

安徽沿江地区中生代原地和异地矽卡岩 岩浆-热液成矿作用

杜杨松¹⁾, 曹毅¹⁾, 张智宇¹⁾, 庞振山²⁾, 李大鹏¹⁾

1) 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京, 100083;

2) 中国地质调查局发展研究中心, 北京, 100037

内容提要:在安徽沿江地区,既分布有大量接触交代成因和叠加复合成因的矽卡岩矿床,也分布有岩浆成因的矽卡岩矿床。本文给出了不同类型岩浆矽卡岩及其矿床的定义,论述了安徽沿江地区中生代岩浆矽卡岩及其矿床的特征,并在此基础上分析了区域中生代矽卡岩岩浆-热液成矿作用。根据矽卡岩岩浆就位位置的不同可将岩浆矽卡岩分成原地矽卡岩和异地矽卡岩两类,相应地将岩浆矽卡岩矿床分成原地矽卡岩矿床和异地矽卡岩矿床两类。两类矽卡岩及其矿床具有明显不同的特征。在地质产状上,原地矽卡岩岩体常与壳幔同熔岩浆侵入体紧密伴生而分布在壳幔同熔岩浆侵入体与碳酸盐围岩的接触带上,在矽卡岩岩体边缘一般没有冷凝边和烘烤边,但常能见到因同化混染作用不彻底而留下的围岩残留体(多已变质成角闪岩或大理岩)。与此明显不同的是,异地矽卡岩岩体常分布在断裂带或地层虚脱带中,附近一般没有壳幔同熔岩浆侵入体与其紧密伴生,在矽卡岩岩体边缘一般有冷凝边和烘烤边,有时能见到气孔构造以及石榴石或透辉石堆积岩,但见不到围岩残留体。同时,原地矽卡岩和异地矽卡岩均具有明显的水平分带,但两者明显不同。原地矽卡岩的水平分带常表现为从侵入岩体经矽卡岩往碳酸盐围岩方向依次出现侵入岩、同化混染侵入岩、富铁矽卡岩、富钙矽卡岩、同化混染碳酸盐岩和碳酸盐岩,反映同化混染作用逐渐减弱,而异地矽卡岩的水平分带常表现为从矽卡岩体中央往两边依次出现中粗粒矽卡岩和中细粒矽卡岩,反映随降温速度逐渐增加结晶速度逐渐降低。在矿物组成上,原地矽卡岩中的石榴石包含钙铁榴石、钙铁铝榴石和钙铝榴石,辉石主要为透辉石和钙铁辉石,而异地矽卡岩中的石榴石几乎全是钙铁榴石,辉石全是钙铁辉石。在地球化学方面,相对于原地矽卡岩,异地矽卡岩明显富集 W、F、Rb、Be、Fe,而亏损 Al、Sr、Ba、Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni 等元素。在岩相学上,原地矽卡岩和异地矽卡岩大多具有自形等粒结构,其中大多能见到熔融包裹体,但原地矽卡岩中的石榴石和辉石更为自形且常发育良好环带,熔融包裹体的均一温度明显高于异地矽卡岩中熔融包裹体的均一温度。在矿床类型上,原地矽卡岩可与铜矿床和铁矿床等各种矿床伴生,而异地矽卡岩一般只与铁矿床伴生。通过综合分析,认为原地矽卡岩和异地矽卡岩是由矽卡岩岩浆分别在原地和异地发生冷却结晶作用形成的,而原地矽卡岩矿床和异地矽卡岩矿床是由原地矽卡岩岩浆和异地矽卡岩岩浆发生熔离作用和结晶分异作用,熔离出的矿浆和分异出的热液经过冷却结晶和交代蚀变作用形成的。

关键词: 矽卡岩; 岩浆-热液成矿作用; 中生代; 安徽沿江地区

矽卡岩矿床分布广泛,种类繁多,成因复杂,一直是矿床学研究的热点之一。近些年来,国内外对矽卡岩矿床进行了广泛研究,在矽卡岩矿床成矿作用研究方面取得了重要的新进展。

矽卡岩矿床多成因观点受到普遍重视,提出了矽卡岩矿床的成因分类方案(常印佛等,1991;唐永成等,1998),揭示了矽卡岩矿床形成环境和成矿作用的多样性(赵斌,1989;Meinert et al.,2005)。矽

卡岩矿床接触交代成矿理论得到进一步完善,认识了矽卡岩矿床蚀变矿化分带的多样性和成矿过程的复杂性(赵一鸣等,1990;1992;Zhao et al.,2003;Markowski et al.,2006;Karimzadeh,2010;Maher,2010),了解了成矿流体的性质及其演化过程(Zhou et al.,2007;Chang and Meinert,2008)。矽卡岩矿床复合叠加成矿理论得到进一步发展,查明了矽卡岩矿床复合成矿过程(周涛发等,2008;Li et al.,

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 40672045)和教育部科学技术研究重点项目(编号 308006)资助的成果。

收稿日期:2011-01-12;改回日期:2011-03-25;责任编辑:郝祥国。

作者简介:杜杨松,男,1957年生。教授。岩石学和矿床学专业。Email: duys5510@cugb.edu.cn。

DOI:CNKI:11-1951/P.20110511.2216.005 网络出版时间:2011-5-11 22:16:26

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20110511.2216.005.html

2008; 翟裕生等, 2009; 毛景文等, 2009), 建立了层控矽卡岩矿床叠加成矿模式(顾连兴和徐克勤, 1986; 常印佛等, 1991; 徐克勤等, 1996)。矽卡岩矿床的岩浆成因观点受到广泛关注, 发现了岩浆矽卡岩矿床的典型实例(许国建和林新多, 1990; 常印佛等, 1991; 吴言昌等, 1992), 提供了矽卡岩矿床的岩浆成因证据(赵斌等, 1995; 唐永成等, 1998; 赵劲松等, 2008; Baker et al., 2004)。

由上可见, 近些年来对矽卡岩矿床成矿作用的研究主要集中在矽卡岩接触交代成矿作用和复合叠加成矿作用方面, 对矽卡岩岩浆-热液成矿作用虽然也有所认识, 但尚无较全面的系统研究, 没有提出矽卡岩岩浆-热液成矿作用的框架模型。这样一种模型不仅有利于深化对矽卡岩岩浆-热液成矿作用的认识, 而且有利于指导寻找相关的矽卡岩矿床。

安徽沿江地区分布有大量矽卡岩岩浆-热液矿床, 是研究矽卡岩岩浆-热液成矿作用的理想基地。本文对区内部分典型矽卡岩岩浆-热液矿床进行了详细研究, 并在此基础上讨论了安徽沿江地区中生代矽卡岩岩浆-热液成矿作用。

1 矽长岩及其矿床类型

岩浆矽卡岩, 是指由矽卡岩岩浆冷却结晶作用形成的石榴石和辉石等钙镁铁锰硅酸盐矿物组合, 相当于前人所称的“干矽卡岩”。

原地矽卡岩, 是指在壳幔混源岩浆侵入碳酸盐围岩发生同化混染作用形成矽卡岩岩浆后, 矽卡岩岩浆没有发生大的位移而在原地冷却结晶形成的矽卡岩。

异地矽卡岩, 是指在壳幔混源岩浆侵入碳酸盐围岩发生同化混染作用形成矽卡岩岩浆后, 矽卡岩岩浆发生大的位移而在异地冷却结晶形成的矽卡岩。

矽卡岩热液蚀变矿物组合, 是指由矽卡岩岩浆热液交代蚀变作用形成的透闪石、绿帘石和绿泥石等含水钙镁铁锰硅酸盐矿物组合, 相当于前人所称的“湿矽卡岩”。

原地矽卡岩矿浆型矿床, 是指在原地就位的矽卡岩岩浆发生熔离作用形成矿浆后由矿浆冷却结晶而形成的矿床。

异地矽卡岩矿浆型矿床, 是指在异地就位的矽卡岩岩浆发生熔离作用形成矿浆后由矿浆冷却结晶形成的矿床。

原地矽卡岩(层控)热液型矿床, 是指在原地就位的矽卡岩岩浆发生结晶分异作用形成含矿热液后由含矿热液交代早期形成的矽卡岩和/或碳酸盐地

层(包括矿源层)而形成的(层控)热液型矿床。

异地矽卡岩(层控)热液型矿床, 是指在异地就位的矽卡岩岩浆发生结晶分异作用形成含矿热液后由含矿热液交代早期形成的矽卡岩和/或碳酸盐地层(包括矿源层)而形成的(层控)热液型矿床。

2 典型矿床特征

安徽沿江地区位于长江中下游岩浆成矿带的中部(图1), 构造上隶属由华北板块与扬子板块在 T_2 - J_2 发生陆-陆碰撞形成的大别造山带的前陆带。在 J_3 - K_1 时期, 该区形成了若干次级拗陷和隆起, 其内发育有大量的壳幔同熔侵入岩和相关的矽卡岩 Fe-Cu 矿床(图1)。在池州市铜山铜矿, 既分布有接触交代成因和叠加复合成因的矽卡岩矿床, 也分布有可能属于岩浆成因的矽卡岩矿床。而在铜陵市东狮子山铜矿和繁昌县桃冲铁矿, 则分布有比较典型的岩浆矽卡岩矿床。

考虑到先前已有许多研究者对区内接触交代和叠加复合型矽卡岩矿床进行过深入研究, 以下将重点论述岩浆矽卡岩矿床的特征。

2.1 贵池市铜山铜矿

贵池市铜山铜矿地处安庆-池州铜铁金矿集区东部(图1), 构造上位于贵池姥山背斜南翼。矿区主要出露志留系至三叠系地层, 主要赋矿层位为二叠系栖霞组、石炭系船山组 and 黄龙组碳酸盐岩地层(周余谔, 1997)。区内与岩浆矽卡岩矿化关系最为密切的壳幔同熔侵入岩为花岗闪长斑岩(俞沧海和袁小明, 1999)。岩浆矽卡岩主要分布于花岗闪长斑岩与碳酸盐围岩的接触带上, 并具有明显的空间分带。从花岗闪长斑岩经岩浆矽卡岩往碳酸盐岩方向依次为花岗闪长斑岩、同化混染花岗闪长斑岩、富铁矽卡岩、富钙矽卡岩、同化混染碳酸盐岩和碳酸盐岩(张智宇等, 2010), 反映同化混染作用逐渐减弱。在靠近围岩的矽卡岩中可见因岩浆同化混染作用不彻底而留下的围岩残留体(多已变质成角闪或大理岩)。

值得注意的是, 在该矿床中岩浆矽卡岩与大理岩是逐渐过渡的, 二者之间没有明显的界线。同时, 在岩浆矽卡岩中除了发育岩浆成因的硅酸盐矿物(石榴石和透辉石)外, 还发育典型的热液矿物(绿帘石、绿泥石、石英和方解石等)及硫化物矿物(黄铜矿和黄铁矿等)(图2a), 这与通常所见的接触交代矽卡岩相似。

与接触交代矽卡岩明显不同的是, 此类矽卡岩中发育具有环带结构的自形石榴石, 其内分布有熔

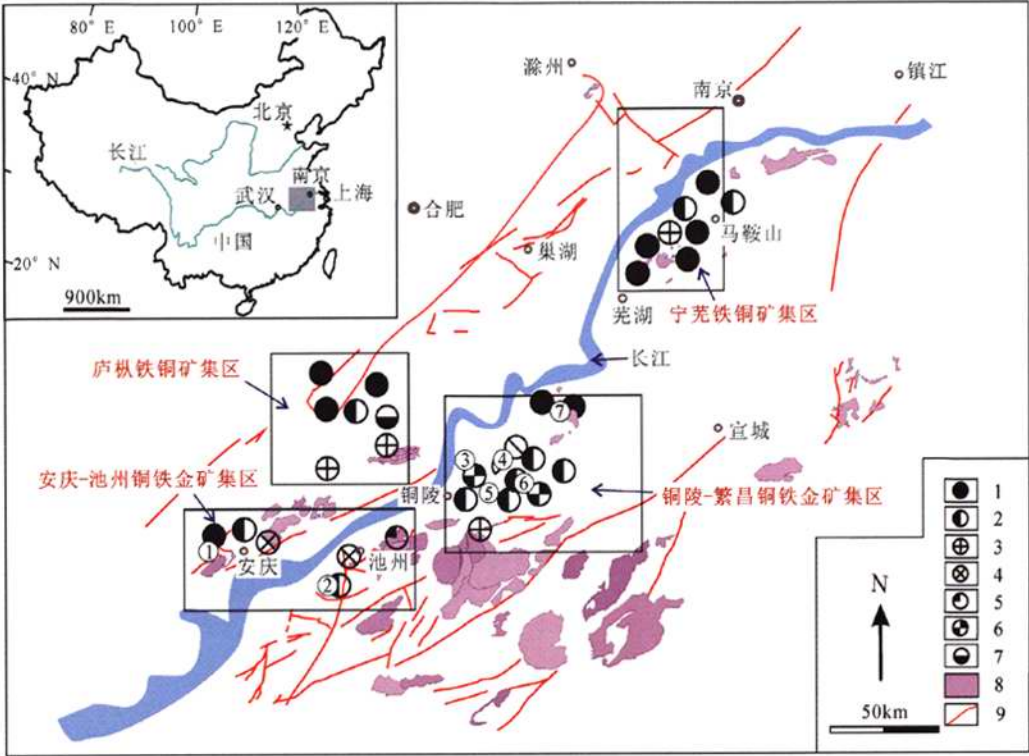


图 1 安徽沿江地区中生代侵入岩和典型矽卡岩矿床分布简图(据 Pang et al., 1999,略有修改)
Fig. 1 Sketch distribution map of the Mesozoic plutons and representative skarn deposits in the Anhui segment of the Lower Yangtze Metallogenic Belt(after Pang et al., 1999)

1—Fe 矿床;2—Cu 矿床;3—Fe-Cu 矿床;4—Cu-Fe 矿床;5—Cu-Au 矿床;6—Au-Cu 矿床;7—Pb-Zn-Ag 矿床;8—侵入岩;9—断层;
①—安庆铜矿;②—铜山铜矿;③—铜官山铜矿;④—冬瓜山铜矿;⑤—老鸦岭铜矿;⑥—东狮子山铜矿;⑦—桃冲铁矿
1—Fe deposit; 2—Cu deposit; 3—Fe-Cu deposit; 4—Cu-Fe deposit; 5—Cu-Au deposit; 6—Au-Cu deposit; 7—Pb-Zn-Ag deposit; 8—
intrusive rock; 9—fault; ①—Anqing copper mine; ②—Tongshan copper mine; ③—Tongguanshan copper mine; ④—Dongguashan copper
mine; ⑤—Laoyaling copper mine; ⑥—Dongshizishan copper mine; ⑦—Taochong iron mine

融包裹体(图 3a),熔融包裹体的均一温度为 789~890℃(表 1),表明铜山矽卡岩中的石榴石是矽卡岩岩浆结晶的产物。同时,石榴石中不仅发育熔融包裹体,还存在熔体-流体包裹体(图 3b)和含石盐子晶的流体包裹体(林新多,1998)。从熔融包裹体到熔体-流体包裹体,均一温度逐渐降低(表 1),反映出由矽卡岩岩浆结晶分异并逐渐演化出岩浆期后热液的完整过程。因此,铜山矿区岩浆矽卡岩与大理岩的渐变接触关系以及矽卡岩中的热液矿物可能是矽卡岩岩浆期后热液对碳酸盐地层和早期形成的矽卡岩矿物交代蚀变的产物。

由以上论述可知,铜山岩浆矽卡岩是矽卡岩岩浆通过冷却结晶作用形成的原地矽卡岩,矽卡岩岩浆结晶分异晚期逐渐产生矽卡岩岩浆期后热液,这些热液在原地交代早先形成的矽卡岩以及碳酸盐围

岩,导致矽卡岩岩浆热液蚀变和成矿作用,形成原地矽卡岩(层控)热液型矿床。

表 1 安徽沿江地区岩浆矽卡岩中石榴石内的
各类包裹体测温数据

Table 1 Temperature measurement data of different types of inclusions within garnet from magmatic skarns in the Anhui Segment of the Lower Yangtze Metallogenic Belt

矿床	包裹体类型	均一温度(℃)	资料来源
东狮子山铜矿	熔融包裹体	920~948	凌其聪等,1998
		1195~1290	赵斌等,1995
铜山铜矿	流体包裹体	670~750	凌其聪等,1998
	熔融包裹体	789~890	贾鹏飞,2011 [●]
桃冲铁矿	流体包裹体	450~800	贾鹏飞,2011 [●]
	熔融包裹体	930	许建国和林新多,1990
	熔体-流体包裹体	730	许建国和林新多,1990
	流体包裹体	400~480	本文

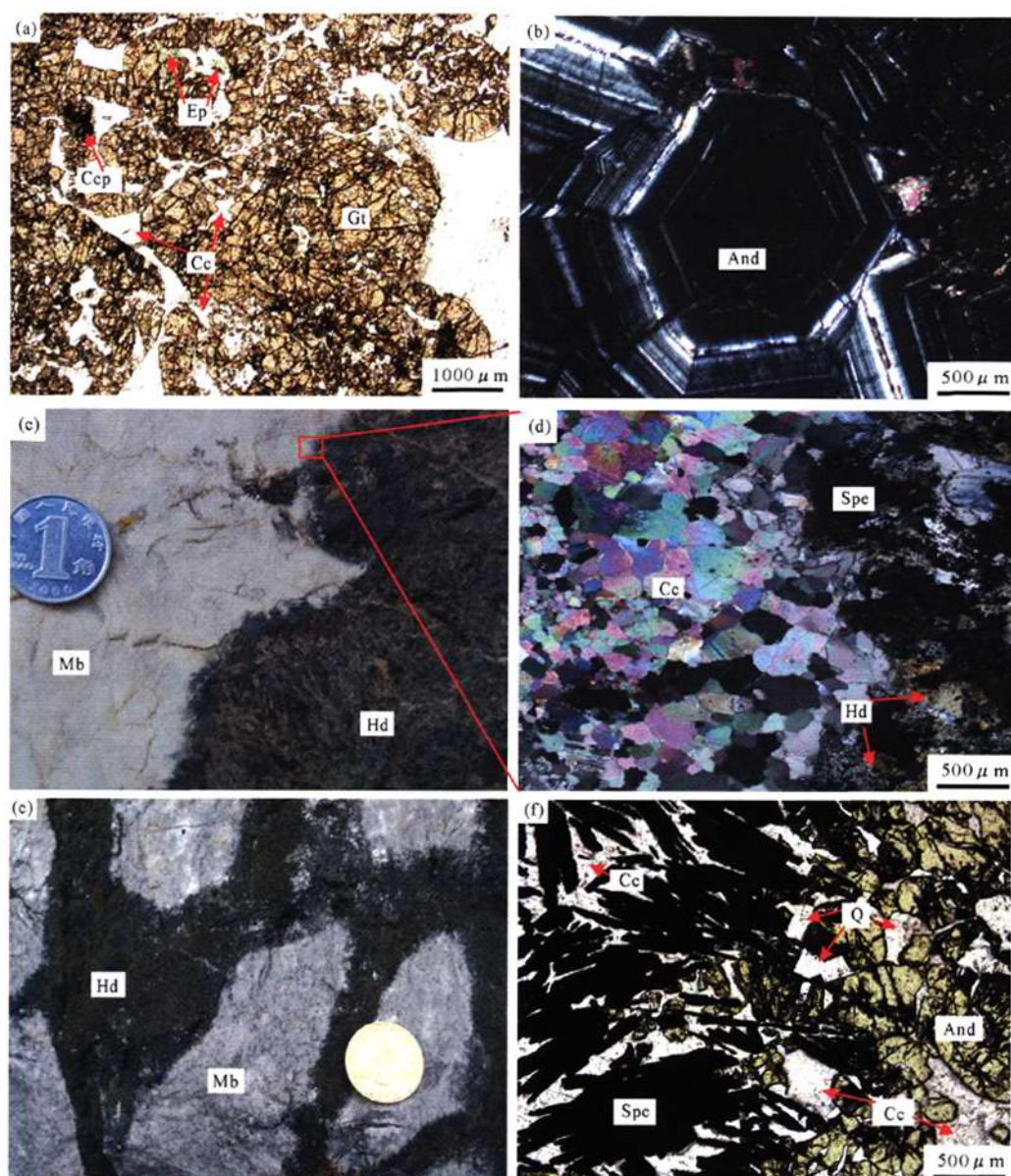


图 2 安徽沿江地区岩浆砂卡岩照片

Fig. 2 Photographs of magmatic skarns from the Anhui segment of the Lower Yangtze Metallogenic Belt

(a)—自形粒状石榴石被绿帘石交代,晚期方解石沿石榴石裂隙充填(铜山铜矿,单偏光);(b)—发育环带结构的钙铁榴石(桃冲铁矿,正交偏光);(c-d)—岩浆砂卡岩与大理岩接触带上的冷凝边和烘烤边(桃冲铁矿);(e)—钙铁辉石砂卡岩呈网脉状穿入大理岩(桃冲铁矿);(f)—钙铁榴石被方解石和石英交代(桃冲铁矿);And—钙铁榴石;Cc—方解石;Ccp—黄铜矿;Gt—石榴石;Hd—钙铁辉石;Mb—大理岩;Mt—磁铁矿;Q—石英;Spe—镜铁矿

(a)—Replacement of euhedral and granular garnet by epidote and filling of late calcite into fractures of garnet (Tongshan copper deposit, plane polar); (b)—andradite with clear optical and compositional zoning (Taochong iron deposit, crossed polars); (c-d)—chilled and baking borders in the contact zone between magmatic skarn and marble (Taochong iron deposit); (e)—stockwork hedenbergite skarn cutting across marble (Taochong iron deposit); (f)—replacement of andradite by specularite, quartz, and calcite (Taochong iron deposit, plane polar); And—andradite; Cc—calcite; Ccp—chalcopyrite; Gt—garnet; Hd—hedenbergite; Mb—marble; Mt—magnetite; Q—quartz; Spe—specularite

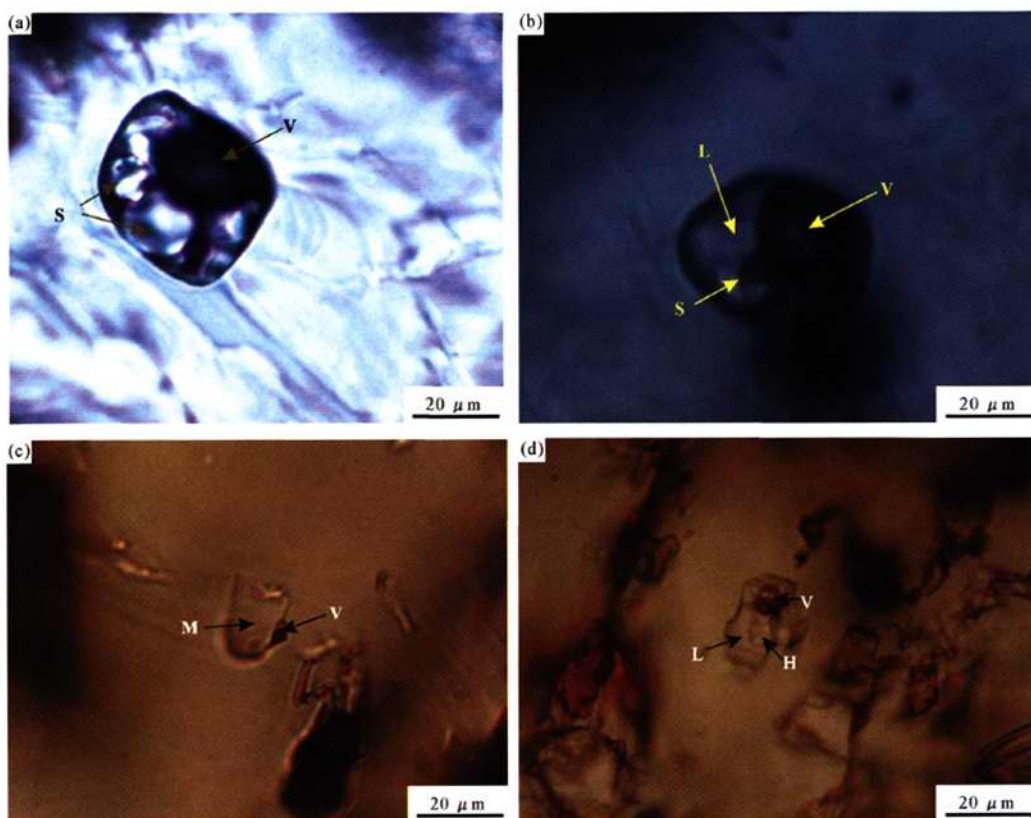


图3 安徽沿江地区岩浆矽卡岩中石榴石内的各类包裹体显微照片

Fig. 3 Photographs of different types of inclusions within garnet from magmatic skarns in the Anhui Segment of the Lower Yangtze Metallogenic Belt

(a~b)—石榴石中的熔融包裹体和熔体-流体包裹体(铜山铜矿,单偏光);(c~d)—石榴石中的熔融包裹体和流体包裹体(桃冲铁矿,单偏光);L—液相;V—气相;H—石盐;M—熔体;S—晶质体

(a~b)—Melt and magma-fluid inclusions within garnet (Tongshan copper deposit, plane polar); (c~d)—melt and fluid inclusions within garnet (Taochong iron deposit, plane polar); L—liquid; V—vapour; H—halite; M—melt; S—crystal

2.2 铜陵市东狮子山铜矿

铜陵市东狮子山铜矿地处铜陵-繁昌铜铁金矿集区西部(图1),构造上位于青山背斜的东南翼^①。与矿化关系密切的壳幔同熔侵入岩为辉石二长闪长岩,赋矿地层主要为下三叠统南陵湖组泥质条带灰岩。岩浆矽卡岩与辉石二长闪长岩紧密伴生,总体呈似层状和透镜状沿南陵湖组的层间滑脱构造产出,并与地层同步褶皱。但两者接触界线截然,无交代蚀变现象,局部出现港湾状熔蚀边,且接触带及其附近的大理岩有明显的重结晶褪色带(张叔贞和凌其聪,1993;凌其聪和程惠兰,1998)。此外,矽卡岩中常出现由钾长石、方解石和石英等矿物组成的囊状体以及由长石、磷灰石和榍石等类似闪长岩的矿物组合(唐永成等,1998)。这些现象反映形成岩浆

矽卡岩的熔体是一种具有较高温度和密度的粘稠岩浆。

岩浆矽卡岩主要由石榴石和透辉石组成,其中石榴石主要为钙铁石榴石、钙铁铝石榴石和钙铝石榴石(表2),常发育环带状结构。张叔贞和凌其聪(1993)和赵斌等(1995)在本矿区岩浆矽卡岩的石榴石中发现了由硅酸盐矿物和气体组成的不规则状熔融包裹体,其均一温度为920~1290℃(表1),表明矽卡岩中的石榴子石是由矽卡岩岩浆冷却结晶而成的。

矿体主要呈脉状、似层状、透镜状和鞍状产于岩浆矽卡岩中。矿体与岩浆矽卡岩呈渐变接触,但与大理岩呈截然接触。从矽卡岩到大理岩存在明显的矿化分带,各带依次为粗粒钙铁铝石榴石矽卡岩、浸染状硫化物-中粗粒钙铁铝石榴石矽卡岩、斑点(块)状硫

表 2 安徽沿江地区岩浆砂卡岩中石榴子石的电子探针分析结果(%)

Table 2 EMPA analyses (%) for garnet from magmatic skarns in the Anhui Segment of the Lower Yangtze Metallogenic Belt

矿床	东狮子山铜矿 [*]				铜山铜矿						桃冲铁矿			
样品编号	DS01	DS02	DS03	DS04	TS01	TS02	TS03	TS04	TS05	TS06	TC01	TC02	TC03	TC04
SiO ₂	37.09	37.04	37.06	38.24	35.61	35.48	40.47	39.78	38.90	37.35	35.43	34.89	34.36	33.56
TiO ₂	0.01	0.00	0.79	0.46	0.06	0.03	0.26	1.16	0.61	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	5.54	6.72	7.90	10.39	1.44	1.50	22.23	15.39	14.69	6.01	0.07	0.11	0.78	0.11
FeO	21.62	20.17	19.95	15.39	26.14	26.45	1.07	9.63	11.72	22.56	28.85	28.74	28.19	28.13
MnO	0.13	0.41	0.34	0.23	0.58	0.58	0.54	0.61	0.25	0.45	0.29	0.31	0.31	0.25
MgO	0.04	0.01	1.00	0.17	0.04	0.06	0.00	0.19	0.11	0.19	0.01	0.03	0.01	0.03
CaO	34.23	34.59	32.76	35.08	32.55	32.54	34.88	32.32	33.37	31.97	35.29	35.87	36.25	37.87
K ₂ O	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.01	0.03	0.01	0.04	0.02	0.04	0.05	0.04	0.38	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
总和	98.80	99.20	100.10	100.01	96.52	96.77	99.50	99.12	100.03	98.83	99.94	99.97	99.91	99.94
Si	3.01	2.99	2.95	3.00	3.01	2.99	3.05	3.07	3.02	3.02	2.93	2.89	2.85	2.81
Ti	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00	0.01	0.07	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.53	0.64	0.74	0.96	0.14	0.15	1.97	1.40	1.34	0.57	0.01	0.01	0.08	0.01
Fe ³⁺	1.46	1.36	1.26	1.01	1.85	1.85	0.00	0.50	0.62	1.40	1.99	1.99	1.96	1.97
Fe ²⁺	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.01	0.07	0.12	0.14	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.01	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
Mg	0.00	0.00	0.12	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	2.97	2.99	2.79	2.95	2.95	2.94	2.81	2.68	2.78	2.77	3.12	3.19	3.22	3.39
And	73.44	67.61	62.98	50.76	92.56	92.55	0.00	26.41	31.56	70.91	95.04	93.05	90.42	86.43
Gro	26.02	31.42	30.07	48.06	5.88	5.38	95.10	67.25	62.66	22.88	4.26	6.15	8.88	12.94
Pyrralspite	0.54	0.97	6.95	1.18	0.00	0.00	3.44	6.34	5.78	6.21	0.69	0.79	0.70	0.63

And 为钙铁榴石, Gro 为钙铝榴石, Pyrralspite 为铝榴石; * 数据来源于凌其聪等(1998); 其它数据来自本文; 铜山铜矿样品分析在中国地质大学(北京)地质实验中心 EPMA-1600 型电子探针上完成; 桃冲铁矿样品分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 LA-ICP-MS 上完成。

化物-透辉石-钙铁铝辉石砂卡岩、细粒硫化物-透辉石砂卡岩和大理岩。矿石中砂卡岩矿物自形程度高,并被晚期结晶的硫化物矿物胶结,呈现出岩浆熔离型矿床中常出现的典型海绵陨铁结构。另外,张叔贞和凌其聪(1993)发现本矿区砂卡岩岩石的微量元素、稀土元素特征与矿体具有高度一致性,表明两者具有同源性。以上特征反映出东狮子山铜矿体是由富含矿质的高温高密度砂卡岩岩浆经熔离作用和冷凝结晶形成的产物。

由以上论述可知,东狮子山铜矿中的砂卡岩具有明显的岩浆岩特征,且多产于辉石二长闪长岩附近,属于原地砂卡岩;脉状、似层状和透镜状硫化物矿体与砂卡岩早渐变接触,硫化物具有典型海绵陨铁结构,表明该矿体可能是原地富铜砂卡岩岩浆发生熔离作用形成硫化物矿浆后由硫化物矿浆冷却结晶形成的,属于原地砂卡岩矿浆型矿床。

2.3 繁昌县桃冲铁矿

桃冲铁矿地处铜陵-繁昌铁铜金矿集区东北部(图 1),矿体严格受地层控制,并与砂卡岩密切伴生。同时,砂卡岩和矿体远离岩浆岩体,在本区具有

典型意义。矿区出露的岩浆岩主要为燕山晚期脉岩,它们集中分布于矿区的东部和中部,且均切穿矿体,与矿化无直接成因关系。矿区主要出露志留系到三叠系地层。砂卡岩体主要呈似层状产于黄龙组白云质大理岩与栖霞组大理岩之间的层间断裂带内。岩浆砂卡岩主要由钙铁榴石和钙铁辉石组成(表 2),其中钙铁榴石含量超过 80%,且发育良好的环带结构(图 2b)。砂卡岩与碳酸盐围岩的接触边界清楚截然(图 2c),接触面多呈港湾状,在砂卡岩与大理岩接触带上可见冷凝边和烘烤边(图 2c-d)。从中部砂卡岩往两边围岩依次出现中粗粒砂卡岩-中细粒砂卡岩-碳酸盐围岩,反映随降温速度逐渐增加结晶速度逐渐降低。在部分地段见到砂卡岩沿断裂贯入,或呈细脉和网脉状穿入大理岩(图 2e),有时在砂卡岩中能見到气孔状构造和由钾长石和石英组成的伟晶岩囊(许建国等,1990)。这些现象都不可能通过热液交代或充填作用形成,而在岩浆侵入围岩时却常常出现(凌其聪等,1998),表明砂卡岩可能是由高温高密度岩浆冷却结晶形成的。另外,虽然地球物理和钻孔资料显示其深部可能有隐伏岩体

存在,但矿区内未见矽卡岩与侵入体接触,表明桃冲铁矿区矽卡岩岩浆形成后发生过远距离迁移,属于异地矽卡岩。

主矿体的产状与矽卡岩体基本相同,呈似层状和透镜状分布于栖霞组大理岩与致密块状石榴石矽卡岩之间^①。矿石矿物主要为镜铁矿,另有少量磁铁矿以及微量黄铁矿和黄铜矿;脉石矿物主要为钙铁榴石、钙铁辉石、方解石和石英。在矿区—57m中段,从矿体底板至顶板显示出明显的矿化分带特征:黄龙组白云质大理岩→致密块状钙铁榴石矽卡岩→钙铁辉石矽卡岩→矿化矽卡岩→放射状矿体→致密块状矿体→栖霞组大理岩。其中,矿体与栖霞组大理岩呈突变接触,界线鲜明,而与矽卡岩呈渐变关系,自底板向顶板方向,矿化逐渐增强;矿化矽卡岩中可见镜铁矿嵌生于钙铁辉石颗粒间隙和解理缝隙中,相互之间无交代蚀变现象,构成较典型的亚共结结构;这些特征表明该矿体可能是富铁矽卡岩岩浆在异地就位后发生熔离作用形成铁矿浆后由铁矿浆冷却结晶形成的,属于异地矽卡岩矿浆型矿床。

另外,在矿区部分地段可见到钙铁榴石和钙铁辉石等矽卡岩矿物被晚期的方解石和石英交代,并伴有氧化物(如磁铁矿等)和极少量硫化物(如黄铁矿和黄铜矿等)的形成(图2f),显示出热液交代蚀变特征。与此同时,在石榴石中发育熔融包裹体(均一温度可达970℃,许建国等,1990)、熔体-流体包裹体和含盐子晶的流体包裹体(图3c-d),其均一温度逐渐降低(表1),表明成矿流体可能是矽卡岩岩浆发生结晶分异作用形成的含矿热液。因此,桃冲矿区中这套矽卡岩岩浆热液蚀变矿物组合及与其伴生的脉状-网脉状和/或层状-似层状矿体,属于异地矽卡岩(层控)热液型矿床。

3 原地和异地矽卡岩岩浆-热液成矿作用

从前述资料来看,矿区中的岩浆矽卡岩呈侵入产状,与围岩呈截然接触,接触面多呈港湾状,有时有冷凝边、气孔构造和围岩残留体,镜下观察一般具自形等粒结构,常能见到发育良好环带的自形石榴石和辉石,其中大多能见到熔融包裹体,包裹体的均一温度多在800℃以上。与此明显不同的是,接触交代矽卡岩与岩体和碳酸盐围岩逐渐过渡,界线不明显,没有冷凝边和气孔构造,镜下观察一般具交代结构,石榴石和辉石呈它形且无发育环带,其中只有气液包裹体而没有熔融包裹体。此外,虽然原地矽

卡岩的空间分带与接触交代矽卡岩类似,但异地矽卡岩的空间分带与接触交代矽卡岩明显不同,从中部矽卡岩往两边围岩依次出现中粗粒矽卡岩-中细粒矽卡岩-碳酸盐围岩,反映出矽卡岩岩浆侵入碳酸盐围岩后的冷却结晶过程。

前人在高温高压条件下完成的熔融-结晶实验研究表明,中酸性岩浆岩在高温条件下同化富钙围岩,经熔离和冷却结晶作用可以产生富钙矽卡岩岩浆及矿浆(吴言昌等,1996;唐永成等,1998)。该实验结果为矽卡岩的岩浆成因提供了另一方面的证据。

对前述不同矿区岩浆矽卡岩及其矿化产物进行综合对比后发现,原地矽卡岩及有关矿床与异地矽卡岩及有关矿床在地质产状、矿物组成、包裹体、地球化学和矿床类型等方面存在着明显的差异。

在地质产状上,原地矽卡岩岩体常与壳幔同熔岩浆侵入体紧密伴生,分布在壳幔同熔岩浆侵入体与碳酸盐围岩的接触带上,在矽卡岩岩体边缘一般没有冷凝边和烘烤边,但常能见到因同化混染作用不彻底而留下的围岩残留体(多已变质成角岩或大理岩)。与此明显不同的是,异地矽卡岩岩体常分布在断裂带或地层虚脱带中,附近一般没有壳幔同熔岩浆侵入体与其紧密伴生,在矽卡岩岩体边缘一般有冷凝边和烘烤边,有时能见到气孔构造以及石榴石或透辉石堆积岩,但见不到围岩残留体。同时,原地矽卡岩和异地矽卡岩均具有明显的水平分带,但两者明显不同。原地矽卡岩的水平分带常表现为从侵入岩体经矽卡岩往碳酸盐围岩方向依次出现侵入岩、同化混染侵入岩、富铁矽卡岩、富钙矽卡岩、同化混染碳酸盐岩和碳酸盐岩,反映同化混染作用逐渐减弱,而异地矽卡岩的水平分带常表现为从矽卡岩体中央往两边依次出现中粗粒矽卡岩和中细粒矽卡岩,反映随降温速度逐渐增加结晶速度逐渐降低。

在矿物组成上,虽然原地和异地矽卡岩均由石榴石和辉石组成,但原地矽卡岩中的石榴石包含钙铁榴石、钙铁铝榴石和钙铝榴石,辉石主要为透辉石和钙铁辉石,而异地矽卡岩中的石榴石几乎全是钙铁榴石,辉石全是钙铁辉石(表2和表3)。造成矿物学差异的原因可能与Al、Fe等元素的地球化学特征有关,Al在熔体中起着形成网络,增强聚合程度的作用,而Fe起着减弱熔体聚合程度的作用。因此,富Fe的熔体更有利于迁移。

在包裹体方面,虽然原地和异地矽卡岩中均含有熔融包裹体、熔体-流体包裹体和含子晶流体包裹

表 3 安徽沿江地区岩浆砂卡岩中代表性辉石的电子探针分析结果(%)

Table 3 EMPA analyses (%) for pyroxene from magmatic skarns in the Anhui Segment of the Lower Yangtze Metallogenic Belt

矿床	东狮子山铜矿*			铜山铜矿				桃冲铁矿			
样品号	DS01	DS02	DS03	TS01	TS02	TS07	TS06	TC01	TC02	TC03	TC04
SiO ₂	53.44	53.32	53.33	54.40	53.88	55.34	56.17	48.48	47.38	47.12	39.48
TiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.05	0.00	0.19	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.11	0.40	0.40	0.82	0.17	0.49	0.53	0.56	0.80	0.61	14.03
Cr ₂ O ₃				0.01	0.04	0.00	0.00				
FeO	5.53	9.92	7.11	0.64	2.61	0.75	0.15	23.50	26.89	26.04	22.24
MnO	0.66	0.60	0.72	0.06	0.75	0.00	0.10	0.61	1.06	0.89	0.17
MgO	14.63	11.96	13.84	17.11	15.76	18.58	18.61	3.06	1.04	1.57	1.87
CaO	25.34	24.39	24.59	26.45	26.18	23.96	24.33	22.25	21.64	22.51	21.49
Na ₂ O	0.09	0.18	0.15	0.07	0.06	0.00	0.14	1.41	1.08	1.16	0.02
K ₂ O	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
总和	99.82	100.80	100.15	99.61	99.46	99.31	100.03	99.86	99.90	99.90	99.32
Si	1.99	2.00	1.99	1.98	1.99	2.00	2.01	1.97	1.96	1.94	1.60
Al(IV)	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40
Al(VI)	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.27
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00	0.22	0.20	0.26	0.21
Fe ²⁺	0.13	0.30	0.19	0.01	0.05	0.02	0.00	0.56	0.71	0.62	0.53
Mn	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.04	0.03	0.01
Mg	0.81	0.67	0.77	0.93	0.87	1.00	0.99	0.18	0.06	0.10	0.11
Ca	1.01	0.98	0.98	1.03	1.04	0.93	0.93	0.97	0.96	1.00	0.93
Na	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.11	0.09	0.09	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Di	83.61	66.55	77.31	98.25	91.47	97.78	98.29	21.05	7.09	11.48	17.23
Hd	13.58	30.25	19.31	1.03	5.60	2.22	0.45	63.95	79.23	73.79	81.68
Jo	2.14	1.90	2.29	0.20	2.47	0.00	0.30	2.37	4.12	3.68	0.88
Jd+Ae	0.67	1.30	1.09	0.52	0.45	0.00	0.96	12.63	9.56	11.04	0.22

注:Di为透辉石,Hd为钙铁辉石,Jo为钙锰辉石,Jd为硬玉,Ae为霓石;*数据来源于凌其聪等(1998);其它数据来自本文。铜山铜矿样品分析在中国地质大学(北京)地质实验中心 EPMA-1600 型电子探针上完成;桃冲铁矿样品分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 LA-ICP-MS 上完成。

体,且其均一温度逐渐降低(表 1)。但原地砂卡岩中的包裹体的均一温度明显高于异地砂卡岩中同类型包裹体的均一温度。这种差异可能是随着迁移距离的增加,温度逐渐降低的结果。

在地球化学方面,相对于原地砂卡岩,异地砂卡岩及矿石明显富集 W、F、Rb、Be、Fe,而亏损 Sr、Ba、Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、Al 等元素(表 4)。造成地球化学差异的原因也可能与元素的地球化学特征有关,例如,F 元素含量的增加,可使熔体中水的溶解度明显增加,从而降低熔浆的结晶温度,有利于熔体的迁移。

在矿床类型上,原地砂卡岩可与铜矿床和铁矿床等各种矿床伴生,而异地砂卡岩一般只与铁矿床伴生。

根据前述典型矿床资料,可以初步分析本区中生代原地和异地砂卡岩岩浆-热液成矿作用。

在中生代,安徽沿江地区经历了碰撞后时期的岩石圈伸展减薄作用和造山后时期的岩石圈拆沉作用,引发了碰撞后(大致开始于 145 Ma)和造山后(大致开始于 125 Ma)大规模幔源岩浆底侵作用。底侵的幔源岩浆通过一系列岩浆作用过程形成富含成矿物质的壳幔同熔岩浆。这类富含成矿物质的壳幔同熔岩浆侵位后发生结晶分异作用,导致岩浆热液活动和斑岩型蚀变,形成大量斑岩型矿床,如铜山铜矿中的斑岩铜矿以及沙溪斑岩铜矿等。

壳幔同熔岩浆侵位后与古生代碳酸盐围岩发生同化混染作用就形成砂卡岩岩浆。受构造扰动的影响,砂卡岩岩浆在形成后可以与硅酸盐岩浆发生混合作用。在砂卡岩岩浆冷却结晶过程中,后期补充的砂卡岩岩浆或硅酸盐岩浆也可以与早期尚未完全固结的早期砂卡岩岩浆发生混合作用。这种混合作用可以使砂卡岩具有十分复杂的结构构造和矿物组合。

表 4 安徽沿江地区岩浆矽卡岩主量元素(%)、微量元素(μg/g)分析结果

Table 4 Whole-rock analyses of major oxides(%)and trace elements (μg/g) of magmatic skarns in the Anhui Segment of the Lower Yangtze Metallogenic Belt

矿床	东狮子山铜矿*				铜山铜矿			桃冲铁矿			
样品编号	DS11	DS12	DS13	DS14	TS11	TS12	TS13	TC11	TC12	TC13	TC14
SiO ²	38.93	38.64	35.00	39.25	38.10	42.32	37.02	29.82	27.70	27.11	28.75
Al ₂ O ₃	12.61	13.75	0.80	12.35	2.52	4.65	2.97	0.47	<0.1	0.11	0.02
TF ₂ O ₃	12.43	7.74	22.90	9.21	30.67	2.82	15.84	27.05	24.60	30.02	25.00
FeO	1.35	1.34	1.29	1.74				0.40	0.42	1.01	0.34
MgO	0.80	2.10	0.15	1.86	12.74	2.34	1.82	0.22	1.09	0.30	0.15
CaO	31.35	32.49	32.46	31.62	13.88	26.42	31.80	32.27	31.79	32.23	32.43
Be					0.20	0.31	0.12	0.87	22.43	4.23	4.07
Ba	137.50	79.70	13.40	245.20	12.31	16.43	8.69	<5	9.10	8.60	14.10
Sr	155.30	73.60	24.00	78.00	54.77	102.60	56.70	31.20	129.70	49.10	51.70
Rb					0.66	6.78	0.56	<5	2.80	<5	<5
Bi			0.72	2.61				0.09	0.05	0.09	0.06
W	9.54	11.85	163.47	8.47				110.77	38.83	116.49	32.47
Mo	1.14	52.28	1.05	82.96				0.51	0.68	2.23	0.31
Sn	2.20	2.20	14.00	10.00	6.57	8.90	81.22	1.31	1.42	1.23	3.31
Co	11.10	12.50	4.90	4.30	63.72	5.95	12.41	0.82	0.78	0.82	1.31
Cr	28.00	30.80	40.00	30.00				14.60	11.90	15.70	15.90
Ni	19.50	20.40	4.00	11.00				6.37	7.97	6.42	9.50
V	19.80	36.70	33.90	68.00	74.20	32.89	23.27	13.40	21.20	8.20	13.40
Cu	681.1	88.2	1600.0	1400.0	5827.00	106.40	939.80	1.89	2.75	1.87	2.31
Pb	13.30	6.90	2.00	4.90	6.09	13.19	8.00	1.22	1.35	0.96	2.06
Zn	89.50	57.90	76.00	79.00				9.52	8.90	12.50	11.46
F	1376.4	896.9	511.6	1424.9				4947.3	2486.4	3507.3	2595.6

* 数据来源于唐永成等,1998,其它来自本文;铜山铜矿样品分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,主、微量元素分别采用 X 射线荧光熔片法和等离子体质谱法进行分析;桃冲铁矿样品分析在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所完成,主、微量元素分别采用 X 射线荧光光谱法和等离子体质谱法进行分析。

矽卡岩岩浆可以在原地就位,通过熔离作用可以形成矿浆,通过冷却结晶作用可以形成原地矽卡岩(如铜山铜矿和东狮子山铜矿等矿区的矽卡岩,与侵入岩共生),通过结晶分异作用可以形成矽卡岩岩浆热液(图 4a)。由岩浆熔离作用形成的矿浆冷却结晶就形成原地矽卡岩矿浆型矿床(如东狮子山铜矿等)。由矽卡岩岩浆结晶分异作用形成的矽卡岩岩浆热液交代早先形成的矽卡岩以及碳酸盐围岩和(或)矿源层,导致矽卡岩岩浆热液蚀变和成矿作用,形成原地矽卡岩(层控)热液型矿床(如铜山铜矿等)。

矽卡岩岩浆也可以发生远距离迁移而在异地就位,通过熔离作用可以形成矿浆,通过冷却结晶形成异地矽卡岩(如安徽桃冲铁矿的矽卡岩,不与侵入岩共生),通过结晶分异作用可以形成矽卡岩岩浆热液(图 4b)。由岩浆熔离作用形成的矿浆冷却结晶就形成异地矽卡岩矿浆型矿床(如桃冲铁矿的部分矿体)。由矽卡岩岩浆结晶分异作用形成的矽卡岩岩

浆热液交代早先形成的矽卡岩以及碳酸盐围岩和(或)矿源层,导致矽卡岩岩浆热液蚀变和成矿作用,形成异地矽卡岩(层控)热液型矿床(如桃冲铁矿的其它矿体)。

4 结论

(1) 在安徽沿江地区,既分布有大量接触交代成因和叠加复合成因的矽卡岩及其矿床,也分布有岩浆成因的矽卡岩及其矿床。

(2) 岩浆矽卡岩具有岩浆岩的典型特征,与接触交代矽卡岩明显不同。

(3) 根据矽卡岩岩浆就位位置的不同可将岩浆矽卡岩分成原地矽卡岩和异地矽卡岩两类,并将岩浆矽卡岩矿床分成原地矽卡岩矿床和异地矽卡岩矿床两大类。两类矽卡岩及其矿床具有明显不同的特征。

(4) 原地矽卡岩矿床和异地矽卡岩矿床是由矽卡岩岩浆在原地和异地发生熔离作用和结晶分异作

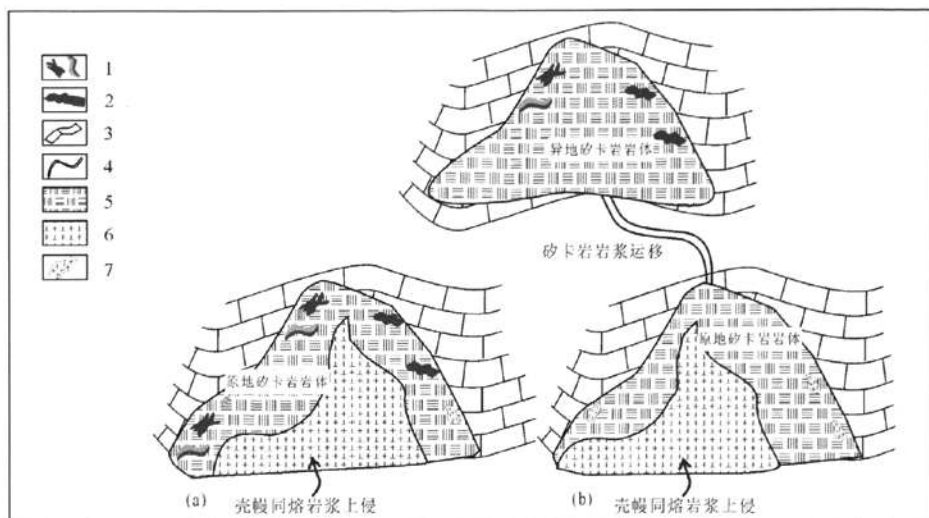


图4 安徽沿江地区中生代原地和异地矽卡岩岩浆-热液成矿作用模型

Fig.4 Model for the Mesozoic in-situ and external skarn magmatic-hydrothermal mineralization in the Anhui Segment of the Lower Yangtze Metallogenic Belt

1—(层控)热液型矿床; 2—矿浆型矿床; 3—碳酸盐围岩; 4—矽卡岩岩浆迁移通道; 5—矽卡岩岩体;
6—壳幔同熔岩浆侵入体; 7—碳酸盐岩残留体

1—Stratabound hydrothermal deposit; 2—skarn-type ore pulp deposit; 3—carbonate rocks; 4—migration pathway of the skarn-type magma; 5—skarn rocks; 6—crust-mantle syntectonic magma intrusive mass; 7—remained mass of carbonate rocks

用,熔离出的岩浆和分异出的热液发生冷却结晶和蚀变交代作用形成的。

致谢:感谢常印佛院士多年来的指导、支持和帮助! 今年是常院士 80 华诞,特撰写此文以致祝贺! 本文成文过程中,得到了翟裕生院士、赵一鸣教授和叶天竺教授的热情指导;论文实验工作得到了杨斌、古丽冰、马芳、李林庆、尹京武、郝金华和陈华的大力支持;硕士研究生胡利芳、莘丰培、高浮萍和贾鹏飞参加了部分野外调研和室内分析工作;在野外工作期间得到了卜保全、吴铸成、万勇、李品杰、徐刚等人的积极协助。在此一并致谢!

注 释

- ① 贾鹏飞. 2011. 安徽省铜山矽卡岩型铜矿床流体及成矿作用研究. 北京:中国地质大学(北京). [硕士学位论文].
- ② 安徽地矿局 321 地质队. 1995. 安徽沿江重要成矿区铜及有关矿产勘查研究报告. 内部资料.
- ③ 华东冶金地质勘查局 803 地质队. 1963. 长龙山铁矿勘查报告. 内部资料.

参 考 文 献

- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京:地质出版社,1~379.
- 顾连兴,徐克勤. 1986. 论大陆地壳断裂拗陷带中的华南型块状硫

化物矿床. 矿床地质,5(2):1~13.

- 林新多. 1998. 岩浆-热液过渡型矿床的若干特征. 现代地质,12(4):485~492.
- 凌其聪,程惠兰,陈邦国. 1998. 铜陵东狮子山铜矿床地质特征及成岩成矿机理研究. 矿床地质,2(17):158~164.
- 毛景文,邵拥军,谢桂青. 2009. 长江中下游成矿带铜陵集铜多金属矿床模型. 矿床地质,28(2):109~119.
- 倪若水,王道华. 1983. 繁昌桃冲铁矿成因探讨. 矿床地质,2(3):16~23.
- 唐永成,吴言昌,储国正,邢凤鸣,王永敏,曹奇扬,常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜多金属矿床地质. 北京:地质出版社,1~351.
- 吴言昌. 1992. 论岩浆矽卡岩:一种新类型矽卡岩. 安徽地质,2(1):12~26.
- 吴言昌,邵桂清,吴炼. 1996. 岩浆矽卡岩及其矿床. 安徽地质,6(2):30~39.
- 徐克勤,王鹤年,周建平,朱金初. 1996. 论华南喷流-沉积块状硫化物矿床. 高校地质学报,2(3):241~256.
- 许建国,林新多. 1990. 安徽长龙山矽卡岩型铁矿成因探讨. 地球科学,15(6):649~656.
- 俞沧海,袁小明. 1999. 贵池铜山岩体岩石化学与地球化学特征. 安徽地质,9(3):194~197.
- 翟裕生,王建平,彭润民,刘家军. 2009. 叠加成矿系统与多成因矿床研究. 地学前缘,16(6):282~290.
- 张叔贞,凌其聪. 1993. 矽卡岩型铜矿床特征——以安徽铜陵东狮子山铜矿床为例. 地球科学,6(18):801~813.
- 张智宇,杜杨松,张静,庞振山,李大鹏,贾鹏飞. 2010. 安徽贵池铜山矽卡岩型铜矿床蚀变矿化分带特征及其成因. 矿床地质,29

- (6); 999~1016.
- 赵斌, 李院生, 赵劲松. 1995. 岩浆成因矽卡岩的包裹体证据. 地球化学, 24(2): 198~200.
- 赵斌. 1989. 中国主要矽卡岩及矽卡岩矿床. 北京: 科学出版社.
- 赵劲松, 夏斌, 丘学林, 赵斌, 许德如, 冯佐海, 李兆麟, 沈致富, 胡瑞忠, 苏文超, 秦朝建, 秦伟民, 符贤, 胡志高. 2008. 海南岛石榴矽卡岩铁矿物中石榴子石的熔融包裹体及其意义. 岩石学报, 24(1): 149~160.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 李大新, 蒋崇俊. 1990. 中国矽卡岩矿床. 北京: 地质出版社, 1~354.
- 赵一鸣, 林文蔚, 张德全, 李大新, 赵国红, 陈仁义. 1992. 交代成矿作用及其找矿意义——几个重要含矿交代建造的研究. 北京: 北京科学技术出版社, 1~158.
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(8): 1665~1678.
- 周余涛. 1997. 安徽铜山铜矿床有关地质体中稀土元素特征及其地质意义. 安徽地质, 7(2): 51~58.
- Baker T, Achterberg EV, Ryan CG, Lang JR. 2004. Composition and evolution of ore fluids in a magmatic-hydrothermal skarn deposit. *Geology*, 32(2): 117~120.
- Chang Yinfo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. 1991. The copper-iron belt of the Middle and Lower reaches of Yangtze River. Beijing: Geological Publishing House, 1~379 (in Chinese with English abstract).
- Chang ZS, Meinert LD. 2008. The Empire Cu-Zn mine, Idaho; exploration implications of unusual skarn features related to high fluorine activity. *Economic Geology*, 103(5): 909~938.
- Gu Lianxing, Xu Keqin. 1986. Discussion on the South China-Type Massive Sulphide Deposits Formed on Continental Crust. *Mineral Deposits*, 5(2): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Jia Pengfei. 2011. Study on the fluid inclusions of the Tongshan skarn copper deposit, Anhui Province; [Master thesis]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Karimzadeh SA. 2010. Garnetization as a ground preparation process for copper mineralization; evidence from the Mazraeh skarn deposit, Iran. *Geologische Rundschau*, 99(2): 343~356.
- Li Jianwei, Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Vasconcelos P, Ma Changqian, Deng Xiaodong, Souza ZSD, Zhao Yongxin, Wu Gang. 2008. Origin of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, eastern Yangtze Craton, Eastern China; Geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints. *Mineralium Deposita*, 43(3): 315~336.
- Lin Xinduo. 1998. Geological characteristics of magmatic-hydrothermal transitional ore deposits. *Geoscience*, 12(4): 485~492 (in Chinese with English abstract).
- Ling Qicong, Cheng Huilan, Chen Bangguo. 1998. Geological characteristics and ore-forming and rock-forming mechanism of the Dongshizishan copper deposit in Tongling, Anhui Province. *Mineral Deposits*, 2(17): 158~164 (in Chinese with English abstract).
- Maher K C. 2010. Skarn alteration and mineralization at Corocochuayco, Tintaya District, Peru. *Economic Geology*, 105(2): 263~283.
- Markowski A, Vallance J, Chiaradia M, Fontboté L. 2006. Mineral zoning and gold occurrence in the Fortuna skarn mine, Namibia District, Ecuador. *Mineralium Deposita*, 41(4): 301~321.
- Mao Jingwen, Shao Yongjun, Xie Guiqing. 2009. Mineral deposit model for porphyry-skarn polymetallic copper deposits in Tongling ore dense district of Middle-Lower Yangtze Valley metallogenic belt. *Mineral Deposits*, 28(2): 109~119 (in Chinese with English abstract).
- Meinert LD, Dipple GM, Nicolescu S. 2005. World skarn deposits. *Economic Geology*, one hundredth anniversary volume: 299~336.
- Ni R, Wang D. 1983. An investigation of the genesis of the Taochong iron deposit in Fanchang county, Anhui Province. *Mineral Deposits*, 2(3): 16~23 (in Chinese with English abstract).
- Pan Y, Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi / Yangtze River) metallogenic belt, east central China; intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. *Ore Geology Review*, 15: 177~242.
- Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng, Xing Fengming, Wang Yongmei, Cao Fenyang, Chang Yinfo. 1998. Geology of copper-gold polymetallic deposits along the Yangtze River, Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House. 1~351 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yanchang. 1992. Magmatic skarn; a new type skarn. *Geology of Anhui*, 2(1): 12~26 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yanchang, Shao Guiqing, Wu Lian. 1996. Magmatic skarn and its ore deposits. *Geology of Anhui*, 6(2): 30~39 (in Chinese with English abstract).
- Xu Keqin, Wang Henian, Zhou Jianping, Zhu Jinchu. 1996. A discussion on the exhalative sedimentary massive sulfide deposits of South China. *Geological Journal of China Universities*, 2(3): 241~256 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jianguo, Lin Xinduo. 1990. An investigation into the genesis of the Changlongshan skarn-magma type of iron deposit, Anhui province. *Earth Science*, 15(6): 649~656 (in Chinese with English abstract).
- Yu Canghai, Yuan Xiaoming. 1999. The petrochemical and geochemical characteristics of the Tongshan intrusive, Guichi. *Geology of Anhui*, 9(3): 194~197 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Wang Jianping, Peng Runmin, Liu Jiajun. 2009. Research on superimposed metallogenic systems and polygenetic mineral deposits. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 282~290 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuzhen, Ling Qicong. 1993. Characteristics of skarn copper deposit; an example from Dongshizishan copper deposit in

- Tongling county, Anhui Province. *Earth Science*, 6(18): 801~813 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiyu, Du Yangsong, Zhang Jing, Pang Zhenshan, Li Dapeng, Jia Pengfei. 2010. Alteration and mineralization zoning in Tongshan skarn-type copper deposit, Anhui Province, and its genesis. *Mineral Deposits*, 29(6): 999~1016 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Bin, Li Yuansheng, Zhao Jinsong. 1995. The evidence from inclusions for magma-genetic skarn. *Geochimica*, 24(2): 198~200 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Bin. 1989. The skarn and skarn deposits in China. Beijing: Science Press.
- Zhao Jinsong, Xia Bin, Qiu Xuelin, Zhao Bin, Xu Deru, Feng Zuohai, Li Zhaolin, Shen Ganfu, Hu Ruizhong, Su Wenchao, Qin Chaojian, Qin Weimin, Fu Xian, Hu Zhigao. 2008. Finding of melt inclusion in garnet from skarn of Shilu iron deposit, Hainan province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 149~160 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Lin Wenwei, Bi Chengsi, Li Daxin, Jiang Congjun. 1990. Skarn deposits of China. Beijing: Geological Publishing House, 1~354 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Lin Wenwei, Zhang Dequan, Li Daxin, Zhao Guohong, Chen Renyi. 1992. Metasomatism and Mineralization and their significance to geological prospecting; study on several important ore-bearing metasomatic rocks. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1~158 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Dong Yongguan, Li Daxin, Bi Chengsi. 2003. Geology, mineralogy, geochemistry, and zonation of the Bajiazi dolostone-hosted Zn-Pb-Ag skarn deposit, Liaoning Province, China. *Ore Geology Reviews*, 23(3-4): 153~182.
- Zhou Taofa, Yuan Feng, Yue Shucang, Liu Xiaodong, Zhang Xin, Fan Yu. 2007. Geochemistry and evolution of ore-forming fluids of the Yueshan Cu-Au skarn- and vein-type deposits, Anhui Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4): 279~303.
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1665~1678 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yu'e. 1997. The characteristics of REEs in some geological bodies of the Tongshan copper ore deposit and their implications. *Geology of Anhui*, 7(2): 51~58 (in Chinese with English abstract).

Mesozoic In-situ and External Skarn Magmatic-Hydrothermal Mineralization in the Anhui Segment of the Lower Yangtze Metallogenic Belt

DU Yangsong¹⁾, CAO Yi¹⁾, ZHANG Zhiyu¹⁾, PANG Zhenshan²⁾, LI Dapeng¹⁾

1) State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083; 2) Development Research Center, China Geological Survey, Beijing, 100037

Abstract

In the Anhui segment of the Lower Yangtze metallogenic belt are distributed not only a great number of contact metasomatic and superimposed and composite skarn deposits, but also some magmatic skarn deposits. Definitions are given for different magmatic skarns and associated deposits, and discussions are held on the characteristics of Mesozoic magmatic skarns and associated deposits in the area, with a focus on an analysis of Mesozoic skarn magmatic-hydrothermal mineralization. Based on emplacement location of skarn magma, magmatic skarn can be divided into in-situ skarn and external skarn, and magmatic skarn deposit correspondingly into in-situ skarn deposit and external skarn deposit. Characteristics are evidently different between the two skarns and associated deposits. Geologically, an in-situ skarn body is closely associated with a crust-mantle syntactic magmatic intrusion and occurs in the contact belt between the intrusion and carbonate wall rock. This in-situ skarn body generally has no chilled or optalic border but contains residuals of wall rock at its margin. These xenoliths were formed by incomplete assimilation of crust-mantle syntactic magma with the wall rock and mostly metamorphosed as hornfels or marble. In contrast, an external skarn body is not associated with a crust-mantle syntactic magmatic intrusion and generally located in fault belt or detachment belt within strata. This external skarn body often has a chilled or optalic border, vesicular structure and garnet or pyroxene cumulate, but contains no residuals of wall

rock at its margin. In addition, clear horizontal zoning occurs in both of the in-situ and external skarn bodies, but their style of zoning is evidently different. Granitoid, hybrid granitoid, rich-Fe skarn, rich-Ca skarn, hybrid carbonate, and carbonate occur in order from crust-mantle syntactic magmatic intrusion through in-situ skarn body to carbonate wall rock, indicating gradual weakening of assimilation and contamination. In contrast, lithologies from the centre to the margin of external skarn body vary from medium-coarse-grained skarn to medium-fine-grained skarn, showing gradual decreasing of crystallization speed with gradual increasing of temperature lowering speed. Mineralogically, in the in-situ skarn, garnet includes andradite, grossular and grossular, and pyroxene does diopside and hedenbergite. In contrast, in the external skarn, garnet is almost andradite, and pyroxene is all hedenbergite. Geochemically, compared with the in-situ skarn, the external skarn is evidently rich in W, F, Rb, Be and Fe, but poor in Al, Sr, Ba, Cu, Pb, Zn, Cr, Co and Ni. Petrographically, both of the in-situ and external skarns have automorphic granular texture and mostly contain melt inclusions. However, compared with those in the in-situ skarn, garnet and pyroxene in the external skarn are more automorphic and have better zonal structure, and melt inclusions indicate evidently lower homogenization temperature. In ore deposit, the in-situ skarn is associated with various deposits such as copper and iron ones, while the external skarn with only iron deposit. A comprehensive analysis is consistent with formation of the in-situ and external skarns by cooling and crystallization of the in situ and external skarn magmas, and supports formation of deposits associated with the in-situ and external skarns by cooling and crystallization of the ore pulp formed through liquation of the skarn magmas and by alteration and replacement of the hydrothermal solution formed through crystalline differentiation of the skarn magmas.

Key words: skarn; magmatic-hydrothermal mineralization; Mesozoic; Anhui segment of the Lower Yangtze metallogenic belt