

凤太泥盆纪拉分盆地中硅质铁白云岩-硅质岩特征及成岩成矿方式*

方维萱^{1,3} 刘方杰^{2,3} 胡瑞忠¹ 黄转莹^{1,3}

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室, 贵阳 550002

2. 西北大学地质学系, 西安, 710069

3. 西北有色金属地质勘查局, 西安, 710054

1. Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

3. Northwest Geological Exploration Bureau, CNNC, Xi'an 710054, China.

1999-10-15收稿, 2000-06-10改回.

Fang Weixuan, Liu Fangjie, Hu Ruizhong and Huang Zhuanying. 2000. The characteristics and diagenetic-metallogenic pattern for cherts and siliceous ferrodolomitites from Fengtai apart-pull basin, Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 700-710

Abstract Based on the studies of petrology, mineralogy, geochemistry for the cherts and siliceous ferrodolomitites from Fengtai apart-pull basin, Qinling Orogen, geological and geochemical characteristics for the hydrothermal rocks have been discussed. Cherts with contents of (FeO+ Fe₂O₃+ MgO) less than 10% contains SiO₂ more than 70% while siliceous ferrodolomitites with contents of (FeO+ Fe₂O₃+ MgO) more than 20% contains SiO₂ from 30% to 50%. The results of research have shown that diagenetic-metallogenic pattern of these hydrothermal rocks includes syndedimentation of the hydrothermal water, syndedimentation-replacement of the hydrothermal water, syndedimentation of the hydrothermal water-mixing, explosion and fluid pressure-fracturing of the hydrothermal water, and filling-replacement of the hydrothermal water.

Key words Siliceous ferrodolomitites, Cherts, Geological and geochemical characteristics, Diagenetic-metallogenic pattern, Qinling, Devonian

摘要 从岩石学、矿物学、地球化学等方面研究总结秦岭凤太地区泥盆纪硅质铁白云岩-硅质岩的地质地球化学特征。硅质岩类中, SiO₂ > 80%, (FeO+ Fe₂O₃+ MgO) < 10%; 硅质铁白云岩类中, SiO₂ 为 30%~50%, (FeO+ Fe₂O₃+ MgO) 大于 20%。提出该类热水沉积岩由热水同生沉积作用、热水混合同生沉积作用、热水同生沉积交代作用、热水爆炸-液致裂作用及热水充填-交代作用形成。

关键词 硅质铁白云岩; 硅质岩; 地质地球化学特征; 成岩成矿方式; 秦岭; 泥盆纪

中图法分类号 P588.24

对于硅质岩的研究已在国内外受到重视 (Meyers W J, 1977; Yamamoto K, 1987; Iijima A *et al.*, 1983; Simonson BN, 1985; 涂光炽等, 1988; 陈先沛等, 1992; 方维萱, 1999a)。秦岭泥盆系是我国重要的银、多金属成矿集中区, 已探明的厂坝超大型铅锌矿床一处, 银洞子大型银多金属矿床; 大型-中型铅锌矿床十余处, 如铅洞山、手搬崖、八方山、银母寺等。这些矿床均产于三级热水沉积盆地之中, 含矿地

层是由一套热水沉积岩等组成。研究其特征、成岩成矿方式不但具有重要的理论意义, 而且有很大的实用价值。前人研究多以集中在秦岭造山带中的硅质岩特征及其成因 (祁思敬等, 1991; 王集磊等, 1996; 王相等, 1996; 薛春纪, 1997)。对成岩成矿方式讨论很少。硅质铁白云岩-硅质岩-硅质灰岩为密切共生的岩石系列, 本文对这类热水沉积岩的特征及成岩成矿方式进行系统讨论。

* 本文由国家重大基础研究规划项目 (1999043200)、国家杰出青年科学基金 (49925309) 及中国有色金属工业总公司人才培养基金资助。

第一作者简介: 方维萱, 男, 1961年生, 博士后, 高级工程师, 矿产勘查, 沉积盆地与地质流体研究, E-mail: on@public1.gy.gz.cn

1 地质特征

陕西省凤县太白县地区泥盆系金-多金属成矿带是我国重要的成矿集中区之一,已发现大型铅锌矿床三处,中型矿床四处,超大型金矿床一处,大型金矿床一处。凤太地区主要出露泥盆系,其次为少量石炭系-三叠系。中泥盆统古道岭组下岩段主要为陆源砂岩、岩屑砂岩及砂页岩,属一套陆源中-细碎屑岩;上岩段主要为碳酸盐岩组成,岩性有生物灰岩、含长英质碎屑灰岩、白云质灰岩及含炭灰岩等。上泥盆统星红铺组岩性是以粉砂岩、砂页岩为主的浊积岩系,属钙质细碎屑岩。在中泥盆统古道岭组与上泥盆统星红铺组的过渡部位,分布着一套热水沉积岩,是铅锌矿床的赋矿部位。凤太泥盆纪一级拉分盆地地位于秦岭微板块北半部,属板内拉分盆地,其南界同生断层为留坝剥离断层,北界同生断层为商丹带(西段),中部凤县凤镇山阳同生断层及酒奠梁镇安板岩镇两条 NNW 向同生断裂的西段分别从拉分盆地中通过,为穿盆同生断裂(crossing-basin synfaults)(Tim Dooley and Ken McClay, 1997),是控制三级热水沉积盆地的主控因素(方维萱, 1999b)。其西河 SN 向同生断裂将凤太盆地分割为东部太白二级盆地及西部凤县二级盆地,二级盆地范围经遥感解译可较清楚地圈定。银母寺中型铅锌矿床、八卦庙超大型金矿床及八方山二里河大型多金属矿床位于凤县二级盆地东北缘上,产于银母寺-八卦庙-八方山拉分式三级构造热水沉积成矿盆地。铅硐山、东塘子两个大型铅锌矿床及手搬崖、银硐梁、峰崖三个中型铅锌矿床位于凤县二级盆地西南缘上,产于铅硐山-双石铺复合断陷型三级构造热水沉积盆地中。铅锌矿床的赋矿层位是一套深水-半深水滞流还原盆地相,热水沉积岩有硅质岩、硅质铁白云岩、硅质灰岩,共生岩石有炭质灰岩、炭质泥灰岩、含炭生物碎屑灰岩、生物灰岩、铁白云石细碎屑岩、炭质泥岩等。

2 热水沉积岩特征

2.1 热水沉积建造特征

沉积建造作为岩石地层组合在研究沉积盆地、找矿预测、事件地层学研究方面有广泛的应用(孟祥化等, 1993)。热水沉积建造是沉积盆地内由热水同生沉积-交代作用形成的岩石和微相共生组合体,是区域性热水沉积-交代事件所形成的特定层序和格架。凤太泥盆纪拉分盆地中有广泛分布的热水沉积建造,由如下几类岩石系列组成:硅质岩-铁白云石-硅质岩-硅质铁白云岩-硅质菱铁矿-铁白云岩-铁白云岩-硅质灰岩;硫化物硅质角砾岩-硅质铁白云石角砾岩-硫化物硅质铁白云石角砾岩。它们是铅锌矿的含矿岩石,硅质铁白云岩中赋存有铜矿体。其热水沉积微相有(图 1):①热水同生沉积微相,单一成分热水因物化条件的改变而发生同生沉积,由硅质岩、铁白云岩等组成。②热水混合同生沉积微相,由两种

不同成分热水混合造成了化学骤沉,包括含矿铁白云石硅质岩、含矿炭硅质岩、含矿硅质岩、含矿硅质铁白云岩及硅质铁白云岩-硅质灰岩。③热水同生沉积交代微相,由两种不同成分的热混合,并对已形成的沉积物软泥发生同生交代作用,包括硅质铁白云岩化(生物)灰岩、硅质菱铁矿铁白云岩、硅化灰岩、铁白云质灰岩、微晶石英岩。④热水喷溢通道微相(或称热水液致裂微相),先形成的热水沉积岩封存热水喷溢通道,其后沿热水喷溢通道附近发生后期热水液致裂和热水爆炸作用,形成各种角砾岩,如含矿硅质角砾岩、含矿硅质铁白云石角砾岩等,是热水喷溢通道的标志。

2.2 岩石学特征

(1) 硅质铁白云岩-硅质菱铁矿-铁白云岩-铁白云岩: 岩石为深灰色、灰色,风化后呈褐红色,块状、层纹状、条带状构造,铁白云石含量在 30%~75%,呈半自形粒状。石英含量在 10%~60%,呈它形粒状、皱晶状、板条状,构成似交织结构,菱铁矿含量 10%~30%,局部含量较高。次要矿物有铁方解石、绢云母、草莓状黄铁矿、毒砂。微量矿物有石膏、高岭石、方铅矿、浅棕色闪锌矿。硅质铁白云岩是广泛分布的一种岩石,铁白云石、菱铁矿、石英等矿物组成,铁白云石交代方解石、石英交代菱铁矿,交代结构发育。发育在多金属矿层之下的硅质铁白云岩中交代结构十分发育。沿走向上相变为硅质岩、硅质灰岩。

(2) 硅质岩为灰黑色,厚层块状、层纹状构造,致密坚硬,主要组成矿物为微晶石英和网脉状石英,含少量的铁白云石、方解石、绢云母、炭质。局部炭质可高达 1%~5%,形成炭硅质岩,如铅硐山 II 号矿体上盘产出的有一层含矿炭硅质岩,含 5%炭质。石英晶粒细小,粒径 0.01mm~0.03mm,它形-半自形,含有碳酸盐矿物包体和尘点状炭质,部分石英呈短柱状,粒度 0.05mm~0.03mm。八方山多金属矿床中有大量的网脉状石英穿插分布于硅质岩中,被称之为微晶石英岩。在纵向上,硅质岩与下伏的生物灰岩界限清楚。在横向上,沿走向变为硅质生物灰岩。

(3) 含矿硅质角砾岩-黄铁矿-硅质铁白云石角砾岩,为角砾状构造、网脉状构造,角砾主要为硅质岩、铁白云岩。胶结物主要为硫化物,一般硫化物含量在 5%~10%,局部富矿地段硫化物可达 30%,主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿。黄铁矿-硅质铁白云石角砾岩在八方山、银母寺矿床内发育,角砾为铁白云石、铁白云石-石英,呈悬浮状由含浸染状黄铁矿、碳酸盐质及硅质胶结。石英-铁白云石呈角砾状,由泥质(绢云母)、微晶石英、微晶铁白云石胶结。这些角砾岩是热水喷溢通道上部液致裂、热水爆炸作用所形成的角砾岩化。含矿硅质角砾岩可能是液致裂作用而角砾岩化,并伴随着矿质大量沉淀,硫化物呈裂隙式胶结硅质岩角砾。空隙式胶结的含矿硅质角砾岩、悬浮式胶结的黄铁矿-硅质铁白云石角砾岩可能为热水爆炸作用而角砾岩化。

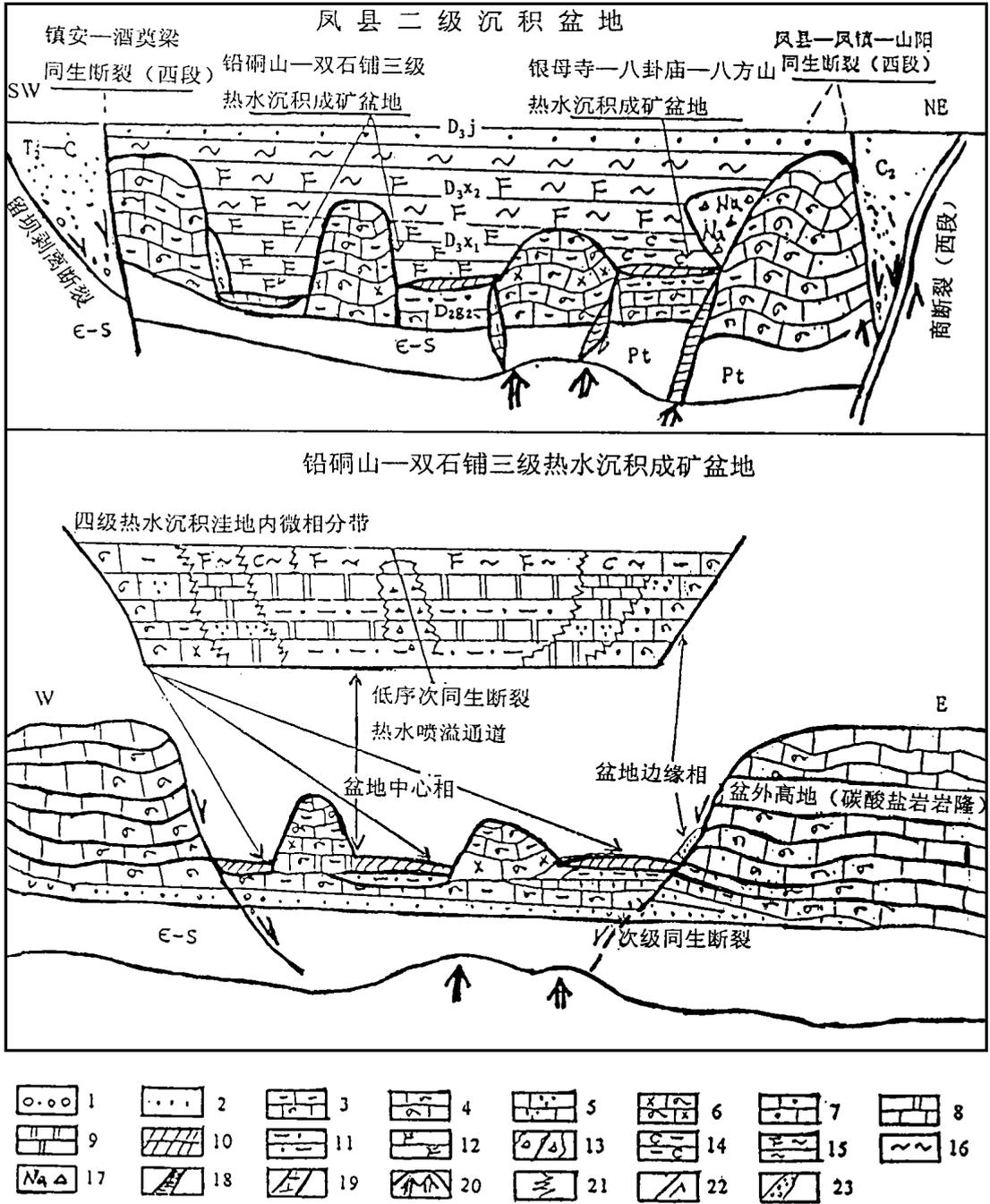


图 1 凤太泥盆纪三级盆地中构造-热水沉积岩相时空分布与演化示意图

1-含砾砂岩; 2泥质粉砂岩; 3含炭生物灰岩; 4生物(礁)灰岩. a-热水同生交代微相; 5铁白云质灰岩; 6硅化铁白云石化生物灰岩; 7硅质灰岩. b-热水混合同生沉积微相; 8铁白云质硅质岩; 9硅质铁白云岩; 10硫化物岩微相(含矿硅质铁白云岩 含矿菱铁矿铁白云岩). c-热水同生沉积微相; 11硅质岩; 12铁白云质泥岩(干枚岩) 铁白云岩. d-热水液致裂微相; 13含矿硅质角砾岩-含矿硅质铁白云石角砾岩. e-封闭、滞水盆地相(矿体覆盖保存层); 14炭质泥岩(干枚岩); 15-(含炭)铁白云质泥岩(干枚岩); 16绿泥石泥岩(干枚岩). f-热流体隐爆岩相; 17钠长石碳酸(角砾)岩 铁白云石钠长石(角砾)岩. g-热流体充填岩相; 18钠长石碳酸岩脉; 19基性岩脉-闪长玢岩脉; 20盆地下伏热源区; 21微相相变界线; 22同生断层及运动方向; 23-油积岩层序; C₂-中石炭统; T₂-P₂-C₂-中三叠统-二叠系-中石炭统; D_{3j}-上泥盆统九里坪组; D_{3x2}-上泥盆统星红铺第二岩性段; D_{3x1}-上泥盆统星红铺组第一岩性段; D_{2g2}-中泥盆统古道岭组第二岩性段; D_{2g1}-中泥盆统古道岭组第一岩性段; E-S-泥盆纪沉积盆地地下伏寒武志留系; Pt-元古代富钠火山岩.

Fig. 1 Sketch map of time-dimension and evolution for tectonic-hydrothermal sedimentary facies in Fengtai Devonian three-order basin

2.3 矿物学特征

在八方山-二里河及铅硐山大型铅锌矿床及银母寺、手搬崖、银硐梁等中型铅锌矿床中,硅质岩及硅质铁白云岩常含有稳定的泥质纹层及炭质纹层。炭质呈粉末状、非晶质纹层状聚集,经后期(印支期)构造作用后,常沿炭质纹层产生滑动面,在构造滑动面上的炭质多已结晶形成石墨化镜面构造。此外,炭质可呈尘点状浸染分布于硅质岩及硅质铁白云岩中。炭质富集时,常有黄铁矿、方铅矿及闪锌矿等硫化物呈草莓状产出,显示在热水同生沉积过程中,有机质(炭质)可能参与成矿作用。泥质成分多已结晶形成绢云母,在镜下绢云母的消光方位大致相同,呈鳞片状组成了泥质纹层。石英主要呈微晶状石英,显示快速堆积的特点。短柱状微晶石英与它形微晶状石英组成了显微交织构造,显示热水同生沉积的特点。硫化物(主要为黄铁矿、闪锌矿)可呈浸染状产于硅质岩-硅质铁白云岩中,硫化物集中时,出现条带状、条纹状

构造及致密块状硫化物。与硅质岩同时形成的浅棕色闪锌矿中含 Hg、Cd 较低,呈稀疏浸染状、浸染状产出;而后期改造(印支期)形成的穿层硫化物-石英脉中的闪锌矿呈黑色,含 Fe、Cd、Hg 较高(方维萱, 1999)。黄铜矿、黝铜矿主要产于硅质铁白云岩、铁白云岩及穿层分布的硫化物-铁白云石脉中,与铁白云石、菱铁矿、铁方解石等矿物有密切的共生关系,说明铜的富集成矿主要与富 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} - CO_3^{2-} 质热水成岩成矿作用有关。银母寺铅锌矿床中尚发现了少量的钠长石晶屑。碳酸盐矿物有菱铁矿、铁白云石、白云石、方解石、含铁白云石、铁方解石、铁云石、锰铁白云石等。从表 1 看:在柞水断陷盆地中铁白云石含 MgO 高,含 FeO 低,并有大量菱铁矿形成(大西沟菱铁矿床)。凤太拉分盆地,主要为铁云石、高 FeO 而低 MgO ,反映形成温度比柞山断陷盆地高。碳酸盐矿物中均含有一定量的 MnO ,这是热水矿床发育 Mn 异常的主要原因所在。

表 1 热水沉积岩中碳酸盐矿物的电子探针分析结果 (wt%)

Table 1 Results of electronic probe analysis for carbonate minerals from hydrothermal rocks in Fengtai apart-pull basin (wt%)

编号	矿床	测定矿物	MgO	CaO	FeO	SrO	MnO	BaO	Au	Pt	Pb	Pd	Cu	Σ	资料来源
PD111	铅硐山铅锌矿床	铁云石	3.53	30.22	21.21	0.21	0.69	0.11	0.00	0.00	0.16	0.01	0.00	56.15	
PD112		铁云石	4.96	28.43	20.91	0.30	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	55.46	本
PD15		铁云石	5.17	28.88	23.19	0.14	0.95	0.00	0.25	0.23	0.08	0.04	0.03	58.46	
DX1	大西沟菱铁矿	菱铁矿	5.49	0.30	49.59		1.80		0.00	0.20				58.06	
Y52	银硐子	铁白云石	4.51	26.38	19.89	0.42	4.56	0.03	0.12				0.05	56.33	文
1130-B	银多金属矿	方解石	0.10	56.56	1.53	0.16	2.36	0.00	0.00				0.02	60.76	
样品数 = 3	银硐子	含铁方解石	9.91	26.97	15.49		0.33								祁思敬
样品数 = 2		铁白云石	7.00	27.25	19.24		0.52								(1991)

测试单位:西安地质矿产研究所;测定者:刘文峰;测试条件:电压 15KV,电 20nA,束斑 30 μ m,ZAF校正;空格为未分析项目;总量误差为 (100 \pm 1)%

3 岩石化学特征

从表 2 看:硅质岩中 SiO_2 是主要成分, SiO_2 在 70% 以上,其他成分含量较低,含矿硅质岩中除 Pb、Zn、S 含量高外,尚有一定的 Fe_2O_3 、 FeO 、 CaO 、 CO_2 , 主要由于含有铁白云石、铁方解石所引起。 Al_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 含量均较低。硅质铁白云岩中的 FeO 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 CO_2 等含量高, FeO 为 9.33%~35.64%, MgO 为 1.53%~5.90%, MnO 为 0.38%~0.94%, CaO 为 3.84%~30.02%, 主要由于含有较多的铁白云石、菱铁矿等铁碳酸盐矿物引起。 SiO_2 含量一般在 45% 以下,而且含量变化大。样品中 K_2O 和 Na_2O 含量较低,多在 0.5% 以下。铁白云石硅质岩的化学成分介于硅质岩与硅质铁白云岩之间。硅质岩中, $SiO_2 > 70%$,

其化学成分较纯,反映混入其他成分很少。当混入炭质和泥质时, K_2O 含量升高。混入 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} - HCO_3^- 型热水时形成了铁白云石硅质岩。硅质铁白云岩的化学成分特征是以富 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 CO 型热水与富 SiO_2 型热水混合同生沉积,伴有同生交代作用。位于硅质岩层之间的硅质铁白云岩,虽然发育交代结构(如铅硐山、八方山矿床),但仍显示了热水混合同生沉积的特点,如层纹状构造。铁白云岩(峰崖矿床)由单一成分的富 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 热水同生沉积为主,铁白云岩含量在 90% 以上,未见其他成分混入。铁白云岩常呈脉状、不规则状充填于古道岭组灰岩中的古喀斯特地形中,是由于这种古喀斯特为热水充填交代作用提供了空间,铁白云石晶体可达 8mm~3mm,说明其形成时有充分的结晶空间。

笔者在研究秦岭泥盆纪沉积盆地中热水沉积岩分析硅质岩-硅质铁白云岩-硅质灰岩-生物灰岩-结晶灰岩及硅质岩

表 2 泥盆系硅质铁白云岩-硅质岩的岩石化学特征表(%)

Table 2 Petrochemistry of cherts and siliceous ferrodolomites from Fengtai apart-pull basin(%)

矿床	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	CO ₂	S	P ₂ O ₅	H ₂ O	Cu	Pb	Zn	Σ	资料来源	
铅	含矿硅质铁白云岩	34.65	0.04	0.62	0.76	27.06	0.94	2.13	3.84	0.02	0.13	21.25	3.25				0.91	4.65	100.25	本	
	含矿硅质铁白云岩	32.35	0.04	1.15	2.68	9.33	0.42	2.30	10.49	0.00	0.34	16.25	9.42				1.91	14.81	101.48		
	含矿硅质铁白云岩	63.11	0.08	2.81	0.06	3.92	0.17	2.51	10.53	0.03	0.72	12.91	1.54				0.28	2.00	100.17		
山	铁白云石硅质岩	71.58	0.06	1.99	0.64	1.42	0.08	0.69	12.04	0.07	0.60	10.67	0.22				0.04	0.09	100.22	文	
	铁白云石硅质岩	71.58	0.06	1.99	0.64	1.42	0.08	0.69	12.04	0.07	0.60	10.67	0.22				0.04	0.09	100.22		
	铁白云石硅质岩	50.77	0.06	1.91	1.45	3.98	0.20	1.52	5.00	0.03	0.58	7.43	9.24				2.68	15.10	99.97		
	含矿炭硅质岩	62.79	0.28	7.42	0.42	3.84	0.12	0.99	3.89	0.22	1.87	6.57	3.64				2.87	5.48	100.40	文	
铅	含矿硅质铁白云岩	45.36	0.04	0.78	8.57	0.39	2.96	16.35	0.13	0.18	21.56	1.12	0.012	0.012	1.24		0.13	0.32	99.16	*	
	含矿硅质铁白云岩	22.73	0.05	0.97	8.04	0.38	2.58	30.02	0.11	0.08	30.54	1.61	0.012	0.012	1.31		0.022	0.11	0.45		99.60
	含矿硅质铁白云岩	40.55	0.04	0.96	14.86	0.53	1.53	7.26	0.13	0.14	16.44	4.81	0.98	0.98	1.40		0.016	1.50	6.47		99.00
八	含铜硅质铁白云岩	18.75	0.06	1.25	4.42	7.36	0.03	5.90	26.88	0.04	0.30	30.42	3.63				0.50	0.60	100.14	本	
	含铜硅质铁白云岩	18.27	0.05	1.19	4.27	7.49	0.30	5.52	27.28	0.02	0.30	31.23	3.62				0.52	0.60	100.62		
	浅灰色条带状硅质岩	89.44	0.00	0.59	1.54	1.38	0.05	0.76	3.07	0.03	0.17	3.78	0.12						100.93		
方	浅灰色硅质岩	88.84	0.08	2.12	0.65	0.48	0.02	0.50	3.56	0.08	0.66	3.61	0.053						100.65	文	
	深灰色硅质岩	81.92	0.13	3.87	2.46	1.85	0.05	1.33	3.46	0.07	1.08	5.54	0.042						100.44		
	铁白云石硅质岩	77.84	0.10	2.61	0.43	2.98	0.06	1.72	5.06	0.10	0.75	6.77					0.30	100.47	祁思敬(1991)		
矿床	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	CO ₂	S	P ₂ O ₅	H ₂ O	V ₂ O ₅	C	有机			
凤	N=2 硅质灰岩	45.35	0.07	1.99	3.48	0.81	0.16	0.33	23.69	0.03	0.40	19.89	0.064	0.00	1.12	0.008	0.19			王	
	含矿硅质灰岩	46.20	0.04	2.40	0.39	0.66	0.02	0.48	25.48	0.05	0.14	17.53	0.323	0.02	0.08	0.009	1.23				
	硅质铁白云岩	36.40	0.21	4.90	0.65	6.35	0.15	4.68	19.38	0.31	0.62	24.43	0.192	0.03	0.80	0.012	0.35				
地	含矿硅质铁白云岩	20.20	0.05	1.79	0.05	35.64	1.14	2.86	3.19	0.11	0.43	21.96	2.15	0.03	0.02	0.021	0.48			等(1996)	
	n=7 硅质岩	76.84	0.09	1.67	2.03	3.41	0.13	1.29	4.66	0.07	0.50	5.33	0.09							薛春纪(1997)	

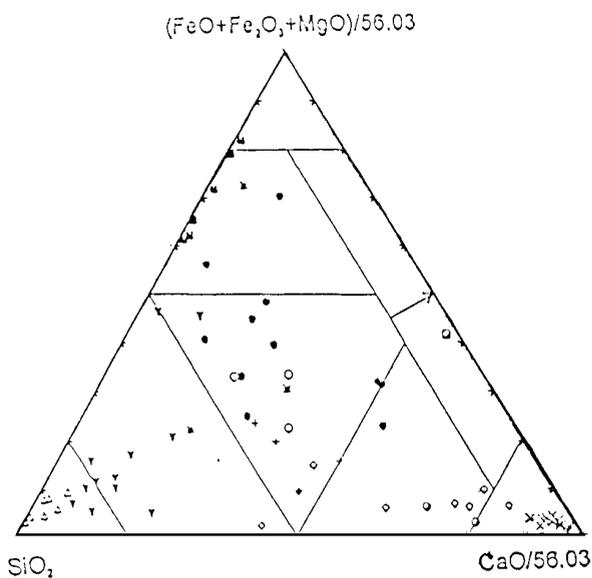


图 2 秦岭泥盆纪沉积盆地热水沉积岩 S-F-C图解点图
 ○硅质铁白云岩; ●含矿硅质铁白云岩; △硅质岩; ▼含矿硅质岩; 生物铁白云岩, 结晶灰岩; 菱铁矿岩; * 绢云铁白云岩, 菱铁白云岩; 灰质铁白云岩; 绢云硅质灰岩; ◇硅质灰岩; 白云岩; 含矿硅质灰岩

Fig. 2 S-F-C plot of hydrothermal depositional rocks in the Devonian basin in the Qinling orogen

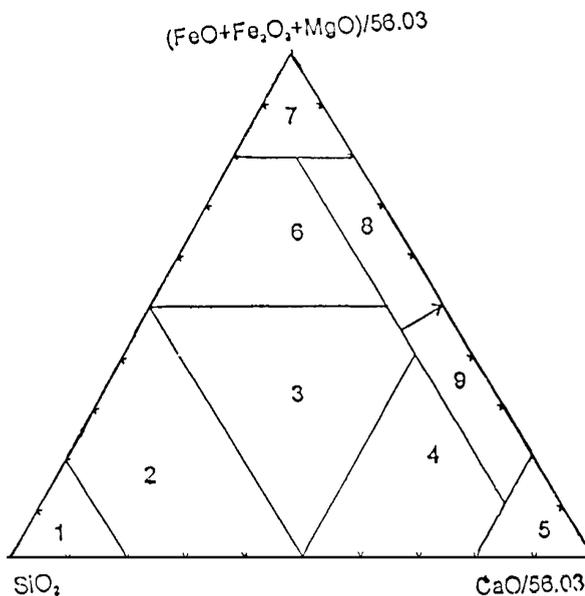


图 3 秦岭泥盆纪沉积盆地热水沉积岩 S-F-C分类图
 1-硅质岩; 2-铁白云质硅质岩; 3-硅质铁白云岩; 4-硅质灰岩; 5-生物灰岩, 结晶灰岩; 6-菱铁矿岩; 7-磁铁菱铁矿岩; 8-铁碳酸盐岩; 9-白云岩

Fig. 3 Classification of S-F-C plot for hydrothermal depositional rocks in the Devonian basin in the Qinling orogen

硅质铁白云岩 菱铁矿岩有完整的岩石类型,在收集整理前人(祁思敬等,1991;王集磊等,1996;王相等,1996;薛春纪,1997)资料的基础上,结合本文研究(共77件岩石化学分析成果)制作 S-F-C图解。S代表 SiO₂,F代表 (FeO+ Fe₂O₃+ MgO),C代表 CaO,F和C分别除以56.03进行归一化处理(图2)。从图2看:不同岩石类型在图2中集中在相对稳定的区域,有明显的规律性。在此基础上,笔者提出秦岭泥盆纪沉积盆地中硅质岩-硅质铁白云岩-菱铁矿岩-生物灰岩、结晶灰岩等岩石系列及其过渡类型岩石的 S-F-C图解(图3)。C端元(CaO)代表正常海水的沉积作用形成的碳酸盐岩,S端元(SiO₂)代表以 SiO₂为酸酐的热水同生沉积作用形成的硅质岩,F端元(FeO+ Fe₂O₃+ MgO)代表富 Fe Mg碳酸盐型热水同生沉积作用形成的菱铁矿岩,硅质铁白云岩(图3,3区)是典型的热混合同生沉积作用区,其他区域(图3)是过渡岩石类型及热水同生沉积作用与热混合同生沉积作用的过渡区域。S-F-C图解(图3)可用于分析研究秦岭泥盆纪沉积盆地中热水沉积岩类型及热水成岩作用。

4 地球化学特征

4.1 稀土元素

从前人资料(王集磊等,1996)的稀土元素分析成果看,硅质岩及其产于硅质岩中铅锌矿石的 REE组成与配分型基本相同,说明它们二者有相似的成岩方式、形成环境。矿石中 La/Yb 比值比硅质岩高,在 4.20~36.99 之间,平均为 17.80,差异较大。这是因为矿石样品中有后期动力热改造型流体的改造富集成矿,轻稀土碱性较强,易在改造过程中发生分异作用而富集。硅质岩中稀土总量较低,REE在 31.0×10⁻⁶~54×10⁻⁶。含泥质成分多的绢云母硅质岩中的 REE 含量升高,REE达 197.396×10⁻⁶~75.93×10⁻⁶,LREE/HREE及 La/Yb 比值均较高,与甘肃西成地区的千枚岩相似,这是硅质岩中混入较多来自陆源碎屑物质(王集磊等,1996)。硅质岩中的稀土组成、配分型式与海水相似,表明海底热水形成过程中有大量的海水参与成矿。硅质铁白云岩的稀土总量大致与硅质岩类相同(表3),但 LREE/HREE比值则小于 1.0,反映富集重稀土,而硅质岩中却是轻稀土相对富

表 3 稀土元素含量特征表 (10^{-6})Table 3 Contents of REE in cherts and siliceous ferrodolomitites from Fengtai apart-pull basin (10^{-6})

矿床	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sc
八	硅质铁白云岩	3.44	8.54	0.89	5.92	1.03	0.394	1.74	0.408	3.53	0.284	1.13	0.159	1.14	0.245	11.61	1.96
方	硅质铁白云岩	3.62	8.55	1.33	6.19	1.68	0.394	1.71	0.241	3.49	0.175	1.06	0.253	1.16	0.098	11.77	1.69 ^①
山	钠长石碳酸岩	8.21	15.25	1.50	8.94	1.97	0.422	2.01	0.468	3.97	0.313	1.40	0.148	1.41	0.026	14.38	7.04
二	黑色硅质岩	6.63	7.78	1.08	2.80	0.61	0.085	0.47	0.061	0.39	0.094	0.28	0.040	0.29	0.050	1.62	
里	黑色硅质岩	2.47	1.72	0.41	1.36	0.30	0.042	0.22	0.031	0.18	0.039	0.11	0.014	0.12	0.022	0.79	
河	深灰色硅质岩	4.79	5.66	0.75	1.84	0.42	0.069	0.35	0.053	0.33	0.078	0.24	0.043	0.26	0.44	0.79	
	铁白云石 硅质岩	0.70	1.46	0.27	1.04	0.84	0.058	0.32	0.041	0.28	0.059	0.17	0.027	0.17	0.027	1.54	
	深灰色硅质岩	7.12	5.07	2.16	8.31	1.86	0.124	1.40	0.170	1.05	0.205	0.54	0.088	0.48	0.071	4.38	②
银	条带状炭硅质岩	24.19	37.58	4.28	11.05	1.39	0.169	0.791	0.144	0.84	0.227	0.79	0.172	1.18	0.175	5.14	
碛	含矿炭硅质岩	3.21	2.77	0.82	3.06	0.65	0.054	0.466	0.071	0.46	0.108	0.30	0.042	0.30	0.045	2.29	
铅	条带状硅质 铁白云岩	10.43	16.12	1.88	5.93	1.02	0.138	0.812	0.108	0.94	0.198	0.58	0.085	0.68	0.098	6.23	
碛	砾状铁白云石 炭硅质岩	5.10	4.23	1.23	4.16	1.09	0.115	1.124	0.215	1.27	0.273	0.78	0.106	0.69	0.093	8.03	
山	铁白云石硅质岩	10.51	20.31	2.66	8.79	1.65	0.280	1.24	0.202	1.12	0.223	0.67	0.107	0.63	0.084	6.20	
	含矿砾状菱 铁矿硅质岩	1.10	1.59	0.23	0.85	0.20	0.06	0.20	0.038	0.24	0.050	0.14	0.019	0.10	0.015	1.38	

① 本文. ② 王集磊等 (1996)

集 La/Yb 在 3.12~2.93 间, 球粒陨石 (Boynton 等, 1984) 稀土元素标准化, Ce 富集了 10 倍, Eu 富集 5 倍, Eu 和 Ce 比硅质岩中富集程度更高, $\delta_{Ce} = 1.147 \sim 0.937$, $\delta_{Eu} = 0.902 \sim 0.704$. 这是因为硅质铁白云岩形成在更强的还原环境中, Ce 和 Eu 的不同价态未及分异, 便进入岩石中保存, 并被后继的热热水沉积物所覆盖, 也说明沉积盆地内热水具有快速堆积的特点.

4.2 硅质岩的硅同位素

铅碛山矿床及银母寺矿床, 由海底热水喷溢形成的含矿硅质岩 $\delta^{30}\text{Si}$ (0.3‰~0.2‰) (3 件贫矿石, 王相等, 1996) 与现代温泉硅华沉淀物 $\delta^{30}\text{Si}$ (-0.6‰~0.0‰) 和深海放射虫硅质岩 $\delta^{30}\text{Si}$ (-0.6‰~-0.1‰) 组成基本一致, 接近现代海底“黑烟囱”硅质沉淀物 $\delta^{30}\text{Si}$ (-3.4‰~-0.4‰) 上限. 由后期改造形成的脉状矿石 $\delta^{30}\text{Si}$ 为 (-0.2‰~-0.1‰) (2 件富矿石, 王相等, 1996), 接近凤太地区印支-燕山期花岗岩岩脉 $\delta^{30}\text{Si}$ (-0.1‰~+0.1‰) 组成, 暗示岩浆热改造作用使矿床发生贫化 (王相等, 1996).

后期区域变质作用及热液改造成矿作用形成的石英多以穿层分布的硫化物-石英铁白云石脉形式, 形成温度在 200°C 以上, 硫化物-石英铁白云石脉及石英脉中石英的 O 同位素是经过重新动力学分馏过程. 后期区域变质作用及热液改造成矿作用未造成硅质岩中石英 O 同位素发生区域性重新动力学分馏. 硅质岩中石英晶出温度代表了海底热水同生

沉积作用形成硅质岩的温度. 秦岭泥盆纪硅质岩中石英晶出温度在 82.1~94.8°C (薛春纪, 1997), 与西秦岭拉尔玛-邛莫寒武系金矿床中的硅质岩 (70.9~118.1°C, 刘家军等, 1999) 形成时热水温度大致相似. 硅质岩及产于硅质岩中的脉状团块石英中 $\delta^{30}\text{Si}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 显示正相关性 (表 4), 说明 Si-O 同位素从热水溶液中, SiO_2 结晶形成石英时有相似的动力学分馏过程, 证明硅质岩属海底热水沉积成因 (薛春纪, 1997), 硅质的搬运以 SiO_2 形式进行, 搬运和沉淀的形式相同, 所提示的同位素组成变化主要是由于动力学分馏所致, 而非热力学分馏, 这也是 (热水) 化学沉积的特征之一 (薛春纪, 1997).

4.3 微量元素含量特征

从表 5 看: 热水沉积岩中反映高温热流体活动 W-Sn-Mo-Bi 组合的元素含量均较低, 而指示中、低温热水活动的 As-Sb-Hg-Ag 含量均较高. 银母寺矿区的硅质铁白云岩中 F 含量可达 357×10^{-6} , 是本区含 F 最高的矿区, 银母寺铅碛矿体上盘铁白云质干枚岩中有 F 为 $5000 \times 10^{-6} \sim 7000 \times 10^{-6}$ 的强 F 原生异常, 指示了银母寺铅碛矿形成时其热水中有较高的 F 含量. 八方山矿区铁白云质大理岩中含 Ni、Co 较高, 局部 Ni 可达 1300×10^{-6} , Co 为 365×10^{-6} , 主要由镍黄铁矿引起. 热水沉积岩中普遍高 Mn, 主要是硅质铁白云岩中铁白云石中含有较高的 Mn (表 1). 含矿硅质铁白云岩中 Cu、Pb、Zn、Cd、Mn、Hg、As、Sb、Ag 均发生了富集, 主成矿元素为 Pb、Zn, 伴生元素有 Ag、Cu、Cd、Hg. 指示热水活动的 Ba、Sr

表 4 秦岭泥盆系硅质岩及石英的 Si O 同位素组成

Table 4 The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{30}\text{Si}$ values in cherts and quartzes from Fengtai apart-pull basin

样号	岩性	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} (\times 10^{-3})$	$\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}} (\times 10^{-3})$	样品位置及产状
Pb-195	硅质岩	19.8	- 0.3	铅硐山 1515m中段矿层中
Pb-25	硅质岩	19.0	- 0.4	铅硐山 1530m矿层
Pb-27	硅质岩	18.6	- 0.4	铅硐山 1530m主矿层下部
Pb-19Q	石英	20.9	- 0.3	铅硐山 1515m中段硅质岩中石英脉
Pb-1	石英	21.9	- 0.1	铅硐山方铅矿矿石中脉石矿物
Cu-1	硅质岩	19.4	- 0.5	八方山矿床 10坑 1818m中段含矿硅质岩
Cu-16	石英	20.6	- 0.4	八方山矿床 8坑含黄铜矿方铅矿的脉石英
YM-2	硅质岩	20.6	- 0.4	银母寺 1425m中段 28线 1-4号矿体硅质岩
YM-1Q	石英	21.6	- 0.3	银母寺 1425m中段 28线硅化灰岩中的石英脉
YM-17	石英	21.8	- 0.5	银母寺 1485m中段 13线方铅矿矿石中石英脉

分析者: 中国地质科学院矿床地质研究所李延河, 资料来源: 薛春纪 (1997)

表 5 凤太盆地热水沉积岩中微量元素含量特征表 (10^{-6})Table 5 Characteristics of trace elements for hydrothermal rocks in Fengtai apart-pull basin (10^{-6})

矿床	岩性	样数	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Mn	Cd	Hg	As	Sb	Bi	F	Ag	W	Mo	B	Sn	Sr	Ti	Ba	Cr	V
铅硐山	含矿硅质铁白云岩	6	171	6392	50000	23	55	3024	291	81.04	1373	98	0.18	119	0.535	614	0.04	18	10	66	716	141	28	35
	毒砂硅质的白云岩	4	93	123	297	21	16	2388	6.0	0.06	949	20	0.12	178	0.291	290	0.88	20	1.5	202	1806	33	33	48
手搬崖	硅质灰岩	4	36	40	42	32	21	1225	3.8	0.25	549	9.540	10	115	0.110	570	0.50	< 5	1.0	335	335	27	28	36
银母寺	硅质的白云岩	6	313	62	89	16	23	575	3.4	0.05	15	0.990	10	357	0.651	580	0.91	7	2.5	385	397	180	37	41
八方山	铁白云质大理	22	300	105	115	129	54	202	5.0	0.12	192	4.100	10	49	0.191	0.000	0.55	< 5	1.0	213	102	68	39	69

单位: $\times 10^{-6}$, 微量定量分析: Cu Pb Zn Ni Co Cd 为原子吸收光谱分析; As Sb 为原子荧光光谱分析; Hg 为 SG-4型塞曼测汞仪; F 为离子选择电极法分析; 其他元素为 ICP 直读光谱分析. 分析单位: 西北有色物化探总队化验室

在热水沉积岩中含量不高,而在矿体上盘由热卤水同生沉积形成的铁白云质千枚岩中含 Ba Sr 较高, Ba 可达 $500 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$, 局部形成含 Sr 重晶石方解石脉穿层分布, 指示了后期过程中 Ba Sr 发生了活化、迁移和再沉淀 (方维萱, 1999a, b).

5 成岩成矿方式的讨论

热水场地球化学类型可划分 (方维萱, 1999e): ① 硫酸盐型热水场; ② 碳酸盐型热水场; ③ 以 SiO_2 酸酐型热水场型; ④ 富 Mg 重卤水型热水场; ⑤ 热卤水型热水场; ⑥ 硼硅酸盐型 铝硅酸盐型热水场. 热水沉积矿床及热水沉积岩具有同一成岩成矿过程, 尤其是黑色岩系中金属矿产的形成与演化过程中, 成岩成矿作用表现为同一过程的特点更为明显 (范德廉等, 1991; 李有禹, 1997; 饶雪峰等, 1990; 吴朝东等, 1999). 探讨其成岩成矿方式有助深入认识热水沉积成矿盆地 (方维萱, 1999 c) 及大型-超大型矿床集中区形成与演化规律. 本区热水沉积岩类型较多, 其成岩成矿方式也较为复杂, 按成矿方式可分为如下几类 (图 1):

(1) 热水同生沉积岩 (热水同生沉积微相): 主要由海底热水发生同生沉积作用所形成, 有少量内源和陆源物质的混入. 岩石类型有硅质岩. 岩石中发育热水同生作用形成的结构构造, 如层纹状构造、厚层块状构造. 硅质岩中金属硫化物呈浸染状、韵律层纹状、层纹状及草莓状等产出. 硅质岩宏观呈层状与上覆岩性层呈整合关系, 闪锌矿 (浅色) 呈稀疏浸染状、浸染状产于层状硅质岩中, 低 Hg Cd, 这与后期改造过程中形成穿层分布的硫化物-石英铁白云石脉中黑色闪锌矿 (高 Hg Cd) 差异较大 (方维萱, 1999d). 硅质岩中石英主要呈微晶状, 少量短柱状石英, 但粒度很细, 多在 0.08mm 以下, 显示快速化学沉淀堆积特征. 炭质多以浸染状分布于硅质岩中, 可能系热水快速沉淀的方式发生同生沉积作用, 沉积过程中混入少量炭质. 出现炭质 (泥质) 相对集中, 形成层纹构造及韵律层纹状构造, 显示了明显沉积韵律构造. 在后期改造过程中, 泥质发生动力重结晶形成鳞片状宏观消光方位趋向一致的绢云母. 含泥质较高的浅灰色绢云母硅质岩一般不利于金属硫化物富集, 常形成于较氧化的三级热水沉积盆地的边部. 炭质纹层中常见较多的金属硫化物, 灰黑色含炭硅质岩及黑色硅质岩常构成贫铅锌矿石. 层纹状、韵律层纹状

构造显示在沉积时水动力条件相对较弱且稳定,为热水同生沉积成岩成矿作用提供了水文条件。镜下常可见到闪锌矿、黄铁矿和方铅矿呈草莓状结构,与原生沉积的炭质、生物碎屑共生,且可见到闪锌矿沿生物化石的周缘呈椭圆状产出,说明可能有生物成矿作用参与。草莓状黄铁矿分布较广,草莓状硫化物在炭泥质层状薄层中相对富集,是典型的矿石沉积组构(王俊发等,1991)。富 Zn^{2+} 、 S^{2-} 、 SiO_2 的热水以快速化学沉淀的方式发生同生沉积作用,主要形成硅质岩及含铅锌金矿硅质岩,未能使矿质大规模聚集。

(2)热水混合同生沉积岩(热水混合同生沉积微相):在以一种成分的海底热水为主体系中,由于后发热水喷流作用混入了不同成分、性状的热热水,而触发先存热水失稳,发生了热水混合同生沉积作用,并造成矿质的骤沉。岩石类型有菱铁矿硅质岩、炭硅质岩、硅质灰岩、含矿硅质岩、含矿硅质铁白云岩。岩石中发育由不同矿物成分组成的条带条纹构造、层纹状构造。主要有如下三种热水混合同生沉积的方式:

(A) 硅质灰岩一般多位于硅质岩与灰岩的过渡微相相区。含矿硅质灰岩中有机炭及硫含量(见表2)均升高。硅质灰岩含矿硅质灰岩是富 Zn^{2+} 、 S^{2-} 、 SiO_2 的热水与三级热水沉积成矿盆地内富 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 的海水发生混合,而触发不同成分、性态的流体混合同生沉积作用,以 SiO_2 为酸酐的热水与三级热水沉积盆地的海水碳酸盐软泥($CaCO_3$)形成缓冲体系(buffer system),为硫化物沉淀提供了稳定的 pH 条件。它们具有与硅质岩相类似的沉积组构。局部可形成有一定规模的锌铅贫矿层,一般位于四级热水洼地(矿层容纳空间)边部,与半深水滞流、还原盆地相中的含炭灰岩、炭质生物灰岩、含炭生物碎屑灰岩及炭质页岩共生。

(B) 秦岭铅锌矿床含矿围岩及矿石中方解石的 $\delta^{13}C$ 完全位于泥盆纪正常海相沉积的碳酸盐岩范围内,表明成矿过程中碳质来源于泥盆纪正常海相碳酸盐岩(王集磊等,1996)。有机炭富集为矿质沉淀提供了良好强还原环境,凤太铅锌矿床石英及闪锌矿气液包裹体成分测定表明, SO_4^{2-} 含量在 $1094 \times 10^{-6} \sim 5156 \times 10^{-6}$ (王集磊等,1996),强还原环境可使 SO_4^{2-} 大量还原为 S^{2-} ,为金属硫化物沉淀提供了大量的 S^{2-} 。一般地,铅锌矿层附近均有大量的含炭围岩,它们宏观上围绕矿层分布。在铅锌矿层中,当出现炭质韵律层纹层及含量增高时,闪锌矿含量增高,出现条带状、稠密浸染状及厚层块状闪锌矿,是富锌矿段的标志。可能系富 Zn^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 SiO_2 的氧化态酸性热水与富炭还原态酸性海水发生混合,强烈地氧化-还原条件骤变而触发了矿质骤沉,从而使矿化剂元素(S)的高价氧化态(SO_4^{2-})被还原为低价还原态(S^{2-}), S^{2-} 与 Zn^{2+} 结合形成闪锌矿沉淀,形成富锌矿段。如八方山 T13坑道内富 Zn 矿段含矿岩石主要为炭硅质岩,炭质含量可达 10%。

(C) 据王集磊等人研究,八方山矿床闪锌矿、方铅矿及黄铁矿包裹体的液相成分中, Ca^{2+} 为 12162×10^{-6} , Mg^{2+} 为 647×10^{-6} , CO_2 为 230273×10^{-6} , H_2O 为 283149×10^{-6} ,尚

含有 K^+ 、 Na^+ 、 F^- 、 Cl^- 、 CO_2 、 CH_4 和 H_2 。铅矾山、手搬崖、银洞梁和银母寺矿床闪锌矿包裹体中也有类似的特征,含 CO_2 更高, Mg^{2+} 为 $1463 \times 10^{-6} \sim 3342 \times 10^{-6}$,含 H_2 为 $925 \times 10^{-6} \sim 4172 \times 10^{-6}$ 。从表2看:硅质铁白云岩及含矿硅质铁白云岩中, SiO_2 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 MnO 、 CaO 、 CO_2 、S 含量均较高。 CO_2 溶于 H_2O 中后形成 H_2CO_3 , H_2CO_3 是不稳定的中间产物,分解为 $2H^+$ 和 CO_3^{2-} 。强还原条件下, $2H^+$ 被还原形成 H_2 ,这正是矿物包裹体中存在着 H_2 的地球化学机理。在强还原、偏碱性的环境中,形成富 Fe^{2+} - Ca^{2+} - Mg^{2+} - Mn^{2+} 、 CO_3^{2-} 的碳酸盐型热水。发生化学结晶后形成铁白云岩而变为固-液两相的强还原、偏碱性热水,这种热水喷溢进入热水沉积盆地之中,与先存的富 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 SiO_2 氧化态、酸性热水混合,强烈的酸碱性(pH)不平衡和氧化-还原条件(Eh)的骤变,这两种地球化学动力学因素触发热水体系失稳,引起矿质大规模骤沉。稀土元素特征也显示了具有快速堆积特点。铁白云石、菱铁矿与微晶石英韵律层纹状沉积组构普遍发育,细粒闪锌矿(0.002~0.03)mm,呈浸染状、星散状沿它们层纹之间分布,偶见到细粒方铅矿。含矿硅质铁白云岩一般夹于硅质岩层之中,并与硅质岩形成过渡关系,当铁白云石含量较高时,形成铜矿体(如八方山)。

这三种不同化学成分、性态的热水混合同生沉积作用是凤太拉盆地内铅锌矿层主体形成的主要成岩成矿方式,成矿作用地球化学动力学因素为 pH-Eh 非平衡作用,触发热水体系失稳,造成矿质大规模聚集。

(3)热水同生沉积交代岩(热水同生交代微相):常由两种以上的不同成分和性状的热热水混合,触发热水同生沉积作用,对先存的沉积物发生同生交代作用,一般均发生于热水沉积岩层的下盘围岩或沿走向的矿层尖灭部位。主要岩石类型有硅质铁白云岩、铁白云石化灰岩、铁白云质灰岩、硅化灰岩等。岩石中矿物之间同生交代结构、溶蚀结构、矿物假像结构发育。八方山二里河金多金属矿床中,富 SiO_2 热水同生交代作用是十分发育的,常形成微晶石英岩,可见到中泥盆统古道岭组灰岩的残留体,有时呈分枝状或不规则状产于灰岩中。微晶石英岩中可见到生物化石,化石形态完好,主要有腕足类、海百合茎和层孔虫,有时化石被闪锌矿和微晶石英交代,系富 SiO_2 热水交代生物碎屑灰岩所形成。在与灰岩之间的界线呈岛屿状、不规则状,具有交代蚕蚀结构,石英晶粒保留方解石晶粒的外形的交代假像结构及石英细脉穿插于灰岩中。整体形成仍然受层位控制明显。

在以上三种成岩成矿方式形成的硅质岩、硅质灰岩、硅质铁白云岩、含矿硅质岩中,草莓状硫化物与生物活动有密切关系,但未发现硅质岩类具有明显的生物成因组构,硅质岩类可能主要系热水成因。不排除区域上非成矿地段有与生物成因的硅质岩。生物成因的硅质岩中含 SiO_2 高,本区硅质岩中含 FeO 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 和 CaO 等含量高,硅质岩类系热水成因(方维萱,1999a)。

(4)热水爆炸-液致裂角砾岩(热水喷溢通道微相或称

为热水液致裂微相): 先存的沉积物封存了热水喷流通道口,其后上升的热水在运移到热水喷流通道口附近时,由于减压作用,超临界热水发生爆炸和液致裂而使先存封的沉积物发生角砾岩化,并伴随着强烈的热水-沉积物成分交换作用和蚀变作用,触发矿质骤沉。当第二次上升的热水含矿质不足时,仅有成岩作用发生,或产生弱矿化。含矿硅质铁白云石角砾岩强烈的铁白云石化、硅化,岩石中角砾构造发育。在八方山-二里河矿床内,黄铁矿硅质铁白云石角砾岩在 T13坑、T14坑的多金属矿体底部均可见到,角砾成分与胶结物同成分,主要由硅质及细粒铁白云石组成,黄铁矿及黄铜矿主要呈浸染状产于胶结物中,角砾呈棱角状-次棱角状,并与含炭质高的部位相吻合。十分有意义的是这些角砾岩层的分布部位有穿切中泥盆统古道岭组生物碎屑灰岩、生物灰岩的钠长石碳酸岩脉,呈向上多枝状尖灭于多金属矿层之中,而未见上泥盆统星红铺组细碎屑岩中产出。显然指示这些钠长石碳酸岩脉形成于晚泥盆世星红铺阶之前。硅质铁白云石角砾岩层和穿层钠长石碳酸岩脉指示了低序次同生断裂位置,它们是热水喷溢通道的标志。含矿硅质角砾岩,硫化物以胶结物形式出现,发生大规模工业聚集。在铅硐山II号矿体 52线-51线、I号矿体 8A线-7线之间分别有较多的含矿硅质角砾岩,角砾成分主要是围岩碎块和硅质岩角砾,胶结物主要是硫化物、硅质和铁白云石。角砾成分向东西两侧含量降低,相变为层状、层纹状和韵律条带状矿石,这种与角砾状铅锌矿石的共生相变关系可能指示了在 52线-51线、8A线-7线曾发育北东向的低序次同生断裂,它是热水喷溢进入四级热水沉积洼地的喷溢通道口。这些勘探线附近,不但矿体厚度最大,而且是 Pb/Zn值沿走向到最高的矿段(王俊发等,1991)。在银母寺铅锌矿床内 11线、19线及 23线附近,均有含矿硅质铁白云石角砾岩分布。铅锌矿石中含有近平行排列的硅质岩角砾,铁白云石角砾呈蠕状、钩状及不规则弯曲状,显示了塑性流变的特征。这种铁白云石角砾可能是由富 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 的还原态、偏碱性碳酸盐型热水在热水喷溢通道口附近发生热水爆炸,形成角砾岩化,但在未完全固结状态下,因盆地古地形及塑性流体重力作用下,发生塑性流变及同生变形作用而形成,这种硅质铁白云石角砾岩产出的地段黄铜矿显著增加。

(6)热水充填-交代岩(热水充填交代微相):沿同生断裂上升的热水由于减压作用而发生成岩,对附近围岩发生弱的交代作用,常呈脉状产出。如石英钠长石碳酸岩、铁方解石岩、毒砂铁方解石岩、网脉状石英化硅质岩。在银母寺南铜矿化带(中泥盆统古道岭组灰岩中),含矿岩石主要为硅质铁白云岩、铁白云岩及铁方解石铁白云石脉。在银母寺矿区规模最大的I-4号矿体(3线-33线),南矿带集中分布着 6号、3号、10号及 14号矿体。在古道岭组顶部附近发育古喀斯特地貌,有古溶洞、古落水洞及古岩溶裂隙(王俊发等,1991),为热水充填-交代作用发生提供了构造空间。热水交代作用以硅化为主,形成不规则硅化灰岩,热水充填作用以含铜铁

白云石岩(脉)、含铜铁方解石铁白云石脉为主,常呈不规则状、脉状及囊状。铁白云石、铁方解石晶体生长粗大,在 5mm × 8mm 之间,个别可达 2cm × 2cm,显示有充足的晶体生长空间。在银硐梁、手搬崖及峰崖铅锌矿床中,这种热水充填-交代作用也较为发育,如峰崖铅锌矿床中,形成了一些不规则状的灰白色铁白云岩。在铅硐山铅锌矿床II号矿体下盘与中泥盆统古道岭组碳酸盐之间,产出有毒砂铁方解石岩,厚 0.2m~2m,铁方解石结晶形态完好,毒砂自形晶、放射状及束状集合体,局部较富集;或毒砂呈浸染、稀疏浸染产于铁方解石之中,显然由热水充填作用所形成。

笔者在研究过程中得到张国伟教授及卢纪英教授二位导师的热情指导和帮助,特此致谢。

References

- Chen Xianpei, Gao Jiyuan and Chen Duofu. 1992. Conception of hydrothermal depositions and indexes of petrology. *Acta Sedimentologica Sinica*, 10(3): 124~132 (in Chinese with English abstract)
- Fang Weixuan. 1999a. Characteristics of sedimentary facies of hydrothermal for Qianongshan giant lead-zinc ore deposits, Feng County, Shaanxi Province, *Acta Sedimentologica Sinica*. 17(1): 44~50 (in Chinese with English abstract)
- Fang Weixuan. 1999b. The evolutions and characteristic of ore-forming fluid and tectonic basin with hydrothermal sedimentary mineralization in the Devonian in the Qinling orogen, China. (Ph. D dissertation). Department of Geology, Northwest University, 3~72 (in Chinese with English abstract)
- Fang Weixuan, Zhang Guowei and Huang Zhuanying. 1999c. Characteristics of barite-olites and diagenesis-metallogenesis for superlarge silver-polymetallic deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 484~491 (in Chinese with English abstract)
- Fang Weixuan. 1999d. Research on mineral geochemistry of Qianongshan lead-zinc deposits, a large-size deposits in Fengxian Country, Shaanxi. *Acta Mineralogica Sinica*. 19(2): 198~205 (in Chinese with English abstract)
- Fang Weixuan. 1999e. Discuss on model of fluid dynamics for hydrothermal water system and geochemical patterns of paleo-hydrothermal fluid in the Qinling orogen—the analysis and approach of sedimentary basin with hydrothermal deposition (part II). *Northwest Geosciences* (in Chinese with English abstract) 20(2): 17~27
- Fan Delian, Liu Tiebing and Ye Jie. 1991. Biogeochemistry of black shale series during diagenetic and metallogenetic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 7(2): 65~72 (in Chinese with English abstract)
- Iijima A, Hein J R and Sieve R. 1983. Siliceous deposits in the Pacific region. *Developments in Sedimentology*, 36 143~209
- Li Youyu. 1997. The geological characteristics of sea-floor

- exhalation-sedimentary chert in Lower Cambrian black shales in Dayong-Cili area, Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 13 (1): 121-126 (in Chinese with English abstract)
- Liu Jiajun, Zheng Minghua, Liu Jianming, Zhou Yufeng, Gu Xuexiang and Zhang Bin. 1999. The geological and geochemical characteristics of Cambrian chert and their sedimentary environmental implications in western Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 14-154 (in Chinese with English abstract)
- Meng Xianghua and Ge Ming. Sedimentary formation and formation sequence. Beijing: Geological Publishing House, 1-14 (in Chinese)
- Meyers W.J. 1977. Chertification in the Mississippian lake valley formation, Sacramento mountains, New Mexico. *Sedimentology*, (24): 75-105
- Qi Shijing and Li Ying. 1991. Qinling Devonian Lead-zinc metallogenic belt. Beijing: Geological Publishing House, 124-178 (in Chinese)
- Rao Xuefeng and Fan Deliang. 1990. Petrology, geochemistry and genesis of the middle Ordovician black shale series in Tuojiang, the central region of Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 6 (3): 78-86 (in Chinese with English abstract)
- Simonson B.N. 1985. Sedimentology of cherts in the early Proterozoic Wisshart Formation, Quebec Newfoundland, Canada. *Sedimentology*, (32): 28-40
- Tu Guangzhi. 1988. Geochemistry of strata-bound ore deposits in China. Beijing: Science Press, 195-218 (in Chinese)
- Tim Dooley and Ken McClay. 1997. Analog modeling of pull-apart basins. *AAPG Bulletin*, 81(11): 1804-1826
- Wang Junfa, Zhang Fuxin, Yan Jincai and Chen Lin. 1991. The stratabound metallic ore deposits in Qinling Devonian System. Publishing House of Shaanxi Science and Technology, 2-71 (in Chinese)
- Wang Xiang, Tang Rongyang, Li Shi, Li Yongxiang, *et al.* 1996. Qinling orogeny and metallogenesis. Beijing: Metallurgical Industry Press, 187-229 (in Chinese)
- Wang Jilei, He Beichi, Li Jianzhong and He Dianren. 1996. Qinling-type lead-zinc ore deposits in China, Beijing: Geological Publishing House, 4-126 (in Chinese)
- Wu Chaodong, Chen Qiying and Lei Jiajin. 1999. The genesis factors and organic petrology of black shale series from the Upper Sinian to the Lower Cambrian, southwest of China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 453-462 (in Chinese with English abstract)
- Xue Chunji. 1997. Devonian hydrothermal depositions in the Qinling. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 49-112 (in Chinese)
- Yamamoto K. 1987. Geochemical characteristics and depositional environment of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes. *Sedimentary Geology*, 52: 65-108

附中文参考文献

- 祁思敬, 李英著. 1991. 秦岭泥盆系铅锌成矿带. 北京: 地质出版社, 124-178
- 王集磊, 何伯坤, 李健中, 何典仁编著. 1996. 中国秦岭铅锌矿床. 北京: 地质出版社, 195-218
- 王相, 唐荣杨, 李实, 李永祥等编著. 1996. 秦岭造山与金属成矿. 北京: 冶金工业出版社, 187-229
- 薛春纪. 1997. 秦岭泥盆纪热水沉积. 西安: 西安地图出版社, 49-112
- 涂光炽等著. 1988. 中国层控矿床地球化学. 北京: 科学出版社, 196-206
- 饶雪峰, 范德廉. 1990. 湘中桃江中奥陶统黑色岩系岩石学地球化学及成因. *岩石学报*, 6(3): 78-86
- 范德廉, 刘铁兵, 叶杰. 1991. 黑色岩系成岩成矿过程中的生物化学作用. *岩石学报*, 7(2): 65-72
- 王俊发, 张复新, 炎金才, 陈苓. 1991. 秦岭泥盆系层控金属矿床. 西安: 陕西科学技术出版社, 2-71
- 陈先沛, 高计元, 陈多福. 1992. 热水沉积作用的概念和几个岩石学标志. *沉积学报*, 10(3): 124-132
- 孟祥化, 葛铭著. 1993. 沉积建造与建造层序. 北京: 地质出版社, 1-14
- 李有禹. 1997. 湖南大庸慈利一带下寒武统黑色页岩中海底喷流沉积硅岩的地质特征. *岩石学报*, 13(1): 121-126
- 刘家军, 郑明华, 刘建明等. 1999. 西秦岭寒武系金矿床中硅岩的地质地球化学特征及其沉积环境. *岩石学报*, 15(1): 145-154
- 方维萱. 1999a. 陕西铅铜山大型铅锌矿床热水沉积岩相特征. *沉积学报*, 17(1): 44-50
- 方维萱. 1999b. 秦岭造山带泥盆纪构造热水沉积成矿盆地与流体成岩成矿特征及其演化规律. (博士学位论文), 西北大学地质系, 3-72
- 方维萱. 1999c. 银洞子-大西沟特大型矿床中重晶石岩类特征及成岩成矿作用. *岩石学报*, 15(3): 484-491
- 方维萱. 1999d. 陕西凤县铅铜山大型铅锌矿床矿物地球化学研究. *矿物学报*, 19(2): 198-205
- 方维萱. 1999e. 秦岭造山带古热水场地球化学类型及流体动力学模型探讨. 热水沉积成矿盆地分析与研究方法之二. *西北地质科学*, 20(2): 17-27
- 吴朝东, 陈其英, 雷家锦. 1999. 湘西震旦-寒武纪黑色岩系的有机岩石学特征及其形成条件. *岩石学报*, 15(3): 453-462