

南秦岭造山带安康石梯—旬阳神河早古生代热水沉积盆地构造—沉积相与热水聚矿特征

唐永忠¹ 杨兴科² 张宝荣³ 高荣虎¹ 吴 昊¹ 李晓聪¹

(1. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西地勘局第一地质队, 陕西 安康 725000)

摘要:南秦岭造山带安康石梯—旬阳神河一带早古生代为裂陷沉积盆地, 发育一套深水相“硅、灰、泥”沉积建造, 伸展构造体制下形成的裂陷型盆地中, 具有典型的深水沉积、火山喷流沉积与热水沉积同盆共存, 形成规模巨大独具特色的以重晶石、磁铁矿为主的多金属成矿带。热水沉积成矿盆地构造—沉积相反映了不同的构造变形—岩石组合—地球化学—沉积岩相的多维组合。南秦岭带三级热水沉积盆地发育的构造—沉积相, 可初步划分为 3 种类型: (火山)热水沉积成矿盆地构造—沉积相、深水缺氧环境中裂陷沉积成矿盆地的构造—沉积相、碳酸盐岩台地浅水沉积盆地的构造—沉积相。(火山)热水沉积成矿盆地构造沉积相主要表现为火山沉积、热水沉积、深水化学沉积、热水沉积成矿四位一体。裂陷沉积成矿盆地的构造沉积相主要表现为热水沉积、深水化学沉积、热水沉积成矿三位一体。碳酸盐岩浅水沉积盆地的构造沉积相主要表现为正常浅水沉积、热水沉积、热水沉积成矿三位一体。

通过对区内沉积成矿盆地的识别分析, 三级构造热水沉积成矿盆地受控于盆地中的同生断裂和火山活动, 具有沉积岩相、热水沉积岩组合、火山喷流沉积组合、显著成矿作用及物化探异常分布。三级构造热水沉积成矿盆地是矿床定位的构造空间, 四级热水沉积洼地为矿体(矿层)的容纳空间。区内热水沉积岩主要为重晶石(毒重石)岩、硅质岩、磁铁钠长石岩和铁碳酸盐岩类, 重晶石、磁铁矿等矿产多产于热水沉积岩中或火山(喷流)沉积岩的上盘。

关键词:南秦岭, 热水沉积盆地, 构造—沉积相, 热水沉积聚矿特征

中图分类号: P611.2⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1000-3657(2012)05-1261-10

南秦岭造山带早古生代沉积盆地是一个巨大的“聚宝盆”, 安康石梯—旬阳神河早古生代沉积盆地为一套“硅、灰、泥”黑色岩系沉积建造与热水沉积同盆共存, 形成以重晶石(毒重石)、铅锌磁铁矿为主的多金属矿产^[1-3]; 成矿作用主要与火山活动和热水沉积有关, 特别与热水沉积组合的钠长石岩关系密切^[4]。区内已探明安康石梯大型重晶石矿床、神河中型重晶石矿床及赤岩重晶石矿等, 近年来发现的旬阳县桂花—张河磁铁矿带, 长达近 50 km, 是继陕西旬北铅锌矿之后的最重要发现之一, 对其成矿控制条件、成矿规律的研究具有重要意义。

热水沉积成矿盆地构造—沉积相是构造变形—岩石组合—地球化学—沉积岩相的多维组合, 与热水沉积成矿关系密切^[1,2,4], 因此具有重要的理论与重大找矿意义。陕西安康石梯—旬阳神河早古生代沉积盆地中形成了重晶石(毒重石)、钒、铅锌和磁铁矿等矿床集中区, 与秦岭造山带泥盆纪沉积盆地中金—多金属成矿具有明显的成矿差异^[4], 本文重点从构造—沉积相和热水沉积岩(或热水沉积岩相)角度讨论, 探讨石梯—旬阳神河地区重晶石(毒重石)、钒、铅锌和磁铁矿成矿集中区与早古生代沉积盆地分级与热水沉积成矿关系。

收稿日期: 2012-02-08; 改回日期: 2012-04-10

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查矿产资源评价项目(200110200029、[2005]13-8)资助。

作者简介: 唐永忠, 男, 1965 年生, 高级工程师, 主要从事矿产地质勘查及盆地研究工作; E-mail: 625879916@qq.com。

1 热水沉积盆地级别划分及其主要特征

1.1 热水沉积盆地发育几条重要的同生断裂

热水沉积成矿盆地主要是由同生构造作用形成构造-沉积空间,同生断裂、同沉积洼地和生长背向斜是成矿的主要同生构造之一,它造成了盆地基底沉降,导致构造-沉积空间的形成。与成矿关系最为密切的为同生断裂和热水沉积洼地。

区域性同生断裂控制了热水沉积盆地的边界和分布范围,次级同生断裂则控制了矿田或矿床的分布范围。区内岩性岩相既有东西向变化,又有南北向变化,同生断裂往往发生在盆地边缘斜坡岩性变化较大部位,因此区内东西向、南北向同生断裂共同构成了同生断裂-热水沉积成矿网络,往往控制了矿床或矿体的产出,它们是热水沉积的矿液通道及沉淀场所。区内可以识别出的区域性同生断裂有石泉-安康断裂、公馆-白河断裂、吕河-茅坪断裂等,往往具有多期次活动特征(图 1)。

石泉-安康断裂:为东西向区域性大断裂,属同生断裂并长期活动。早期断面北倾,南部为浅水相混

砂质沉积,北部为深水相炭-硅-泥质沉积,沉积厚度南厚北薄,差异显著。该断裂是奥陶系热水沉积型重晶石等矿产的主要控矿构造。

吕河-茅坪断裂:为区域性同生断裂,近东西向展布。早期断面南倾,北部为碳酸盐台缘礁滩相,南部为深水硅质、炭泥质相。北部以铅锌矿和磁铁矿为主,南部有重晶石产出。

公馆-白河断裂:为近东西向区域性断裂,沿仁河口-公馆-白河一带展布,明显具同生断裂性质。断面北倾为主,属多期复合断裂带。据断裂两盘沉积建造、矿产分布特征,北部为碳酸盐岩开阔台地相,形成汞锑金矿产;南部为碳酸盐岩局限台地相,以铅锌矿为主。断裂形成于加里东晚期或华力西早期。早期属同沉积断裂,印支期具有逆冲断裂特征。

1.2 沉积盆地级别划分—一级和二级单元

安康石梯-旬阳神河早古生代裂陷盆地属一级沉积盆地,主要由安康茨沟-石梯热水沉积盆地、旬阳桂花-张河热水沉积盆地二个二级沉积盆地组成(表 1)。

按构造作用类型、动力学机制及构造-热水沉积成矿特征进一步划分为以下盆地类型。

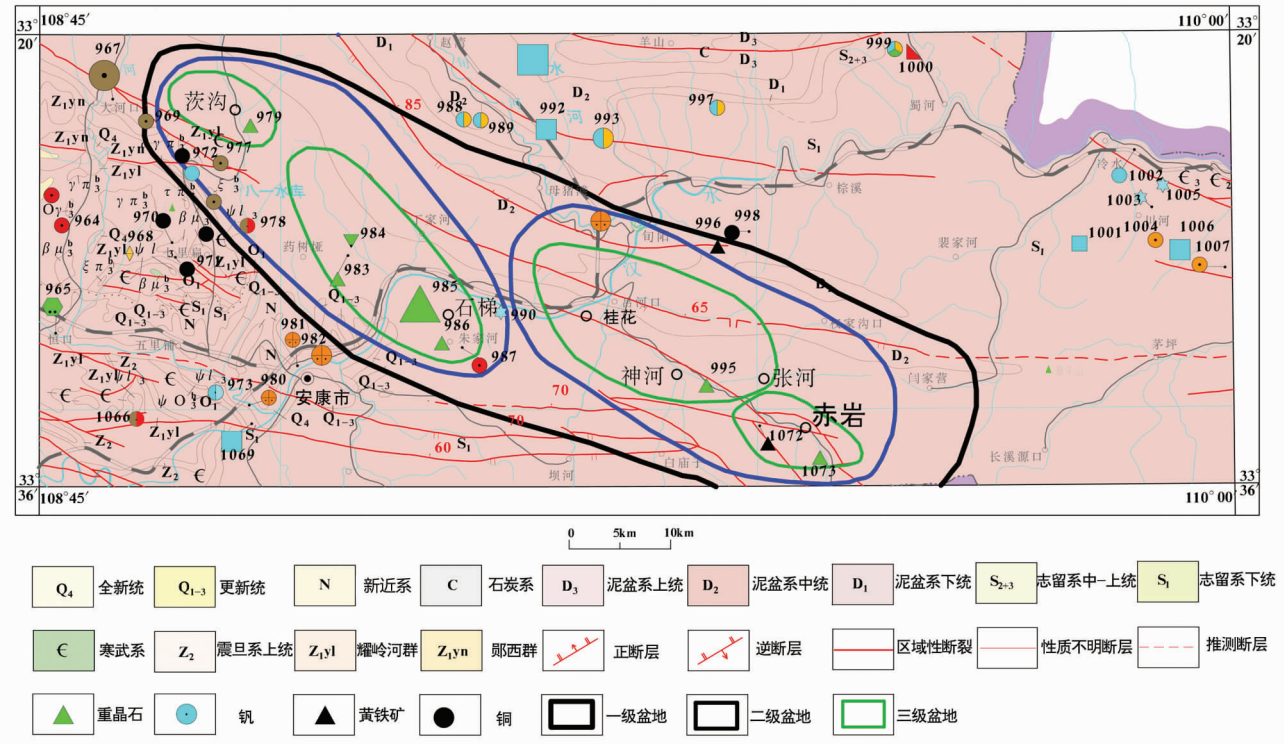


图 1 安康石梯—旬阳神河地区区域地质及沉积盆地分级图

Fig.1 Regional geological map showing gradation of the sedimentary basin in Shiti (Ankang) -Shenhe (Xunyang) area

表 1 安康石梯—旬阳神河沉积盆地分级与构造类型一览

Table 1 Sedimentary basin gradation and structural types of Shiti (in Ankang) –Shenhe (in Xunyang) area				
一级单元—南秦岭早古生代盆地	二级单元—安康—旬阳早古生代盆地	三级单元—早古生代热水沉积盆地	三级盆地的构造类型	主要矿产
安康石梯—旬阳神河早古生代裂陷盆地	安康茨沟—石梯沉积盆地	东镇—茨盆地	断陷型盆地	铀、钒
		茨沟—石梯盆地	裂陷型盆地	重晶石(毒重石)
	旬阳桂花—张河沉积盆地	桂花—张河盆地	裂陷型盆地	磁铁矿、重晶石
		金寨—赤岩盆地	断陷型盆地	重晶石

1.2.1 安康茨沟—石梯热水沉积盆地

安康茨沟—石梯热水沉积盆地主要由东镇—茨沟热水沉积盆地、茨沟—石梯热水沉积盆地二个三级裂陷盆地构成(以区域性银杏坝—吕河—茅坪同生断裂、石泉—安康同生断裂为界)。沉积盆地之间由近南北向断裂或火山活动形成的火山隆起(堆)所分隔。

安康石梯—旬阳神河早古生代裂陷盆地主要发育一套炭、硅质岩夹细碎屑岩、火山沉积岩等沉积建造。由早到晚,在沉积盆地内接受了由寒武系—志留系构成的完整向上变浅的沉积序列,发育半深海—外陆棚的硅质、炭质、泥质沉积及火山岩、次火山岩斜坡沉积,沉积范围逐渐缩小。中晚志留世,随着构造隆升活动加剧,盆地收缩填满并抬升成陆,受平利—牛山古陆隆升影响,盆地西南缘首先隆起,成为晚古生代隆起区而缺失中晚志留世及早泥盆世沉积,中泥盆世地层超覆在下志留统之上。

盆地古地理格局总体表现为南低北高,热水沉积同盆共存,热水沉积建造主要是碳硅质岩、重晶石(毒重石)相,海盆具有深—浅水陆棚性质。

1.2.2 旬阳桂花—张河热水沉积盆地

旬阳桂花—张河热水沉积盆地主要由旬阳桂花—张河热水沉积盆地、金寨—赤岩热水沉积盆地二个三级裂陷盆地构成。

旬阳桂花—张河早古生代裂陷盆地主要发育一套碳、硅质岩夹细碎屑岩、火山沉积岩等沉积建造。由早到晚盆地逐渐变浅,寒武系—志留系构成一完整的向上变浅的沉积序列,沉积范围逐渐缩小,发育外陆棚—半深海的硅质、炭质、泥质沉积夹火山岩、次火山岩斜坡沉积。火山岩主要为灰绿色块状绿泥绿帘石片岩或细碧质安山岩,局部发育火山凝灰岩、火山集块岩或火山角砾岩,细碧质安山岩见杏仁状构造。

在旬阳县桂花—张河一带磁铁矿发育地段,常见厚度 1~5 m 肉红色块状或条带状钠长石岩。热水沉积建造主要是炭硅质岩、重晶石(毒重石)岩、磁铁矿钠长石岩相。

中晚志留世,随着加里东运动,构造隆升活动加剧,沉积盆地收缩填满并抬升成陆,受平利—牛山古陆隆升影响,盆地西南缘首先隆起,成为晚古生代隆起区而缺失中晚志留世及早泥盆世沉积,中泥盆世地层超覆在下志留统之上。盆地古地理格局总体表现为南低北高,热水沉积、火山沉积同盆共存,沉积建造属于次稳定型,海盆具断陷—裂陷性质。

1.3 沉积盆地级别划分—三级单元—热水沉积盆地

三级构造热水沉积成矿盆地是热水沉积成矿发生的主要空间,也是矿质大规模聚集的场所及矿床的容纳空间。二级沉积盆地中边缘部位常发育多个三级构造热水沉积成矿盆地,它受控于二级沉积盆地中的同生断裂、火山隆起,往往具有突出的特殊沉积岩相、热水沉积岩组合及具显著成矿作用特点和物化探异常^[1-3]。往往具有典型的热热水沉积建造,如炭硅质岩、重晶石(毒重石)岩、磁铁矿钠长石岩沉积^[8],形成区域性铅锌、钡、钒、铀、硼等化探异常。三级构造沉积盆地内部常由更低序次同生断裂与水下隆起、火山隆起所分隔的四级热水沉积洼地组成,通常具有单断型特点。三级构造热水沉积成矿盆地是矿床定位的构造空间,四级热水沉积洼地为矿体(矿层)的容纳空间。

如旬阳桂花—张河磁铁矿带主要受吕河—茅坪同生断裂及力加坝、桂花、神河一带基性火山岩隆起控制,旬阳县桂花磁铁矿、重晶石矿赋存在吕河—茅坪同生断裂旁侧及基性火山岩隆起形成的三级热水沉积盆地中,磁铁矿具体赋存在旬阳县桂花—神河火山岩带中,重晶石则赋存于炭硅质岩热水沉积洼地(图 2)。

1.4 沉积盆地级别划分—热水沉积洼地

区内的热水沉积洼地,主要发育在寒武系、奥陶系深水相炭硅质岩、细碎屑岩裂陷部位和泥盆系碳酸盐台地浅水区相对深水部位,它往往控制了热水沉积型磁铁矿、重晶石矿的具体赋矿部位。如旬阳县张河—白河西营一带磁铁矿多赋存在深灰色薄层生

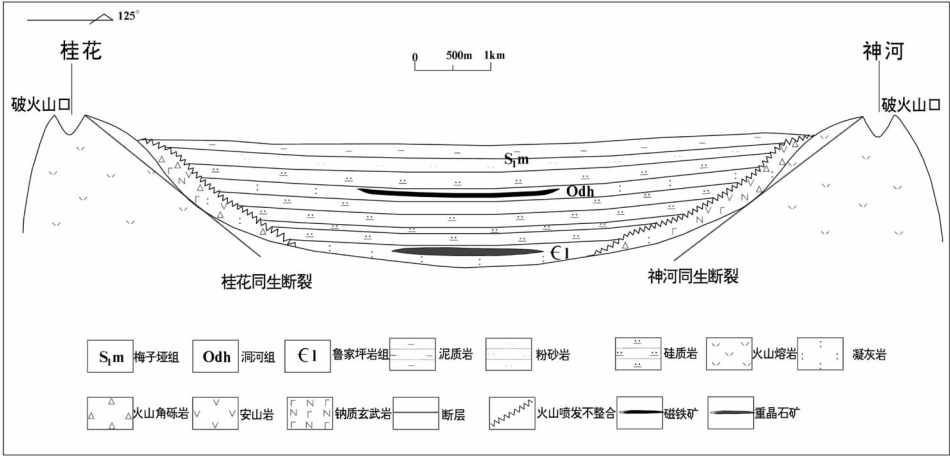


图 2 旬阳桂花-神河三级沉积盆地与热水沉积成矿模式图

Fig.2 The third grade basin and hydrothermal sedimentary mineralization pattern of Guihua-Shenhe in Xunyang

物碎屑灰岩与灰黄色粉砂质千枚岩界面的沉积洼地中,矿体呈条带状或层状沿岩性岩相界面分布,且矿体中部发育条带状钠长石岩。神河重晶石矿产在奥陶系洞河岩组深水相中厚层硅质岩与浅水相粉砂质千枚岩、粉砂岩过渡部位的热热水沉积洼地中^[10]。

2 热水沉积盆地的岩石组合与构造-沉积相

2.1 热水沉积盆地的主要岩石组合

热水成岩成矿作用发生和保存的必须条件是三级构造热水沉积盆地,它是热水沉积岩相及热水沉积矿床的构造-沉积容纳空间,是巨大的“热化学反应库”,与其共生的具有有机联系的盆地相共同组成了热水沉积盆地的充填地层体^[1,2,5,6]。热水沉积岩是热水沉积型重晶石矿、热水沉积-(改造)型磁铁矿最重要的物质组成,同时也是重要的找矿标志。热水沉积形成一般由早期的热水喷溢→主期热水喷流→晚期热水喷气演变。早期的热水喷溢多沿区域性同生断裂通道喷溢,形成块状热水沉积岩及网脉状、角砾状矿化,如下寒武统鲁家坪岩组下部的厚-块状硅质岩,类似热泉中的硅华;主期热水喷流主要形成多金属及热水喷流相,形成块状、条带状、层纹状矿石或热水沉积钠长石岩,同生富集 B、Ba、As、Mn 等热水沉积特殊元素,如中泥盆统石家沟组下部肉红色块状、条带状磁铁矿钠长石岩;晚期热水喷气主要形成浸染状矿石和热水喷气岩石,富含 F、As、Cl 等热水喷气元素^[4,7,8]。

南秦岭早古生代主要发育有钠长石岩、炭硅质

岩、重晶石(毒重石)岩及块状硫化物,常见的热水沉积岩主要是硅质岩、碳酸盐岩、钠长石岩、铁锰碳酸盐岩^[7,10,11]。根据岩石组合、岩石化学及与金属矿产关系,区内热水沉积岩可划分为钠长石岩类、硅质岩类、铁碳酸盐岩类、重晶石(毒重石)类(表 2)。

2.2 热水沉积盆地的构造-沉积相

热水沉积盆地构造-沉积相反映了不同的构造变形-岩石组合-地球化学-沉积岩相的多维组合。南秦岭三级热水沉积盆地发育的构造-沉积相,可初步划分为 3 种类型。

2.2.1 (火山)热水沉积成矿盆地构造-沉积相

(火山)热水沉积成矿盆地的构造-沉积相主要表现为火山沉积、热水沉积、深水化学沉积、热水沉积成矿四位一体。

以安康石梯大型重晶石^[12,13]和旬阳神河小型重晶石矿床为代表,构造-沉积岩相的自下而上结构为:奥陶系洞河岩组海底火山喷发岩相-火山沉积岩相→重晶石岩相+硅质岩相-毒重石岩相-钡解石岩相→钠长石岩相组成的热水沉积岩相→中泥盆统石家沟组浅海细碎屑岩相。从早到晚,由海底火山喷发岩相-火山沉积岩相→热水喷溢-喷流沉积相→热水喷流-充填交代沉积成矿演变。

奥陶系洞河岩组可分为 3 个亚段,其中第一亚段以厚层状炭硅质岩为主,第二亚段以薄板状含炭硅质岩为主,夹基性火山岩和重晶石岩(层),岩相及地层厚度变化大。基性火山岩原岩为角闪岩、(杏仁状)钠质玄武岩为主夹石英角斑岩,是旬阳县桂花磁铁矿主要赋矿层,其上有热水沉积的硅质岩-重晶

表 2 南秦岭造山带旬阳一带热水沉积岩类型及矿物组合
Table 2 Hydrothermal sedimentary rock types and mineral combinations of Xunyang area in South Qinling orogenic belt

热水沉积岩类	亚相类型	矿物组合	岩石成因与成矿关系
钠长石岩	石英钠长石岩	钠长石、石英、绢云母、磁黄铁矿、电气石	层块状, 热水喷流沉积, 多产于铅锌矿下盘, 与成矿关系密切
	磁铁钠长石岩	钠长石、磁铁矿、方解石、绢云母、黄铁矿	层块状, 条带状, 热水喷流沉积, 与磁铁矿成矿密切
	钠长角砾岩	钠长石、石英、绢云母、磁黄铁矿、黑云母	层块状, 热水沉积充填、交代
硅质岩	炭硅质岩	微晶石英、炭质、绢云母、粉砂质	层块状、层纹状、条带状, 热水喷溢, 与重晶石成矿密切
	硅化岩	微晶石英、绢云母	块状、条带状, 热水交代
铁碳酸盐岩	铁锰碳酸盐岩	铁白云石、铁方解石、锰方解石、石英	块状、条带状, 热水喷流, 与铅锌成矿密切
	铁白云石岩、黄铁矿泥石岩	铁白云石、铁方解石、绿泥石、黄铁矿	层状、条带状, 热水喷气, 与铅锌成矿密切
	菱铁矿岩	菱铁矿、石英、绢云母	层状、条带状, 热水沉积
重晶石-毒重石岩	重晶石岩	重晶石、磁铁矿、石英	层状、层纹状、条带状, 热水喷流, 与重晶石成矿密切
	毒重石岩	毒重石、钡解石、重晶石、闪锌矿	层状、层纹状、条带状, 热水喷流, 与毒重石成矿密切
	钡解石岩	斜钡钙石、钡解石、重晶石	层状、块状, 热水交代

石(毒重石)岩相。火山活动主要沿同生断裂呈裂隙式喷发,火山喷溢—喷流—喷气,形成流动状火山熔岩、火山集块(角砾岩)岩、火山凝灰岩等。

构造变形相方面, 主要表现为大规模的塑性构造流变,发育小型顺层掩卧褶皱、构造石香肠、拉伸线理及构造剪切形成的糜棱岩、构造片岩等。

地球化学方面则表现为早期热水沉积元素(Ba、B、As、Fe、Mn) 富集→中晚期多金属热水沉积成矿(Au、Ag、Zn、V、Mo),形成重晶石(毒重石)—磁铁矿。

构造—沉积相为塑性流变热水沉积成矿的深水相裂陷型火山—热水沉积盆地。

2.2.2 深水缺氧环境中裂陷沉积成矿盆地的构造—沉积相

裂陷沉积成矿盆地的构造—沉积相主要表现为热水沉积、深水化学沉积、热水沉积成矿三位一体。

南秦岭早古生代发育大套黑色“炭、硅、泥”沉积建造,反映沉积盆地为深水、缺氧、低能局限的裂陷盆地^[19,21,23,24]。在正常浅海陆棚—深水槽盆沉积上发生的热热水沉积是一个“突发事件或灾变事件”,具有特殊的物质组成和产态。旬阳县神河一带早寒武纪鲁家坪组和奥陶纪洞河岩组硅质岩的形成与热水喷流沉积有明确的关系,角砾状硅质岩代表了热水喷口及同生断裂发育部位,厚层状、块状硅质岩代表热水喷流(热泉硅华)沉积,层纹状、条带状硅质岩代表热水喷溢沉积,主要形成(炭)硅质岩—重晶石(毒重石)岩相。

构造变形相方面, 主要表现为大规模的塑性构

造流变,发育小型顺层掩卧褶皱、构造石香肠、拉伸线理及构造剪切形成的糜棱岩、构造片岩等。

地球化学方面则表现为早期热水沉积元素(Ba、B、As、Fe、Mn 等) 富集→中晚期多金属热水沉积成矿(Au、Ag、Zn、V、Mo),形成重晶石—毒重石—钡解石—磁铁矿。

构造—沉积相为塑性流变热水沉积成矿的深水相裂陷型热水沉积盆地。

2.2.3 碳酸盐岩台地浅水沉积盆地的构造—沉积相

碳酸盐岩台地浅水沉积盆地的构造—沉积相主要表现为正常浅水沉积、热水沉积、热水沉积成矿三位一体。

在旬阳县张河—白河县西营一带泥盆纪沉积盆地中, 中泥盆统石家沟组主要发育一套碳酸盐岩台地潮坪—浅水陆棚相生物碎屑灰岩、泥质粉砂岩、粉砂质千枚岩, 近年来发现了旬阳张河—白河县西营磁铁矿带。

中泥盆统石家沟组从上到下,由泥质(粉)细砂岩—粉砂质千枚岩—薄层生物碎屑灰岩—厚层块状生物礁灰岩,陆源碎屑物质逐渐变细减少,碳酸盐岩增多, 沉积环境由细碎屑岩浅水陆棚相—碳酸盐岩台地(生物礁)相发展。在旬阳县张河—白河县西营一带浅水三级沉积盆地中,形成了碳酸盐岩台地沉积,同时沿区域性银杏坝—吕河—张河—茅坪同生断裂旁侧,发育热水沉积磁铁矿钠长石岩。磁铁矿钠长石岩多呈厚层、块状,发育在磁铁矿体中心部位,钠长

石岩与磁铁矿组成条带状或层纹状,说明钠长石岩是热水沉积最强烈期喷流形成的,磁铁矿的成矿物质主要来自于盆下源热水沉积。

构造变形相方面,主要表现为大规模的构造挤压,发育大中型直立-斜歪褶皱及脆性断裂,形成一系列逆冲推覆构造等。

地球化学方面则表现为早期热水沉积元素(Ba、B、Fe、Mn)富集→中晚期热水沉积成矿,形成磁铁矿。

构造-沉积相为挤压推覆的碳酸盐岩台地浅水相断陷型热水沉积盆地。

3 热水沉积与热水聚矿特征

3.1 热水聚矿盆地发展与演化

热水聚矿盆地形成是一个复杂的系统,它必须是在伸展构造背景的断陷-裂陷次稳定环境下形成,同生断裂是其形成必备条件,在正常水成沉积上发生的热热水沉积成矿事件是一个“突发事件或灾变事件”,具有特殊的物质组成和产态。

在早古生代,平利—紫阳—镇坪沉积盆地,受扬子板块向北俯冲和武当古陆隆升的影响,构造活动加剧,局部地幔开裂,形成具陆内裂谷环境的海底基性火山喷发和碱性岩杂岩带^[5,14-16,25],而区内安康石梯—旬阳神河深水裂陷海盆在区域同生断裂影响下,形成了以硅质岩-重晶石、毒重石岩-钠长石岩为代表的热水沉积岩。随着加里东隆升加剧,平利—安康牛山一带首先结束早古生代沉积并成陆,盆地沉降中心逐渐向北迁移,晚古生代旬阳—镇安沉积盆地形成以碳酸盐岩夹碎屑岩沉积。盆地内部在同生断裂影响下,形成铁碳酸盐岩、硅质岩和钠长石岩系列热水沉积岩及铅锌矿。石炭纪—二叠纪,盆地逐渐萎缩,主要形成浅水碳酸盐岩台地,海水逐渐退出并隆升成陆。

3.2 热水沉积系统形成、发展与演化

根据南秦岭铅锌矿、磁铁矿、重晶石矿地质特征,结合沉积成矿背景分析认为:南秦岭热水聚矿盆地形成于早古生代,以裂陷盆地为主,局部发生的火山活动为热水成矿提供热源和物源,热水沉积发生于深水相“黑色岩系”中,热水沉积岩以重晶石岩-毒重石岩、硅质岩、钠长石岩系列为主,主要形成重晶石-毒重石、磁铁矿;热水喷流沉积主要发生在泥盆纪,赋存于碳酸盐岩台地及生物礁中,以地堑-地垒式断陷盆地为主,与生物礁和同生断裂关系密切。

热水沉积岩以铁锰碳酸盐岩、硅质岩系列为主,热水沉积成矿以热水喷流沉积为主,形成热水沉积-构造型铅锌矿;热水活动大致在石炭纪结束,以热水喷气为主,形成网脉状硅化岩等,一般无矿化发生。

热水沉积有一个完整的形成、发展及消亡过程或系统,其主要受控于构造运动及其有关的区域性同生断裂、海底火山活动。热水沉积作用开始于早寒武世,以热泉活动为主,奥陶纪早中期达到强烈期,热水喷流和海底火山喷发为主,晚期逐渐减弱,以火山喷气为主;志留纪时期,开始第二次热水活动,早期以热水充填、交代为主,区域性同生断裂(如石泉—安康同生断裂)旁侧,热水沉积以喷流为主,形成旬阳长沙—白河黄石板一带长达近百千米的钠长石岩带;中晚泥盆世,热水沉积活动达到鼎盛期,以热水喷流方式,在碳酸盐岩台缘形成铁锰碳酸盐岩;早石炭世,热水活动明显减弱或埋没,以热水喷气方式,一般无矿化发生,从而构成了一个完整的热水沉积演化系统(表3)。

3.3 热水聚矿盆地与多金属成矿

3.3.1 大型铅锌矿集区的成矿

位于扬子地台北缘志留系梅子垭组地层中的旬北大型铅锌矿集区,主要受地层、岩性、岩相、构造和地球化学等多因素控制,与海底热水喷流(喷气)—构造改造密切相关。

旬北地区铅锌矿地层层位对铅锌成矿的控制表现在矿化主要赋存在4个层位中,即下志留统梅子垭组下部层位、梅子垭组上部层位,中志留统双河镇组上部层位和中泥盆统石家沟组上部层位。志留系梅子垭组、双河镇组是细碎屑岩型铅锌矿的赋存层位,泥盆系石家沟组是碳酸盐岩型铅锌矿的赋存层位。地层层位对铅锌矿的控制表现在三方面:①矿床赋存在一个特定层位中;②控矿层位有一套利于成矿的岩性组合;③赋矿岩性是在较特殊的沉积环境下形成的。

地层层位及含矿岩层主要控制矿带的分布范围,含矿岩层的岩相与岩石组合条件则主要控制矿体的具体产出部位及其产态。区内铅锌矿体主要产于两种不同岩相、岩性界面附近或其一侧。如南沙沟矿区,主要矿体产于双河镇组一侧,赋矿岩性以细碎屑岩为主,其次为碳酸盐岩。在正常的沉积过程中,往往叠加一系列类型多样的热水沉积岩等特殊岩石。志留系以细碎屑岩为主要赋矿岩石,自下而上其

表 3 南秦岭造山带旬阳一带热水沉积演化与热水沉积成矿一览
Table 3 Hydrothermal sedimentary evolutions and hydrothermal sedimentary mineralization of Xunyang area in South Qinling orogenic belt

时代或地层	热水沉积岩类	矿物组合	热水沉积岩成矿关系	热水成矿方式
石炭系 袁家沟组	硅化白云岩	铁白云石、铁方解石、石英、 玉髓	层块状, 网脉状, 无矿化	热水喷气沉积
中泥盆统 石家沟组	铁锰碳酸盐岩	铁白云石、铁方解石、锰方解 石、石英	层块状、层纹状、条带状, 热 水喷溢, 与铅锌矿成矿密切	热水喷流
	磁铁钠长石岩	钠长石、磁铁矿、方解石、绢 云母、黄铁矿、黄铜矿	层块状、条带状, 与磁铁矿成 矿密切	热水喷流
志留系 梅子垭组、双河 镇组	铁白云石岩、黄铁绿 泥石岩	铁白云石、铁方解石、绿泥石、 黄铁矿	层状、条带状, 与铅锌金成矿 密切	热水喷气
	钠长石岩	钠长石、方解石、绢云母、黄 铁矿、磁黄铁矿	块状、条带状, 与磁铁矿成矿 密切	热水喷流
	钠长角砾岩	钠长石、石英、绢云母、 磁黄铁矿、黑云母	层块状, 角砾状, 与铅锌矿成 矿密切	热水充填、交代
奥陶系 洞河岩组	钠长石岩	钠长石、磁铁矿、方解石、绢 云母、黄铁矿	块状、条带状, 与磁铁矿成矿 密切	热水喷流
	重晶石岩	重晶石、磁铁矿、石英	块状、条带状, 与重晶石成矿 密切	热水喷流
	炭硅质岩	微晶石英、炭质、绢云母、粉 砂质	层状、层纹状、条带状, 与重 晶石成矿密切	热水喷流
	钠质玄武岩	绿泥石、绿帘石、角闪石、石 英、铁质	块状、条带状, 与磁铁矿成矿 密切	海底火山喷流
寒武系 鲁家坪岩组	重晶石岩	重晶石、磁铁矿、石英	层状、层纹状、条带状, 与重 晶石成矿密切	热水喷流
	毒重石岩	毒重石、钡解石、重晶石、闪 锌矿	层状、层纹状、条带状, 与毒 重石成矿密切	热水喷流
	钡解石岩	钡解石、斜钡钙石、重晶石	层状、块状	热水交代

垂向结构为:炭(硅)质岩→泥质岩→粉砂(砂)岩→泥砂质灰岩,构成一向上变浅的沉积序列。在上述沉积过程中,有较多的热水沉积物质参与,形成菱铁矿(粉)砂岩、菱铁矿灰岩、铁锰碳酸盐岩、铁白云石千枚岩、黄铁绿泥石岩、重晶石岩等热水沉积岩,与铅锌成矿关系十分密切。泥盆系以碳酸盐岩为主要赋矿岩石的铅锌矿,自下而上其垂向结构为:泥砂质岩→薄层生物碎屑灰岩→厚层生物灰岩→块状白云岩化礁灰岩,构成向上明显变浅的沉积序列。在成岩过程中,热水以喷流方式参与成矿,形成铁锰碳酸盐岩、重晶石砂岩、硅质白云岩、硅质岩等热水沉积岩。热水沉积岩往往是铅锌矿最直接赋矿岩石。

岩相古地理对镇旬盆地多金属矿控矿是十分明显的。区内东邻武当古陆,西为佛坪古陆,南有平利—牛山高地,北邻迷魂阵—板板山隆起。盆地沉积相带变化是东西向的,盆地方向是近南北向的。在南北方向上,区内有 2 条长约 60 km,宽 5~10 km 的生物礁带,控制了沉积相带的展布及变化。从盆缘到盆地沉积中心,沉积相由潮坪相—潟湖相—台缘生物礁相—斜坡相—开阔台地相—盆地相演化^[3,9]。

构造对成矿的控制主要表现为:盆地边缘、构造层次、构造样式等分别控制了矿田、矿床和矿体的形

态与展布。矿化分布具有双重结构,矿体产于临近基底的盖层有利岩石组合,即泥质—粉砂岩、碳酸盐岩中。沉积盆地边缘是区域性同生断裂的发育部位,同时也是构造变形软弱滑脱带与岩性岩相变化最剧烈的地带^[14-16]。因此,控制了铅锌矿带的宏观空间展布形态。在不同构造体制和构造深度下,不同构造层次分别控制了不同类型的矿产。①区域构造控制了矿带分布,如大羊山复向斜、旬阳复背斜及麻坪河断裂、吕河断裂,控制了以铅锌矿为主的多金属矿带。②矿区构造组合控制了矿床分布。矿床多位于区域断裂带特别是同生断裂带上,构造叠加明显;区内铅锌矿床往往分布于东西向褶皱断裂带与近南北向同生断裂的交汇处。③层间断层或构造滑脱带控制了矿体产态、规模,矿体就位于构造交汇部位、同沉积洼地等易形成热水沉积岩分布地段^[6]。

3.3.2 大型重晶石矿集区的成矿

安康石梯—旬阳神河—赤岩—平利一带,目前已探明安康石梯大型重晶石矿床、旬阳神河中型重晶石矿床、平利县獐子坪中型重晶石矿床及旬阳县桂花、何家沟、赤岩、平利大贵坪小型重晶石矿床(点)等,是陕西省最具规模的重晶石(毒重石)成矿带,主要分布在奥陶系洞河岩组炭硅质岩中。

地层层位、岩石组合对重晶石矿的成矿控制作用十分明显,主要表现在以下三方面:①矿床赋存在一个特定层位中,即奥陶系洞河岩组中的中下部;②控矿层位有一套利于成矿的岩性组合,即深水“炭、硅、泥”等黑色岩系及海底火山喷发-火山沉积;③赋矿岩性是在较特殊的深水还原与热水喷流等沉积环境下形成的一套炭硅质岩、钠质玄武岩、磁铁钠长石岩组合。

岩相古地理对成矿控制,主要表现在伸展构造体制下,古老基底旁侧的产生的同生断裂,构成断陷-裂陷盆地。海底火山活动形成的隆起,对三级热水沉积盆地起到了分割与成矿圈闭作用。

区域同生断裂是热水沉积成矿的有利通道,次级同生断裂及同沉积洼地是成矿具体赋矿部位。

3.3.3 大型磁铁矿带的成矿

旬阳神河—张河—白河西营一带,目前已发现旬阳县桂花磁铁矿床、旬阳县张河中型磁铁矿矿床及其他磁铁矿矿床(点)等,磁铁矿带长约 50 km,矿化宽度 5~50 m,其远景在大型以上。有两种矿化类型:即产在奥陶系洞河组炭硅质岩中与基性火山岩有关的磁铁矿和产在中泥盆统石家沟组细碎屑岩中的磁铁矿。其主要受层位、岩相和热水沉积钠长石岩及火山活动等控制。

地层层位、岩石组合对磁铁矿的成矿控制作用十分明显,主要表现在以下三方面:①矿床赋存在一个特定层位中,即奥陶系洞河岩组中的中下部,中泥盆统石家沟组中部;②控矿层位有一套利于成矿的岩性组合,即洞河岩组深水炭硅质岩、海底火山喷发-火山沉积及钠长石岩组合;石家沟组中部泥质粉砂岩、粉砂质千枚岩、薄层生物碎屑灰岩及磁铁钠长石岩组合;③赋矿岩性是在碳酸盐岩台地边缘与热水喷流等沉积环境下形成的一套泥质粉砂岩质石、磁铁钠长石岩组合。

岩相古地理对成矿控制,主要表现在伸展构造体制下,古老基底旁侧及不同沉积层序界面产生的同生断裂,构成断陷-裂陷盆地。不同沉积层序界面特别是淹没型不整合面,往往是岩性岩相界面和地球化学障,而且对成矿起隔挡圈闭作用。海底火山活动形成的隆起,对三级热水沉积盆地起到了分割与成矿圈闭作用。

4 结 语

南秦岭安康石梯—旬阳神河沉积盆地,磁铁矿、

铅锌矿、重晶石矿等多金属矿与火山喷流-火山沉积、热水沉积岩,同盆共存,具有特殊的沉积环境与沉积成矿组合,赋存于扬子板块被动大陆边缘区的次稳定型沉积建造中,具有特殊的沉积环境与沉积成矿组合。区域构造应力以南北方向为主,区域性同生断裂活动控制了二级和三级盆地的发生和发展,形成“地堑式”断陷或裂陷型盆地,同沉积断裂活动不但为热水溶液的上升提供了通道,而且在盆地中又形成了次级海底热水沉积洼地,为热水成矿和矿体富集提供了沉积场所^[3,4]。

南秦岭热水聚矿盆地形成于早古生代,以裂陷盆地为主,局部发生的火山活动为热水成矿提供热源和物源,热水沉积发生于深水相“黑色岩系”中,热水沉积岩以重晶石岩-毒重石岩、硅质岩、钠长石岩系列为主,主要形成重晶石-毒重石、磁铁矿;热水喷流沉积主要发生在泥盆纪,赋存于碳酸盐岩台地及生物礁中,以地堑-地垒式断陷盆地为主,与生物礁和同生断裂关系密切。热水沉积岩以铁锰碳酸盐岩、硅质岩系列为主,热水沉积成矿以热水喷流沉积为主,形成热水沉积-构造型铅锌矿;热水活动大致在石炭纪结束,以热水喷气为主。

参考文献(References):

- [1] 方维萱. 秦岭造山带中热水沉积成矿盆地的研究思路与方法初探[J]. 西北地质科学, 1999, 20(2):28-41.
Fang Weixuan. Qinling orogen of hydrothermal depositional mineralization in Palaeozoic sedimentary basin [J]. Northwest Geoscience, 1999, 20 (2):28-41 (in Chinese with English abstract).
- [2] 方维萱, 卢纪英, 张国伟. 南秦岭及邻区大陆动力成矿系统及成矿系列特征与找矿方向[J]. 西北地质科学, 1999, 20(2):1-14.
Fang Weixuan, Lu Jiyang, Zhang Guowei. On metallogenic system of continental dynamics and characteristics of metallogenic series and prospecting orientaton in the south Qinling and its vicinity areas [J]. Northwest Geoscience, 1999, 20(2):1-14(in Chinese with English abstract).
- [3] 唐永忠, 侯满堂. 南秦岭古生代沉积盆地沉积-构造事件与热水沉积成矿[J]. 矿产与地质, 2006, 20(2):102-108.
Tang Yongzhong, Hou Mantang. Sedimentary-tectonic event and hydrothermal depositional mineralization in Palaeozoic sedimentary basin, south Qinling [J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20(2):102-108(in Chinese with English abstract).
- [4] 薛春纪. 秦泥盆纪热水沉积[M]. 西安:西安地图出版社, 1997: 85-122.
Xue Chunji. Hydrothermal Sediment of Devonian Period in Qinling, China [M]. Xi'an:Xi'an Cartographic Publishing House,

- 1997:85–122(in Chinese).
- [5] 夏祖春, 夏林圻, 张诚. 北大巴山碱质基性—超基性潜火山杂岩的辉石矿物研究[J]. 西北地质科学, 1992, 13(2):22–30.
Xia Zuchun, Xia Linqi, Zhang Cheng. The study of Pyroxene minerals of alkali—basic—ultrabasic subvolcanic complex from northern Daba MTS [J]. Northwest Geoscience, 1992, 13(2):22–30 (in Chinese with English abstract).
 - [6] 唐永忠, 吴帮朝. 陕西镇安—旬阳盆地汞锑铅锌金成矿控制条件[J]. 地质通报, 2003, 22(7):49–53.
Tang Yongzhong, Wu Bangcao. Study of metallogenic condition of Devonian and Silurian lead—zinc gold deposits in Zhenan—Xunyang ore field [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(7): 49–53(in Chinese with English abstract).
 - [7] 祁思敬, 李英. 南秦岭晚古生代海底喷气—沉积成矿系统 [J]. 地学前缘, 1999, 6(1):171–179.
Qi Sijing, Li Ying. The upper Paleozoic submarine exhalative—sedimentary metallogenic system in south Qinling [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1):171–179(in Chinese with English abstract).
 - [8] 薛春纪, 刘淑文, 李强, 等. 南秦岭旬阳盆地地下古生界钠长石岩岩石学和地球化学特征[J].中国地质, 2005, 32(3):424–433.
Xue Chunji, Liu Shuwen, Li Qiang, et al. Geology and geochemistry of Lower Paleozoic albitite in the Xunyang basin,south in Qinling[J]. Geology in China, 2005, 32(3):424–433 (in Chinese with English abstract).
 - [9] 唐永忠. 镇旬盆地南西缘泥盆纪碳酸盐台缘生物礁与层控铅锌矿[J]. 陕西地质, 2000, 18(2):30–37.
Tang Yongzhong. The biogenic reef and stratabound Lead—zinc deposit in the SW margin of carbonate platform in Devonian period in Zhenxun basin[J]. Geology of Shaanxi, 2000, 18(2):30–37(in Chinese with English abstract).
 - [10] 肖荣阁, 张汉城, 陈卉泉, 等. 热水沉积岩及矿物岩石标志[J]. 地学前缘, 2001, 8 (4):379–385.
Xiao Rongge, Zhang Hancheng, Chen Huiquan, et al. Hyhrothermal sedimentary rock and indicators of minerals and rocks [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8 (4):379–385(in Chinese with English abstract).
 - [11] 肖荣阁, 张宗恒, 陈卉泉, 等. 地质流体自然类型与成矿流体类型[J]. 地学前缘, 2001, 8 (4):245–251.
Xiao Rongge, Zhang Zonghuan, Chen Huiquan, et al. Type of indicators of geological fluids and ore—forming fluid [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8 (4):245–251 (in Chinese with English abstract).
 - [12] 廖明汉, 王波. 陕西石梯重晶石矿床地质特征及其成因初步探讨[J]. 陕西地质, 1988,2.
Liao Minghan, Wang Bo. The geological characteristics and the genesis of the Shiti Barite deposit of Shaanxi [J]. Geology of Shaanxi, 1988, 2(in Chinese with English abstract).
 - [13] 吴胜华, 刘家军, 柳镇江, 等. 陕西石梯钼矿床中流体包裹体特征及成因意义[J]. 中国地质, 2010, 37(5):1469–1479.
Wu Shenghua, Liu Jiajun, Liu Zhenjiang, et al. Characteristics of fluid inclusions in barite, witherite and barytocalcite from the Shiti barium deposit in southern Shaanxi and their genetic significance [J]. Geology in China, 2010, 37(5):1469–1479(in Chinese with English abstract).
 - [14] 王靖华, 张复新, 于在平, 等. 秦岭金属矿床成矿系列与大陆造山带构造动力学背景[J]. 中国地质, 2002, 29(2):192–196.
Wang Jinghua, Zhang Fuxin, Yu Zaiping, et al. Minerogenetic series of metallic ore deposits in the Qinling Mountains and tectonodynamic background of the continental orogenic belts [J]. Geology in China, 2002, 29(2):192–196 (in Chinese with English abstract).
 - [15] 杨志华, 郭俊锋, 苏生瑞, 等. 秦岭造山带基础地质研究新进展[J]. 中国地质, 2002, 29(3):246–256.
Yang Zhihua, Guo Junfeng, Su Shengrui, et al. New advances in the geological study of the Qinling orogen [J]. Geology in China, 2002, 29(3):246–256(in Chinese with English abstract).
 - [16] 路凤香, 王春阳, 胡宝群, 等. 南秦岭下地壳组成及岩石圈的拆离俯冲作用[J]. 中国地质, 2003, 30(2):113–119.
Lu Fengxiang, Wang Chunyang, Hu Baoqun, et al. Structure of the lower crust and detachment and subduction of the lithosphere of the South Qinling[J]. Geology in China, 2003, 30(2):113–119 (in Chinese with English abstract).
 - [17] 王瑞廷, 毛景文, 任小华, 等. 区域地球化学异常评价的现状及其存在的问题[J]. 中国地质, 2005, 32(1):168–175.
Wang Ruiting, Mao Jingwen, Ren Xiaohua, et al. Facts and problems of the evaluation of regional geochemical anomalies [J]. Geology in China, 2005, 32(1):168–175(in Chinese with English abstract).
 - [18] 齐文, 侯满堂. 镇旬矿田泥盆系和志留系铅锌矿的成矿地质条件分析[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 452–462.
Qi Wen, Hou Mantang. Metallogenic conditions of Devonian—Silurian lead—zinc deposits in the Zhenxun ore field[J]. Geology in China, 2005, 32(3):452–462(in Chinese with English abstract).
 - [19] 高菊生, 王瑞廷, 张复新, 等. 南秦岭寒武系黑色岩系中夏家店金矿床地质地球化学特征[J]. 中国地质, 2006, 33(6):1371–1378.
Gao Jusheng, Wang Ruiting, Zhang Fuxin, et al. Geology and geochemistry of the Xiajiadian gold deposit in the Cambrian black rock series in the South Qinling [J]. Geology in China, 2006, 33 (6):1371–1378(in Chinese with English abstract).
 - [20] 叶天竺, 薛建玲. 金属矿床深部找矿中的地质研究[J]. 中国地质, 2007, 34(5):855–869.
Ye Tianzhu, Xue Jianling, et al. Geological study in search of metallic ore deposits at depth [J]. Geology in China, 2007, 34(5): 855–869(in Chinese with English abstract).
 - [21] 刘平, 廖友常, 殷科华, 等. 与火山活动有关的热液沉积锰矿——以贵州二叠纪锰矿为例[J]. 中国地质, 2008, 35(5):992–1006.
Liu Ping, Liao Youchang, Yin Kehua, et al. Hydrothermal sedimentary manganese deposits associated to volcanic activities—Permian manganese deposit in Guizhou [J]. Geology in China, 2008, 35(5): 992–1006 (in Chinese with English abstract).
 - [22] 王瑞廷, 李剑斌, 任涛, 等. 柞水—山阳多金属矿集区成矿条件及找矿潜力分析[J]. 中国地质, 2008, 35(6):1291–1298.

- Wang Ruiting, Li Jianbin, Ren Tao, et al. Metallogenic conditions and prospecting potential of the Zhashui–Shanyang poly–metal ore cluster[J]. *Geology in China*, 2008, 35(6):1291–1298 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张复新, 王立社, 侯俊富. 秦岭造山带黑色岩系与金属矿床类型及成矿系列[J]. *中国地质*, 2009, 36(3):694–704.
- Zhang Fuxin, Wang Lishe, Hou Junfu. Black rock series, types of ore deposits and ore-forming systems in Qinling orogenic belt[J]. *Geology in China*, 2009, 36(3):694–704 (in Chinese with English abstract).
- [24] 侯满堂. 陕西马元铅锌矿有机质与成矿作用的关系研究[J]. *中国地质*, 2009, 36(4):861–870.
- Hou Mantang. The relationship between organic matter and lead–zinc mineralization in the Mayuan lead–zinc deposit, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 2009, 36(4):861–870 (in Chinese with English abstract).
- [25] 陈衍景. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. *中国地质*, 2010, 37(4):854–865.
- Chen YanJing. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, central China [J]. *Geology in China*, 2010, 37(4):854–865 (in Chinese with English abstract).

Structure–sedimentary facies and hydrothermal mineralization characteristics of Shiti (in Ankang) –Shenhe (in Xunyang) Early Paleozoic hydrothermal basin in South Qinling orogenic belt

TANG Yong–zhong¹, YANG Xing–ke², ZHANG Bao–rong³,
GAO Rong–hu¹, WU Hao¹, LI Xiao–cong¹

(1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. No. 1 Geological Party, Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Ankang 725000, Shaanxi, China)

Abstract: The Early Paleozoic Shiti (in Ankang) –Shenhe (in Xunyang) area belongs to the South Qinling orogenic belt and has the characteristics of the so-called “chert–limestone–mudstone” sedimentary edifice in deep–water setting. It was a rifting basin formed in the extensive structural regime, and there coexisted the classic deep–water sedimentation, volcanic exhalative sedimentation and hydrothermal sedimentation, producing the special and unique polymetallic field composed mainly of barite and magnetite. The facies of hydrothermal sedimentary mineralization basin show distinct several–dimensional associations comprising structural deformation, petrologic composition, geochemical signature and features of sedimentary rocks. The structure–sedimentary facies of the third–grade hydrothermal sedimentary basin in South Qinling orogenic belt can be roughly divided into 3 types. The first type is the structure–sedimentary facies of volcanic hydrothermal sedimentary mineralization basin, which has the Quaternary characteristics of volcanic sedimentation, hydrothermal sedimentation, deep–water chemical sedimentation and hydrothermal sedimentary mineralization. The second is the facies of the deep–water and oxygen–absent rifting sedimentary mineralization basin, which has the trinity characteristics of hydrothermal sedimentation, deep–water chemical sedimentation and hydrothermal sedimentary mineralization. The third is the facies of the shallow–water carbonate platform, which has the trinity characteristics of normal shallow–water chemical sedimentation, hydrothermal sedimentation and hydrothermal sedimentary mineralization.

The analysis and identification show that the third–grade hydrothermal sedimentary mineralization basin is controlled by the syngenetic faults and the volcanic actions, having the geographic features of the sedimentary rocks, association of hydrothermal sedimentary rock, exhalation association, obvious mineralization and distribution of geophysical and geochemical anomalies. The third–grade hydrothermal sedimentary mineralization basin is the structural space for ore deposits, and the fourth–grade hydrothermal sedimentary depression acts as the suitable space for ore body. The exhalites in the region mainly include baritite, chert, magnet–albitite and ferro–carbonate. The minerals such as barite and magnetite are mostly grown in the exhalites or the hanging wall of the volcanic sedimentary rocks.

Key words: South Qinling; hydrothermal sedimentation basin; structure–sedimentary facies; characteristics of hydrothermal sedimentary mineralization

About the first author: TANG Yong–zhong, male, born in 1965, senior engineer, engages in geological exploration and research; E–mail: 625879916@qq.com.