

南岭地区几个与锡(钨)矿化有关的岩体的岩浆演化

席斌斌, 张德会, 周利敏

XI Bin-bin, ZHANG De-hui, ZHOU Li-min

中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:南岭地区是中国重要的钨、锡成矿区, 钨、锡矿化与该区燕山期侵位的花岗岩关系密切。在对南岭花岗岩的研究中发现, 高的 ε_{Nd} 、低的 $T_{2\text{DM}}$ 标志着有较多地幔物质的混入。在受地幔物质影响较大的杭州-诸广山-花山(HZH)带内出现较多的锡矿化; 在地幔物质影响较小的地区锡矿化则相对较少。在总结前人关于南岭地区姑婆山、骑田岭、千里山和大吉山4个岩体的同位素、微量元素、稀土元素等资料的基础上, 对4个岩体源岩中地幔物质的相对含量、岩浆演化过程、出溶流体的性质等进行了比较。结合4个岩体矿化类型的差异, 认为地幔物质除可能为锡矿化的物质来源外, 地幔物质混入量的差异还可能通过影响与矿化有关的花岗岩岩浆演化的过程而决定钨、锡矿化的差异。

关键词:南岭花岗岩; 锡矿床; 钨矿床; 地幔组分; 岩浆演化; 分配系数

中图分类号: P588.12⁺; P618.44

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2007)12-1591-09

Xi B B, Zhang D H, Zhou L M. Magmatic evolutions of several granite plutons related to Sn (W) mineralizations in the Nanling region, China. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(12):1591-1599

Abstract: The Nanling region is an important tungsten-tin metallogenic province in China, where tungsten and tin mineralizations have close relations with the Yanshanian granite in the region. In the study of the Nanling granite, the authors found that higher values of ε_{Nd} and lower values of $T_{2\text{DM}}$ indicate contamination with more mantle material. More tin mineralization occurs in Hangzhou-Zhuaguangshan-Huashan belt, where the granite contains more mantle contaminants; whereas tin mineralization is of infrequent occurrence where mantle contaminants are less. This paper summarizes the isotope, trace element and REE data of the Guposhan, Qitianling, Qianlishan and Dajishan intrusions and, on that basis, compares the relative contents of mantle contaminants, magmatic evolution and characteristics of the exsolution fluids in the source rocks of the four intrusions. According to this comparison, combined with the differences in mineralization types between the four intrusions, this paper concludes that the differences in amount of mantle contaminants can determine the differences of tungsten and tin mineralizations by influencing the granite magmatic evolution related to mineralization.

Key words: Nanling granite; Sn deposits; W deposits; mantle contaminant; magmatic evolution; partition coefficient

南岭地区是中国重要的钨、锡矿产基地, 亦是著名的花岗岩分布区。传统观点认为钨、锡矿化与燕山期壳源(S)型花岗岩的关系最为密切。近年来, 许多学者利用Sm、Nd同位素对南岭花岗岩进行了全面的研究, 圈定了几个高 ε_{Nd} 、低 $T_{2\text{DM}}$ 的带^[1-4]。其中最引人注目的是杭州-诸广山-花山(HZH)带^[3-4], 该带

处在扬子地块与华夏地块的交界处, 构造相对薄弱, 有利于地幔物质上侵, 是一个锡矿的集中分布区^[7]。在此基础上, 许多学者^[8-13]对分布于该带上的花岗岩的成因类型及年代学进行了重新审视, 证明骑田岭和姑婆山岩体是壳幔混合作用的产物, 而非简单的壳源产物, 地幔物质在成岩过程中起了重要作用。

收稿日期: 2007-06-15; 修订日期: 2007-09-24

基金项目: 全国危机矿山接替资源找矿项目(编码: 200636033)和国家自然科学基金项目(编号: 40573033、40173021)资助。

作者简介: 席斌斌(1981-), 男, 在读硕士, 从事流体地球化学和成矿地球化学的研究。E-mail: jucky1981@163.com

南岭中段锡多金属矿床主要分布在构造薄弱的古地块结合带、隆起区与凹陷区结合部位及深大断裂带附近^[4]。锡多金属矿化的这种分布规律,反映了地幔物质对锡矿化有着重要的影响。而钨矿化则集中分布在隆起区,与壳源花岗岩具有密切的成因联系。这一规律已引起众多学者的关注,但是对于地幔物质在钨、锡矿化中所起的作用,岩浆演化过程、岩浆出溶流体的性质与钨、锡矿化差异的关系等深层次的问题有待深入探讨。本文以同位素和微量元素的方法,结合W、Sn在晶体-熔体中的分配系数及其在流体中的迁移形式,对南岭地区姑婆山、骑田岭、千里山和大吉山4个复式岩体进行了比较地球化学研究,初步探讨地幔物质及岩浆演化过程对钨、锡矿化作用的影响机制。

1 岩体地质概况

本次研究主要涉及4个花岗岩岩体:姑婆山、骑田岭和千里山岩体处在构造相对薄弱的扬子地块与华夏地块的交界处,大吉山岩体位于武夷山隆起和粤北断陷的交界处(图1)。区域上的多组深大断裂控制了4个岩体的分布,如姑婆山岩体位于NE向的宁远-江华-平南深断裂和南岭EW向两大深断裂的交会处,大吉山岩体被NNE向德安-四会-吴川深断裂、乐平-新干-曲江深断裂、桂东-定南-汕头深断裂和连山-平远深断裂所夹持。

4个岩体均表现出多期侵入的特征,姑婆山岩体从早到晚由里松岩体(160 Ma±20 Ma,中粗粒似斑状角闪黑云二长花岗岩)、姑婆山东体(150.9 Ma±0.8 Ma,中粗粒似斑状黑云母钾长花岗岩)和姑婆山西体(141 Ma±12 Ma,中细粒斑状黑云母花岗岩、细粒花岗岩和中粗粒似斑状黑云母钾长花岗岩)组成^[10,15-17]。骑田岭岩体由晚侏罗世的荒唐岭序列和中侏罗世的骑田岭序列组成^[9]。千里山岩体从早到晚由似斑状黑云母花岗岩(152 Ma±9 Ma)、等粒黑云母花岗岩(137 Ma±7 Ma)和花岗斑岩(131 Ma±1 Ma)组成^[18-19],由于最晚阶段的花岗斑岩与钨、锡矿化的关系不大,且可能与前2期岩体不是同源岩浆的产物^[18-19],故本文所讨论的千里山岩体不包括花岗斑岩。大吉山岩体从早到晚由五里亭黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩组成。

姑婆山、骑田岭和千里山岩体处在洪大卫等^[3]所圈定出的杭州-诸广山-花山(HZH)高 ϵ_{Nd} 和低 T_{2DM} 带上(图1),虽然该带所代表的地质意义还不明确,但大多数学者认为位于该带内的中生代花岗岩源区含有较多的地幔物质^[4-5,20]。姑婆山岩体^[11,17,21-22]和骑田岭岩体^[9,23-26]中有地幔物质的加入已有许多学者予以论证,但对于千里山岩体的物质来源问题仍存在分歧。有学者认为千里山岩体属于S型或改造型花岗岩,其成岩物质主要来源于地壳^[19,27-28];也有学者认为千里山岩体的成岩物质来源于地壳,但有

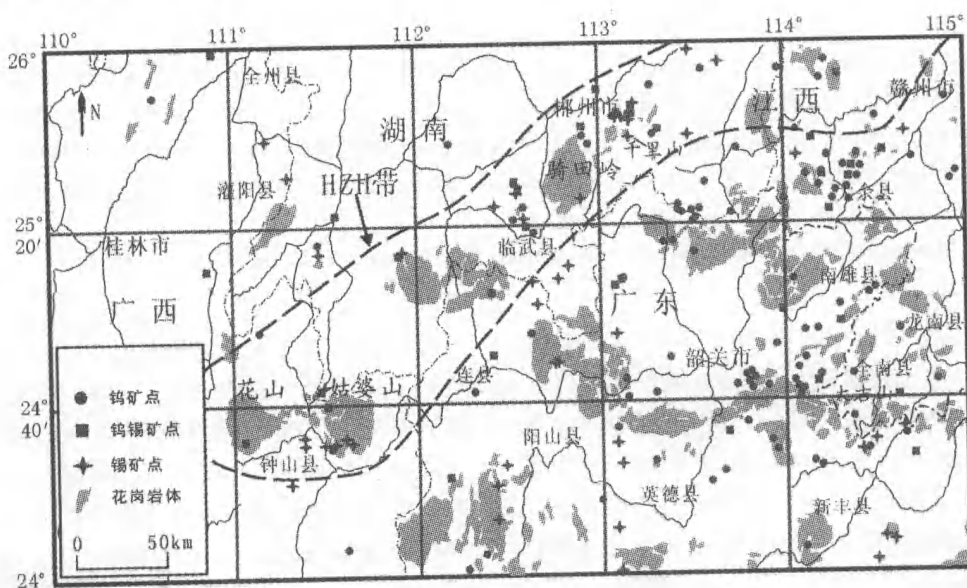


图1 南岭地区钨、锡矿产资源及花岗岩的空间分布

(底图据参考文献[4]及宜昌地质矿产研究所《南岭地区锡多金属矿评价》实施项目设计书,2002,有改动)

Fig. 1 Distribution of tungsten and tin resources and granite intrusions in the Nanling region, China

较多地幔物质的混入^[29-30]。对于大吉山岩体,多数学者^[31-33]对其壳源成因有较一致的认识。

2 同位素地球化学

Sm、Nd同属于稀土元素,原子序数仅差2,化学性质非常相似,在地质过程中较易保持封闭^[34-35],因此利用Sm、Nd同位素示踪能得出令人信服的结果。尽管如此,由于南岭花岗岩岩浆经历了高度演化并遭受了强烈的流体作用,对南岭花岗岩利用Sm、Nd同位素示踪时仍需谨慎地选择数据。洪大卫等^[4]认为只有Sm/Nd值在0.14~0.24范围内的花岗岩才能给出可信的两阶段模式年龄(T_{DM})。李献华等^[36]认为当 $f_{Sm/Nd} > -0.3$ 或 $f_{Sm/Nd} < -0.5$ 时,单阶段模式年龄(T_{DM})偏差较大,必须用两阶段模式年龄进行计算。

在 $f_{Sm/Nd}$ -Sm/Nd图解(图2)中,4个岩体的同位素数据中只有少量数据点落在了Sm/Nd值为0.14~0.24的范围内,落在 $f_{Sm/Nd}$ 值为-0.3~-0.5的数据更少(表1)。为了减少计算误差,同时便于统一比较标准,本文采用两阶段模式年龄进行模式年龄的计算。考虑到样品的代表性,本文将Sm/Nd值在0.12~0.26范围内的样品的 T_{DM} 值均认为是可信的,以此为标准对样品进行筛选,将筛选后的样品进行投图。

在 $\epsilon_{Nd}(t)$ - T_{DM} 图解(图3)中,姑婆山、骑田岭和千里山岩体●表现出较高的 ϵ_{Nd} 和较低的 T_{DM} 值,可能反映了花岗岩源区中有较多的地幔物质;而大吉山岩体具有低的● ϵ_{Nd} 和高的 T_{DM} 值,反映其主要来源于地壳重熔。在 t - $\epsilon_{Nd}(t)$ 图(图4)中,姑婆山、骑田岭和千里山岩体的Nd同位素数据落在亏损地幔和低成熟度的华南元古宙地壳演化线之间,亦反映了花岗岩源岩中含有较多的地幔物质;而大吉山岩体的同位素数据落在低成熟度的华南元古宙地壳和高成熟度的华南元古宙地壳演化线之间,反映大吉山岩体主要起源于华南元古宙地壳重熔。

对于骑田岭、姑婆山岩体为壳幔混合成因和大吉山岩体为壳源成因的争议不大,但是对于千里山岩体是否为壳幔混合成因还存在争议。由于千里山岩体的Sm/Nd值和 $f_{Sm/Nd}$ 值变化范围较大(图2),其Sm、Nd同位素体系可能遭到了一定程度的破坏, ϵ_{Nd} 和 T_{DM} 值可能与真实值有一定的偏差,此外千里山

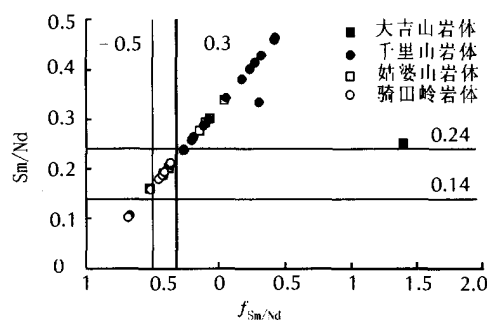


图2 $f_{Sm/Nd}$ -Sm/Nd图解

Fig. 2 Bivariate plot of $f_{Sm/Nd}$ vs. Sm/Nd

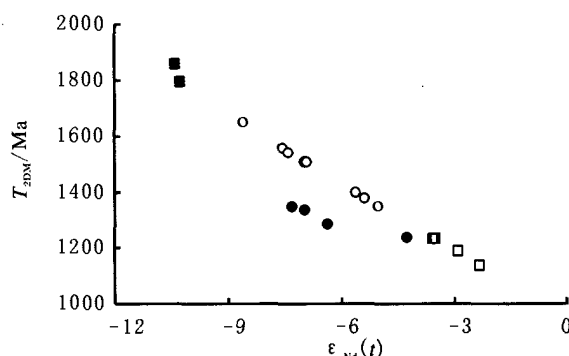


图3 $\epsilon_{Nd}(t)$ - T_{DM} 图解(样品图例说明同图2)

Fig. 3 Bivariate plot of $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. T_{DM}

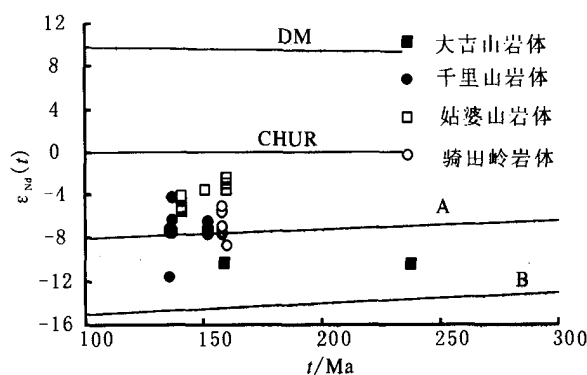


图4 $\epsilon_{Nd}(t)$ - t 图解^[28]

Fig. 4 Bivariate plot of $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. t

DM—亏损地幔;CHUR—球粒陨石地幔;A—成熟度较低的元古宙地壳;B—成熟度较高的元古宙地壳

岩体的初始Sr值较高,为0.7088~0.7215^[19],所以笔者认为,千里山岩体主要源于地壳重熔,可能有少量地幔物质的混染,其源岩中地幔物质的含量比骑田岭和姑婆山岩体少,但比大吉山岩体多。

● 本文所有岩体的微量元素和主量元素的数据均取自参考文献,其中大吉山岩体数据据蒋国豪等^[7],姑婆山岩体数据据顾展彦等^[10],骑田岭岩体数据据柏道远等^[9]及汪雄武等^[8],千里山岩体数据据毛景文等^[18]及李忠文等^[27]。

表1 Sm-Nd同位素数据
Table 1 Isotopic data of Sm and Nd

岩体名称	样品编号	单元或岩性	t/Ma	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	f _{Sm/Nd}	â _{Nd(t)}	T _{2DM} /Ma	Sm/Nd	数据来源		
大吉山岩体	DJS-1	黑云母花岗岩	237.5	0.0937	0.511944	-0.52	-10.42	1858	0.16	[30]		
	DJS-8	白云母花岗岩	159	0.471	0.512396	1.40	-10.29	1796	0.25			
姑婆山岩体	LH-1	姑婆山 西体细粒斑状 黑云母花岗岩	141	0.1835	0.512354	-0.07	-5.3	1365	0.30	[17]		
	LS-15			0.1775	0.512338	-0.10	-5.51	1382	0.29			
	GP-8			0.2054	0.512434	0.04	-4.13	1270	0.34			
	GP-16			0.1682	0.512345	-0.14	-5.2	1357	0.28			
	GP-1	姑婆山 东体花岗岩	150.9	0.1129	0.512373	-0.43	-3.57	1231	0.19			
	LS-4	里松花岗岩体	160	0.1154	0.512373	-0.41	-3.5	1235	0.19			
	LS-6			0.1135	0.512432	-0.42	-2.33	1138	0.19			
	LS-11			0.1221	0.512411	-0.38	-2.91	1186	0.20			
	Q3			似斑状 黑云母花岗岩	152	0.144	0.512258	-0.27	-6.39		1463	0.24
	Q4	0.1448	0.512228			-0.26	-6.99	1511	0.24			
Q5	0.1561	0.512222	-0.21			-7.33	1539	0.26				
Q6	0.1576	0.512241	-0.20			-6.99	1511	0.26				
千里山岩体	490-46	等粒、中粗粒 黑云母花岗岩	137	0.1595	0.512212	-0.19	-7.59	1560	0.26	[19]		
	490-18			0.2566	0.512312	0.31	-7.41	1533	0.34			
	490-19			0.2074	0.512322	0.05	-6.35	1447	0.34			
	490-20			0.2595	0.512313	0.32	-7.44	1535	0.43			
	490-21			0.2808	0.512341	0.43	-7.27	1521	0.46			
	490-22			0.0647	0.512288	-0.67	-4.25	1298	0.11			
	490-28			0.243	0.512302	0.24	-7.34	1528	0.40			
	490-29			0.2506	0.512312	0.27	-7.28	1523	0.41			
	XN-1	等粒、细粒 黑云母花岗岩	136	0.2791	0.512344	0.42	-7.16	1513	0.46			
	XN-2			0.1817	0.512033	-0.08	-11.55	1867	0.30			
	490-31			0.2308	0.512304	0.17	-7.1	1508	0.38			
	490-32			0.1739	0.512232	-0.12	-7.53	1542	0.29			
	骑田岭岩体	D220-1	黄家湾单元	160	0.0955	0.512091	-0.51	-8.6	1649		0.16	[25]
		C48-1	仰天湖单元	158	0.1108	0.512161	-0.44	-7.57	1564		0.18	[9]
C21		仰天湖单元	158	0.1083	0.512189	-0.45	-6.98	1515	0.18	[9]		
C47		仰天湖单元	158	0.1259	0.512185	-0.36	-7.41	1550	0.21	[9]		
C48-2		黄家湾单元	158	0.1136	0.512197	-0.42	-6.93	1511	0.19	[9]		
QT29		仰天湖单元	158	0.1257	0.512288	-0.36	-5.4	1387	0.21	[24]		
Q138		黄家湾单元	158	0.0612	0.512209	-0.69	-5.64	1407	0.10	[24]		
HN37		不详	158	0.117	0.512297	-0.40	-5.05	1358	0.19	[24]		

注: $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $T_{2\text{DM}}$ 计算据文献[20]; 计算参数为 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.1967$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}}=0.118$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.2137$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.513151$, $\lambda_{\text{Sm}}=6.54 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$, 下标字母: CHUR—球粒陨石均一储库, CC—大陆地壳, DM—亏损地幔

3 稀土元素地球化学

利用稀土元素数据, 能够了解岩浆岩的形成机制、分异方式和演化历史。稀土元素在中基性岩的研究中已经得到了广泛的应用, 但是由于花岗岩类

岩石形成的物质来源、熔融过程、分异演化和挥发分的影响较为复杂^[30], 因此利用稀土元素数据研究花岗岩类岩石, 尤其是高度演化的花岗岩的成因问题具有一定的难度。本文通过比较4个岩体的 ΣREE 、 $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$ 和 δEu 值的变化趋势, 对

它们是否经历了相似的演化过程进行讨论。

在 $\Sigma\text{REE}-\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 图和 $\Sigma\text{REE}-\delta\text{Eu}$ 图(图5)中,大吉山岩体从早到晚 ΣREE 、 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 和 δEu 值逐渐降低,显示出强烈的分异演化趋势。千里山岩体由早到晚 ΣREE 和 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值变化不明显, δEu 逐渐降低。姑婆山和骑田岭岩体从早到晚 ΣREE 和 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值逐渐降低, δEu 也呈降低的趋势,但不很明显。大吉山岩体的稀土元素由早到晚表现出强烈而有规律的变化趋势,可能反映出比其他3个岩体经历了更加强化的分异和更复杂的地质过程。骑田岭和姑婆山岩体表现出较一致的演化规律,可能反映它们经历了相似的地质过程。千里山岩体有较高的 ΣREE 值,与骑田岭和姑婆山岩体相似,而其较低的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 和 δEu 值又与大吉山晚期岩体相类似。

4 岩体分异程度

南岭地区与钨、锡矿化有关的花岗岩多属于高度演化的花岗岩,而高度演化的花岗岩岩浆体系常常是晶体、熔体和岩浆热液三相共存的岩浆-热液过渡体系,岩浆热液对钨、锡的萃取、迁移和沉淀起着至关重要的作用^[40],因此岩体的演化程度、岩浆热液的活动强度及其组成是决定钨、锡矿化强度和矿化类型的重要因素。随着岩浆分异作用的增强,残余岩浆中Rb的含量不断增加,K/Rb比值不断降低^[41]。

在Rb-K/Rb图(图6)中,4个岩体由早到晚K/Rb值逐渐降低,Rb含量逐渐增高,反映它们的演化程度逐渐增高。与姑婆山岩体和骑田岭岩体相比,大吉山晚期岩体和千里山岩体有较低的K/Rb值(<50)和较高的Rb含量,说明它们的演化程度相对更高。

Nb和Ta、Zr和Hf是2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值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有流体参与时才会发生较大的变化^[44-45]。在 SiO_2 -Nb/Ta图和 SiO_2 -Zr/Hf图(图7、图8)中,4个岩体晚阶段产物的Nb/Ta、Zr/Hf值均偏离大陆地壳的平均值,而大吉山晚期岩体和千里山岩体的偏离程度要比骑田岭和姑婆山岩体高,说明流体对岩浆演化体系的影响程度更大,因此相比姑婆山和骑田岭岩体,流体对大吉山晚期岩体和千里山岩体的影响更大。

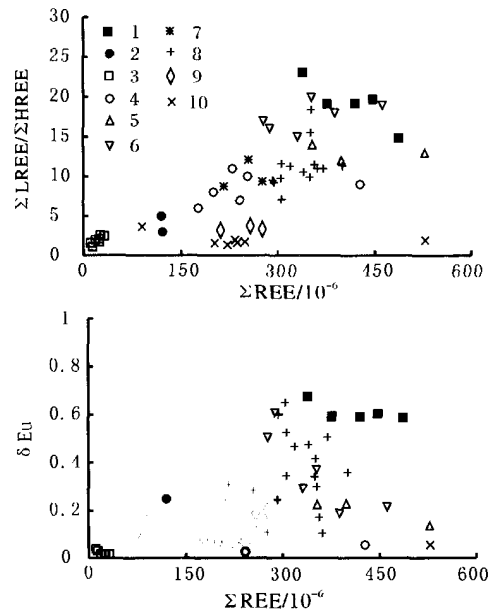


图5 $\Sigma\text{REE}-(\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE})^*$ 和 $\delta\text{Eu}-\Sigma\text{REE}$ 图解

Fig. 5 Bivariate plot of ΣREE vs.

$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}^*$ and δEu

大吉山岩体:1—黑云母花岗岩;2—二云母花岗岩;3—白云母花岗岩;姑婆山岩体:4—里松岩体;5—姑婆山东体;6—姑婆山西体;骑田岭岩体:7—骑田岭序列;8—荒唐岭序列;千里山岩体:9—似斑状黑云母花岗岩;10—等粒黑云母花岗岩

5 讨论

源岩中含有较多地幔物质的姑婆山和骑田岭岩体主要与锡矿化关系密切(图1),含有少量地幔物质的千里山岩体与钨、锡矿化关系密切,而主要为壳源的大吉山岩体则与钨矿化有关。这4个岩体的上述特征反映出地幔物质含量越多越有利于锡矿化,反之则有利于钨矿化。前人认为这是由于地幔物质为锡矿化提供了物质来源^[14]。笔者则认为,花岗岩岩浆中含有较多的地幔物质会对岩浆演化过程和出溶流体的性质产生重要的影响,而岩浆演化过程和流体的性质又与矿化有着密切的联系,因此仅仅将地幔物质作为成矿物质的来源,而不考虑其对钨、锡成矿过程的影响显然是不够的。

W、Sn在花岗岩的主要造岩矿物长石、石英中的分配系数均远小于1,而在云母和某些含Fe、Ti的副矿物中的分配系数要大于1。白云母在压力小于1500 Pa,尤其是同时有B、F等挥发分存在的条件下是不稳定的^[46],花岗岩中副矿物的含量较少,所以

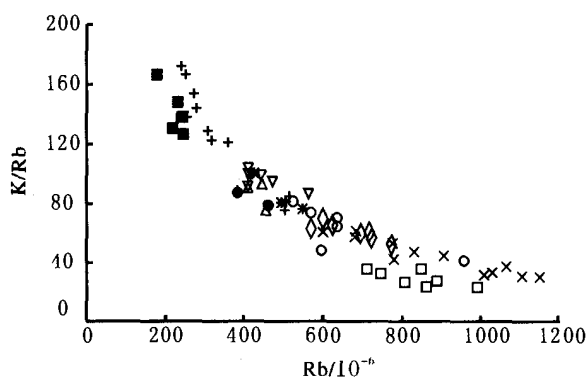


图6 Rb-K/Rb图解(样品图例说明同图5)

Fig. 6 Bivariate plot of Rb vs. K/Rb

影响W、Sn在晶体和熔体间分配系数的最主要矿物是长石、石英和黑云母。表2列举了前人通过岩相学研究获得的4个岩体的长石、石英和黑云母的含量(重新换算成100%),根据W、Sn在过铝质酸性岩中的分配系数^[47],计算了W、Sn在各个阶段岩体和熔体间的分配系数。相关分配系数显示(表2),除大吉山岩体最早期的黑云母花岗岩外,其余各岩体W、Sn在矿物-熔体间的分配系数均小于1,说明W、Sn倾向于在残余熔体中富集;Sn的分配系数要比W更低一些,因此与W相比Sn更倾向于在残余熔体中富集。

骑田岭和姑婆山岩体源岩中含有较多的地幔物质,较之壳源成因的花岗岩相对贫水,形成相对贫水而富卤族元素的A型花岗岩浆^[30,48-49]。由于源岩相对贫水,岩体演化过程中流体出溶较晚,Sn在流体出溶前能够在残余熔体中达到更好的预富集,同时流体出溶晚使得流体对岩浆演化影响较小,不利于岩浆的高度分异演化,因而REE、K/Rb、Zr/Hf和Nb/Ta

表现出的演化性不如大吉山和千里山岩体强烈。

在熔体-流体体系中,F倾向于进入残余熔体相而Cl倾向于进入流体相^[50-51],因此贫水、流体出溶较晚的含地幔物质的岩体较之壳源成因的岩体往往富F。含较多地幔物质的姑婆山和骑田岭岩体的F峰值含量分别为 $1000 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$ ^[10]和 1842×10^{-6} ^[9],而壳源成因的大吉山岩体的F平均含量为 720×10^{-6} ^[31]。此外,在骑田岭芙蓉锡矿田的成岩和主成矿阶段有大量高盐度的包裹体^[52],在姑婆山岩体中也有少量高盐度的包裹体^[53],而大吉山岩体则主要以低盐度的包裹体为主^[54-55]。以上地质事实均说明骑田岭和姑婆山岩体的岩浆体系更加富卤族元素。千里山前2期岩体的F含量高达 4400×10^{-6} 以上^[18],异常高的F含量除来源于岩浆演化本身外,还可能与后期流体的蚀变或富F的外来物质混入岩浆体系有关。

虽然前人对W、Sn在流体中的迁移形式做了很多实验和研究,但是由于受实验条件、络合剂加入形式的影响,得出的结论并不一致。近年来对W、Sn迁移形式的主要认识有:Cl是Sn迁移的主要络合剂, $D_{Sn, \text{流体/熔体}}$ 与溶液中Cl含量的平方成正比^[47,60]。Cl与W络合迁移的可能性较小^[60-63], WO_4^{2-} 、 HWO_4^- 和 H_2WO_4 可能是W迁移的主要形式^[61-63,65]。在具有高F含量的成矿流体中,F可能是W、Sn的主要络合剂^[66-67]。

骑田岭和姑婆山岩体的岩浆演化过程有利于Sn在残余熔体中达到更好的预富集,同时由于出溶的流体中Cl含量更高,因而有利于Sn与Cl络和迁移富集成矿。在大吉山岩体岩浆演化的过程中,流体较早地达到水饱和,使其能够与熔体和晶体充分地反应,有利于更多的W以 WO_4^{2-} 、 HWO_4^- 和 H_2WO_4 的形式

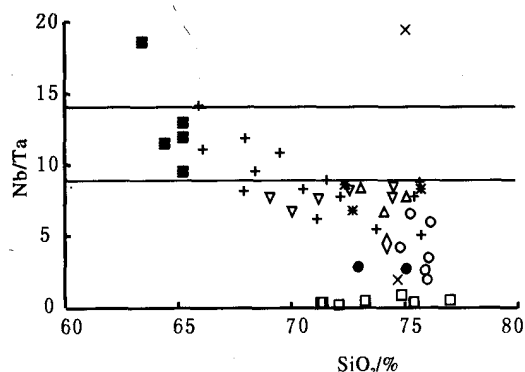


图7 SiO_2 -Nb/Ta图解(图例同图5)

Fig. 7 Bivariate plot of SiO_2 vs. Nb/Ta

Nb/Ta比值9~14为大陆地壳的范围^[64]

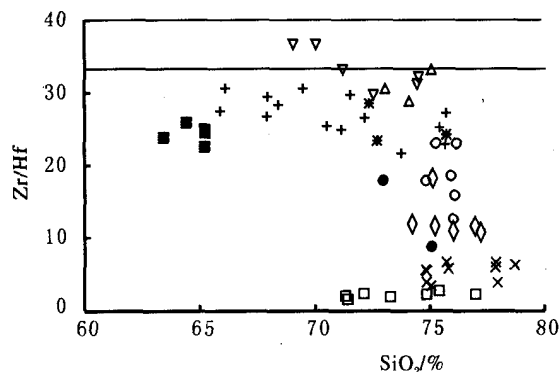


图8 SiO_2 -Zr/Hf图解(图例同图5)

Fig. 8 Bivariate plot of SiO_2 vs. Zr/Hf

Zr/Hf比值33~40为大陆地壳的范围^[64]

表2 W、Sn在主要造岩矿物与熔体之间的分配系数

Table 2 Partition coefficients of W and Sn between the main rock-forming minerals and melts

岩体名称	岩性或单元	矿 物		成 分/%		D_W	D_{Sn}	数据来源
		石英	斜长石	钾长石	黑云母			
大吉山	黑云母花岗岩	26.0	32.0	27.0	15.0	1.26	1.60	[56]
	二云母花岗岩	35.6	34.4	27.8	2.2	0.57	0.35	[57]
	白云母花岗岩	42.4	28.3	29.3	0.0	0.43	0.12	[56]
姑婆山	细粒二云母二(碱)长花岗岩	35.0	27.0	34.0	4.0	0.64	0.51	[57]
	微细粒斑状二云母二(钾)长花岗岩	28.6	24.6	43.3	3.5	0.61	0.46	
	粗中粒斑状黑云母二(钾)长花岗岩	30.2	20.2	46.2	3.4	0.59	0.45	
	细中粒斑状黑云母二长花岗岩	31.4	25.6	39.1	3.9	0.63	0.50	
千里山	中细粒斑状黑云母花岗岩	30.3	25.3	40.4	4.0	0.64	0.52	[56]
	中粒黑云母花岗岩	33.7	27.6	35.7	3.1	0.59	0.42	
	细粒二云母花岗岩	30.9	30.9	36.1	2.1	0.55	0.33	
骑田岭	荒唐岭	28.5	18.4	50.5	2.7	0.55	0.38	[59]
	芙蓉	46.7	20.8	29.4	3.1	0.58	0.41	
	菜岭	41.8	29.6	24.4	4.2	0.66	0.53	

注:取 $D_W(\text{石英})=0.36$, $D_{Sn}(\text{石英})=0.05$; $D_W(\text{斜长石})=0.63$, $D_{Sn}(\text{斜长石})=0.24$; $D_W(\text{钾长石})=0.34$, $D_{Sn}(\text{钾长石})=0.1$; $D_W(\text{黑云母})=5.8$, $D_{Sn}(\text{黑云母})=9.9$ [67]

迁移富集成矿。千里山岩体与大吉山岩体的岩浆演化过程基本一致,但是由于其含有异常高的F,因而F在W、Sn富集成矿的过程中可能起了较大的作用。另外在大吉山岩体岩浆演化的晚期还可能发生了岩浆的液态分离^[68-69],这也可能是造成大吉山岩体稀土元素等由早到晚表现出强烈演化趋势的原因之一,虽然其在演化的晚阶段发生了液态分离,但是石英脉型钨矿主要还是与中阶段的二云母花岗岩有关^[37]。晚阶段的岩浆液态分离可能与岩体型铌、钽、钨和铍矿化的关系更密切。

地幔物质在南岭锡成矿中的作用已经引起众多学者的关注^[14,26,70],有些学者认为地幔物质为锡矿化提供了物质来源^[14],但是现在还没有直接的证据。虽然在HZH带中主要以锡矿化为主,但是仍有一些钨矿点在其中分布(图1)。锡成矿究竟在多大程度上受源区的控制,多大程度上受成矿作用过程的控制,现今难以给出正确的解答^[71],但是有人认为稀有金属

元素花岗岩的形成,成矿作用过程可能贡献更大一些^[46]。本文所研究的4个岩体在岩浆演化过程中有着很大的差别,造成了W、Sn的晶体-熔体分配系数和出溶流体的性质迥异,这些成矿作用过程的差异很可能是影响W、Sn相对矿化强度的重要因素。实际的地质过程远比本文所探讨的复杂,如本文并没有考虑pH值、氧逸度等对W、Sn在流体中迁移形式的影响,而且地幔物质加入花岗岩源区除了有可能会提供成矿物质外,还会对岩浆演化过程造成影响,所以仅从地幔物质为锡矿化提供了物质来源进行考虑是远远不够的。国外已经有很多学者对稀有金属花岗岩中的熔体包裹体和熔流包裹体进行研究,对W、Sn与挥发分的关系和岩浆演化晚期的液态分离等进行了许多有意义的探讨^[60,66-67,72],而国内这方面的工作进展较慢。笔者认为,钨、锡矿化研究应当从物源和成矿作用过程2个方面入手,尤其要注意对过程的研究。

6 结论

由于地质过程的复杂性,本文在研究岩浆演化过程对钨、锡矿化的影响时,仅从W、Sn在晶体-熔体中的分配系数和它们在流体中的迁移形式进行了讨论,对温度、压力、pH值等对成矿作用过程的影响未作考虑。本文得出以下几点初步结论。

(1)姑婆山、骑田岭、千里山和大吉山岩体的源岩中,地幔物质的含量有着显著的差异。花岗岩岩浆中地幔物质的含量多少可能会对岩浆演化过程有重要的影响。

(2)含有较多地幔物质的姑婆山和骑田岭花岗岩岩浆的演化过程有利于锡矿化,主要为壳源的大吉山花岗岩岩浆的演化过程有利于钨矿化,千里山花岗岩岩浆与大吉山花岗岩岩浆的演化过程基本一致,但是由于千里山花岗岩岩浆含有异常高的F和较多(与大吉山岩体相比)的地幔物质,因而其与钨、锡矿化有关。

(3)在对钨、锡的成矿作用进行研究时要从物源和成矿作用过程2个方面入手,由于地质过程的复杂性,尤其要注意对成矿过程进行研究。

致谢:在成文过程中得到张文淮、诸惠燕老师的指导和鼓励,在数据处理和绘图方面得到李大鹏、王永博士的热情帮助,在此一并致谢。

参考文献:

- [1]裴荣富,洪大卫.碰撞造山与华南花岗岩及其成矿系列研究的新进展[J].矿床地质,1995,14(2):189-194.
- [2]Gilder S A, Gill J, Wu Haoruo. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China [J]. Jour. Geophys. Research, 1996, 101: 16137-16154.
- [3]洪大卫,谢锡林,张季生.从花岗岩的Sm-Nd同位素探讨华南中下地壳的组成、性质和演化[J].高校地质学报,1999,5(4):361-371.
- [4]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.
- [5]沈渭洲,凌洪飞,李武显,等.中国东南部花岗岩类的Nd模式年龄与地壳演化[J].中国科学(D辑),2000,30(5):471-478.
- [6]王德滋,沈渭洲.中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J].地学前缘,2003,10(3):209-220.
- [7]魏道芳,鲍征宇,付建明.南岭地区锡成矿规律浅析[J].矿床地质,2006,25(增刊):377-382.
- [8]邓希光,李献华,刘义茂,等.骑田岭花岗岩岩体的地球化学特征及其对成矿的制约[J].岩石矿物学杂志,2005,24(2):93-102.
- [9]柏道远,陈建超,马铁球,等.湘东南骑田岭岩体A型花岗岩的地球化学特征及其构造环境[J].岩石矿物学杂志,2005,24(4):255-272.
- [10]顾晟彦,华仁民,戚华文.广西花山-姑婆山燕山期花岗岩的地球化学特征及成因研究[J].岩石矿物学杂志,2006,25(2):97-109.
- [11]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):529-542.
- [12]李金冬,柏道远,伍光英,等.湘南郴州地区骑田岭花岗岩锆石SHRIMP定年及其地质意义[J].地质通报,2005,24(5):411-414.
- [13]马铁球,伍光英,贾宝华,等.南岭中段郴州一带中-晚侏罗世花岗岩浆的混合作用[J].地质通报,2005,24(6):506-512.
- [14]付建明,刘运华,魏君奇,等.南岭中段锡多金属矿床的成矿物质来源[C]//陈毓川,毛景文,薛春纪.第八届全国矿床会议论文集.第八届全国矿床会议,南昌.北京:地质出版社,2006:553-556.
- [15]张德全,王雪英,孙桂英.关于广西姑婆山-里松岩体的定(侵)位年龄和冷凝历史的探讨[J].地质论评,1985,31(3):232-239.
- [16]杨学明,张培善.Rb-Sr和Pb同位素在限定花岗岩质石源岩中的地质意义[J].科学通报,1990,35(15):1174-1176.
- [17]顾晟彦,华仁民,戚华文.广西姑婆山花岗岩单颗粒锆石LA-ICP-MS U-Pb定年及全岩Sr-Nd同位素研究 [J]. 地质学报,2006,80(4):543-553.
- [18]毛景文,李红艳,裴荣富,等.千里山花岗岩体地质地球化学及与成矿关系[J].矿床地质,1995,14(1):12-25.
- [19]毛景文,李红艳,裴荣富.湖南千里山花岗岩体的Nd-Sr同位素及岩石成因研究[J].矿床地质,1995,14(3):235-242.
- [20]陈江峰,江博明.铍、锆、铅同位素示踪和中国东南大陆地壳演化[C]//郑永飞.化学地球动力学.北京:科学出版社,1999:262-287.
- [21]王建辉,蒋柏昌,孔祥伟,等.姑婆山复式岩体的基本特征及其与成矿作用的关系[J].矿床与地质,2006,20(1):47-53.
- [22]杨策,朱金初,张佩华,等.广西姑婆山里松花岗岩中闪长质包体的地球化学特征及其成因探讨[J].高校地质学报,2006,12(3):310-318.
- [23]刘明.骑田岭花岗岩各单元特征及物质来源与成岩方式初步探讨[J].湖南地质,1991,10(4):295-299.
- [24]朱金初,黄革非,张佩华,等.湘南骑田岭岩体菜岭超单元花岗岩侵位年龄和物质来源研究[J].地质论评,2003,49(3):245-252.
- [25]付建明,马昌前,谢才富,等.湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石SHRIMP定年及其意义[J].中国地质,2004,31(1):96-100.
- [26]李兆丽,胡瑞忠,彭建堂,等.湖南芙蓉锡矿田流体包裹体的He同位素组成及成矿流体来源示踪[J].地球科学,2006,31(1):129-135.
- [27]李忠文,崔斌,匡跃求.湖南千里山花岗岩的岩石学和地球化学研究[J].岩石矿物学杂志,1987,6(1):10-18.
- [28]沈渭洲,王德滋,谢永林,等.湖南千里山复式花岗岩体的地球化学特征和物质来源[J].岩石矿物学杂志,1995,14(3):193-202.
- [29]赵振华,包志伟,张伯友,等.柿竹园超大型钨多金属矿床形成的壳幔相互作用背景[J].中国科学(D辑),2000,30(增刊):161-168.
- [30]胡建,邱检生,王德滋,等.中国东南沿海与南岭内陆A型花岗岩的对比及其构造意义[J].高校地质学报,2005,11(3):404-414.
- [31]孙恭安,史明魁,张宏良,等.大吉山花岗岩体岩石学、地球化学及成矿作用的研究[C]//中国地质科学院宜昌地质矿产研究所.南岭地质矿产科研报告集(二).武汉:中国地质大学出版社,1989:326-363.

- [32]邱检生,McInnes B I A,徐夕生,等.赣南大青山五里亭岩体的锆石ELA-ICP-MS定年及其与钨成矿关系的新认识[J].地质论评,2004,50(2):125-133.
- [33]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.
- [34]Faure G, Mengsing T M. Isotopes: principles and applications. Third edition[M]. America: John Wiley, 2005: 194-213.
- [35]陈岳龙,杨忠芳,赵志丹.同位素地质年代学与地球化学[M].北京:地质出版社,2005:46-75.
- [36]李献华.Sm-Nd模式年龄和等时线年龄的适用性与局限性[J].地质科学,1996,31(1):97-104.
- [37]蒋国豪,胡瑞忠,谢桂青,等.江西大青山钨矿成矿年代学研究[J].矿物学报,2004,24(3):251-254.
- [38]汪雄武,王晓地,刘家齐,等.湖南骑田岭花岗岩与锡成矿的关系[J].地质科技情报,2004,23(2):1-12.
- [39]朱金初,徐士进.华南含锡钨花岗岩的稀土元素地球化学特征和岩石成因[J].矿床地质,1989,8(3):21-31.
- [40]张德会,张文淮,许国建.岩浆热液出溶和演化对斑岩成矿系统金属成矿的制约[J].地学前缘,2001,8(3):193-202.
- [41]赵振华.微量元素地球化学原理[M].北京:科学出版社,1997:71-73.
- [42]Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. Chem. Geol., 1995, 120: 347-359.
- [43]Jochum K P, Seufert H M, Spettel B, et al. The solar-system abundances of Nb, Ta and Y, and the relative abundances of refractory lithophile elements in differentiated planetary bodies [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1986, 50: 1173-1183.
- [44]Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1996, 126: 323-333.
- [45]Dostal J, Chatterjee A K. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton (Nova Scotia, Canada)[J]. Chemical Geology, 2000, 163: 207-218.
- [46]Lehmann B. Metallogeny of Tin[M]. Germany, Springer, 1990: 1-211.
- [47]干国梁.矿物-熔体间元素分配系数资料及主要变化规律[J].岩石矿物学杂志,1993,12(2):144-181.
- [48]Collins M J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1982, 80: 189-200.
- [49]顾连兴.A型花岗岩的特征、成因及成矿[J].地质科技情报,1990,9(1):25-31.
- [50]干国梁.熔体-溶液体系中元素分配系数:新资料及其研究方向[J].地质科技情报,1993,12(2):55-65.
- [51]张德会,张文淮,许国建.富F熔体-溶液体系流体地球化学及其成矿效应——研究现状及存在问题[J].地学前缘,2004,11(2):479-490.
- [52]李桃叶,刘家齐.湘南骑田岭芙蓉锡矿田流体包裹体特征和成分[J].华南地质与矿产,2005,(3):44-49.
- [53]郑跃鹏,喻铁阶,蔡宏渊.评价含锡花岗岩类岩体成矿性的包裹体地球化学标志[J].矿物学报,1991,11(4):395-403.
- [54]马秀娟.大青山钨矿包裹体地球化学研究[C]//李荫清,马秀娟,魏家秀.流体包裹体在矿床学和岩石学中的应用.北京:北京科学技术出版社,1988:61-112.
- [55]蒋国豪.氟、氯对热液钨、铜成矿的制约——以江西德兴铜矿、大青山钨矿为例[D].中国科学院地球化学研究所,2004:1-100.
- [56]白鸽,章锦统,孙恭安,等.花岗岩与成矿关系[C]//陈毓川.南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质.北京:地质出版社,1989:325-349.
- [57]卢焕章,施继锡,喻茨玫.某含钽铌花岗岩成岩成矿温度的研究[J].地球化学,1975,(3):210-223.
- [58]邹建林,曾永红,陈文辉.湖南姑婆山锡矿田地质特征及找矿前景[J].华南地质与矿产,2005,(2):45-53.
- [59]郑基俭,贾宝华.骑田岭岩体的基本特征及其与锡多金属成矿作用的关系[J].华南地质与矿产,2001,(4):50-57.
- [60]Audetat A, Gunther D, Heinrich C A. Magmatic-hydrothermal evolution in a fractionating granite: A microchemical study of the Sn-W-F-mineralized Mole Granite (Australia) [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(19):3373-3379.
- [61]Wood S A, Vlassopoulos D. Experimental determination of the hydrothermal solubility and speciation of tungsten at 500°C and 1kbar[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1989, 53: 303-312.
- [62]Wood S A, Samson I M. Solubility of ore minerals and complexation of ore metals in hydrothermal solutions[J]. Reviews in Economic Geology, 1998, 10: 33-80.
- [63]Wood S A, Samson I M. The hydrothermal geochemistry of tungsten in granitoid environments: I. Relative solubilities of ferberite and scheelite as a function of T , P , pH, and mNaCl [J]. Economic Geology, 2000, 95: 143-182.
- [64]Keppler H, Wyllie P J. Partitioning of Cu, Sn, Mo, W, U and Th between melt and aqueous fluid in the systems haplogranite-H₂O-HCl and haplogranite-H₂O-HF [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1991, 109(2):139-150.
- [65]刘英俊,马东升.钨的地球化学[M].北京:科学出版社,1987:1-232.
- [66]Webster J D. The exsolution of magmatic hydrosaline chloride liquids[J]. Chemical Geology, 2004, 210: 33-48.
- [67]Thomas R, Forster H J, Rickers K, et al. Formation of extremely F-rich hydrous melt fractions and hydrothermal fluids during differentiation of highly evolved tin-granite magmas: a melt/fluid-inclusion study[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2005, 148: 582-601.
- [68]王联魁,王慧芬.锂氟花岗质岩石三端元组分的发现及其液态分离成因[J].地质与勘探,1997,33(3):11-20.
- [69]王联魁,王慧芬,黄智龙.Li-F花岗岩液态分离的同位素地球化学标志[J].地质与勘探,2002,38(5):38-43.
- [70]邱检生,McInnes B I A,蒋少涌,等.江西会昌密坑山岩体的地球化学及其成因类型的新认识[J].地球化学,2005,34(1):20-32.
- [71]张德会.关于成矿作用地球化学研究的几个问题[J].地质通报,2005,24(10/11):885-891.
- [72]Thomas R, Webster J D, Heinrich W. Melt inclusions in pegmatite quartz: Complete immiscibility between silicate melts and hydrous fluids at low pressure[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2000, 139: 394-401.