

# 云南兰坪盆地西缘脉状铜矿床富 CO<sub>2</sub> 流体来源的 He 和 Ar 同位素证据

张锦让<sup>1,2</sup>, 温汉捷<sup>2\*</sup>, 邹志超<sup>3</sup>, 杜胜江<sup>2</sup>

(1. 成都地质矿产研究所 资源评价与矿床研究室, 四川 成都 610081; 2. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 3. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

**摘要:** 兰坪盆地西缘广泛发育大量沉积岩容矿脉状铜矿床, 这些脉状铜矿床的成矿流体以普遍存在大量富 CO<sub>2</sub> 流体包裹体为特征, 这在整个兰坪盆地是十分罕见的, 显著区别于盆地流体成矿系统主导成矿的 Pb-Zn 矿床。为探明这种富 CO<sub>2</sub> 流体的来源, 本文首次报道了盆地西缘 2 个代表性脉状铜矿床(连城、金满)主成矿阶段形成的黄铜矿、黄铁矿的 He 和 Ar 同位素组成的研究结果。结果表明, 2 个矿床不同样品流体包裹体中 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值变化较小, 介于 0.01~0.07 Ra 之间, 明显区别于幔源氦的 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 特征值(6~9 Ra), 而与壳源氦的 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 特征值(0.01~0.05 Ra)极其一致; <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比值变化较大, 介于 305~1142 之间, 明显高于大气中的 <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比值(295.5)。结合矿床地质、流体包裹体及 H、O 同位素地球化学特征, 认为兰坪盆地西缘脉状铜矿床中富 CO<sub>2</sub> 的成矿流体以混有少量饱和和大气水的地壳流体为主, 没有明显的幔源流体参与。

**关键词:** 富 CO<sub>2</sub> 流体; He-Ar 同位素; 地壳流体; 脉状铜矿床; 兰坪盆地西缘; 云南

中图分类号: P597; P618 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)02-0167-11

## Origin of CO<sub>2</sub>-rich ore-forming fluids in the vein-type Cu deposits in western Lanping Basin, Yunnan: Evidence from He and Ar isotopes

ZHANG Jin-rang<sup>1,2</sup>, WEN Han-jie<sup>2\*</sup>, ZOU Zhi-chao<sup>3</sup> and DU Sheng-jiang<sup>2</sup>

1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610081, China;  
2. Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;  
3. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract:** A series of vein-type Cu deposits occur in western Lanping Basin in Yunnan Province of China. The ore-forming fluids responsible for these vein-type Cu deposits are characterized by abundant CO<sub>2</sub>-rich fluid inclusions, which are significantly different from those of basinal fluid systems that are responsible for the Pb-Zn deposits in other parts of the Lanping Basin. In order to better understand the sources of the CO<sub>2</sub>-rich fluids, the authors report new results of helium and argon isotopic compositions of the fluid inclusions in pyrite and chalcopyrite formed at the main mineralizing stage for two vein-type copper deposits in western Lanping Basin. The analytical results show that the <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios of all samples range from 0.01 to 0.07 Ra, which are all significantly lower than the mantle values, but are consistent with the typical crustal values (0.01~0.05). The measured <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar values range from 305 to 1142, which are greatly higher than the atmospheric value of 295.5. Based on the results of geology, fluid inclusions and H, O isotopic geochemistry, we suggest that the CO<sub>2</sub>-rich fluids are mainly derived from the crustal fluids, with no considerable involvement of mantle-derived fluids. It may have been mixed with some amount of air-saturated water, which can reduce the <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratio for hydrothermal fluid, but has little effect on the R/Ra ratio.

**Key words:** CO<sub>2</sub>-rich fluids; helium and argon isotopes; deeply crustal fluids; vein-type Cu deposit; western Lanping Basin; Yunnan Province

收稿日期(Received): 2014-03-26; 改回日期(Revised): 2014-05-18; 接受日期(Accepted): 2014-08-27

基金项目: 国家青年科学基金(41403038); 国家重点基础研究发展计划(2009CB421005); 中国地质调查局综合研究项目(12120113094400)

作者简介: 张锦让(1985-), 男, 博士研究生, 矿床地球化学专业。

\* 通讯作者(Corresponding author): WEN Han-jie, E-mail: wenhanjie@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5891723

## 0 引言

“三江”中段兰坪盆地是一个典型的中新生代陆内盆地,在大地构造上属于环特提斯构造域,是我国著名三江构造-成矿带中的一个重要组成部分。兰坪盆地是著名的贱金属成矿区,其中,最为重要的是产出于盆地中北部的一系列喜马拉雅期沉积岩容矿 Pb-Zn 和 Cu-Ag 等多金属矿床<sup>[1-7]</sup>,主要包括中国最大的 Pb-Zn 矿床(金顶, Pb + Zn > 1000 万吨)、河西-三山 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属矿化区以及盆地西缘的一系列脉状 Cu 多金属矿床。这些矿床均产于碰撞造山带(新生代印度-亚洲大陆碰撞)环境,主体赋存于盆地内部中生代沉积地层中,受逆冲推覆构造系统控制,显著区别于世界已知的各类沉积岩容矿贱金属矿床,即喷流-沉积(Sedex) Pb-Zn、密西西比河谷(MVT)型 Pb-Zn、砂岩(SST)型 Pb-Zn 和砂岩(SSC)型 Cu 矿床<sup>[3-4,7-10]</sup>。此外,世界上沉积岩容矿贱金属脉状矿床中,多为 Pb-Zn-Ag 矿脉,独立的 Cu 矿脉比较少见,兰坪盆地西缘则存在大量独立的铜矿体,受控于西部逆推覆构造及其次级构造,主要包括金满 Cu-Ag 矿床、连城 Cu-Mo 矿床及一系列(30 余个)脉状 Cu 矿床(点)(恩棋、科登洞、小格拉等),部分矿床含少量 Ag,显示独特的成矿特点。

近年来的研究表明,兰坪盆地西缘脉状 Cu 矿床和盆地内普遍存在的 Pb-Zn 矿床在矿体产出形态、流体包裹体特征、同位素特征及成矿时代上都存在较大的差异<sup>[7,11-17]</sup>。

对兰坪盆地西缘脉状铜矿床成矿流体性质的认识出现颇多分歧,争论主要集中在盆地流体<sup>[5,18-20]</sup>和与深部作用(隐伏岩浆活动、深部变质作用、甚至幔源流体活动)有关的流体上<sup>[15,21,22]</sup>。成矿流体性质认识的具大分歧,也导致矿床成因亦存在很大争议,如“改造成因矿床”<sup>[19,23]</sup>、“喷流(热水)沉积矿床”<sup>[18,24]</sup>和“造山型铜矿床”<sup>[4]</sup>等。

总结前人研究成果,笔者发现争议的焦点主要集中在成矿流体来源的问题上。笔者通过系统的流体包裹体研究表明,金满 Cu-Ag 和连城 Cu-Mo 矿床成矿流体整体上是一种中高温、中低盐度、极富 CO<sub>2</sub> 的流体(CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 包裹体均一温度集中在 260~340 °C,盐度集中在 1%~4% NaCl)<sup>[17]</sup>。虽然仅从流体成分还不能确定本区富 CO<sub>2</sub> 流体的来源<sup>[25-26]</sup>,但至少可以确定不应是大气降水主导的盆地流体,

不属于典型的盆地流体系统,这在整个兰坪盆地是十分特殊的<sup>[9,26-31]</sup>。探讨这种富含 CO<sub>2</sub> 流体的来源对研究整个盆地西缘脉状铜矿床成矿流体特征及其矿床成因都具有非常重要的意义。前人对研究区脉状铜矿床(金满、连城等)成矿流体来源和演化的研究,主要侧重于 C、H、O、S 等稳定同位素地球化学方面<sup>[6,14,18,19,24]</sup>,然而,由于水岩作用和同位素交换反应等因素的影响,使得 C、H、O、S 等稳定同位素组成示踪流体来源常具有多解性。

稀有气体具有化学惰性,在地质作用过程中一般不参与化学反应;并且在不同来源的流体中具有极不相同的同位素组成,特别是地壳氦(<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He = 0.01~0.05 R/Ra; Ra 代表大气氦的 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值,为 1.4×10<sup>-6</sup>)和地幔氦(<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He = 6~9 R/Ra)的 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值存在高达近 1000 倍的差异<sup>[32-34]</sup>,从而使得成矿流体的 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值可灵敏地记录幔源氦的加入。另外,成矿流体中 <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比值如果大于大气中 <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 的特征值(295.5),就说明是有部分地壳或者地幔组分的加入<sup>[35-36]</sup>。因此,稀有气体,尤其是 He 和 Ar 同位素已经成为成矿流体来源的有效示踪剂,尤其在识别地幔流体参与成矿,揭示矿床成因和全面理解成矿动力学背景方面被广泛应用<sup>[11,32,37-40]</sup>。

本文首次报道盆地西缘 2 个代表性脉状铜矿床主成矿阶段黄铜矿、黄铁矿 He 和 Ar 同位素组成的研究结果,并结合前人研究成果,进一步探讨成矿流体的来源、矿床成因及其对区域成矿作用的指示意义。

## 1 成矿地质背景和矿床地质

西南“三江”位于特提斯与环太平洋两大巨型构造域的结合部位,受到印度板块和欧亚板块相互作用的影响,经历了复杂的构造演化过程,主要经历了特提斯(古特提斯阶段、中特提斯阶段)、印-亚碰撞两大构造演化事件,形成特提斯、碰撞造山两大成矿系统<sup>[3-6,41]</sup>。

“三江”中段兰坪盆地是一个典型的中新生代陆内盆地,是我国著名三江构造-成矿带中的一个重要组成部分,位于阿尔卑斯-喜马拉雅巨型构造带东段弧形转弯处(亦即青藏高原东缘)<sup>[3,21,41]</sup>。以盆地东西边缘金沙江-哀牢山断裂和澜沧江断裂及盆地中轴断裂为主的盆地断裂系统控制了盆地的构造演化。在古特提斯基础上盆地内先后沉积了海相、陆相碳酸盐岩、火山岩和碎屑岩建造。兰坪盆地的新

生代岩浆岩多出露于盆地的边缘, 分布受澜沧江和金沙江-哀牢山等断裂控制<sup>[21,42]</sup>。盆地内部只在南部永平、巍山一带出露有水云岩体、卓潘岩体、莲花山等碱性岩体, 这些岩体的成岩年龄在 68~23 Ma 之间<sup>[41,43,44]</sup>。盆地中北部(研究区)至今没有新生代岩浆活动的报道, 虽然张成江等<sup>[44]</sup>根据航磁资料、重力测量及遥感资料分析, 曾推测兰坪盆地中北部, 沿兰坪-思茅断裂有一巨大的隐伏岩浆系统。

盆地内矿产十分丰富, 主要有 Pb、Zn、Cu、Ag、Hg、As、Sb 和 Au 以及石膏、石盐等矿产, 构成我国西部一个重要的铅锌铜多金属大型成矿集区。其中, 最为重要的是广泛分布于盆地中北部喜马拉雅期沉积岩容矿 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属矿床(图 1), 主要包括: 金顶 Pb-Zn 矿床(Pb + Zn > 1000 万吨)、河西-三山 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属成矿带、白秧坪 Ag-Cu-Pb-Zn 多金属矿床及盆地西缘一系列脉状铜矿床<sup>[1,3-6,45,46]</sup>。

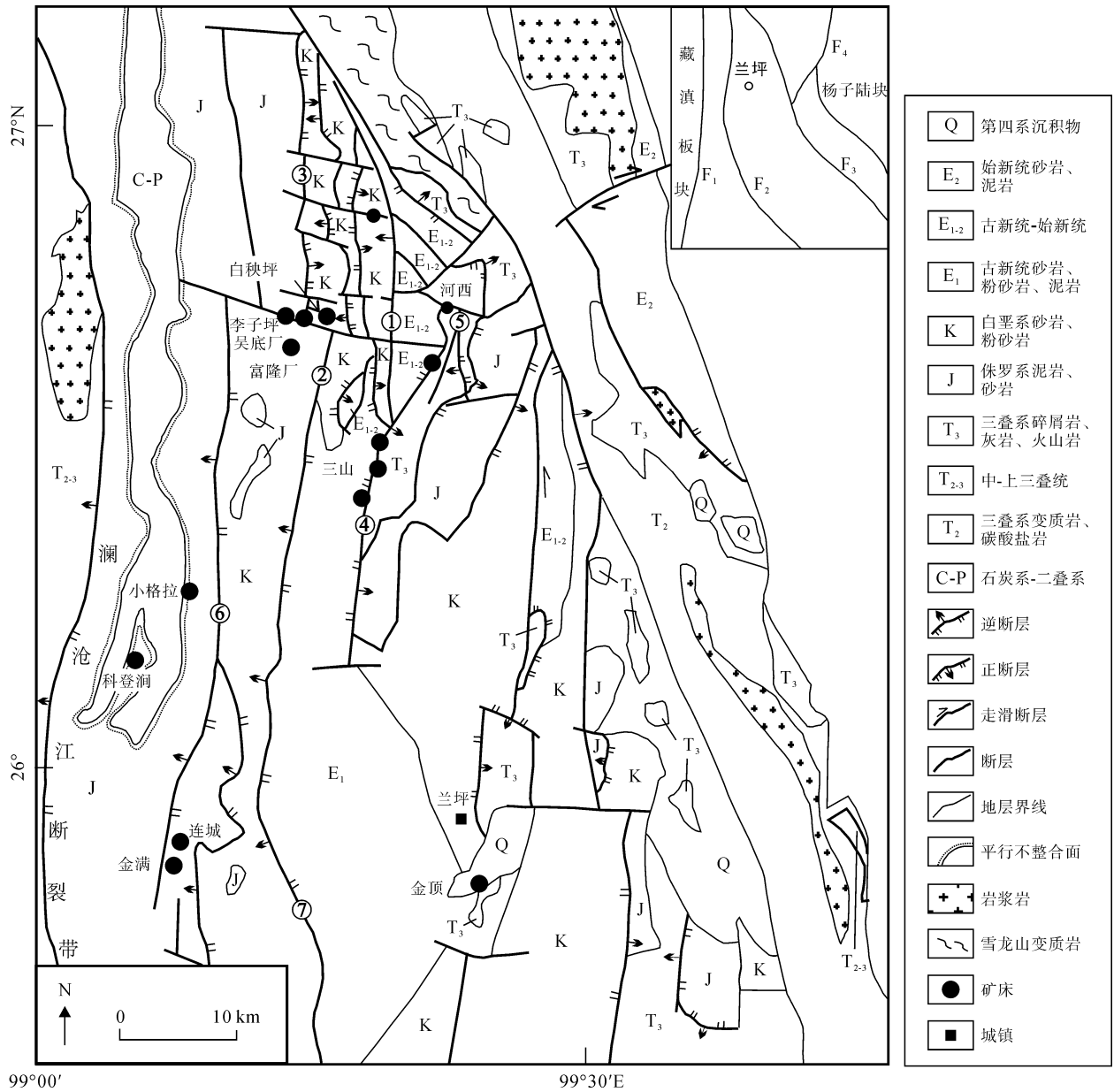


图 1 兰坪盆地中北部地质简图及主要矿床分布图(据侯增谦等<sup>[4]</sup>)

Fig.1 Distribution map of main deposits in northern Lanping basin in Yunnan (modified from Hou et al.<sup>[4]</sup>)

F<sub>1</sub>-怒江断裂带; F<sub>2</sub>-澜沧江断裂带; F<sub>3</sub>-金沙江-哀牢山断裂带; F<sub>4</sub>-中甸-剑川断裂带; -匡力底断裂; -四十里箐断裂; -富隆厂断裂; -华昌山断裂; -水磨房断裂; -营盘断裂(?); -大山箐断裂。

F<sub>1</sub>-Nujiang fault; F<sub>2</sub>-Lanchangjiang fault; F<sub>3</sub>-Jinshajiang-Ailaoshan fault; F<sub>4</sub>-Zhongdian-Jianchuan fault; -Kuangliidi fault; -Sishiliqing fault; -Fulongchang fault; -Huachangshan fault; -Shuimofang fault; -Yingpan fault (?); -Dashanqing fault.

盆地西缘广泛发育的脉状铜矿床主要包括：金满 Cu-Ag、连城 Cu-Mo 矿床及一系列(30 余个)脉状 Cu 矿床(点) (科登涧、小格拉、恩棋等)，这些矿床主要赋存于侏罗系花开佐组的杂色碎屑岩中，矿体受近南北向(逆冲)断裂控制<sup>[1,4-6]</sup>。下面对 2 个代表性脉状铜矿床(金满和连城)的矿床地质特征进行简单的介绍。

1.1 金满铜金属矿床地质特征

矿床紧靠澜沧江深大断裂分布，是区内规模最大、品位最高的铜矿床，拥有大于 20 万吨的铜，平均品位为 2.6%<sup>[5,19]</sup>。矿区内断裂和褶皱非常发育，主要构造为金满-连城复式倒转背斜，背斜轴向为 NNE 向，并伴有一系列近南北向、倾向西的逆断层<sup>[4,6]</sup>。矿区广泛出露有中侏罗统花开佐组(J<sub>2</sub>h)和上侏罗统坝注

路组(J<sub>3</sub>b)地层(图 2a 和 2b)。花开佐组地层为浅绿灰色、灰白色长石石英砂岩夹绢云母板岩、钙质板岩，局部夹白云岩，为矿区主要赋矿层位；上侏罗统坝注路组主要为紫红色绢云母板岩夹数层薄至中厚层砂岩。矿体主要产出在中侏罗统花开佐组地层中，特别是花开佐组上段(J<sub>2</sub>h<sub>2</sub>)杂色石英砂岩夹钙质板岩。矿区范围内无岩浆岩出露。

矿体主要分布在次级背斜的层间破碎带和轴部附近的张裂隙中<sup>[4,6,19]</sup>。矿体主要产状为似层状、脉状或透镜状等，整体产状大致与层间破碎带一致，普遍受到了后期变形作用的叠加，在构造变形较强的地段铜矿体被改造成透镜状。矿床围岩蚀变以中低温蚀变为主，主要有硅化、方解石化、重晶石化和菱铁矿化等。矿石矿物主要以黝铜矿、砷黝铜矿、黄铜矿、斑铜矿、辉锑矿等铜和锑硫化物为主；脉

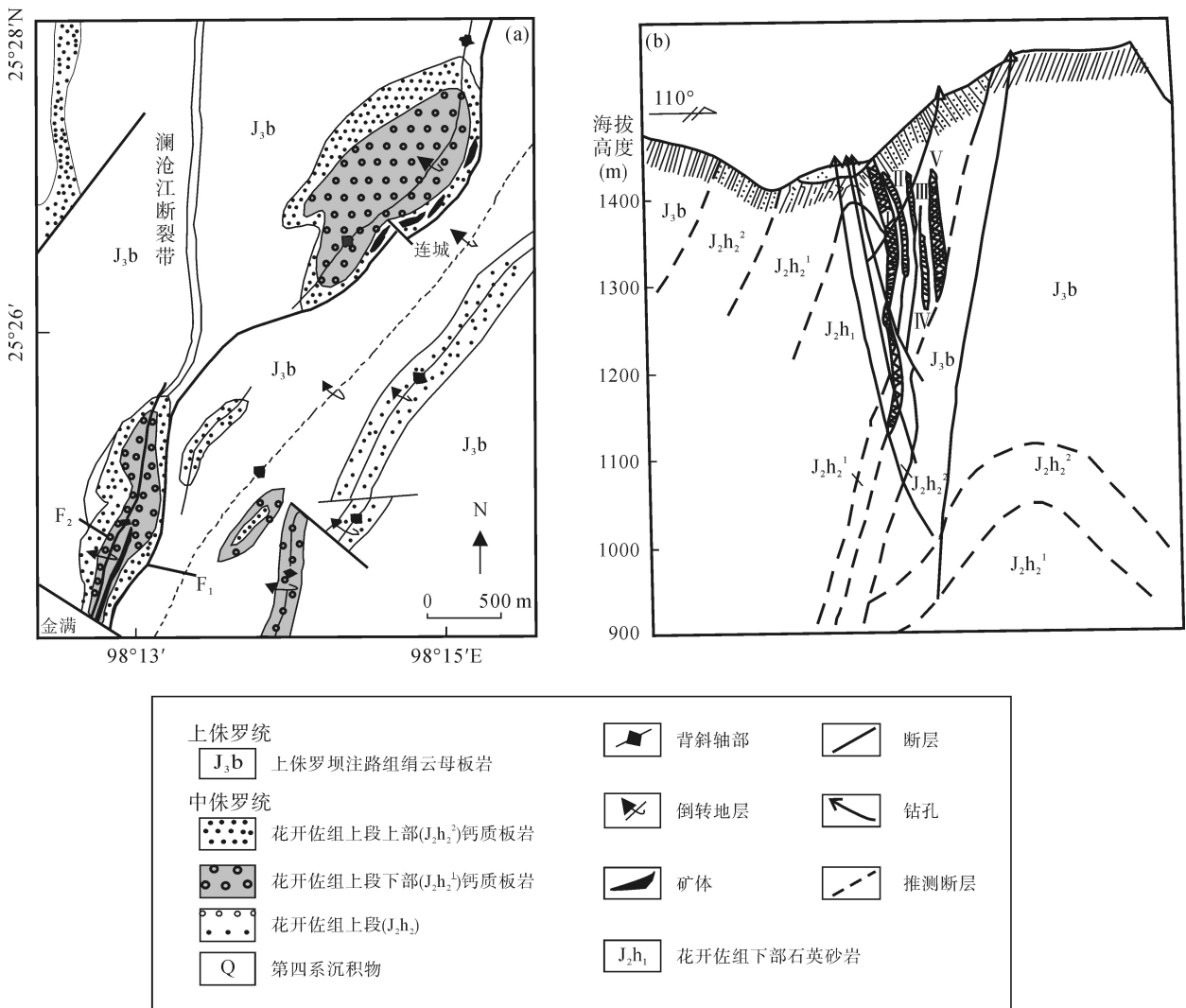


图 2 金满-连城矿床地质简图(a)和金满矿区 15 线勘探剖面图(b) (据李峰等<sup>[19]</sup>)

Fig.2 Geologic map of the Jinman-Liancheng deposits (a) and the line 15 cross-section for exploration of the Jinman deposit (b) (modified from Li et al.<sup>[19]</sup>)

石矿物有重晶石、石英、方解石和铁白云石等。矿石构造多为浸染状、块状、角砾状、脉状和网脉状等。结构以充填、交代及半自形粒状结构为主,有的矿石中还出现生物结构,如黄铁矿的草莓结构和黄铜矿、斑铜矿木质结构(黄铜矿或斑铜矿交代木质细胞后,仍基本保持了木质细胞规则有序的细胞排列形态)<sup>[19,47]</sup>。根据矿床矿化形式、矿物共生组合和矿脉穿插关系,金满铜矿床热液期成矿作用可分为成矿早期、主成矿期和成矿晚期 3 个阶段<sup>[14,19]</sup>,3 个阶段的矿物组合分别是:(1) 石英 + 铁白云石 + 少量黄铜矿 + 黝铜矿 + 少量黄铁矿;(2) 石英 + 方解石 + 大量黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿 + 少量砷黄铁矿;(3) 方解石 + 少量石英 + 少量黄铜矿、斑铜矿、铜蓝及黄铁矿。

### 1.2 连城 Cu-Mo 矿床地质特征

矿床位于金满矿床 NE 向 3 km 左右,在构造位置上与金满矿床同处于西部逆冲推覆构造带根部位置,两者可能为同一个矿床的不同矿段<sup>[4,6]</sup>。区内出露的地层与金满矿区基本相同,主要赋矿岩层为中侏罗统花开佐组上段紫红色厚层状砂岩。区内断裂、褶皱、裂隙和劈理非常发育,主要控矿构造为金满-连城复式倒转背斜,背斜轴向为 NNE 向。矿区范围内亦无岩浆岩出露。连城 Cu-Mo 多金属矿床由 8 个大小不等的脉状、透镜状矿体组成,矿体主要分布在次级背斜的层间破碎带和轴部附近的张裂隙中。矿区内矿石中的矿物组成比较简单,矿石矿物主要有黄铜矿、辉钼矿、黝铜矿、斑铜矿和辉铜矿及少量氧化矿;脉石矿物主要是石英和碳酸盐矿物组合,含少量绢云母。矿石结构为半自形-他形粒状结构、溶蚀结构和交代结构等,矿石构造以脉状为主,次为块状和浸染状,局部发育有少量纹层状黄铜矿、斑铜矿。矿区最常见的围岩蚀变类型为硅化和碳酸盐化,其次为重晶石化、绢云母化、菱铁矿化和黄铁矿化等。根据矿床矿化形式、矿物共生组合和矿脉穿插关系,连城 Cu-Mo 多金属矿床成矿作用可大致分为 3 个阶段:早阶段主要发育含辉钼矿±黄铁矿石英脉,其中辉钼矿多呈片状、纤维状产于石英脉的表面,石英脉中常发育有少量黄铁矿、黄铜矿;中阶段主要发育含铜硫化物石英脉±方解石/菱铁矿,其中含铜硫化物以黄铜矿、黝铜矿、斑铜矿为主,多呈脉状、点状产出;晚阶段则主要发育石英-方解石矿或菱铁矿细脉,偶含黄铁矿,伴随矿化较弱,交

切早、中阶段矿脉。成矿后的表生氧化作用形成了褐铁矿、铜蓝等次生矿物。

## 2 样品及分析测试方法

对 6 件黄铜矿和 1 件黄铁矿样品流体包裹体的 He 和 Ar 同位素进行了测定,用于研究的样品采自金满矿床地下采场 1230~1300 m 中段 号矿体和连城矿床 2 号矿洞主成矿阶段硫化物石英脉。

在系统的矿物岩相学、流体包裹体岩相学观察的基础上,选择 2 个矿床主成矿阶段含铜硫化物-石英脉中合适的硫化物样品。测试用的黄铜矿和黄铁矿样品具有完好晶形、后期改造的痕迹不明显的特点,同时与这些硫化物密切共生石英中流体包裹体主要为原生流体包裹体(以富 CO<sub>2</sub> 包裹体为主),从而保证硫化物中流体包裹体的 He、Ar 同位素组成能够在最大程度上代表成矿流体的原始信息(图 3 和表 1)。整体上,共生脉石矿物中流体包裹体以 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 包裹体(包括富 CO<sub>2</sub> 包裹体)为主,含一定量的 H<sub>2</sub>O-NaCl 包裹体,CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 包裹体均一温度多集中在 260~340 °C 之间,盐度集中在 1%~4% NaCl 之间,这部分工作另文详述<sup>[17]</sup>。分析所需硫化物样品均采用人工分选方法,在双目显微镜下反复挑选,矿物纯度达到 99% 以上。

惰性气体同位素分析在中国科学院兰州地质研究所气体地球化学实验室完成,测试仪器为英国 MM5400 型气体质谱仪,实验条件:发射电流  $I(t_4) = 800 \mu\text{A}$ ,  $I(t_{40}) = 200 \mu\text{A}$ , 高压为 9.000 kV。实验大致流程:将样品称重后用铝箔包好置于样品台中,然后密封抽真空,当压力达  $1 \times 10^{-5}$  Pa 时,加热样品到 130 °C 左右并烘烤 10 h 以上,以除去样品表面吸附和次生包裹体中的气体,后用电阻炉加热熔样坩锅中样品至 1600 °C,释放出的气体被吸入超真空气体净化系统,用活性炭阱将惰性气体分离出,然后送进气体质谱仪测定其同位素组成。使用的标准样是兰州市皋兰山顶的空气(AIRLZ2003),详细的测试过程参见叶先仁等<sup>[48]</sup>。

## 3 结果和讨论

### 3.1 流体包裹体中 He-Ar 同位素特征

所选黄铁矿样品是连城矿段成矿早阶段与辉钼矿伴生矿物(图 3b-1),黄铜矿为金满矿段和连城矿

段主成矿阶段最主要的硫化物。研究表明, 硫化物的封闭性较好, 可以较好地保存 He<sup>[40-50]</sup>。其中以黄铁矿封闭程度最高, 其他硫化物中流体包裹体中的 He 在流体包裹体被圈闭后可能会发生一定的丢失, 但因其丢失所产生的同位素分馏效应极小, 对 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值的影响甚微而可忽略不计<sup>[38]</sup>。因此, 在以 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值(而不是基于 He 的丰度)讨论问题

时, 一般可以不考虑扩散丢失的影响, 而大多数矿物中流体包裹体对 Ar 都有很好的保存能力<sup>[38,49]</sup>。由于热液流体包裹体内 U、Th 和 Pb 等亲石元素含量极低(Th 在热液中几乎不溶), 而黄铜矿和黄铁矿为非含钾矿物, 因此, 由 Th 和 K 放射性形成的 He 和 Ar 可以忽略不计。He 在大气中的含量极低, 不足以对地壳流体中 He 的丰度和同位素组成产生明

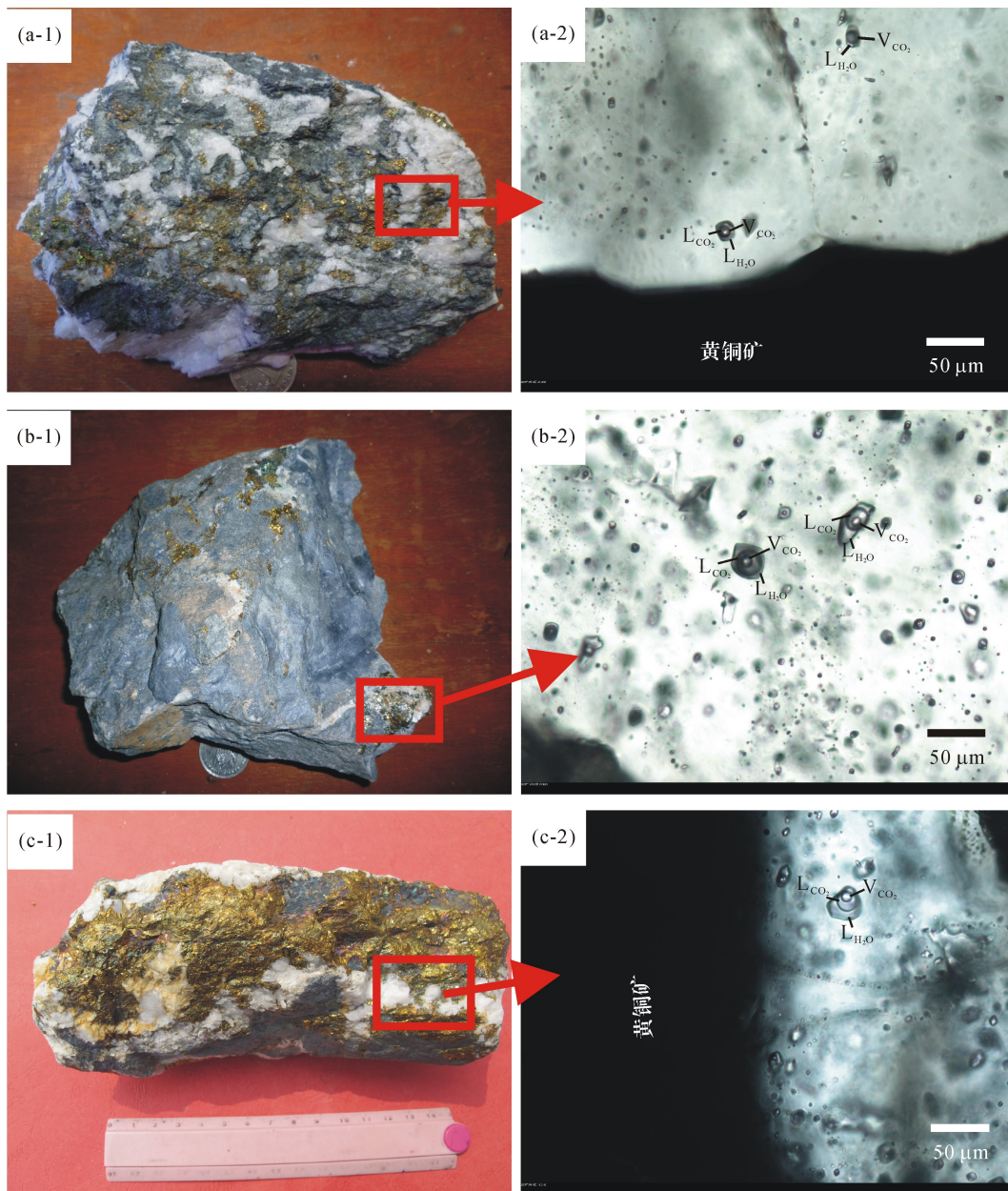


图 3 兰坪盆地西缘脉状铜矿床 He、Ar 研究样品特征及流体包裹体特点

Fig.3 Samples for He and Ar isotopic analysis and their fluid inclusions from vein-type Cu deposits in western Lanping basin (a-1) 主成矿期石英-黄铜矿网脉; (a-2) 黄铜矿周边石英中富 CO<sub>2</sub> 包裹体(JMD-5, 金满铜矿床); (b-1) 早阶段黄铜矿、黄铁矿石英脉呈网脉状充填在早阶段辉钼矿中; (b-2) 石英中富 CO<sub>2</sub> 包裹体(LC02-1, 连城矿床); (c-1) 主成矿期石英/白云石-黄铜矿大脉; (c-2) 主成矿期石英/白云石-黄铜矿大脉、黄铜矿周边石英中富 CO<sub>2</sub> 包裹体(JMC-17, 金满铜矿床)。  
(a-1) Sulfide-rich quartz and calcite vein; (a-2) CO<sub>2</sub>-rich fluid inclusions occurring in quartz at mineralization stage (JMD-5, Jinman); (b-1) Early molybdenite cut by quartz-sulfide veins; (b-2) CO<sub>2</sub>-rich fluid inclusions occurring in quartz (LC02-1, Liancheng); (c-1) Sulfide-rich quartz and dolomite vein; (c-2) CO<sub>2</sub>-rich fluid inclusions occurring in quartz adjacent to chalcopyrite (JMC-17, Jinman).

表 1 兰坪盆地西缘脉状铜矿床 He、Ar 研究样品特征及流体包裹体特点

Table 1 Samples for He and Ar isotopic analysis and their fluid inclusions from vein-type Cu deposits in western Lanping basin

样品号	矿物共生组合	伴生脉石矿物流体包裹体特征		
		包裹体类型	均一温度 (°C)	盐度 (% NaCl)
09JM-14	黄铜矿+石英+少量方解石	CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	231~334	0.8~4.3
JMC-17	黄铜矿+石英+少量白云石	CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	267~327	0.4~4.6
JMD-5	黄铜矿+黝铜矿+石英	CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	254~342	0.8~4.1
EQ-20	黄铜矿+石英	CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	238~298	0.6~3.7
En-6	黄铜矿+黝铜矿+石英	CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	243~287	1.0~3.7
LC02-1	辉钼矿+黄铁矿+石英	CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	270~343	0.6~4.1
EQ-2	黄铜矿+石英	CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	228~314	0.8~3.7

注: 表中仅列出伴生脉石矿物中主要的包裹体类型(CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 包裹体)的数据, 详见文献[17]。

显影响, 同时本次研究用的样品均采自地下坑道, 且暴露时间很短, 这些样品中流体包裹体内存在宇宙成因 <sup>3</sup>He 的可能性可以排除。另外, 研究表明, Li 衰变可产生 <sup>3</sup>He, 可能会导致流体包裹体 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值升高, 影响 He 的初始同位素比值<sup>[51-52]</sup>。金满、连城矿床蚀变围岩和矿物流体包裹体中 Li 元素含量较低<sup>[14]</sup>, Li 衰变产生的 <sup>3</sup>He 可忽略不计。本研究测试用的黄铜矿和黄铁矿均具完好晶形, 未见后期改造的痕迹, 其中的流体包裹体当以原生包裹体为主, 这与前述共生矿物石英中的流体包裹体基本上均为原生包裹体的事实相一致。由于 He 在大气中的含量极低, 接近 0, 不足以对地壳流体中 He 的丰度和同位素组成产生明显影响, 可忽略不计<sup>[53]</sup>。且流体中大气 He 的贡献可以根据参数 F<sup>4</sup>He 值(定义为样品中 <sup>4</sup>He/<sup>36</sup>Ar 相对于大气中 <sup>4</sup>He/<sup>36</sup>Ar = 0.1655 的比值)来判断, 假如样品中含有大气 He, 则 F<sup>4</sup>He = 1<sup>[34,40]</sup>。经计算, 金满和连城矿床硫化物样品的 F<sup>4</sup>He 值远远大于 1, 为 663~12924(表 2), 可以排除大气对流体包裹体中 He 的混染作用。因此, 金满、连城矿床黄铜矿和黄铁矿中流体包裹体的 He-Ar 同位素测定值基本代表原生流体包裹体或成矿流体的 He 和 Ar 同位素组成初始值。流体包裹体中 He、Ar 同位素组成分析结果见表 2 和图 4。

由表 2 测定结果可见, 金满铜矿床中黄铜矿的流体包裹体 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值为 0.01~0.06 Ra, <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar

比值为 305~1142(平均 669), 略高于大气中 <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比值; 连城铜(铅)矿床中黄铜矿和黄铁矿的流体包裹体 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值为 0.01~0.07 Ra, <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比值为 322~852(平均 486), 略高于大气中 <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比值。

在 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 图解(图 4)上, He 和 Ar 同位素组成具有一定的负相关关系, 所有点集中在地壳流体和饱和大气水之间, 而与地幔流体相距较远, 显示成矿流体可能是地壳流体和饱和大气水的混合物, 没有明显的地幔流体成分混入。另外, 2 个矿床

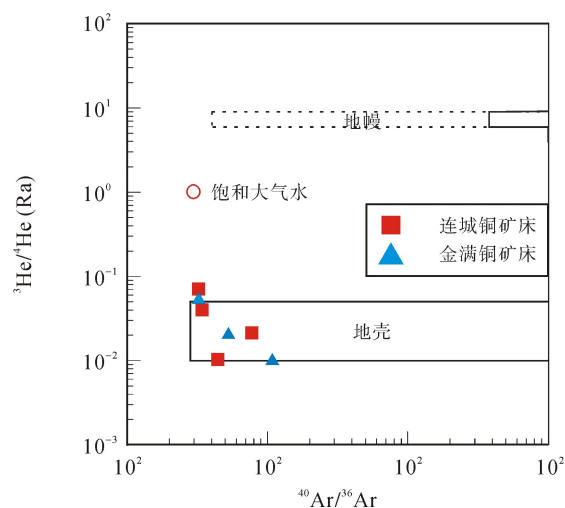


图 4 金满-连城铜多金属矿床 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 图解(据 Mamyrin *et al.*<sup>[54]</sup>修改)

Fig.4 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar diagram for the Jinman and Liancheng polymetallic deposits in western Lanping basin (modified from Mamyrin *et al.*<sup>[54]</sup>)

表 2 兰坪盆地西缘脉状铜矿床 He、Ar 同位素组成

Table 2 He and Ar isotope data for vein-type Cu deposits in western Lanping basin

样品号	矿床	矿物	<sup>4</sup> He (×10 <sup>-7</sup> )	<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He (Ra)	<sup>40</sup> Ar (×10 <sup>-7</sup> )	<sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	F <sup>4</sup> He
09JM-14	金满-连城	黄铜矿	1.37±0.10	0.06	3.81±0.27	305	663
JMC-17	金满-连城	黄铜矿	0.59±0.05	0.01	1.03±0.07	1142	3961
JMD-5	金满-连城	黄铜矿	3.03±0.21	0.02	4.83±0.33	561	2126
EQ-20	金满-连城	黄铜矿	2.25±0.16	0.04	2.81±0.20	333	1631
En-6	金满-连城	黄铜矿	3.52±0.24	0.07	2.64±0.19	322	2596
LC02-1	金满-连城	黄铁矿	1.31±0.10	0.02	1.64±0.12	852	4116
EQ-2	金满-连城	黄铜矿	37.9±2.5	0.01	0.80±0.06	438	12924

均含有一定量的过剩  $^{40}\text{Ar}$ , 样品中  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值偏高是由放射成因  $^{40}\text{Ar}$  值偏高引起的。这些现象说明, 成矿流体的温度较高(高于一般含钾矿物的 Ar 封闭温度  $200\text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[55]</sup>。因此, 在成矿流体与流经的岩石相互作用中, 捕获了部分放射成因的  $^{40}\text{Ar}$ 。这与这 2 个矿床成矿温度为  $170\sim 340\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[17]</sup>, 且大多高于  $200\text{ }^\circ\text{C}$  的事实较为一致。

### 3.2 成矿流体来源、演化和矿床的成因机制探讨

对金满和连城铜多金属矿床含石英脉中流体包裹体的系统研究表明, 成矿流体整体上显示出中高温、中低盐度、极富  $\text{CO}_2$  的特征,  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  包裹体均一温度集中在  $260\sim 340\text{ }^\circ\text{C}$  之间, 盐度集中在  $1\%\sim 4\%$  NaCl 之间<sup>[6,15,17]</sup>, 这在整个兰坪盆地是十分罕见的<sup>[26,28-31,56]</sup>。尽管单从流体成分还不能具体确定本区富  $\text{CO}_2$  流体的来源<sup>[25-26]</sup>, 但至少可以确定不大可能是大气降水主导的盆地流体, 不属于典型的盆地流体系统<sup>[12,15,26,27]</sup>。

关于这种富  $\text{CO}_2$  流体, 一般认为有以下几种可能的来源: 幔源流体、下地壳中高级变质流体、岩浆热液、碳酸盐地层的分解<sup>[26,28-31,56-57]</sup>。首先, 兰坪盆地西缘脉状铜矿床矿区附近, 特别是赋矿围岩无大规模的碳酸盐地层, 因此  $\text{CO}_2$  来源于碳酸盐地层的可能性很小。金满和连城铜多金属矿床成矿流体的氢氧同位素组成研究显示, 主成矿阶段含石英脉中石英的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为  $-14.8\%\sim -9.8\%$ , 其氧同位素组成具有变质水/岩浆水的特征, 对应的  $\delta\text{D}$  值跨度较大( $-110\%\sim -51\%$ )。在  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  关系图上, 金满和连城铜多金属矿床的数据点几乎都位于岩浆水/变质水下方区域, 部分偏向大气降水线<sup>[6,14,18,19,22,58]</sup>, 指示成矿热液可能主要来源于岩浆水或变质水, 有部分大气降水的参与。笔者及前人研究表明, 兰坪盆地西缘脉状铜矿床含石英脉中流体包裹体的碳同位素组成变化较小( $\delta^{13}\text{C}$  为  $-6.0\%\sim -3.2\%$ ), 显示出地幔源/岩浆碳的特点<sup>[6,17-19,58]</sup>。整体上讲, 兰坪盆地西缘脉状铜矿床成矿流体 C、H 和 O 等稳定同位素特征显示出深源流体的特征, 但不能有效的区分这种深源流体是来自幔源流体或者岩浆流体/变质流体。前文对兰坪盆地西缘脉状铜矿床主成矿期硫化物的 He、Ar 同位素组成的研究, 则表明成矿流体主要为地壳流体, 没有明显的地幔流体成分混入, 从而有效地排除了地幔流体作为这种富  $\text{CO}_2$  流体主要来源的可能。

兰坪盆地边缘及盆地南部永平、巍山一带发育有大量喜马拉雅期碱性岩体, 形成时代介于  $68\sim 23\text{ Ma}$  之间(长石、云母、锆石和全岩的 K-Ar、Rb-Sr、U-Pb 年龄)<sup>[41,43,44]</sup>, 这与兰坪盆地西缘脉状铜矿床成矿时代( $56\sim 48\text{ Ma}$ )十分的一致, 显示出一定内在联系<sup>[4,6,14,17]</sup>。虽然, 盆地中北部至今尚无岩浆活动的报道, 但张成江等<sup>[44]</sup>及薛春纪等<sup>[41]</sup>都曾推测盆地中北部应该存在一个巨大的隐伏岩浆系统。另外, 兰坪盆地西缘脉状铜矿床矿区内均未发生强烈的变质作用, 事实上整个兰坪盆地自其形成以来, 都没发生过强烈的变质作用, 盆地内亦没有变质岩的出露, 因此区内这种富含  $\text{CO}_2$  的成矿流体是变质成因的可能性较小。据此笔者推断, 区内中高温、中低盐度、富  $\text{CO}_2$  的流体可能与盆地隐伏壳源岩浆活动有关, 但目前仍缺乏直接证据。同时, 也不能排除富  $\text{CO}_2$  流体是来源于盆地基底变质岩系局部发生动力变质作用而形成的变质流体的可能性<sup>[4,6]</sup>。

基于以上讨论, 笔者认为兰坪盆地西缘脉状铜矿床成矿流体主要为地壳流体, 混入有少量饱和大气水, 没有明显的地幔流体成分混入。至于这种地壳流体的具体来源, 笔者认为还需要进一步的探讨, 但它应该可以作为在兰坪盆地内寻找脉状铜矿床的标志之一。

## 4 结 论

兰坪盆地西缘脉状铜矿床的成矿流体以普遍存在大量富  $\text{CO}_2$  流体包裹体为特征, 这在整个兰坪盆地是十分罕见的, 显著区别于盆地流体成矿系统主导成矿的 Pb-Zn 矿床。盆地西缘 2 个代表性脉状铜矿床(连城和金满)主成矿阶段形成的黄铜矿、黄铁矿的流体包裹体中  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值变化较小, 介于  $0.01\sim 0.07\text{ Ra}$  之间, 明显区别于幔源氦的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  特征值( $6\sim 9\text{ Ra}$ ), 而与壳源氦的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  特征值( $0.01\sim 0.05\text{ Ra}$ )极其一致; 成矿流体的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值变化较大, 介于  $305\sim 1142$  之间, 明显高于大气中的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值( $295.5$ ), 其原因可能是, 成矿流体与流经岩石的相互作用过程中, 捕获了部分放射成因的  $^{40}\text{Ar}$  所致。结合兰坪盆地西缘脉状铜矿床的地质特征、流体包裹体及 C、H、O 同位素地球化学等特征, 认为这些脉状铜矿床中富  $\text{CO}_2$  的成矿流体主要为地壳流体, 混入有少量饱和大气水, 没有明显的地幔流体成分混入。这种地壳流体的具体来源, 尚需要进一步的探讨。



野外工作得到云南省兰坪县三江铜业有限责任公司领导及生产部地质人员的热情帮助, 在此表示衷心的感谢! 在本文修改过程中得到了两位审稿老师的悉心指导, 谨表谢忱!

### 参考文献(References):

- [1] 徐启东, 李建威. 云南兰坪北部铜多金属矿化区成矿流体与矿化分带——流体包裹体和稳定同位素证据[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 365–376.  
Xu Qi-dong, Li Jian-wei. Migration of ore-forming fluids and its relation to zoning of mineralization in northern Lanping Cu-polymetallic metallogenic area, Yunnan Province: Evidence from fluid inclusions and stable isotopes [J]. Mineral Deposit, 2003, 22(4): 365–376 (in Chinese with English abstract).
- [2] 徐启东, 周炼. 云南兰坪北部铜多金属矿化区成矿流体流动与矿化分带——矿石铅同位素和特征元素组成依据[J]. 矿床地质, 2004, 23(4): 452–463.  
Xu Qi-dong, Zhou Lian. Ore-forming fluid migration in relation to mineralization zoning in Cu-polymetallic mineralization district of northern Lanping, Yunnan: Evidence from lead isotope and mineral chemistry of ores [J]. Mineral Deposit, 2004, 23(4): 452–463 (in Chinese with English abstract).
- [3] 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 青藏高原碰撞造山带: 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(5): 521–543.  
Hou Zeng-qian, Pan Gui-tang, Wang An-jian, Mo Xuan-xue, Tian Shi-hong, Sun Xiao-ming, Ding Lin, Wang Er-qi, Gao Yong-feng, Xie Yu-ling, Zeng Pu-sheng, Qin Ke-zhang, Xu Ji-feng, Qu Xiao-ming, Yang Zhi-ming, Yang Zhu-sen, Fei Hong-cai, Meng Xiang-jin, Li Zhen-qing. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting [J]. Mineral deposit, 2006, 25(5): 521–543 (in Chinese with English abstract).
- [4] 侯增谦, 宋玉财, 李政, 王召林, 杨志明, 杨竹森, 刘英超, 田世洪, 何龙清, 陈开旭, 王富春, 赵呈祥, 薛万文, 鲁海峰. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 123–144.  
Hou Zeng-qian, Song Yu-cai, Li Zheng, Wang Zhao-lin, Yang Zhi-ming, Yang Zhu-sen, Liu Ying-chao, Tian Shi-hong, He Long-qing, Chen Kai-xu, Wang Fu-chun, Zhao Cheng-xiang, Xue Wan-wen, Lu Hai-feng. Thrust controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt: Geological features and tectonic model [J]. Mineral deposit, 2008, 27(2): 124–144 (in Chinese with English abstract).
- [5] He Longqing, Song Yucai, Chen Kaixu, Hou Zengqian, Yu Fengming, Yang Zhusen, Wei Junqi, Li Zheng, Liu Yingchao. Thrust-controlled, sediment-hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland fold belt, eastern margin of Tibetan Plateau [J]. Ore Geol Rev, 2009, 36(1–3): 106–132.
- [6] 王光辉. 滇西兰坪盆地金满-连城脉状铜矿床成因研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.  
Wang Guang-hui. Genesis of Liancheng-Jinman vein copper deposits in Lanping basin, western Yunnan [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [7] 宋玉财, 侯增谦, 杨天南, 张洪瑞, 杨竹森, 田世洪, 刘英超, 王晓虎, 刘燕学, 薛传东, 王光辉, 李政. 三江喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(3): 355–380.  
Song Yu-cai, Hou Zeng-qian, Yang Tian-nan, Zhang Hong-ru, Yang Zhu-sen, Tian Shi-hong, Liu Ying-chao, Wang Xiao-hu, Liu Yan-xue, Xue Chuan-dong, Wang Guang-hui, Li Zheng. Sediment-hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang region: Characteristics and genetic types [J]. Acta Petrol Mineral, 2011, 30(3): 355–380 (in Chinese with English abstract).
- [8] Misra K C. Understanding Mineral Deposits [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2000: 845p.
- [9] Xue Chunji, Zeng Rong, Liu Shuwen, Chi Guoxiang, Qing Hairuo, Chen Yuchuan, Yang Jianmin, Wang Denghong. Geological, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, South China: A review [J]. Ore Geol Rev, 2007, 31(1–4): 337–359.
- [10] 邓军, 侯增谦, 莫宣学, 杨立强, 王庆飞, 王长明. 三江提斯复合造山与成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 37–42.  
Deng Jun, Hou Zeng-qian, Mo Xuan-xue, Yang Li-qiang, Wang Qing-fei, Wang Chang-ming. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys [J]. Mineral Deposit, 2010, 29(1): 37–42 (in Chinese with English abstract).
- [11] 胡瑞忠, Turner G, Burnard P G, 钟宏, 叶造军, 毕献武. 金顶超大型铅-锌矿床氦、氩同位素地球化学[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(3): 208–213.  
Hu Ruizhong, Turner G, Burnard P G, Zhong Hong, Ye Zaojun, Bi Xianwu. Helium and argon isotopic geochemistry of Jinding superlarge Pb-Zn deposit [J]. Sci China (D), 1998, 41(4): 442–448.
- [12] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 王登红, 徐珏. 滇西北兰坪铅锌铜银矿田含烃富 CO<sub>2</sub> 成矿流体及其地质意义[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 244–253.  
Xue Chun-ji, Chen Yu-chuan, Yang Jian-min, Wang Deng-hong, Xu Jue. The CO<sub>2</sub>-rich and hydrocarbon-bearing ore-forming fluid and their metallogenic role in the Lanping Pb-Zn-Ag-Cu ore field, north-western Yunnan [J]. Acta Geol Sin, 2002, 76(2): 244–253 (in Chinese with English abstract).
- [13] 徐晓春, 谢巧勤, 陆三明, 陈天虎, 黄震, 岳书仓. 滇西兰坪盆地西缘铜矿床矿物流体包裹体研究[J]. 矿物学报, 2005, 25(2): 170–176.  
Xu Xiao-chun, Xie Qiao-qin, Lu San-ming, Chen Tian-hu, Huang Zhen, Yue Shu-Cang. Fluid inclusion characteristics of copper deposits on the western border of Lanping basin, Yunnan Province [J]. Acta Mineral Sin, 2005, 25(2): 170–176 (in Chinese with English abstract).
- [14] 赵海滨. 滇西兰坪盆地中北部铜多金属矿床成矿地质特征及地质条件[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.  
Zhao Hai-bin. Study on the characteristics and metallogenic conditions of copper-polymetallic deposits in middle-northern Lanping basin, western Yunnan [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006 (in Chinese with English abstract).

- [15] Chi Guoxiang, Xue Chunji. Abundance of CO<sub>2</sub>-rich fluid inclusions in a sedimentary basin-hosted Cu deposit at Jinman, Yunnan, China: Implications for mineralization environment and classification of the deposit [J]. *Mineral Deposita*, 2011, 46(4): 365–380.
- [16] Zhang Jinrang, Wen Hanjie, Qiu Yuzhuo, Zhang Yuxu, Li Chao. Age of sediment-hosted Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag polymetallic deposits in the Lanping basin: Re/Os geochronology of molybdenite and Sm-Nd dating of calcite [J]. *J Asian Earth Sci*, 2013, 73: 284–295.
- [17] 张锦让. 兰坪盆地西缘成矿流体特征、时空演化及其成矿效应[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2013.  
Zhang Jin-rang. Spatial-temporal evolution of the ore-forming fluid and related mineralization in the western Lanping basin, Yunnan Province, China [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [18] 刘家军, 李朝阳, 潘家永, 胡瑞忠, 刘显凡, 张乾. 兰坪-思茅盆地砂页岩中铜矿床同位素地球化学[J]. *矿床地质*, 2000, 19(3): 223–234.  
Liu Jia-jun, Li Chao-yang, Pan Jia-yong, Hu Rui-zhong, Liu Xian-fan, Zhang Qian. Isotopic geochemistry of copper deposits from sandstone and shale of Lanping-Simao Basin, western Yunan [J]. *Mineral Deposit*, 2000, 19(3): 223–234 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李峰, 甫为民. 滇西红层铜矿地质[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2000: 16–60.  
Li Feng, Fu Wei-min. Geology of Red Bed Copper Deposits in Western Yunnan [M]. Kunming: Yunnan University Press, 2000: 16–60 (in Chinese).
- [20] 吴南平, 蒋少涌, 廖启林, 潘家永, 戴宝章. 云南兰坪-思茅盆地脉状铜矿床铅、硫同位素地球化学与成矿物质来源研究[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 799–807.  
Wu Nan-ping, Jiang Shao-yong, Liao Qi-lin, Pan Jia-yong, Dai Bao-zhang. Lead and sulfur isotope geochemistry and the ore sources of the vein-type copper deposits in Lanping-Simao basin, Yunan Province [J]. *Acta Petrol Sin*, 2003, 19(4): 799–807 (in Chinese with English abstract).
- [21] 阙梅英, 程敦摸, 张立生, 夏文杰, 朱创业. 兰坪-思茅盆地铜矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1–20, 37–46.  
Que Mei-ying, Cheng Dun-mo, Zhang Li-sheng, Xia Wen-jie, Zhu Chuang-ye. Copper Deposits in Lanping-Simao Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1–20, 37–46 (in Chinese).
- [22] Ji Hongbing, Li Chaoyang. Geochemistry of Jinman copper vein deposit, West Yunnan Province, China. Fluid inclusion and stable isotope geochemical characteristics [J]. *Chin J Geochem*, 1998, 17(1): 81–90.
- [23] 何明勤, 宋焕斌, 冉崇英, 严键. 云南兰坪金满铜矿床改造成因证据[J]. *地质与勘探*, 1998, 34(2): 13–15.  
He Ming-qin, Song Huan-bin, Ran Chong-ying, Yan Jian. Evidence for transformed genesis of Jinman copper deposit in Lanping [J]. *Geol Prospect*, 1998, 34(2): 13–15 (in Chinese with English abstract).
- [24] 颜文, 李朝阳. 一种新类型铜矿床的地球化学特征及其热水沉积成因[J]. *地球化学*, 1997, 26(1): 55–63.  
Yan Wen, Li Chao-yang. Geochemical characteristics and their hydrothermal sedimentary genesis of a new type copper deposit [J]. *Geochimica*, 1997, 26(1): 55–63 (in Chinese with English abstract).
- [25] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1–487.  
Lu Huan-zhang, Fan Hong-rui, Ni Pei, Ou Guang-xi, Shen Kun, Zhang Wen-huai. Fluid Inclusion [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1–487 (in Chinese).
- [26] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2085–2108.  
Chen Yan-jing, Ni Pei, Fan Hong-rui, Pirajno F, Lai Yong, Su Wen-chao, Zhang Hui. Diagnostic fluid inclusions of different types of hydrothermal gold deposits [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(9): 2085–2108 (in Chinese with English abstract).
- [27] Xue Chunji, Chi Guoxiang, Chen Yuchuan Wang Denghong, Qing Hairuo. Two fluid systems in the Lanping basin, Yunnan, China — Their interaction and implications for mineralization [J]. *J Geochem Explor*, 2006, 89(1–3): 436–439.
- [28] Diamond L W. Review of the systematics of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O fluid inclusions [J]. *Lithos*, 2001, 55(1–4): 69–99.
- [29] Phillips G N, Powell R. Link between gold provinces [J]. *Econ Geol*, 1993, 88(5): 1084–1098.
- [30] Rosenbaum J M, Zindler A, Rubenstone J L. Mantle fluids: Evidence from fluid inclusions [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60(17): 3229–3252.
- [31] Wilkinson J J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits [J]. *Lithos*, 2001, 55(1–4): 229–272.
- [32] Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, Turner G. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralisation, South Korea [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59(22): 4663–4673.
- [33] Graham D W, Johnson K T M, Douglas Priebe L, Lupton J E. Hotspot-ridge interaction along the Southeast Indian Ridge near Amsterdam and St. Paul islands: Helium isotope evidence [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 167(3/4): 297–310.
- [34] Kendrick M A, Burgess R, Patrick R A D, Turner G. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-porphry mineralizing fluids [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2001, 65(16): 2651–2668.
- [35] Böhlke J K, Irwin J J. Laser microprobe analyses of noble gas isotopes and halogens in fluid inclusions: Analyses of microstandards and synthetic inclusions in quartz [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56(1): 187–201.
- [36] Mao Jingwen, Li Yinqing, Goldfarb R J, He Ying, Zaw K. Fluid inclusion and noble gas studies of the Dongping gold deposit, Hebei province, China: A mantle connection for mineralization? [J]. *Economic Geology*, 2003, 98(3): 517–534.
- [37] Norman D I, Musgrave J A. N<sub>2</sub>-He-Ar compositions in fluid inclusions: Indicators of fluid source [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58(3): 1119–1131.
- [38] 胡瑞忠, Turner G, Burnard P G, 钟宏, 叶造军, 毕献武. 袁

- 牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(4): 321–330.
- Hu Ruizhong, Turner G, Burnard P G, Zhong Hong, Ye Zaojun, Bi Xianwu. Helium and argon isotopic geochemistry of Jinding superlarge Pb-Zn deposit [J]. *Sci China (D)*, 1999, 29(4): 321–330 (in Chinese).
- [39] Kendrick M A, Burgess R, Leach D, Patrick R A D. Hydrothermal fluid origins in Mississippi valley-type ore districts: Combined noble gas (He, Ar, Kr) and halogen (Cl, Br, I) analysis of fluid inclusions from the Illinois-Kentucky fluor spar district, Viburnum Trend, and Tri-State Districts, Midcontinent United States [J]. *Econ Geol*, 2002, 97(3): 453–469.
- [40] Kendrick M A, Duncan R, Phillips D. Noble gas and halogen constraints on mineralizing fluids of metamorphic versus surficial origin: Mt Isa, Australia [J]. *Chem Geol*, 2006, 235(3/4): 325–351.
- [41] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 王登红, 杨伟光, 杨清标. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. 矿床地质, 2002, 21(1): 36–44.
- Xue Chun-ji, Chen Yu-chuan, Yang Jian-min, Wang Deng-hong, Yang Wei-guang, Yang Qing-biao. Analysis of ore-forming background and tectonic system of Lanping basin, western Yunnan Province [J]. *Mineral Deposit*, 2002, 21(1): 36–44 (in Chinese with English abstract).
- [42] 罗君烈, 杨荆舟. 滇西特提斯的演化及主要金属矿床成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 149–239.
- Luo Jun-lie, Yang Jing-zhou. Tethyan Evolution of West Yunnan and the Major Metallogenesis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 149–239 (in Chinese).
- [43] 董方浏, 莫宣学, 侯增谦, 王勇, 毕先梅, 周肃. 云南兰坪盆地喜马拉雅期碱性岩 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(2): 103–109.
- Dong Fang-liu, Mo Xuan-xue, Hou Zeng-qian, Wang Yong, Bi Xian-mei, Zhou Su. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages of Himalayan alkaline rocks in Lanping basin, Yunnan Province, and their geological implications [J]. *Acta Petrol Mineral*, 2005, 24(2): 103–109 (in Chinese with English abstract).
- [44] 张成江, 倪师军, 滕彦国, 彭秀红, 刘家铎. 兰坪盆地喜马拉雅期构造-岩浆活动与流体成矿的关系[J]. 矿物岩石, 2000, 20(2): 35–39.
- Zhang Cheng-jiang, Ni Shi-jun, Teng Yan-guo, Peng Xiu-hong, Liu Jia-duo. Relationship between Himalayan tectonic-magmatic movement and mineralization in Lanping basin, Yunnan Province [J]. *Mineral Petrol*, 2000, 20(2): 35–39 (in Chinese with English abstract).
- [45] 李文昌, 莫宣学. 西南“三江”地区新生代构造及其成矿作用[J]. 云南地质, 2001, 20(4): 333–346.
- Li Wen-chang, Mo Xuan-xue. The Cenozoic tectonics and metallogenesis in “Three-River” area of Southwest China [J]. *Yunnan Geol*, 2001, 20(4): 333–346 (in Chinese with English abstract).
- [46] 何明勤, 刘家军, 李朝阳, 刘玉平. 兰坪盆地铅锌铜大型矿集区的流体成矿作用机制——以白秧坪铜钴多金属地区为例[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1–108.
- He Ming-qin, Liu Jia-jun, Li Chao-yang, Li Yu-ping. Mechanism of Ore-Forming Fluid of the Lanping Pb-Zn-Cu Polymetallic Mineralized Concentration Area: An Example Study on the Baiyangping Ore District [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1–108 (in Chinese).
- [47] 刘家军, 李朝阳, 张乾, 潘家永, 刘玉平, 刘显凡, 刘世荣, 杨伟光. 滇西金满铜矿床中木质结构及其成因意义[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(2): 89–95.
- Liu Jiajun, Li Chaoyang, Zhang Qian, Pan Jiayong, Liu Yuping, Liu Xianfan, Liu Shirong, Yang Weiguang. Wood textures in Jinman copper deposit in western Yunnan and their genetic implications [J]. *Sci China (D)*, 2001, 44(6): 545–554.
- [48] 叶先仁, 吴茂炳, 孙明良. 岩矿样品中稀有气体同位素组成的质谱分析[J]. 岩矿测试, 2001, 20(3): 174–180.
- Ye Xian-ren, Wu Mao-bing, Sun Ming-liang. Determination of the noble gas isotopic composition in rocks and minerals by mass spectrometry [J]. *Rock Mineral Anal*, 2001, 20(3): 174–180 (in Chinese with English abstract).
- [49] Trull T W, Kurz M D, Jenkins W J. Diffusion of cosmogenic <sup>3</sup>He in olivine and quartz: Implications for surface exposure dating [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 103(1–4): 241–256.
- [50] Ballentine C J, O’Nions R K, Coleman M L. A magnus opus: Helium, neon and argon isotopes in a North Sea oilfield [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60(5): 831–849.
- [51] Burnard P G, Hu Ruizhong, Turner G, Bi Xianwu. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(10): 1595–1604.
- [52] 范世家, 王安建, 刘汉斌, 修群业, 曹殿华, 李瑞萍, 高辉, 陈其慎. 论兰坪盆地白秧坪铜(钴)矿床成因的氦氩同位素证据[J]. 地质论评, 2006, 52(5): 628–635.
- Fan Shi-jia, Wang An-jian, Liu Han-bin, Xiu Qun-ye, Cao Dian-hua, Li Rui-ping, Gao Hui, Chen Qi-shen. A discussion on the helium and argon isotopic evidences for genesis of the Baiyangping copper-cobalt deposit in the Lanping Basin [J]. *Geol Rev*, 2006, 52(5): 628–635 (in Chinese with English abstract).
- [53] Turner G, Burnard P, Ford J L, Gilmour J D, Lyon I C, Stuart F M, Gruszczynski M, Halliday A. Tracing fluid sources and interactions [J]. *Philos Trans R Soc Lond A Math Phys Sci Eng*, 1993, 344(1670): 127–140.
- [54] Mamyrin B A, Tolstikhin I N. Helium Isotope in Nature [M]. Amsterdam: Elsevier, 1984: 1–237.
- [55] Ballentine C J, Burnard P G. Production, release and transport of noble gases in the continental crust [J]. *Rev Mineral Geochem*, 2002, 47: 481–538.
- [56] Cameron E M, Hattori K. Archean gold mineralization and oxidized hydrothermal fluids [J]. *Econ Geol*, 1987, 82(5): 1177–1191.
- [57] Su Wen-chao, Heinrich C A, Pettke T, Zhang Xingchun, Hu Ruizhong, Xia Bin. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: Products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids [J]. *Econ Geol*, 2009, 104(1): 73–93.
- [58] 肖荣阁, 陈卉泉, 袁见齐. 云南中新世地质与矿产[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 98–118.
- Xiao Rong-ge, Chen Hui-quan, Yuan Jian-qi. Geology and Mineral Deposits of Mesozoic in Yunnan Province [M]. Beijing: Ocean Press, 1993: 98–118 (in Chinese).