

云南个旧碱性杂岩体的岩石成因及稀土元素富集机制

王长兵,倪光清,覃勇凯,廖志凯,李炜森,李 誓,张 黎,官 斌

(云南省核工业二〇九地质大队, 云南 昆明 650106; 云南省三稀矿产资源勘查评价工程研究中心, 云南 昆明 650106)

摘 要: 云南个旧碱性杂岩体由边缘相碱长正长岩和中心相霞石正长岩组成。全岩地球化学分析表明,该碱性杂岩体具有高碱、富钾、富铁、低镁、高分异的碱性-过碱性岩石特征,晚期更富集碱金属元素; LREE/HREE 值为 20~59, $(La/Sm)_N = 8 \sim 50$, $(Sm/Yb)_N = 1.2 \sim 5.0$, 富集轻稀土元素,轻稀土元素较重稀土元素分馏程度高,具 Eu 负异常,亏损 Ti、Nb、P、K、Sr 等元素,富集 Zr、Hf、Th、La、Ce、Nd、U、Rb 等元素,岩浆来源与幔源物质有关;碱长正长岩和霞石正长岩具有相似的微量元素和稀土元素特征,具有同源岩浆分异演化的特点;Rb/Sr、Nb/Ta、Zr/Hf 等比值均高于或接近于原始地幔的相应值;CIPW 标准矿物计算结果表明边缘相碱长正长岩中出现紫苏辉石、锥辉石、橄榄石,中心相霞石正长岩中出现橄榄石。结合 $(Th/Nb)_N$ 和 Nb/La 值特征以及前人 Sr-Nd 同位素研究成果,认为个旧碱性杂岩体的岩浆来源于遭受交代作用的富集地幔部分熔融,同时受有限的地壳混染作用而成,形成于后碰撞的伸展环境。碱性岩浆演化晚期更加富碱、经历了更高分异的结晶分异作用是稀土元素、Nb、Ga 和 Zr 元素超常富集的重要原因。

关键词: 碱性杂岩体; 元素地球化学; 地幔岩浆; 稀土元素; 超常富集; 云南个旧

中图分类号: P588.15; P618.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)04-0704-13

Petrogenesis and REE enrichment mechanism of Gejiu alkaline complex in Yunnan Province

WANG Chang-bing, NI Guang-qing, QIN Yong-kai, LIAO Zhi-kai, LI Wei-sen, LI Shi,

ZHANG Li and GUAN Bin

(No. 209 Geological Party, Geological Bureau of Yunnan Nuclear Industry, Kunming 650106, China; Yunnan Exploration-Assessment and Study Center of Three Rare Mineral Resources, Kunming 650106, China)

Abstract: The Gejiu alkaline complex is composed of alkaline feldspar syenite in border facies and nepheline syenite in central facies. The whole-rock geochemical analysis shows that the alkaline complex has the characteristics of high alkalinity, rich potassium, rich iron, low magnesium, and highly differentiated alkaline-peralkaline rocks, with the late stage more enriched in alkali metal elements. $LREE/HREE = 20 \sim 59$, $(La/Sm)_N = 8 \sim 50$, and $(Sm/Yb)_N = 1.2 \sim 5.0$. It is rich in light rare earth elements. The fractionation degree of the light rare earth elements is higher than that of the heavier rare earth elements. It has Eu negative anomaly. The Gejiu alkaline complex is depleted in such elements as Ti, Nb, P, K, and Sr, and rich in such elements as Zr, Hf, Th, La, Ce, Nd, U and Rb. All these characteristics indicate that the magma source is related to mantle derived materials. Alkali syenite and nepheline syenite have similar characteristics of trace elements and rare earth elements, and have

收稿日期: 2020-11-04; 接受日期: 2021-05-08; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 云南省高新技术产业发展项目(201704)

作者简介: 王长兵(1986-), 男, 工程师, 主要从事固体矿产资源勘查与评价工作, E-mail: 475281792@qq.com; 通讯作者: 倪光清(1975-), 男, 高级工程师, 长期从事地质矿产调查、研究及管理工作, E-mail: 1213835731@qq.com。

the characteristics of homologous magmatic differentiation and evolution. The ratios of Rb/Sr, Nb/Ta, and Zr/Hf are all higher than or close to the corresponding values of the original mantle. CIPW standard mineral calculations show that perilla pyroxene, cone pyroxene, and olivine appear in the alkali syenite in marginal facies. Olivine appears in the nepheline syenite in central facies. Combined with the characteristics of the ratios of $(\text{Th}/\text{Nb})_N$ and Nb/La and the research results of previous Sr-Nd isotope, it is considered that the magma of Gejiu alkaline complex was derived from partial melting of enriched mantle subjected to metasomatism and limited crustal contamination, which was formed in the extensional environment of the post-collision. In the late period of alkaline magma evolution, alkali was richer, and the higher degree of crystallization differentiation constituted an important factor for the abnormal enrichment of REE, Nb, Ga and Zr.

Key words: alkaline complex; element geochemistry; mantle magma; REE; supernormal enrichment; Gejiu in Yunnan Province

Fund support: Yunnan High-tech Industry Development Project(201704)

碱性岩类具有幔源和产于拉张型构造环境特征,被认为是探索地球深部物质组成特征及演化过程、地球动力学、构造和物理化学环境的“探针”(赵振华, 1994; 任康绪, 2003; 王亚莹等, 2014)。全球与碱性岩类相关的稀土、稀有、稀散和放射性矿产资源储量十分丰富(徐夕生等, 2010),因此,碱性岩岩浆演化及相关稀土、稀有、稀散和放射性矿产的矿床学研究一直受到岩石学和矿床学研究者广泛和长期关注。个旧碱性杂岩体属于个旧杂岩体的一部分(刘红英等, 2004),大地构造位置位于兰坪-思茅地块、华夏陆块和扬子陆块的交界部位,隶属华夏地块西部的右江盆地(图 1a)(杜远生等, 2009; 陈超等, 2016)。个旧碱性杂岩体是超大型离子吸附型稀土(iREE)矿床的成矿母岩,在岩体风化壳内共/伴生铌(Nb)、镓(Ga)、锆(Zr)等稀有稀散元素,已达到中型-大型矿床的规模。前人对个旧碱性杂岩体进行了岩相学特征、岩石成因和构造背景的有益探讨(刘红英, 2004; 程彦博等, 2008, 2009; 黄文龙等, 2016, 2018; 李新仁等, 2018)。李新仁等(2018)对长岭岗碱性岩体进行了详细的岩相学和地球化学研究,将碱性岩划分为 5 种类型,认为其形成于板块内部环境。其他学者(刘红英, 2004; 程彦博等, 2008, 2009; 黄文龙等, 2016, 2018)的研究表明,个旧碱性杂岩体形成时代为 $82.89 \sim 76.6 \pm 3.6$ Ma,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,形成于富集的岩石圈地幔,具有板内伸展构造背景。

笔者在研究个旧碱性杂岩体风化形成超大型 iREE-Nb-Ga-Zr 稀土稀有稀散矿床的成矿规律时,发现碱长正长岩和霞石正长岩形成的风化壳中稀土矿

体全相稀土总量(TRE_2O_3)、离子相稀土总量(SRE_2O_3)、厚度等均有显著差异,如碱长正长岩和霞石正长岩全风化层(矿体)中 TRE_2O_3 平均含量分别为 0.15×10^{-6} 和 0.22×10^{-6} , SRE_2O_3 平均含量分别为 0.062×10^{-6} 和 0.096×10^{-6} ,厚度分别为 7.06 m 和 14.16 m。显然,碱性杂岩体的时空分布、岩浆演化过程、源区性质是揭示个旧碱性杂岩体大型-超大型 iREE-Nb-Ga-Zr 稀土稀有稀散矿床成因的关键因素之一。本文在详实调查个旧碱性杂岩体分布、产状、岩石组合特征等的基础上,在钻探工程中采集新鲜样品,对其进行详细的岩相学和全岩地球化学等的研究,结合前人研究成果,探讨了碱性杂岩体成因联系及演化关系,揭示了碱性杂岩体与稀土稀有稀散元素成矿作用的内生机制,这将有助于进一步揭示稀土稀有稀散元素超常富集规律,为发现新的、优质的稀土稀有稀散矿产提供理论依据,具有重要的现实和战略意义。

1 地质产状与岩相学特征

1.1 地质产状

个旧杂岩体由辉长岩、闪长岩、黑云二长花岗岩、钾长花岗岩、碱长花岗岩、碱长正长岩及霞石正长岩组成(图 1b)。本文研究的个旧碱性杂岩体由北部的长岭岗岩体和南部的白云山岩体组成,呈南北向延展,中间被细粒碱长花岗岩分隔。其中,长岭岗岩体出露面积约 20 km^2 ,白云山岩体出露面积约 16 km^2 。碱性杂岩体呈岩珠状侵入于三叠系法郎组(T_2f)、个旧组(T_2g)中,接触带发育大理岩化、角岩化。岩体边缘相为碱长正长岩,具中细粒结构;中心

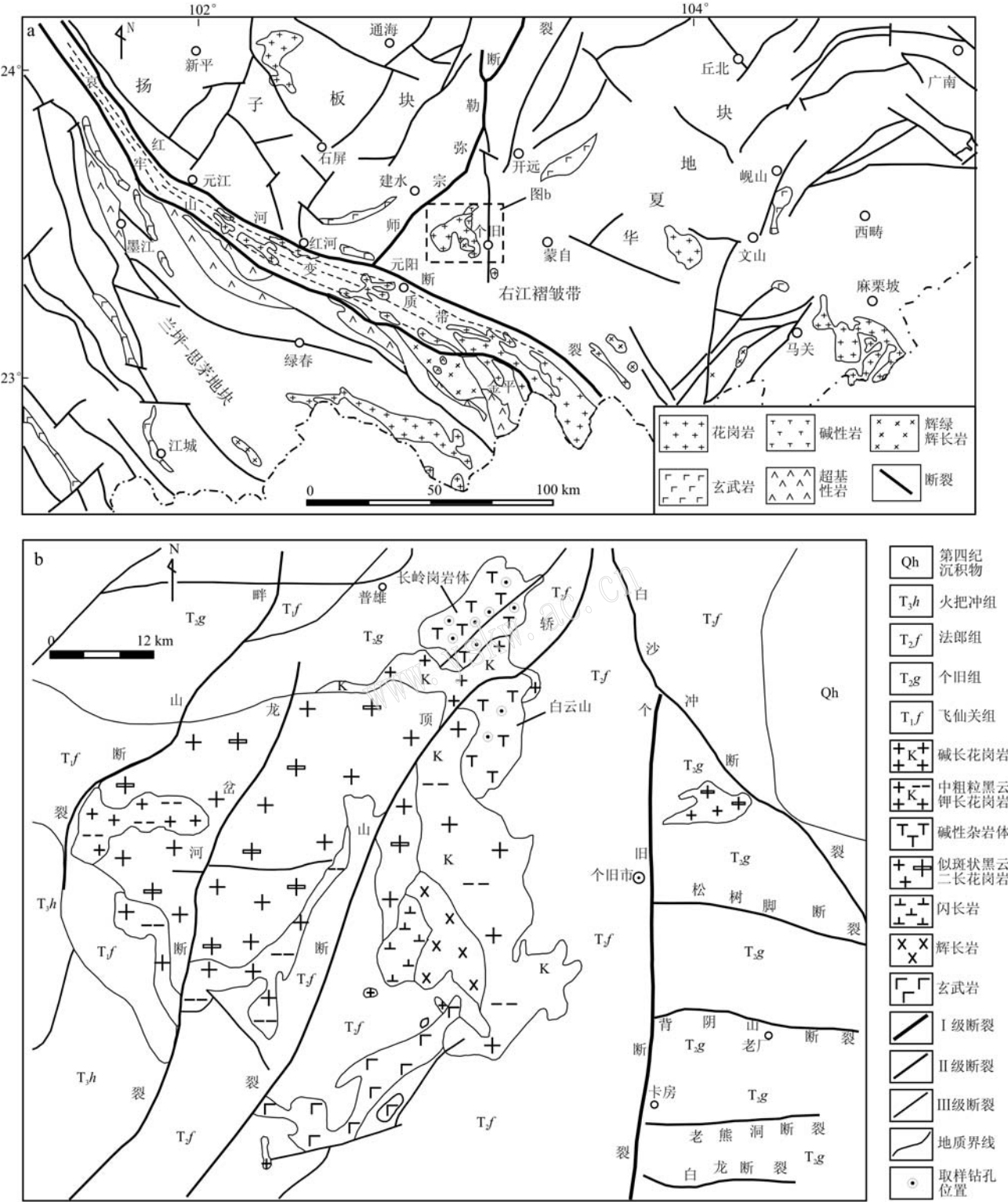


图 1 云南个旧地区大地构造位置图[a, 据陈超等(2016)修编]和地质示意图[b, 据程彦博等(2008)、黄文龙等(2016)修编]

Fig. 1 Map showing the geotectonic location (a, modified after Chen Chao *et al.*, 2016) and sketch geological map (b, modified after Cheng Yanbo *et al.*, 2008; Huang Wenlong *et al.*, 2016) of the Gejiu, Yunnan Province

相为霞石正长岩,具中粗粒结构;二者为渐变过渡关系,呈环状分布(西南有色地质勘查局地质研究所,1997)^①(图1b)。

1.2 岩相学特征

依据碱性杂岩体的野外产状、结构构造及室内镜下所显示的矿物组合差异,可将个旧碱性杂岩体划分为以下两组:① 碱长正长岩:新鲜面呈肉红色、浅灰色(图2a),风化后为褐黄色,具中细粒半自形粒状结构、似斑状结构,块状构造。斑晶主要为碱性长石(5%~20%,粒度0.5~6 mm)、钠长石(3%~5%,粒度0.5~3 mm);基质以细粒为主(0.05~0.5 mm),主要矿物有碱性长石(55%~65%)、钠长石(2%~15%)、黑云母(2%~15%)、角闪石(2%~20%)、霓辉石(2%~10%)(图2b),副矿物以榍石(1%~3%)为主。边缘相的碱长正长岩中有辉石、角闪石、黑云母、石英的富集,推测与花岗岩的围岩捕虏体的同化混染作用有关。② 霞石正长岩:新鲜面

为浅灰-灰色(图2c),中粗粒半自形粒状嵌晶结构,部分为伟晶结构,块状构造。主要矿物有碱性长石(50%~65%,以正长石为主)、霞石(25%~40%)、方钠石(5%~15%),含有1%~2%的黑云母、普通角闪石、霓辉石、霓石、萤石、方沸石、黑榴石(图2d)。依据特征矿物,霞石正长岩可进一步划分为霓辉霞石正长岩、黑榴霞石正长岩、黑云霞石正长岩、霞石正长岩(李新仁等,2018),中心相中有副长石类矿物霞石、方钠石、方沸石等铝、碱硅酸盐类矿物析出。

从边缘相的碱长正长岩到中心相的霞石正长岩,矿物成分和结构特征表现出以下变化:① 粒度由细粒或中细粒向中粗粒过渡,主要造岩矿物的自形程度提高;② 碱性长石含量从大量到中等变化;③ 暗色矿物角闪石、辉石、黑云母从大量到少量,霞石、方钠石等副长石类矿物从无到有;④ CIPW 标准矿物计算表明(表1),边缘相碱长正长岩中出现紫苏辉石、锥辉石、橄榄石,中心相霞石正长岩中出现

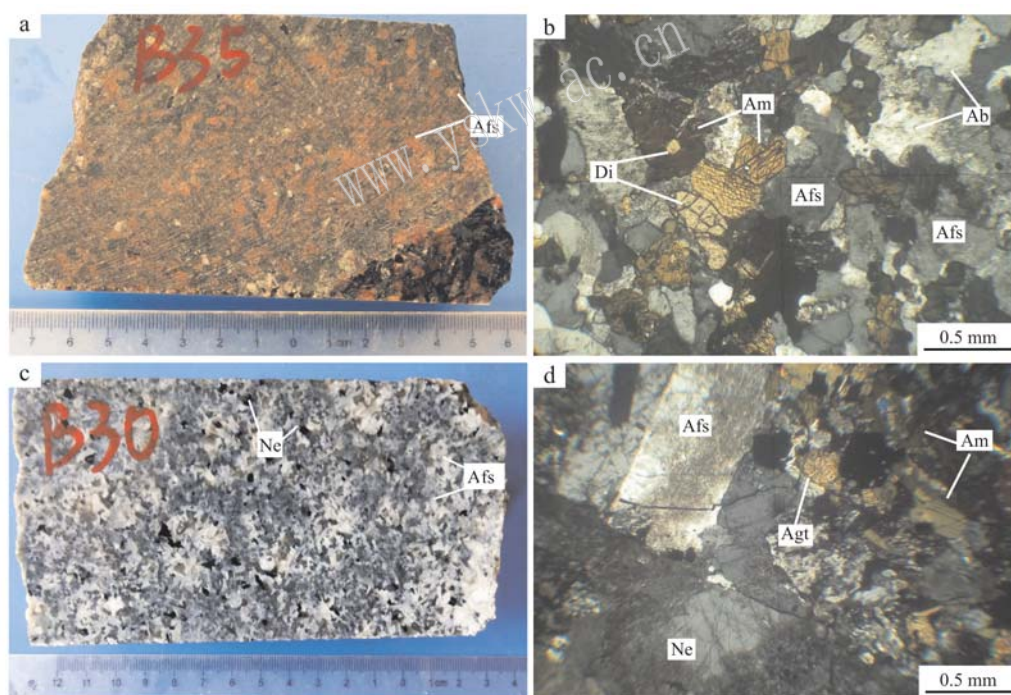


图2 个旧碱性杂岩体野外岩石学特征(a、c)和显微岩相学特征(b、d)

Fig. 2 Field petrological characteristics (a, c) and micro-lithologic characteristics (b, d) of Gejiu alkaline complex
a—碱性正长岩手标本照片; b—碱性正长岩正交偏光显微照片; c—霞石正长岩手标本照片; d—霞石正长岩正交偏光显微照片;

Agt—霓辉石; Di—透辉石; Am—角闪石; Afs—碱性长石; Ab—钠长石; Or—正长石; Ne—霞石

a—field photo of alkaline syenite; b—photomicrograph of alkaline syenite (crossed nicols); c—field photo of nepheline syenite;

d—microphotograph of nepheline syenite (crossed nicols); Agt—aegirine-augite; Di—diopside; Am—amphibole; Afs—alkali feldspar;

Ab—albite; Or—orthoclase; Ne—nepheline

① 西南有色地质勘查局地质研究所. 1997. 云南省个旧市白云山霞石正长岩矿床地质勘探报告(内部资料). 1~189.

表 1 个旧碱性杂岩体 CIPW 标准矿物计算表
Table 1 CIPW standard minerals of the Gejiu alkaline complex

$w_B/\%$

	石英	钙长石	钠长石	正长石	霞石	白榴石	刚玉	透辉石
碱长正长岩	0.88	7.62	34.23	47.24	0.88	0	0.99	0.83
霞石正长岩	0	1.87	8.21	47.72	26.53	3.46	0.54	4.01
	紫苏辉石	硅灰石	橄榄石	锥辉石	钛铁矿	磁铁矿	磷灰石	锆石
碱长正长岩	0.80	0.98	0.85	0	0.91	3.41	0.31	0.09
霞石正长岩	0	2.45	0.12	3.84	0.49	1.91	0.07	0.44

了橄榄石。这些现象表明碱性杂岩体形成过程中发生了结晶分异作用,且具有上地幔岩浆分异而成的特点。

2 采样及测试方法

研究样品采自笔者参与主持的“云南省建水县普雄矿风化壳型铌稀土矿勘探”项目深部 9 个钻孔(图 1b),样品新鲜(图 2a、2c),共 9 件(表 2、表 3),其中,长岭岗霞石正长岩样品 7 件;白云山碱长正长岩 1 件,霞石正长岩样品 1 件。主量元素、稀土元素、微量元素测试在国土资源部昆明矿产资源监督检查中心完成。主量元素分析采用电感耦合等离子体发射光谱法(等离子体发射光谱仪 ICAP7000),其

中 SiO_2 采用动物胶凝聚重量法(电子天平 AUW120D), FeO 采用重铬酸钾容量法(滴定管),分析精度优于 3%。岩石样品经破碎后用玛瑙研磨至 200 目,称取 0.1 g 样品,利用氢氟酸、硝酸、硫酸等复合酸溶样,然后将溶液样品置于电感耦合等离子体发射光谱仪上测定主量元素组成。稀土元素和微量元素采用等离子体质谱法(等离子体质谱仪 PE300X),分析精度优于 5%;岩石样品经破碎后用玛瑙研磨至 200 目,称取 0.1 g 样品,采用氢氟酸、硝酸、硫酸等复合酸溶,在电感耦合等离子体质谱仪上测定。薄片鉴定由昆明冶金研究院完成。此外,文中还引用了前人对个旧碱性杂岩体的主量元素和微量元素含量的测试数据及其结果(西南有色地质勘查局地质研究所,1997^①;黄文龙等,2016,2018)。

表 2 个旧碱性杂岩体主量元素含量
Table 2 The major elements content of the the Gejiu alkaline complex

$w_B/\%$

岩性	长岭岗霞石正长岩							白云山霞石正长岩	白云山碱长正长岩
样号	GJ01	GJ02	GJ03	GJ04	GJ05	GJ06	GJ07	GJ08	GJ09
SiO_2	52.58	53.91	54.79	56.01	52.49	52.20	55.96	54.13	58.84
TiO_2	0.24	0.15	0.25	0.12	0.37	0.22	0.37	0.18	0.43
Al_2O_3	20.65	20.96	20.09	21.48	19.60	21.12	19.33	20.19	17.90
Fe_2O_3	3.86	2.41	3.69	2.02	3.42	3.62	3.50	2.94	1.96
FeO	1.88	1.37	1.81	1.57	1.48	1.28	1.48	1.16	4.47
MnO	0.13	0.13	0.22	0.13	0.14	0.14	0.17	0.11	0.12
MgO	0.19	0.11	0.23	0.08	0.24	0.16	0.30	0.11	0.61
CaO	2.67	2.04	0.87	1.48	3.31	1.91	2.83	2.64	1.83
K_2O	8.59	6.96	6.80	6.63	7.88	7.82	7.82	11.10	8.37
Na_2O	7.84	8.65	8.04	9.03	8.12	8.90	6.77	4.29	3.95
P_2O_5	0.03	0.01	0.02	0.01	0.05	0.01	0.06	0.03	0.12
LOI	1.23	1.97	3.51	1.34	1.96	2.10	1.74	3.06	0.84
H_2O^+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
总量	99.89	98.67	100.32	99.90	99.06	99.48	101.03	99.94	99.44
σ	27.00	20.45	17.28	18.26	24.58	27.79	15.91	19.62	9.40
AR	5.10	5.22	5.85	5.29	5.63	6.30	4.14	5.14	2.34
DI	81.45	87.45	88.90	89.78	78.65	82.58	85.87	86.90	83.33
SI	0.85	0.56	1.12	0.41	1.14	0.74	1.51	0.56	3.12
FL	86.02	88.44	94.46	91.37	82.86	89.75	83.75	85.36	87.07
MF	96.80	97.17	95.99	97.82	95.33	96.84	94.32	97.39	91.61
A/NK	0.93	0.96	0.98	0.98	0.90	0.91	0.99	1.06	1.15
A/CNK	0.76	0.82	0.91	0.87	0.70	0.80	0.78	0.85	0.95

注:—表示未检测; $\text{A/CNK} = \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; $\text{A/NK} = \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; $\sigma = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2/(\text{SiO}_2 - 43)$; $\text{AR} = [\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]/[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$; $\text{DI} = \text{Qz} + \text{Or} + \text{Ab} + \text{Ne} + \text{Lc} + \text{Kp}$; $\text{SI} = 100 \text{ MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; $\text{FL} = 100(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$; $\text{MF} = 100(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 。

① 西南有色地质勘查局地质研究所. 1997. 云南省个旧市白云山霞石正长岩矿床地质勘探报告(内部资料). 1~189.

表 3 个旧碱性杂岩体微量元素和稀土元素分析结果

 $w_B/10^{-6}$

Table 3 Trace and rare earth elements content of the Gejiu alkaline complex

岩性样号	长岭岗霞石正长岩							白云山霞石正长岩	白云山碱长正长岩
	GJ01	GJ02	GJ03	GJ04	GJ05	GJ06	GJ07	GJ08	GJ09
Li	35.4	115.0	218.0	152.0	90.5	61.8	87.0	33.4	48.0
Be	9.28	11.40	29.80	13.20	16.30	12.90	17.10	2.71	5.83
Nb	131.0	147.0	199.0	96.3	147.0	132.0	139.0	89.9	69.4
Sc	1.28	1.46	1.55	1.32	1.30	1.16	1.76	1.49	2.09
Ga	29.7	33.3	49.5	36.8	30.8	35.7	32.8	22.7	22.8
Th	91.7	78.3	60.4	68.3	125.0	71.3	110.0	91.1	77.5
Sr	647.0	38.0	76.5	10.4	479.0	167.0	334.0	614.0	632.0
Ba	218.00	5.11	17.50	5.16	121.00	40.00	325.00	389.00	567.00
V	24.80	4.98	10.20	2.92	25.80	11.80	16.70	18.40	19.30
Hf	36.60	56.10	46.10	66.90	35.00	20.00	53.80	30.70	27.50
Rb	152	385	275	619	206	235	304	346	333
Ta	2.35	2.07	3.99	1.27	3.64	3.17	3.82	2.37	2.87
Zr	3 270	4 290	2 610	4 020	2 230	1 410	3 870	3 250	1 080
La	247.0	209.0	168.0	164.0	387.0	97.6	458.0	269.0	166.0
Ce	333	238	166	167	472	111	592	327	287
Pr	30.6	19.5	11.8	11.9	40.4	8.3	55.5	29.6	30.6
Nd	77.3	46.0	23.1	22.2	106.0	19.4	141.0	69.4	100.0
Sm	9.46	6.06	2.17	2.14	13.00	2.13	17.20	7.98	14.00
Eu	2.10	0.93	0.41	0.26	2.59	0.40	3.15	1.54	2.60
Gd	10.50	7.15	3.16	3.45	15.80	2.96	18.90	8.95	12.30
Tb	0.90	0.76	0.22	0.25	1.20	0.18	1.76	0.78	1.24
Dy	4.26	4.41	0.99	1.25	5.12	0.71	7.70	3.72	5.83
Ho	0.92	1.24	0.22	0.37	1.15	0.17	1.71	0.85	1.20
Er	3.20	4.45	0.76	1.38	3.88	0.61	5.58	2.91	3.57
Tm	0.50	0.80	0.12	0.28	0.60	0.09	0.90	0.49	0.50
Yb	3.51	5.61	0.66	1.59	3.69	0.57	5.71	3.36	3.09
Lu	0.62	0.98	0.13	0.37	0.61	0.10	0.91	0.58	0.54
Y	29.30	43.50	5.85	13.20	35.20	5.32	52.00	28.18	32.20
LREE	699	519	371	368	1 021	239	1 267	705	600
HREE	24	25	6	9	32	5	43	22	28
ΣREE	724	545	378	376	1 053	244	1 310	726	628
LREE/HREE	29	20	59	41	32	44	29	33	21
(La/Yb) _N	50	27	183	74	75	123	58	51	39
(La/Sm) _N	17	22	50	49	19	30	17	22	8
(Sm/Yb) _N	3.0	1.2	3.7	1.5	3.9	4.2	3.3	2.3	5.0
(Th/Nb) _N	5.9	4.5	2.5	5.9	7.1	4.5	6.6	8.5	9.4
δEu	0.64	0.43	0.48	0.29	0.55	0.49	0.53	0.60	0.61
δCe	0.94	0.91	0.91	0.93	0.93	0.96	0.91	0.90	0.99

3 地球化学特征

3.1 主量元素特征

数据显示(表 2),边缘相碱长正长岩主量元素组成具有以下特征: ① SiO_2 含量为 58.84%, Al_2O_3 含量为 17.90%, CaO 含量为 1.83%, 分异指数高

($\text{DI}=83.33$), 固结指数低($\text{SI}=3.12$), 长英指数高($\text{FL}=87.07$), 镁铁指数高($\text{MF}=91.61$), 揭示岩体经历了高分化的分异演化作用。② 全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)为 12.32%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=2.12$, 属于钾质类型岩石; 里特曼指数 σ 为 9.40, 属于碱性岩系列; 碱度率较高($\text{AR}=2.34$); A/NK 值为 1.15, 具有碱质岩石特征。中心相霞石正长岩主量元素组成具有以下

特征: ① SiO_2 含量变化于 52.20%~56.01% 之间, Al_2O_3 含量变化于 19.33%~21.48% 之间, CaO 含量变化于 0.87%~3.31% 之间; 分异指数高 ($\text{DI}=78.65\sim89.78$), 固结指数低 ($\text{SI}=0.41\sim1.51$), 长英指数高 ($\text{FL}=82.86\sim94.46$), 镁铁指数高 ($\text{MF}=94.32\sim97.82$), 揭示岩体经历了高分化的分异演化作用。② 全碱 ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) 变化于 14.59%~16.72% 之间, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 变化于 0.73~2.59 之间, 属于钾质类型岩石; 里特曼指数 σ 变化于 15.91~27.79 之间, 属于过碱性岩系列; 碱度率较高 ($\text{AR}=4.14\sim6.30$), A/NK 值变化于 0.90~1.06 之间, 具有过碱质岩石特征。全碱- SiO_2 图上, 碱长正长岩样品主体落入正

长岩范围内, 霞石正长岩样品主体落入副长正长岩范围内 (图 3a)。在 $\text{AR}-\text{SiO}_2$ 图解上, 碱长正长岩样品绝大部分落入碱性岩区, 少数落入钙碱性区域; 霞石正长岩样品全部落入过碱性岩区 (图 3b)。 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图解上, 碱长正长岩指示过铝质-准铝质特征; 霞石正长岩指示过碱质特征, 少数指示准铝质特征 (图 3c)。 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上, 碱长正长岩和霞石正长岩样品全部落入钾玄岩区 (图 3d)。主量元素地球化学特征揭示碱长正长岩具有高碱、富钾、富铁、低镁、过铝质-准铝质的碱性岩石特征; 霞石正长岩具有 SiO_2 不饱和、富碱、富钾、富铁、低镁、过碱性岩石特征。

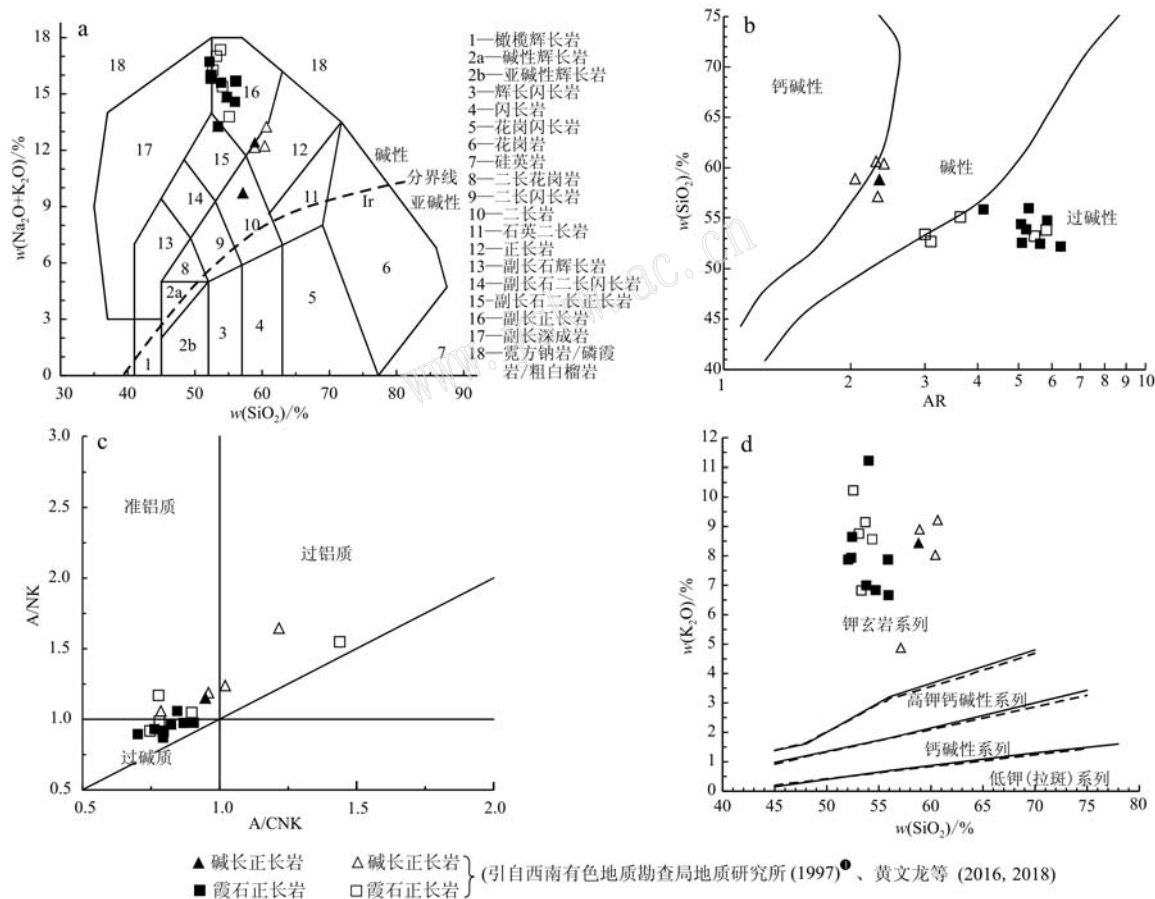


图 3 个旧碱性杂岩体 TAS 图解 (a, 据 Middlemost, 1994)、 SiO_2 -AR 判别图解 (b, 据 Wright, 1969)、 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 图解 (c, 据 Ewart, 1982)、 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解 (d, 据 Ewart, 1982)

Fig. 3 TAS diagram (a, after Middlemost, 1994), SiO_2 versus AR discrimination diagram (b, after Wright, 1969), A/NK versus A/CNK diagram (c, after Ewart, 1982), K_2O versus SiO_2 diagram (d, after Ewart, 1982) for the Gejiu alkaline complex

主量元素哈克图解 (图 4) 表明: ① 碱长正长岩和霞石正长岩具有两个阶段的岩浆分异演化过程, 暗示两类岩石具有成因上的联系。② 从边缘相碱长正

长岩向中心相霞石正长岩岩浆演化作用过程中, SiO_2 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 MgO 含量逐渐减低, K_2O 、 Na_2O 含量逐渐增加, 即由碱质岩石向过碱质岩石过渡。③ TFe_2O_3 、

① 西南有色地质勘查局地质研究所. 1997. 云南省个旧市白云山霞石正长岩矿床地质勘探报告 (内部资料). 1~189.

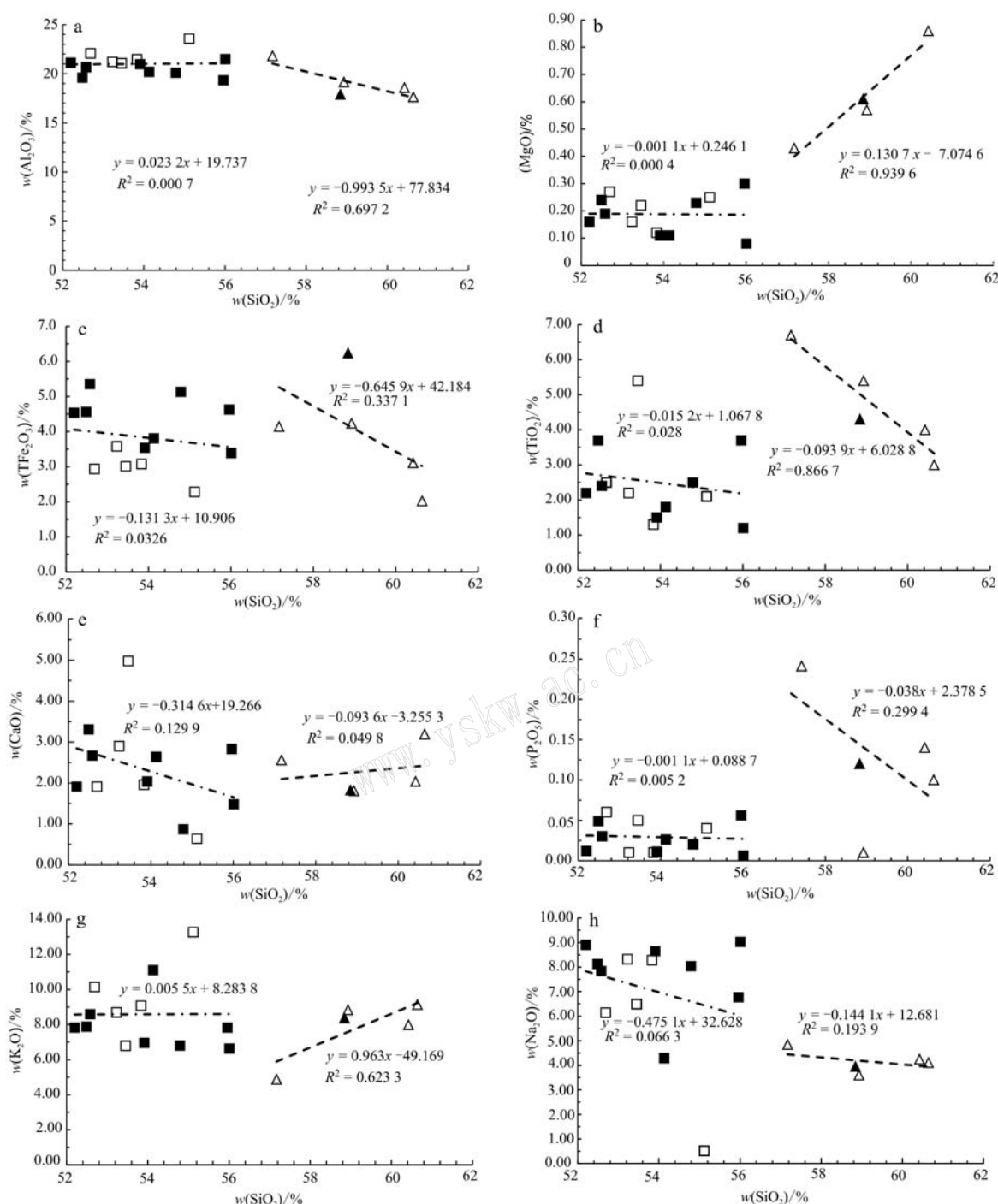


图4 个旧碱性杂岩体哈克图解(图例同图3)

Fig. 4 Harker diagrams for the Gejiu alkaline complex (legends as for Fig. 3)

Al₂O₃、CaO 含量基本保持不变。④ 碱长正长岩随着 SiO₂ 含量增加, MgO、K₂O 逐渐增加, Na₂O、TiO₂、P₂O₅、Al₂O₃、TFe₂O₃ 逐渐降低, CaO 含量变化不大。⑤ 霞石正长岩随着 SiO₂ 含量增加, MgO、P₂O₅、K₂O、Al₂O₃ 含量基本不变, Na₂O、TiO₂、CaO、TFe₂O₃ 含量逐渐降低, 说明存在钾长石、钛铁矿等矿物的分离结晶作用。

3.2 稀土元素特征

数据显示(表3), 碱长正长岩和霞石正长岩具有如下特征: ① 边缘相碱长正长岩稀土元素总量(ΣREE)为 628×10^{-6} 。② 中心相霞石正长岩 ΣREE 为 $244 \times 10^{-6} \sim 1310 \times 10^{-6}$, 平均 670×10^{-6} , 从边缘相到中心相显著增高。③ 具明显的 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.29 \sim 0.64$, 平均 0.51), 揭示岩石经历了强烈的斜

长石分离结晶作用。④ $\delta\text{Ce} = 0.90 \sim 0.96$ (平均 0.92), 无明显的 Ce 异常。⑤ $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 27 \sim 183$ (平均 75), LREE/HREE 为 20~59 (平均 34), 揭示轻、重稀土元素发生了明显的分馏; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 8 \sim 50$ (平均 24)、 $(\text{Sm}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.2 \sim 5.0$ (平均 3.1), 揭示碱性杂岩体轻稀土元素较重稀土元素分馏程度高。⑥ 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈现明显的右倾型(图 5a), 配分型式总体相似, 揭示了同源岩浆分异演化特征, 霞石正长岩中稀土元素进一步富集。

3.3 微量元素特征

数据显示(表 3), 碱长正长岩和霞石正长岩具有如下特征: ① 微量元素原始地幔标准化图上, 二者分布型式相似, 均亏损高场强元素 Ti、Nb、P 和大离子亲石元素 K、Sr 等, 明显富集高场强元素 Zr、Hf、Th, 稀土元素 La、Ce、Nd 及大离子亲石元素 U、Rb

(图 5b), 说明它们具有相同的源区。② 边缘相碱长正长岩和中心相霞石正长岩 Rb/Sr 值(分别为 0.53 和 0.23~60.00, 平均 9.60)接近或明显高于原始地幔的相应值(0.88; Taylor and McLennan, 1995), 说明岩体经历了较高分异。③ Nb/Ta 值(分别为 24 和 36~76, 平均 51)明显高于地幔的 Nb/Ta 值(17.5 ± 2 ; Weyer *et al.*, 2002; 徐平等, 2004); Zr/Hf 值(分别为 39 和 57~106, 平均 74)接近或远高于原始地幔和球粒陨石值(34~36; Sun and McDonough, 1989), 揭示碱性岩浆源于遭受交代作用的富集地幔部分熔融。④ 霞石正长岩中 Nb 含量 $89.9 \times 10^{-6} \sim 199.0 \times 10^{-6}$ (平均 135×10^{-6})、Ga 含量 $22.7 \times 10^{-6} \sim 49.5 \times 10^{-6}$ (平均 33.9×10^{-6}) 和 Zr 含量 $1410 \times 10^{-6} \sim 4290 \times 10^{-6}$ (平均 3119×10^{-6}) 均显著高于碱长正长岩中 Nb (69.4×10^{-6})、Ga (22.8×10^{-6}) 和 Zr 含量 (1080×10^{-6})。

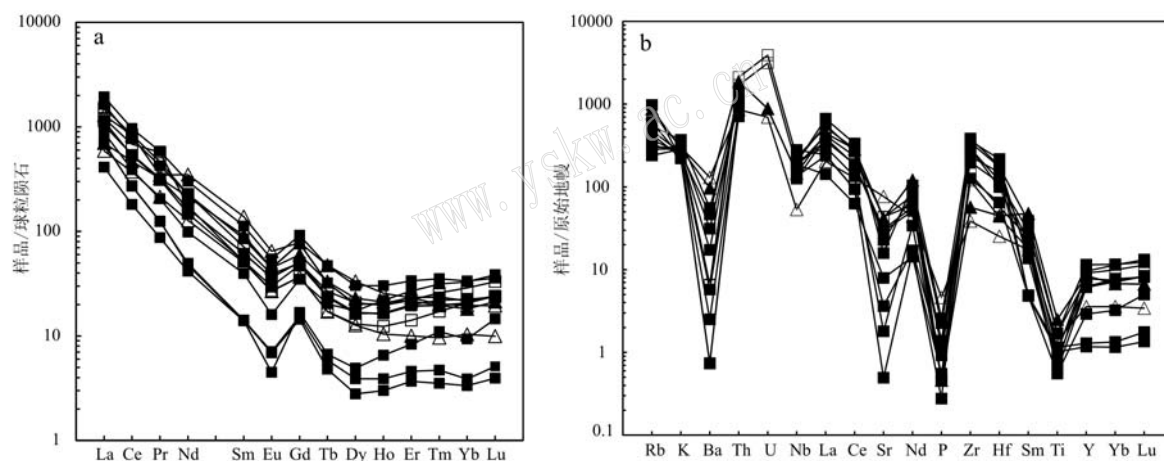


图 5 个旧碱性杂岩体稀土元素配分图解(a)和微量元素蛛网图解(b) (标准化数值据 Sun and McDonough, 1989) (图例同图 3)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE diagram (a) and primitive mantle-normalized trace element spider (b) for the Gejiu alkaline complex (normalization values after Sun and McDonough, 1989) (legends as for Fig. 3)

4 成因讨论

4.1 岩浆演化

碱性杂岩体具有相似的主量元素含量, 经历了高分异的分异演化作用, 具有富碱、富钾、富铁、低镁碱性-过碱性岩石特征; 与碱长正长岩相比, 霞石正长岩碱金属含量明显增加, 分异程度更高。二者具有相似的稀土元素配分型式(图 5a), 具有 Eu 负异常、Ce 弱负异常; 霞石正长岩 ΣREE 、 LREE/HREE 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 特征值均明显高于碱长正长

岩, 稀土元素地球化学特征显示, 高分异的岩浆演化使霞石正长岩中稀土元素超常富集, 轻、重稀土元素分馏程度更高。二者具有相似的微量元素分布型式(图 5b), Rb/Sr、Ba/Sr、 δEu 特征值等揭示碱性杂岩体均发生了高分异的结晶分异作用, 且霞石正长岩结晶分异程度更高, 更加富集 Nb、Ga、Zr 元素。边缘相岩浆冷却较快, 成岩温度较低, 多为细粒结构或似斑状结构; 中心相岩浆缓慢冷却, 成岩温度较高, 岩石结构以中粗粒结构为主, 少部分为伟晶结构; 从边缘相至中心相, 显示 SiO_2 、CaO 含量和 SI 值逐渐降低, Al_2O_3 、 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量、DI、MF、 δ 、AR 逐渐升高, 具有

硅质降低、从碱质岩石向过碱质岩石过渡特征以及矿物组合和含量变化特征(图2a),这些都是岩浆结晶分异作用特征。在野外调查中发现中心相霞石正长岩中含有边缘相碱长正长岩捕虏体, Hark 图解(图4)显示二者存在两个阶段的岩浆分异演化过程,证实碱长正长岩的形成略早于霞石正长岩。边缘相碱长正长岩和中心相霞石正长岩具有相似的地球化学特征和岩相学特征,是同源岩浆分异演化产物,晚期霞石正长岩的分异程度明显高于早期碱长正长岩,高分度的分异作用使稀土元素、Nb、Ga 和 Zr 元素超常富集。

4.2 岩浆源区性质

碱性杂岩体 SiO_2 含量 52%~59% (平均 55%) 区别于长英质地壳物质部分形成的产物(黄文龙等, 2018); Nb/Ta 值为 24~76 (平均值 48), 明显高于地幔的 Nb/Ta 值 (17.5 ± 2 ; Weyer *et al.*, 2002; 徐平等, 2004); Zr/Hf 值 (39~106, 平均值 70)、Th/Nb 值 (0.30~1.12, 平均值 0.73) 远高于原始地幔和球

粒陨石值 (36 和 0.12; Sun and McDonough, 1989); 碱性杂岩体的 CIPW 标准矿物计算结果中出现紫苏辉石、锥辉石、橄榄石等幔源特征指示矿物; 上述特征均表明碱性杂岩体微量元素具有幔源特征。Cheng 等 (2013) 和黄文龙等 (2018) 对个旧碱性杂岩体进行的 Sr-Nd 同位素研究表明, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化于 0.709 4~0.710 4 之间, ε_{Nd} 变化于 -7.12~-6.4 之间; 且杂岩体的 $(\text{Th}/\text{Nb})_{\text{N}}$ 值为 2.5~9.4, 平均 6.1, Nb/La 值为 0.53~1.40, 平均 0.64, 符合 $(\text{Th}/\text{Nb})_{\text{N}} > 1$ 和 $\text{Nb}/\text{La} < 1$ 两个判别地壳混染作用的微量元素指标 (Saunders *et al.*, 1992; 夏林圻等, 2007), 因此认为碱性杂岩中混入了有限的地壳物质。综上所述, 个旧碱性杂岩体岩浆来源地幔的母岩浆应通过分异作用形成, 受到有限的地壳混染作用影响。

4.3 构造环境

碱性杂岩体的成因类型与 A 型花岗岩大致相当 (图6a、6b)。为了进一步研究个旧碱性杂岩体各组

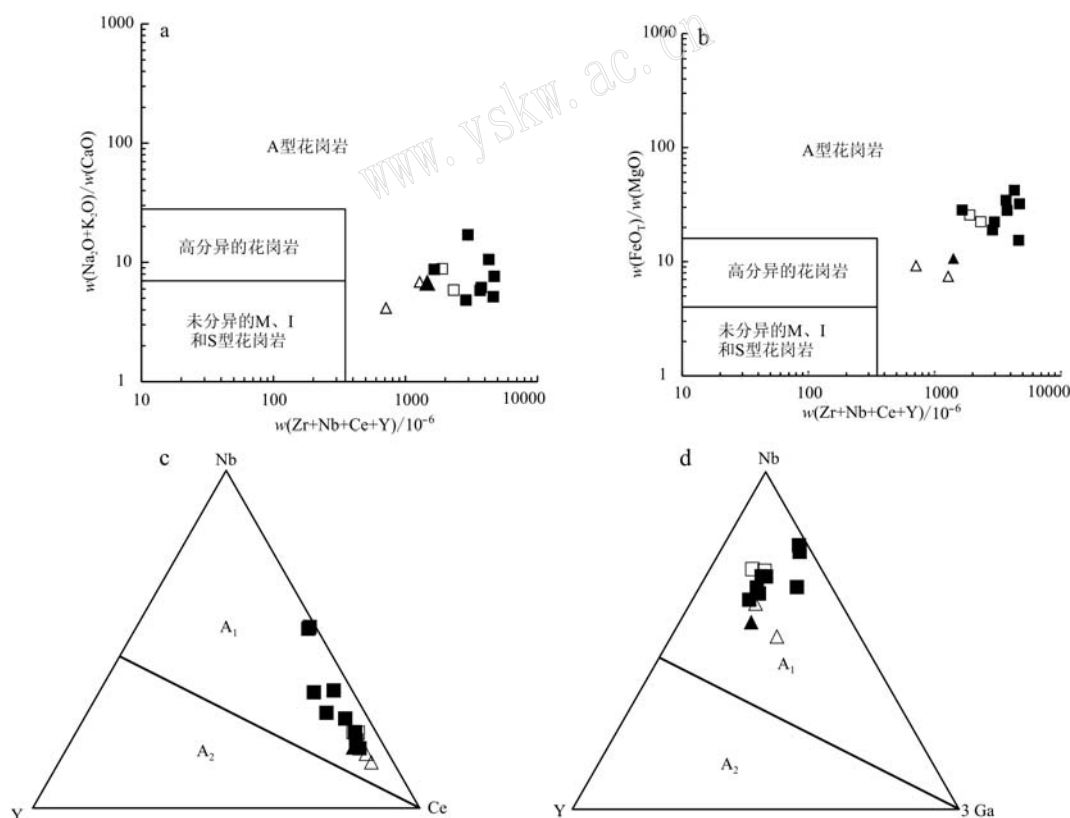


图6 个旧碱性杂岩体 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ (a, 底图据 Whalen *et al.*, 1987)、 $(\text{FeO}^T/\text{MgO})-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ (b, 底图据 Whalen *et al.*, 1987)、Y-Ce-Nb (c, 底图据 Eby, 1992) 和 Y-Ga-Nb (d, 底图据 Eby, 1992) 判别图解 (图例同图3)

Fig. 6 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ versus $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ discrimination diagram (a, after Whalen *et al.*, 1987), $(\text{FeO}^T/\text{MgO})$ versus $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ discrimination diagram (b, after Whalen *et al.*, 1987), Y versus Ce versus Nb discrimination diagram (c, after Eby, 1992) and Y versus Ga versus Nb discrimination diagram (d, after Eby, 1992) for the Gejiu alkaline complex (legends as for Fig. 3)

分岩石成因,尝试运用A型岩套的划分方案(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992),即A₁型与上地幔热柱或裂谷有关,A₂型则与大陆边缘地壳伸展作用有关,以此来区分和对比研究。在Y-Ce-Nb和Y-Ga-Nb判别图解中,全部样品投影到A₁花岗岩中(图6c、6d),由此推测其形成构造环境与加厚地壳-岩石圈拆沉作用所引起地幔上涌有关。

在 $\lg[\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]-\text{SiO}_2$ 判别图解(图7a)中,个旧碱性杂岩体样品全部落入于引张型碱钙性-碱性岩区。在Rb-(Nb+Y)判别图解(图7b)中,大部分样品位于后碰撞花岗岩-板内花岗岩的交界部位。在Rb-(Yb+Ta)判别图(图7c)中,全部样品位于后碰撞花岗岩区。在Ta-Yb判别图解(图7d)

中,绝大部分样品位于板内花岗岩区,少数落入同碰撞花岗岩区。

前人研究表明,位于华南西部的滇东南-桂西地区分布的世界级的超大型锡多金属矿床(个旧、大厂、都龙及白牛厂)的成岩成矿时限范围为119~73.9 Ma,在100~80 Ma集中出现,且均形成于岩石圈伸展的动力学背景,更多地受到太平洋构造域的影响(陈懋弘等, 2008; 毛景文等, 2008a, 2008b; 杨宗喜等, 2008; 程彦博等, 2008, 2009; Cheng *et al.*, 2013)。个旧碱性杂岩体的侵位年龄(82.9~76.6±3.6 Ma)说明该区岩石圈伸展构造背景与华南西部的滇东南-桂西地区岩石圈伸展的动力学背景具有可比性,形成于后碰撞的伸展环境。

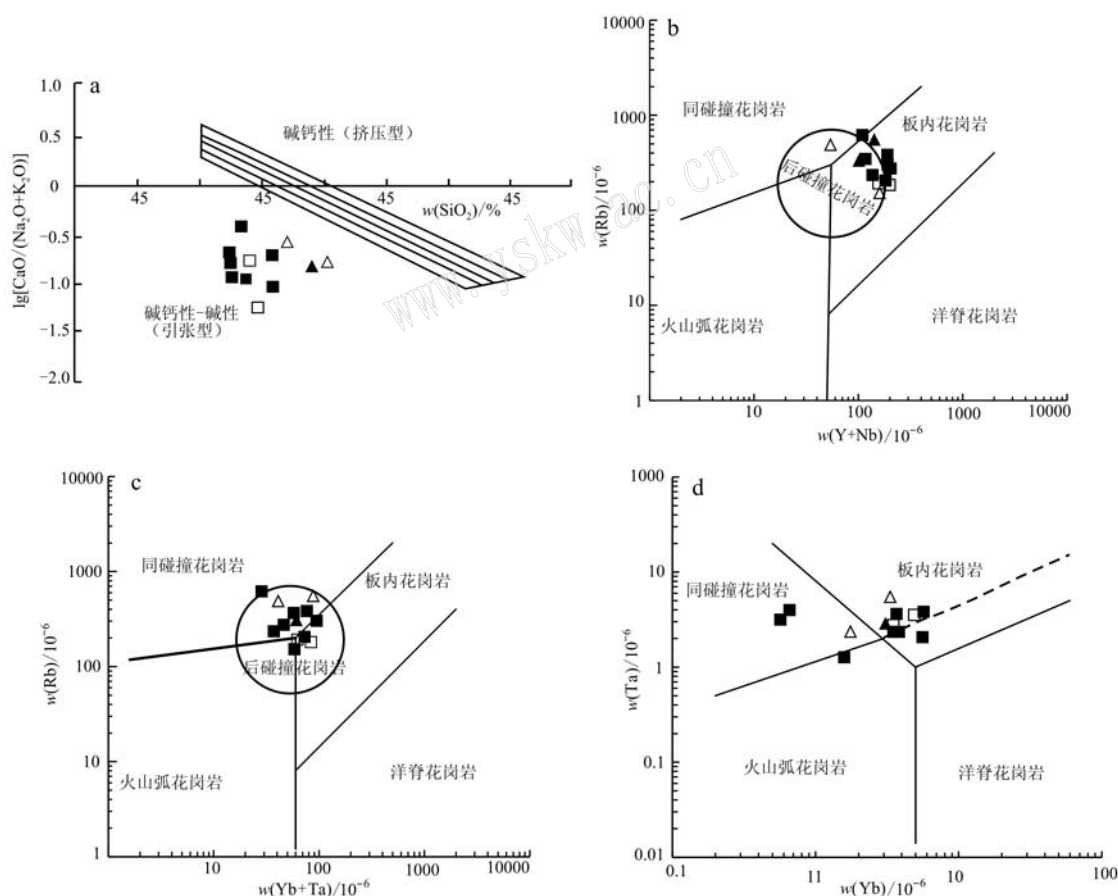


图7 个旧碱性杂岩体 $\lg[\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]-\text{SiO}_2$ (a, 底图据 Brown, 1982)、Rb-(Y+Nb)(b, 底图据 Pearce, 1996)、Rb-(Yb+Ta)(c, 底图据 Pearce, 1996)和Ta-Yb(d, 底图据 Pearce, 1996)判别图解(图例同图3)

Fig. 7 $\lg[\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]$ versus SiO_2 diagram (a, after Brown, 1982), Rb versus (Y+Nb) discrimination diagram (b, after Pearce, 1996), Rb versus (Yb+Ta) discrimination diagram (c, after Pearce, 1996) and Ta versus Yb discrimination diagram (d, after Pearce, 1996) of the Gejiu alkaline complex (legends as for Fig. 3)

5 结论

(1) 个旧碱性杂岩体碱长正长岩和霞石正长岩是同源岩浆分异演化产物, 岩浆起源于遭受交代作用的富集地幔部分熔融, 并受到了有限的地壳混染作用影响。晚期霞石正长岩的分异程度明显高于早期碱长正长岩。碱性岩浆演化晚期更加富碱、经历了更高层次的结晶分异作用是稀土元素、Nb、Ga 和 Zr 元素超常富集的重要原因。

(2) 个旧碱性杂岩体形成于后碰撞的伸展环境, 其形成机制可能与加厚地壳-岩石圈拆沉作用所引起地幔上涌有关, 该碱性杂岩体的形成属于燕山晚期华南西部较大区域范围内的晚白垩世岩浆-成矿热事件的一部分, 与华南西部的滇东南-桂西地区岩石圈伸展的动力学背景相似。

致谢 论文的完成得益于云南省地质矿产开发局严城民高级工程师无私帮助和细心指导, 匿名审稿专家对文章修改提出诸多宝贵意见和建议, 在此表示感谢!

References

- Brown G C. 1982. Calcalkaline intrusive rocks: Their diversity, evolution and relation to volcanic arcs [A]. Thorpe R S. Andesites [C]. Hoboken: John Wiley and Sons, 437~461.
- Chen Chao, Zhou Tao, Hu Weiyun, *et al.* 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical characteristics of volcanic rocks in Jianshui, Southeast Yunnan and their geological implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(1): 161~173 (in Chinese with English abstract).
- Chen Maohong, Cheng Yanbo, Zhang Wei, *et al.* 2008. A preliminary study on the magmatism and mineralization during Yanshannian epoch in Youjiang fold belt [A]. The proceeding of the 9th national conference of mineral deposits, China [C]. Beijing: Geological Publishing House, 241~242 (in Chinese).
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Chen Maohong, *et al.* 2008. LA-ICP-MS zircon dating of the alkaline rocks and lamprophyres in Gejiu area and its implications [J]. *Geology in China*, 35(6): 1 138~1 149 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen and Spandler C. 2013. Petrogenesis and geodynamic implications of the Gejiu igneous complex in the western Cathaysia block, South China [J]. *Lithos*, 175~176: 213~229.
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Xie Guiqing, *et al.* 2009. Zircon U-Pb dating of granites in Gejiu superlarge tin polymetallic ore field and its significance [J]. *Mineral Deposits*, 28(3): 297~312 (in Chinese with English abstract).
- Du Yuansheng, Huang Hongwei, Huangzhiqiang, *et al.* 2009. Basin translation from Late Palaeozoic to Triassic of Youjiang Basin and its tectonic significance [J]. *Geological Science and Technology Information*, 28(6): 10~15 (in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 20(7): 641~644.
- Ewart A. 1982. The mineralogy and petrology of Tertiary: Recent orogenic volcanic rocks with special reference to the andesitic basaltic compositional range [A]. Thorpe R S. Andesites [C]. Chichester: Wiley, 25~87.
- 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 Wenlong, Xu Jifeng, Chen Jianlin, *et al.* 2018. Geochronology, geochemistry and genesis of the Baiyunshan alkali rocks in Gejiu area of southeastern Yunnan Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(5): 716~732 (in Chinese with English abstract).
- Li Xinren, Wang Changbing and Zhang Li. 2018. The lithologic character and genesis of Changlinggang alkali intrusion in Jianshui, Yunnan [J]. *Yunnan Geology*, 37(2): 150~155 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongying, Zhang Yuquan, Xia Bin, *et al.* 2004. A new viewpoint about the Rb-Sr isotopic data of two alkaline rock bodies in West Yunnan [J]. *Yunnan Geology*, 23(1): 52~59 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Mao Jingwen, Cheng Yanbo, Guo Chunli, *et al.* 2008a. Gejiu tin polymetallic ore field: Deposit model and discussion [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1 456~1 468 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, *et al.* 2008b. Spatial temporal distribution of Mesozoic ore deposit in South China and their metallogenic settings [J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510~526 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A. 1996. Source and settings of granitic rocks [J]. *Episodes*, 19: 120~125.
- Ren Kangxu. 2003. Study progress of the alkaline rocks: A review [J].

- Geology of Chemical Minerals, 25(3): 151~163 (in Chinese with English abstract).
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, *et al.* 1992. Consequences of plume lithosphere interactions[J]. Geological Society, London, Special Publication, 68(1): 41~60.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and process[A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins[C]. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313~345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. Rev. Geophys., 33: 165~241.
- Wang Yaying, Cai Jianhui, Yan Guohan, *et al.* 2014. SHRIMP zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the Zijinshan alkaline complex in Linxian County, Shanxi Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(6): 1 052~1 072 (in Chinese with English abstract).
- Weyer S, Munker C, Rehkamper M, *et al.* 2002. Determination of ultralow Nb, Ta, Zr and Hf concentrations and the chondritic Zr/Hf and Nb/Ta ratios by isotope dilution analyses with multiple collector ICP-MS[J]. Chemical Geology, 187(3): 295~313.
- 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.
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. Geol. Mag., 106: 370~384.
- 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).
- Xu Ping, Wu Fuyuan, Xie Liewen, *et al.* 2004. Hf isotopes of standard zircon for U-Pb isotopic dating[J]. Chinese Science Bulletin, 49(14): 1 403~1 410 (in Chinese).
- Xu Xisheng and Qiu Jiansheng. 2010. Igneous Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 239~256 (in Chinese).
- Yang Zongxi, Mao Jingwen, Chen Maohong, *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).
- Zhao Zhenghua. 1994. Alkali rich intrusive rocks: A window for exploring mantle composition[A]. Ouyang Ziyuan. Research Progress of Mineral and Rock Geochemistry in China[C]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 203~204 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈超, 周涛, 胡维云, 等. 2016. 滇东南建水火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、地球化学特征及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 40(1): 161~173.
- 陈懋弘, 程彦博, 章伟, 等. 2008. 右江褶皱带燕山期岩浆作用与成矿作用初步研究[A]. 第九届全国矿床会议论文集[C]. 北京: 地质出版社, 241~242.
- 程彦博, 毛景文, 陈懋弘, 等. 2008. 云南个旧锡矿田碱性岩和煌斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 35(6): 1 138~1 149.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 等. 2009. 与云南个旧超大型锡矿床有关的花岗岩锆石 U-Pb 定年及意义[J]. 矿床地质, 28(3): 297~312.
- 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.
- 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.
- 黄文龙, 许继峰, 陈建林, 等. 2018. 滇东南个旧白云山碱性岩年代学与地球化学及成因意义[J]. 岩石矿物学杂志, 37(5): 716~732.
- 李新仁, 王长兵, 张黎. 2018. 云南建水县长岭岗碱性侵入岩体岩石特征与成因[J]. 云南地质, 37(2): 150~155.
- 刘红英, 张玉泉, 夏斌. 2004. 滇西两个碱性岩体 Rb、Sr 同位素资料的再认识[J]. 云南地质, 23(1): 52~59.
- 毛景文, 程彦博, 郭春丽, 等. 2008a. 云南个旧锡矿田: 矿床模型及若干问题讨论[J]. 地质学报, 81(11): 1 456~1 468.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 2008b. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 14(4): 510~526.
- 任康绪. 2003. 碱性岩研究进展述评[J]. 化工矿产地质, 25(3): 151~163.
- 王亚莹, 蔡剑辉, 阎国翰, 等. 2014. 山西临县紫金山碱性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究[J]. 岩石矿物学杂志, 33(6): 1 052~1 072.
- 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.
- 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. 科学通报, 49(14): 1 403~1 410.
- 徐夕生, 邱检生. 2010. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 239~256.
- 杨宗喜, 毛景文, 陈懋弘. 2008. 云南个旧卡房夕卡岩型铜(锡)矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(8): 1 937~1 944.
- 赵振华. 1994. 富碱侵入岩——窥探地幔成分的窗口[A]. 欧阳自远. 中国矿物岩石地球化学研究进展[C]. 兰州: 兰州大学出版社, 113~114.