

湖南瑶岗仙复式花岗岩岩石成因及与钨成矿关系*

董少花^{1,2} 毕献武^{1**} 胡瑞忠¹ 陈佑纬¹

DONG ShaoHua^{1,2}, BI XianWu^{1**}, HU RuiZhong¹ and CHEN YouWei¹

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,贵阳 550002

2. 中国科学院大学,北京 100049

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2014-01-01 收稿, 2014-07-01 改回.

Dong SH, Bi XW, Hu RZ and Chen YW. 2014. Petrogenesis of the Yaogangxian granites and implications for W mineralization, Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2749–2765

Abstract The Yaogangxian composite granitic pluton is located in the north of Nanling complex structural belt, hosting the giant Yaogangxian tungsten deposit. The Yaogangxian granites are differentiation S-type granite with the characters of highly acid, hyperalkaline and peraluminous, belonging to the high-K calc-alkalic series granite. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating method was applied to obtain the ages of different types of the Yaogangxian granites. The Yaogangxian composite granitic pluton can be divided into three stages according to their emplacement ages, including coarse-grained two-mica granite forming at 170Ma, medium-to fine-grained two-mica granite forming at 162Ma, and fine-grained muscovite granite forming at 157Ma, indicating that the granitic magma had undergone multi-epoch pulsating emplacement. The element geochemistry and Sr-Nd isotopic characters show that source materials of the Yaogangxian granites might come from pelite in the Paleoproterozoic Era. The Yaogangxian granites formed at 170Ma to 157Ma belonging to the Yanshannian Period, occurring in a continental crustal extension and thinning setting. The diagenetic events of the Yaogangxian granites and the metallogenetic events of tungsten deposits were highly consistent in time and space. The granitic magma had experienced high fractional crystallization and produced volatile-rich fluid. So it was indicated that the granites may provide original fluid and material source to mineralization in post-magmatic hydrothermal stage.

Key words Sr-Nd isotopes; LA-ICP-MS U-Pb dating; Magmatic evolution; Yaogangxian granite; Yaogangxian tungsten deposit; Hunan

摘要 瑶岗仙复式花岗岩体位于南岭复杂构造带北端,赋存着大型瑶岗仙钨矿床。瑶岗仙花岗岩高硅、富碱,属于高钾钙碱性系列,为分异的S型花岗岩。系统的单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄测定表明,瑶岗仙复式花岗岩体有多期成岩事件,分别为:170Ma 形成的粗粒二云母花岗岩,162Ma 形成的中细粒二云母花岗岩,157Ma 形成的细粒白云母花岗岩,表明花岗质岩浆经历了多期脉动侵位。元素地球化学及 Sr-Nd 同位素特征表明,瑶岗仙花岗岩成岩物质来源于古元古代的泥质岩。瑶岗仙花岗岩成岩年龄为 170~157Ma,处于燕山期陆内伸展-减薄的构造环境。瑶岗仙花岗岩的成岩事件与钨矿床成矿事件在时空上高度吻合,花岗岩岩浆经历了高度分离结晶并产生富挥发分的流体,表明花岗岩可能为岩浆期后热液阶段成矿作用提供了原始流体和物质来源。

关键词 Sr-Nd 同位素; 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年; 岩浆演化; 瑶岗仙花岗岩; 瑶岗仙钨矿床; 湖南

中图法分类号 P588.121; P597.3

* 本文受国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB411404)和国家自然科学基金项目(40373020)联合资助。

第一作者简介:董少花,女,1985年生,博士生,地球化学专业,E-mail: dongshaohua@mail.gyig.ac.cn

** 通讯作者:毕献武,女,1967年生,博士,研究员,从事矿床地球化学和岩石学研究,E-mail: bixianwu@vip.gyig.ac.cn

花岗岩与成矿的关系,历来都是地球科学的热点研究问题之一。大量研究表明,许多矿床都与花岗质岩石具有密切的时空或成因联系,如钨、锡、钼、铋、铀、金、银、铜、铁、铅、锌、铌、钽、铪和稀土矿床等(Holland, 1972; 中国科学院地球化学研究所, 1979; 南京大学地质系, 1981; Ishihara, 1981; 地矿部南岭项目花岗岩专题组, 1989; Bi *et al.*, 2000)。南岭地区花岗岩广泛发育,并盛产钨、锡、铋、钽、铀等有色、稀有金属矿产资源。大量研究表明,南岭地区的成矿作用与该区分布广泛的花岗岩具有密切的成因联系(毛景文等, 1999, 2007; 华仁民等, 2003; 周新民, 2007)。因此,对该区花岗岩岩石地球化学特征和成因的研究,对深入认识该区有色、稀有金属矿床的成矿作用具有重要的意义。

瑶岗仙花岗岩体位于南岭中段,岩体较小,出露面积仅 1.2 km²,赋存着大型瑶岗仙脉状钨矿床,矿床自 1914 年开采以来到现在已有近百年的历史。近些年来,有关湖南瑶岗仙钨矿床的矿床地质、成矿年代学及成矿流体特征等方面的研究取得了重要的进展(陈依壤, 1981, 1988, 1992; Peng *et al.*, 2006; 王巧云等, 2007; 王登红等, 2009; 陈宏伟等, 2011; 董少花等, 2011),但对与成矿具有密切时空关系的瑶岗仙花岗岩体的岩石化学、年代学、岩浆来源及岩浆演化过程的研究较少,就成岩年代学研究而言,前人对瑶岗仙复式花岗岩成岩年龄的认识主要有依据 K-Ar 法获得花岗岩年龄 178 ~ 173 Ma(陈依壤, 1988),没有对其各个成岩阶段的花岗岩年龄进行精确厘定,从而制约了对花岗岩与成矿关系的深入认识。因此本次研究以瑶岗仙花岗岩体为对象,开展了系

统的地质地球化学研究,通过对各种类型花岗岩的岩石学、主量和微量元素地球化学,全岩 Sr-Nd 同位素地球化学及单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学的研究,详细厘定瑶岗仙复式花岗岩体的年龄格架,揭示了花岗岩的源区特征及成因,并在此基础上探讨花岗岩岩浆演化过程及其与钨成矿作用的关系。

1 地质背景与岩石学特征

瑶岗仙花岗岩体位于湖南省郴州市南 32 km 处,在构造位置上地处南岭东西复杂构造带北端,加里东隆起带与印支-燕山拗陷带的交汇地带(陈依壤, 1981)。该区广泛发育不同类型的褶皱和断裂,并伴随着相应的岩浆活动和成矿作用,形成了现今以北东-北北东褶皱和断裂为主导的构造格架(图 1)。区内出露地层包括寒武系浅变质砂岩、板岩,中泥盆统砂岩、砂砾岩、页岩,中、上泥盆统灰岩、页岩,下、中石炭统灰岩、砂岩、页岩,下侏罗统砂岩、砂砾岩、页岩等。

瑶岗仙花岗岩体沿背斜的走向转折端侵入,断裂及裂隙发育,岩体较小,出露面积约 1.2 km²,呈复式岩株产出。经野外观察,瑶岗仙复式花岗岩主体主要有三种岩石类型(图 2):粗粒二云母花岗岩、中细粒二云母花岗岩、细粒白云母花岗岩,其中粗粒二云母花岗岩出露较少;中细粒二云母花岗岩为瑶岗仙花岗岩的主体;细粒白云母花岗岩呈后期穿插关系。粗粒二云母花岗岩,呈浅灰色,似斑状结构,块状构造;

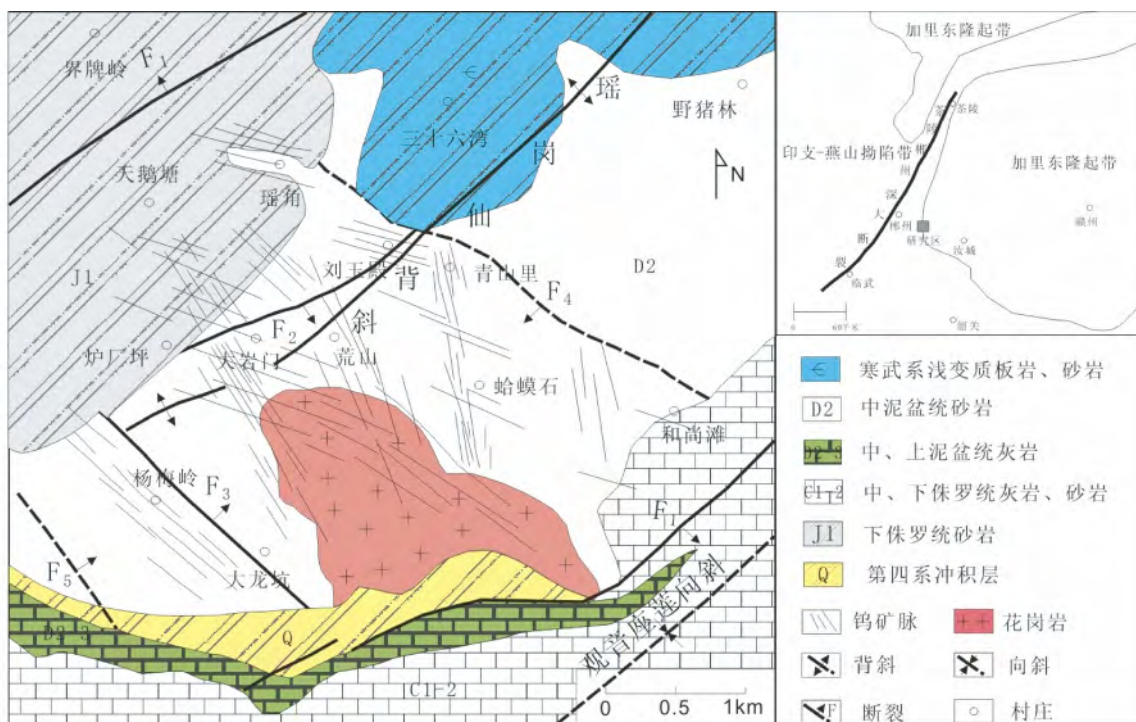


图 1 瑶岗仙钨矿区地质简图(据车勤建等, 2005; Peng *et al.*, 2006)

Fig. 1 Geological sketch map of the Yaogangxian tungsten mine (after Che *et al.*, 2005; Peng *et al.*, 2006)

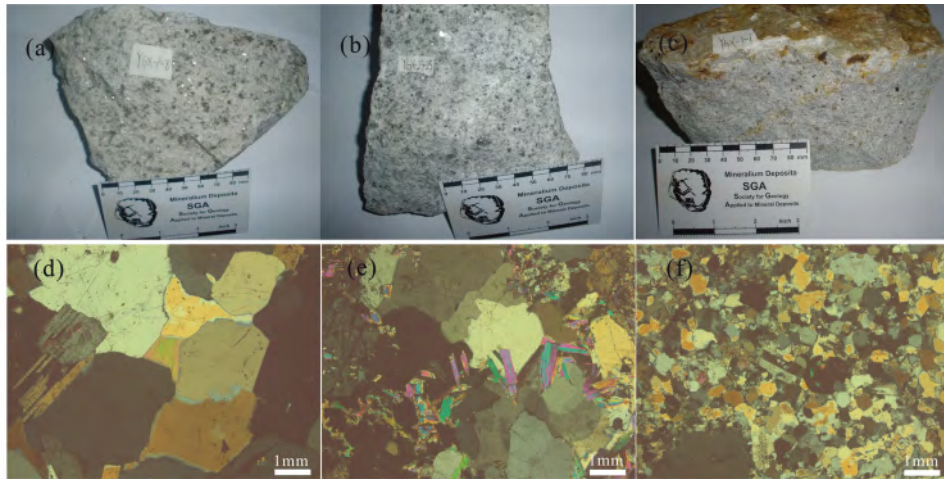


图2 瑶岗仙花岗岩手标本和显微镜下照片

(a, d) 粗粒二云母花岗岩; (b, e) 中细粒二云母花岗岩; (c, f) 细粒白云母花岗岩

Fig. 2 Photographs and photomicrographs for the Yaogangxian granites

(a, d) -coarse-grained two-mica granite; (b, e) -medium- to fine-grained two-mica granite; (c, f) -fine-grained muscovite granite

斑晶较多且粒度较粗,主要矿物有石英、钾长石、斜长石、少量黑云母和白云母,钾长石为微斜长石和条纹长石,板状它形晶体;斜长石为板状它形;石英多为它形小颗粒;黑云母呈片状、黑褐色且多白云母化;白云母多呈片状;副矿物有磷灰石、石榴子石、锆石、磷钇矿等。中细粒二云母花岗岩,岩石呈灰白色,斑状结构,块状构造;斑晶以石英、钾长石为主,少量斜长石、白云母及黑云母;基质为细粒花岗结构,矿物组成主要为石英、钾长石、斜长石、白云母、黑云母,副矿物主要有磷灰石、石榴子石、锆石、磷钇矿、萤石等。细粒白云母花岗岩,岩石呈白色,细粒结构,块状构造;主要矿物为石英、钾长石、斜长石、白云母;副矿物主要有石榴子石、锆石、萤石等。岩体较多发生蚀变,主要有云英岩化、钾长石化、高岭土化等。

2 样品制备与分析方法

本次研究的岩石样品主要采自瑶岗仙钨矿地表及5个不同标高中段的岩石共计120件,选取24件花岗岩研磨成粉末,用于主量元素及微量元素分析,10件用于Rb-Sr、Sm-Nd同位素分析,6件挑选锆石用于锆石U-Pb定年。主量元素含量采用Axios PW4400型X射线荧光光谱仪(XRF)分

析,误差小于3%。微量元素含量采用ELAN 6000等离子质谱仪(ICP-MS)分析,精度高于5%。Sr、Nd同位素比值采用热电离质谱(TIMS)分析,所用仪器为Thermo Fisher公司生产的TRITON型热电离质谱仪。上述分析均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。

单颗粒锆石U-Pb同位素定年采用LA-ICP-MS分析,激光束斑为44 μ m,剥蚀频率为8Hz。锆石91500和NIST610分别作为标准锆石和结果标定锆石。锆石测定点的同位素比值、U-Pb表面年龄和U-Th-Pb含量计算采用软件ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2009)完成。采用安德森模式(Andersen, 2002)对普通Pb进行校正,并采用ISOPLOT程序进行锆石加权平均年龄计算及谐和图的绘制。锆石阴极发光图像采集在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。单颗粒锆石LA-ICP-MS U-Pb同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。

3 分析结果

3.1 锆石U-Pb年龄

花岗岩中的锆石在显微镜下呈无色、浅黄色、褐色等,透明到不透明,自形晶,典型岩浆锆石的特点,阴极发光图像

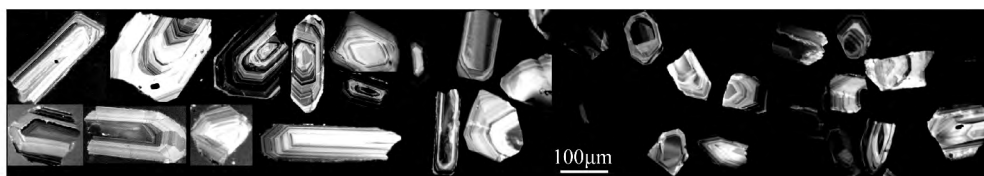


图3 瑶岗仙花岗岩代表性锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescent images of representative zircons from the Yaogangxian granites

表1 瑶岗仙花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of the Yaogangxian granites

Spot No.	Pb ($\times 10^{-6}$)	Th	U	Isotopic ratio						Age (Ma)			
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
ygx-23-46-01	133.2	847	4656	0.0535	0.0009	0.196	0.0038	0.0263	0.0002	182	3	168	1
ygx-23-46-02	43.65	563	1417	0.0494	0.0013	0.1851	0.0049	0.0271	0.0002	172	4	172	1
ygx-23-46-03	37.36	618	1184	0.0498	0.0015	0.1834	0.0053	0.0267	0.0003	171	5	170	2
ygx-23-46-04	40.2	820	1212	0.0521	0.0013	0.1948	0.0046	0.027	0.0002	181	4	172	1
ygx-23-46-05	42.94	454	1476	0.0506	0.0013	0.1858	0.0047	0.0265	0.0002	173	4	168	1
ygx-23-46-06	165.4	2249	5174	0.052	0.0009	0.1957	0.0033	0.0271	0.0002	181	3	173	1
ygx-23-46-07	8.4	180	253	0.0515	0.0028	0.1871	0.0095	0.0267	0.0004	174	8	170	2
ygx-23-46-08	15.09	322	461	0.0519	0.002	0.1879	0.0073	0.0263	0.0003	175	6	168	2
ygx-23-46-09	9.49	137	315	0.0484	0.0023	0.1757	0.0084	0.0262	0.0003	164	7	167	2
ygx-23-46-10	49.6	666	1581	0.0487	0.001	0.1775	0.0037	0.0264	0.0002	166	3	168	1
ygx-23-46-11	65.2	941	2162	0.0485	0.0011	0.1766	0.0038	0.0262	0.0002	165	3	167	2
ygx-23-46-12	43.5	515	1422	0.0508	0.0011	0.1872	0.0042	0.0267	0.0003	174	4	170	2
ygx-23-46-13	30.6	511	702	0.0517	0.0026	0.1916	0.0093	0.0267	0.0002	178	8	170	2
ygx-23-46-14	10.39	205	310	0.0502	0.0024	0.1836	0.0086	0.0269	0.0003	171	7	171	2
ygx-23-46-15	8.56	167	256	0.0529	0.0038	0.1909	0.0126	0.0268	0.0004	177	11	171	2
ygx-23-46-16	7.74	171	229	0.0543	0.0032	0.1958	0.0111	0.0266	0.0004	182	9	169	2
ygx-23-46-17	5.73	134	167	0.052	0.0034	0.18	0.0119	0.0262	0.0005	168	10	167	3
ygx-23-46-18	91.2	1104	2983	0.0471	0.0012	0.1724	0.0038	0.0266	0.0002	161	3	169	1
ygx-23-46-19	8.13	172	249	0.0554	0.0034	0.1951	0.0117	0.0266	0.0004	181	10	169	3
ygx-23-46-20	91.4	1213	2781	0.0504	0.0012	0.1873	0.0044	0.0267	0.0002	174	4	170	1
ygx21-7-01	7.62	197	227	0.0505	0.0031	0.1774	0.0105	0.026	0.0003	166	9	166	2
ygx21-7-02	12.48	321	363	0.0478	0.002	0.1752	0.0074	0.0267	0.0003	164	6	170	2
ygx21-7-03	11.33	210	352	0.0488	0.0022	0.175	0.0077	0.0259	0.0003	164	7	165	2
ygx21-7-04	44	798	1369	0.0492	0.0013	0.1822	0.005	0.0268	0.0002	170	4	170	2
ygx21-7-05	48.2	1006	1491	0.0514	0.0012	0.1878	0.0043	0.0264	0.0002	175	4	168	1
ygx21-7-06	61.8	1192	1947	0.05	0.0012	0.1832	0.0044	0.0264	0.0002	171	4	168	1
ygx21-7-07	32.78	645	1049	0.0523	0.0015	0.1891	0.0055	0.0261	0.0002	176	5	166	1
ygx21-7-08	20.17	416	624	0.0479	0.0017	0.1748	0.0063	0.0265	0.0002	164	5	169	2
ygx21-7-09	22.96	518	696	0.0503	0.0017	0.1833	0.0061	0.0264	0.0002	171	5	168	1
ygx21-7-10	34.67	590	1085	0.0516	0.0014	0.1924	0.005	0.027	0.0002	179	4	172	1
ygx21-7-11	92.1	914	3048	0.0518	0.0011	0.1954	0.0041	0.0272	0.0002	181	3	173	1
ygx21-7-12	48.1	701	1545	0.0531	0.0012	0.1994	0.0045	0.027	0.0002	185	4	172	1
ygx21-7-13	147.4	1002	4885	0.0519	0.001	0.1972	0.0036	0.0274	0.0002	183	3	174	1
ygx21-7-14	36.12	638	1149	0.0495	0.0012	0.1831	0.0045	0.0267	0.0002	171	4	170	1
ygx21-7-15	53.75	502	1795	0.0503	0.0011	0.1902	0.0041	0.0273	0.0002	177	3	173	1
ygx21-7-16	123.7	1787	3860	0.0513	0.0009	0.1957	0.0036	0.0275	0.0002	181	3	175	1
ygx21-7-17	126	916	4254	0.0501	0.0008	0.1911	0.0033	0.0275	0.0002	178	3	175	1
ygx21-7-18	44.2	932	1382	0.05	0.0011	0.1839	0.0042	0.0266	0.0002	171	4	169	1
ygx23-21-01	13.7	303	430	0.0507	0.0021	0.1792	0.0075	0.0257	0.0003	167	6	164	2
ygx23-21-02	22.75	373	767	0.0516	0.0016	0.1791	0.0055	0.0251	0.0002	167	5	160	1
ygx23-21-03	7.33	179	228	0.0529	0.0029	0.1846	0.0099	0.0255	0.0003	172	8	162	2
ygx23-21-04	26.78	493	864	0.0525	0.0022	0.184	0.0075	0.0254	0.0002	171	6	162	2
ygx23-21-05	7.9	179	247	0.0503	0.0028	0.1766	0.0096	0.0253	0.0003	165	8	161	2
ygx23-21-06	20.53	435	657	0.0505	0.0017	0.1766	0.0057	0.0255	0.0002	165	5	162	1
ygx23-21-07	16.01	353	511	0.0503	0.0017	0.1762	0.006	0.0254	0.0002	165	5	161	1
ygx23-21-08	10.82	251	346	0.05	0.002	0.1749	0.0068	0.0255	0.0003	164	6	163	2
ygx23-21-09	10.46	180	355	0.0507	0.0024	0.1745	0.0078	0.0252	0.0003	163	7	160	2
ygx23-21-10	18.7	368	615	0.0505	0.0018	0.1778	0.0061	0.0255	0.0002	166	5	162	2
ygx23-21-11	10.74	313	316	0.0508	0.0022	0.1774	0.0073	0.0256	0.0003	166	6	163	2
ygx23-21-12	9.04	222	288	0.0511	0.0024	0.1749	0.008	0.0251	0.0003	164	7	160	2
ygx23-21-13	7.51	128	254	0.0485	0.0024	0.169	0.0083	0.0251	0.0003	159	7	160	2

续表 1

Continued Table 1

Spot No.	Pb ($\times 10^{-6}$)	Th	U	Isotopic ratio						Age (Ma)			
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
ygx23-21-14	11.87	266	378	0.0495	0.0023	0.1745	0.0079	0.0255	0.0002	163	7	163	2
ygx23-21-15	14.43	301	467	0.0491	0.0018	0.1696	0.0061	0.0251	0.0002	159	5	160	1
ygx23-21-16	12.46	273	392	0.0496	0.002	0.1719	0.0067	0.0254	0.0002	161	6	162	2
ygx23-21-17	9.19	205	295	0.0506	0.0027	0.1745	0.0093	0.0253	0.0003	163	8	161	2
ygx23-21-18	17.5	93	607	0.0511	0.0025	0.1794	0.0089	0.0255	0.0004	168	8	162	3
ygx23-21-19	20.93	381	684	0.0507	0.002	0.1797	0.0075	0.0257	0.0004	168	6	163	2
ygx23-21-20	54.3	1210	1702	0.0523	0.0011	0.1842	0.0039	0.0255	0.0002	172	3	163	1
ygx19-2-01	53.5	579	1861	0.0497	0.0011	0.1774	0.0038	0.0257	0.0002	166	3	164	1
ygx19-2-02	27.74	605	897	0.05	0.0014	0.174	0.0049	0.0252	0.0002	163	4	160	1
ygx19-2-03	20.64	332	680	0.0503	0.0023	0.1795	0.0079	0.0258	0.0004	168	7	164	2
ygx19-2-04	52.2	1102	1668	0.05	0.0013	0.1772	0.0045	0.0255	0.0002	166	4	163	1
ygx19-2-05	23.68	493	763	0.0498	0.0016	0.1727	0.0056	0.0252	0.0002	162	5	160	1
ygx19-2-06	26.62	526	863	0.0494	0.0016	0.173	0.0054	0.0254	0.0002	162	5	161	1
ygx19-2-07	41.8	1224	1224	0.0503	0.0013	0.1795	0.0047	0.0257	0.0002	168	4	164	1
ygx19-2-08	18.61	335	612	0.0496	0.002	0.1743	0.0068	0.0255	0.0002	163	6	162	2
ygx19-2-09	16.63	502	488	0.0527	0.0019	0.1865	0.0064	0.0257	0.0003	174	5	164	2
ygx19-2-10	11.19	305	342	0.049	0.0021	0.172	0.0075	0.0255	0.0003	161	6	162	2
ygx19-2-11	8.32	268	240	0.051	0.0031	0.1761	0.0101	0.0254	0.0003	165	9	162	2
ygx19-2-12	12.77	268	399	0.0491	0.0022	0.1742	0.0081	0.0256	0.0003	163	7	163	2
ygx19-2-13	32.03	587	1055	0.0502	0.0014	0.1775	0.0048	0.0255	0.0002	166	4	163	1
ygx19-2-14	121.6	1302	4345	0.0509	0.0011	0.18	0.0048	0.0254	0.0003	168	4	162	2
ygx19-2-15	46.61	664	1602	0.0496	0.0012	0.1767	0.0043	0.0257	0.0002	165	4	164	1
ygx19-2-16	48.89	607	1675	0.0506	0.0011	0.1778	0.0038	0.0253	0.0002	166	3	161	1
ygx19-2-17	23.38	449	726	0.0513	0.0013	0.1805	0.0045	0.0256	0.0002	168	4	163	1
ygx19-2-18	91.8	1310	3065	0.0502	0.0009	0.1793	0.003	0.0257	0.0002	167	3	164	1
ygx19-2-19	53	720	1680	0.0494	0.0011	0.1784	0.0039	0.0259	0.0002	167	3	165	1
ygx19-2-20	76.4	1229	2353	0.0475	0.0012	0.1681	0.0042	0.0255	0.0002	158	4	162	1
ygx16-7-01	7.06	260	199	0.051	0.0027	0.1725	0.0087	0.0248	0.0003	162	8	158	2
ygx16-7-02	10.6	160	374	0.0503	0.0025	0.1681	0.0078	0.0245	0.0004	158	7	156	2
ygx16-7-03	18.55	425	624	0.0492	0.0017	0.1637	0.0056	0.0241	0.0002	154	5	154	1
ygx16-7-04	9.79	239	307	0.0497	0.0027	0.1678	0.0088	0.0247	0.0003	157	8	158	2
ygx16-7-05	14.71	91	558	0.0491	0.0016	0.1662	0.0053	0.0245	0.0002	156	5	156	2
ygx16-7-06	8.88	252	272	0.0493	0.0029	0.1692	0.0091	0.025	0.0003	159	8	159	2
ygx16-7-07	12.93	299	423	0.0507	0.0032	0.1701	0.0089	0.0248	0.0003	159	8	158	2
ygx16-7-08	8.42	227	269	0.0511	0.0041	0.1673	0.0129	0.0241	0.0004	157	11	154	2
ygx16-7-09	6.56	153	213	0.0486	0.0028	0.1652	0.0096	0.0248	0.0003	155	8	158	2
ygx16-7-10	79.7	1232	2719	0.0496	0.0009	0.1727	0.0033	0.025	0.0002	162	3	159	1
ygx16-7-11	12.08	371	354	0.0514	0.0027	0.1726	0.0088	0.0247	0.0003	162	8	157	2
ygx16-7-12	13.94	310	438	0.0527	0.0022	0.1759	0.007	0.0247	0.0003	165	6	157	2
ygx16-7-13	40.6	694	1375	0.049	0.0011	0.1654	0.0038	0.0244	0.0002	155	3	155	1
ygx16-7-14	14	483	401	0.049	0.0019	0.1649	0.0066	0.0245	0.0002	155	6	156	1
ygx16-7-15	23.71	125	917	0.0481	0.0016	0.1654	0.006	0.0248	0.0003	155	5	158	2
ygx16-7-16	52.5	857	1759	0.0517	0.0014	0.1783	0.0051	0.025	0.0002	167	4	159	1
ygx16-7-17	28.73	477	970	0.052	0.0013	0.1756	0.0044	0.0245	0.0002	164	4	156	1
ygx16-7-18	52.4	723	1825	0.0515	0.0012	0.1764	0.004	0.0247	0.0002	165	3	157	1
ygx16-7-19	10.13	237	320	0.0526	0.0033	0.1779	0.0106	0.0249	0.0003	166	9	159	2
ygx16-7-20	4.9	82.1	159	0.0524	0.0042	0.1697	0.0128	0.0245	0.0004	159	11	156	2
ygx1-3-01	20.61	584	631	0.0507	0.0019	0.1747	0.0064	0.025	0.0002	164	5	159	1
ygx1-3-02	18.61	392	614	0.0496	0.0018	0.1698	0.0059	0.0248	0.0002	159	5	158	1
ygx1-3-03	13.32	195	475	0.0508	0.0018	0.1723	0.0063	0.0245	0.0002	161	5	156	2
ygx1-3-04	22.24	459	744	0.0493	0.0016	0.1679	0.0056	0.0246	0.0002	158	5	157	1

续表 1

Continued Table 1

Spot No.	Pb ($\times 10^{-6}$)	Th	U	Isotopic ratio						Age (Ma)			
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
ygx1-3-05	25.2	768	774	0.0504	0.0016	0.172	0.0055	0.0246	0.0002	161	5	157	1
ygx1-3-06	19.25	384	660	0.0506	0.0016	0.1694	0.0053	0.0243	0.0003	159	5	155	2
ygx1-3-07	6.25	246	177	0.052	0.0032	0.1692	0.0098	0.0241	0.0004	159	8	154	2
ygx1-3-08	11.22	288	352	0.0509	0.0021	0.173	0.0069	0.0247	0.0003	162	6	157	2
ygx1-3-09	8.7	219	280	0.0493	0.0023	0.1657	0.0078	0.0243	0.0003	156	7	155	2
ygx1-3-10	9.05	251	287	0.0498	0.0023	0.1708	0.0081	0.0248	0.0003	160	7	158	2
ygx1-3-11	13.25	251	445	0.0507	0.0018	0.1747	0.0061	0.0249	0.0003	164	5	159	2
ygx1-3-12	60.1	838	2114	0.0504	0.0017	0.1726	0.0056	0.0247	0.0002	162	5	157	1
ygx1-3-13	8.84	196	307	0.052	0.0031	0.1761	0.0108	0.0246	0.0004	165	9	157	2
ygx1-3-14	17.88	298	631	0.0527	0.0016	0.179	0.0055	0.0246	0.0002	167	5	157	2
ygx1-3-15	15.95	379	523	0.0507	0.0018	0.1728	0.0061	0.0246	0.0003	162	5	157	2
ygx1-3-16	6.62	101	232	0.0507	0.0028	0.173	0.0091	0.025	0.0004	162	8	159	2
ygx1-3-17	24.97	96.6	965	0.0515	0.0015	0.1736	0.0051	0.0244	0.0002	163	4	155	1
ygx1-3-18	68.5	656	2412	0.0514	0.001	0.1759	0.0034	0.0246	0.0002	165	3	157	1
ygx1-3-19	18.41	525	601	0.0491	0.0015	0.167	0.0052	0.0246	0.0002	157	4	157	1
ygx1-3-20	64.1	1084	2093	0.0494	0.001	0.1724	0.0034	0.0251	0.0002	161	3	160	1

表 2 瑶岗仙花岗岩岩石化学成分 (wt%) 及相关参数

Table 2 Major element compositions (wt%) of the Yaogangxian granites and relative parameter

样品号	岩性	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	Total	ACNK	A/NK	T _{Zr} (°C)
YGX-21-7	粗粒二云母花岗岩	75.62	12.75	0.86	0.01	0.56	3.62	4.57	0.14	0.01	0.03	0.99	99.15	1.07	1.17	701
YGX-23-8		75.00	12.85	1.13	0.02	0.63	3.39	4.76	0.11	0.02	0.04	1.01	98.96	1.08	1.20	752
YGX-23-12		74.68	12.98	1.08	0.04	0.77	3.58	4.64	0.10	0.01	0.05	1.06	98.99	1.06	1.19	716
YGX-23-14		74.34	13.15	1.23	0.10	0.90	3.56	4.57	0.07	0.02	0.07	0.94	98.96	1.06	1.22	729
YGX-23-15		74.40	12.94	1.11	0.03	0.73	3.57	4.61	0.10	0.02	0.05	0.96	98.51	1.06	1.19	736
YGX-23-17		74.99	12.88	1.06	0.04	0.66	3.76	4.53	0.09	0.02	0.04	1.00	99.06	1.05	1.16	721
YGX-23-24		75.31	12.83	0.87	0.01	0.60	3.85	4.42	0.11	0.01	0.04	0.90	98.95	1.05	1.15	711
YGX-19-2	中细粒二云母花岗岩	75.66	12.53	1.09	trace	0.52	3.60	4.39	0.14	0.01	0.03	0.91	98.88	1.08	1.17	698
YGX-19-3		74.49	12.92	0.88	0.03	0.52	3.67	4.88	0.13	0.01	0.02	0.93	98.47	1.06	1.14	724
YGX-19-12		75.77	12.92	0.86	0.02	0.61	4.09	4.36	0.14	0.01	0.03	0.82	99.63	1.03	1.13	721
YGX-19-18		75.69	12.92	0.98	0.01	0.58	3.97	4.41	0.11	0.01	0.03	0.81	99.52	1.05	1.14	707
YGX-21-10		75.57	12.79	0.95	0.02	0.60	3.33	4.68	0.16	0.01	0.02	1.09	99.24	1.10	1.21	724
YGX-21-12		75.86	12.58	1.00	0.01	0.53	3.72	4.34	0.15	0.01	0.03	0.85	99.08	1.07	1.16	705
YGX-23-13		74.75	13.24	0.89	0.04	0.63	3.93	4.55	0.11	0.01	0.03	0.99	99.17	1.06	1.16	723
YGX-23-21	74.74	13.01	0.98	0.04	0.53	4.13	4.43	0.13	0.01	0.03	0.81	98.84	1.04	1.12	712	
YGX-23-29	76.65	12.65	0.91	0.03	0.60	3.93	4.39	0.13	0.01	0.03	0.51	99.83	1.03	1.13	721	
YGX-16-7	细粒白云母花岗岩	76.67	13.09	0.96	0.01	0.53	3.38	5.07	0.16	0.01	0.03	0.94	100.85	1.09	1.18	713
YGX-16-13		75.11	13.05	0.87	0.02	0.51	4.35	4.73	0.08	0.01	0.03	0.72	99.47	0.99	1.06	708
YGX-23-4		75.72	12.62	0.96	trace	0.55	4.03	4.28	0.10	0.01	0.03	0.78	99.08	1.03	1.12	710
YGX-23-25		75.32	12.72	0.92	trace	0.56	4.10	4.30	0.12	0.01	0.03	0.75	98.83	1.02	1.12	721
YGX-1-1		76.55	12.99	0.82	0.08	0.51	4.21	4.18	0.12	0.01	0.02	0.52	100.01	1.05	1.13	725
YGX-1-2		77.04	12.91	0.83	trace	0.49	4.16	4.03	0.11	0.01	0.02	0.47	100.06	1.07	1.15	722
YGX-1-3		75.89	12.90	0.68	trace	0.48	4.00	4.22	0.14	0.01	0.02	0.48	98.81	1.07	1.16	719
YGX-1-7	76.80	12.71	0.82	trace	0.45	3.72	4.27	0.14	0.01	0.02	0.86	99.79	1.10	1.18	711	

(图 3) 下大多呈现了清晰的内部结构, 大多数锆石具有岩浆型锆石振荡环带, 少部分锆石显示有核幔结构。

单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果见表 1 和图 4。中粗粒二云母花岗岩中 2 个样品的自形锆石大部分数据位

于谐和曲线上, YGX23-16 的 20 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均计算为 $169.5 \pm 0.9\text{Ma}$ (MSWD = 1.5); YGX21-7 的 18 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均计算为 $170.7 \pm 1.5\text{Ma}$ (MSWD = 5.2)。中细粒二云母花岗岩中的自形锆石

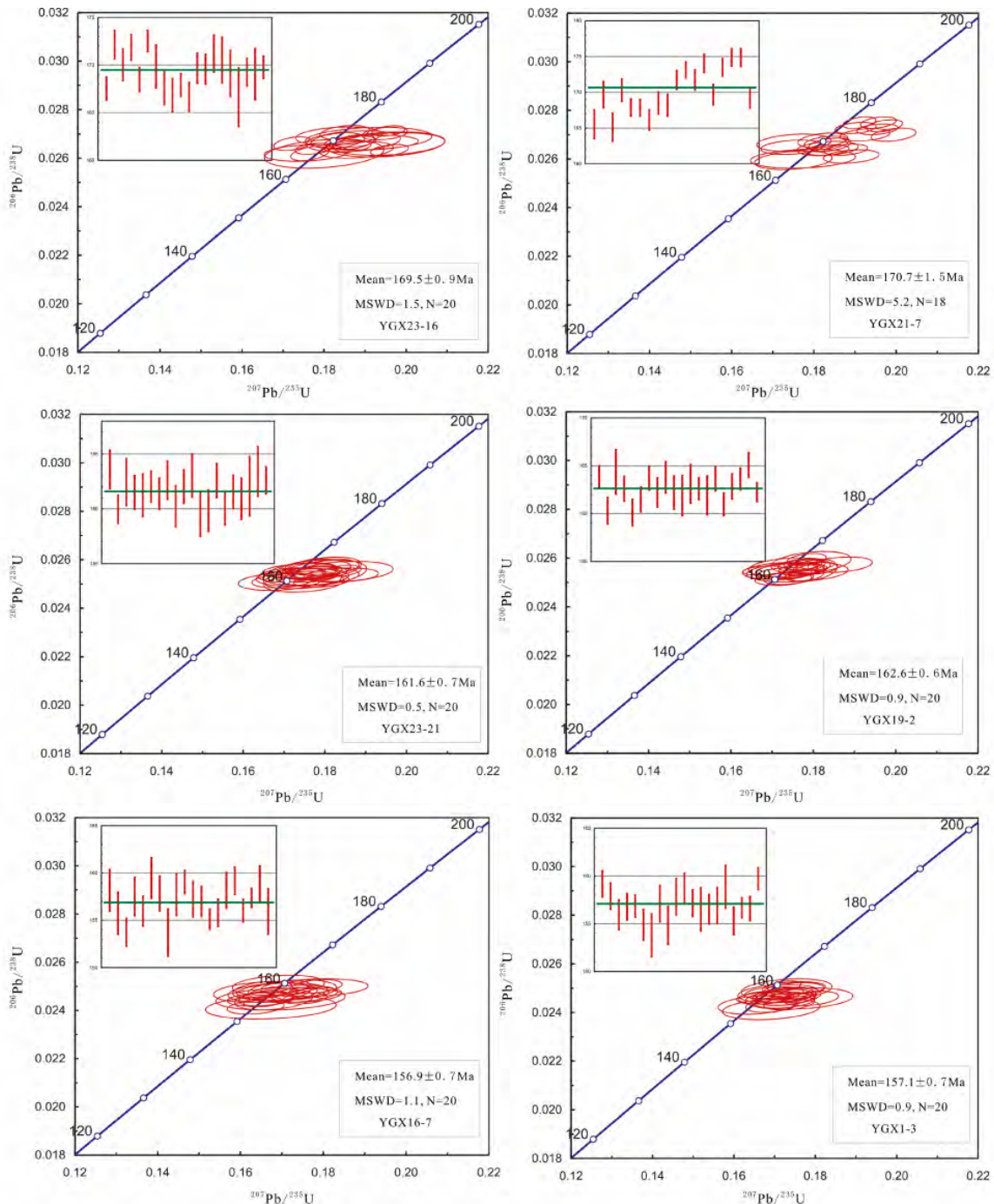


图4 瑶岗仙花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of zircons from the Yaogangxian granites

大部分数据位于谐和曲线上, YGX23-21 的 20 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均计算为 $161.6 \pm 0.7\text{Ma}$ (MSWD = 0.5), YGX19-2 的 20 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均计算为 $162.6 \pm 0.6\text{Ma}$ (MSWD = 0.9)。细粒白云母花岗岩中的自形锆石大部分数据位于谐和曲线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄均指向燕山期, YGX16-7 的 20 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均计算为 $156.9 \pm 0.7\text{Ma}$ (MSWD = 1.1), YGX1-3 的 20 个

据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均计算为 $157.1 \pm 0.7\text{Ma}$ (MSWD = 0.9)。由 U-Pb 定年结果可知, 瑶岗仙花岗岩体形成于燕山早期, 经历了多期成岩事件。

3.2 主量元素组成

瑶岗仙花岗岩的主量元素分析结果(表 2), 主要表现为以下特征: 三种类型的岩石均具有较高的 SiO_2 含量

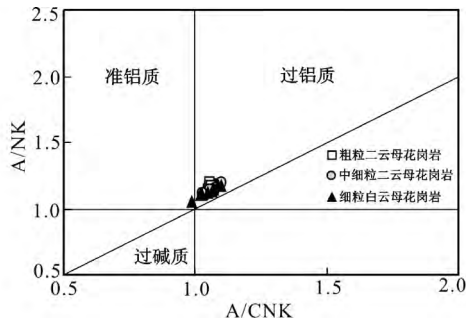


图5 瑶岗仙花岗岩全岩 A/CNK-A/NK 图解(底图据 Maniar and Piccoli, 1989)

图9-图12、图15、图16 图例同此图

Fig. 5 A/CNK-A/NK diagram of the Yaogangxian granites (after Maniar and Piccoli, 1989)

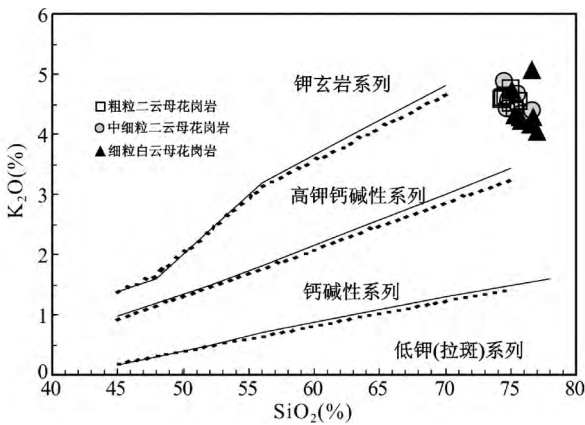


图6 瑶岗仙花岗岩全岩 SiO₂-K₂O 图解(实线据 Peccerillo and Taylor, 1976; 虚线据 Middlemost, 1985)

Fig. 6 SiO₂-K₂O diagram of the Yaogangxian granites (solid lines after Peccerillo and Taylor, 1976; dotted lines after Middlemost, 1985)

(74.34% ~ 77.04%) 和较高的 K₂O 含量 (4.03% ~ 5.07%); 较高的全碱含量 ALK (Na₂O + K₂O = 7.99% ~ 9.08%, 平均 8.32%), 高于正常的世界花岗岩 (Na₂O + K₂O = 7.75%) 和我国花岗岩 (Na₂O + K₂O = 7.82%) (邱家骥, 1985), 大多数花岗岩的 K₂O/Na₂O > 1; 较低的铝饱和指数 (A/CNK 即 Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) = 0.99 ~ 1.10); 较低的 P₂O₅ 含量 (0.005% ~ 0.025%), 较低的 TiO₂ 含量 (0.016% ~ 0.073%), 较低的 MnO 含量 (0.07% ~ 0.16%), 较高的 CaO 含量 (0.447% ~ 0.901%), 铁高而镁低 (Fe₂O₃ = 0.68% ~ 1.23%, MgO ≤ 0.1%)。在全岩 A/CNK-A/NK 图解 (图5) 中, 投影点大部分样品落入弱过铝质区, 只有极少数点落在准铝质区, 表明瑶岗仙花岗岩属弱过铝质系列花岗岩。在全岩 SiO₂-K₂O 图解 (图6) 中, 投影点均落在高钾钙碱性系列, 表明瑶岗仙花岗岩属于高钾钙碱性系列花岗岩。

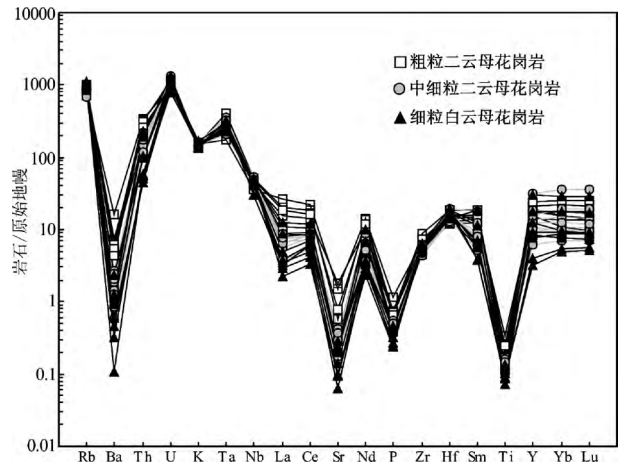


图7 瑶岗仙花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图 (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized spider diagram of the Yaogangxian granites (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

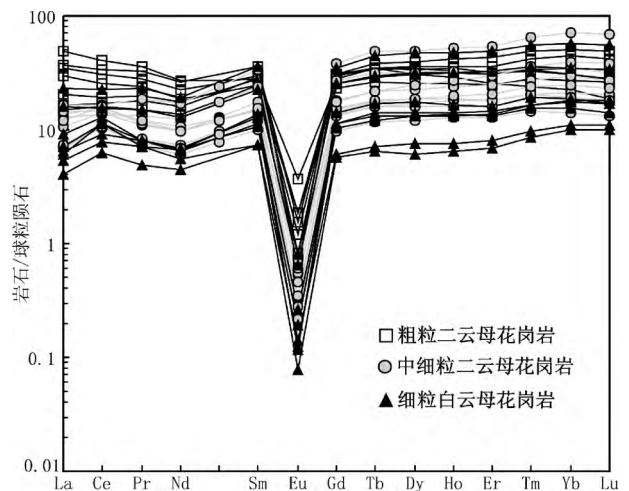


图8 瑶岗仙花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(标准化值据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE pattern diagram of the Yaogangxian granites (normalization values after Taylor and McLennan, 1985)

3.3 微量元素组成

瑶岗仙花岗岩的微量元素和稀土元素分析结果(表3), 主要表现为以下特征: 在原始地幔标准化蛛网图(图7)上可以看出三种类型花岗岩的微量元素变化特征类似, 均以富含大离子亲石元素 K、Rb 和高场强元素 Zr、Hf、Ta、Th、U 等, 而亏损大离子亲石元素 Sr、Ba 和相容元素 P、Ti 等, 表明它们可能来自同一岩浆源。在稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(图8)上可以看出, 三种类型花岗岩的稀土元素特征大致相似, 均具稀土元素总量偏低 ($\Sigma \text{REE} = 24.24 \times 10^{-6} \sim 130.1$)

表3 瑶岗仙花岗岩全岩微量和稀土元素分析结果($\times 10^{-6}$)Table 3 Trace and rare earth element compositions of the Yaogangxian granites ($\times 10^{-6}$)

样品号	YGX-21-7	YGX-23-8	YGX-23-12	YGX-23-14	YGX-23-15	YGX-23-16	YGX-23-17	YGX-19-2	YGX-19-3	YGX-19-12	YGX-19-18	
Rb	624	646	606	458	626	583	617	639	648	539	516	
Ba	11.0	35.5	52.4	112.0	43.9	38.0	30.8	10.3	4.0	6.0	8.1	
Th	17.9	26.9	19.5	28.6	26.3	14.0	21.6	14.5	9.0	12.7	10.6	
U	20.3	21.7	16.7	19.5	23.8	22.8	19.9	19.6	25.1	28.3	23.6	
Ta	16.40	9.64	8.96	7.07	10.50	10.90	12.40	12.60	14.40	11.20	10.70	
Nb	36.2	35.9	30.3	25.7	34.5	32.7	32.9	33.9	33.2	37.8	37.2	
Sr	6.55	12.10	37.60	31.60	16.60	7.87	7.19	3.78	3.69	4.43	5.92	
Zr	50.5	97.2	63.4	75.8	82.1	69.7	68.0	48.0	70.3	70.1	57.1	
Hf	4.48	5.61	3.72	3.79	5.10	5.60	4.97	3.99	5.56	4.85	4.17	
Li	151	386	324	268	386	195	201	367	144	139	157	
Be	6.21	7.55	30.25	19.80	6.38	23.24	8.89	7.04	6.67	10.82	16.13	
Sc	8.65	4.57	4.34	5.59	3.69	2.51	8.17	5.17	3.48	3.63	5.25	
V	0.06	1.29	2.01	4.02	2.06	0.35	0.45	0.60	0.11	0.25	0.66	
Cr	2.62	5.93	2.78	5.04	3.53	3.46	5.33	8.94	5.68	2.56	6.22	
Co	0.44	0.95	0.83	1.17	0.85	0.66	0.84	0.58	0.59	0.46	0.70	
Ni	1.33	2.84	1.26	2.29	2.09	2.18	2.91	3.91	1.89	0.98	2.06	
Ga	21.4	14.9	15.2	17.1	13.0	13.0	20.9	16.0	12.2	12.4	10.8	
Sn	45.1	52.9	51.0	20.0	38.3	41.6	49.5	160.3	40.7	27.8	48.9	
Cs	26.8	59.3	54.2	49.2	67.5	31.7	32.6	40.9	32.2	24.7	36.3	
W	290.0	13.6	9.0	4.5	8.3	7.5	37.7	232.0	6.9	7.7	9.3	
Pb	90.6	83.1	63.9	69.3	77.1	76.6	110.2	101.5	85.6	83.3	93.4	
La	5.99	13.60	10.80	18.20	12.90	5.42	7.60	4.67	2.60	3.95	2.55	
Ce	16.40	32.60	24.70	38.60	29.10	15.50	18.50	12.90	9.78	13.40	10.20	
Pr	2.48	4.43	3.26	4.95	3.84	2.06	2.68	1.83	1.13	1.52	0.99	
Nd	11.30	18.70	13.40	19.30	16.10	9.70	12.40	8.91	5.16	6.83	4.32	
Sm	6.65	8.35	5.62	6.39	6.77	5.65	6.37	5.58	3.05	4.02	2.28	
Eu	0.06	0.13	0.16	0.32	0.16	0.07	0.11	0.05	0.02	0.04	0.02	
Gd	8.49	9.47	7.02	7.77	9.10	9.44	9.28	8.16	4.24	5.45	2.99	
Tb	2.02	2.04	1.51	1.66	1.99	1.96	2.18	1.83	0.93	1.28	0.69	
Dy	13.60	11.80	9.56	11.50	12.90	13.20	15.20	11.90	6.49	8.60	4.58	
Ho	3.07	2.44	2.17	2.65	2.96	2.81	3.59	2.75	1.53	2.01	1.09	
Er	9.00	6.28	6.13	7.64	7.94	7.71	10.70	7.79	4.56	6.11	3.21	
Tm	1.50	0.86	1.00	1.20	1.15	1.18	1.76	1.24	0.74	0.96	0.52	
Yb	10.90	5.50	6.80	8.60	7.57	7.61	12.50	8.55	5.27	7.29	3.49	
Lu	1.57	0.71	1.01	1.29	1.06	1.02	1.86	1.20	0.77	1.03	0.51	
Y	95.70	70.30	63.40	78.20	79.50	86.20	110.0	85.50	42.30	61.40	27.80	
Σ REE	93.03	116.9	93.14	130.1	113.5	83.33	104.7	77.36	46.27	62.49	37.43	
(La/Yb) _N	0.37	1.67	1.07	1.43	1.15	0.48	0.41	0.37	0.33	0.37	0.49	
δ Eu	0.03	0.05	0.08	0.14	0.06	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	
δ Ce	1.00	0.98	0.97	0.94	0.96	1.09	0.96	1.03	1.33	1.28	1.51	
样品号	YGX-21-12	YGX-23-13	YGX-23-21	YGX-23-29	YGX-16-7	YGX-16-13	YGX-23-4	YGX-23-25	YGX-1-1	YGX-1-2	YGX-1-3	YGX-1-7
Rb	576	596	597	443	679	600	548	575	652	626	649	707
Ba	8.7	18.8	16.8	14.3	8.8	16.1	6.4	8.3	3.3	0.7	2.2	4.2
Th	8.5	12.2	10.2	15.1	19.5	8.5	8.8	16.2	4.4	5.1	4.7	3.8
U	20.2	22.9	25.4	22.6	21.7	21.2	25.5	27.9	24.8	22.9	17.3	20.5
Ta	13.00	10.00	11.60	8.60	12.10	9.46	10.20	11.30	12.90	11.40	10.00	13.50
Nb	34.1	33.3	34.1	30.9	34.7	32.5	33.4	36.1	35.3	34.1	28.8	21.4
Sr	4.30	8.72	6.25	7.70	4.73	6.04	4.98	4.26	1.96	1.34	2.10	3.00
Zr	53.5	70.0	61.6	69.2	58.8	62.3	59.8	69.9	71.9	66.9	64.1	56.0
Hf	3.97	4.84	5.15	4.82	4.46	4.95	4.57	5.23	5.92	5.34	5.36	5.07
Li	183	271	159	112	238	158	119	138	240	239	316	175
Be	14.57	6.67	17.02	8.06	16.79	11.90	9.00	25.80	14.23	23.13	14.46	20.02
Sc	3.74	3.21	3.09	3.64	8.90	3.96	3.32	4.43	6.39	5.56	5.31	3.70
V	0.69	0.68	0.35	0.56	0.67	0.83	0.28	0.01	1.23	0.83	0.96	0.61
Cr	6.52	5.11	2.02	3.98	7.27	4.83	14.70	3.69	15.30	5.09	7.36	6.64
Co	0.63	0.50	0.54	0.70	0.58	0.54	0.63	0.88	0.91	0.67	0.51	0.60

续表 3

Continued Table 3

样品号	YGX-21-12	YGX-23-13	YGX-23-21	YGX-23-29	YGX-16-7	YGX-16-13	YGX-23-4	YGX-23-25	YGX-1-1	YGX-1-2	YGX-1-3	YGX-1-7
Ni	5.86	1.95	1.94	1.77	3.18	1.54	10.10	1.95	19.50	1.81	2.94	4.53
Ga	13.6	12.4	13.1	12.2	19.9	11.9	12.0	13.9	12.9	13.0	13.1	12.4
Sn	40.1	40.8	39.3	17.0	57.0	26.3	34.7	30.6	33.9	33.6	36.7	54.1
Cs	28.5	43.7	29.8	30.7	27.1	32.9	37.6	42.2	59.7	63.0	77.3	38.7
W	7.4	10.8	13.0	4.5	8.7	6.5	7.1	5.6	6.0	4.4	5.7	4.7
Pb	100.2	91.0	87.5	85.6	84.7	93.8	93.7	96.1	96.6	90.1	99.6	112.1
La	2.65	5.07	4.41	5.30	8.57	2.60	3.38	5.94	1.51	1.99	2.37	2.21
Ce	10.30	14.70	15.10	14.00	21.40	10.90	12.40	15.00	5.98	7.39	8.64	10.80
Pr	1.04	1.66	1.56	1.63	3.13	1.11	1.11	2.04	0.68	0.96	1.11	0.97
Nd	4.89	7.51	6.80	6.95	13.70	4.85	4.80	9.24	3.13	3.95	4.57	4.68
Sm	2.75	3.39	3.44	3.54	8.33	2.95	2.49	5.15	1.69	1.70	2.65	3.18
Eu	0.03	0.06	0.03	0.05	0.07	0.02	0.02	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01
Gd	4.00	4.60	4.71	5.40	10.65	3.47	3.42	7.67	1.84	1.73	3.13	4.36
Tb	0.92	1.00	1.06	1.27	2.55	0.82	0.77	1.72	0.42	0.37	0.71	1.00
Dy	6.01	6.99	7.14	9.32	17.80	5.40	5.10	12.00	2.87	2.32	5.03	6.60
Ho	1.34	1.57	1.68	2.30	4.01	1.20	1.16	2.70	0.64	0.55	1.14	1.39
Er	4.02	4.54	5.05	7.40	12.00	3.60	3.34	8.21	2.02	1.69	3.40	3.99
Tm	0.68	0.72	0.86	1.27	1.96	0.59	0.55	1.29	0.34	0.30	0.59	0.68
Yb	4.73	4.83	6.18	9.65	14.30	4.35	3.80	8.60	2.70	2.46	4.48	4.65
Lu	0.66	0.69	0.88	1.44	2.09	0.64	0.54	1.27	0.41	0.38	0.68	0.64
Y	41.20	47.60	57.80	69.90	136.00	34.90	38.40	80.90	18.20	14.40	41.60	56.60
ΣREE	44.02	57.34	58.89	69.52	120.6	42.50	42.88	80.88	24.25	25.80	38.51	45.16
(La/Yb) _N	0.38	0.71	0.48	0.37	0.40	0.40	0.60	0.47	0.38	0.55	0.36	0.32
δEu	0.03	0.05	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01
δCe	1.45	1.18	1.35	1.11	0.97	1.50	1.50	1.01	1.38	1.24	1.24	1.72

表 4 瑶岗仙花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素 TIMS 分析结果

Table 4 Sr and Nd isotopic compositions of the Yaogangxian granites

样品号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	SE	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _i	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	SE	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd} (t)	t _{2DM} (Ma)
YGX-21-7					0.3556	0.512362	5	0.511966	-8.8	1675
YGX-23-8	154.4842	1.090036	12	0.716661	0.2698	0.512144	2	0.511844	-11.2	1869
YGX-23-12	46.6361	0.828641	6	0.715926	0.1265	0.512101	1	0.511960	-9.0	1685
YGX-23-14	41.9387	0.823816	7	0.727229	0.2000	0.512104	6	0.511892	-10.5	1810
YGX-19-5					0.4008	0.51233	1	0.511905	-10.2	1806
YGX-23-29	166.4754	1.113531	22	0.730130	0.3078	0.512238	2	0.511912	-10.1	1787
YGX-1-2					0.2600	0.512274	2	0.512007	-8.4	1647
YGX-1-3					0.3504	0.512222	1	0.511862	-11.2	1888
YGX-16-7					0.3674	0.512236	1	0.511859	-11.3	1895
YGX-23-25	349.5408	1.51202	25	0.731884	0.3368	0.512239	2	0.511893	-10.6	1837

$\times 10^{-6}$) 轻重稀土分异不明显(LREE = $13 \times 10^{-6} \sim 87.75 \times 10^{-6}$, HREE = $9.8 \times 10^{-6} \sim 73.2 \times 10^{-6}$, LREE/HREE = 0.6 ~ 2.7) 呈“海鸥式”分布, 稍微富集重稀土((La/Yb)_N = 0.32 ~ 1.67, 平均为 0.6), 均具有强烈的负 Eu 异常(δEu = 0.01 ~ 0.14) 等特征, 表明花岗岩体经历了高度演化。

3.4 Sr-Nd 同位素组成

根据上文测得的锆石 U-Pb 年龄, 采用 Mculloch *et al.* (1982) 公式计算样品初始 Sr、Nd 同位素组成, 结果见表 4, 其

中(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i 在 0.511844 ~ 0.512007 之间, ε_{Nd}(t) 在 -11.3 ~ -8.4 之间。由于某些花岗岩样品 Rb/Sr 比值较高, 对其 Sr 初始值的校正影响较大, 导致全岩的 Sr 同位素组成变化较大, 因此仅选择样品 ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 值较小的样品进行 Sr 初始值的计算, I_{Sr} 在 0.7159 ~ 0.7318 之间。

采用两阶段模式(Liew and Hofmann, 1988; 陈江峰等, 1999) 计算 Nd 模式年龄, 计算公式为: $t_{2DM} = (1/\lambda) \ln\{1 + \frac{[(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{DM} - \frac{[(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_c](e^{\lambda t} - 1)]}{[(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_c - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{DM}]}\}$

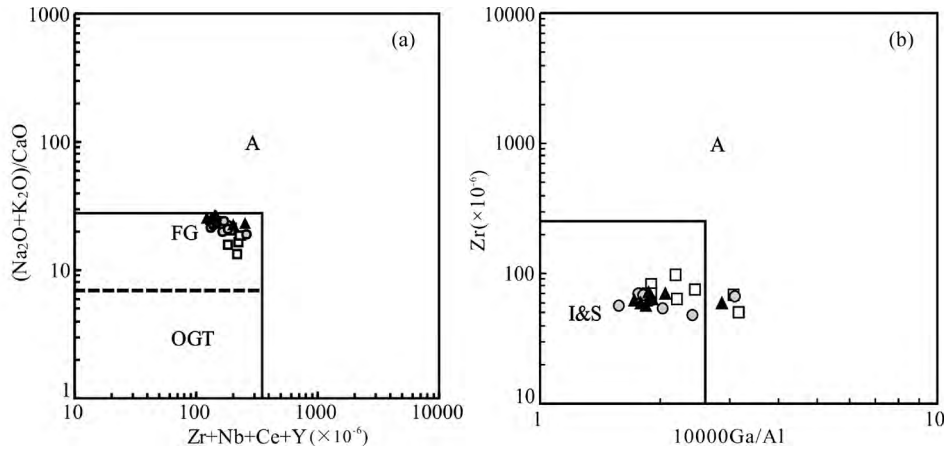


图9 瑶岗仙花岗岩 Zr + Nb + Ce + Y-(K₂O + Na₂O) /CaO 图解 (a) 和 10000Ga/Al-Zr 图解 (b) (据 Whalen *et al.* , 1987)

Fig. 9 Zr + Nb + Ce + Y vs. (K₂O + Na₂O) /CaO diagram (a) and 10000Ga/Al vs. Zr diagram (b) of the Yaogangxian granites (after Whalen *et al.* , 1987)

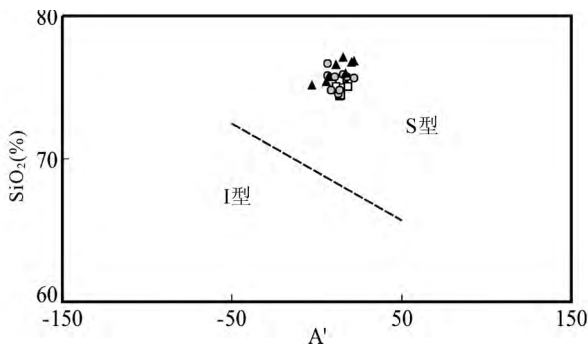


图10 瑶岗仙花岗岩 SiO₂-A'图解 (据刘昌实和朱金初, 1989)

Fig. 10 SiO₂-A' diagram of the Yaogangxian granites (after Liu and Zhu , 1989)

$^{144}\text{Nd}_{\text{DM}} \}} \lambda$ (其中 $\lambda = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$, 下标 m 表示样品测定值, 下标 CHUR 为球粒陨石均一储库, 下标 DM 表示亏损地幔值, t 为岩石结晶年龄, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2168$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.51325$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{c}} = 0.118$)。瑶岗仙花岗岩的两阶段模式年龄 $t_{2\text{DM}}$ 在 1.64 ~ 1.89Ga 之间, 表明瑶岗仙花岗岩有较古老的源区。

4 讨论

4.1 岩石类型

根据原岩类型将花岗岩划分为 I 型、S 型、M 型和 A 型花岗岩仍是目前应用较广泛的花岗岩成因分类方法 (Chappell and White, 1974; Picher, 1983, 1993)。然而对于高演化程度花岗岩的成因分类通常比较困难, 因为经历了高度分异结晶作用之后的花岗质岩石的主量元素和矿物相趋向于最低共熔点组分, 这给原岩的判定造成了很大的困难 (Li *et al.* ,

2007)。

瑶岗仙花岗岩具有明显的超碱、富碱、高钾、贫钙、弱过铝、高铁镁比等特征, 元素地球化学分析表明其为高度演化的花岗岩。10000Ga/Al 比值和 Zr + Nb + Ce + Y 被认为能够有效地将 A 型与 I 型、S 型和 M 型进行区分 (Whalen *et al.* , 1987), 虽然有时由于高演化的岩浆也富集高场强元素而发生部分重叠, 但在大多数的应用中表明是有效的 (Wu *et al.* , 2003; 吴福元等, 2007)。根据 Whalen *et al.* (1987) 花岗岩判别图解 (图 9) 可以看出, 瑶岗仙花岗岩 10000Ga/Al 大部分要小于典型的界限 2.6 且 Zr + Nb + Ce + Y 也小于典型 A 型花岗岩的明显界限 350×10^{-6} , 大多数样品落入分异的 I 型或 S 型花岗岩区。

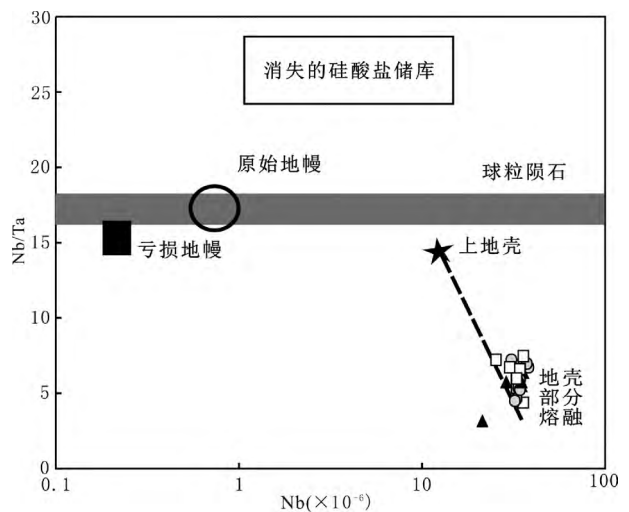


图11 瑶岗仙花岗岩 Nb-Nb/Ta 图解 (据 Barth *et al.* , 2000)

Fig. 11 Nb vs. Nb/Ta diagram of the Yaogangxian granites (after Barth *et al.* , 2000)

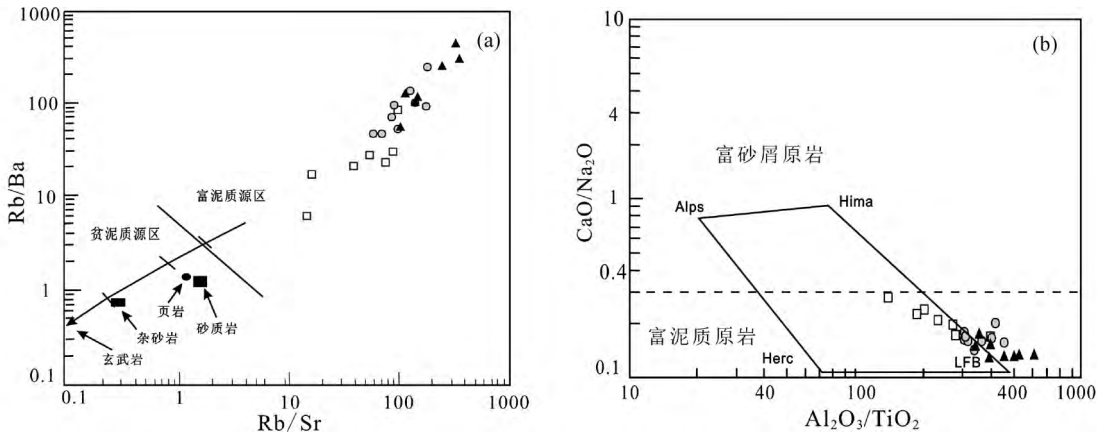


图 12 瑶岗仙花岗岩 Rb/Sr-Rb/Ba 图解 (a) 和 Al_2O_3/TiO_2 -CaO/Na₂O 图解 (b) (据 Sylvester, 1998)

Fig. 12 Rb/Sr vs. Rb/Ba diagram (a) and Al_2O_3/TiO_2 vs. CaO/Na₂O diagram (b) of the Yaogangxian granites (after Sylvester, 1998)

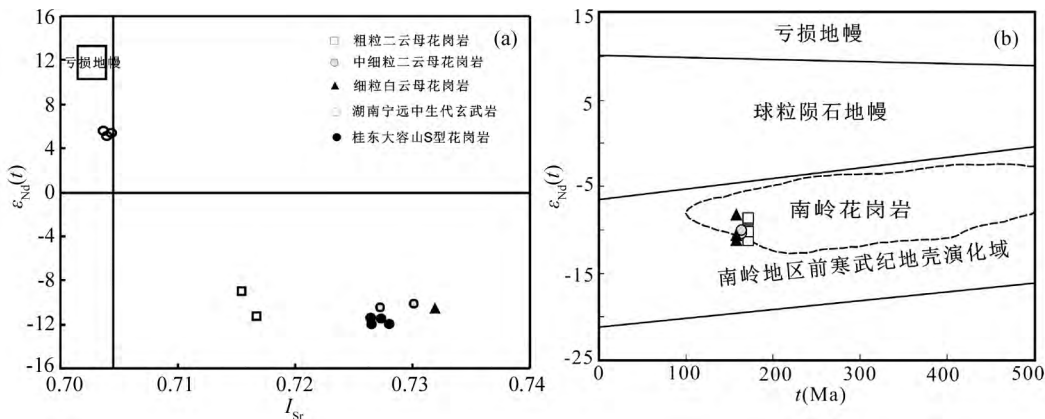


图 13 瑶岗仙花岗岩 I_{Sr} - $\epsilon_{Nd}(t)$ 图解 (a, 大容山花岗岩数据来自祁昌实等 2007) 和 $\epsilon_{Nd}(t)$ - t 图解 (b, 据孙涛等, 2003)

Fig. 13 Initial Sr isotope I_{Sr} vs. initial Nd isotope ratio $\epsilon_{Nd}(t)$ diagram (a, data of the Darongshan granites after Qi *et al.*, 2007) and initial Nd isotope ratio $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. t diagram (b, after Sun *et al.*, 2003) of the Yaogangxian granites

刘昌实和朱金初 (1989) 利用 SiO_2-A' [$A' = (Al-Na-K-2Ca) \times 1000$, 原子数] 的关系图来判别华南改造型 (S 型) 和同熔型 (I 型) 花岗岩, 通过 $SiO_2 = 69.09 - 0.06819A'$ 的直线作为两者的分界, 认为线的上部为改造型花岗岩 (S 型), 线的下部为同熔型花岗岩 (I 型), 瑶岗仙花岗岩样品落在 S 型花岗岩区 (图 10)。

锆石是最早结晶的副矿物之一, 对温度极为敏感且不易遭到后期流体蚀变, 其结晶温度可近似代表花岗质岩浆的近液相线温度。采用 Watson and Harrison (1983) Zr 饱和温度计估算出瑶岗仙花岗岩结晶时的温度范围在 698 ~ 752°C 之间 (表 2), 表明其形成温度较低, 与 S 型花岗岩特征一致。

通过上述几种方法对瑶岗仙花岗岩岩石类型的判别可知, 瑶岗仙花岗岩属于分异的 S 型花岗岩。

4.2 成岩源区

瑶岗仙花岗岩强烈亏损 Ba、Sr、Ti, 而 Nb、Ta 略亏损, Nb/

Ta 低于正常花岗岩和大陆地壳的平均值 (约 11; Green, 1995), 在 Nb/Ta-Nb 图解 (图 11) 上, 数据位于上地壳平均值右下方, 说明花岗岩原始岩浆来源于地壳物质的熔融 (Barth *et al.*, 2000)。

过铝质花岗岩 Rb-Sr-Ba 的变化与它们源岩中起作用的泥质岩及砂屑岩的源区一致, 因此, 可利用 Rb-Sr-Ba 系统比值确定源区的成分 (Sylvester, 1998), 在 Rb/Sr-Rb/Ba 图解 (图 12a) 之中, 岩体的投影点均位于富泥质源区。CaO/Na₂O 比值是判断过铝质花岗岩源区的一个重要指标, 泥岩生成的花岗岩 CaO/Na₂O 比值一般小于 0.3, 而碎屑岩生成的花岗岩 CaO/Na₂O 比值一般大于 0.3 (Chappell and White, 1992)。瑶岗仙花岗岩的大多数样品的 CaO/Na₂O < 0.3 (平均为 0.18), 说明其源区物质主要由泥质岩组成 (图 12b)。

Sr-Nd 同位素研究表明, 岩体具有较高的 I_{Sr} 在 0.7159 ~ 0.7318, 较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 在 -11.3 ~ -8.4, 高 I_{Sr} 、低 $\epsilon_{Nd}(t)$ 的

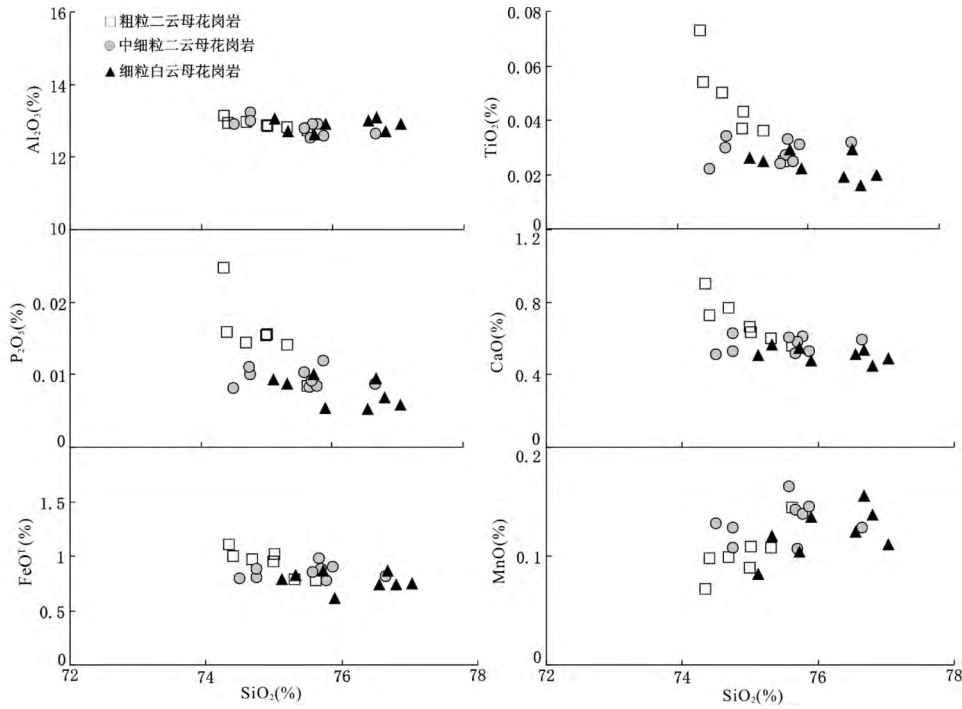


图 14 瑶岗仙花岗岩主要氧化物的 Harker 图解(据 Bhatia ,1983)

Fig. 14 Harker diagram of the main oxides for the Yaogangxian granites (after Bhatia ,1983)

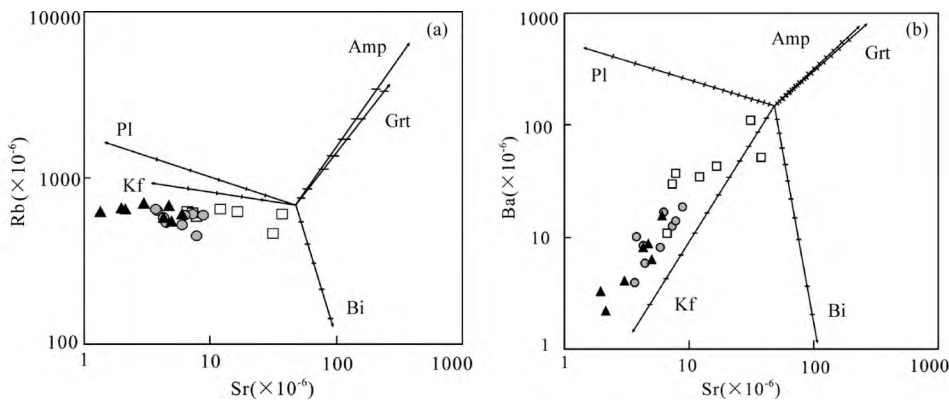


图 15 瑶岗仙花岗岩 Sr-Rb 图解 (a) 和 Sr-Ba 图解 (b)

Pl-斜长石; Kf-钾长石; Bi-黑云母; Amp-角闪石; Grt-石榴石

Fig. 15 Sr-Rb diagram (a) and Sr-Ba diagram (b) of the Yaogangxian granites

同位素组成显示出壳源花岗岩的 Sr-Nd 同位素特点。在 $I_{Sr}-\epsilon_{Nd}(t)$ 图解(图 13a) 上, 瑶岗仙花岗岩 Sr-Nd 同位素组成与来源于大陆上地壳物质重熔的桂东南大容山堇青石 S 型花岗岩相当(祁昌实等 2007), 在 $\epsilon_{Nd}(t) \rightarrow t$ 图解(图 13b) 上, 样品点落在南岭地区前寒武纪地壳演化域(孙涛等, 2003), 两阶段 Nd 模式年龄为 1.6 ~ 1.9Ga, 表明花岗岩成岩物质来源于古元古代地壳。我们在一颗锆石的核部发现明显的继承锆石, $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 $1946 \pm 9Ma$, 表明花岗岩源岩年龄可能在 1.95Ga 左右, 为古元古代华夏地块的存在提供了直接的证据, 也证实该地区中生代岩浆作用有古老地壳物质的参与。

通过上述几种方法对瑶岗仙花岗岩源区的判别可知, 瑶岗仙花岗岩体可能是由古元古代的泥质岩低程度部分熔融而来。

4.3 岩浆演化

在主要氧化物的 Harker 图解(图 14) 上, 各期花岗岩的 SiO_2 与 TiO_2 、 P_2O_5 、 CaO 、 FeO^T 有较好的负相关趋势, 说明磷灰石、钛铁矿、斜长石等矿物的分离结晶作用明显。从判别图解上可以看出, 粗粒二云母花岗岩、中细粒二云母花岗岩和细粒白云母花岗岩, 化学特征相近, 有相同的演化趋势线

且演化程度逐渐增高。

在稀土元素球粒陨石标准化分布型式图上可以看出, 岩体具有典型的 M 型四分组效应, 说明其为高程度演化的晚阶段花岗岩(赵振华等, 1999)。在微量元素图解上, 各期花岗岩明显亏损 Ba、Sr、P、Ti、Nb 和 Eu 等元素, 暗示了花岗岩在形成过程中经历了强烈的结晶分离作用。Nb-Ti 的亏损可能由于含 Ti 矿物相(钛铁矿、榍石等)的分离结晶作用所致, 而 P 的亏损应该是磷灰石的分离结晶作用造成的。强烈的 Eu 亏损必须有大量的斜长石或者钾长石的结晶分异, 斜长石的分离会导致 Sr-Eu 异常, 钾长石的分离会造成 Ba-Eu 异常。Rollinson (1993) 将岩石演化趋势的斜率与模拟的矿物分离矢量图进行对比, 用于识别出造成花岗质岩石成分变化的结晶分离矿物。从 Sr-Rb 图解(图 15a)、Sr-Ba 图解(图 15b)中可以看出, 在岩浆演化过程中, Sr 和 Ba 的含量迅速下降, 钾长石的分离结晶作用可能占主导优势, 这一推测与 K_2O 随 SiO_2 含量升高而降低, 以及二云母花岗岩呈似斑状结构和斑晶以钾长石为主的特征一致。

4.4 构造背景

在距今 180 ~ 155Ma 期间, 南岭地区进入燕山运动的早期阶段, 在全区范围内掀起了一轮大规模的花岗质岩浆活动, 是该区早中生代花岗质岩浆活动的主体(孙涛等, 2003)。近年来研究成果表明, 南岭地区燕山早期花岗岩类形成于继印支造山运动以后的一种后造山的大陆裂解的地球动力学背景(陈培荣等, 2002; 周新民, 2003; 朱金初等, 2008)。在早期岩石圈局部拉张裂解的基础上, 华南地区在 170Ma 之后的燕山中期发生了更大规模的“造山后”岩石圈伸展-减薄, 并形成了大量的陆壳重熔型花岗岩类(华仁民等, 2005)。由年代学结果可知, 瑶岗仙花岗岩体由二云母花岗岩到白云母花岗岩的成岩年龄依次为 170Ma、162Ma、157Ma, 均属燕山早期, 形成于后造山的岩石圈伸展-减薄环境。

高钾钙碱性(HKCA)岩浆活动是后碰撞岩浆作用的重要特点(Liegeois, 1998), 发生在同碰撞岩石圈加厚之后, 以及向非造山板内活动的过渡时期。瑶岗仙花岗岩属于高钾钙碱性系列, 进一步证明了瑶岗仙花岗岩体侵位时处于陆壳伸展-减薄的构造环境。

4.5 成岩成矿关系探讨

一些学者认为, 南岭地区的成矿作用与该区分布广泛的花岗岩具有密切的成因联系(毛景文等, 1999, 2007; 华仁民等, 2003; 周新民, 2007)。而近年来, 一些学者对花岗岩与成矿作用的成因关系提出了质疑, 如张旗等(2010)认为花岗岩与成矿有关不是成因联系而是时空关系。为此我们从瑶岗仙钨矿成矿所需的物源条件及流体来源和成岩成矿时差对瑶岗仙花岗岩与钨成矿的关系进行重新探讨。

花岗岩是否能够成为钨成矿的母岩, 取决于三个方面的

因素: 花岗岩岩浆是否具备较好的含矿性? 花岗岩是否发生了充分的演化作用而导致成矿元素的进一步富集? 花岗岩是否存在有利于钨成矿元素迁移富集的流体环境? 岩石化学、矿物化学研究可以成为花岗岩成矿示踪的重要手段(王汝成等, 2008)。前人研究表明, 上地壳钨丰度在地球各圈层中最高, 泥岩钨丰度在中国东部沉积岩中最高(马东升, 2009), 而瑶岗仙花岗岩体原岩为上地壳泥岩, 因此瑶岗仙花岗岩体的原岩具有较高的钨背景值。瑶岗仙钨矿矿体赋存于花岗岩体内外接触带, 花岗岩中 W 含量由 4.4×10^{-6} 到几百个 10^{-6} 变化, 远高于一般花岗岩的钨丰度 $1 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-6}$ (马东升, 2009), 可为成矿作用的发生提供丰富的物源。前述研究表明, 瑶岗仙花岗岩在形成过程中经历了强烈的分离结晶作用, 花岗质岩浆发生了高度演化。Nb 和 Ta、Zr 和 Hf 是两对地球化学“孪生”元素, 在由熔体和晶体支配的岩浆演化过程中, 它们极其相似的半径和电价使得它们在熔体和晶体间的分配系数也近似。因此 Nb-Ta、Zr/Hf 在岩浆演化过程中几乎不发生变化, 只有当岩浆高度演化并产生富挥发分流体时才会偏离大陆地壳的平均值(Cerny *et al.*, 1986; Bau, 1996; Dostal and Chatterjee, 2000), SiO_2 -Zr/Hf、 SiO_2 -Nb-Ta 图解(图 16a, b)表明岩浆经历了高度演化并产生富挥发分流体。

花岗岩中钨高度富集的重要标志是出现钨独立矿物。对瑶岗仙花岗岩中光薄片的镜下观察和能谱分析表明, 瑶岗仙第二阶段中细粒二云母花岗岩和第三阶段细粒白云母花岗岩中均含有黑钨矿, 能谱分析表明其成分主要为 (Fe, Mn) WO_4 (图 17), 有些黑钨矿中还有少量 Nb 形成铌黑钨矿, 花岗岩中黑钨矿的存在为花岗岩的成矿能力提供了有力的证据。萤石主要由热液作用和外生作用形成, 岩浆演化到热液过程时往往形成大量的萤石。瑶岗仙花岗岩第二阶段和第三阶段花岗岩中含有大量的萤石, 表明花岗岩演化到后期时可能分演出了富 F 的流体。手标本和显微镜下发现, 黑钨矿周围经常伴生有萤石, 黑钨矿与萤石的密切共生关系与 Audétat *et al.* (2000) 对澳大利亚新英格兰地区 Sn-W-F 矿化 Mole 花岗岩流体包裹体 LA-ICP-MS 的研究结果一致, 钨迁移的主要形式可能是 W 的氟化物络合物。

对瑶岗仙钨矿床成矿年代学已有较多的研究, Peng *et al.* (2006) 通过对与黑钨矿共生的辉钼矿 Re-Os 定年, 得到成矿年龄为 154.9 ± 2.6 Ma, 对热液成因的金云母、白云母和黑云母进行氩同位素定年, 得到坪年龄分别为 153.0 ± 1.1 Ma、 155.1 ± 1.1 Ma、 159.0 ± 1.5 Ma。毛景文等(2007)通过对与黑钨矿共生的辉钼矿 Re-Os 定年, 得到成矿年龄为 163.3 ± 2.1 Ma。将成岩成矿年代学进行对比结合花岗岩与石英脉型黑钨矿空间接触关系可见, 瑶岗仙复式花岗岩体有 170Ma、162Ma、157Ma 三期成岩事件, 而与其对应的成矿事件可能有 163Ma、155Ma 两期, 成岩成矿年代在误差范围内一致, 表明瑶岗仙钨矿床的成岩事件和成矿事件都是连贯的地质事件。

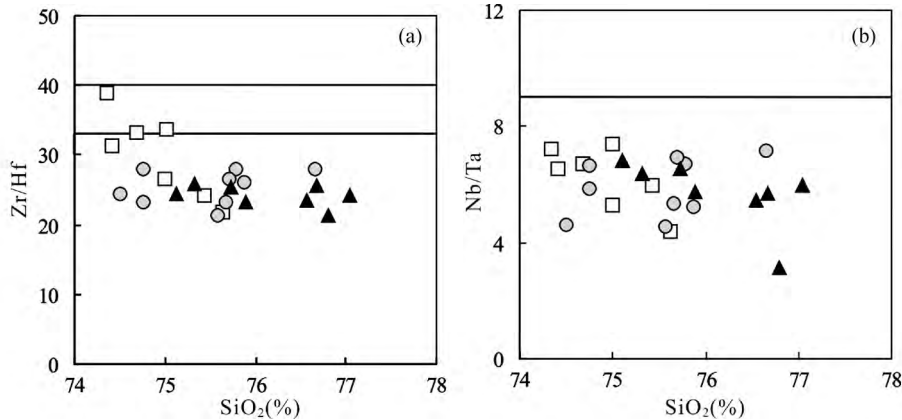


图 16 瑶岗仙花岗岩 SiO_2 -Zr/Hf 图解 (a, 33 ~ 40 为大陆地壳范围) 和 SiO_2 -Nb/Ta 图解 (b, 9 ~ 14 为大陆地壳范围)

Fig. 16 SiO_2 vs. Zr/Hf diagram (a) and SiO_2 vs. Nb/Ta diagram (b) of the Yaogangxian granites

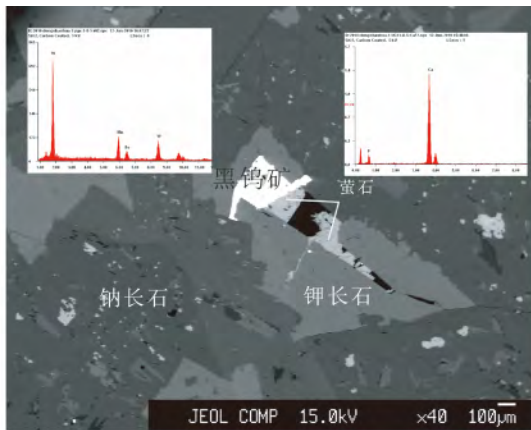


图 17 瑶岗仙花岗岩背散射电子图像及能谱图

Fig. 17 Backscattered electron image and spectral images from the Yaogangxian granites

综上所述,我们认为瑶岗仙复式花岗岩体及脉型黑钨矿床可能存在以下成岩成矿模式:燕山早期南岭地区发生了大规模的陆内伸展-减薄,古元古代的变质泥岩发生低程度部分熔融形成了瑶岗仙复式花岗岩体。岩浆演化过程中经历了高度分离结晶并产生富挥发分的流体,为岩浆期后热液阶段成矿作用提供了初始成矿流体。初始成矿流体演化过程中经历了自然冷却以及与大气降水的混合作用等过程(董少花等 2011) 这些过程相互作用使得成矿流体的物理化学条件不断改变,从而使钨不断富集沉淀成矿。

5 结论

(1) 瑶岗仙花岗岩高硅、富碱,属于高钾钙碱性系列,为分异的 S 型花岗岩。元素地球化学及 Sr-Nd 同位素特征表明,瑶岗仙花岗岩体可能是由古元古代的泥质岩低程度部分熔融而来。

(2) 系统的单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄测定表明,瑶岗仙花岗岩成岩年龄为 170 ~ 157Ma,处于燕山早期陆内伸展-减薄的构造环境。花岗岩体有多期成岩事件,分别为:170Ma 形成的中粗粒二云母花岗岩,162Ma 形成的中细粒二云母花岗岩,157Ma 形成的白云母花岗岩,表明花岗岩质岩浆经历了多期脉动侵位。

(3) 瑶岗仙花岗岩体的原岩具有较高的钨背景值,可为成矿作用的发生提供丰富的物源。花岗质岩浆经历了高度分离结晶并产生富挥发分的流体,可能为岩浆期后热液阶段成矿作用提供了原始流体。瑶岗仙花岗岩的成岩事件与钨矿床成矿事件在时空上高度吻合,成岩与成矿有密切的成因联系。

致谢 锆石 U-Pb 定年实验过程中得到中国地质大学(武汉)的刘勇胜教授和胡兆初博士的指导;阴极发光实验中得到西北大学的弓虎军教授的帮助;论文成文过程中得到中国科学院地球化学研究所钟宏研究员的帮助;在此谨致谢意。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Audélat A, Günther D and Heinrich CA. 2000. Magmatic-hydrothermal evolution in a fractionating granite: A microchemical study of the Sn-W-F-mineralized Mole Granite (Australia). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(19): 3373-3393
- Barth MG, McDonough WF and Rudnick RL. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust. *Chemical Geology*, 165: 197-213
- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 126: 323-333
- Bhatia MR. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, 91: 611-627
- Bi XW, Hu RZ, Ye ZJ and Shao SX. 2000. Relations between A-type granites and copper mineralization as exemplified by the

- Machangqing Cu deposit. *Science in China (Series D)*, 43(1): 93–102
- Cerny P, Goad BE, Hawthorne FC and Chapman R. 1986. Fraction trends of the Nb- and Ta-bearing oxide minerals in the Greer Lake pegmatitic granite and its pegmatite aureole, southeastern Manitoba. *American Mineralogist*, 71: 501–517
- Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173–174
- Chappell BW and White AJR. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt. *Geological Society of America Special Papers*, 272: 1–26
- Che QJ, Li JD, Wei SL and Wu GY. 2005. Elementary discussion on the tectonic background of deposit-concentrated Qianlishan-Qitianling area in Hunan. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(2): 204–214 (in Chinese with English abstract)
- Chen HW, Hu RZ, Peng JT and Bi XW. 2011. Helium and argon isotopic compositions of ore-forming fluid from the Yaogangxian tungsten deposit and their geological implications. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 597–603 (in Chinese with English abstract)
- Chen JF, Guo XS, Tang JF and Zhou TX. 1999. Nd isotopic model ages: Implications of the growth of the continental crust of southeastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 35(6): 649–658 (in Chinese with English abstract)
- Chen PR, Hua RM, Zhang BT, Lu JJ and Fan CF. 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region—Petrological constraints and geodynamic settings. *Sciences in China (Series D)*, 32(4): 279–289 (in Chinese)
- Chen YR. 1981. Geological characteristics and symbols of Yaogangxian tungsten deposit. *Geology and Exploration*, (2): 25–30 (in Chinese)
- Chen YR. 1988. Geological and geochemical characteristics and diagenetic minerogenetic processes of Yaogangxian granite. *Mineral Resources and Geology*, (1): 22–28 (in Chinese with English abstract)
- Chen YR. 1992. Analysis of the control factors and conditions of the mineralization in Yaogangxian orefield, Yizhang County, Hunan. *Hunan Geology*, 11(4): 285–293 (in Chinese with English abstract)
- Department of Geology of Nanjing University. 1981. *Granitoids of Different Ages in South China and Their Metallogenetic Relations*. Beijing: Science Press, 1–395 (in Chinese)
- Dong SH, Bi XW, Hu RZ, Chen YW and Chen H. 2011. Characteristics of the ore-forming fluid in Yaogangxian quartz-vein wolframite deposit, Hunan Province. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 31(2): 54–60 (in Chinese with English abstract)
- Dostal J and Chatterjee AK. 2000. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton. *Chemical Geology*, 163: 207–218
- Granitoid Research Group of Nanling Project, MGMR. 1989. *Geology of Granitoids of Nanling Region and Their Petrogenesis and Mineralization*. Beijing: Geological Publishing House, 1–471 (in Chinese)
- Green TH. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical Geology*, 120: 347–359
- Holland HD. 1972. Granite, solutions, and base metal deposits. *Economic Geology*, 67: 281–301
- Hua RM, Chen PR, Zhang WL, Liu XD, Lu JJ, Lin JF, Yao JM, Qi HW, Zhang ZS and Gu SY. 2003. Metallogenic systems related to Mesozoic-Cenozoic granitoids in south China. *Science in China (Series D)*, 33(4): 335–343 (in Chinese)
- Hua RM, Chen PR, Zhang WL and Lu JJ. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China. *Mineral Deposits*, 24(2): 99–107 (in Chinese with English abstract)
- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1979. *Geochemistry of Granitoids in South China*. Beijing: Science Press, 1–421 (in Chinese)
- Ishihara S. 1981. The granitoid series and mineralization. *Economic Geology*, 75: 458–484
- Li XH, Li WX and Li ZX. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1873–1885
- Liegeois JP, Navez J, Hertogen J and Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids: The use of sliding normalization. *Lithos*, 45: 1–28
- Liew TC and Hofmann AW. 1988. Precambrian crustal components, plutonic assimilations, plate environment of the Hercynian Fold belt of central Europe: Indications from an Nd and Sr isotopic study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(2): 129–138
- Liu CS and Zhu JC. 1989. Petrochemical features of four genetic types of granitoids in Southeast China. *Acta Petrologica Sinica*, (2): 38–47 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2009. 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. *Journal of Petrology*, 51: 537–571
- Ma DS. 2009. Progress in research on geochemistry of tungsten. *Geological Journal of China Universities*, 15(1): 19–34 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643
- Mao JW and Hua RM. 1999. A preliminary study of large scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits. *Mineral Deposits*, 18(4): 291–299 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL and Chen YC. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329–2338 (in Chinese with English abstract)
- Middlemost EAK. 1985. *Magma and Magmatic Rocks*. London: Longman, 1–266
- Peccerillo R and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81
- Peng JT, Zhou MF, Hu RZ, Shen NP, Yuan SD, Bi XW, Du AD and Qu WJ. 2006. Precise molybdenite Re-Os and mica Ar-Ar dating of the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, central Nanling district, South China. *Mineralium Deposita*, 41: 661–669
- Pitcher WS. 1983. Granite type and tectonic environment. *Mountain Building Processes*, 19: 40
- Pitcher WS. 1993. *The Nature and Origin of Granite*. London: Blackie Academic and Progressional, 1–321
- Qi CS, Deng XG, Li XW, Li XH, Yang YH and Xie LW. 2007. Origin of the Darongshan-Shiwanshan S-type granitoid belt from southeastern Guangxi: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 403–412 (in Chinese with English abstract)
- Qiu JX. 1985. *Magmatic Petrology*. Beijing: Geology Publishing House, 1–340 (in Chinese)
- Rollinson HR. 1993. *Using Geochemical Data: Evolution, Presentation, Interpretation*. Singapore: Longman Publishers Ltd, 1–352
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD, Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Geological Society London Special Publications, 42: 313–345
- Sun T, Zhou XM, Chen PR, Li HM, Zhou HY, Wang ZC and Shen WZ. 2003. Mesozoic strongly peraluminous granites from eastern Nanling Range, southern China: Petrogenesis and implications for tectonics. *Sciences in China (Series D)*, 33(12): 1209–1218 (in Chinese)
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29–44
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its*

- Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, 1-328
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407-419
- Wang DH, Li HQ, Qin Y, Mei YP, Chen ZH, Qu WJ, Wang YB, Cai H, Gong SQ and He XP. 2009. Rock-forming and ore-forming ages of the Yaogangxian tungsten deposit of Hunan Province. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 201-208 (in Chinese with English abstract)
- Wang QY, Hu RZ, Peng JT, Bi XW, Wu LY, Liu H and Su BX. 2007. Characteristics and significance of the fluid inclusions from Yaogangxian tungsten deposit in south of Hunan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2263-2272 (in Chinese with English abstract)
- Wang RC, Zhu JC, Zhang WL, Xie L, Yu AP and Che XD. 2008. Ore-forming mineralogy of W-Sn granites in the Nanling range: Concept and case study. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 485-495 (in Chinese with English abstract)
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects on a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 295-304
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66(3-4): 241-273
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Jin WJ, Wang Y, Li CD and Wang YL. 2010. Relationship between granitic rocks and Au-Cu-W-Sn mineralization. *Mineral Deposits*, 29(5): 729-759 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Xiong XL and Han XD. 1999. Discussion on the forming mechanism of tetrad effects of granite REE-Examples of Qianlishan granite and Baerz granite. *Sciences in China (Series D)*, 29(4): 331-338 (in Chinese)
- Zhou XM. 2003. My thinking about granite geneses of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556-565 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM. 2007. Petrogenesis of Late Mesozoic Granites and Dynamic Evolution of Lithosphere in Namling Region. Beijing: Science Press, 1-691 (in Chinese)
- Zhu JC, Chen J, Wang RC, Lu JJ and Xie L. 2008. Early Yanshanian NE trending Sn/W-bearing A-type granites in the western-middle part of the Nanling Mts region. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 474-484 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 车勤建, 李金冬, 魏绍六, 伍光英. 2005. 湖南千里山-骑田岭矿集区形成的构造背景初探. *大地构造与成矿学*, 29(2): 204-214
- 陈宏伟, 胡瑞忠, 彭建堂, 毕献武. 2011. 湖南瑶岗仙钨矿床成矿流体的氦-氩同位素组成及其意义. *矿物学报*, 31(3): 597-603
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 周泰禧. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄. *南京大学学报(自然科学版)*, 35(6): 649-658
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 陆建军, 范春方. 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景. *中国科学(D 辑)*, 32(4): 279-289
- 陈依壤. 1981. 瑶岗仙脉钨矿床地质特征与找矿标志. *地质与勘探*, (2): 25-30
- 陈依壤. 1988. 瑶岗仙花岗岩地质地球化学特征与成岩成矿作用. *矿产与地质*, (1): 22-28
- 陈依壤. 1992. 瑶岗仙矿田控矿因素及成矿条件分析. *湖南地质*, 11(4): 285-293
- 地矿部南岭项目花岗岩专题组. 1989. 南岭花岗岩地质及其成岩和成矿作用. 北京: 地质出版社, 1-471
- 董少花, 毕献武, 胡瑞忠, 陈佑纬, 陈恒. 2011. 湖南瑶岗仙石英脉型黑钨矿床成矿流体特征. *矿物岩石*, 31(2): 54-60
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 刘晓东, 陆建军, 林锦富, 姚军明, 戚华文, 张展适, 顾晟彦. 2003. 华南中-新生代与花岗岩类有关的成矿系统. *中国科学(D 辑)*, 33(4): 335-343
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用. *矿床地质*, 24(2): 99-107
- 刘昌实, 朱金初. 1989. 华南四种成因类型花岗岩类岩石化学特征对比. *岩石学报*, (2): 38-47
- 马东升. 2009. 钨的地球化学研究进展. *高校地质学报*, 15(1): 19-34
- 毛景文, 华仁民. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区. *矿床地质*, 18(4): 291-299
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用、成矿时限及地球动力学背景. *岩石学报*, 23(10): 2329-2338
- 南京大学地质系. 1981. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系. 北京: 科学出版社, 1-395
- 祁昌实, 邓希光, 李武显, 李献华, 杨岳衡, 谢烈文. 2007. 桂东南大容山-十万大山 S 型花岗岩带的成因地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约. *岩石学报*, 23(2): 403-412
- 邱家骥. 1985. 岩浆岩岩石学. 北京: 地质出版社, 1-340
- 孙涛, 周新民, 陈培荣, 李惠民, 周红英, 王志成, 沈渭洲. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义. *中国科学(D 辑)*, 33(12): 1209-1218
- 王登红, 李华芹, 秦燕, 梅玉萍, 陈郑辉, 屈文俊, 王彦斌, 蔡红, 龚述清, 何晓平. 2009. 湖南瑶岗仙钨矿成岩成矿作用年代学研究. *岩矿测试*, 28(3): 201-208
- 王巧云, 胡瑞忠, 彭建堂, 毕献武, 武丽艳, 刘华, 苏本勋. 2007. 湖南瑶岗仙钨矿床流体包裹体特征及其意义. *岩石学报*, 23(9): 2263-2272
- 王汝成, 朱金初, 张文兰, 谢磊, 于阿朋, 车旭东. 2008. 南岭地区钨锡花岗岩的成矿矿物学: 概念与实例. *高校地质学报*, 14(4): 485-495
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217-1238
- 张旗, 金惟俊, 王焰, 李承东, 王元龙. 2010. 花岗岩与金铜及钨锡成矿的关系. *矿床地质*, 29(5): 729-759
- 赵振华, 熊小林, 韩小东. 1999. 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. *中国科学(D 辑)*, 29(4): 331-338
- 中国科学院地球化学研究所. 1979. 华南花岗岩类的地球化学. 北京: 科学出版社, 1-421
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. *高校地质学报*, 9(4): 556-565
- 周新民. 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 1-691
- 朱金初, 陈骏, 王汝成, 陆建军, 谢磊. 2008. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带. *高校地质学报*, 14(4): 474-484