

文章编号 10258-7106 (2009) 04-0413-12

兰坪盆地连城脉状铜矿床辉钼矿 Re-Os 定年 及其地质意义*

王光辉^{1 2} , 宋玉财² , 侯增谦^{2 * *} , 王晓虎² , 杨竹森³ , 杨天南² , 刘燕学² ,
江迎飞^{1 2} , 潘小菲² , 张洪瑞² , 刘英超² , 李 政² , 薛传东¹

(1 昆明理工大学, 云南 昆明 650093 ; 2 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037 ;

3 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 兰坪盆地贱金属矿床是一套独特的受逆冲推覆构造系统控制的矿床类型, 连城脉状铜矿床是其重要组成之一。以往研究采用多种测年手段限定脉状铜矿成矿年龄, 但结果分歧较大。本文采用辉钼矿 Re-Os 同位素定年方法, 获得连城矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素模式年龄为 $(48.14 \pm 0.87) \text{ Ma}$, 等时线年龄为 $(49.0 \pm 1.3) \text{ Ma}$, 初步厘定兰坪盆地热液脉型铜矿床形成于 $48 \sim 49 \text{ Ma}$ 。结合区域地质与控矿构造分析, 该矿床应为盆地西部逆冲带逆冲变形过程中的产物, 由此限定兰坪盆地西部逆冲推覆的起始时间至少早于 49 Ma , 同时佐证了兰坪盆地西部逆冲带内以 Cu(-Ag) 为主的成矿系统的形成发育可能早于东部逆冲推覆带内以 Pb-Zn 为主的成矿系统。

关键词 地球化学, 脉状铜矿, 辉钼矿, Re-Os 定年, 逆冲推覆, 兰坪盆地

中图分类号 P618.41 P597

文献标志码 A

Re-Os dating of molybdenite from Liancheng vein copper deposit in Lanping basin and its geological significance

WANG GuangHui^{1,2}, SONG YuCai², HOU ZengQian², WANG XiaoHu², YANG ZhuSen³, YANG TianNan²,
LIU YanXue², JIANG YingFei^{1,2}, PAN XiaoFei², ZHANG HongRui², LIU YingChao²,
LI Zheng² and XUE ChuanDong¹

(1 Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The sediments-hosted base metal deposits controlled by Cenozoic thrust-nappe structural system in Lanping basin, southwest China, apparently differ from the sediments-hosted base metal deposits in other parts of the world. The Liancheng vein-type copper deposit is one of these deposits in Lanping basin. Lots of dating methods had been employed to define the ages of this type of ore deposits, but the results were obscure due to the flaws of the methods themselves. In this study, the Re-Os isotopic dating method was used to measure 6 molybdenite

* 本文得到国家科技支撑计划项目(2006BAB01A08)、中国地质科学院地质研究所基础科研业务费(J0723)、国家重点基础研究发展计划(2009CB421008)、中国地质调查局地质大调查项目(1212010818096)、中国博士后科学基金(20070420418)和国家自然科学基金(40772067)的联合资助

第一作者简介 王光辉, 男, 1984 年生, 在读硕士研究生, 矿产普查与勘探专业。Email 304001947@qq.com

* * 通讯作者 侯增谦, 男, 1961 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 长期从事海底与大陆成矿作用研究。Email houzengqian@126.com

收稿日期 2009-03-10 ; 改回日期 2009-5-27。李德先编辑。

samples collected from the Liancheng copper deposit. The isotopic model age is (48.14 ± 0.87) Ma and the isochronic age is (49.0 ± 1.3) Ma, indicating that the deposit was formed at 48~49 Ma. The age in combination with the regional geological setting and the ore-controlling characteristics supports the viewpoint that the vein-type copper deposits similar to the Liancheng ore deposit must have resulted from the thrust deformation in western Lanping basin, and the initial thrust-napping took place at least earlier than 49 Ma. This result also suggests that the copper-silver ore-forming system in western Lanping basin was formed earlier than the lead-zinc ore-forming system in eastern Lanping basin.

Key words: geochemistry, vein-type copper deposit, molybdenite, Re-Os isotopic dating, thrust-nappe, Lanping basin

滇西兰坪盆地是中国重要的矿产基地之一,目前已发现各类矿床、矿点达 100 多处(阙梅英等, 1998),其中不乏大型超大型矿床,如中国最大的 Pb-Zn 矿——金顶矿床、白秧坪大型 Ag-Pb-Zn 多金属矿床等。金满、连城等脉状铜矿床是兰坪盆地贱金属矿床的重要组成部分,主要分布于盆地西缘,呈带状展布,单个矿体呈 NS 向或 NNE 向脉状展布,受断裂控制,矿石以石英+铜硫化物(黝铜矿、砷黝铜矿、黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿等)为典型特征,系后生充填成矿(表 1)。前人对这套脉状 Cu 矿床的形成有着不同的认识,阙梅英等(1998)通过地质条件推断兰坪脉状铜矿床大致形成于 40~30 Ma 之间,李峰

表 1 兰坪盆地脉状铜矿床地质特征
Table 1 Geological features of veinlike copper deposits in Lanping basin

矿床(点)及主要控矿因素	围岩	矿体形态	矿石矿物	脉石矿物	结构构造	围岩蚀变	资料来源
金满中型矿床							
倒转背斜一翼, NNE 走向,层间破碎带	中侏罗统花开佐组上段砂岩、粉砂岩、泥岩	脉状、透镜状	黝铜矿、砷黝铜矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿	石英、方解石、(铁)白云石、重晶石、菱铁矿	粒状、交代和溶蚀结构;脉状、浸染状和条带状构造	硅化、碳酸盐化、重晶石化、绢云母化、黄铁矿化	本文;李峰等 2000;赵海滨 2006
连城中型矿床							
倒转背斜一翼, NNE 走向,切层破碎带	中侏罗统花开佐组上段砂岩、泥岩、钙质板岩	脉状、透镜状	黝铜矿、砷黝铜矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、辉钼矿	石英、方解石、重晶石、菱铁矿	粒状、交代和溶蚀结构;脉状、浸染状和块状构造	硅化、碳酸盐化、重晶石化、黄铁矿化	本文
水泄中型矿床							
NNE 向走向断裂	上三叠统麦初箐组砂岩、粉砂岩、泥岩和中侏罗统花开佐组上段砂岩、泥岩、泥灰岩	脉状、透镜状	砷黝铜矿、黄铜矿、辉钼矿	石英、方解石、重晶石、菱铁矿	粒状、交代和溶蚀结构;脉状、浸染状、条带状构造	硅化、碳酸盐化、重晶石化、黄铁矿化、菱铁矿化	李峰等 2000;云南省地质局 1974 ^①
科登洞矿点							
倒转背斜轴部 NNE 向破碎带	石炭系石登群下段中性火山岩	脉状	斑铜矿、黄铜矿	石英、方解石	粒状、交代结构;脉状、浸染状构造	硅化、绢云母化	云南省地质局 1974 ^① ;李峰等 1994
小格拉小型矿床							
近 NS 向断裂	石炭系石登群上段变质火山岩、灰岩、板岩和中侏罗统花开佐组下段变质砂岩、绢云板岩	脉状、透镜状	黝铜矿	石英、方解石、绢云母、天青石、菱铁矿	粒状、交代和溶蚀结构;脉状、浸染状、条带状、角砾状构造	硅化、碳酸盐化、天青石化、绢云母化	李小明等, 2001b;云南省地质局 1974 ^①

① 云南省地质局. 1974. 1:20 万矿产图(兰坪幅)及区域地质调查报告.

等(2000)根据地质条件和铅同位素模式年龄,认为这套矿床形成于 70~30 Ma 之间,而后,许多学者进行了大量定年工作,如李小明(2001a)获得金满矿床磷灰石裂变径迹年龄为 58.7 Ma、石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 66.8 Ma,获得小格拉的磷灰石裂变径迹年龄 >93.9 Ma(李小明等,2001b),并提出成矿发生于燕山晚期至喜马拉雅期弧后前陆盆地向走滑拉分盆地转换阶段;刘家军等(2003)用石英流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子活化法测出的金满矿床的成矿年龄为 $(58.05 \pm 0.54)\text{Ma}$,认为成矿与喜马拉雅早期构造-岩浆热事件有关,徐晓春等(2004)用同样方法得到金满和水泄铜矿床的成矿年龄分别为 $(56.7 \pm 1.0)\text{Ma}$ 和 $(59.2 \pm 0.8)\text{Ma}$;毕先梅等(2004)采用极低级变质矿物(从成岩作用向低级变质作用转变的过程中形成的)伊利石 K-Ar 法定年得到金满矿化年龄为 $(46.71 \pm 0.68)\text{Ma}$,采用同样方法,赵海滨(2006)获得的成矿年龄为 47.17~35.41 Ma;王彦斌等(2005)以绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测得金满矿床成矿早期为 67 Ma,晚期为 37 Ma;Gu 等(2007)则认为金满等铜矿床形成于中侏罗-晚白垩世坳陷或前陆盆地,成矿流体由盆地中心或造山带向盆地边缘(西缘)迁移沉淀形成。

不难看出,对这类脉状铜矿床的形成时代争论很大,尽管多数研究认为其形成于早喜马拉雅期,但年龄差别很大,对同一矿床定年获得的年龄介于 67~35 Ma 之间,甚至对同一矿床采用同一方法获得的成矿年龄也相差较大。究其原因,一方面与磷灰石裂变径迹、石英流体包裹体 Rb-Sr 法和 Ar-Ar 法、含钾热液矿物的 K-Ar 法等定年方法所选用的测试对象不同有关;另一方面,上述各种定年方法是通过围岩的形成时代或与矿石矿物同期形成的物质进行定年来限定成矿作用发生的时间,因此对不同成因类型的矿床的适用性也不同;此外,各定年方法本身都具有一定的局限性,这也是出现测试结果误差较大的原因之一(刘建明等,1998;谭俊等,2006)。因此,要确定脉状铜矿床的形成时代,尝试不同的方法,或者说采用更为可靠的定年手段是十分必要的。

近年,笔者在野外考察期间,在连城矿床中发现了形成于矿化期的辉钼矿。辉钼矿 Re-Os 法在热液矿床定年中应用广泛,许多矿床的成矿年龄,特别是斑岩铜矿直接成矿年龄多由此方法获得,是目前对热液矿床定年较为可信的手段之一。辉钼矿的发现为厘定兰坪脉状 Cu 矿床的形成时代提供了理想样

品。本文通过连城矿床中辉钼矿的 Re-Os 定年,对矿床的成矿时代进行厘定,这对研究兰坪盆地成矿以及喜马拉雅期逆冲变形起始时间的确定具有重要意义。

1 地质背景

兰坪盆地处于藏滇板块与扬子陆块之间,夹持于金沙江-哀牢山断裂带和澜沧江断裂带之间(图 1a),向北趋于歼灭,向南与思茅盆地相接。盆地的形成演化大致经历了 5 个阶段:①早二叠世晚期—晚二叠世,金沙江洋的俯冲、消减在兰坪地区形成弧后盆地(牟传龙等,1999);②早-中三叠世,金沙江洋盆闭合、弧-陆碰撞,兰坪盆地由弧后盆地转为弧后前陆盆地(牟传龙等,1999);③晚三叠世的后碰撞地壳伸展形成裂谷盆地,并接受上三叠统浅海相碳酸盐-砂泥岩沉积(廖宗廷等,2005;钟康惠等,2006);④伴随着侏罗纪班公-怒江洋盆开启(刘增乾等,1993),兰坪盆地演变为坳陷盆地,接受侏罗系-白垩系海陆交互相红色陆源碎屑岩建造和碳酸盐建造以及浅湖相砂泥岩-陆源粗碎屑岩建造沉积,构成兰坪第三纪盆地的基底岩系;⑤印度-亚洲大陆于 65 Ma 左右发生对接碰撞,导致三叠系-白垩系沉积岩系作为构造岩片逆冲推覆于第三纪盆地地层之上(侯增谦等,2006),逆冲推覆自盆地两侧向中央推进,形成对冲式逆冲推覆构造系统。晚期因青藏高原东部的大规模走滑,兰坪盆地演变为走滑拉分盆地(Wang et al., 2001;牟传龙等,1999;陶晓风等,2002;付修根,2005)。

伴随印度-亚洲大陆的强烈碰撞,青藏高原东缘自新生代以来以发育新生代大规模走滑断裂系统、逆冲推覆构造系统以及相伴产生的规模宏大的新生代钾质岩浆岩带为典型特征(侯增谦等,2006)。

兰坪盆地贱金属矿床的分布具有东、西分带特点(图 1b)。以兰坪-云龙一带第三系沉积为界,矿床分处于东、西逆冲推覆构造带内(He et al., 2009;侯增谦等,2008)。东带矿床成矿元素组合主要为 Pb-Zn $\pm$ Ag $\pm$ Cu $\pm$ Sr,包括华昌山、灰山、黑山(三山)等 Pb-Zn-Ag 矿床、下区吾 Ag 矿、燕子洞 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床、河西 Sr-Pb 矿、金顶 Zn-Pb(-Sr)矿床等;西矿带的成矿金属组合主要为 Cu $\pm$ Co $\pm$ Ag $\pm$ Pb $\pm$ Zn,一类如富隆厂 Cu-Ag-Pb-Zn 矿床、白秧坪 Cu-Co-Pb-Zn 矿床、吴底厂和李子坪 Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床,另一类

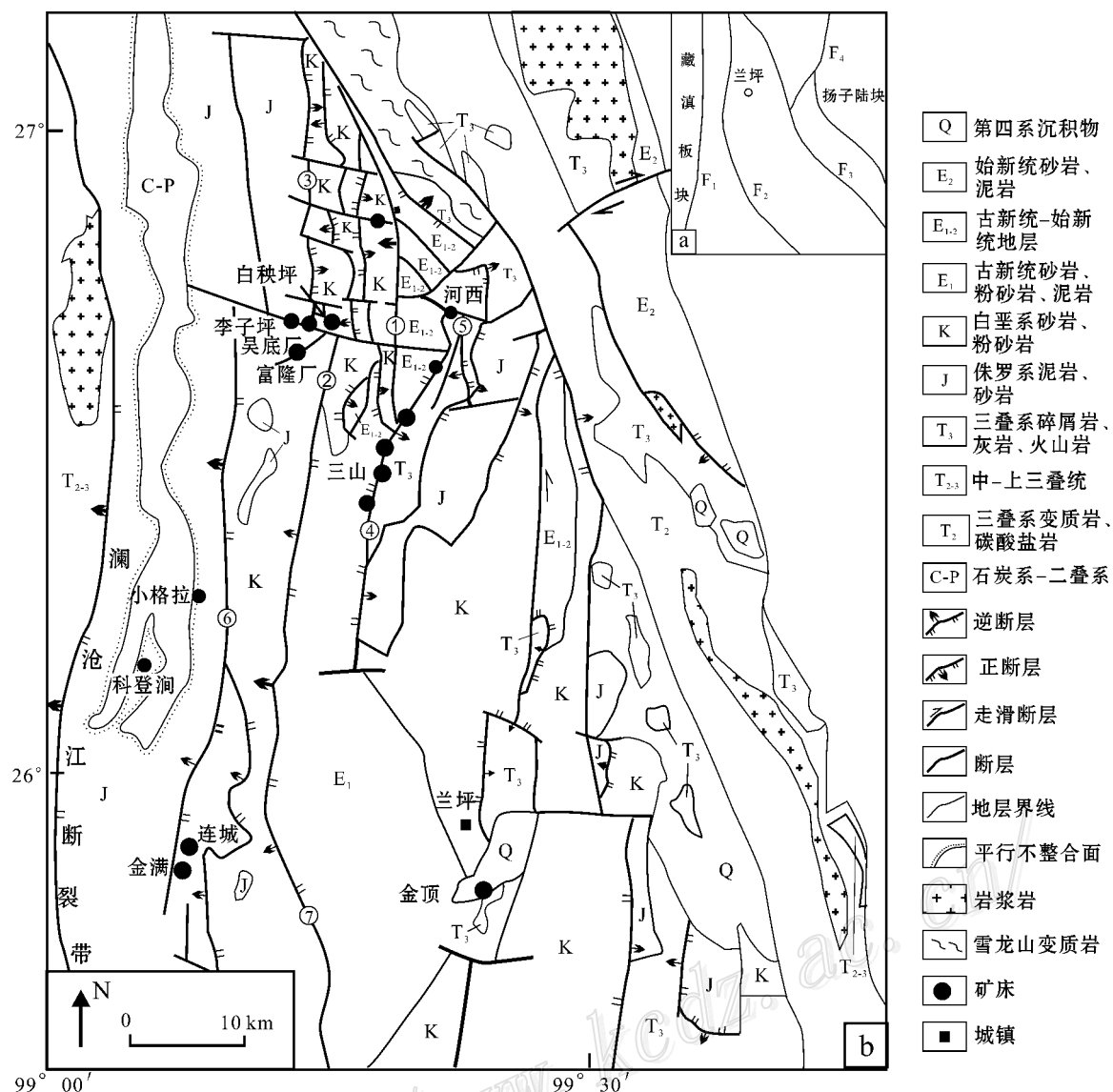


图 1 兰坪盆地构造位置图(a)和兰坪盆地北部地质简图及主要矿床分布图(b)(据徐启东等 2003 修绘)

F₁—怒江断裂带; F₂—澜沧江断裂带; F₃—金沙江-哀牢山断裂带; F₄—中甸-剑川断裂带; ①—匡力底断裂; ②—四十里箐断裂; ③—富隆厂断裂; ④—华昌山断裂; ⑤—水磨房断裂; ⑥—营盘断裂(?); ⑦—大山箐断裂

Fig. 1 Tectonic framework of Lanping Basin(a) and Geological map showing distribution of main deposits in northern Lanping basin(b)(modified after Xu et al., 2003)

F₁—Nujiang fault zone; F₂—Lancangjiang fault zone; F₃—Jingshajiang-Ailaoshan fault zone; F₄—Zhongdian-Jianchuan fault zone; ①—Kuangleidi fault; ②—Sishiliqing fault; ③—Fulongchang fault; ④—Huachangshan fault; ⑤—Shuimofang fault; ⑥—Yingpan fault(?); ⑦—Dashanqing fault

为脉状 Cu 矿床,包括金满、连城、小格拉、科登洞、水泄、河梅沟等矿床。

2 矿区地质

连城脉状铜矿床位于兰坪县营盘镇 195°方向约 2.2 km,处于澜沧江深大断裂带东侧,距金满脉状铜矿床仅 3 km 左右,两者可能为同一个矿床的不同矿

段(图 2;李峰等 2000)。金满-连城脉状铜矿床构造位置上处于西部逆冲推覆构造的根部带(侯增谦等, 2008),带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(图 2)。区内主要出露中、上侏罗统,中侏罗统花开佐组(J_{2h})岩性为紫红色砾岩夹含砾长石石英砂岩、绢云母板岩和灰白色、浅灰绿色含碳钙质板岩、泥岩、泥灰岩,局部夹膏盐层,上侏罗统坝注路组(J_{3b})岩性为紫红

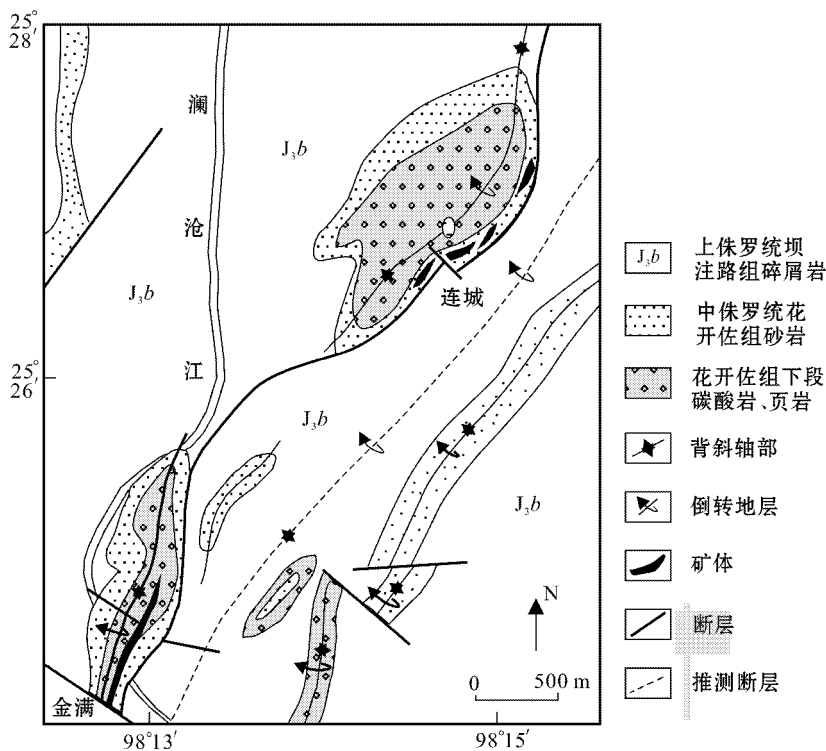


图 2 金满-连城矿床地质简图(据李峰等 2000 修改)

Fig. 2 Geological map of the Jinman-Liancheng deposit(modified after Li et al. 2000)

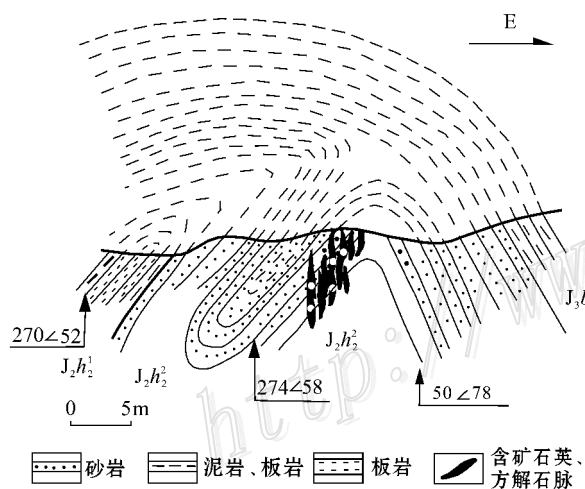


图 3 连城复式背斜倒转翼次级背斜核部矿化示意图(据李峰等 2000 修绘)

Fig. 3 Schematic geological section of sub-anticline core mineralization in the limb of Liancheng reversed complex anticline(modified after Li et al. , 2000)

矿体主要分布在次级背斜的层间滑动破碎带和轴部附近的张裂隙中(图 3 李峰等 2000)。

据矿床矿化形式、金属组合和矿脉穿插关系 ,矿化矿物组合可分为 3 期 :早期为辉钼矿(图 4a、b) ;中期为含铜硫化物石英脉 ± 方解石/菱铁矿 ,该期按照硫化物在石英脉中的组合形式又可分为石英 + 黄铜矿 + 辉铜矿(图 4c)、石英 + 斑铜矿 + 辉铜矿(图 4d)和石英 + 黄铜矿 + 黝铜矿 + 辉铜矿(图 4e)等 3 类 ;晚期主要为方解石矿脉或菱铁矿脉。其中 ,辉钼矿呈脉状产出 ,被石英脉穿插(图 4a、b、f) ,围岩为中侏罗统花开佐组上段砂岩、粉砂岩 ,在辉钼矿中见有浸染状分布的黄铜矿等硫化物 ,可能是后期交代辉钼矿形成的(图 4b)。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。据李峰等(2000)及赵海滨(2006)研究 ,围岩蚀变有硅化、褪色化、方解石化、重晶石化、绢云母化、菱铁矿化、黄铁矿化等(表 1)。

目前连城矿床正处于开发过程中 ,钼矿体的完整形态尚未揭露 ,储量未知 ,前人报道中也未见相关描述。

色绢云母板岩夹薄至中厚层长石石英杂砂岩 ,砂岩厚度向上逐渐变薄 ,赋矿岩层为中侏罗统花开佐组。连城矿段由 8 个大小不等的脉状、透镜状矿体组成 ,

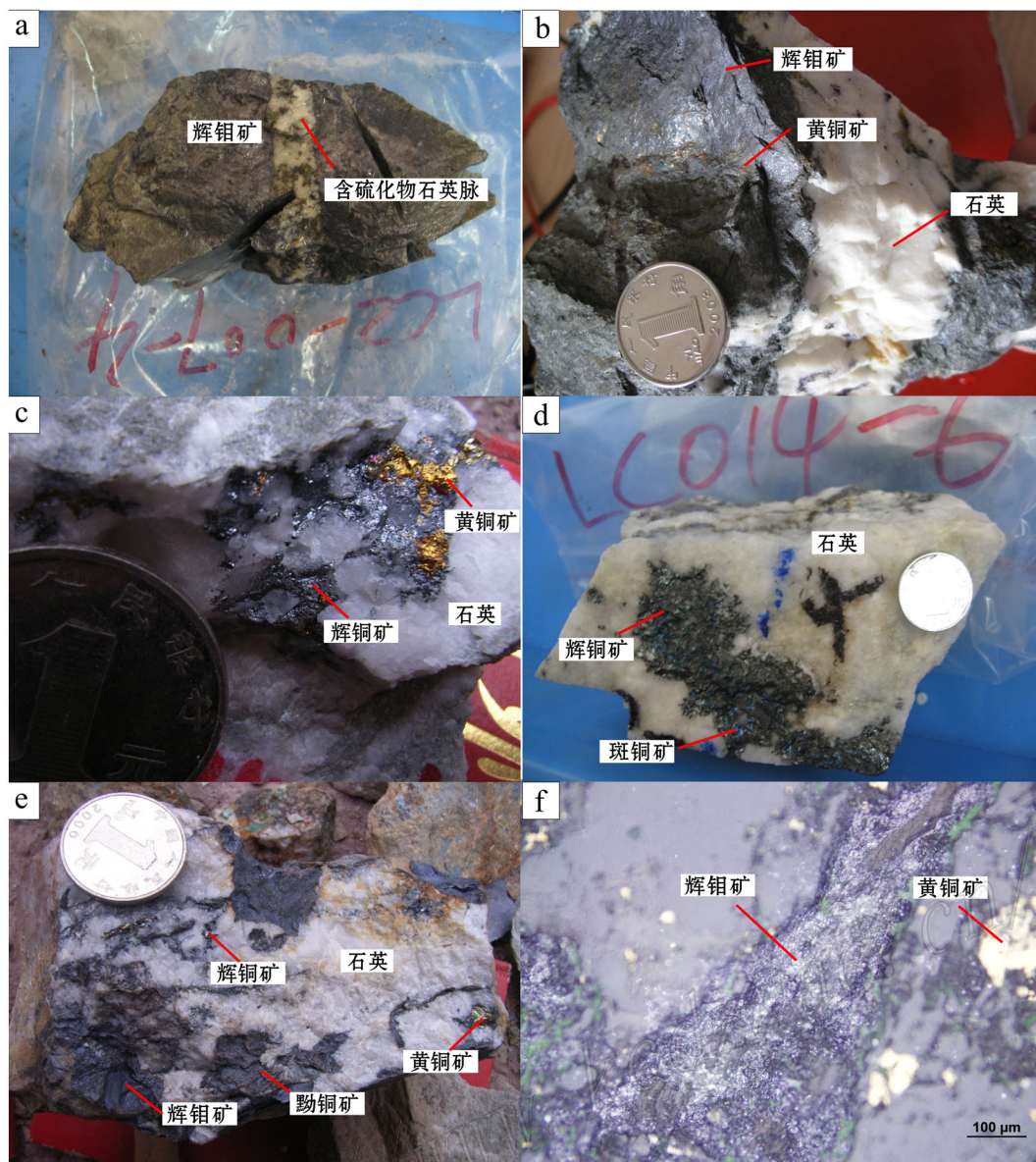


图 4 矿石矿物组合及产状

- a. 早期辉钼矿被石英-硫化物脉切穿; b. 辉钼矿呈脉状产出, 被后期浸染状分布的黄铜矿等硫化物交代; c. 石英 + 黄铜矿 + 辉铜矿;
d. 石英 + 斑铜矿 + 辉铜矿; e. 早期辉钼矿被石英及硫化物切穿; f. 辉钼矿呈脉状产出(反射光)

Fig. 4 Ore mineral assemblages and output status

- a. Early molybdenite penetrated by quartz-sulfide vein; b. Molybdenite vein metasomatized by late disseminated chalcopyrite and other sulfides;
c. Quartz + chalcopyrite + bornite; d. Quartz + bornite + chalcocite; e. Early molybdenite penetrated by quartz-sulfide;
f. Veinlike molybdenite(reflected light)

3 样品和测试分析方法

6 件测试样品均采自井下采坑的含矿石英脉。样品均用微型钻机钻下, 钻头为医用牙钻(钻头不含铁, 对测试结果的影响可以忽略), 之后在双目镜下挑纯, 样品纯度达到 98 % 以上, 样品的化学处理和

分析测试在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成, 测试仪器为电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS。样品经碱熔分解, 用萃取法分离 Re, 蒸馏法分离 Os, 全流程化学回收率达 90 % 以上, Re、 ^{187}Os 的空白值见表 2, 详细的分析流程和相关测试方法见参考文献(杜安道等, 1994; 2001; 屈文俊等, 2004)。

表 2 本次实验全流程的 Re、¹⁸⁷Os 空白水平

Table 2 Re and ¹⁸⁷Os blank level of the whole flow of the experiment

编号	$\varepsilon(\text{Re})/10^{-9}$		$\varepsilon(\text{Os}_{\text{普}})/10^{-9}$		$\varepsilon(^{187}\text{Os})/10^{-9}$	
	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
090113-20	0.0258	0.0011	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000
090122-20	0.0345	0.0053	0.0001	0.0000	0.0003	0.0001

注 本次实验全流程空白水平远小于样品中的 Re、Os 含量,不影响实验过程中 Re、Os 含量的测定。

表 3 连城铜矿辉钼矿 Re-Os 同位素数据

Table 3 Molybdenite Re-Os isotopic data of the Liancheng copper deposit

编号	原样号	样重/g	$\varepsilon(\text{Re})/10^{-6}$		$\varepsilon(\text{Os}_{\text{普}})/10^{-9}$	
			测定值	不确定度	测定值	不确定度
090122-10	LC2007-1	0.00511	134.50	1.10	0.4023	0.0230
090122-11	LC2007-2	0.00522	156.20	1.40	1.2238	0.0516
090122-12	LC2007-4	0.00551	81.49	0.76	0.4805	0.0229
090122-13	LC2007-11	0.00553	116.00	0.80	0.4789	0.0225
090122-14	LC2007-15	0.00638	353.00	2.80	0.3472	0.0518
090122-15	LC014-10-1	0.00524	34.90	0.30	0.1829	0.0161

编号	$\Sigma^{187}\text{Re}/10^{-6}$		$\Sigma^{187}\text{Os}/10^{-9}$		模式年龄/Ma	
	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
090122-10	84.52	0.68	67.77	0.54	48.11	0.67
090122-11	98.18	0.89	78.02	0.65	47.68	0.70
090122-12	51.22	0.47	40.34	0.38	47.26	0.73
090122-13	72.90	0.53	60.56	0.53	49.85	0.69
090122-14	221.90	1.70	180.60	1.50	48.84	0.69
090122-15	21.94	0.19	17.36	0.22	47.49	0.82

注 $\varepsilon_{\text{Os普}}$ 是根据 Nier 值的 Os 同位素丰度,通过¹⁹²Os/¹⁹⁰Os 测量比计算得出, $\Sigma^{187}\text{Re}$ 和 $\Sigma^{187}\text{Os}$ 分别代表¹⁸⁷Re和¹⁸⁷Os 同位素总量。Re、Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差,置信水平 95 %。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02 %),置信水平 95 %。

4 分析结果

测试结果见表 3,模式年龄 t 按下式计算:

$$t = \frac{1}{\lambda} \left[\ln \left(1 + \frac{^{187}\text{Os}}{^{187}\text{Re}} \right) \right]$$

其中, $\lambda(^{187}\text{Re} \text{ 衰变常数}) = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。
模式年龄 t 的不确定度由下式计算: $dt/t \approx \sqrt{(d^{187}\text{Os}/^{187}\text{Os})^2 + (d^{187}\text{Re}/^{187}\text{Re})^2}$,等时线年龄计算
公式: $t = 1/\lambda [\ln(1 + b)]$,年龄误差 $dt/t \approx db/b$ 。

通过计算得出,样品的模式年龄介于(47.26 ± 0.73) Ma~(49.85 ± 0.69) Ma 之间,模式年龄的加权平均值为(48.14 ± 0.87) Ma,等时线年龄为(49.0 ± 1.3) Ma(图 5),两者差值较小,可确定连城铜矿床的成矿年龄为 48~49 Ma。

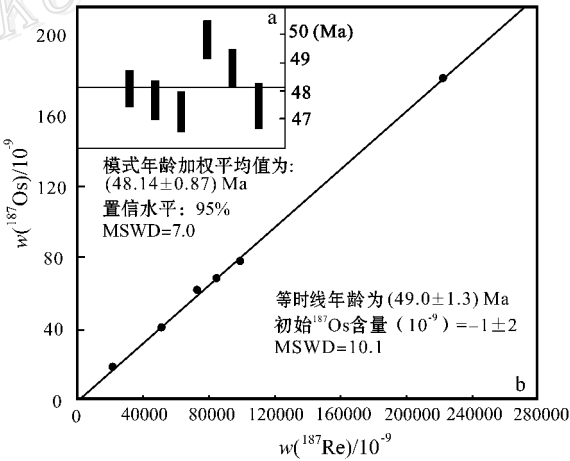


图 5 兰坪盆地连城铜矿辉钼矿 Re-Os 模式年龄加权平均值(a)及 Re-Os 同位素等时线(b)

Fig. 5 Molybdenite Re-Os model age weighted averages(a) and Re-Os isotopic isochron ages(b) of the Liancheng copper deposits in Lanping basin

5 讨 论

5.1 脉状铜矿形成与逆冲推覆关系

前文已述及,兰坪盆地西缘脉状铜矿床有着相似的控矿构造、矿体形态、矿物组合、围岩蚀变等特点(表1)暗示了这些矿床是同一流体系统和构造活动下的产物,因此,连城铜矿形成于48~49 Ma,基本反映了这套脉状铜矿床的形成时代。事实上,这一年龄与毕先梅等(2004)采用极低级变质矿物(即从成岩作用向低级变质作用的转变过程中形成的矿物)伊利石 K-Ar 法得到的金满矿化年龄($(46.71 \pm 0.68) \text{ Ma}$)相差不大,从另一方面佐证了脉状铜矿形成时代相近。从1:20万地质图上分析^①,兰坪盆地的对冲形成了东、西两个相对独立的逆冲推覆带,其中,卷入西部逆冲推覆构造的最新地层为古新世云龙组或果朗组(两者为整合接触),其与上部始新世宝相寺组呈不整合接触(图6;牟传龙等,1999),这一

不整合理论上代表着西部逆冲推覆的发生,其时限介于果朗组和宝相寺组沉积之间,即晚古新世或早始新世,而连城脉状铜矿床形成于48~49 Ma,与此时间段相一致。由此可以推断,该矿床很可能形成于逆冲推覆发生期间。值得注意的是,在此时限内,区域的走滑尚未开始(发育时限为40~24 Ma, Wang et al., 2001),因此脉状铜矿的形成与区域的走滑构造无关。

另外,从控矿构造本身特点看,控制这套脉状铜矿矿体的构造往往出现在背斜的轴部、倾伏端或倒转背斜的翼部(阙梅英等,1998),仅就金满和连城铜矿床而言,控矿构造为金满-连城复式倒转背斜东翼、顺其走向延伸的断层或构造破碎带(图2)。Fernand(2008)设计实验对逆冲构造的诱发和传播过程进行了模拟,结果显示,在变形达到一定程度后,褶皱前翼(forelimb)的中间部位最容易发生脆性破裂,如果继续发展就形成逆冲断层(图7)。

金满和连城的控矿构造和这一特点相似,均产



图6 金满-连城矿区主要地层剖面柱状图(据牟传龙等,1999)

Fig. 6 Main stratigraphic columnar section of the Jinman-Liancheng deposits (after Mou et al., 1999)

① 云南省地质局. 1974. 1:20万矿产图(兰坪幅)及区域地质调查报告.

在大型背斜前翼部位(图 2、3),可以解释为在 E-W 或 NWW-SEE 向挤压过程中褶皱变形达到一定程度后的结果。其控矿构造为小型断裂或破碎带,而没有形成大型逆冲断层,说明挤压没有持续发展,反映了逆冲构造早期的变形特点。由于实验材料与真实地层脆/韧性存在差异所致,含矿地层实际的变形程度与实验模拟有所差别,但并不妨碍对逆冲变形形成控矿构造的认识。

总之,兰坪脉状铜矿床形成于盆地西部逆冲带逆冲推覆发育期间,控矿构造具有逆冲构造早期变形的特点。

5.2 兰坪盆地贱金属矿床形成时代

除脉状铜矿床外,包括金顶、白秧坪等在内的其他贱金属矿床的成矿年龄,一直困扰着许多地质学家,要么是获得的年龄不符合地质实际(薛春纪等, 2003),要么是同一矿床采用同样方法获得的年龄相差较大(薛春纪等, 2003;何明勤等, 2006),而地质条件的约束则了解这些矿床的形成时代提供了重要线索。

在西部逆冲推覆带内,不仅发育脉状铜矿床,而

且发育富隆厂、白秧坪、李子坪、吴底厂等 Cu-Ag-Pb-Zn 矿床,它们均受控于与逆冲推覆伴生的平推断层或逆冲断裂的次级断裂(侯增谦等, 2008;He et al., 2009),尽管控矿构造形式与脉状 Cu 矿床有差异,但都是西部逆冲带逆冲推覆变形的产物。因此,其形成时限也应介于果朗组和宝相寺组沉积之间,即晚古新世或早始新世。

在东部逆冲推覆带内,卷入推覆变形的最新地层为始新世宝相寺组^①,其与上部渐新统也为不整合接触(图 6;牟传龙等, 1999),此不整合应代表东部逆冲推覆的发生,其时限介于宝相寺组和渐新统沉积之间,也就是晚始新世或早渐新世。东部逆冲推覆带有河西-三山等一系列 Pb-Zn-Cu-Ag 矿床/矿段以及金顶超大型 Pb-Zn 矿床,其分别受控于华昌山主逆冲断层和与逆冲推覆相关的构造-盐穹(田洪亮, 1998;邵兆刚等, 2003;何龙清等, 2004;2005;2007;侯增谦等, 2008;He et al., 2009),意味着这些矿床很可能形成于东部逆冲推覆变形期间,即晚始新世或早渐新世。如下两点可以作为佐证:一是在河西-三山的燕子洞矿段,矿化出现在宝相寺组地层

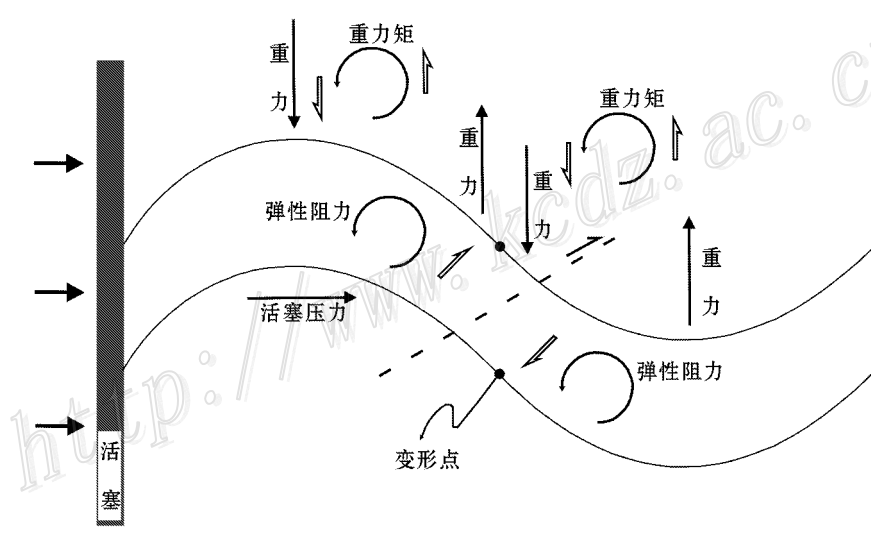


图 7 逆冲构造发生的机制示意图(Fernando , 2008)

图中显示的是在模拟的地层中力和力矩的作用机制,活塞移动(构造应力)引起地层厚度变薄,从而形成弯曲,但是重力和弹性阻力使弯曲趋向于变平,如果压力超过沙层的承受力时,松散的沙层前翼中部将被破坏,水平力也有助于逆冲运动

Fig. 7 Experimental display of the development mechanism of a thrust structure(Fernando , 2008)
Schematic representation of forces and torques acting on the model layers. Buckles are formed and amplified by layer parallel shortening induced by piston displacement(tectonic forces), but gravity and elastic resistance tend to flatten them out. This resistance to amplification and the respective torques make the brittle sand layer break in the middle of the forelimb if stresses exceed the brittle yield of the sand layer. The horizontal forces also add to thrust movement

① 云南省地质局. 1974. 1:20 万矿产图(兰坪幅)及区域地质调查报告.

当中(赵海滨,2006),表明确实有宝相寺组沉积之后的矿化发生;二是从区域上看,渐新统及其更新的地层没有出现任何矿化^①,反映矿床的形成可能早于渐新统沉积。

总之,兰坪盆地西部逆冲推覆系统控制的以 Cu(-Ag)为主的成矿系统形成可能早于东部逆冲推覆系统控制的以 Pb-Zn 为主的成矿系统,推测前者形成于晚古新世或早始新世,后者形成于晚始新世或早渐新世。

5.3 兰坪盆地新生代逆冲起始时间

逆冲推覆构造系统是青藏高原东缘新生代以来的主要构造变形之一,通过对卷入逆冲推覆地层的分析,前文讨论中已提出兰坪盆地最早的逆冲(西部逆冲带)发生在晚古新世或早始新世,较晚的逆冲推覆(东部逆冲推覆带)发生在晚始新世或早渐新世,与前人提出的兰坪盆地逆冲推覆发生于始新世-渐新世(吴根耀,1994;李光勋,1994;陶晓风等,2002;刘俊来等,2006)的认识是一致的。但具体到其逆冲起始时间,还未见相关报道。连城铜矿发育在西部逆冲带,其形成于逆冲变形过程中,或地层褶皱变形之后,因此其形成年龄代表着逆冲构造的起始时间,应至少早于 48~49 Ma。在青藏高原东北缘的玉树-囊谦地区,Spurlin 等(2005)根据覆盖在逆冲断层上的火山岩的年龄,提出逆冲推覆的发生早于 51 Ma,两者逆冲发生的时间是基本一致的。

6 结 论

(1)连城铜矿床辉钼矿样品的 Re-Os 模式年龄加权平均值为 (48.14 ± 0.87) Ma,等时线年龄为 (49.0 ± 1.3) Ma,指示兰坪盆地热液脉型铜矿床形成于 48~49 Ma。

(2)兰坪脉状铜矿床形成于盆地西部逆冲带逆冲推覆发育期间,其成矿年龄指示西部逆冲推覆起始于 49 Ma 前,形成于青藏高原的主碰撞汇聚时期(65~41 Ma)。

(3)受控于西部逆冲推覆系统的以 Cu(-Ag)为主的成矿系统,其形成可能早于东部逆冲推覆系统控制的以 Pb-Zn 为主的成矿系统,推测前者形成于晚古新世或早始新世,后者形成于晚始新世或早渐新世。

志 谢 在野外工作期间,David Leach 博士给予了很大的指导和帮助,同时,国家地质实验测试中心的杜安道研究员和李超同学在样品的处理和测试中亦给予了很大帮助,在此一并表示由衷的感谢。

References

- Bi X M and Mo X X. 2004. Transition from diagenesis to low-grade metamorphism and related minerals and energy resources[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1):287-294 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, Zhao D M, Wang S X, Sun D Z and Liu D Y. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Carius tube sample preparation[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 20(4):247-252 (in Chinese with English abstract).
- Fernando O Marques. 2008. Thrust initiation and propagation during shorting of a 2-layer model lithosphere[J]. *Journal of Structural Geology*, 30:29-38.
- Fu X G. 2005. Evolution of Lanping basin and formation of relevant metal deposits[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 27(2):26-32 (in Chinese with English abstract).
- Gu X X, Zhang Y M, Dong S Y, Tang J X, Wang C S and Chen J P. 2007. Basin fluid mineralization during multistage evolution of the Lanping sedimentary basin, southwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(6):984-995.
- He L Q, Chen K X, Yu F M, Wei J Q, Yang A P and Li H. 2004. Nappe tectonics and their ore-controlling of Lanping basin in Yunnan Province[J]. *Geology and Prospecting*, 40(4):7-12 (in Chinese with English abstract).
- He L Q, Chen K X, Wei J Q and Yu F M. 2005. Geological and geochemical characteristics and genesis of ore deposits in eastern ore belt of Baiyangping area, Yunnan Province[J]. *Mineral Deposits*, 24(1):61-70 (in Chinese with English abstract).
- He L Q, Ji W, Chen K X, Yu F M, Wei J Q, Yang A P and Yang W G. 2007. Ore-controlling effect of nappe structure in the east ore zone of the Baiyangping area, Lanping basin, Yunnan[J]. *Journal of Geomechanics*, 13(2):110-118 (in Chinese with English abstract).
- He L Q, Song Y C, Chen K X, Hou Z Q, Yu F M, Yang Z S, Wei J Q, Li Z and Liu Y C. 2009. Thrust-controlled, sediment-hosted, Himalaya Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland foldbelt, eastern margin of Tibetan Plateau[J]. *Ore Geology Reviews* (in press).
- He M Q, Liu J J, Li C Y, Li Z M, Liu Y P, Yang A P and Sang H Q. 2006. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of ore quartz from the Baiyangping Cu-Co polymetallic mineralized concentration area, Lanping, Yunnan[J]. *Chinese Journal of Geology*, 41(4):688-693 (in Chinese with English abstract).

① 云南省地质局. 1974. 1:20 万矿产图(兰坪幅)及区域地质调查报告.

- Hou Z Q, Pan G T, Wang A J, Mo X X, Tian S H, Sun X M, Ding L, Wang E Q, Gao Y F, Xie Y L, Zeng P S, Qin K Z, Xu J F, Qu X M, Yang Z M, Yang Z S, Fei H C, Meng X J and Li Z Q. 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. Mineral Deposits, 25(5): 521-543 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Tian S H, Xie Y L, Yuan Z X, Yang Z S, Yang Z M, Yin S P, Fei H C, Zou T R and Li X Y. 2008. Mianning-Dechang Himalayan REE belt associated with carbonatite-alkalic of REE deposits and a possible metallogenic model[J]. Mineral Deposits, 27(2): 145-176 (in Chinese with English abstract).
- Li F. 1994. The regional ore-controlling factors of copper deposits in the Lanping-Simao basin[J]. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 3(6): 321-326 (in Chinese with English abstract).
- Li F and Pu W M. 2000. Geology of red beds copper deposits in western Yunnan[M]. Kunming: Yunnan University of Publishing House. 16-30 (in Chinese with English abstract).
- Li G X. 1994. A preliminary study of some thrust-nappe structures in Lanping basin[J]. Yunnan Geology, 13(2): 203-215 (in Chinese with English abstract).
- Li X M, Gong W J, Tan K X and Gong G L. 2001b. Preliminary discussion on the geological characteristics and mineralogenetic epoch of Xiaogela copper deposit in Lanping basin[J]. Journal of East China Geological Institute, 4(11): 17-19 (in Chinese with English abstract).
- Li X M. 2001a. Metallogenic age of Jinman copper deposits in western Yunnan Province, China[J]. Geoscience, 15(4): 405-408 (in Chinese with English abstract).
- Liao Z T and Chen Y K. 2005. Nature and evolution of Lanping-Simao basin prototyp[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 33(11): 1527-1531 (in Chinese with English abstract).
- Liu J J, Li Z M, Liu Y P, Li C Y, Zhang Q, He M Q, Yang W G, Yang A P and San H Q. 2003. The metallogenic age of Jinman vein copper deposits, western Yunnan[J]. Geoscience, 17(1): 34-39 (in Chinese with English abstract).
- Liu J L, Song Z J, Cao S Y, Zhai Y F, Wang A J, Gao L, Xiu Q Y and Cao D H. 2006. The dynamic setting and processes of tectonic and magmatic evolution of the oblique collision zone between Indian and Eurasian plates: Exemplified by the tectonic evolution of the Three River region, eastern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(4): 775-786 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Zhao S R, Shen J, Jiang N and Huo W G. 1998. Review on direct isotopic dating of hydrothermal ore-forming processes[J]. Progress in Geophysics, 13(3): 46-55 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z Q, Li X Z, Ye Q T, Luo J N, Shen G F and Yang Y Q. 1993. Tectonic-magmatic belt division and distribution of mineral in Sanjiang region[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-246 (in Chinese with English abstract).
- Mou C L, Wang J, Yu Q and Zhang L S. 1999. The evolution of the sedimentary basin in Lanping area during Mesozoic-Cenozoic[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 19(3): 30-36 (in Chinese with English abstract).
- Qu W J and Du A D. 2004. Correction of mass discrimination in the determination of the isotope abundance for rhenium and osmium in molybdenite by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 25(Supp.): 181-182 (in Chinese with English abstract).
- Que M Y, Chen D M, Zhang L S, Xia W J and Zhu C Y. 1998. Copper deposits in Lanping-Simao basin[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).
- Shao Z G, Meng X G, Feng X Y and Zhu D G. 2003. Tectonic characteristics of the Baiyangping-Huachangshan ore belt, Yunnan Province and its ore-controlling effect[J]. Journal of Geomechanics, 8(3): 246-253 (in Chinese with English abstract).
- Spurlin M S, Yin A, Horton B K, Zhou J Y and Wang J H. 2005. Structural evolution of the Yushu-Nangqian region and its relationship to syn-collisional igneous activity, east-central Tibet[J]. GSA Bulletin, 117: 1293-1317.
- Tan J, Wei J H, Yang C F, Feng B and Li Y H. 2006. Application state of isotopic dating methods for ore deposits[J]. Geology and Prospecting, 42(3): 61-66 (in Chinese with English abstract).
- Tao X F, Zhu L D, Liu D Z, Wang G Z and Li Y G. 2002. The formation and evolution of the Lanping basin in western Yunnan[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 29(5): 521-525 (in Chinese with English abstract).
- Tian H L. 1998. The geological features of Sanshan polymetallic deposit, Lanping[J]. Yunnan Geology, 17(2): 199-206 (in Chinese with English abstract).
- Wang J H, Yin A, Harrison T M, Grove M, Zhang Y Q and Xie G H. 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. Earth Planet Sci. Lett., 199: 123-133.
- Wang Y B, Chen W and Zeng P S. 2005. Constraints of sericite ^{40}Ar - ^{39}Ar ages on the metallogenic epoch of the Jinman vein copper deposit in the Lanping basin, northwestern Yunnan[J]. Geological Bulletin of China, 24(2): 181-184 (in Chinese with English abstract).
- Wu G Y. 1994. Tertiary thrust-nappe structures in northwest Yunnan, China[J]. Geotectonic and Metallogenesis, 18(4): 331-338 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q D and Li J W. 2003. 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 Deposits, 22(4): 365-376 (in Chinese with English abstract).
- Xu X C, Huang Z, Xie Q Q, Yue S C and Liu Y. 2004. Ar-Ar isotopic ages of Jinman and Shuixie copper polymetallic deposits in Yunnan Province, and their geological implications[J]. Geological Journal of China University, 10(2): 157-164 (in Chinese with English abstract).
- Xue C J, Chen Y C, Wang D H, Yang J M, Yang W G and Zeng R. 2003. Geology and isotopic composition of Helium, Neon, Xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits,

- northwest Yunnan, China [J]. Science in China (Ser. D), 33(4): 315-322 (in Chinese with English abstract).
- Zhao H B. 2006. Study on the characteristics and metallogenic conditions of copper polymetallic deposits in middle-northern Lanping basin, western Yunnan (dissertation for Doctor degree) [D]. Supervisor: Mo X. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhong K H, Tang J X, Liu Z C, Kou L L, Dong S Y, Li Z J and Zhou H W. 2006. Mesozoic-Cenozoic intracontinental rifting of Changdu-Simao tectonic zone in east margin of Qinghai-Tibet, WS China [J]. Acta Geological Sinica, 80(9): 6921-6937 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 毕先梅, 莫宣学. 2004. 成岩-极低级变质-低级变质作用及有关矿产 [J]. 地学前缘, 11(1): 287-294.
- 杜安道, 何红菱, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究 [J]. 地质学报, 68(4): 339-347.
- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 孙德忠, 刘敦一. 2001. Carius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄 [J]. 岩矿测试, 20(4): 247-252.
- 付修根. 2005. 兰坪陆相盆地演化与金属矿床的形成 [J]. 地球科学与环境学报, 27(2): 26-32.
- 何龙清, 陈开旭, 魏军奇, 余凤鸣. 2005. 云南白秧坪地区东矿带矿床地球化学特征及成因初析 [J]. 矿床地质, 24(1): 61-70.
- 何龙清, 陈开旭, 余凤鸣, 魏君奇, 杨爱平, 李航. 2004. 云南兰坪盆地推覆构造及其控矿作用 [J]. 地质与勘探, 40(4): 7-12.
- 何龙清, 季玮, 陈开旭, 余凤鸣, 魏君奇, 杨爱平, 杨伟光. 2007. 滇西兰坪盆地白秧坪地区东矿带推覆构造的控矿作用 [J]. 地质力学学报, 13(2): 110-118.
- 何明勤, 刘家军, 李朝阳, 李志明, 刘玉平, 杨爱平, 桑海清. 2006. 云南兰坪白秧坪铜钴多金属矿集区矿石中石英的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄 [J]. 地质科学, 41(4): 688-693.
- 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. 2006. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用 [J]. 矿床地质, 25(5): 521-543.
- 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 袁忠信, 杨竹森, 杨志明, 尹淑萍, 费红彩, 邹天人, 李小明. 2008. 川西冕宁-德昌喜马拉雅期稀土成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型 [J]. 矿床地质, 27(2): 145-176.
- 李峰. 1994. 兰坪-思茅盆地铜矿区域控矿因素 [J]. 有色金属矿产与勘查, 3(6): 321-326.
- 李峰, 甫为民. 2000. 滇西红层铜矿地质 [M]. 昆明: 云南大学出版社. 16-30.
- 李光勋. 1994. 兰坪盆地某些逆冲推覆构造研究 [J]. 云南地质, 13(2): 203-215.
- 李小明, 龚文君, 谭凯旋, 龚革联. 2001b. 兰坪盆地小格拉铜矿床地质特征及成矿时代初探 [J]. 华东地质学院学报, 4(11): 17-19.
- 李小明. 2001a. 滇西金满铜矿床成矿年龄测定 [J]. 现代地质, 15(4): 405-408.
- 廖宗廷, 陈跃昆. 2005. 兰坪-思茅盆地原型的性质及演化 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 33(11): 1527-1531.
- 刘家军, 李志明, 刘玉平, 李朝阳, 张乾, 何明勤, 杨伟光, 杨爱平, 桑海清. 2003. 滇西金满脉状铜矿床成矿年龄讨论 [J]. 现代地质, 17(1): 34-39.
- 刘建明, 赵善仁, 沈洁, 姜能, 霍卫国. 1998. 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): 46-55.
- 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 翟云峰, 王安建, 高兰, 修群业, 曹殿华. 2006. 印度-欧亚侧向碰撞带构造-岩浆演化的动力学背景与过程——以藏东三江地区构造演化为例 [J]. 岩石学报, 22(4): 775-786.
- 刘增乾, 李兴振, 叶庆同, 罗建宁, 沈敢富, 杨岳清. 1993. 三江地区构造岩浆带的划分与矿产分布规律 [M]. 北京: 地质出版社. 1-246.
- 牟传龙, 王剑, 余谦, 张立生. 1999. 兰坪中新生代沉积盆地演化 [J]. 矿物岩石, 19(3): 30-36.
- 屈文俊, 杜安道. 2004. 电感耦合等离子体质谱测定辉钼矿中 Re、Os 含量时的质量分馏效应的校正 [J]. 质谱学报, 25(增刊): 181-182.
- 阙梅英, 程敦模, 张立生, 夏文杰, 朱创业. 1998. 兰坪-思茅盆地铜矿床 [M]. 北京: 地质出版社.
- 邵兆刚, 孟宪刚, 冯向阳, 朱大岗. 2003. 云南白秧坪-华昌山矿带构造特征及其控矿作用 [J]. 地质力学学报, 9(3): 246-253.
- 谭俊, 魏俊浩, 杨春福, 冯波, 李闰华. 2006. 矿床同位素定年方法的应用现状评析 [J]. 地质与勘探, 42(3): 61-66.
- 陶晓风, 朱利东, 刘登忠, 王国芝, 李佑国. 2002. 滇西兰坪盆地的形成及演化 [J]. 成都理工学院学报, 29(5): 521-525.
- 田洪亮. 1998. 兰坪三山多金属矿床地质特征 [J]. 云南地质, 17(2): 199-206.
- 王彦斌, 陈文, 曾普胜. 2005. 滇西北兰坪盆地金满脉状铜矿床绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄对成矿时代的约束 [J]. 地质通报, 24(2): 181-184.
- 吴根耀. 1994. 滇西北地区第三纪的逆冲-推覆构造 [J]. 大地构造与成矿学, 18(4): 331-338.
- 徐启东, 李建威. 2003. 云南兰坪北部铜多金属矿化区成矿流体动与矿化分带——流体包裹体和稳定同位素证据 [J]. 矿床地质, 22(4): 365-376.
- 徐晓春, 黄震, 谢巧勤, 岳书仓, 刘因. 2004. 云南金满、水泄铜多金属矿床的 Ar-Ar 同位素年代学及其地质意义 [J]. 高校地质学报, 10(2): 157-164.
- 薛春纪, 陈毓川, 王登红, 杨建民, 杨伟光, 曾荣. 2003. 滇西北金顶和白秧坪矿床地质和 He、Ne、Xe 同位素组成及成矿时代 [J]. 中国科学 (D 辑), 33(4): 315-322.
- 赵海滨. 2006. 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 (博士论文) [D]. 导师: 莫宣学. 北京: 中国地质大学.
- 钟康惠, 唐菊兴, 刘肇昌, 寇林林, 董数义, 李志军, 周慧文. 2006. 青藏东缘昌都-思茅构造带中新生代陆内裂谷作用 [J]. 地质学报, 80(9): 6921-6937.