

文章编号: 1000-4734(2011)03-0515-10

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

张颖^{1 2 3}, 黄智龙^{1 2*}, 罗泰义^{1 2}, 钱志宽^{1 2 3}

(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 550002;

2. 云南省矿产资源开发工程技术研究中心, 云南 昆明 650218; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 云南个旧地区花岗岩极其发育, 且与锡成矿关系密切。其中个旧西区神仙水花岗岩体呈岩株状, 岩性主要为碱长花岗岩和正长岩。岩石地球化学研究表明, 神仙水花岗岩具有高硅、贫钙镁、富碱的特征; $w(\text{TFeO})/w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值高。富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、K、La、Nd 和高场强元素 Zr、Hf, 亏损 Ba、Sr、Ta、P、Ti。Eu 负异常较强, 轻稀土富集, 重稀土相对亏损, 稀土配分模式呈右倾海鸥型。岩石类型属于 A 型花岗岩。锆石 LA-ICP-MS 定年结果表明神仙水花岗岩体形成于 81 Ma 左右, 相当于晚白垩世。根据区域地质和花岗岩地球化学特征, 判断其形成于伸展构造环境。

关键词: 神仙水花岗岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 云南个旧

中图分类号: P579; P581; P597 **文献标识码:** A

作者简介: 张颖, 男, 1981 年生, 博士研究生, 矿床学专业。E-mail: zhangying2701@sina.com

云南个旧锡矿田花岗质岩石极其发育, 且与锡矿联系紧密。东区有马拉格—松树脚花岗岩体、老厂—卡房花岗岩体、白沙冲花岗岩体; 西区有龙岔河花岗岩体和神仙水花岗岩体。相比于东区花岗岩体, 西区花岗岩体的研究程度较低。前人对神仙水花岗岩体进行过岩石学、地球化学及年代学方面的研究^[1-4]。但是对神仙水花岗岩体年龄、成因和动力学背景等问题尚存在争议。在岩石成因方面有地壳重熔型^[5-9]、混熔型^[10]、幔源成因^[11]、壳幔同熔型^[4]的观点。关于岩体年龄, 李家和^[1]报道的黑云母 Ar-Ar 年龄为 97、72、78 Ma, 钾长石年龄为 98 Ma。郭杰^[2]报道用全岩石 Rb-Sr 法测的年龄为 84 ± 1 Ma, Cheng et al.^[4]获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (81.0 ± 0.53) Ma。为进一步确定神仙水花岗岩体的成因类型、精确厘定形成年龄, 本文对神仙水岩体西南缘的正长花岗岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究, 并对神仙水花岗岩进行了岩石地球化学研究, 为今后进一步判断西区成矿潜力提供研究基础。

1 区域地质背景

个旧锡多金属是世界上规模最大的锡多金属矿田, 有色金属储量超过 1000 万 t, 锡资源量超过 200 万 t。该矿田位于中国华南成矿省最西端, 毗邻三江特提斯成矿带, 隶属于华夏地块西部的右江盆地(图 1)。其北部以弥勒—师宗断裂与扬子陆块分界, 西南面以红河断裂与哀牢山断块毗邻, 南部为越北古陆。印支期形成了个旧地区主要的地质层: 上三叠统火把冲组板岩、砂岩、砂砾岩, 中三叠统法郎组砂岩、页岩夹凝灰岩和玄武质熔岩, 中三叠统个旧组碳酸盐岩, 下三叠统红色砂岩夹绿色砂岩、泥灰岩。矿区内断裂发育, 小江岩石圈断裂南缘的南北向个旧断裂将矿区划分为东、西两区(图 2)。其中西区面积为 1100 km², 东区近 600 km², 矿床多位于东区, 汇集了个旧金属总储量的 90% 左右。个旧东区的花岗岩体主要以燕山期花岗质岩浆侵入活动形成的复式岩体为主, 有白沙冲、马拉格—松树脚和老厂—卡房等花岗岩体。

个旧西区发育有乍甸—猛宗复式向斜, 其轴部有四角山—轿顶山次一级向斜。NNE 向纵向

收稿日期: 2011-03-01

基金项目: 全国危机矿山接替资源找矿项目(编号: 2008186)

* 通讯作者: E-mail: huangzhilong@vip.syg.ac.cn

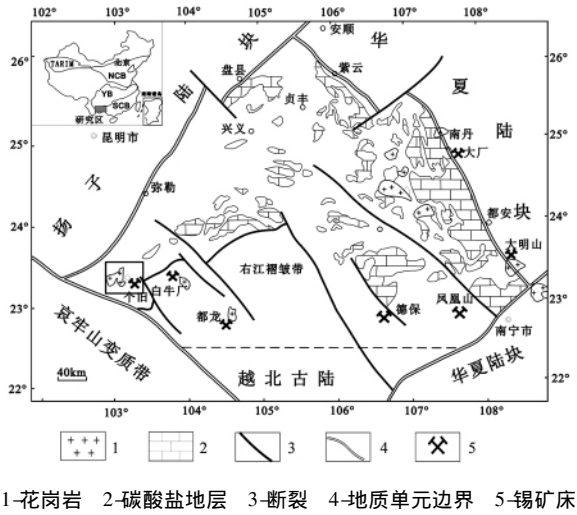


图1 右江褶皱带内构造、矿床分部及周围构造单元位置图(据文献[12]修改)
 Fig. 1. Structure and deposit distribution of the Youjiang fold belt and locations of surrounding tectonic units.

断裂较发育,其中轿顶山断裂沿乍甸-猛宗复式向斜轴部延伸,控制了西区岩浆岩的分布。沿轿顶山断裂两侧,由南向北依次分布有贾沙辉长-闪长岩体、龙岔河花岗岩体、神仙水花岗岩体以及白云山和长岭岗霞石正长岩体。

2 岩体地质及岩石学特征

神仙水岩体位于个旧断裂西侧。岩体呈南北向展布,出露面积约60 km²,为一大块的花岗岩株。岩体东面与法郎组及个旧组地层接触,西南与贾沙基性岩体接触,界限不清,表现出岩浆混合的特征,西北与龙岔河花岗岩体接触,北部与白云山碱性岩体接触。

岩体的侵入导致围岩的变质和同化混染,并在岩体东西接触带广泛发育各种角岩、大理岩和夕卡岩。在岩体南部白马寨-核桃寨之间还可见到暗色捕虏体(图3e),这些捕虏体边部暗色矿物

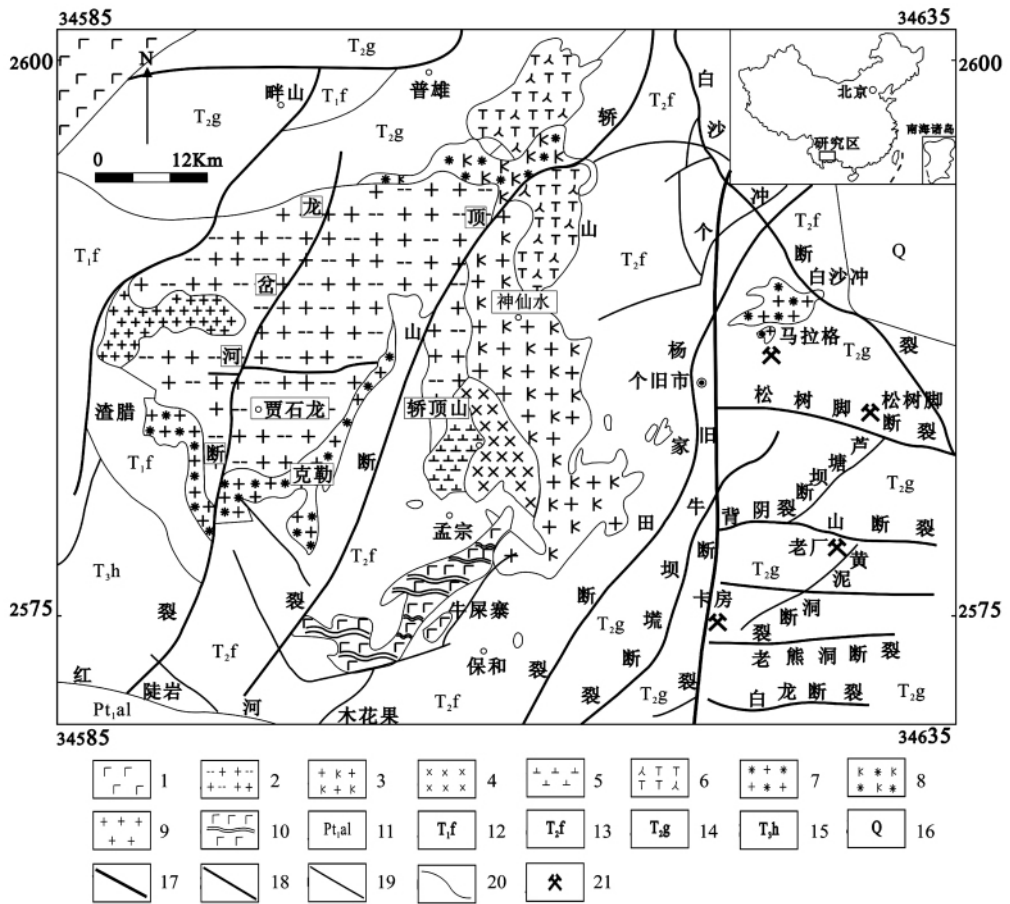


图2 云南个旧地区地质简图(据文献[13]修编)
 1-峨眉山玄武岩 2-斑状黑云母花岗岩 3-碱长花岗岩 4-辉长岩 5-闪长岩 6-霞石正长岩 7-碱性花岗岩
 8-正长岩 9-细粒花岗岩 10-变玄武岩 11-哀牢山变质带 12-法郎组 13-飞仙关组 14-个旧组 15-火把冲组
 16-第四纪沉积物 17-I级断裂 18-II级断裂 19-III级断裂 20-地质单元边界 21-锡矿床

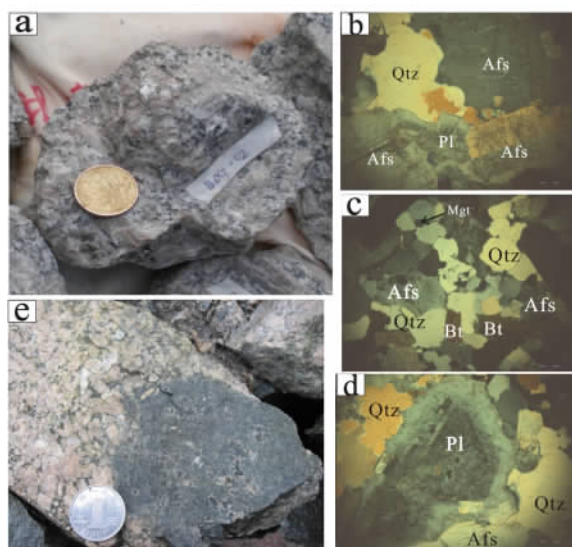
增多,并出现钾长石斑晶。

岩体以浅肉红色中粗粒花岗岩为主,主要矿物有微斜长石、斜长石、石英、黑云母等,副矿物有榍石、磷灰石、锆石、电气石、磁铁矿等。岩石中的暗色矿物具富铁的特征,长石主要是碱性长石,云母、角闪石等含水矿物较少。钾长石含量约35%,呈半自形或它形晶,粒径约8 mm左右,常包裹斜长石和石英。斜长石含量约25%,呈自形和半自形长板状,核心部分蚀变较强,常呈现绢云母化,边缘常形成洁净的增生边(图3d)。石英含量约30%,常为不规则的粒状集合体,具波状消光。黑云母含量约6%,白云母含量<1%,为交代黑云母、斜长石形成,或由绢云母重结晶形成。花岗岩的蚀变主要是高岭土化、绢云母化,在北西部石洞坝、神仙水一带电气石化普遍。

3 分析方法

LA-ICP-MS 测试分析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,锆石定年分析所用的 LA-ICP-MS 为 ELAN DRC-e 型等离子质谱仪和 GeoLasPro 193 nm 型准分子激光剥蚀系统。锆石 U-Pb 定年激光束斑直径为 44 μm 。LA-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,数据分析前用 NIST610 进行调试仪器,使之达到最优状态。标样采用 GJ-1^[14] 和 Plešovice^[15],在测试过程中每测定 6 个样品点后,重复测定 2 个 GJ-1 和 1 个 Plešovice 进行校正,观察仪器的状态以保证测试的精度。分析顺序为: 2 GJ-1 \rightarrow 1 Plešovice \rightarrow 6 samples \rightarrow 2 GJ-1 \rightarrow 1 Plešovice。数据处理采用 ICP-MS DataCal 程序^[16-17]。普通铅校正采用 Anderson^[18] 的方法,锆石谐和图用 Isoplot 程序^[19] 获得。

常量元素分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成,方法代码为 ME-XRF06,检测仪器为 X 荧光光谱仪(PANalyticalsAXIOS)。微量元素测试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 Q-ICP-MS 分析室完成,所用仪器为 Perkinelmen 公司的 ELAN DRC-e 型高分辨等离子质谱仪,精度高于 10%。具体分析步骤见文献[20]。花岗岩的微量元素原始地幔标准化值据 Sun 和 McDonough^[21] 稀土元素球粒陨石标准化值据 Boynton^[22]。



Qtz-石英 Afs-钾长石 Pl-斜长石 Bt-黑云母 Mgt-磁铁矿
图3 神仙水花岗岩岩石标本及镜下特征

Fig. 3. Hand specimen and microscopic photographs of the Shenxianshui granite.

4 结论

4.1 锆石 U-Pb 年龄

正长岩标本中的锆石颗粒较大,粒径 100 ~ 300 μm ,多呈长柱状,自形程度较好,长宽比约为 2:1 ~ 3:1,大部分锆石颗粒以灰白色、淡棕色为主。阴极发光(CL)图像显示大部分锆石灰黑不透明(图4a),这可能是由于锆石的高铀、钍含量引起的辐射损伤所致。

从所测的同位素比值和年龄数据(表1)可以看出锆石具有较高的 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值(0.35 ~ 1.88,多数>0.5),属于典型的岩浆成因锆石范围^[23-24]。12个测点的 Th 含量变化于 2550×10^{-6} ~ 14943×10^{-6} ,U 含量变化于 5893×10^{-6} ~ 12062×10^{-6} ,且含量呈现较明显的正相关关系,与岩浆锆石特征一致。12个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值接近,为 0.047 ~ 0.051,表明该类锆石为同期岩浆结晶而成。由于 ^{235}U 的衰变比 ^{238}U 快 6.3 倍,因此放射成因的 ^{207}Pb 在地球早期历史中更为富集,而显生宙以来 ^{207}Pb 生成率很低,这种变化使得显生宙锆石的 ^{207}Pb 计数速率低,从而造成 ^{207}Pb 测定的误差较大,使得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 比值可信度降低。因此对显生宙锆石,一般会采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄^[25]。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄范围在 80.4 ~ 83.0 Ma。12个数据点分布于谐和线上或附近,此次研究的正长岩的加权 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 81.7 ± 0.6 Ma。

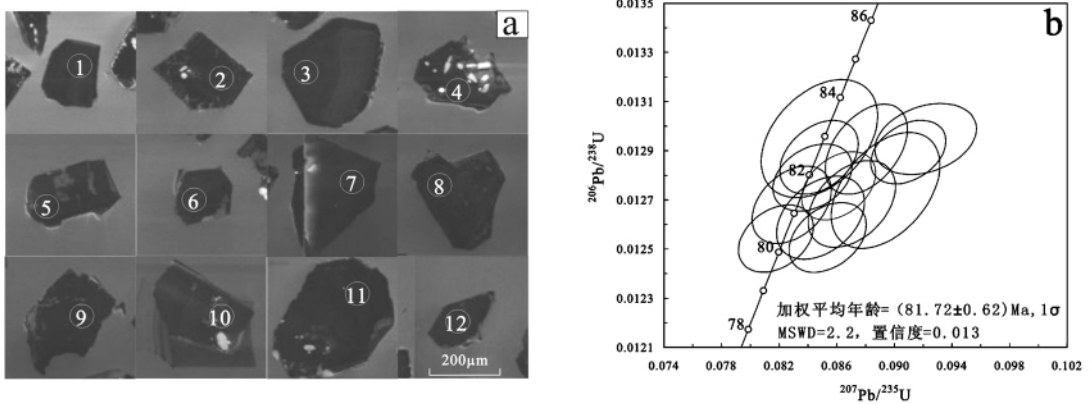


图4 神仙水正长岩锆石 CL 图像与锆石 U-Pb 年龄协和图

Fig. 4. CL images of zircons and zircon U-Pb Concordia diagram of Shenxiangshui syenite.

表1 神仙水花岗岩锆石 U-Pb 年龄数据

Table 1. Zircon U-Pb dating of Shenxiangshui granite

分析 点号	$w_B/10^{-6}$			$w(\text{Th})/w(\text{U})$	同位素比值					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	106.6	4940.1	6206.3	0.796	0.05100	0.00128	0.09217	0.00233	0.01295	0.00010
5	162	14943	7969.5	1.875	0.04817	0.00118	0.08487	0.00201	0.01263	0.00011
6	145.4	3580.4	10173	0.352	0.04672	0.00105	0.08287	0.00182	0.01268	0.00011
9	110.5	4541	7043.3	0.645	0.04889	0.00105	0.08805	0.00188	0.0129	0.00012
10	142	8673.4	8548.2	1.015	0.04652	0.00097	0.08178	0.00172	0.01254	0.00010
11	119.1	4408.9	7762.7	0.568	0.04705	0.00101	0.08477	0.00180	0.01287	0.00010
13	116.1	4311.1	7678.3	0.561	0.04909	0.00112	0.08704	0.00200	0.01268	0.00012
14	131.6	5306	8738.5	0.576	0.04878	0.00103	0.08537	0.00177	0.01254	0.00009
17	86.7	3128.5	5893.1	0.531	0.05047	0.00134	0.08939	0.00249	0.01274	0.00016
19	86.3	2549.9	6045.5	0.422	0.04696	0.00134	0.08479	0.00267	0.01295	0.00016
28	190.3	7898.5	12062	0.630	0.05064	0.00098	0.09097	0.00172	0.01289	0.00009
29	120.6	3820.6	8002	0.477	0.04757	0.00106	0.08431	0.00181	0.01279	0.00009

分析点号	t/Ma					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
1	242.66	54.62	82.93	0.61	89.52	2.17
5	109.35	54.63	80.89	0.71	82.71	1.88
6	35.28	51.85	81.23	0.66	80.84	1.70
9	142.68	45.37	82.67	0.77	85.68	1.75
10	33.43	42.59	80.35	0.57	79.81	1.61
11	50.095	149.06	82.46	0.63	82.62	1.68
13	153.79	56.47	81.25	0.74	84.74	1.87
14	200.08	50.00	80.38	0.60	83.18	1.66
17	216.7	61.10	81.60	0.99	86.94	2.32
19	55.65	66.66	82.94	1.00	82.64	2.50
28	233.4	72.21	82.59	0.54	88.40	1.60
29	76.02	47.22	81.93	0.57	82.19	1.70

Ma, MSWD=2.2 (图4b)。

4.2 岩石化学特征

神仙水花岗岩体样品的主量、微量和稀土元素分析结果见表2,所测样品均较新鲜,未发生蚀变或蚀变轻微。神仙水岩体的 SiO_2 含量变化较

大,其范围为61.15%~75.5%,与王兴阵^[3]所测的63.18%~76.18%一致。碱质含量高,富钠富钾, $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 值为8.13%~12.55%,在TAS图上(图5),主要落在碱性花岗岩和正长岩范围。样品中 K_2O 含量高于 Na_2O 含量, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值在1.32~5.4之间, $w(\text{K}_2\text{O})$

+Na₂O) / w(Al₂O₃) 为 0.58% ~ 0.76% , μ(FeO) / w(MgO) 为 3.33 ~ 9 , μ(TiO₂) / w(MgO) 为 0.44 ~ 9。碱度率 R_A 为 3.12 ~ 6.05。铝饱和指数 (I_{ACNK}) 为 0.82 ~ 1.14 ,表现出过铝质特征(图 6) ,与全球和南岭锡花岗岩一致(I_{ACNK} 分别为

1.10 和 1.23) [26]。与全球和南岭花岗岩相比,神仙水花岗岩碱度指数偏高,碱度 w(K₂O+Na₂O) 平均值 9.77% ,高于全球花岗岩及南岭花岗岩平均值(分别为 7.59% 和 7.87%) ,也高于全球含锡花岗岩和南岭含锡花岗岩的平均值(7.85%

表 2 神仙水花岗岩主量元素和微量元素分析结果
Table 2. Major and trace elements of Shenxianshui granite

样品	SXS-3	SXS-7	SXS-12	SXS-14	SXS-15	SXS-17	SXS-5	SXS-6	SXS-10
w _B / %									
SiO ₂	71.84	74.14	74.28	75.5	74.35	72.73	62.63	62.53	61.15
Al ₂ O ₃	14.04	13.41	13.09	13.41	13.07	13.73	16.47	16.44	18.69
TFe ₂ O ₃	1.55	0.64	1.19	1	1.32	1.21	2.3	2.11	3.6
CaO	0.61	0.3	0.71	0.57	0.86	0.82	2.99	2.87	2.35
MgO	0.22	0.09	0.13	0.1	0.16	0.14	0.59	0.57	0.75
Na ₂ O	3.3	1.84	3.38	3.68	3.4	3.62	1.98	1.96	4.07
K ₂ O	5.37	7.98	4.97	4.86	4.73	4.96	10.48	10.59	6.75
TiO ₂	0.17	0.04	0.08	0.09	0.13	0.1	0.38	0.38	0.46
MnO	0.04	0.02	0.04	0.03	0.05	0.06	0.13	0.12	0.04
P ₂ O ₅	0.052	0.034	0.035	0.03	0.048	0.046	0.156	0.153	0.232
LOI	0.87	0.57	0.65	0.61	0.68	0.7	0.54	0.45	0.82
Total	98.08	99.1	98.58	99.89	98.82	98.15	98.49	98.43	99.11
I _{ACNK}	0.137	1.098	1.07	1.086	1.065	1.071	0.822	0.826	1.023
w _B / 10 ⁻⁶									
Rb	427	400	432	419	403	443	760	811	269
Ba	323	168	136	94.5	213	235	1380	1420	1080
Th	66.1	8.62	54.6	50.6	63.5	58	39.8	38.6	87.7
U	23.2	4.11	15.8	13.8	16.2	17.8	4.33	4.24	15.7
Nb	49.3	9.94	27.6	25.2	30	32.8	39.3	38.7	19.9
Ta	5.18	3.24	4.02	3.02	4.61	4.42	3.2	3.66	1.15
Pb	47.6	40.9	64.6	60.8	56.7	74	25.2	23.2	48.9
Sr	191	227	97.6	59.2	128	105	1010	1050	641
Zr	181	33.3	147	147	194	146	240	266	361
Hf	4.76	1.8	4.71	5.23	6.03	4.66	5.84	6.72	8.44
Y	15.4	8.31	20.3	11.1	30.2	31.4	19	18.6	14.9
La	67.7	14	43.6	34.6	55.7	51	16.3	17.3	154
Ce	103	25.9	72.7	58.1	102	95.2	35.1	37.8	254
Pr	11.3	2.85	8.26	5.6	101.1	9.25	4.67	4.77	24.8
Nd	33.5	10.2	26.3	16.6	30.8	29.2	19.1	19	73
Sm	5.62	2.49	4.6	2.36	5.59	5.7	4.75	4.67	9.01
Eu	0.774	0.231	0.531	0.347	0.651	0.601	0.839	0.547	1.98
Gd	3.94	2.19	3.52	1.89	4.83	5.68	4.44	4.25	5.78
Tb	0.569	0.362	0.57	0.295	0.769	0.898	0.605	0.564	0.721
Dy	2.88	1.88	3.09	1.39	4.13	4.89	3.27	3.15	2.91
Ho	0.554	0.336	0.612	0.338	0.922	1.02	0.66	0.607	0.545
Er	1.66	0.86	1.85	0.998	2.71	3.09	1.74	1.67	1.53
Tm	0.25	0.128	0.324	0.178	0.443	0.503	0.246	0.223	0.211
Yb	1.94	0.852	2.44	1.34	3.36	3.64	1.6	1.6	1.45
Lu	0.268	0.122	0.378	0.219	0.49	0.547	0.22	0.229	0.225
REE	233.9	62.4	168.78	124.26	222.49	211.22	93.54	96.38	530.16
LREE	221.89	55.67	155.99	117.61	204.84	190.95	80.76	84.09	516.79
HREE	44.84	21.37	26.36	37.74	24.93	20.87	15.17	15.99	116.69
w(LREE) / w(HREE)	18.39	8.28	12.2	17.69	11.61	9.42	6.32	6.84	38.66
δEu	0.5	0.3	0.4	0.5	0.38	0.32	0.56	0.38	0.84

和 7.64%)^[9,26-27]。

稀土元素研究表明,稀土总量变化较大, Σ REE 在 $62.0 \times 10^{-6} \sim 530.16 \times 10^{-6}$ 之间,与王兴阵^[3]所测的 $151 \times 10^{-6} \sim 570.16 \times 10^{-6}$ 一致,平均 193.7×10^{-6} ,低于世界平均水平和我国华南地区花岗岩^[28]。神仙水岩体的轻稀土(Σ LREE)含量在 $55.67 \times 10^{-6} \sim 516.79 \times 10^{-6}$,平均 180.95×10^{-6} ,重稀土(Σ HREE)在 $6.65 \times 10^{-6} \sim 20.27 \times 10^{-6}$,平均 12.73×10^{-6} , Σ LREE/ Σ HREE 比值为 6.32 ~ 38.66, La_N/Yb_N 比值在 7.31 ~ 78.16 之间,平均 20.15,比值较高。神仙水岩体的 Ce 异常不明显, Eu 负异常明显, Eu/Eu^* 比值在 0.3 ~ 0.84 之间,暗示在成岩过程中存在一定程度的斜长石分离结晶作用。从图 7 中可以看出轻稀土富集,重稀土亏损,稀土配分模式图呈现出“右倾海鸥型”。

由微量元素测试结果及原始地幔标准化蛛网图(图 7)可知,相对于原始地幔,神仙水岩体富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、K、La、Nd 和高场强元素 Zr、Hf,亏损 Ba、Sr、Ta、P、Ti。Ba、Sr、Ti 的亏损可能反映了成岩过程经历了斜长石、磷灰石、钛铁矿等的分离结晶作用^[29]。Nb、Ta 相对于 Th、Ce 显示出较为明显的亏损,说明岩体源岩可能为陆壳物质^[29]。

微量元素具有选择性富集与亏损的特征:①元素 Ga 相对富集, Ga/Al 比值大;②稀土含量较高,轻重稀土分馏明显,铈具负异常;③高场强元素 Zr、Hf、Nb 的含量偏高;④大离子亲石元素 Rb、Th、U 含量高;⑤过渡元素 Cr、Ni 亏损, Cu、Zn 相对富集。此外,钨钼族元素的含量也较高。

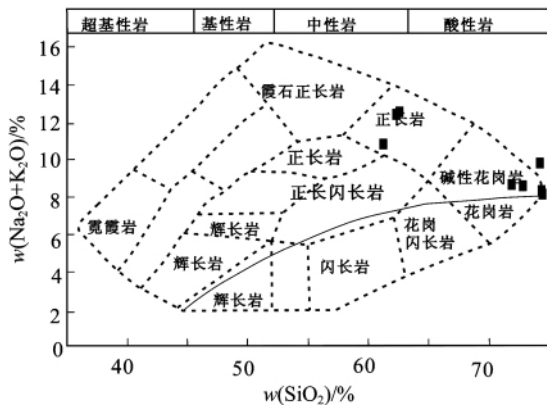
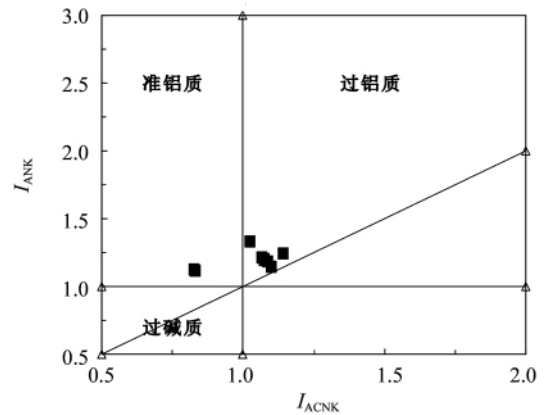


图 5 神仙水花岗岩的 TAS 图解

Fig. 5. TAS diagram of Shenxianshui granite.



$$I_{ACNK} = n(Al_2O_3) / n(CaO + Na_2O + K_2O);$$

$$I_{ANK} = n(Al_2O_3) / n(Na_2O + K_2O)$$

图 6 神仙水花岗岩的 ACNK-ANK 图解

Fig. 6. ACNK vs. ANK diagram of Shenxianshui granite.

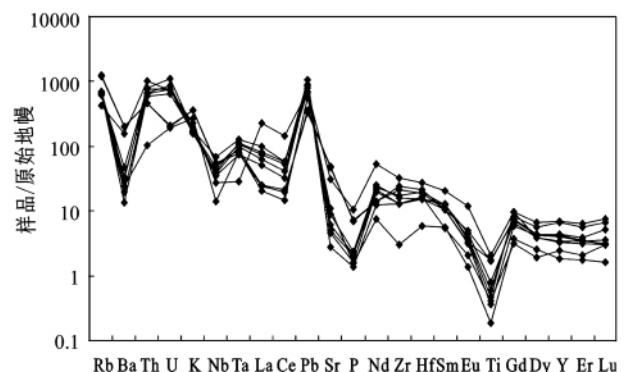
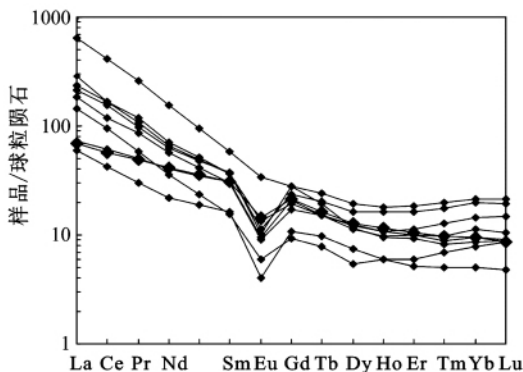


图 7 神仙水花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化曲线^[22]与微量元素原始地幔标准化蛛网图^[21]

Fig. 7. REE chondrite-normalized distribution patterns and trace element primitive

mantle-normalized patterns of Shenxianshui granite.

5 岩石类型及成因

关于个旧地区花岗岩的成因类型,前人认为与我国华南大多数花岗岩一样,为 S 型花岗岩,也称之为地壳改造型花岗岩^[5-9]。但也存在不同观点,莫国培^[10]认为个旧花岗岩既不是 S 型花岗岩也不是典型的 I 型,而是具有壳幔特征的混熔型花岗岩,黎应书^[11]通过对黄铁矿中硫同位素研究后认为个旧含锡花岗岩为幔源成因。Cheng 等^[4]认为个旧花岗岩显示出了 A 型和 I 型共有的特征,将其简单地划分成 I 型、S 型或 A 型会带来很多问题,认为将其划为壳幔同熔型较为妥当。

本次对神仙水花岗岩的岩石化学及矿物学特征等研究表明,神仙水花岗岩体具有明显的 A 型特征。如岩体为高侵位的岩株,岩石中的暗色矿物具富铁的特征,长石主要是碱性长石,云母、角闪石等含水矿物较少。富 SiO₂,富碱,贫 MgO、CaO。 $w(FeO^*)/w(MgO)$ 、 $w(Na_2O + K_2O)/w(Al_2O_3)$ 和 $w(TiO)/w(MgO)$ 值均较高;微量元素具有选择性富集与亏损的特征,轻重稀土分馏明显,钫具负异常,配分模式呈明显的右倾“海鸥型”;高场强元素 Zr、Hf、Nb 的含量偏高;大离子亲石元素 Rb、Th、U 含量高;过渡元素 Cr、Ni 亏损,Cu、Zn 相对富集。在 Nb-Ga/Al 图解(图 8)中落入 A 型花岗岩区域内,在 Rb-(Y+Ta)图解(图 9)中落入板内环境范围内。

关于岩浆来源,Cheng 等^[4]通过对个旧花岗岩的 Sr-Nd-Hf 同位素研究表明,个旧花岗岩主要来源于地壳的熔融,并有少量地幔物质的加入。结合二阶段钨模式年龄、钪模式年龄及同位素特征的研究表明,个旧花岗质岩浆来源于中元古代陆壳的部分熔融,并伴随着少量幔源熔体的加入,随后发生了广泛的分离结晶作用。

利用岩石化学分析数据进行有关源岩成因判别,在 K₂O-SiO₂ 图(图 10)中多数投在大陆花岗岩区,在图 11 中投点散乱,表明来源具多源特点,这与 Cheng 等^[4]通过 Sr-Nd-Hf 同位素得出的结论基本一致。

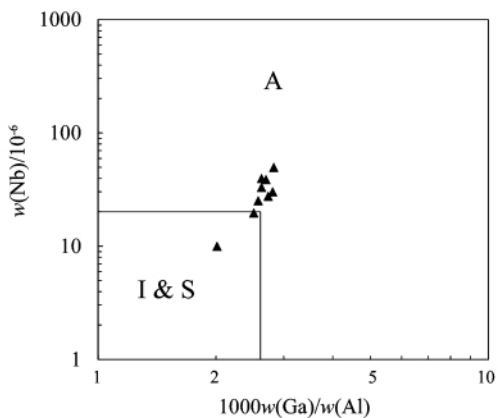


图 8 神仙水花岗岩 Nb-Ga/Al 图解
Fig. 8. Nb vs. Ga/Al diagram of Shenxianshui granite.

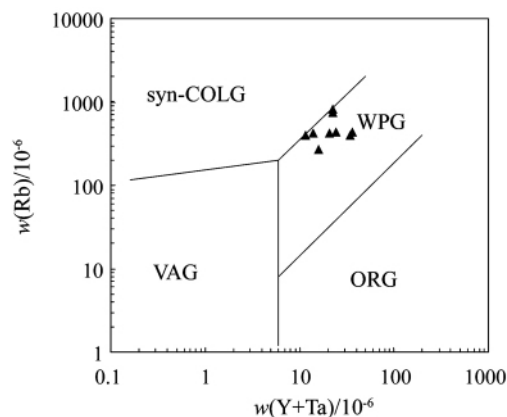


图 9 神仙水花岗岩 Rb-(Y+Ta) 图解
Fig. 9. Rb vs. (Y+Ta) diagram of Shenxianshui granite.

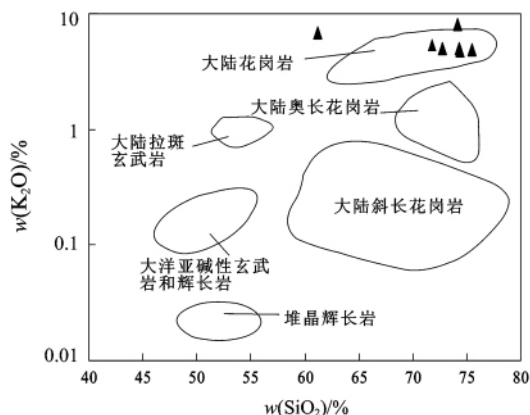


图 10 神仙水花岗岩 K₂O-SiO₂ 图
Fig. 10. K₂O vs. SiO₂ diagram of Shenxianshui granite.

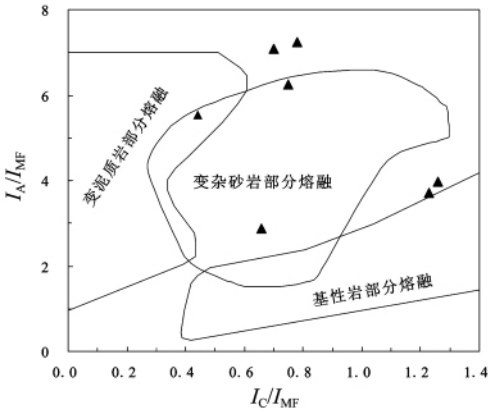


图 11 神仙水花岗岩 A/MF-C/MF 图

Fig. 11. A/MF vs. C/MF diagram of Shenxianshui granite.

6 地球动力学意义

关于神仙水花岗岩体的形成时代,李家和^[1]报道的黑云母年龄为 97、72、78 Ma,钾长石年龄为 98 Ma。郭杰^[2]报道用全岩 Rb-Sr 法测的年龄为 84 ± 1 Ma,Cheng 等^[4]获得的 LA-ICP-MS 锆石年龄为 81.0 ± 0.53 Ma。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果表明神仙水岩体形成于燕山晚期 (81.7 ± 0.6 Ma),这与 Cheng 等^[4]用该方法获得年龄一致。

程彦博等^[33-34]和 Cheng 等^[4]以 LA-ICP-MS 法测得龙岔河似斑状花岗岩的锆石年龄为 82.0 ± 0.25 Ma,白沙冲等粒花岗岩年龄为 79.1 ± 0.8 Ma,神仙水花岗岩 2 组年龄为 83.0 ± 0.35 Ma 和 81.0 ± 0.53 Ma,新山等粒花岗岩年龄为 83.1 ± 0.42 Ma。SHRIMP 法测得龙岔河岩体锆石年龄为 83.2 ± 1.4 Ma,马拉格-松树脚似斑状花岗岩岩体年龄为 82.8 ± 1.7 Ma,老厂似斑状花岗岩年龄为 83.3 ± 1.6 Ma,白沙冲等粒花岗岩年龄为 77.4 ± 2.5 Ma。杨宗喜^[35]测得的个旧东区卡房锡矿田砂卡岩中辉钼矿的 Re-Os 同位素等时线年龄为 83 ± 2.1 Ma。可见,个旧矿区大规模的成岩成矿时限应为 76~85 Ma 之间。

刘玉平等^[36]对老君山岩体与都龙锡矿的形成年代进行了精测,获得的年龄为 $86.9 \pm 1.4 \sim 92.9 \pm 1.9$ Ma。王登红等^[37]获得大厂西矿带铜坑-长坡矿床 91 号层状矿体石英 Ar/Ar 坪年龄 94.52 ± 0.33 Ma,龙头山 100 号块状矿体石英 Ar/Ar 坪年龄为 94.56 ± 0.45 Ma。蔡明海等^[38]获得

大厂东矿带亢马脉状矿体石英 Rb-Sr 等时线年龄 94.1 ± 2.7 Ma。蔡明海等^[39]还获得了矿田内龙箱盖岩体主体岩性黑云母花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $93 \pm$ Ma,斑状黑云母花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 91 ± 1 Ma。蔺志永等^[40]获得了大明山典型矿集区中代表性矿床王社铜钨矿中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 93.8 ± 4.6 Ma。可见,神仙水花岗岩体的形成时代与个旧锡矿田及其花岗岩以及桂西成岩成矿事件一致,都形成于统一的构造动力学背景之下。

已有研究表明,滇东南-桂西地区燕山期花岗岩岩浆作用集中在 73.9~119 Ma 和 80~100 Ma 很窄的时间范围内^[34,41]。结合最新研究成果,可以发现华南西部地区成岩成矿高峰在 80~100 Ma 的白垩纪晚期。前人研究认为滇东南-桂西地区在该时期的成岩成矿作用与岩石圈伸展关系密切^[12,36,39,42-43]。神仙水花岗岩的形成时间与滇东南-桂西地区成岩成矿高峰一致,也形成于岩石圈伸展的动力学环境。至于该区域在晚中生代的大规模的成岩成矿事件是受太平洋还是特提斯构造域的影响,尚需进一步研究。

7 结论

神仙水岩体西南缘正长岩的锆石 U-Pb 定年结果为 (81.7 ± 0.6) Ma,表明岩体的形成时代与个旧地区龙岔河、老卡、马松、新山、白沙冲以及老君山、龙箱盖岩体等基本一致,均形成于燕山晚期。

神仙水岩体中长石主要是碱性长石,云母、角闪石等含水矿物较少,地球化学特征上表现为富 SiO₂ 和 Na₂O+K₂O,贫 MgO、CaO。微量元素具有选择性富集与亏损的特征,轻重稀土分馏明显,锆具负异常,配分模式呈右倾“海鸥型”。神仙水岩体属于 A 型花岗岩,形成于地壳伸展的地球动力学环境。

致谢:中科院地球化学研究所周家喜博士助理研究员对本文提出了宝贵的修改意见。野外采样过程中得到了中科院地球化学研究所冷成彪博士、成都理工叶永钦同学的大力帮助。实验过程中,得到了中科院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室胡静高级工程师、李亮、黄艳和包广萍实验员的指导和帮助。在此一并致以诚挚的谢意。

参 考 文 献:

- [1] 李家和. 云南某锡矿岩浆杂岩体的同位素地质年龄[A]. 全国同位素地质会议文集(第二集)[C]. 1977: 165-171.
- [2] 郭杰. 个旧岩体地球化学研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1984.
- [3] 王兴阵. 个旧岩体地球化学及成因研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2006.
- [4] Cheng Y B, Mao J W. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan Province, SW China: Constraints on their petrogenesis and tectonic setting [J]. *Lithos*, 2010, 120: 258-276.
- [5] 汪自芬. 关于个旧锡矿成矿作用的几个问题的探讨[J]. 地质学报, 1983, 57(2): 154-163.
- [6] 陈吉琛. 云南 S 型和 I 型两类花岗岩划分对比的初步探讨[J]. 云南地质, 1983, 2(1): 28-37.
- [7] 伍勤生, 许俊珍, 杨志. 个旧含锡花岗岩的 Sr 同位素特征及找矿标志研究[J]. 地球化学, 1984, (4): 293-302.
- [8] 伍勤生, 刘青莲. 个旧含锡花岗岩杂岩体的成因演化及成矿[J]. 桂林工学院学报, 1986, 6(3): 229-238.
- [9] 李家和. 个旧花岗岩特征及成因研究[J]. 云南地质, 1985, 4(4): 327-352.
- [10] 莫国培. 个旧超大型锡多金属矿区花岗岩成因类型[J]. 矿产与地质, 2006, 20(4): 413-417.
- [11] 黎应书. 个旧含锡花岗岩幔源成因证据[J]. 有色金属, 2007, 59(3): 20-26.
- [12] 陈懋弘, 程彦博, 章伟, 等. 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, 2008: 241-242.
- [13] 陈毓川, 朱裕生. 中国矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 209-211.
- [14] Jackson S, Pearson N, Griffin W et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology [J]. *Chemical Geology*, 2004, 211: 47-69.
- [15] Sláma J, Kočourek J, Condon D, Crowley J, Gerdes A, Hancher J, Horstwood M, Morris G, Nasdala L, Norberg N. Plesovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 2008, 249: 1-35.
- [16] Liu Y S, Gao S, Hu Z C et al. 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*, 2010a, 51: 537.
- [17] Liu Y S, Hu Z C, Zong K et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010b, 55: 1535-1546.
- [18] Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analysis that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192: 59-79.
- [19] Luding K R. User's Manual for Isoplot 3.00, a geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. *Berkeley Geochronological Center Special Publication*, 2003, 4: 25-32.
- [20] Qi L, Hu J, Grégoire D C. Determination of trace elements in twenty six chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Geostandards Newsletter*, 2000, 24: 51-63.
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic basalt, implication for mantle composition and process [J]. *Geological Society Special Publication*, 1989, 42: 313-345.
- [22] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [A]. Henderson P N. *Rare-Earth Element Geochemistry* [M]. Amsterdam Oxford-New York-Tokyo: Elsevier, 1984: 63-144.
- [23] Pidgeon R T, Nemchin A A, Hitchen G J. Internal structures of zircon from Archean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1998, 132: 288-299.
- [24] Claesson S, Vetrin V, Bayan O T et al. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia; a record of geological evolution from the Archean to the Paleozoic [J]. *Lithos*, 2000, 51(1/2): 95-108.
- [25] Compston W, Williams I S, Kirschvink I L. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian timescale [J]. *Geol Soc London*, 1992, 149(2): 171-184.
- [26] 庄永秋, 王任重, 杨树培. 云南个旧锡铜多金属矿床[M]. 北京: 地震出版社, 1996: 38-101.
- [27] 冶金工业部西南冶金地质勘探公司. 个旧锡矿地质[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 50-90.
- [28] 刘英俊. 华南花岗岩类中微量元素的地球化学, 花岗岩地质和成矿关系[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982: 57-103.
- [29] Rollison H. *Petrogeochemistry* Trans. [M]. Yang X M, Yang X Y, Chen S X. Trans. Hefei: Chinese Science and Technology University Publishing House, 2000: 179-205.
- [30] 毛景文, 李红艳. 柿竹园钨锡钼多金属矿床中多阶段花岗岩与多期矿化的时空关系[A]. 第五届矿床会议论文集[C]. 北京: 地质出版社, 1993: 361-363.
- [31] 毛景文, Raimbaull L, Guy B. 千里山花岗岩体地质地球化学及与成矿关系[J]. 矿床地质, 1995, 14(1): 12-25.
- [32] 毛景文, 李红艳, 宋学信. 湖南柿竹园钨锡钼多金属矿床地质与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-183.
- [33] 程彦博, 毛景文, 谢桂清, 等. 云南个旧老厂一卡花岗岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学约束[J]. 地质学报, 2008, 82(11): 1478-1493.

- [34] 程彦博,毛景文,谢桂清,等. 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,2009,28(3): 297-312.
- [35] 杨宗喜,毛景文,陈懋弘,等. 云南个旧超卡房砂卡岩型铜(锡)矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报,2008,24(8): 1937-1944.
- [36] 刘玉平,李正祥,李惠民. 都龙锡矿床锡石和锆石 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,2009,23(5): 967-976.
- [37] 王登红,陈毓川,陈文,等. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代[J]. 地质学报,2004,78: 262-268.
- [38] 蔡明海,梁婷,刘国庆,等. 广西大厂锡多金属矿田充马锡矿床地质特征及成矿时代[J]. 地质学报,2005,79: 409-976.
- [39] 蔡明海,何龙清,吴德成,等. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质论评,2006,52(3): 409-976.
- [40] 简志永,王登红,李水如. 广西王社铜钨矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报,2008,82(11): 1565-1571.
- [41] 施琳,陈吉琛,吴上龙,等. 滇西锡矿带成矿规律[M]. 北京:地质出版,1989: 1-284.
- [42] 毛景文,谢桂清,郭春丽,等. 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,2008b,14(4): 510-526.
- [43] 程彦博,毛景文,陈懋弘,等. 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,2008b,35(6): 1082-1093.

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Petrogenesis of Shenxianshui Granite in Gejiu, Yunnan Province, China

ZHANG Ying^{1,2,3}, HUANG Zhi-long^{1,2}, LUO Tai-yi^{1,2}, QIAN Zhi-kuan^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Research Center of Mineral Resources Exploitation Engineering technology, Kunming 650218, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The Gejiu in Yunnan province, south China, is the largest felsic intrusion-related Sn-polymetallic ore field in the world. The Shenxianshui in western Gejiu district occurs as a stock, and consists of Si, alkali-rich, and Ca, Mg-poor alkali feldspar granite. FeO/MgO and $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios are high. The alkali feldspar granite is characterized by enriched in large ion lithophile elements (Rb, Th, U, K, La and Nd) and high field strength elements (Zr and Hf), but depleted in Ba, Sr, Ta, P, and Ti. Chondrite-normalized REE distribution pattern shows pronounced negative Eu anomaly and LREE enrichment. Bulk geochemistry characteristics indicate that the Shenxianshui is highly differentiated A-type granite. Zircon LA-ICP-MS concordia age of 81.7 ± 0.6 Ma indicates that the Shenxianshui granite occurred at Late Jurassic. Regional geology and bulk rock geochemistry indicate that the Shenxianshui alkali feldspar granite formed at an extensional tectonic setting during Late Yanshanian.

Key words: Shenxianshui granite; geochemistry; zircon U-Pb data; Gejiu area; Yunnan Province