

太行山连巴岭铅锌矿床地质特征及成矿物质来源

吴继莲, 刘建朝, 张海东, 侯雷明, 郑利宏

(长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:连巴岭铅锌矿区位于太行山北段涞源花岗岩体北侧与阜平变质核杂岩北西缘,产于乌龙沟—上黄旗深断裂带的次级平行断裂带中。分析了连巴岭铅锌矿床成矿地质背景、矿相学特征以及控矿构造,对比研究了矿石 S-Pb 同位素组成,探讨了成矿物质来源,建立了成矿模式。结果表明:金属硫化物样品(黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿)的硫同位素组成为 $(-2.7 \sim 6.9) \times 10^{-3}$,多数集中在 $(-1 \sim 3) \times 10^{-3}$,平均值为 1.1×10^{-3} ,与地幔硫接近;硫同位素组成频率直方图呈塔式分布,表明其深源岩浆硫的特点;矿石铅同位素组成稳定,花岗岩是主要的成矿母岩,成矿物质具有壳幔混合特点,并来源于上地幔—下地壳物质部分熔融形成的岩浆。连巴岭铅锌矿床成矿模式为:岩层因受到多种构造应力的影响而发生变形和破裂;中生代燕山运动引起次一级的褶曲断裂和节理,使地壳变得更加虚弱;基底的王安镇岩体发生断裂,花岗岩体乘机侵入;然后酸性、中性、基性岩脉侵入,由于颗粒细小,近于致密,渗透性差的中性岩脉起到屏蔽、遮挡作用,使得含矿热液与白云岩发生交代作用而聚集堆积形成矿体。

关键词:铅锌矿床;成矿模式;控矿构造;围岩蚀变;地质特征;S-Pb 同位素;连巴岭;太行山

中图分类号:P618.4

文献标志码:A

Geological Characteristics and Their Ore-forming Material Sources of Lianbaling Pb-Zn Deposit in Taihang Mountains

WU Ji-lian, LIU Jian-chao, ZHANG Hai-dong, HOU Lei-ming, ZHENG Li-hong

(School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Lianbaling Pb-Zn mining area, which is located in the northern of Laiyuan granite rock and the northwest of Fuping metamorphic core complex from the northern Taihang Mountains, develops in secondary parallel fault zone of Wulonggou-Shanghuangqi deep fault zone. Ore-forming geological background, characteristics of ore microscopy and ore-controlling structure of Lianbaling Pb-Zn deposit were analyzed, and S-Pb isotopic compositions of ore were studied, and ore-forming material sources were discussed, and metallogenic model was built. The results show that S isotopic compositions of metal sulfides (pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena) are $(-2.7 \sim 6.9) \times 10^{-3}$ with the average of 1.1×10^{-3} and mainly $(-1 \sim 3) \times 10^{-3}$, and are close to mantle sulfur; the distribution of frequency histogram of S isotopic composition, which is the type of tower, presents the characteristic of deep origin magma sulfur; Pb isotopic composition of ore is stable, granite is the main ore-controlling mother rock, and metallogenic material, which has the characteristic of crust-mantle mixing, comes from magma formed by partial melting of the upper mantle-lower crust. The metallogenic model of Lianbaling Pb-Zn deposit includes that the

收稿日期:2013-07-10

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212011121076)

作者简介:吴继莲(1981-),女,安徽太湖人,理学硕士研究生,E-mail:409526969@qq.com。

strata deform and rupture because of various tectonic stresses; Mesozoic Yanshanian movement causes secondary fold fracture and joint, and makes the crust more fragile; Wang'anzen complex of batholith ruptures, and then granite body intrudes; acidic, intermediate and mafic dykes later intrude, and intermediate dyke with low permeability has shield and shelter effects because of fine particle close to the density, and causes the metasomatism between ore-bearing hydrothermal solution and dolomite in order to aggregate and accumulate the orebody.

Key words: Pb-Zn deposit; metallogenic model; ore-controlling structure; wall-rock alteration; geological characteristic; S-Pb isotope; Lianbaling; Taihang Mountains

0 引言

连巴岭铅锌矿位于太行山北段河北省涞源县境内,产于涞源花岗岩体的北部边缘、乌龙沟—上黄旗深断裂带的次级平行断裂带中。从20世纪五六十年代开始,很多学者对连巴岭铅锌矿进行了大量的找矿地质勘探和科学研究工作,认为该区深部找矿应注重脉型铅锌多金属矿的控制评价,以小岩体为主要靶区,以斑岩型、矽卡岩型等新类型矿化或矿种为主要突破^[1],注重深部铜、铅锌矿的勘查和沿岩体接触带新矿体的找寻^[2],并提出该区多金属矿床成矿受3个因素的控制:①王安镇杂岩体提供了丰富的热源、水源和矿源;②岩体周围的中元古界雾迷山组白云岩是使矿质产生沉淀沉积的主要因素;③近SN向断裂是重要的控矿构造^[3]。这些研究主要集中在找矿和控矿因素方面,但对成矿物质来源没有进行深入研究。笔者在连巴岭铅锌矿床地质特征综合研究的基础上,结合矿相学特征,对矿区矿石S-Pb同位素进行系统研究,探讨其成矿物质来源,建立成矿模式。

1 区域地质概况

研究区出露地层自老至新有太古界阜平群,下元古界五台群,震旦亚界蓟县系和青白口系,下古生界寒武系和奥陶系下统,上古生界石炭系中统,中生界侏罗系中统、上统和新生界第四系。各界(亚界)之间均以角度不整合或明显的超覆或沉积间断为分界,反映本区地质发展曾经历了吕梁运动、蓟县运动、燕山运动的变革。

连巴岭铅锌矿区是大兴安岭—太行山—武陵山深断裂带的一部分,位于NNE向地幔陡坡带及重力梯度带上,存在多组构造形迹,NNE向乌龙沟大断裂和NEE向紫荆关深大断裂2组构造发育最明显,并构成区域构造格架^[4]。

研究区侵入岩主要形成于燕山期,前吕梁期只

有中酸性脉岩类。岩浆活动发生于中晚侏罗世,在燕山运动时期最强。在NNE向深断裂控制之下,首先形成构造火山岩带,继而发展为构造岩浆岩带,形成完整岩浆岩旋回。岩浆侵入大致在司格庄、王安镇南北2个中心同时发生中心式间歇性侵位,形成哑铃状花岗岩杂岩体^[5]。

2 矿区地质特征

连巴岭铅锌矿受王安镇岩体和雾迷山组白云岩的接触带、NNE向乌龙沟深断裂的控制。研究区内发现4条NW向铅锌矿含矿带,矿化产于构造蚀变带中或中酸性脉岩旁侧,与成矿有关的围岩蚀变为硅化、黄铁矿化和铁锰碳酸盐化等(图1)。

2.1 地层

研究区出露的地层较简单,东部的太古界黑云母斜长片麻岩具NE走向,向NW倾斜,倾角 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。震旦纪地层下部属中震旦统雾迷山组白云岩,上部为上震旦统下马岭组紫红色泥质页岩,其下部与阜平群片麻岩呈角度不整合接触,第四纪地层不发育,主要为残积、坡积与冲积物,其坡积层分布较广,一般覆盖于平缓的山坡,厚度1~3 m,最厚者可超过10 m^[6]。

2.2 构造

研究区内沉积地层构成NE走向、向NW倾斜的单斜构造。其由于次一级的褶曲而变得比较复杂,一般为平缓褶曲,只有在花岗岩接触带附近才形成较陡的背斜构造。其断层多为断距不大的逆断层和正断层。其节理极发育,在白云岩内和南部花岗岩岩体内均有发育;节理往往相互延长,其中近于SE向的节理最为发育;节理一般皆为张口裂隙,宽度为0~1 m,但北部因受岩性及构造运动的影响,节理宽度较大,达1~2 m,有时甚至形成更大的裂隙。南部的裂隙宽度略窄,但节理在延长方向上表现出很大的稳定性。

2.3 岩浆岩

2.3.1 侵入岩

研究区出露的大片酸性侵入岩,依次为花岗岩、

被中长石穿插及磁铁矿交代辉石的现象。

2.3.2 脉 岩

研究区脉岩分布广泛,其产状受生成前节理的控制,以 NNE 向和 NNW 向 2 组为主,尤以 NNE 向最为发育。区内最常见的中酸性脉岩有石英斑岩、花岗斑岩、正长闪长玢岩、石英闪长玢岩、闪长玢岩、细晶闪长岩、闪斜煌斑岩与云斜煌斑岩等,在全区都有分布,但北部比南部要少,南部又主要集中在黄土岗、库状石、列巴沟和南款区段,即接近侵入岩分布的地区。

石英斑岩脉的分布很广,主要集中在南部黄土岗、列巴沟区段。其产状为 NE 向 10°~30°,倾向 SE,倾角 50°~85°,其中少量呈 NNW 向或 SN 向,岩脉受节理裂隙控制,延长数百至数千米,宽度最大达 100 m,最小至数十厘米,一般为 1~10 m,是矿区规模最大的一种岩脉。石英斑岩脉的延向稳定,与围岩接触界线清楚,但局部变薄、膨大和分叉的现象较为普遍。岩脉中常有透镜状的白云岩包体,后者长轴与岩脉的延向一致。

花岗斑岩脉分布较少,见于黄安、西黄安、黄土岗村东及列巴沟等地,即与接触带临近的地段。其产状与石英斑岩相似,规模较次于石英斑岩,宽度大者达 30 m,一般为数米至 10 m,延长数百米,亦见有达千余米者。岩脉产状稳定,与围岩界线清楚,膨胀与变窄的现象不如石英斑岩普遍。

闪长玢岩脉、细晶闪长岩脉、云斜煌斑岩脉和闪斜煌斑岩脉主要密集于黄土岗、黄安、列巴沟和库状石等地。其分布于侵入岩附近者较少,大多数分布在离花岗岩较远的地区,并且由黄土岗以北至库状石以北有逐渐增多的趋势。

3 矿床地质特征

3.1 矿体特征

研究区已发现的矿脉共有 160 余条,其中较大者 35 条。矿脉大小不一,长数百米至数千米,一般为 500~1 500 m;厚度变化甚大,数十厘米至数米皆有,主要分布于白云岩中,只有个别矿脉伸展到花岗闪长岩内;矿脉主要集中分布于南款、黄安、黄土岗、列巴沟、库状石和铜碓子 6 个矿段及其外围,位于深断裂带两侧的黄土岗、列巴沟、黄安、南款 4 个矿段是主要矿段(图 2)。百余条矿脉中,黄安矿段 101 脉,黄土岗矿段 203、204、205 脉,列巴沟矿段 301 脉,库状石矿段 401 脉最大。主要矿脉特征列于表 1。

表 1 主要矿脉统计结果
Tab.1 Statistical Results of the Main Ore Vein

| 矿段 | 矿脉 编号 | 规模/m | | | 有用组分 | | 备注 |
|-----|----------|-------|------|------|----------|-------|----------------|
| | | 长度 | 延深 | 厚度 | 主要 | 伴生 | |
| 黄土岗 | 203 | 1 300 | >400 | 1.31 | Zn、Pb、Cu | Au、Ag | 与中性岩 脉伴生 |
| | 204 | 1 100 | >200 | 1.21 | Zn、Pb、Cu | Au、Ag | |
| | 205 | 900 | >180 | 0.43 | Zn、Pb、Cu | Au、Ag | |
| | 201 | 500 | >120 | 0.75 | Zn、Pb、Cu | Au、Ag | |
| 列巴沟 | 301 | 1 330 | >100 | 1.13 | Zn、Pb | Ag | 与酸性及中 性岩脉伴生 |
| | 303 | 920 | | 0.97 | Zn、Pb | Ag | |
| 黄安 | 101 | 800 | >100 | 1.06 | Pb、Zn、Au | Ag | 与煌斑岩脉伴生 |
| 库状石 | 401 | 1 500 | >150 | 1.20 | Pb、Zn | Cu | 与中性岩 脉伴生 |
| | 402 | 400 | | 0.60 | Pb、Zn | | |
| 南款 | 501 | 1 200 | | 0.81 | Pb、Zn | Cu | 与中基性岩 脉伴生 |
| | 511 | 500 | | 0.57 | Pb、Zn | | |
| | 531 | 700 | | 1.00 | Pb、Zn | | |

注:数据来源于河北地质六队。

矿体在矿脉中沿走向与倾向的变化甚大,膨胀与变窄交替出现,呈透镜状或串珠状体,有时则具囊状或瘤状体^[12-13]。后者的形成是含矿热液于破碎地段交代白云岩的结果,矿体沿倾向与走向分枝的现象也很常见。矿体以脉状充填为主,故其产状大致相同于裂隙及岩脉的产状,走向多为 NNE 向,倾向 SE,倾角 50°~80°。坑道中偶见有矿体被断层错动的现象,断距很小,断层有时被后期石英岩脉充填^[14-16]。

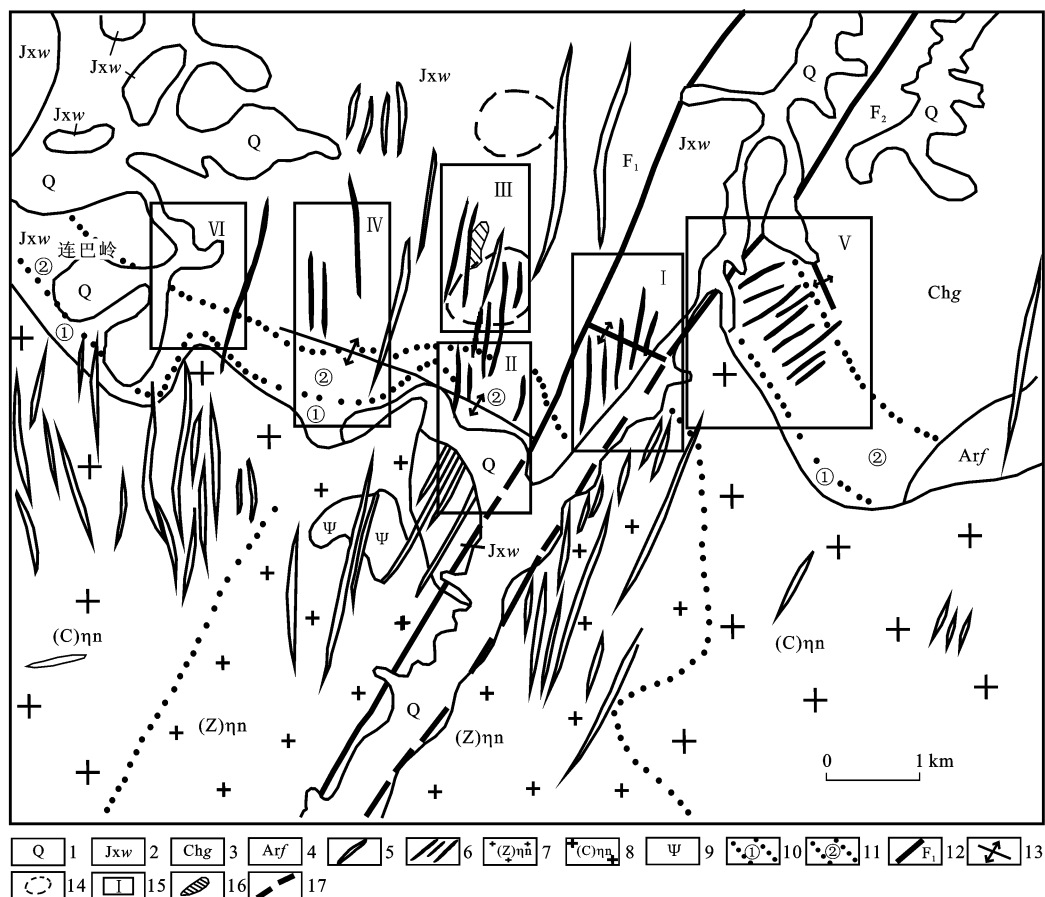
3.2 矿石特征

3.2.1 矿石的结构构造

研究区内矿石的结构构造分为原生矿石结构构造与氧化矿石结构构造^[4]。原生矿石结构以自形、半自形、他形粒状结构为主,其次为残余结构、交代结构、环状结构,氧化矿石中最常见的有胶状结构。隐晶状结构和粒状结构等^[17];原生矿石构造以块状、浸染状、条带状、细脉状、杂斑状为主,其次为角砾状、交错构造,氧化矿石构造与一般硫化矿床氧化带中的无明显差异,主要有土状和粉末状构造、皮壳状构造、胶状构造、晶洞构造、多孔构造、环状构造等(图 3)。

3.2.2 矿石组分

组成矿石的原生金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿和毒砂等(图 3)。次生金属矿物为褐铁矿、孔雀石、铜蓝、铅矾、白铅矿、菱锌矿、赤铁矿和辉铜矿等。脉石矿物主要有白云石、方解石,其次为石英,此外还有少量重晶石、石墨、绿泥石、白云母、滑石、绢云母等^[18]。



1—第四系;2—蓟县系雾迷山组;3—长城系高于庄组;4—太古宇阜平群;5—中酸性岩脉;6—铅锌矿脉;7—中粒石英二长岩;8—粗粒石英二长岩;9—橄榄石角闪岩;10—重结晶大理岩;11—蛇纹石化大理岩;12—断层及编号;13—背斜轴;14—推测隐伏岩体;15—矿段及编号;16—铅锌矿化带;17—推测断层;I—黄安区段;II—黄土岗区段;III—列巴沟区段;IV—库状区段;V—南款区段;VI—铜铜子区段;引自文献[1]

图2 连巴岭矿田矿脉分布简图

Fig. 2 Geological Map of Lianbaling Ore Field and Vein

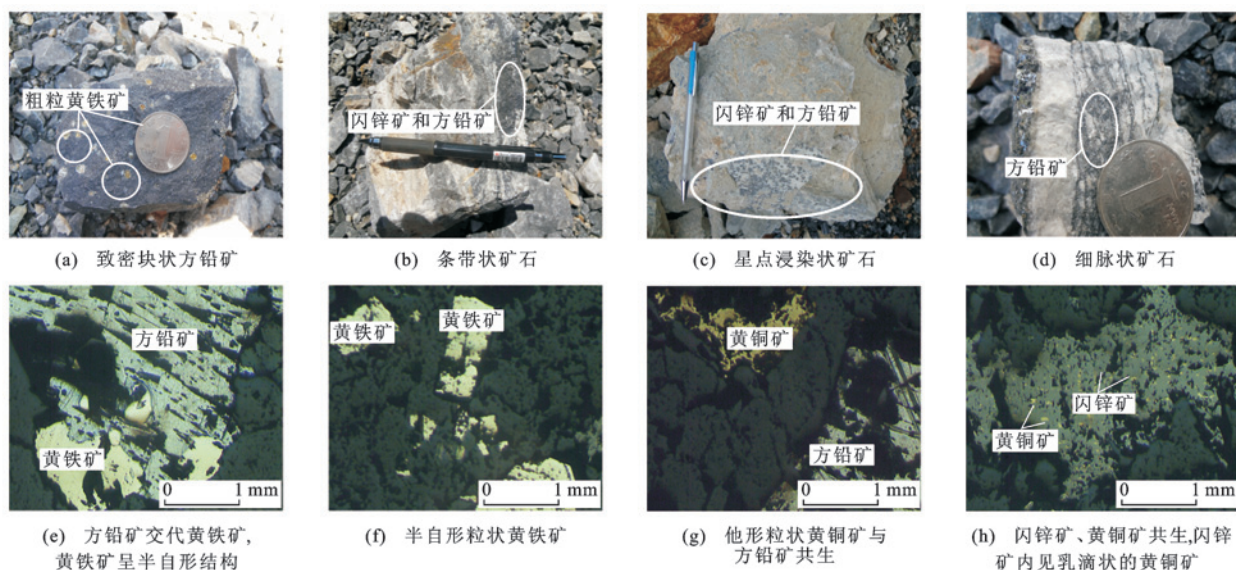


图3 连巴岭铅锌矿矿石结构及矿物照片

Fig. 3 Ore Structures and Mineral Photos from Lianbaling Pb-Zn Deposit

研究区主要造矿矿物是方铅矿,在全区广泛分布;它与其他造矿矿物间的含量比值由南至北逐渐递增。方铅矿往往交代生成黄铁矿,一般呈粒状、致密块状集合体,粒径 $0.1\sim 5.0\text{ mm}$,常呈细脉状充填于其他矿物的空隙中。根据镜下观察,方铅矿交代黄铁矿的现象较其他矿物更为发育。方铅矿在地表环境下很耐风化,大部分保持新鲜状态,轻微氧化后,表面产生一层黑色灰暗的薄膜,只在局部地段氧化成铅矾、白铅矿和褐铁矿,但白铅矿非常罕见,说明方铅矿在本区仅经历了氧化作用的初期阶段。

该区闪锌矿主要存在于矿脉的地下部分,地表较少,一般呈粒状产出,呈浸染状散布于其他矿物之间,有时呈致密集合体产出,闪锌矿晶体仅见于个别晶洞中,呈四面体与立方体的聚形产出^[14]。粒径一般 $0.1\sim 2.0\text{ mm}$,最大可达 2 cm 左右。晶体一般南部较细,而矿区北部则较为粗大。其具有多种颜色之变种,地下的闪锌矿颜色较深,为深—黑棕色,地表多为灰色,研究区北部则呈松脂黄色、绿黄色或灰黄色。

该区黄铁矿分布较广,呈半自形粒状,且大多存在于方铅矿矿石中或浸染于围岩,偶见于石英晶洞中。黄铜矿分布在矿区南部,尤其在黄土岗区段的岩石中;黄铜矿含量较高,大多呈他形粒状填充于某一矿物之间,或呈浸染状散布于闪锌矿矿物的晶体中。地表黄铜矿易氧化,生成孔雀石、铜蓝或褐铁矿^[18]。

3.3 控矿构造特征

研究区最大的控矿构造为乌龙沟—上黄旗深大断裂,宽 1 km ,走向为NE向 35° 。该断裂由 F_1 、 F_2 两条主干断裂组成(图2),走向NNE,倾向SE,倾角 $70^\circ\sim 80^\circ$,为左行扭动正断层,水平断距约 1.5 km 。控矿断裂沿走向及倾向均是舒缓波状。在断裂的下盘常发生和矿脉倾向相反的楔形张裂隙。不同产状的矿脉厚度表明,呈舒缓波状变化的矿脉,倾角变陡处的矿脉厚度变大。列巴沟和库状石区段控矿断裂为 $3\sim 5\text{ m}$ 宽的矿化破碎带,破碎带主要由构造角砾岩组成,构造角砾棱角明显,排列无序,矿体大多位于破碎带上盘附近,呈细脉状、树枝状分布;黄安和黄土岗区段控矿断裂地表为 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 宽的矿化破碎带,破碎带构造片理发育,其上盘常见 $1\sim 3\text{ cm}$ 的断层泥,断层泥下部形成浸染状或薄脉状矿体, $5\sim 15\text{ cm}$,矿体以板状、透镜状贯入为主。

3.3.1 大断层

研究区两个大断层是黄安—小庄大断裂与小安河—西坡大断裂,二者相距 1 km ,全长约 50 km ,两大断层的基本特征相似,均直交切穿岩浆岩与白云

岩的接触带。大断层与矿脉平行,受次级断层裂隙的严格控制,大部分有工业意义的矿脉均发育于大断层下盘 $300\sim 1\,000\text{ m}$ 的白云岩中,如黄土岗区段与库状石区段的良好矿化。由库状石区段向西,距离大断层越远矿化越微弱。发育于大断层上盘或者两大断层之间的矿脉,形状不甚规则,规模较小,且分布零星。

3.3.2 次级断层

与大断层有成因联系或者与大断层平行且呈NNE及SN向的平移正断层、平移逆断层直接控制矿脉的分布,而单纯的正断层与逆断层矿化和蚀变极微弱。矿脉的延伸、矿脉的规模以及矿脉的产状也随着断层的规模产状的变化而变化。形成于矿化后的NW向断层对矿脉起着破坏作用,少数成矿前的断层矿化很微弱,不形成矿脉。

3.4 围岩蚀变

连巴岭铅锌矿区围岩蚀变种类较多,并且不同方位、不同岩石又具有不同的蚀变类型和蚀变组合。目前已知者有矽卡岩化、蛇纹石化、大理岩化、硅化、滑石化、碳酸盐化、绢云母化、磁铁矿化、绿泥石化,绿帘石化,黄铁矿化、重晶石化等^[14-16]。

矽卡岩化广泛发育于中部的岩体与白云岩接触带处,往往沿循裂隙发育,岩体内的白云岩捕虏体大多为矽卡岩化,并伴随有镜铁矿、磁铁矿化等。矽卡岩化的大理岩一般呈条带状,白色条带钙质含量较高,灰黑色条带泥质含量较高[图4(a)]。滑石化常见于交代矿体部分,呈团块状分布于矿体中或在矿体与白云岩的交界处^[15]。重晶石化常与矽化伴生,

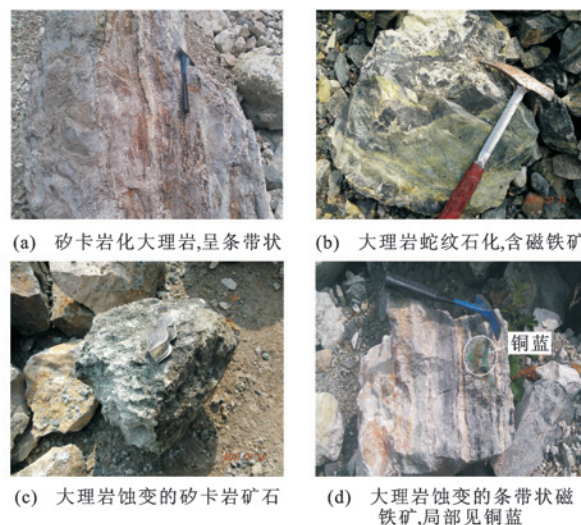


图4 连巴岭铅锌矿矿石围岩蚀变照片

Fig. 4 Ore Wall-rock Alteration Photos from Lianbaling Pb-Zn Deposit

在重金石化、矽卡岩化作用同时出现的地段,铅锌矿物较多集中于重金石化部分。

大理岩化、蛇纹石化一般发育于远离接触带内的白云岩中,有的大理岩蛇纹石化,并含有磁铁矿[图 4(b)],有的大理岩蚀变成矽卡岩矿石[图 4(c)],有的大理岩经热液蚀变形成条带状磁铁矿,并在磁铁矿化处见到蓝绿色铜蓝[图 4(d)]。硅化、碳酸盐化、黄铁矿化等金属矿化广泛发育于破碎带内。

硅化是本区分布最广的一种蚀变,呈灰色—灰白色,主要由他形粒状石英组成,分布在铅锌矿体边缘,与成矿关系密切。硅化发育的地方往往可以形成较大规模的铅锌矿体。

4 矿床成因

4.1 成矿物质来源

4.1.1 硫同位素

研究区 14 件硫化物同位素组成分析结果表明,硫具有 3 种不同的硫同位素组成($\delta(^{34}\text{S})$)储库。幔源硫 $\delta(^{34}\text{S})$ 值约为 0.3×10^{-3} ,海水硫 $\delta(^{34}\text{S})$ 值为 20×10^{-3} ,具有负 $\delta(^{34}\text{S})$ 值的强还原沉积硫。

研究区主要硫化物的硫同位素组成见表 2,其中有 4 件是在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成,有 14 件是引用文献[1](表 2)。由表 2 可以看出, $\delta(^{34}\text{S})$ 值为 $(-2.7 \sim 6.9) \times 10^{-3}$,集中于 $(-1 \sim 3) \times 10^{-3}$,平均值为 1.1×10^{-3} ,地幔或岩浆的 $\delta(^{34}\text{S})$ 值一般为 $(0 \sim 2) \times 10^{-3}$,与地幔硫接近。 $\delta(^{34}\text{S})$ 值频率直方图呈塔式分布(图 5),表明其深源岩浆硫特点^[19-22]。

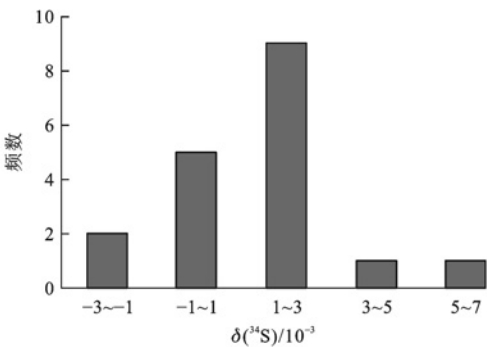


图 5 连巴岭铅锌矿床硫同位素组成直方图
Fig. 5 Histogram of S Isotopic Composition in Lianbaling Pb-Zn Deposit

4.1.2 铅同位素

5 件方铅矿样品铅同位素(在核工业北京地质研究院分析测试研究中心测试,仪器型号为 ISO-PROBE-T 热电离质谱仪,检测方法和依据为 GB/

T 17672—1999 国家标准)分析结果见表 3,并投影到 Barnes 等的 Pb 演化模式曲线上(图 6)。

表 2 硫同位素组成

Tab. 2 S Isotopic Compositions

| 位置 | 采样位置(样品号) | 样品名称 | $\delta(^{34}\text{S})/10^{-3}$ | 资料来源 |
|-------|-----------|------|---------------------------------|-------|
| 黄土岗矿段 | 203 脉 | 黄铜矿 | 1.7 | 文献[1] |
| | 203 脉 | 黄铁矿 | 1.9 | |
| | 203 脉 | 闪锌矿 | 0.3 | |
| | 203 脉 | 黄铁矿 | 1.1 | |
| | 205 脉 | 闪锌矿 | 1.5 | |
| | LY066-12 | 方铅矿 | 0.6 | 本文 |
| | LY066-14 | 黄铁矿 | 0.9 | |
| | LY075-6 | 黄铜矿 | 1.0 | |
| | LY075-7 | 黄铜矿 | -0.1 | |
| 黄安矿段 | 101 脉 | 黄铁矿 | 2.5 | 文献[1] |
| 南款矿段 | 531 脉 | 方铅矿 | -2.7 | |
| 列巴沟矿段 | 301 脉 | 闪锌矿 | 1.4 | |
| | 301 脉 | 闪锌矿 | 2.9 | |
| | 301 脉 | 方铅矿 | -1.3 | |
| | 301 脉 | 黄铁矿 | 2.6 | |
| | 似层状矿体 | 方铅矿 | -0.8 | |
| 外围 | 铅锌矿脉 | 方铅矿 | 3.6 | |
| | 铅锌矿脉 | 闪锌矿 | 6.9 | |

注: $\delta(^{34}\text{S})$ 值是参考国际硫同位素标准 V-CDT 得来的。

矿床铅同位素组成(表 3)在构造环境分区图上均投影于下地壳区范围,其在铅同位素演化曲线图上位于下地壳与造山带铅演化线之间。这表明成矿物质主要来源于上地幔—下地壳,与硫同位素信息协调一致^[23-26]。

表 3 Pb 同位素测试结果

Tab. 3 Results of Pb Isotope

| 样品号 | 样品名称 | $N(^{208}\text{Pb})/$ $N(^{204}\text{Pb})$ | $N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{204}\text{Pb})$ | $N(^{206}\text{Pb})/$ $N(^{204}\text{Pb})$ |
|----------|------|---|---|---|
| LY066-12 | 方铅矿 | 36.335 ± 0.004 | 15.231 ± 0.002 | 16.192 ± 0.002 |
| LY066-3 | 方铅矿 | 36.419 ± 0.007 | 15.176 ± 0.003 | 16.317 ± 0.003 |
| LY066-6 | 方铅矿 | 36.686 ± 0.007 | 15.264 ± 0.003 | 16.368 ± 0.003 |
| LY066-9 | 方铅矿 | 37.022 ± 0.007 | 15.351 ± 0.003 | 16.936 ± 0.003 |
| LY067-9 | 方铅矿 | 36.443 ± 0.003 | 15.199 ± 0.001 | 16.227 ± 0.001 |

注: $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值, $N(\cdot)$ 为该元素的原子丰度。

通过 S-Pb 同位素对比认为,成矿物质具有多源性,以岩浆来源为主,部分来自地层。由图 6 可以确定成矿物质主要来源于上地幔—下地壳物质部分熔融形成的岩浆^[27-30]。

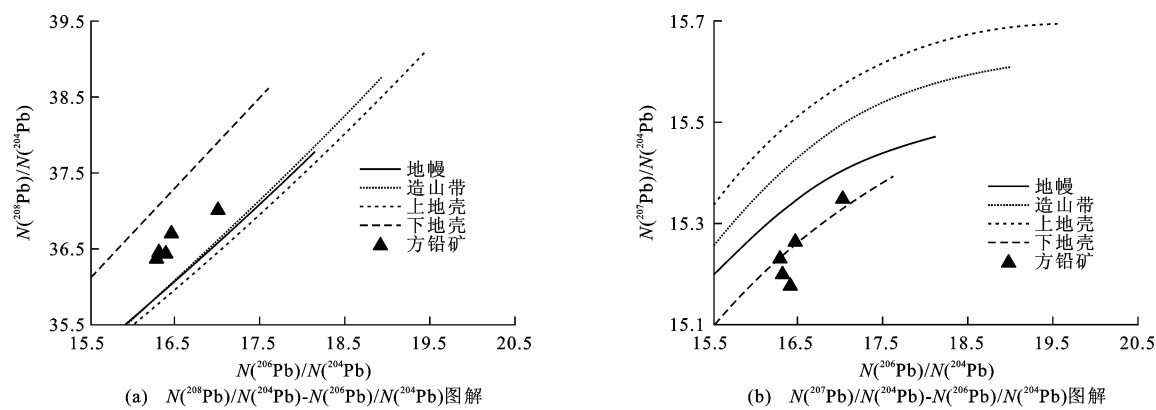


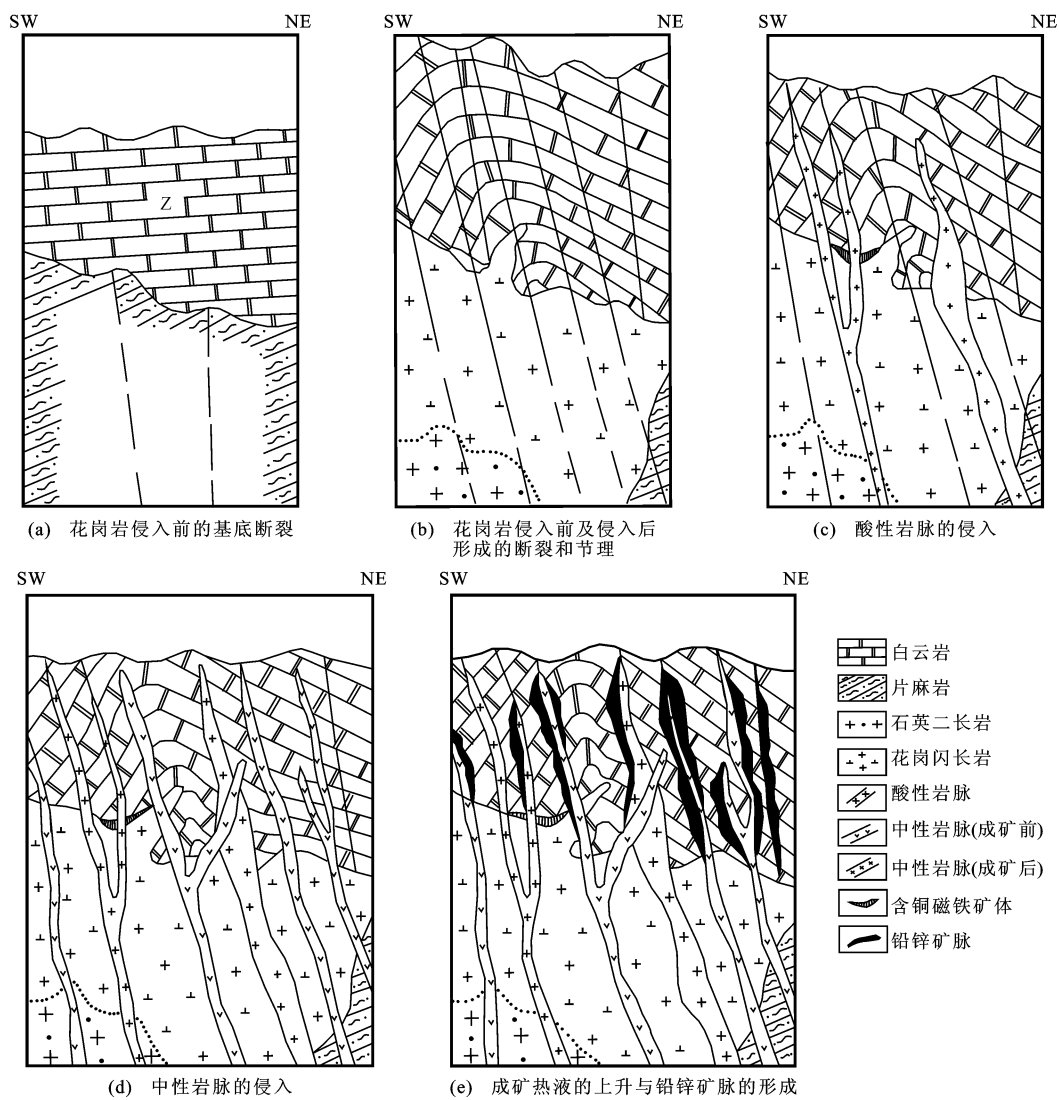
图 6 Pb 同位素结构图解

Fig. 6 Diagrams of Pb Isotope Structure

4.2 成矿模式

在深入探讨连巴岭铅锌矿床成矿物质来源的基础上^[31],建立成矿模式(图 7)。

岩层受多种构造应力的影响而发生变形和破



图件引自文献[6]

图 7 连巴岭铅锌矿床成矿模式

Fig. 7 Metallogenetic Model of Lianbaling Pb-Zn Deposit

裂,形成开阔平缓的背斜向斜和大断裂;中生代燕山运动引起次一级的褶曲断裂和节理,使地壳变得更加虚弱;基底的王安镇岩体发生断裂,花岗岩体乘机侵入并在侵入过程中分离出含矿物质,在同化围岩过程中吸取一些有用矿物组分以及岩浆水与大气水,在长距离运移过程中经混合形成含矿热液;然后,酸性、中性、基性岩脉侵入,在这一侵入的先后过程中,愈靠近接触带,愈向中性过渡,且结构变细,暗色矿物增加^[32]。由于颗粒细小,近于致密,渗透性差的中性岩脉起到屏蔽、遮挡作用,使得含矿热液与白云岩发生交代作用而聚集堆积形成矿体。岩脉与矿脉属于邻生关系,而且脉岩在这期间并没有发生矿化,因此,脉岩对矿化并没有控制作用,只是为含矿热液的上升提供了良好的通道。成矿物质主要来源于上地幔—下地壳物质部分熔融形成的岩浆^[33-34],赋矿地层为变质基底和碳酸盐岩,储矿部位是乌龙沟断裂束的次级断裂带。

5 结 语

(1)研究区处于燕山准地槽与山西地台的过渡地带,吕梁运动以来,其岩层因受到多种构造应力的影响而发生变形和破裂,形成开阔平缓的背斜向斜和大断裂(如紫荆关大断裂);中生代燕山运动引起次一级的褶曲断裂和节理,使地壳变得更加虚弱;基底的王安镇岩体发生断裂,花岗岩体乘机侵入;然后,酸性、中性、基性岩脉侵入,由于颗粒细小,近于致密,渗透性差的中性岩脉起到屏蔽、遮挡作用,使得含矿热液与白云岩发生交代作用而聚集堆积形成矿体。

(2)通过 S-Pb 同位素对比,从硫同位素组成直方图和铅同位素结构图解中可以看出,花岗岩是主要的成矿母岩,成矿物质具有壳幔混合特点,并来源于上地幔—下地壳物质部分熔融形成的岩浆。

参考文献:

References:

- [1] 马国玺. 河北省涞源县连巴岭铅锌矿地质特征及找矿方向[J]. 河北地质矿产信息, 1999(2): 10-17.
MA Guo-xi. Geological Characteristics and Prospecting Direction of Lianbaling Lead-zinc Deposit in Laiyuan County, Hebei Province[J]. Hebei Geological Mineral Information, 1999(2): 10-17.
- [2] 胡亚军, 王建平. 连巴岭铅锌矿田地质特征及找矿方向[J]. 河北地质矿产信息, 2003(1): 6-8.
HU Ya-jun, WANG Jian-ping. Geological Characteristics and Prospecting Direction of Lianbaling Lead-zinc Ore Field[J]. Hebei Geological Mineral Information, 2003(1): 6-8.
- [3] 郭长华, 刘志明, 陆树文, 等. 河北省涞源县连巴岭—东团堡地区金—多金属矿地质特征及找矿方向[J]. 地质找矿论丛, 2010, 25(2): 112-117.
GUO Chang-hua, LIU Zhi-ming, LU Shu-wen, et al. The Geological Feature and Prospecting Direction of the Gold Polymetallic Deposits in the Lianbaling-Dongtuanbu Area of Laiyuan County, Hebei Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2010, 25(2): 112-117.
- [4] 高永丰, 魏瑞华, 侯增谦, 等. 木吉村斑岩铜矿成矿作用: 华北克拉通中生代岩石圈减薄的响应[J]. 矿床地质, 2011, 30(5): 890-902.
GAO Yong-feng, WEI Rui-hua, HOU Zeng-qian, et al. Mujicun Porphyry Copper Mineralization: Response to Mesozoic Thinning of Lithosphere in North China Craton[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(5): 890-902.
- [5] 张 强, 张 晓, 朱凤丽, 等. 河北省涞水县安妥岭铜矿床地质特征及成因探讨[J]. 地质调查与研究, 2009, 32(1): 34-40.
ZHANG Qiang, ZHANG Xiao, ZHU Feng-li, et al. Geological Characters and Genesis of the Antuoling Molybdenum Deposit in Laishui, Hebei Province[J]. Geological Survey and Research, 2009, 32(1): 34-40.
- [6] 范成模, 陈守源. 河北省涞源县连巴岭铅锌矿初步勘探报告[R]. 天津: 地质矿产部天津地质矿产研究所, 1991.
FAN Cheng-mo, CHEN Shou-yuan. Preliminary Prospecting Report for Lianbaling Lead-zinc Deposit in Laiyuan County of Hebei Province[R]. Tianjin: Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources of Ministry of Geology and Mineral Resources, 1991.
- [7] 刘凤山, 石准立. 太行山—燕山地区中生代花岗岩生成动力学机制与陆内造山作用[J]. 地球学报, 1998, 19(1): 13-18.
LIU Feng-shan, SHI Zhun-li. Dynamic Mechanism About Generation of Mesozoic Granites in Taihangshan-Yanshan Area and Intracontinental Orogeny[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1998, 19(1): 13-18.
- [8] 陈 斌, 刘超群, 田 伟. 太行山中生代岩浆作用过程中的壳幔岩浆混合作用: 岩石学和地球化学证据[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 140-147.
CHEN Bin, LIU Chao-qun, TIAN Wei. Magma-mixing Between Mantle- and Crustal-derived Melts in the Process of Mesozoic Magmatism, Taihangshan: Constraints from Petrology and Geochemistry[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 140-147.

- [9] 罗照华,邓晋福,赵国春,等. 太行山造山带岩浆活动特征及其造山过程反演[J]. 地球科学,1997,22(3):279-284.
LUO Zhao-hua, DENG Jin-fu, ZHAO Guo-chun, et al. Characteristics of Magmatic Activities and Orogenic Process of Taihangshan Intraplate Orogen[J]. Earth Science, 1997, 22(3): 279-284.
- [10] 汤中立. 超大型 Ni-Cu(Pt) 岩浆矿床的划分与找矿[J]. 地质与勘探, 2002, 38(3): 1-7.
TANG Zhong-li. Dividing and Prospecting for Super-large Scale Ni-Cu(Pt) Magmatic Sulfide Deposits[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(3): 1-7.
- [11] 刘凤山,石准立. 太行山—燕山造山带与中生代花岗岩有关的金属矿床成矿系列特征[J]. 矿床地质, 1998, 17(3): 193-203.
LIU Feng-shan, SHI Zhun-li. Minerogenic Series of Metallic Deposits Related to Mesozoic Granites in the Taihangshan-Yanshan Orogenic Belt and Their Characteristics[J]. Mineral Deposits, 1998, 17(3): 193-203.
- [12] 董存杰,陈仁义,赵金才,等. 辽宁省海城市小孤山铅锌多金属矿集区成矿地质特征及成因分析[J]. 地质与勘探, 2010, 46(4): 599-608.
DONG Cun-jie, CHEN Ren-yi, ZHAO Jin-cai, et al. Metallogenic Geological Characteristics and Analysis of the Xiaogushan Polymetallic Mineralization Area in Haicheng City, Liaoning Province[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(4): 599-608.
- [13] 雷良奇,宋慈安,冯佐海. 佛子冲火山岩区隐伏铅锌矿床的类型归属及成矿远景[J]. 地质与勘探, 2002, 38(1): 9-14.
LEI Liang-qi, SONG Ci-an, FENG Zuo-hai. The Types of Hidden Lead-zinc Deposits and the Exploration Prospect in the Volcanic Cover Terrain of Fuzichong Belt, Southeastern Guangxi, China[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(1): 9-14.
- [14] 王方成,刘伯崇,蔡晓菊. 甘肃掉石沟铅锌矿床特征及找矿思路[J]. 地质与勘探, 2010, 46(5): 836-843.
WANG Fang-cheng, LIU Bo-chong, CAI Xiao-ju. Deposit Characteristics and Ore-search Ideas of the Diaoshigou Lead-zinc Deposit in Gansu Province[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(5): 836-843.
- [15] 任鹏,梁婷,牛亮,等. 陕西秦岭铅锌矿床的地质特征及成矿动力学过程[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(1): 34-47.
REN Peng, LIANG Ting, NIU Liang, et al. Geological Characteristic and Geodynamic Process from Pb-Zn Deposit in Qinling of Shaanxi[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(1): 34-47.
- [16] 辛存林,都卫东,张育平,等. 西藏洞中松多铅锌多金属矿床地质特征及成因[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2013, 49(1): 24-31.
XIN Cun-lin, DOU Wei-dong, ZHANG Yu-ping, et al. A Preliminary Study of the Geologic Characteristics and Genesis of the Dongzhongsongduo Lead-zinc Polymetallic Deposit, Tibet[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2013, 49(1): 24-31.
- [17] 周利敏,张德会. 太行山北段王安镇—大河南岩体岩石地球化学特征及成因与成矿关系探讨[J]. 矿床地质, 2006, 25(增): 391-394.
ZHOU Li-min, ZHANG De-hui. Petrological and Geochemical Characteristics of the Wanganzhen-Dahenan Complex in the Northern Part of Taihang Mountains with Reference to Its Petrogenesis and Mineralization[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(S): 391-394.
- [18] 戴绍杰,吕向志,肖红梅. 湖北花椒树坪锌矿床主要矿石矿物特征研究[J]. 资源环境与工程, 2010, 24(6): 659-664.
DAI Shao-jie, LU Xiang-zhi, XIAO Hong-mei. Study on Main Ore Mineral Characteristics About Huajiaoshuping Zinc Deposits, Hubei Province[J]. Resources Environment and Engineering, 2010, 24(6): 659-664.
- [19] 张乾,邵树勋,刘家军,等. 兰坪盆地大型矿集区多金属矿床的铅同位素组成及铅的来源[J]. 矿物学报, 2002, 22(2): 147-154.
ZHANG Qian, SHAO Shu-xun, LIU Jia-jun, et al. Lead Isotopic Composition and Lead Source of Polymetallic Deposits in the Large Ore-assembly District in the Lanping Basin[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2002, 22(2): 147-154.
- [20] 金中国,张伦尉,叶静. 黔西北地区铅锌矿床成矿物质来源探讨[J]. 地质与勘探, 2007, 43(6): 32-35.
JIN Zhong-guo, ZHANG Lun-wei, YE Jing. Ore-forming Materials Source of Lead-zinc Deposits in the Northwest Guizhou[J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(6): 32-35.
- [21] 易慧,徐素云. 铜山岭矿田庵堂岭铅锌矿床地球化学特征分析[J]. 地质与勘探, 2006, 42(4): 20-24.
YI Hui, XU Su-yun. Geochemical Characteristics of Antangling Lead-zinc Deposit in the Tongshanling Orefield[J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(4): 20-24.
- [22] 张海东,刘建朝,陈正乐,等. 山西平顺地区矽卡岩型铁矿床地质特征及成矿物质来源探讨[J]. 地质与勘探, 2010, 46(4): 634-642.
ZHANG Hai-dong, LIU Jian-chao, CHEN Zheng-le, et al. Geological Characteristics of Skarn Iron Deposit and Their Mineralization Material Source in the Pingshun

- Area, Shanxi Province [J]. *Geology and Exploration*, 2010, 46(4): 634-642.
- [23] 张舒, 张招崇, 黄河, 等. 南天山沙里塔什铅锌矿床地质特征及 S、Pb 同位素特征研究[J]. *现代地质*, 2010, 24(5): 856-865.
- ZHANG Shu, ZHANG Zhao-chong, HUANG He, et al. *Geologic Characteristics, Sulfur and Lead Isotope Study of the Shalitashi Lead-zinc Deposit, Southern Tianshan*[J]. *Geoscience*, 2010, 24(5): 856-865.
- [24] 祝新友, 王莉娟, 朱谷昌, 等. 锡铁山 SEDEX 铅锌矿床成矿物质来源研究——铅同位素地球化学证据[J]. *中国地质*, 2010, 37(6): 1682-1689.
- ZHU Xin-you, WANG Li-juan, ZHU Gu-chang, et al. *The Genesis of the Xitieshan SEDEX Lead-zinc Deposit in Qinghai Province—Lead Isotope Evidence*[J]. *Geology in China*, 2010, 37(6): 1682-1689.
- [25] 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 Ting-ting, TANG Ju-xing, LIU Hong-fei, 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.
- [26] 肖宪国, 黄智龙, 周家喜, 等. 黔西北篁箕湾铅锌矿床成矿物质来源: Pb 同位素证据[J]. *矿物学报*, 2012, 32(2): 294-299.
- XIAO Xian-guo, HUANG Zhi-long, ZHOU Jia-xi, et al. *Source of Metallogenic Materials in the Shaojiwan Pb-Zn Deposit in Northwest Guizhou Province, China: An Evidence from Pb Isotopic Composition*[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2012, 32(2): 294-299.
- [27] 费光春, 多吉, 温春齐, 等. 西藏洞中拉铅锌矿床 S、Pb、Sr 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. *矿物岩石*, 2011, 31(4): 52-57.
- FEI Guang-chun, DUO Ji, WEN Chun-qi, et al. *S, Pb and Sr Isotopic Compositions for Tracing Sources of Ore-forming Materials in Dongzhongla Lead-zinc Deposit in Tibet*[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2011, 31(4): 52-57.
- [28] 沈能平, 苏文超, 符亚洲, 等. 贵州独山巴年锑矿床硫、铅同位素特征及其对成矿物质来源的指示[J]. *矿物学报*, 2013, 33(3): 271-277.
- SHEN Neng-ping, SU Wen-chao, FU Ya-zhou, et al. *Characteristics of Sulfur and Lead Isotopes for Banian Antimony Deposit in Dushan Area, Guizhou Province, China: Implication for Origin of Ore-forming Materials*[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2013, 33(3): 271-277.
- [29] 韩凤彬, 陈正乐, 刘增仁, 等. 塔里木盆地西北缘乌恰地区乌拉根铅锌矿床 S-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 2012, 31(5): 783-793.
- HAN Feng-bin, CHEN Zheng-le, LIU Zeng-ren, et al. *Sulfur-lead Isotopic Composition of the Wulagen Pb-Zn Deposit in the Northwestern Margin of the Tarim Basin, Wujia Area, Xinjiang and Its Geological Implications*[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(5): 783-793.
- [30] 闫国强, 钟康惠, 白景国, 等. 西藏洞中拉铅锌矿床 S、Pb 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. *甘肃地质*, 2011, 20(2): 35-39.
- YAN Guo-qiang, ZHONG Kang-hui, BAI Jing-guo, et al. *Sulfur and Lead Isotope Composition Tracing for the Sources of Ore-forming Material in Dongzhongla Pb-Zn Deposit, Tibet*[J]. *Gansu Geology*, 2011, 20(2): 35-39.
- [31] 付王伟, 许德如, 傅杨荣, 等. 海南省后万岭铅锌矿床控矿因素、矿床成因及成矿模式探讨[J]. *矿床地质*, 2012, 31(6): 1211-1226.
- FU Wang-wei, XU De-ru, FU Yang-rong, et al. *A Tentative Discussion on Ore-controlling Factors, Ore Genesis and Metallogenic Model of Houwanling Pb-Zn Deposit in Hainan Province*[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(6): 1211-1226.
- [32] 高辉, HRONSKY J, 曹殿华, 等. 金川铜镍矿床成矿模式、控矿因素分析与找矿[J]. *地质与勘探*, 2009, 45(3): 218-228.
- GAO Hui, HRONSKY J, CAO Dian-hua, et al. *An Analysis on Metallogenic Model and Ore-control Factors of Jinchuan Cu-Ni (PGE) Magmatic Sulfide Deposit and Its Exploration Implications*[J]. *Geology and Exploration*, 2009, 45(3): 218-228.
- [33] 牛树银, 孙爱群, 王宝德, 等. 太行山北段阜平幔枝构造成矿作用研究[J]. *前寒武纪研究进展*, 2002, 25(3/4): 221-232.
- NIU Shu-yin, SUN Ai-qun, WANG Bao-de, et al. *Mineralization of Fuping Mantle Branch Structures in the North Section of Taihangshan Mountain*[J]. *Progress in Precambrian Research*, 2002, 25(3/4): 221-232.
- [34] 吴继莲, 刘建朝, 门文辉, 等. 河北涞源连巴岭铅锌矿床地质特征及成矿模式[J]. *西北地质*, 2012, 45(增): 163-166.
- WU Ji-lian, LIU Jian-chao, MEN Wen-hui, et al. *Geological Characteristics of Lead-zinc Deposit and Their Metallogenic Model in Lianbaling, Laiyuan County, Hebei Province*[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(S): 163-166.