

云南澜沧老厂深部斑岩钼(铜)矿成矿物质来源的同位素地球化学证据

赵晓勇 李峰 杨帆

(昆明理工大学 地球科学系, 云南 昆明 650093)

摘要:通过对云南澜沧老厂深部斑岩钼(铜)矿的 S、Pb、H、O 同位素地球化学特征的综合分析研究,探讨了隐伏斑岩型矿床的成矿物质来源。研究表明:斑岩钼(铜)矿体主要硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 在 $-3.99\text{‰} \sim +1.8\text{‰}$ 之间,平均值为 -1.32‰ ,分布范围较窄,指示硫具有壳-幔混合源特征。隐伏的成矿花岗斑岩和矿石中主要硫化物的铅同位素组成的变化范围和平均值均具明显的相似性, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化于 $17.863 \sim 18.701$ 之间(平均值为 18.411), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化于 $15.448 \sim 15.733$ 之间(平均值为 15.628), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化于 $37.753 \sim 39.104$ 之间(平均值为 38.615),指示矿区斑岩型矿体中的原始铅具有壳-幔混合源的特点,深部地幔也是重要源区之一。斑岩型钼(铜)矿体脉石矿物石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 在 $-9.51\text{‰} \sim +9.41\text{‰}$ 之间, δD 在 $-93\text{‰} \sim -46.2\text{‰}$ 之间,指示斑岩矿体成矿流体介质水既有岩浆水又有大气降水,其中,在远离主岩体的外接触带大气降水(雨水)参与成矿的程度相对较高。

关键词:斑岩钼(铜)矿体;成矿物质来源;同位素地球化学;澜沧老厂;云南省

中图分类号: P597; P618.65; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)05-0712-11

Isotopic geochemical evidence of the sources of ore-forming materials for the Laochang deep porphyry Mo(Cu) deposit in Lancang, Yunnan

ZHAO Xiao-yong, LI Feng and YANG Fan

(Department of Earth Sciences, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Based on a comprehensive analysis of S, Pb, H, O isotope geochemical characteristics of the Laochang deep porphyry molybdenum (copper) ore bodies, this paper deals with concealed porphyry metallogenic source material in Lancang of Yunnan Province. Studies show that the main sulfide $\delta^{34}\text{S}$ values of porphyry molybdenum (copper) ore bodies are between -3.99‰ and $+1.8\text{‰}$, concentrated in a narrow distribution area, with an average of -1.32‰ . The test results of S isotope show the crust-mantle characteristics with the mixture derived from the lower crust and the upper mantle. The main lead isotope $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of porphyry molybdenum (copper) ore bodies vary in the range of $17.863 \sim 18.701$, with an average of 18.411 . $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios vary in the range of $15.448 \sim 15.733$, with an average of 15.628 . $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios vary in the range of $37.753 \sim 39.104$, with an average of 38.615 . These data show that lead was derived not only from the formation but also from the ancient continental crust basement located in the lower part of the ore-bearing layer, deep mantle and volcanic magma. The $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values of porphyry molybdenum (copper) ore bodies vary between -9.51‰ and $+9.41\text{‰}$, δD values vary between -93‰ and -46.2‰ , suggesting that the ore-forming solution of the porphyry ore body was derived from media water from magmatic water and atmospheric precipitation,

收稿日期: 2012-04-20; 修订日期: 2012-08-15

基金项目: 国家危机矿山接替资源勘查项目(200653056, 20089943)

作者简介: 赵晓勇(1983-), 男, 汉族, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业, 主要从事成矿规律预测研究, E-mail: 418221107@qq.com;

通讯作者: 李峰(1957-), 男, 汉族, 教授, 主要从事区域地质与成矿学的教学与研究, E-mail: lifeng@kmust.edu.cn

with the atmospheric precipitation playing the dominant role.

Key words: porphyry molybdenum (copper) ore bodies; source of ore-forming materials; isotope geochemistry; Laochang of Lancang; Yunnan Province

云南澜沧老厂矿床是“三江”成矿带上重要的大型多金属矿床之一,开采历史悠久。2006年,国家危机矿山接替资源勘查项目的实施过程中,在矿区深部发现了具有大型-超大型潜力的厚大斑岩 Mo (Cu) 矿体(李峰等,2009a,2010a),老矿区找矿潜力被高度关注。在矿床地球化学方面,前人对该矿区火山喷流沉积型矿体群的稳定同位素组成(徐楚明等,1991;杨开辉,1992;龙汉生等,2009)、硫化物的微量元素(叶庆同等,1992;李虎杰等,1995)及稀土元素组成(龙汉生等,2011)、流体包裹体(叶庆同等,1992)等进行过较多研究,取得了一些成果。但对深部新发现的斑岩型矿体群的矿床地球化学研究尚很薄弱,制约了斑岩矿体成矿作用特征及成矿机理的深入认识。本文在对该矿区矿化系统结构认识的基础上,开展了与深部斑岩有关的矿体的同位素地球化学研究,以探讨该类矿体的成矿物质来源,丰富和完善澜沧老厂矿区矿床地球化学研究成果。

1 矿区地质概况及矿化系统结构

1.1 地质概况

澜沧老厂矿区大地构造位置处于“三江”地槽褶皱系昌宁-孟连裂谷带南部的澜沧裂谷中。澜沧裂谷基底为元古界变质岩系,东侧称澜沧群,西侧称西盟群,二者的岩性、岩相及年代相似。晚古生代以来,澜沧地区区域动力学环境多次转变,区域构造演变过程可分为裂谷期(D-P₁)→裂谷封闭-隆升期(P₂-K)→陆内碰撞造山期(新生代以来)三大构造期(李峰等,2010a)。区域大地构造体制的演变-转化,一方面造成老厂矿区构造复杂,南北向为主的基底断层和褶皱发育,并与北西向和北东向等断层相互交错(图1),另一方面使矿区不同成矿构造环境和成矿地质作用类型交替出现。其中,裂谷扩张期(C₁)形成矿区传统的火山喷流-沉积型银铅锌铜多金属矿床,喜山期(E₂)的陆内造山作用又在矿区形成一套与花岗斑岩有关的成矿系列[包括厚大的斑岩型钼(铜)矿体及热液脉状铅锌矿体],成为“双成矿系统同位叠加成矿”的典型矿床(李峰等,2009a)。

老厂矿区地层出露较好,由老到新主要为泥盆

系(D)、石炭系(C)和二叠系(P)。泥盆系(D)为一套碎屑岩夹硅质岩建造,以陆源碎屑岩和硅质岩为主,属浅海裂陷槽型沉积;下石炭统依柳组(C_{1y})为主要含矿层,是一套总厚540~870m的中基性火山岩-沉积岩建造,其灰岩中含珊瑚、腕足类和蜓类等化石;上石炭统(C₃)和下二叠统(P₁)为一套连续沉积的浅海相碳酸盐岩建造,发育时代意义较明确的蜓类化石。矿区深部出现隐伏花岗斑岩,据目前深孔揭露资料,隐伏花岗斑岩顶面标高大致在902~1530m之间,有北高南低的趋势,侵入最高层位为C₁⁵⁺⁶中部,总体受老厂背斜核部、F₁断层及F₄断层控制,长轴方向近南北,9-143线一带可能是隐伏岩体分布区,两断层交汇附近可能为高侵位区(图1)。岩体与依柳组(C_{1y})接触带出现厚大砂卡岩化-角岩化带。

1.2 矿化系统结构

西南有色309队在老厂矿区勘探钻孔中发现隐伏花岗斑岩脉及与之相关的复杂砂卡岩。之后,一些学者将老厂矿床的成因与隐伏岩体联系起来,如徐楚明等(1991)、欧阳成甫等(1993)提出老厂矿床为与地洼期隐伏岩体有关的中偏高温热液多因复成矿床,薛步高(1995)认为老厂为燕山晚期(主)含锡花岗岩(隐伏)外带岩浆热液型银铅多金属矿床等。尽管如此,以往的研究中,多数学者将澜沧老厂矿床定位为火山喷流沉积成因,研究对象基本为火山岩系中的I、II和III号银铅锌矿体群,对深部隐伏岩体的成矿作用特征重视不够。

2008年以来,老厂矿区相继在深部花岗斑岩体内及其接触带发现厚大斑岩型钼(铜)矿体群(Ⅵ矿体群),在南北向主干断裂带层内发现大脉状铅锌银矿体(Ⅳ矿体群),在Ⅱ矿体群之下确认存在黄铁矿型铜矿体(Ⅴ矿体群)(李峰等,2012),地质找矿获得重要突破。李峰等(2009a,2010a)根据不同矿体在成矿条件、成因及时空分布上的特点,鉴别出I、II和Ⅴ矿体群为晚古生代大陆裂谷背景下的火山喷流沉积成矿作用产物,Ⅲ、Ⅳ、Ⅵ号矿体群为始新世中晚期陆内碰撞造山背景下隐伏斑岩成矿作用的产物。因此,老厂矿区是由六类不同类型矿体组成的矿化系统——“六类一体”矿化系统,其结构具以

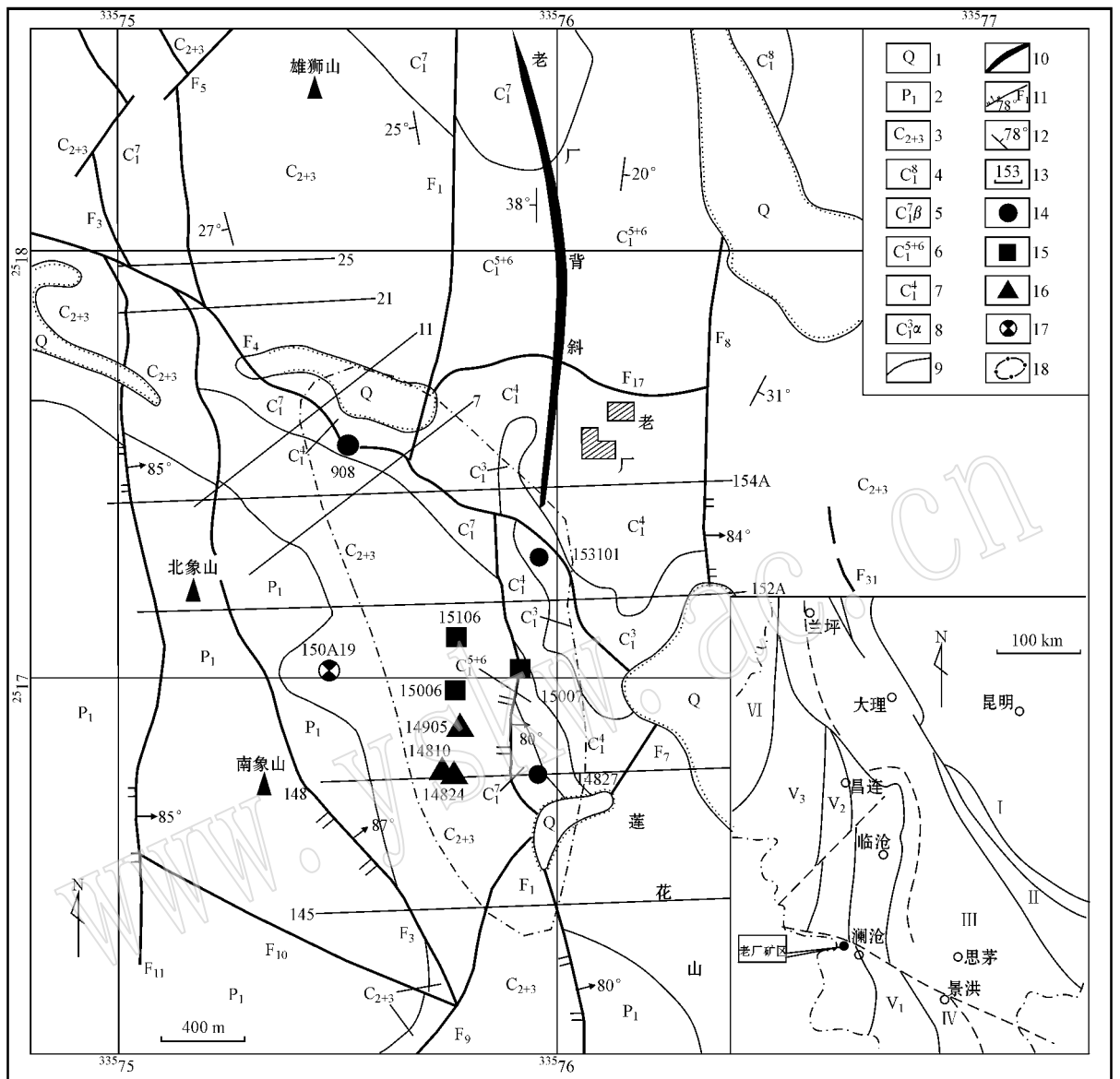


图 1 云南澜沧老厂矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the Laochang ore district in Lancang, Yunnan

1—第四系坡积冲积层；2—二叠系块状白云质灰岩；3—中上石炭统珊瑚灰岩；4—下石炭统沉积岩；5—下石炭统玄武岩及其凝灰岩；6—下石炭统粗面安山质凝灰岩；7—下石炭统安山质凝灰角砾岩夹沉积岩；8—下石炭统安山岩、集块岩；9—地质界线；10—背斜轴；11—断层及编号；12—地层产状；13—勘探线号；14—见斑岩、砂卡岩、辉钼矿钻孔；15—见花岗斑岩钻孔；16—见砂卡岩、辉钼矿钻孔；17—见砂卡岩钻孔；18—预测花岗斑岩体范围；I—扬子板块；II—哀牢山结合带；III—兰坪-思茅微板块；IV—澜沧江结合带；V₁—临沧岛弧带；V₂—昌宁-孟连晚古生代裂谷带；V₃—保山微古陆；VI—腾冲微板块

1—Quaternary alluvial-slope wash layer；2—Lower Permian dolomitized limestone；3—Middle-Upper Carboniferous coral limestone；4—Lower Carboniferous sedimentary rock；5—Lower Carboniferous basalt and basaltic tuff；6—Lower Carboniferous trachyandesite-tuff；7—Lower Carboniferous andesitic tuff breccia intercalated with sedimentary tuff；8—Lower Carboniferous amygdaloidal andesite and agglomerate；9—geological boundary；10—anticlinal axis；11—fault and its serial number；12—stratigraphic attitude；13—serial number of exploration line；14—drill hole intersecting granite porphyry, skarn and molybdenite；15—drill hole intersecting granite porphyry；16—drill hole intersecting skarn and molybdenite；17—drill hole intersecting skarn；18—inferred granite porphyry zone；I—Yangtze plate；II—Ailao Mountain suture；III—Lanping-Simao microplate；IV—Lancangjiang suture；V₁—Lincang island-arc；V₂—Late Paleozoic Changning-Menglian rift zone；V₃—Baoshan micro-terrain；VI—Tengchong microplate

下重要特色 在剖面上(图 2),由深部到地表,矿体类型依次为:斑岩型中高温热液充填钼(铜)矿体(Ⅵ

号矿体群)→火山喷流-沉积型含铜黄铁矿矿体(Ⅴ号矿体群)→火山喷流-沉积型黄铁铅锌银矿体(Ⅰ-

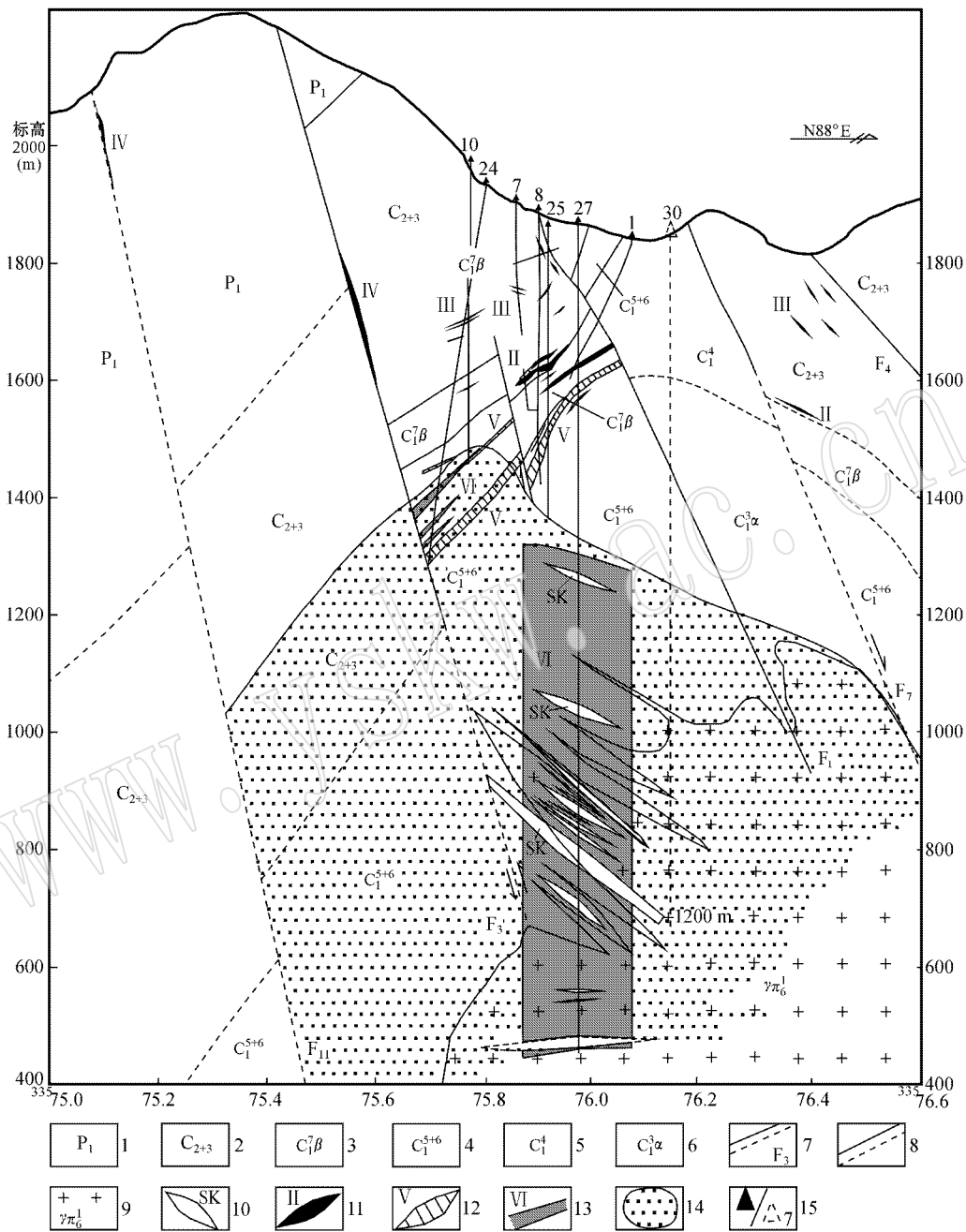


图 2 老厂矿区 148 线剖面图

Fig. 2 Geological section along Line148 of the Laochang deposit

1—下二叠统白云质灰岩；2—中上石炭统灰岩、白云岩；3—下石炭统玄武岩及其凝灰岩；4—下石炭统粗面安山质凝灰岩、角砾熔岩夹沉积岩；5—下石炭统安山质角砾岩夹沉积岩；6—下石炭统杏仁状安山岩、集块岩；7—实测、推测断层及编号；8—地质界线；9—花岗斑岩体；10—石榴石透辉石砂卡岩带；11—铅锌银矿体及编号；12—含铜黄铁矿体及编号；13—钼矿体；14—细脉浸染状钼（铜）矿化区；15—见矿钻孔/设计钻孔

1—Lower Permian dolomite limestone ; 2—Middle-Upper Carboniferous limestone and dolomite ; 3—Lower Carboniferous basalt and stuff ; 4—Lower Carboniferous trachyte-andesite tuff ; 5—Lower Carboniferous andesitic breccia intercalated with tuffite ; 6—Lower Carboniferous amygdaloidal andesite , agglomerate ; 7—fault or inferred fault and its serial serial number ; 8—geological boundary ; 9—granite porphyry ; 10—garnet-diopside skarn zone ; 11—Pb-Zn-Ag ore body and its serial number ; 12—Cu-rich pyrite body ; 13—Mo ore body ; 14—veinlet-disseminated Mo (Cu) mineralized zone ; 15—drill hole/ designed drill hole and serial number

II号矿体群)→热液充填型铅锌银矿体(IV、III号矿体),不同成矿系列及不同成因类型的矿体集中叠置,是典型的多因复成矿化系统,在同类矿床中罕见,在成矿元素分带上,由下至上总体构成 $Md(Cu) \rightarrow Cu, S \rightarrow Pb-Zn-Ag \rightarrow Ag-Pb(Zn)$ 的成矿元素垂直分带,两大成矿系列的成矿元素分带有机耦合在一起;在成矿规模上,火山喷流-沉积成矿系列的矿床规模已达大型,斑岩成矿系列的矿床规模也具大型-超大型潜力,构成“双大叠置”的特有现象;在时间序列上,早石炭世的3层火山-喷流沉积型矿体群与早喜山期斑岩有关的3个细脉-浸染状和脉状矿体群叠置与穿插,“新-老”同位叠置特征显著,形成特有的“三层叠三带”的矿化空间结构(李峰等, 2009a, 2009b, 2010a)。

2 矿体同位素地球化学特征及成矿物质来源分析

澜沧老厂矿区深部的 $Md(Cu)$ 矿体(VI号矿体群)产于花岗斑岩体内至矽卡岩-角岩接触带,主要包括矽卡岩型细脉-浸染状 $Md(Cu)$ 矿体和花岗斑岩型矿体。矿体南北分布长约1200 m,东西宽约730 m,单孔钼矿体最大厚度达869.40 m,矿体平均厚度为320 m,具大型-超大型规模潜力。矿体中矿石矿物组成比较复杂,金属矿物主要有辉钼矿、黄铁矿,少量黄铜矿、闪锌矿、雄黄、毒砂,偶见白钨矿、辉铋矿、辉铊矿等;非金属矿物主要有透辉石、石榴石、符山石、绿帘石、绿泥石、长石、石英、方解石、绢云母,少量萤石、黑云母等。辉钼矿呈薄膜状、微脉状或他形微细鳞片状分布于矽卡岩、花岗斑岩、矽卡岩化-硅化凝灰岩或角岩中,粒度较细,粒径一般介于0.02~0.50 mm之间。

本次研究所用样品采自老厂矿区平巷和钻孔岩芯,在野外观察和室内研究的基础上,选取具有代表性的矿石样品进行分离粉碎,在显微镜下手工挑选,单矿物纯度均在99%以上。S、Pb、H、O同位素均在国土资源部中南矿产资源监督检测中心进行测试,主要测试仪器为MAT-251气体质谱计和MAT-261气体质谱计。其中对Pb的测试过程为,样品先用三酸分解,然后用树脂交换法分离出铅,蒸干后进行同位素测定,测试仪器采用MAT-261气体质谱仪,分析精度对1 μg 铅含量其 $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 低于0.05%, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 一般不大于0.005‰。对国际标样MBS981的测试结果为: $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.162189$,误

差0.0027%; $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.913626$,误差0.0059%; $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.059201$,误差0.0015%。测试依据标准为DZ/T0184.12-1997《岩石、矿物中微量铅的同位素组成的测定》。

2.1 硫同位素组成

本次测试共14件样品,其中4件取自1600平巷,1件样品取自ZK14703孔岩芯,9件取自ZK14827孔。黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿、花岗斑岩全岩的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 组成分析结果见表1。

表1 老厂矿区斑岩矿体硫同位素组成

Table 1 Porphyry ore body sulfur isotopic compositions of the Laochang ore deposit

序号	样品号	采样位置	矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
1	1600-B1	1600中段148线	黄铁矿	+1.80
2	1600-B3-1	1600平巷绕道口	黄铁矿	-1.10
3	1600-B3-3	1600平巷绕道口	方铅矿	-2.40
4	1600-B3-2	1600平巷绕道口	闪锌矿	-3.30
5	ZK14703-1	ZK14703	闪锌矿	-1.10
6	TW-4	ZK14827	辉钼矿	-1.02
7	TW-5	ZK14827	辉钼矿	-1.05
8	TW-6	ZK14827	辉钼矿	-3.99
9	TW-7	ZK14827	辉钼矿	+0.30
10	E-51	ZK14827	花岗斑岩全岩	+10.06
11	E-67	ZK14827	花岗斑岩全岩	+3.56
12	E-73	ZK14827	花岗斑岩全岩	+3.00
13	E-82	ZK14827	花岗斑岩全岩	+3.34
14	E-84	ZK14827	花岗斑岩全岩	+7.15

由表1可知,所有样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为-3.99‰~+10.06‰,均值为+1.09‰,峰值出现在-1‰附近,大部分样品集中在-3.99‰~+3.56‰之间。从不同矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布来看(图3),花岗斑岩全岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布相对分散,分布在+3.00‰~+10.06‰之间,离差为7.06‰,平均值为+5.42‰,硫化矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布相对集中,呈塔式分布,主要分布在-3.99‰~+1.80‰之间,平均值为-1.32‰。黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围-1.1‰~+1.80‰,离差为2.9‰,平均值为+0.35‰;方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-2.40‰;闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围-3.3‰~-1.1‰,离差为2.2‰,平均值为-2.2‰;辉钼矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围-3.99‰~+0.30‰,离差为4.29‰,平均值为-1.44‰。对比9件硫化矿物样品, $\delta^{34}\text{S}$ 值变化不大,虽然有一定的差别,但变化区间相似,总体上反映了硫化矿物中的硫来源比较集中,具深源硫的特点;花岗斑岩全岩样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值全部为正值,和黄铁矿、方铅矿、闪锌矿相比明显偏高。造

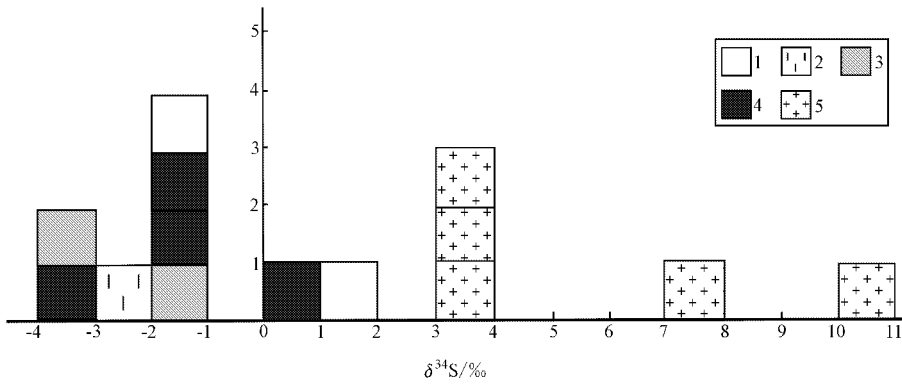


图 3 老厂矿区斑岩矿体 S 同位素直方图

Fig. 3 Porphyry ore body sulfur isotope histogram of the Laochang ore district in the Lancang ore field
 1—黄铁矿；2—方铅矿；3—闪锌矿；4—辉钼矿；5—花岗斑岩
 1—pyrite；2—galena；3—sphalerite；4—molybdenite；5—granite-porphry

成这种情况的原因可能是花岗斑岩全岩受围岩中的地壳物质影响，从而产生硫的富集。澜沧老厂斑岩钼（铜）矿的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围比幔源硫 $\delta^{34}\text{S} = -3\text{‰} \sim 3\text{‰}$ (Chaussidon and Lorand, 1990) 的范围要宽，比海水硫 $\delta^{34}\text{S} = 20\text{‰}$ 左右要小得多，也不符合具有较大的负值的沉积物中还原硫 (Rollinson, 1993) 的特征。因此结合 Ohmoto (1972)、Barnes (1979) 的研究理论，笔者认为澜沧老厂斑岩矿床中的硫同位素不是单一地幔物质来源。通过与基性岩和陨石 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围对比可推测，澜沧老厂斑岩钼铜矿床的硫同位素主要来源可能为地幔或者地壳深部壳幔物质均一化的深部岩浆。

2.2 铅同位素组成

2.2.1 矿石、岩石铅同位素组成特征

矿石铅同位素组成是研究成矿物质来源比较有效的方法之一。由于铅的质量数大，不同铅同位素之间相对质量差小，铅在地质作用过程中的同位素组成通常变化不明显，因此成矿热液中的铅基本可以继承其源区铅同位素组成的特征。铅同位素在研究矿石成因及成矿环境、物质来源等方面得到广泛应用。本次分析黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、花岗斑岩共 15 件硫化物铅的组成，测试结果与同位素组成变化和平均值见表 2。由表 2 可知，老厂矿区斑岩及 $\text{M}\alpha(\text{Cu})$ 矿体中硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化于 17.863~18.701 之间，平均值为 18.411，极差为 0.838， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值介于 15.448~15.733 之间，平均值为 15.628，极差为 0.285 (较窄)， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化于 37.753~39.104 之间，平均值为 38.615，极差为 1.351 (较宽)。不同矿物的

铅同位素组成也有较大的差异，闪锌矿铅同位素组成相对稳定，变化范围最小，其 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的比值分别为 18.505~18.701、15.651~15.733 和 38.646~39.104，黄铁矿的比值变化范围最大， $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的比值分别为 17.863~18.688、15.448~15.716、37.753~39.053，花岗斑岩铅同位素比值变化范围一般， $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的比值分别为 17.988~18.621、15.586~15.663、38.246~38.91。但上述铅同位素的组成极差均小于 1，说明铅来源比较稳定。总体上，无论是花岗斑岩还是硫化矿物，铅同位素组成的变化范围和平均值均具明显的相似性，与上地壳、下地壳、地幔及造山带铅同位素平均值比较 (表 2)，矿区硫化物和花岗斑岩明显与造山带的铅同位素组成相似性高。

2.2.2 铅同位素示踪

矿石铅同位素是示踪成矿物质来源的重要手段之一。利用矿石铅同位素组成分析成矿物质来源，是上个世纪 90 年代以来矿床地球化学研究中常用的有效方法 (涂光炽等, 1987; 王集磊等, 1996; 张乾等, 2000; 侯增谦等, 2003)。

通过澜沧老厂铅同位素演化模式图解 (图 4) 可知，斑岩和硫化物的数据投点集中在上地壳与造山带同位素演化曲线范围之内，落在地幔与造山带同位素演化曲线范围内的投点数量次之，花岗斑岩投点分布与硫化物投点分布相比，花岗斑岩投点更加集中，硫化物相对分散。硫化物投点的源区跨度较大，分布在地幔-造山带-上地壳同位素演化曲线之间，7

表 2 老厂矿区斑岩矿体铅同位素组成变化和平均值

Table 2 Porphyry ore body lead isotope composition variation and average value of the Laochang ore field

序号	样号	测试对象	采样位置	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
1	1600-B1	黄铁矿	1600 中段 148 线	18.657	15.686	38.950
2	1600-B3-1	黄铁矿	1600 平巷绕道口	18.688	15.716	39.053
3	B-30-1	黄铁矿		17.874	15.452	37.753
4	K-1-1	黄铁矿		17.863	15.448	37.771
		平均值		18.271	15.826	38.382
5	1600-B3-3	方铅矿	1600 平巷绕道口	18.677	15.703	39.007
6	1600-B3-2	闪锌矿	1601 平巷绕道口	18.701	15.733	39.104
7	ZK14703-1	闪锌矿	ZK14703 430 m	18.505	15.651	38.646
		平均值		18.603	15.692	38.875
8	88061	花岗斑岩	ZK15007 355 m	18.561	15.614	38.695
9	88088	花岗斑岩	ZK15006 427 m	17.988	15.652	38.246
10	88090	花岗斑岩	ZK15006 440 m	18.552	15.661	38.766
11	E-51	花岗斑岩	ZK14827 998.5 m	18.205	15.586	38.405
12	E-67	花岗斑岩	ZK14827 1 214.8 m	18.426	15.601	38.623
13	E-73	花岗斑岩	ZK14827 1 302.8 m	18.564	15.620	38.774
14	E-82	花岗斑岩	ZK14827 1 389 m	18.621	15.663	38.910
15	E-84	花岗斑岩	ZK14827 1 412 m	18.283	15.628	38.524
		平均值		18.40	15.628	38.618
		上地壳*		19.33	15.73	39.08
		下地壳*		17.27	15.29	38.57
		地幔*		18.10	15.42	37.30
		造山带*		18.86	15.62	38.83

资料来源: 1~7、11~15 据本文; 8~10 据徐楚明等(1991); 表中带* 据赵伦山等(1988)。

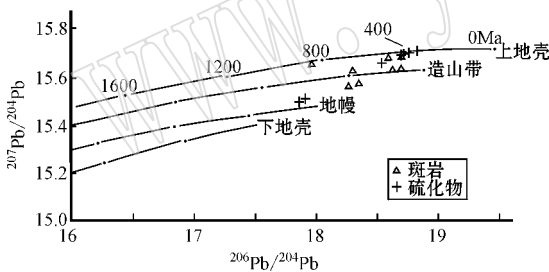


图 4 老厂矿区斑岩矿体铅同位素演化模式图解

Fig. 4 Porphyry ore body lead isotope evolution model of the Laochang ore deposit

个硫化物数据投点中有 5 个分布于造山带和上地壳同位素演化曲线之间并靠近上地壳一缘, 2 个分布于地幔和造山带同位素演化曲线之间, 靠近地幔一缘; 花岗斑岩投点相对集中, 8 个花岗斑岩斑岩投点中有 2 个点靠近上地壳同位素演化曲线, 6 个分布于地幔-造山带-上地壳之间同位素造山带演化曲线的两侧, 呈零星状分布。并且整体上投点的线性趋势与单阶段同位素演化曲线斜交, 并与零等时线斜交, 显示矿石铅属于多阶段演化的异常铅。硫化物和花岗斑岩的铅同位素分布呈较好的线性排列, 说明二者的铅源

相似。而且, 硫化物的投点区范围与花岗斑岩的投点区也基本相似, 均在地幔-造山带-上地壳同位素演化曲线区间范围之内。通常情况下, 造山带铅具幔源和壳源(上部地壳和下部地壳)铅混合的特点, 陈琿等(2010)、杨帆等(2012)研究表明, 澜沧老厂隐伏花岗斑岩是在青藏高原新生代碰撞造山主碰撞构造环境下形成壳源为主的壳幔源混合成因花岗斑岩。结合演化模式图解可以判断, 矿区斑岩型矿体中的原始铅具有壳-幔混合来源且多阶段演化的特点。

Doe 和 Zartman(1979)根据全世界不同构造环境显生宙岩石和矿床的全部铅同位素组成, 划定了不同地质环境所处的独特的同位素范围。将澜沧老厂矿区测试的 7 件硫化物、8 件花岗斑岩样品铅同位素组成投点于 Doe 和 Zartman 的源区图解上, 由图 5 可以看出, 铅同位素的投点大部分落入克拉通化地壳区, 部分落在克拉通化地壳与成熟岛弧交界区域, 少部分投点落入大洋火山岩区。斑岩比硫化物矿铅投点分布要相对的集中, 斑岩铅投点多分布在成熟岛弧区域, 硫化物铅投点多分布于克拉通化地壳区域, 斑岩和硫化物铅投点在大洋火山岩区域

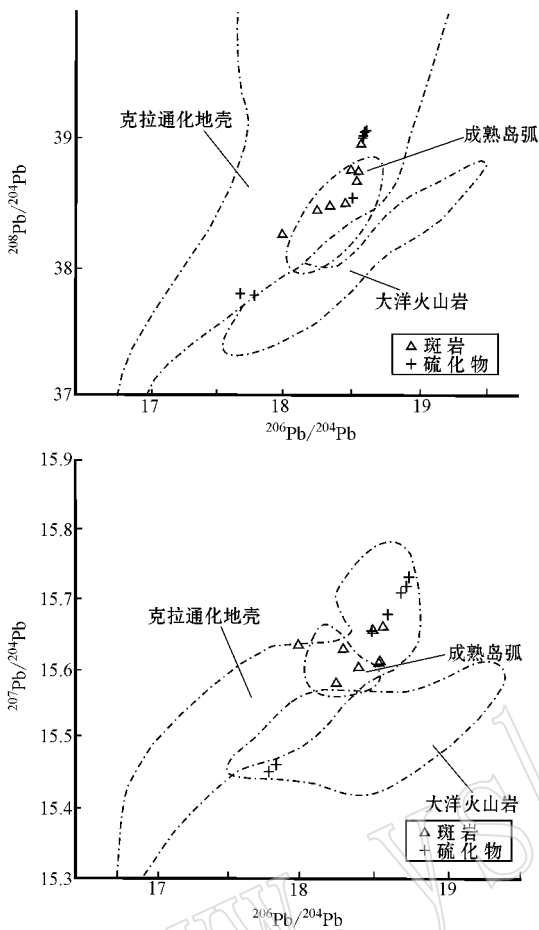


图 5 老厂斑岩矿体铅同位素构造环境图解

Fig. 5 Tectonic setting diagram of porphyry ore body lead isotope composition in Laochang

少有分布。整体上除个别分散于集中区以外，铅投点绝大多数分布比较集中，说明铅来源相对集中。由上可知，澜沧老厂斑岩矿体的初始铅主要源自含矿层之下的古陆壳基底，初始铅的演化过程与陆内碰撞造山期的斑岩成矿作用过程相吻合（在新生代陆内碰撞造山期，微板块碰撞和陆块对挤，激发深部地幔局部熔融，沿穿透性构造发育的早期裂谷带轴部上涌注入下地壳，诱发下地壳物质熔融，形成壳幔混合源含矿岩浆，沿走滑断裂系与SN断层提供的通道，在花岗斑岩体就位与围岩交代，形成斑岩钼铜矿体淀积）。另外，有两个点落入大洋火山岩区，可能与幔源岩浆活动相关。这与李峰等（2010b）研究认为澜沧老厂矿区含矿花岗斑岩体的成因与地壳重熔有关、总体属于有幔源物质混入的壳幔源混合成因花岗岩的结论相一致。

2.3 氢、氧同位素组成

直接测试老厂矿区斑岩 $Md(Cu)$ 矿体中石英单矿物，获得 4 个样品的 $\delta^{18}O_{\text{矿物}}$ ， $\delta^{18}O_{H_2O}$ 是根据石英-水氧同位素平衡分馏方程： $1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.42 \times 10^6 \times T^{-2} - 2.86$ （张理刚，1985），将石英的 $\delta^{18}O_{\text{矿物}}$ 换算成与之平衡的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值，公式中的温度 T 用所测与之对应的石英中的均一温度的平均值。处理后结果（表 3）显示，石英的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 $-9.59\text{‰} \sim +9.41\text{‰}$ ，平均值为 -1.07‰ ，极差为 19‰ ； δD 为 $-93\text{‰} \sim -46.2\text{‰}$ ，平均值为 -68.13‰ ，极差为 -46.8‰ 。

Taylor（1974）、芮宗瑶等（1984）、Zhu 等（2001）的研究表明，岩浆水和大气降水是斑岩型矿床成矿流体系统的主要组成部分。据表 3 在 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系图解中投点（图 6）可以看出，该矿床成矿流体的投影点相对集中，1、3 号样投点落在通常认为的大气降水区岩浆水附近，5 号样点落在雨水线上，6、7 号样点落在雨水线（大气降水）附近，显示成矿热液为大气降水与岩浆水混合的特征。1、2、3 号样品为主成矿期的产物（徐楚明等，1991），从矿物结晶形态、共生组合和测试温度（表 3），可以知道 1 号样品为主成矿阶段早期产物，3 号样品为主成矿阶段晚期产物，通过对比 1 号、3 号成矿结晶时的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值，可以知道主成矿阶段的样品由早期到晚期的投点是由岩浆水位置向大气降水位置漂移的。因此，对比表 3，可知随着样品的采样深度加大，测试出的样品 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值有逐渐变小的趋势，与 1、2、3 号成矿规律一致，4、5、6、7（偏向雨水线）成矿阶段要比 1、2、3 号略晚。由岩浆水位置向大气降水位置漂移的原因可能有以下两种：① 本次样品采取自斑岩成矿体系中上部位置，所以测试出的样品数据体现出大气降水入渗参与成矿作用的特征；② 结合前人的研究推测主成矿阶段成矿溶液早期是以深部岩浆水为主，后来随着成矿作用过程的进行，大气降水的加入且所占的比重越来越大，从而显示斑岩矿体成矿热液为岩浆水向大气降水漂移的混合溶液特征。

综上所述，澜沧老厂斑岩 $Md(Cu)$ 矿的成矿过程可以概括为：在新生代陆内碰撞造山期，幔源物质注入地壳岩浆源区引起上地壳底部重熔形成含矿岩浆，后来原始岩浆水和大气降水的加入、裂谷带的南北向基底主干断裂及北西向断裂提供深浅沟通的通

表 3 老厂矿区斑岩矿体氢、氧同位素组成

Table 3 Porphyry ore body carbon, hydrogen and oxygen isotope composition of the Laochang ore deposit

序号	样号	样品	均一温度/℃	$\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	采样位置
1	L8604	石英	276	17.7	-92	9.21	1925 中段 1-2 穿脉
2	L8605	石英	276	17.9		9.41	1925 中段 1-2 穿脉
3	L8761	石英	264	13.1	-93	4.1	1925 中段 9 穿脉
4	E-29	石英	259	3.81	-67.2	-5.41	ZK14827 的 659.4 m
5	E-37	石英	246	1.87	-48.2	-7.97	ZK14827 的 717.5 m
6	E-61	石英	308	-0.02	-46.2	-7.29	ZK14827 的 1 174.3 m
7	E-77	石英	252	-0.04	-62.2	-9.59	ZK14827 的 1 342.5 m

资料来源: 1~3 据徐楚明等(1991); 4~7 来自本文。

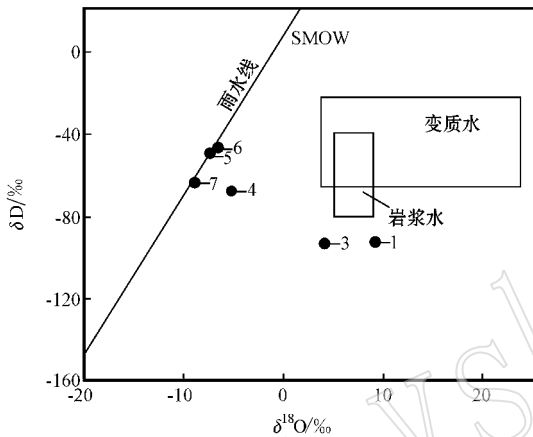


图 6 老厂矿区斑岩矿体 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图解
(图中所示序号与表 3 中序号一致)

Fig. 6 Porphyry ore body $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ diagram of the Laochang ore deposit

道,在花岗斑岩体就位于裂谷期火山建造内的过程中,岩浆流体大量分凝与围岩交代,形成斑岩 $\text{Mo}(\text{Cu})$ 矿体沉积。

3 结论

(1) 澜沧老厂矿区深部隐伏斑岩 $\text{Mo}(\text{Cu})$ 矿体硫化物的硫同位素组成具相似性, $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 $+1.09\text{‰}$, 成矿系统中的硫主要以深源岩浆硫为主并有地层硫的参与, 说明深部地质作用对斑岩成矿系统具有重要的贡献。

(2) 成矿花岗斑岩与斑岩 $\text{Mo}(\text{Cu})$ 矿体硫化物铅同位素组成具有高度一致性, 主要为上地壳-造山带-地幔铅, 具有壳幔混合来源的特点, 原始铅源与古陆壳基底和幔源岩浆活动有关。

(3) 氢-氧同位素组成研究表明, 斑岩成矿系统中的成矿流体具多来源特点, $\text{Mo}(\text{Cu})$ 矿体成矿溶液

介质水既有岩浆水又有大气降水, 早期以深源流体为主, 后来随着成矿作用过程的进行, 大气降水加入所占的比重越来越大。

References

- Barnes H L. 1979. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (Second edition) [M]. New York, 509-567.
- Chaussidon M and Lorand J P. 1990. Sulphur isotope composition of orogenic spinal lherzolite massifs from Ariege (North-eastern Pyrenees, France): An ion microprobe study [J]. *Geochemical et Cosmochimica Acta*, 54: 2 835-2 846.
- Chen Hui, Li Feng, Jian Runtang, et al. 2010. Typomorphic characteristics and geological significance of the zircon from the Laochang granite porphyry in Lancang, Yunnan Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(1): 41-49 (in Chinese with English abstract).
- Doe B R and Zartman R E. 1979. Plumbotectonics: the phanerozoic [A]. Barnes H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* [C]. New York: Wiley, 22-70.
- Hou Zengqian, Han Fa, Xia Linqi, et al. 2003. Hydrothermal Systems and Metallogeny on the Modern and Ancient Aea-Floor [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Li Feng, Chen Hui, Lu Wenju, et al. 2010b. Rock-forming ages of the Laochang granite-porphyry, Lancang Yunnan and their geological significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(1): 84-91 (in Chinese with English abstract).
- Li Feng, Lu Wenju, Yang Yingzhong, et al. 2009a. Mineralizing texture and metallogenic model of Laochang polymetallic deposit in Lancang, Yunnan [J]. *Geology and Exploration*, 45(5): 516-523 (in Chinese with English abstract).
- Li Feng, Lu Wenju, Yang Yingzhong, et al. 2009b. Mineralizing sys-

- tem texture and exploration idea of the Laochang polymetallic deposits in Lancang, Yunnan[J]. Geological Science and Technology Information, 28(6):45~50(in Chinese with English abstract).
- Li Feng, Lu Wenju, Yang Yingzhong, et al. 2010a. The Research of Crisis Mines Ore-forming Regularity and Prospecting: On Yunnan Lancang Old Mines Bed for Example[M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Press(in Chinese with English abstract).
- Li Feng, Lu Wenju, Shi Zenglong, et al. 2012. Determination of copper-bearing pyritic ore body in the Laochang deposit of Lancang county, Yunnan Province and its resource significance[J]. Geology and Exploration, 48(3):592~600(in Chinese with English abstract).
- Li Huijie, Tian Xu and Yi Facheng. 1995. The stable isotope geochemistry of the Lancang Pb-Zn-Ag-Cu deposit in Yunnan Province[J]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 4(5):278~282(in Chinese with English abstract).
- Long Hansheng, Luo Taiyi, Huang Zhilong, et al. 2009. Carbon and oxygen isotopic geochemistry of Laochang large-sized Ag polymetallic deposit in Lancang, Yunnan Province and its significance[J]. Mineral Deposits, 28(5):687~695(in Chinese with English abstract).
- Long Hansheng, Luo Taiyi, Huang Zhilong, et al. 2011. Rare earth element and trace element geochemistry of pyrite ores in the Laochang large size silver polymetallic deposit of Lancang, Yunnan province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 31(3):462~473(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal deposits[J]. Econ. Geol., 67:551~579.
- Ouyang Chengfu, Xu Chuming, Hu Chengqi, et al. 1993. Predicted existence of a concealed granitic body in the Laochang Silver-lead deposit and the geologic significance, Langchang, Yunan[J]. Geotectonica et Metallogenia, 17(2):119~126(in Chinese with English abstract).
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Longman Scientific and Technical Press, 306~308.
- Rui Zongyao, Huang Chongke, Qi Guoming, et al. 1984. Porphyry Copper(Molybdenum) Deposits of China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Taylor H P. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problem of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Econ. Geol., 69:843~884.
- Tu Guangchi, Wang Xiuzhang, Chen Xianpei, et al. 1987. China Stratabound Deposits Geochemistry(Volume II)[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Wang Jilei, He Boxi, Li Jianzhong, et al. 1996. Qinling-type Lead-zinc Deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Xu Chuming and Ouyang Chengfu. 1991. A study on the genesis of the Ag-Pb-Zn Deposit in Laochang Lancang, Yunnan[J]. Journal of Guilin College of Geology, 11(3):245~252(in Chinese with English abstract).
- Xue Bugao. 1995. Geological Characteristics of Ag-Pb polymetallic deposit outer Sn granite[J]. Mineral Resources and Geology, 9(3):12~23(in Chinese with English abstract).
- Yang Fan, Li Feng, Chen Hui, et al. 2012. Geochemistry and tectonic setting of the Laochang concealed granite porphyry in Lancang, Yunnan Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 31(1):39~49(in Chinese with English abstract).
- Yang Kaihui. 1992. Volcanogenic massive sulfide deposits in Sanjiang Region, southwest China, geological features and main types[J]. Mineral Deposits, 11(1):35~44(in Chinese with English abstract).
- Ye Qingtong, Hu Yunzhong, Yang Qing, et al. 1992. The Geochemical Background Character and Mineralization of Au-Ag-Pb-Zn in Sanjiang[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ligang. 1985. The Application of the Stable Isotope to Geology—the Hydrothermal Mineralization of Metal Activation and Its Prospecting[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qian, Pan Jiayong and Shao Shuxun. 2000. An interpretation of ore lead sources from lead isotopic compositions of some ore deposits in China[J]. Geochemical, 29(3):231~238(in Chinese with English abstract).
- Zhao Lunshan and Zhang Benren. 1988. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F, Jiang N and Zeng Y S. 2001. Geochemistry of the ore-forming fluids in gold deposits from the Taihang Mountains, northern China[J]. International Geology Review, 43:457~473.

附中文参考文献

- 陈 琨, 李 峰, 坚润堂, 等. 2010. 云南澜沧老厂花岗斑岩中铅石标型特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 29(1):41~49.
- 侯增谦, 韩 发, 夏林析, 等. 2003. 现代与古代海底热水成矿作用[M]. 北京:地质出版社.
- 李 峰, 陈 琨, 鲁文举, 等. 2010b. 云南澜沧老厂花岗斑岩形成年龄及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 34(1):84~91.
- 李 峰, 鲁文举, 杨映忠, 等. 2009a. 云南澜沧老厂多金属矿床矿化结构及成矿模式[J]. 地质与勘探, 45(5):516~523.
- 李 峰, 鲁文举, 杨映忠, 等. 2009b. 云南澜沧老厂多金属矿床矿化

- 系统结构及找矿思路[J]. 地质科技情报, 28(6):45~50.
- 李峰, 鲁文举, 杨映忠, 等. 2010a. 危机矿山成矿规律与找矿研究: 以云南澜沧老厂矿床为例[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 李峰, 鲁文举, 石增龙, 等. 2012. 云南澜沧老厂矿区含铜黄铁矿体的确认及其资源意义[J]. 地质与勘探, 48(3):592~600.
- 李虎杰, 田 煦, 易发成. 1995. 云南澜沧老厂铅锌银铜矿床稳定同位素地球化学研究[J]. 有色金属矿产与勘查, 4(5):278~282.
- 龙汉生, 罗泰义, 黄智龙, 等. 2009. 云南澜沧老厂大型银多金属矿床碳、氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质, 28(5):687~695.
- 龙汉生, 罗泰义, 黄智龙, 等. 2011. 云南澜沧老厂大型银多金属矿床黄铁矿稀土和微量元素地球化学[J]. 矿物学报, 31(3):462~473.
- 欧阳成甫, 徐楚明, 胡承绮, 等. 1993. 云南澜沧老厂银铅矿区隐伏花岗岩体预测及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 17(2):119~126.
- 芮宗瑶, 黄崇轲, 齐国明, 等. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 涂光帜, 王秀璋, 陈先沛, 等. 1987. 中国层控矿床地球化学(第二卷)[M]. 北京: 科学出版社.
- 王集磊, 何伯樾, 李键中, 等. 1996. 中国秦岭型铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 徐楚明, 欧阳成甫. 1991. 云南澜沧老厂银铅锌矿床成因研究[J]. 桂林冶金地质学院学报, 11(3):245~252.
- 薛步高. 1995. 含锡花岗岩外带银铅多金属矿床的地质特征[J]. 矿产与地质, 9(3):12~23.
- 杨帆, 李峰, 陈 琿, 等. 2012. 云南澜沧老厂隐伏花岗岩体地球化学特征及构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 31(1):39~49.
- 杨开辉. 1992. 三江地区火山岩成因块状硫化物矿床的基本特征与主要类型[J]. 矿床地质, 11(1):35~44.
- 叶庆同, 胡云中, 杨 清, 等. 1992. 三江地区区域地球化学背景和金银铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用—金属活化热液成矿作用及找矿[M]. 西安: 陕西科学技术出版社.
- 张 乾, 潘家永, 邵树勋. 2000. 中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J]. 地球化学, 29(3):231~238.
- 赵伦山, 张本仁. 1988. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社.

www.yskw.com.cn