

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.01.003

引用格式:孙建东,徐敏成,谭桂丽,等.赣东北黄山铌钽矿床成矿岩体地球化学特征及成矿意义[J].华东地质,2023,44(1):28-38.(SUN J D,XU M C,TAN G L, et al.Geochemical characteristics and metallogenic significance of Huangshan Nb-Ta deposit in northeast Jiangxi Province[J].East China Geology, 2023, 44(1):28-38.)

赣东北黄山铌钽矿床成矿岩体地球化学特征及成矿意义

孙建东¹,徐敏成¹,谭桂丽¹,吕劲松¹,武彬¹,张勇¹,江小强²

(1.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016;

2.成都理工大学,四川 成都 610059)

摘要:对黄山铌钽矿区含矿岩体(黑云母二长花岗岩、花岗伟晶岩、细粒黑云母花岗岩)的主量元素、微量元素进行地球化学分析,并与成矿带典型A型花岗岩对比,发现它们属于高分异花岗岩,具富硅高碱、贫钙低镁的特征, A/CNK 值均 >1 ,属于准铝质—过铝质岩石。岩石富集高场强元素 Nb、Th、Ta、Zr、U、Hf 及大离子亲石元素 Rb,亏损大离子亲石元素 Ba、Sr、P 及高场强元素 Ti。球粒陨石标准化稀土元素配分形式属于“海鸥型”,具强烈的 Eu 负异常。 $10\ 000\times Ga/Al$ 值均 >2.60 , $Zr+Nb+Ce+Y$ 总量远高于 350×10^{-6} ,岩石成因类型为板内花岗岩 A_1 亚类,推断岩体是在拉伸构造背景下由于地幔物质上涌导致底侵作用,促使下地壳部分熔融形成了初始岩浆,在上侵过程中有地壳物质的混染。岩浆在侵位过程中发生的结晶分异作用,使铌钽等成矿元素与岩浆熔体分离,高分异演化熔体、富挥发份流体(主要是 F、Cl)共同作用是铌钽富集的主要因素。

关键词: 黄山铌钽矿; A型花岗岩; 地球化学; 燕山期; 赣东北

中图分类号: P611; P618.79; P618.86

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2023)01-028-11

南岭地区是我国乃至世界上钨、锡、钼、铋、锂、铍、铌、钽及稀土等金属矿产资源最丰富的地区之一,这些金属矿产的成矿作用均与花岗质岩浆的分异演化具有密切关系^[1]。随着相关研究的深入,该区相继甄别出一批与稀有金属矿产有关的A型花岗岩类,主要分布在华南地区低 t_{DM} 值的花岗岩带上,代表了不同地质时期的伸展构造背景,是较稳定的十杭带与较活跃的南岭地区的边界^[2]。从赣西南陡水、上犹、岩背、足洞岩体到相山、灵山岩体,均是重要的钨、锡、稀有金属、铀多金属矿化带^[3-7],特定成因的花岗岩与不同的矿床类型相对应。

黄山大型铌钽矿床是钦杭成矿带东段重要的稀有金属矿床之一,其中 Nb_2O_5 资源量 52.80 万 t、

Ta_2O_5 资源量 5.16 万 t,富 Nb,相对贫 Ta,矿床规模达大型^[1]。前人主要对灵山复式岩体的地质、地球化学、构造背景及成矿作用进行了研究,对灵山复式岩体的成矿机制提出了岩浆分异、碱质交代等多种观点^[2,8-11],但对黄山含矿岩体的研究相对较少。基于上述问题,笔者在该区开展了黄山含矿岩体地质、地球化学研究,并与成矿带内典型的同类花岗岩进行对比,揭示花岗岩的成因类型、岩浆演化及构造背景,进一步理解赣东北地区燕山期花岗质岩浆演化对成矿作用的制约,为区内找矿勘查提供理论参考。

1 地质概况

黄山铌钽矿床位于钦杭结合带东段(图1(a))、

* 收稿日期:2021-07-06 修订日期:2022-02-05 责任编辑:谭桂丽

基金项目:中国地质调查局“钦杭成矿带武宁—平江地区钨铜多金属矿地质调查(编号:DD20190153)”、“华东地区钨锡钴等矿产地质调查(编号:DD20221688)”项目联合资助。

第一作者简介:孙建东,1987年生,男,高级工程师,博士,主要从事矿床地质研究工作。Email:njsunjiandong@163.com。

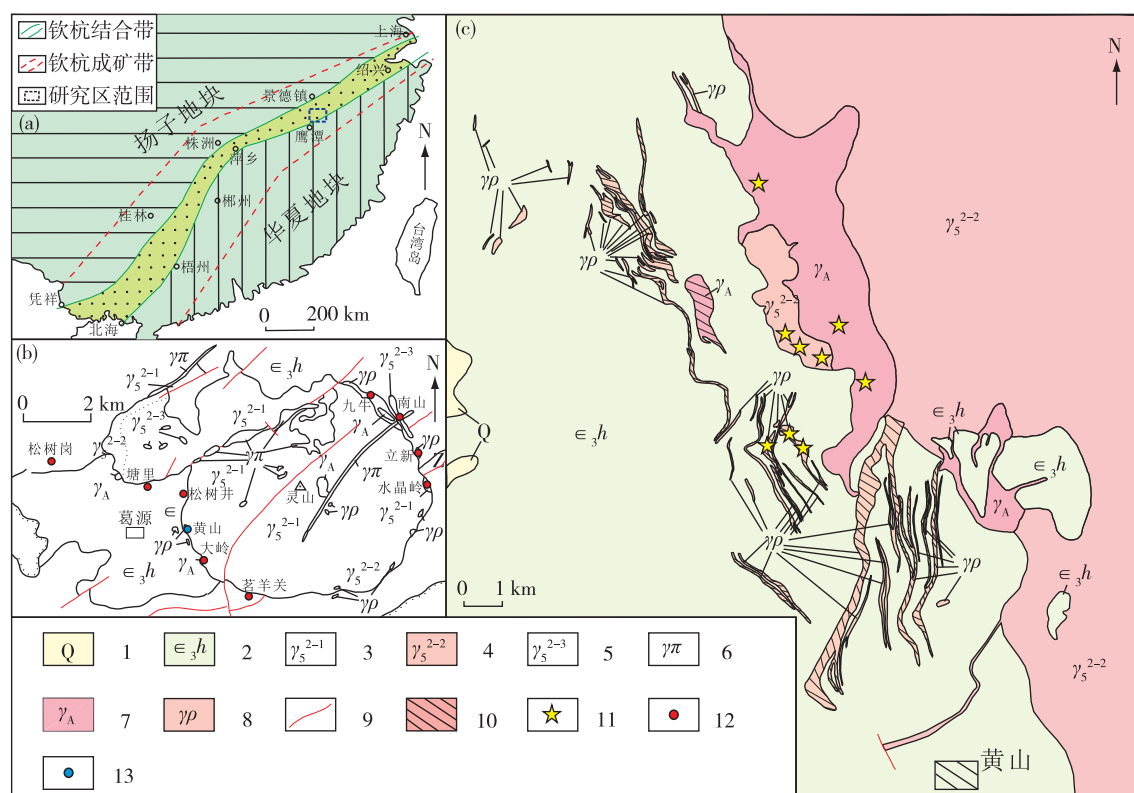
通信作者简介:徐敏成,1969年生,男,教授级高级工程师,本科,主要从事区域成矿规律研究及成矿预测工作。Email:xuminc@126.com。

江西省横峰县灵山复式岩体西南部(图 1(b))。灵山环状复式岩体出露于灵山—怀玉山复背斜次级葛源向斜西南翼,面积约 200 km²,岩体中间缓、四周陡,由内向外分为中心相、过渡相、边缘相,分别对应中粗粒似斑状角闪黑云母花岗岩(γ_5^{2-1})、中粗粒黑云母二长花岗岩(γ_5^{2-2})、中细粒钠长石化黑鳞云母花岗岩(γ_5^{2-3})。一些研究者^[12-14]获得灵山复式岩体锆石 U-Pb 年龄及独居石年龄为 127~140 Ma,时代为早白垩世。角岩化、硅化、矽卡岩化普遍沿岩体外接触带发育。

灵山岩体围岩主要出露寒武纪华严寺组灰岩、震旦纪千枚岩及变质粉砂岩。黄山矿区出露的寒

武纪华严寺组为灰色薄层状不纯灰岩、页岩夹泥质条带、泥灰岩,产状较稳定,倾向 NE 向—NNE 向,倾角平缓。矿区主体构造主要控制灵山复式岩体 NE 向褶皱和断裂。分布于寒武纪华严寺组内由岩浆侵入导致的环状断裂,控制了矿区含矿花岗岩脉的形成。

矿区黄山岩体为灵山复式岩体边缘相的中粗粒黑云母二长花岗岩、中细粒钠长石化黑鳞云母花岗岩及花岗伟晶岩,是灵山复式岩体的一部分。前者呈环带状产于岩体边缘,后两者与成矿关系最为密切,呈不规则状叠加侵入于前者岩体内,是矿区钨钽矿的赋矿岩体,矿区矿体分为以下两类(图 1(c))。



1.第四系;2.寒武纪华严寺组;3.中粗粒似斑状角闪黑云母花岗岩;4.中粗粒黑云母二长花岗岩;5.中细粒钠长石化黑鳞云母花岗岩;6.花岗斑岩;7.弱(强)钠长石化细粒黑云母花岗岩;8.花岗伟晶岩;9.断裂;10.花岗伟晶岩型/蚀变细粒黑云母花岗岩型矿体;11.采样点;12.稀有金属矿产地;13.黄山矿床

图 1 钦杭成矿带东段大地构造格架(a)、灵山复式岩体(b)及黄山钨钽矿区(c)地质略图

Fig. 1 Geological sketch of eastern Qinhang metallogenic belt(a), Lingshan complex pluton(b) and Huangshan Nb-Ta mining area(c)

(1)花岗伟晶岩型矿体。成组围绕岩体平行接触带产出,倾向 60°~80°,倾角 20°~50°。规模差异大,小者长几米,宽 0.1 m,大者长 500~600 m,宽

几十米。形态较复杂,受张性裂隙控制,沿寒武系张性裂隙充填,呈分枝复合、膨胀收缩和尖灭再现特征。该类型分为富钨伟晶岩矿体和富钽伟晶岩

矿体:前者呈大脉状充填于近接触带(250 m内)围岩中,多数为花岗结构、伟晶结构;后者呈不规则脉状充填于离接触带较远的(250 m外)围岩中,多数为伟晶结构、糖粒结构。

(2)中细粒钠长石化黑鳞云母花岗岩型矿体。即蚀变花岗岩型,呈不规则状产于岩体边缘或呈岩枝状赋存于外接触带,规模大,长、深可达数百米,一般宽可达百米以上,其内常见团块状花岗伟晶岩包体,蚀变花岗岩、花岗伟晶岩共同组成含矿岩体。矿石矿物主要为钨铁矿、钽铁矿、铌钽铁矿等,脉石矿物主要为钠长石、微斜长石、石英等。

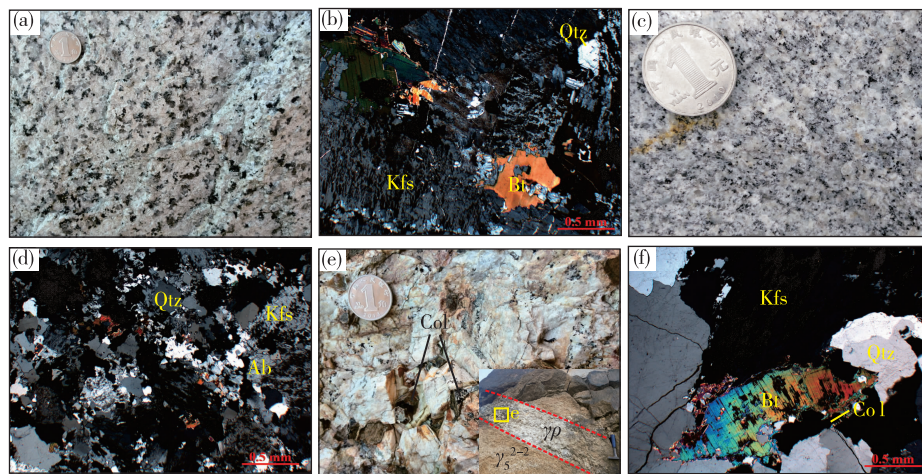
2 岩石学特征

在黄山岩体采集了代表性样品中粗粒黑云母二长花岗岩(编号:HS-1YQ、HS-2YQ、HS-3YQ)、中细粒钠长石化黑鳞云母花岗岩(编号:HS-7YQ、HS-8YQ、HS-9YQ)和花岗伟晶岩(编号:HS-4YQ、HS-5YQ、HS-6YQ),以上样品均采自矿区露天采场壁(图1(c))。

(1)中粗粒黑云母二长花岗岩(图2(a)、(b))。弱风化,呈灰白色,中粗粒花岗结构,块状构造,矿物含量变化较大,微斜长石40%~60%,更长石10%~30%,石英20%~30%,黑云母4%~6%,副矿物主要有锆石、独居石、磷灰石、钼石及萤石等。

(2)中细粒钠长石化黑鳞云母花岗岩(图2(c)、(d))。钠长石化弱者呈黄褐色,钠长石化较强者为灰白色或白色,细粒花岗结构,偶尔具似斑状结构,块状构造。矿物组成视钠长石化强弱而有较大变化,大体上微斜长石40%~60%,钠长石5%~20%,黑云母5%~7%,石英25%~35%;副矿物有锆石、钨铁矿、钼石、萤石等。

(3)花岗伟晶岩(图2(e)、(f))。浅灰白色,花岗伟晶结构,块状构造,矿物组成主要为微斜长石55%~60%,更长石5%,石英25%,黑云母10%。长石类呈短柱状、长板状,粒径1 cm×4 cm~3 cm×8 cm;石英呈油脂光泽,他形粒状,粒径1~5 cm;黑云母呈片状,片幅1~3 cm。副矿物主要有锆石、独居石、磷灰石、钽铁矿、磁铁矿、萤石等。



(a)、(b),中粗粒黑云母二长花岗岩;(c)、(d),中细粒钠长石化黑鳞云母花岗岩;(e)、(f),花岗伟晶岩;Kfs,钾长石;Ab,钠长石;Qtz,石英;Bt,黑云母;Col,钨钽铁矿

图2 测试样品宏观及显微镜下特征照片

Fig. 2 Macroscopic and microscopic characteristics of the test samples

3 分析及结果

3.1 分析方法

黄山岩体样品的主量元素、微量元素及稀土元素测试在国土资源部华东矿产资源监督检测中心完成。

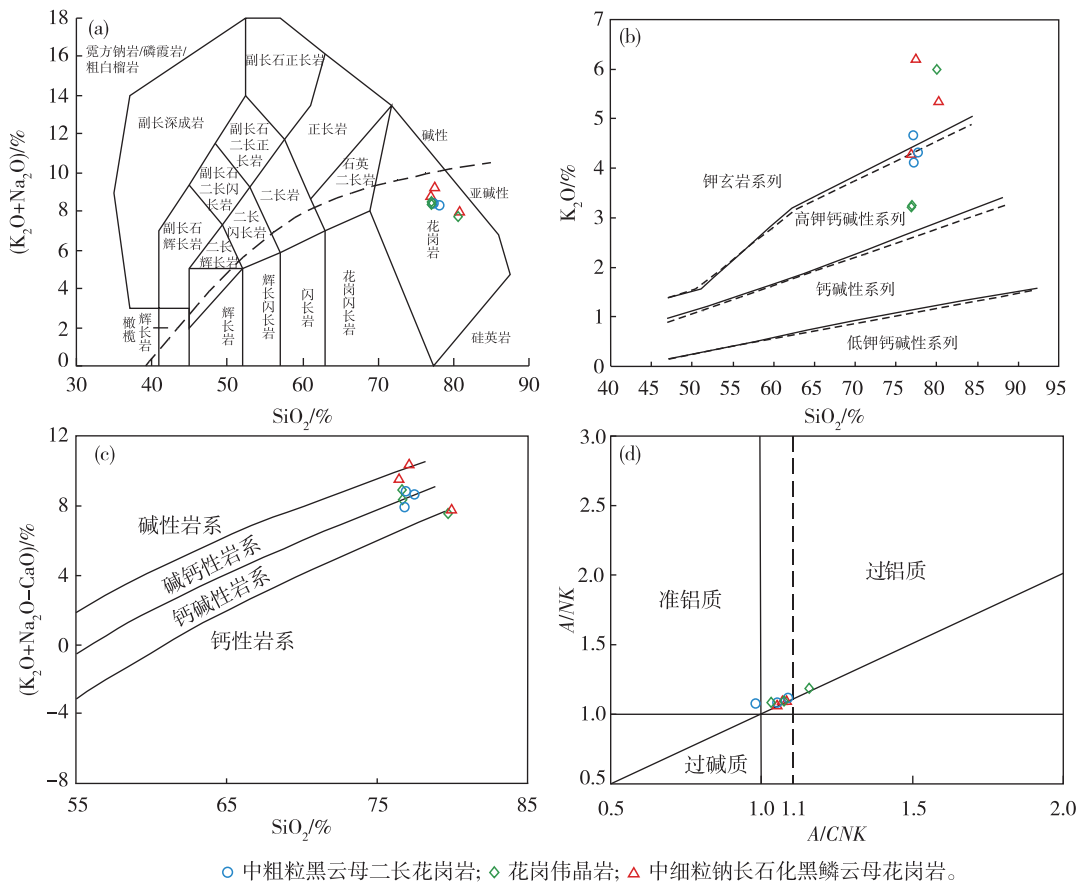
选取新鲜、无裂隙岩石研磨至200目以下,主量元素采用X射线荧光光谱法(XRF)分析,精度优于1%,其中铁氧化物测试得到的为 TFe_2O_3 ,然后酸消解、重铬酸钾滴定测量氧化亚铁(0.01%~100%),再计算 Fe_2O_3 。微量元素、稀土元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,样品溶液在Finnigan MAT

Element 2 型高分辨电感耦合等离子体质谱仪(美国热电公司)进行测试,各元素检出限 $<0.5 \times 10^{-9}$,精度优于 5%。

3.2 分析结果

主量元素分析测试结果显示,中粗粒黑云母二长花岗岩(SiO_2 平均含量 76.63%)、花岗伟晶岩(SiO_2 平均含量 77.19%)、中细粒钠长石化黑鳞云母花岗岩的 SiO_2 含量(SiO_2 平均含量 77.49%)显示硅过饱和(表 1)。在侵入岩 TAS 图解(图 3(a))上,投影点全部落入花岗岩范围内。上述 3 类岩石

样品的 TiO_2 、 CaO 、 FeO^T 、 MgO 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 含量低, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量(9%~12%)较高, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 多数 >1 ,属于富钾富碱岩石。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 3(b))上,样品投影点落入高钾钙碱性系列-钾玄岩系列区域内;在 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO})-\text{SiO}_2$ 图解(图 3(c))上,投影点落入钙碱性-碱钙性岩系区域内。样品的 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T+\text{MgO})$ 值均较小,属于铁质岩石。在 $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$ 图解(图 3(d))上,投影点落入准铝-过铝质花岗岩区域,属于准铝-弱过铝质岩石。



(a).TAS 图解^[15]; (b). $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解^[16-17]; (c). $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO})-\text{SiO}_2$ 图解^[18]; (d). $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$ 图解^[19]

图 3 测试样品岩石类型和系列划分图解

Fig. 3 Classification of rock types and series of the test samples

中粗粒黑云母二长花岗岩、花岗伟晶岩、钠长石化细粒黑云母花岗岩样品具有相似的微量元素分布特征,暗示它们来自于同一源区。与钦杭成矿带典型的 A 型花岗岩(三清山、沐尘、灵山、洪公、儒洪、岩前)相比,研究区样品的地球化学特征与前述

岩体相似^[20-23],均具有较高的 Rb、Nb、Ta,低的 Ba、Sr 含量,且总体含量呈递增富集趋势(表 1)。原始地幔标准化微量元素蛛网(图 4(a))中,三者明显富集高场强元素 Ta、Nb、Th、U、Zr、Hf 及大离子亲石元素 Rb,亏损高场强元素 Ti、大离子亲石元素 Ba、Sr 及 P。

表 1 样品主量、微量及稀土元素测试结果

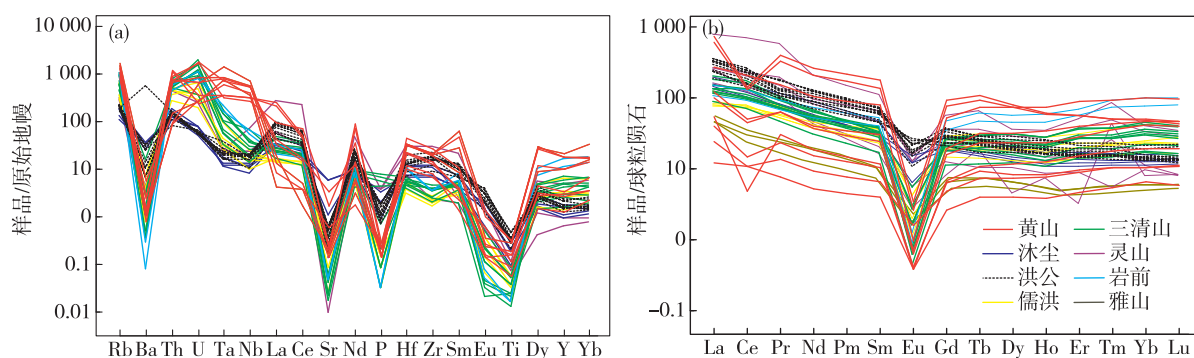
Table 1 The results of main elements, trace elements and rare earth elements of the test samples

样品编号	主量元素含量/%														
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	灼失量	总量	σ	Rb
HS-1YQ	76.39	0.06	12.31	0.13	0.99	0.02	0.04	0.53	4.32	4.11	<0.003	0.73	99.63	2.13	675
HS-2YQ	77.14	0.06	12.11	0.07	1.14	0.03	0.05	0.08	4.06	4.30	<0.003	0.59	99.64	2.05	783
HS-3YQ	76.35	0.07	12.44	0.13	1.17	0.03	0.06	0.08	3.77	4.66	0.01	0.79	99.55	2.13	931
HS-4YQ	79.11	0.02	11.20	<0.05	0.42	0.02	0.04	0.07	1.86	5.96	0.01	0.90	99.61	1.69	950
HS-5YQ	76.25	0.04	12.96	0.15	0.80	0.02	0.03	0.28	5.19	3.22	<0.003	0.71	99.65	2.13	558
HS-6YQ	76.20	0.03	13.17	0.33	0.64	0.02	0.03	0.07	5.22	3.26	<0.003	0.65	99.62	2.17	514
HS-7YQ	79.66	0.02	11.04	<0.05	0.27	0.01	0.04	0.10	2.59	5.39	0.01	0.48	99.61	1.74	827
HS-8YQ	76.65	0.01	12.81	<0.05	0.12	0.01	0.03	0.07	2.99	6.24	0.01	0.68	99.61	2.53	1 060
HS-9YQ	76.15	0.03	12.88	0.45	0.56	0.02	0.04	0.08	4.50	4.34	<0.003	0.58	99.63	2.36	669
沐尘岩体(4)	64.90	0.37	16.46	4.19	—	0.15	1.01	2.05	4.69	5.54	0.21	1.02	100.65	4.78	158
洪公岩体(10)	65.89	0.57	14.11	1.97	3.54	0.16	0.50	1.77	3.76	5.68	0.15	1.37	99.82	3.91	198
三清山岩体(9)	76.84	0.11	12.04	0.38	0.97	0.05	0.08	0.38	3.36	4.71	0.04	0.73	99.67	1.93	503
儒洪岩体(5)	74.44	0.11	12.12	4.35	—	0.04	0.15	0.52	3.05	4.87	0.02	—	99.53	2	365
灵山岩体(5)	72.82	0.38	12.49	0.52	2.30	0.04	0.46	1.64	3.63	4.61	0.36	0.71	99.97	2.31	244
岩前岩体(2)	76.96	0.06	12.29	0.23	0.89	0.03	0.10	0.60	3.53	4.63	0.01	0.40	99.72	1.96	689
雅山岩体(7)	73.57	0.04	15.33	0.52	—	0.16	0.11	0.38	4.42	3.72	0.25	0.99	99.49	0.52	1 975
样品编号	微量及稀土元素含量/10 ⁻⁶														
	Cs	Sr	Ba	Nb	Ta	Zr	Hf	Ga	U	Th	La	Ce	Pr	Nd	Sm
HS-1YQ	4.8	35.2	8.2	193.0	12.9	221.0	9.9	33.7	36.2	77.7	63.4	128	14.6	48.3	12.2
HS-2YQ	7.7	4.8	16.3	232.0	14.7	241.0	10.6	34.2	7.5	99.8	174.0	87.8	38.4	122.0	27.4
HS-3YQ	8.4	5.3	17.9	222.0	14.2	230.0	10.4	34.5	5.1	96.9	143.0	80.5	31.1	97.6	21.2
HS-4YQ	7.0	3.0	8.3	286.0	24.0	76.7	3.1	31.3	5.8	7.7	5.7	6.6	1.3	4.3	1.0
HS-5YQ	4.8	71.0	5.4	384.0	32.5	210.0	10.5	42.6	13.8	62.9	28.5	30.2	6.1	17.2	3.7
HS-6YQ	3.7	3.5	7.6	411.0	35.2	155.0	7.0	42.8	17.5	55.9	9.4	9.0	2.2	7.2	1.6
HS-7YQ	5.3	4.3	7.5	507.0	57.6	144.0	6.6	30.2	13.5	7.8	12.6	3.0	2.9	8.5	1.8
HS-8YQ	8.3	12.8	39.8	249.0	30.8	89.9	3.6	34.0	5.5	12.7	2.9	6.7	0.7	2.4	0.6
HS-9YQ	4.5	4.8	9.6	373.0	29.0	302.0	13.7	41.7	36.7	61.2	23.3	27.0	6.0	18.8	4.6
沐尘岩体(4)	4.5	276.0	454.5	25.3	1.7	347.8	9.7	18.6	3.0	19.8	56.9	112.1	12.8	47.7	8.5
洪公岩体(10)	5.5	61.2	792	35.7	2.4	538.5	11.9	23.9	2.6	20.4	101.1	190.7	18.7	74.3	14.6
三清山岩体(9)	—	18.6	80.6	55.3	7.4	163.9	6.3	23.6	24.1	59.1	50.3	113.3	11.8	40.5	7.9
儒洪岩体(5)	7.2	27.2	116.6	33.8	4.2	117.3	5.5	18.8	10.7	44.6	33.5	77.2	9.0	32.5	7.4
灵山岩体(5)	—	73.4	214.7	70.3	2.7	393.8	14.0	20.2	14.9	61.8	119.6	251.4	31.4	68.6	12.5
岩前岩体(2)	—	13.0	11.3	91.6	12.5	172.5	10.8	30.2	21.4	54.4	47.1	104.7	11.9	46.3	11.3
雅山岩体(7)	170.1	17.4	26.7	53.4	50.4	27.9	2.1	27.1	10.4	7.8	4.0	4.8	9.9	1.0	3.78
样品编号	微量及稀土元素含量/10 ⁻⁶											特征参数			
	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δ Eu	δ Ce
HS-1YQ	0.06	10.60	2.80	18.8	4.10	14.5	2.40	16.7	2.40	94.50	338.86	3.69	2.72	0.02	1.03
HS-2YQ	0.20	18.90	4.10	20.2	3.40	9.20	1.30	8.1	1.10	81.70	516.10	6.78	15.41	0.03	0.26
HS-3YQ	0.15	15.50	3.40	18.4	3.30	9.30	1.30	8.6	1.20	80.90	434.55	6.12	11.93	0.03	0.3
HS-4YQ	0.09	0.98	0.28	1.9	0.44	1.50	0.26	1.8	0.27	13.20	26.42	2.56	2.27	0.28	0.59
HS-5YQ	0.04	3.30	0.86	6.0	1.30	4.70	0.90	6.9	1.00	45.30	110.70	3.43	2.96	0.03	0.56
HS-6YQ	0.02	1.40	0.41	3.0	0.70	2.50	0.46	3.3	0.48	15.60	41.67	2.40	2.04	0.04	0.49
HS-7YQ	0.02	1.30	0.34	2.1	0.47	1.60	0.26	1.8	0.28	12.0	36.97	3.54	5.02	0.05	0.12
HS-8YQ	0.02	0.54	0.15	1.0	0.22	0.78	0.14	1.1	0.15	5.70	17.43	3.27	1.89	0.12	1.13
HS-9YQ	0.04	4.00	1.20	8.1	1.90	6.50	1.10	7.8	1.20	44.3	111.54	2.51	2.14	0.03	0.56
沐尘岩体(4)	1.12	7.43	1.17	6.6	1.26	3.77	0.57	3.8	0.59	33.32	264.22	9.58	10.91	0.43	1.06
洪公岩体(10)	1.88	9.65	1.49	9.0	1.8	4.80	0.73	4.4	0.65	40.45	433.60	12.43	16.77	0.47	1.10
三清山岩体(9)	0.20	7.28	1.37	9.3	1.86	7.07	1.10	8.4	1.16	75.74	261.71	6.35	4.82	0.08	1.19
儒洪岩体(5)	0.30	7.36	1.34	8.8	1.81	5.87	—	7.2	1.13	65.37	193.4	5.06	3.61	0.13	1.17
灵山岩体(5)	0.99	9.15	1.82	8.2	1.75	6.19	1.69	5.7	0.74	46.48	519.71	14.86	17.37	0.30	1.05
岩前岩体(2)	0.12	13.45	3.17	20.6	4.68	4.68	3.33	23.4	3.55	196.15	298.17	2.87	1.43	0.03	1.15
雅山岩体(7)	1.01	0.06	0.94	0.2	0.99	0.16	0.48	0.1	0.55	0.08	6.23	24.07	6.63	8.39	1.39

注:中粗粒黑云母二长花岗岩(编号:HS-1YQ、HS-2YQ、HS-3YQ)、中细粒钠长石化黑鳞云母花岗岩(编号:HS-7YQ、HS-8YQ、HS-9YQ)、花岗伟晶岩(编号:HS-4YQ、HS-5YQ、HS-6YQ)。测试单位:国土资源部华东矿产资源监督检测中心。 δ Eu=(Eu)_N/0.5(Sm+Nd)_N, δ Ce=(Ce)_N/0.5(La+Pr)_N。

中粗粒黑云母二长花岗岩、花岗伟晶岩、钠长石化细粒黑云母花岗岩具有相近的稀土元素分布特征,稀土元素总量(平均值分别为 429.8×10^{-6} 、 59.6×10^{-6} 、 55.3×10^{-6})呈递减趋势, $(La/Yb)_N$ 平均值分别为 10.02、2.43、3.02,其中以中粗粒黑云母二长花岗岩的轻重稀土分异

程度最高(表 1)。在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(图 4(b))中均显示为右倾的“海鸥型”,与成矿带典型的三清山、沐尘、灵山、洪公、儒洪、岩前及雅山 A 型花岗岩特征相似,指示岩浆演化过程中发生了与斜长石结晶分离有关的分异结晶作用。



标准化值据参考文献[19];沐尘岩体数据引自文献[20];洪公岩体数据引自文献[21];三清山岩体数据引自文献[22];雅山岩体数据引自文献[23];儒洪岩体数据引自注释①;灵山复式岩体数据引自注释②;岩前岩体数据引自注释③

图 4 测试样品原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)及球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(b)

Fig. 4 Primitive mantle normalized trace elements spidergram (a) and chondrite normalized REE patterns (b) of the test samples

4 讨论

4.1 A 型花岗岩的判定

目前,花岗岩通常被分为 I 型、S 型和 A 型,其中 I 型花岗岩被认为来源于未经风化的火成岩部分熔融,S 型花岗岩是经过地表风化的沉积物质部分熔融的产物^[24],A 型花岗岩的特征为碱性、贫水和非造山^[25],构造上反映了伸展环境下形成的花岗岩类^[26]。A 型花岗岩具有特定的地球化学特征,但有时与高分异的 I 型、S 型花岗岩难以区分。黄山岩体不具有 S 型花岗岩具有的堇青石、白云母和石榴子石等富铝标志矿物^[27]。主量及微量元素方面,黄山岩体具有 A 型花岗岩富硅高碱、贫钙低镁、稀土元素具有总量高、强烈亏损 Sr、Ba、P、Ti 等一般特征^[28]。样品的 $10\,000 \times Ga/Al$ 值(5.25、5.88、5.43)均 > 2.60 , $Zr+Nb+Ce+Y$ 值(630.8×10^{-6} 、 547.53×10^{-6} 、 587.87×10^{-6})远高于 350×10^{-6} , Rb/Sr 值(119.32、157.13、138.17), Rb/Ba 值远高于 I 型、S 型花岗岩的相应值(0.61、0.28 和 1.81、0.46),属于 WHALEN J B 等^[29]判别标准内的 A 型花岗岩。在 $FeO^T/MgO-(Zr+Nb+Ce+Y)$ 图解(图 5(a))、 $Nb-10\,000Ga/Al$ 图解(图 5(b))中,样品

投影点均落于 A 型花岗岩区。

4.2 岩浆演化与成矿

A 型花岗岩多数属于高度演化岩浆结晶的岩体^[29]。区内中粗粒黑云母二长花岗岩、花岗伟晶岩、中细粒钠长石化黑鳞云母花岗岩富硅、富碱, Rb/Sr 值、 Rb/Ba 值高, Sr、Ba、P、Ti、Eu 及过渡族元素显著亏损,说明其应为高度演化岩浆结晶的产物。极低的全铁含量说明分离结晶的矿物中应有黑云母或其他镁铁矿物析出, Sr、Ba、Eu 亏损指示成岩过程中发生了斜长石的分离结晶^[30]。根据分离结晶作用矿物矢量图解(图 6),与雅山高分异 S 型花岗岩相比,该区 3 个岩体 Sr、Ba 的强烈亏损及 Rb 的富集可能由斜长石的分离结晶引起的,受黑云母影响较小。晚期流体特别是钾长石结晶或钾质交代,表现为微斜长石置换斜长石,钾长石结晶或钾质交代是 Rb 富集的主导因素^[31]。在 $La-(La/Yb)_N$ 图解(图 6(d))中,岩体还经历了独居石和褐帘石的分离结晶。由早期至晚期,岩体随演化程度的升高,显示高硅富铝特征,熔体中独居石结晶析出,残余熔体中稀土元素含量减少,稀土元素配分显示较强的四分组效应,岩浆演化晚期流体-熔体的相互作用^[32],钾长石化致使溶液的碱度

降低,使钠的活度增高,促进了铌钽的富集^[32],成矿受到高分异演化熔体和富挥发份流体(主要为

F、Cl)共同作用,与区内大量产出萤石等副矿物相一致。

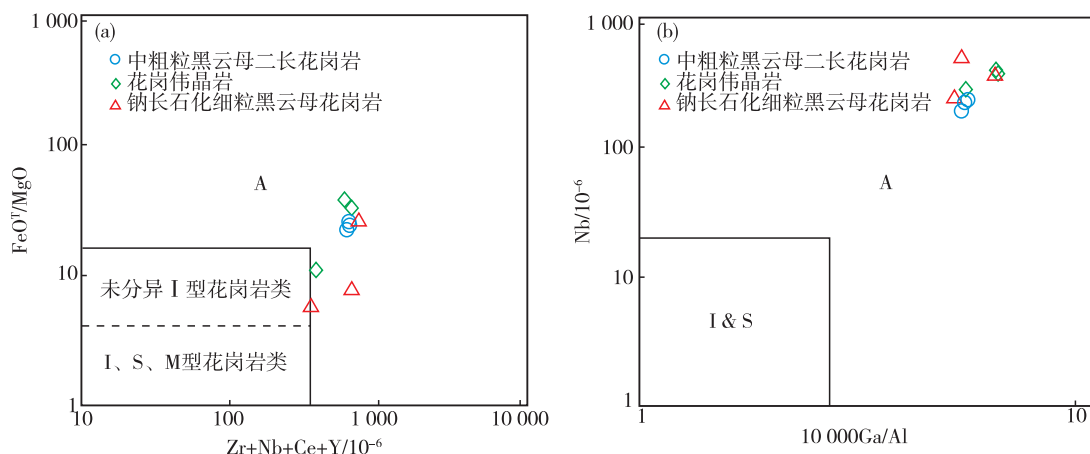
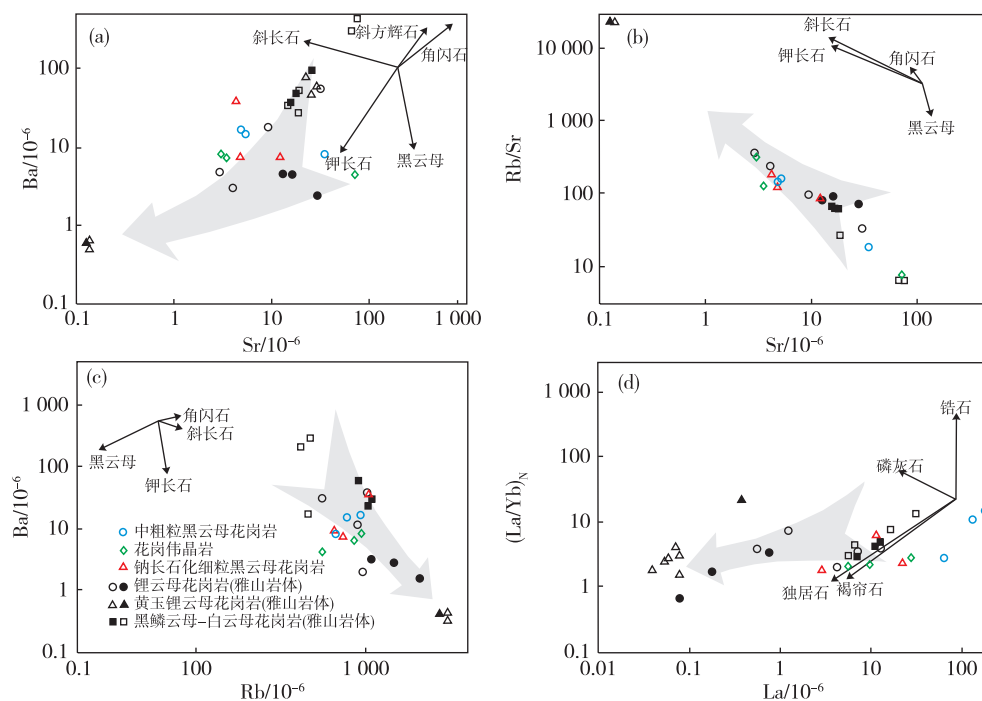


图 5 A 型花岗岩 $\text{FeO}^T/\text{MgO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ (a) 和 $\text{Nb}-10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ (b) 判别图解^[29]

Fig. 5 $\text{FeO}^T/\text{MgO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ (a) and $\text{Nb}-10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ (b) discriminant diagrams of A-type granites^[29]



(a).Sr-Ba 图解;(b).Sr-Rb/Sr 图解;(c).Rb-Ba 图解;(d). $\text{La}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解;雅山岩体数据引自文献[23]

图 6 测试样品分离结晶作用矿物矢量图解

Fig. 6 Vector diagrams of mineral separation crystallization of the test samples

4.3 构造背景

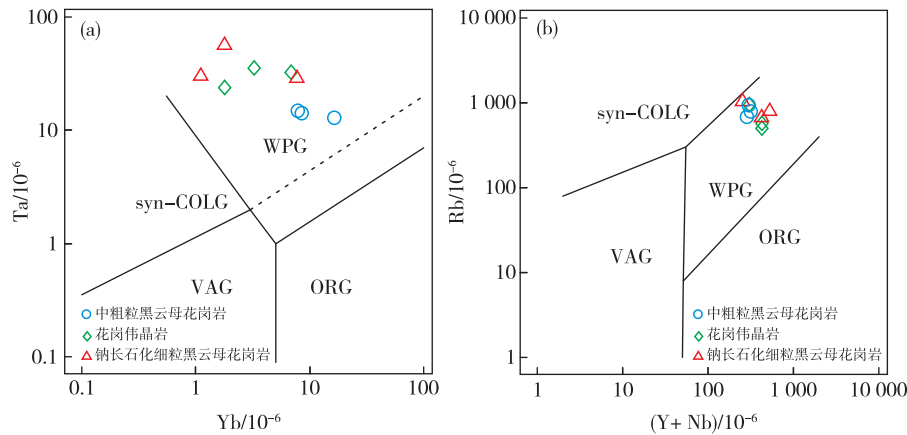
A 型花岗岩的成因主要有岩浆分异成因^[33]、形成于地壳火成岩、地幔岩浆加热或挥发分稀释作用下地壳岩石熔融^[33-35]、交代、壳幔混合^[36]。由于 A

型花岗岩岩石学差异性及其产出构造的多样性,一些学者认为其来源也是多样的^[37]。

3 个岩体富集高场强元素 Ta、Nb、Th、U、Zr、Hf 及大离子亲石元素 Rb,说明岩体形成过程中有地幔物质的有效参与^[38],亏损 Sr 和强烈的 Eu 负

异常暗示岩浆源区相对浅($<30\text{ km}$)。在 Ta-Yb 构造环境判别图解(图 7(a))、Rb-(Y+Nb)构造环境判别图解(图 7(b))中,样品投影点均落于板内花岗岩区,属非造山环境。EBY G N^[36]将 A 型花岗岩划分为 A₁ 和 A₂ 2 个亚类,在 Nb-Y-Ce 图解(图 8(a))和 Nb-Y-3Ga 图解(图 8(b))上,投影点均落入 A₁ 亚类区,而 A₁ 亚类形成于板内裂谷、地幔柱或热点环境,以地幔来源为主,有部分地壳物质混染^[39]。钦杭成矿带中典型的 A 型花岗岩雅

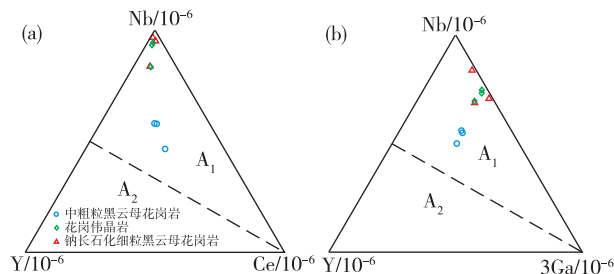
山岩体,具有低 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值($-9.5\sim-10.7$)^[23],带内高 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 花岗岩被认为是地幔物质参与成岩过程的重要表现,反映了岩石圈内部 NE 向线型的拉张减薄带或裂谷,由于拉张作用导致地幔物质上涌,形成区内高 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 的壳幔混合型花岗岩^[40-41]。以上特征显示,成矿岩体是在华南燕山早期造山以后,在燕山晚期早白垩世进入造山后的拉张裂解阶段产生的,并以地幔来源为主,有部分地壳物质混染。



syn-COLG.同碰撞花岗岩;WPG.板内花岗岩;VAG.火山弧花岗岩;ORG.洋中脊花岗岩

图 7 Ta-Yb(a)和 Rb-(Y+Nb)(b)构造环境判别图解^[42]

Fig. 7 Ta-Yb(a) and Rb-(Y+Nb)(b) tectonic discrimination diagrams^[42]



A₁.大陆裂谷或板内环境;A₂ 陆-陆碰撞或弧环境

图 8 Nb-Y-Ce(a)和 Nb-Y-3Ga(b)图解^[29]

Fig. 8 Nb-Y-Ce(a) and Nb-Y-3Ga(b) diagrams^[29]

5 结论

(1)黄山铌钽矿区中粗粒黑云母二长花岗岩、花岗伟晶岩、钠长石化细粒黑云母花岗岩富硅高碱、贫钙低镁, A/CNK 值均 >1 ,为准铝-过铝质岩石,属于 A₁ 型花岗岩系列造山后的拉张环境,由地幔物质上涌导致底侵作用,促使下地壳部分熔融而成。

(2)斜长石的分离导致 Sr、Ba、Eu 含量强烈亏损,钾长石结晶或钾质交代是 Rb 富集的主导因素,高分异演化熔体、富挥发份流体(主要为 F、Cl)共同作用是铌钽富集的主要因素。

致谢:本文研究过程中得到了江西省核工业地质大队二六五大队莫子奋院长的鼎力帮助,初稿得到了中国地质调查局南京地质调查中心毛建仁研究员、范飞鹏正高级工程师的悉心审阅并提出了宝贵的修改建议,在此一并致以诚挚的谢意!

注释

- ① 中国地质调查局南京地质调查中心.钦杭成矿带(东段)基础地质调查综合研究报告. 2013.
- ② 江西省地质调查院. 1:25 万上饶市幅区域地质调查报告. 2002.
- ③ 中国地质大学(北京).江绍拼合带中西段铜多金属矿床区域成矿规律研究与成矿预测. 2012.

参考文献

- [1] 华仁民,陈培荣,张文兰,等.南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J].高校地质学报,2005,11(3):291-304.
HUA R M, CHEN P R, ZHANG W L, et al. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling range[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(3): 291-304.
- [2] 蒋少涌,赵葵东,姜耀辉,等.十杭带湘南—桂北段中生代 A 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论[J].高校地质学报,2008,14(4):496-509.
JIANG S Y, ZHAO K D, JIANG Y H, et al. Characteristics and genesis of Mesozoic A-type granites and associated mineral deposits in the southern Hunan and northern Guangxi Provinces along the Shi-Hang belt, south China [J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4): 496-509.
- [3] 章崇真,李吉涛,黄定堂,等.江西灵山花岗岩的演化与成矿[J].大地构造与成矿学,1985,25(12):323-340.
ZHANG C Z, LI J T, HUANG D T, et al. The evolution and mineralization of Lingshan granite in Jiangxi [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1985, 25(12): 323-340.
- [4] 朱金初,张佩华,谢才富,等.南岭西段花山—姑婆山 A 型花岗岩杂岩带:岩石学、地球化学和岩石成因[J].地质学报,2006,80(4):521-540.
ZHU J C, ZHANG P H, XIE C F, et al. The Huashan-Guposhan granitoid belt in the Western part of the Nangling mountains petrology, geochemistry and genetic interpretations[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(4): 521-540.
- [5] 付建明,马昌前,谢才富,等.湖南金鸡岭铝质 A 型花岗岩的厘定及构造环境分析[J].地球化学,2005,34(3):215-223.
FU J M, MA C Q, XIE C F, et al. Ascertainment of the Jinjiling aluminous A-type granite, Hunan Province and its tectonic settings[J]. Geochimica, 2005, 34(3): 215-223.
- [6] 杨水源,蒋少涌,赵葵东,等.江西相山铀矿田邹家山矿床中流纹斑岩的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素组成[J].岩石学报,2012,28(12):3915-3928.
YANG S Y, JIANG S Y, ZHAO K D, et al. Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of the rhyolite porphyry from the Zoujiashan deposit in Xiangshan uranium ore field, Jiangxi Province, SE China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(12): 3915-3928.
- [7] YANG S Y, JIANG S Y, JIANG Y H, et al. Geochemical, zircon U-Pb dating and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and petrogenesis of an Early Cretaceous volcanic-intrusive complex at Xiangshan, Southeast China [J]. Mineralogy and Petrology, 2011, 101: 21-48.
- [8] 陈立志.赣东北灵山岩体的阶段划分与钨钽成矿关系的研究[J].大地构造与成矿学,1984,9(1):59-70.
CHEN Z Z. A study on division of stage and their metallogenic relationship with tungsten and tantalum in Lingshan northeastern Jiangxi [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1984, 9(1): 59-70.
- [9] 黄定堂.灵山岩体演化特征及其与稀有金属的成矿关系[J].地质与勘探,2003,39(4):35-40.
HUANG D T. Evolving characteristics and related rare-metal metallogenesis of Lingshan rock body [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(4): 35-40.
- [10] 马振兴,郑英,尹祝,等.江西“灵山式”花岗岩地貌景观特征及成因探讨[J].华东地质,2020,41(1):8-17.
MA Z X, ZHENG Y, YIN Z, et al. Characteristics and genesis of the “Lingshan-style” granite landscapes, Jiangxi Province [J]. East China Geology, 2020, 41(1): 8-17.
- [11] ZHU Z Y, WANG R C, MARIGNAC CHRISTIAN, et al. A new style of rare metal granite with Nb-rich mica: The Early Cretaceous Huangshan rare-metal granite suite, northeast Jiangxi Province, southeast China [J]. American Mineralogist, 2018, 103: 1530-1544.
- [12] XIANG Y X, YANG J H, CHEN J Y, et al. Petrogenesis of Lingshan highly fractionated granites in the Southeast China: Implication for Nb-Ta mineralization [J]. Ore Geology Reviews, 2017, 89: 497-525.
- [13] 叶茂.赣杭构造带灵山花岗岩及其镁铁质微粒包体的岩石成因和岩浆混合作用研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
YE M. Magma mixing and petrogenesis of granite and associated mafic microgranular enclaves from Lingshan pluton, Gan-Hang Belt [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [14] 吴旭铃,凡秀君,龚咤云,等.江西灵山杂岩体地质特征及成因探讨[J].高校地质学报,2016,22(3):459-466.
WU X L, FAN X J, GONG C Y, et al. Geological Characteristics and Genesis of the Lingshan Complex in Jiangxi Province [J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(3): 459-466.
- [15] MIDDLEMOST E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Earth Science Reviews,

- 1994, 37: 215-224.
- [16] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-91.
- [17] FROST B R, BARNES C G, COLLINS W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 2001, 42(11): 2033-2048.
- [18] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22(4): 247-263.
- [19] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C] // SAUNDERS A D, NORRIS M J. Magmatism in Ocean Basins[M]. Geological Society of London, 1989: 313-345.
- [20] 刘亮, 邱检生, 李真, 等. 浙江龙游沐尘早白垩世石英二长岩体的成因: 镁铁质包体及寄主岩的元素与 Sr-Nd 同位素地球化学证据[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 3993-4006.
- LIU L, QIU J S, LI Z, et al. Petrogenesis of the early Cretaceous quartz monzonite pluton at Muchen in Longyou County, Zhejiang Province: Evidences from elemental and isotopic geochemistry of mafic microgranular enclaves and their host rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(12): 3993-4006.
- [21] 卢成忠, 汪庆华, 董传万, 等. 浙江洪公铝质 A 型花岗岩类的岩石地球化学及其构造环境[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 500-506.
- LU C Z, WANG Q H, DONG C W, et al. Geochemical characteristics of the Honggong aluminous A-type granite pluton in Zhejiang Province and its tectonic setting[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(4): 500-506.
- [22] 张招崇, 简平, 魏罕蓉. 江西三清山国家地质公园花岗岩 SHRIMP 年龄、地质—地球化学特征和岩石成因类型[J]. 地质论评, 2007, 53(增刊 1): 28-40.
- ZHANG Z C, JIAN P, WEI H R. SHRIMP ages, geology, geochemistry and petrogenetic type of granites from the Sanqingshan geopark, Jiangxi Province[J]. Geological Review, 2007, 53(S1): 28-40.
- [23] 杨泽黎, 邱检生, 邢光福, 等. 江西宜春雅山花岗岩体的成因与演化及其对成矿的制约[J]. 地质学报, 2014, 88(5): 850-865.
- YANG Z L, QIU J S, XING G F, et al. Petrogenesis and magmatic evolution of the Yashan granite pluton in Yichun, Jiangxi Province, and their constraints on mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5): 850-865.
- [24] CHAPPELL B W, WHITE A J R. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 1974, 8: 173-174.
- [25] LOISELLE M C, WONES D R. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. Geological Society of America, 1979, 1: 468.
- [26] 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(9): 2249-2269.
- ZHANG Q, WANG Y, LI C D, et al. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(9): 2249-2269.
- [27] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- WU F Y, LI X H, YANG J H, et al. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [28] COLLINS W J, BEAMS S D, WHITE A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2): 189-200.
- [29] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites-geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- [30] HANSON G N. The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic compositions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 38: 26-43.
- [31] 朱笑青, 王中刚, 黄艳, 等. 磷灰石的稀土组成及其示踪意义[J]. 稀土, 2004, 25(5): 41-45.
- WANG X Q, WANG Z G, HUANG Y, et al. REE content and distribution in apatite and its geological tracing significance[J]. Chinese Rare Earths, 2004, 25(5): 41-45.
- [32] 赵振华, 增田彰正, 夏巴尼. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应[J]. 地球化学, 1992(3): 221-232.
- ZHAO Z H, MASUDA A, SHABANI M B. Tetrad effects of rare-earth elements in rare-metal granites[J]. Geochimica, 1992(3): 221-232.
- [33] CLEMENS J D, HOLLWAY J R, WHITE A J R. Origin of an A-type granite: experimental constraints[J]. American Mineralogist, 1986, 71: 317-324.
- [34] ANDERSON J L, BENDER E E. Nature and origin of Proterozoic A-type granitic magmatism in the southwestern United States of America [J]. Lithosphere, 1989, 23(1/2): 19-52.
- [35] YANG J H, WU F Y, CHUNG S L, et al. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. Litho-

- sphere, 2006, 89(1/2): 89-106.
- [36] EBY G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20: 641-644.
- [37] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(7): 1035-1053.
- SHU L S. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [38] 洪大卫, 谢锡林, 张季生. 试析杭州—诸广山—花山高 ϵ_{Nd} 值花岗岩带的地质意义[J]. *地质通报*, 2002, 21(6): 348-354.
- HONG D W, XIE X L, ZHANG J S. Geological significance of the Hangzhou-Zhuguangshan-Huashan high ϵ_{Nd} granite belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(6): 348-354.
- [39] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. *地质学报*, 2011, 85(5): 636-658.
- MAO J W, CHEN C H, YUAN S D, et al. Geological Characteristics of the Qinhang (or Shihang) Metallogenic Belt in South China and Spatial-Temporal Distribution Regularity of Mineral Deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(5): 636-658.
- [40] GILDER S A, GILL J, COE R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China[J]. *Geology Reviews*, 1996, 101: 16137-16154.
- [41] ZHOU X M, SUN T, SHEN W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution [J]. *Episodes*, 2006, 29: 26-33.
- [42] 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.

Geochemical characteristics and metallogenic significance of Huangshan Nb-Ta deposit in northeast Jiangxi Province

SUN Jiandong¹, XU Mincheng¹, TAN Guili¹, LÜ Jinsong¹, WU Bin¹,
ZHANG Yong¹, JIANG Xiaoqiang²

(1 *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*;

2 *Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*)

Abstract: The main and trace elements of biotite monzogranite, granite pegmatite and fine-grained biotite granite in Huangshan Nb-Ta mining area were analyzed and compared with the typical A-type granites in the metallogenic belt. It shows that they belong to highly differentiated granite, characterized with rich silicon, high alkali, poor calcium and low magnesium, and A/CNK value > 1 , belonging to quasi aluminous-peraluminous rock. The rocks are enriched with high field strength elements Nb, Th, Ta, Zr, U, Hf and large ion lithophile element Rb, and depleted with large ion lithophile elements Ba, Sr, P and high field strength element Ti. The distribution form of rare earth elements belongs to “Seagull type”, with strong Eu negative anomaly. $1\ 000 \times Ga/Al$ values are higher than 2.60, and the total amount of $Zr+Nb+Ce+Y$ is much higher than 350×10^{-6} . The genetic type of the rock is A1 subclass of intraplate granite. It is inferred that the rock mass is underplated due to the upwelling of mantle material under extensional tectonic setting, which promotes the partial melting of the lower crust to form the initial magma, and there is the contamination of crustal material in the upwelling process. The crystallization differentiation of magma in the process of emplacement separates niobium tantalum and other metallogenic elements from magmatic melt. The joint action of highly differentiated evolution melt and volatile rich (mainly F, Cl) fluid is the main factor for the enrichment of niobium tantalum.

Key words: Huangshan Nb-Ta deposit; A-type granite; geochemistry; Yanshanian; Northeast Jiangxi Province