗岩体东南侧及神仙水花岗岩体西侧,呈不规则分布,该岩体主要由二长辉长岩和二长岩组成。二长辉长岩为灰黑色,块状构造,中粗粒结构,可见镁铁质矿物堆晶结构。在二长辉长岩中,镁铁质矿物自岩体西侧向东侧逐渐减少,且矿物逐渐由单斜辉石转变为角闪石。二长辉长岩主要由单斜辉石(5%~10%)、角闪石(约 30%)、碱性长石(15%~25%)、斜长石(10%~30%)、黑云母(5%~10%)组成,副矿物发育磷灰石、锆石、榍石、钛铁矿等。二长岩为灰色,块状构造,中细粒结构,主要矿物包含斜长石(25%~35%)、碱性长石(20%~35%)、黑云母(5%~10%)、石英(<5%)、角闪石(3%~5%),副矿物发育锆石、磷灰石、榍石、钛铁矿等。

龙岔河岩体是个旧碱性杂岩体中出露面积最大的岩体,主要发育二长花岗岩。二长花岗岩主要为灰白色,块状构造,似斑状结构,斑晶主要以钾长石为主,内部包含定向排列、半自行的斜长石及少量黑云母。基质主要发育黑云母(约 15%)、石英(约 25%)、斜长石(20%~30%)、碱性长石(20%~30%)和少量角闪石。副矿物主要为榍石、磷灰石、褐帘石、锆石等。

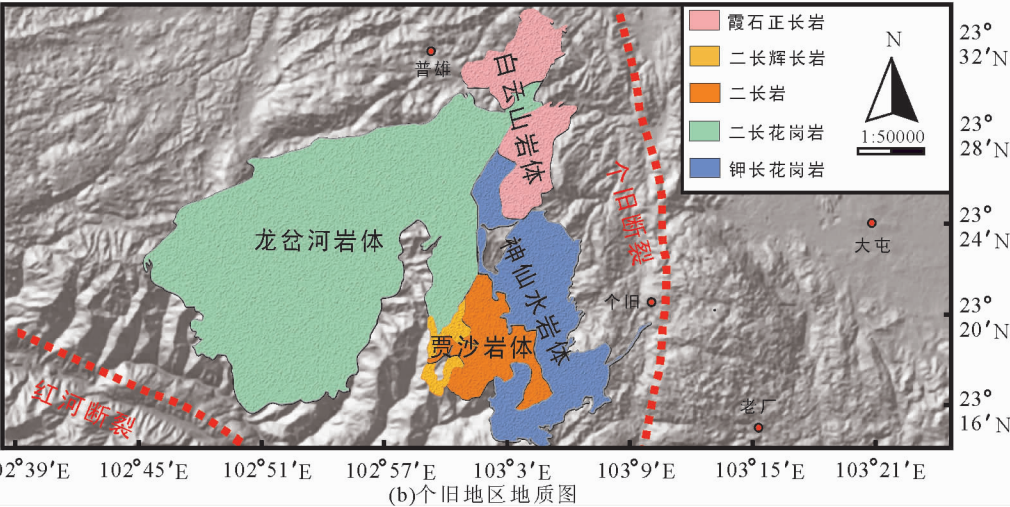
神仙水岩体位于白云山岩体南侧,呈南北向不规则分布,岩体岩性与个旧东区成矿岩体岩性基本一致,主要由钾长花岗岩组成。钾长花岗岩

呈浅肉红色,块状构造,等粒结构。其主要矿物为石英(30% ~ 40%)、钠长石(15% ~ 25%)、钾长

石(20% ~ 30%)、少量黑云母和电气石,副矿物主要发育锆石、榍石、磷灰石等。



(a)右江盆地区域地质图



(b)个旧地区地质图

图1 个旧区域地质构造图(据文献[11]修改)

Fig. 1 Regional geological map of Gejiu

2 地球化学特征

本研究总结了关于个旧碱性杂岩体已报道的76个样品的主微量元素分析结果^[11-16,19-20],40个样品的全岩Sr-Nd同位素分析结果^[11-13],14个样品的全岩Pb同位素分析结果^[12-13],113个样品的锆石Hf同位素分析结果^[11,18]。

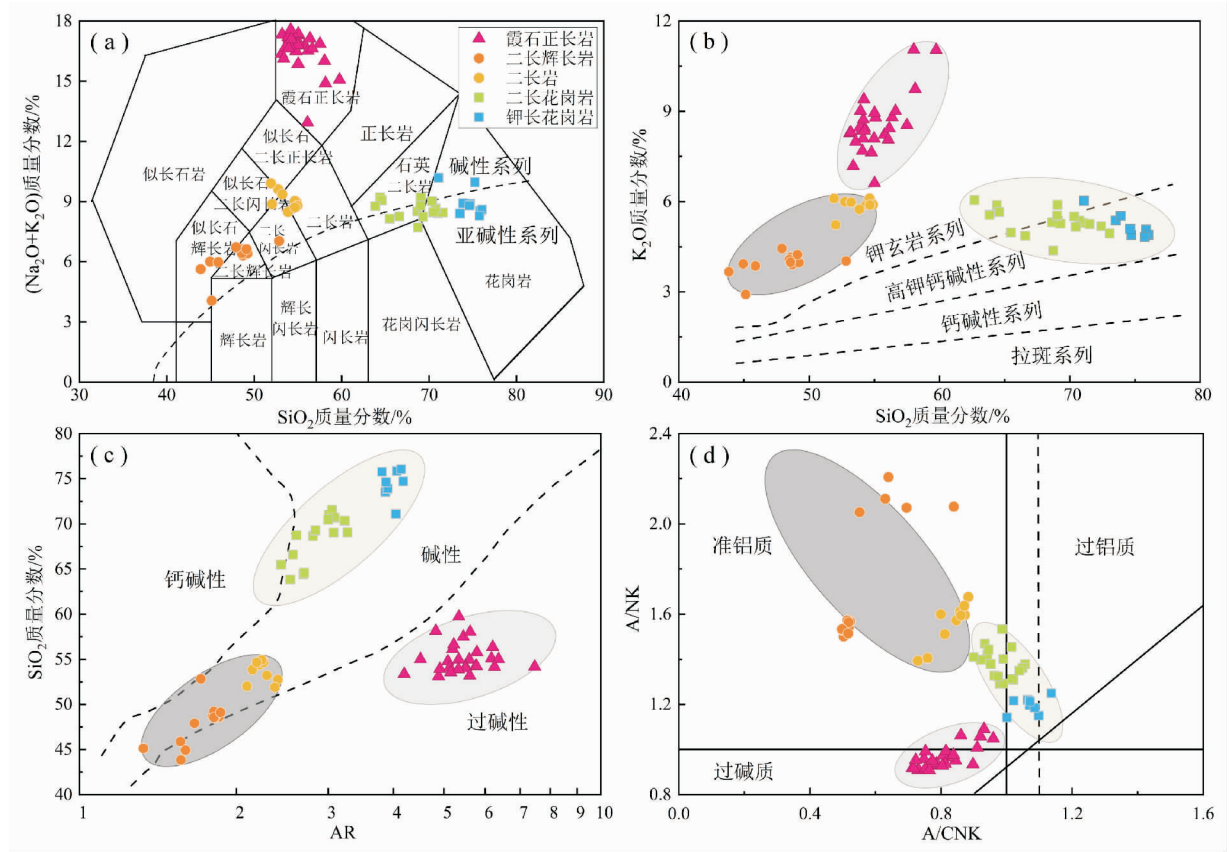
2.1 全岩主微量元素特征

白云山霞石正长岩是典型的过碱性岩石,属于钾玄岩系列,其SiO₂质量分数较低(52.05% ~ 58.01%),全碱(K₂O + Na₂O)质量分数极高(12.76% ~ 17.57%),K₂O质量分数为6.39% ~ 10.72%,Na₂O质量分数为3.91% ~ 9.58%,

K₂O/Na₂O比值变化范围较大,为0.71 ~ 2.74, TiO₂和MgO质量分数极低,分别为0.08% ~ 0.76%和0.04% ~ 1.59%,Mg[#]值为3.37 ~ 44.4(平均为14.3),Al₂O₃质量分数为18.79% ~ 24.09%,A/CNK(Al₂O₃/CaO + Na₂O + K₂O)比值为0.71 ~ 0.96,大多数样品落入过碱质范围内(见图2)。微量元素蛛网图显示[见图3(a)],霞石正长岩富集Th、Rb、U、K,强烈亏损Ba、Nb、Ta、P、Ti,且Nb(33.2 × 10⁻⁶ ~ 200 × 10⁻⁶)、Ta(1.02 × 10⁻⁶ ~ 5.69 × 10⁻⁶)、Zr(179 × 10⁻⁶ ~ 1532 × 10⁻⁶)等不相容元素含量变化较大。稀土元素球粒陨石标准化配分图显示[见图3(b)],霞石正长岩总稀土含量高且变化范围较大,为134 × 10⁻⁶ ~ 1764 × 10⁻⁶,富集轻稀土元素(LREE),重

稀土元素 (HREE) 较为亏损。此外,这些样品呈现出负 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.60 \sim 0.91$, 平均为

0.73)。



注:(a) TAS 图解(据文献[30]修改);(b) SiO_2 - K_2O 图解(据文献[31]修改);(c) SiO_2 -AR 图解(据文献[32]修改);(d) A/CNK-A/NK 图解(据文献[33]修改)。

图 2 个旧碱性杂岩体主量元素相关图解

Fig. 2 The major elements correlation diagram of the Gejiu alkaline complex

贾沙二长辉长岩与二长岩均属于钾玄岩系列。二长辉长岩具有较低的 SiO_2 质量分数,为 42.97% ~ 51.97%, K_2O 质量分数与 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值很高,分别为 2.85% ~ 4.36% 和 1.34 ~ 2.54,属于典型的钾质岩石, CaO 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 MgO 质量分数较高,分别为 7.43% ~ 16.59%, 7.84% ~ 13.93%, 2.85% ~ 8.78% (平均 7.09%), $\text{Mg}^{\#}$ 值为 45.9 ~ 68.0, Al_2O_3 质量分数为 11.76% ~ 19.01%, A/CNK 比值为 0.34 ~ 0.84,均落在准铝质范围内。二长岩与二长辉长岩相比,其 SiO_2 质量分数较高,为 51.26% ~ 53.92%, K_2O 质量分数更高,为 5.16% ~ 6.03%,但 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值分布范围一致,为 1.43 ~ 2.14, CaO 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 MgO 质量分数略低于二长辉长岩,分别为 5.14% ~ 6.37%, 8.17% ~ 8.79%, 2.38% ~ 3.45%, A/CNK 比值为 0.73 ~ 0.88,同样落入准铝质范围内(见图 2)。微量元

素蛛网图显示[见图 3(c)],二长辉长岩与二长岩具有相似的微量元素分布特征,富集 Rb、Ba、Th、U,亏损 Nb、Ta、P、Ti,二者均具有极高的 Ba (高至 $4\,640 \times 10^{-6}$) 和 Sr (高至 $1\,690 \times 10^{-6}$) 含量。稀土元素球粒陨石标准化配分图显示[见图 3(d)],二长辉长岩与二长岩总稀土含量一致,分别为 $(327 \sim 625) \times 10^{-6}$, $(396 \sim 673) \times 10^{-6}$,二者均富集 LREE,二长辉长岩的球粒陨石标准化 Yb(Yb_N) 值为 12.1 ~ 17.5,与二长岩 Yb_N 值(21.3 ~ 30.4)相比较低。此外,二者 Eu 异常存在明显差异,二长辉长岩具有正的 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.80 \sim 1.08$),与岩相学镁铁质矿物堆晶现象一致,而二长岩具有负 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.74 \sim 0.84$),表明二长岩更为演化,经历了斜长石分离结晶过程。

龙岔河二长花岗岩属于高钾钙碱性系列,具有较高的 SiO_2 质量分数,为 61.95% ~ 70.34%,

全碱质量分数高,为 8.33% ~ 9.79%, K_2O 质量分数为 4.31% ~ 5.98%, Na_2O 质量分数为 3.09% ~ 5.43%, K_2O/Na_2O 比值较高,为 1.10 ~ 1.78, $MgO/Fe_2O_3^T$ 和 TiO_2 质量分数较低,分别为 0.68% ~ 1.48%, 2.07% ~ 3.96%, 0.38% ~ 0.69%, $Mg^\#$ 值为 39.9 ~ 46.8, Al_2O_3 质量分数为 14.49% ~ 16.10%, A/CNK 比值为 0.76 ~ 1.06, 介于准铝质和弱过铝质之间[见图 2]。微量元素

蛛网图显示[见图 3(e)],二长花岗岩具有与地壳相似的微量元素特征,富集 Rb、Th、U、K,亏损 Ba、Nb、Ta、P、Zr、Hf、Ti。稀土元素球粒陨石标准化配分图显示[见图 3(d)],总稀土含量较高,为 $(276 \sim 546) \times 10^{-6}$,富集 LREE,亏损 HREE,轻重稀土比值(LREE/HREE)为 20.9 ~ 34.2, Yb_N 值较低,为 3.53 ~ 13.0。此外,二长花岗岩显示负 Eu 异常($Eu/Eu^* = 0.49 \sim 0.88$)。

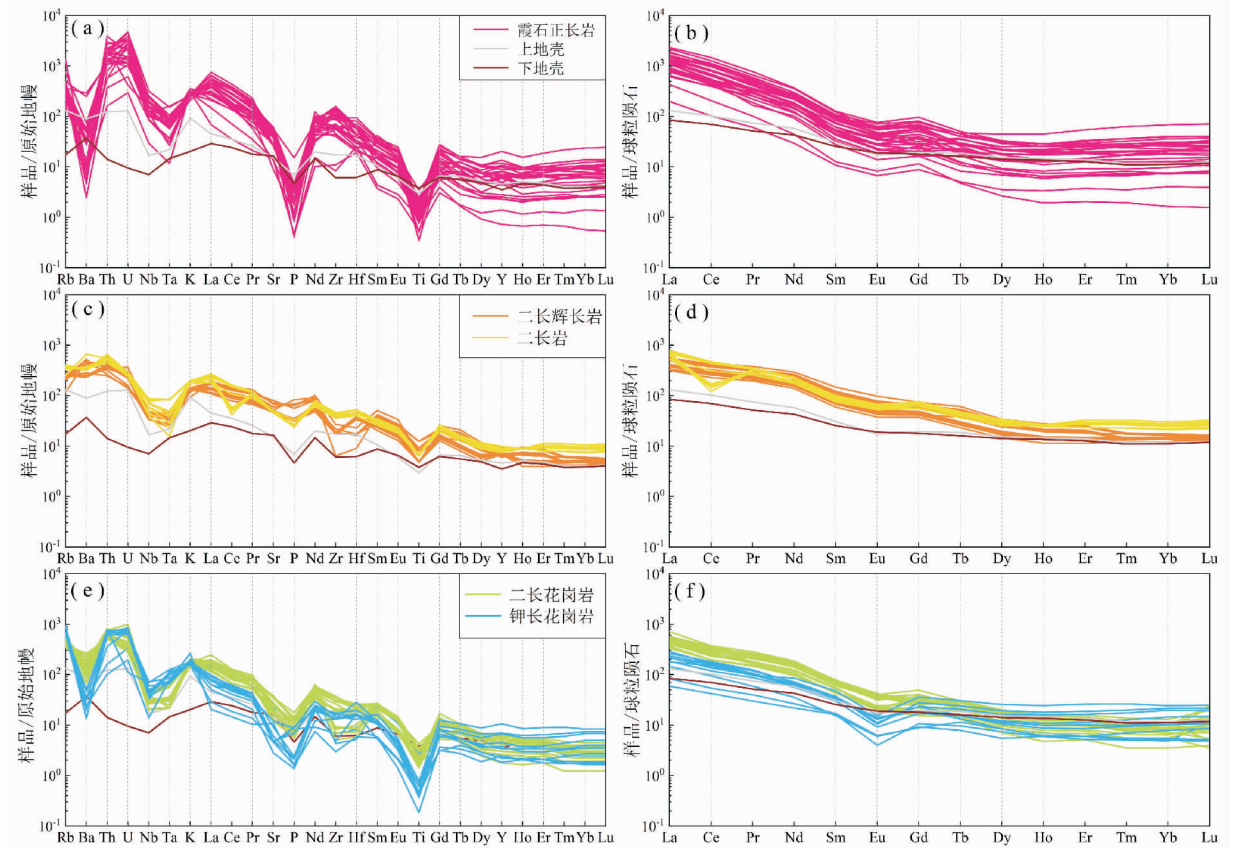


图 3 个旧碱性杂岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图和原始地幔标准化微量元素蛛网图(据文献[34]修改)
Fig. 3 Chondrite-normalized REE and primitive-mantle normalized trace element pattern diagrams of the Gejiu alkaline complex

神仙水钾长花岗岩也属于典型的高钾钙碱性系列,具有极高的 SiO_2 质量分数,为 70.64% ~ 75.50%,全碱质量分数很高,为 7.61% ~ 11.41%, K_2O 质量分数为 4.73% ~ 5.98%, Na_2O 质量分数为 1.84% ~ 3.68%, K_2O/Na_2O 比值较高,为 1.22 ~ 4.34, $MgO/Fe_2O_3^T$ 和 TiO_2 质量分数极低,分别为 0.09% ~ 0.46%, 1.00% ~ 3.17%, 0.04% ~ 0.17%, $Mg^\#$ 值为 12.8 ~ 24.9(一个样品为 51.7), Al_2O_3 质量分数为 13.07% ~ 15.18%, A/CNK 比值为 0.94 ~ 1.14,均落在过铝质范围内(见图 2)。微量元素蛛网图显示[见图 3(e)],钾长花岗岩与二长花岗岩具有相似的微量元素分

布特征,富集 Rb、Th、U、K,但极度亏损 Ba、P、Ti,显示出钾长花岗岩经历了极其显著的磷灰石、钾长石、钛铁矿等矿物分异过程。稀土元素球粒陨石标准化配分图显示[见图 3(f)],总稀土含量与二长花岗岩相比较低,为 $(62.4 \sim 236) \times 10^{-6}$,且轻重稀土分异不显著(LREE/HREE = 7.33 ~ 19.4)。此外,钾长花岗岩具有显著的负 Eu 异常($Eu/Eu^* = 0.30 \sim 0.57$),表明钾长花岗岩为高分异花岗岩,经历了显著的斜长石分离结晶过程。在哈克图解中(见图 4),个旧碱性杂岩体各类岩石显示出了不同的岩浆演化过程,根据其主微量元素特征和演化趋势可以划分为以下 3 组。

第一组为霞石正长岩,其代表个旧地区碱性岩岩浆活动,岩石主要由霞石、霓辉石等典型的碱性矿物组成,是个旧碱性杂岩体中全碱含量最高的

岩石,不相容元素、LREE 和 K_2O/Na_2O 比值变化较大;具有极低的不相容元素、Ba 和 MgO 含量,暗示岩浆经历了高度演化过程。

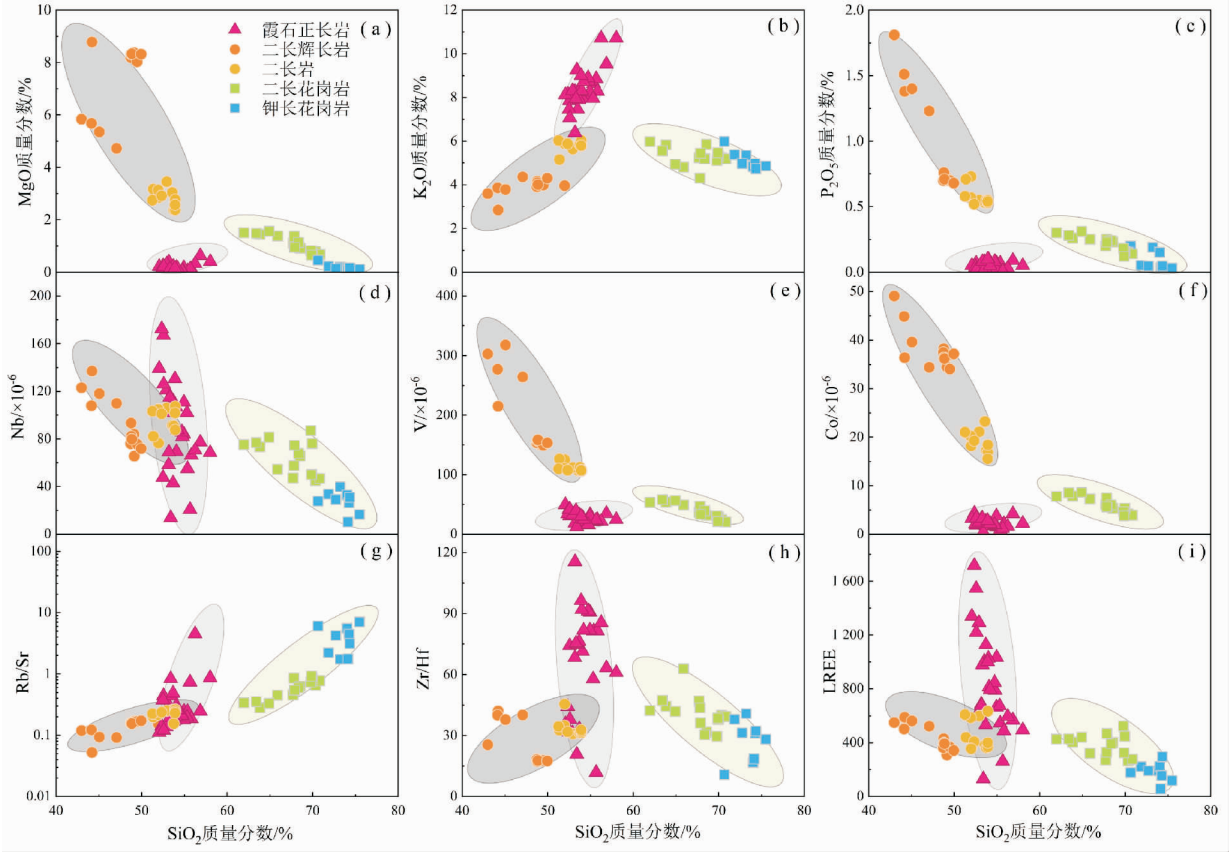


图 4 个旧碱性杂岩体哈克图解

Fig. 4 Harker diagrams of the Gejiu alkaline complex

第二组为二长辉长岩和二长岩,两组岩石均为钾质高 Ba-Sr 岩石,具有一致的主微量元素演化趋势,结合区域分布和岩相学特征可知,二长辉长岩与二长岩为同源岩浆不同演化阶段的产物。

第三组为二长花岗岩和钾长花岗岩,两组岩石均为钾质花岗岩,且主微量元素特征均与地壳相似,表明两者都来源于壳源。此外,一致的主微量元素演化关系指示二长花岗岩到钾长花岗岩具有连续演化的成因联系。

2.2 全岩 Sr-Nd-Pb 同位素及锆石 Hf 同位素组成

白云山霞石正长岩同位素特征为:其初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值(I_{Sr})稳定在 0.709 7 ~ 0.711 8,全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 - 8.6 ~ - 6.4,初始 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 值分别为 38.906 ~ 39.445,15.670 ~ 15.752,18.442 ~ 18.659(见图 5),其锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 - 5.6 ~ + 2.8,这些同位素数据与新生代西扬子地区幔源岩浆的分布范围一

致^[35-37](见图 6)。

贾沙二长辉长岩同位素特征为:其初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值(I_{Sr})为 0.7091 ~ 0.7101,与霞石正长岩在误差范围内一致($2\sigma = 10 \sim 16$),全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 - 7.7 ~ - 5.2,初始 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 值分别为 38.849 ~ 38.874,15.650 ~ 15.658,18.609 ~ 18.627(见图 5),其锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 - 4.8 ~ + 2.5,这些同位素数据与白云山霞石正长岩基本一致,指示二者起源于相似的富集地幔源区(见图 6)。

贾沙二长岩同位素特征为:其初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值(I_{Sr})比二长辉长岩更富集,为 0.710 9 ~ 0.711 1,这表明原始岩浆可能受到同化分离结晶过程的影响。其 Nd-Pb-Hf 同位素与二长辉长岩分布范围一致, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 - 7.9 ~ - 5.3,初始 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 值分别为 38.950 ~ 39.135,15.622 ~ 15.648,18.201 ~ 18.467,其锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 - 6.3 ~ - 0.3,这些同位素特征

表明二长岩与二长辉长岩为同源岩浆不同演化阶段的产物(见图5和6)。

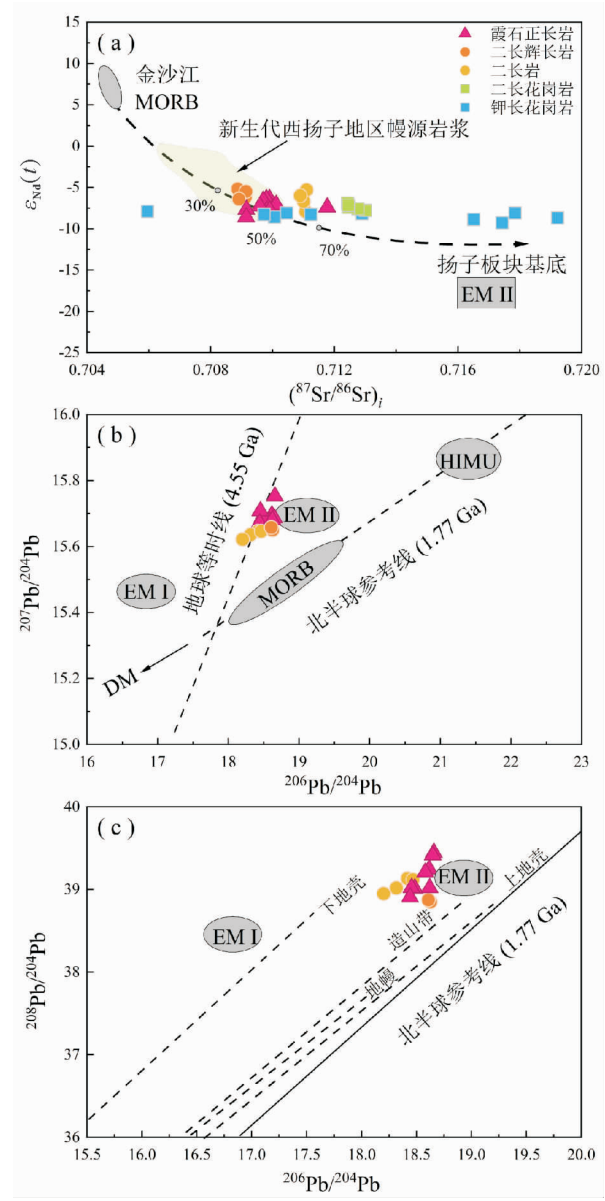


图5 个旧碱性杂岩体全岩 Sr-Nd-Pb 同位素相关图解
Fig. 5 Whole-rock Sr-Nd-Pb isotope correlation diagram of the Gejiu alkaline complex

龙岔河二长花岗岩同位素特征为: 其初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为0.712 4~0.713 0, 远高于二长岩, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为-7.8~-6.9, 两阶段Nd模式年龄在1.45~1.52 Ga(见图5), 其锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为-7.3~+0.8, 一阶段Hf模式年龄在0.72~1.05 Ga, 两阶段Hf模式年龄在1.21~1.62 Ga, 变化的Hf同位素指示着壳幔混合作用的发生^[38](见图6)。

神仙水钾长花岗岩同位素特征为: 其初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值变化较大, 为0.705 9~0.719 2, 这归

因于这些高分异花岗岩具有极高的Rb/Sr比值, 导致初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值计算不准确^[39]。钾长花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值比二长花岗岩更富集, 为-9.3~-7.9, 两阶段Nd模式年龄在1.58~1.64 Ga(见图5); 锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为-8.2~-2.2, 一阶段Hf模式年龄在0.79~1.11 Ga, 两阶段Hf模式年龄在1.05~1.35 Ga(见图6)。

3 讨论

3.1 霞石正长岩成因机制

大量研究表明,霞石正长岩起源于岩石圈地幔^[4,39-41]或地壳^[42]。白云山霞石正长岩具有极高的全碱质量分数(12.76%~17.57%)和总稀土元素含量($134 \times 10^{-6} \sim 1\,764 \times 10^{-6}$), 这些地球化学特征很难通过长英质地壳部分熔融产生。此外,白云山霞石正长岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值分布范围较广, 为-5.6~+2.8, 表明熔体起源于古老地壳或富集地幔(见图6)。全岩Sr-Nd-Pb数据显示(见图5),霞石正长岩具有与EM II型富集地幔相似的 I_{Sr} (0.7097~0.7118)、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-8.6~-6.4)和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-5.6~+2.8), 并且这些同位素值与新生代西扬子地区起源于富集岩石圈地幔的钾质岩浆基本一致^[39-41], 其初始 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 值(38.906~39.445, 15.670~15.752, 18.442~18.659)同样指示EM II型富集地幔源区。霞石正长岩成因模式相关研究表明^[43], 起源于富集地幔的碱性岩浆可以通过分离结晶作用形成具有低 $Mg^\#$ 值和明显负Eu异常的霞石正长岩。哈克图解显示(见图4),白云山霞石正长岩具有极低的相容元素V($16.6 \times 10^{-6} \sim 49.7 \times 10^{-6}$)、Co($0.85 \times 10^{-6} \sim 9.31 \times 10^{-6}$)和MgO含量($Mg^\#$ 值平均为14.3); 同时, 稀土元素球粒陨石标准化配分图显示[见图3(b)], 其具有负的Eu异常(Eu/Eu^* 平均为0.73), 与前人成因模型一致^[43]。综上所述,霞石正长岩是部分熔融EM II型的富集岩石圈地幔产生的原始岩浆再经显著的镁铁质矿物和斜长石矿物分离结晶作用所形成。

白云山霞石正长岩具有与弧岩浆相似的微量元素地球化学特征, 富集大离子亲石元素(LILEs), 亏损高场强元素(HFSEs), 具有高Nb/Yb(18.0~218.2)和La/Yb(30.4~240)比值, 以及Nb、Ta、Ti负异常[见图3(b)], 但

是,其Nb/U比值(1.42 ~ 12.0)远低于洋岛玄武岩(OIB)的平均值(47 ± 7)^[44],这说明其源区经历了与俯冲板片熔体或流体相关的交代作用^[45]。霞石正长岩富集 LREE(平均为 837×10^{-6})、K₂O(6.39% ~ 10.72%)和 Th(平均为 137×10^{-6}),且具有极低的 Ba/La 和 Ba/Y 比值,这表明其源区经历了俯冲沉积物熔体交代作用^[46-47]〔见图 7(a)、

(b)〕。含水交代地幔部分熔融是形成钾质岩浆的主要原因^[48],霞石正长岩具有极低的 Rb/Sr 比值且 Rb/La 与 K/La 比值成正相关关系,表明其地幔源区存在金云母矿物^[49-50]〔见图 7(c)、(d)〕。综上所述,俯冲沉积物熔体交代作用形成了含金云母相的岩石圈地幔,之后含金云母相的岩石圈地幔发生部分熔融,产生了霞石正长岩的母岩浆。

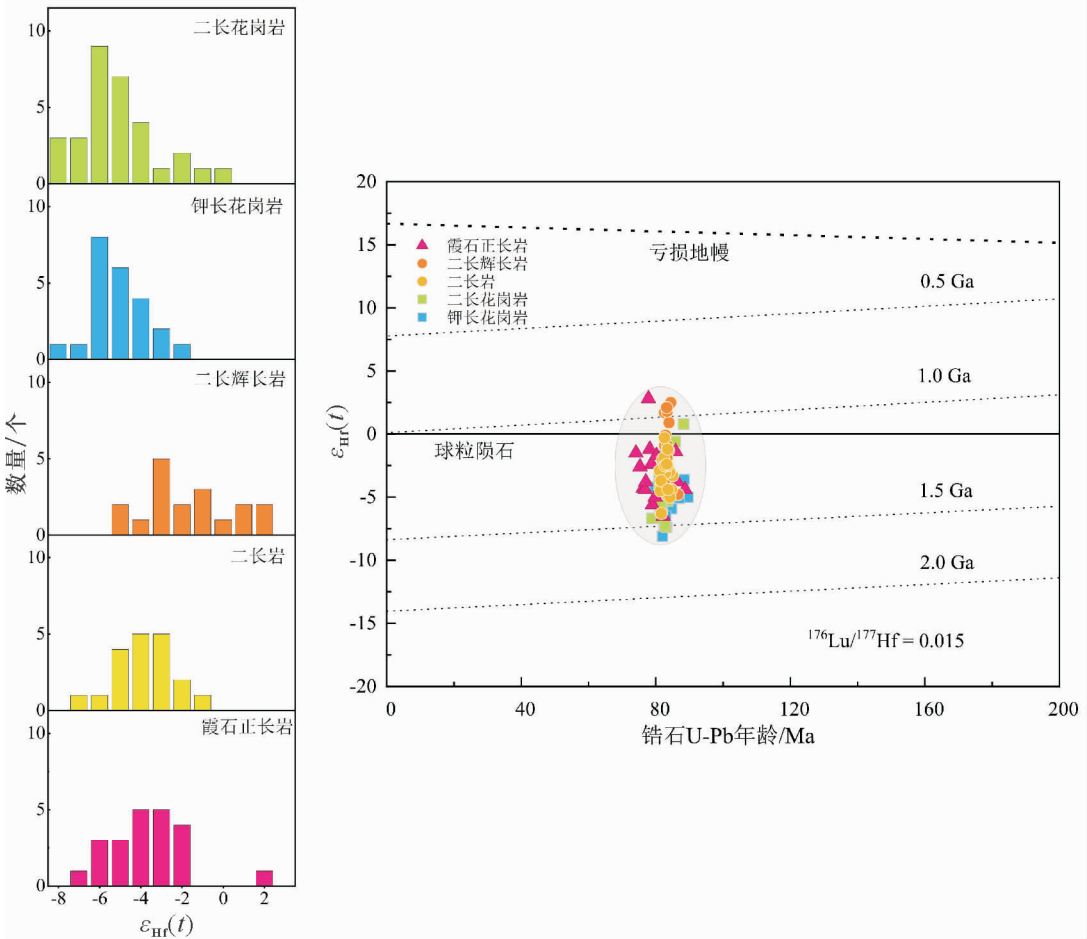


图 6 个旧碱性杂岩体锆石 Hf 位素相关图解

Fig. 6 The zircon Hf isotope correlation diagram of the Gejiu alkaline complex

3.2 二长辉长岩-二长岩组合成因机制

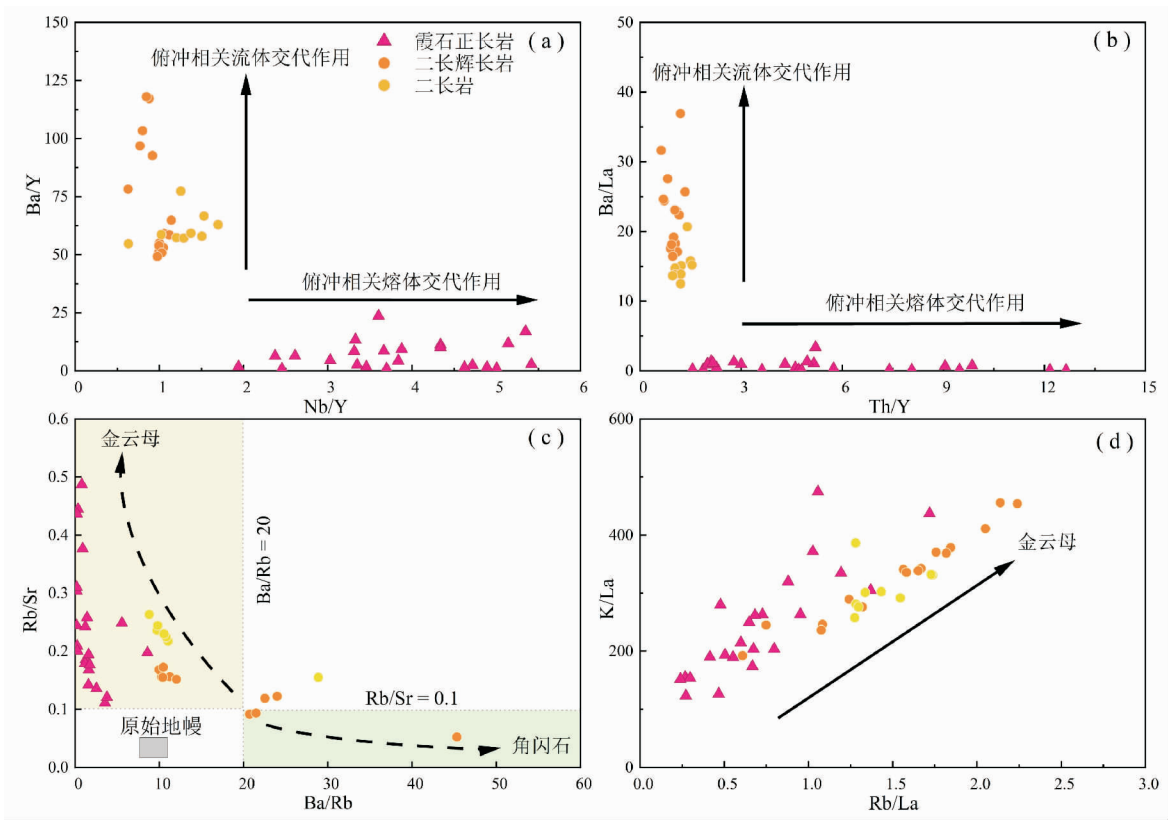
贾沙二长辉长岩属于钾玄岩系列,具有极高的 Ba($1\,619 \times 10^{-6} \sim 3\,390 \times 10^{-6}$)和 Sr($973 \times 10^{-6} \sim 1\,690 \times 10^{-6}$)含量,与起源于富集岩石圈地幔的高 Ba-Sr 岩浆极其相似^[51-53]。然而,贾沙二长岩同样属于钾玄岩系列并且具有远高于思茅和扬子板块的 Ba($2\,242 \times 10^{-6} \sim 4\,640 \times 10^{-6}$)和 Sr($970 \times 10^{-6} \sim 1\,058 \times 10^{-6}$)含量^[54],并且其 Mg[#]值(40.0 ~ 48.4)高于镁铁质下地壳熔体^[54],表明二长岩与二长辉长岩源区均为富集岩石圈地幔。值得注意的是,二长岩与二长辉长岩具有相似的微量元素分布特征,富集 Rb、Ba、Th、

U,亏损 Nb、Ta、P、Ti〔见图 3(c)〕,且主微量元素演化趋势一致(见图 4),结合二长辉长岩和二长岩一致的锆石 Hf 同位素特征(-4.8 ~ +2.5, -6.3 ~ -0.3)可以看出,二者为同源岩浆不同演化阶段的产物。此外,贾沙二长辉长岩具有明显的镁铁质矿物堆晶现象,并且具有正的 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.80 \sim 1.08$);而二长岩的 CaO(5.14% ~ 6.37%)、Fe₂O₃^T(8.17% ~ 8.79%)、MgO(2.38% ~ 3.45%)质量分数较低,且具有负的 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.74 \sim 0.84$),表明二长辉长岩为岩浆分离结晶的残余堆晶组分,而二长岩为进一步演化的熔体组分。全岩 Sr-Nd-Pb 数

据显示(见图 5),二长辉长岩和二长岩的 I_{Sr} 值($0.709\ 1 \sim 0.711\ 1$)、 $\varepsilon_{Nd}(t)$ ($-7.9 \sim -5.2$)和 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值($-6.3 \sim +2.5$),初始 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 值($38.849 \sim 39.135$, $15.642 \sim 15.658$, $18.201 \sim 18.627$) 在误差范围内与霞石正长岩一致,指示 EM II 型富集地幔源区。综上所述,贾沙二长辉长岩与二长岩起源于同一 EM II 型富集地幔源区,为同源钾质岩浆在不同演化阶段分异形成的产物。

尽管贾沙二长辉长岩和二长岩同样具有与弧岩浆相似的微量元素地球化学特征及富集的 Sr-

Nd-Pb-Hf 同位素特征,这些特征与白云山霞石正长岩一致,但与霞石正长岩不同的是,贾沙二长辉长岩和二长岩富集 LILEs(Ba 和 Sr),且具有极低的 Nb/Y 和 Th/Y 比值,这表明其源区经历了与俯冲板片流体有关的交代作用^[46-47],其较为宽泛的 Ba/Rb 比值、Rb/La 与 K/La 的正相关性,表明其地幔源区存在金云母和角闪石^[48-50](见图 7)。综上所述,贾沙二长辉长岩与白云山霞石正长岩地幔源区存在差异,贾沙幔源岩浆起源于受到俯冲板片流体交代的岩石圈地幔,地幔源区存在金云母和角闪石等矿物。



注:(a)Ba/Y-Nb/Y 图解(据文献[46]修改);(b)Th/Yb-Ba/La 图解(据文献[46]修改);(c)Rb/Sr-Ba/Rb 图解(据文献[49]修改);(d)K/La-Rb/La 图解(据文献[50]修改)。

图 7 个旧碱性杂岩体交代地幔判别图

Fig. 7 Discriminant diagrams of the metasomatized mantle in the Gejiu alkaline complex

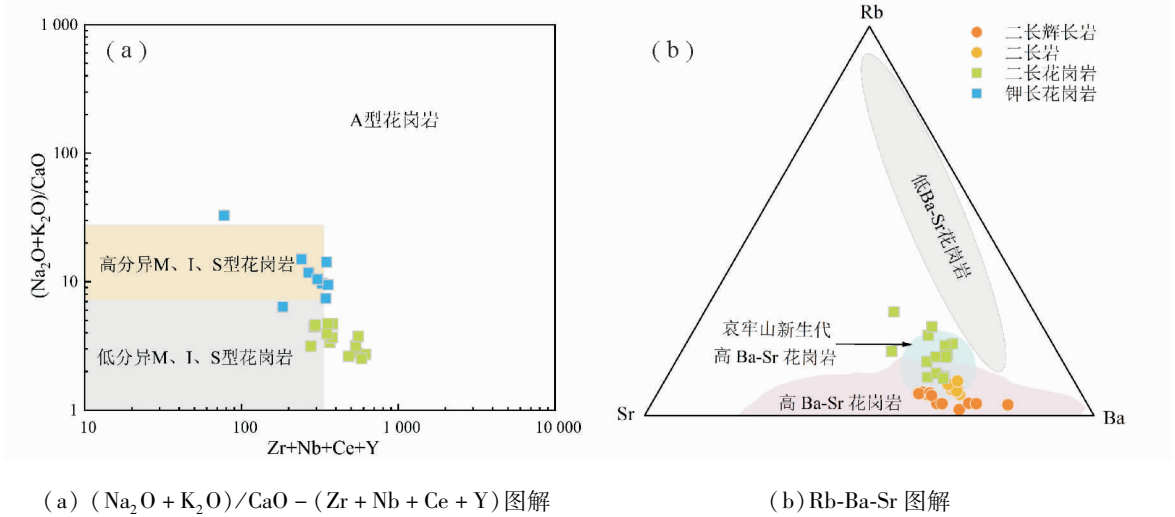
3.3 二长花岗岩-钾长花岗岩组合成因机制

前人对龙岔河二长花岗岩的岩石成因类型研究仍存在争议^[11,14]。在花岗岩成因类型判别图中[见图 8(a)],大部分二长花岗岩落入 A 型花岗岩区域且图中显示出负的相关性。结合二长花岗岩具有较高的全岩 Zr 饱和温度(高至 849 ℃),明显的负 Eu 异常($Eu/Eu^* = 0.49 \sim 0.88$),以及不对称右倾“海鸥”型的稀土元素配分曲线,表明二长花岗岩符合 A 型花岗岩特征^[55-57][见图 3

(f)]。二长花岗岩属于典型高钾钙碱性,具有较高的 Th($43.6 \times 10^{-6} \sim 68.3 \times 10^{-6}$)和 U($6.00 \times 10^{-6} \sim 14.7 \times 10^{-6}$)含量,下地壳相似的 Nb/U 比值($1.64 \sim 4.48$),以及富集的 Sr-Nd 同位素组成,比如高的 I_{Sr} ($0.712\ 4 \sim 0.713\ 0$)和低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ ($-7.8 \sim -6.9$),与下地壳起源的岩石一致^[58]。值得注意的是,绝大多数二长花岗岩还具有极高的 Ba(高至 $1\ 830 \times 10^{-6}$)和 Sr 含量(高至 805×10^{-6}),与哀牢山新生代高 Ba-Sr 花岗岩分布范围

一致,因此,二长花岗岩同样具有高 Ba-Sr 花岗岩特征^[51-54]〔见图 8(b)〕。研究表明,高 Ba-Sr 花岗岩成因与起源于富集岩石圈地幔的岩浆作用密切相关^[51-53],而二长花岗岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-7.3 \sim +0.8$,一阶段 Hf 模式年龄在 $0.72 \sim 1.05 \text{ Ga}$,指示源区受到了幔源物质的影响。程彦博研究认为,二长花岗岩发育大量暗色包体,这些

暗色包体的 Ba 和 Sr 含量比二长花岗岩更高,而且地球化学特征与贾沙二长岩基本吻合^[11]。此外,二长花岗岩与贾沙高 Ba-Sr 幔源岩浆 Sr-Nd-Hf 同位素组成相似。以上研究表明,龙岔河二长花岗岩为高 Ba-Sr 幔源岩浆和具有 A 型花岗岩特征的长英质岩浆混合而成,但是镁铁质岩浆与长英质岩浆的混合作用机制还需进一步研究。



注:图(b)据文献[59]修改,高 Ba-Sr 花岗岩数据来源于文献[58,60]。

图 8 个旧花岗岩成因类型判别图

Fig. 8 Discriminant diagrams of genesis of the Gejiu granites

神仙水钾长花岗岩同时具有 A 型花岗岩和高分异花岗岩的特征〔见图 8(a)〕。首先,钾长花岗岩具有较高的全碱质量分数 ($7.61\% \sim 11.41\%$)、较高的全岩 Zr 饱和温度 ($672 \sim 809\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[56]以及和二长花岗岩相似的微量元素分布特征〔见图 3(e)〕,符合 A 型花岗岩特征,且源区与二长花岗岩十分相似。在哈克图解中(见图 4),二长花岗岩与钾长花岗岩主微量元素演化趋势一致,表明二者起源于同一母岩浆。此外,钾长花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($-9.3 \sim -7.9$) 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-8.2 \sim -2.2$) 分布范围与二长花岗岩相似,二长花岗岩和钾长花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值与 SiO_2 质量分数具有明显的正相关性,这进一步表明钾长花岗岩与二长花岗岩为同源岩浆不同演化阶段的产物,并且在岩浆演化过程中经历了显著的地壳混染和分离结晶作用。再者,钾长花岗岩具有极高的 SiO_2 质量分数 ($70.64\% \sim 75.50\%$) 和 Rb/Sr 比值 ($2.24 \sim 7.08$),较低 Nb/Ta ($3.07 \sim 15.6$) 和 Zr/Hf 比值 ($18.5 \sim 38.0$),以及其稀土元素配分曲线显示出明显的“四分组”效应,显示出高分异花岗岩地球化学特征,也与喜马拉雅淡色高硅花

岗岩一致^[61-63]。在微量元素蛛网图中〔见图 3(e)〕,钾长花岗岩比二长花岗岩更加富集 Rb、Nb、Ta、K,更亏损 Ba、Sr、P、Ti、LREEs,且具有极其显著的负 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.30 \sim 0.57$),表明其与二长花岗岩相比,经历了更加显著的磷灰石、钾长石、斜长石、榍石、钛铁矿等矿物的分离结晶过程。综上所述,钾长花岗岩同样为壳幔混合成因,是二长花岗岩经历更加强烈的岩浆演化过程形成的高分异岩。

3.4 个旧杂岩成因模型及地质意义

在晚白垩世时期,整个华南板块出露大面积晚白垩世岩浆岩,在红河—哀牢山断裂北侧,晚白垩世岩浆活动广泛发育。例如,云南薄竹山花岗岩的平均年龄为 $87.3 \sim 91.2 \text{ Ma}$ 和 $86.5 \sim 87.8 \text{ Ma}$ ^[64],广西昆仑关花岗岩的平均年龄为 $(93.0 \pm 0.6) \text{ Ma}$ 和 $(97.7 \pm 1.3) \text{ Ma}$ ^[65],广西车河花岗岩报道的平均年龄为 $(86.3 \pm 0.7) \text{ Ma}$ ^[66],广西南丹花岗质岩石年龄分布在 $90 \sim 98 \text{ Ma}$ ^[67-68],海南千家花岗岩平均年龄为 $(99.2 \pm 1.0) \text{ Ma}$ ^[69],贵州贞丰镁铁质碱性岩脉年龄分布在 $85 \sim 99 \text{ Ma}$ ^[28],广东阳春花岗岩平均年龄为 (77.4 ± 0.8)

Ma^[70]。这些华南板块晚白垩世岩浆岩年龄范围集中在 75 ~ 100 Ma,与华南板块西南缘个旧地区晚白垩世岩浆活动时间一致(74 ~ 91 Ma)^[11-22],均为后碰撞板内伸展背景^[64-70]。在岩石圈伸展背景下,区域性软流圈地幔上涌事件频发,进而导致华南板块岩石圈经历了再造过程^[26]。在个旧地区,上涌的软流圈地幔提供大量的热,导致经历过先前俯冲交代作用的次大陆下岩石圈地幔发生减压熔融,形成碱性幔源岩浆和高 Ba-Sr 幔源岩浆。这些新生幔源岩浆的底侵作用使得下地壳发生部分熔融,产生长英质岩浆房,其中上涌的高 Ba-Sr 幔源岩浆注入到下地壳长英质岩浆房内,形成具有壳幔混合特征的岩浆,这些大量新生的地幔物质加入下地壳中,指示了大陆地壳的生长过程^[51-53,71]。最终,碱性幔源岩浆演化形成霞石正长岩,而高 Ba-Sr 幔源岩浆经历不同的演化阶段形成二长辉长岩和二长岩。与此同时,由幔源上涌导致地壳物质发生部分熔融产生的岩浆分别演化为二长花岗岩和高分异钾长花岗岩(见图 9)。

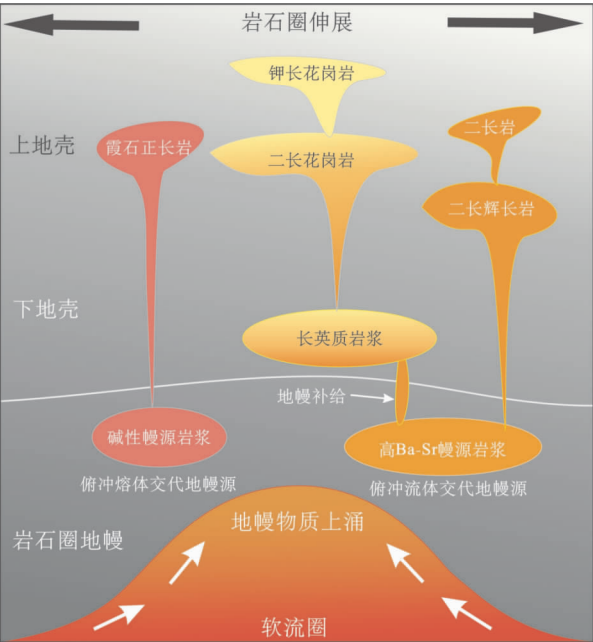


图 9 个旧碱性杂岩体成因模式图(据文献[26]修改)
Fig. 9 Genetic model of the Gejiu alkaline complex

个旧地区位于三江构造带东部与华南板块西南缘结合部位,晚白垩世,个旧岩浆活动主要受新特提斯构造体系的影响还是太平洋构造体系的影响仍不明确^[11-20]。程彦博认为,个旧晚白垩世岩浆活动主要受到太平洋板块西向俯冲控制^[14],然而,近年来,越来越多的学者认为,华南板块晚白垩世岩浆活动受到新特提斯俯冲的远洋效应影

响^[69-70,72-74]。东南亚古地理重建工作表明,晚白垩世岩浆活动是由新特提斯板块向北俯冲所导致,且新特提斯板块折返诱发了华南板块南北向伸展,形成了广泛的岩浆活动和成矿事件^[72-75]。已有研究报道,华南板块南部已发现东西走向的火成岩带和钨锡成矿带,且与新特提斯板块俯冲机制相关^[74-76]。此外,红河—哀牢山构造带附近发现了起源于岩石圈地幔的新生代富钾、高 Ba-Sr 长英质岩石,这些高 Ba-Sr 长英质岩石与个旧高 Ba-Sr 岩石的地球化学特征十分相似,其构造背景受到新特提斯板块俯冲的控制,这也指示临近哀牢山带的华南板块西南缘在晚白垩世期间极有可能同样受到新特提斯构造体系的控制^[58]。综上所述,本研究认为,新特提斯板块折返作用导致了晚白垩世华南板块内部发生东西向伸展,进而引发了广泛的岩浆活动以及与岩浆活动密切相关的成矿事件。

4 结论

- 1) 个旧碱性杂岩体记录了华南板块西南缘典型的多期次、多阶段、多源区、深部岩浆作用过程。
- 2) 白云山霞石正长岩是典型的过碱性岩石,其起源于经历俯冲沉积物熔体交代的含金云母相岩石圈地幔,且原始岩浆经历了广泛的分离结晶作用。贾沙二长辉长岩和二长岩均为钾质高 Ba-Sr 岩石,二者起源于经历俯冲流体交代的含金云母角闪石相岩石圈地幔,是原始岩浆不同演化阶段的产物。龙岔河二长花岗岩具有 A 型和高 Ba-Sr 花岗岩特征,其为壳幔混合的岩浆演化而成,源区发生高 Ba-Sr 幔源岩浆和下地壳源的长英质岩浆混合作用。神仙水钾长花岗岩为高分异的 A 型花岗岩,为二长花岗岩经历强烈的磷灰石、钾长石、斜长石、榍石、钛铁矿等矿物分异所形成。
- 3) 晚白垩世期间,新特提斯板块折返导致华南板块东西向伸展,在岩石圈伸展背景下,大量软流圈地幔物质上涌,进而引发华南板块大陆岩石圈再造和大陆地壳生长。

参考文献

[1] BLACK R, LAMEYRE J, BONIN B. The structural setting of alkaline complexes [J]. Journal of African Earth Sciences(1983), 1985, 3(1/2): 5-16.

- [2] ELIZONDO-PACHECO L A, RAMIREZ-FERNANDEZ J A, DEIGNACIO C, et al. Generation of arc-like and OIB-like magmas triggered by slab detachment in the eastern Mexican alkaline province: Petrological evidence from the Cenozoic sierra de San Carlos-Cruillas complex, Tamaulipas[J]. *Journal of Petrology*, 2022, 63(5): egac027.
- [3] 马丹贞. 华北克拉通三叠纪赛马碱性杂岩体成因和铈富集机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2023.
- [4] 李腾建. 滇西卓潘碱性杂岩体成因及其成矿意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [5] 陆露, 钱程, 赵珍. 辽西凌源河坎子碱性杂岩体的成因[J]. *地球科学*, 2023, 48(10): 3671-3688.
LU L, QIAN C, ZHAO Z. Petrogenesis of Hekanzi alkaline complex in Lingyuan, West Liaoning[J]. *Earth Science*, 2023, 48(10): 3671-3688.
- [6] ÓDRI Á, HARRIS C, LE ROUX P. The role of crustal contamination in the petrogenesis of nepheline syenite to granite magmas in the Ditrau Complex, Romania: Evidence from O-, Nd-, Sr-and Pb-isotopes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2020, 175: 1-25.
- [7] UPADHYAY D, RAITH M M, MEZGER K, et al. Mesoproterozoic rifting and Pan-African continental collision in SE India: Evidence from the Khariar alkaline complex[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151: 434-456.
- [8] CHEN C Y, FREY F A, GARCIA M O. Evolution of alkalic lavas at Haleakala Volcano, East Maui, Hawaii: Major, trace element and isotopic constraint[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1990, 105: 197-218.
- [9] TAPPE S, ROMER R L, STRACKE A, et al. Sources and mobility of carbonate melts beneath cratons, with implications for deep carbon cycling, metasomatism and rift initiation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 466: 152-167.
- [10] WOOLLEY A R, BAILEY D K. The crucial role of lithospheric structure in the generation and release of carbonatites: Geological evidence[J]. *Mineralogical Magazine*, 2012, 76(2): 259-270.
- [11] MOLLER V, WILLIAMS-JONES A E. Magmatic and hydrothermal controls on the mineralogy of the basal zone, Nechalacho REE-Nb-Zr deposit, Canada[J]. *Economic geology*, 2017, 112(8): 1823-1856.
- [12] ZHU Y S, YANG J H, SUN J F, et al. Petrogenesis of coeval silica-saturated and silica-undersaturated alkaline rocks: Mineralogical and geochemical evidence from the Saima alkaline complex, NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 117: 184-207.
- [13] CHENG Y, MAO J, RUSK B, et al. Geology and genesis of Kafang Cu, Sn deposit, Gejiu district, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48: 180-196.
- [14] 程彦博. 个旧超大型锡多金属矿区成岩成矿时空演化及一些关键问题探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [15] 鲁浩. 云南个旧霞石正长岩全岩地球化学与锆石 U-Pb 定年及找矿意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [16] 汤立伟. 个旧贾沙辉长二长岩地球化学、年代学特征及其地质意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [17] 陈薇. 云南个旧花岗岩浆作用及其成矿意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [18] 解世雄. 云南个旧矿田岩浆作用特征与锡铜超大规模富集分析[D]. 广东: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2021.
- [19] 张颖, 黄智龙, 罗泰义, 等. 云南个旧神仙水岩体锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学研究[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3): 515-524.
ZHANG Y, HUANG Z L, LUO T Y, et al. The Zircon U-Pb chronology and geochemistry of the Shengxianshui pluton in Gejiu, Yunnan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(3): 515-524.
- [20] 黄文龙, 许继峰, 陈建林, 等. 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*, 2016, 32(8): 2330-2346.
HUANG W L, XU J F, CHEN J L, et al. 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*, 2016, 32(8): 2330-2346.
- [21] 王长兵, 倪光清, 覃勇凯, 等. 云南个旧碱性杂岩体的岩石成因及稀土元素富集机制[J]. *岩石矿物学杂志*, 2021, 40(4): 704-716.
WANG C B, NI G Q, TAN Y K, et al. Petrogenesis and REE enrichment mechanism of Gejiu alkaline complex in Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2021, 40(4): 704-716.
- [22] 黄文龙, 许继峰, 陈建林, 等. 滇东南个旧白云山碱性岩年代学和地球化学及成因意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2018, 37(5): 716-732.
HUANG W L, XU J F, CHEN J L, et al. Geochronology, geochemistry and genesis of the Baiyunshan alkaline rocks in Gejiu area of southeastern Yunnan Province

- [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2018, 37(5): 716-732.
- [23] 王宇菲,董国臣,陈薇,等. 云南个旧似长石正长岩类及其岩石成因[J]. *地质前缘*, 2019, 26(4): 209-220.
- WANG Y F, DONG G C, CHEN W, et al. Characteristics and petrogenesis of feldspathoid syenite in Gejiu, Yunnan[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(4): 209-220.
- [24] 刘畅. 云南个旧似斑状花岗岩岩石特征及成因探讨[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020.
- [25] 张颖,黄智龙,罗泰义,等. 云南个旧西区贾沙辉长二长岩体 SIMS 锆石 U-Pb 定年及地球化学研究[J]. *地球化学*, 2013, 42(6): 523-54.
- ZHANG Y, HUANG Z L, LUO T Y, et al. The geochemistry and SIMS U-Pb zircon dating of the Jiasha gabbro-monzonitic intrusion in Gejiu district, Yunnan Province[J]. *Geochimica*, 2013, 42(6): 523-54.
- [26] LEPVERIER C, FAURE M, VAN V N, et al. North-directed Triassic nappes in northeastern Vietnam (east bac Bo)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 56-68.
- [27] WANG Y, LI G, WANG Q, et al. Early Paleozoic granitoids from South China: Implications for understanding the Wuyi-Yunkai orogen[J]. *International Geology Review*, 2020, 62(2): 243-261.
- [28] LIU S, SU W, HU R, et al. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of alkaline ultramafic dykes from southwest Guizhou Province, SW China[J]. *Lithos*, 2010, 114(1/2): 253-264.
- [29] CHENG Y, MAO J, SPANDLER C. Petrogenesis and geodynamic implications of the Gejiu igneous complex in the western Cathaysia block, South China[J]. *Lithos*, 2013, 175: 213-229.
- [30] FROST B R, BARNES C G, COLLINS W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of petrology*, 2001, 42(11): 2033-2048.
- [31] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247-263.
- [32] MIDDLEMOST E. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [33] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- [34] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society*, 1989, 42(1): 313-345.
- [35] WENG Q, YANG W B, NIU H C, et al. B-Sr-Nd-Pb isotopic constraints on the origin of the Maoniuping alkaline syenite-carbonatite complex, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 135: 104193.
- [36] YU H, DENG J, WANG Q, et al. Petrogenesis of Paleogene lamprophyres in the Ailaoshan tectonic belt, western Yangtze Craton: Implications for the mantle source of orogenic gold deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 122: 103507.
- [37] MIAO Z, ZHAO Z, NIU Y, et al. Petrogenetic evolution of the Zhuopan potassic alkaline complex, western Yunnan, SW China: Implications for heterogeneous metasomatism of lithospheric mantle beneath Simao and western Yangtze block[J]. *Lithos*, 2021, 400: 106354.
- [38] KEMP A I S, HAWKESWORTH C J, FOSTER G L, et al. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon[J]. *Science*, 2007, 315(5814): 980-983.
- [39] WU F, SUN D, LI H, et al. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 2002, 187(1/2): 143-173.
- [40] WILSON M, DOWNES H, CEBRIA J M. Contrasting fractionation trends in coexisting continental alkaline magma series; Cantal, Massif Central, France[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(6): 1729-1753.
- [41] ZHU Y S, YANG J H, WANG H, et al. Geochemical and Sr-Nd-Hf-O isotopic constraints on the source and petrogenesis of the Xiangshuigou silicic alkaline igneous complex from the northern margin of the North China Craton[J]. *Lithos*, 2020, 378: 105866.
- [42] LUBALAR T, FRICK C, ROGERS J H, et al. Petrogenesis of syenites and granites of the Schiel Alkaline complex, Northern Transvaal, South Africa[J]. *The Journal of Geology*, 1994, 102(3): 307-316.
- [43] PASLICK C R, HALLIDAY A N, DAVIES G R, et al. Timing of Proterozoic magmatism in the Gardar Province, southern Greenland[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1993, 105(2): 272-278.
- [44] HOFMANN A W. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90(3): 297-314.
- [45] VERMA S P. Extension-related origin of magmas from a garnet-bearing source in the Los Tuxtlas volcanic

- field, Mexico[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2006, 95: 871-901.
- [46] WOODHEAD J D, HERGT J M, DAVIDSON J P, et al. Hafnium isotope evidence for 'conservative' element mobility during subduction zone processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 331-346.
- [47] HAWKESWORTH C J, TURNER S P, MCDERMOTT F, et al. U-Th isotopes in arc magmas: Implications for element transfer from the subducted crust[J]. *Science*, 1997, 276(5312): 551-555.
- [48] PROUTEAU G, SCAILLET B, PICHAVANT M, et al. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust[J]. *Nature*, 2001, 410(6825): 197-200.
- [49] LUY J, KERRICH R, KEMP A I S, et al. Intracontinental Eocene-Oligocene porphyry Cu mineral systems of Yunnan, western Yangtze Craton, China: Compositional characteristics, sources, and implications for continental collision metallogeny[J]. *Economic Geology*, 2013, 108(7): 1541-1576.
- [50] RAPP R P, SHIMIZU N, NORMAN M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chemical Geology*, 1999, 160(4): 335-356.
- [51] ZHU R Z, FOWLER M, HUANG F, et al. Barium-Mg isotopes in high Ba-Sr granites record a melt-metasomatized mantle source and crustal growth[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2024, 379: 124-133.
- [52] FOWLER M B, KOCKS H, DARBYSHIRE D P F, et al. Petrogenesis of high Ba-Sr plutons from the northern highlands Terrane of the British Caledonian Province[J]. *Lithos*, 2008, 105(1/2): 129-148.
- [53] LIN L H, ZHU R Z, LAI S C, et al. Petrogenesis of late Cretaceous high Ba-Sr granodiorites, SE Lhasa block, China: Implications for the reworking of juvenile crust and continental growth[J]. *Acta Geochimica*, 2024, 44: 86111.
- [54] LIU Z, LIAO S Y, WANG J R, et al. Petrogenesis of late Eocene high Ba-Sr potassic rocks from western Yangtze Block, SE Tibet: A magmatic response to the Indo-Asian collision[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 135: 95-109.
- [55] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407-419.
- [56] EBY G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641-644.
- [57] WATSON D. Intraindividual and interindividual analyses of positive and negative affect: Their relation to health complaints, perceived stress, and daily activities[J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1988, 54(6): 1020.
- [58] RUDNICK R L, FOUNTAIN D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(3): 267-309.
- [59] TARNEY J, JONES C E. Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models[J]. *Journal of the Geological Society*, 1994, 151(5): 855-868.
- [60] FOWLER M B, HENNEY P J. Mixed Caledonian apinitic magmas: Implications for lamprophyre fractionation and high Ba-Sr granite genesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 126(1): 199-215.
- [61] IRBER W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3/4): 489-508.
- [62] GAO T, WANG L, YAO X, et al. The Paleocene high-silica granites and their associated diorite enclaves in central Lhasa subterranean, Xizang, China: Insights to crust-mantle mixing and crustal reworking[J]. *Gondwana Research*, 2024, 128: 390-404.
- [63] GAO L E, ZENG L, ZHAO L, et al. Geochemical behavior of rare metals and high field strength elements during granitic magma differentiation: A record from the Borong and Malashan Gneiss Domes, Tethyan Himalaya, southern Tibet[J]. *Lithos*, 2021, 398: 106344.
- [64] 程彦博, 毛景文, 陈小林, 等. 滇东南薄竹山花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(4): 869-878.
- CHENG Y B, MAO J W, CHEN X L, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the bozhushan granite in southeastern yunnan province and its significance[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(4): 869-878.
- [65] 谭俊, 魏俊浩, 李水如, 等. 广西昆仑关 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2008, 33(6): 743-754.
- TAN J, WEI J H, LI S R, et al. Geochemical charac-

- teristics and tectonic significance of Kunlun A-type granite, Guangxi [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2008, 33 (6): 743-754.
- [66] LUO J H, CHE Z C, GUO A L, et al. Late Cretaceous lithospheric extension in the Nandan-Hechi tectonic zone of northern Guangxi Province and its influence on hydrocarbon accumulation conditions [J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(5): 619-625.
- [67] CAI M H, HE L Q, LIU G Q, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of the intrusive rocks in the Dachang tin-polymetallic ore field, Guangxi and their geological significance [J]. *Geological Review*, 2006, 52 (3): 409-414.
- [68] 郭佳. 华南右江盆地锡成矿事件与花岗岩锡成矿能力 [D]. 广东: 中国科学院大学 (中国科学院广州地球化学研究所), 2019.
- [69] SUN S J, ZHANG L P, ZHANG R Q, et al. Mid-late Cretaceous igneous activity in South China: The Qianjia example, Hainan Island [J]. *International Geology Review*, 2018, 60(11/12/13/14): 1665-1683.
- [70] ZHANG L, ZHANG R, CHEN Y, et al. Geochronology and geochemistry of the Late Cretaceous Xinpeng granitic intrusion, South China: Implication for Sn-W mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 113: 103075.
- [71] GOMEZ-FRUTOS D, CASTRO A, GUTIERREZ-ALONSO G. Post-collisional batholiths do contribute to continental growth [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2023, 603: 117978.
- [72] SUN W, WANG J, ZHANG L, et al. The formation of porphyry copper deposits [J]. *Acta Geochimica*, 2017, 36: 9-15.
- [73] ZHANG L, HU Y, LIANG J, et al. Adakitic rocks associated with the Shilu copper-molybdenum deposit in the Yangchun Basin, South China, and their tectonic implications [J]. *Acta Geochimica*, 2017, 36: 132-150.
- [74] ZHANG L, ZHANG R, HU Y, et al. The formation of the Late Cretaceous Xishan Sn-W deposit, South China: Geochronological and geochemical perspectives [J]. *Lithos*, 2017, 290: 253-268.
- [75] ZHANG L, ZHANG R, WU K, et al. Late Cretaceous granitic magmatism and mineralization in the Yingwuling W-Sn deposit, South China: Constraints from zircon and cassiterite U-Pb geochronology and whole-rock geochemistry [J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 96: 115-129.
- [76] LI J, ZHANG Y, DONG S, et al. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 134: 98-136.

(编辑 雷雁林)