

文章编号: 1000-4734(2016)04-0441-14

滇东南燕山晚期老君山花岗岩的 地球化学特征与年龄谱系

蓝江波^{1*}, 刘玉平¹, 叶霖¹, 张乾¹, 王大鹏¹, 苏航²

(1. 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081;

2. 华联矿产勘探有限责任公司, 云南 曲靖, 655000)

摘要: 对滇东南燕山晚期老君山花岗岩开展了全岩主-微量元素、Sr-Nd-Pb 同位素、锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 定年研究。结果表明该岩体岩石化学成分总体上属于高 K 钙碱性系列, 其铝饱和指数 ACNK 多大于 1.1; 标准矿物计算显示大多数样品含有标准刚玉分子 (1%~5%); 认为老君山花岗岩为过铝-强过铝 S 型花岗岩, 是古老地壳物质部分熔融的产物, 其源岩可能为滇东南地区中-古元古代结晶基底中的一套变质泥岩为主, 含少量变质硬砂岩的泥砂质副变质岩。根据锆石 U-Pb 定年结果, 可将该复式岩体形成年龄分为 80~88 Ma、90~98 Ma、100~118 Ma 等三幕。老君山花岗岩成岩与锡矿化时代的一致性, 表明都龙锡矿化与燕山期岩浆热液活动关系密切, 老君山花岗岩是都龙锡锌多金属矿床成矿物质的主要源区。滇东南个旧、白牛厂和都龙等三个超大型矿床的成矿和成岩时代的耦合关系可能暗示其经历了相似的动力学背景, 均与燕山期岩浆事件和华南岩石圈伸展密切相关。

关键词: 花岗岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 年代学; 都龙锡锌多金属矿床; 滇东南; 老君山

中图分类号: P579; P597; P618.4

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2016.04.001

作者简介: 蓝江波, 1979 年生, 副研究员, 主要从事岩石地球化学和矿床学研究. E-mail: lanjiangbo@vip.gyig.ac.cn

Geochemistry and age spectrum of Late Yanshanian granites from Laojunshan Area, Southeastern Yunnan Province, China

LAN Jiang-Bo^{1*}, LIU Yu-Ping¹, YE Lin¹, ZHANG Qian¹, WANG Da-Peng¹, SU Hang²

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. Yunnan Hualian Mineral Resource Exploration Lt. Co., Qujing 655000, China)

Abstract: In this paper, Laojunshan granites were collected systematically. Zircon U-Pb dating, whole rock major and trace elements, and Sr-Nd-Pb isotope analysis were carried out to understand their petrogenesis and the relationship between respective mineralizations. Results show that Laojunshan granite belongs to high-K calc-alkaline series. The ACNK is higher than 1, and most of them higher than 1.1. CIPW results show that most of the samples contain standard corundum molecules (1%–5%), indicating that Laojunshan granite are peraluminous S-type granites. Whole rock major-trace elements and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics indicate that Laojunshan granite is highly fractionated S-type granites. Geochemical and isotopic data suggest that these highly fractionated S-type granites originated from partial melting of the protolith, which has analogous components in mixture of metamorphosed pelitic and psammitic rocks from the Meso-Paleoproterozoic continental crust. LA-MC-ICPMS U-Pb dating results show that Laojunshan granite can be divided into three episodes, i.e. 80–88 Ma, 90–98 Ma, and 100–118 Ma. Laojunshan granite is consistent with the age of tin mineralization. The consistency implies that Dulong tin mineralization has close relation with granitic magmatic hydrothermal. Laojunshan granite may be likely an important source of minerals reservoir for Dulong tin zinc polymetallic deposits. The coupling between mineralization and emplacement in Gejiu, Baihuichang, and Dulong,

收稿日期: 2016-07-04

基金项目: 云南华联锡铜股份有限公司委托项目 (KY20120910); 矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群 (SKLOGD-ZY125-04)

Southeast Yunnan Province imply that those deposits formed in similar dynamic background, and are closely related to the same magmatic events and lithospheric extension of South China.

Keywords: Granite; Geochemistry; Zircon U-Pb dating; Dulong tin-zinc polymetallic deposit; Laojunshan; Southeastern Yunnan Province

滇东南地区位于南岭燕山期花岗岩锡多金属成矿带的西南端,由西向东依次分布个旧锡多金属矿床、白牛厂银多金属矿床和都龙锡锌多金属矿床等3个与燕山晚期花岗岩关系密切的超大型矿床^[1]。其中地处中越边境的云南省马关县都龙锡锌多金属矿床,目前探明锌金属资源/储量超过 400×10^4 t、锡金属资源/储量超过 30×10^4 t,保有铟金属资源/储量约 6000 t,是全国第一大铟资源基地,有“中国第三锡都”和“边陲铟都”之称。尽管该矿床的成因尚存在一定争议,但大量研究表明,其与燕山晚期老君山花岗岩具有密切的关系^[2-4]。

老君山花岗岩出露于云南省东南部马关县与麻栗坡县交界处,北至阿基、南歪一带,南至花石头一带,西至大竹山、扣哈一带,东至瓦渣、戈岭一带,岩体呈纺锤状,南北长约 17 km,东西宽约 10 km,出露面积约 153 km²,为一个多期次岩相组成的复式岩体(图 1)。关于该岩体的期次,前人提出了二分法、三分法和五分法^[5-8]等多种划分方案。目前,普遍采用的是 1:20 万区域地质调查报告提出的三分法方案,即第一期为粗粒含斑二云母二长花岗岩,第二期为中细粒含斑二云母二长花岗岩,第三期为花岗斑岩、石英斑岩和花岗细晶岩等脉岩。近

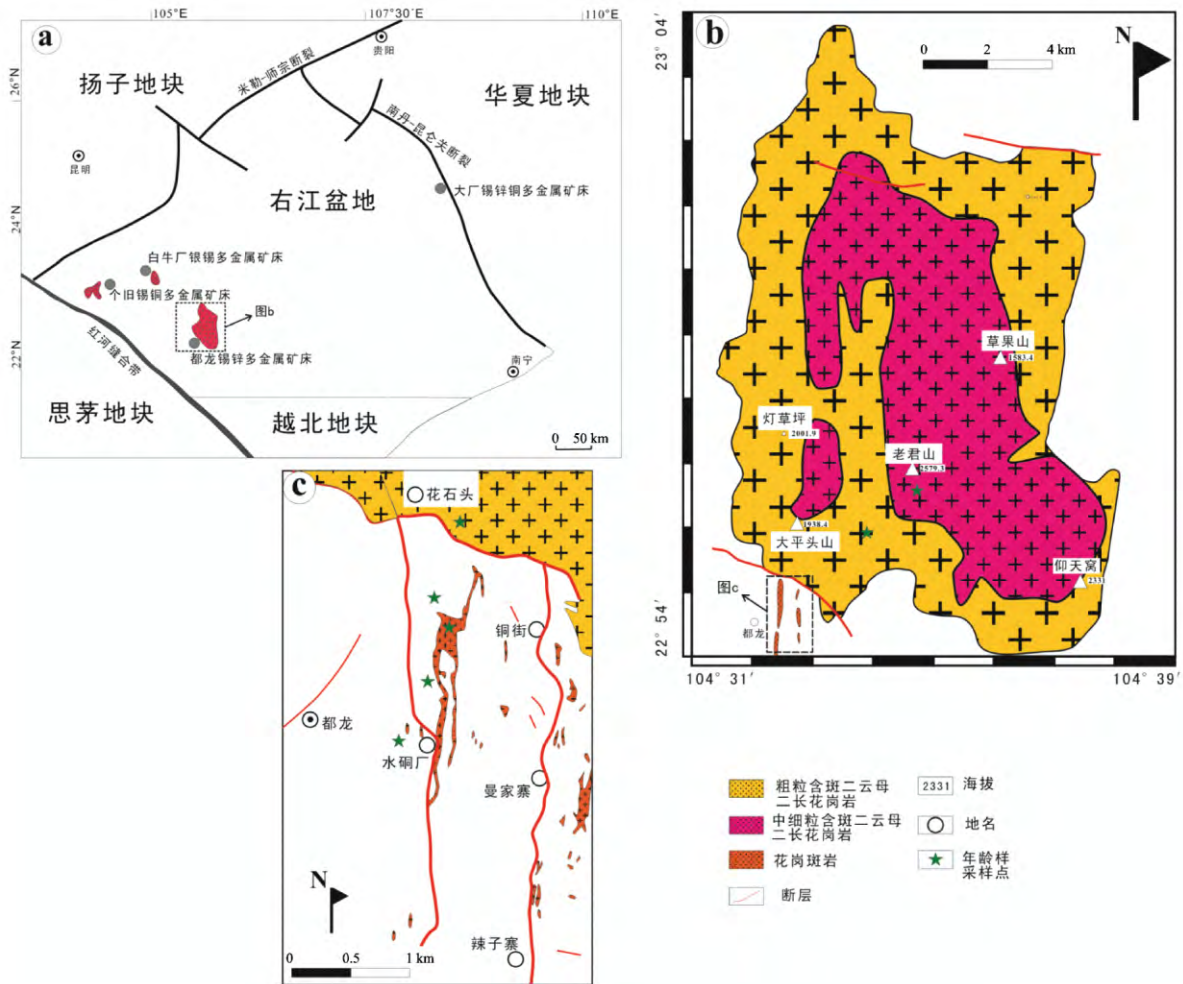


图 1 老君山花岗岩体地质简图(据文献[4]、[21]修改)

Fig.1. Regional geological map of Laojunshan granitoids in Southeastern Yunnan Province, China (modified by Wang et al., 2014^[4]; Xu et al., 2015^[21]).

年来, 一些学者也对该花岗岩体进行了不同程度的研究, 初步刻画了该岩体的地球化学特征, 获得了一些高质量的锆石 U-Pb 年代学数据, 但总体上看, 这些研究采样比较零散, 缺少系统性, 代表性不足。

近期, 我们在实施云南华联锌铜股份有限公司委托项目《云南马关老君山西部锡锌多金属成矿作用研究与找矿预测》过程中, 以勘探工程岩芯取样为主、地表穿越法(自花石头至老君山主峰穿越采样)取样为辅, 系统采集了老君山花岗岩三个期次的新鲜样品, 开展了比较系统的单颗粒锆石 U-Pb 定年, 以及全岩主-微量元素、Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究, 对其年龄谱系、地球化学特征及与矿化关系有了进一步的认识。

1 老君山花岗岩地球化学特征

1.1 岩相学特征

根据 1:20 万区调报告的划分方案, 老君山花岗岩复式岩体可分为 3 个亚期: 第一亚期 (γ_5^{3a}) 约占岩体面积的三分之二, 主要为中粗粒含斑黑云-二云二长花岗岩, 呈岩基侵入中、下寒武统地层; 第二亚期 (γ_5^{3b}) 约占岩体面积的三分之一, 主要为中细粒含斑二云-白云二长花岗岩, 呈岩株侵入第一亚期中; 第三亚期 (γ_5^{3c}) 规模最小, 主要为花岗斑岩、石英斑岩及花岗细晶岩, 多呈岩脉沿南北向、东西向两组断裂侵入第一、第二亚期或外接触带变质围岩中。岩体东西两侧与围岩呈陡倾侵位接触, 倾角 $50^\circ\sim 65^\circ$, 南北两端倾角为 $20^\circ\sim 35^\circ$ 。岩体顶面平缓, 出露标高 600~2579.3 m, 其剥蚀程度较浅, 老君山主峰旁侧仍保留有变质岩残留顶盖。主体花岗岩四周的一定距离内, 沿南北和东西向断裂交汇

处, 往往出现一系列卫星式小岩株(如大丫口、马卡、天生桥、田坝心)。

对采自金石坡、曼西钻孔岩芯, 以及老君山主峰、花石头、铜街等地的 27 件样品进行系统研究。老君山主峰、花石头和铜街的样品为含斑中粗粒二云母花岗岩, ZK79033、ZK101033 和 ZK109021 岩芯样品为中细粒白云母-二云母花岗岩, 岩石粒度随部位不同而有所变化, 岩体中心矿物粒度较粗, 边缘变细, 岩性均一, 不含或偶含斑晶, 主要矿物为微斜长石、斜长石、石英、黑云母、白云母。其余样品为花岗斑岩, 可细分为钾长花岗斑岩、二长花岗斑岩。斑晶主要为钾长石、石英、次为斜长石、黑云母, 一般钾长石多于石英。从岩脉中心至边缘黑云母含量逐渐减少, 斑晶从多至少, 甚至无斑, 基质粒度从微粒至霏细或隐晶状。

1.2 主-微量元素地球化学特征

全岩主-微量元素分析结果(表 1)表明, 老君山花岗岩总烧失量(LOI)为 0.94%~2.23%, 暗示所研究样品非常新鲜。全岩分析结果可以看出该类花岗岩具有高硅 ($w(\text{SiO}_2)$ 为 69.26%~78.95%, 大部分大于 71%)、全碱含量相对较高 ($w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 为 6.91%~10.39%) 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}>1$ 的特征。在 TAS 和 SiO_2 - K_2O 图解中, 老君山花岗岩总体上落入高 K 钙碱性系列区域(图 2)。在标准矿物的岩石分类图解上, 该类花岗岩主要属于二长花岗岩和花岗岩区域, 铝饱和指数 A/CNK 均大于 1, 大多数大于 1.1, 在 I-S 型花岗岩分类图中位于 S 型花岗岩区域(图 3)。标准矿物计算结果中, 大多数样品含有标准刚玉分子 (>1%), 表明老君山花岗岩为过铝-强过铝 S 型花岗岩。

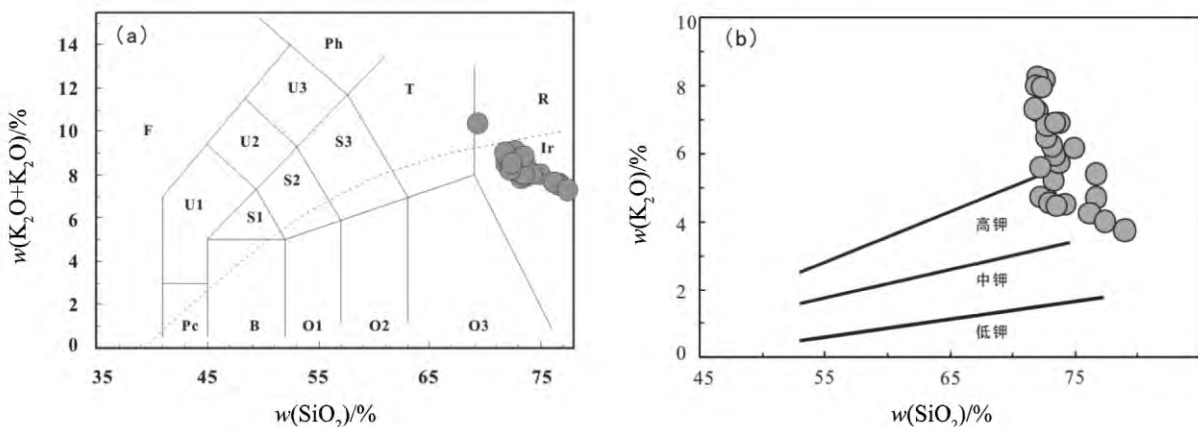


图 2 老君山花岗岩 TAS 图解 (a) 以及 SiO_2 - K_2O 图解 (b)
Fig.2. Diagrams of $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ vs. SiO_2 (a) and K_2O vs. SiO_2 (b) for Laojunshan granites.

表 1 老君山花岗岩的全岩主量元素 (%)、微量元素 (10^{-6}) 分析结果
Table 1. Whole rock major (%) and trace element (10^{-6}) data for Laojunshan granitoids

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	BaO	LOI	Total		
铜街	DL12-348	72.53	14.02	1.05	0.27	0.25	0.14	8.19	0.09	0.1	0.216	0.02	1.61	98.46	
	DL12-371	76.68	12.25	0.80	0.48	0.25	2.90	4.72	0.11	0.02	0.160	0.05	1.11	99.51	
花石头	DL12-376	73.20	15.07	0.21	0.18	0.12	2.63	5.21	0.04	<0.01	0.208	<0.01	2.23	99.07	
	DL12-386	72.73	14.69	0.99	0.66	0.20	3.81	4.66	0.07	0.04	0.208	0.01	1.39	99.43	
ZK67031	67031-G1	73.65	13.65	1.24	0.40	0.46	2.24	5.75	0.10	0.03	0.242	0.03	1.52	99.30	
	67031-G2	73.32	14.29	1.03	0.45	0.31	2.64	5.96	0.10	0.02	0.250	0.02	1.36	99.75	
	67031-G3	76.61	12.26	0.71	0.39	0.33	2.13	5.42	0.08	0.01	0.207	0.02	1.35	99.51	
ZK79021	79021-G1	71.94	13.96	1.14	0.69	0.29	0.24	8.27	0.10	0.08	0.233	0.02	2.06	99.01	
	79021-G2	73.15	14.12	1.06	0.52	0.33	2.32	6.24	0.13	0.08	0.225	0.03	1.34	99.55	
	79021-G3	74.92	13.15	0.90	0.69	0.31	1.86	6.17	0.10	0.05	0.204	0.03	1.43	99.80	
	79021-G4	71.83	14.27	1.15	0.89	0.28	0.56	8.00	0.11	0.08	0.244	0.02	1.77	99.20	
	79021-G5	73.66	13.38	0.98	0.52	0.24	1.45	6.92	0.09	0.08	0.229	0.01	1.41	98.95	
ZK79033	79033-G1	74.12	13.45	0.99	0.58	0.23	3.53	4.51	0.09	0.03	0.195	0.02	1.2	98.93	
	79033-G2	76.11	12.77	0.69	0.66	0.16	3.39	4.27	0.07	0.02	0.194	0.01	1.39	99.72	
	79033-G4	72.16	14.45	1.04	0.71	0.23	3.87	4.74	0.10	0.02	0.231	0.02	1.41	98.98	
ZK101033	101033-G1	69.26	14.94	0.76	1.31	0.30	0.27	10.12	0.12	0.04	0.227	0.05	1.71	99.08	
	101033-G4	78.95	11.42	0.68	0.48	0.21	3.15	3.76	0.05	0.02	0.166	0.01	0.99	99.87	
	101033-G5	77.34	11.77	0.80	0.50	0.20	3.30	4.02	0.06	0.01	0.182	0.01	0.94	99.13	
ZK109021	109021-G1	72.88	14.19	0.79	0.64	0.16	3.61	4.58	0.06	0.04	0.243	0.01	1.36	98.56	
	109021-G2	73.45	14.31	0.84	0.67	0.17	3.57	4.47	0.06	0.04	0.250	0.01	1.45	99.27	
ZK123037	123037-G1	72.64	14.45	0.85	0.69	0.24	2.65	6.48	0.11	0.05	0.230	0.02	1.39	99.79	
	123037-G2	71.94	14.14	1.03	0.87	0.31	1.61	7.26	0.10	0.25	0.232	0.02	1.46	99.21	
ZK129023	129023-G1	72.20	14.80	0.81	0.93	0.37	2.64	5.60	0.10	0.03	0.252	0.01	1.72	99.46	
	129023-G4	72.69	13.94	0.83	0.55	0.27	1.90	6.86	0.10	0.10	0.24	0.02	1.41	98.88	
	129023-G5	71.75	14.45	0.58	0.82	0.33	1.70	7.34	0.09	0.04	0.248	0.02	1.57	98.91	
ZK135031	135031-G1	73.39	13.82	0.59	0.63	0.25	1.93	6.93	0.09	0.02	0.235	0.02	1.45	99.35	
	135031-G2	72.30	13.69	0.76	0.79	0.32	0.58	7.96	0.10	0.02	0.239	0.04	1.65	98.44	
样品	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Ho	La	Lu	Nb	
铜街	DL12-348	145.5	34.6	10	78.8	2.05	0.81	0.21	24.6	2.67	2.5	0.31	15.6	0.11	24.2
	DL12-371	377	47.3	10	16.0	1.68	0.83	0.39	19	2.50	2.8	0.29	24.9	0.12	18.2
花石头	DL12-376	23.8	4.0	10	19.7	0.64	0.35	0.09	33.8	0.57	1.1	0.11	2.3	0.08	52.5
	DL12-386	115	26.5	10	35.0	2.12	1.09	0.25	27.6	2.10	2.0	0.39	12.4	0.16	26.5
ZK67031	67031-G1	225	39.1	10	48.8	2.71	1.16	0.32	24.8	3.67	2.9	0.43	17.3	0.13	24.5
	67031-G2	193.5	41.5	10	49.4	2.74	1.12	0.30	25.8	3.50	2.8	0.42	18.6	0.13	25.0
	67031-G3	229	37.6	10	43.2	2.34	0.96	0.30	20.4	3.12	2.3	0.36	16.9	0.12	21.3
ZK79021	79021-G1	212	39.2	10	83.1	2.67	1.13	0.28	25.8	3.57	2.8	0.42	17.4	0.13	24.0
	79021-G2	218	52.1	10	42.5	2.49	1.04	0.37	25.1	3.59	3.1	0.40	23.2	0.13	21.5
	79021-G3	251	43.7	10	52.1	2.26	1.00	0.30	23.2	3.01	2.8	0.37	19.4	0.12	19.9
	79021-G4	218	39.8	10	82.6	2.73	1.15	0.29	27	3.56	2.9	0.42	17.7	0.13	25.8
	79021-G5	157	36.8	10	77.4	2.69	1.10	0.28	24.4	3.47	2.7	0.43	16.4	0.12	22.1
ZK79033	79033-G1	184.5	39.8	10	32.2	2.09	1.02	0.30	25.1	2.34	2.7	0.37	18.7	0.16	24.2
	79033-G2	132.5	31.8	10	24.2	1.95	0.97	0.27	23	2.09	2.3	0.33	15.1	0.14	19.4
	79033-G4	234	40.1	10	29.0	2.27	1.16	0.35	25.3	2.55	2.5	0.40	19.0	0.17	24.9
ZK101033	101033-G1	455	51.9	10	52.8	2.52	1.08	0.39	28.2	3.56	2.9	0.41	23.1	0.13	25.6
	101033-G4	115.5	20.6	10	18.95	1.58	0.80	0.19	18.7	1.55	1.7	0.28	9.7	0.11	19.7
	101033-G5	133.5	22.3	10	19.5	1.64	0.79	0.20	17.5	1.64	1.6	0.28	10.5	0.11	20.3
ZK109021	109021-G1	89.1	21.7	10	27.4	1.54	0.94	0.18	30.2	1.53	2.0	0.29	10.2	0.16	33.1
	109021-G2	79.7	21.0	10	29.0	1.52	0.91	0.17	30.9	1.46	2.0	0.28	9.9	0.15	36.4
ZK123037	123037-G1	193	48.3	10	38.5	2.6	1.12	0.35	25	3.44	2.7	0.41	21.6	0.13	22.0
	123037-G2	183	43.6	10	54.3	2.61	1.17	0.33	29.1	3.28	2.9	0.43	19.6	0.15	24.4
ZK129023	129023-G1	127.5	38.0	10	63.4	2.72	1.15	0.31	29.7	3.57	2.8	0.43	16.9	0.14	25.5
	129023-G4	170.5	38.5	10	62.0	2.77	1.17	0.31	26.9	3.66	2.8	0.43	17.1	0.14	24.4
	129023-G5	181.5	36.0	10	72.8	2.49	1.00	0.23	26.7	3.14	2.6	0.38	16.1	0.12	28.2
ZK135031	135031-G1	200	40.5	10	45.5	2.7	1.10	0.28	25.4	3.6	2.8	0.42	18.1	0.13	25.4
	135031-G2	364	37.7	10	63.6	2.46	1.05	0.26	25.8	3.22	2.4	0.39	16.8	0.12	26.3

续表 1

样品	Nd	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	U	V	W	Y	Yb	Zr	
铜街	DL12-348	14.5	4.06	1175	3.33	29	23.0	6.3	0.40	16.25	9.41	7	14	10.2	0.80	69
	DL12-371	18.0	5.25	334	3.36	25	99.8	3.9	0.33	17.95	13.25	12	6	10.5	0.87	88
花石头	DL12-376	2.5	0.63	595	0.76	24	21.5	13.9	0.10	2.13	3.23	<5	14	3.7	0.53	22
	DL12-386	11.0	2.98	571	2.39	38	47.0	5.4	0.38	10.50	23.80	7	25	13.1	1.18	58
ZK67031	67031-G1	17.6	4.45	606	4.14	18	55.9	4.8	0.57	18.40	21.90	6	8	13.7	0.97	86
	67031-G2	18.1	4.7	612	4.14	22	65.1	4.6	0.57	18.65	19.65	7	8	13.7	0.96	86
	67031-G3	16.3	4.25	571	3.77	17	57.9	3.9	0.50	15.40	16.45	6	6	12.2	0.84	72
ZK79021	79021-G1	17.2	4.54	1090	4.11	34	34.3	4.6	0.58	18.85	20.10	8	9	14.0	0.97	81
	79021-G2	22.5	5.87	664	4.69	41	62.4	3.7	0.52	24.30	19.45	11	7	13.0	0.93	98
	79021-G3	19.0	4.96	721	3.95	42	51.7	3.6	0.47	20.50	18.45	10	6	12.2	0.91	87
	79021-G4	17.6	4.57	1075	4.33	32	34.1	4.7	0.55	19.05	20.30	7	9	14.8	1.03	89
	79021-G5	16.7	4.27	932	3.96	24	35.7	4.4	0.55	18.05	18.45	8	7	14.0	0.96	79
ZK79033	79033-G1	16.1	4.37	484	3.14	23	58.4	5.1	0.38	15.25	20.80	10	8	13.2	1.06	84
	79033-G2	13.1	3.53	439	2.72	20	48.4	4.6	0.36	12.30	17.10	11	9	11.9	1.02	69
	79033-G4	16.8	4.49	482	3.26	24	82.5	6.0	0.43	14.85	21.60	10	7	13.9	1.19	80
ZK101033	101033-G1	22.6	5.94	1120	4.91	28	59.4	4.2	0.53	22.10	18.85	14	8	13.6	0.97	93
	101033-G4	8.7	2.29	359	1.8	23	49.2	5.1	0.27	8.10	15.10	6	5	9.8	0.81	48
	101033-G5	9.0	2.44	354	1.85	25	52.0	5.4	0.30	8.84	15.85	7	4	9.9	0.83	46
ZK109021	109021-G1	8.9	2.36	590	1.84	31	38.2	8.3	0.28	8.69	23.60	8	41	10.2	1.19	53
	109021-G2	8.7	2.32	596	1.81	32	36.1	10.4	0.27	8.54	24.50	7	115	10.4	1.17	51
ZK123037	123037-G1	21.1	5.52	654	4.51	15	72.1	4.0	0.53	21.20	18.95	10	7	13.9	1.00	86
	123037-G2	19.0	4.99	936	4.13	59	43.6	4.7	0.52	19.40	20.60	9	13	15.0	1.11	91
ZK129023	129023-G1	16.8	4.44	727	4.03	25	35.0	4.9	0.57	19.25	20.10	6	13	14.2	1.00	86
	129023-G4	17.5	4.46	867	4.12	19	37.4	4.5	0.57	19.10	19.40	6	10	14.4	0.97	86
	129023-G5	16.0	4.13	962	3.77	22	41.1	6.8	0.50	16.50	17.10	7	8	12.6	0.90	77
ZK135031	135031-G1	17.6	4.62	787	4.13	18	46.1	4.9	0.55	18.90	19.70	7	12	13.7	1.00	81
	135031-G2	16.6	4.22	943	3.91	21	37.1	5.8	0.51	16.3	16.35	<5	16	13.1	0.94	74

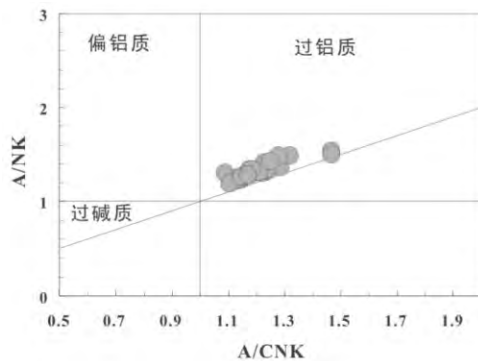


图 3 老君山花岗岩铝饱和指数 ACNK-ANK 图解
Fig. 3. ACNK-ANK plots for Laojunshan granitoids.

样品的稀土总量为 $48 \times 10^{-6} \sim 1118 \times 10^{-6}$, 在球粒陨石标准化稀土配分图解上 (图 4), 具有明显的轻稀土富集、重稀土亏损的特征, $(La/Yb)_N$ 为 3.1~20.5; 显示明显的 Eu 负异常, Eu/Eu^* 为 0.20~0.41, 平均 0.29。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上 (图 5), Ce 以及左侧不相容性更强的元素强烈富集, 为原始地幔丰度 10~1000 倍; Sr 等弱不相容元素以及右侧比其相容性更强的元素, 显示出弱富集或者与原始地幔丰度接近的特征; Nb、P、Zr、Ti 等高场强元素具有明显的负异常, 而 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素具有明显的正异常,

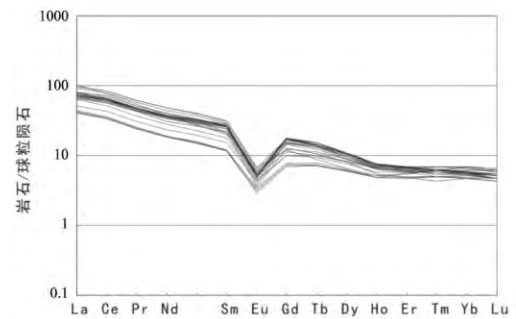


图 4 稀土元素配分图解
Fig. 4. Chondrite-normalized REE patterns for Laojunshan granites.

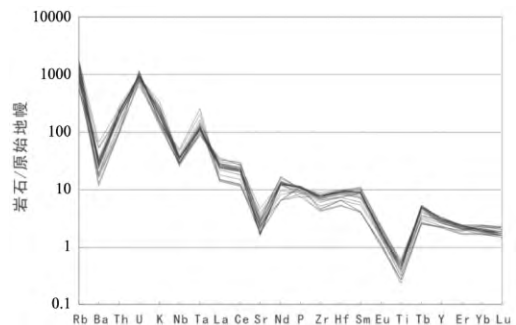


图 5 微量元素蛛网图
Fig. 5. Primitive mantle-normalized trace element patterns for Laojunshan granitoids.

体现该花岗岩部分熔融成因及其具有明显的地壳亲合性; 明显的 Sr、Ba 负异常, 表明花岗岩岩浆部分熔融或结晶分异过程中具有长石类矿物的残余或分离结晶。

1.3 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学特征

样品 $w(\text{Rb})$ 较高, 且变化范围大 ($484 \times 10^{-6} \sim 1175 \times 10^{-6}$), 大多数样品大于 600×10^{-6} , 其中 DL12-348 最高达 1175×10^{-6} ; $w(\text{Sr})$ 较低 ($23.0 \times 10^{-6} \sim 72.1 \times 10^{-6}$), 导致 Rb/Sr 比值很高 (8.29~51.09)。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 变化范围为 24.1~68.2、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化范围较大为 0.739901~0.787129, 经过年龄校正之后

($t=85 \text{ Ma}$) 获得 $I_{\text{Sr}} = 0.702403 \sim 0.721615$ (表 2)。样品的 $w(\text{Sm})$ 为 $1.8 \times 10^{-6} \sim 4.9 \times 10^{-6}$, Nd 含量为 $8.7 \times 10^{-6} \sim 22.6 \times 10^{-6}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.511971~0.512158, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 为 0.511892~0.512089, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -12.42~-8.59, 亏损地幔二阶段 Nd 模式年龄 T_{DM} 在 2.49~1.70 Ga 之间, 暗示其源区来自中-古元古代古老物质。为了示踪成矿物质来源与老君山花岗岩的关系, 本研究课题组还对花岗岩中的长石 Pb 同位素进行测试, 14 件样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位素比值分别为 18.264~18.776、15.622~15.713、38.014~39.044, 显示较为均一的 Pb 同位素组成。

表 2 老君山花岗岩的全岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 2. Sr and Nd isotopic compositions for Laojunshan granitoids

样品	Rb	Sr	Rb/Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) _i	
101033-G1	1120	59.4	18.9	55	0.787129	19	0.72073	
109021-G1	590	38.2	15.4	44.9	0.765857	17	0.711579	
109021-G2	596	36.1	16.5	48.1	0.769828	12	0.711786	
123037-G1	654	72.1	9.1	26.4	0.750846	15	0.719016	
129023-G5	962	41.1	23.4	68.2	0.784811	14	0.702403	
135031-G1	787	46.1	17.1	49.7	0.768237	12	0.708229	
67031-G1	606	55.9	10.8	31.5	0.745995	13	0.707971	
79021-G2	664	62.4	10.6	30.9	0.739901	13	0.7026	
79033-G1	484	58.4	8.3	24.1	0.750697	11	0.721615	
DL12-348	1175	23	51.1	149	0.790658	49	0.610691	
101033-G1	1120	59.4	18.9	55.0	0.787129	19	0.720730	
109021-G1	590	38.2	15.4	44.9	0.765857	17	0.711579	
109021-G2	596	36.1	16.5	48.1	0.769828	12	0.711786	
123037-G1	654	72.1	9.1	26.4	0.750846	15	0.719016	
129023-G5	962	41.1	23.4	68.2	0.784811	14	0.702403	
135031-G1	787	46.1	17.1	49.7	0.768237	12	0.708229	
67031-G1	606	55.9	10.8	31.5	0.745995	13	0.707971	
79021-G2	664	62.4	10.6	30.9	0.739901	13	0.702600	
79033-G1	484	58.4	8.3	24.1	0.750697	11	0.721615	
DL12-348	1175	23.0	51.1	149.0	0.790658	49	0.610691	
样品	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$T_{\text{CHUR}}(\text{Ga})$	($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) _i	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
101033-G1	4.9	22.6	0.131325	0.511993	8	1.5	0.51192	-11.9
109021-G1	1.8	8.9	0.124973	0.512158	12	1.02	0.512089	-8.6
109021-G2	1.8	8.7	0.125762	0.512154	12	1.04	0.512084	-8.7
123037-G1	4.5	21.1	0.129206	0.512133	12	1.14	0.512061	-9.1
129023-G5	3.8	16	0.142428	0.511991	8	1.81	0.511912	-12
135031-G1	4.1	17.6	0.141843	0.511971	9	1.85	0.511892	-12.4
67031-G1	4.1	17.6	0.14219	0.512077	23	1.57	0.511998	-10.4
79021-G2	4.7	22.5	0.125999	0.512026	11	1.32	0.511956	-11.2
79033-G1	3.1	16.1	0.117892	0.51205	9	1.14	0.511984	-10.6
DL12-348	3.3	14.5	0.138819	0.511989	9	1.7	0.511912	-12
101033-G1	4.9	22.6	0.131325	0.511993	8	1.50	0.511920	-11.9
109021-G1	1.8	8.9	0.124973	0.512158	12	1.02	0.512089	-8.6
109021-G2	1.8	8.7	0.125762	0.512154	12	1.04	0.512084	-8.7
123037-G1	4.5	21.1	0.129206	0.512133	12	1.14	0.512061	-9.1
129023-G5	3.8	16.0	0.142428	0.511991	8	1.81	0.511912	-12.0
135031-G1	4.1	17.6	0.141843	0.511971	9	1.85	0.511892	-12.4
67031-G1	4.1	17.6	0.142190	0.512077	23	1.57	0.511998	-10.4
79021-G2	4.7	22.5	0.125999	0.512026	11	1.32	0.511956	-11.2
79033-G1	3.1	16.1	0.117892	0.512050	9	1.14	0.511984	-10.6
DL12-348	3.3	14.5	0.138819	0.511989	9	1.70	0.511912	-12.0

2 锆石 U-Pb 年代学

2.1 分析测试方法

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。其中, 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统由德国哥廷根 LamdaPhysik 公司制造 (型号 GeoLasPro), 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 为日本东京安捷伦公司制造 (型号为 Agilent 7700x)。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面, 能量密度为 10J/cm², 束斑直径为 32μm, 频率为 5Hz, 共剥蚀 40 s, 剥蚀气溶胶由氦气送入 ICP-MS 完成测试。测试过程中以标准锆石 91500 为外标, 校正仪器质量歧视与元素分馏; 以标准锆石 GJ-1 与 Plešovice 为盲样, 检验 U-Pb 定年数据质量; 以 NIST SRM 610 为外标, 以 Si 为内标标定锆石中的 Pb 元素含量, 以 Zr 为内标标定锆石中其余微量元素含量^[9-10]。原始的测试数据经过 ICPMS- DataCal 软件离线处理完成^[11]。

2.2 分析结果

所有样品中锆石均为无色透明, 自形程度较好, 主要为无色长柱状晶体, 少数呈短柱状, 长约 100~300μm, 长宽比为 1~4。在 CL 图像上可见明显的震荡环带结构, 显示了典型岩浆锆石的特征。仅少数样品含有继承锆石。本次分析所有测点 w(Pb) 分布在 5.71×10⁻⁶~240.6×10⁻⁶ 之间, w(Th) 在

32.5×10⁻⁶~4072×10⁻⁶ 之间, w(U) 介于 263×10⁻⁶~8290×10⁻⁶ 之间, 绝大多数 Th/U 比值介于 0.1~1.5 间, 且 Th 和 U 之间具有明显的正相关性, 显示了典型岩浆锆石的特征。其中, 少数锆石的 Th/U 比值小于 0.1, 可能是受后期热液作用影响。6 件样品的单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析结果如表 3 所示。

采自花石头至铜街公路旁的花岗细晶岩 LJS-3, 获得 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值为 88.3±1.1 Ma (N=7, MSWD=0.03) (图 6a); 金石坡矿段花岗斑岩 ZK31033, 获得 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值为 86.5±1.0 Ma (N=9, MSWD=0.004) (图 6b)。金石坡矿段中-细粒含斑白云母花岗岩 ZK101033, 获得 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值为 97.3±1.1 Ma (N=8, MSWD=0.62) (图 6c); 金石坡矿段中-粗粒含斑二云母花岗岩 ZK145013 获得两组年龄, 第一组 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值为 103.5±1.1 Ma (N=8, MSWD=0.14), 第二组 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值为 95.9±0.9 Ma (N=8, MSWD=0.45) (图 6d); 金石坡矿段中-粗粒含斑二云母花岗岩 ZK131019, 获得 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值为 117.1±0.9 Ma (N=14, MSWD=0.74) (图 6e); 老君山主峰山脚废弃矿洞中-粗粒含斑二云母花岗岩 LJ13, 获得 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值为 106.2±1.0 Ma (N=11, MSWD 为 0.029) (图 6f)。综上所述, 6 件样品的锆石 U-Pb 年龄介于 86.5~117.1 Ma 之间。

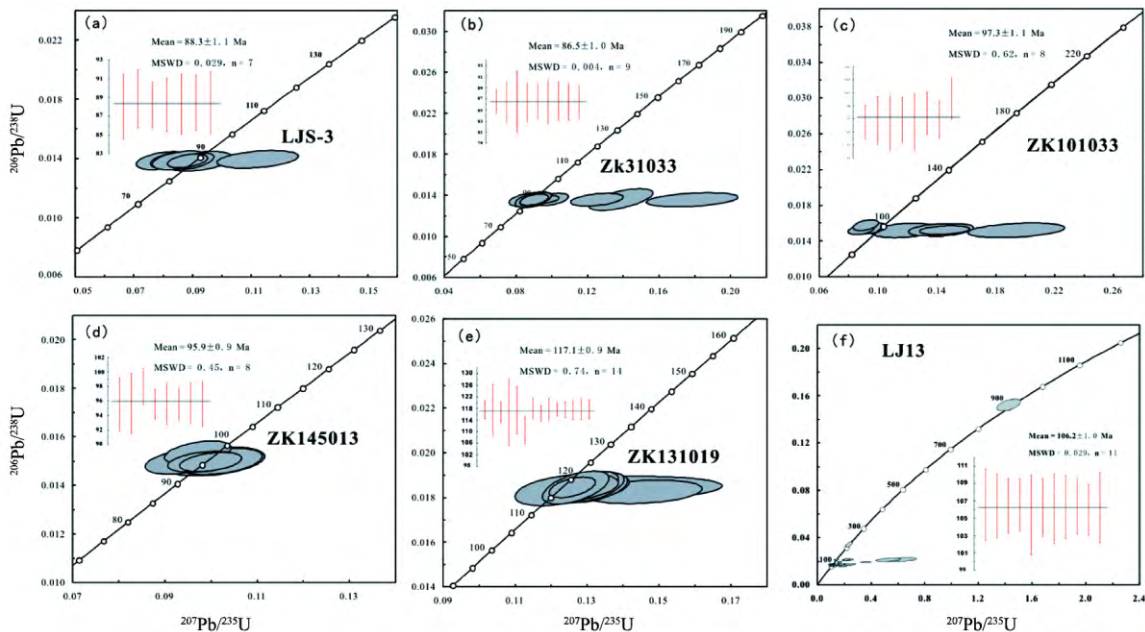


图 6 老君山花岗岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig.6 LA-ICP-MS zircon U-Pb Concordia diagrams for Laojunshan granites

表 3 老君山花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据
Table 3. LA-ICP-MS zircon U-Pb data for Laojunshan granitoids

点位	w(Pb)	w(Th)	w(U)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		rho	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	R _w	1σ	R _w	1σ		t/Ma	1σ	t/Ma	1σ
ZK31033												
1	83	591	5530	0.095196	0.004	0.013516	0.0002	0.32	92.3	3.5	86.5	1.1
2	16	487	958	0.089266	0.005	0.013485	0.0003	0.37	86.8	4.8	86.4	1.9
3	115	175	8290	0.138793	0.007	0.013502	0.0004	0.60	132.0	6.6	86.5	2.7
4	22	946	1069	0.178474	0.010	0.013488	0.0003	0.35	166.7	9.0	86.4	1.8
5	45	4072	1938	0.100198	0.004	0.013518	0.0002	0.46	97.0	3.6	86.6	1.5
6	27	1631	1521	0.090272	0.004	0.013493	0.0003	0.49	87.8	3.9	86.4	2.0
7	45	2006	2462	0.091304	0.004	0.013525	0.0003	0.50	88.7	3.4	86.6	1.7
8	30	1071	1605	0.125313	0.006	0.013491	0.0003	0.40	119.9	5.4	86.4	1.6
9	63	1570	3727	0.090542	0.003	0.013486	0.0002	0.47	88.0	3.0	86.4	1.4
10	242	155	1618	1.194583	0.037	0.135598	0.0024	0.56	798.1	17.3	819.7	13.6
LJS-3												
1	23	145	1521	0.092425	0.005	0.013755	0.0003	0.39	89.8	4.3	88.1	1.7
2	102	117	1229	0.233647	0.282	0.067876	0.0024	0.03	213.2	236.0	423.3	14.2
3	51	73	331	1.192448	0.036	0.133975	0.0017	0.42	797.1	16.6	810.5	9.6
4	16	355	956	0.112387	0.006	0.013878	0.0002	0.35	108.1	5.2	88.8	1.6
5	58	2748	3335	0.088544	0.003	0.013775	0.0002	0.43	86.1	2.6	88.2	1.2
6	69	155	791	0.599866	0.018	0.079803	0.0012	0.50	477.1	11.2	494.9	6.9
7	69	97	455	1.177075	0.039	0.134094	0.0024	0.54	790.0	18.1	811.2	13.5
8	61	953	3818	0.090388	0.003	0.013773	0.0002	0.50	87.9	2.7	88.2	1.4
9	451	86	6362	0.473804	0.013	0.064837	0.0009	0.48	393.8	8.9	405.0	5.2
10	49	121	527	0.608286	0.024	0.079878	0.0014	0.46	482.5	15.2	495.4	8.6
11	17	479	974	0.080194	0.004	0.013791	0.0003	0.40	78.3	3.5	88.3	1.6
12	62	115	383	1.115378	0.040	0.134063	0.0022	0.46	760.8	19.4	811.0	12.7
13	24	262	1546	0.084758	0.004	0.013818	0.0002	0.39	82.6	3.4	88.5	1.5
14	93	310	1212	0.428907	0.015	0.064822	0.0012	0.52	362.4	10.9	404.9	7.2
15	12	737	519	0.098464	0.006	0.014883	0.0004	0.49	95.4	5.4	95.2	2.8
16	39	2165	1592	0.085757	0.004	0.013813	0.0003	0.43	83.5	3.5	88.4	1.7
17	32	38	914	0.211824	0.010	0.030167	0.0010	0.68	195.1	8.8	191.6	6.3
18	30	155	888	0.216365	0.012	0.030202	0.0012	0.73	198.9	9.9	191.8	7.6
19	16	312	947	0.106694	0.005	0.014886	0.0002	0.35	102.9	4.6	95.3	1.6
20	11	347	609	0.114994	0.013	0.014966	0.0005	0.31	110.5	11.5	95.8	3.2
LJ13												
1	22	848	835	0.226563	0.017	0.020493	0.0004	0.25	207.4	13.9	130.8	2.4
2	8	283	404	0.156841	0.009	0.016672	0.0003	0.36	147.9	7.6	106.6	2.1
3	18	487	821	0.143213	0.006	0.020472	0.0003	0.33	135.9	5.7	130.6	1.9
4	56	345	3551	0.119645	0.003	0.016647	0.0003	0.68	114.8	2.8	106.4	1.8
5	27	1205	1042	0.219897	0.010	0.020451	0.0003	0.38	201.8	8.1	130.5	2.2
6	66	1953	1878	0.625054	0.047	0.020521	0.0007	0.44	493.0	29.5	130.9	4.3
7	32	1295	1377	0.167180	0.006	0.018512	0.0003	0.41	157.0	5.3	118.2	1.8
8	50	3779	1451	0.365842	0.015	0.018498	0.0002	0.31	316.6	11.3	118.2	1.5
9	45	2085	1340	0.527945	0.038	0.020477	0.0006	0.38	430.4	25.2	130.7	3.6
10				9.446345	0.271	0.090899	0.0019	0.73	2382.3	26.3	560.9	11.2
11	119	571	7791	0.101069	0.002	0.014960	0.0002	0.43	97.8	2.3	95.7	1.0
12	69	925	4212	0.117950	0.003	0.014919	0.0002	0.46	113.2	2.8	95.5	1.1
13	70	95	2221	0.238109	0.011	0.033230	0.0010	0.70	216.9	8.7	210.7	6.5
14	240	331	1413	1.424454	0.036	0.151518	0.0020	0.52	899.2	15.3	909.5	11.4
15	38	2700	1321	0.160514	0.006	0.016648	0.0002	0.40	151.2	5.2	106.4	1.6
16	95	5877	3257	0.201212	0.009	0.016662	0.0002	0.31	186.2	7.7	106.5	1.5
17	61	162	3505	0.157445	0.010	0.016479	0.0004	0.34	148.5	9.0	105.4	2.3
18	19	612	936	0.134137	0.006	0.014974	0.0002	0.35	127.8	5.6	95.8	1.6
19	34	1098	1610	0.119652	0.005	0.016617	0.0003	0.34	114.8	4.9	106.2	1.6
20	45	1762	1892	0.183573	0.010	0.016589	0.0003	0.34	171.1	8.8	106.1	2.0
21	29	633	1442	0.106975	0.007	0.016625	0.0003	0.25	103.2	6.8	106.3	1.8
22	75	147	4146	0.106339	0.004	0.016629	0.0002	0.37	102.6	3.9	106.3	1.6
23	84	2551	4003	0.094116	0.004	0.016569	0.0002	0.35	91.3	3.4	105.9	1.4
24	102	3411	3544	0.246184	0.018	0.016612	0.0003	0.26	223.5	14.8	106.2	2.0
25	23	1674	778	0.191282	0.011	0.014860	0.0003	0.29	177.7	9.6	95.1	1.6

续表 2

点位	w(Pb)	w(Th)	w(U)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		rho	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	R_w	1σ	R_w	1σ		t/Ma	1σ	t/Ma	1σ
ZK131019												
1	123	7127	5245	0.131422	0.004	0.018406	0.0002	0.41	125.4	3.8	117.6	1.5
2	6	414	232	0.188893	0.017	0.018384	0.0007	0.43	175.7	14.4	117.4	4.5
3	23	1302	1043	0.120009	0.006	0.016499	0.0002	0.30	115.1	5.2	105.5	1.5
4	41	2556	1708	0.122131	0.005	0.018262	0.0003	0.38	117.0	4.4	116.7	1.8
5	135	213	1560	0.680554	0.014	0.087738	0.0010	0.58	527.1	8.2	542.1	6.1
6	140	271	875	1.485042	0.028	0.152539	0.0017	0.59	924.3	11.3	915.2	9.3
7	31	1641	1385	0.141840	0.010	0.018244	0.0009	0.67	134.7	9.2	116.5	5.7
8	5	277	217	0.183380	0.016	0.018380	0.0006	0.40	171.0	13.7	117.4	4.1
9	8	395	394	0.194130	0.015	0.017288	0.0004	0.27	180.1	13.0	110.5	2.3
10	136	260	1774	0.679787	0.017	0.087720	0.0016	0.74	526.6	10.4	542.0	9.7
11	111	1178	5781	0.377241	0.044	0.016500	0.0005	0.27	325.0	32.4	105.5	3.3
12	6	422	246	0.179691	0.011	0.016535	0.0004	0.38	167.8	9.2	105.7	2.4
13	76	205	413	1.721262	0.039	0.173894	0.0020	0.51	1016.5	14.4	1033.5	11.0
14	137	1268	1544	0.652849	0.019	0.077683	0.0011	0.48	510.2	11.5	482.3	6.4
15	92	149	634	1.392523	0.037	0.152676	0.0027	0.66	885.8	15.7	915.9	15.0
16	5	448	213	0.163824	0.011	0.016523	0.0004	0.40	154.0	9.6	105.6	2.8
17	71	2848	3437	0.128899	0.004	0.018459	0.0003	0.48	123.1	3.6	117.9	1.8
18	25	1283	1057	0.145833	0.007	0.018206	0.0002	0.26	138.2	5.9	116.3	1.4
19	54	662	3195	0.127050	0.004	0.018413	0.0003	0.55	121.4	3.4	117.6	1.9
20	129	141	7479	0.126047	0.003	0.018411	0.0002	0.49	120.5	2.4	117.6	1.2
21	52	1673	2569	0.140879	0.011	0.018396	0.0002	0.15	133.8	9.7	117.5	1.3
22	69	1922	3652	0.132120	0.004	0.018384	0.0003	0.49	126.0	3.4	117.4	1.6
23	64	5253	2433	0.130851	0.004	0.018424	0.0003	0.51	124.9	3.5	117.7	1.8
24	34	243	1793	0.137019	0.005	0.019127	0.0003	0.39	130.4	4.1	122.1	1.6
25	26	1330	1139	0.126215	0.005	0.018410	0.0002	0.33	120.7	4.6	117.6	1.6
ZK145013												
1	15	688	730	0.124497	0.009	0.014934	0.0003	0.26	119.1	8.2	95.6	1.8
2	9	657	331	0.175459	0.015	0.014954	0.0003	0.26	164.1	12.8	95.7	2.0
3	100	1761	5853	0.097263	0.003	0.015317	0.0002	0.42	94.2	2.7	98.0	1.2
4	35	891	1735	0.132785	0.005	0.017898	0.0004	0.52	126.6	4.8	114.4	2.4
5	35	2715	1159	0.224450	0.013	0.016617	0.0002	0.21	205.6	11.0	106.2	1.3
6	215	144	1353	1.368473	0.036	0.150107	0.0021	0.53	875.5	15.5	901.6	11.7
7	80	1437	4616	0.100031	0.003	0.014934	0.0002	0.39	96.8	2.5	95.6	1.0
8	38	587	1924	0.134654	0.006	0.018379	0.0003	0.43	128.3	5.1	117.4	2.1
9	33	657	1901	0.101988	0.004	0.014946	0.0002	0.40	98.6	3.5	95.6	1.4
10	35	1588	1597	0.107818	0.005	0.016199	0.0002	0.25	104.0	4.9	103.6	1.3
11	51	2684	2425	0.113802	0.004	0.016172	0.0003	0.46	109.4	4.0	103.4	1.8
12	81	374	928	0.571958	0.017	0.072760	0.0009	0.41	459.3	10.7	452.8	5.2
13	11	552	363	0.211074	0.013	0.017124	0.0003	0.32	194.5	10.6	109.5	2.1
14	55	5491	2088	0.113216	0.004	0.016056	0.0002	0.37	108.9	4.0	102.7	1.4
15	22	506	1144	0.109403	0.005	0.016232	0.0003	0.36	105.4	4.6	103.8	1.7
16	63	3285	2768	0.109043	0.004	0.016136	0.0002	0.43	105.1	3.5	103.2	1.6
17	41	528	2483	0.140872	0.007	0.016421	0.0003	0.41	133.8	6.3	105.0	2.1
18	81	957	4011	0.111937	0.004	0.017813	0.0002	0.34	107.7	3.4	113.8	1.3
19	128	7514	6189	0.098555	0.003	0.014941	0.0002	0.36	95.4	3.0	95.6	1.1
20	73	5367	3024	0.094392	0.003	0.014956	0.0002	0.40	91.6	3.2	95.7	1.4
21	58	2296	3098	0.100762	0.004	0.014948	0.0002	0.36	97.5	4.1	95.6	1.5
22	41	1900	1527	0.201378	0.013	0.017109	0.0003	0.25	186.3	11.0	109.4	1.7
23	43	552	2239	0.132339	0.012	0.018372	0.0004	0.24	126.2	10.6	117.4	2.5

续表 2

点位	$w(\text{Pb})$	$w(\text{Th})$	$w(\text{U})$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		rho	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	R_w	1σ	R_w	1σ		t/Ma	1σ	t/Ma	1σ
ZK101033												
1	159	1844	1804	0.491340	0.015	0.065629	0.0011	0.52	405.8	10.5	409.8	6.5
2	37	790	1684	0.185923	0.010	0.017996	0.0004	0.38	173.1	8.5	115.0	2.3
3	106	2093	5615	0.103578	0.003	0.016305	0.0003	0.69	100.1	2.7	104.3	2.0
4	17	371	858	0.145440	0.007	0.015084	0.0002	0.28	137.9	6.2	96.5	1.3
5	19	816	844	0.146016	0.008	0.015118	0.0003	0.36	138.4	7.0	96.7	1.8
6	184	126	1063	1.353933	0.039	0.145133	0.0018	0.42	869.3	17.0	873.6	10.1
7	49	135	263	1.305490	0.046	0.141154	0.0020	0.40	848.1	20.1	851.2	11.2
8	51	91	343	1.167180	0.038	0.121211	0.0016	0.40	785.3	17.9	737.5	9.2
9	9	365	462	0.118012	0.009	0.015066	0.0003	0.29	113.3	8.1	96.4	2.1
10	25	410	752	0.168461	0.008	0.026204	0.0004	0.36	158.1	6.6	166.7	2.7
11	135	135	940	0.984740	0.038	0.120953	0.0024	0.51	696.0	19.4	736.0	13.6
12	16	506	719	0.137700	0.007	0.015133	0.0003	0.37	131.0	6.0	96.8	1.7
13	18	614	621	0.172168	0.010	0.018616	0.0003	0.32	161.3	8.5	118.9	2.1
14	40	56	2000	0.194094	0.013	0.015076	0.0003	0.33	180.1	11.4	96.5	2.2
15	192	1171	2617	0.390577	0.015	0.057996	0.0010	0.45	334.8	10.9	363.4	6.0
16	114	157	1958	0.372857	0.031	0.058149	0.0037	0.76	321.8	23.2	364.4	22.6
17	43	1359	1696	0.169983	0.008	0.017612	0.0003	0.34	159.4	6.6	112.5	1.7
18	59	2378	3019	0.096166	0.004	0.015296	0.0003	0.41	93.2	3.6	97.9	1.6
19	45	1673	2255	0.088947	0.004	0.015128	0.0002	0.37	86.5	3.3	96.8	1.4
20	129	11388	4534	0.092080	0.004	0.015651	0.0002	0.41	89.4	3.3	100.1	1.6

3 讨论

3.1 老君山花岗岩地球化学特征

3.1.1 老君山花岗岩的岩石分类

花岗岩是大陆地壳的重要组成部分,是地球区别于太阳系其他行星的重要标志。MISA 是目前最常用的花岗岩成因分类方案,该方案以岩浆源区将花岗岩分为 4 类: M 型、I 型、S 型和 A 型^[12]。

老君山花岗岩及其周围尚未发现幔源包体及同时期相关岩浆作用,因此可以排除其为 M 型的可能。该岩体普遍含过铝质矿物白云母,不含角闪石及碱性暗色矿物。全岩化学具有高硅(SiO_2 为 69.26%~78.95%,大部分大于 71%)、高碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为 6.91%~10.39%)、高磷(P_2O_5 为 0.16%~0.25%),低铝(Al_2O_3 为 11.42%~15.07%)、低钙(CaO 为 0.18%~1.31%)的特征, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}>1$,铝饱和指数 A/CNK 大于 1.1(大部分在 1.1~1.3 之间),且普遍含有刚玉标准矿物分子(1%~5%),因此,可以认为老君山花岗岩属于高钾钙碱性、过铝-强过铝 S 型花岗岩。

从微量元素特征上看,高场强元素中 Zr、Hf、Nb 含量低于典型 A 型花岗岩,高于典型 I 型花岗岩,与 S 型花岗岩接近, $w(\text{Zr})$ 为 $22\times 10^{-6}\sim 98\times 10^{-6}$,平均 75×10^{-6} ; $w(\text{Hf})$ 为 $1.1\times 10^{-6}\sim 2.9\times 10^{-6}$; $w(\text{Nb})$ 为 $18.2\times 10^{-6}\sim 36.4\times 10^{-6}$ 。 $w(\text{Ga})$ 为 $17.5\times 10^{-6}\sim 33.8\times 10^{-6}$, $1000\text{Ga}/\text{Al}$ 比值为 0.3~0.5,而 A 型花

岗岩一般大于 2.6^[12]。 Th/U 比值为 0.42~1.73,大多为 1 左右,与地壳平均值和普通花岗岩一样,远低于 A 型花岗岩。典型的藏南 I 型花岗岩相对富集 Sr, Sr/Ba 比值一般大于 0.5, S 型花岗岩相对富集 Ba, Sr/Ba 的比值小于 0.5,老君山花岗岩 Sr/Ba 值为 0.1~0.45,在 S 型花岗岩范围内。因此,微量元素地球化学特征指示老君山花岗岩具有 S 型花岗岩特征。

Chappell 和 White^[13-14] 经过详细分析,选择 $w(\text{Rb})=250\times 10^{-6}$ 来作为分异和未分异花岗岩的分界线,他们认为在多数情况下该界限应该接近于从残留体分离向结晶分异转变的上限。从图 7 我们可以看出,老君山花岗岩的 $w(\text{Rb})$ 大多大于 250×10^{-6} ($300\times 10^{-6}\sim 1100\times 10^{-6}$ 之间), $w(\text{SiO}_2)$ 与 $w(\text{Rb})$ 呈负相关关系,为强分异 S 型花岗岩。在 Rb 对 P_2O_5 、Th、Y、La 和 Ce 图(图 7)中我们可以看出,随着 Rb 含量的增加(分异程度变大), P_2O_5 呈正相关, Th 和 Y 基本不变,而 La 和 Ce 呈线性下降的趋势,基本符合高分异 S 型花岗岩的变化趋势。

3.1.2 花岗岩源区特征

老君山花岗岩具有低 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(比值介于 0.15~4.85 间,其中 9 件样品高于 0.3,其余均小于 0.3),高 Rb/Sr (3~51),高 Rb/Ba (0.9~25.0) 的特征,表明源区以富粘土贫斜长石变质泥岩为主,含少量变质硬砂岩^[15](图 8a, b)。

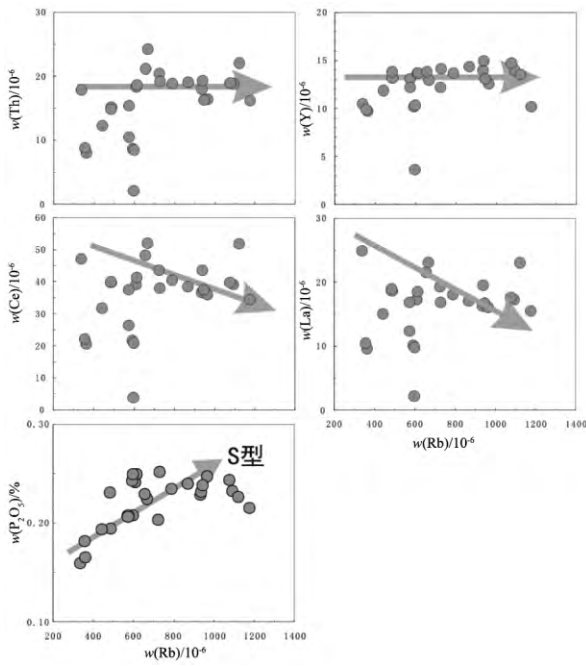


图 7 Rb 对 P₂O₅、Th、Y、La 和 Ce 二元图
Fig. 7. Variation diagrams for selected major and trace elements in Laojunshan granites.

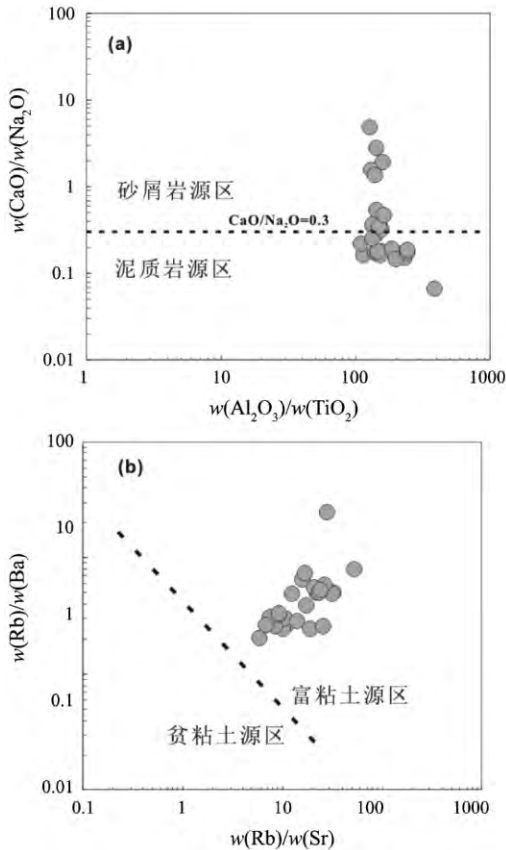


图 8 花岗岩源区判别图解
Fig. 8. Diagrams of Al₂O₃/TiO₂ vs. CaO/Na₂O (a) and Rb/Sr vs. Rb/Ba (b) for Laojunshan granites (after Sylvester, 1998^[15]).

在 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解上有一异常现象(图 9), $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 明显变化而 $\epsilon_{Nd}(t)$ 保持相对不变。初始 Sr 同位素比值中由计算所带来的不确定因素很多, 尤其是高 Rb/Sr 值的花岗岩, 这一比值能够指示高程度分异作用, 本次研究的老君山花岗岩样品均很新鲜(烧失量 LOI 为 0.94%~2.23%), 初始 Sr 同位素比值 ($I_{Sr} = 0.702403 \sim 0.721615$) 呈现出变化范围较大不能归因于岩石风化的影响。这说明具有高或非常高 Rb/Sr 值 (8.3~51.1) 的样品 I_{Sr} 太不精确而不具有成因意义^[18-19]。因此, 对约束老君山花岗岩成因来说, Nd 同位素比 Sr 同位素更合适。

剔除掉高 Rb/Sr 值 (>10) 的样品, 老君山花岗岩的 I_{Sr} 变化范围在 0.7026~0.7216, 与同一地区的个旧花岗岩 (0.7060~0.7202) 和薄竹山花岗岩 (0.7126~0.7257) 具有可比性, 说明它们来自相似的源区。老君山花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 在 -12.4~-8.6 间变化, 个旧花岗岩和薄竹山花岗岩的分别介于 -9.3~-6.9、-12.0~-11.2 之间, 前者介于后二者变化范围中间。老君山花岗岩 Nd 亏损地幔二阶段模式年龄 T_{DM} 在 1.70~2.49 Ga 间, 个旧花岗岩和薄竹山花岗岩的分别为 1.4~1.6 Ga 和 1.8 Ga, 前者较后二者具有更为宽泛的变化范围, 这与 Xu 等^[21]通过老君山花岗岩锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄得出的结果 (1.32~2.12 Ga) 比较吻合, 说明老君山花岗岩是古老地壳物质部分熔融的产物, 其源岩可能为滇东南地区中-古元古代结晶基底中的一套变质泥质岩为主, 含少量变质硬砂岩的泥砂质副变质岩。

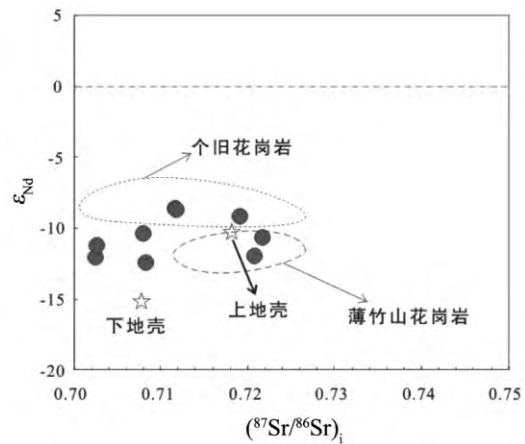


图 9 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解
Fig. 9. $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ diagram for Laojunshan granitoids.

3.2 老君山花岗岩年龄谱系

上世纪 90 年代前开展的云母 K-Ar 法定年, 具体结果为第一期为粗粒含斑二云母二长花岗岩,

K-Ar 年龄为 118~101 Ma; 第二期为中细粒含斑二云母二长花岗岩, K-Ar 年龄为 85~95 Ma, Rb-Sr 等时线年龄为 93.4 Ma; 第三期为花岗斑岩, K-Ar 年龄为 76~101 Ma^[6-9]。1999 年完成的 1:50000 区域地质调查(都龙幅), 根据地质及岩石特征把老君山花岗岩划入都龙超单元, 该超单元包含花石头(K₁H)、马鹿塘(K₂M)、太平头山(K₂D)、箐脚(K₂Q)及扣哈(K₂K)5个单元。其中, (1)花石头单元(K₁H)岩性为灰、浅灰色中粗粒似斑状二云母二长花岗岩, 具似斑状结构, 基质为中粗粒半自形粒状结构, 白云母 K-Ar 法年龄为 106.86±1.18~118.08±1.84 Ma; (2)马鹿塘单元(K₂M)岩性为浅灰色中粒二云母二长花岗岩, 具似斑状结构, 基质为中粒半自形粒状结构, 白云母 K-Ar 法年龄为 95.17±1.09~101.38 Ma, 而黑云母 K-Ar 法年龄为 95.02 Ma; (3)太平头山单元(K₂D)岩性为浅灰、灰白色中细粒二云母二长花岗岩, 具似斑状结构, 基质为细-中细粒半自形粒状结构, 全岩 Rb-Sr 法年龄 93.4 Ma, 白云母 K-Ar 法年龄为 93.87 Ma; (4)箐脚单元(K₂Q)岩性为灰色微-细粒二云母二长花岗岩, 具斑状结构, 基质具微-细粒半自形粒状结构, 白云母 K-Ar 法年龄为 89.0±0.99 Ma; (5)扣哈单元(K₂K)岩性为灰-灰白色花岗斑岩, 具斑状结构, 斑晶为粒状、板粒状钾微长石、石英、斜长石, 少量片状黑云母, 基质主要具微粒结构, 白云母 K-Ar 法年龄为 75.9 Ma。此外, 也有学者利用黑云母和白云母 Ar-Ar 法获得老君山花岗岩年龄为 84~116 Ma^[22]。

2006 年以后, 随着 SHRIMP 和 LA-MC-ICP-MS 等新技术新方法的成熟和应用普及, 越来越多的研究人员通过单颗粒锆石 U-Pb 法对老君山花岗岩进行研究, 积累了丰富的年代学数据^[3,21,23-27]。刘玉平等^[23]用 SHRIMP 单颗粒锆石 U-Pb 法对都龙矿区曼家寨岩芯钻孔中的隐伏花岗岩和铜街露采场出露的花岗斑岩进行研究, 分别得出 92.9±1.9 Ma 和 86.9±1.4 Ma 的结果。冯佳睿等^[24]对老君山岩体东北角的瓦渣矿区的中粗粒二云母二长花岗岩的 SHRIMP 锆石测年结果为 83.3±1.5 Ma。张斌辉等^[3]对老君山花岗岩体第一期花岗岩进行 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的结果为 96±2 Ma。李进文等^[25]通过 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 法定年结果, 把老君山花岗岩分为两个期次: 早期 87.3±2.1~92.9±1.9 Ma, 形成了白云母花岗岩及花岗斑岩; 晚期 83.3±1.5~85.0±1.3 Ma, 形成了二云母花岗岩。Feng 等^[26]对老君山花岗岩三个期次的三种类型花岗岩进行 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得了 3 个非常均一的年龄值, 分别为 86.6±0.42 Ma、86.72

±0.47 Ma 和 86.02±0.48 Ma。刘艳宾等^[27]根据花岗岩的结构特征及主要矿物的相对含量, 将老君山花岗岩分为三类: 似斑状黑云母花岗岩、粗粒-中粗粒黑云母-二云母花岗岩、中粗粒黑云母-二云母二长花岗岩, 并获得 6 件花岗岩样品 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 88.9±1.1~93.9±2.0 Ma。Xu 等^[21]报道了采自曼家寨岩芯和铜街采场的 3 件样品, 岩石类型分别为粗粒花岗岩、细粒花岗岩和花岗斑岩, LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 90.1±0.7 Ma, 89.7±0.8 Ma 及 86.0±0.5 Ma。综上所述, 2006 年至 2015 年间发表的 22 件老君山花岗岩样品锆石 U-Pb 年龄介于 83.3~96.0 Ma 之间。

本研究通过老君山花岗岩 3 个期次的 6 件新鲜样品, 开展了比较系统的 LA-MC-ICP-MS 单颗粒锆石 U-Pb 定年。结果显示花岗岩年龄在 86.5~117.1 Ma 之间, 均表明该岩体为燕山晚期岩浆活动的产物。值得一提的是, 本次研究识别出了第一期岩浆作用的时间为 103.5~117.1 Ma, 对应于 1:5 万都龙幅地质图划分的花石头单元(K₁H)。综合本次研究和前人研究成果, 可以把燕山晚期老君山花岗岩分为三幕: 第一幕为 100~118 Ma, 主要为粗粒二云母二长花岗岩; 第二幕为 90~98 Ma, 主要为中-细粒二云母二长花岗岩及花岗斑岩; 第三幕为 88Ma~80 Ma, 主要为细粒黑云母二长花岗岩及花岗斑岩(图 10)。

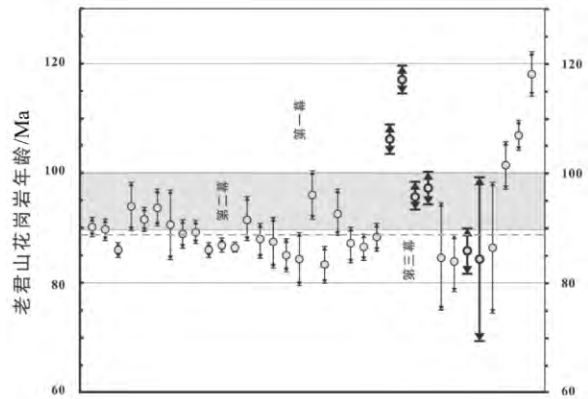


图 10 滇东南燕山晚期老君山花岗岩年龄谱系图(加粗为本研究样品, 其余为文献数据, $n=35$)

Fig. 10. Summary of the published and new geochronologic determinations for Laojunshan granites (Points in bold were from this study, the other were from published data, $n=35$).

3.3 老君山花岗岩成岩与锡成矿的关系

老君山花岗岩以富含 W、Sn、Pb、Zn、In 等成矿元素和 B、F 等挥发分为特点, 与世界含锡花岗岩^[28]微量元素特征接近。与世界花岗岩 $w(\text{Sn})$ 平均

值(3×10^{-6})相比,老君山花岗岩 $w(\text{Sn})$ 高出了数倍至数十倍($25 \times 10^{-6} \sim 57 \times 10^{-6}$),也明显高于我国华南同期含锡花岗岩的平均含量(9.94×10^{-6});区内花岗岩 $w(\text{Zn})$ 为 $150 \times 10^{-6} \sim 206 \times 10^{-6}$ [29],最高可达 563×10^{-6} ,明显高于花岗岩的丰度值(60×10^{-6});此外,区内花岗岩的 $w(\text{In})$ 较高,为 $0.12 \times 10^{-6} \sim 0.34 \times 10^{-6}$,均值为 0.205×10^{-6} 。花岗岩中 Sn、Zn、W 的极高丰度值,为矿区形成超大型锡、锌矿床和大型钨矿床提供了重要的成矿物质来源。

老君山花岗岩的放射性元素 Th、U、K、Rb 等含量较高, $w(\text{Th})$ 变化范围 $8 \times 10^{-6} \sim 24 \times 10^{-6}$,平均为 16×10^{-6} ; $w(\text{U})$ 为 $9 \times 10^{-6} \sim 24 \times 10^{-6}$,平均 18×10^{-6} 。 $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 3.8% ~ 8.3%, $w(\text{Rb})$ 为 $334 \times 10^{-6} \sim 1175 \times 10^{-6}$ 。按照 $w(\text{U}) > 8 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Th}) > 10 \times 10^{-6}$ 的标准划分,老君山花岗岩的 U 和 Th 含量较一般花岗岩高,应属于 HHP 花岗岩,而 HHP 花岗岩可以使岩浆分异演化的时间拉长(老君山花岗岩侵位年龄在 80~118 Ma 之间),侵位动能更大,从而更有利于成矿金属元素从岩浆中分异出来并富集成矿。

老君山花岗岩的主体出露于都龙矿区北侧,并且向南隐伏于矿区深部。前人研究表明,都龙锡锌多金属矿床的物质来源主要源自老君山花岗岩。如对都龙锡锌多金属矿床的硫化物单矿物和方解石分别进行 S 同位素和 C-O 同位素研究 [30] 表明,硫化物单矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化小,靠近零值,具岩浆硫特性,说明该矿床的硫主要来自岩浆分异作用;方解石 C-O 同位素结果表明碳,氧主要来自岩浆,晚期则有大气降水的混合。何芳等 [31] 对都龙锡锌多金属矿床的矿石矿物、花岗斑岩长石、大理岩、片岩和基底片麻岩进行铅同位素示踪研究,结果表明矿石矿物铅同位素组成分布集中,具有均一的较浅源区,与老君山花岗岩中的长石铅同位素组成一致,而与大理岩、片岩和基底片麻岩铅同位素组成有一定差异,表明该矿床的铅主要来源于老君山花岗岩。综上所述,S-C-O-Pb 同位素研究表明老君山花岗岩是都龙矿区 Sn-Zn 成矿作用的重要物源。

此外,老君山花岗岩与都龙锡锌多金属矿床不仅在空间上关系密切,而且在时间上也密切相关。刘玉平等 [23] 利用 SHRIMP 锡石 U-Pb 法首次获得都龙锡锌多金属矿床 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 79.8 ± 3.2 Ma, $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 等时线年龄为 82.0 ± 9.6 Ma,表明该矿床锡-铜矿化年龄为 80 Ma,主要与晚白垩世岩浆热液活动有关。王小娟等 [4] 运

用 LA-MC-ICP-MS 微区原位 U-Pb 同位素测年技术对都龙矿区曼家寨矿段的锡石样品进行研究,3 件样品获得的谐和年龄范围 $82.0 \pm 2.5 \sim 96.6 \pm 3.5$ Ma,也表明都龙矿区锡成矿作用主要发生在晚白垩纪,与燕山晚期老君山花岗岩岩浆热液活动关系密切。

区域上,滇东南地区自西向东依次分布个旧、白牛厂和都龙等 3 个超大型矿床,它们均与燕山晚期花岗岩具有密切的空间关系,但对它们的成因仍有较大争议 [32-37],获得精确可靠的成矿年代学是解决该争议的重要突破点。近年来,个旧和白牛厂两个矿床的成岩-成矿年代学研究也取得了不少进展。杨宗喜等报道的个旧锡多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄及等时线年龄分别为 82.95 ± 1.16 Ma 和 83.54 ± 1.31 Ma [34],与个旧花岗岩体锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年龄 $77.4 \sim 88.3$ Ma 一致 [36],表明燕山晚期花岗岩浆作用与成矿关系密切。李开文等 [38] 获得的白牛厂银多金属矿床 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 同位素年龄为 87.4 ± 3.7 Ma 和 88.4 ± 4.3 Ma,与薄竹山花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $86.51 \sim 87.83$ Ma [36-37] 一致,表明锡的主成矿期为晚白垩纪。这些成岩-成矿时代的耦合关系表明滇东南成矿事件的动力学背景具有统一性,均与岩浆事件和华南岩石圈伸展密切相关 [23]。

4 结论

(1) 滇东南燕山晚期老君山花岗岩的岩石化学成分总体上属于高 K 钙碱性系列具有过铝-强过铝 S 型花岗岩特征,属于高分异 S 型花岗岩,是古老地壳物质部分熔融的产物,其源岩可能为滇东南地区中-古元古代结晶基底中的一套变质泥岩为主,含少量变质硬砂岩的泥砂质副变质岩。

(2) 滇东南燕山晚期老君山花岗岩年龄可分为 3 幕,分为 80~88 Ma、90~98 Ma 和 100~118 Ma,该岩体与区域 Sn-Zn 矿化关系密切,是都龙锡锌多金属矿床成矿作用的重要物质来源。滇东南个旧、白牛厂和都龙等 3 个超大型矿床的成矿和成岩时代的耦合关系可能暗示其经历了相似的动力学背景,均与岩浆事件和华南岩石圈伸展密切相关。

致谢: 野外考察与采样工作中,得到了中国科学院地球化学研究所鲍谈、何芳、王小娟等三位硕士和蔡伊博士,云南华联矿产勘探有限责任公司韦文彪工程师,云南华联锌铜股份有限公司李廷俊工程师、陶春梅工程师等地质同行的支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 涂光炽. 我国西南两个别具一格的成矿带(域). 矿物岩石地球化学通报 [J]. 2002, 22: 1-2
- [2] 刘玉平, 李朝阳, 廖震, 等. 都龙超大型锡锌钨多金属矿床矿石组构学与年代学 [J]. 矿床地质, 2010, 29 (s1): 480-489.
- [3] 张斌辉, 丁俊, 任光明, 等. 云南马关老君山花岗岩的年代学、地球化学特征及地质意义 [J]. 地质学报, 2012, 86 (4): 587-601.
- [4] 王小娟, 刘玉平, 缪应理, 等. 都龙锡锌多金属矿床 LA-MC-ICPMS 锡石 U-Pb 测年及其意义 [J]. 岩石学报, 2014, 030 (03): 0867-86.
- [5] 官容生. 滇东南构造岩浆带花岗岩体的含矿性探讨 [J]. 矿物岩石, 1991, 11(1): 92-101.
- [6] 安保华. 老君山岩体特征、成岩及找矿意义探讨 [J]. 西南矿产地质, 1990, 4(1): 30-35.
- [7] 云南省地矿局, 云南省区域地质志 [M].北京, 地质出版社. 1990.
- [8] 云南省地质矿产局区域地质调查院. 1:5 万 (都龙幅) 区域地质矿产调查报告 [M]. 1999.
- [9] Hu Z C, Liu Y S, Chen L. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS analysis at high spatial resolution [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2011, 26 (2): 425-430.
- [10] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [11] Liu Y S, Gao S, Hu Z C. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [12] 吴福元, 李献华, 杨进辉. 花岗岩成因研究的若干问题 [J]. 岩石学报. 2007, 023(06):1217-1238.
- [13] Chappell BW, White AJR. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt [J]. Trans. R. Soc. Edinburgh Earth Sci, 1992, 83: 1-26.
- [14] Chappell B.W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. Lithos, 1999, 46: 535-551.
- [15] Sylvester, P.J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. Lithos, 1998, 45: 29-44.
- [16] Patino Douce AE and Johnson AD. Phase equilibria and melting productivity in the polytic system: Implication for the origin of peraluminous granites and aluminous granites [J]. Contr Mineral Petro, 1991, 107: 202-218.
- [17] Jung S, Pfänder JA. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids: constraints from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry [J]. European Journal of Mineralogy, 2007, 19: 859-870.
- [18] Jahn BM, Wu FY, Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. Episodes, 2000, 23(2): 82-92.
- [19] Jahn B, Wu F, Chen B. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic [J]. Geological Society of America Special Papers, 2000, 350: 181-193.
- [20] Wu FY, Sun DY, Li HM. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. Chem. Geol., 2002, 187:143-173.
- [21] Xu B, Jiang SY, Wang R. 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, 2015, 218-219: 54-72.
- [22] Yan DP, Zhou MF, Wang Y. Structural and geochronological constraints on the tectonic evolution of the Dulong-Song Chay tectonic dome in Yunnan province, SW China [J]. JAES, 2006, 28: 332-353
- [23] 刘玉平, 李正祥, 李惠民. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩成矿事件 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (5): 967-976.
- [24] 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富. 云南瓦渣钨矿区老君山花岗岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因探讨 [J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 845-857.
- [25] 李进文, 裴荣富, 王永磊. 云南都龙锡锌矿区同位素年代学研究 [J]. 矿床地质, 2013, 32 (4): 767-782.
- [26] Feng JR, Mao JW, Pei RF. Ages and geochemistry of Laojunshan granites in southeastern Yunnan, China: implications for W-Sn polymetallic ore deposits [J]. Miner Petrol, 2013, 107:573-589.
- [27] 刘艳宾, 莫宣学, 张达. 滇东南老君山地区晚白垩世花岗岩的成因 [J]. 岩石学报, 2014, 30 (11): 3271-86.
- [28] Tischendorf G. Geochemical and petrographic characteristics of silicic magmatic rocks associated with rare-element mineralization [J]. Metallization associated with acid magmatism, 1977, 2: 41-96.
- [29] 宋焕斌. 云南东南部都龙锡石-硫化物型矿床的成矿特征. 矿床地质 [J]. 1989, 8(4): 29-38.
- [30] 何芳, 张乾, 王大鹏. 云南都龙锡锌多金属矿床成矿物质来源—硫-碳-氧稳定同位素证据 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(6): 900-907.
- [31] 何芳, 张乾, 刘玉平. 云南都龙锡锌多金属矿床铅同位素组成: 成矿金属来源制约 [J]. 矿物学报, 2015, 35(3): 309-317.
- [32] 秦德先, 黎应书, 谈树成. 云南个旧锡矿的成矿时代 [J]. 地质科学, 2006, 41(1): 122-132.
- [33] 张洪培, 刘继顺, 李晓波. 滇东南花岗岩与锡、银、铜、铅、锌多金属矿床的成因关系 [J]. 地质找矿论丛, 2007, 21 (2): 87-90.
- [34] 杨宗喜, 毛景文, 陈懋弘. 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, 2008, 24(8): 1937-1944.
- [35] 刘玉平. 一个受后期改造和热液叠加的块状硫化物矿床-都龙超大型锡锌多金属矿床 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所 (硕士学位论文文), 1996.
- [36] 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 (博士学位论文), 2009.
- [37] Chen XC, Hu RZ, Bi XW. Zircon U-Pb ages and Hf-O isotopes, and whole-rock Sr-Nd isotopes of the Bozhushan granite, Yunnan province, SW China: Constraints on petrogenesis and tectonic setting [J]. JAES, 2015(99): 57-71.
- [38] 李开文, 张乾, 王大鹏. 滇东南白牛厂多金属矿床铅同位素组成及铅来源新认识 [J]. 地球化学, 2013, 42(2): 116-130.