赣南大吉山五里亭岩体的锆石 ELA-ICP-MS 定年及其与钨成矿关系的新认识

邱检生[1)] McInnes B I A[2)] 徐夕生[1)] Allen C M[3)]
1) 南京大学成矿作用国家重点实验室,210093
2) CSIRO Division of Exploration and Mining, PO Box 136, North Ryde, NSW 2113, Australia
3) Research School of Earth Sciences, Australian National University, 2006 Canberra, Australia

内容提要 .大吉山是南岭地区一个著名的大型钨多金属矿床,五里亭岩体是矿区出露规模最大的火成岩体,岩性为中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩。锆石 ELA-ICP-MS 定年结果表明其形成年龄为237.5±4.8 Ma,属印支期岩浆活动的产物。与南岭地区典型钨多金属矿床成矿岩体相比,五里亭岩体贫硅,富钙、镁、铁,Rb/Sr、Rb/Ba 和 U/Th 比值低,K/Rb 比值高,铕负异常不显著,分异指数低,尚未达到矿化岩体的分异演化程度,不具备矿化岩体的地球化学特征。元素—同位素综合示踪显示区内白云母碱长花岗岩为五里亭岩体经高度分异演化的产物,它与钨多金属矿成矿直接有关。矿区范围内出露的闪长岩起源于地幔,这一岩浆侵位所引起的高热场环境有利于花岗质岩石的形成与演化,对成矿具有重要的意义。

关键词 锆石 ELA-ICP-MS 定年 地球化学 钨成矿作用 赣南大吉山

大吉山矿区位于江西省西南部,是南岭地区一个典型的集石英脉型钨矿、花岗岩型钨-钽(铌、铍)矿于一体的大型稀有多金属矿床。五里亭岩体是矿田范围内出露规模最大的火成岩体,岩性为中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩。前人认为该岩体与矿区深部隐伏的中细粒白云母碱长花岗岩为同源不同阶段的产物,二者共同构成区内与钨多金属矿有关的复式成矿岩体,并分别获得了167 Ma 和161～159 Ma 的全岩 Rb-Sr 等时线年龄(孙恭安等,1989)。但五里亭岩体也有187 Ma 的 K-Ar 年龄报道❶,显示其成岩年龄尚有不确定性。此外,该岩体的地质地球化学特征与南岭地区典型钨多金属矿成矿岩体也存在较显著差别。为此,笔者等运用新近发展起来的高精度的 ELA-ICP-MS 定年技术,对五里亭岩体的成岩年龄进行了精确测定,并根据新获得的地球化学资料,对其与钨多金属矿的成矿关系进行了进一步的探讨。

1 地质概况

矿区范围内出露的地层主要为寒武系中、上统浅变质砂岩夹砂质板岩及板岩,仅在东南部有泥盆系中、下统砂砾岩分布(图1)。岩浆岩除有五里亭粗粒似斑状黑云母二长花岗岩及矿区深部隐伏的中细粒白云母碱长花岗岩外,尚有中基性的闪长岩脉(墙)。五里亭岩体侵入于寒武系中上统浅变质砂板岩中,出露面积约20 $km^2$❷,在平面上呈椭圆形,长轴沿 NEE 向延伸(图1),主体岩性为中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩,在岩体边缘的局部地段可见中细粒斑状石英二长岩,但总体相带构造不明显。野外可见闪长岩和白云母碱长花岗岩穿截黑云母二长花岗岩,以及白云母碱长花岗岩穿截闪长岩的现象。因此,从时序上,五里亭岩体形成最早,随后闪长质岩浆侵入,最后形成矿区深部隐伏的白云母碱长花岗岩。石英脉型钨矿床位于五里亭岩体之南约4 km 处,二者在空间上缺乏紧密联系。矿脉走向 NWW,可分为北、中、南三组,北组和南组矿脉的围岩均为寒武系浅变质岩,中组矿脉分布在闪长岩墙内(图1)。花岗岩型 W-Ta(Nb、Be)矿床隐伏于石英脉型钨矿床的深部,矿体即为中细粒白云母碱长花岗岩的顶部相——细粒白云母碱长花岗岩,钻孔剖面上可见中组、北组矿脉下延切过细粒白云母碱长花岗岩而尖灭于深部的中细粒白云母碱长花岗岩中,说明

注:本文为国家自然科学基金(编号 40132010)、国家创新研究群体科学基金(编号 40221301)和国家杰出青年科学基金项目(编号 40125007)资助成果。
本文2003-05-28收到;2003-10-31改回;刘淑春编辑。
作者简介:邱检生,男,1965年生,博士,教授。主要从事花岗岩、火山岩及其与成矿关系研究。通讯地址:210093,南京大学地球科学系;Email: jsqiuwyh@public1.ptt.js.cn。

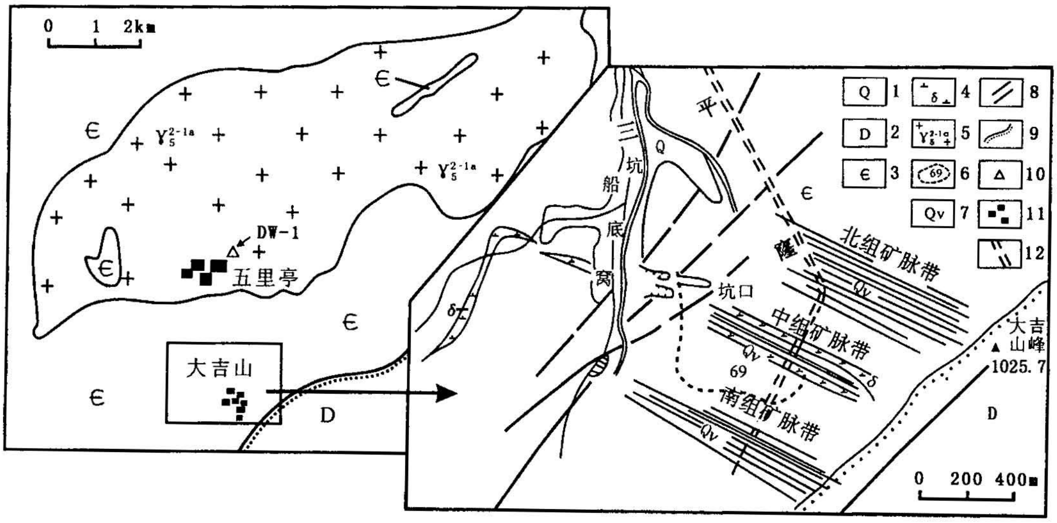

图 1　大吉山矿区地质略图

Fig. 1　Sketch geological map of Dajishan mine

1—第四系；2—泥盆系；3—寒武系；4—闪长岩；5—燕山早期似斑状黑云母二长花岗岩（五里亭岩体）；6—隐伏的白云母碱长花岗岩；7—含钨石英脉；8—断裂；9—不整合面；10—锆石定年样采样位置；11—居民点；12—采矿平巷

1—Quaternary; 2—Devonian; 3—Cambrian; 4—diorite; 5—early Yanshanian porphyroid biotite adamellite (the Wuliting pluton); 6—buried muscovite alkali-feldspar granite; 7—tungsten-bearing quartz vein; 8—fault; 9—unconformity plane; 10—locality of the sample for zircon dating; 11—residential area; 12—horizontal mining tunnel

石英脉型钨矿成矿作用发生在花岗岩型 W-Ta(Nb、Be)矿化之后，且二者与五里亭岩体的成岩应存在较显著的时差。

2　锆石 ELA-ICP-MS 定年

2.1　样品及分析方法

本次定年的样品采自大吉山钨矿矿部大楼NE56°方向约300 m 处公路旁，具体采样位置示于图1。样品岩性为中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩，其组成矿物为钾长石（主要为微斜长石，约35％）、斜长石（An= 25～35，约25％）、石英（25％±）和黑云母（10％±），副矿物有磁铁矿、榍石、锆石、磷灰石和褐帘石等。样品无明显矿化蚀变，总体较新鲜。经人工重砂分离出的锆石以自形晶为主，呈柱状或短柱双锥状，无色—浅褐黄色，表面无熔蚀磨圆现象，表明为岩浆结晶锆石。

锆石 ELA-ICP-MS 定年技术是近年来发展起来的新方法，具有快速、经济及可对锆石不同区域同时测定等优点，其精确度与 SHRIMP 方法基本相同(Ballard et al., 2001; Kosler et al., 2002)。本次实验在澳大利亚国立大学地球科学研究所 ICP-MS 实验室完成。将经重砂分离出来的锆石装在环氧树脂中并抛光，再通过阴极发光及光学显微镜观察，选出裂隙及包裹体均不发育的锆石晶体以备测试之用。激光熔样在脉冲 ArF LambdaPhysik LPX 1201 UV Excimer 激光发生器中进行，激光熔样点直径为29 μm，穿透深度约30 μm。用 Ar-He 混合气体将激光熔化的物质送入 Agilent 7500 ICP-MS 质谱中测定，^{39}Si，^{96}Zr，^{31}P，^{206}Pb，^{207}Pb，^{208}Pb，^{232}Th 和^{238}U 的计数通过时间判别模型收集。由于载气的^{204}Hg 本底高，因此没有测定^{204}Pb，在定年过程中测定的其他元素还包括^{139}La，^{140}Ce，^{146}Nd，^{175}Lu 和^{178}Hf。实验采用的标样为锆石 TEMORA 和 NIST612硅酸盐玻璃，通过监测 TEMORA 的^{207}Pb/^{206}Pb，^{206}Pb/^{238}U 和^{208}Pb/^{232}Th 比值及 NIST612的^{232}Th/^{238}U 比值以对每个测试点进行仪器质量偏差及与深度有关的元素和同位素分馏校正。为了减少继承铅、铅丢失等对年龄的影响，在^{207}Pb/^{235}U-^{206}P6/^{238}U 谐和图中谐和度低于95％的测定数据不参加最终年龄的计算。另外，如果出现异常高的 La(>3 ×10^{-6})或 P(>500 ×10^{-6})含量，指示测定的样品中可能存在磷灰石包裹体，由于磷灰石的普通铅含量高(Watson et al., 1997)，因此，这些样品的测试数据也将被排除。

2.2　结果和讨论

本次研究共测定了36个锆石点年龄，其中4个点(No. 6, 8, 31, 32)由于太高的普通铅及含包体等

原因未能获得合理结果，剩余32个锆石点的测定结果列于表1。由于年轻锆石中^{206}Pb、^{238}U 的丰度较大，其比值容易测准，且受扣除实验空白及样品中初始普通铅的影响较小，因此样品的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值精度较高。图2为32个锆石测定点的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄频数分布直方图，可以看出，被测锆石的年龄可分为3组，其中年龄值主要变化于216～254 Ma 之间（B组），分布在这一年龄区间的锆石点共25个，占样品总数的 78%，其中 11 个锆石点在$^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$谐和图中谐和度大于95%，且它们在累积概率分布图上基本沿一斜线分布（图3），说明它们是近于同时形成的。根据这11个锆石点数据计算的年龄统计权重平均值为237.5±4.8 Ma，MSWD 值较小（为6.2），表明所获得的年龄有较高的准确度，可以较精确地反映岩体的形成年龄。A 组年龄（共3个锆石点）明显偏新，其中14号锆石点落在谐和线上，其$^{206}Pb/^{238}U$年龄为173.5 Ma，有较高的可信度，指示在173.5 Ma 左右岩体受到过热事件的扰动，结合区内各岩浆杂岩的相互穿插关系，以及孙恭安等（1989）测得的矿区深部隐伏的中细粒白云母碱长花岗岩的 Rb-Sr 年龄（161～159 Ma）资料，推测这一热扰动事件可能代表中基性闪长质岩浆的侵位。C 组年龄（4个锆石点）明显偏老，35号锆石点的$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄接近2400 Ma，说明在成岩过程中有古老地壳物质的参与。锆石 ELA-ICP-MS 定年结果表明五里亭岩体并非前人所认为的形成于燕山期，而应为印支期岩浆活动的产物。

表 1　赣南大吉山五里亭岩体锆石 ELA-ICP-MS 定年结果

Table 1　ELA-ICP-MS dating results for zircons from Wuliting pluton at Dajishan, southern Jiangxi

测定点号	同位素原子比率						表面年龄(Ma)						备注
	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	±1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	±1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	±1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	±1σ	
1	0.09991	0.00105	0.8625	0.0373	0.0626	0.0026	612.3	6.4	658.2	27.6	804.8	31.1	
2	0.03714	0.00013	0.2660	0.0024	0.0520	0.0004	234.8	0.8	237.4	3.8	261.6	4.1	Cond.
3	0.03773	0.00037	0.2640	0.0058	0.0508	0.0010	238.8	2.3	228.4	5.4	131.1	3.0	
4	0.04052	0.00048	0.3205	0.0097	0.0574	0.0016	254.1	3.0	227.5	33.5	NC	2.5	
5	0.03560	0.00032	0.2664	0.0053	0.0543	0.0010	224.5	2.0	225.5	5.2	235.8	5.0	Cond.
7	0.03743	0.00029	0.3042	0.0077	0.0589	0.0014	234.6	1.9	217.3	11.3	NC	2.7	
9	0.03725	0.00014	0.2674	0.0036	0.0521	0.0007	235.5	0.9	236.3	9.5	243.5	9.7	Cond.
10	0.03990	0.00034	0.3425	0.0224	0.0622	0.0040	249.0	2.4	300.5	21.5	NC	40.5	
11	0.03428	0.00019	0.2561	0.0035	0.0542	0.0007	216.3	1.2	219.2	3.2	248.5	3.3	
12	0.03643	0.00020	0.2603	0.0041	0.0518	0.0008	230.4	1.3	232.8	9.3	254.8	9.9	Cond.
13	0.03233	0.00017	0.6908	0.0139	0.1550	0.0030	179.1	1.2	176.4	17.2	NC	17.9	
14	0.02728	0.00015	0.1869	0.0025	0.0497	0.0006	173.5	1.0	173.2	2.4	170.1	2.2	Cond.
15	0.11950	0.00069	1.0951	0.0161	0.0665	0.0009	725.3	4.0	709.3	18.0	663.9	16.9	Cond.
16	0.04029	0.00060	0.3941	0.0090	0.0709	0.0012	248.5	3.6	232.0	15.0	NC	5.7	
17	0.02716	0.00024	0.1890	0.0044	0.0504	0.0011	172.6	1.5	161.6	4.2	NC	0.7	
18	0.03677	0.00015	0.2575	0.0035	0.0508	0.0007	232.8	1.0	241.4	9.4	319.9	12.0	
19	0.03618	0.00025	0.2561	0.0068	0.0513	0.0013	229.0	1.6	226.0	8.8	197.2	7.7	
20	0.23292	0.00130	2.6620	0.0299	0.0829	0.0008	1355.2	6.9	1334.7	12.4	1306.9	11.5	Cond.
21	0.03789	0.00017	0.2692	0.0022	0.0515	0.0003	239.6	1.1	241.2	3.4	256.0	3.4	Cond.
22	0.03810	0.00019	0.2682	0.0032	0.0510	0.0006	241.0	1.2	239.0	4.5	221.1	4.1	Cond.
23	0.03913	0.00034	0.2796	0.0043	0.0518	0.0007	247.2	2.1	263.6	17.9	402.2	25.4	
24	0.03836	0.00024	0.2762	0.0037	0.0522	0.0006	242.3	1.5	266.8	28.1	473.2	45.2	
25	0.03997	0.00060	0.2759	0.0090	0.0501	0.0014	253.0	3.7	248.4	28.7	208.0	24.3	Cond.
26	0.03858	0.00023	0.2692	0.0043	0.0506	0.0007	244.2	1.4	239.8	4.6	200.7	3.7	
27	0.03885	0.00021	0.2789	0.0057	0.0521	0.0010	245.4	1.3	251.1	6.3	301.3	7.2	
28	0.03794	0.00049	0.2530	0.0080	0.0484	0.0014	240.8	3.1	239.6	35.7	228.9	34.1	Cond.
29	0.03918	0.00055	0.2688	0.0050	0.0498	0.0006	248.2	3.4	246.8	6.5	234.7	5.4	Cond.
30	0.03672	0.00030	0.2634	0.0047	0.0520	0.0008	232.2	1.9	229.8	15.1	207.9	13.7	
33	0.03825	0.00021	0.2638	0.0051	0.0500	0.0009	242.3	1.3	240.5	17.4	224.8	16.3	Cond.
34	0.03947	0.00026	0.2838	0.0039	0.0522	0.0006	249.3	1.6	251.9	10.8	274.6	11.5	Cond.
35	0.41563	0.00368	9.0715	0.0922	0.1583	0.0008	2198.2	16.6	2319.8	11.5	2397.3	8.2	Cond.
36	0.03815	0.00024	0.2811	0.0044	0.0534	0.0008	240.7	1.5	248.1	11.0	314.4	13.4	

注：NC 表示该测定点$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄分散，未能求得合理值；Cond. 表示该测定点在$^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 图中谐和度大于95%。

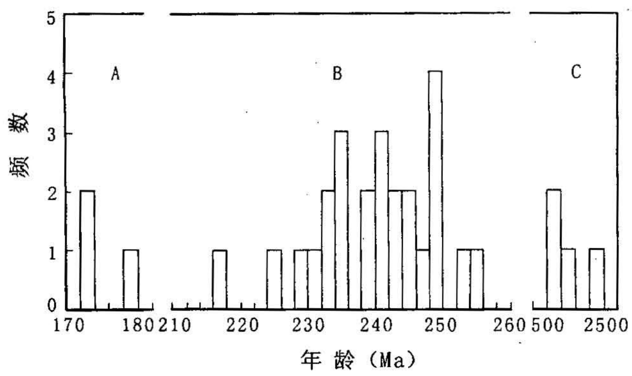

图 2 五里亭岩体锆石 U-Pb 年龄频数分布直方图

Fig. 2 Frequency histogram showing the distribution of zircon U-Pb dates of Wuliting pluton

A、B、C 分别代表170～180 Ma，210～260 Ma 和500～2500 Ma 时段锆石年龄分布图

A, B, C are frequency histograms of zircon U-Pb dates in the ranges of 170～180 Ma, 210～260 Ma and 500～2500 Ma respectively

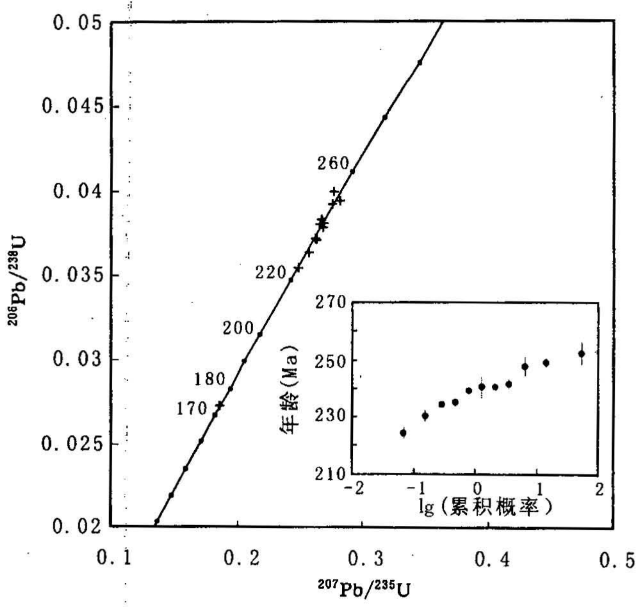

图 3 五里亭岩体锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 3 U-Pb concordia diagram for zircons from Wuliting pluton

3 五里亭岩体与南岭地区典型钨多金属矿床成矿岩体地质地球化学特征的对比

南岭地区与钨多金属矿床有关的成矿岩体主要为多期多阶段演化的复式小岩体，主要形成于燕山期，含矿岩体的出露面积多数在20 km²以下。化学成分上富硅、富碱，贫钙、镁、铁，分异演化程度高，分异指数(*DI* 值)多在86以上(地质矿产部南岭项目花岗岩专题组，1989)；微量及稀土元素组成上富 Li、Rb，Rb/Sr、Rb/Ba 比值高，K/Rb、K/Ba 及轻重稀土比值低，铕负异常显著，具有典型的"海鸥型"稀土分布型式(陈毓川等，1989；梅勇文，1994)。

五里亭岩体的地质地球化学特征与南岭地区钨多金属矿床成矿岩体存在较明显的差别。根据与西华山、千里山等典型成矿岩体的系统对比，这些差别主要体现在：① 成岩时代偏老。ELA-ICP-MS 定年结果表明五里亭岩体应形成于印支期；而西华山、千里山等南岭地区的主要含钨岩体均形成于燕山期，如西华山岩体不同方法($^{40}Ar/^{39}Ar$ 法、全岩 Rb-Sr 等时线法等)获得的成岩年龄均较接近，变化于155～148 Ma 之间(李亿斗等，1986；McKee et al.，1987)；千里山岩体全岩 Rb-Sr 等时年龄变化于152～131 Ma 之间(毛景文等，1998)。② 五里亭岩体中的黑云母相对富镁(MgO ＝ 9.42%～10.36%，$Mg^{\#}$＝0.44～0.48，表2)，而西华山、千里山岩体中黑云母的MgO含量多在5％以下，$Mg^{\#}$ 值常小于

表 2 赣南大吉山五里亭岩体中黑云母的电子探针分析结果(%)

Table 2 Microprobe analyses (%) of biotites from Wuliting pluton at Dajishan, Southern Jiangxi

点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	总量	$Mg^{\#}$
1	35.78	2.09	17.24	19.78	0.43	10.36		0.08	10.47	0.05	96.28	0.48
2	36.39	2.01	17.55	19.94	0.43	9.55	0.02	0.13	10.66	0.05	96.73	0.46
3	35.93	2.48	16.71	19.53	0.58	9.66	0.07	0.04	10.61		95.61	0.47
4	35.72	2.86	16.42	19.72	0.54	10.15		0.06	10.55		96.02	0.48
5	35.59	3.00	16.49	21.08	0.48	9.42		0.05	10.35		96.46	0.44
6	35.08	2.21	17.33	19.93	0.47	10.12		0.08	10.4	0.01	95.63	0.48
7	35.13	3.08	16.54	20.45	0.46	9.44	0.07	0.13	10.48		95.78	0.45
8	36.48	2.63	16.48	19.87	0.61	9.66	0.04	0.14	10.3	0.02	96.23	0.46

注：样品赋存岩性为中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩，采样位置同锆石定年样品，$Mg^{\#}=Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$，数据由南京大学成矿作用国家重点实验室用 JEOL JXA-8800M 电子探针仪测定，相对误差小于1%。

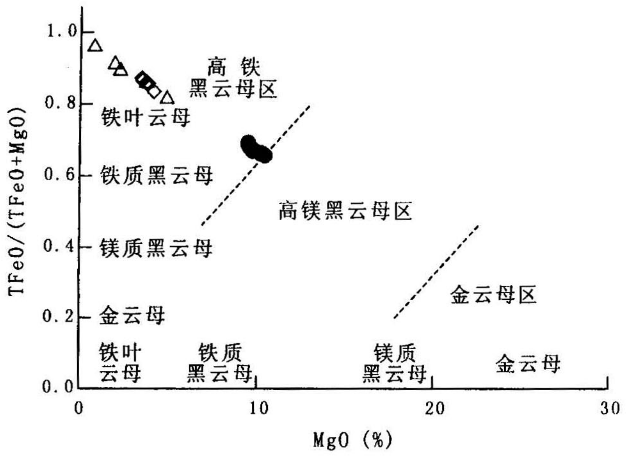

图 4　五里亭岩体中黑云母的 MgO—TFeO/(TFeO+MgO)分类图(底图据周作侠,1988)

Fig. 4　MgO vs. TFeO/(TFeO+MgO) classification diagram for biotites from Wuliting pluton (after Zhou Z X, 1988)

△—西华山黑云母二长花岗岩中的黑云母;◇—千里山似斑状黑云母花岗岩中的黑云母;●—大吉山五里亭岩体中的黑云母;西华山和千里山岩体资料分别引自地质矿产部南岭项目花岗岩专题组(1989)和毛景文等(1998)

△—Biotite from the biotite adamellite at Xihuashan; ◇—biotite from the porphyroid biotite granite at Qianlishan; ●—biotite from the Wuliting pluton at Dajishan. Biotite data of Xihuashan pluton and Qianlishan pluton are qouted from the Ganitoid Research Group of the Nanling Project, MGMR (1989) and from Mao Jingwen et al. (1998) respectively

0.25(地质矿产部南岭项目花岗岩专题组,1989;毛景文等,1998)。在矿物种属上,前者为铁黑云母,而后者主要为铁叶云母(图4,周作侠,1988)。③ 五里亭岩体相对贫硅(SiO_2=65.15%～66.32%)、贫碱(K_2O+Na_2O=7.26%～7.50%),富钙、镁、铁,分异指数较低(*DI*=73～76, 表3),在 Middlemost(1994)提出的 SiO_2-K_2O+Na_2O 图上,投影点落在花岗闪长岩/石英二长岩交界处附近,而区内白云母碱长花岗岩则与千里山、西华山岩体一样落在花岗岩区(图5),其分异演化程度也较高,分异指数达94(表3),表现出明显的超酸富碱高分异演化特征。④ 在微量元素组成上,五里亭岩体的 Rb/Sr、Rb/Ba 比值(分别为0.60～0.80和0.24～0.31,表3)远低于区内白云母碱长花岗岩(分别为35.3和110.3)及千里山、西华山等典型含矿花岗岩(图6a),而 K/Rb 比值(139.2～156.2)则显著偏高(图6b),同样反映其分异演化程度较低。Srivastava 等(1997)根据对印度 Rajasthan 地区含钨花岗岩地球化学的系统研究,并通过与世界其他地区(如中国南岭、意大利、澳大利亚)典型含钨花岗岩的广泛对比,表明矿化岩体普遍具有高的 Rb/Sr、Rb/Ba 比值和低的 K/Rb 比值,并提出了用于判别矿化与非矿化岩体的地球化学参数(GCI = lg[(Rb^3 × Li × 10^4)/(Mg × K × Ba × Sr)]),含矿岩体的 GCI 值无例外地为正值,而不含矿岩体则为负值。五里亭岩体的 GCI 值为负值(−0.90～−1.26),矿区隐伏的白云母碱长花岗岩的 GCI 值为5.10,千里山和西华山岩体的 GCI 值均为正值(图6b),上述特征说明五里亭岩体尚未达到矿化岩体的分异演化程度。⑤ 五里亭岩体的稀土元素组成特征也与矿化岩体迥异,主要表现在岩体的轻重稀土比值较大,而铕负异常则相对不明显。根据对五里亭岩体已有稀土分析资料(孙恭安等,1989;地质矿产部南岭项目花岗岩专题组,1989;杨学明等;1999)的统计,其 LREE/HREE 比值一般均在15以上,δEu 值多大于0.5,而矿区隐伏的白云母碱

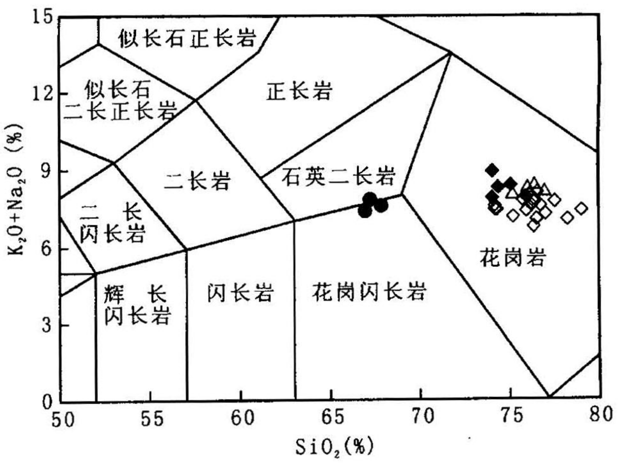

图 5　五里亭岩体 SiO_2—K_2O+Na_2O 分类图(底图据 Middlemost,1994)

Fig. 5　SiO_2 vs. K_2O+Na_2O classification diagram of Wuliting pluton (after Middlemost, 1994)

●—五里亭岩体,◆—大吉山矿区隐伏的中细粒白云母碱长花岗岩,△—西华山黑云母二长花岗岩,◇—千里山似斑状黑云母花岗岩;西华山和千里山岩体资料来源同图4,大吉山岩体除本文资料外,尚引用了孙恭安(1989)和地质矿产部南岭项目花岗岩专题组(1989)的资料

●—The Wuliting pluton; ◆—medium—fine granular muscovite alkali-feldspar granite buried under the Dajishan mine; △—biotite adamellite at Xihuashan; ◇—porphyroid biotite granite at Qianlishan; For the plutons of Xihuashan and Qianlishan, the data sources are the same as those in Fig. 4; For the plutons of Dajishan, besides the data of this study, those from Sun Gongan et al. (1989) and the Ganitoid Research Group of the Nanling Project, MGMR (1989) are also included

表 3 大吉山矿区岩浆杂岩主量、微量和稀土元素含量

Table 3 Major, trace and rare earth element contents of igneous complex at Dajishan mine

主量元素(%)						微量元素($\times10^{-6}$)						稀土元素($\times10^{-6}$)					
岩性	Bi-Gr		Mus-Gr	Diorite		岩性	Bi-Gr		Mus-Gr	Diorite		岩性	Bi-Gr		Mus-Gr	Diorite	
样号	DJS-1	DW-1	DJS-8	DJS-13	DJS-15	样 号	DJS-1	DW-1	DJS-8	DJS-13	DJS-15	样 号	DJS-1	DW-1	DJS-8	DJS-13	DJS-15
SiO_2	66.32	65.15	73.84	52.02	48.28	Li	65	63	47	62	93	La	72.64	101.10	2.94	19.40	12.24
TiO_2	0.56	0.58	<0.01	2.08	2.62	Cs	18.01	16.32	61.55	100.10	175.20	Ce	147.86	197.10	8.79	44.18	28.39
Al_2O_3	14.90	14.93	14.88	14.08	13.46	Rb	281.51	243.9	882.57	108.66	208.99	Pr	16.22	21.10	1.34	6.07	3.93
Fe_2O_3	3.90	4.10	0.63	12.37	14.12	Sr	352	404	25	333	320	Nd	57.73	74.85	5.44	27.31	17.51
MnO	0.07	0.07	0.28	0.205	0.22	Ba	900	1017	8	87	79	Sm	9.24	11.39	5.23	6.41	4.41
MgO	1.56	1.76	0.08	4.89	5.54	U	11.99	7.77	10.31	0.58	0.52	Eu	1.51	1.84	0.03	2.16	1.55
CaO	2.67	3.17	0.32	8.83	9.85	Th	45.86	41.96	2.33	3.26	2.35	Gd	8.65	10.12	5.18	7.31	5.08
Na_2O	2.78	2.67	5.1	3.20	2.51	Ga	20.23	19.76	39.66	21.32	21.40	Tb	1.01	1.08	0.81	1.18	0.81
K_2O	4.72	4.59	3.22	0.62	0.93	Nb	21	17	47	12	11	Dy	4.66	4.84	2.22	6.87	4.82
P_2O_5	0.25	0.28	0.01	0.29	0.21	Zr	229	247	28	199	146	Ho	0.87	0.86	0.10	1.27	0.96
烧失	0.88	0.63	1.01	0.68	0.91	V	86.50	83.26	6.99	277.21	484.73	Er	2.45	2.28	0.11	3.35	2.52
总量	97.73	97.30	98.36	98.59	97.74	Co	9.55	10.28	0.24	39.11	47.39	Tm	0.34	0.32	0.01	0.45	0.32
ALK	7.5	7.26	8.32	3.82	3.44	Ni	10.29	16.6	0.53	21.37	30.06	Yb	2.26	2.06	0.13	2.59	2.02
N/K	0.59	0.58	1.58	5.16	2.70	Rb/Sr	0.80	0.60	35.30	0.33	0.65	Lu	0.37	0.29	0.02	0.33	0.27
AKI	0.65	0.63	0.8	0.42	0.38	Rb/Ba	0.31	0.24	110.32	1.25	2.65	Y	27.85	23.92	8.06	31.76	25.27
A/NKC	1.02	0.99	1.19	0.64	0.58	K/Rb	139.13	156.16	30.27	47.37	36.94	ΣREE	325.80	429.23	32.34	128.87	84.84
DI	76	73	94	36	28	U/Th	0.26	0.19	4.35	0.18	0.22	LR/HR	14.82	18.64	2.77	4.52	4.05
A.R	1.93	1.84	3.42	1.40	1.35	GCI	−0.90	−1.26	5.10	−0.74	0.12	δEu	0.51	0.51	0.02	0.96	1.00

注:Bi-Gr—五里亭中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩;Mus-Gr—矿区隐伏的白云母碱长花岗岩;Diorite—闪长岩。采样位置:DJS-1—五里亭岩体稀土矿露天选矿池旁采场;DW-1—大吉山钨矿矿部大楼 NE56°方向约300 m 处公路旁;DJS-8—3坑417中段13号脉西;DJS-13—3坑417中段中组矿带1号脉围岩;DJS-15—3坑417中段中组矿带7号脉围岩。ALK=Na_2O+K_2O; N/K=Na_2O/K_2O; AKI=$(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$(分子比); A/NKC=$Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$(分子比); *DI* 为分异指数;*A.R* 为碱度率;GCI=$\lg[(Rb^3\times Li\times10^4)/(Mg\times K\times Ba\times Sr)]$。主量元素、Sr, Ba, Nb, Zr 在澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)矿业与勘探研究所(Division of Exploration & Mining)用 XRF 方法测定,相对误差低于5%;其他微量元素(包括稀土元素)在澳大利亚悉尼科技大学(University of Technology, Sydney)用 ICP-MS 方法分析,相对误差低于5%~10%.

长花岗岩则与千里山、西华山含矿岩体一样,轻、重稀土比值较低(LREE/HREE 比值一般小于5),铕负异常十分明显(δEu 多小于0.35),具有典型的改造型花岗岩(徐克勤等,1989)的稀土元素组成特征。综上所述,五里亭岩体不具备矿化岩体的地球化学特征,大吉山 W-Ta(Nb、Be)的成矿主要与白云母碱长花岗岩有关。

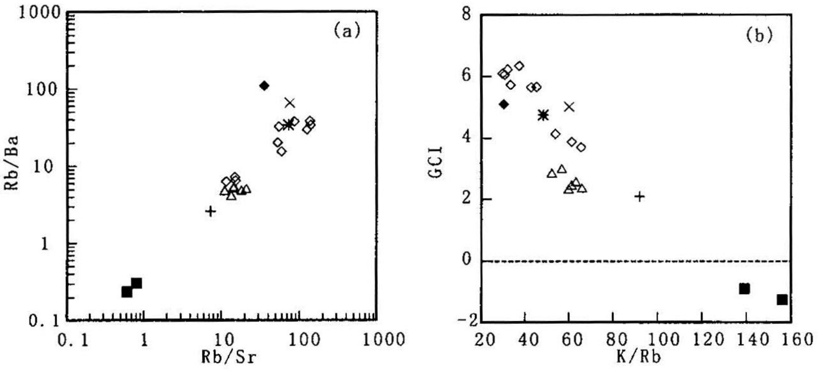

图 6 五里亭岩体 Rb/Sr-Rb/Ba (a)及 K/Rb-GCI 值(b)关系图

Fig. 6 Rb/Sr-Rb/Ba (a) and K/Rb-GCI value (b) diagrams of Wuliting pluton

■—五里亭岩体;◆—大吉山中细粒白云母花岗岩;+—西华山一阶段中粒黑云母二长花岗岩;×—西华山二阶段中粒黑云母二长-碱长花岗岩;*—西华山三阶段斑状中—细粒黑云母二长花岗岩;△—千里山一阶段似斑状黑云母花岗岩;◇—千里山二阶段等粒黑云母花岗岩;西华山资料引自刘昌实等(2002);千里山资料引自毛景文等(1998)

■—The Wuliting pluton; ◆—medium-fine granular muscovite alkali-feldspar granite at Dajishan; +—medium granular biotite adamellite of the first stage intrusion at Xihuashan; ×—medium biotite adamellite-alkali feldspar granite of the second stage intrusion at Xihuashan; *—medium-fine granular porphyry biotite adamellite of the third stage intrusion at Xihuashan; △—porphyroid biotite granite of the first stage intrusion at Qianlishan; ◇—equigranular biotite granite of the second intrusion at Qianlishan; Data of the Xihuashan pluton are quoted from Liu Changshi et al. (2002); those of Qianlishan from Mao Jingwen et al. (1998)

4　五里亭岩体与矿区其他岩浆杂岩的成因联系

从前面的综合对比可以看出,五里亭岩体与矿区深部隐伏的矿化岩体——中细粒白云母碱长花岗岩在地质地球化学特征上存在较明显的差别,但二者相对于原始地幔标准化微量元素分布模式的基本轮廓相似,只是元素富集与亏损的程度不同(图7),说明彼此之间存在成因联系。与五里亭斑状黑云母二长花岗岩相比,中细粒白云母碱长花岗岩 Sr、Ba、P、Ti 及轻、重稀土含量显著降低,铕负异常则十分明显(图8),这些特征可用岩浆体系中发生了斜长石、角闪石、磷灰石、榍石、褐帘石和锆石等矿物的显著分离结晶得到很好解释(Raith, 1995),二类岩石的主要矿物组合及副矿物重砂分析结果(表4)证实了这种推断的合理性。

表 4　大吉山矿区主要岩浆岩副矿物含量对比表(g/t)

Table 4　Accessory mineral contents of main igneous rock types at Dajishan mine (g/t)

岩性	似斑状黑云母二长花岗岩	细粒白云母碱长花岗岩		
样号	Wr-13	Dr367	Dr417	Dr467
褐帘石	485.1	微	微	微
榍石	1025.6	微	微	0.212
锆石	240.8	1.203	微	微
磷灰石	646.2	0.91	少	少

注:据孙恭安等(1989)。

中细粒白云母碱长花岗岩高的 Cs、Rb、Ga 含量和高的 Rb/Sr、Rb/Ba、U/Th 及低的 K/Rb 比值等特征也充分说明其经历了高程度的分异演化作用。区内闪长质岩石的微量和稀土元素分布模式与五里亭斑状黑云母二长花岗岩存在较明显的差别(图7、图8),表明其应有独立的岩浆源区。

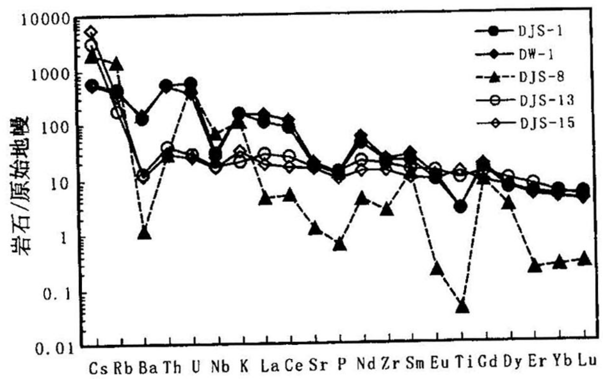

图 7　大吉山矿区岩浆杂岩微量元素相对于原始地幔标准化蛛网图

Fig. 7　Primitive mantle-normalized spidergrams of trace elements for igneous complex at Dajishan mine

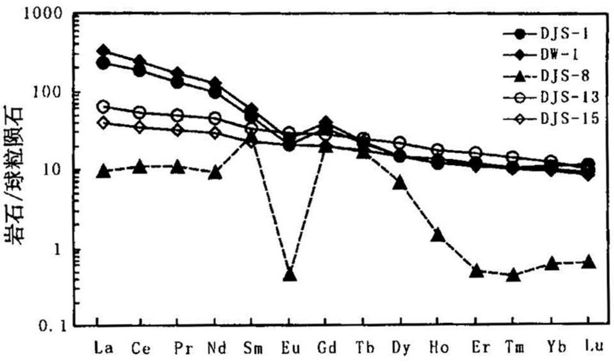

图 8　大吉山矿区岩浆杂岩稀土元素球粒陨石标准化配分型式

Fig. 8　Chondrite-normalized REE distribution patterns for igneous complex at Dajishan mine

五里亭斑状黑云母二长花岗岩的 $I_{Sr}=0.7164$, $\varepsilon_{Nd}(t)=-10.42$(表5),其 Sr、Nd 同位素组成与邻近的西华山岩体十分接近($I_{Sr}=0.7163\sim0.7169$, $\varepsilon_{Nd}(t)=-10.74\sim-11.40$,沈渭洲等,1994)。岩体的 T_{DM}值为1858 Ma,$\varepsilon_{Nd}(t)$值相似于华南两个元古宙地壳端元(沈渭洲等,1993)的平均组成,表明该岩体应为区内平均元古宙地壳经重熔再生的产物,岩石的全岩 $\delta^{18}O$ 值较高(10.3‰,孙恭安等,1989)及岩体中存在有残留锆石等特点佐证了这一认识。中细粒白云母碱长花岗岩由于被测样品的 Rb/Sr 比值高(达35.30),使得年龄对锶同位素初始值的校正十分敏感,在这种情况下,单个样品的锶同位素组成往往不具明确的成岩指示意义,但 Nd 同位素组成可以很好地反映源区组成特征。采用孙恭安等(1989)测得的159 Ma 代表该期岩浆活动的年龄,则计算所得的 $\varepsilon_{Nd}(t)$和 T_{DM}值(分别为−10.29和1796 Ma)与五里亭岩体几乎一致,其全岩氧同位素组成($\delta^{18}O=10.1$‰)及根据全岩 Rb-Sr 等时线所获得的锶同位素初始值(=0.7143,孙恭安等,1989)均可与五里亭岩体相对比,表明二者应具有相似的岩浆源区。结合前述的主量、微量和稀土元素变异特点,我们有理由认为矿区深部隐伏的中细粒白云母碱长花岗岩与五里亭斑状黑云母二长花岗岩应为同源岩浆经长期分异演化的产物。

闪长质岩石按相互穿截关系,其形成年龄应介于斑状黑云母二长花岗岩和中细粒白云母碱长花岗岩之间,为此,分别采用237.5 Ma 和159 Ma 对其 Sr、Nd同位素初始值进行校正。由表5所列数据可

表 5 大吉山主要岩浆岩 Sr、Nd 同位素组成

Table 5 Sr, Nd isotopic compositions of main igneous rock types at Dajishan mine

样号	岩性	t(Ma)	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	2σ	I_{Sr}	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	2σ	$\varepsilon_{Nd}(t)$	T_{DM}(Ma)
DJS-1	黑云母二长花岗岩	237.5	2.369	0.72439	7	0.71638	0.0937	0.511944	10	−10.42	1858
DJS-8	白云母碱长花岗岩	159	130.9	1.004124	12	0.70824	0.471	0.512396	7	−10.29	1796
DJS-15	闪长岩	237.5	2.023	0.711944	9	0.70511 0.70737①	0.1514	0.512655	6	1.71 0.25①	870 843①

注：为减少$^{147}Sm/^{144}Nd$变化对 Nd 模式年龄计算产生的影响，表中所列 T_{DM}年龄统一采用二阶段模式计算。Sr，Nd 同位素组成在中国科学院地质与地球物理研究所用 VG354质谱测定，Sr 和 Nd 同位素比值分别采用$^{88}Sr/^{86}Sr=0.1194$和$^{146}Nd/^{144}Nd=0.7219$进行质量分馏校正。①取 $t=159$ Ma 的相应值。

以看出，岩石的 I_{Sr}值应变化于0.70511～0.70737，$\varepsilon_{Nd}(t)$值应介于1.25～1.71之间，Sr、Nd 同位素组成明显不同于区内的花岗质岩石。闪长质岩石的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值为正值，表明其应起源于地幔，即在五里亭岩体侵位后，区内存在有幔源岩浆的侵入。花岗质岩浆活动之后伴随有中基性幔源岩浆侵入的现象在南岭钨多金属矿床中具有相当的普遍性(陈毓川等，1989)。正是由于幔源岩浆的侵入，使得矿区在成矿期间能维持较高的地热状态，从而导致由地壳熔融形成的花岗质岩浆房具较低的冷却速率而得以充分的分异演化。南岭地区钨多金属矿床的分布基本都与超壳断裂有关(李逸群等，1991)，这一特征同样说明矿床的形成与幔源岩浆活动存在一定的成因联系。因此，即使钨等成矿物质不是直接来自于地幔，但幔源岩浆活动所引起的区域高热场对于花岗岩的形成、分异演化和成矿无疑具有重要的意义。

5 结论

(1) 五里亭岩体的成岩年龄为237.5 Ma，应属印支期岩浆活动的产物。

(2) 五里亭岩体与矿区隐伏的中细粒白云母碱长花岗岩具同源岩浆分异演化的关系，但五里亭岩体尚未达到矿化岩体的分异演化程度，不具备钨含矿岩体的地球化学特征，该区与钨多金属矿成矿直接有关的岩体应为经历过高程度分异演化作用的白云母碱长花岗岩。

(3) 区内闪长质岩石为幔源岩浆活动的产物，这一岩浆的侵入有利于维系区域高热场环境，使得地壳熔融形成的花岗质岩浆能得以充分的分异演化，进而导致钨多金属矿床的形成，因此，幔源岩浆的侵入对成矿具有重要意义。

注 释

❶ 大吉山钨矿地测科资料. 1979.

❷ 南京大学地质系. 1966. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系研究.

参 考 文 献

陈毓川，裴荣富，张宏良，林新多，白鸽，李崇佑，胡永嘉，等. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质. 北京：地质出版社，1～508.

地质矿产部南岭项目花岗岩专题组. 1989. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用，北京：地质出版社，1～471.

李亿斗，盛继福，Bel L L，Giuliani G. 1986. 西华山花岗岩下地壳起源证据. 地质学报，60(3)：256～273.

李逸群，颜晓钟. 1991. 中国南岭及邻区钨矿床矿物学. 武汉：中国地质大学出版社，1～455.

刘昌实，王汝成，舒良树，陈小明，黄小龙. 2002. 陆内 S 型花岗岩的形成与演化. 见：王德滋主编. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京：科学出版社，93～130.

毛景文，李红艳，宋学信，等. 1998. 湖南柿竹园钨锡钼铋多金属矿床地质与地球化学. 北京：地质出版社，1～215.

梅勇文. 1994. 脉钨矿床的多次成岩成矿作用. 长春地质学院学报，24(2)：148～154.

沈渭洲，朱金初，刘昌实，徐士进，凌洪飞. 1993. 华南基底变质岩的 Sm-Nd 同位素及其对花岗岩类物质来源的制约. 岩石学报，9(2)：115～124.

沈渭洲，徐士进，王银喜，杨杰东. 1994. 西华山花岗岩的 Nd-Sr 同位素研究. 科学通报，39(2)：154～156.

孙恭安，史明魁，张宏良，胡雄伟. 1989. 大吉山花岗岩体岩石学、地球化学及成矿作用研究. 见：中国地质科学院宜昌地质矿产研究所编. 南岭地质矿产科研报告集. 武汉：中国地质大学出版社，326～363.

徐克勤，朱金初，刘昌实，沈渭洲，徐士进. 1989. 华南花岗岩类的成因系列和物质来源. 南京大学学报(地球科学)，(3)：1～18.

杨学明，杨晓勇，张培善，詹旺龙，陶克捷. 1999. 江西大吉山花岗岩风化壳稀土矿床稀土元素地球化学. 稀土，20(1)：1～5.

周作侠. 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义. 岩石学报，(3)：63～73.

References

Ballard J R, Palin J M, Williams I S, Campbell I H. 2001. Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquicamata copper deposit of northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP. Geology, 29: 383～386.

Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Zhang Hongliang, Lin Xinduo, Bai Ge, Li Chongyou, Hu Yongjia, et al. 1989. The geology of non-ferrous and rare metal deposits related to Mesozoic granitoids in Nanling region. Beijing: Geology Press, 1～508 (in Chinese with English abstract).

Kosler J, Fonneland H, Sylvester P, Tubrett M, Pedersen R B. 2002. U-Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies—— a comparison of laser ablation ICPMS and SIMS techniques. Chem. Geol., 182:605~618.

Li Yidou, Sheng Jifu, Bel L L, Giuliani G. 1986. Evidence for the lower continental crustal source of the Xihuashan granite. Acta Geologica Sinica, 60(3): 256~273 (in Chinese with English abstract).

Li Yiqun, Yan Xiaozhong. 1991. Mineralogy of tungsten deposits in Nanling and neighboring area, China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~455 (in Chinese with English abstract).

Liu Changshi, Wang Rucheng, Shu Liangshu, Chen Xiaoming, Huang Xiaolong. 2002. The formation and evolution of intracontinental S-type granites. In: Wang Dezi, ed. Petrogenesis of the Late Mesozoic Granitic Volcanic-Intrusive Complexes in SE China and Its Implication to Crust Evolution. Beijing: Science Press, 93~130 (in Chinese).

Mao Jingwen, Li Hongyan, Song Xuexin, et al. 1998. Geology and geochemistry of the Shizhuyuan W-Sn-Mo-Bi polymetallic deposit. Hunan, China. Beijing: Geology Press, 1~215 (in Chinese with English abstract).

McKee E H, Rytuba J T, Xu K Q. 1987. Geochronology of the Xihuashan composite granitic body and tungsten mineralization, Jiangxi province, South China. Econ. Geol., 82:218~223.

Mei Yongwen. 1994. Multiple diagenesis-mineralization of vein-type tungsten mineralization. J. Changchun Uni. of Earth Sci., 24 (2): 148~154 (in Chinese with English abstract).

Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth-science Review, 37: 215~224.

Raith J G. 1995. Petrogenesis of the Concordia granite gneiss and its relation to W-Mo mineralization in weatern Namaqualand, South Africa. Precambrian Research, 70:303~335.

Shen Weizhou, Zhou Jinchu, Liu Changshi, Xu Shijin, Ling Hongfei. 1993. Sm-Nd isotopic study of basement metamorphic rocks in South China and its comstraint on material sources of granitoids. Acta Petrologica Sinica, 9(2):115-124 (in Chinese with English abstract).

Shen Weizhou, Xu Shijin, Wang Yinxi, Yang Jiedong. 1994. Nd-Sr isotopic studies of the Xihuashan granite. Chinese Science Bulletin, 39(2):154~156 (in Chinese).

Srivastava P K, Sinha A K. 1997. Geochemical characterization of tungsten-bearing granites from Rajasthan, India. J. Geochemical Exploration, 60:173~184.

Watson E B, Cherniak D J, Hanchar J M, Harrison T M, Wark D A. 1997. The incorporation of Pb into zircon. Chem. Geol., 141:19~31.

Xu Keqin, Zhu Jinchu, Liu Changshi, Shen Weizhou, Xu Shijin. 1989. Genetic series and material sources of granitoids in South China. J. Nanjing University (Earth Science Edition), (3):1~18 (in Chinese with English abstract).

Yang Xueming, Yang Xiaoyong, Zhang Peishan, Zhan Wanglong, Tao Kejie. 1999. Geochemical study of REE from granite weathering crusts in Dajishan of Jiangxi province. Chinese Rare Earths, 20 (1):1~5 (in Chinese with English abstract).

Zhou Zuoxia. 1988. Chemical characteristics of mafic mica in intrusive rocks and its geological meaning. Acta Petrologica Sinica, (3):63~73 (in Chinese with English abstract).

Zircon ELA-ICP-MS Dating for Wuliting Pluton at Dajishan, Southern Jiangxi and New Recognition about Its Relation to Tungsten Mineralization

QIU Jiansheng[1)], MCINNES B I A[2)], XU Xisheng[1)], ALLEN C M[3)]

1) *State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing* 210093, *China*

2) *CSIRO Division of Exploration and Mining, PO Box* 136, *North Ryde, NSW* 2113, *Australia*

3) *Research School of Earth Sciences, Australian National University*, 2006 *Canberra, Australia*

Abstract

The Dajishan mine is a famous large-scale tungsten polymetallic deposit in Nanling region. The Wuliting pluton with lithologically as medium-coarse porphyroid biotite adamellite is the largest igneous rock body outcropped in the mining area. Zircon ELA-ICP-MS dating for this pluton yields a 237.5±4.8 Ma age which indicates that it is the product of Indosinian magmatism. Compared with the typical tungsten polymetallic ore-forming granites in Nanling region, the Wuliting pluton is relatively poor in silicon, rich in calcium, magnesium and iron. The rocks also have lower Rb/Sr, Rb/Ba and U/Th ratios, lower differentiation index, but higher K/Rb values, and display weakly europium negative anomaly on the chondrite-normalized REE distribution patterns. The above features imply that the differentiation degree of the Wuliting pluton is not high enough, thus it doesn't possess the related geochemical characteristics of the mineralized granite masses. Integrated element and isotopic tracing indicates that the muscovite alkali-feldspar granite in the mining district is the high-degree differentiation product of the Wuliting pluton, and it has direct relation to tungsten polymetallic mineralization. The dioritic rocks outcropped in this area were derived from mantle. The high heat environment induced by the intrusion of mantle-derived magma is favorable for the formation and evolution of granitic rocks, thus it has important significance to mineralization.

Key words: zircon ELA-ICP-MS dating; geochemistry; tungsten mineralization; Dajishan, Jiangxi