



广东乳源一六钨矿两期热液成矿事件： 来自岩石地球化学的证据

和秋姣^{1,2}, 赖健清^{1,2}, 肖文舟^{1,2}, 梅嘉靖^{1,2}, 钱丽华^{1,2}, 刘 烨^{1,2}, 杜日俊^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 一六矿床是粤北钨锡多金属矿床中一个重要的钨矿床。矿区内地质体的岩性均为二长花岗岩, 具有高硅、过铝质、富钾和钙碱性等相似特征, 为分异的 S型花岗岩。两期岩体源区相同, 继承了陆内造山向板内伸展环境过渡的沉积物质, 经历了岩石圈沉积岩和早期火成岩的部分熔融, 并通过岩浆结晶分异作用使W、Sn等成矿元素富集。将矿床内的矽卡岩分为两组: 第一组Rb、Sr、Ba等大离子亲石元素亏损程度低, 稀土元素总量(Σ REE)高, 具有显著的Eu负异常; 第二组Rb、Sr、Ba等元素亏损程度高, Σ REE值较低, 具有弱Eu异常。两组矽卡岩是矿区内地质体两期热液活动作用的产物, 宝山岩体与帽子峰组砂岩发生接触交代作用形成矽卡岩型白钨矿, 一六岩体出溶热液沿矽卡岩中的裂隙充填交代形成石英脉型白钨矿, 这两期热液成矿事件反映了—六钨矿复合型矿床的本质。

关键词: 一六钨矿床; S型花岗岩; 结晶分异; 两期成矿

文章编号: 1004-0609(2018)-12-2610-13

中图分类号: P581; P542

文献标志码: A

一六钨矿床位于粤北曲江一六钨、锡、砷多金属矿田, 毗邻凡口超大型铅锌矿床。近年来, 吴桂捷^[1]研究了矿区内的岩体, 指出宝山岩体为燕山早期第三阶段的产物, K-Ar年龄为161.1 Ma; 一六岩体为燕山晚期第一阶段的产物, 其K-Ar年龄为137 Ma。裴太昌^[2]通过研究稀土配分模式, 指出宝山、一六两期岩浆岩均属壳源重熔型花岗岩系列。於崇文^[3]对矿区内地质体中微量元素含量进行了测定, 认为矿区内的成矿物质主要来源于宝山岩体和一六岩体。肖光铭等^[4]研究了一六矿区的钨矿类型, 指出矿区内地质体与燕山期的岩浆活动关系密切。裴太昌^[5]研究发现矿区地层中W、Sn、等元素的含量远高于地壳克拉克值, 可能为矿区内地质体的成矿作用提供了部分物质来源。前人对矿区内地质体和成矿有直接的关系, 但一六岩体和成矿的关系尚不清楚^[1-5]。本文作者通过研究矿区内地质体、矽卡岩、宝山岩体和一六岩体的地球化学特征, 发现矿区存在两组矽卡岩, 分别反映与宝山岩体、一六岩体相关的两期热液成矿作用。

1 矿区地质特征

乳源地区位于华夏板块北西缘的曲仁构造盆地, 北西侧为扬子板块和华夏板块相互作用形成的雪峰山-九岭陆内造山带^[6-7]。区域内岩浆活动强烈, 多伴随构造带以复式花岗岩体的形式产出, 以燕山早期的主体花岗岩和燕山晚期的补体花岗岩为主^[8-9]。区域内矿产资源丰富。

矿区内地质体从老至新有: 上泥盆统天子岭组(D₃t)灰岩、帽子峰组(D₃m)灰岩夹砂岩; 下石炭统孟公坳组(C₁ym)灰岩^[10]。其中, D₃m灰岩夹砂岩与一六钨矿成矿关系最密切。矿区内的断裂构造呈NNE向, 由西部的F₉、中部的F₂和东部F₃组成(见图1^[11])。

矿区内地质体主要为宝山岩体和一六岩体(见图1)。宝山岩体位于矿区中部偏西, 呈不规则状侵入, 规模较大。其岩性主要为含白云母、黑云母的二长花岗岩^[12]。一六岩体位于宝山岩体南东侧, 以岩脉

基金项目: 中南大学创新驱动项目(2015CX008); 中国地质调查局“整装勘查关键基础地质研究”计划项目(12120114052701); 中南大学中央高校基本科研业务专项资金资助(2017zzts566)

收稿日期: 2017-07-03; 修订日期: 2017-11-13

通信作者: 赖健清, 教授, 博士; 电话: 13875983805; E-mail: ljq@csu.edu.cn

的形式出露, 规模较小。其岩性为灰白色中细粒二长花岗岩, 岩体呈花岗结构, 块状构造, 主要由石英 40%、钾长石 30%、斜长石 25%、白云母 4%(质量分数)组成

(见图 2(a))。可见蚀变现象, 钾长石多发生泥化, 斜长石表面可见弱绢云母化, 局部见碳酸盐化。

岩体与帽子峰组地层发生接触交代作用形成矽卡

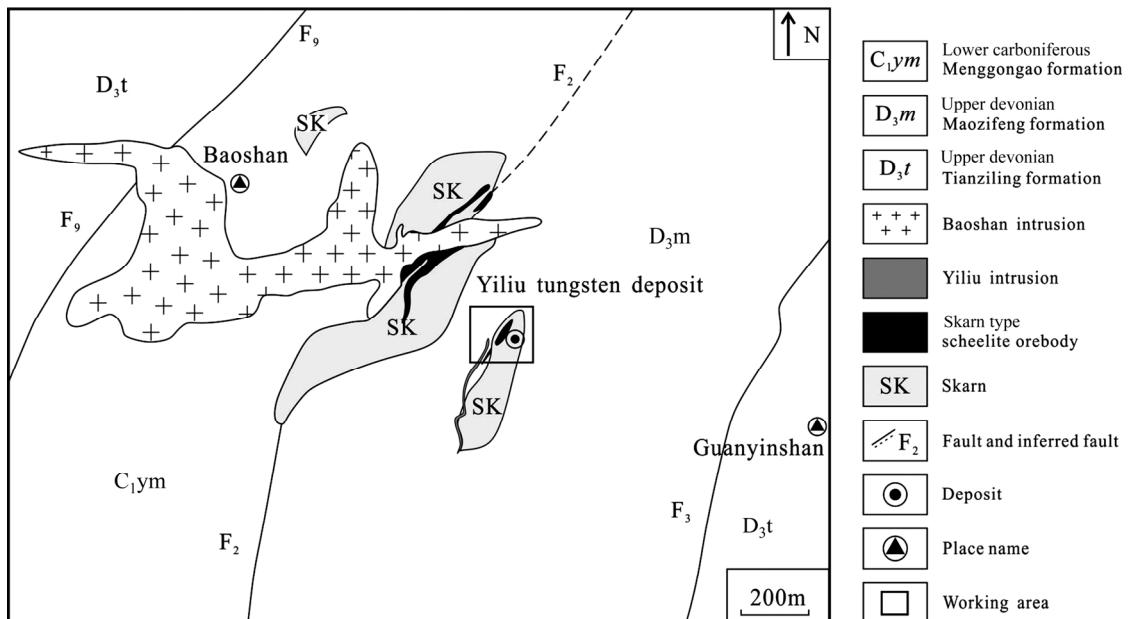


图 1 广东乳源一六矿区地质简图(底图据文献[11])

Fig. 1 Geological sketch map of Yiliu mineral area in Ruyuan, Guangdong Province (base map derived from Ref. [11])

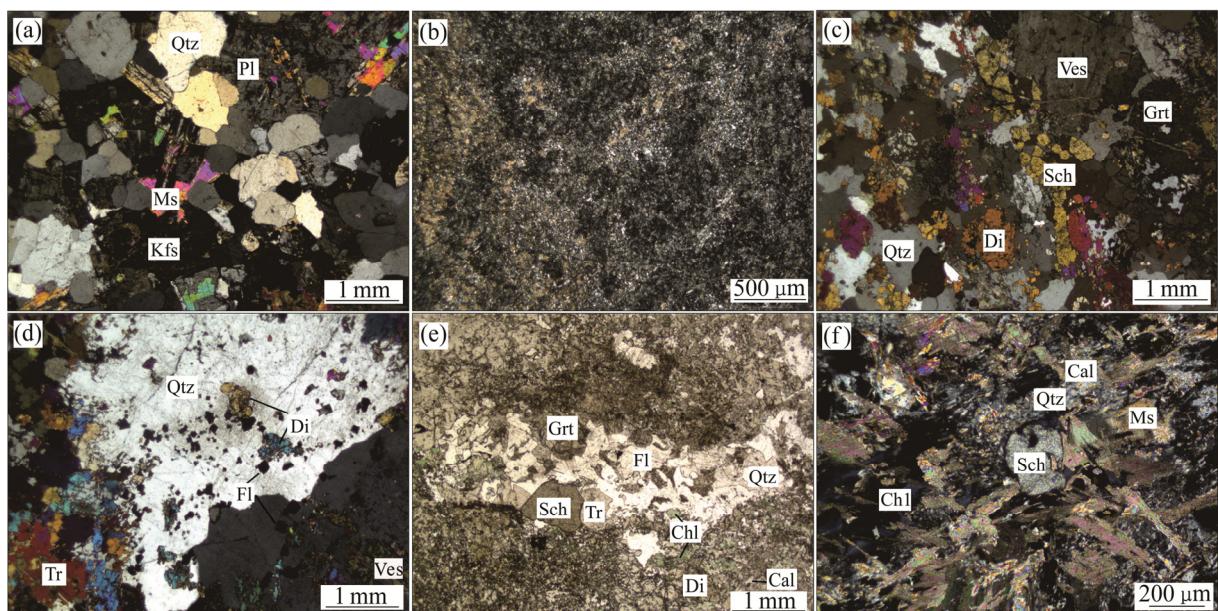


图 2 一六矿区岩浆岩、地层、矽卡岩镜下照片(Qtz—石英; Pl—斜长石; Ms—白云母; Kfs—钾长石; Ves—符山石; Di—透辉石; Grt—石榴子石; Sch—白钨矿; Tr—透闪石; Fl—萤石; Chl—绿泥石; Cal—方解石): (a) 二长花岗岩(一六岩体)(+); (b) 弱矽卡岩化砂岩(+); (c) 含白钨矿的矽卡岩(+); (d) 受后期热液叠加作用的矽卡岩(+); (e) 矽卡岩中含白钨矿的萤石—石英脉(-); (f) 受后期热液叠加作用的含白钨矿矽卡岩(+)

Fig. 2 Microphotographs of magmatic rock, strata and skarn in Yiliu mineral area (Qtz—Quartz; Pl—Plagioclase; Ms—Muscovite; Kfs—K-feldspar; Ves—Vesuvianite; Di—Diopside; Grt—Garnet; Sch—Scheelite; Tr—Tremolite; Fl—Fluorite; Chl—Chlorite; Cal—Calcite): (a) Monzonite granite (Yiliu intrusion)(+); (b) Weak skarnized sandstone(+); (c) Skarn with scheelite(+); (d) Skarn superimposed by late hydrothermal process(+); (e) Fluorite-quartz vein containing scheelite in skarn(-); (f) Skarn with scheelite superimposed by late hydrothermal process(+)

岩；在砂岩的接触带或远离接触带的碳酸盐岩中发生较弱的矽卡岩化(见图2(b))。矽卡岩多呈中-细粒状变晶结构(见图2(c))。主要矿物有钙铝榴石、符山石、透辉石、透闪石、白云母、萤石、绿泥石、石英、方解石等(见图2(e)和(d))。矿区内地质构造复杂，区内一系列后期石英细脉充填于矽卡岩化带NW向的裂隙中。因此将区内矽卡岩分为两类：一类为远离石英脉的矽卡岩，其中可见白钨矿呈团包状、浸染状分布(见图2(c))。另一类为叠加了石英细脉的矽卡岩，石英细脉中可见白云母、萤石和半自形的白钨矿，有透闪石、石榴子石等早期矽卡岩矿物的交代残留体(见图2(e))。脉旁的矽卡岩受后期热液叠加作用形成大量的方解石、绿泥石等蚀变产物，有白钨矿的交代残余体(见图2(f))。

一六矿区白钨矿矿体主要赋存于矽卡岩和一系列NW向的白云母石英脉中。矽卡岩型白钨矿化多呈星点状、浸染状和团包状分布。含钨石英脉多沿矽卡岩中的裂隙充填，脉体宽度1~30 cm不等，部分含矿石英脉交代矽卡岩^[10]；脉内可见浸染状、团包状的白钨矿，此外还出现浸染状的黄铁矿、辉钼矿等。早期与矽卡岩型矿化有关的围岩蚀变有硅化和碳酸盐化，晚期与白云母石英脉型矿化有关的围岩蚀变主要为云英岩化、黄铁绢英岩化等。

2 样品采集和分析测试

本次研究工作中，在一六钨矿床采集了11件岩石样品，其中包括D₃m砂岩样品1件、矽卡岩样品8件和一六岩体样品2件。砂岩和矽卡岩样品的采样位置

见图3。上述样品的主量、微量元素和稀土元素分析测试工作均由广州澳实分析检测有限公司澳实矿物实验室完成，其中主量元素的分析测试采用的是X射线荧光光谱法(XRF)，分析误差优于5%，砂岩、矽卡岩和岩体分别采用ME-XRF26d和ME-XRF06方法；微量元素测定均采用ICP-MS法，当元素含量大于 10×10^{-6} (质量分数)时，误差小于5%；元素含量小于 10×10^{-6} (质量分数)时，误差小于10%。详细测试方法和流程见文献[13]。此外，文中还引用了5件宝山岩体样品的全岩和微量元素测试数据^[12]。

3 地球化学特征

3.1 主量元素特征

由一六矿区内地质构造复杂，区内矽卡岩、一六岩体和宝山花岗岩体的主量元素分析结果(见表1)可知，一六矿区的矽卡岩主要由富含钙、铝、铁的硅酸盐矿物组成，有少量含镁和锰的硅酸盐矿物。一六矿区矽卡岩中Ca的含量远远大于K+Na、Mg和Mn的含量，因此这些矽卡岩样品为典型的钙矽卡岩^[14]。

矿区内的16、宝山两期岩体在主量元素组成上具有相似的特征，总结为以下几点：1) 富硅，SiO₂含量为74.10%~78.50%。2) 过铝质，A/KNC值在1.01~1.69范围内，在A/KNC-A/NK图解上样品点落在过铝质区(见图4(a))，样品集中落在A/KNC=1.1范围内及其右侧区域。样品的CIPW标准矿物计算结果中均出现刚玉分子，含量均在1%以上(5.75%~12.76%(质量分数)范围内)。3) 富钾(w(K₂O)为4.36%~6.50%)，

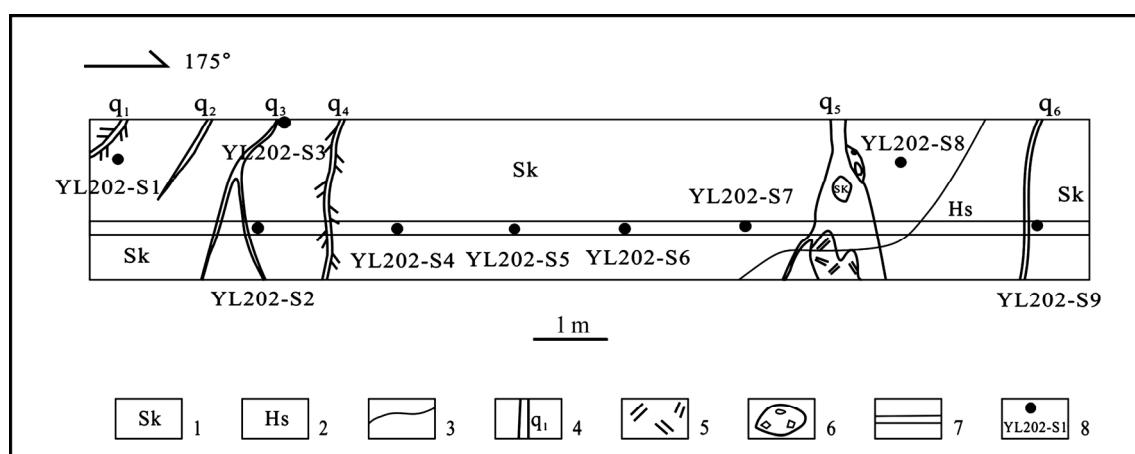


图3 一六钨矿床矽卡岩和砂岩采样位置图：1—矽卡岩；2—角岩；3—岩性界线；4—石英脉及编号；5—云英岩化；6—长石脉；7—探槽；8—采样点及编号

Fig. 3 Sampling position map of sandstone and skarn in Yiliu tungsten deposit: 1—Skarn; 2—Hornstone; 3—Lithology boundary; 4—Quartz veins and its number; 5—Greisenization; 6—Feldspar vein; 7—Trial trench; 8—Sampling point and its number

表1 一六矿区砂岩、矽卡岩和岩体主要元素含量、CIPW标准矿物(刚玉 C)及主要岩石化学参数

Table 1 Major element contents, CIPW-normative mineral and predominant lithochemical parameters of sandstone, skarn and intrusions in Yiliu mineral area

Sample No.	Lithology	Mass fraction/%													A/NK	A/KNC	AKI	
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI	C				
YL202-S7	Sandstone	60.81	<0.01	15.68	4.89	0.20	0.26	3.69	0.19	9.00	0.34	0.31	3.11	—	—	—	—	
YL202-S1	Skarn The first group	47.52	0.57	14.20	5.46	0.51	1.98	18.5	2.57	0.49	0.13	0.05	6.59	—	—	—	—	
YL202-S2		31.34	0.52	14.62	8.27	0.45	4.08	19.0	0.81	2.51	0.15	0.15	16.06	—	—	—	—	
YL202-S3		57.29	0.25	10.19	4.27	0.37	0.86	14.9	0.69	1.96	0.07	0.49	5.32	—	—	—	—	
YL202-S9		47.14	0.48	11.73	4.53	0.50	1.74	20.7	0.73	1.71	0.11	0.37	5.08	—	—	—	—	
YL202-S4	Skarn The second group	47.92	0.06	1.32	6.16	0.49	2.60	37.3	<0.01	0.01	0.02	0.09	4.12	—	—	—	—	
YL202-S5		43.36	0.42	11.88	5.89	0.57	1.30	30.5	0.02	0.01	0.09	0.04	3.98	—	—	—	—	
YL202-S6		44.51	0.43	10.82	4.52	0.52	1.46	29.7	0.04	0.01	0.10	0.10	4.72	—	—	—	—	
YL202-S8		42.40	0.43	11.66	7.20	0.44	1.00	34.1	0.01	0.01	0.11	0.05	3.93	—	—	—	—	
YL202-Y2	Monzonite	Yiliu	75.85	1.03	12.32	1.28	0.04	0.15	0.90	2.61	5.14	0.01	<0.01	1.03	6.23	1.25	1.07	0.80
YL202-Y3	granite	intrusion	75.88	1.84	13.16	1.44	0.03	0.20	0.84	0.07	5.64	0.01	<0.01	1.84	11.62	2.11	1.69	0.47
TD603-B1*			74.23	0.07	12.68	1.52	0.05	0.07	0.83	3.42	5.03	0.02	-	0.91	5.75	1.14	1.01	0.87
TD604-B1*			74.70	0.13	12.55	1.43	0.08	0.13	0.96	2.67	5.27	0.01	0.05	1.06	6.44	1.24	1.06	0.81
TD604-B2*	Granite	Baoshan intrusion	74.10	0.12	12.75	1.36	0.07	0.12	1.36	1.63	6.15	0.01	0.21	1.47	8.84	1.36	1.08	0.73
TD604-B3*			75.00	0.14	13.90	1.71	0.07	0.14	0.73	0.10	6.50	0.01	0.41	1.57	12.76	1.93	1.63	0.52
TD604-B5*			78.50	0.11	9.91	1.56	0.09	0.11	1.43	0.96	4.36	0.02	0.15	1.65	7.23	1.57	1.11	0.64

Note: A/NK=n(Al₂O₃)/n(Na₂O+K₂O); A/KNC=n(Al₂O₃)/n(Na₂O+K₂O+CaO); AKI=n(Na₂O+K₂O). Sample data for “**” is based on Ref. [12].

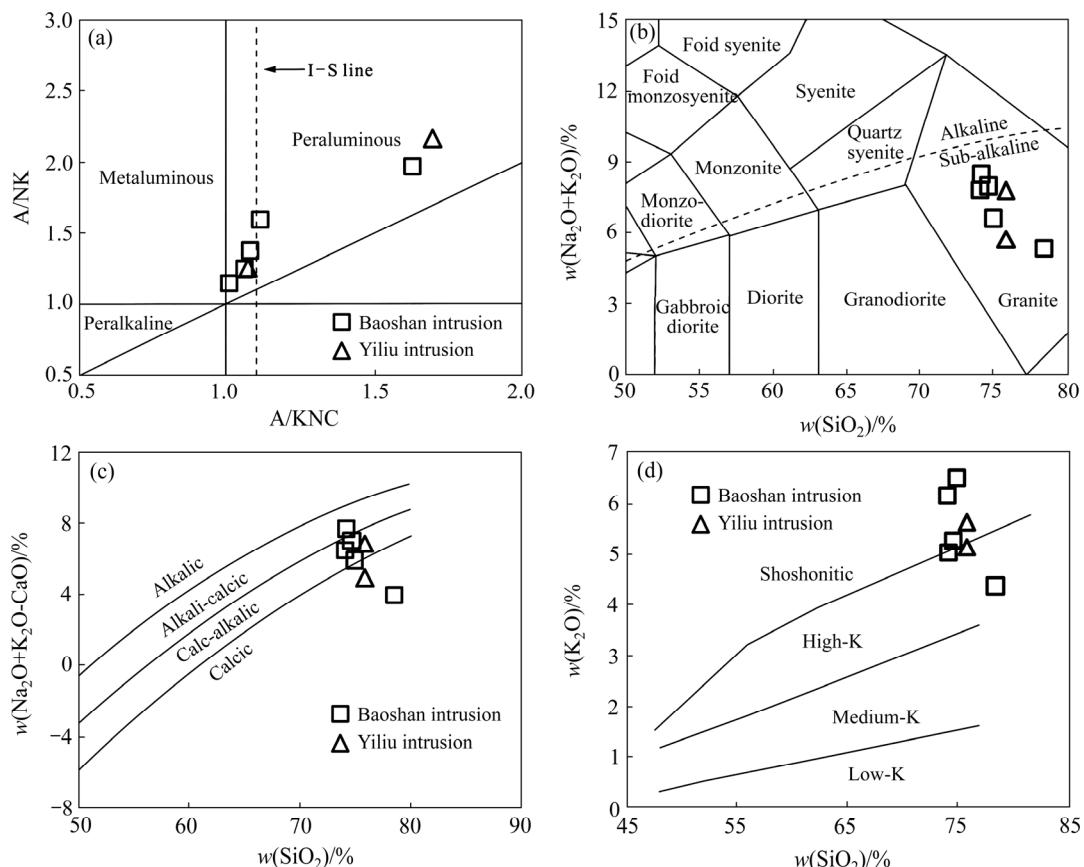


图4 一六矿区两期岩体的地球化学分类图: (a) A/KNC-A/NK关系图解(底图据文献[15]); (b)TAS图解(底图据文献[16])(图例同图4(a)); (c)Na₂O+K₂O-CaO-Si₂O关系图解(底图据文献[17]); (d)K₂O-SiO₂关系图解

Fig. 4 Diagrams for geochemistry classification of two stages of intrusions in Yiliu mineral area: (a) A/KNC-A/NK diagram (base map derived from Ref. [15]); (b) TAS diagram (base map derived from Ref. [16]) (Same legend as Fig. 4(a)); (c) Na₂O+K₂O-CaO-Si₂O diagram (Base map derived from Ref. [17]); (d) K₂O-SiO₂ diagram

在 K_2O-SiO_2 关系图上, 样品点落在高钾系列和钾玄武系列中(见图 4(d))。4)碱含量中等偏高($w(K_2O+Na_2O)$ 为 5.32%~8.45%), 在 $SiO_2-(K_2O+Na_2O)$ 关系图上, 样品点落在亚碱性系列区的花岗岩中(见图 4(b))。在 $Na_2O+K_2O-CaO-Si_2O$ 关系图中集中落在钙碱性范围内, 其中有两个样品由于 Na_2O 含量极低落入钙性区域内(见图 4(c))。

3.2 微量元素特征

表 2 所列为一六矿区内砂岩、矽卡岩、一六岩体和宝山花岗岩样品的微量元素分析结果。在原始地幔标准化蛛网图(见图 5(a))中, 砂岩明显富集 Rb、U、K、

Ta、P、Sr、Hf, 贫 Ba、Th、Ti。矽卡岩的微量元素总体上呈富集 Rb、Th、U、Ta, 贫 Ba、K、Nb、Sr、P、Ti 的特征。

结合表 2 和图 5(a)发现, 8 件矽卡岩样品中 Rb、Sr、Ba 元素的亏损可明显分为两组, 第一组矽卡岩样品为低亏损组, 包括 YL202-S1、YL202-S2、YL202-S3 和 YL202-S9 4 个样品; 第二组矽卡岩样品为高亏损组, 包括 YL202-S4、YL202-S5、YL202-S6 和 YL202-S8 4 个样品。

宝山岩体和一六岩体的微量元素组成基本一致, 富集 Rb、Th 及 U 等大离子亲石元素, 相对亏损 Ta、Nb、P 及 Ti 等高场强元素。Ba、Sr、K 等元素呈负异

表 2 一六矿区砂岩、矽卡岩和岩体微量元素含量

Table 2 Trace element contents of sandstone, skarn and intrusions in Yiliu mineral area

Sample No.	Lithology	Trace element content/($\mu g \cdot g^{-1}$)																			
		Rb	Ba	Th	U	K	Ta	Nb	La	Ce	Sr	Nd	P	Zr	Hf	Sm	Ti	Y	Yb	Lu	
YL202-S7	Sandstone	1215	1020	8.05	7.53	74680.9	145.0	28.6	2.0	4.8	174.0	2.5	1484.51	29	5.6	0.77	<60	7.0	0.66	0.12	
YL202-S1		89.4	32.2	10.85	1.99	4066.0	1.7	22.4	23.9	50.5	299	22.0	567.61	108	2.8	4.82	3420	20.5	2.00	0.31	
YL202-S2	Skarn	First	543	231	10.10	2.90	20827.7	1.0	12.6	31.2	58.1	284	23.8	654.93	103	2.7	5.34	3120	24.9	2.23	0.30
YL202-S3		group	274	242	5.27	12.45	16263.8	10.6	19.6	26.8	57.6	219	19.7	305.63	55	1.7	4.64	1500	47.5	7.45	1.24
YL202-S9			223	190.0	8.11	4.36	14189.4	23.9	51.0	25.7	54.7	179.5	22.2	480.28	97	2.8	5.08	2880	30.8	3.85	0.66
YL202-S4			1.7	3.4	1.34	1.07	83.0	0.4	2.4	12.0	27.0	70.1	12.0	87.32	33	0.8	2.31	360	9.0	0.69	0.11
YL202-S5	Skarn	Second	1.9	1.8	8.22	1.98	83.0	1.0	12.5	21.9	40.9	75.3	15.0	392.96	119	3.1	2.91	2520	12.5	1.51	0.22
YL202-S6		group	1.0	1.6	8.19	2.06	83.0	0.9	11.5	24.7	43.9	65.6	15.5	436.62	94	2.6	2.91	2580	12.1	1.31	0.20
YL202-S8			2.5	3.1	8.60	2.34	83.0	6.6	13.5	30.3	55.6	66.6	20.9	480.28	136	3.6	4.30	2580	18.8	1.72	0.25
YL202-Y2	Monzonite	Yiliu	751	28.7	47.0	35.4	42651.1	7.1	24.8	20.2	46.8	22.4	21.9	43.66	117	6.5	7.63	6180	100.5	10.15	1.59
YL202-Y3	granite	intrusion	991	48.4	55.6	40.4	46800.0	9.9	31.8	29.9	69.8	13.0	31.3	43.66	135	7.6	9.40	11040	103.0	10.85	1.58
TD603-B1*			738	20.2	48.5	35.0	41738.3	10.4	32.9	25.8	60.6	14	28.7	87.32	108	5.3	8.76	420	85.5	10.05	1.51
TD604-B1*			771	30.1	43.1	35.4	43729.8	7.7	29.4	23.3	56.0	23	27.5	43.66	98	5.7	9.43	780	114.0	13.50	2.02
TD604-B2*	granite	Baoshan intrusion	924	51.3	52.3	44.5	51031.9	7.4	29.5	27.1	64.4	18	29.9	43.66	132	6.4	9.43	720	99.6	11.40	1.72
TD604-B3*			1145	38.3	57.9	44.0	53936.2	10.6	36.4	26.8	63.6	10	29.5	43.66	127	6.7	8.86	840	88.9	10.80	1.62
TD604-B5*			687	44.0	41.8	46.4	36178.7	5.6	24.3	20.5	48.6	20	24.7	87.32	116	7.4	8.43	660	127.5	15.50	2.26

Note: Sample data for “**” is based on Ref. [12].

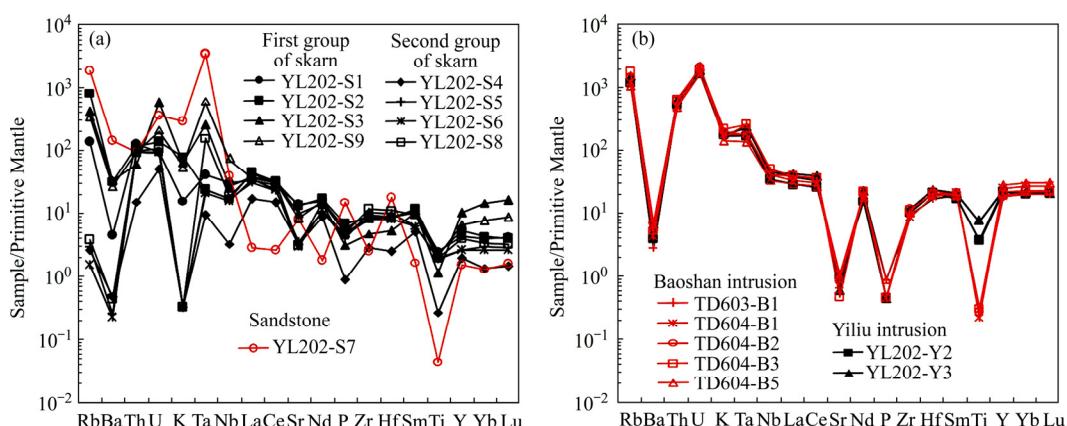


图 5 一六矿区各岩石微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams of different rocks in Yiliu mineral area

常。相比宝山岩体, 一六岩体的K元素亏损明显增强(见图5(b))。矿区内地质体的微量元素蛛网图与矽卡岩十分相似。

3.3 稀土元素特征

由一六矿区内地质体、矽卡岩、一六岩体和宝山岩体样品的稀土元素分析结果(表3)可知, 矽卡岩的稀土总量很低, ΣREE 值为 $13.99 \mu\text{g/g}$, LREE/HREE 值为 3.53, 略富集轻稀土, 具有轻微的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.92$), REE 分布曲线为右倾平滑的曲线(见图6(a))。

8件矽卡岩样品的 Eu 异常也明显分为两组: 第一组矽卡岩的 δEu 值在 0.47~0.59 范围内; 第二组的 δEu 值在 0.77~1.14 之间。分组结果与 Rb、Sr、Ba 的亏损相符, 第一组矽卡岩具有高 Eu 异常(δEu 值)、低 Rb、Sr、Ba 亏损的特征; 第二组矽卡岩具有低 Eu 异常、高 Rb、Sr、Ba 亏损的特征。8件矽卡岩的 ΣREE 值在 $62.70\sim141.82 \mu\text{g/g}$ 之间, 第一组的 ΣREE 值高于第二组。第一组矽卡岩的 LREE/HREE 值在 5.10~9.73 之间, 高于第二组(10.10~11.69); 第一组矽卡岩的 La_N/Yb_N 值(2.58~10.04)低于第二组(10.40~13.52), 表明两组矽

表3 一六矿区矽卡岩、矽卡岩和岩体稀土元素含量

Table 3 REE contents of sandstone, skarn and intrusions in Yiliu mineral area

Sample No.	Lithology	REE content/($\mu\text{g g}^{-1}$)													ΣREE	LREE/ La_N	δEu	δCe						
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y								
YL202-S7	Sandstone	2.0	4.8	0.61	2.5	0.77	0.22	0.69	0.13	0.82	0.15	0.44	0.08	0.66	0.12	7.0	13.99	10.90	3.09	3.53	2.17	0.92	1.07	
YL202-S1		23.9	50.5	5.91	22.0	4.82	0.70	4.39	0.55	3.45	0.71	2.00	0.30	2.00	0.31	20.5	121.54	107.83	13.71	7.87	8.57	0.47	1.04	
YL202-S2	Skarn first group	The first group	31.2	58.1	6.69	23.8	5.34	0.85	5.37	0.63	3.92	0.81	2.25	0.33	2.23	0.30	24.9	141.82	125.98	15.84	7.95	10.04	0.49	0.99
YL202-S3			26.8	57.6	6.33	19.7	4.64	0.83	4.04	0.64	4.33	0.95	3.32	0.75	7.45	1.24	47.5	138.62	115.90	22.72	5.10	2.58	0.59	1.08
YL202-S9			25.7	54.7	6.37	22.2	5.08	0.89	4.69	0.64	4.05	0.83	2.56	0.46	3.85	0.66	30.8	132.68	114.94	17.74	6.48	4.79	0.56	1.05
YL202-S4		12.0	27.0	3.24	12.0	2.31	0.76	1.80	0.23	1.42	0.29	0.74	0.11	0.69	0.11	9.0	62.70	57.31	5.39	10.63	12.47	1.14	1.06	
YL202-S5	Skarn second group	The second group	21.9	40.9	4.45	15.0	2.91	0.68	2.38	0.33	2.10	0.44	1.31	0.21	1.51	0.22	12.5	94.34	85.84	8.50	10.10	10.40	0.79	1.02
YL202-S6			24.7	43.9	4.60	15.5	2.91	0.76	2.32	0.32	1.98	0.42	1.15	0.20	1.31	0.20	12.1	100.27	92.37	7.90	11.69	13.52	0.89	1.01
YL202-S8			30.3	55.6	5.99	20.9	4.30	1.03	3.94	0.52	3.18	0.61	1.67	0.25	1.72	0.25	18.8	130.26	118.12	12.14	9.73	12.64	0.77	1.01
YL202-Y2	Monzonite	Yiliu	20.2	46.8	5.69	21.9	7.63	0.16	8.89	1.56	11.75	2.65	8.57	1.42	10.15	1.59	100.5	148.96	102.38	46.58	2.20	1.43	0.06	1.07
YL202-Y3	granite	intrusion	29.9	69.8	8.39	31.3	9.40	0.21	9.98	1.77	12.70	2.89	9.02	1.55	10.85	1.58	103.0	199.34	149.00	50.34	2.96	1.98	0.07	1.08
TD603-B1*			25.8	60.6	7.62	28.7	8.76	0.21	9.67	2.01	13.75	2.86	9.04	1.39	10.05	1.51	85.5	181.97	131.69	50.28	2.62	1.84	0.07	1.06
TD604-B1*			23.3	56.0	7.07	27.5	9.43	0.17	11.00	2.41	16.45	3.76	11.55	1.95	13.50	2.02	114.0	186.11	123.47	62.64	1.97	1.24	0.05	1.07
TD604-B2*	Granite	Baoshan intrusion	27.1	64.4	8.05	29.9	9.43	0.21	10.40	2.21	14.40	3.20	9.77	1.59	11.40	1.72	99.6	193.78	139.09	54.69	2.54	1.71	0.06	1.07
TD604-B3*			26.8	63.6	7.86	29.5	8.86	0.23	9.64	1.98	12.90	2.93	9.09	1.57	10.80	1.62	88.9	187.38	136.85	50.53	2.71	1.78	0.08	1.07
TD604-B5*			20.5	48.6	6.14	24.7	8.43	0.15	11.55	2.65	19.10	4.27	13.35	2.19	15.50	2.26	127.5	179.39	108.52	70.87	1.53	0.95	0.05	1.06

Note: Sample data for “*” is based on Ref. [12].

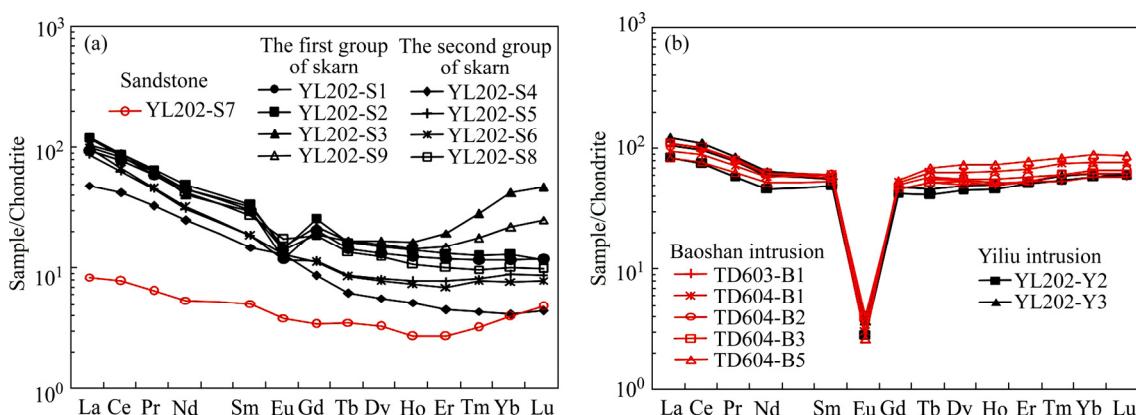


图6 一六矿区各岩石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns of different rocks in Yiliu mineral area

卡岩均富集轻稀土元素, 第二组矽卡岩的轻、重稀土元素分异程度大于第一组。从第一组矽卡岩到第二组矽卡岩, δEu 值逐渐变大, 从负异常向正异常过渡。8件矽卡岩样品的 δCe 值都集中在 0.99~1.08 范围内, Ce 基本无异常。两组矽卡岩样品的稀土配分形式呈明显的右倾型(见图 6(a))。

由表 3 中的数据可知, 一六岩体和宝山岩体的 $\sum\text{REE}$ 值在 148.96~199.34 $\mu\text{g/g}$ 之间, 高于矽卡岩和砂岩。 LREE/HREE 值在 1.53~2.96 之间, La_N/Yb_N 的值在 0.95~1.68 之间, 轻重稀土元素的分异程度较低。 δEu 值在 0.05~0.08 之间。

总体上, 矿区内岩体、第一组矽卡岩、第二组矽卡岩的 REE 总量依次降低, 轻稀土富集程度变高, 轻重稀土分馏变明显, Eu 从显著的负异常逐渐变为正异常。矿床的围岩(砂岩)的 REE 总量极低。矽卡岩的 REE 分布曲线和形态和总量介于岩体和围岩之间。

4 讨论

4.1 岩浆岩成因

矿区内出现的宝山岩体和一六岩体均属于花岗岩(见图 4(b))。矿区内宝山、一六两期岩体样品在 $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-\text{TFeO/MgO}$ 判别图解中(见图 7(a)), 集中落在分异的 I、S 和 M 型花岗岩区, 少数样品落在 A 型花岗岩区。两期岩体的碱铝指数(AKI 值)为 0.47~0.87 之间变化(见表 1), 低于 A 型花岗岩的平均

值($\text{AKI}=0.95$)^[18~19]。两期岩体均落在钙性-钙碱性范围内(见图 4(c))。经计算, 得出两期岩体的锆石饱和温度为 791~843 °C 之间变化, 均低于 A 型花岗岩的形成温度(>900 °C)^[20~22]。此外, 矿区范围内出露大面积接触交代成因的矽卡岩化带, 表明与围岩发生接触交代作用的岩体中含水。以上特征均不符合 A 型花岗岩碱性、无水的特性。

一六矿区内的宝山岩体和一六岩体总体上具有相似的特征, 均具有高硅、过铝质、富钾和钙碱性的特征(图 4)。A/KNC 值在 1.01~1.69 之间, 主要集中在 $\text{A}/\text{KNC}=1.1$ (I-S 线)附近(见图 4(a))。两期岩体的 CIPW 标准矿物计算结果中刚玉的含量在 5.75%~12.76% 之间变化, 均大于 1%, 岩石矿物中可见白云母等富铝矿物(见图 2(a)), 符合 S 型花岗岩的特征。两期岩体的 P_2O_5 含量总体较低, 均为 0.01% 和 0.02%, 与 S 型花岗岩的特征有所不同(S 型花岗岩的 P_2O_5 含量 > 0.20%)^[18]。两期岩体的 REE 分布曲线极其相似, 以略富集轻稀土元素和强烈的 Eu 负异常的折线型曲线^[23]为特征(见图 6(b)), 与典型的 S 型花岗岩“海鸥型”稀土配分形式相似^[24]。两期花岗岩的 Rb 与 Y 元素之间存在负相关关系(见图 7(b)), 这一特征与 S 型花岗岩的演化特征相似。

两期岩体极为相似的地球化学性质指示了它们可能来自于同一源区。以上指标多数指示矿区内两期岩体属分异的 S 型花岗岩, 但由于两期岩体的 $w(\text{P}_2\text{O}_5)\leq 0.02\%$ 以及部分样品的 $\text{A}/\text{KNC}<1.1$, 认为矿区内两期岩体可能具有混合源区: 源区以上地壳岩石

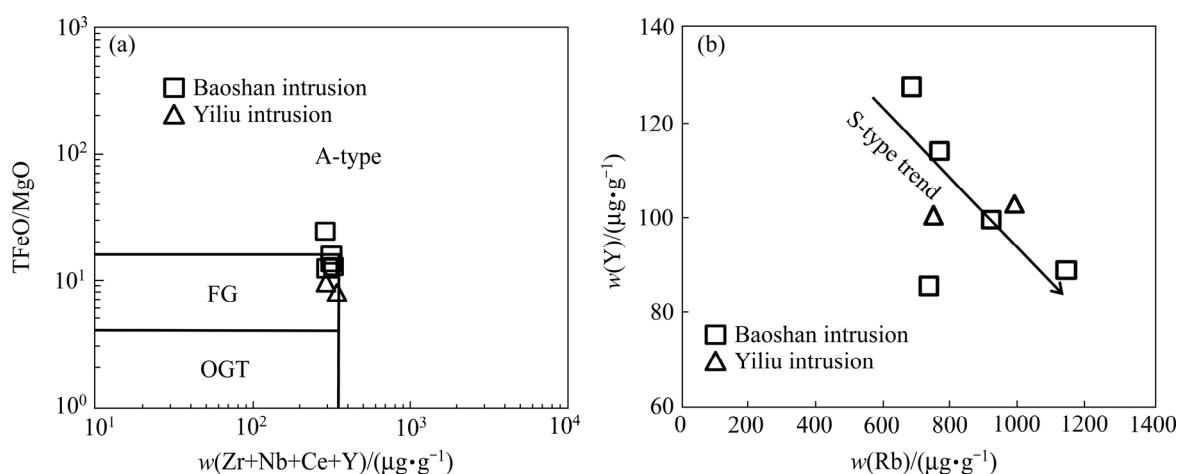


图 7 一六矿区两期岩体的 $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-\text{TFeO/MgO}$ 关系图(底图据文献[19])和 Rb-Y 关系图 (OGT 为未分异的 I、S 和 M 型花岗岩区; FG 为分异的 I、S 和 M 型花岗岩区; A 为 A 型花岗岩区)

Fig. 7 $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-\text{TFeO/MgO}$ diagram (base map derived from Ref. [19])(a) and Rb-Y diagram(b) of two stage intrusions in Yiliu mineral area (OGT: Unfractionated I-, S- and M-type granites; FG: Fractionated I-, S- and M-type granites; A-type: A-type granites)

圈沉积岩为主, 是沉积岩和早期火成岩的混合物质。综上所述可知, 矿区内的两期岩体为分异的S型花岗岩。

宝山岩体和一六岩体的稀土元素均具有明显的负Eu异常, 以及轻微的轻稀土富集。长石是Eu富集的主要矿物, 岩浆岩的负Eu异常可能有两种原因: 一种是部分熔融过程中难熔的长石残留在源区; 另一种是岩浆的高程度结晶分异使长石发生分离。两期岩体在 $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-\text{TiFeO/MgO}$ 判别图解中(见图7(a)), 主要落在分异的I、S和M型花岗岩区; 在La-La/Sm图解中(见图8(a)), 显示两期岩体主要是由结晶分异形成的。说明这两期岩体的形成过程中主要经历了结晶分异过程, 但并不排除源区的部分熔融。 $\text{Zr}-\theta_{\text{Zrn}}$ 图解(见图8(b))显示一六岩体的锆饱和温度略微高于宝山岩体, 这两期岩体具有同源的特征, 而晚期一六岩体略高的锆饱和温度可能指示了源区存在部分熔融的现象, 早期宝山岩体的初次熔融残留了部分难熔物质,

使后期一六岩体的熔融温度更高, 两期岩体的微量元素蛛网图(见图5(b))显示了难熔物质主要为含Ti矿物。在Sr-Ba和Sr-Rb图解中(见图8(c)和(d)^[25]), 一六岩体和宝山岩体均显示了以斜长石($\text{An}=50$)为主的结晶分异过程。

4.2 矿区构造演化与成矿

在 $\text{Y}+\text{Nb}-\text{Rb}$ 和 $\text{Rb}/10-\text{Hf}-3\text{Ta}$ 构造环境判别图中(见图9(a)、(d)), 一六矿区的两期花岗岩分析点均落在同碰撞区域和板内区域的交界线上, 而 $\text{Yb}-\text{Ta}$ 和 $\text{Y}-\text{Nb}$ 构造环境判别图中(见图9(b)、(c)), 分析点均落在板内花岗岩区域。说明区域可能经历了从同碰撞环境到板内环境的过渡, 而两期岩体的源区为两种构造环境下沉积物质的混合。

结合图9, 认为一六矿区的两期岩体形成于挤压后期、伸展初期的构造环境中。一六矿区位于粤北地区, 雪峰山-九岭以南, 远离太平洋板块向华夏板块

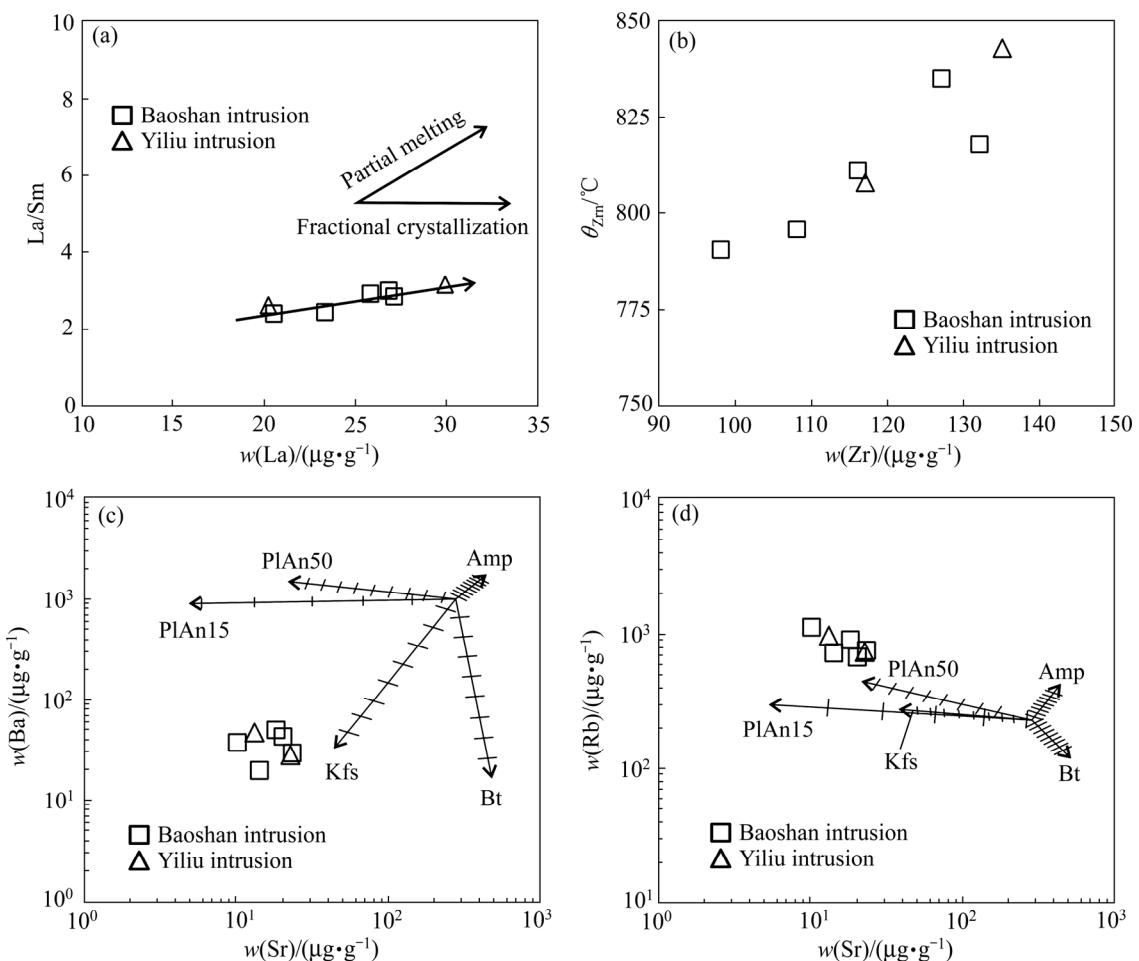


图8 矿区内两期岩体的La-La/Sm图解、 $\text{Zr}-\theta_{\text{Zrn}}$ 图解、Sr-Ba和Sr-Rb图解(底图据文献[25])(Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Amp—角闪石; Bt—黑云母)

Fig. 8 La-La/Sm diagram(a), $\text{Zr}-\theta_{\text{Zrn}}$ diagram(b), Sr-Ba(c) and Sr-Rb diagram (d) (base map derived from Ref. [25]) of two stages of intrusions in Yiliu mineral area (Pl—Plagioclase; Kfs—k-feldspar; Amp—Amphibole; Bt—Biotite)

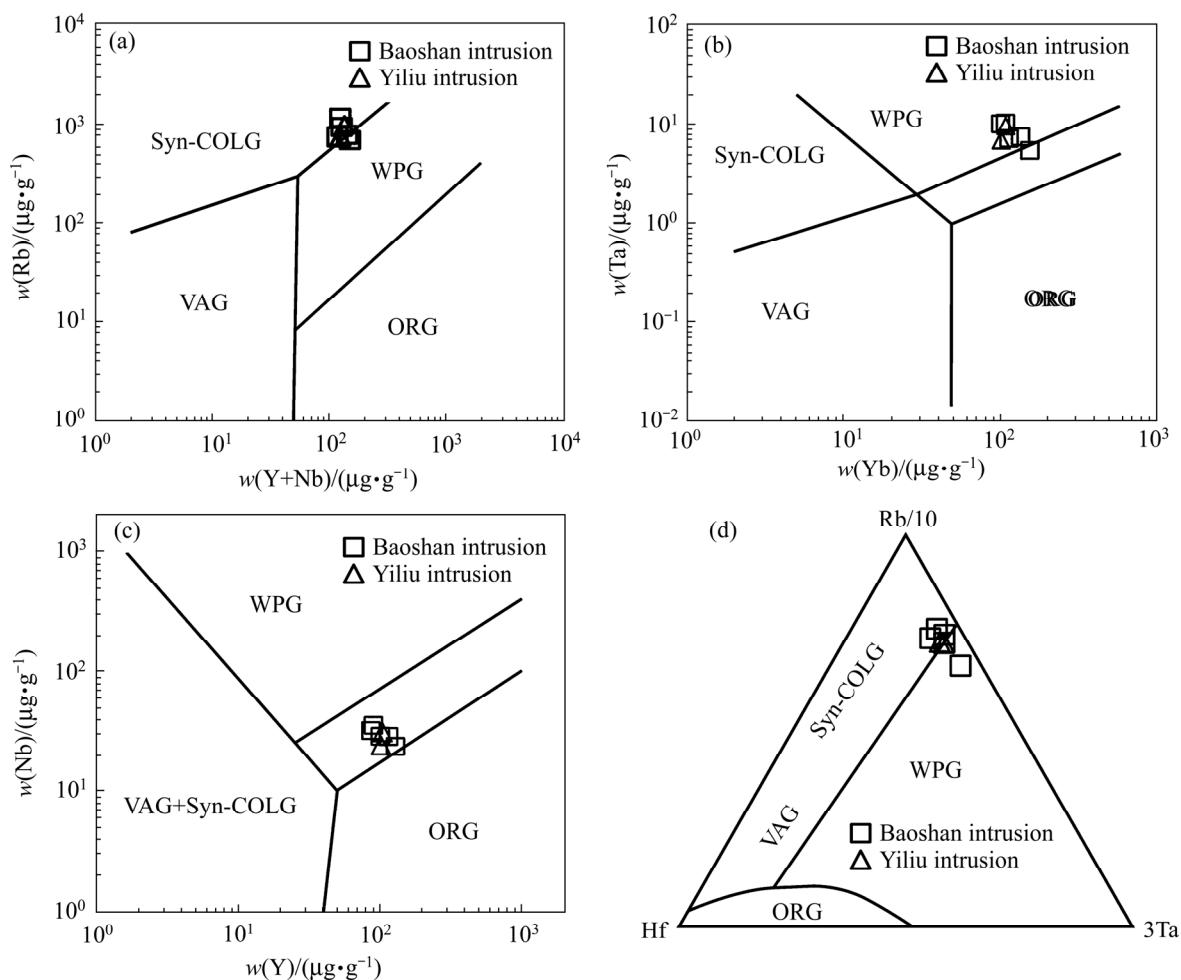


图9 一六矿区两期岩体的构造环境判别图(底图据文献[26])(Syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—大洋脊花岗岩)

Fig. 9 Tectonic setting discrimination diagram of two stages of intrusions in Yiliu mineral area (base map derived from Ref. [26]). (Syn-COLG—Syn-collision granite; WPG—Within plate granites; VAG—Volcanic arc granites; ORG—Ocean ridge granites)

俯冲形成的造山带,本文认为两期岩体的形成可能与华南板块雪峰山-九岭的陆内造山事件相关。然而关于华南地区印支期陆内造山作用的说法一直存在两种观点:一种认为古太平洋板块的低角度俯冲及其相关构造变动产生的远程效应引起的陆内造山作用形成了挤压环境^[26-27],使整个华南板块内部在早中生代便发育了长达几百千米的陆内褶皱带^[7];另一种观点认为是大陆板块内不同陆块(或地块)在深部背景下非均衡状态的差异相互作用导致岩石圈的拆沉、垮塌现象,从而引起地壳增厚,形成了陆内造山环境^[28-31]。新近的研究认为印支期华南大陆内部的构造变动与扬子和华夏两陆块间的相互作用存在必然的联系,且沿海到一六矿区并不存在大规模的陆内褶皱带,难于用远程效应的观点进行解释;另一方面,分析发现华南板块内部主导构造不是由北缘印支期秦岭-大别山造山带

的作用及其远程效应所致^[28]。综合以上理由,同意第二种观点,认为华南板块的陆内造山作用是由华夏陆块和扬子陆块碰撞拼合之后,继续发生相互作用引发的。

中三叠世至白垩世,一六矿区所处的区域发生了陆内造山作用及随后的区域伸展作用。分为以下3个阶段:1) 中三叠世至中侏罗世,陆内造山作用阶段(见图10(a)),以华夏板块和扬子板块之间NWW-SEE向的挤压引发的陆内挤压造山作用为主,期间因地壳增厚而温度升高的中地壳下部岩石产生部分熔融形成岩浆并向上升位形成了印支期花岗岩,具有后碰撞(同造山后期)花岗岩特征^[32]。2) 中侏罗世末至晚侏罗世,区域进入后造山作用阶段(见图10(b)),以伸展运动为主。3) 白垩纪,陆内裂谷阶段(见图10(c)),整个华南地区发生区域性的伸展构造作用,形成一系列断陷盆

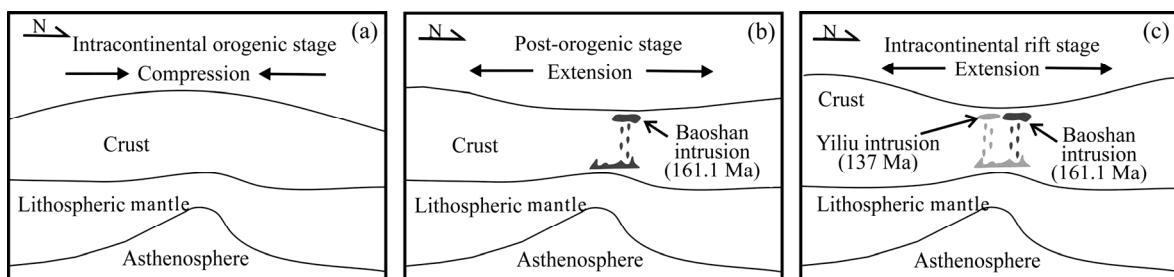


图 10 一六矿区中生代构造演化模式图

Fig. 10 Mesozoic tectonic evolution pattern of Yiliu mineral area: (a) T₂–J₂; (b) J₂–J₃; (c) K

地, 燕山期的花岗质岩浆活动强烈, 出露部分双峰式火山岩^[33]。综合吴桂捷等提供的宝山岩体和一六岩体的年龄数据^[1], 认为宝山岩体(161.1 Ma)形成于晚侏罗世, 即陆内造山作用向后造山作用过渡的阶段; 一六岩体(137 Ma)形成于早白垩世, 即后造山阶段向陆内裂谷阶段过渡的构造环境中。这两期岩体的源区继承了陆内造山阶段和后造山阶段的沉积物质, 指示了华南地区中生代岩石圈由挤压增厚环境向板内伸展环境过渡(见图 10)。

一六矿床内采集的8件矽卡岩样品的镜下鉴定结果与主量元素的分析结果一致, 主要由钙铝榴石、透闪石、符山石和透辉石等富含钙、铝、铁的硅酸盐矿物组成。第一组矽卡岩均采自石英脉或白云母石英脉旁, 薄片中也发现矽卡岩受到石英微细脉的充填(见图 2(e)、(f)), Rb、Ba、Sr等大离子亲石元素含量、ΣREE值均高于第二组矽卡岩, 重稀土元素的分异程度低, 显著的Eu负异常, 第一组矽卡岩的稀土配分曲线与矿区两期岩体的稀土配分曲线更加相似, 反映了早期接触交代作用形成矽卡岩的基础上还叠加了晚期热液充填作用。第二组矽卡岩的采样位置离脉较远, Rb、Ba、Sr等大离子亲石元素含量、ΣREE值较低, 重稀土元素的分异程度高, Eu负异常逐渐变小甚至向正异常过渡, 后期热液的叠加作用对其影响较小或未产生影响。

矿区内两组矽卡岩的形成过程简述如下: 燕山早期, 宝山岩体侵入过程中, 与矿床内帽子峰组(D₃m)的灰岩夹砂岩地层发生接触交代作用, 形成矽卡岩化带, 这一期形成的矽卡岩以文中的第二组矽卡岩为代表。燕山晚期, 一六岩体的岩浆出溶热液沿早期形成的矽卡岩的裂隙向上运移并充填形成含矿石英脉。在此过程中脉旁的矽卡岩受到了热液叠加作用, 热液中携带大量的REE和Rb、Ba、Sr等大离子亲石元素, 这些元素随热液沿裂隙向上运移的过程中一部分进入到旁侧的矽卡岩中, 使矿床内脉旁的矽卡岩相比远离

脉的矽卡岩更加富集REE和Rb、Ba、Sr等大离子亲石元素, 即形成了第一组矽卡岩。第二组矽卡岩主要是由接触交代作用形成的, 还保留了原岩(砂岩)的特征。第一组矽卡岩受到晚期的热液叠加, 使矽卡岩富集Rb、Ba、Sr等大离子亲石元素(见图 11), 并具有高的负Eu异常, 地球化学特征与岩体更加相似。

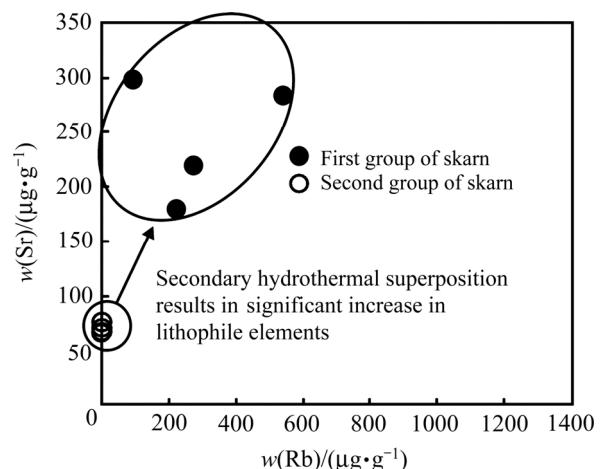


图 11 一六矿区两组矽卡岩的Rb–Sr关系图

Fig. 11 Rb–Sr diagram of two groups of skarns in Yiliu mineral area

华南地区燕山期的区域伸展作用, 造成了岩石圈的减薄, 地幔上拱, 岩石圈的沉积岩以及部分火成岩由于温度升高部分熔融形成岩浆并向上侵位形成燕山期花岗岩。这些花岗岩多具有高分异的特征, 其成矿主要是由于岩浆的结晶分异作用形成的, 含矿岩浆侵位到地表, 发生了高程度的结晶分异作用, 使岩体富集W、Sn等成矿元素, 造成区域内的大规模W、Sn金属成矿事件^[34]。一六钨矿床的成矿过程中, 燕山早期的宝山岩体在侵位过程中与矿床内的帽子峰组地层发生接触交代作用, 形成矽卡岩型白钨矿。燕山晚期侵位的一六岩体的岩浆出溶热液对早期矽卡岩型白钨

矿进行再次叠加改造，沿矽卡岩的裂隙充填交代形成石英脉型钨矿。这两期热液成矿事件体现了一六钨矿复合型矿床的本质。

5 结论

1) 一六矿区内的宝山岩体和一六岩体的岩性均为二长花岗岩。两期岩体的地球化学特征相似，来自于同一源区。综合分析认为矿区内的两期岩体主要为分异的S型花岗岩，源区可能混有早期火成岩。宝山岩体和一六岩体主要是由结晶分异作用形成，并伴随了源区的部分熔融，两期岩体的结晶分异过程主要以斜长石(An=50)为主。

2) 矿区内的两组矽卡岩是矿区内的两期热液活动作用的产物。第二组矽卡岩为宝山岩体接触交代的产物，第一组矽卡岩是宝山、一六两期岩体综合叠加作用的产物总体上，第一组矽卡岩的地球化学特征与两期岩体更加相似。

3) 矿区内两期岩体的源区继承了陆内造山阶段和后造山阶段的沉积物质，指示了华南中生代岩石圈由挤压增厚环境向后造山板内伸展环境过渡。宝山岩体与地层的接触交代作用形成了矽卡岩型白钨矿，一六岩体出溶热液的充填作用形成了石英脉型白钨矿，这两期热液的成矿事件反映了一六钨矿复合型矿床的本质。

REFERENCES

- [1] 吴桂捷, 余金相, 王崇杰. 广东曲江一六矿田构造与矿床分带[C]// 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所文集. 北京: 中国地质学会, 1993: 101–110.
WU Gui-jie, YU Jin-xiang, WANG Chong-jie. Tectonics and zoning of ore deposits in Yiliu orefield, Qujiang, Guangdong Province[C]// Bull Yichang Inst Geol Mineral Resources, CAGS, Beijing: Geological Society of China, 1993: 101–110.
- [2] 裴太昌. 广东韶关-乳源地区花岗岩与成矿关系探讨[J]. 广东地质, 1988, 3(1): 108–109.
PEI Tai-chang. Discussion on relationship between granite and mineralization in Shaoguan-Ruyuan area, Guangdong Province[J]. Guangdong Geology, 1988, 3(1): 108–109.
- [3] 於崇文. 广东一六地区区域地球化学研究[M]. 武汉: 地质出版社, 1987: 50–78.
YU Chong-wen. Regional geochemistry of Yiliu region, Guangdong Province[M]. Wuhan: Geological Publishing House, 1987: 50–78.
- [4] 肖光铭, 邸文. 粤北地区钨成矿规律研究[J]. 华南地质与矿产, 2011, 27(2): 132–140.
XIAO Guang-ming, DI Wen. Metallogenetic regularity of tungsten deposits in Northern Guangdong Province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2011, 27(2): 132–140.
- [5] 裴太昌. 韶关-乳源地区内生金属矿产控矿因素及成矿规律初步分析[J]. 矿产与地质, 1990(3): 1–10.
PEI Tai-chang. Preliminary analysis to metallogens and mineralogenetic regularity of endogenic metal mineral resource in Shaoguan—Ruyuan area [J]. Mineral and Geology, 1990(3): 1–10.
- [6] 张少兵, 郑永飞. 前寒武纪大陆岩石圈在华南的形成与演化[Gondwana Research, 2013, 23: 1241–1260].
ZHANG Shao-bing, ZHENG Yong-fei. Formation and evolution of Precambrian continental lithosphere in South China [J]. Gondwana Research, 2013, 23: 1241–1260.
- [7] 褚杨, 林伟, FAURE Michel, 王清晨. 华南板块早中生代陆内造山过程——以雪峰山-九岭为例[J]. 岩石学报, 2015, 31(8): 2145–2155.
CHU Yang, LIN Wei, FAURE M, WANG Qing-chen. Early Mesozoic intracontinental orogeny: Example of the Xuefengshan-Jiuling Belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(8): 2145–2155.
- [8] 黄会清, 李献华, 李武显, 刘颖. 南岭大东山花岗岩的形成时代与成因—SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 317–333.
HUANG Hui-qing, LI Xian-hua, LI Wu-xian, LIU Ying. Age and origin of the Dadongshan granite from the Nanling Range: SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(3): 317–333.
- [9] 张术根, 袁莹, 姚翠霞. 南岭中段诸广山复式花岗岩岩石学及其控矿作用[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(6): 1585–1598.
ZHANG Shu-gen, YUAN Ying, YAO Cui-xia. Petrology and ore-control of Zhuguangshan composite granitic pluton in middle section of Nanling region [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(6): 1585–1598.
- [10] 唐一昂, 赖健清, 杨牧, 梅嘉靖, 吴剑, 谭后成, 郭兰萱. 广东梅子冲铅锌钨多金属矿床流体包裹体特征及成矿作用[J]. 地质与勘探, 2017, 53(2): 217–226.
TANG Yi-ang, LAI Jian-qing, YANG Mu, MEI Jia-jing, WU Jian, ZHAN Hou-cheng, GUO Lan-xuan. Characteristics of fluid inclusions and metallogenesis of the Meizichong Pb-Zn-W polymetallic deposit in Guangdong Province[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(2): 217–226.
- [11] 吴剑. 梅子冲矿区内部详查报告[R]. 广东省有色金属地质局九三二队, 2011.
WU Jian. Internal investigation report of Meizichong mining area[R]. Nonferrous Metals Geological Bureau of Guangdong Province 932 Battalion, 2011.
- [12] 刘启, 赖健清. 广东乳源宝山岩体花岗岩成因以及构造环境[J]. 国土资源导刊, 2016, 13(1): 14–21.

- LIU Qi, LAI Jian-qing. Genesis and tectonic environments of Baoshan Pluton in Ruyuan, Guangdong Province[J]. Land and Resources Herald, 2016, 13(1): 14–21.
- [13] 高剑峰, 陆建军, 赖鸣远, 林雨萍, 潘巍. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2003, 39(6): 844–850.
- GAO Jian-feng, LU Jian-jun, LAI Ming-yuan, LIN Yu-ping, PU Wei. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 2003, 39(6): 844–850.
- [14] 赵一鸣. 中国矽卡岩矿床[M]. 武汉: 地质出版社, 1990: 1–60.
- ZHAO Yi-ming. Skarn deposits in China[M]. Wuhan: Geological Publishing House, 1999: 1–60.
- [15] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- [16] MIDDLEMOST E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37(3/4): 215–224.
- [17] FROST B R, BARNES C G, COLLINS W J, ARCULUS R J, ELLIS D J, FROST C D. A geochemical classification for granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 2001, 42(11): 2033–2048.
- [18] CHAPPELL B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. Lithos, 1999, 46(3): 535–551.
- [19] 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.
- [20] SKJERLIE K P, JOHNSTON A D. Vapor-absent melting at 10k bar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites[J]. Geology, 1992, 20(3): 263–266.
- [21] DOUCE P, ALBERTO E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids[J]. Geology, 1997, 25(8): 743–746.
- [22] ZENG Ren-yu, LAI Jian-qing, MAO Xian-cheng, LI Bin, JU Pei-jiao, TAO Shi-long. Geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotopes composition of Paleozoic granitoids in Jinchuan, NW China: Constraints on their petrogenesis, source characteristics and tectonic implication[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 121: 20–33.
- [23] 赵振华. 微量元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1–153.
- ZHAO Zhen-hua. Trace element geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1997: 1–153.
- [24] 徐克勤, 朱金初, 刘昌实, 沈渭洲, 徐士进. 华南花岗岩类的成因系列和物质来源[J]. 南京大学学报(地球科学), 1989, 15(3): 1–18.
- XU Ke-qin, ZHU Jin-chu, LIU Chang-shi, SHEN Wei-zhou, XU Shi-jin. Genesis series and material sources of granitoids in Southern China[J]. Journal of Nanjing University(Earth Sciences), 1989, 15(3): 1–18.
- [25] JANOUSEK V, FINGER F, ROBERTS M, FRYDA J, PIN C, DOLEJS D. Deciphering the petrogenesis of deeply buried granites: whole-rock geochemical constraints on the origin of largely undepleted granulites from the Moldanubian zone of the Bohemian Massif[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences, 2004, 95: 141–159.
- [26] 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.
- [27] LI Zheng-xiang, LI Xian-hua. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. Geology, 2007, 35(2): 179–182.
- [28] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 李三忠, 董云鹏, 刘少峰, 何登发, 程顺有, 鲁如魁, 姚安平. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(10): 1553–1582.
- ZHANG Guo-wei, GUO An-lin, WANG Yue-jun, LI San-zhong, DONG Yun-peng, LIU Shao-feng, HE Deng-fa, LU Ru-kui, YAO Ping-an. Tectonics of South China continent and its implications [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(10): 1553–1582.
- [29] 舒良树. 华南构造演化基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035–1053.
- SHU Liang-shu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1035–1053.
- [30] WANG Yue-jun, FAN Wei-ming, ZHANG Guo-wei, ZHANG Yan-hua. Phanerozoic tectonics of the South China block: Key observations and controversies[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1273–1305.
- [31] 李三忠, 王涛, 金宠, 戴黎明, 刘鑫, 周小军, 王岳军, 张国伟. 雪峰山基底隆起带及其邻区印支期陆内构造特征与成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 93–105.
- LI San-zhong, WANG Tao, JIN Chong, DAI Li-ming, LIU Xin, ZHOU Xiao-jun, WANG Yue-jun, ZHANG Guo-wei. Features and causes of Indosinian intracontinental structures in the Xuefengshan precambrian basement and its neighboring regions[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011, 41(1): 93–105.
- [32] 柏道远, 马铁球, 王先辉, 张晓阳, 陈必河. 南岭中段中生代构造—岩浆活动与成矿作用研究进展[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 436–455.
- BAI Dao-yuan, MA Tie-qiu, WANG Xian-hui, ZHANG Xiao-yang, CHEN Bi-he. Progress in the study of Mesozoic tectono-magmatism and mineralization in the central segment of the Nanling mountains[J]. Geology in China, 2008, 35(3): 436–455.
- [33] 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇.

- 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 2012, 33(3): 257–279.
- ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, LI Jian-hua, CUI Jian-jun, SHI Wei, SU Jin-bao, LI Yong. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(3): 257–279.
- [34] WANG Li-juan, WANG Jing-bin, WANG Yu-wang, SHIMAZAKI H. REE geochemistry of the Huangguangliang skarn Fe-Sn deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18 (4): 575–584.

Two hydrothermal mineralization events of Yiliu tungsten deposit in Ruyuan, Guangdong: Evidence from rock geochemistry

HE Qiu-jiao^{1,2}, LAI Jian-qing^{1,2}, XIAO Wen-zhou^{1,2}, MEI Jia-jing^{1,2}, QIAN Li-hua^{1,2}, LIU Ye^{1,2}, DU Ri-jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenetic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Yiliu deposit is an important tungsten deposit of W-Sn polymetallic deposits in Northern Guangdong. The lithology of Baoshan and Yiliu intrusion exposed in the mineral area are both adamellite. Two stages of intrusions which have similar geochemical characteristics: high-SiO₂, peraluminous, K-rich and calc-alkaline, belong to differentiated S-type granite. These intrusions have the same source region which inherits the sediment transition from the intran-continent orogeny environment to intraplate extensional environment, experiences the partial melting of sedimentary rocks and early stage igneous rocks, and enriches the ore-forming elements, such as W and Sn, mainly through the fractional crystallization of magma. The skarn is divided into two groups. The first group of skarn is slightly depleted in large ion lithophile elements, such as Rb, Sr, Ba, and has the high total REE content, with significant negative Eu anomaly. The second group of skarn is highly depleted in large ion lithophile elements and has the lower total REE content, with slightly Eu anomaly. It is believed that the two groups of skarn in the mineral area are the product of the two hydrothermal activities. The skarn type scheelite was formed by contact metasomatism between Baoshan intrusion and sandstone of Maozifeng Formation. Yiliu intrusion's dissolution hydrothermal filling and metasomatism occurring along the cracks of skarn formed quartz vein type scheelite. The two stages of hydrothermal mineralization events reflect the nature that Yiliu tungsten deposit is a composite deposit.

Key words: Yiliu tungsten deposit; S-type granite; fractional crystallization; two metallogenetic stages

Foundation item: Project(2015CX008) supported by Innovation-driven Plan of Central South University, China; Project (12120114052701) supported by “Complete Exploration of Key Basic Geological Research” of China Geological Survey; Project(2017zzts566) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University, China

Received date: 2017-07-03; **Accepted date:** 2017-11-13

Corresponding author: LAI Jian-qing; Tel: +86-13875983805; E-mail: ljq@csu.edu.cn

(编辑 李艳红)