

西秦岭地区生物礁与铅锌矿关系的再认识

何进忠^{1,2)} 姚书振¹⁾ 彭德启³⁾ 朱永新²⁾

1) 中国地质大学, 湖北武汉 430074;

2) 甘肃省地质调查院, 甘肃兰州 730000;

3) 甘肃省地勘局, 甘肃兰州 730000

摘要 本文以前人对西秦岭地区地层、岩相及有机地球化学研究成果为基础, 结合补充的实际资料, 论述了生物礁与西秦岭铅锌矿的伴生关系及其成因联系。地质建造上, 规模矿床赋矿地层的共同特点是相对发育灰岩及生物灰岩; 空间上, 生物礁为沉积成矿洼地的障壁; 层序上, 沉积型铅锌矿和改造型铅锌矿与生物礁的伴生关系有所不同, 前者一般赋存于生物灰岩或碎屑岩中, 后者的矿体常赋存在生物灰岩与泥质岩的过渡部位, 表现为礁硅岩套。与造礁生物有关的有机质可能在沉积成矿或改造成矿作用发生前的成岩过程中, 参与了硫酸盐的热化学还原及铅、锌等多金属元素的萃取、运聚过程。板内伸展阶段的深源流体、陆内俯冲阶段的深源或岩浆热液注入先存的中低温富有机质卤水, 分别导致了沉积和改造成矿作用发生。沿生长断裂发生的热水沉积成矿作用促进了处于低纬度地区的生物礁生长, 并形成成矿洼地的障壁。生物礁在改造成矿过程中的作用主要在于形成利于改造成矿作用发生的成矿构造。

关键词 生物礁; 铅锌矿; 伴生关系; 成矿机制; 西秦岭

中图分类号: Q911.6; P618.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-3021(2008)01-61-11

Reconsideration of the Relationship between Organic Reef and Lead-Zinc Deposits in West Qinling

HE Jinzhong^{1,2)} YAO Shuzhen¹⁾ PENG Deqi³⁾ ZHU Yongxin²⁾

1) China University Of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074;

2) Gansu Institute of Geological Surveying, Lanzhou, Gansu 730000;

3) Gansu Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou, Gansu 730000

Abstract Based on previous studies of stratigraphy, lithofaces and organic geochemistry in combination with data obtained by the authors, this paper deals with the association relationship and genetic connection of organic reef with lead-zinc deposits in West Qinling region. In geological formation, the lead-zinc ore-bearing strata are characterized by well-developed limestone and biogenic limestone; in space, the organic reef generally acted as the baffle of the ore-forming depression; in sequences, the association relationship between organic reef and sedimentary lead-zinc deposits is different from that between organic reef and reformation deposits, i. e., the former occur in limestone or clastic rocks, whereas the latter often occur in the transitional position between limestone and argillite. The organic matter related to hermatypic organism was likely to participate in such processes as thermal sulfate reduction, extraction of lead-zinc from rocks, transportation and accumulation before sedimentary mineralization or reformation mineralization. The injection of fluids from the depth during the intraplate stretching and that from the depth or magma during intracontinental subduction into epithermal to mesothermal organism-rich brine led to sedimentary mineralization and reformation mineralization respectively. The hy-

本文由中国地质大学(武汉)承担的地调局资源评价部项目“秦岭地区重大找矿疑难问题研究”(编号:200310200040)资助。

收稿日期:2007-07-11; 改回日期:2007-08-22。责任编辑:刘志强。

第一作者简介:何进忠,男,1963年生,博士,教授级高工,长期从事矿产地质与矿床地球化学预测模式研究;通讯地址:730020,甘肃省兰州市雁儿湾路279号;电话:0931-9702981;E-mail:viewsino@163.com。

drothermal sedimentation and mineralization along the growing faults facilitated the formation of organic reef or baffle of depressions in the low latitude area. The role of organic reef in reformation mineralization lies primarily in the formation of metallogenic structures favorable for reformation mineralization.

Key words organic reef; lead-zinc deposit; association relationship; metallogenic mechanism; West Qinling

西秦岭铅锌矿床属于 SEDEX 型矿床,是在内生和外生共同作用下形成的,所有规模铅锌矿床均产于中秦岭泥盆纪—中三叠世板内裂陷盆地的次级凹陷中(冯益民等,2003)。其中,沉积成矿作用发生于板内伸展阶段的海西期,改造成矿作用发生于陆内俯冲—走滑阶段的印支晚期—燕山期,岩浆侵入活动强烈,但尚未发现与新生代以来沿玛曲—迭部断裂持续发生的俯冲—走滑作用(张岳桥等,2005)有关的铅锌矿化。据统计,共有铅锌矿床(点)161处(孙矿生等,2004),其中大型7处,中型5处,小型15处,矿点107处,矿化点28处。对西成地区泥盆系单个矿床或矿田产出的地层、岩相条件、构造控矿规律、矿床地球化学等已有大量而深入的研究(武安斌等,1992;林兵,1993;祁思敬等,1993,1999;杜远生等,1996;汪集磊等,1996;方维萱等,2000);并且认为生物礁与成矿关系密切(许凤仪,1991;李建中等,1993;邓海军等,2005),或铅锌矿绝大部分分布在迎风礁和背风礁之间的泻湖区和礁与泻湖交界处(杜远生等,1991),或铅锌矿床的形成和分布明显受碳酸盐岩沉积相带的控制,半开阔台地相和生物滩、滩后浅水盆地相是西成矿田大中型灰岩型铅锌矿床形成的最有利的控矿岩相,生物滩、礁后浅水盆地相也是区内热水沉积改造矿床的赋矿层位和最重要的控矿岩相(武安斌等,1993)。

那么,生物礁和铅锌矿床之间的关系究竟密切到何种程度呢?成生联系如何?本文认为生物礁与铅锌矿床在地质建造及时空上呈现伴生关系,并且具有一定的成因联系。

所谓伴生关系是指在时空上经常相伴出现,可以是同一地质作用的产物,但不一定在成因上和形成时间上有必然联系,也可以独自出现。类似于伴生矿物、伴生元素等概念。以下就上述两个问题,结合该地区铅锌成矿作用方面研究的新成果,对已有地球化学资料的重新整理及本人获取的资料进行论述。

1 地质建造上铅锌矿与生物灰岩是伴生关系

地质建造上的伴生关系表现为规模铅锌矿床赋矿

地层的岩石建造均以发育灰岩及厚层灰岩为特点。

赋矿地层时代横跨震旦纪至石炭纪,但绝大多数铅锌矿集中分布于中秦岭的晚古生界,且自东向西赋矿地层相应地也由中泥盆统抬高至中、下石炭统(表1)。

对比分析西秦岭地区的赋矿地层的岩性及矿床赋存情况表明,规模矿床主要集中于安家岔组、黄家沟组、红岭山组和中石炭统,其共同特点是这些地层均相对发育灰岩及生物灰岩,而含矿较差的双狼沟组为深水相泥质浊积岩。同时,并非处处生物灰岩和厚层灰岩发育地段含矿,如西秦岭及东昆仑一带二叠系中的厚层生物灰岩(田树刚等,2001),至今未见有铅锌矿存在的报道,也并非无厚层灰岩就绝对不含矿,如只有少量灰岩和泥灰岩的舒家坝组中也有铅锌矿点。

2 时空上铅锌矿床与生物礁的伴生关系

2.1 空间上的伴生关系

笔者认为空间上呈伴生关系的证据表现在以下3方面:

(1)岩相古地图上铅锌矿床与生物礁的3种伴生关系。各位学者在研究西秦岭地区泥盆系中的铅锌矿床时,均绘制了具有自己特色的岩相古地图,由于所获资料及对资料的解释不同,而具有不同的划分方案或名词称谓(许凤仪,1991;杜远生等,1991;李建中等,1993;武安斌等,1993;孙矿生等,2004),但均识别出了碳酸盐岩台地相和生物礁,造礁生物为珊瑚、层孔虫、腕足类、苔藓虫组合及共生的(蓝绿藻门的)钙藻(图1)。

以孙矿生等编制的岩相古地图为例(图2),铅锌矿床与生物礁的伴生关系有3种主要形式:台内凹地相、台缘凹地相和浅海陆棚相,生物礁主要发育在碳酸盐岩台地的南北边缘,构成成矿洼地的障壁。3种伴生关系表明,铅锌沉积成矿作用发生的位置完全取决于热液喷口及凹地的位置,厂坝、李家沟、向阳山、毕家山等规模矿床均处于台缘生物丘滩亚相中,邓家山、尖崖沟铅锌矿产于浅海陆棚相的生

表 1 西秦岭铅锌矿赋矿地层

Table 1 Ore-bearing strata of lead-zinc deposits in West Qinling

地区	构造单元	地层	岩组及岩性	赋存矿床	
西部		石炭系	中统	下加岭组、东扎口组并层 C_{2x-dz} 。下加岭组：灰—深灰色灰岩、生物碎屑灰岩、含砾灰岩夹砾岩、砂岩、页岩；东扎口组：以灰色调为主的粉砂岩、细砂岩、泥岩、泥灰岩、灰岩	窑沟、下拉地等中、小型铅锌矿
			下统	巴都组 C_{1bd} ：以暗灰色为主的杂色砂岩、粉砂岩夹砂质灰岩、砾状灰岩及砾岩。大草滩组 C_{1dc} ：灰—紫红色、灰绿色变质砂岩、粉砂岩及粉砂质板岩	
中部	中秦岭 D_1-T_2 板内裂隙盆地	泥盆系	上统	大草滩群及王家店组下部：大草滩群包括红相和绿相两种类型，红相以紫红色砂、砾、泥岩为主，绿相位于红相南侧，为灰绿色泥岩、砂岩及少量砾岩；王家店组底部为紫红色砂岩、灰褐色砂岩	
				梅川组：灰—灰褐色薄层石英细砂岩、板岩、灰质板岩	
			中统	舒家坝群 D_{2sj} ：舒家坝群 D_{2sj} 灰绿色板岩、变砂岩、变粉砂岩韵律性互层，夹少量灰岩、泥灰岩	铅锌矿床(点)
				双狼沟组 D_{3sl} ：灰—灰绿色中厚层、厚层、块状及薄层细粒岩屑石英砂岩、石英砂岩、粉砂岩，及泥质粉砂岩为主夹同色粉砂质板岩、板岩，局部偶夹灰岩	
				红岭山组 $D_{2,3hl}$ ：为一套灰—深灰色碳酸盐岩建造。下部或底部为灰—深灰色薄层泥晶灰岩与泥灰岩互层；中下部为深灰色含泥质条带生物灰岩，中上部为灰—深灰色中厚层状含生屑核形石微晶灰岩，顶部为含生屑及珊瑚的微晶灰岩，总体为一碳酸盐岩台地向上变浅层序	代家庄中型铅锌矿及半沟小型铅锌矿
	黄家沟组 D_{2h} ：灰绿色板岩、钙质粉砂质板岩、局部夹少量微—泥晶灰岩，由单一岩性构成单一的韵律性层序				
	南秦岭	中下统	当多组 $D_{1,2d}$ ：中上部深灰、灰绿、褐紫红色板岩、变石英砂岩夹灰岩、铁质岩；下部深灰色灰岩夹板岩、变粉砂岩，底部变砂岩、板岩、含磷砂质灰岩	铅锌矿点	
东部	中秦岭 D_1-T_2 板内裂隙盆地	泥盆系	上统	双狼沟组 D_{3sl} ：灰色、灰绿色浅变质细砂岩、粉砂岩与板岩互层，局部夹紫红色粉砂质板岩及灰岩、泥灰岩	
			中上统	红岭山组 $D_{2,3hl}$ ：灰白—灰色中厚—巨厚层灰岩、生物灰岩夹泥灰岩、局部夹板岩。下部有时变为角砾状、团块状及条带状灰岩	洛坝、页水河等中型铅锌矿
			中统	舒家坝群 D_{2sj} ：灰绿色板岩、变砂岩、变粉砂岩韵律性互层，夹少量灰岩、泥灰岩	铅锌矿点
			黄家沟组 D_{2h} ：深灰色、黄褐色浅变质钙质砂岩、粉砂岩、粉砂质千枚岩，灰绿色板岩，灰色灰岩、泥灰岩组成韵律性互层	毕家山、庙沟、邓家山等大中型铅锌矿	
		中下统	安家岔组 $D_{1,2aj}$ ：灰绿、黄绿、黄褐色灰岩、生物灰岩、粉砂质绢云千枚岩、变粉砂岩互层，上部夹变砂岩	厂坝—李家沟、向阳山等大中型铅锌矿	
	上志留统	吴家山组 S_{3w} ：上部粉红色、灰白色大理岩，黑色碳质千枚岩、白云岩、变砂岩、变砾岩；下部黑云石英片岩夹大理岩	沿地层北缘有数处铅锌矿点		

物层礁滩亚相中，洛坝铅锌矿产于生物丘礁亚相中，焦沟铅锌矿产于盆地亚相中，表明生物礁与成矿洼地在空间上是伴生关系，并非整个生物礁成矿。与此相似的是凤太地区铅锌矿床的成矿条件，南部有生物礁滩存在，中部有近南北向水下沙坝分布，构成本区西部半封闭滨海水盆地，铅锌矿床及大多数矿点多分布于西南部三叉生物礁滩隆起区北缘，构成礁后相弧形铅锌矿带；生物礁与成矿洼地也是伴生关系，并非有生物礁就会有矿床产出。

从更小的尺度上看矿体与生物礁的伴生关系，如洛坝铅锌矿，矿体旁侧及附近均存在大量的生物灰岩或生物礁灰岩，紧靠富铅锌矿脉的灰岩发育的化石细小，相对较远的化石以珊瑚类为主(祝新友等 2006)。

(2) 区域地球化学异常显示生物礁与沉积型铅锌矿床的伴生关系更明显。Chester(1965)研究发

现 Ni/Co 是判定生物礁的量化指标(钟建华等, 2005)，磷元素是生物生息繁衍的必须营养元素，磷酸盐矿物和海绿石是鉴别具有高有机质产率的主要标志，而 Ba/Sr 则是指示热水沉积作用的有效指标。在此针对西成地区利用 1:20 万图幅成县幅区域岩石地球化学分析数据勾绘的磷地球化学图及 Ba/Sr 、 Ni/Co 异常图如图 3，厂坝、李家沟、向阳山、毕家山等大型矿床处于或紧挨 P 含量相对较高的区域 ($>640 \times 10^{-6}$)，亦即处于有机质产率较高的区域； Ni/Co 、 Ba/Sr 仅在厂坝、李家沟等矿床附近存在异常。这种现象从某种程度上反映出沉积型铅锌矿床与生物礁的伴生关系更明显，但页水河、邓家山一带的铅锌矿床(点)离 Ni/Co 、 Ba/Sr 的异常较远，且处于磷含量较低的区域 ($320 \sim 640$) $\times 10^{-6}$ ，表明浅海陆棚相条件下产出的矿床与造礁生物活动的关系不太密切。与该现象不同的是孙省利针对西成地区

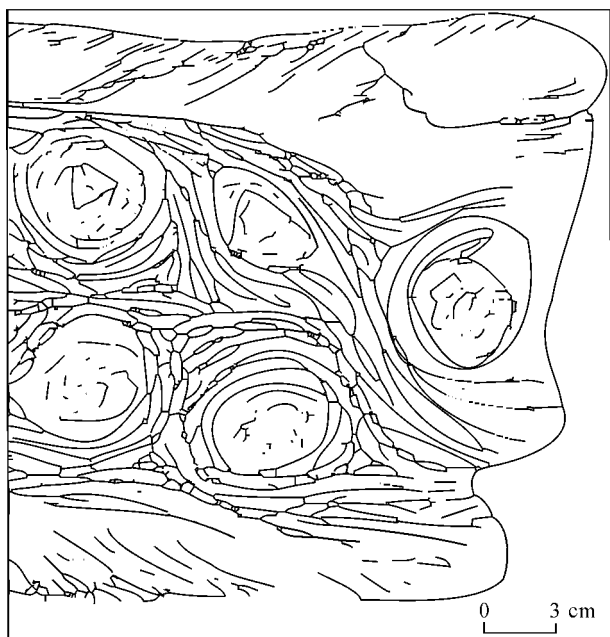


图 1 磨沟铅锌矿下盘灰岩中与群体珊瑚共生的藻丝素描图
Fig. 1 Alginite associated with colony of coral in footwall limestone of the Mogou lead-zinc deposit

不同地层、不同类型矿床矿石及围岩有机碳含量的分析结果：厂坝型铅锌矿矿床和围岩 $C_{org} = 0.12\% - 0.85\%$ ，毕家山—邓家山矿床及围岩中 $C_{org} = 0.64\% - 2.47\%$ ，并认为前者较后者的受变质程度较高(孙省利, 1999)。由此可见由 P 来反映古沉积环境中的有机质产率可能更为合理。

(3) 生物灰岩中铅锌含量高是二者呈伴生关系的体现。前人及本文计算的西秦岭主要赋矿地层碳酸盐岩及礁灰岩 Pb、Zn 平均含量列于表 2，所有赋矿地层中灰岩和礁灰岩的铅、锌含量均明显高于岩组的平均含量和陆壳丰度数倍，证实了沉积成矿过程中生物礁，尤其是与造礁生物珊瑚等共生的(蓝绿藻门的)钙藻等对成矿元素的集聚作用、海水中成矿元素的高浓度，同时表明生物礁中成矿元素的含量水平处于沉积岩与矿石中成矿元素含量的过渡含量区间，从成矿元素含量方面体现了生物礁与铅锌矿呈伴生关系。

2.2 生物礁与铅锌矿床在层序上的伴生关系

生物礁与铅锌矿床在层序上的伴生关系，在沉积成因特征明显的厂坝铅锌矿床和下拉地铅锌矿床表现得相对明显，即铅锌矿体直接处于临近碎屑岩或火山岩的生物灰岩中或生物灰岩之上的细碎屑岩中(图 4)，并非在生物碎屑岩与泥质岩石的过渡部位，由具体赋矿层位向上或向下的碎屑岩或生物灰岩内可以不含矿。

在改造成因的铅锌矿床中，由下而上体现为由礁灰岩—硅质岩—泥质岩组成的礁硅岩套(邓海军等 2005, 图 7)，矿体赋存在生物灰岩与泥质岩的过渡部位，显然与沉积成矿作用形成的序列有差异。

令人感叹的是，西成地区赋存厂坝铅锌矿床的变质岩系被厘定为元古代(杨志华等 2002)，而矿石普通铅年龄为 293~619 Ma，由此，前人所建的沉积

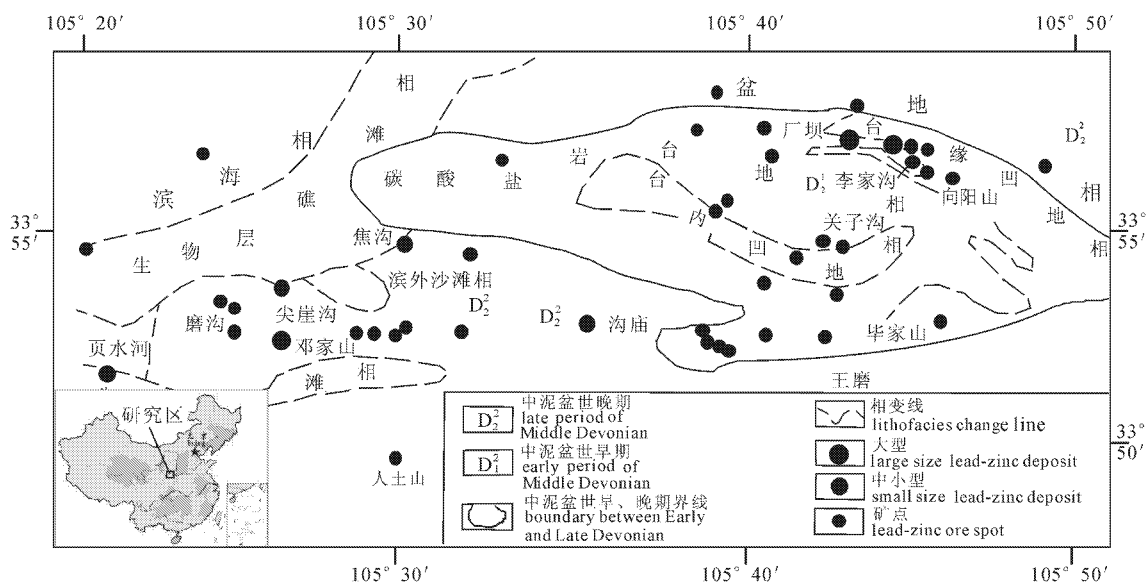


图 2 西成地区岩相古地理图(孙矿生等 2004)

Fig. 2 Sketch map of lithofacies and palaeogeography in Xicheng district (from Sun et al., 2004)

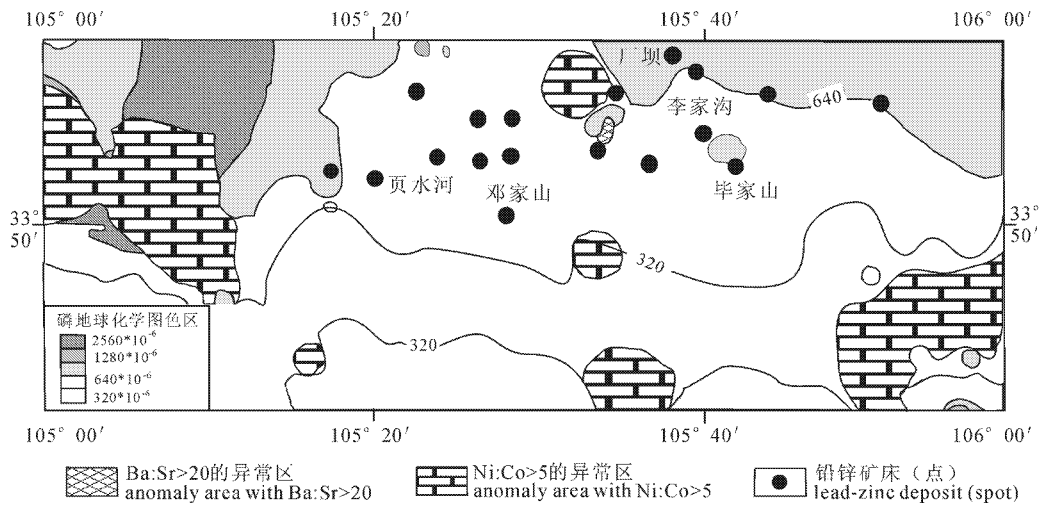


图 3 西成地区磷地球化学图及 Ba/Sr, Ni/Co 异常图

Fig. 3 Geochemical map of phosphorite and Ba/Sr, Ni/Co anomaly map of Xicheng district

表 2 西秦岭铅锌成矿区地层与碳酸盐岩中铅、锌含量

Table 2 Lead and zinc contents of strata and carbonate rocks in the metallogenic area of West Qinling

地点	地质单元	岩性	样本数	Pb/ $\times 10^{-6}$		Zn/ $\times 10^{-6}$		资料来源
				平均值	浓集克拉克值	平均值	浓集克拉克值	
西成	碇山组		37	18.0	1.39	48.0	0.59	林兵, 1993
	西汉水组		51	24.0	1.85	56.0	0.59	
	安家岔组		26	13.0	1.00	40.0	0.49	
	吴家山组		41	17.0	1.31	53.0	0.65	
	中泥盆统		145	19.0	1.46	51.0	0.62	
李家沟		碳酸盐岩	20	181.0		798.0		林兵, 1993
毕家山		碳酸盐岩	4	387.0		583.0		林兵, 1993
西成	黄家沟组	礁灰岩	1	54.2		158.5		本文
	红岭山组	礁灰岩	3	67.3		153.0		
	安家岔组	灰岩	1	39.9		95.5		
下拉地	巴都组	灰岩	1	15.0				本文
	巴都组	礁灰岩	3	67.5				
代家庄		红岭山组	2	783.8		394.3		张中平 2006
陆地地壳丰度				12.6		73.0		韩吟交等 2003

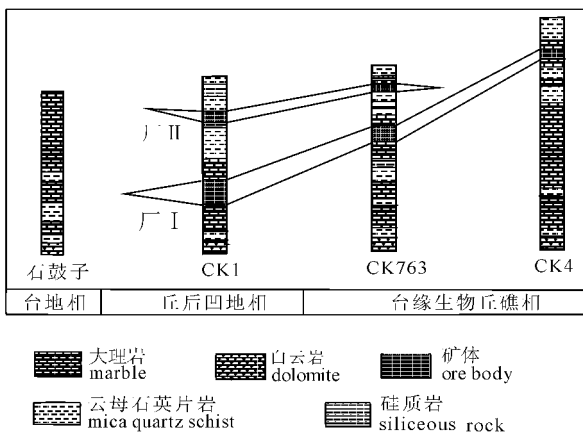


图 4 厂坝铅锌矿区地层柱状对比图

Fig. 4 Stratigraphic correlation of the Changba lead-zinc deposit

成矿模式的基础已不复存在, 应该属于后生热液矿床。后生成矿年龄可能对应于晚古生代和在吴家山核部变质岩系中获得的角闪石矿物的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄反映出 3 次构造热变质事件 (249 Ma、220 Ma、180 Ma) (杨军禄等, 1999)。如果确属这种情况, 则生物灰岩与矿床的所有伴生关系主要源于改造成矿作用, 但是, 在矿床的诸多沉积成矿证据面前, 我们不能否定矿床的(火山)喷流沉积成矿作用。

3 生物礁与铅锌矿床的成因联系

3.1 物质来源与成矿机制

3.1.1 矿石与围岩的铅、硫同位素特征

如前所述, 沉积成矿作用发生时, 生物礁对成矿元素有集聚作用, 所集聚的元素只能在改造成矿作

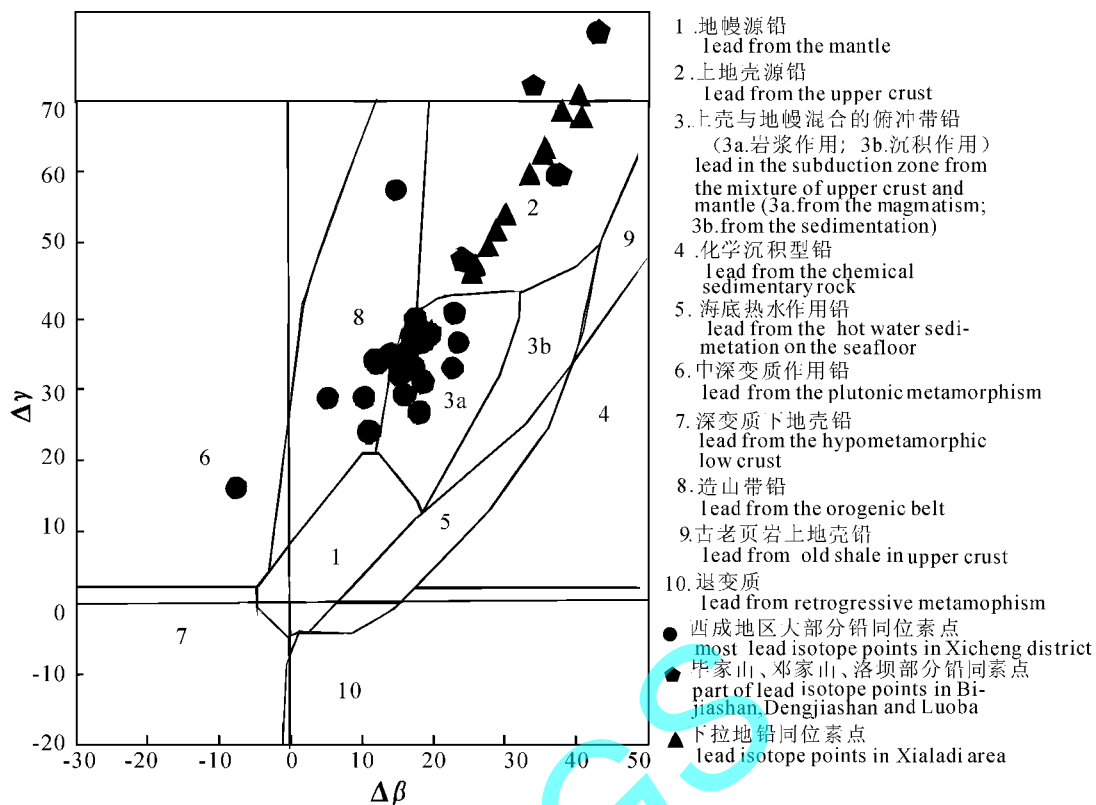


图 5 矿石铅同位素的 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解(据朱炳泉等,1998)

Fig. 5 Diagram showing the $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ classification of ore isotopes(from Zhu et al. ,1998)

用过程中成矿,而沉积成矿作用中铅、锌等成矿元素的来源只能是基底地层。对于西成地区矿石矿物铅同位素组成的研究表明,厂坝—李家沟地区的矿石铅基本都来源于壳幔混源铅,而邓家山、毕家山、洛坝等改造型铅锌矿的铅有一部分来源于上地壳,石炭纪成矿的下拉地铅锌矿则全部来源于上地壳(图5)。即包括赋矿地层在内的上地壳,在改造成矿作用中有可能提供部分成矿金属,但沉积成矿和改造成矿中存在深源铅是显而易见的。

对于矿石硫同位素组成,有两种看法,其一认为是封闭条件下细菌还原海水硫酸盐的产物(林兵,1993),其二认为矿石矿物中的硫和围岩中的硫均应属于地层封存古海水或地下循环热卤水中的硫酸盐的热化学还原产物,还原过程是在含 SO_4^{2-} 的热卤水中发生的,并且认为金属和硫是在同一流体中运移到达成矿地点的(孙省利等,1992)。笔者认为,西成地区大部分矿床的硫同位素值 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $+4.20\text{‰} \sim +28.56\text{‰}$,其中方铅矿 $\delta^{34}\text{S} +4.2\text{‰} \sim +15.9\text{‰}$,闪锌矿 $\delta^{34}\text{S} +10.5\text{‰} \sim +19.8\text{‰}$,黄铁矿 $\delta^{34}\text{S} +12.9\text{‰} \sim +13.8\text{‰}$,重晶石 $\delta^{34}\text{S} +23.0\text{‰} \sim +31.8\text{‰}$;下拉地铅锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $+3.2\text{‰} \sim +15.7\text{‰}$ 。绝大部分为正值,富集重硫,且偏0值较远

(图6),但也有极少数值近于0。总体分布特征与现代海底块状硫化物矿床一致,成矿温度较高(西成地区为 $150 \sim 250^\circ\text{C}$ 、 $200 \sim <380^\circ\text{C}$),应属于深源硫和热化学硫酸盐还原硫(TSR)的混合物(Jochum, 2000; Jost et al., 2003),而 TSR 多发生于连续埋藏、深埋的碳酸盐岩成岩体系中,如加拿大的 Pine Point (Powell et al., 1984) 这样才能解释成矿温度较高,而且有深源硫加入的事实。另外,改造成矿作用阶段,有生物硫参与成矿的迹象。

3.1.2 母源为菌藻类的有机质是成矿前含矿流体的主要组成部分

西成地区铅锌矿床矿化岩石(硅质岩、灰岩和大理岩)的生物母源以菌藻类低等生物为主,并有陆源母质混入,矿床形成于还原环境,矿床中存在来源相同或相似的异源有机质。炭沥青与围岩、矿石中子活化分析结果表明,在后期改造成矿作用中,炭沥青与矿石有紧密联系,有机质和成矿元素一起在改造成矿期抵达成矿部位(朱弟成等,2003)。与该事实不同的是,李家沟、毕家山、庙沟矿区含炭岩石的干酪根都属腐植型,干酪根中木质成分一般在 $70\% \sim 80\%$,木质组降解无定形组分约占 $10\% \sim 20\%$,还有约 10% 的黄铁矿,闪锌矿和方铅矿等矿

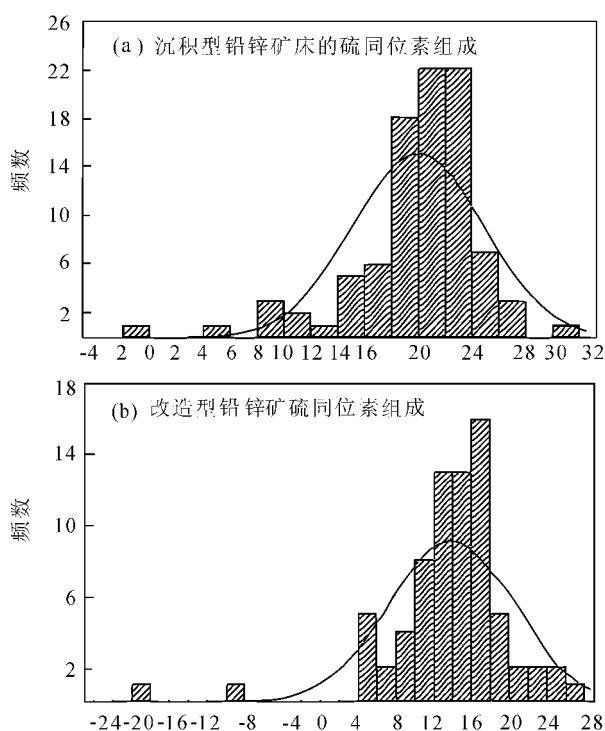


图 6 西秦岭铅锌矿矿石硫同位素组成

Fig. 6 Sulfur isotope composition of lead-zinc ore in West Qinling

物(林兵,1993)。说明成矿流体及其中的有机质是从深部来源的,同时也展现出了泥盆纪郁郁葱葱的礁堤及地面生态景观。

另外,邓家山铅锌矿床和毕家山铅锌矿床的含矿硅质岩中,有机硫含量分别高达 5.35% 和 3.33%。

这些现象表明,源于菌藻类低等生物的有机质是成矿前深部含矿流体的重要组成部分;造礁生物和基底地层的有机质可能在沉积、改造成矿作用发生前的成岩过程中,参与了硫酸盐的热化学还原及铅、锌等多金属元素的萃取、运聚过程。而成矿作用则是在另外一次构造—热事件的叠加过程中发生的,该热事件很可能是板内伸展阶段的深源流体泄流事件或陆内俯冲造山过程中的岩浆事件。

3.1.3 围岩与矿石的古地温显示成矿作用源于深源高温流体的泄流

用吴冲龙等(2001)推导出的单一热源条件下有机质成熟度经验公式: $R_{0,m} = 0.492t^{0.093} / (646.32 / ((111.85 + \ln t) \cdot \ln T))$ 其中 $R_{0,a}$ 为镜质组平均反射率, t 为岩层绝对年龄, T 为古地温度,求得热事件年龄分别为 390 Ma、239 Ma、204 Ma、184 Ma 时的古地温处于 110~200℃。再用 Barker 等(1986)建立的古地温计算公式: $\ln R_{0,m} = 0.0078T_{\text{compt}} - 1.2$ (其

中 $R_{0,m}$ 是有机质的平均反射率, T_{compt} 是最大埋藏温度)求得热事件的最大古温度为 160~320℃(表 3)。对西成地区与同生沉积成矿作用有关的岩石测温结果为:钠长岩 300~200℃,具炭质及微粒碳酸盐岩核心的柱粒状石英 250~180℃,铁镁碳酸盐岩 200~100℃(祁思敬等,1999);沉积形成的条带状矿石与微晶硅岩的成矿温度为 150~250℃,改造成矿期形成的块状和角砾状矿石的成矿温度为 200~380℃(林兵,1993);洛坝铅锌矿矿石形成温度为 150~310℃,平均 216℃(陈光,2002)或 316~394℃(祝新友等,2006)。由此可见,无论沉积成矿流体,还是改造成矿流体,其温度都显著高于围岩的成岩温度,仅成岩作用形成的有机流体难以发生成矿作用,更何况于碳酸盐岩台地等生物礁中的孔隙流体,在没有海底喷流的参与时更难以具有较高的温度。进一步证明,沉积成矿作用和改造成矿作用的发生均源于深源流体泄流事件。

3.2 生物礁与沉积成矿作用的关系

3.2.1 泥盆纪的生物礁主要是低纬度地区造礁生物作用的产物

尽管人们对扬子地块古生代地层给出的古地磁资料存在着较大的争议(白立新等,1996),但加里东期秦岭海逐渐消亡后,西秦岭地区在晚古生代处于板内裂谷环境,而且紧邻华北地台,因此根据华北地台在晚古生代所处古纬度 10°~30°N,方位角为现今位置右 120°(孟祥化等,2002)等参数判断,晚古生代西秦岭地区应处于低纬度区域,该推断与李建中等(1993)所获西秦岭中泥盆世古纬度为南纬 10 度的数据一致。证明生物礁主要是低纬度地区造礁生物作用的产物。

3.2.2 矿石硫同位素证明造礁生物未直接参与沉积成矿

以 3.1.1 中所述沉积型铅锌矿矿石硫同位素组成与生物成矿作用明显的云南金顶硫同位素 (-10.29‰~14.06‰,曾荣等,2005)比较,差异较大。表明造礁生物虽然对铅、锌起到积聚作用,但未直接参与沉积成矿。

3.2.3 海底热水活动在形成热水沉积岩的同时促进了附近生物礁生长

现代海底热水流体活动调查发现,海底深部流体的活动是形成富集有机质沉积的不可忽视的因素:①海底热水流体活动区生物繁盛,而且生物产量往往与热水流体活动强度呈正比关系(Haymon et al.,1993);②海底热水流体活动从浅海到深海均

表3 西成铅锌矿区及非矿区有机质镜质体反射率对应的古地温

Table 3 Ancient temperature corresponding to reflection power of organic substance vitrinite in the Xihe-Chengxian lead-zinc ore district and barren area

样号	矿区	矿床类型	岩性	R ₀ /%	古地温估计值 /℃				
					T _{390 Ma}	T _{239 Ma}	T _{204 Ma}	T _{184 Ma}	T _{compt}
BCD-85	李家沟	沉积型	炭质结晶灰岩	1.22	119.516	126.168	128.364	129.807	179.3399
B22-3	毕家山	沉积改造型	炭质千枚岩	3.20	200.652	199.894	199.653	199.497	302.9681
BDix	邓家山	沉积改造型	炭质结晶灰岩	3.75	200.766	200.817	200.834	200.844	323.3020
BED-118	非矿区		含炭质结晶灰岩	1.10	119.612	119.612	119.612	119.612	166.0654

有存在(Pichler et al., 1996; Heikoop et al., 1996; Marani et al., 1997);③在深海水体中热水流体活动区,生物具有较高的密度和多样性,如巴布亚新几内亚 Ambitle 岛的滨浅海(5~10 m)区,海底热水流体活动强烈,在热水区发育有珊瑚—藻类生物礁生态体系(Pichler et al., 1996)。

陈学民等对凡口 MVT 型铅锌矿床中硅质岩与碳酸盐岩形成机理的解释值得借鉴:酸性含矿热泉与海水混合后,造成底层海水 pH 值降低,从而阻碍了海水中 CaCO₃ 沉淀,使含矿热泉活动带附近的正常海相碳酸盐岩沉积大大减少,因此形成脉石矿物含量很低的富矿石堆积,与此同时,当富含 CaCO₃ 并混合有含矿热泉的海水运移到外面与正常海水相遇时,由于 pH 值升高,使过饱和的 CaCO₃ 迅速大量沉淀,同时促使钙质底栖生物大量发育,碳酸盐沉积物和生物礁在卤水池外围构筑堤坝,形成障壁(陈学民等 1999)。李建中也曾认为,西秦岭泥盆系生物礁的形成除了适宜的气候、水温、盐度和海水泥沙含量之外,也可能和地下热水的活动有关,热水沉积岩相直接控制多金属矿层的产出(李建中, 1983)。

结合前述西秦岭地区生物礁与铅锌成矿洼地空间上的伴生关系,有理由认为,含矿生物礁的存在可能与含硫化物热水沉积岩一样与热水活动有关,存在热水活动的地区更宜于造礁生物的繁衍,形成热水沉积凹地的障壁。热水喷流通道是与剧烈相变部位和古热隆起有关的生长断裂。

3.3 生物礁是改造成矿作用发生的有利场所

3.3.1 西成地区与礁硅岩套有关的改造成矿作用发生于构造剥离空间

西成地区的礁硅岩套中改造成因硅质岩的存在表明,铅锌矿石充填于礁灰岩与千枚岩之间的构造剥离空间,生物礁是极为有利的改造成矿作用发生的场所,主要体现在绝大多数铅锌矿床在空间上和礁灰岩紧密共生,60%的铅锌矿体产于硅质岩中,30%在礁灰岩顶部,较少产于千枚岩中(图7)。从礁

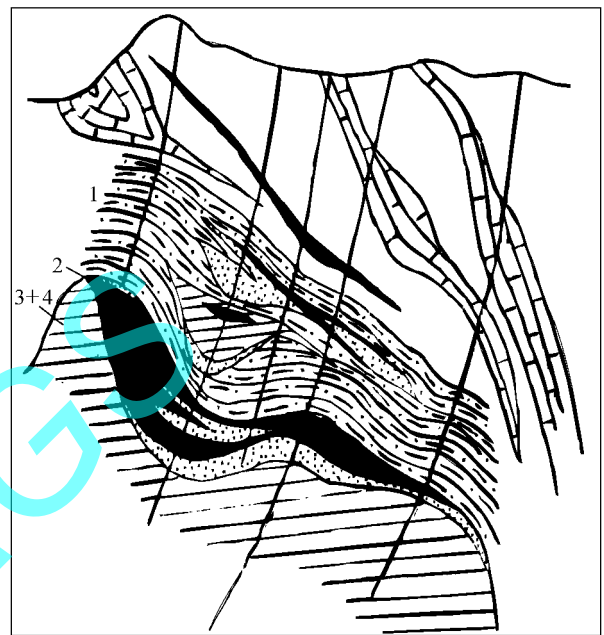


图7 毕家山铅锌矿礁硅岩套典型剖面(据李建中, 1983)

Fig. 7 Representative section showing the combination of reef and quartzite (after Li, 1983)

顶到礁核的礁体剖面为:

- 4 礁顶上覆盖泥质岩,形成成矿屏蔽层
 - 3 含矿硅质岩主要为改造成因硅岩。在构造上,此部位是生物灰岩与泥质岩之间的后期剥离空间,主要矿体赋存于这一部位
 - 2 薄层泥状微晶灰岩、含碳灰岩(礁顶)
 - 1 中厚层生物微晶灰岩(礁核)
- 说明生物礁有利于成矿构造的发育。

3.3.2 礼岷地区代家庄铅锌矿的构造剥离空间控矿现象

代家庄铅锌矿赋矿地层中尚未识别出礁核,但明显发育的生物灰岩及生物碎屑灰岩等原地沉积建造则指示了生物礁的存在(Riding, 2002)。厚层礁灰岩与矿体之间存在两种接触关系:在近地表因断

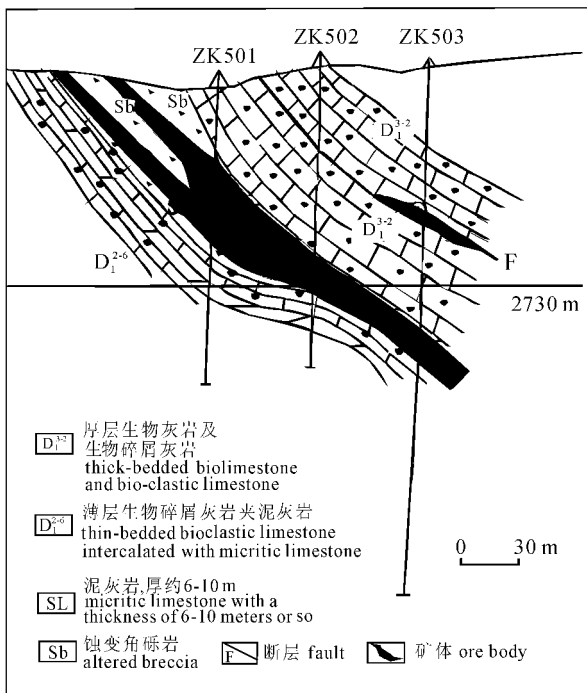


图 8 代家庄铅锌矿 5 号勘探线剖面中的生物碎屑灰岩与矿体关系

Fig. 8 Relationship between bioclastic limestone and ore bodies in No. 5 exploration section of the Daijiazhuang lead-zinc deposit

裂构造叠加破坏,与矿体之间以蚀变构造角砾岩相隔,如 5 号勘探线的 1 号矿体及 2 号矿体浅部;约 30 m 以下,矿体与生物碎屑灰岩之间夹 6~10 m 的泥灰岩,该泥灰岩构成了层状铅锌矿的顶板,矿体的下盘为蚀变角砾岩和薄层灰岩(图 8)。目前在 2730 m 标高以下发现的与上、下围岩整合的含矿硅质岩、硅质灰岩则应属改造成因。生物礁对改造成矿作用来说,因与上覆泥灰岩之间形成构造剥离空间而具有构造意义。

由此可见,生物礁在改造成矿过程中的有利之处可能在于其生物礁的形态、坚硬而不易变形和高渗透性等物理性质。在造山过程中,随着挤压、剪切变形的进行,与上覆塑性泥质岩石之间产生减压剥离空间等;同时,礁灰岩的高渗透性有利于成矿流体在其中运移。生物礁在成矿过程中的作用在于形成有利于改造成矿作用发生的成矿构造。

4 结论

(1) 对比分析西秦岭地区的赋矿地层的岩性及矿床赋存情况表明,规模矿床主要集中于安家岔组、黄家沟组、红岭山组及中石炭统,其共同特点是该三

套地层均相对发育灰岩及生物灰岩,而含矿较差的双狼沟组为深水相泥质浊积岩。空间上,生物礁为沉积成矿洼地的障壁。层序上,沉积型铅锌矿和改造型铅锌矿与生物礁的伴生关系有所不同,前者则一般赋存与生物灰岩中或碎屑岩中,后者的矿体常赋存在生物灰岩与泥质岩的过渡部位,表现为礁硅岩套。

(2) 与造礁生物有关的有机质可能在沉积成矿或改造成矿作用发生前的成岩过程中,参与了硫酸盐的热化学还原及铅、锌等多金属元素的萃取、运聚过程。板内伸展阶段的深源流体、陆内俯冲阶段的深源或岩浆热液注入先存的中低温富有机质卤水,分别导致了沉积和改造成矿作用发生。沿生长断裂发生的深源热水沉积成矿作用促进了处于低纬度地区的造礁生物繁衍,并形成成矿洼地的障壁。生物礁在改造成矿过程中的作用主要在于形成有利于改造成矿作用发生的成矿构造。

感谢 特别感谢《地球学报》编辑部责任编辑与审稿专家提供的细致而热心的审查意见及指导!

参考文献

- 白立新,朱日祥.1996.扬子地块古生代大地构造演化及古地磁学研究综述.地球物理学进展,11(3):109~115.
- 陈光.2002.西成铅锌矿化集中区热水沉积成矿作用的岩矿证据.甘肃地质学报,11(1):32~43.
- 陈学民,邓军,翟裕生.1999.凡口铅锌矿床地球化学特征及成矿作用分析.地质地球化学,27(1):6~14.
- 邓海军,浩德成.2005.西成地区泥盆系地层礁硅岩套地质特征及找矿意义.甘肃冶金,27(1):17~19.
- 韩吟文,马振东.2003.地球化学.北京:地质出版社,45~48.
- 杜远生,赵锡文.1991.甘肃西成铅锌矿田泥盆纪吉维特—弗拉斯期沉积古地理及控矿意义.沉积学报,9(3):22~29.
- 杜远生.1996.西秦岭造山带泥盆纪沉积地质学和动力沉积学研究:古地理、地层层序及构造演化.岩相古地理,16(1):51~70.
- 方维萱,胡瑞忠,等.2000.热水沉积成矿盆地的热状态及热演化分析与研究思路.西地质科学,21(1):10~13.
- 冯益民,曹宣铎,张二朋,等.2003.西秦岭造山带的演化、构造格局和性质.西北地质,36(1):1~10.
- 李健中.1983.西秦岭东段泥盆纪海相.礁灰岩及其与铅锌矿产的关系.甘肃西成铅锌矿学术讨论会议论文摘要.
- 李建中,高兆奎.1993.西秦岭中泥盆世沉积环境及其与铅锌矿的关系.地质论评,39(2):156~162.
- 林兵著.1993.西秦岭泥盆系层控铅锌矿带成矿地球化学模式及其预测系统的建立.武汉:中国地质大学出版社,49~53.
- 孟祥化,葛铭.2002.中朝板块旋回层序、事件和形成演化的探索.地学前缘,9(3):31~47.
- 祁忠敬,李英.1993.秦岭泥盆系铅锌成矿带.北京:地质出版社,1~29.

- 祁思敬, 李英. 1999. 南秦岭晚古生代海底喷气沉积成矿系统. 地学前缘, 1(1):171~178.
- 孙省利, 王国安, 袁明坤. 1992. 西成铅锌矿田铅、硫同位素特征及成矿物质来源的研究. 甘肃地质学报, 1(2):51~64.
- 孙省利. 1999. 西成铅锌矿田有机地球化学特征及成矿作用. 甘肃地质学报, 2(2):58~64.
- 孙矿生, 彭德启. 2004. 甘肃省铅锌矿成矿系列及控矿因素. 甘肃地质学报, 13(1):1~9.
- 田树刚, 王增吉. 2001. 东昆仑西段早—中二叠世生物礁相地层层序. 地球学报, 22(3):243~248.
- 王集磊, 何伯迟, 李建中, 等. 1996. 中国秦岭型铅锌矿床. 北京: 地质出版社, 1~73.
- 武安斌, 宋春晖, 孙省利. 1992. 甘肃西成矿田中泥盆统沉积相古地理与成矿作用. 兰州: 兰州大学出版社, 1~128.
- 武安斌, 宋春晖. 1993. 甘肃西成铅锌矿田中泥盆统铅锌碳酸盐沉积相的初步研究. 甘肃地质学报, 2(1):25~34.
- 吴冲龙, 李星. 2001. 多热源叠加的岩层有机质成熟度动态模拟方法. 石油与天然气地质, 22(2):187~189.
- 许凤仪. 1991. 西成铅锌矿田西部中泥盆统西汉水组碳酸盐岩沉积特征. 沉积学报, 9(1):81~86.
- 杨军禄, 冯益民. 1999. 西秦岭吴家山隆起的隆升过程及时代. 西北地质, 32(4):1~4.
- 杨志华, 郭俊锋, 苏生瑞, 等. 2002. 秦岭造山带基础地质研究新进展. 中国地质, 29(3):246~256.
- 张岳桥, 马寅生, 杨农. 2005. 西秦岭地区东昆仑—秦岭断裂系晚新生代左旋走滑历史及其向东扩展. 地球学报, 26(1):1~8.
- 张忠平. 2006. 甘肃代家庄铅锌矿床地球化学异常特征. 甘肃地质, 15(2):42~47.
- 曾荣, 薛春纪, 刘淑文, 等. 2005. 金顶超大型铅锌矿床成矿条件分析. 地球科学与环境学报, 27(2):21~25.
- 钟建华, 温志峰, 李勇, 等. 2005. 生物礁的研究现状与发展趋势. 地质论评, 51(3):288~300.
- 朱弟成, 朱利东, 林丽, 等. 2003. 西成矿田泥盆系铅锌矿床中的有机成矿作用. 地球科学—中国地质大学学报, 28(2):201~208.
- 祝新友, 汪东波, 卫治国, 等. 2006. 论南秦岭西成矿田南矿带铅锌矿的喷流成矿作用. 第八届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 360~363.
- 朱炳泉, 等. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用—兼论中国大陆壳幔演化. 北京: 科学出版社, 225~226.
- (1):32~43 in Chinese with English abstract).
- CHEN Xueming, ZHAI Yusheng, DENG Jun. 1999. Geological and Geochemical Characteristics of Fankou Pb-Zn Deposit and its metallogenic analysis. Geology-Geochemistry, 27(1):6~14.
- Chester R. 1965. Geochemical criteria for differentiating reef from non-reef facies in carbonate rocks. Bull. Am. Asso. Petro. Geol., 49:258~276.
- DENG Haujun, HAO Decheng. 2005. Geological Features and Ore-prospecting Significance for the Reef Siliceous Suite of Devonian System Stratum in Xi-cheng Region. Gansu Metallurgy, 27(1):17~19 in Chinese).
- DU Yuansheng, ZHAO Xiwen. 1991. The Sedimentary Paleogeography of Givetian-Frasnian(Devonian) and Its Ore-controlling Significance in Xicheng Pb-Zn Orefield, Gansu Province. Acta Sedimentologica Sinica, 9(3):22~29 in Chinese with English abstract).
- DU Yuansheng. 1996. Sedimentary Geology and Dynamic Sedimentology of the Devonian Strata in the West Qinling Orogenic Belt. Devonian Palaeogeography, Stratigraphic Sequences and Tectonic Evolution. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 16(1):51~70 in Chinese with English abstract).
- FANG Weixuan, HU Ruizhong, HUANG Zhuanying, et al. 2000. Analysis and approach on geothermal state and evolution of hydrothermal depositional sedimentary basin. Northwest Geoscience, 21(1):10~13 in Chinese with English abstract).
- FENG Yimin, CAO Xuanduo, ZHANG Erpeng. 2003. Tectonic Evolution Framework and Nature of the West Qinling Orogenic Belt. Northwest Geology, 36(1):1~10 in Chinese with English abstract).
- Haymon R M, Fornari D J, Von Damm K L, et al. 1993. Volcanic eruption of the mid ocean ridge along the East Pacific Rise crest at 9°45'~52' N: Direct submersible observations of seafloor phenomena associated with an eruption event in April, 1991. Earth Planetary Science Letter, 119:85~101.
- Heikoop J M, Tsujita C J, Risk M J, Tomascik T. 1996. Corals as proxy recorders of volcanic activity: evidence from Banda Apt, Indonesia. Palaios, 11:286~292.
- HAN, Yinwen, MA Zhendong. 2003. Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 45~48 in Chinese).
- Jochum J. 2000. Variscan and post-Variscan lead ± zinc mineralization, Rhenish Massif, Germany: evidence for sulfide precipitation via thermochemical sulfate reduction. Mineralium Deposita, 35:451~464.
- Jost V Lavric, Jorge E Spangenberg. 2003. Stable isotope (C, O, S) systematics of the mercury mineralization at Idrija, Slovenia: constraints on fluid source and alteration processes. Mineralium Deposita, 38:886~899.
- LI Jianzhong. 1983. Devonian reef limestone with marine facies in eastern section of west Qinling and its relation to lead-zinc deposits. In: Compile of abstracts of symposium for Xicheng lead-zinc deposits, 21~30 in Chinese).
- LI Jianzhong, GAO Zhaokui. 1993. The Middle Devonian Sedimentary Environment of the West Qinling Mountains and Its Relationship

References

- BAI Lixing, ZHU Rixiang. 1996. A Review of the Tectonic Evolution and Paleomagnetic Research for the Yangtze Block During Paleozoic. Progress of Geophysics, 11(3):109~115 in Chinese with English abstract).
- Barker C E, Pawlewicz M J. 1986. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter. Palaeogeothermics, Lecture Notes in Earth Sciences. Berlin: Springer-Verlag, 5:79~93.
- CHEN Guang. 2002. Petrologic and Mineralogical Evidences for Sedimentation and Mineralization of Hydrothermal Water in Concentrative area of Xihe-Chengxian District. Acta Geologica Gansu, 11

- with Lead and Zinc Deposits. *Geological Review*, 39(2):156~164 (in Chinese with English abstract).
- LIN Bin. 1993. Model of Metallogenic Geochemistry and Prediction System of Strata-bound Lead-zinc Ore Belt in Devonian System of West Qinling. Wuhan: Publishing House of China University of Geoscience 49~53 (in Chinese with English abstract).
- MENG Xianghua, GE Ming. 2002. Research on Cyclic Sequence, Events and Formational Evolution of the Sino-Korea Plate. *Earth Science Frontiers*, 9(3):31~47 (in Chinese with English abstract).
- Marani M P, Gamberi F, Savelli C. 1997. Shallow water polymetallic sulfide deposits in the Aeolian island arc. *Geology*, 25:815~818.
- Pichler T, Dix G R. 1996. Hydrothermal venting within a coal reef ecosystem, Ambitle Island, Papua New Guinea. *Geology*, 20:435~438.
- Powell T G, MacQueen R W. 1984. Precipitation of sulfide ores and organic matter: sulfide reactions at Pine Point, Canada. *Science*, 294:63~66.
- Riding R. 2002. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: concepts and categories. *Earth Science Reviews*, 58(1~2):163~231.
- QI Sijing, LI Ying. 1993. Metallogenic Belt of Lead-zinc in Devonian System of Qinling. Beijing: Geological Publishing House, 1~29 (in Chinese).
- QI Sijing, LI Ying. 1999. The Upper Paleozoic Submarine Exhalative-sedimentary Metallogenic System in South Qinling. *Earth Science Frontiers*, 6(1):171~178 (in Chinese with English abstract).
- SUN Kuangsheng, PENG Deqi. 2004. Lead-zinc Metallogenic Types and Ore-control Factor Gansu Province, China. *Acta Geologica Gansu*, 13(1):1~9 (in Chinese with English abstract).
- SUN Xingli, WANG Guo'an, YUAN Mingkun. 1992. Studies on lead-sulfur Isotope Geochemical Characteristics and Material Source in Xicheng Pb-Zn Orefield, Gansu, China. *Acta Geologica Gansu*, 2(1):51~64 (in Chinese with English abstract).
- SUN Xing-li. 1999. Organic Geochemical Characters and Metallogenesis of Xicheng Pb-Zn Orefield, Gansu, China. *Acta Geologica Gansu*, 8(2):58~64 (in Chinese with English abstract).
- TIAN Shugang, WANG Zenji. 2001. Stratigraphic Sequence of the Early-Middle Permian Reef in Western East Kunlun Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3):243~248 (in Chinese with English abstract).
- WANG Jilei, HE Bochi, LI Jianzhong, et al. 1996. The Qinling Type of Lead-zinc Ore Deposits of China. Beijing: Geological Publishing House, 1~73 (in Chinese).
- WU Anbin, SONG Chunhui. 1993. A Preliminary Study on the Carbonate Sedimentary Facies of the Middle Devonian in Xicheng Ore field, Gansu. *Acta Geologica Gansu*, 2(1):25~34 (in Chinese with English abstract).
- WU Anbin, SONG Chunhui, SUN Xingli. 1992. Sedimentary Phases, Paleogeography and Mineralization of Middle Devonian series in Xihe-Chengxian Ore Field. Lanzhou: Publishing House of Lanzhou University, 1~128 (in Chinese with English abstract).
- WU Chonglong, LI Xing. 2001. A Dynamic Simulation Method for Maturity of Organic Matter in Superposed Rocks of Multiple Thermal Sources. *Oil & Gas Geology*, 22(12):187~189 (in Chinese with English abstract).
- XU Fengyi. 1991. Sedimentary Characteristics of Xihanshuicarbonate Formation of Middle Devonian in Western Sicheng Lead-Zinc Ore-field. *Acta Sedimentologica Sinica*, 9(1):81~87 (in Chinese with English abstract).
- YANG Junlu, FENG Yiming. 1999. The process and times of uprising of Wujiashan uplift in west Qinling. *Northwestern Geology*, 32(4):1~4 (in Chinese with English abstract).
- YANG Zhihua, GUO Junfeng, SU Shengrui, et al. 2002. New Advances in the Geological Study of the Qinling orogen. *Geology in China*, 29(3):246~256 (in Chinese with English abstract).
- ZENG Rong, XUE Chunji, LIU Shuwen, et al. 2005. Formation conditions of Jinding giant lead-zinc deposit. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 27(2):21~25 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yueqiao, MA Yinsheng, YANG Nong, et al. 2005. Late Cenozoic Left-Slip Faulting Process of the East Kunlun-Qinling Fault System in West Qinling Region and Its Eastward Propagation. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(1):1~8 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhongping. 2006. Geochemical Anomaly Characteristic of Daijiazhuang Lead-zinc Deposit, Gansu Province. *Gansu Geology*, 13(2):42~47 (in Chinese with English abstract).
- ZHONG Jianhua, WEN Zhifeng, LI Yong, et al. 2005. Organic Reef's Study: Concept, Classification, Characteristics, History and Development. *Geological Review*, 51(3):288~300 (in Chinese with English abstract).
- ZHU Dicheng, ZHU Lidong, LIN Li, et al. 2003. Organic Mineralization of Lead-Zinc Deposits in Devonian System, Xicheng Ore Field. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 28(2):201~208 (in Chinese with English abstract).
- ZHU Xinyou, WANG Dongpo, WEI Zhiguo, et al. 2006. Exhalation mineralgenesis in the South Ore Belt of Xicheng Lead-zinc Field, Southern Qinling: Opportunity and Challenge of Mineral Deposit Research: Meeting the Demand of Developments. Beijing: Geological Publishing House, 360~363 (in Chinese).