

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.02.010

喀喇昆仑地区豹子山铅锌矿地质特征与成因浅析

高峰^{1,2}, 管坤坤¹, 张振凯¹, 潘亮¹, 杜彪¹

(1. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学, 陕西 西安 710054)

摘要:新疆和田地区豹子山铅锌矿具与热液交代作用有关的后生矿床的地质特征, 矿化赋存于中侏罗统龙山组碳酸盐岩中, 严格受北西向断裂构造控制, 矿石矿物组分简单, 主要矿物为菱锌矿和白铅矿, 围岩蚀变以赤铁矿化、褐铁矿化为主。矿石 S 同位素组成分布范围较宽($\delta^{34}\text{S} = -8.49\% \sim 24.88\%$), S 具多源性, 主要源于沉积岩地层, 有地表流体的加入; 矿石 Pb 同位素组成较均一, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.807 \sim 18.822$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.73 \sim 15.756$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 39.055 \sim 39.168$, $\mu = 9.68 \sim 9.73$, Pb 源于上地壳; 矿石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = 2.85\% \sim 8.25\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 20.04\% \sim 21.07\%$, C、O 来源于碳酸盐岩, 而非岩浆热液。综合矿床地质及同位素特征, 认为其成因类型属构造热液-直接交代型铅锌矿。

关键词:铅锌矿床; 同位素; 矿床成因; 成矿模式; 喀喇昆仑

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)02-0172-11

Geological Characteristics and Genesis Analysis of Baozishan Pb - Zn Deposit in Karakoram Area

GAO Feng^{1,2}, JIAN Kunkun¹, ZHANG Zhenkai¹, PAN Liang¹, DU Biao¹

(1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The lead-zinc deposit of Baozishan, which is located in the Hetian area of Xinjiang Province, has the geological characteristics of epigenetic deposit related to hydrothermal metasomatic process. Mineralization occurs in the Middle Jurassic carbonatite of Longshan Formation and is strictly controlled by the NW trending faults. The main ores are smithsonite and acrusite. The alteration of country rocks are mainly hematitization and ferritization. Sulfur isotopic composition in ore has a wide distribution range ($\delta^{34}\text{S} = -8.49\% \sim 24.88\%$), indicating that the S originated from sedimentary strata and the additions of surface fluid. The lead isotopic composition in ore is relatively homogeneous (the values of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and μ are 18.807—18.822, 15.73—15.756, 39.055—39.168, 9.68—9.73 respectively), with Pb coming from the upper crust. The values of $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ vary from 2.85% to 8.25%, 20.04% to 21.07% respectively, implying that C and O are from carbonate rocks rather than magmatic

收稿日期: 2019-03-09; 修回日期: 2019-10-30

基金项目: 国家专项“第二次青藏高原综合科学考察研究”(2019QZKK0806), 中国地质调查局“新疆河尾滩—河西岗地区 1:5 万矿产地质调查”项目(DD20160004-5)

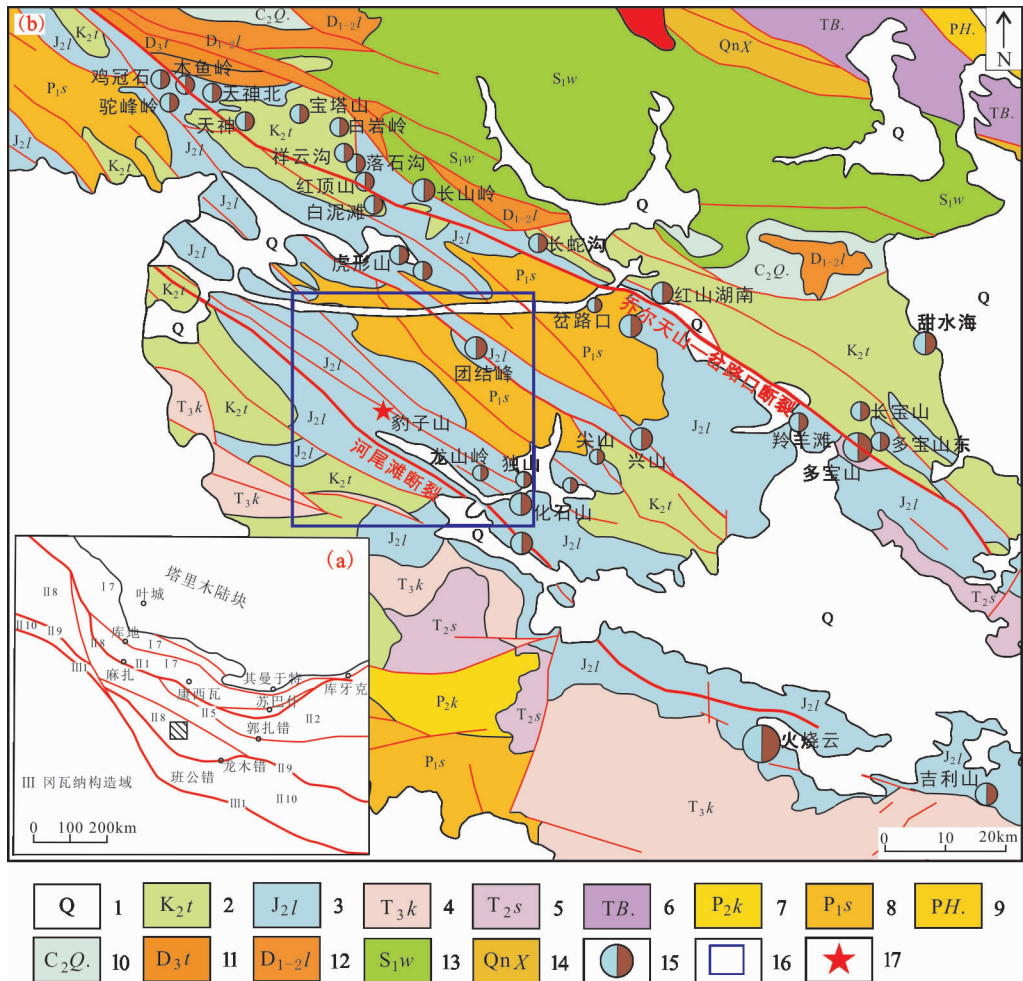
作者简介: 高峰(1985-), 男, 在职研究生, 高级工程师, 长期从事区域地质调查和矿产勘查工作。E-mail: gaofengddzx@163.com

hydrothermal fluid. With the analysis of geology of the deposit and isotopic characteristics, Baozishan deposit is regarded as the tectonic hydrothermal-direct metasomatic lead-zinc.

Keywords: lead-zinc deposit; isotope; genesis of ore deposit; metallogenic model; Karakoram

喀喇昆仑铅锌成矿带(董连慧等,2015)位于喀喇昆仑山脉主脊北侧,北以郭扎错-麻扎断裂为界,南以喀喇昆仑断裂为界,东接藏北铅锌成矿带,西连 Lasbela - Khuzdar 铅锌矿带(巴基斯坦),是喀喇昆仑-三江成矿省(董连慧等,2010)的重要组成。近年来,随着中国地质调查局和新疆自治区地勘基金中心的不断投入,铅锌找矿取得重要进展,区域上已累计发现铅锌矿床(点)30 余处(图 1b)。尤其是火烧云超大型铅锌矿的发现,再次掀起了众多学者对该

地区铅锌矿产的研究热潮,但在矿床成因认识方面存在分歧,主流观点有 3 种:一是杜红星等(2012)认为多宝山铅锌矿床属 MVT 型;二是董连慧等(2015)研究认为火烧云铅锌具原生层控特征,为喷流-沉积成因,是 SEDEX 型 Pb - Zn 矿床的新类型;三是高永宝等(2017)提出了“边缘盆地褶皱逆冲+构造流体+次生交代”成矿系统的新认识,建立了“火烧云式”热液-交代非硫化物和“多宝山式”构造-热液硫化物的成矿模式。笔者以近年来在火烧云外



1. 第四系;2. 铁龙滩组;3. 龙山组;4. 克勒青河组;5. 神仙湾组;6. 巴颜喀拉群;7. 库吉尔台组;8. 神仙湾组;9. 黄羊岭群;10. 恰提尔群;11. 天山达坂组;12. 落石沟组;13. 温泉沟组;14. 尔克谷地岩组;15. 铅锌矿床(点);16. 研究区;17. 采样位置

图 1 (a)构造位置图(底图据李荣社等,2008)和(b)区域地质简图(底图据赵晓健等,2015)

Fig. 1 (a)The map of tectonic location and (b)regional geological sketch map

围新发现的豹子山铅锌矿为研究对象,通过分析成矿地质背景、矿床地质特征,结合 S、Pb、C、O 同位素研究成果,探讨其成因类型,以期为区域成矿规律和矿床成因研究提供借鉴。

1 区域地质背景

研究区位于昆南-羌北缝合系(李荣社等,2008),甜水海-北羌塘陆块群之神仙湾晚古生代边缘裂陷带内(崔建堂等,2005),以乔尔天山-岔路口断裂为界,北接甜水海地块(图 1a)。

神仙湾晚古生代边缘裂陷带,出露地层主要有下二叠统神仙湾组、中三叠统上河尾滩组、中侏罗统龙山组 and 上白垩统铁龙滩组。其中下二叠统神仙湾组总体为一套较深水浊积岩建造,下段为一套细碎屑岩与板岩不均匀互层,局部夹少量细砾岩;中段为一套浅色石英粗砂岩夹少量细砂岩、板岩;上段为一套深灰色粉砂质板岩、板岩夹细砂岩。中三叠统上河尾滩组下部主要为粉砂岩、泥质板岩,局部见深海硅质岩等,具有深水浊积岩沉积特征,上部主要为碎屑岩,局部夹灰岩,具浅海滨岸相沉积特征。中侏罗统龙山组底部为一套粗碎屑岩建造,上部为一套滨浅海相碳酸盐岩建造,局部夹基性火山岩,是区内铅锌矿的主要含矿建造,与下伏神仙湾组或上河尾滩组呈角度不整合接触。上白垩统铁龙滩组下部为一套粗碎屑岩,上部为一套褐红色灰岩,其下部与下伏龙山组呈角度不整合接触。岩浆岩整体不发育,主要为后碰撞伸展体制下的基性侵入岩和中酸性侵入岩,时代主要为早白垩世至晚白垩世早期。构造主要表现为一系列的北西-南东向短轴背、向斜构造,发育北西-南东向断裂构造以及北东向断裂构造。区域代表性铅锌矿产地有火烧云铅锌矿、团结峰北铅锌矿、化石山铅锌矿和豹子山铅锌矿。

2 矿区地质

2.1 赋矿地层

铅锌矿化赋存于中侏罗统龙山组上段,为一套滨浅海相碳酸盐岩建造。岩性主要为细晶灰岩、白云质灰岩和生物碎屑灰岩,细晶灰岩和白云质灰岩为直接赋矿岩石,与下伏上河尾滩组碎屑岩呈角度不整合接触,局部受后期断层改造(图 2)。

2.2 控矿构造

区域上铅锌矿化与断裂构造关系密切,主要为早期的北西向逆冲推覆构造系统和晚期的北东向张性走滑断裂束,以北西向断裂规模最大。区域上,北西向深大断裂及其次级断裂系统控制着铅锌矿的产出和分布,其中河尾滩断裂横穿研究区,该断裂沿 NW 向展布,向北延伸至神仙湾地区,南部延伸至火烧云一带,长度达上百千米,倾向 NE,倾角为 $40^{\circ} \sim 65^{\circ}$,断层破碎带宽度几米至上百米。该断裂为区域性深大断裂,与之伴生的次级断裂共同构成河尾滩逆冲推覆构造系统,控制着火烧云铅锌矿、化石山铅锌矿(魏永峰等,2017)、龙山岭铅锌矿(魏永峰等,2018)和豹子山铅锌矿(高峰等,2019)的产出和分布(图 1b),是该地区除乔尔天山-岔路口断裂之外的另一铅锌矿产重要的导矿构造和容矿构造。

豹子山铅锌矿区发育北西向和北东向两期断裂构造,其中北西向断层性质为逆断层,断层倾向为 $23^{\circ} \sim 50^{\circ}$,倾角为 $40^{\circ} \sim 58^{\circ}$,断层破碎带宽为 5~45 m,带内断层角砾岩、碎屑岩发育,矿化主要赋存在断层破碎带内,为豹子山铅锌矿的主要容矿构造;北东向断层性质为正断层,兼具右行走滑属性,错断北西向断裂,为铅锌矿的破矿构造。

2.3 围岩蚀变

围岩蚀变较为发育,主要为赤铁矿化、褐铁矿化和碳酸盐化。

赤铁矿化、褐铁矿化为区内最重要的与铅锌矿化密切相关的蚀变类型,蚀变主要与裂隙及空隙关系密切,是碳酸盐矿物阳离子之间相互类质同象代替形成的氧化物集合体,为该地区同类型铅锌矿床最直接的野外识别标志;铅锌矿石中普遍发育碳酸盐化,是铅矾蚀变为白铅矿和闪锌矿蚀变为菱锌矿的最主要蚀变类型。

3 矿床地质特征

3.1 矿体特征

铅锌矿化带受断裂控制,长度大于 3 km,带宽为 20~50 m,走向 NW,倾向 NE,倾角中等。矿体赋存于侏罗系龙山组白云质灰岩中,严格受北西向断裂控制,矿体连续性好,在平面上呈脉状(图 2),矿体与围岩界限截然,小矿体平行于主矿体呈透镜状产出,以 I-1 号矿体规模最大。

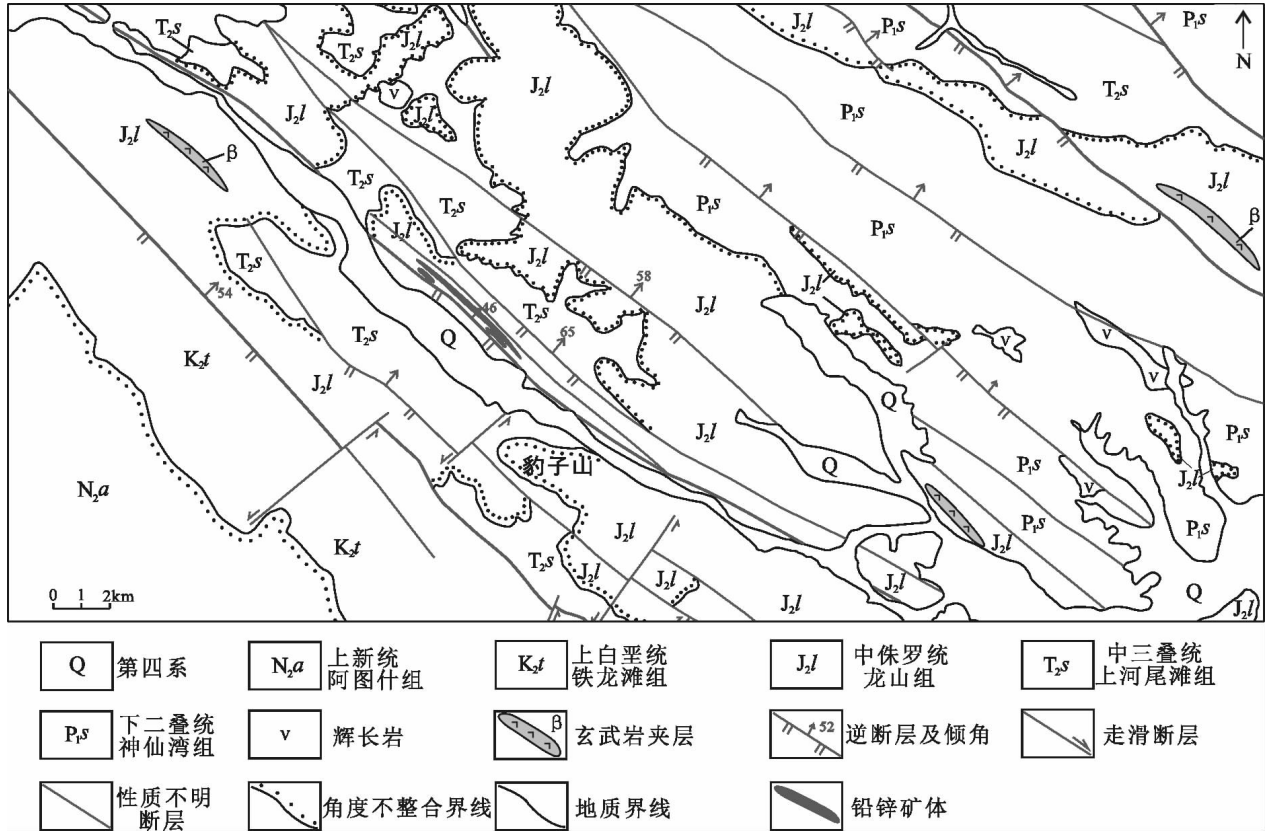


图 2 豹子山地区地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of Baozishan area

I-1 号矿体。地表断续出露长度约 1 500 m, 似层状产出, 总体产状为 $48^\circ \angle 40 \sim 50^\circ$, 厚度为 1.73~6.53 m, 平均厚度为 4.17 m。Zn 品位为 0.45%~25.92%, 平均品位为 12.59%; Pb 品位为 0.046%~40.65%, 平均品位为 4.0%; 伴生 Ag 最高品位 10.7×10^{-6} , 矿体向自西向东 Zn 品位降低。

I-2 号矿体。长度为 160 m, 呈脉状产出, 产状为 $50^\circ \angle 53^\circ$, 矿体厚度为 3.14 m, Zn 平均品位为 13.32%, Pb 平均品位为 1.92%, 向东侧尖灭。

I-3 号矿体。长度为 230 m, 透镜状产出, 产状为 $23^\circ \angle 49^\circ$, 矿体厚度为 2.06 m, Zn 平均品位为 17.85%, Pb 平均品位为 1.45%, 向两侧尖灭。

3.2 矿石矿物组成

金属矿物主要有铅-锌系列矿物、赤铁矿、褐铁矿等(图 2); 脉石矿物主要为方解石和白云石(铁白云石)。铅矿物主要为白铅矿、方铅矿和铅矾, 锌矿物主要为菱锌矿及少量闪锌矿。

由表 1 可见, 方铅矿由 S、Pb 组成; 白铅矿由 C、

O、Pb 组成; 铅矾由 S、O、Pb 组成; 菱锌矿由 C、O、Zn 组成, 部分菱锌矿中含 Mg、Fe、Pb 等其他元素; 闪锌矿由 S、Zn 组成; 赤铁矿中含有一定量的 Pb、Zn 等其他元素。

3.3 矿石结构及成矿阶段划分

3.3.1 矿石结构

矿石矿物以交代残留结构、他形粒状结构和不规则状结构为主, 次为胶状和集体体状结构。铅、锌矿物粒度较细, 粒径 $< 0.01 \sim 0.2$ mm, 白铅矿多与赤铁矿共生, 与铅矾依次交代方铅矿, 菱锌矿多与赤铁矿矿紧密共生, 局部可见交代残余的闪锌矿(图 3)。

构造主要为块状(图 4a)、角砾状(图 4b)、条带状(图 4c)、浸染脉状(图 4d)和脉状构造(图 4f)。

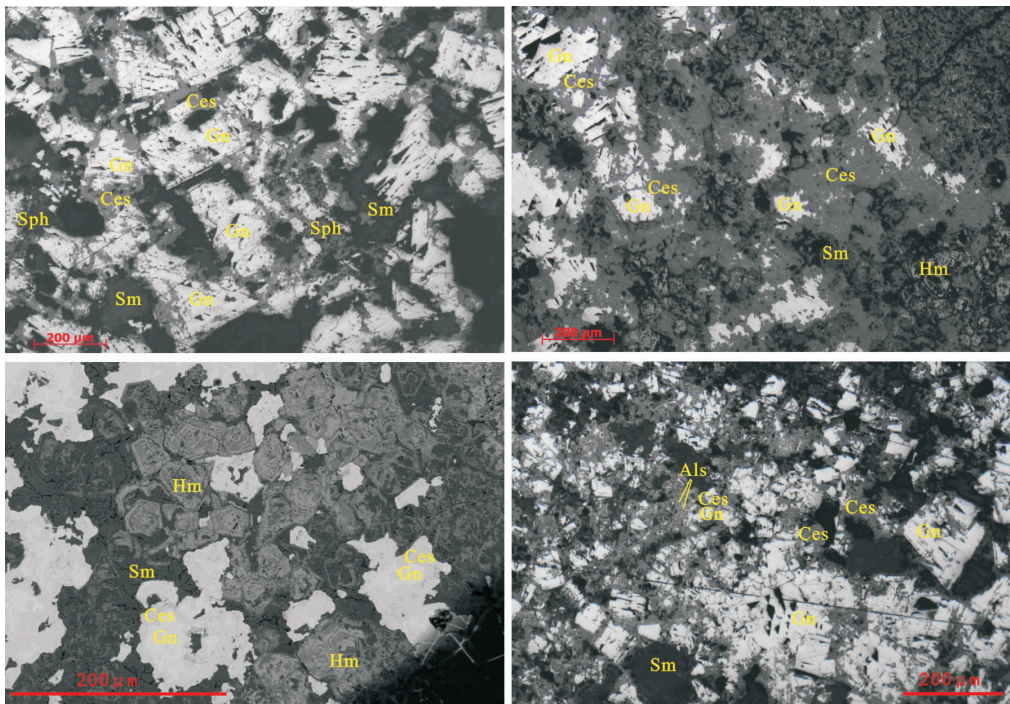
3.3.2 成矿阶段划分

根据矿物组合特征, 其生成顺序依次为硫化物(方铅矿、闪锌矿)→硫酸盐(铅矾)→碳酸盐(白铅矿、菱锌矿)。据此将该矿床划分为 2 个成矿阶段, 即热液硫化物期和交代非硫化物期。

表1 矿物能谱分析结果表
Tab.1 Table of analysis results of mineral energy spectrum

矿物	化学组成(%)										
	S	C	O	Mg	Ca	Mn	Fe	Zn	Pb	Al	Si
方铅矿	12.94		3.94						83.12		
	13.58		4.54						81.89		
	14.25								85.75		
白铅矿		3.15	18.20						78.65		
		4.06	17.83						78.11		
铅矾	14.63		24.34						61.03		
	15.03		24.05						60.92		
菱锌矿		4.45	46.23	3.32	1.00	0.42	3.10	39.57	1.91		
		5.35	50.11	1.60				42.94			
		5.42	44.44	2.40	0.66	0.72	9.92	33.63	2.81		
		6.08	47.73	1.78	0.43		0.66	43.32			
闪锌矿									48.51		
	35.08								64.92		
赤铁矿			37.35				50.39	2.66	7.97	0.61	1.02
			37.09			0.76	46.26	4.05	8.64	0.97	2.25

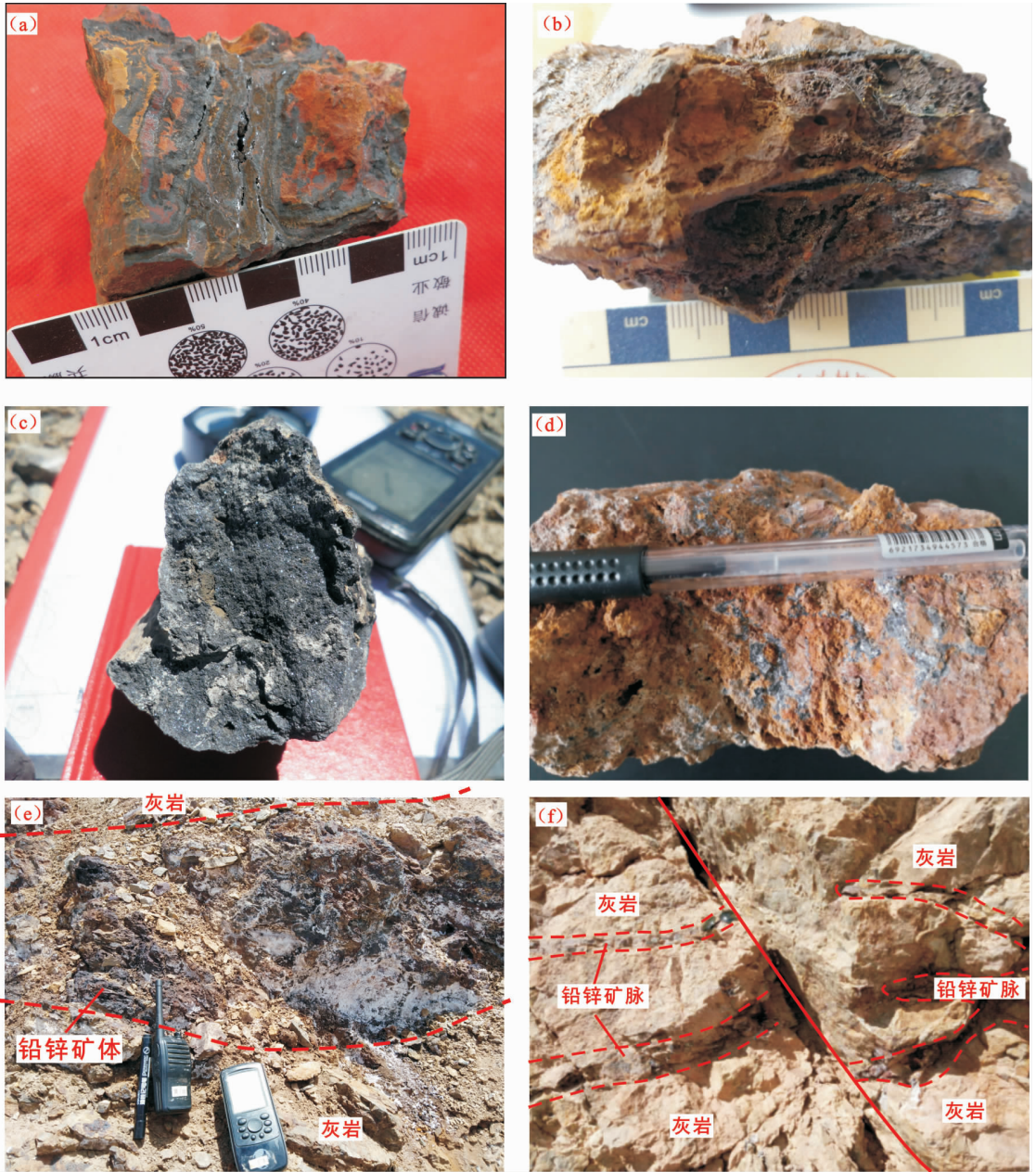
注:样品测试由西安西北有色研究院有限公司完成,2018。采用 FEIQUANTA650 型扫描电镜仪和 EDAX APOLLO X 型能谱仪测定。



Sm. 菱锌矿; Sph. 闪锌矿; Ces. 白铅矿; Gm. 方铅矿; Als. 铅矾; Hm. 赤铁矿

图3 铅锌矿石显微结构照片

Fig.3 The microstructure of lead-zinc ores



a. 块状矿石; b. 角砾状矿石; c. 纹层状矿石; d. 浸染脉状矿石; e. 矿体野外露头; f. 铅锌矿脉

图 4 铅锌矿石野外特征照片

Fig. 4 Field characteristics photos of Lead-Zinc ores

4 同位素地球化学特征

4.1 S 同位素特征

通过对豹子山地区 4 件铅锌矿中的方铅矿中的 S 进行测定, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-8.49\text{‰} \sim 24.88\text{‰}$ (表 2), 平均值为 8.74‰ , 总体 $\delta^{34}\text{S}$ 波动范围较宽, 极差为 33.37。

4.2 Pb 同位素特征

根据豹子山铅锌矿金属硫化物的 Pb 同位素组成 (表 2), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 $18.807 \sim 18.822$, 平均值为 18.813, 极差为 0.015; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 $15.73 \sim 15.756$, 平均值为 15.741, 极差为 0.026; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $39.055 \sim 39.168$, 平均值为 39.116, 极差为 0.113。铅各同位素比值相对稳定, 显示正常铅的特征; Th/U 值为 $3.81 \sim 3.85$, 均值

表2 方铅矿 S、Pb 同位素组成表

Tab. 2 Sulfur and lead isotopes composition of Galena

样品编号	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	ω	Th/U	V1	V2	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
BPb01	3.82	18.808	15.730	39.055	9.68	38.07	3.81	77.87	63.94	86.89	26.01	44.1
BPb02	24.88	18.807	15.737	39.099	9.69	38.31	3.83	79.6	64.02	87.56	26.5	45.69
BPb03	14.74	18.822	15.740	39.140	9.70	38.42	3.83	80.45	64.03	87.89	26.67	46.48
BPb04	-8.49	18.816	15.756	39.168	9.73	38.72	3.85	82.75	64.96	89.41	27.81	48.29

注: Pb 同位素测试由中国地质调查局武汉地质调查中心同位素室完成, 2018; 用电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)测定; S 同位素中
国地质科学院矿产资源研究所测试完成, 采用美国 PE 公司生产的 MAT253 气体同位素质谱仪测定, 分析精度为 0.2‰。

为 3.83; ω 值为 38.07~38.72, 均值为 38.38。

4.3 C、O 同位素特征

由表 3 可见, 豹子山矿区矿石中的菱锌矿 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 2.85‰~8.25‰, 平均为 5.66‰, 变化范围相对较大, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 20.04‰~21.07‰, 平均值为 20.53‰, 数据集中。

表3 菱锌矿 C-O 同位素组成表

Tab. 3 C-O isotope composition of Smithsonite

样品编号	样品名称	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}(\text{‰})$
BC001	菱锌矿	6.20	-9.78	20.83
BC002	菱锌矿	2.85	-10.42	20.17
BC003	菱锌矿	5.34	-9.55	21.07
BC004	菱锌矿	8.25	-10.55	20.04

注: 本次 C、O 同位素由中国地质科学院矿产资源研究所测试完成, 2018。采用美国 PE 公司生产的 MAT253 气体同位素质谱仪测定, 单个样品的测试精度为 0.05‰。

5 讨论

5.1 成矿物质来源

5.1.1 硫来源

硫是成矿热液中最主要的矿化剂, 通过确定流体系统中的硫同位素组成对成矿物质来源、探讨矿床成因具有重要意义(TAYLOR, 1987a; 陈好寿, 1997)。前人(OHMOTO, 1986; OHMOTO et al., 1997; CLAYPOOL et al., 1980; 郑永飞等, 2000; 温春齐等, 2009; 陕亮等, 2009)研究表明硫的来源不同导致了硫同位素的差异: ①地幔硫、岩浆硫或陨石硫, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 0 附近较小范围内变化。②沉积岩中的硫同位素具有很大的变化范围, 通常多呈较大的正值或负值。③海水 $\delta^{34}\text{S}$ 值稳定在 20‰左右, 蒸

发岩类和硫酸盐中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为较大的正值(10‰~30‰)。

杜红星等(2012)对多宝山铅锌矿石中的硫同位素进行了分析, 方铅矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}} = -10.55\text{‰} \sim -1.01\text{‰}$, 显示变化范围较大。本次豹子山地区矿石 S 同位素数值变化范围亦较大, 符合前人对沉积岩地层区硫同位素研究的特征, 暗示硫源的多源性。

5.1.2 铅来源

前人(ZARTMAN ET AL., 1981; 吴开兴等, 2002; 张长青等, 2006)研究认为矿石中 Pb 同位素组成能够为成矿物质来源提供准确信息, 并以此作为探讨矿床成因的重要依据。一般认为 Pb 同位素源区特征值 μ 值能够反映铅的来源, $\mu > 9.58$ 通常被解释为铅来源于上地壳(刘婷婷等, 2011; 吴开兴等, 2002; 杨斌等, 2018)。表 3 显示矿石 Pb 同位素特征值 μ 值为 9.68~9.73, 均大于 9.58, 显示矿石铅源具有上地壳物质特征。

ZARTMAN 等(1981)根据不同铅源区的 Pb 同位素组成特征绘制了 Pb 同位素构造模式判别图解: ①样品落在造山带增长线上方则矿石铅必然包含上地壳成分。②样点落在造山带增长线下方则矿石铅则必定源于地幔或下地壳。③样点位于造山带增长线附近, 表明矿石铅来自混合源。豹子山铅锌矿 4 件样品均落在造山带增长线上方(图 5a), 表明矿石铅包含上地壳成分; 在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中(图 5b)所有样品落在上地壳演化线以上或其附近区域, 暗示矿石 Pb 主要来源于上地壳。

朱炳泉等(1998)研究认为 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的值变化能够很好地反映成矿物质 Pb 的源区特征, 并以此构建了矿石铅同位素的 $\Delta\beta$ -

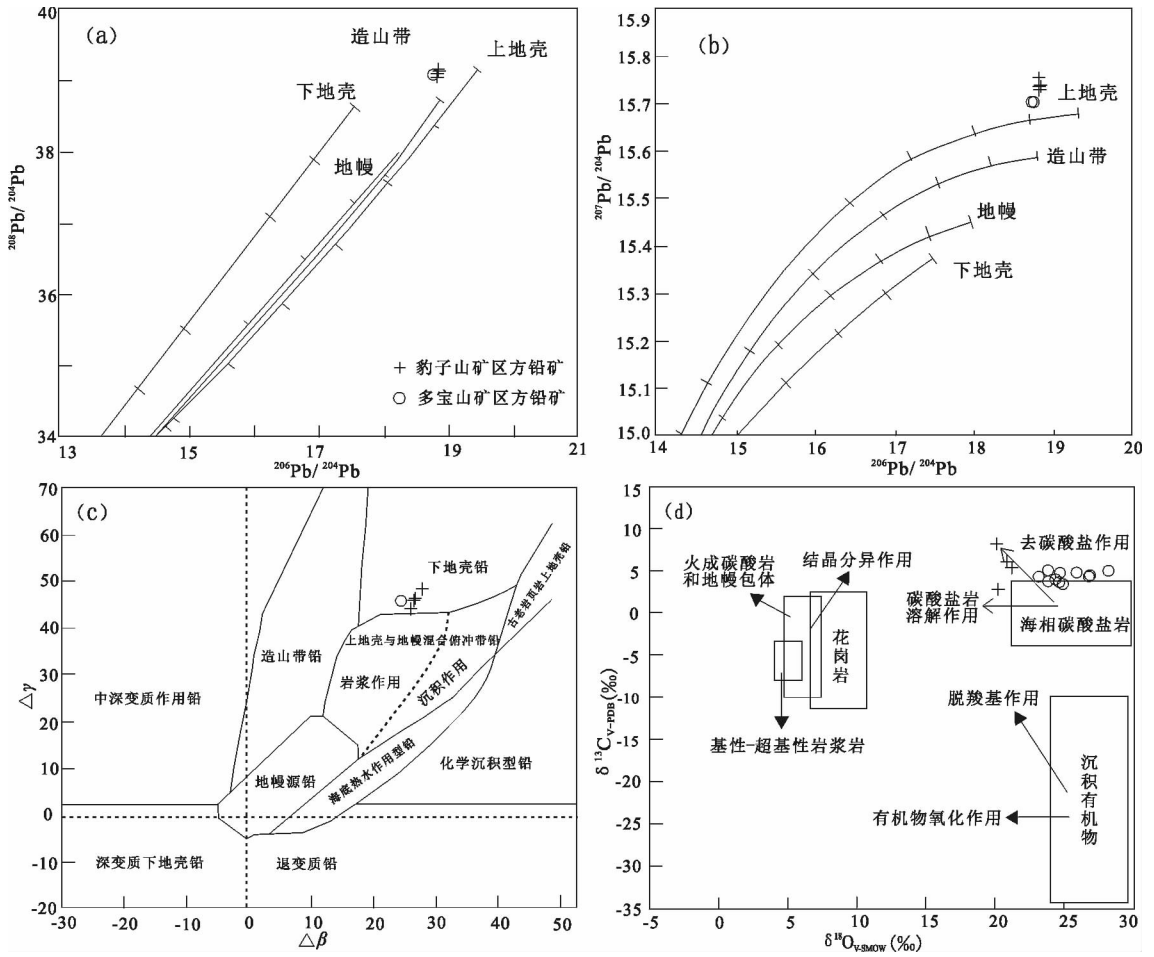


图 5 Pb、C、O 同位素判别图解(多宝山数据据杜红星等, 2012)

Fig. 5 Discriminant diagrams of lead, carbon and oxygen isotopes

$\Delta\gamma$ 图解。图 5c 显示,豹子山铅锌矿的 4 件矿石 Pb 同位素样品全部落在上地壳铅范围内。

赵晓健等(2014)通过对乔尔天山一岔路口一带各地层单元和不同岩石中的 Pb 含量研究,认为区域上铅的富集是从形成神仙湾组上岩性段时开始的,铅的富集明显向灰岩集中,从砂岩(碎屑岩)到钙质砂岩(碎屑岩),再到灰岩(碳酸盐岩),Pb 含量依次增高。本次 1:5 万水系沉积物测量成果显示研究区内二叠系神仙湾组、三叠系上河尾滩组和侏罗系龙山组 Pb、Zn 明显富集(表 4),Pb 的富集倍数较新疆西昆仑地区平均值(20×10^{-6})在 2.07~4.09,Zn 的富集倍数较新疆西昆仑地区平均值(65×10^{-6})在 1.59~2.51。

综上所述,豹子山与多宝山铅锌矿床矿石 Pb 同位素特征一致,均源于上地壳,铅、锌等金属成矿元素,主要来源于晚古生代至中生代以来的陆缘沉

积体系下形成的具高 Pb、Zn 背景值的沉积地层。

表 4 各地层单元 Pb、Zn 元素含量值表

Tab. 4 The contents of lead-zinc of each stratigraphic units

序号	地层	地层代号	元素含量(10^{-6})	
			Pb	Zn
1	铁龙滩组	K ₂ t	41.5	103.2
2	龙山组	J ₂ l	81.7	148.4
3	上河尾滩组	T ₂ s	68.1	148.5
4	神仙湾组	P ₁ s	64.5	162.9

5.1.3 碳、氧来源

据刘家军(2004) $\delta^{13}C_{V-PDB} - \delta^{18}O_{V-SMOW}$ 图解(图 5d),豹子山矿区 4 件菱锌矿样品均落于海相碳酸盐岩,可与多宝山铅锌矿(杜红星等,2012)对比,说明成矿热液中的 C、O 来自于海相碳酸盐岩的去碳酸

盐作用和碳酸盐岩溶解作用,矿区的赋矿岩石为灰岩,有一定的物质基础,推测 C、O 同位素主要源于侏罗系龙山组碳酸盐岩,而非岩浆热液。

5.2 矿床成因

根据上述研究,豹子山地区铅锌矿与多宝山铅锌矿更具有相似性。豹子山地区铅锌矿体赋存于中侏罗统龙山组上段-滨浅海相碳酸盐岩建造的灰岩中,北西向断裂系为主要的导矿和容矿构造。矿体与围岩界限截然。矿石矿物以菱锌矿、白铅矿为主,可见交代残留方铅矿和闪锌矿。地球化学特征显示晚古生代至中生代以来陆缘沉积体系下形成的沉积地层为主要的矿源层,S、Pb 同位素特征显示成矿物质来源于上地壳的沉积地层,C、O 同位素特征显示成矿流体源于碳酸盐岩。

高永宝等(2017)提出了“边缘盆地褶皱逆冲+构造流体+次生交代”成矿系统的新认识,建立了“多宝山式”构造-热液硫化物的成矿模式。综上所述,豹子山地区铅锌矿经历了“矿源层—热液硫化

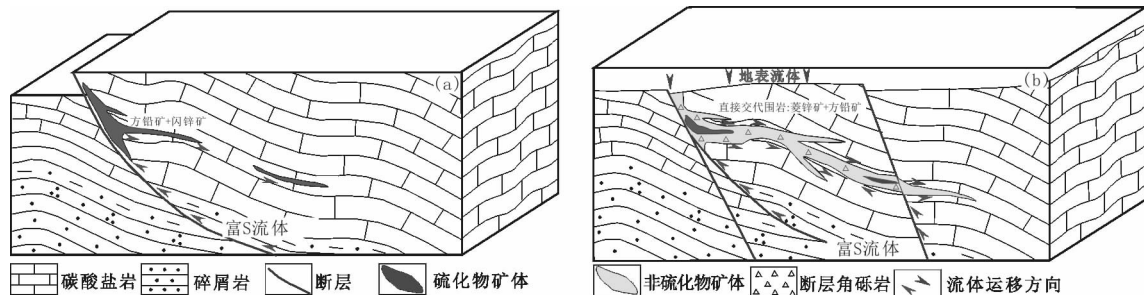
物—交代非硫化物”的成矿过程,具多阶段成矿特征,属构造热液-直接交代型铅锌矿。

5.3 成矿模式

对比区域典型矿床发现,尽管豹子山铅锌矿在成矿地质背景、地球化学及矿石矿物组成等特征可与火烧云铅锌矿床类比,但矿体规模、形态、产状、控矿要素及 S-Pb、C-O 同位素特征更与多宝山铅锌矿床类似,成矿模式(图 6)表述如下。

(1)晚古生代至中生代以来的陆缘沉积体系下形成的沉积地层为铅锌成矿奠定了物质基础。

(2)晚白垩纪区域上发生大规模的剪切走滑、古近纪区域挤压作用下发生的大规模逆冲推覆构造,致使侏罗纪—白垩纪碳酸盐岩建造强烈变形,形成一系列层间滑动、破碎带及有利的构造圈闭(地球化学障),持续的区域挤压作用驱动中生代盆地中的流体侧向运移形成富 S 流体,萃取地层中的 Pb、Zn 等成矿物质形成含矿流体,沿河尾滩断裂等排泄空间汇聚并卸载形成硫化物矿体(PbS、ZnS)。



a. 热液硫化物阶段;b. 交代非硫化物阶段

图 6 豹子山铅锌矿成矿模式图

Fig. 6 Metallogenic model of Baozishan lead-zinc deposits

(3)随着区域构造应力由挤压转为伸展,逆冲断层发生断后伸展,使得区域上形成大量的开放空间,大量地表流体下渗(氧化性)与地下流体混合,致使含矿围岩(碳酸盐岩)溶解形成的酸性流体,在不同的构造部位直接交代金属成矿物质形成碳酸盐矿物或交代先成硫化物形成次生碳酸盐矿物(白铅矿、菱锌矿),该阶段形成了沿各类断裂及裂隙产出的热液型石膏矿脉。

硫酸盐及碳酸盐矿物的卸载机制可由以下方程式表述。

方铅矿氧化形成铅钒: $PbS(\text{方铅矿}) + 2O^{2-} + 2H_2O \rightarrow PbSO_4(\text{铅钒}) + 8H^+$ 。

闪锌矿氧化: $ZnS(\text{闪锌矿}) + 2O^{2-} + 2H_2O \rightarrow Zn^{2+} + SO_4^{2-} + 8H^+$ 。

酸性溶液形成(碳酸盐岩溶解): $H^+ + CaCO_3 \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$ 。

白铅矿形成: $PbSO_4 + 2HCO_3^- + Ca^{2+} + H_2O \rightarrow PbCO_3(\text{白铅矿}) + CaSO_4 \cdot 2H_2O(\text{石膏}) + CO_2 \uparrow$ 。

菱锌矿形成: $Zn^{2+} + SO_4^{2-} + 2HCO_3^- + Ca^{2+} + H_2O \rightarrow ZnCO_3(\text{菱锌矿}) + CaSO_4 \cdot 2H_2O(\text{石膏}) + CO_2 \uparrow$ 。

(4)随着青藏高原隆升,在强氧化环境下(大气圈中的游离氧),近地表矿体经风化淋滤形成富含铅

锌的铁锰氧化带,矿体受后期断裂破坏。

6 结论

豹子山地区铅锌矿体严格受断裂构造控制,矿化赋存于中侏罗统龙山组碳酸盐岩中,矿体与围岩界限截然,矿石矿物以菱锌矿、白铅矿为主,次为方铅矿、铅钒和闪锌矿,具多阶段成矿特征。矿石S同位素特征指示S主要来源于沉积岩地层,有地表流体的加入;Pb同位素指示金属物质Pb来源于上地壳,与围岩中的Pb、Zn高背景特征吻合;C、O同位素特征显示成矿流体源于碳酸盐岩,与去碳酸盐作用和碳酸盐岩溶解作用有关。综合矿床地质及同位素特征,认为豹子山铅锌矿属构造热液—直接交代型铅锌矿。

致谢:本文在撰写过程中,得到了中国地质调查局西安地质调查中心高永宝副研究员和陕西省矿产地质调查中心王满仓高级工程师的精心指导和帮助,在此表示诚挚的谢意!

参考文献(References):

- 陈好寿. 铅锌矿床同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社,1997.
- CHEN Haoshou. Isotope Geochemistry of Lead-Zinc Deposits. [M]. Beijing: Science Press,1997.
- 杜红星,魏永峰,薛春纪,等. 多宝山铅锌矿床地质特征及地球化学研究[J]. 新疆地质,2012,30(1):52-57.
- DU Hongxing, WEI Yongfeng, XUE Chunji, et al. Geological and Geochemical characteristics of Duobaoshan Pb-Zn Deposit in Hetian, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2012, 30(1):52-57.
- 董连慧,冯京,刘德权,等. 新疆成矿单元划分方案研究[J]. 新疆地质,2010,28(01):1-15.
- DONG Lianhui, FENG Jing, LIU Dequan, et al. Research for Classification of Metallogenic Unit of Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2010, 28(01):1-15.
- 董连慧,徐兴旺,范廷宾,等. 喀喇昆仑火烧云超大型喷流—沉积成因碳酸盐型Pb-Zn矿的发现及区域成矿学意义[J]. 新疆地质, 2015, 33(1):41-50.
- DONG Lianhui, XU Xingwang, FAN Tingbin, et al. Discovery of the Huoshaoyun Super-Large Exhalative-Sedi-

- mentary Carbonate Pb-Zn Deposit in the Western Kunlun Area and its Great Significance for Regional Metallogeny[J]. Xinjiang Geology, 2015, 33(1):41-50.
- 高永宝,滕家欣,李侃. 喀喇昆仑火烧云超大型铅锌矿床成矿特征与成因[J]. 矿物学报,2017,(增刊):561-562.
- GAO Yongbao, TENG Jiaxin, LI Kan. Metallogenic characteristics and genesis of Huoshaoyun superlarge Lead-Zinc deposit in Karakorum [J]. Mineralogical Journal, 2017, (Suppl.):561-562.
- 高峰,菅坤坤,王炬川,等. 新疆河尾滩—河西岗地区1:5万矿产地质调查报告[R]. 西安:陕西省矿产地质调查中心,2019.
- 刘家军,何明勤,李志明,等. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质, 2004, 23(1):1-10.
- LIU Jiajun, HE Mingqin, LI Zhiming, et al. Oxygen and Carbon Isotopic Geochemistry of Baiyangping Silver-Copper Polymetallic Ore Concentration Area in Lanping Basin of Yunnan Province and Its Significance[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(1):1-10.
- 刘婷婷,唐菊兴,刘鸿飞,等. 西藏墨竹工卡县洞中拉铅锌矿床S、Pb同位素组成及成矿物质来源[J]. 现代地质, 2011, 25(5):869-876.
- LIU Tingting, TANG Juxing, LIU Hongfei, et al. Sulfur and lead isotope composition and tracing for sources of ore-forming materials in the Dongzhongla Pb-Zn deposits in Mozhuogongka County, Tibet[J]. Geoscience, 2011, 25(5):869-876.
- 李荣社,计文化,杨永成,等. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京:地质出版社,2008.
- LI Rongshe, JI Wenhua, YANG Yongcheng, et al. The Geology of Kunlun, China and Adjacent Areas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- 黎敦朋,崔建堂,罗乾周,等. 新疆1:25万岔路口幅(I44C001001)区域地质调查报告[R]. 西安:陕西省地质调查院,2005.
- 陕亮,郑有业,许荣科,等. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究[J]. 地质与资源, 2009, 18(3):197-203.
- SHAN Liang, ZHENG Youye, XU Rongke, et al. Review on sulfur isotopic tracing and hydrothermal metallogenesis [J]. Geology and Resources, 2009, 18(3):197-203.
- 温春齐,多吉. 矿床研究力法[M]. 四川:四川科学技术出

- 版社, 2009.
- WEN Chunqi, DUO Ji. Research Method of Deposit[M]. Sichuan Science and Technology Press, 2009.
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地球与环境, 2002, 30(3): 73-81.
- WU Kaixing, HU Ruizhong, BI Xianwu, et al. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: A review[J]. Earth and Environment, 2002, 30(3): 73-81.
- 魏永峰, 冯邦国, 林鑫, 等. 新疆和田县化石山外围金铅锌矿调查评价报告[R]. 成都: 四川省地质矿产勘查开发局区域地质调查队, 2018.
- 魏永峰, 赵志强, 冯邦国, 等. 新疆和田县化石山一带铅锌矿预查报告[R]. 成都: 四川省地质矿产勘查开发局区域地质调查队, 2017.
- 杨斌, 陈正乐, 张青, 等. 南天山坎岭铅锌矿矿床地质特征及S、Pb同位素特征研究[J]. 中国地质, 2018, 45(1): 155-167.
- YANG Bin, CHEN Zhengle, ZHANG Qing, et al. Geological characteristics and sulfur and lead isotopes of the Kanglead-zinc deposit, Southern Tianshan Mountains[J]. Geology in China, 2018, 45(1): 155-167.
- 张长青, 李厚民, 代军治, 等. 铅锌矿床中矿石铅同位素研究[J]. 矿床地质, 25(增刊): 213-216.
- ZHANG Changqing, LI Houmin, DAI Junzhi, et al. Lead isotope research on lead-zinc deposits[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(suppl.): 213-216.
- 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- ZHENG Yongfei, CHEN Jiangfeng. Stable Isotope Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- 赵晓健, 伍跃中, 王泰山, 等. 西昆仑乔尔天山——岔路口地区铅锌矿成矿特征及找矿标志[J]. 西北地质, 2014, 47(4): 245-255.
- ZHAO Xiaojian, WU Yuezhong, WANG Taishan, et al. Metallogenic Characteristics and Prospecting Criteria of Lead-zinc Deposits in Qiao'erTianshan-Chalukou Region of West Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(4): 245-255.
- 朱炳泉, 李献华. 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[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- ZHU Bingquan, LI Xianhua. The Theory and Application of Isotopic System in Earth Science—Crust Mantle Evolution in China[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- CLAYPOOL GE, HOLSER WT, KAPLAN IR, et al. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation[J]. Chemical Geology, 1980, 28: 199-260.
- OHMOTO H. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. Reviews in Mineralogy, 1986, 16(1): 491-559.
- OHMOTO H, GOLDBERGER M B. Sulfur and carbon isotopes[J]. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 1997, 3: 517-611.
- ZARTMANRE, DOEBR. Plumbotectonics—the model[J]. Tectonophysics, 1981, 75(1-2): 135-162.
- TAYLOR BE. Stable isotope geochemistry of ore-forming fluids[J]. Mineralogist Association of Canada: Short Course Handbook, 1987a, 13: 337-445.