

湖南新生矿区花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、 Hf 同位素特征及地质意义

孔 华^{1,2}, 费利东^{1,2}, 钟江临³, 王 高^{1,2}, 刘士杰⁴, 周伟平³, 全铁军^{1,2,4}

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 3. 湖南省有色地质勘查局一总队, 郴州 423000;
4. 湖南省有色地质勘查局, 长沙 410007)

摘 要: 新生矿区花岗岩体岩性为黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩。花岗岩总体上具有富钾、高硅的特征, 为钙碱性到弱过铝质花岗岩的过渡(A/CNK 为 0.93~1.13)。花岗岩具有强烈的 Eu 负异常(δEu 为 0.15~0.35), 稀土元素配分曲线呈不对称的“海鸥型”, 与典型过铝质 A 型花岗岩的特征一致。花岗岩的 $10\ 000\text{Ga}/\text{Al}$ 为 3.62(3.47~4.00), 与世界 A 型花岗岩平均值 3.75 相接近。锆石 U-Pb 年龄为(147.5±3.5) Ma(MSWD=2.6), 显示岩体形成于燕山早期第二阶段。锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -5.79~-4.15, 暗示岩浆来源于均一源区, 锆石的 Hf 同位素两阶段模式年龄(T_{DM2})为 1.208~1.290 Ga, 平均为 1.227 Ga, 说明岩浆源区有中元古代的古老地壳物质的加入。花岗岩构造环境判别图解显示为造山后(A2)的板内花岗岩。成矿花岗岩是在燕山早期晚阶段板内拉张背景下侵入地壳, 并带来成矿物质形成矽卡型铜多金属矿床。

关键词: 铜多金属矿床; A 型花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素

中图分类号: P597

文献标志码: A

Zircon U-Pb ages and Hf isotope and their geological significance of granites in Xinsheng deposit, Hunan Province, China

KONG Hua¹, FEI Li-dong¹, ZHONG Jiang-lin², WANG Gao¹, LIU shi-jie³, ZHOU Wei-ping², QUAN Tie-Jun^{1,3}

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals
Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. First General Geological Team of Hunan Nonferrous Metal Geo-exploration Bureau, Chenzhou 423000, China;
4. Hunan Nonferrous Metal Geo-exploration Bureau, Changsha 410007, China)

Abstract: The Xinsheng granite bodies are distinguished as biotite granite and biotite monzogranite in mining area, the granites can be classified to be calc-alkaline granite and weakly peraluminous granite with K-rich, Si-high (the values of A/CNK are 0.93~1.13). The granites have obvious Eu negative anomaly, the REE distribution patterns be long to the type of “gull”, which are the same as that of typical A-type granite. The average value of $10\ 000\text{Ga}/\text{Al}$ of granites is 3.62 (3.47~4.00), which is close to 3.75, the average value of A-type granite worldwide. The zircon U-Pb age of granite bodies is (147.5±3.5) Ma (MSWD=2.6), which shows that they formed in the second stage of early Yanshan movement. The values of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ are -5.79~ -4.15, indicating that the magma mainly derived from a uniform resource. The model ages of two-stage range of zircon Hf isotope (T_{DM2}) are 1.208~1.290 Ga (average value is 1.227 Ga). This feature indicates that the granite bodies originated from melting of early crustal materials formed in mesoproterozoic. The discrimination diagrams for tectonic background of granites prove that the granites formed in intra-plate extension environment, and the granites are A2-type, so, the granite body intruded to lower crust in extension environment, and brought enough mineralizing material to form skarn type copper polymetallic deposit.

Key words: copper polymetallic deposit; A-type granite; zircon U-Pb dating; Hf isotope

湖南省永兴县新生矿床为铜锡多金属矿床, 矿区位于南岭中段大义山岩体南东部。南岭地区地质构造复杂, 矿产资源丰富。大义山岩体受北西向郴州-邵阳构造带严格控制, 呈长条状侵入于印支期构造层之中, 总面积约 210 km²。大义山岩体为一具有多期次侵入活动的复式岩体, 侵入时代为印支晚期(210~278 Ma)至燕山早-中期(156~185 Ma; 128~148 Ma), 其中(160±5) Ma 期间的岩浆活动与成矿最密切。这与区域上北西向郴州-邵阳构造岩浆成矿带产出锡多金属矿花岗岩的成矿期是一致的^[1]。新生矿区地表为灰岩覆盖, 钻探资料显示矿区深部存在隐伏岩体, 为大义山岩体南东缘的延伸。前人对该矿区研究较少, 本文作者着重对矿区隐伏岩体的成岩年代学、岩石成因及其构造背景进行讨论。

1 地质概况

新生矿区位于湘南大义山岩体南东部接触带上, 即南岭东西向构造带中段北缘与耒阳临武南北向构造带中段的交汇部位, 属于大义山-骑田岭-柿竹园-瑶岗仙钨锡多金属成矿带中段。矿区断裂较为发育, 依走向可分为两组, 一组为近南北向的 F₁、F₂、F₃, 均为走向逆断层; 另一种为近东西向的 F₁₁、F₁₂、F₁₃, 均为平移断层(见图 1)。

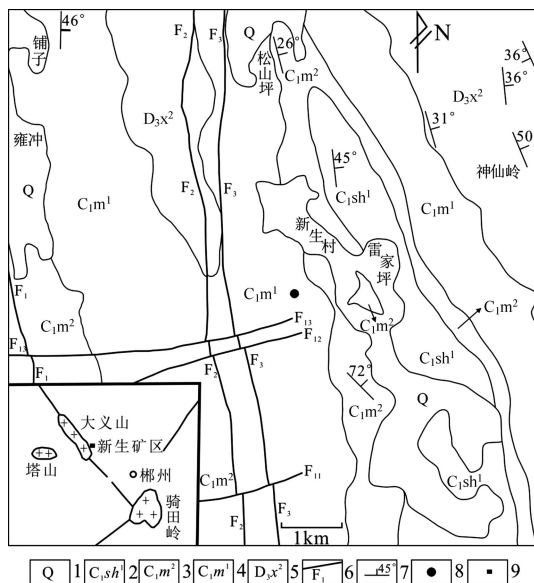


图 1 新生铜多金属矿区地质简图^[2]

Fig. 1 Geological sketch map of Xinsheng Copper polymetallic deposit^[2]: 1—Quaternary; 2—Shidengzi Fm, lower Member; 3—Menggong'ao Fm, upper member; 4—Menggong'ao Fm, lower member; 5—Xikuangshan Fm, upper member; 6—Fault; 7—Occurrence; 8—Sampling location; 9—Location of ore deposit

矿区出露的地层为泥盆系上统锡矿山组上段(D₃x²)、石炭系下统孟公坳组(C₁m¹、C₁m²)、石磴子组下段(C₁sh¹)及第四系(Q)(见图 1)。

矿区地表未见岩体出露, 但钻孔揭露深部存在隐伏岩体, 岩性为黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩, 在岩体上部有矽卡岩及云英岩。矿化类型可分为以下 3 种: 1) 产于外接触带中的裂隙充填交代型铜多金属矿床; 2) 产于正接触带中的矽卡岩型铜多金属矿床; 3) 产于内接触带中的云英岩型铜多金属矿床。

2 样品的采集和分析方法

2.1 样品的采集及岩石矿物学特征

本次研究样品为钻孔样品及坑道样品, 主要有两种岩性, 分别为黑云母二长花岗岩和黑云母花岗岩。

黑云母二长花岗岩: 似斑状结构, 块状构造。斑晶成分主要为斜长石和钾长石, 基质成分主要为斜长石、钾长石和黑云母。斜长石为自形-半自形板状, 部分蚀变为绢云母, 斜长石斑晶粒径为 2.5~0.3 cm, 斜长石基质为 0.3~0.2 mm, 斜长石含量为 32%左右; 钾长石为半自形板状-他形粒状, 可见卡斯巴斯双晶, 钾长石斑晶粒径为 2.0~0.8 cm, 钾长石基质为 0.3~0.21 mm, 钾长石含量为 30%左右; 石英为他形粒状, 粒径 1.0~0.1 mm, 含量为 30%左右; 黑云母为半自形鳞片状, 粒径 0.3~0.2 mm, 含量 8%左右。

黑云母花岗岩: 花岗结构、块状构造。主要矿物成分为斜长石、钾长石、石英和黑云母。斜长石为自形-半自形板状, 粒径 2.5~0.3 mm, 可见卡-钠复合双晶, 部分蚀变为绢云母, 含量为 30%左右; 钾长石为半自形板状-他形粒状, 粒径 2.0~0.2 mm, 可见卡斯巴斯双晶, 以条纹长石(612-14 和 612-16)为主, 部分蚀变为高岭石, 含量为 35%左右; 石英为他形粒状, 粒径 1.0~0.1 mm, 含量为 25%左右; 黑云母为半自形鳞片状, 粒径 0.3~0.2 mm, 含量为 10%左右。

2.2 主量元素、稀土元素和微量元素分析方法

用于测试的样品分别为黑云母二长花岗岩和黑云母花岗岩, 样品 6 件(X725-3、612-3、612-5、612-9、612-14 和 612-16), 其中 X725-3、612-3、612-5 为黑云母二长花岗岩, 612-9、612-14 和 612-16 为黑云母花岗岩。与成矿直接相关的是黑云母二长花岗岩, 野外观察显示有矿化蚀变现象。样品分析在武汉综合岩矿测试中心用 X 荧光光谱仪(XRF)完成, 分析误差控制在 2%以内。分析数据列于表 1~3。

表1 新生矿区花岗岩体常量元素含量及参数

Table 1 Major element contents and some parameters of Xinsheng granites

Lithology	Sample	w/%											A/CNK	A/NK	NK/A
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅			
Biotite monzogranite	X725-3	70.4	12.92	0.76	3.6	1.91	0.47	5.2	2.88	0.44	0.06	0.14	0.93	1.25	0.8
	612-3	71.18	13.36	0.5	2.37	1.99	0.6	6.56	1.76	0.4	0.04	0.15	0.98	1.34	0.75
	612-5	71.7	13.15	0.68	2.65	2.18	0.41	5.44	2.3	0.45	0.04	0.17	0.96	1.36	0.74
	612-9	74.46	12.51	0.37	2.13	1.34	0.3	5.38	2.33	0.3	0.03	0.08	1.03	-	0.77
Biotite granite	612-14	76.01	12.46	0.26	1.27	0.84	0.19	5.56	2.42	0.15	0.02	0.04	1.08	-	0.8
	612-16	77.03	12.05	0.26	1.2	0.58	0.18	5.34	2.3	0.15	0.02	0.04	1.13	-	0.79

表2 新生矿区花岗岩体稀土元素含量及参数

Table 2 Rare earth element contents and some parameters of Xinsheng granites

Lithology	Sample	w/10 ⁻⁶										
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
Biotite monzogranite	X725-3	132	247.7	27.1	92.7	17.8	1	16.2	2.5	14.4	2.7	7.7
	612-3	109.8	197.7	22.7	75.7	13.9	1.5	11.7	2	10.3	2	5.6
	612-5	30.1	68.1	9.9	40.1	10.6	1.2	9.7	1.9	10.8	2.1	6.2
	612-9	101.5	187.5	22.6	76.7	15.9	0.7	14.1	2.6	14.1	2.7	7.7
Biotite granite	612-14	85.8	155.2	18.1	58.6	11.3	0.5	10.3	1.9	11.3	2.4	7.3
	612-16	90.2	161.6	18	56.4	10.2	0.5	8.7	1.5	8	1.6	4.6

Lithology	Sample	w/10 ⁻⁶							LREE/HREE	δEu	(La/Yb) _N
		Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE			
Biotite monzogranite	X725-3	1.1	7.5	1.1	78.6	571.3	518	53.1	9.77	0.19	11.4
	612-3	0.9	5.5	0.8	57.3	460.2	421	38.9	10.8	0.35	12.8
	612-5	1	6.4	1	71	199.2	160	39.2	4.09	0.35	3.05
	612-9	1.2	7.7	1.2	81.8	456.2	405	51.2	7.91	0.15	8.56
Biotite granite	612-14	1.2	7.8	1.2	68.6	372.8	329	43.3	7.61	0.15	7.16
	612-16	0.7	4.5	0.7	47.9	367.2	337	30.2	11.1	0.15	12.9

表3 新生矿区花岗岩体微量元素含量

Table 3 Trace element contents of Xinsheng granites

Lithology	Sample	w/10 ⁻⁶										
		Rb	Ba	Th	U	Nb	Sr	Nd	Zr	Hf	Sm	Ga
Biotite monzogranite	X725-3	488.2	516	83.5	20.4	40.4	73.5	92.7	286	9.9	17.8	27.4
	612-3	429.3	545	55.2	13.6	37.1	112	75.7	261	8.3	13.9	25.4
	612-5	363.4	356	41.3	14.7	12.4	102	40.1	282	9.3	10.6	23.4
	612-9	491.8	165	75.5	20.7	39.7	48.7	76.7	237	7.7	15.9	25
Biotite granite	612-14	486.8	133	69.8	18.1	28.2	35.9	58.6	149	5.1	11.3	23.2
	612-16	441.3	101	83.4	20.7	11.2	31.4	56.4	168	5.4	10.2	22.2

2.3 锆石的分选和分析流程

用于锆石定年和 Hf 同位素的样品为来自矿区深采坑道揭露的黑云母二长花岗岩(X725-3)。样品处理首先采用常规方法将岩石样品粉碎至 150~178 μm , 并用浮选和电磁选方法进行分选, 再在双目镜下挑选出晶形好、透明度高、无裂纹和包裹体少的锆石晶体进行制靶, 并对靶上的待测样品分别进行透射光与发射光照相进而选取锆石微区分析靶位。将锆石颗粒粘在双面胶上, 然后用无色透明的环氧树脂固定, 待环氧树脂充分固化后, 对其表面进行抛光至 2/3 厚度。在开始锆石 U-Pb 分析前, 先进行阴极发光(CL)图像分析, 以确定锆石颗粒的内部结构。锆石的反射光和透射光显微照相以及阴极发光(CL)显微照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室扫描电镜实验室完成。

锆石原位 U-Pb 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 LA-ICPMS 仪器上按标准测定程序进行。激光剥蚀系统为备有 193 nm ArF-excimer 激光器的 Geolas200M(Microlas Gottingen Germany), 激

光剥蚀斑束直径为 30 μm , 剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。分析时采用 He 作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化, 锆石年龄测定采用国际标准锆石 91500、GJ-1 作为外标标准物质, 外标校正方法为每隔 5 个个样品分析点测一次标准, 保证标准和样品的仪器条件完全一致。样品的同位素比值和元素含量数据采用 ICPDATA CAL^[3]程序计算, 并采用 Andersen(2002)^[4]软件对测试数据进行普通铅校正, 年龄计算和成图采用年采用 Isoplot3.0 软件^[5]完成。分析数据列于表 4, 分析及计算误差为 1σ 。

在锆石 U-Pb 定年分析的基础上对已定年的锆石颗粒, 参照锆石 CL 图像和 U-Pb 定年的位置(即激光剥蚀的位置)选择 Lu-Hf 同位素测定点, 点位与 U-Pb 的位置一致。实验在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。分析时激光束斑直径控制在 44 μm 。采用标准锆石 91500, MON-1 和 GJ-1 作外部标样。分析过程和数据处理及校正参数见文献^[6]。分析数据列于表 5。

表 4 新生矿区花岗岩锆石 U-Pb 同位素组成及年龄

Table 4 Zircon U-Pb isotope compositions and ages of Xinsheng granites

Sample	$w/10^{-6}$				Isotope ratio			Age/Ma		
	Pb	²³² Th	²³⁸ U	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U $\pm 1\sigma$	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U $\pm 1\sigma$	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th $\pm 1\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U $\pm 1\sigma$	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U $\pm 1\sigma$	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th $\pm 1\sigma$
X725-3-2	19.72	170.10	445.44	0.38	0.154 09 \pm 0.004 74	0.022 26 \pm 0.000 18	0.005 87 \pm 0.000 12	146 \pm 4	142 \pm 1	118 \pm 2
X725-3-4	20.32	187.57	444.21	0.42	0.144 91 \pm 0.004 99	0.022 46 \pm 0.000 20	0.005 52 \pm 0.000 11	137 \pm 4	143 \pm 1	111 \pm 2
X725-3-5	22.35	199.06	505.93	0.39	0.140 24 \pm 0.004 44	0.022 07 \pm 0.000 17	0.005 51 \pm 0.000 10	133 \pm 4	141 \pm 1	111 \pm 2
X725-3-9	22.85	209.80	542.29	0.39	0.140 26 \pm 0.003 54	0.022 51 \pm 0.000 17	0.005 74 \pm 0.000 09	133 \pm 3	143 \pm 1	116 \pm 2
X725-3-10	25.04	216.79	528.46	0.41	0.151 21 \pm 0.003 78	0.023 66 \pm 0.000 21	0.006 70 \pm 0.000 11	143 \pm 3	151 \pm 1	135 \pm 2
X725-3-11	18.34	176.35	445.25	0.40	0.148 07 \pm 0.003 93	0.022 72 \pm 0.000 19	0.005 78 \pm 0.000 11	140 \pm 3	145 \pm 1	116 \pm 2
X725-3-12	20.10	185.40	474.89	0.39	0.148 06 \pm 0.004 23	0.023 10 \pm 0.000 18	0.006 37 \pm 0.000 09	140 \pm 4	147 \pm 1	128 \pm 2
X725-3-13	21.30	187.65	476.32	0.39	0.169 10 \pm 0.004 94	0.023 86 \pm 0.000 18	0.007 12 \pm 0.000 12	159 \pm 4	152 \pm 1	143 \pm 2
X725-3-14	19.49	184.30	442.73	0.42	0.159 70 \pm 0.004 39	0.023 20 \pm 0.000 18	0.006 78 \pm 0.000 14	150 \pm 4	148 \pm 1	136 \pm 3
X725-3-16	20.34	180.67	462.94	0.39	0.165 24 \pm 0.004 44	0.023 41 \pm 0.000 19	0.007 12 \pm 0.000 11	155 \pm 4	149 \pm 1	143 \pm 2
X725-3-17	17.61	171.45	402.63	0.43	0.155 96 \pm 0.005 11	0.022 86 \pm 0.000 19	0.006 57 \pm 0.000 15	147 \pm 4	146 \pm 1	132 \pm 3

Note: σ denotes mean square error

表 5 新生矿区花岗岩锆石 Hf 同位素组成

Table 5 Zircon Hf isotope compositions of Xinsheng granites

Sample	t/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM1} /Ma	T _{DM2} /Ma	f _{Lw/Hf}
X725-3-10	151	0.015 116	0.000 582	0.282 555	0.000 018	-7.66	-4.40	975	1221	-0.98
X725-3-11	145	0.012 003	0.000 471	0.282 563	0.000 018	-7.38	-4.24	961	1208	-0.99
X725-3-12	147	0.013 935	0.000 537	0.282 559	0.000 015	-7.54	-4.37	969	1217	-0.98
X725-3-14	148	0.013 848	0.000 537	0.282 518	0.000 016	-8.99	-5.79	1030	1290	-0.98
X725-3-16	149	0.016 063	0.000 623	0.282 564	0.000 016	-7.36	-4.15	964	1207	-0.98
X725-3-17	146	0.015 029	0.000 584	0.282 557	0.000 020	-7.61	-4.46	973	1220	-0.98

Note: $\epsilon_{Hf}(t) = \{[(^{176}Hf/^{177}Hf)_S - (^{176}Lu/^{177}Hf)_S \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0} - (^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR,0} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1\} \times 10\ 000$, $T_{DM1} = 1/\lambda \times \ln\{1 + [(^{176}Hf/^{177}Hf)_S - (^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM}] / [(^{176}Lu/^{177}Hf)_S - (^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM}]\}$; $T_{DM2} = T_{DM1} - (T_{DM1} - t)[(f_{CC} - f_S)/(f_{CC} - f_{DM})]$; in upper formula, T is formation time of sample, T_{DM1} is single stage modal age of Hf isotope; T_{DM2} is two stage modal age of Hf isotope; λ is decay constant of ¹⁷⁶Lu, its value is $1.867 \times 10^{-11} a^{-1}$; (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_S and (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_S are measured values of sample; σ is mean square error. (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0} and (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0} represent ratio of parent to daughter and composite of daughter isotope of present chondrite mantle, they are 0.033 2 和 0.282 772, respectively; (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM} and (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM} represent ratio of parent to daughter and composite of daughter isotope of present depleted mantle, they are 0.038 4 和 0.283 25, respectively; f_{CC} represent $f_{Lw/Hf}$ of continental crust, its value is -0.548 1; f_S represents $f_{Lw/Hf}$ of measured sample, f_{DM} represents the $f_{Lw/Hf}$ of depleted mantle, its value is 0.156 6.

3 结果与讨论

3.1 岩石地球化学特征

3.1.1 常量元素特征

从表 1 可以看出, 矿区隐伏岩体 SiO₂ 含量为 70.40%~77.03%, 平均含量为 73.50%, K₂O 含量为 5.20%~6.56%, 平均含量为 5.58%; Na₂O 含量为 1.76%~2.88%, 平均含量为 2.33%; 过碱指数 NK/A 为 0.74~0.80, 均小于 1, 平均 0.78。岩体总体上具高钾 ($w(K_2O) > w(Na_2O)$)、高硅、低钛(TiO₂ 平均含量为 0.32%)的特征。

在 SiO₂-K₂O 图解(见图 2(a))中, 样品全部落入高钾钙碱性系列; 在铝质-准铝质 A/NK-A/CNK 判别图解(图 2(b))中, 样品落入区域可分为两组: 第 1 组为黑云母二长花岗岩, 其 A/CNK 小于 1(0.93~0.98, 平均 0.96)而 A/NK 大于 1(1.25~1.36, 平均 1.31), 显示矿区的黑云母二长花岗岩为钙碱性花岗岩类, 第 2 组为黑云母花岗岩, 其 A/CNK 大于 1(1.03~1.13, 平均 1.08), 显示矿区的黑云母花岗岩为过铝质, 且属弱过铝质范畴($1 < A/CNK < 1.1$)。

3.1.2 稀土元素特征

如表 1 所列, 新生矿区岩体的稀土总量(不包括 Y)在 $199.20 \times 10^{-6} \sim 571.30 \times 10^{-6}$ 之间, 轻重稀土比值 (LREE/HREE)为 4.09~11.14, (La/Yb)_N 为 3.05~12.88, 平均 9.30, 具有轻稀土中等富集特征。岩体具强烈的

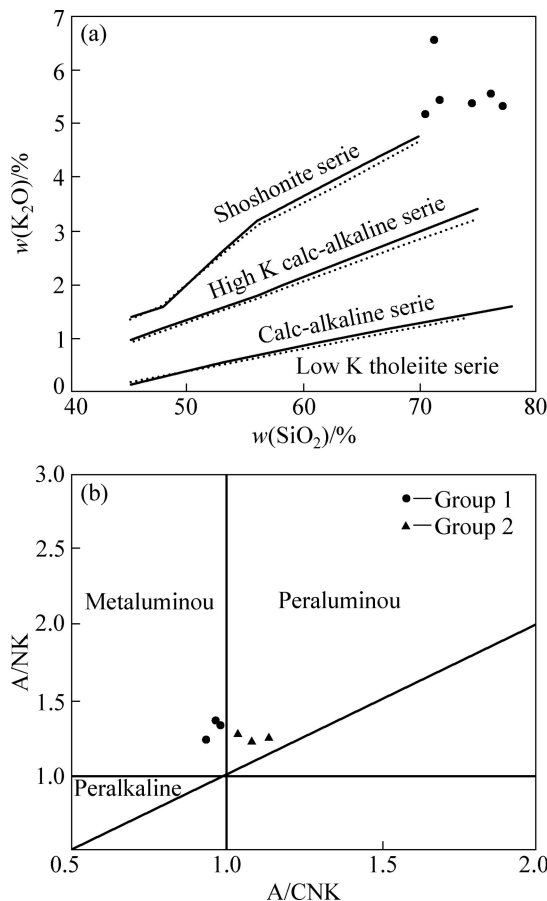


图 2 w(SiO₂)-w(K₂O)图(a)和 A/NK-A/CNK 图解(b)^[7]
 Fig. 2 w(SiO₂)-w(K₂O) diagram (a) and A/NK-A/CNK diagram (b)^[7]

Eu 负异常(δEu 为 0.15~0.35, 平均 0.22); 从稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(见图 3(a))看, 轻稀土部分相对较陡, 重稀土部分趋于平缓, 曲线呈“V”字形, 整体呈“海鸥”型分布, 显示源区部分熔融岩浆经历了较强的斜长石分离结晶作用。岩体稀土配分型式呈现非对称性型(右倾斜型)四分组效应, 该效应通常是岩浆-流体间的反应所致, 岩浆-流体间的反应不一定产生四分组效应, 非高度演化的岩石即便遭受过热液蚀变也不会出现稀土元素的四分组效应。如千里山岩体及其组成矿物如成岩矿物(如钾长石、黑云母等)和富稀土副矿物(黄玉、独居石等)均有四分组效应, 它们是由已经产生四分组效应的熔体结晶而来, 而不可能是由岩浆期后的水-岩反应形成, 该特征具有鲜明的岩浆属性^[8]。近年来的研究表明, 四分组效应仅见于高度演化的火成岩中且富 H_2O 、 CO_2 、Li、B、Cl、F 等元素, 主要为与热液发生有强烈相互作用的晚期岩浆分异物, 包括高度演化的淡色花岗岩、伟晶岩和矿化的花岗岩等^[9]。

总体看, 本区花岗岩稀土元素特征与典型高分异

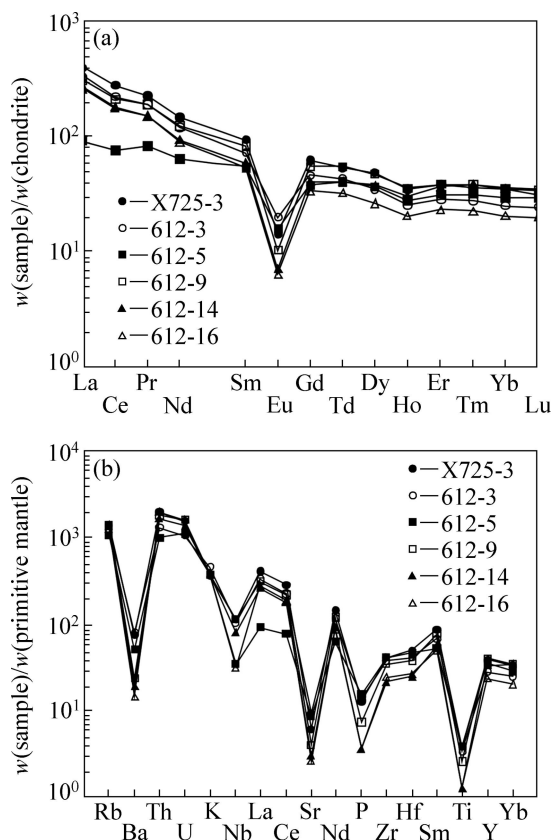


图 3 稀土元素球粒陨石标准化分布型式图和岩体原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 3 Diagram show chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and Spider diagram show primitive mantle-normalized trace elements(b) (After Ref. [10-11])

A 型花岗岩类似。

3.1.3 微量元素特征

从表 3 可以看出, 矿区岩浆岩类岩石具有较高的大离子亲石元素含量(Rb 为 363.4×10^{-6} ~ 491.8×10^{-6} ; 前 3 个样品 Ba 为 356.00×10^{-6} ~ 545.00×10^{-6} ; U 为 13.60×10^{-6} ~ 20.70×10^{-6}), 但 Sr 含量则出现亏损 (31.40×10^{-6} ~ 101.50×10^{-6}); 高场强元素 Ta (1.20×10^{-6} ~ 4.80×10^{-6}) 和 Hf (5.40×10^{-6} ~ 9.90×10^{-6}) 含量较低, Zr (149.10×10^{-6} ~ 285.90×10^{-6})、 Nb (11.20×10^{-6} ~ 40.40×10^{-6}) 和 Th (41.30×10^{-6} ~ 83.50×10^{-6}) 含量则较高。

从原始地幔标准化图(见图 3(b))可以看出, Rb 和 Th 为正异常, Ba 、 Nb 、 Sr 则为负异常, 另外 P 和 Ti 也出现负异常, Zr 和 Hf 则无明显异常。这些特征与大陆地壳的特征(富大离子亲石元素 Rb 、 Ba 、 U 、 Th , 富高场强元素 Zr 、 Hf , 富 Pb 、 K , 亏损 Nb 和 Ti) 相接近但不完全一致, 说明源区可能以壳源为主, 亦混有幔源物质。

3.2 锆石 U-Pb 同位素特征

本次测试所选新生矿区样品(X725-3), 剔除部分普通铅丢失严重及谐和度低($<90\%$)的测试数据, 有效锆石为 11 颗(表 4)。锆石 CL 图像(见图 4)显示锆石结晶均较好, 呈长柱状晶形, 具典型的岩浆震荡环带, 为岩浆成因锆石。锆石的 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值分布比较均衡, 为 0.38~0.43, 平均为 0.40(见表 4)。

样品 X725-3 锆石 U-Pb 年龄谱和图(见图 5)显示锆石平均年龄为 (147.5 ± 3.5) Ma (MSWD=2.6), 为黑云母二长花岗岩的成岩年龄, 对应于燕山早期的第二阶段。锆石年龄与大义山北部泥板田黑云母花岗岩体的年龄(128~148 Ma)一致^[1], 岩体岩石化学特征与大义山岩体一致^[2], 这表明新生岩体在深部可能与大义山岩体相连, 是大义山复式岩体的有机组成部分。

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素特征

从表 5 可以看出, 所有锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 471~0.000 623, 平均为 0.000 556, 远小于 0.002, 说明锆石形成以后具有较低的放射性 Hf 的积累。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.282 518~0.282 564, 平均为 0.282 553, 说明 Hf 同位素组成均一。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -5.79~-4.15, 均为 -4.57, 均小于 0, 这说明研究区无新生地壳生长, 岩浆主要源自单一地壳源区^[12]。

可以看出, 在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解中(见图 6(a)), 所有样品分析点均远离亏损地幔线, 而位于球粒陨石线和 2.5 Ga 下地壳线之间, 锆石的 Hf 两阶段模式年龄分布较

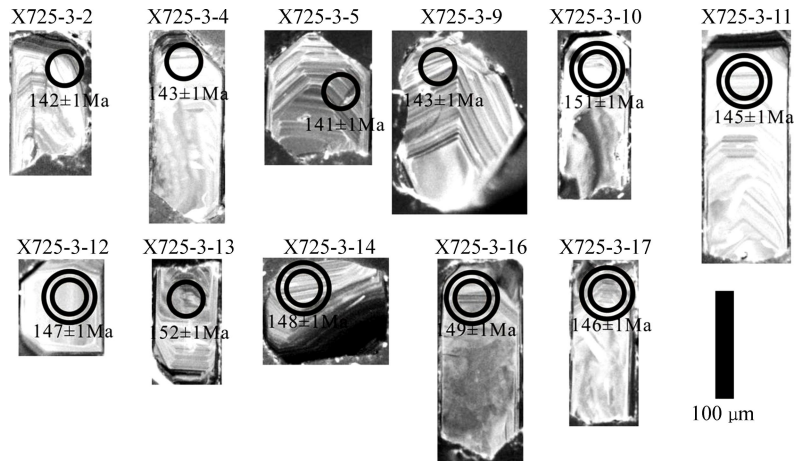


图 4 新生矿区花岗岩样品(X725-3)中锆石 CL 图像

Fig. 4 CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircons (sample X725-3) from Xinsheng granite (Illustration of label in figure: X725-3-12 denotes measuring spot number, (147±1) Ma denotes age of this spot; Circle represents position by laser ablation, the smaller is for U-Pb isotope test, bigger is for Hf isotope test. Black line is scale)

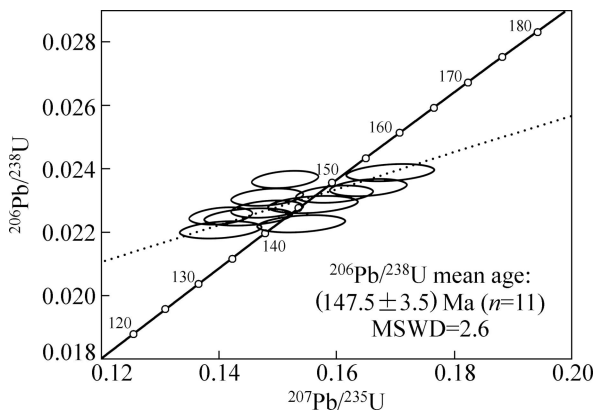


图 5 锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram

均一, 为 1.208~1.290 Ga, 平均为 1.227 Ga。说明岩体源区有古老地壳物质的加入, 主要是中元古地壳物质。

4 构造环境探讨

花岗岩构造环境判别图解(见图 6(b))显示, 本区为板内花岗岩(WPG), 反映拉张环境。矿区地处华南腹地, 该区域(200~180 Ma)处于相对平静时期, 目前没有发现该时间段有大规模岩浆活动的活动记录。在经历了这个岩浆活动相对沉寂期之后, 从 180 Ma 开始, 华南内部逐渐进入一个岩石圈“伸展-减薄”的地球动力学环境, 而从 160 Ma 左右开始, 贯穿整个晚侏罗世(J_3), 华南全面进入岩石圈“伸展-减薄”的地球动力学环境^[13]。岩石圈伸展-拉张-减薄, 为地幔物质的

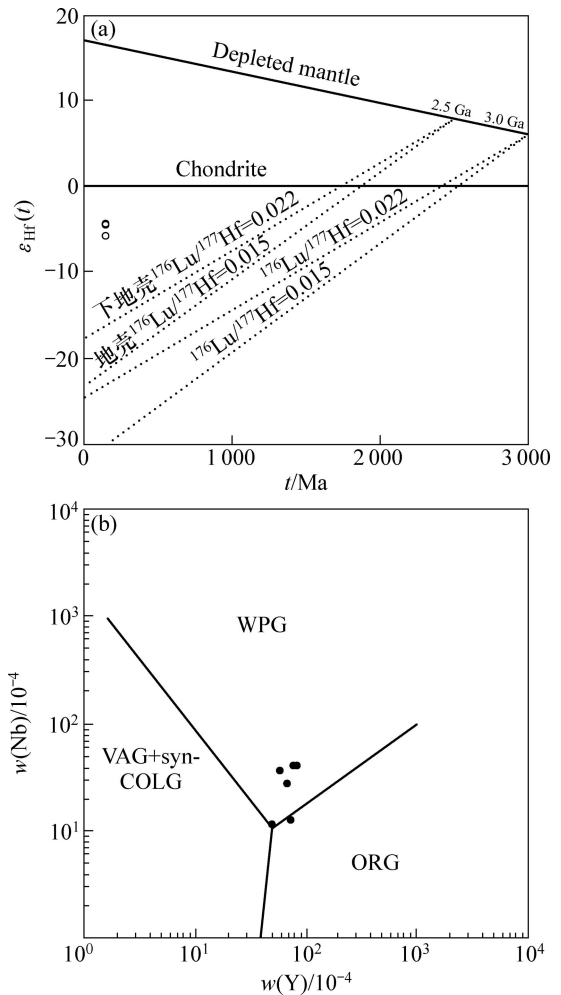


图 6 新生矿区隐伏岩体锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解和花岗岩构造环境判别图解^[14-16]

Fig. 6 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ diagram of zircon of Xinsheng granite (a) and diagrams for discrimination of tectonic background of granite (b)^[14-16] (VAG-Volcanic arc granite; syn-COLG-syn-collision granite; WPG-Within plate granite; ORG-ocean ridge granite)

上涌提供了有利条件,地幔上涌造成玄武岩浆发生底侵作用,造成下地壳温度升高,加热和软化了岩石圈下地壳,这有利于A型花岗岩的形成。其中部分花岗岩质岩浆在演化后期能够发生强烈的岩体-熔体相互作用,导致出现与高分异花岗岩有关的W、Sn矿床的形成。

本区花岗岩的 $10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ 值在3.47~4.00之间,平均3.62,明显高于世界M、I和S型花岗岩的相应值,而与世界上的一些A型花岗岩接近(世界A、M、I和S型花岗岩的 $10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ 平均值分别为3.75、1.87、2.28和2.25^[17])。在A型花岗岩的Zr- $10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ 判别图解(见图7(a))样品全部落入A型花岗岩区域内。在A型花岗岩的分类图(见图7(b))中,样品全部落入A2(造山后的A型花岗岩)区域内,代表造山作用的结束,其地球动力学环境由挤压转变为拉张。

矿区位于大义山岩体的东南端,而离大义山不远

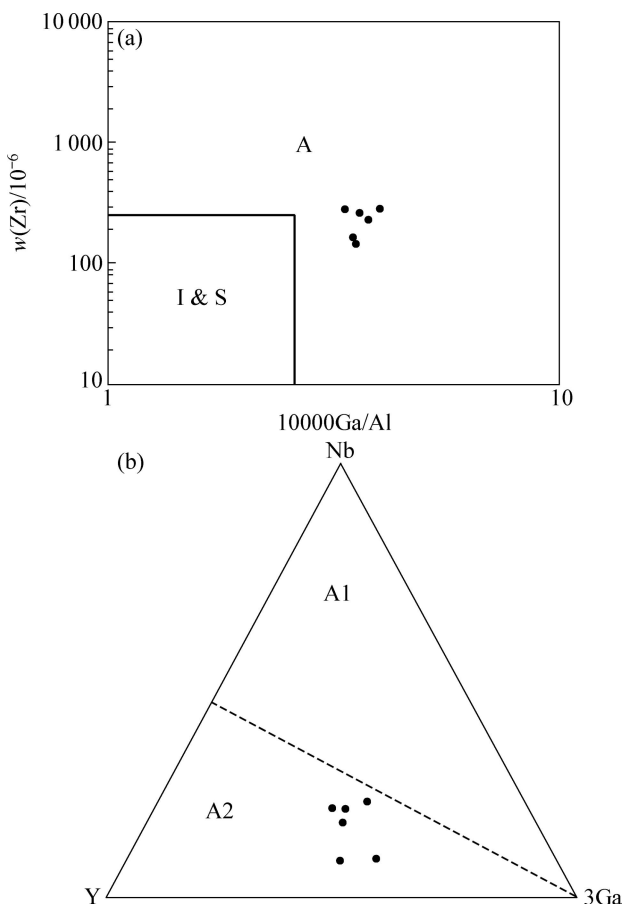


图7 A型花岗岩Zr- $10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ 关系图A型花岗岩的A1亚类和A2亚类判别图^[18-19]

Fig. 7 Diagram of A-type granites of Zr- $10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ (a) and Sub-class of A-type granites of A1 and A2 subclass discriminant diagram (b)^[18-19] (A1—Anorogenic A-type granites; A2—Post-orogenic A-type granites)

的千里山复式岩体其主要岩性为黑云母二长花岗岩,长久以来一直被认为是S型花岗岩,尽管岩体有黑云母等含水矿物的存在,但有学者指出千里山复式岩体实际上更符合A型花岗岩的特征^[20]。同样,前人一般认为大义山岩体为S型花岗岩,但根据前文及本文分析,矿区及大义山岩体实际上应该为A型花岗岩。据勘探资料表明,本区以铜矿为主,另有一定量的锡产出。另外,整个大义山地区均有锡矿(多与铜矿相伴生)产出,而锡矿床以往被认为只与S型花岗岩或陆壳改造型(南岭型)花岗岩密切相关。近年来的研究表明,锡矿床与A型花岗岩也密切相关,如湖南芙蓉锡矿田就是与A型花岗岩有关的一个超大型锡矿田^[21-22]。另外,有学者指出南岭地区的A型花岗岩常伴随有锡矿化^[23]。

5 结论

1) 矿区隐伏花岗岩体为黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩,岩石地球化学特征显示为钙碱性-弱过铝质花岗岩,岩石稀土元素分布具有非对称四分组效应,具有过铝质A型花岗岩的特征。

2) 与成矿直接相关的黑云母二长花岗岩的锆石U-Pb年龄为 (147.5 ± 3.5) Ma(MSWD=2.6),其形成时代为晚侏罗世(J_3),属燕山早期运动的第二阶段。

3) 微量元素地球化学判别图解显示燕山早期本区为板内构造环境,花岗岩为造山后(A2型)花岗岩,其地球动力学环境为板内拉张背景。锆石的Hf同位素测试结果显示 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-5.79~-4.15,计算的两阶段模式年龄 T_{DM2} 为1.208~1.290 Ga,平均1.227 Ga,反映岩浆源区有中元古代的古地壳物质。花岗岩是早期增厚的中下地壳在燕山早期发生熔融上侵到浅部地壳冷凝固晶形成,岩浆经过充分分异,晚期热液中富含挥发份及成矿物质,在与灰岩的接触带形成矽卡岩型矿体。

致谢: 锆石测试得到西北大学大陆动力学国家重点实验室袁洪林教授、柳小明高工、弓虎军博士、戴梦宁博士的支持,数据处理得到阳杰华博士的协助。承蒙匿名审稿人提出的宝贵修改意见,谨此一并致以诚挚谢意!

REFERENCES

[1] 伍光英,潘仲芳,侯增谦,李金冬,车勤建,陈辉明. 湖南大

- 义山锡多金属矿田矿体分布规律、控矿因素及找矿方向[J]. 地质与勘探, 2005, 41(2): 6-11.
- WU Guang-ying, PAN Zhong-fang, HOU Zeng-qian, LI Jin-dong, ChE Qin-jian, CHEN Hui-ming. Ore body distribution pattern, ore-controlling factors and prospecting potentiality in the Dayishan tin deposit, Hunan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2005, 41(2): 6-11.
- [2] 费利东, 全铁军, 孔 华, 王 高, 郭碧莹. 湖南省永兴县新生矿区隐伏岩体地质地球化学特征及其与成矿的关系[J]. 地质与勘探, 2012, 48(1): 110-118.
- FEI Li-dong, QUAN Tie-jun, KONG Hua, WANG Gao, GUO Bi-ying. Geological and geochemical characteristics of the concealed granite orebodies in the Xinsheng ore district and their relationship with metallogeny in Yongxing County, Hunan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(1): 110-118.
- [3] LIU Y S, GAO S, HU Z C, GAO C G, ZONG K Q, WANG D B. 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 of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [4] ANDERSEN T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [5] LUDWIG K R. User's Manual for Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for microsoft excel[M]. California: Berkeley Geochronology Center. Special Publication, 2003, 4a: 1-71.
- [6] YUAN H L, GAO S, DAI M N, ZONG C L, GÜNTHER D, FONTAINE G H, LIU X M, DIWU C R. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 110-118.
- [7] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247-263.
- [8] 赵振华, 熊小林, 韩小东. 花岗岩稀土元素四分组效应形成机理探讨——以千里山和巴尔哲花岗岩为例[J]. 中国科学: D 辑, 1999, 29(4): 331-338.
- ZHAO Zhen-hua, XIONG Xiao-lin, HAN Xiao-dong. A discussion of the mechanism of REE tetrad effect of granites[J]. *Science in China: Series D*, 1999, 29(4): 331-338.
- [9] 薛怀民, 汪应庚, 马 芳, 汪 诚, 王德恩, 左延龙. 高度演化的黄山 A 型花岗岩: 对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄的约束[J]. 地质学报, 2009, 83(2): 247-259.
- XUE Huai-min, WANG Ying-geng, MA Fang, WANG Cheng, WANG De-en, ZUO Yan-long. The Huangshan A-type granites with tetrad REE: Constraints on mesozoic lithospheric thinning of the southeastern Yangtze craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(2): 247-259.
- [10] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 171-181.
- LI Chang-nian. *Igneous trace element petrology*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992: 171-181.
- [11] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
- LU Yuan-fa. Geokit: A geochemical toolkit for Microsoft excel[J]. *Geochimica*, 2004, 33(5): 459-464.
- [12] HAWKESWORTH C, KEMP A I S. Evolution of the continental crust[J]. *Nature*, 2006, 443: 811-817.
- [13] 郭春丽. 赣南崇义-上犹地区与成矿有关中生代花岗岩类的研究及对南岭地区中生代成矿花岗岩的探讨[D]. 北京: 中国地质科学院, 2010: 113-152.
- GUO Chun-li. Study on mineralization-related Mesozoic Granitoids in Chongyi-Shangyou Counties, South Jiangxi and comparison to corresponding Granitoids in the Nanling Region, South China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2010: 113-152.
- [14] NOWELL G M, KEMPTON P D, NOBLE S P, FITTON J G, SAUNDERS A D, MAHONEY J J, TAYLOR R N. Highprecision Hf isotope measurements of MORB and OIB by thermal ionisation mass spectrometry: Insights into the depleted mantle[J]. *Chemical Geology*, 1998, 149(3/4): 211-233.
- [15] VERVOORT J D AND BLICHERT-TOFT J. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3/4): 533-556.
- [16] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [17] 肖庆辉, 王 涛, 邓晋福, 莫宣学, 卢欣祥, 洪大卫, 谢才富, 罗照华, 邱瑞照, 王晓霞. 中国典型造山带花岗岩与大陆地壳生长研究[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1-528.
- XIAO Qing-hui, WANG Tao, DENG Jin-fu, MO Xuan-xue, LU Xin-xian, HONG Da-wei, XIE Cai-fu, LUO Zhao-hua, QIU Rui-zhao, WANG Xiao-xia. Granitoids and continent growth of key orogene in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 1-528.
- [18] WHALEN J B, CURRIE K L and CHAPPELL B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407-419.
- [19] EBY G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20(7):

- 641-644.
- [20] 赵振华, 包志伟, 张伯友. 柿竹园超大型钨多金属矿床形成的壳幔相互作用背景[J]. 中国科学: D 辑, 2000, 30(S1): 161-168.
- ZHAO Zhen-hua, BAO Zhi-wei and ZHANG Bo-you. The background of Crust-Mantle interaction in super tungsten deposit in Shizhuyuan[J]. Science in China: Series D, 2000, 30(S1): 161-168.
- [21] 李兆丽. 锡成矿与 A 型花岗岩关系的地球化学研究——以湖南芙蓉锡矿田为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2006: 72-75.
- LI Zhao-li. Geochemical relationship between tin mineralization and A-type granite: A case of the Furong Tin orefield, Hunan Province, South China[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006: 72-75.
- [22] 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 凌洪飞, 倪培. 华南与花岗岩有关的一种新类型的锡成矿作用矿物化学、元素和同位素地球化学证据分[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2509-2516.
- JIANG Shao-yong, ZHAO Kui-dong, JIANG Yao-hui, LING Hong-fei and NI Pei. New type of tin mineralization related to granite in South China: Evidence from mineral chemistry, element and isotope geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10): 2509-2516.
- [23] 朱金初, 陈骏, 王汝成, 陆建军, 谢磊. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 474-484.
- ZHU Jin-chu, CHEN Jun, WANG Ru-cheng, LU Jian-jun and XIE Lei. Early Yangshanian NE trending Sn/W-Bearing A-type granites in the Western-Middle part of the Nanling Mts Region[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4): 474-484.

(编辑 李艳红)