

邯邢铁矿的蚀变矿化

冯钟燕 赖 勇

(北京大学地质学系)

内容提要: 邯邢地区矽卡岩铁矿的蚀变矿化包括三个阶段: 石榴石-辉石阶段, 形成矽卡岩; 石英-铁氧化物阶段, 沉淀大量磁铁矿, 矽卡岩发生绿泥石化和绿帘石化; 石英-硫化物阶段, 伴随着石英、绿泥石、透闪石、蛇纹石和方解石蚀变, 有少量黄铁矿和黄铜矿等形成。详细的岩矿工作结合着流体包裹体和稳定同位素研究, 对石榴石、透辉石、磁铁矿和方解石沉淀时的温度、压力、矿液组分、 $x_{\text{CO}_2}/x_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 f_{O_2} 等作了估计。

主题词: 邯邢地区 矽卡岩铁矿 蚀变矿化 地质和地球化学特征

邯邢地区是我国著名接触交代铁矿成矿区域之一, 已知铁矿超过60个, 经济价值很大。

这些矿床的形成作用和过程非常相似。伴随着侵入体的冷却, 热和物质逐步从侵入体转入围岩, 产生一系列的蚀变矿化效应。闪长岩浆的侵入和冷凝(相应熔浆物系减压降温变化)的演化趋势是一致的, 矿床蚀变矿化的发展格局也必然一致。

我们曾详细研究过矿山村、五家子、蓁村、磁山、符山、西郝庄、北洛峡、李珍和杨家庄等典型接触交代矿床的成矿过程, 对矿床的蚀变矿化阶段, 矿物组成, 矿物共生顺序, 以及成矿流体在温度、组分、盐度、 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 f_{O_2} 等方面的变化, 做了归纳。本文以邯邢铁矿的蚀变矿化为题, 介绍有关研究成果。测试数据多以西郝庄铁矿为例。

一、一般特征

这一地区的接触交代铁矿的形成深度根据成矿时上覆地层厚度估计大约为 1.5km, 按 1km深相当 $270 \times 10^5\text{Pa}$ 推算, 压力大约是 $400 \times 10^5\text{Pa}$ 。蚀变矿化温度范围688—216℃, 磁铁矿大约在400℃大量集中沉淀。矿体产在燕山期闪长岩(或斑岩)与奥陶系马家沟组石灰岩的接触带中, 主要在外接触交代带中, 内接触交代带中也有。矿石矿物主要是磁铁矿, 赤铁矿不多, 铁品位30—50%, 伴生有黄铁矿、黄铜矿等, 数量很少。脉石矿物主要是矽卡岩矿物, 以石榴石、辉石、绿帘石和绿泥石最为重要。蚀变分带现象不明显, 水热流体活动受构造控制, 不同阶段的矿物叠加在一起, 形成复杂的矿物组合。

成矿闪长岩体一般为灰绿色, 具全晶质等粒结构或斑状结构, 块状构造。在斑状岩石中斑晶是斜长石和角闪石, 基质为细粒结构。主要矿物是中长石和普通角闪石, 次要矿物有黑云母、石英, 副矿物有磷灰石、榍石和磁铁矿等。

中长石: 斑晶的中长石呈厚板状, 多为全自形, 环带结构发育, 以正环带为基本特征, 环带核心部分 An_{45} 号, 边缘部分 An_{37} 号。双晶较发育, 聚片双晶和卡钠复合双晶常见。基

质中的斜长石聚片双晶较少，卡式双晶发育，一般不具环带。全岩中长石含量约65%。

普通角闪石：绿色，自形一半自形长柱状，含量约20%。

黑云母：颜色黄褐，含量约5%。

石英：呈他形充填于其他矿物之间。

副矿物：种类不多，主要为磷灰石、榍石、磁铁矿和锆石。副矿物自形程度最好，常被角闪石包裹。

西郝庄岩体的化学成分(%)：SiO₂ 63.52, TiO₂ 0.37, Al₂O₃ 14.15, Fe₂O₃ 2.83, FeO 2.15, MnO 0.06, MgO 4.44, CaO 4.26, Na₂O 4.15, K₂O 2.44, P₂O₅ 0.26, H₂O 1.00, 合计99.63。

常见次生变化有钠长石化、绿泥石化和绢云母化。斜长石经钠长石化后环带和双晶变得模糊，并往往镶以钠长石边。角闪石和黑云母往往蚀变成绿泥石。绢云母化往往在斜长石内形成鳞片状绢云母。这三种蚀变产物，呈弥漫状分布于整个岩体中，与构造裂隙无关，在取自较深处的岩心标本中，蚀变未见减弱，属于岩浆末期的自蚀变(deuteric alteration)现象，是以水为主的残余蒸气与已形成的岩浆矿物反应的结果，与岩浆期后的热液蚀变有别。

被闪长(斑)岩侵入的主要地层有奥陶系马家沟组和石炭系本溪组和太原组。马家沟组旧称马家沟石灰岩，主要是灰色块状石灰岩层，夹有薄层白云质石灰岩，属正常浅海沉积物，厚约400m。本溪组平行不整合于马家沟组之上。本溪组和太原组的厚度都不大，都是由砂岩、页岩和石灰岩组成的沉积物，属海陆交互相。

二、蚀变矿化

1. 蚀变矿化阶段：接触变质作用之后的接触交代作用，在内外接触带中产生了强烈的蚀变和矿化。接触交代延续的时间长，可分出三个明显的阶段：①石榴石-辉石阶段，形成石榴石和辉石等矽卡岩矿物，虽然没有矿石矿物相伴沉淀，但蚀变结果改变了岩石的物理性

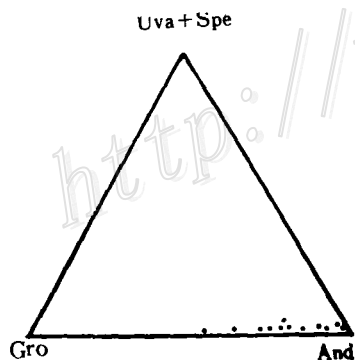


图 1 石榴石端员分子组成

And—钙铁榴石；Gro—钙铝榴石；Uva + Spe—钙铬榴石 + 锰铝榴石

Fig. 1. End member components of garnet.

And—Andradite; Gro—Grossular; Uva + Spe—Uvarovite + Spessartine.

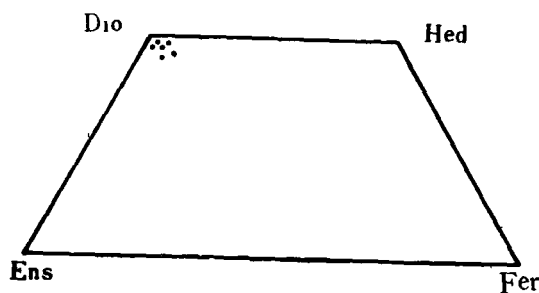


图 2 辉石端员分子组成

Dio—透辉石；Hed—钙铁辉石；Ens—顽辉石；Fer—铁辉石

Fig. 2. End member components of pyroxene.

Dio—Diopside; Hed—Hedenbergite; Ens—Enstatite; Fer—Ferrosillite.

表 1 石榴石湿法化学和电子探针分析结果

Table 1. Wet chemical analyses and electron microprobe analyses of garnet

石榴石湿法化学分析 (%)							石榴石的电子探针分析 (%)						
	002	223-s	223-f	028-g	059-s	059-f		029-(3)	223-1	058-(1)	224-(1)	051-2-(1)	024-(1)
SiO ₂	35.97	37.01	35.53	36.37	36.07	35.85	SiO ₂	37.13	35.96	36.55	37.18	38.59	36.90
TiO ₂	0.03	0.11	0.03	0.04	0.02	0.01	TiO ₂	0.02	0.16	0.12	0.00	0.04	0.00
Al ₂ O ₃	4.57	5.51	2.35	5.04	3.97	1.29	Al ₂ O ₃	5.43	2.16	0.00	4.51	12.63	2.67
Fe ₂ O ₃	23.44	22.94	27.44	22.90	24.42	29.04	Cr ₂ O ₃	0.00	0.04	0.00	0.00	0.13	0.10
FeO	0.20	0.50	0.20	0.30	0.50	0.25	Fe ₂ O ₃	21.58	27.22	28.00	23.61	12.09	25.29
Mn ₂ O	0.34	0.32	0.36	0.32	0.30	0.22	FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	0.28	0.43	0.28	0.67	0.21	0.21	Mn ₂ O	0.46	0.49	0.31	0.57	0.88	0.14
CaO	32.65	32.25	31.20	32.11	32.57	32.50	MgO	0.00	0.09	0.19	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.20	0.23	0.22	0.18	0.15	0.21	CaO	34.13	32.75	34.16	33.67	34.80	34.25
K ₂ O	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	Na ₂ O	0.17	0.21	0.15	0.12	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.11	0.13	0.12	0.11	0.12	0.10	K ₂ O	0.00	0.05	0.00	0.00	0.04	0.00
H ₂ O ⁺	0.36	0.63	0.28	0.59	0.91	0.19	P ₂ O ₅	0.00	0.33	0.41	0.10	0.22	0.18
H ₂ O ⁻	1.54	0.50	1.94	0.86	0.28	0.16	总计	98.92	99.46	99.89	99.76	99.42	99.53
以12个O为基础的分子式中阳离子数目							以12个O为基础的分子式中阳离子数目						
Si	3.022	3.038	3.012	3.033	3.026	3.014	Si	3.065	3.011	3.058	3.059	3.049	3.067
Ti	0.002	0.007	0.002	0.003	0.001	0.001	Ti	0.001	0.010	0.008	0.000	0.002	0.000
Al	0.452	0.533	0.235	0.495	0.393	0.128	Al	0.528	0.213	0.021	0.437	1.176	0.262
Fe ³⁺	1.482	1.417	1.751	1.437	1.542	1.837	Cr	0.000	0.003	0.000	0.000	0.008	0.007
Fe ²⁺	0.014	0.034	0.057	0.021	0.035	0.018	Fe ³⁺	1.341	1.715	1.763	1.462	0.719	1.582
Mn	0.024	0.022	0.026	0.023	0.021	0.016	Mn	0.032	0.035	0.022	0.040	0.059	0.010
Mg	0.035	0.053	0.035	0.083	0.026	0.026	Mg	0.000	0.011	0.024	0.000	0.000	0.000
Ca	2.939	2.836	2.834	2.869	2.928	2.928	Ca	3.019	2.938	3.062	2.968	2.946	3.050
Na	0.033	0.037	0.036	0.029	0.024	0.034	Na	0.027	0.034	0.024	0.019	0.000	0.000
K	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	K	0.000	0.005	0.000	0.000	0.004	0.000
端员组分百分数							端员组分百分数						
And	76.61	72.66	88.96	74.37	79.71	93.50	Uva	0.00	0.14	0.00	0.00	0.43	0.36
Pyr	1.21	1.80	1.20	2.87	0.91	0.89	And	71.73	88.82	98.84	76.97	37.77	85.51
Spe	0.83	0.76	0.88	0.78	0.73	0.53	Pyr	0.00	0.39	0.89	0.00	0.00	0.00
Gro	21.35	24.30	7.05	21.98	18.65	5.08	Spe	1.15	1.20	0.28	1.29	2.06	0.36
Alm	0.00	0.48	1.92	0.00	0.00	0.00	Gro	27.12	9.45	0.00	21.63	59.74	13.78

矿物代号: Alm—铁铝石榴石; Pyr—镁铝石榴石; 其余见图1; 全铁按Fe₂O₃计算

质,脆性和渗透性都加大了,为矿化准备了场地;②石英-铁氧化物阶段,发生在石榴石-辉石阶段之后,石榴石和辉石被绿帘石和石英等矿物交代,并伴随着磁铁矿、赤铁矿沉淀,形成很有价值的铁矿体;③石英-硫化物阶段,发生在石英-铁氧化物阶段之后,形成的矿物有绿泥石、透闪石、蛇纹石、方解石、石英、黄铁矿和黄铜矿等,这个阶段的作用强度不大,未沉淀大量硫化物。

2. 矿物特征:对主要的矽卡岩矿物作过比较详细的研究,限于篇幅,下面只就石榴石和辉石的特征作些介绍。

(1) 石榴石:常成完好晶体,常见菱形十二面体及四角三八面体以及他们的聚形,集

表 2 单斜辉石探针分析和湿法分析结果

Table 2. Electron microprobe analyses and wet chemical analyses of clinopyroxene

	029	051-2-(2)	041	028-3	028-4	041 ^①	028 ^①
SiO ₂	54.06	51.78	54.18	54.04	54.30	52.62	52.73
TiO ₂	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	0.59	1.77	0.00	0.00	0.00	0.84	0.81
Cr ₂ O ₃	0.13	0.08	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.29	2.45
FeO	4.28	8.91	4.63	5.96	4.14	3.00	2.35
MnO	0.37	0.07	0.31	0.42	0.37	0.21	0.24
MgO	14.96	12.26	14.59	14.30	15.24	14.60	15.08
CaO	25.74	23.95	25.53	25.78	25.80	25.32	24.34
Na ₂ O	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.23	0.18
K ₂ O	0.04	0.00	0.05	0.01	0.02	0.01	0.01
P ₂ O ₅	0.32	0.21	0.30	0.26	0.36	0.08	0.07
总计	100.49	99.94	99.59	100.77	100.25	99.31	98.27
以 6 个 O 为基础的阳离子数 (经校正)							
Si	1.980	1.946	1.966	1.954	1.956	1.957	1.968
Ti	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.025	0.078	0.037	0.036	0.036	0.037	0.036
Fe ³⁺	0.013	0.075	0.064	0.069	0.069	0.064	0.069
Fe ²⁺	0.118	0.205	0.079	0.115	0.053	0.093	0.073
Mn	0.011	0.002	0.010	0.013	0.011	0.007	0.008
Mg	0.817	0.687	0.804	0.785	0.834	0.810	0.839
Ca	1.010	0.964	1.011	1.017	1.014	1.009	0.973
Na	0.000	0.055	0.000	0.000	0.000	0.017	0.013
K	0.002	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000
端员组分百分数							
Ac	0.00	0.055	0.00	0.00	0.00	1.71	1.37
Ti	0.00	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tsch	1.21	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wo	49.79	45.95	49.37	48.97	49.09	48.48	47.20
En ₅	44.33	37.76	43.2	39.60	42.58	40.59	42.69
Fer	5.96	13.73	4.06	5.80	2.96	5.01	4.12

①湿法分析结果

合体常为粒状和致密块状。粒度 0.1—0.5cm。颜色多黄褐和黄绿。薄片均质，突起高，有平行 (110) 的裂理，环带构造发育，矿物化学成分见表 1。可见石榴石基本上是钙铁石榴石 (图 1)。

(2) 辉石：为透辉石 (图 2)，主要呈粒状集合体，浅绿色。薄片无色透明，两列解理清楚，突起高，消光角 α/c 40° 左右，有双晶纹， $+2V=50^\circ$ 左右。透辉石的湿法分析和探针分析的结果见表 2。

3. 矿物生成顺序和共生组合：根据矿物之间的相互关系、矿物晶形的完整程度和矿物之间的穿插交代关系，建立了矿物的生成顺序和共生组合，如表 3 所示。

表 3 矿物生成顺序和共生组合

Table 3. Formation sequence and paragenetic association of minerals

矿 物	接触变质	接 触 交 代		
		石榴石— 辉石阶段	石英—铁氧 化物阶段	石英—硫 化物阶段
硅灰石	——			
钙铁石榴石	——	——		
透辉石	——	——		
符山石	——	——		
方柱石	——	——		
绿帘石	——		——	
石英	——		——	——
磁铁矿	——		——	
赤铁矿	——		——	
绿泥石	——			——
透闪石	——			——
蛇纹石	——			——
方解石	——			——
黄铁矿	——			——
铜蓝	——			——
黄铜矿	——			——

三、地球化学

在成矿作用地球化学方面,研究过矿物包裹体,获得温度、盐度、气液相成分、二氧化碳和水的相对密度以及氧逸度等方面的资料,测得有关岩石、矿物和包裹体的碳、氢、氧同位素组成。蚀变矿化三大阶段的代表性矿物是石榴石、透辉石、磁铁矿和方解石等,矿物包裹体和同位素组成研究也围绕这些矿物进行。

1. 矿物包裹体温度和盐度:矿区矽卡岩矿物中流体包裹体比较发育,但个体都比

较小,长轴多在10 μ m左右,超过25 μ m者少见。石榴石中的包裹体多为长条状,长轴平行石榴石的生长环带;透辉石中矩形的居多,长边略大于短边;方解石中的包体有矩形和菱形两种,黝帘石中包裹体比较规则,大都为长条状。

包裹体有两类:一类是盐度中等的包裹体,有两个相,主要由水组成,有一个水蒸气的气泡,占包裹体的2—25%,以占10%左右的特多;另一类是含子晶的包裹体,含盐量可以超过50%,除立方体石盐外,偶尔子矿物还有钾石盐,子晶体积占包裹体的5—10%,溶化温度从236—365℃不等。

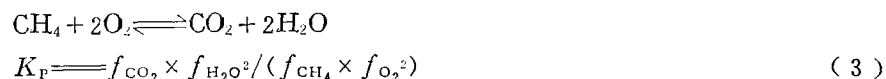
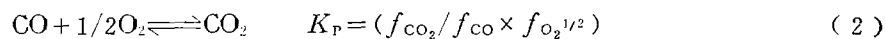
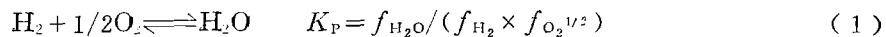
石榴石、透辉石、方解石和黝帘石等矿物的均一温度和冰点见表4。

石榴石有两世代:早期石榴石的形成温度为662—688℃左右,盐度为57wt.%NaCl;晚期石榴石的温度为402—462℃,盐度43—38wt.%NaCl。透辉石的温度范围为576—589℃,盐度范围52—34wt.%NaCl。方解石的均一温度范围在220—298℃之间,方解石包裹体一般不含子晶,根据冰点估计,盐度范围为21—12%。黝帘石的均一温度均为216℃,盐度约为5wt.%NaCl。

2. 矿物包裹体成分:为了了解成矿流体的性质,测定了透辉石和磁铁矿原生包裹体的气相和液相成分(表5)。

成矿流体的氧逸度(f_{O_2})是流体重要特征之一,对矿物生成影响很大。

根据包裹体气相组分的特点,共存气相间有下列平衡关系:



应用平衡关系式、有关热力学数据以及各组分的摩尔分数,可以算出 f_{O_2} 。

透辉石(580℃)形成时成矿流体的氧逸度(f_{O_2})= 5.89×10^{-22} bar,磁铁矿(300℃)形

表 4 流体包裹体测温数据

Table 4. Thermometric data of fluid inclusions

样号	矿物名称	包体类型	采样位置	各相相对含量(%)			均一温度(°C)			盐度 (wt.%NaCl)
				<i>v</i>	<i>s</i>	<i>l</i>	固相消失	气相消失	气泡复现	
021	石榴石	I	147m中段	2		98		688		
		III	147m中段	5	8	87	510	600		57.46
		III	147m中段	8	4	88	502	570		56.54
058	石榴石	III		15	10	75	365.4	>485		43.00
		III		15	5	80	355	518		42.13
		III		10	5	85	350	495		41.75
		I		5		95		498		
		III		5	5	90	320	310		39.37
051-1	透辉石	III	115m中段	10	2	88		590	580	
		I	115m中段	15		85		>600		
		I	115m中段	2		98		539.8	520	
		I	115m中段	4		96		599.9		
		I	115m中段	8		82		583.8		
		I	115m中段	15		85		574.8		
		I	115m中段	10		90		582.0		
		III	115m中段	10	8	82		569.7		
		I	115m中段	8		92		576		
		I	115m中段	6		94		597		
		I	115m中段	10		90		524.2		
		I	115m中段	15		85		550.3		
041	透辉石	III	155m中段	5	5	90	439	559		49.80
		III	155m中段	8	5	87	236.1	587.7		33.80
		I	155m中段	2		98		582.8		
		I	155m中段	5		95		551		
		I	155m中段	10		90		598.8	564.6	
058	方解石	I		2		98		403.3		
		I		2		98		383.9		
		I		5		95		203.8		
		I						214.8		
		I						218.3		
024	方解石	I						220		
011-2	黝帘石	I		10		90		211	208.1	
	黝帘石	I		8		92		212.6	209.4	

成时成矿流体的 f_{O_2} 为 1.34×10^{-34} bar。

成矿流体中 CO_2 的含量也明显地影响着流体的性质。用红外光谱分析了石榴石和透辉石包裹体中水和二氧化碳的相对含量。包裹体中的 H_2O 在 $3400cm^{-1}$ 、 CO_2 在 $2350cm^{-1}$ 有吸收谱带，它们分别属于 H_2O 和 CO_2 的伸缩振动，据此选定扫描范围为 $2000cm^{-1}$ — $4000cm^{-1}$ 。吸光度 A 和浓度成正比：

表 5 透辉石、磁铁矿流体包裹体气、液、相成分

Table 5. Gas-fluid composition of fluid inclusions in diopside and magnetite

	CO ₂	H ₂ O	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO
透辉石	457.400	2818.120	1.807	0.000	4.998	2.649	33.234
041	(6.137×10 ⁻²)	(9.244×10 ⁻¹)	(5.33×10 ⁻³)	0	(1.054×10 ⁻³)	(8.691×10 ⁻⁴)	(7.0076×10 ⁻³)
磁铁矿	150.470	3043.570	0.000	0.000	0.317	0.770	2.365
061	(1.981×10 ⁻²)	(9.794×10 ⁻¹)	0	0	(6.56×10 ⁻⁵)	(2.478×10 ⁻⁴)	(4.90×10 ⁻⁴)
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
透辉石	115.20	1.60	78.40	161.60	6.56	32.56	952.90
041	(3.149×10 ⁻³)	(2.573×10 ⁻³)	(1.230×10 ⁻³)	(4.18×10 ⁻³)	(2.17×10 ⁻⁴)	(5.775×10 ⁻⁴)	(6.237×10 ⁻³)
磁铁矿	15.30	3.90	3.30	9.00	0.09	11.67	93.15
061	(3.928×10 ⁻⁴)	(5.890×10 ⁻³)	(4.862×10 ⁻⁵)	(2.187×10 ⁻³)	(2.797×10 ⁻⁶)	(1.944×10 ⁻⁵)	(5.726×10 ⁻⁴)

气相组分单位为 (mg/kg样品), 液相组分单位 (μg/10g样品); 括号内为组分的克分子分数, 其中液相将H₂O计算在内

$$A = \log T^0 / T$$

式中 A 为峰顶吸光度, T^0 和 T 分别为背景和峰顶处的透过率。根据 (表 5) 样品 041 包裹体气液成分分析结果对比包裹体红外分析结果, 确定了比例系数 $K = 0.10365$, 因而:

$$K(A_{\text{CO}_2}/A_{\text{H}_2\text{O}}) = x_{\text{CO}_2}/x_{\text{H}_2\text{O}}$$

把矿物包裹体红外光谱测得的 $A_{\text{CO}_2}/A_{\text{H}_2\text{O}}$ 乘以 0.10365, 即为该包裹体中的 $x_{\text{CO}_2}/x_{\text{H}_2\text{O}}$, x_{CO_2} 和 $x_{\text{H}_2\text{O}}$ 是 CO_2 和 H_2O 的摩尔分数。

石榴石 (Ga) 和透辉石 (Di) 包裹体的红外分析结果见表 6。

表 6 石榴石透辉石包裹体红外光谱分析结果

Table 6. Ultrared spectrometric analyses of inclusions in garnet and diopside

样号	矿物	H ₂ O			CO ₂			$x_{\text{CO}_2}/x_{\text{H}_2\text{O}}$
		T^0	T	A	T^0	T	A	
074	Ga(75)*	9.37	3.94	0.3766	10	6.53	0.1847	0.0508
075	Di(75)**	2.67	0.51	0.7186	8.98	6.85	0.1174	0.0169
051-2	Di(147)	5.63	3.74	0.1776	9.19	8.17	0.0511	0.0298
052	Ga(147)	7.12	4.29	0.2202	9.29	5.67	0.2145	0.1010
051-1	Di(147)	5.75	4.01	0.1557	9.21	8.15	0.0532	0.0354
004	Di(147)	6.73	3.82	0.2462	7.99	6.53	0.0874	0.0368
017	Di(147)	5.43	4.01	0.1313	8.46	7.24	0.0676	0.0534
018	Di(155)	5.65	3.84	0.1677	9.29	8.66	0.0305	0.0188
041	Di(155)	7.24	4.88	0.1714	9.45	7.28	0.1130	0.0683
029	Ga	8.11	5.51	0.1677	9.61	8.98	0.0295	0.0182
224	Ga	8.50	4.72	0.2553	9.92	7.95	0.0960	0.0390
058	Ga	8.50	5.35	0.2009	9.84	8.11	0.0841	0.0434
028	Ga	7.99	4.92	0.2106	9.27	8.29	0.0487	0.0240
024	Ga(155)	8.50	4.57	0.2700	9.80	7.05	0.1433	0.0550
029	Di	5.31	2.79	0.2791	9.92	8.19	0.0833	0.0309

* Ga为石榴石; ** Di为透辉石

可以看到从石榴石经透辉石到磁铁矿, x_{CO_2} 逐渐降低。

3. 氧同位素组成: 研究了石榴石、透辉石、磁铁矿、方解石、石灰岩和闪长斑岩的氧同位素组成。

石榴石和透辉石、磁铁矿、方解石是三大蚀变矿化阶段的代表性矿物。它们结晶时与成矿流体处于同位素平衡, 利用公式 (Bottinga, 1973; Becker, 1970; Taylor, 1977; O'Neil, 1969等) 计算出与石榴石、透辉石、磁铁矿和方解石平衡的流体水的 $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ 分别为 7.64、7.75、11.50、3.08; 数字反映了不同蚀变矿化阶段成矿流体氧同位素的特点。

4. 氢同位素组成: 测定了石榴石、透辉石、磁铁矿包裹体水的 δD 值 (表 7)。

表 7 矿物和包裹体的氧氢碳同位素组成(‰)

Table 7. Oxygen, hydrogen and carbon isotopic composition of minerals and inclusions

样品编号	矿物、岩石名称	矿物的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	计算的与矿物平衡的水 $\delta^{18}\text{O}$	包裹体水的 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$	包裹体、矿物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	$t(^{\circ}\text{C})$
024	石榴石	6.88	7.63	-121.1	-5.97	614
028-g	石榴石	6.89	7.64	-117.9	-6.98	688
041	透辉石	8.15	8.33	-75.8	-7.73	582
028-d	透辉石	6.99	7.17	-79.6	-7.37	580
070-f	磁铁矿	4.10	11.1	-59.8	-11.53	405
061	磁铁矿	4.14	11.89	-51.9	-10.57	300
042	方解石	10.54	4.14		-7.41(Cc) ^②	260
044	方解石	10.18	2.02		-6.98(Cc)	235
009	灰岩	22.58			-0.94(Cc)	
079	闪长斑岩	9.77				
L217①	石榴石			-111.3		
B298①	透辉石			-119.6		
405①	磁铁矿			-61.7		
300①	方解石			-61.0		

①为西安里铁矿矿物包裹体的同位素值, 引自李宁 (1986) 论文; ②数据右下方有括号者为矿物的同位素值

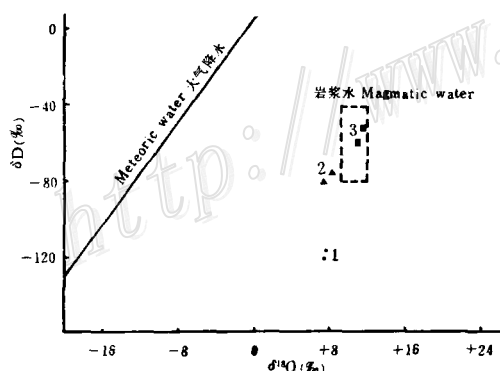


图 3 石榴石 (1)、透辉石 (2)、磁铁矿 (3) 包裹体水 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 相关图

Fig. 3. $\delta^{18}\text{O}$ - δD correlogram of inclusion water of garnet (1), diopside (2) and magnetite (3).

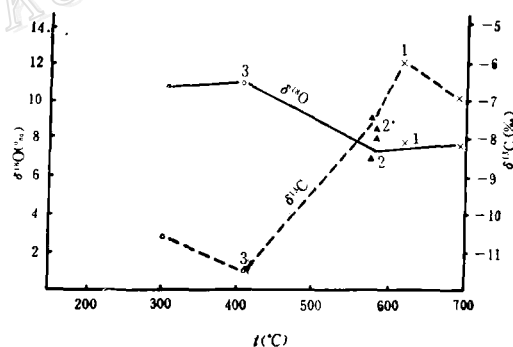


图 4 石榴石 (1)、透辉石 (2)、磁铁矿 (3) 包裹体水 t - $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ 相关图

Fig. 4. t - $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ correlogram of inclusion water of garnet (1), diopside (2) and magnetite (3).

在图3标绘了磁铁矿包裹体水在 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 相关图上相应的位置。虽然对应石榴石和透辉石的点落在一般认为的岩浆水范围之外,但从矿床地质特征可以确认形成石榴石和辉石的流体只能是岩浆水。李宁研究过西安里铁矿床石榴石、透辉石、磁铁矿和方解石等矿物包裹体水的 δD ,也得到类似的结果。赖勇提出很可能是早期的脱碳反应和氧化反应使矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 和流体的 δD 偏低。

5. 碳同位素组成: 研究过石榴石、透辉石、磁铁矿等矿物中包裹体的 $\delta^{13}\text{C}$,以及方解石矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 如表7。图4反映不同矿化阶段 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化情况。

四、成因讨论

蚀变矿化作用来自火成侵入体,最好的地质证据是蚀变矿化都发生在侵入体的突起部位和火成岩内的石灰岩捕掳体中。地球化学资料也支持这一结论。

邯邢地区接触交代铁矿的成矿过程相同,先是接触变质,然后是接触交代,包括石榴石-辉石、石英-铁氧化物和石英-硫化物三个阶段,这些事件都是侵入体冷却过程中转移热和物质引起的效应。闪长岩侵入体冷凝(长英质硅酸盐熔浆降压降温下发生变化)演化趋势是一致的,矿床的形成过程也必然基本上相同。

蚀变矿化的阶段以及不同阶段引起蚀变矿化的水热流体在温度、成分、 CO_2 和 H_2O 的相对浓度、盐度、 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 f_{O_2} 等方面的特点,归纳于表8。

表8 成矿过程中温度压力和组分变化

Table 8. Variation in temperature, pressure and composition in the ore-forming process

	石榴石-辉石阶段		石英-铁氧化物阶段	石英-硫化物阶段
	钙铁榴石	透辉石	磁铁矿	方解石
温度($^{\circ}\text{C}$)	640	570	352	230
压力(Pa)	400×10^5	400×10^5	400×10^5	400×10^5
$x_{\text{CO}_2}/x_{\text{H}_2\text{O}}$	0.1010	0.0683	0.0202	
盐度(wt. %)	57	43	33	16
包体液相成分($\mu\text{g}/10\text{g}$)		$\text{Na}^+ 115.20, \text{K}^+ 1.60, \text{Ca}^{2+} 78.40, \text{Mg}^{2+} 161.60, \text{F}^- 6.56, \text{Cl}^- 32.56, \text{SO}_4^{2-} 952.90$	$\text{Na}^+ 15.30, \text{K}^+ 3.90, \text{Ca}^{2+} 3.30, \text{Mg}^{2+} 9.00, \text{F}^- 0.09, \text{Cl}^- 11.67, \text{SO}_4^{2-} 93.15$	
包裹体气相成分(mg/kg)		$\text{CO}_2 457.40, \text{H}_2\text{O} 2818.12, \text{H}_2 1.81, \text{O}_2 0, \text{N}_2 4.99, \text{CH}_4 2.65, \text{CO} 33.23$	$\text{CO}_2 150.47, \text{H}_2\text{O} 3043.57, \text{H}_2\text{O} 0, \text{O}_2 0, \text{N}_2 0.32, \text{CH}_4 0.77, \text{CO} 2.37$	
$\delta\text{D}(\text{‰})$	-120	-78	-56	
$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	7.6	7.8	11.5	3.1
$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	-6.5	-7.6	-11.1	
f_{O_2}		5.89×10^{-22}	1.34×10^{-34}	

注:详细数据可参考赖勇学位论文《河北西邯庄铁矿地质特征和成因》

ALTERATION-MINERALIZATION OF SKARN IRON DEPOSITS IN HANXING (HANDAN-XINGTAI) AREA

Feng Zhongyan and Lai Yong

(*Peking University, Beijing*)

Abstract

Hanxing area is a famous skarn iron metallogenic province in China.

The alteration-mineralization event of the skarn iron deposits in this area included three stages: (1) garnet-pyroxene stage, during which magmatic hydrothermal fluids reacted upon limestone (marble), forming skarn dominated by andradite and diopside, (2) quartz-iron oxide stage, following the formation of the garnet-pyroxene skarn and accompanied by the hydrous alteration of early minerals; during this stage large amounts of magnetite, hematite, quartz and epidote precipitated; (3) quartz-sulfide stage, during which sulfides precipitated after the deposition of iron oxides, and the mineral assemblage of quartz, chlorite, tremolite, serpentine, calcite, pyrite and chalcopyrite was formed.

Through detailed field investigation and laboratory analysis and determination combined with fluid inclusion and stable isotope studies, we estimated temperature, pressure, composition, $X_{\text{CO}_2}/X_{\text{H}_2\text{O}}$, salinity, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ and f_{O_2} of hydrothermal fluids in the process of alteration-mineralization, and the data obtained are given in the text.

~~~~~  
(上接96页 continued from p.96)

tin deposits are the main part of the Sanjiang tin metallogenic domain, and their regional settings are related closely to the evolution of Paleo- and Neo-Tethys tectonics.

This paper has made a detailed analysis of the granitoids in Tengchong-Lianghe area and for the first time divided them into three rock groups, eight superunits, twenty-eight units and a number of intrusive bodies. In the light of petrologic evolution, geochemistry, assemblages of individual minerals and accessory minerals, REE and isotopic composition, spatial distribution and ore potentiality, the paper has studied the units and superunits.

A new scheme is put forward for the classification of primary tin deposits and the metallogenic series. In addition, some preliminary conclusions of the Dianxi tin deposits are drawn which show distinctive regional features.