



豫西骆驼山多金属硫铁矿床硫化物 Rb-Sr 等时线 年龄及其地质意义*

杨晨英¹, 叶会寿^{2*}, 向君峰², 陈小丹², 邢波¹, 李亮³, 王赛¹

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要 豫西骆驼山多金属硫铁矿床位于华北陆块南缘南泥湖矿田西北侧。为确定该矿床的形成时代, 文章选取了8件硫化物矿物样品, 采用 Rb-Sr 等时线定年方法测定成矿年龄。结果获得, 闪锌矿+磁黄铁矿+方铅矿等时线年龄为(137.3±2.6) Ma, 闪锌矿+方铅矿等时线年龄为(138.2±5.8) Ma, 闪锌矿+磁黄铁矿等时线年龄为(137±3) Ma, 磁黄铁矿+方铅矿等时线年龄为(137.1±2.7) Ma, 方铅矿等时线年龄为(138.4±7.6) Ma, 磁黄铁矿等时线年龄为(137.2±3.7) Ma。上述定年结果表明, 骆驼山多金属硫铁矿床的成矿时代为 137 Ma 左右, 属早白垩世。硫化物 Sr 同位素初始比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 介于 0.713 23~0.713 32, 平均值为 0.713 25, 小于陆源硅酸盐 Sr 的初始值 0.7190, 而高于地幔 Sr 的初始值 0.7040, 表明成矿物质来源于壳幔混合。骆驼山多金属硫铁矿床与矿田内的南泥湖-三道庄斑岩-矽卡岩(钨)矿床、冷水北沟铅锌矿成矿时代基本一致, 是同一构造-岩浆-流体成矿活动的产物。结合前人对华北陆块南缘中生代期间地球动力学背景研究成果, 笔者认为骆驼山矿床是中国东部中生代构造体制大转折过程晚期的产物。

关键词 地球化学; Rb-Sr 等时线年龄; 成矿时代; 闪锌矿; 骆驼山多金属硫铁矿床; 豫西
中图分类号 P618.31 **文献标志码** A

Rb-Sr isochron age of sulfide minerals in Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit of western Henan Province and its geological significance

YANG ChenYing¹, YE HuiShou², XIANG JunFeng², CHEN XiaoDan², XING Bo¹,
LI Liang³ and WANG Sai¹

(1 School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3 College of Land Resources Engineering, Kunming University of Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract

The Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit lies on the northwestern side of the Nannihu orefield which is located on the southern margin of the North China craton. In order to determine the metallogenic age of the deposit, the authors chose eight sulfide mineral samples to determine the metallogenic age by using the Rb-Sr isochron dating method. The result shows that the isochron age of sphalerite + pyrrhotite + galena, sphalerite +

* 本文得到国家科技支撑计划项目(编号 2011BAB04B06)、国家自然科学基金(编号 41303233、41403041)和国土资源部公益性行业基金(编号 200911007-08)联合资助

第一作者简介 杨晨英,女,1988年生,硕士研究生,地质工程专业。Email: yangchenying.ok@163.com

** 通讯作者 叶会寿,男,1964年生,研究员,长期从事矿床研究和勘查评价工作。Email: yehuishou@163.com

收稿日期 2015-06-12; 改回日期 2016-02-19。苏杭编辑。

galena, sphalerite + pyrrhotite, pyrrhotite + galena, sphalerite and pyrrhotite are (137.3 ± 2.6) Ma, (138.2 ± 5.8) Ma, (137 ± 3) Ma, (137.1 ± 2.7) Ma, (138.4 ± 7.6) Ma and (137.2 ± 3.7) Ma, respectively. These dating results indicate that the metallogenic age of the Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit is about 137 Ma, suggesting Early Cretaceous. The $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ of sulfides range from 0.713 23 to 0.713 32, with an average of 0.713 25, lower than the $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ratio of the terrigenous silicates (0.7190) and higher than that of the mantle (0.7040), implying that the ore-forming materials were derived from the crust-mantle mixture. The Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit has basically the same metallogenic age as the Nannihu-Sandaozhuang porphyry-skarn molybdenum (tungsten) deposit and the Lengshuibeiyou lead-zinc deposit. They are the products of the same structure-magma-ore-forming-fluid activities. Combined with the previous studies of the geodynamic settings of the East Qinling orogenic belt during the Mesozoic period, it is held that the Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit is the product of great transition period of late Mesozoic tectonic regime in eastern China.

Key words: geochemistry, Rb-Sr isochron age, metallogenic age, sphalerite, Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit, western Henan Province

骆驼山多金属硫铁矿床在大地构造上位于华北陆块南缘台缘褶皱带内(图 1a) 栾川钼多金属矿集区北部。该矿集区内矿产丰富,有南泥湖-三道庄斑岩-矽卡岩型钼(钨)矿床、上房沟斑岩-矽卡岩型钼(铁)矿床和马圈斑岩型钼矿床等,此外还有骆驼山、银和沟、鱼库等矽卡岩型多金属硫铁矿床或矿点,以及冷水北沟、银洞沟、杨树凹等热液脉型铅锌银矿床(图 1b)。其中,骆驼山矿床位于河南省栾川县冷水镇($111^{\circ}28'01.8''\text{E} \sim 111^{\circ}28'36.7''\text{E}$, $33^{\circ}55'00.7''\text{N} \sim 33^{\circ}55'41.0''\text{N}$)是一个以硫为主,并伴有 Zn、Cu、W、Be、Pb、萤石等多种组分的中型硫多金属矿床(河南省地质局地质三队,1975)。前人对骆驼山多金属硫铁矿床的研究主要集中在矿床地质特征和矿床成因方面(胡受奚等,1988;燕长海等,2004;吕文德等,2006;叶会寿,2006;王长明等,2007;毛景文等,2009)。有些学者认为,骆驼山矿床属于 SEDEX 型(胡受奚等,1988;燕长海等,2004);而有些学者认为,该矿床是燕山期岩浆热液充填交代形成的(吕文德等,2006;叶会寿,2006;王长明等,2007;毛景文等,2009)。关于矿床的形成时代,骆驼山多金属硫铁矿床位于南泥湖斑岩型钼矿床外围,同时又被冷水北沟北东向铅锌矿脉切穿,推测其成矿时代应属燕山中期末或燕山晚期的早阶段(吕文德等,2005)。骆驼山矿床还存在许多未解决的科学问题,如:矿床成因、成矿年代学、成矿物质来源、成矿流体、成矿作用过程与成矿机理、成矿构造背景等。这些问题不仅直接关系到骆驼山矿床成矿模式的建立和找矿标志的确定,而且关系到与南泥湖矿田其他矿床的成

因联系以及矿床成矿系列的建立。因此,精确的成矿年代学研究是解决以上问题的关键之一。本文在详细研究骆驼山多金属硫铁矿床地质特征的基础上,选取热液硫化物成矿阶段的共生闪锌矿、磁黄铁矿及方铅矿开展 Rb-Sr 同位素测年,尝试获得一组可以相互验证的年龄数据,以便能够精确厘定成矿时代,进而为探索矿床成因、建立成矿模型和确定找矿标志提供科学依据。

1 栾川矿集区地质

栾川矿集区出露的地层包括中元古界官道口群滨海-浅海相碎屑岩和碳酸盐岩,及新元古界栾川群中浅变质的浅海相碎屑岩、碳酸盐岩和粗面岩,因受燕山期中酸性岩侵入的影响形成了广泛的各种角岩和矽卡岩(李永峰等,2005),其中,新元古界陶湾群,主要由大理岩、千枚岩和石英岩组成。矿集区内赋矿岩层主要为新元古界栾川群三川组大理岩、南泥湖组大理岩、片岩及煤窑沟组白云质大理岩。区内褶皱构造近 EW 向为主,主要有杨树凹-白沙洞向斜、银洞沟背斜、增河口向斜、黄背岭-石宝沟背斜、核桃岔向斜等。断裂带主要有近 NWW 向、NNE 向 2 组,其交汇部位控制了燕山期中酸性小侵入体的分布。区内出露的岩浆岩除新元古代辉长岩(830 Ma, Wang et al., 2011)外,燕山期岩浆岩较发育,如南泥湖、上房沟、石宝沟、鱼库、马圈等中酸性岩体,出露面积大多小于 1 km^2 ,为复式岩体,与矿集区内钼钨矿床在时间、空间和成因上都密切相关(叶会寿等,

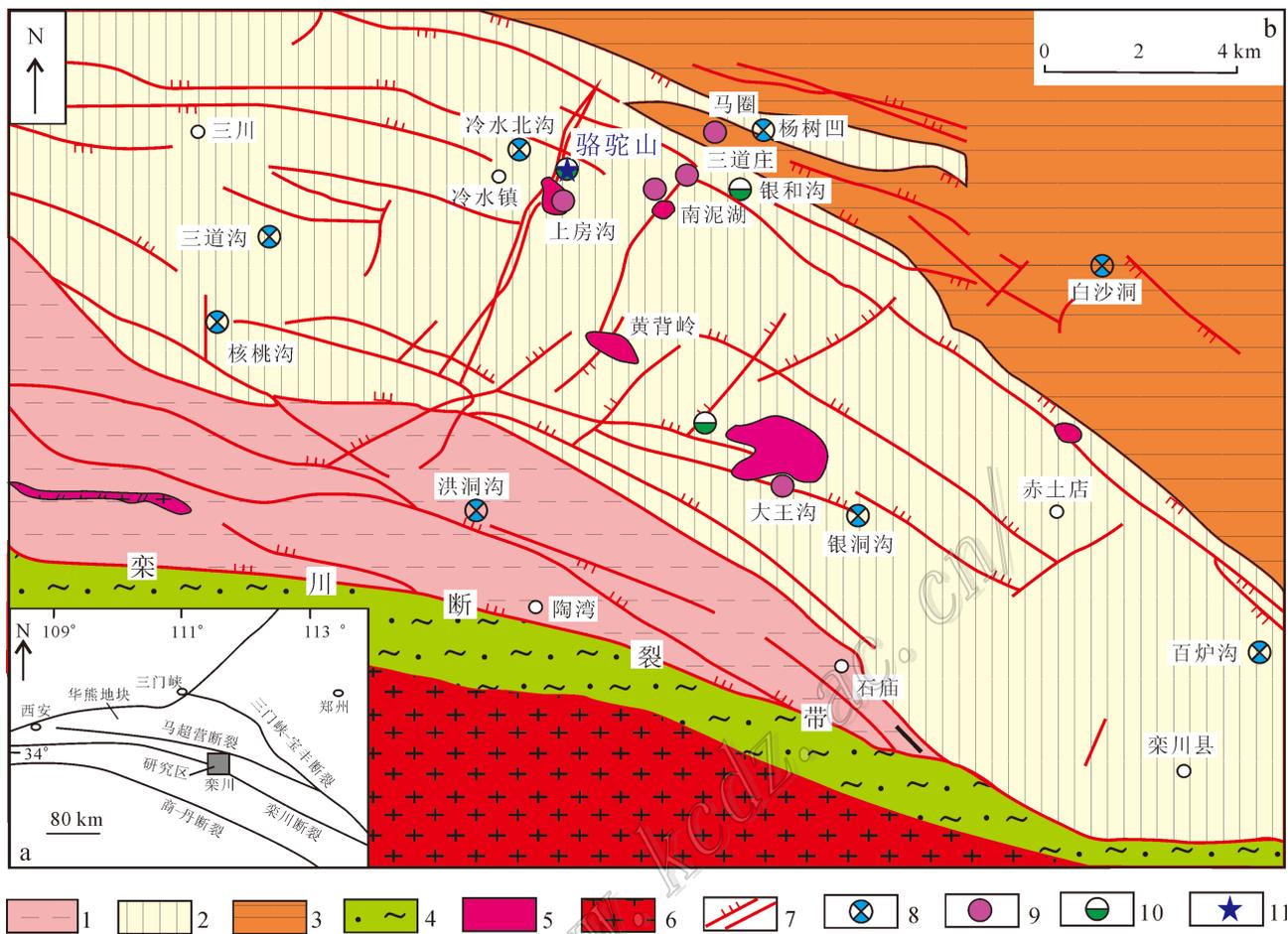


图 1 栾川矿集区地质简图(据叶会寿等, 2006a 修改)

1—新元古界陶湾群碳酸盐岩、碎屑岩；2—新元古界栾川群碎屑岩、碳酸盐岩及粗面岩；3—中元古界官道口群大理岩；4—中元古界宽坪群大理岩及基性火山岩；5—早白垩世花岗岩；6—晚侏罗世花岗岩斑岩；7—断裂；8—脉状铅锌银矿床；9—斑岩-矽卡岩型钼(钨)矿床；10—矽卡岩型多金属硫化物矿床；11—研究位置

Fig. 1 Geological sketch map of the Luanchuan ore concentration area (modified after Ye et al., 2006a)

1—Neoproterozoic Taowan Formation of carbonate rock, clastic rocks; 2—Neoproterozoic Luanchuan Formation of clastic rocks, carbonate rock and trachyte; 3—Middle Proterozoic Guandaokou Formation of marble; 4—Middle Proterozoic Kuanping Formation of marble and basic volcanic rock; 5—Granite of Early Cretaceous; 6—Granite of Late Jurassic; 7—Fracture; 8—Veined lead-zinc deposit; 9—Porphyry-skarn molybdenum (tungsten) deposit; 10—Skarn pyrite deposit; 11—Research position

2006a)。其中,南泥湖岩体呈不规则的椭圆形岩株状产出,地表出露长 450 m,宽 300 m,面积约 0.12 km²,经钻孔揭露,岩体往下逐渐变大,岩体向 290°方向延伸,呈 NW 向侧伏,岩体南西部、西北部缓,倾角 20~40°,南东部、北东部陡,倾角 50~80°,岩性主要为花岗斑岩。向君峰等(2012)对南泥湖含矿岩体进行高精度锆石 U-Pb 测年,获得南泥湖含矿岩体的形成年龄为(146.7±1.2) Ma,属于晚侏罗世的产物。

矿集区内矿床类型多样,叶会寿等(2006a)和毛景文等(2009)研究指出,不同类型矿床之间存在着

联系,以斑岩体为中心,由内向外呈规律分布(图 1)。在斑岩体及其接触带处发育斑岩型或斑岩-矽卡岩型钼(钨)矿床,如南泥湖-三道庄斑岩-矽卡岩型钼(钨)矿床,上房沟斑岩-矽卡岩型钼(铁)矿床和马圈斑岩型钼矿床;远离斑岩体接触带的围岩矽卡岩中,发育矽卡岩型多金属硫化物矿床,如骆驼山、银河沟、鱼库等矿床或矿点;此外,在斑岩体外围的断裂带中,还发育热液脉型铅锌银矿床,如冷水北沟、核桃岔、银洞沟、杨树凹等矿床或矿点。

2 骆驼山多金属硫铁矿床特征

2.1 矿区地质

骆驼山多金属硫铁矿床处于栾川台缘褶皱带火神庙-骆驼山背斜东端南翼。矿区内出露地层主要有中元古界白术沟组与新元古界栾川群(图2),自北向南依次为白术沟组上段炭质千枚岩碳质绢云石英岩夹含碳大理岩;三川组下段含石英细粒的变质砂岩夹千枚岩;三川组上段绢云钙质片岩、云母石英片岩、大理岩及矽卡岩;南泥湖组下段细粒石英岩夹云母片岩;南泥湖组中段绢云石英片岩、黑云石英片岩、二云片岩等,石英千枚岩、碳质千枚岩夹有薄层石英岩,受接触变质作用,强者多变为变斑黑云二云片岩、黑云长英角岩及透辉长英角岩;南泥湖组上段条带状大理岩。

骆驼山背斜出露于矿区中部,为火神庙-骆驼山背斜的东扬起端,轴向北西向,轴面倾伏角 15° 。受断裂构造和燕山期构造运动影响,两翼不对称,为一向南西倾斜的倒转背斜,核部地层为白术沟组上段,南翼为三川组、南泥湖组地层,北翼为南泥湖组地层。南翼总体倾向南西,倾角 $30^{\circ}\sim 58^{\circ}$,北翼总体倾向南西,倾角 38° 左右。

断裂构造可分NWW向、NNE向和NEE向3组。

NWW向层间断裂带:分布于矿区中部,总体走向为 $280^{\circ}\sim 320^{\circ}$,倾向南西,倾角 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。断裂带沿走向长1500 m以上,沿倾向延深800余m,地表出露宽2 m至100 m余。断裂带上盘为三川组上段大理岩,下盘为三川组下段变质砂岩夹千枚岩,带内由破碎大理岩、长英质角岩,矽卡岩化大理岩、矽卡岩和多金属硫铁矿体化矽卡岩组成。该断裂带为矿区的主要控矿构造。

NEE向和NNE向断裂,属成矿后断裂,对矿体稍有破坏。

矿区出露变辉长岩和花岗斑岩脉。其中,变辉长岩主要分布于矿区南部,呈NWW-NW向条带状侵入南泥湖组地层中,岩石呈暗绿色、灰黑色,块状构造,具中粗粒变余辉长结构和辉长辉绿结构,主要矿物为次闪石、钠黝帘石化斜长石,次要矿物为黑云母,副矿物为磷灰石、磁铁矿、榍石等。该类岩石锆石U-Pb年龄为830 Ma(Wang et al., 2011),形成于新元古代。在岩体与围岩接触带形成含矿性差的阳

起石透辉石石榴子石矽卡岩,具黄铁矿化。

花岗斑岩脉:出露于矿区西部,呈岩墙状产出,沿区域性NNE向压扭性断裂侵入。岩石浅肉红色、灰白色,斑状结构,块状构造。斑晶约占30%,粒径 $1\sim 3$ mm,由板状钾长石,斜长石及石英组成,基质为显微花岗结构,由斜长石、钾长石、石英及少量黑云母组成,粒径0.1 mm,副矿物为榍石、磷灰石、锆石等。其侵入时代属燕山期。

2.2 矿体特征

骆驼山多金属硫铁矿床发育3条矽卡岩带,从北往南,分别为I、II、III号矽卡岩带。多金属硫铁矿主要分布于I号矽卡岩带中,其次分布于II、III号矽卡岩带中。矿区探明硫铁矿矿石资源储量757万t,平均品位17.61%,铜资源储量26630 t,平均品位0.375%。三氧化钨资源储量14781 t,平均品位0.217%。锌资源储量191 763 t,平均品位2.5%。铍(氧化铍)资源储量1795 t,平均品位0.0238%。萤石矿石资源储量757万t,平均品位7.739%(河南省地质局地质三队,1975)。

I号矽卡岩带及多金属硫铁矿体 矽卡岩带分布于栾川群三川组下段石英岩、云母石英片岩与上段大理岩之间(图2),受层间破碎带控制。矽卡岩产状基本与地层一致,倾向 $210^{\circ}\sim 240^{\circ}$,倾角 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。矽卡岩长约800 m,厚度2~60 m,沿倾向控制延深约500 m,被NNE向断裂带破坏。多金属硫铁矿体产于矽卡岩中,矿体产状与矽卡岩体产状基本一致。矿体呈似层状或透镜状产出(图3),矿体厚度变化较大,最厚达52 m,最薄仅2.5 m,平均厚度16 m,其厚度与矽卡岩厚度成正比。总体上,多金属硫铁矿体和矽卡岩体严格受层间破碎带控制。

II号矽卡岩带及多金属硫铁矿体:矽卡岩带位于南泥湖组下段石英岩与三川组上段大理岩之间的层间断裂带中。矽卡岩长度约300 m,厚度几米至十余米,矿体规模小,含矿性差。

III号矽卡岩带及多金属硫铁矿体:矽卡岩带主要位于矿区南部南泥湖组中、上段与辉长岩的接触带。矽卡岩长约1000 m,宽10~40 m,走向NW,倾向SW,倾角 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。该矽卡岩中矿体规模较小而零散,含矿性差。

根据矿石的矿物成分,矿物共生组合及矿石结构、构造等特征,可将多金属硫铁矿矿石划分为致密块状磁黄铁矿型矿石、致密块状黄铁矿型矿石、闪锌矿型矿石和矽卡岩型硫铁矿矿石,另可见少量黄铁

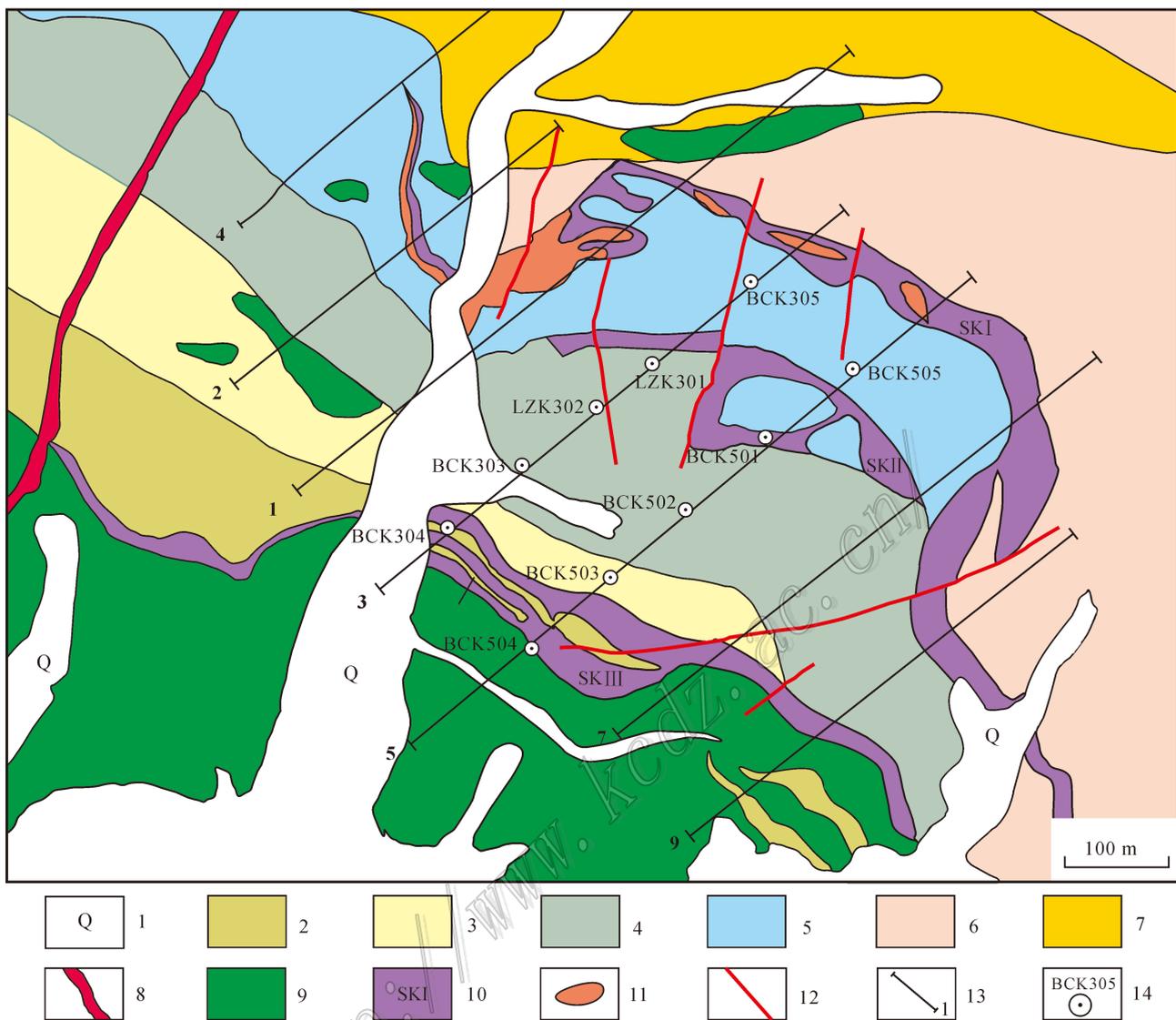


图 2 骆驼山多金属硫铁矿床矿区地质简图(据河南省地质局地质三队修改,1975)

1—第四系沉积物；2—新元古界南泥湖组上段条带状黑云母大理岩；3—新元古界南泥湖组中段角闪岩为主夹石英岩；4—新元古界南泥湖组下段细粒石英岩夹绢云母黑云母片岩；5—新元古界三川组下段含石英细粒的变质砂岩(石英岩)夹千枚岩；6—新元古界三川组上段片岩,大理岩及矽卡岩；7—中元古界白术沟组上段黑色板状炭质千枚岩、炭质绢云石英岩夹含炭大理岩；8—晚侏罗世花岗岩斑岩脉；9—新元古代变辉长岩；10—矽卡岩带；11—硫多金属矿体；12—断层；13—勘探线位置及编号；14—钻孔及编号

Fig. 2 Simplified geological map of the Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit (modified after No. 3 Geological Party of Henan Geological Bureau, 1975)

1—Quaternary sediments; 2—Biotite-marble of Nannihu Formation of Neoproterozoic; 3—Hornfels and quartzite of Nannihu Formation of Neoproterozoic; 4—Quartzite and schist of Nannihu Formation of Neoproterozoic; 5—Fine grained metasandstone (quartzite) and phyllite of Sanchuan Under paragraph Formation of Neoproterozoic; 6—Schist, marble and skarn, metasandstone (quartzite) and phyllite of Sanchuan Upper Formation of Neoproterozoic; 7—Phyllite, sericite quartzite and carbon-bearing marble of Baizhugou Formation of Neoproterozoic; 8—Granite-porphyrty dyke of late Jurassic; 9—Metagabbro of Neoproterozoic; 10—Skarn zones; 11—Sulfur polymetallic orebody; 12—Fault; 13—Exploration line and its serial number; 14—Drill hole and number

矿石英脉型矿石。其中,致密块状磁黄铁矿型矿石、致密块状黄铁矿型矿石为该矿区的主要矿石类型,往往在同一矿体出现,矿体中间为黄铁矿型矿石,呈

团块状、不规则状、透镜状等,向外为磁黄铁矿型矿石,在矿体边缘为矽卡岩型硫铁矿矿石。主要分布在2线、5~7线一带。闪锌矿型矿石和矽卡岩型硫

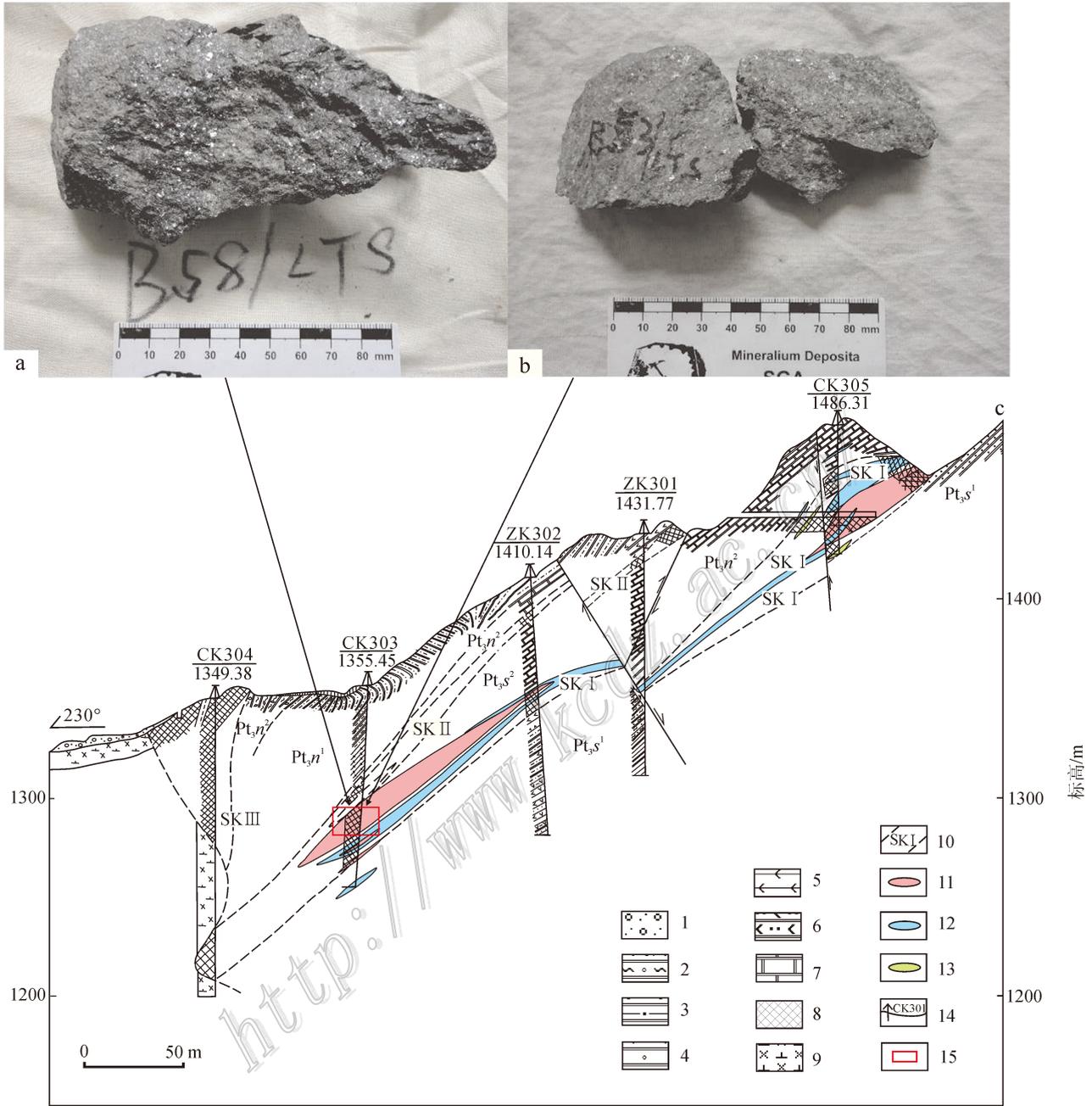


图3 骆驼山多金属硫铁矿矿石照片(a,b)及第3勘探线剖面图(c)(据河南省地质局地质三队修改,1975)
 1—第四系沉积物; 2—绢云母石英片岩; 3—云母石英片岩; 4—石英片岩; 5—透辉石斜长角岩; 6—透辉石石英角岩; 7—大理岩; 8—砂卡岩; 9—V3辉长岩; 10—砂卡岩带; 11—硫多金属矿体; 12—锌矿体; 13—钨矿体; 14—钻孔位置与编号; 15—取样位置

Fig. 3 Photos of ores (a, b) and geological cross section along No. 3 exploration line (c) in the Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit (modified after No. 3 Geological Party of Henan Geological Bureau, 1975)
 1—Quaternary sediments; 2—Sericitic quartz-schist; 3—Mica-quartzose schist; 4—Quartz schist; 5—Diopside plagioclase hornfels; 6—Diopside quartz hornfels; 7—Marble; 8—Skarn; 9—Gabbro of V3; 10—Skarn zones; 11—Sulfur polymetallic orebody; 12—Zinc orebody; 13—Tungsten orebody; 14—Drill hole and its serial number; 15—Sampling location

铁矿矿石可单独出现构成矿体,亦可与其他3种类型矿石同时出现组成矿体,一般单类型矿石的矿体

很少见。通过勘探发现,锌和硫在垂直方向上有相间富集现象,总体看随深度增加硫和铁含量增高,而

锌随至地表有增加趋势,含硫矿物在浅部黄铁矿较多,深部磁黄铁矿较多。

矿石矿物以磁黄铁矿、黄铁矿、铁闪锌矿为主,黄铜矿、白钨矿次之,微量矿物为绿柱石等,脉石矿物以透辉石、钙铁榴石、石英、钾长石为主,阳起石、透闪石、绿帘石、萤石次之,微量矿物为黑云母、绢云母、绿泥石、磷灰石、钠长石、方解石等。矿石主要有他形粒状结构、半自形晶结构、自形晶结构、交代充填结构、交代溶蚀结构、固溶体出溶结构、胶状结构等,矿石构造有致密块状、浸染状构造、纹层状、条带状、脉状、网脉状等构造。

围岩蚀变类型主要有砂卡岩化、钾长石化、硅化、绿帘石-阳起石化、绿泥石化、碳酸盐化等。砂卡岩化是本区发育最强烈最广泛的一种蚀变作用,主要发生在大理岩中,其次是辉长岩和钙质片岩中。以矿区中部 3~7 线最强,东部较西部强,主要含矿砂卡岩呈似层状发育于大理岩与其上下片岩之间层间断裂带中,至深部大理岩全部被砂卡岩交代,主要有透辉石钙铁榴石砂卡岩组成。向东则出现含镁的砂卡岩矿物。在辉长岩内接触带及片岩中,砂卡岩呈不连续透镜状,团块状发育,其岩性以富含阳起石、绿帘石、透辉石、斜长石为特征。砂卡岩化作用末期开始出现白钨矿、早期铁闪锌矿、萤石等的矿化作用。

根据矿脉穿切关系、矿物组合以及矿物之间的共生关系等特征,成矿阶段可划分为:① 砂卡岩阶段,形成各类砂卡岩和角岩,主要为石榴子石砂卡岩、透辉石石榴子石砂卡岩、长英质角岩等;② 退化蚀变阶段,形成含水硅酸盐矿物如绿泥石、绿帘石、阳起石等,大量的萤石、白钨矿、黄铁矿以及少量磁黄铁矿、闪锌矿等;③ 热液硫化物阶段,大量出现闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等。此阶段金属硫化物多呈他形粒状结构、半自形、自形粒状结构,多以共生关系为主,交代充填于早期黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿裂隙中。并广泛发育硅化、绿帘石-阳起石化、绿泥石化、萤石化、绿泥石-碳酸盐化等。

3 样品特征及分析测试方法

用于 Rb-Sr 等时线年龄测定的样品均采于热液硫化物阶段的块状-稠密浸染状(图 4a、b)原生硫化物矿石,主要金属矿物为闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、黄铜矿等(表 1)。黄铁矿镜下为浅黄白色,

表 1 骆驼山多金属硫铁矿床 Rb-Sr 定年样品
取样位置及样品简要特征

Table 1 Locations and characteristics of samples from the Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit for Rb-Sr isotopic dating

编号	取样位置	样品描述
B53/LTS	矿井采石场	闪锌矿、方铅矿呈团块状产于透辉石砂卡岩
B58/LTS	坑口矿石堆	闪锌矿呈团块状产于透辉石石榴子石砂卡岩
B59/LTS	坑口矿石堆	闪锌矿呈稠密浸染状产出在砂卡岩中
B42/LTS	坑口矿石堆	方铅矿呈块状产出
B17/LTS	坑口矿石堆	方铅矿、磁黄铁矿呈稠密浸染状产出
PB12	坑道内采场	磁黄铁矿以浸染状产出在透辉石砂卡岩中
PB14	坑道内采场	磁黄铁矿呈稠密浸染状产出,围岩为透辉石砂卡岩

自形-半自形粒状结构,被闪锌矿交代呈残留结构(图 4c)。方铅矿镜下为灰白色,半自形-他形粒状结构,与闪锌矿、磁黄铁矿等共生(图 4d)。磁黄铁矿反射光下呈浅玫瑰色,半自形-他形粒状结构,黄铜矿在闪锌矿中呈“病毒”结构(图 4g)。闪锌矿单偏光下呈深红棕色,半自形-他形粒状结构,闪锌矿与方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿等共生(图 4h)。试验中所用矿物为闪锌矿、磁黄铁矿与方铅矿。

将样品粉碎到 40~80 目,在双目镜下挑选出相应单矿物,纯度达 99% 以上,用蒸馏水清洗,低温蒸干,然后将纯净的单矿物样品在玛瑙研钵内研磨至 200 目待测。因为闪锌矿等金属矿物的 Rb、Sr 含量较低,甚至低于 0.01×10^{-6} ,为了确定进行 Rb-Sr 同位素定年的可行性,在南京大学现代分析中心同位素分析室首先对待测的闪锌矿、磁黄铁矿样品进行了微量元素 Rb、Sr 含量的初测,在此基础上,挑选适合定年的样品进行 Rb、Sr 含量和同位素组成测定。具体分析方法如下:

Rb-Sr 同位素分析方法:原粉末样品用混合酸溶解,取清液上离子交换柱分离,采用高压密闭熔样和阳离子交换技术分离和提纯,然后用英国产的 VG354 质谱仪测定,测定方法见文献(Wang et al., 2007; 王银喜等, 2007)。用于测定的美国 NBS987 同位素标样为: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (0.710\ 236 \pm 0.000\ 007)$, Sr 的全流程空白为 $(5 \sim 7) \times 10^{-9}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 进行标准化。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的分析误差为 $\pm 1\%$, $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ 。等时线年龄计算采用国际通用的 ISOPLOT(Ludwig, 1991) 程序计算。

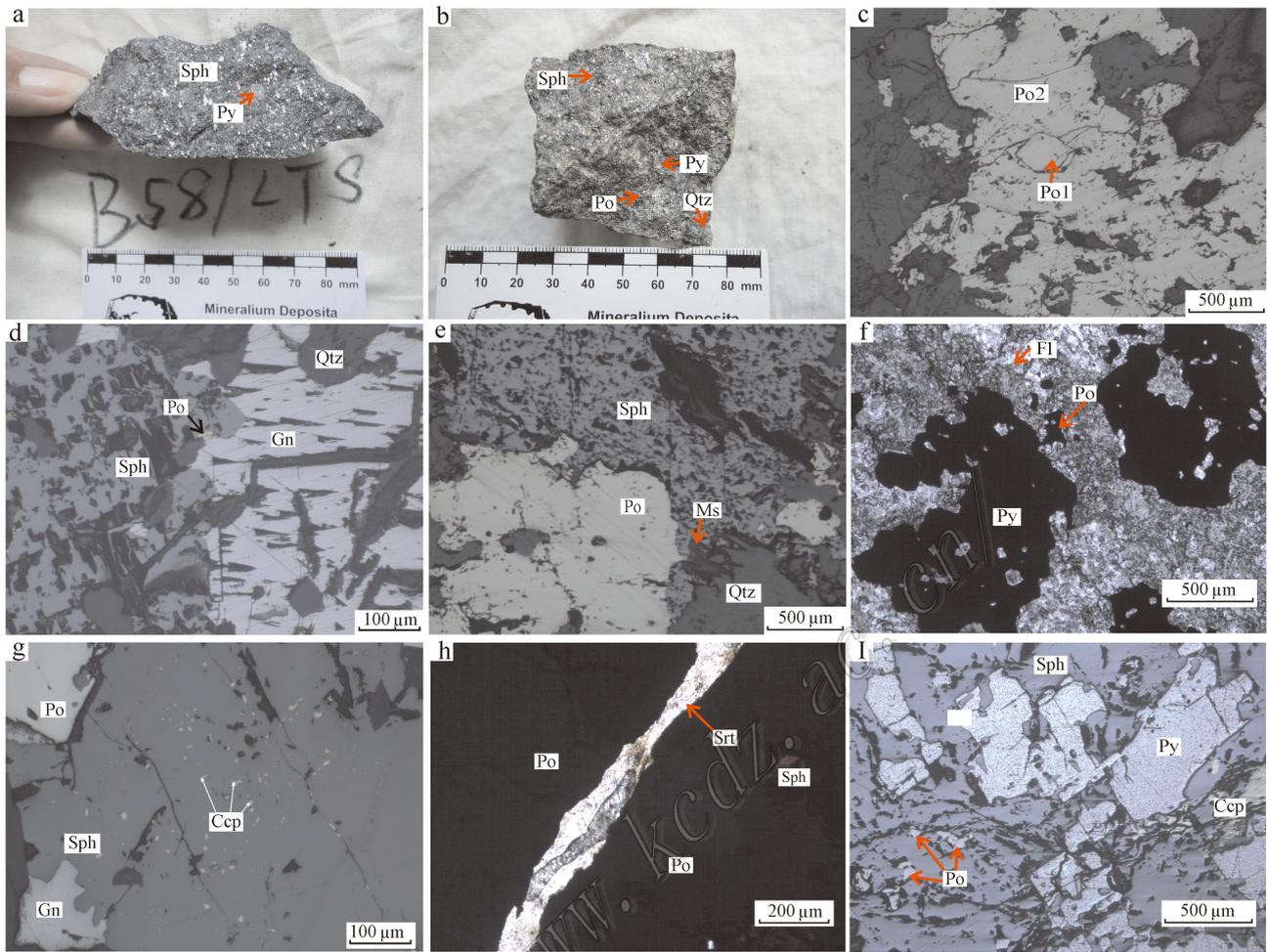


图4 骆驼山多金属硫铁矿床样品特征

a. 团块状闪锌矿矿石; b. 稠密浸染状闪锌矿磁黄铁矿矿石; c. 不同世代的磁黄铁矿(反射光); d. 闪锌矿与方铅矿共生(反射光); e. 闪锌矿交代磁黄铁矿(反射光); f. 石英及萤石交代黄铁矿(单偏光); g. 磁黄铁矿、方铅矿与闪锌矿共生,闪锌矿中黄铜矿“病毒”结构(反射光); h. 晚期绢云母细脉切穿早期硫化物矿物(单偏光); i. 黄铁矿、磁黄铁矿被闪锌矿交代呈残留结构(反射光)

Sph—闪锌矿; Po—磁黄铁矿; Po1—第一世代磁黄铁矿; Po2—第二世代磁黄铁矿; Gn—方铅矿; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Ms—白云母; Srt—绢云母; Fl—萤石

Fig. 4 Characteristics of ore mineral samples from the Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit

a. Massive lead-zinc ore; b. Densely disseminated sphalerite pyrrhotite (under reflective light); c. Different generations of pyrrhotite (under reflective light); d. Sphalerite associated with galena (under reflective light); e. Sphalerite associated with (replacing) pyrrhotite (under reflective light); f. Quartz and fluorite replacing sphalerite (under transmitted light); g. Sphalerite associated with pyrrhotite, galena, chalcopyrite exsolved from sphalerite (under reflective light); h. Late vein of sericitization cutting through the early sulfide mineral (under transmitted light); i. Sphalerite replacing pyrite, pyrrhotite with relict texture (under reflective light)

Sph—Sphalerite; Po—Pyrrhotite; Po1—The first generation of pyrrhotite; Po2—The second generation of pyrrhotite; Gn—Galena; Ccp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Qtz—Quartz; Ms—Muscovite; Srt—Sericite; Fl—Fluorite

4 测试结果

本次测试的8个样品闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿的Rb、Sr含量和同位素组成结果见表2。通过对单矿物以及共生矿物间不同的矿物组合来构筑等时线,这样单矿物和共生矿物的等时线年龄可以相互

约束,从而提高等时线的精确度,得出比较精确的成矿年龄(郑伟等,2013)。得到的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图(图5~图8)均表现出很好的线性关系。

利用ISOPLOT软件包计算出闪锌矿+方铅矿+磁黄铁矿的Rb-Sr等时线年龄为 (137.3 ± 2.6) Ma, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为0.713 24, MSWD=0.130(图5,表3);闪锌矿+方铅矿的Rb-Sr等时线年龄为

表 2 骆驼山多金属硫铁矿床闪锌矿、磁黄铁矿、方铅矿 Rb-Sr 同位素组成

Table 2 Rb-Sr isotopic analyses of sphalerite, pyrrhotite and galena from the Luotuoshan sulfur-polymetallic deposit

样品号	测试矿物	$\alpha(\text{Rb}) \times 10^{-6}$	$\alpha(\text{Sr}) \times 10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 1\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$
B53/LTS	闪锌矿	0.1679	1.4590	0.3409	0.713933 ± 8	0.71327
B58/LTS	闪锌矿	0.4201	0.8095	1.5340	0.716221 ± 9	0.71323
B59/LTS	闪锌矿	0.9847	0.9913	2.9380	0.719038 ± 7	0.71332
B42/LTS	方铅矿	0.1374	1.3510	0.2986	0.713807 ± 10	0.71323
B53/LTS	方铅矿	0.1502	6.1340	0.0721	0.713414 ± 9	0.71327
BI7/LTS	磁黄铁矿	0.7819	4.4680	0.5168	0.714241 ± 10	0.71323
PBI2	磁黄铁矿	1.9830	0.9825	5.9470	0.724839 ± 8	0.71326
PBI4	磁黄铁矿	1.5650	1.3960	3.3040	0.719673 ± 9	0.71324

测试单位: 南京大学现代分析中心同位素分析室。

表 3 骆驼山多金属硫铁矿床矿物组合、等时线年龄及 Sr 初始比值

Table 3 The data of mineral association, isochron age and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ from the Luotuoshan sulfur-polymetallic deposit

矿物组合	等时线年龄/Ma	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$	MSWD
闪锌矿 + 方铅矿 + 磁黄铁矿	137.3 ± 2.6	0.71324	0.130
闪锌矿 + 方铅矿	138.2 ± 5.8	0.71325	0.114
闪锌矿 + 磁黄铁矿	137.0 ± 3.0	0.71325	0.114
方铅矿 + 磁黄铁矿	137.1 ± 2.7	0.71325	0.044
闪锌矿	138.4 ± 7.6	0.71324	0.210
磁黄铁矿	137.2 ± 3.7	0.71324	0.007

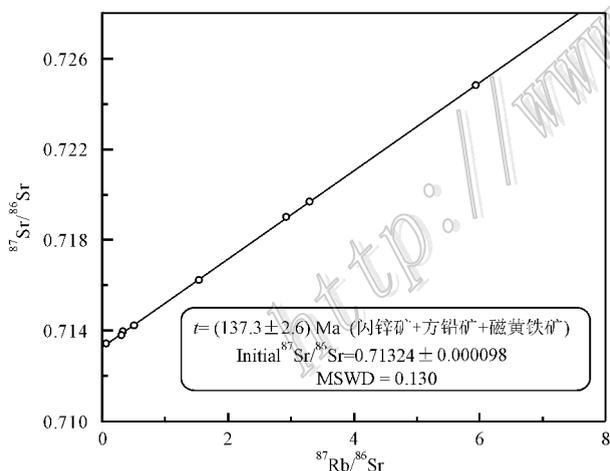


图 5 骆驼山多金属硫铁矿床闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿组合的 Rb-Sr 等时线图

Fig. 5 Rb-Sr isochron of the intergrowth mineral association of sphalerite, galena and pyrrhotite from the Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit

$(138.2 \pm 5.8) \text{ Ma}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ 为 0.71325 , $\text{MSWD} = 0.114$ (图 6, 表 3); 闪锌矿 + 磁黄铁矿的 Rb-Sr 等时线年龄为 $(137 \pm 3) \text{ Ma}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ 为 0.71325 , $\text{MSWD} = 0.114$ (图 7, 表 3); 方铅矿 + 磁黄铁矿的

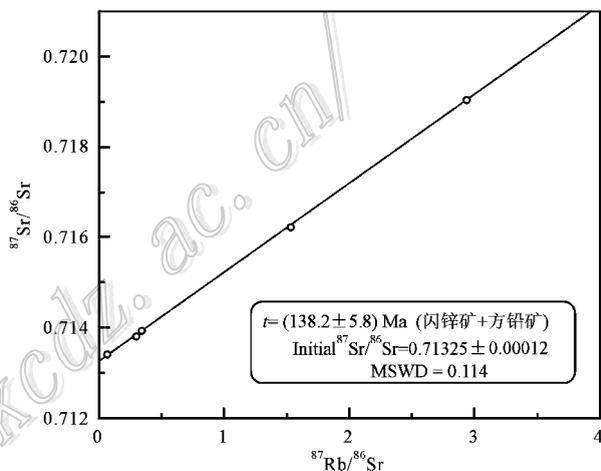


图 6 骆驼山多金属硫铁矿床闪锌矿、方铅矿组合的 Rb-Sr 等时线图

Fig. 6 Rb-Sr isochron of the intergrowth mineral association of sphalerite and galena from the Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit

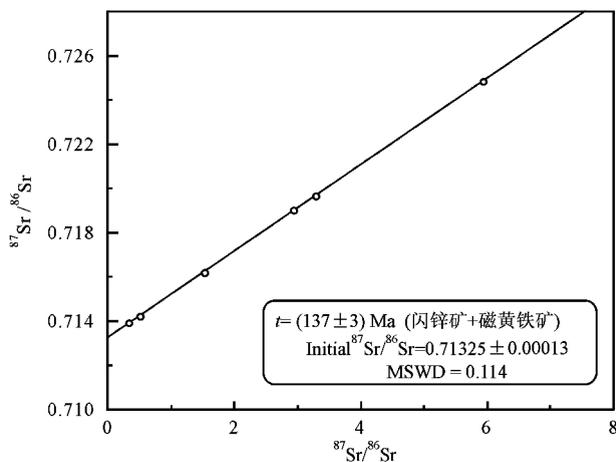


图 7 骆驼山多金属硫铁矿床闪锌矿和磁黄铁矿组合的 Rb-Sr 等时线图

Fig. 7 Rb-Sr isochron of the intergrowth mineral association of sphalerite and pyrrhotite from the Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit

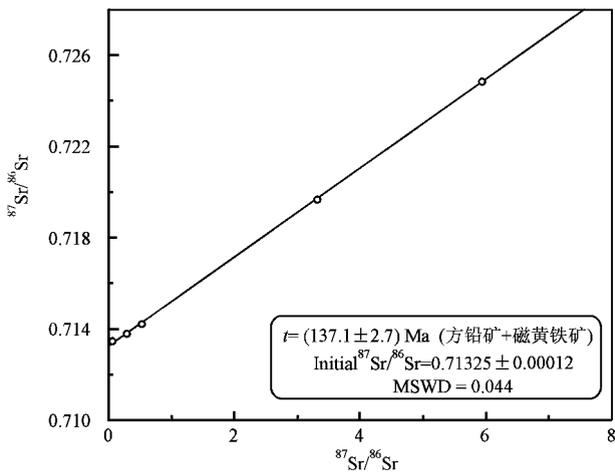


图8 骆驼山多金属硫铁矿床方铅矿、磁黄铁矿组合的 Rb-Sr 等时线图

Fig. 8 Rb-Sr isochron of the intergrowth mineral association of galena and pyrrhotite from the Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit

Rb-Sr 等时线年龄为 $(137.1 \pm 2.7) \text{ Ma}$, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 为 0.713 25, MSWD=0.044(图8,表3)。

5 讨论

5.1 成矿年龄的可靠性

精确测定金属矿床的成矿时代,对于正确认识矿床成因和成矿要素、探讨成矿作用过程和机理、总结成矿规律并指导找矿勘探工作都具有极为重要的意义(程裕淇,1983;裴荣富等,1993;1994;陈毓川等,1994;刘建明等,1998a;毛景文等,2000;2005;2006;翟裕生等,2008)。

随着同位素年代学的不断发展,一些国内外学者直接利用矿石矿物进行同位素测年取得成功。例如辉钼矿 Re-Os 法(Walker et al., 1982; Barra et al., 2002; Mao et al., 2008; 向君峰等, 2012), 锡石 U-Pb 法(Yuan et al., 2008), 闪锌矿流体包裹体 Rb-Sr 法(Nakai et al., 1990), 硫化物(如闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿) Rb-Sr 法(Brannon et al., 1992; Nakai et al., 1993; Christensen et al., 1993; 1995a; 1995b; Petke et al., 1996; 杨进辉等, 2001; 张长青等, 2008; Yin et al., 2009; 胡乔青等, 2012; 郑伟等, 2013; 李铁刚等, 2014)。赵葵东等(2004)指出 Rb、Sr 在硫化物中主要赋存在包裹体或者矿物晶格中, 而主矿物晶格中的原生包裹体中赋存的 Rb、Sr 产生的影响可以忽略,但次生包裹体必须去除(刘建明

等,1998a),同一矿物不同晶粒的 Rb、Sr 含量和 Rb/Sr 比值会有变化,从而满足定年的条件。刘建明等(1998a,1998b)也指出,利用热液矿物组合等时线测定热液矿床的成矿时代会比较理想,因为不同矿物相具有不同的化学势,而化学性质不同的矿物 Rb 和 Sr 会发生化学分异,从而使同一成矿母液中沉淀出的共生矿物具有不同的 Rb/Sr 比值。李文博等(2004)利用 2 组共生矿物组合 Rb-Sr 等时线方法获得会泽超大型铅锌矿床的成矿时代为 $(225.1 \pm 2.9) \text{ Ma}$ 和 $(225.9 \pm 3.1) \text{ Ma}$; 田世洪等(2009)同样成功地获得了东莫扎抓铅锌矿床的共生矿物黄铁矿与方铅矿 Rb-Sr 年龄 $(34.747 \pm 0.015) \text{ Ma}$, 以及莫海拉亨铅锌矿床的共生闪锌矿与方铅矿 Rb-Sr 年龄 $(33.949 \pm 0.022) \text{ Ma}$, 并得出 2 个矿床为同期同源成矿作用的产物。

综上所述,利用热液矿物组合 Rb-Sr 法来厘定矿床成矿时代是比较理想的,通过对共生热液矿物开展 Rb-Sr 等时线定年,不仅符合 Rb-Sr 等时线定年的基本前提,而且还提高了 Rb-Sr 等时线定年的精确度。骆驼山矿床中金属硫化物矿物(黄铁矿、闪锌矿、磁黄铁矿、方铅矿等)广泛分布,是直接测定成矿时代的理想对象。因此,本文选取热液硫化物阶段的共生闪锌矿、磁黄铁矿及方铅矿进行 Rb-Sr 同位素等时线年龄测定,使所获得的数据更为可信。

5.2 成矿时代

热液矿物 Rb-Sr 法测年的基本前提是同源、同时、封闭性、($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 的均一性以及 ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$) 的差异性(李文博等,2002)。此次工作选择结晶较好的致密块状矿石矿物作为研究对象,尽可能满足 Rb-Sr 同位素测年的前提条件。试验过程中,将闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿等单矿物研磨至 200 目以下,然后进行超声波清洗,基本可排除次生包裹体的干扰(刘建明等,1998a; 薛良伟等,1999)。

判别所测数据是否合理,可依据李文博等(2002)提出的利用 $1/\text{Sr}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图和 $1/\text{Rb}-^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 图来判别闪锌矿生长期间 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值是否保持不变,进而判断数据的合理性。本次测试结果在 $1/\text{Rb}-n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 和 $1/\text{Sr}-n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ (图9)关系图解中显示,同时形成于热液硫化物阶段的单矿物闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿等的 Rb、Sr 含量不同, $1/\text{Rb}$ 与 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 、 $1/\text{Sr}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 之间不存在线性关系,且相对稳定,说明闪锌矿及其共生矿物生长期间初始值基本保持不变,因此可以认为图 5~

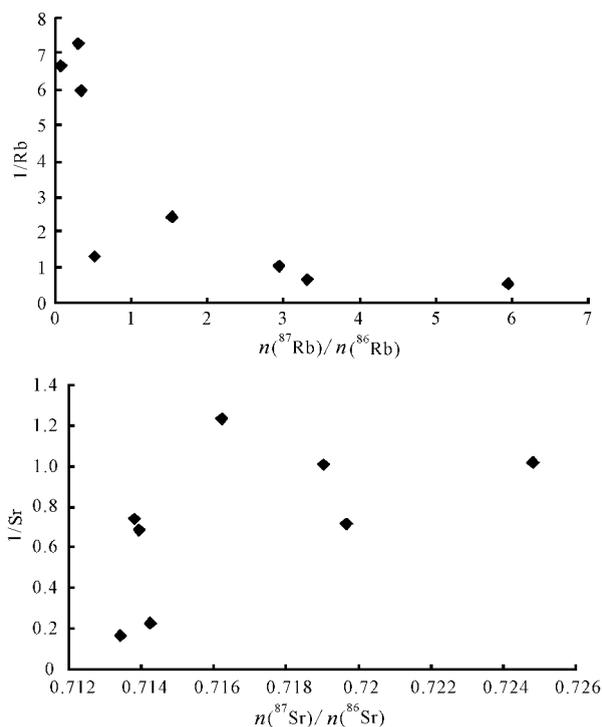


图 9 骆驼山多金属硫铁矿床闪锌矿及其共生矿物磁黄铁矿和方铅矿 $1/Rb-n(^{87}Rb)/n(^{86}Sr)$ 和 $1/Sr-n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ 关系图

Fig. 9 Diagrams of $1/Rb$ versus $n(^{87}Rb)/n(^{86}Sr)$ and $1/Sr$ versus $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ of sphalerites and the intergrowth mineral association of pyrrhotite and galena from the Luotuoshan pyrite-polymetallic deposit

图 8 所表现出的 4 条直线具有等时线意义。

从图 5~图 8 中可以看出,所有的样点几乎全部落在等时线上,说明矿石矿物形成过程中 Sr 同位素是均一的,而且得到了很好的封闭,因此拟合的等时线年龄具有很高的精度。闪锌矿+方铅矿+磁黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 (137.3 ± 2.6) Ma; 闪锌矿+方铅矿 Rb-Sr 等时线年龄为 (138.2 ± 5.8) Ma; 闪锌矿+磁黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 (137 ± 3) Ma; 方铅矿+磁黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 (137.1 ± 2.7) Ma; 单矿物闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄为 (138.4 ± 7.6) Ma; 单矿物磁黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 (137.2 ± 3.7) Ma。因此可以得出,单矿物闪锌矿和矿物组合黄铁矿与方铅矿或者闪锌矿与方铅矿、闪锌矿与磁黄铁矿等的形成时代在误差范围内是基本一致的,获得的年龄非常相近,介于 137.1~138.4 Ma,说明骆驼山多金属硫铁矿床形成于早白垩世。

5.3 成矿物质来源

$(^{87}Sr/^{86}Sr)$ 是判断成岩成矿物质壳幔来源的重

要指标(侯明兰等,2006),一般 $(^{87}Sr/^{86}Sr) > 0.7190$ 时被认为是壳源(Palmer et al.,1989;孙省利,2001) $(^{87}Sr/^{86}Sr) < 0.7040$ (Palmer et al.,1985;Faure,1986;孙省利,2001)时为幔源。在矿床地质研究中常利用其来示踪成矿物质来源、岩浆流体、深源流体的壳幔混染作用(侯明兰等,2006)。为避免放射性 ^{87}Rb 衰变对 Sr 同位素造成显著影响,采用 Geokit 软件(路远发,2004)将硫化物 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 测试值换算到 137 Ma 的初始锶同位素比值,从表 2 中可以看出骆驼山矿床硫化物等时线年龄给出的初始锶同位素比值非常接近,介于 0.713 23~0.713 32,平均为 0.713 25,显示出硫化物的成矿物质来源于壳幔混染。

同时,笔者对骆驼山矿床 15 个硫化物样品进行了 S 同位素组成分析, $\delta^{34}S$ 值介于 1.4‰~3.0‰,平均为 2.35‰(杨晨英等,未发表资料)。矿区外围冷水北沟脉状铅锌银矿床矿石矿物硫同位素测定结果显示,矿石矿物的 $\delta^{34}S$ 值为 0.7‰~3.8‰,平均是 2.35‰(付治国等,2010)与三道庄-南泥湖矿床的成矿流体总硫 $\delta^{34}S_{\Sigma}$ (2.75‰)(罗铭玖等,1991)较接近,显示硫具有深源硫的特点。结合南泥湖矿田上房沟、南泥湖等成矿斑岩体属 I 型花岗岩的事实(叶会寿等,2006a;叶会寿,2006),推断硫等成矿物质和花岗斑岩体一样应主要来自于下地壳。

5.4 地质意义

关于骆驼山矿床的成因类型存在较大分歧,主要有喷流沉积(胡受奚等,1988;燕长海等,2004)和岩浆热液充填交代(吕文德等,2006;叶会寿等,2006a;王长明等,2007;毛景文等,2009)的观点。根据本次测试获得骆驼山多金属硫铁矿床的成矿时代为早白垩世,以及多金属硫铁矿体和矽卡岩沿 NNW 向层间破碎带产出,新元古代变辉长岩亦发生矽卡岩化和多金属硫铁矿化的事实,厘定该矿床应为一后生的矽卡岩型矿床,而不是同生的 SEDEX 型矿床。

南泥湖矿田内已有大量的成岩成矿测年数据,如上房沟花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为 135 Ma(包志伟等,2009),南泥湖含矿花岗斑岩体的 U-Pb 年龄为 (145.2 ± 1.5) Ma~ (146.7 ± 1.2) Ma(向君峰等,2012),南泥湖-三道庄斑岩-矽卡岩型钼矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (146.0 ± 1.1) Ma(向君峰等,2012),上房沟斑岩型钨(铁)矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (144.8 ± 2.1) Ma(李永峰等,2004),本文测得的骆驼山多金属硫化物矿床 Rb-Sr 等时线年龄为 (137.3 ± 2.6) Ma,冷水北沟脉状铅锌矿 ^{40}Ar - ^{39}Ar

坪年龄为 (137.87 ± 0.39) Ma (王长明等, 2007)。这些基本一致的成岩成矿年龄表明:南泥湖斑岩体及围绕岩体分布的斑岩-矽卡岩型钼(钨)矿床、矽卡岩型多金属硫铁矿床、热液脉状铅锌矿床为同一构造-岩浆-流体成矿事件的产物,构成晚侏罗世—早白垩世与I型花岗岩有关的矿床成矿系列。

在地壳演化过程中,成矿过程总是受到一个特定区域内的重要构造-热事件或其他异常地质事件的影响和制约(周涛发等, 2000; 杨竹森等, 2002; 曾普胜等, 2002; 毛景文等, 2004; 王彦斌等, 2004)。毛景文等(2003, 2009)认为,东秦岭地区大规模成矿作用主要发生在200~166 Ma、140 Ma左右、130~110 Ma三个时间段。三叠纪华北板块与扬子板块相互碰撞,形成秦岭造山带(Ames et al., 1993; 张国伟等, 1996; 2001; 2011),根据前人研究成果(黄典豪等, 1994; 卢欣祥等, 1999; 2008; 李永峰等, 2005; 毛景文等, 2005; 曹晶等, 2014), 210 Ma以前秦岭地区结束碰撞造山作用,进入后碰撞的伸展环境。中-晚侏罗世秦岭地区构造体制发生大转折,主应力场由SN向向NWW向转变,东秦岭受板片断离作用和壳幔边界附近发生的基性岩浆的底侵作用影响,加厚的下地壳物质发生部分熔融形成花岗质岩浆,并沿构造薄弱带上升到浅层次侵位形成南泥湖、金堆城等同熔型花岗斑岩,以及在140 Ma左右,形成斑岩型、矽卡岩型钼(钨)矿床和热液脉型铅锌银矿床(叶会寿等, 2006b),如金堆城钼矿床(139~129 Ma, 黄典豪等, 1985), 银家沟硫铁多金属矿床(140 Ma, 武广等, 2013)等。晚侏罗世末—早白垩世,中国东部发生大规模岩石圈拆沉作用(邓晋福等, 2004; 朱赖民等, 2008),由于拆沉作用和软流圈热侵蚀作用,形成S型、A型和壳幔混源型花岗岩等各类花岗岩,以及与之相关的各类矿床,如东沟斑岩型钼矿床(116 Ma, 叶会寿等, 2006b)。

本研究通过金属硫化物 Rb-Sr 同位素精确测年,获得骆驼山多金属硫铁矿床 Rb-Sr 等时线年龄为137 Ma左右,其形成的地球动力学背景应处于中国东部中生代构造体制大转换过程晚期的产物,是中国东部中生代140 Ma左右大规模成矿作用的一部分。

6 结 论

(1) 骆驼山多金属硫铁矿床热液硫化物阶段的闪锌矿及其共生矿物 Rb-Sr 等时线年龄为137 Ma

左右,成矿作用发生于早白垩世。该年龄对于南泥湖矿田同类型多金属硫铁矿床成矿时代具有一定的约束意义。

(2) 闪锌矿及其共生矿物磁黄铁矿、方铅矿的锶同位素初始比值非常接近,介于0.713 23~0.713 32,平均值为0.713 25,指示成矿物质来源于壳幔混源。

(3) 骆驼山多金属硫铁矿床,与南泥湖斑岩-矽卡岩型钼矿床、冷水北沟脉状铅锌矿床是同一构造-岩浆-流体成矿事件的产物,构成晚侏罗世—早白垩世与I型花岗岩有关的矿床成矿系列,其成矿动力学背景与中国东部中生代构造体制大转换有关,即由挤压体制向伸展体制转化背景下。

志 谢 本文完成过程中得到中国地质大学(北京)郑伟博士研究生、李铁刚博士研究生的帮助;野外地质工作中得到河南栾川众鑫矿业有限公司的大力帮助;分析测试中得到了南京大学王银喜老师的热情帮助,在此一并表示感谢。

References

- Ames L, Tilton G R and Zhou G. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite bearing eclogites [J]. *Geology*, 21(4): 339-342.
- Barra F, Ruiz J, Mathur R and Titley S. 2002. A Re-Os study of sulfide minerals from the Bagdad porphyry Cu-Mo deposit, northern Arizona, USA [J]. *Mineralium Deposita*, 38(5): 585-596.
- Bao Z W, Zeng Q S, Zhao T P and Yuan Z L. 2009. Geochemistry porphyries from east Qinling belt and their and petrogenesis of the ore-related Nannihu and constraints on the molybdenum mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2523-2536 (in Chinese with English abstract).
- Brannon J C, Podosek F A and McLimans R K. 1992. A Permian Rb-Sr age for sphalerite from the Upper Mississippi Valley zinc-lead district, southwest Wisconsin [J]. *Nature*, 356: 509-511.
- Cao J, Ye H S, Li H Y, Li Z Y, Zhang X K, He W and Li C. 2014. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Huangshui carbonatite vein-type Mo (Pb) deposit in Songxian County, Henan Province [J]. *Mineral Deposits*, 33(1): 53-69 (in Chinese with English abstract).

- Chen Y C, Wang P A, Qin K L, Zhao D H and Mao J W. 1994. Metallogenic series of main ore deposits and regional metallogeny in the Qinling area [J]. *Mineral Deposits*, 13(4): 289-298 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Y Q, Chen Y C, Zhao Y M and Song T R. 1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences*, 5(6): 1-64 (in Chinese).
- Christensen J N, Halliday A N, Stephen E K and Sangster D F. 1993. Further evaluation of the Rb-Sr dating of sphalerite: The Nanisivik Precambrian MVT deposit, Baffin Island, Canada [J]. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 25: 471.
- Christensen J N, Halliday A N, Kenneth E L, Roderick N R and Stephen E K. 1995a. Direct dating of sulfides by Rb-Sr: A critical test using the Polaris Mississippi Valley-type Zn-Pb deposit [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 5191-5197.
- Christensen J N, Halliday A N, Vearncombe J R and Stephen E K. 1995b. Testing models of large-scale crustal fluid flow using direct dating of sulfides: Rb-Sr evidence for early dewatering and formation of Mississippi Valley-type deposits, Canning Basin, Australia [J]. *Econ. Geol.*, 90: 877-884.
- Deng J F, Flower M F J, Su S G, Yu X H, Luo Z H, Qiu R Z and Wu Z X. 2004. Coexisting of contrast lithospheric deformation and magmatism in the mediterranean region: Mantle flow as the response and expression to the continent-continent collision [J]. *Geoscience*, 18(4): 435-442 (in Chinese with English abstract).
- Faure G. 1986. *Principles of isotope geology* [M]. United States: John Wiley Sons. 183-199.
- Fu Z G, Weng J C, Yan C H and Gao S H. 2010. Isotope geochemical characteristics of the leng shui bei gou lead zinc silver ore district in east Qinling [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(1): 34-39 (in Chinese with English abstract).
- Hu S X, Lin Q L, Chen Z M and Li S M. 1988. North and Southern China square blocks with geological and mineralization (east of Qinling Mountains and Tongbai as an example) [M]. Nanjing: Nanjing University Press. 1-558 (in Chinese).
- Hu Q Q, Wang Y T, Wang R T, Li J H, Dai J Z and Wang S Y. 2012. Ore-forming time of the Erlihe Pb-Zn deposit in the Fengxi-an-Taibai ore concentration area, Shaanxi Province: Evidence from the Rb-Sr isotopic dating of sphalerites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 258-266 (in Chinese with English abstract).
- Huang D H, Wang Y C, Nie F J and Jiang X J. 1985. A new type of molybdenum deposit-geological characteristics and metallogenetic mechanism of the Huanglongpu carbonatite vein-type of molybdenum (lead) deposit, Shanxi [J]. *Acta Geologica Sinica*, 59(3): 241-257 + 275 (in Chinese with English abstract).
- Huang D H, Wu C Y, Du A D and He H L. 1994. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in east Qinling and their significance [J]. *Mineral Deposits*, 13(3): 221-230 (in Chinese with English abstract).
- Hou M L, Jiang Y H and Ling H F. 2006. S-Pb isotope geochemistry and Rb-Sr geochronology of the Penglai gold field in the eastern Shandong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2525-2533 (in Chinese with English abstract).
- Li T G, Wu G, Liu J, Hu Y Q, Zhang Y F and Luo D F. 2014. Rb-Sr isochron age of the Jiawula Pb-Zn-Ag deposit in the Manzhouli area and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 257-270 (in Chinese with English abstract).
- Li W B, Huang Z L, Xu D R, Chen J, Xu C and Guan T. 2002. Rb-Sr isotopic method on zinc-lead ore deposits: A review [J]. *Geotectonica et Metallogenia*. 26(4): 436-441 (in Chinese with English abstract).
- Li W B, Huang Z L, Chen J, Han R S, Zhang Z L, Xu C and Guan T. 2004. Rb-Sr dating of mineral assemblage from the Huize giant Zn-Pb deposit, Yunnan Province [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(2): 112-116 (in Chinese with English abstract).
- Li Y F, Wang C Q, Bai F J and Song Y L. 2004. Re-Os isotopic ages of Mo deposits in east Qinling and their geodynamic settings [J]. *Mineral Resources and Geology*, 18(6): 571-578 (in Chinese with English abstract).
- Li Y F, Mao J W, Hu H B, Guo B J and Bai F J. 2005. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in east Qinling area [J]. *Mineral Deposits*, 24(3): 292 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Zhao S R, Shen J, Jiang N and Huo W G. 1998a. Review on direct isotopic dating of hydrothermal ore-forming processes [J]. *Progress in Geophysics*, 13(3): 46-55 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Shen J, Zhao S R, Huo W G and Jiang N. 1998b. Isotopic dating for metallic deposits and its significance [J]. *Geological Ex-*

- ploration for Non-ferrous Metals, 7(2): 107-113 (in Chinese with English abstract).
- Lu X X, Wei X D, Xiao Q H, Zhang Z Q, Li H M and Wang W. 1999. Geochronological studies of rapakivi granites in Qinling and its geological implications [J]. Geological Journal of China Universities, 15(4): 372-377 (in Chinese with English abstract).
- Lu X X, Li M L, Wang W, Yu Z P and Shi Y Z. 2008. Indosinian movement and metallogenesis in Qinling orogenic belt [J]. Mineral Deposits, 27(6): 762-773 (in Chinese with English abstract).
- Lu Y F. 2004. GeoKit: A geochemical toolkit for Microsoft Excel [J]. Geochimica, 33(5): 459-464 (in Chinese with English abstract).
- Luo M J, Zhang F M, Dong Q Y, et al. 1991. Chinese molybdenum deposits [M]. Henan: Henan Science and Technology Press. 108-131 (in Chinese).
- Ludwig K R. 1991. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data, version 2.5 [R]. US Geological Survey.
- Lü W D, Zhao C H, Sun W Z and Yan J S. 2005. Characters of the Skarn lead and zinc deposit in Luanchuan County, Henan Province [J]. Geological Survey and Research, 28(1): 23 (in Chinese with English abstract).
- Lü W D, Zhao C H, Sun W Z and Yan J S. 2006. Geological characteristics and genesis of Nannihu lead zinc polymetallic ore field in West Henan [J]. Mineral Resources and Geology, 20(3): 219 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W and Wang Z L. 2000. A preliminary study on time limits and geodynamic setting of large-scale metallogeny in east China [J]. Mineral Deposits, 19(4): 289-296 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Wang Y T, Zhang Z H, Yu J J and Niu B G. 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas-Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 33(04): 289-299 (in Chinese).
- Mao J W, Stein H, Du A D, Zhou T F, Mei Y X, Li Y F, Zang W S and Li J W. 2004. Molybdenite Re-Os precise dating for molybdenite from Cu-Au-Mo deposits in the Middle-Lower Reaches of Yangtze river belt and its implications for mineralization [J]. Acta Geologica Sinica, 78(1): 121-131 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 169-188 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Hu R Z, Chen Y C and Wang Y T. 2006. Large-scale ore-forming events and large ore dense areas [M]. Beijing: Geological Publishing Press. 58-70 (in Chinese).
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Ye H S, Qu W J, Du A D, Pirajno F, Li H M, Guo B J, Li Y F and Yang Z Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72: 4607-4626.
- Mao J W, Ye H S, Wang R T, Dai J Z, Jian W, Xiang J F, Zhou K and Meng F. 2009. Mineral deposit model of Mesozoic porphyry Mo and vein-type Pb-Zn-Ag ore deposits in the eastern Qinling, Central China and its implication for prospecting [J]. Geological Bulletin of China, 28(1): 72-79 (in Chinese with English abstract).
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S E and Jones H D. 1990. Rb-Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley-type ore deposits [J]. Nature, 346: 354-357.
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, Jones H D, Kyle J R and Lane T E. 1993. Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley-type (MVT) ore deposits [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57: 417-427.
- Palmer M R and Elderfield H. 1985. Sr isotope composition of sea water over the past 75 Myr [J]. Nature, 314: 526-528.
- Palmer M R and Edmond J M. 1989. The strontium isotope budget of the modern ocean [J]. Earth and Planetary Science Letters, 92(1): 11-26.
- Pei R F and Wu L S. 1993. The metallogenic province geological history evolution and metallogenic chronology research progress [J]. Mineral Deposits, 12(3): 285-286 (in Chinese with English abstract).
- Pei R F and Wu L S. 1994. On the evolution of metallogenic province and metallogeny [J]. Earth Science Frontier (CUGB, Beijing), 1(3-4): 95-99 (in Chinese with English abstract).
- Petke T and Diamond L W. 1996. Rb-Sr dating of sphalerite based on fluid inclusion-host mineral isochrons; A clarification of why it works [J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 91(5): 951-956.

- Sun S L. 2001. The study on metallogenic series of hydrocarbon alkali-fluids in Devonian in Xicheng concentrated mineralization area, West Qinling, Gansu Province (dissertation for doctor [D]). Supervisor: Zeng Y F and He Z L. Chengdu: Chengdu University of Technology. 43-44 (in Chinese with English abstract).
- The Third Geological Team of Henan Province Geological Survey. 1975. Luotushan sulfur polymetallic mining exploration report [R]. Zhengzhou: The Third Geological Team of Henan Province Geological Survey. 17-58 (in Chinese).
- Tian S H, Yang Z S, Hou Z Q, Liu Y C, Gao Y G, Wang Z L, Song Y C, Xue W W, Lu H F, Wang F C, Su Y N, Li Z Z, Wang Y X, Zhang Y B, Zhu T, Yu C J and Yu Y S. 2009. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Dongmohazhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinghai and their geological implication [J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 747-758 (in Chinese with English abstract).
- Walker D A and McDougall L. 1982. ^{40}Ar - ^{39}Ar and K-Ar dating of altered glassy volcanic rocks: The Dabi Volcanic [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 2182-2190.
- Wang C M, Zhang S T, Deng J, Sun Y X, Yan C H and Ye H S. 2007. Geological-geochemical features and genesis of Lengshuibeiou Pb-Zn deposit in Henan [J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 175-183 (in Chinese with English abstract).
- Wang X L, Jiang S Y, Dai B Z, Griffin W L, Dai M N and Yang Y H. 2011. Age, geochemistry and tectonic setting of the Neoproterozoic (ca 830 Ma) gabbros on the southern margin of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 190(1): 35-47.
- Wang Y B, Tang S H, Wang J H, Zeng P S, Yang Z S, Meng Y F and Tian S H. 2004. The pyrite Rb/Sr isotopic age data of Anhui Tongling Xinqiao copper gold deposit-evidence of Yanshan [J]. *Geological Review*, 50(5): 538-542 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y X, Gu L X, Zhang Z Z, Wu C Z, Li H M and Yang J D. 2007. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of Rhyolite of the Late Carboniferous Dashitou Group in eastern Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica* 23(7): 1749-1755.
- Wu G, Chen Y C, Li Z Y, Yang X S, Liu J and Qiao C J. 2013. Molybdenite Re-Os and sericite ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of Yinjiagou pyrite-polymetallic deposit in western Henan Province, and their geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 33(4): 809-822 (in Chinese with English abstract).
- Xiang J F, Mao J W, Pei R F, Ye H S, Wang C Y, Tian Z H and Wang H L. 2012. New geochronological data of granites and ores from the Nannihu-Sandaozhuang Mo(W) deposit [J]. *Geology in China*, 39(2): 458-473 (in Chinese with English abstract).
- Xue L W, Pang J Q, Wang X G and Zhou C M. 1999. Rb-Sr and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of fluid inclusion of the No. 303 quartz vein in Xiaoling region [J]. *Geochemica*, 28(5): 473-478 (in Chinese with English abstract).
- Yan C H and Liu G Y. 2004. Metallogenic characteristics and ore-prospecting suggestions of lead-zinc polymetallic deposits in southwestern Henan Province of China [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(11): 1143-1148 (in Chinese with English abstract).
- Yang J H and Zhou X H. 2000. The Rb-Sr isochron age and mineralogical epoch from gold ore and gold-bearing mineral of Linglong gold deposit in eastern Shandong Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(14): 1547-1552 (in Chinese).
- Yang Z S, Hou Z Q, Meng Y F, Wang X C, Zeng P S, Tian S H, Jiang Z P and Yao X D. 2002. Regional-scale fluid system and its mineralization in Tongling ore-cluster-area, Anhui [J]. *Mineral Deposits*, 21(Supp.): 1080-1083 (in Chinese with English abstract).
- Ye H S. 2006. The Mesozoic tectonic evolution and Pb-Zn-Ag metallogeny in the south margin of North China Craton (dissertation for doctor [D]). Supervisor: Mao J W. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract).
- Ye H S, Mao J W, Li Y F, Yan C H, Guo B J, Zhao C S, He C F, Zheng R F and Chen L. 2006a. Characteristics and metallogenic mechanism of Mo-W and Pb-Zn-Ag deposits in Nannihu ore field, western Henan Province [J]. *Geoscience*, 20(1): 165-174 (in Chinese with English abstract).
- Ye H S, Mao J W, Li Y F, Guo B J, Zhang C Q, Liu W J, Yan Q R and Liu G Y. 2006b. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the superlarge Donggou porphyry Mo deposit in east Qingling, China, and its geological implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1078-1088 (in Chinese with English abstract).
- Yin M, Li W and Sun X. 2009. Rb-Sr isotopic dating of sphalerite from the giant Huize Zn-Pb ore field, Yunnan Province, southwestern China [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 28(1): 70-75.
- Yuan S D, Peng J T, Hu R Z, Li H M, Shen N P and Zhang D L.

2008. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China) [J]. *Mineralium Deposita*, 43(4): 375-382.
- Zeng P S, Pei R F, Hou Z Q, Meng Y F, Yang Z S, Wang X C, Tian S H, Xu W Y and Jiang Z P. 2002. Sedex-type massive sulfide deposits in Tongling block, Anhui, China [J]. *Mineral Deposits*, 21(Supp.): 532-535 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S, Wang J P, Deng J, Peng R M and Liu J J. 2008. Temporal-spatial evolution of metallogenic systems and its significance to mineral exploration [J]. *Geoscience*, 22(2): 143-150 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C Q, Li X H, Xu X J, Mao J W, Chen F K and Li H M. 2008. Rb-Sr dating of single sphalerites from the Daliangzi Pb-Zn deposit, Sichuan, and its geological significances [J]. *Geological Review*, 54(4): 532-538 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G W, Meng Q R, Yu Z P, Sun Y, Zhou D A and Guo A L. 1996. Qinlingorogenic belt of orogenic process and its dynamic characteristic [J]. *Science in China (Series D)*, 26(3): 193-200 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C and Xiao Q H. 2001. Qinlingorogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Science Press. 1-729 (in Chinese).
- Zhang G W, Guo A L, Dong Y P and Yao A P. 2011. Continent geological continental tectonics and continental dynamics [J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Zhao K D and Jiang S Y. 2004. Metal ore deposit of isotopic dating method [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 425-434 (in Chinese with English abstract).
- Zheng W, Chen M H, Xu L G, Zhao H J, Lin S B, Wu Y, Hu Y G, Tian Y and Wu X D. 2013. Rb-Sr isochron age of Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Guangdong Province and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 32(2): 259-272 (in Chinese with English abstract).
- Zhou T F and Yue S C. 2000. Forming condition and mechanism for the fluid ore-forming system of the copper, gold deposits in the middle and lower reacher of the Yangtze river area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 36(5): 697-707 (in Chinese with English abstract).
- Zhu L M, Zhang G W, Li B and Guo B. 2008. Main geological events, genetic types of metallic deposits and their geodynamical setting in the Qinling orogenic belt [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(4): 384-390 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包志伟, 曾乔松, 赵太平, 原振雷. 2009. 东秦岭钼矿带南泥湖-上房沟花岗岩成因及其对钼成矿作用的制约 [J]. *岩石学报*, 25(10): 2523-2536.
- 曹晶, 叶会寿, 李洪英, 李正远, 张兴康, 贺文, 李超. 2014. 河南嵩县黄水庵碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄 [J]. *矿床地质*, 33(1): 53-69.
- 曾普胜, 裴荣富, 侯增谦, 蒙义峰, 杨竹森, 王训诚, 田世洪, 徐文艺, 姜章平. 2002. 安徽铜陵地块沉积-喷流块状硫化物矿床 [J]. *矿床地质*, 21(增刊): 532-535.
- 陈毓川, 王平安, 秦克令, 赵东宏, 毛景文. 1994. 秦岭地区主要金属矿床成矿系列划分及区域成矿规律探讨 [J]. *矿床地质*, 13(4): 289-298.
- 程裕淇. 1983. 再论矿床的成矿系列问题 [J]. *中国地质科学院院报*, 第6号: 1-64.
- 邓晋福, Martin F. J. Flower, 苏尚国, 喻学惠, 罗照华, 邱瑞照, 吴宗絮. 2004. 地中海地区明显反差的岩石圈变形与岩浆活动的共存: 陆-陆碰撞过程中地幔流的响应与表现 [J]. *现代地质*, 18(4): 435-442.
- 付治国, 瓮纪昌, 燕长海, 高胜淮. 2010. 东秦岭冷水北沟铅锌银矿床同位素地球化学特征 [J]. *物探与化探*, 34(1): 34-39.
- 河南省地质局地质三队. 1975. 骆驼山硫多金属矿区勘查报告 [R]. 郑州: 河南省地质局地质三队. 17-58.
- 侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 凌洪飞. 2006. 胶东蓬莱金成矿区的 S-Pb 同位素地球化学和 Rb-Sr 同位素年代学研究 [J]. *岩石学报*, 22(10): 2524-2533.
- 胡乔青, 王义天, 王瑞廷, 李建华, 代军治, 王双彦. 2012. 陕西省凤太矿集区二里河铅锌矿床的成矿时代: 来自闪锌矿 Rb-Sr 同位素年龄的证据 [J]. *岩石学报*, 28(1): 258-266.
- 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 黎世美. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质与成矿(以东秦岭-桐柏为例) [M]. 南京: 南京大学出版社. 1-558.
- 黄典豪, 王义昌, 聂凤军, 江秀杰. 1985. 一种新的钼矿床类型——陕西黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质特征及成矿机制 [J]. *地质*

- 学报, (3):241-257+275.
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 何红蓼. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼-钼同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 13(3):221-230.
- 李铁刚, 武广, 刘军, 胡青, 张云付, 罗大峰. 2014. 大兴安岭北部甲乌拉铅锌银矿床 Rb-Sr 同位素测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(1):257-270.
- 李文博, 黄智龙, 许德如, 陈进, 许成, 管涛. 2002. 铅锌矿床 Rb-Sr 定年研究综述[J]. 大地构造与成矿学, 26(4):436-441.
- 李文博, 黄智龙, 陈进, 韩润生, 张振亮, 许成, 管涛. 2004. 会泽超大型铅锌矿床成矿时代研究[J]. 矿物学报, 24:112-116.
- 李永峰, 王春秋, 白凤军, 宋艳玲. 2004. 东秦岭钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿动力学背景[J]. 矿产与地质, 6:571-578.
- 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 郭保健, 白凤军. 2005. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景[J]. 矿床地质, 24(3):292-304.
- 刘建明, 赵善仁, 沈洁, 姜能, 霍卫国. 1998a. 成矿流体活动的同位素定年方法评述[J]. 地球物理学进展, 13(3):46-45.
- 刘建明, 沈洁, 赵善仁, 霍卫国, 姜能. 1998b. 金属矿床同位素精确定年的方法和意义[J]. 有色金属矿产与勘查, 7(2):107-113.
- 卢欣祥, 尉向东, 肖庆辉, 张宗清, 李惠民, 王卫. 1999. 秦岭环斑花岗岩的年代学研究及其意义[J]. 高校地质学报, 5(4):372-377.
- 卢欣祥, 李明立, 王卫, 于在平, 时永志. 2008. 秦岭造山带的印支运动及印支期成矿作用[J]. 矿床地质, 27(6):762-773.
- 路远发. 2004. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 33(5):459-464.
- 罗铭玖, 张辅民, 董群英, 等. 1991. 中国钼矿床[M]. 河南: 河南科学技术出版社. 108-131.
- 吕文德, 赵春和, 孙卫志, 燕建设. 2005. 河南栾川地区矽卡岩型铅锌矿地质特征——南泥湖钼矿外围找矿问题[J]. 地质调查与研究, 28(1):25-31.
- 吕文德, 赵春和, 孙卫志, 燕建设. 2006. 豫西南泥湖多金属矿田铅锌矿地质特征与成因研究[J]. 矿产与地质, 20(3):219-226.
- 毛景文, 王志良. 2000. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景初步探讨[J]. 矿床地质, 19(4):289-296.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 33(4):289-299.
- 毛景文, Stein H, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永峰, 藏文柱, 李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 78(1):121-131.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1):169-188.
- 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 王义天. 2006. 大规模成矿作用与大型矿集区[M]. 北京: 地质出版社. 58-70.
- 毛景文, 叶会寿, 王瑞廷, 代军治, 简伟, 向君峰, 周珂, 孟芳. 2009. 东秦岭中生代钼铅锌银多金属矿床模型及其找矿评价[J]. 地质通报, 28(1):72-79.
- 裴荣富, 吴良士. 1993. 金属成矿省的地质历史演化和成矿年代学研究新进展[J]. 矿床地质, 12(3):285-286.
- 裴荣富, 吴良士. 1994. 金属成矿省演化与成矿[J]. 地学前缘, 1(3-4):95-99.
- 孙省利. 2001. 西秦岭泥盆系西成矿化集中区烃碱流体成矿系列研究[博士学位论文]. 导师: 曾允孚, 何知礼. 成都: 成都理工学院. 43-44.
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 刘英超, 高延光, 王召林, 宋玉财, 薛万文, 鲁海峰, 王富春, 苏媛娜, 李真真, 王银喜, 张玉宝, 朱田, 俞长捷, 于玉帅. 2009. 玉树地区东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(6):747-758.
- 王彦斌, 唐赛寒, 王进辉, 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 田世洪. 2004. 安徽铜陵新桥铜金矿床黄铁矿 Rb/Sr 同位素年龄数据[J]. 地质论评, 50(5):538-542.
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 李惠民, 杨杰东. 2007. 东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 23(7):1749-1755.
- 王长明, 张寿庭, 邓军, 孙艳霞, 燕长海, 叶会寿. 2007. 河南冷水北沟铅锌矿地质地球化学特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 26(2):175-183.
- 武广, 陈毓川, 李宗彦, 杨鑫生, 刘军, 乔翠杰. 2013. 豫西银家沟硫铁矿多金属矿床 Re-Os 和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 32(4):809-822.
- 向君峰, 毛景文, 裴荣富, 叶会寿, 王春毅, 田志恒, 王浩琳. 2012. 南泥湖-三道庄钼(钨)矿的成岩成矿年龄新数据及其地质意义[J]. 中国地质, 39(2):458-473.
- 薛良伟, 庞继群, 王祥国, 周长命. 1999. 小秦岭 303 号石英脉流体包裹体 Rb-Sr、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 成矿年龄测定[J]. 地球化学, 28(5):473-478.
- 燕长海, 刘国印. 2004. 豫西南铅锌多金属矿控矿条件及找矿方向[J]. 地质通报, 23(11):1143-1148.

- 杨进辉,周新华. 2000. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代[J]. 科学通报, 45(14): 1547-1552.
- 杨竹森,侯增谦,蒙义峰,王训诚,曾普胜,田世洪,姜章平,姚孝德. 2002. 安徽铜陵矿集区流体系统与成矿[J]. 矿床地质, 21(增刊): 1080-1083.
- 叶会寿. 2006. 华北陆块南缘中生代构造演化与铅锌银成矿作用(博士论文)[D]. 导师:毛景文. 北京:中国地质科学院.
- 叶会寿,毛景文,李永峰,燕长海,郭保健,赵财胜,何春芬,郑榕芬,陈莉. 2006a. 豫西南泥湖矿田钼钨及铅锌银矿床地质特征及其成矿机理探讨[J]. 现代地质, 20(1): 165-174.
- 叶会寿,毛景文,李永峰,郭保健,张长青,刘王君,闫全人,刘国印. 2006b. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 80(7): 1078-1088.
- 翟裕生,王建平,邓军,彭润民,刘家军. 2008. 成矿系统时空演化及其找矿意义[J]. 现代地质, 22(2): 143-150.
- 张长青,李向辉,余金杰,毛景文,陈福坤,李厚民. 2008. 四川大梁子铅锌矿床单颗粒闪锌矿铷-锶测年及地质意义[J]. 地质论评, 54(4): 532-538.
- 张国伟,孟庆仁,于在平,孙勇,周鼎武,郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D辑), 26(3): 193-200.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,肖庆辉,等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京:科学出版社. 1-729.
- 张国伟,郭安林,董云鹏,姚安平. 2011. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学[J]. 地学前缘, 18(3): 1-12.
- 赵葵东,蒋少涌. 2004. 金属矿床的同位素直接定年方法[J]. 地学前缘, 11(2): 425-434.
- 郑伟,陈懋弘,徐林刚,赵海杰,凌世彬,吴越,胡耀国,田云,吴晓东. 2013. 广东天堂铜铅锌多金属矿床 Rb-Sr 等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 32(2): 259-272.
- 周涛发,岳书仓. 2000. 长江中下游铜、金矿床成矿流体系统的形成条件及机理[J]. 北京大学学报, 36(5): 697-707.
- 朱赖民,张国伟,李犇,郭波. 2008. 秦岭造山带重大地质事件、矿床类型和成矿大陆动力学背景[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(4): 384-390.

<http://www.kcdz.com>