

高永宝,李文渊,钱兵,等. 新疆维宝铅锌矿床地质、流体包裹体和同位素地球化学特征. 吉林大学学报:地球科学版,2014,44(4):1153-1165. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201404109.

Gao Yongbao, Li Wenyuan, Qian Bing, et al. Geology, Fluid Inclusions and S, Pb Isotopic Geochemistry of the Weibao Zn-Pb Deposit in Qimantage, Xinjiang. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44(4): 1153-1165. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201404109.

新疆维宝铅锌矿床地质、 流体包裹体和同位素地球化学特征

高永宝¹,李文渊¹,钱兵¹,李侃¹,
张照伟¹,蒋忠祥²,沈灯亮²,王志海¹,叶美芳¹

1. 西安地质矿产研究所/国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,西安 710054

2. 新疆地质矿产勘查局地球物理化学探矿大队,新疆 昌吉 831100

摘要:新疆维宝铅锌矿床位于东昆仑祁漫塔格地区西段,铅锌矿体受地层及岩性控制,多呈层状、似层状赋存于蓟县纪狼牙山组中下部条带状绿帘石(透辉石)砂卡岩中,矿石类型主要为绿帘石-透辉石砂卡岩型铅锌(铜)矿石。矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等,脉石矿物主要为透辉石、绿帘石、方解石、绿泥石、石榴子石等。金属硫化物电子探针分析表明,闪锌矿中 Fe 质量分数为 2.206%~2.679%,贫 Ga、Ge、Cd, Zn/Cd 为 143~150,方铅矿中 Ag 质量分数较低(0.163%~0.210%),具有与岩浆热液有关的金属硫化物特征。流体包裹体以富气相两相包裹体和富液相两相包裹体为主,均一温度平均值分别为 268.2 和 273.1 °C,含有 CO₂、CH₄、N₂、H₂ 等成分,成矿流体可能来源于岩浆流体,具中温、高盐度、低密度的特征,成矿过程中发生了不混溶作用。金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 为 0.49‰~2.41‰,主要来源于岩浆;金属硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.254~18.336, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.556~15.664, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.060~38.367,主要来源于区内深源岩浆活动,有少量地壳铅的混染。综合分析认为维宝铅锌矿床为与印支期岩浆作用有关的层控砂卡岩型矿床。

关键词:流体包裹体;S 同位素;Pb 同位素;地球化学;维宝铅锌矿床;祁漫塔格;新疆

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201404109

中图分类号:P618.4

文献标志码:A

Geology, Fluid Inclusions and S, Pb Isotopic Geochemistry of the Weibao Zn-Pb Deposit in Qimantage, Xinjiang

Gao Yongbao¹, Li Wenyuan¹, Qian Bing¹, Li Kan¹, Zhang Zhaowei¹,
Jiang Zhongxiang², Shen Dengliang², Wang Zhihai¹, Ye Meifang¹

1. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources/MLR Key Laboratory of Genesis and Exploration of
Magmatic Ore Deposits, Xi'an 710054, China

2. Geophysical and Geochemical Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resource Exploration and
Development, Changji 831100, Xinjiang, China

收稿日期:2013-09-27

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41102050);国家“十一·五”科技支撑计划项目(2006BAB01A01);陕西省
自然科学基金基础研究计划项目(2013JBM5010);中国地质调查局地质调查项目(1212011121088,
1212011121092,1212011121083)

作者简介:高永宝(1982—,男,助理研究员,主要从事区域成矿及成矿规律研究,E-mail:gaoyongbao2006@126.com。

Abstract: The Weibao Pb-Zn deposit is located in the western Qimantage, east Kunlun, Xinjiang Province. The stratiform ore bodies are controlled by the strata, and occur in the banded epidote diopside skarn in middle-lower Langyashan Formation of Jixianian Period. Major Pb-Zn (Cu) ore belongs to epidote diopside skarn type. The ore minerals consist of galena, sphalerite and chalcopyrite, and the gangue minerals are composed of diopside, epidote, calcite, chlorite and garnet. The sphalerite is characterized by higher content of Fe (2.206%-2.679%), lower content of Ga, Ge, Cd and Zn/Cd (143-150), and the content of Ag in galena is lower (0.163%-0.210%), which indicates that the metallic minerals may be formed closely with magmatic fluid. There are two types of fluid inclusions, liquid-rich two-phase and gas-rich two-phase. The average homogenization temperatures of two types of inclusions are 268.2 and 273.1 °C, respectively. The gas components of CO₂, CH₄, N₂ and H₂ in inclusions indicate the ore-forming fluid may be derived from magmatic fluid. In all, the initial ore-forming fluid belongs to immiscibility, characterized by middle-high temperature, high salinity and low density. The values of $\delta^{34}\text{S}$ vary from 0.49‰ to 2.41‰, which indicates that sulfur in sulfides was mainly from the magma. The sulfides have $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values from 18.254 to 18.336, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values from 15.556 to 15.664, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values from 38.060 to 38.367, which suggests that ore-forming metals come from deep magmatic activity, with little crust mixing. In summary, the Weibao Pb-Zn deposit may be a layered skarn type deposit related to Indosinian magmatic activity.

Key words: fluid inclusion; S isotope; Pb isotope; geochemistry; Weibao Zn-Pb deposit; Qimantage; Xinjiang

0 前言

新疆祁漫塔格地区成矿条件优越,自20世纪90年代,在铁铜铅锌等多金属矿床的勘查上取得了重要进展,相继在维宝、虎头崖、尕林格、四角羊等地取得了找矿新发现^[1-4],使祁漫塔格地区成为我国又一重要的铁铜铅锌多金属矿集区。研究表明,祁漫塔格地区在中—晚三叠世东昆仑地区经历的大规模中酸性岩浆侵入作用^[5-6]带来了丰富的成矿物质,这可能是该时期大规模多金属成矿的关键因素^[5]。

维宝铅锌矿床地处新疆东昆仑祁漫塔格地区,位于青藏高原的北缘,行政区划属新疆巴音郭楞蒙古自治州若羌县,位于若羌县东南330 km,是由新疆地矿局物化探大队2002—2003年在1:20万区域化探扫面及异常检查中发现的。2004—2011年的工作陆续发现了维宝西段铅锌矿体、维东铅锌矿点、青龙岭铅锌矿点等,目前维宝矿床主矿段已达中型规模,具有大型矿床的找矿远景。由于发现较晚,近年来只对其地质特征^[7-10]、地球化学特征^[11-12]、同位素地球化学特征^[13]开展了初步的研究工作,但对其成矿物质来源及成矿流体特征的研究仍不够深入,且由于矿体具有明显的层控性,均赋存于矽卡岩

中,对其成因仍存在层控矽卡岩型矿床^[7,10]、沉积-岩浆热液叠层控矿床^[9]、后生层控多金属矿床^[8]等不同认识分歧。因此,笔者在详细野外地质观察的基础上,对维宝铅锌矿床地质、矿相学及硫化物矿物化学成分进行了研究,着重开展矿物流体包裹体测温及成分、S同位素、Pb同位素等分析,结合区域成矿背景,分析探讨成矿流体性质、成矿物质来源及矿床成因机制,以期为该矿床的深部及外围进一步找矿有所帮助。

1 区域地质背景

维宝铅锌矿床大地构造位置上处于东昆仑西段祁漫塔格岩浆弧带^[14],南部为中昆仑微陆块,北部为柴达木陆块(图1a)。区域内出露地层主要为古元古代金水口群白沙河组(Pt₁b)、蓟县纪狼牙山组(Jxl)及晚三叠世鄂拉山组(T₃e)。白沙河组为中深变质的钾长花岗片麻岩,局部出露大理岩;狼牙山组岩性主要有条带状绿帘石透辉石矽卡岩、微晶大理岩、绿泥绢云母千枚岩和绢云母纤闪石片岩等;鄂拉山组由一套中酸性、中基性火山岩组成,主要岩性有凝灰岩、流纹岩和中酸性熔岩等。

区域出露的(深)大断裂主要有昆北断裂带、黑

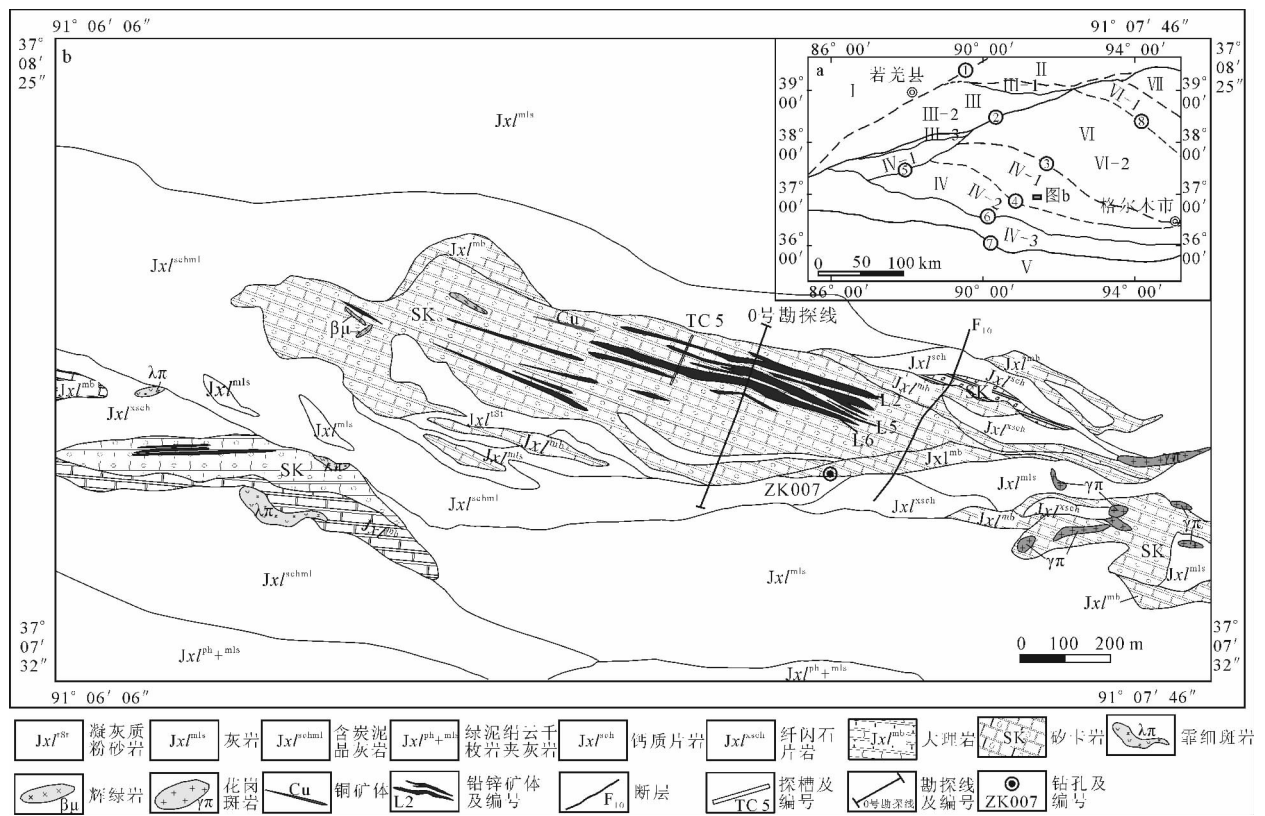
山—那陵格勒断裂和昆中断裂带等。而受上述主干断裂的应力作用影响,区内北西向、东西向、北东向等次级断裂组基为发育。其中:北西向断裂系统对区域沉积建造的分布有明显的控制作用;而东西向、北东向产出的断裂一般规模较小,对区域地质体(包括成矿活动)具有程度不等的破坏作用。

区域中酸性侵入岩发育,主要为新元古代二长—正长—碱长花岗质片麻岩,中—晚三叠世闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩及三叠纪末正长花岗岩—文象碱长花岗斑岩等。以中—晚三叠世花岗岩浆岩最为发育^[5],代表性岩体为鸭子沟钾长花岗斑岩((224.0±1.6)Ma^[15]),卡尔却卡似斑状二长花岗岩((227.3±1.8)Ma^[5]),尕林格石英二长闪长岩和石英二长岩((228.3±0.5)Ma、(234.4±0.6)Ma^[2]),虎头崖

含暗色包体花岗闪长岩和二长花岗岩((224.3±0.6)Ma、(239.7±0.8)Ma)等。中—晚三叠世侵入岩形成了大量的斑岩型铜铅矿床及矽卡岩型铁多金属矿床^[5]。

2 矿床地质

维宝矿区地层单一,主要为蓟县纪狼牙山组,呈北西—南东向分布,以中浅变质的碳酸盐岩、碎屑岩为主,夹部分细碎屑岩、片岩的岩石组合(图 1b)。矿区未见岩浆岩出露,外围西侧存在印支期花岗岩。最新钻探工作在维宝矿区西部发现隐伏二长花岗岩体,在岩体外接触带透辉石—透闪石矽卡岩内可见铁铜多金属矿体,矿石矿物为磁铁矿、黄铜矿及少量方铅矿和闪锌矿,磁铁矿、黄铜矿呈浸染状、块状构造,



I. 塔里木陆块; II. 阿北—敦煌地块; III. 阿尔金造山带; III-1. 红柳沟—拉配泉蛇绿构造混杂岩带, III-2. 阿中地块, III-3. 阿帕—茫崖早古生代蛇绿构造混杂岩带; IV. 昆仑造山带; IV-1. 北昆仑(祁漫塔格)岩浆弧带, IV-2. 中昆仑微地块, IV-3. 昆南增生杂岩楔; V. 巴颜喀拉褶皱带; VI. 柴达木陆块; VI-1. 柴达木盆地北缘, VI-2. 柴达木盆地; VII. 祁连造山带; ①阿尔金北缘断裂; ②阿尔金南缘断裂; ③昆北断裂带; ④黑山—那陵格勒断裂; ⑤白干湖断裂; ⑥昆中断裂带; ⑦昆南断裂带; ⑧柴北缘断裂。

图 1 区域大地构造简图(a)(据文献[14]修编)及维宝铅锌矿床地质矿产图(b)^①

Fig. 1 Regional tectonic sketch map (a) (modified after reference[14]) and geological map of the Weibao Zn-Pb deposit (b)^①

① 新疆地质矿产勘查局地球物理化学探矿大队. 新疆若羌县维宝铅锌矿普查地质报告. 昌吉:新疆地质矿产勘查局地球物理化学探矿大队, 2008.

方铅矿及闪锌矿呈浸染状、细脉状构造产出。

维宝铅锌矿体主要赋存于蓟县纪狼牙山组内,地层岩性控制明显(图2),主要产于狼牙山组中下部条带状绿帘石(透辉石)矽卡岩中。矿体的顶板和底板围岩分别为炭质灰岩、大理岩。矿床地表矿化蚀变带较明显,呈近EW向,长度断续达3 km,矿化蚀变带宽150~300 m。围岩矿化蚀变主要为矽卡岩化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化和硅化等。其中矽卡岩化为重要的找矿标志。

目前为止,已圈定矿体53条,其中工业矿体38条。L2、L5、L6号为主矿体。矿体产状较稳定,走向 $280^{\circ}\sim 290^{\circ}$,倾向SW,倾角 60° 左右,呈层状、似层状、透镜状,局部有膨胀、收缩、分支、复合现象,后

生矿体受层间压剪性断裂重复张开断裂构造控制明显(图2)。矿体一般延长200~900 m,地表视厚度4~25 m,因倾角较大颇接近于真厚度,现已控制斜深大于400 m。矿石中Pb品位为 $0.30\%\sim 12.26\%$,平均 1.03% ;Zn的品位为 $0.50\%\sim 10.75\%$,平均 1.22% ;Zn>Pb,Zn:Pb约为1.2:1.0。伴生Cu品位为 $0.20\%\sim 2.96\%$ 。

维宝铅锌矿矿石按照自然类型划分为绿帘石-透辉石矽卡岩型铅锌(铜)矿石(图3a、b)和(绿帘石、透辉石)石榴子石矽卡岩型铅锌(铜)矿石;前者较为发育,多具条带状、脉状等构造,及半自形、斑状、交代状、交代残余、胶状等结构。矿石矿物成分主要为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等。次生氧化矿物主要为褐铁矿,其他有少量的黄铁矿、白铅矿、铅矾、菱锌矿等。矿石中的脉石矿物主要为透辉石、绿帘石、方解石、绿泥石、石榴子石,次要为透闪石、石英、阳起石、绢云母等。闪锌矿主要呈浸染状,顺层分布于方解石-石英(图3c)、透闪石-绿帘石-石榴石、透辉石等条带中。在闪锌矿的晶粒内,多见黄铜矿滴状分布(图3d)。方铅矿主要呈浸染状、条带状、填隙状,分布于闪锌矿粒间(图3d)或方解石-石英条带、绿泥石条带中,可见与闪锌矿的共生边结构(图3e)。黄铜矿除呈微细粒分布于闪锌矿中外,主要呈稠密浸染状,分布于方解石-石英、绿帘石-透辉石、绿泥石条带中(图3f)。

按矿物组合特点及各矿物相互穿插切割关系,成矿期大致可以分为2个阶段:1)矽卡岩阶段,早阶段主要形成石榴子石、透辉石,晚阶段主要形成透闪石、绿帘石;2)硫化物阶段,主要形成方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、方解石。

在美国印第安纳大学地球科学系用CAMECA SX50型电子探针分析仪对矿石硫化物的化学成分进行了分析(表1)。结果表明:矿石闪锌矿中 $w(\text{Fe})$ 为 $2.206\%\sim 2.679\%$,贫Ga、Ge、Cd,Zn/Cd为143~150,暗示其形成温度中等^[16-17],这与闪锌矿呈褐色的矿相学特征一致,其矿物化学特征区别于典型的层控型矿床(高Ga、Ge,Zn/Cd>300^[16,18]),可能与岩浆热液密切相关(贫Ga、Ge,Zn/Cd<300^[16,18])。方铅矿中 $w(\text{Ag})$ 为 $0.163\%\sim 0.210\%$, $w(\text{Cu})$ 为 $0.010\%\sim 0.013\%$,区别于沉积成矿环境中低Ag的方铅矿^[19-20],与岩浆热液有关的方铅矿高Ag特征一致^[19-20]。

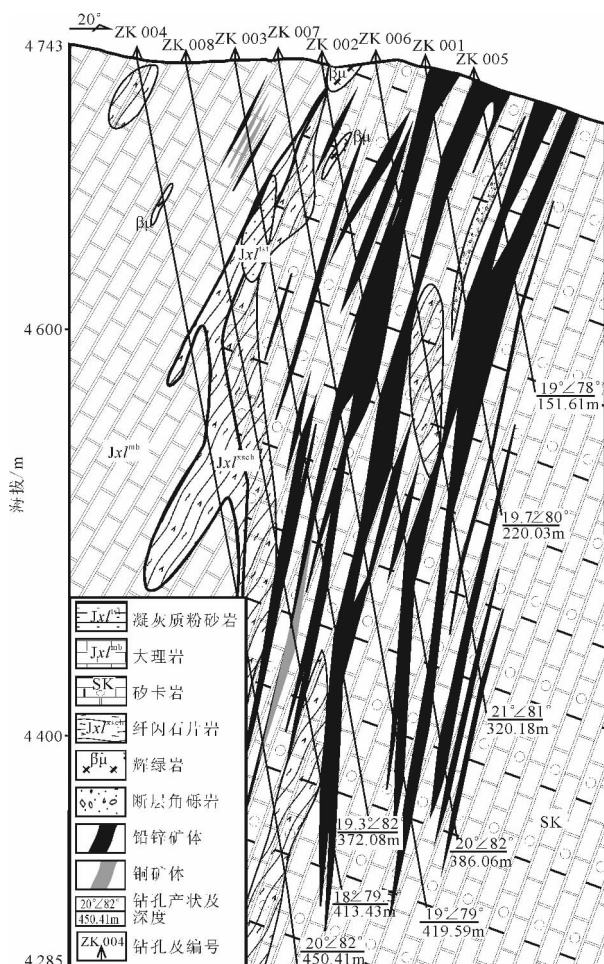
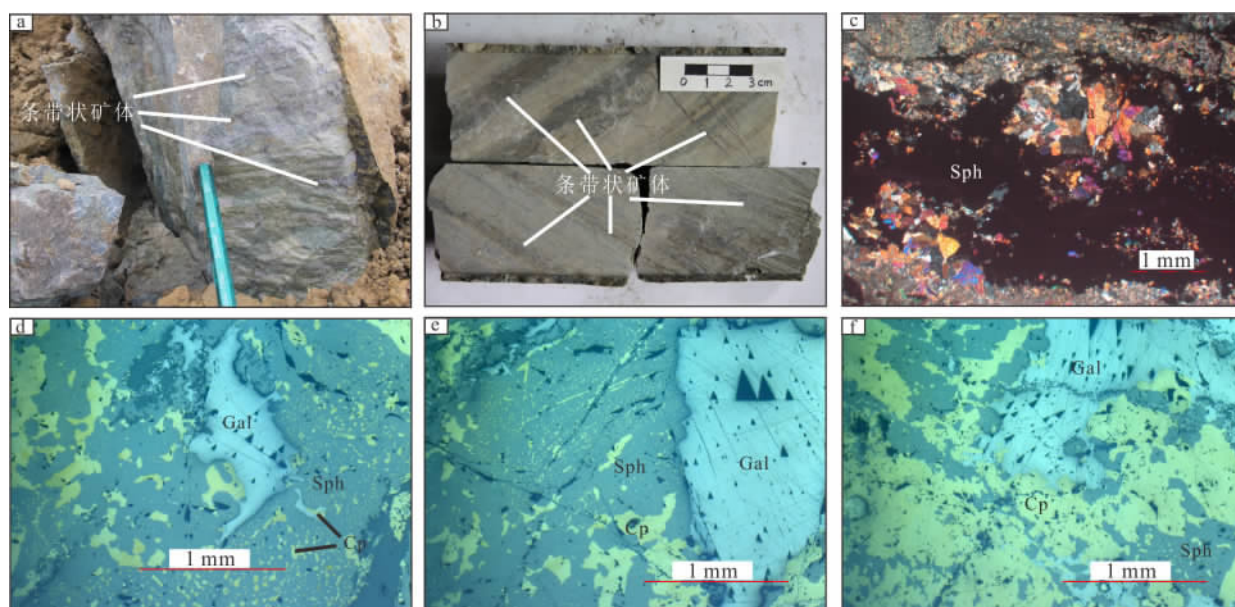


图2 维宝铅锌矿床0勘探线剖面图^①

Fig. 2 Section of 0 line in the Weibao Zn-Pb deposit

① 新疆地质矿产勘查局地球物理化学探矿大队,新疆若羌县维宝铅锌矿普查地质报告,昌吉:新疆地质矿产勘查局地球物理化学探矿大队,2008.



a. 地表条带状绿帘石-透辉石砂卡岩型矿石; b. 条带状绿帘石-透辉石砂卡岩型矿石岩心; c. 闪锌矿与方解石共生(透射光); d. 闪锌矿内的滴状黄铜矿(反射光); e. 闪锌矿与方铅矿共生(反射光); f. 稠密浸染状黄铜矿。Ga. 方解石; Sph. 闪锌矿; Gal. 方铅矿; Cp. 黄铜矿。

图3 维宝铅锌矿床矿石及矿相照片

Fig. 3 Photographs of Zn-Pb ores from the Weibao Zn-Pb deposit

3 流体包裹体

3.1 样品及分析方法

6件矿石样品主要采自维宝矿区的钻孔 ZK007 (WB11-13、WB11-16、WB11-19、WB11-22) 及探槽 TC5 (WB11-54、WB11-86) 的绿帘石-透辉石砂卡岩型铅锌矿石, 矿相学观察表明闪锌矿呈他形粒状, 主要与方解石及少量石英共生(图 3c)。将样品磨制成双面抛光的厚 0.05 mm 的包裹体片, 首先进行流体包裹体岩相学观察, 由于石英中流体包裹体细小, 因而本次研究选择脉石矿物方解石中有代表性的原生包裹体进行激光拉曼探针成分及显微测温实验分析。

流体包裹体气、液相成分的激光拉曼探针测试工作在西安地质矿产研究所实验测试中心进行, 仪器型号为英国 Renshaw 公司 inVia 型激光拉曼探针。实验条件为: Ar^+ 激光器波长 514.5 nm, 激光功率 40 mW, 扫描速度 10 s/6 次叠加, 光谱仪狭缝 10 μm , 实验室温度 23 $^{\circ}\text{C}$, 湿度 65%。

流体包裹体的显微测温实验在西安地质矿产研究所实验测试中心进行。测试仪器为英国 Linkam TMS 94 型显微冷热台, 测温范围为 -196~600 $^{\circ}\text{C}$,

冷冻数据和加热数据精度分别为 ± 0.2 和 ± 2 $^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 流体包裹体岩相学

样品中流体包裹体较丰富(图 4), 原生包裹体和次生包裹体均有发育, 根据室温条件下流体包裹体的相态和充填度特征, 维宝铅锌矿床与闪锌矿共生方解石中的原生包裹体主要分为 2 种类型。

I 型富气相两相包裹体: 在方解石中分布较为广泛(图 4a、b), 室温下主要由气相和液相组成, 多孤立分布。包裹体个体变化较大, 多数为 5~15 μm , 形状变化亦较大, 不规则状、椭圆状均有发现, 气相体积分数在 50% 以上。

II 型富液相两相包裹体: 在方解石(图 4b、c、d) 中均有一定的分布, 常温下由气相和液相组成。形态多样, 多呈椭圆、四边形等不规则状, 直径为 5~10 μm , 气液比普遍较低, 多为 5%~15%。多与 I 型包裹体共生(图 4b)。

3.3 显微测温结果

对原生流体包裹体的显微测温结果见表 2。根据上述相关温度的测定结果, 利用 Hall 等^[21] 的盐度计算公式计算了相应包裹体的盐度:

$$w = 1.78T_m - 0.042T_m^2 + 0.000557T_m^3$$

式中: w 为盐度(%); T_m 为冰点温度($^{\circ}\text{C}$)。据刘斌

表 1 维宝铅锌矿床金属硫化物电子探针分析结果

Table 1 Mineral compositions of metal sulfides of the Weibao Zn-Pb deposit

样品号	矿物	$w_B/\%$											
		Fe	Pb	Zn	S	As	Ge	Ga	Ag	Cd	In	Cu	总和
WB-06.1	方铅矿	—	85.541	—	13.100	—	0.104	—	0.192	0.064	—	0.012	99.046
WB-06.2	方铅矿	—	85.907	—	13.281	—	0.109	0.037	0.165	0.053	—	—	99.606
WB-06.3	方铅矿	—	86.069	—	12.994	—	0.059	—	0.210	0.058	—	—	99.513
WB-06.4	方铅矿	—	83.424	—	13.307	—	0.053	—	0.163	0.061	—	0.013	97.051
WB-22.1	方铅矿	—	86.656	—	13.372	—	0.086	0.022	—	0.059	—	0.010	100.294
WB-22.2	方铅矿	—	85.752	—	13.006	—	0.055	0.045	—	0.055	—	0.013	99.013
WB-22.3	方铅矿	—	86.665	—	13.277	—	0.067	—	—	0.052	—	—	100.105
WB-22.4	方铅矿	—	84.637	—	13.164	—	—	—	—	0.066	—	—	97.940
WB-22.5	方铅矿	0.094	85.975	0.188	13.303	—	0.069	—	—	0.083	—	0.012	99.727
WB-23.1	方铅矿	—	83.684	—	13.141	—	—	—	—	0.060	—	—	96.921
WB-23.2	方铅矿	—	84.875	—	13.424	0.005	0.081	—	—	0.077	—	0.037	98.547
WB-22.6	闪锌矿	2.498	—	64.171	33.320	—	—	—	—	0.444	—	0.076	100.518
WB-22.7	闪锌矿	2.446	—	64.285	33.367	0.006	—	—	—	0.451	—	0.013	100.583
WB-22.8	闪锌矿	2.655	—	63.827	33.025	—	0.035	—	—	0.435	—	0.281	101.738
WB-22.9	闪锌矿	2.580	—	64.098	33.568	0.009	—	—	0.012	0.431	—	0.024	100.945
WB-22.10	闪锌矿	2.206	—	63.624	33.455	0.008	—	—	—	0.437	—	—	99.790
WB-23.3	闪锌矿	2.679	—	59.657	32.142	—	0.038	—	—	0.412	—	0.476	96.936
WB-23.4	闪锌矿	2.509	—	60.279	33.024	—	0.027	—	—	0.417	—	0.082	97.070
WB-23.5	闪锌矿	2.509	—	60.878	33.133	—	—	—	—	0.407	—	0.051	98.724

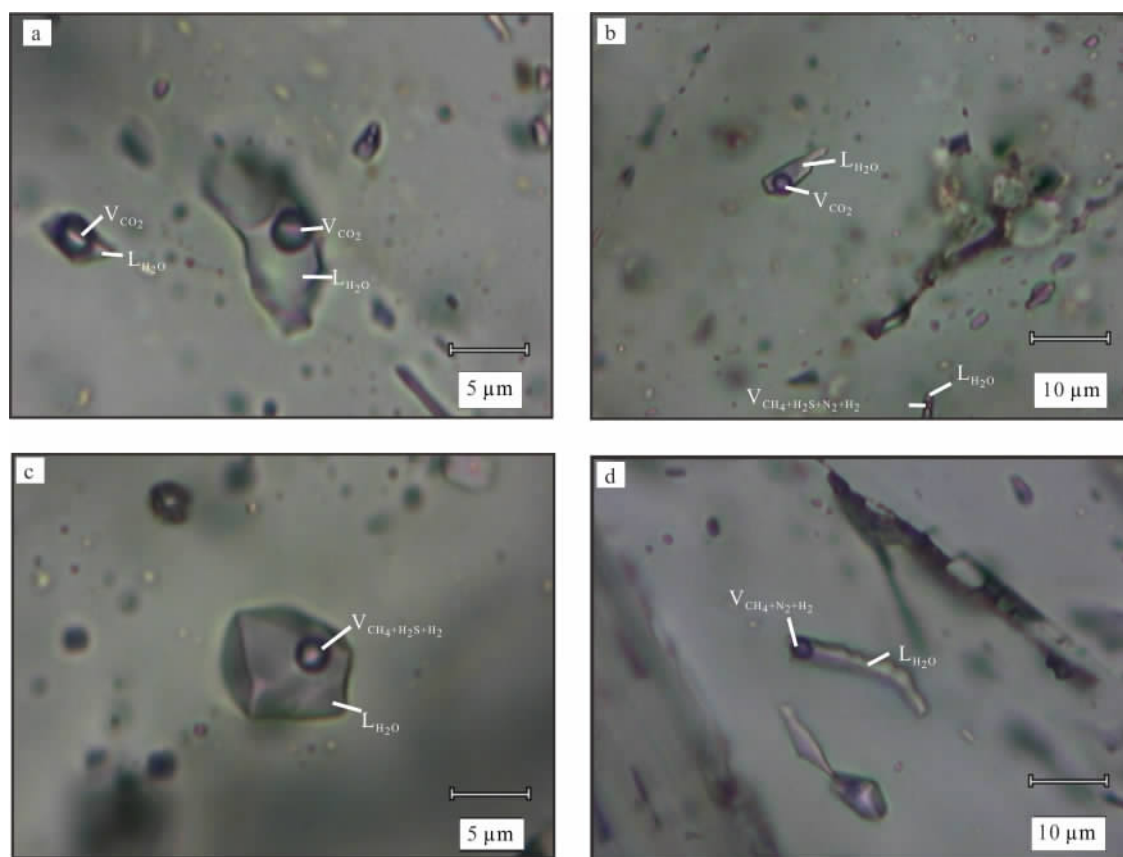
注:总和包括了低于检测限的元素含量;“—”表示未检出或低于检测限。

表 2 维宝铅锌矿床流体包裹体显微测温结果

Table 2 Micro thermometric data of the fluid inclusions in the Weibao Zn-Pb deposit

样品号	寄主 矿物	包裹体 类型	均一温度/℃		冰点温度/℃		$w(\text{NaCl})/\%$		密度/(g/cm ³)	
			范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
WB11-19-2	方解石	I	300.0~317.0(6)	306.8	-11.1~-10.3(6)	-10.7	14.5~15.3	14.9	0.85~0.87	0.86
WB11-54-1	方解石	I	210.0~227.0(4)	217.8	-13.7~-12.6(4)	-13.1	16.9~17.9	17.4	0.98~0.99	0.98
WB11-54-2	方解石	I	217.0~237.0(5)	227.2	-16.4~-13.5(5)	-15.1	17.7~20.4	19.2	0.98~0.99	0.99
WB11-86	方解石	I	340.0~341.0(2)	340.5	-14.7~-14.1(2)	-14.4	18.3~18.9	18.6	0.86~0.87	0.86
WB11-13-1	方解石	II	331.0~357.0(3)	340.0	-9.7~-9.1(3)	-9.4	13.1~13.8	13.4	0.78~0.81	0.80
WB11-16	方解石	II	169.0~326.0(5)	237.8	-16.6~-12.6(5)	-14.7	16.9~20.5	18.8	0.90~1.02	0.97
WB11-19-1	方解石	II	215.0~238.0(5)	223.2	-9.1~-7.1(5)	-8.1	10.7~13.1	11.9	0.93~0.94	0.93
WB11-22-1	方解石	II	177.0~182.0(3)	179.7	-13.4~-12.6(3)	-12.9	16.9~17.7	17.2	1.01~1.02	1.02
WB11-22-2	方解石	II	359.0~362.0(2)	360.5	-12.6~-12.4(2)	-12.5	16.7~16.9	16.8	0.80~0.81	0.81

注:括号内数字表示测试包裹体数。



a. 方解石中的 I 型富气相包裹体(WB11-54-1、2); b. 方解石中的 I 型富气相包裹体(WB11-19-2)和 II 型富液相包裹体(WB11-19-1)共存; c. 方解石中的 II 型富液相包裹体(WB11-22-1); d. 方解石中的 II 型富气相包裹体(WB11-22-2)。L. 液相; V. 气相。

图 4 维宝铅锌矿床包裹体形态特征

Fig. 4 Fluid inclusions from the Weibao Zn-Pb deposit

等^[22]推导的公式计算获得流体包裹体的流体密度。

I 型富气相两相包裹体以均一到气相为主。包裹体的均一温度为 $210.0 \sim 341.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (测试包裹体数 $n=17$), 平均为 $273.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 5a); 冰点温度为 $-16.4 \sim -10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 盐度为 $14.5\% \sim 20.4\%$ (图 5b); 流体的总密度为 $0.85 \sim 0.99\text{ g/cm}^3$ 。

II 型富液相两相包裹体以均一到液相为主。包裹体的均一温度为 $169.0 \sim 362.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($n=18$), 平均为 $268.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 5a); 冰点温度为 $-16.6 \sim -7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 盐度为 $10.7\% \sim 20.5\%$ (图 5b); 流体的总密度为 $0.78 \sim 1.02\text{ g/cm}^3$, 均与 I 型包裹体基本相当。

3.4 流体包裹体成分

流体包裹体激光拉曼探针分析结果(表 3)表明其成分十分复杂。I 型流体包裹体的液相成分主要是水溶液, 含有少量 CO_2 和 CH_4 , 气相成分以 CO_2 为主, 含少量的 CH_4 、 H_2 。II 型流体包裹体的液相成分主要也是水溶液, 含有少量 CH_4 、 H_2S , 气相成

分主要为 CH_4 、 H_2S 、 N_2 、 H_2 等。

4 S、Pb 同位素组成

4.1 样品及分析方法

用于 S、Pb 同位素分析的样品分别采自于钻孔(WB11-12、WB11-14)及探槽(WB-06、WB-10、WB-22、WB-23、WB11-71、WB11-88、WB11-95)的绿帘石-透辉石矽卡岩型铅锌矿石, 矿石样品主要呈条带状构造, 中-粗粒结构。其中, 金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿, 脉石矿物主要为透辉石、绿帘石、方解石等。

S 同位素分析在美国印第安纳大学地球科学系用 Finnigan MAT252 型质谱仪完成。用 0.75 mm 的合金微钻在光片上钻取闪锌矿、方铅矿、黄铜矿粉末, 加入约 10 倍于粉末含量的 V_2O_5 样品, 用锡纸包裹, 分别称重(闪锌矿 $0.21 \sim 0.24\text{ g}$; 方铅矿 $0.52 \sim 0.60\text{ g}$; 黄铜矿 $0.20 \sim 0.23\text{ g}$)用于 S 同位素

分析,分析结果采用国际标准 VCDT 表达,分析精度优于 $\pm 0.05\text{‰}$ ^[23],样品重现性优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

Pb 同位素分析在核工业北京地质研究院测试实验中心完成。将样品粉碎至 60 目,在双目镜下挑出闪锌矿、方铅矿等单矿物,重复挑选 2 次,确保其纯度高于 98%。将挑好的单矿物用于 Pb 同位素分析:首先用混合酸(HF+HClO₄)溶样,然后用树脂交换法分离出铅,蒸干后用热表面电离质谱法进行铅同位素测试,仪器型号为 ISOPROBE-T,对于 1 μg 的²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 分析精度优于 0.005%。

4.2 S 同位素组成

分析结果(表 4)表明,8 件矿石硫化物 S 同位素组成相对集中(图 6), $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 为 0.49‰~2.41‰,平均为 1.30‰。其中:闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 0.53‰和 2.41‰,平均值为 1.47‰;方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 0.49‰~1.65‰,平均值为 1.13‰;黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 1.40‰和 1.58‰,平均值为 1.49‰。 $\delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} \approx$

$\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铜矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$,硫同位素基本达到平衡。

4.3 Pb 同位素组成

维宝铅锌矿床内金属硫化物的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 18.254~18.336,平均为 18.298;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.556~15.664,平均为 15.162;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 38.060~38.367,平均为 38.201(表 5)。不同硫化物矿物之间无明显差别。

利用 Stacey 等^[24]的两阶段模式(假定年龄为铅模式年龄)计算了维宝铅锌矿床硫化物铅同位素的相关参数(表 5)。其中: μ 值为 9.45~9.56,平均为 9.51; ω 值为 35.31~36.90,平均为 36.04; κ 值为 3.72~3.91,平均为 3.79。

5 讨论

5.1 成矿流体性质

维宝铅锌矿床同时存在富气相两相(I 型)和富

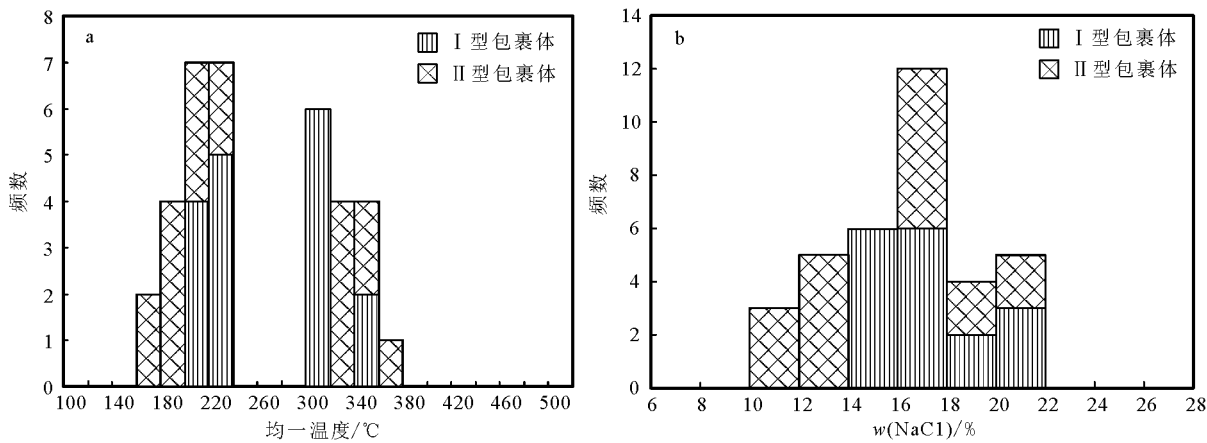


图 5 维宝铅锌矿床流体包裹体均一温度(a)及盐度(b)直方图

Fig. 5 Homogenization temperatures (a) and salinity (b) of fluid inclusions in the Weibao Zn-Pb deposit

表 3 维宝铅锌矿床流体包裹体气、液相成分激光拉曼探针分析结果

Table 3 Laser Raman data of gas and liquid components of the fluid inclusions in the Weibao Zn-Pb deposit

样品号	寄主矿物	包裹体类型	XB气相 / %						XB液相 / %					
			CO ₂	H ₂ S	CH ₄	N ₂	H ₂	总和	CO ₂	H ₂ S	CH ₄	SO ₂	H ₂ O	总和
WB11-19-2	方解石	I	97.1	—	2.8	—	0.1	100.0	4.6	—	0.1	—	95.3	100.0
WB11-54-1	方解石	I	93.7	—	6.0	—	0.4	100.0	2.7	—	—	—	97.3	100.0
WB11-54-2	方解石	I	90.7	—	8.7	—	0.5	100.0	6.5	—	0.2	—	93.2	100.0
WB11-86	方解石	I	91.2	1.7	5.3	1.2	0.6	100.0	1.6	0.7	0.4	—	97.3	100.0
WB11-13-1	方解石	II	—	34.1	45.1	20.8	—	100.0	—	0.1	0.4	—	99.5	100.0
WB11-16	方解石	II	—	—	78.3	—	21.7	100.0	—	0.3	—	—	99.7	100.0
WB11-19-1	方解石	II	—	11.5	63.1	20.7	4.7	100.0	—	—	0.2	—	99.8	100.0
WB11-22-1	方解石	II	—	21.3	75.1	—	3.6	100.0	—	0.2	0.2	—	99.6	100.0
WB11-22-2	方解石	II	—	—	88.0	7.1	4.9	100.0	—	0.1	0.2	—	99.7	100.0

注: x 为物质的量分数; “—”表示未检出。

表4 维宝铅锌矿床金属硫化物S同位素组成

Table 4 S isotopes of metal sulfides in the Weibao Zn-Pb deposit

样品号	测定矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
WB-06-Pb	方铅矿	0.49
WB-10-Pb	方铅矿	1.65
WB-22-Pb	方铅矿	0.96
WB-22-Zn	闪锌矿	0.53
WB-22-CuS	黄铜矿	1.58
WB-23-Pb	方铅矿	1.41
WB-23-Zn	闪锌矿	2.41
WB-23-CuS	黄铜矿	1.40

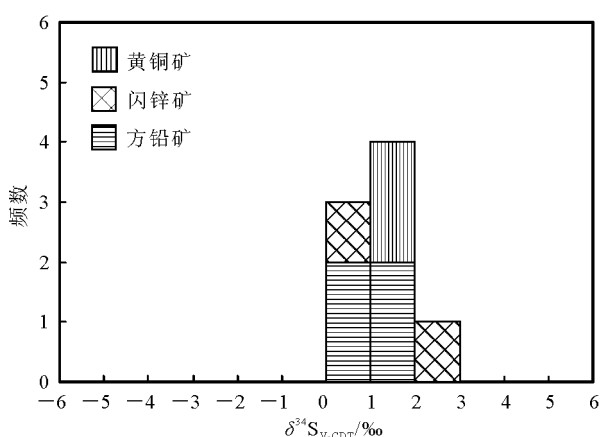


图6 维宝铅锌矿床S同位素组成直方图

Fig. 6 Distribution of S isotopes in the Weibao Zn-Pb deposit

液相两相(Ⅱ型)包裹体,且相互共生,表明其捕获时成矿流体处于一种不均匀的状态^[25-26]。Ⅰ型包裹体以均一到气相为主,均一温度平均为273.1℃,盐度为14.5%~20.4%;Ⅱ型以均一到液相为主,均一温度平均为268.2℃,盐度为10.7%~20.5%。两者具有大致相同的均一温度和盐度,从盐度-均一温度分布(图7)来看,并未显示多端元流体混合的特征。且Ⅰ型包裹体气相成分以CO₂为主,含少量的CH₄、H₂,Ⅱ型包裹体气相成分主要为CH₄、H₂S、N₂、H₂等,这与俯冲和造山作用中流体不混溶作用特征相符^[27]。已有研究表明,CH₄组分的加入可以使NaCl-H₂O-CO₂流体在更深的部位发生不混溶作用^[28]。综上可见,维宝铅锌矿床成矿过程中成矿流体发生了不混溶作用。

在流体不混溶过程中捕获的流体包裹体,其捕获端元组分的流体包裹体均一温度基本代表了成矿作用的温度^[25]。维宝铅锌矿床Ⅰ型包裹体均一温

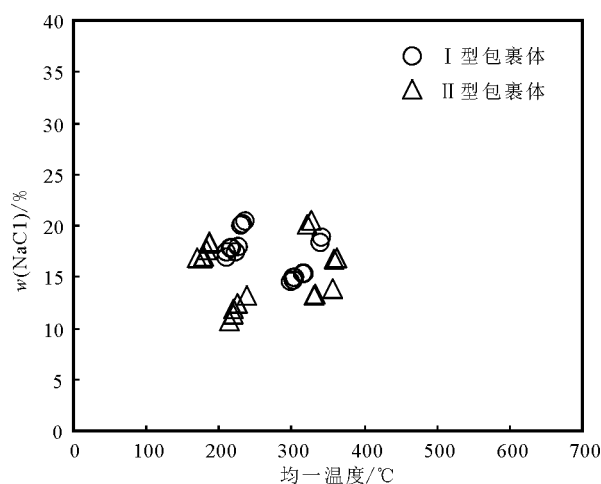


图7 维宝铅锌矿床流体包裹体盐度-均一温度分布图

Fig. 7 Homogenization temperatures vs. salinity diagram of fluid inclusions in the Weibao Zn-Pb deposit

度为210.0~341.0℃,Ⅱ型包裹体均一温度平均为169.0~362.0℃,与石英中流体包裹体的均一温度(130~300℃)^[13]基本相当,因此其成矿流体具中温、高盐度、低密度的特征。激光拉曼探针分析表明:CO₂、CH₄、N₂、H₂是成矿流体重要组分,具有地幔流体或岩浆流体的成分特征^[29],而与海水差异较大,因为海水中基本不含上述气相组分;同时也是一种富CH₄、H₂S等还原性挥发分的流体。

5.2 成矿物质来源

维宝铅锌矿床原生矿石的组成相对简单,矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿,未发现硫酸盐矿物,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值基本能代表成矿流体的总硫同位素组成^[30]。上已述及,矿石矿物闪锌矿、方铅矿、黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 相对集中,为0.49‰~2.41‰,与黄磊^[13]获得的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(3‰~5‰)基本相当,明显不同于强烈还原(沉积的)硫($\delta^{34}\text{S}$ 为较大的负值^[31])和现代海水硫($\delta^{34}\text{S}$ 为20‰^[32]),也区别于喷流沉积铅锌矿床分布范围较大的特点^[33-35],并低于Red Dog等典型喷流沉积矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(14‰~50‰^[36]),具有典型的岩浆硫来源特征^[31]。区域中一晚三叠世岩浆作用发育^[5-6],可能成为维宝铅锌矿床的硫源。

维宝铅锌矿床硫化物 μ 值(9.45~9.56)均低于平均地壳 μ 值(9.74), ω 值(35.31~36.90)大部分低于平均地壳的 ω 值(36.84)。依据朱炳泉^[37]的不同类型矿石铅的 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图解(图8),维宝铅锌矿床5件Pb同位素数据均投影于“上地壳与地幔混合的

表 5 维宝铅锌矿床 Pb 同位素组成
Table 5 Pb isotopes of metal sulfides in the Weibao Zn-Pb deposit

样品号	测定矿物	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	<i>t</i> /Ma	μ	ω	κ
WB11-12	闪锌矿	18.336	15.634	38.195	263	9.56	36.01	3.77
WB11-14	闪锌矿	18.294	15.609	38.097	263	9.50	35.50	3.74
WB11-71	方铅矿	18.254	15.556	38.367	226	9.45	36.90	3.91
WB11-88	方铅矿	18.280	15.597	38.060	258	9.48	35.31	3.72
WB11-95	方铅矿	18.324	15.664	38.285	307	9.54	36.47	3.82

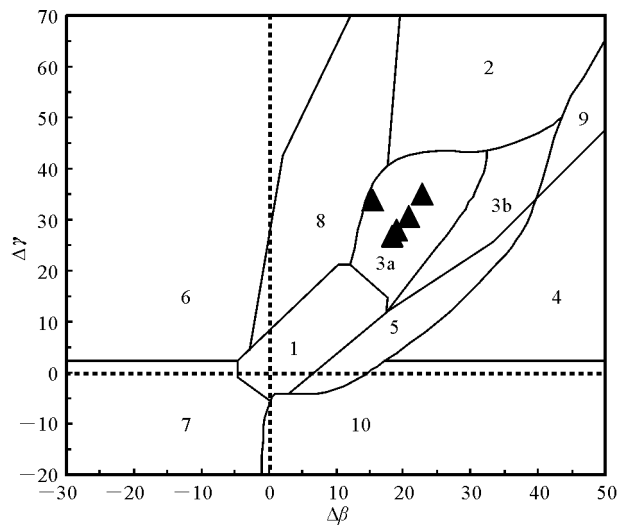
注:*t* 为年龄; μ 为用 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 计算的 ²³⁸U/²⁰⁴Pb 值; ω 为用 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 计算的 ²³²Th/²⁰⁴Pb 值; $\kappa=\omega/\mu$ 。

俯冲带铅(岩浆作用)”区域。而用豪特曼斯公式计算的维宝铅锌矿模式年龄值为 226~307 Ma,与区域广泛分布的地幔底侵及岩浆混合成因的印支期岩浆岩的形成时代基本一致^[2,5-6],指示成矿物质主要来源于区内深源岩浆活动,有少量地壳铅的混染。

5.3 矿床成因探讨

维宝铅锌矿床受地层及岩性控制,铅锌矿体主要赋存于蓟县纪狼牙山组中下部条带状绿帘石(透辉石)矽卡岩中,炭质灰岩和大理岩分别作为矿体的顶板和底板,矽卡岩化、绿泥石化、绿帘石化等围岩蚀变发育。矿体多呈层状、似层状产出,产状与围岩一致。矿石类型主要为绿帘石-透辉石矽卡岩型铅锌(铜)矿石和(绿帘石、透辉石)石榴子石矽卡岩型铅锌(铜)矿石,前者较为发育。而最新钻探工作在矿区西侧发现大量隐伏二长花岗岩体及矽卡岩型 Fe-Cu 矿体,矿床的形成可能与二长花岗岩体存在共生关系。

矿石硫化物电子探针分析表明,闪锌矿贫 Ga、Ge、Cd,Zn/Cd 为 143~150,暗示其应形成温度中等^[16-17],区别于典型层控型矿床(高 Ga、Ge,Zn/Cd<300^[16,18]),可能与岩浆热液密切相关(贫 Ga、Ge,Zn/Cd<300^[16,18])。方铅矿中 Ag 的质量分数与岩浆热液有关方铅矿高 Ag 的特征一致^[19-20]。流体包裹体中 CO₂、CH₄、N₂ 等发育,暗示其具有地幔或岩浆流体特征,且发生了不混溶作用。S 同位素具典型岩浆硫特征,而 Pb 同位素表明成矿物质主要来源于印支期深源岩浆,存在少量地壳混染。因此,维宝铅锌矿床的可能机制为:印支期由于地幔底侵及岩浆混合作用,深部形成岩浆房,继而上侵形成二长花岗岩体等,侵位后派生出岩浆热液,且携带了大量 Pb、Zn、Cu 等成矿物质;同时不断淋滤并萃取少量地层内的金属物质,形成富含成矿物质的成矿流体;在强大内分压作用及热力扩散作用下沿构造裂隙上



1. 地幔源铅;2. 上地壳源铅;3. 上地壳与地幔混合的俯冲带铅(a. 岩浆作用;b. 沉积作用);4. 化学沉积型铅;5. 海底热水作用铅;6. 中深变质作用铅;7. 深变质作用下地壳铅;8. 造山带铅;9. 古老页岩上地壳铅;10. 退变质作用铅。 $\Delta\beta=[\beta/\beta_M(t)-1]\times 1\ 000$; $\Delta\gamma=[\gamma/\gamma_M(t)-1]\times 1\ 000$; β 、 γ 为测定参数值; $\beta_M(t)$ 、 $\gamma_M(t)$ 为 *t* 时的地幔参数值。

图 8 维宝铅锌矿床 Pb 同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解(底图据文献^[37])

Fig. 8 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ diagram of Pb isotopes in the Weibao Zn-Pb deposit(base map after reference^[37])

升运移,沿狼牙山组碳酸盐层进行渗滤交代作用,形成早期石榴子石矽卡岩及绿帘石-透辉石矽卡岩,且由于后期体系温度、压力的降低,致使成矿流体发生不混溶作用使得闪锌矿、方铅矿、黄铜矿等金属硫化物沉淀成矿,同时伴生方解石、石英等脉石矿物(图 9)。

综上所述,维宝铅锌矿床可能为与印支期岩浆作用有关的层控矽卡岩型矿床。

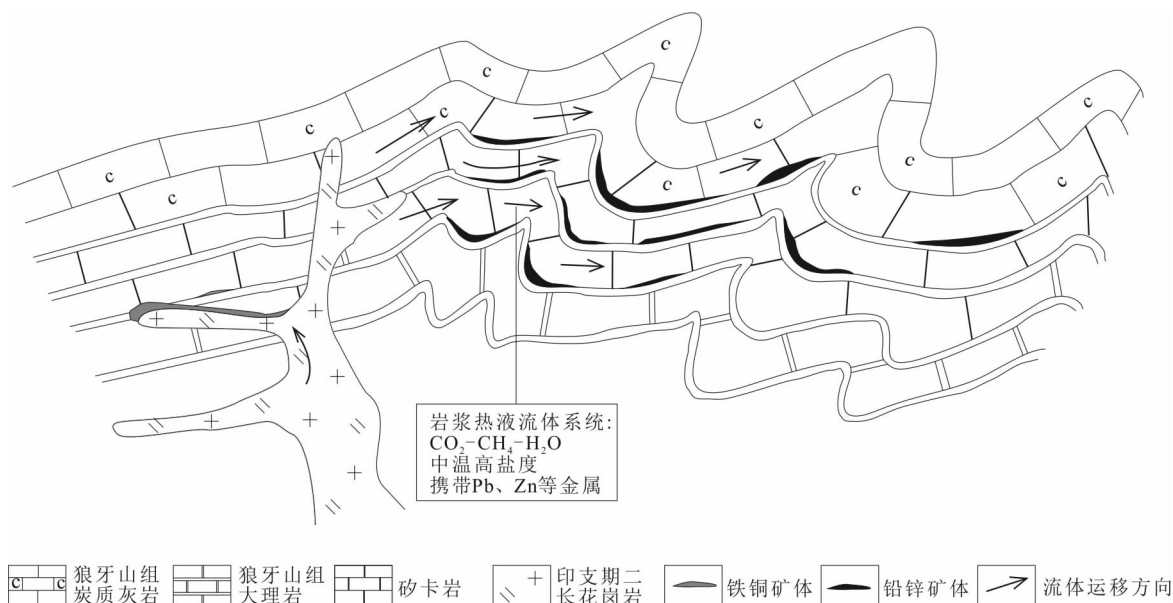


图9 维宝铅锌矿床成矿模式示意图

Fig. 9 The ore-forming model of the Weibao Zn-Pb deposit

6 结论

1) 维宝铅锌矿床流体包裹体以富气相两相包裹体和富液相两相包裹体为主, 成矿流体为岩浆流体体系, 具中温、高盐度、低密度的特征, 成矿过程中发生了不混溶作用。2) 金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 为 $0.49\text{‰} \sim 2.41\text{‰}$, 主要来源于岩浆; 金属硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $18.254 \sim 18.336$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $15.556 \sim 15.664$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $38.060 \sim 38.367$, 主要来源于区内深源岩浆活动, 有少量地壳铅的混染。3) 维宝铅锌矿床受蓟县纪狼牙山组中下部条带状绿帘石(透辉石)砂卡岩控制, 为与印支期岩浆作用有关的层控砂卡岩型矿床。

在 S 同位素测试过程中, 美国印第安纳大学 Chusi Li 教授、Edwards Ripley 教授等给予了有益的帮助; 数据处理及图件绘制过程中, 得到了西安地质矿产研究所张江伟助理研究员、王亚磊研究实习员和长安大学臧遇时同学的帮助; 研究过程得到了西安地质矿产研究所叶芳研究员、李行研究员的有益指导。在此向他们深表感谢。

参考文献 (References):

- [1] 高永宝, 李文渊, 谭文娟. 祁漫塔格地区成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 35-43.
Gao Yongbao, Li Wenyan, Tan Wenjuan.

Metallogenic Characteristics and Analysis of the Prospecting Potential in the Area of Qimantage[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4): 35-43.

- [2] 高永宝, 李文渊, 马晓光, 等. 东昆仑尕斯库勒格铁矿床成因年代学及 Hf 同位素制约[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2012, 48(2): 36-47.

Gao Yongbao, Li Wenyan, Ma Xiaoguang, et al. Genesis, Geochronology and Hf Isotopic Compositions of the Magmatic Rocks in Galinge Iron Deposit, Eastern Kunlun[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2012, 48(2): 36-47.

- [3] 丰成友, 李东生, 吴正寿, 等. 东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 10-17.

Feng Chengyou, Li Dongsheng, Wu Zhengshou, et al. Major Types, Time-Space Distribution and Metallogenesis of Polymetallic Deposits in the Qimantage Metallogenic Belt, Eastern Kunlun Area[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4): 10-17.

- [4] 丰成友, 王雪萍, 舒晓峰, 等. 青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区年代学研究及地质意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(6): 1806-1817.

Feng Chengyou, Wang Xueping, Shu Xiaofeng, et al. Isotopic Chronology of the Hutouya Skarn Lead-Zinc Polymetallic Ore District in Qimantage Area of Qinghai Province and Its Geological Significance[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(6):

- 1806-1817.
- [5] 丰成友, 王松, 李国臣, 等. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成矿意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 665-678.
- Feng Chengyou, Wang Song, Li Guochen, et al. Middle to Late Triassic Granitoids in the Qimantage Area, Qinghai Province, China: Chronology, Geochemistry and Metallogenic Significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 665-678.
- [6] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 403-414.
- Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, et al. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt [J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 403-414.
- [7] 潘维良, 刘春涌, 景宝盛. 新疆维宝铅锌矿床地质特征及成因[J]. 新疆有色金属, 2005(增刊): 2-4.
- Pan Weiliang, Liu Chunyong, Jing Baosheng. Geological Characteristics and Genesis of Weibao Pb-Zn Deposit, Xinjiang Province [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2005(Sup.): 2-4.
- [8] 杨自安, 彭省临, 石菲菲, 等. 新疆若羌县维宝铅锌矿床地质特征及成因分析[J]. 矿产与地质, 2008, 22(6): 503-505.
- Yang Zian, Peng Shenglin, Shi Feifei, et al. Geological Characteristics and Genesis of the Weibao Pb-Zn Deposit in Ruoqiang County, Xinjiang [J]. Mineral Resources and Geology, 2008, 22(6): 503-505.
- [9] 胡华伟, 景宝盛, 王斯林, 等. 新疆若羌县维宝铅锌矿床地质特征及矿床成因浅析[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 73-80.
- Hu Huawei, Jing Baosheng, Wang Silin, et al. Brief Analysis for Geological Features and Ore Deposit Origin of Weibao Lead-Zinc Deposit in Ruoqiang County, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4): 73-80.
- [10] 闫军武, 李爱民, 李新安, 等. 维宝铅锌矿床地质特征[J]. 资源环境与工程, 2011, 25(6): 604-606.
- Yan Junwu, Li Aimin, Li Xin'an, et al. Geological Characteristics of Weibao Lead-Zinc Deposit [J]. Resources Environment & Engineering, 2011, 25(6): 604-606.
- [11] 李爱民, 闫军武, 潘维良. 维宝铅锌矿床地质与地球化学特征[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 81-86.
- Li Aimin, Yan Junwu, Pan Weiliang. Geology and Geochemical Features of Weibao Pb-Zn Deposit[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4): 81-86.
- [12] 李爱民. 维宝铅锌矿床地球化学特征[J]. 西部探矿工程, 2011(11): 163-169.
- Li Aimin. Geochemical Feature of Weibao Pb-Zn Deposit [J]. West-China Exploration Engineering, 2011(11): 163-169.
- [13] 黄磊. 新疆若羌县维宝铅锌矿床地质特征及矿床成因[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
- Huang Lei. Geological Characteristics and Genesis of Weibao Lead-Zinc Deposit in Xinjiang Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [14] 李荣社, 计文化, 杨永成. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-400.
- Li Rongshe, Ji Wenhua, Yang Yongcheng. The Geology in Kunlun and Its Adjacent Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1-400.
- [15] 李世金, 孙丰月, 王力, 等. 青海东昆仑卡尔却卡多金属矿区斑岩型铜矿的流体包裹体研究[J]. 矿床地质, 2008, 27(3): 399-406.
- Li Shijin, Sun Fengyue, Wang Li, et al. Fluid Inclusion Studies of Porphyry Copper Mineralization in Kaerqueka Polymetallic Ore District, East Kunlun Mountains, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(3): 399-406.
- [16] 韩照信. 秦岭泥盆系铅锌成矿带中闪锌矿的标型特征[J]. 西安地质学院学报, 1994, 16(1): 12-17.
- Han Zhaoxin. The Typomorphic Characteristic of the Sphalerite in the Qinling Devonian System Lead-Zinc Metallogenic Belt[J]. Journal of Xi'an Engineering University, 1994, 16(1): 12-17.
- [17] Lin Ye, Nigel J Cook, Cristiana L Ciobanu, et al. Trace and Minor Elements in Sphalerite from Base Metal Deposits in South China: A LA-ICPMS Study [J]. Ore Geology Reviews, 2011, 39: 188-217.
- [18] 李明琴. 广西拉么铜矿床闪锌矿的标型特征研究[J]. 贵州工学院学报, 1990, 19(4): 63-68.
- Li Mingqin. Typomorphic Characteristics of Sphalerite at Lamo Zn-Cu Ore Deposit in Guangxi, China [J]. Journal of Guizhou University of Technology, 1990, 19(4): 63-68.
- [19] 徐国风, 邵洁涟. 方铅矿的元素混入物研究及标型特征[J]. 地质地球化学, 1979(2): 37-42.
- Xu Guofeng, Shao Jielian. The Element Mixing and Typomorphic Characteristics of Ganela [J]. Geology and Geochemistry, 1979(2): 37-42.
- [20] 何耀基. 闽东北地区层控铅锌矿床中方铅矿的一些

- 标型特征及地质意义[J]. 福建地质, 1986, 5(4): 35-47.
- He Yaoji. The Guide Characteristics of Galena in Stratabound Pb-Zn Mineral Deposits in Northern-Eastern Fujian Province and Their Geological Significance[J]. Geology of Fujian, 1986, 5(4): 35-47.
- [21] Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing Point Depression of NaCl-KCl-H₂O Solutions [J]. Economic Geology, 1988, 83: 197-202.
- [22] 刘斌, 沈昆. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- Liu Bin, Shen Kun. Fluid Inclusion Thermodynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.
- [23] Studley S A, Ripley E M, Elswick E R, et al. Analysis of Sulfides in Whole Rock Matrices by Elemental Analyzer-Continuous Flow Isotope Ratio Mass Spectrometry [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 141-148.
- [24] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of Terrestrial Lead Isotope Evolution by a Two-Stage Model[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 26: 207-221.
- [25] 张文淮, 陈紫英. 流体包裹体地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 1-246.
- Zhang Wenhui, Chen Ziyang. Geology of Fluid Inclusions [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993: 1-246.
- [26] Shepherd T J, Rakin A H, Alderton D H M. A Practical Guide to Fluid Inclusions Studies [M]. Blackie: Chapman & Hall, 1985: 1-154.
- [27] 卢焕章. 流体不混溶性和流体包裹体[J]. 岩石学报, 2011, 27(5): 1253-1261.
- Lu Huanzhang. Fluids Immiscibility and Fluid Inclusions[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(5): 1253-1261.
- [28] Naden J, Shepherd T J. Role of Methane and Carbon Dioxide in Gold Deposition[J]. Nature, 1989, 342: 793-795.
- [29] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-487.
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid Inclusion[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-487.
- [30] Ohmoto H. Systematics of Sulfur and Carbon Isotopes in Hydrothermal Ore Deposits [J]. Economic Geology, 1972, 67: 551-579.
- [31] 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.
- [32] Claypool G E, Holser W T, Kaplan I R, et al. The Age Curves of Sulfur and Oxygen Isotopes in Marine Sulfate and Their Mutual Interpretation[J]. Chemical Geology, 1980, 28: 199-260.
- [33] 祝新友, 王莉娟, 朱谷昌, 等. 青海锡铁山铅锌矿床硫同位素地球化学研究: 深源与海水硫的混合[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 657-666.
- Zhu Xinyou, Wang Lijuan, Zhu Guchang, et al. Characteristics of Sulfur Isotope Geochemistry of Xitianshan Lead-Zinc Deposit, Qinghai: The Mixing of Sulfurs from Hydrothermal and Seawater[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(3): 657-666.
- [34] 连永牢, 曹新志, 燕长海, 等. 西藏当雄县拉屋铜铅锌多金属矿床喷流沉积成因[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(5): 1041-1046.
- Lian Yonglao, Cao Xinzhong, Yan Changhai, et al. Exhalative Sedimentary Genesis of Lawu Copper-Lead-Zinc Deposit in Dangxiong County of Tibet[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(5): 1041-1046.
- [35] 冯志强, 林丽, 刘永江, 等. 西秦岭造山带东段喷流沉积型铅锌矿床特征及其成矿模式: 以徽县洛坝矿床为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(6): 1799-1811.
- Feng Zhiqiang, Lin Li, Liu Yongjiang, et al. Characteristics and Metallogenic Model of SEDEX Lead-Zinc Deposits in the Western Qinling Orogenic Belt: A Case Study of the Luoba Deposit in Hui County, Gansu Province [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2013, 43(6): 1799-1811.
- [36] Taylor B E, Beaudoin G. Sulfur Isotope Stratigraphy of the Sullivan Pb-Zn-Ag Deposit, B C: Evidence for Hydrothermal Sulfur, and Bacterial and Thermochemical Sulphate Reduction [C]//Lydon J W, Hoy T, Slack J F, et al. The Geological Environment of the Sullivan Deposit. Columbia: British Columbia Special Publication, 2000: 696-719.
- [37] 朱炳泉. 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. Isotope System Theory in Earth Science and Application[M]. Beijing: Science Press, 1998.