

# 滇西兰坪盆地白秧坪 Pb-Zn-Cu-Ag 多金属矿床 东矿带成矿年代学探讨\*

冯彩霞<sup>1</sup>, 刘 燊<sup>1</sup>, 毕献武<sup>2</sup>, 胡瑞忠<sup>2</sup>, 池国祥<sup>3</sup>, 陈俊瑾<sup>4</sup>, 冯 强<sup>1</sup>, 郭晓磊<sup>1</sup>

(1 大陆动力学国家重点实验室 西北大学地质系, 陕西 西安 710069; 2 矿床地球化学国家重点实验室 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 3 Department of Geology, University of Regina, Regina S4S 0A2, 加拿大; 4 青海省西宁市武警黄金第六支队, 青海 西宁 810021)

**摘要** 白秧坪 Pb-Zn-Cu-Ag 多金属矿集区夹持于金沙江和澜沧江断裂之间, 隶属兰坪盆地北部, 分为东、西 2 个矿带。文章采用闪锌矿、方铅矿的 Rb-Sr 法和成矿阶段方解石的 Sm-Nd 法, 对白秧坪 Pb-Zn-Cu-Ag 多金属矿床东矿带华昌山和下区五矿段进行了成矿年代厘定, 获得方铅矿以及闪锌矿和方铅矿的矿物组合 Rb-Sr 等时线年龄为  $(32.8 \pm 1.5)$  Ma, 方解石的 Sm-Nd 等时线年龄为  $(33.32 \pm 0.43)$  Ma。研究表明, 通过对特定矿床的主要矿石矿物采用 Rb-Sr 法和 Sm-Nd 法获得的年龄在误差范围内是一致的, 从而起到了相互验证的作用, 并对矿床的成矿背景具有一定的指示性。通过成矿年龄的探讨, 认为东矿带铅锌为主的矿化期主要产生于青藏高原东缘晚碰撞阶段( $40 \sim 26$ ) Ma, 伴随印度-亚洲大陆碰撞造山, 形成逆冲推覆构造和赋矿地层, 控制了 Pb-Zn 矿床的形成和发育。该期 Pb-Zn 矿床与兰坪盆地金顶和西矿带 Pb-Zn 矿床、囊谦盆地 Pb-Zn 矿床和沱沱河盆地 Pb-Zn 矿床具有一定的可比性。

**关键词** 地球化学; 成矿年代; 东矿带; Cu-Pb-Zn-Ag 多金属矿床; 白秧坪; 兰坪盆地; 滇西

**中图法分类号:** P618.41; P618.42; P618.43; P618.52

**文献标志码:** A

## An investigation of metallogenic chronology of eastern ore block in Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic ore deposit, Lanping Basin, western Yunnan Province

FENG CaiXia<sup>1</sup>, LIU Shen<sup>1</sup>, BI XianWu<sup>2</sup>, HU RuiZhong<sup>2</sup>, CHI GuoXiang<sup>3</sup>, CHEN JunJin<sup>4</sup>,  
FENG Qiang<sup>1</sup> and GUO XiaoLei<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;  
2 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China; 3 Department of Geology, University of Regina, Regina S4S 0A2, Canada; 4 No. 6 Gold Geological Party of CAPF, Xining 810021, Qinghai, China)

### Abstract

As one part of the northern Lanping Basin, the Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic ore district is located between the Jinshajiang fault and the Lancangjiang fault. On the basis of the sphalerite/galena Rb-Sr and calcite Sm-Nd dating, this study provides preferable ore-forming ages  $(32.8 \pm 1.5)$  Ma and  $(33.32 \pm 0.43)$  Ma for the Huachangshan and Xiaquwu ore plates in Baiyangping Cu-Pb-Zn-Ag polymetallic ore district, western Yunnan Province, China. The results suggest that the Rb-Sr and Sm-Nd dating data are consistent within the error

\* 本文得到国家自然科学基金(编号: 40972071、41373028、41573022)和“973”项目(编号: 2015CB452603)资助

第一作者简介 冯彩霞, 女, 1976 年生, 博士, 副研究员, 矿床地球化学专业。Email: fengcaixia@nwu.edu.cn

收稿日期 2016-02-26; 改回日期 2017-04-30。秦思婷编辑。

range, which, in addition, has certain instruction significance for understanding the deposit metallogenic background. Moreover, due to the age of mineralization, Pb-Zn mineralization period in eastern ore belt mainly produced between 40 Ma and 26 Ma when late collision appeared in east edge of the Qinghai-Tibet plateau. Thrust-nappe system and hosted ore strata were formed due to the collision and orogenesis between India and Asia, and then Pb-Zn ore deposits occurred. This period of Pb-Zn ore deposit can be compared with other similar deposits in Jingding, Nangqian, and Tuotuohe.

**Key words:** geochemistry, metallogenic chronology, eastern ore block, Cu-Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposit, Baiyangping, Lanping Basin, west Yunnan Province

成矿年代是成矿学研究的时间域,也是从地质历史分析矿床生成、发展、演化规律和区域成矿的重要科学论据(裴荣富等,1995),准确的年代学资料是认识或定义大规模成矿或爆发性成矿的基础(毛景文等,2005)。目前,用于直接测定成矿年代学的常用方法主要包括单矿物的Rb-Sr等时线(如金云母和黄铁矿等,李秋立等,2006;韩以贵等,2007)、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄和等时线(如绢云母、石英和闪锌矿等,邱华宁等,2002)、Sm-Nd等时线(如白钨矿、萤石和方解石等,Peng et al.,2003)、Re-Os定年(如与黑色岩系有关的矿床,毛景文等,2001;Mao et al.,2002;杨刚等,2004)、Pb-Pb等时线(如Ni-Mo-PGE硫化物矿石,Jiang et al.,2006)以及单颗粒锆石U-Pb定年。上述定年技术和方法的建立为更好分析矿床的形成、发展和演化规律奠定了非常重要的科学依据。近年来,国内外学者运用上述方法,对与岩浆活动无明显成因关系的沉积岩容矿矿床(如MVT矿床)的定年开展了不断尝试和探索,并获取了明显成果和认识(Grandia et al.,2000;Leach et al.,2001;李文博等,2004a,2004b;Symons et al.,2005,2009;张长青等,2008;田世洪等,2009;王光辉等,2009)。

兰坪盆地是在原特提斯和古特提斯基础上发展起来的中新生代陆相盆地,也是“三江”构造带的重要组成部分(陶晓风等,2002)。盆地内矿产资源丰富,其中,白秧坪Cu-Pb-Zn-Ag多金属矿集区是该盆地内继金顶Pb-Zn矿床后,发现的又一大型多金属成矿区,该矿区形成于大陆碰撞环境,发育在强烈变形的沉积盆地内,受逆冲推覆构造控制,部分特征与MVT型Pb-Zn矿床类似(侯增谦等,2008a,2008b;He et al.,2009)。目前,白秧坪多金属矿集区西矿带的定年工作已取得较多成果,如薛春纪等(2003)和何明勤等(2006)通过石英Ar-Ar快中子活化法测定了白秧坪矿段早期矿化年龄,为( $62.8 \pm 0.60$ )Ma和( $55.9 \pm 0.29$ )Ma;王晓虎等(2011)等利用方解石

Sm-Nd和闪锌矿的Rb-Sr法对西矿带吴底厂、李子坪和富隆厂3个矿段进行了定年测试,得出成矿年龄范围为30~29 Ma;而东矿带目前只是根据地层和断裂的关系,推测出河西-三山矿床的矿化时代(等于或晚于34 Ma,宋玉财等,2011)。根据逆冲推覆构造特征,推断其通常显示多期次特征,东部逆冲带大致发育于34 Ma或56 Ma,而西部褶皱-逆冲发育时限不晚于48~49 Ma(王光辉等,2009)。成矿年代学研究的滞后,问题在于东矿带缺乏合适的可供常规同位素定年的矿物,这严重制约了对其成矿地质背景和成因的认识。因此,本文拟在已有研究基础上,精确测定东矿带的成矿时代,从时限上进一步厘定东、西成矿带的关系,为进一步深入认识该矿床的成因提供可靠的理论依据。

## 1 矿床地质特征

兰坪盆地在构造上属于环特提斯构造域的重要组成部分,位于三江构造带中段(图1a),是具有多次洋盆开合、多个陆块拼贴和多次造山的地带(陶晓凤等,2002)。它介于澜沧江和金沙江断裂带之间,兰坪-思茅微板块之上,东侧与扬子板块相接,西侧与藏滇板块毗邻,北为昌都盆地,南为思茅盆地(Xue et al.,2007)。盆地断裂系统深达上地幔和下地壳,并存在近NW向隐伏构造,共同控制了盆地的动力过程,使其在中生代—新生代经历了印支期前陆-裂谷、燕山期坳陷及喜马拉雅期走滑拉分的演化(薛春纪等,2002)。该区铜等多金属矿产资源高度富集,形成了中国著名的“三江”铜多金属成矿带,白秧坪Cu-Pb-Zn-Ag多金属矿集区就位于兰坪盆地的北部(图1a)。

受造山作用控制,兰坪盆地东、西两侧分别发育与澜沧江-昌宁-孟连造山带和金沙江-哀牢山造山带相关的前陆逆冲推覆构造系统,控制着白秧坪地区Cu-Pb-Zn-Ag多金属矿集区的成矿作用。根据成矿

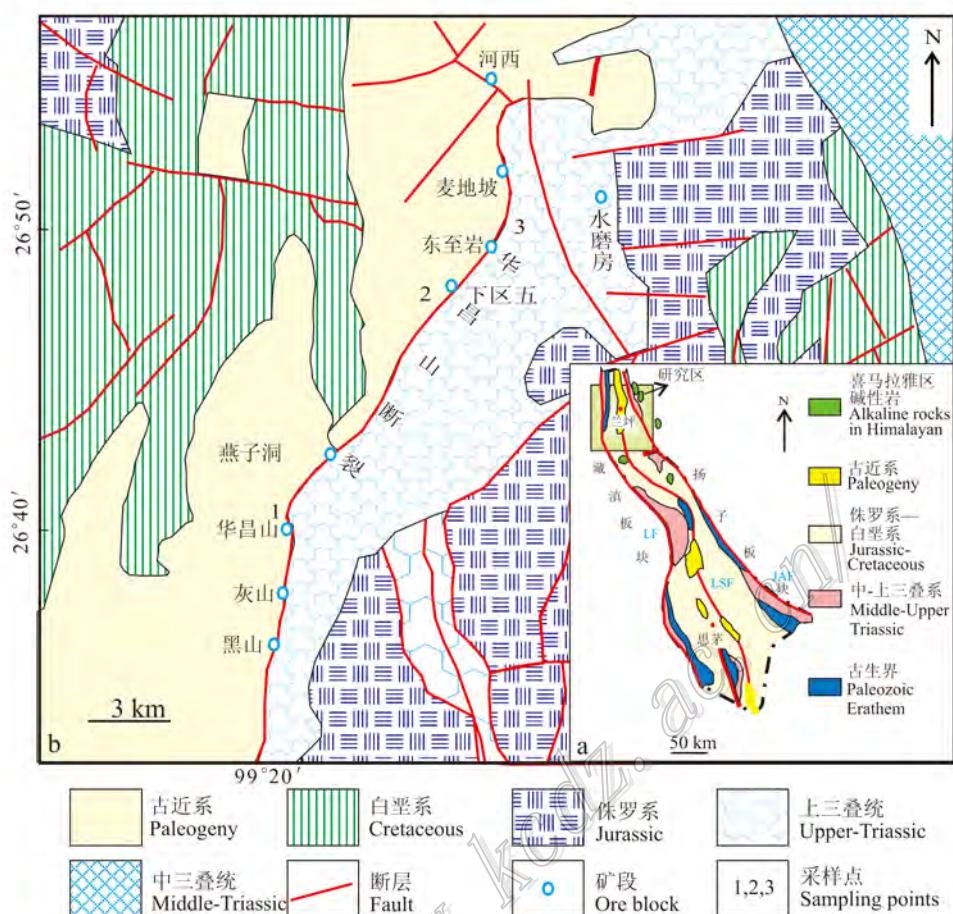


图 1 兰坪盆地构造位置与地质简图(a)和白秧坪 Cu-Pb-Zn-Ag 多金属矿集区东矿带地质图(b)(据云南省地质调查院第三地质矿产调查所, 2003; Xue et al., 2007, 略有修改)  
JAF—金沙江-哀牢山断裂; LF—澜沧江断裂; LSF—兰坪-思茅断裂

Fig. 1 The structural location and geological sketch map of Lanping Basin (a) and geological sketch map of the east ore belt in the Baiyangping Cu-Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposit (b), Lanping basin, western Yunnan Province  
(modified after No. 3 Geology and Mineral Resources Survey, Yunnan Geological Survey, 2003; Xue et al., 2007)

JAF—Jinshajiang-Ailaosha fault; LF—Lancangjiang fault; LSF—Laping-Simao fault

元素组合、控矿特征、矿床成因及所属的空间位置不同, 该矿集区东部与西部属不同体系的成矿带(三山-河西银多金属矿带和富隆厂-白秧坪铜多金属矿带; 陈开旭等, 2000; 魏君奇, 2001)。研究表明, 该区逆冲构造近 NS 向或 NW-SE 向, 显示出对盆地的控制或破坏(He et al., 2009); 另外, 本区逆冲显示多期次特征, 东部逆冲带和西部褶皱-逆冲发育时限有明显差异(陶晓风等, 2002)。

东矿带由麦地坡、东至岩、下区五、燕子洞、华昌山、灰山和黑山 7 个矿段组成, 是以 Cu、Ag、Pb、Zn、Sr 为主的成矿带, 该成矿带沿华昌山断裂带南北延伸>30 km, 水平距离>15 km(图 1b), 与金沙江-哀

牢山造山带前陆逆冲推覆构造系统关系密切(何龙清等, 2005); 主要出露为古新统云龙组( $E_{1y}$ : 岩性为紫红和砖红色泥岩、粉砂岩、泥砾岩为主, 局部含石膏)、上三叠统麦初箐组( $T_{3m}$ : 岩性为石英砂岩、粉砂质泥岩夹黑色页岩、泥岩底部夹泥灰岩)、瓦鲁八组( $T_{3wl}$ : 岩性为黑色页岩、粉砂岩夹薄层细砂岩)和三合洞组( $T_{3s}$ : 岩性为块状粉晶泥晶灰岩、白云岩、灰质白云岩, 含燧石团块及条带粉晶灰岩及细晶灰岩, 该层位为主要赋矿层位)(图 2)。从地层和成矿元素含量来看, 主含矿层(三合洞组)的矿石和围岩样品的 Pb、Zn、Cu、Ag 等均高于其他地层(冯彩霞等, 2011)。

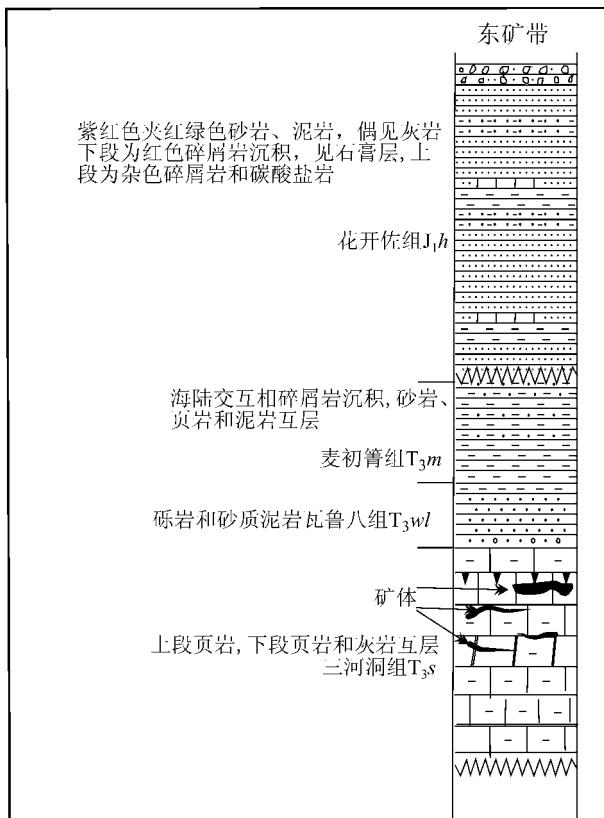


Fig. 2 Stratigraphic column of the eastern ore zone of the Baiyangping Cu-Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposit, Lanping basin (after No. 3 Geology and Mineral Resources Survey, Yunnan Geological Survey, 2003; Feng et al., 2011)

东矿带主要发育构造角砾岩, 角砾成分主要为上盘的三合洞组灰岩, 多为略具磨圆状的次棱角状, 下盘为古新统云龙组, 发育断层泥和构造透镜体, 胶结物主要包括方解石、白云石、石英、重晶石、天青石等(邵兆刚等, 2003; 何龙清等, 2005)。东矿带内围岩蚀变较强烈(黄铁矿化、重晶石或天青石化、硅化、方解石化、白云石化等)。矿石为一套中-低温热液成因的矿物组合(黝铜矿系列、辉铜矿、黑铜矿、黄铜矿、斑铜矿、铜蓝、蓝辉铜矿、方铅矿及车轮矿、闪锌矿、菱锌矿), 以及其他常见金属硫化物黄铁矿和少量白铁矿(邵兆刚等, 2003; 何龙清等, 2005; Xue et al., 2007; He et al., 2009)。

笔者对东矿带华昌山矿段和下区五矿段开展了系统观察和采样, 总结分析了 2 个矿段的铅锌矿化特征, 根据矿石的矿物组合、结构构造和矿脉的穿插关系, 将成矿过程分为 3 个阶段: ① 无矿的方解石、

铁白云石和石英阶段; ② 石英、白云石和方解石脉-多金属硫化物阶段, 发育黄铜矿、方铅矿、黄铁矿、闪锌矿等多金属硫化物及碳酸盐脉, 为主成矿阶段, 其中, 闪锌矿中-细粒, 颜色为浅褐色-深黄色, 大部分呈连续的脉状, 胶结灰岩角砾; 方铅矿和闪锌矿类似, 多呈中-细粒, 其余呈细脉状和星散状分布; 黄铁矿一般呈星散状和团块状, 与闪锌矿和方铅矿共生; ③ 石英脉-碳酸盐阶段, 形成石英-碳酸盐细脉, 穿插前一阶段脉体, 矿脉从几厘米~几十厘米, 且矿脉越宽, 金属硫化物含量越低(图 3)。

## 2 样品处理和分析

本文的样品均采自白秧坪多金属矿集区东矿带(华昌山矿段和下区五矿段)热液主成矿阶段(即石英、白云石和方解石脉-多金属硫化物阶段): 手标本中的闪锌矿中-细粒, 浅褐色-深黄色, 大部分呈连续的脉状胶结灰岩角砾; 方铅矿大部分中-细粒, 其余多呈细脉状和星散状分布(图 3a-d); 方解石为乳白色, 结晶粗, 呈团块状和粗脉状。显微镜下观察发现, 方铅矿和闪锌矿穿插于方解石矿物中(图 3e, f)。

样品处理流程: 在野外和室内工作的基础上, 选择有代表性矿洞内新鲜且未受后期影响的原生矿石, 保持矿物初始 Rb-Sr 系统封闭; 在取样过程中, 采集不同点的样品保证其具不同的 Rb/Sr 比值; 另外, 考虑到 Rb-Sr 同位素测试过程可能会受到次生包裹体的影响, 本测试将样品研磨至 200 目, 尽量去除次生包裹体的影响。挑选的单矿物结晶颗粒较大, 不是快速结晶的产物, 保证其有足够的时间结晶, 避免了快速结晶过程中包裹其他杂质。将手标本粉碎到 40~80 目, 在双目镜下挑选出单矿物, 纯度达 99% 以上, 再用蒸馏水清洗并低温蒸干, 然后将纯净单矿物样品在玛瑙研钵内研磨至 200 目。方解石样品 Sm-Nd 含量在矿床地球化学国家重点实验室使用等离子质谱仪器( ICP-MS )测试, 方铅矿及闪锌矿的 Rb-Sr 含量和 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素组成测定均在南京大学现代分析中心同位素分析室, 用英国产的 VG354 同位素质谱仪测定。

分析方法 粉末样品用混合酸熔解, 取清液上离子交换柱分离, 含量及同位素比值均分开处理和测定, 用高压密闭熔样和阳离子交换技术分离提纯, 上同位素质谱仪测定。测定的美国 NBS9<sup>87</sup>Sr 同位素标样<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.710 236 ± 7, 以<sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr = 0.1194

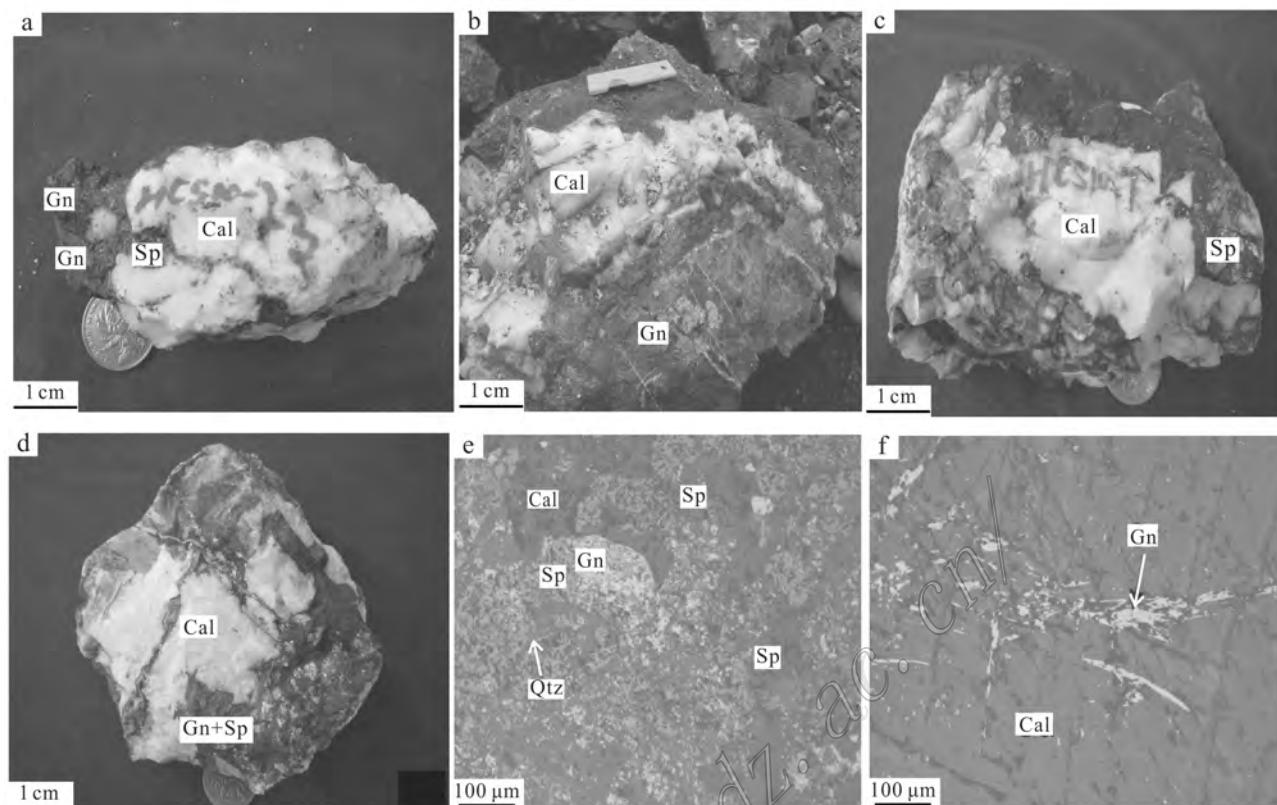


图 3 东矿带矿石手标本和显微镜照片

a. 宽脉方解石与细脉状方铅矿与闪锌矿共生; b. 宽脉方解石与方铅矿共生; c. 宽脉方解石与闪锌矿共生; d. 宽脉方解石与浸染状闪锌矿+方铅矿共生; e. 宽脉方解石与闪锌矿+方铅矿共生(反射光); f. 宽脉方解石与方铅矿共生(反射光)

Cal—方解石; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Qtz—石英

Fig. 3 Photos of sample and microscope images of the ore in the eastern mineral zone

a. Wide vein texture calcite associated with thin vein texture sphalerite + galena; b. Wide vein texture calcite associated with galena; c. Wide vein texture calcite associated with sphalerite; d. Wide vein texture calcite associated with disseminated sphalerite + galena (reflective light); e. Wide vein texture calcite associated with thin vein texture galena (reflective light); f. Wide vein texture calcite associated with thin vein texture galena (reflective light)

Cal—Calcite; Sp—Sphalerite; Gn—Galena; Qtz—Quartz

进行标准化; 美国 La Jolla Nd 同位素标准  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.511\,864 \pm 3$ , 标准值采用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  校正。Sr 的全流程本底为  $3 \times 10^{-9}$  g, Nd 的全流程空白为  $6 \times 10^{-11}$  g。等时线年龄用 ISOPLOT (Version3.23)程序计算 (Ludwig, 2001), 在年龄计算中, 实验室给出样品  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  和  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值误差分别为  $\pm 1\%$  和  $\pm 0.2\%$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  误差优于 3% (Wang et al., 2007)。

### 3 分析结果

成矿阶段方解石 Sm-Nd 含量和同位素分析结果见表 1, 用 ISOPLOT 软件计算出华昌山和下区吾

2 个矿段成矿阶段的方解石 Sm-Nd 等时线年龄为  $(33.32 \pm 0.43)$  Ma, 初始钕同位素组成  $I_{\text{Nd}} = 0.512\,099\,6$ , MSWD = 0.51 (图 4)。

闪锌矿和方铅矿 Rb-Sr 含量和同位素组成见表 2,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  图呈现很好的线性特征。用 ISOPLOT 软件计算出华昌山矿段方铅矿 Rb-Sr 等时线年龄为  $(34.0 \pm 6.5)$  Ma, 初始锶同位素组成  $I_{\text{Sr}} = 0.714\,44 \pm 0.000\,12$ , MSWD = 0.51 (图 5); 将华昌山矿段闪锌矿和方铅矿测定结果拟合成一条等时线, 其 Rb-Sr 等时线年龄为  $(32.8 \pm 1.5)$  Ma, 初始锶同位素组成  $I_{\text{Sr}} = 0.714\,444 \pm 0.000\,090$ , MSWD = 1.3 (图 6)。

表 1 白秧坪多金属矿集区东矿带成矿阶段方解石 Sm-Nd 同位素分析结果

Table 1 The Sm-Nd isotope analysis results of the mineralization stage calcite of the eastern ore zone in the Baiyangping polymetallic ore deposit

样品号	样品名称	$\alpha (B) \times 10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$
		Sm	Nd		
HCS10-1-2	方解石	0.4385	0.8996	0.2743	$0.512159 \pm 8$
HCS10-4	方解石	0.6271	1.8040	0.2052	$0.512145 \pm 9$
HCS10-5	方解石	0.6982	1.1210	0.3524	$0.512176 \pm 7$
HCS10-6	方解石	0.4708	1.1940	0.2329	$0.51215 \pm 9$
HCS10-7	方解石	0.7154	2.0860	0.1785	$0.512138 \pm 6$
HCS10-10	方解石	0.2783	0.6637	0.2506	$0.512155 \pm 10$
HCS10-13	方解石	1.0170	1.1850	0.4982	$0.512209 \pm 8$
HCS10-14	方解石	0.4051	0.9923	0.2259	$0.512148 \pm 9$
HCS10-15	方解石	1.3170	3.5860	0.2164	$0.512146 \pm 7$
HCS10-19	方解石	0.2286	1.7240	0.0826	$0.512118 \pm 6$
HCS10-22	方解石	0.5136	0.4692	0.6547	$0.512241 \pm 9$
HCS10-23	方解石	0.2993	0.5787	0.3146	$0.512169 \pm 11$
XQW10-5	方解石	1.0270	1.3890	0.4361	$0.512197 \pm 8$
XQW10-07-1	方解石	0.7236	3.0870	0.1017	$0.512122 \pm 7$
XQW10-33	方解石	2.3010	8.7920	0.1573	$0.512133 \pm 8$
XQW10-48	方解石	1.3170	1.0050	0.7468	$0.512262 \pm 9$
美国 La Jolla Nd 同位素标准					$0.511863 \pm 6$
(国际权威值 $0.511860 \pm 20$ )					

美国 La Jolla Nd 同位素标准

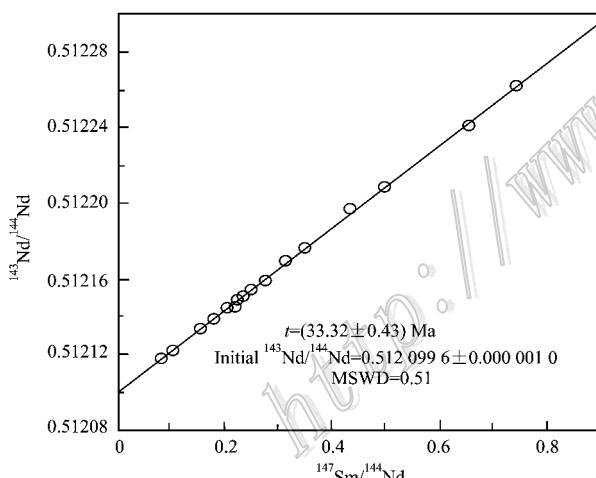
(国际权威值  $0.511860 \pm 20$ )

图 4 白秧坪多金属矿集区东矿带成矿阶段方解石 Sm-Nd 等时线

Fig. 4 Sm-Nd isochron diagram of the mineralization stage calcite of the eastern ore zone in the Baiyangping polymetallic ore deposit

## 4 讨论

### 4.1 定年方法可靠性分析

沉积岩容矿贱金属矿床因矿物组合简单,适合定年的矿物少,通常很难满足定年要求。因此,对该

类矿床如何精确定年一直是地学界的难题。

在闪锌矿沉淀过程中,Rb 比 Sr 更容易进入闪锌矿晶体,具有较高的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  比值,是精确进行放射性同位素定年的理想矿物。前人通过理论、实验和实践论证,证明闪锌矿及其流体包裹体 Rb-Sr 等时线定年在一定条件下是可行的(Nakai et al., 1993; Christensen et al., 1995a; 1995b; Pettke et al., 1996),并利用该方法成功获得了澳大利亚、美国和加拿大等地的 MVT 型铅锌矿床的成矿时代(Nakai et al., 1993; Christensen et al., 1995b)。刘建明等(1998)认为,由于不同矿物相具明显差异的化学势,化学性质不同的 Rb 和 Sr 将发生化学分异,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,故用共生热液矿物开展 Rb-Sr 等时线定年,不仅符合 Rb-Sr 等时线定年的基本前提,同时,还提高了 Rb-Sr 等时线的精确度。利用以上 Rb-Sr 定年方法,使金属矿床定年取得了很大的进展(Leach et al., 2001; 李文博等, 2004a; 田世洪等, 2009; 王晓虎等, 2011; 郑伟等, 2013)。

Sm 和 Nd 同为稀土元素,化学性质接近,稳定性好,变化同步,不易被改造,母体衰变形成的子体容易在矿物晶格中保存(赵振华, 1997),因此,该同位素定年方法是矿床精确定年的有效手段。前人已

表 2 白秧坪多金属矿集区东矿带闪锌矿和方铅矿 Rb-Sr 同位素分析结果

Table 2 Rb-Sr isotope analysis results of the mineralization stage sphalerite and galena of the eastern ore zone in the Baiyangping polymetallic ore deposit

样品号	样品名称	$w(B) \times 10^{-6}$		${}^{87}\text{Rb} / {}^{86}\text{Sr}$	${}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr} \pm 1\sigma$
		Rb	Sr		
HCS10-3-2	闪锌矿	4.1230	1.7860	6.8250	0.717764 ± 12
HCS10-14	闪锌矿	2.7520	7.0150	4.0910	0.71614 ± 15
HCS10-23	闪锌矿	5.9510	1.9480	8.9730	0.718585 ± 10
HCS10-3-2-1	方铅矿	0.2379	1.5920	0.4516	0.714668 ± 9
HCS10-4	方铅矿	0.1036	7.3580	0.0419	0.714492 ± 13
HCS10-7-1	方铅矿	0.8734	1.1370	2.2680	0.715556 ± 8
HCS10-16	方铅矿	0.6215	0.9253	1.9740	0.715359 ± 11
HCS10-21	方铅矿	0.3163	1.5610	0.5913	0.714819 ± 12
HCS10-24	方铅矿	0.5469	7.9720	0.2036	0.714442 ± 9
美国 NBS9					0.710236 ± 7
${}^{87}\text{Sr}$ 同位素标准值					( 标准 0.710340 ± 260 )

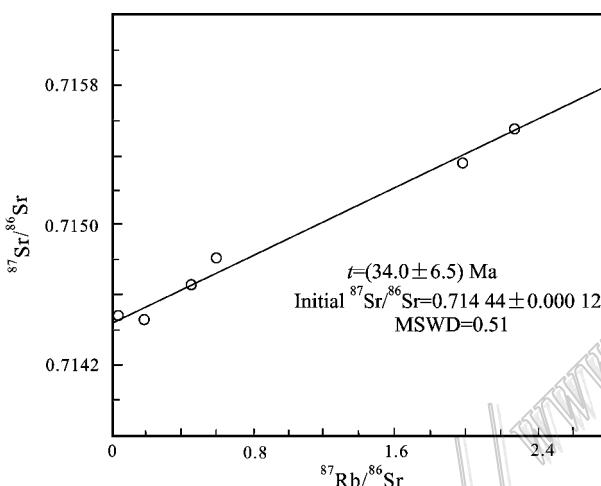


图 5 白秧坪多金属矿集区东矿带方铅矿 Rb-Sr 等时线

Fig. 5 Rb-Sr isochron diagram of the mineralization stage galena of the eastern ore zone in the Baiyangping polymetallic ore deposit

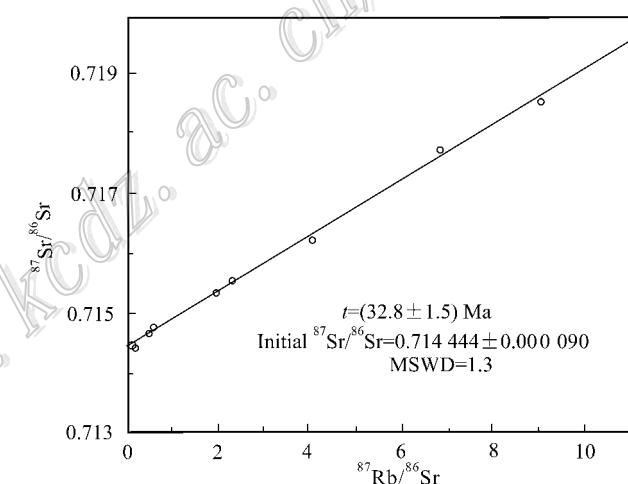


图 6 白秧坪多金属矿集区东矿带矿物共生组合闪锌矿和方铅矿 Rb-Sr 等时线

Fig. 6 Rb-Sr isochron diagram of the mineralization stage intergrowth mineral association sphalerite and galena of the eastern ore zone in the Baiyangping polymetallic ore deposit

利用白钨矿、萤石和电气石等富 REE 的含 Ca 矿物进行了 Sm-Nd 同位素定年( Bell et al. , 1989 ; Holliday et al. , 1990 ; Kent et al. , 1995 ; Anglin et al. , 1996 ; 刘建明等 , 1998 ; Jiang et al. , 2000 ) ; 方解石中的 REE 主要以置换晶格中  $\text{Ca}^{2+}$  的形式存在 , 且 REE 在该矿物中扩散速率低( cherniak , 1998 ) ; 另外 , 成矿流体中 REE 进入方解石晶体后 , 除晶体溶解外 , 其他过程不可能破坏方解石稀土元素的配分模式( Zhong et al. , 1995 )。因此 , 热液方解石具有非常好的 Sm-Nd 等时线定年潜力 : Peng 等( 2003 )成功利用热液方解石对湘中锡矿山锑矿床开展了 Sm-

Nd 等时线定年 ; 李文博等( 2004b )利用方解石 Sm-Nd 等时线获得会泽超大型铅锌矿床的成矿年龄为  $(226 \pm 15)$  Ma 和  $(225 \pm 38)$  Ma , 与其用共生矿物组合 Rb-Sr 等时线方法获得的成矿时代基本一致( 李文博等 , 2004a ) ; 在青海东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床 , 田世洪等( 2009 )利用萤石和方解石的矿物组合 Sm-Nd 等时线得出的年龄与黄铁矿、闪锌矿、方铅矿矿物组合 Rb-Sr 等时线年龄一致 ; 王晓虎等( 2011 )对白秧坪铅锌铜多金属矿床西矿带的成矿热液方解石进行了 Sm-Nd 定年 , 与共生矿物组合 Rb-Sr 等时线获得的成矿时代基本一致。

本文测试采用的样品为块状矿石,闪锌矿和方铅矿纯度较高,既不存在脉石矿物穿插,又很少发育裂隙,很大程度上满足了测年的同时、同源、封闭性和初始比值一致性的前提。因所测样品的粒度较小,几乎为单颗粒样品,利用矿物颗粒间元素含量的不均一性,最大可能地回避了初始同位素不平衡问题(陈福坤等,2006;李秋立等,2006),同时也极大降低了颗粒间次生包裹体的存在带来影响几率,使得测试结果更加接近实际地质含义。另外,从 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 相关图(图4)可见,华昌山和东至岩矿段成矿热液期的方解石表现出良好的线性关系。在 $1/\omega(\text{Nd}) - n(^{143}\text{Nd}) \vee n(^{144}\text{Nd})$ 相关图(图7)中,不存在线性关系,可认为图4表现出的直线并非混合线,而应具等时线意义;与此类似,在 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解(图5,图6)中,单矿物闪锌矿、方铅矿和共生矿物组合(闪锌矿和方铅矿)均表现出良好的线性关系,形成时代在误差范围内基本一致,且 $1/\omega(\text{Sr})$ 与 $n(^{87}\text{Sr}) \vee n(^{86}\text{Sr})$ 之间也不存在线性关系(图8),暗示图5和图6表现出的2条直线具等时线意义。Rb-Sr法和Sm-Nd法的结果在误差范围内是

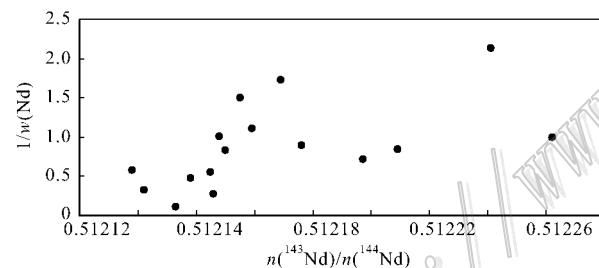


图 7 白秧坪多金属矿集区东矿带闪锌矿和方铅矿  
 $1/\omega(\text{Nd}) - n(^{143}\text{Nd}) \vee n(^{144}\text{Nd})$ 关系图

Fig. 7 Diagram of  $1/\omega(\text{Nd}) - n(^{143}\text{Nd}) \vee n(^{144}\text{Nd})$  of sphalerite and galena of the eastern ore zone in the Baiyangping polymetallic ore deposit

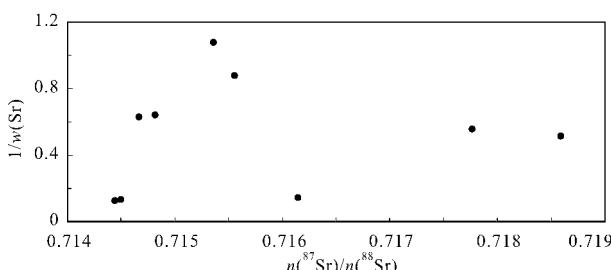


图 8 白秧坪多金属矿集区东矿带闪锌矿和方铅矿  
 $1/\omega(\text{Sr}) - n(^{87}\text{Sr}) \vee n(^{86}\text{Sr})$ 关系图

Fig. 8 Diagram of  $1/\omega(\text{Sr}) - n(^{87}\text{Sr}) \vee n(^{86}\text{Sr})$  of sphalerite and galena of the eastern ore zone in the Baiyangping polymetallic ore deposit

一致的,起到了相互验证的效果。因此,笔者认为本文利用单矿物闪锌矿、方铅矿、共生矿物组合(闪锌矿和方铅矿)Rb-Sr法和方解石Sm-Nd法获得的成矿年龄在误差范围内是一致和可靠的。

#### 4.2 成矿时代的约束性

兰坪盆地呈近NS向带状展布,向南与思茅盆地相接,向北趋于尖灭。对于盆地的成矿时限,前人已开展了一定程度的研究:王义昭等(2000)认为兰坪盆地的成矿时期为燕山期—喜马拉雅期,矿床具有层控性与岩控性,但主要受构造和时间控制;李小明等(2000)认为古近纪—新近纪是主要成矿期(如金顶、金满、白秧坪、三山矿床),并对下区五银矿和燕子洞银矿的磷灰石进行了裂变径迹法定年,获得( $39.3 \pm 7.2$ ) Ma 和 ( $19.9 \pm 2.3$ ) Ma 两个年龄值,经矫正后分别为 50 Ma 和 22.7 Ma(Griyet et al., 1993);侯增谦等(2006a, 2006b, 2006c, 2008a)认为兰坪盆地 Pb-Zn-Cu 多金属矿床均产于青藏高原东缘晚碰撞(40~26 Ma)构造转换环境;宋玉财等(2011)根据地层和断裂关系,推测河西-三山矿床矿化时代应等于或晚于 34 Ma。

虽然如此,上述研究对成矿年龄的确定仍存在较大差异。本文通过单矿物闪锌矿、方铅矿、矿物组合(闪锌矿+方铅矿)的 Rb-Sr 法和方解石的 Sm-Nd 法,获得成矿年龄分别为( $32.8 \pm 1.5$ ) Ma 和 ( $33.3 \pm 0.43$ ) Ma。笔者拟在此基础上,结合东矿带典型矿床地质背景和区域构造演化特征,从赋矿层位和逆冲推覆构造两方面,探讨该矿床的成矿时限。

##### 4.2.1 赋矿层位对成矿年代的约束

东矿带出露有上三叠统三合洞组、挖鲁八组、麦初箐组、古新统云龙组、始新统果郎组、宝相寺组和全新统(云南省地质调查院,2003)。赵海滨(2006)根据东至岩矿段华昌山断裂带下盘古新统云龙组砂岩及燕子洞矿段华昌山断裂带下盘始新统宝相寺组砂岩的地质事实,推断东矿带的成矿时代应在古新世—渐新世;东矿带河西-黑山矿带银铅锌矿床除在三叠系三合洞组富集外,云龙组和宝寺组也有矿化,表明矿床成矿最晚在渐新世之后;以上推断与笔者在野外观察到的地质事实相符,故白秧坪多金属矿集区东矿带主要赋存于古新世云龙组上段和上三叠统三合洞组,表明成矿作用发生于云龙组上段沉积成岩之后,而云龙组上段的时代上限约在 50 Ma,可推测东矿带矿床成矿年龄应小于 50 Ma。

#### 4.2.2 逆冲推覆构造对成矿年代的制约

白秧坪 Pb-Zn-Cu-Ag 多金属矿床西矿带赋矿围岩为侏罗系花开佐组灰岩、泥灰岩、泥岩和砂岩,或白垩系景星组钙质砂岩,矿化对围岩性质无明显选择性,而主要与断裂控制有关;东矿带矿化主要出现上三叠统三合洞组灰岩,古近系碎屑岩内局部出现 Cu 矿化,对围岩存在明显的选择性。

东矿带大量地质资料显示,组成东矿带的地层普遍存在外来三叠系岩系,这些外来岩系主要是推覆成因(He et al., 2009)。在始新世—渐新世,构造变形强烈,形成复杂褶皱和断裂,形成兰坪盆地东、西 2 套逆冲推覆系统(陶晓风等,2002;付修根,2005)。盆地内铅锌多金属矿床主要沿两套逆冲推覆系统分布。其中,东矿带产于东推覆构造系统的华昌山断裂破碎带,破碎带规模大(长约 25 km,宽约 10~100 m),空间大,利于成矿溶液运移、交代和沉淀。各矿床内主矿体规模大,矿体形态简单,呈似层状和透镜状产出(云南省地质调查院,2003)。断裂构造是研究区铜银多金属矿床的主导控制因素,也是成矿的首要条件,沿断裂和裂隙下渗的大气降水地下水被加热,与来自深部的热液对流循环,从早期沉淀形成的矿源层以及矿区外围含矿地层中淋滤出铅锌组分,成矿流体运移并沉淀在上述容矿构造中。王光辉等(2009)根据逆冲推覆构造特征,推断其通常显示多期次特征,东部逆冲带大致发育于 34 Ma 或 56 Ma。何龙清等(2005)的研究显示,东部金沙江-哀牢山逆冲推覆带最宽可达 50 km,前峰带位于兰坪-云龙以东,在三山(灰山、黑山、华昌山)卷入的地质单元有下三叠统、侏罗系和白垩系沉积岩,不同时代沉积岩均推覆于古近系云龙组上。暗示东矿带成矿作用发生于云龙组上段沉积成岩和逆冲推覆断层形成之后,故本次测试所获得成矿年龄( $32.8 \pm 1.5$ ) Ma 和 ( $33.32 \pm 0.43$ ) Ma 在合理范围之内。

#### 4.3 成矿时代的对比

青藏高原东部和北部存在较多喜马拉雅期贱金属硫化物矿床,滇西金顶巨型 Zn-Pb 矿床、白秧坪超大型 Ag-Cu-Pb-Zn 矿集区和金满中型 Cu 矿床以及青南东莫扎抓大型 Pb-Zn 矿床、茶曲帕查 Zn-Pb 矿床(超大型),均产于碰撞造山环境(侯增谦等,2008a;2008b)。碰撞造山阶段始于 65 Ma 的印度-亚洲大陆对接碰撞,在高原中北部和东部形成一系列以逆冲-推覆构造为特征的收缩构造(Wang et al., 1997),其最初发育时限在 50 Ma 以前。

He 等(2009)报道兰坪盆地 Pb-Zn 矿化年龄介于 60~35 Ma,随后通过地质特征研究将其成矿年龄范围缩小至 40~34 Ma。对兰坪盆地年代学工作开展最早的是金满 Cu 矿床(李小明,2001;刘家军等,2003;徐晓春等,2004;毕先梅等,2004;赵海滨,2006),盆地西缘 Cu 矿化年龄可分为 2 个阶段:早阶段大致在 59~56 Ma,晚阶段可持续到 35 Ma。兰坪盆地金顶 Pb-Zn-Cu-Hg 和白秧坪 Cu-Ag-Co 矿化区研究程度相对较高。其中,金顶矿床赋存于下白垩统景星组长石石英砂岩和古新统云龙组灰岩角砾岩中,从矿石结构构造观察,属典型后生热液矿床,该矿床形成时间较晚(李小明等,2000;Xue et al., 2003;修群业等,2006;唐永永,2013)。王晓虎等(2011)利用方解石 Sm-Nd 法和闪锌矿 Rb-Sr 法获得白秧坪矿集区西矿带吴底厂、李子坪和富隆厂 Pb-Zn 矿化的年龄范围为 30~29 Ma。李亚林等(2006)认为沱沱河盆地查曲帕茶和多彩玛 Pb-Zn 矿床为后生热液矿床,而野外观察两者应该为同期成矿,成矿年龄晚于赋矿围岩(分别为沱沱河组和五道梁组)的下限(分别为 52 Ma 和 23.8 Ma),成矿构造背景为青藏高原新生代碰撞造山后碰撞期(侯增谦等,2006c)。田世洪等(2009)通过玉树囊谦盆地东莫扎抓铅锌矿床和莫海拉亨铅锌矿床研究,认为成矿年龄分别为 35 Ma 和 33 Ma。本研究利用方解石 Sm-Nd 法、闪锌矿和方铅矿 Rb-Sr 法获得兰坪盆地白秧坪矿床东矿带的成矿年龄与上述 3 个盆地的典型铅锌矿床年龄相近,故认为青藏高原东部和北部受逆冲推覆构造控制的 Pb-Zn 矿床都为新生代构造转换期或构造伸展早期的产物。

## 5 结 论

(1) 白秧坪 Pb-Zn 多金属矿床东矿带方铅矿、闪锌矿的 Rb-Sr 等时线年龄为( $32.8 \pm 1.5$ ) Ma,方解石 Sm-Nd 等时线年龄为( $33.32 \pm 0.43$ ) Ma。Rb-Sr 和 Sm-Nd 法在误差范围内一致,对矿床的成矿背景具有很好的指示性。

(2) 通过成矿年龄探讨,认为东矿带铅锌为主的矿化期主要产生于青藏高原东缘晚碰撞 40~26 Ma 阶段,伴随印度-亚洲大陆碰撞造山,形成逆冲推覆构造和赋矿地层,共同控制了 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床的形成和发育。

(3) 该成矿年代与相关的矿床(如金顶和西矿

带 Pb-Zn 矿床和囊谦盆地 Pb-Zn 矿床、沱沱河盆地 Pb-Zn 矿床)具有一定的可比性。

## References

- Anglin C D , Jonasson I R and Franklin J M. 1996. Sm-Nd dating of scheelite and tourmaline : Implications for the genesis of Archean gold deposits , Val d 'Or , Canada [ J ]. Econ. Geol. , 91 : 1372-1382.
- Bell K , Anglin C D and Franklin J M. 1989. Sm-Nd and Rb-Sr isotope systematics of scheelites : Possible implications for the age and genesis of vein-hosted gold deposit [ J ]. Geology , 17 : 500-504.
- 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 ).
- Chen F K , Li Q L , Wang X L and Yang X H. 2006. Zircon age and Sr-Nd-Hf isotopic composition of migmatite in the eastern Tengchong block , western Yunnan [ J ]. Acta Petrologica Sinica , 22 ( 2 ) : 439-448 ( in Chinese with English abstract ).
- Chen K X , He L Q , Yang Z Q , Wei J Q and Yang A P. 2000. Oxygen and carbon isotope geochemistry in Sanshan-Baiyangping copper and silver polymetallic enrichment district , Lanping , Yunnan [ J ]. Geology and Mineral Resources of South China , ( 4 ) : 1-8 ( in Chinese with English abstract ).
- Cherniak D J. 1998. REE diffusion in calcite [ J ]. Earth and Planetary Science Letters , 160 : 273-287.
- Christensen J N , Halliday A N , Leigh K E , Randell R N and Kesler S E. 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 Kesler S E. 1995b. Testing models of large-scale crustal fluid flow using direct dating of sulfide : Rb-Sr evidence for early dewatering and formation of Mississippi Valley-type deposits , Canning Basin , Australia [ J ]. Econ. Geol. , 90 : 877-884.
- Feng C X , Bi X W , Hu R Z , Liu S , Wu L Y , Tang Y Y and Zou Z C. 2011. The study on paragenesis-separation mechanism and source of ore-forming element in the Baiyangping Cu-Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposit , Lanping basin , southwestern China [ J ]. Acta Petrologica Sinica , 27 ( 9 ) : 2609-2624 ( in Chinese with English abstract ).
- 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 ).
- Grandia F , Asmerom Y , Getty S , Cardellach E and Canals A. 2000. U-Pb dating of MVT ore-stage calcite : Implications for fluid flow in a Mesozoic extensional basin from Iberian Peninsula [ J ]. Journal of Geochemical Exploration , 69-70 : 377-380.
- Griyet M , Rebetez M and Ghouma N B. 1993. Apatite fission-track age correction and thermal history analysis from projected track length distributions [ J ]. Chemical Geology ( Isotopic Geoscience Section ), 103 : 157-169.
- Halliday A N , Shepherd T J and Dicken A P. 1990. Sm-Nd evidence for the age and origin of a MVT ore deposit [ J ]. Nature , 344 : 54-56.
- Han Y G , Li X H , Zhang S H , Zhang Y H and Chen F K. 2007. Rb-Sr isochron dating of single grain and cataclastic pyrite of Qiyugou gold ore deposit in western of Henan Province , China [ J ]. Chinese Science Bulletin , 52 ( 11 ) : 1307-1311 ( in Chinese ).
- 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 , 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 , Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland fold belt , eastern margin of Tibetan Plateau [ J ]. Ore Geology Reviews , 36 : 106-132.
- He M Q , Liu J J , Li C Y , Li Z M , Liu Y P , Yang A P and San H Q. 2006.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  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 ).
- Hou Z Q , Mo X X , Yang Z M , Wang A J , Pan G T , Qu X M and Nie F J. 2006a. Metallogenesis in the Tibet an collision orogenic belt : Tectonic setting , met allogenic epoch and deposit typ [ J ]. Geology in China , 33 : 348-359 ( in Chinese with English abstract ).
- Hou Z Q , Yang Z S , Xu W Y , Mo X X , Ding L , Gao Y F , Dong F L , Li G M , Qu X M , Li G M , Zhao Z D , Jiang S H , Meng X J , Li Z Q and Qin K Z. 2006b. Metallogenesis in Tibet collisional orogenic belt : I . Mineralization in main-collisional orogenic setting [ J ]. Mineral Deposits , 25 ( 4 ) : 337-358 ( in Chinese with English abstract ).
- 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 , Qing K Z , Xu J F , Qu X M , Yang Z M , Yang Z S , Fei H C , Meng X J and Li Z Q. 2006c. Metallogenesis in Tibet 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 , Song Y C , Li Z , Wang Z L , Yang Z M , Yang Z S , Liu Y C , Tian S H , He L Q , Chen K X , Wang F C , Zhao C X , Xue W Z

- and Lu H F. 2008a. 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 Deposits*, 27(2):123-144 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q , Wang E Q , Mo X X , Ding L , Pan G T and Zhang Z J. 2008b. Collisional orogeny and metallogenesis of the Tibetan plateau [M]. Beijing : Geological Publishing House. 1-950 (in Chinese).
- Jiang S Y , Chen Y Q , Ling H F , Yang J H , Feng H Z and Ni P. 2006. Trace and rare-earth element geochemistry and Pb-Pb dating of black shales and intercalated Ni-Mo-PGE-Au sulfide ores in Lower Cambrian strata, Yangtze Platform, South China [J]. *Mineralium Deposita*, 41:453-467.
- Jiang S Y , Slack J F and Palmer M R. 2000. Sm-Nd dating of the giant Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia [J]. *Geology*, 28:751-754.
- Kent A J R , Campbell I H and McCulloch M T. 1995. Sm-Nd systematics of hydrothermal scheelite from the Mount Charlotte Mine, Kalgoorlie, western Australia: An isotopic link between gold mineralization and Komatiites [J]. *Econ. Geol.*, 90:2329-2335.
- Leach D L , Bradley D , Lewchuck M T , Symons D T A , de Marsily G and Brannon J C. 2001. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: Implications from recent age-dating research [J]. *Mineralium Deposita*, 36:711-740.
- Li Q L , Chen F Q , Wang X L , Li X H and Wang C F. 2006. Ultra-low procedural blank and the single-grain mica Rb-Sr isochron dating [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(3):321-325 (in Chinese with English abstract).
- Li W B , Huang Z L , Chen J , Han R S , Zhang Z L and Xu C. 2004a. 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 W B , Huang Z L , Wang Y X , Chen J , Han R S , Xu C , Guan T and Yin M D. 2004b. Age of the giant Huize Zn-Pb deposits determined by Sm-Nd dating of hydrothermal calcite [J]. *Geological Reviews*, 50(2):189-195 (in Chinese with English abstract).
- Li X M , Tan K X , Gong G L and Gong W J. 2000. Preliminary studies of tectonothermal evolution and metallogenetic processes in Lanping basin with fission track analysis [J]. *Journal of Mineralogica and Petrologica*, 20(2):40-42 (in Chinese with English abstract).
- Li X M. 2001. Metallogenetic age of Jinman copper deposits in western Yunnan Province, China [J]. *Geoscience*, 15(4):405-408 (in Chinese with English abstract).
- Li Y L , Wang C S , Yin H S , Liu Z F and Li Y. 2006. Cenozoic thrust system and uplifting of the Tanggula Mountain, northern Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80:1118-1131 (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 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 metallogenetic age of Jinman vein copper deposits, western Yunnan [J]. *Geoscience*, 17(1):34-39 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. Users Manual for Isoplot/Ex: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication 1a). 1-53.
- Mao J W , Zhang G D , Du A D , Wang Y T and Zeng M G. 2001. Geology, geochemistry and Re-Os isotopic dating of Huangjiawan Ni-Mo-PGE deposit, Zunyi, Guizhou Province-with a discussion of the polymetallic mineralization of basal Cambrian black shales in south China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2):234-343 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W , Lehmann B , Du A D , Zhang G D , Ma D S , Wang Y T , Zeng M G and Kerrich R. 2002. Re-Os dating of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralisation in Lower Cambrian Black shales of South China and its geological significance [J]. *Econ. Geol.*, 97:1051-1061.
- 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 metallogenetic pulses in North China and corresponding geodynamic setting [J]. *Acta Geologica Sinica*, 21(1):169-188 (in Chinese with English abstract).
- 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 MVT ore deposits [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57:417-427.
- No. 3 Geology and Mineral Resources Survey, Yunnan Geological Survey. 2003. The Baiyangping Cu-Ag-Pb-Zn-Co mineralized concentration district, Exploration Report, Yunnan Province [R]. 1-266 (in Chinese).
- Peng J T , Hu R Z and Burnard P G. 2003. Samarium-neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit ( Hunan, China ): The potential of calcite as a geochronometer [J]. *Chemical Geology*, 200(1-2):129-136.
- Pettke T and Diamond L W. 1996. Rb-Sr dating of sphalerite based on fluid inclusion-hosted mineral isochrons: A clarification of why it works [J]. *Econ. Geol.*, 91:951-956.
- Qiu H N , Wijbrans J R , Li X H , Zhu B Q , Zhu C L and Zeng B C. 2002. New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  evidence for ore-forming process during Jinling-Chengjiang period in Dongchuang type copper ore deposit [J].

- Mineral Deposits, 21(2):129-136 (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, 9(3):246-253 (in Chinese with English abstract).
- Song Y C, Hou Z Q, Yang T N, Zhang H R, Yang Z S, Tian S H, Liu Y C, Wang X H, Liu Y X, Xue C D, Wang G H and Li Z. 2011. Sediment-hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang region: Characteristics and genetic types [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 30(3):355-380 (in Chinese with English abstract).
- Symons D T A and Arne D C. 2005. Paleomagnetic constraints on Zn-Pb ore genesis of the Pillara Mine, Lennard Shelf, western Australia [J]. Mineralium Deposita, 39(8):944-959.
- Symons D T A, Lewchuk M T, Kawasaki K, Velasco F and Leach D L. 2009. The Reocin zinc-lead deposit, Spain: Paleomagnetic dating of a late Tertiary ore body [J]. Minerlum Deposita, 44(8):867-880.
- Tang Y Y. 2013. Abnormal enrichment mechanism of ore-forming metals in the Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan Province, China: a dissertation for the degree of Doctor of Natural Science [D]. Supervisor: Xian W B. Beijing: The university of Chinese Academy of Sciences. 1-129 (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 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 A 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 the Dongmozhazhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinhai and their geological implication [J]. Mineral Deposits, 28(6):747-758 (in Chinese with English abstract).
- Wang E Q and Burchfiel B C. 1997. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right-lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalayan syntaxis [J]. International Geological Review, 39:191-219.
- Wang G H, Song Y C, Hou Z Q, Wang X H, Yang Z S, Yang T N, Liu Y X, Jiang Y F, Pan X F, Zhang H R, Liu Y C, Li Z and Xue C D. 2009. Re-Os dating of molybdenite from Liancheng vein copper deposit in Lanping basin and its geological significance [J]. Mineral Deposits, 28(4):413-424 (in Chinese with English abstract).
- Wang X H, Hou Z Q, Song Y C, Yang T N and Zhang H R. 2011. Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit in Lanping Basin: Metallogenetic chronology and regional mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 27(9):2625-2634 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y X, Yang J D and Chen J. 2007. The Sr and Nd isotopic variations of the Chinese Loess Plateau during the past 7 Ma: Implications for the East Asian winter monsoon and source areas of loess [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 249(3-4):351-361.
- Wang Y Z, Li X L, Duan L L, Huang Z X and Cui C L. 2000. Geotectonic and mineralization in the south of Sanjiang region [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-79 (in Chinese).
- Wei J Q. 2001. S-Pb Isotopic geochemistry of copper multi-metal deposits in Hexi, Yunnan Province [J]. Geology and Mineral Resources of South China, (3):36-39 (in Chinese with English abstract).
- Xiu Q Y, Wang A J, Gao L, Liu J L, Yu C L, Cao D H, Fan S J and Zhai S F. 2006. Discussion on the geologic time of host rock of Jinding superlarge deposit and its geological significance [J]. Geological Survey and Research, 29(4):294-302 (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 Yang Q B. 2002. Analysis of ore-forming background and tectonic system of Lanping basin, western Yunnan Province [J]. Mineral Deposits, 21(1):36-44 (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 metallogenetic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, northwest Yunnan, China [J]. Science in China (Ser. D), 33(4):315-322 (in Chinese).
- Xue C J, Zeng R, Liu S W, Chi G X, Qing H R, Chen Y C, Yang J M and Wang D H. 2007. A review of the geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, China [J]. Ore Geology Reviews, 31:337-359.
- Yang G, Chen J F, Du A D, Qu W J and Yu G. 2004. Re-Os dating of containing molybdenum carbonaceous shales of Tongling Laoyaling in Anhui Province, China [J]. Chinese Science Bulletin, 49(2):1205-1208 (in Chinese).
- Zhang C Q, Li X H, Yu J 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 significance [J]. Geological Reviews, 54

- (4):145-151 (in Chinese with English abstract).
- Zhao H B. 2006. Study on the characteristics and metallogenetic conditions of copper polymetallic deposits in middle-northern Lanping Basin, western Yunnan [Ph. D. Dissertation] [D]. Supervisor: M X X. Beijing: China University of Geosciences. 1-134 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H. 1997. The principles of microelement geochemistry [M]. Beijing: Science Press. 84-85 (in Chinese with English abstract).
- Zheng W, Chen H M, Xu L G, Zhao H J, Ling 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).
- Zhong S J and Alfonso M. 1995. Partitioning of rare-earth elements (REEs) between calcite and seawater solution at 25°C and 1atm, and high dissolved REE concentrations [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59:443-453.
- ### 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.
- 陈福坤 李秋立, 王秀丽, 李向辉. 2006. 滇西地区腾冲地块东侧混合岩锆石年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素组成 [J]. 岩石学报, 22(2):439-448.
- 陈开旭, 何龙清, 杨振强, 魏君奇, 杨爱平. 2000. 云南兰坪三山-白秧坪铜银多金属成矿富集区的碳氧同位素地球化学 [J]. 华南地质与矿产, (4):1-8.
- 冯彩霞 毕献武, 胡瑞忠, 刘●, 武丽艳, 唐永永, 邹志超. 2011. 兰坪盆地白秧坪 Cu-Pb-Zn-Ag 多金属矿集区元素共生分异机制及物质来源 [J]. 岩石学报, 27(9):2609-2624.
- 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.
- 韩以贵 李向辉, 张世红, 张元厚, 陈福坤. 2007. 豫西祁雨沟金矿单颗粒和碎裂状黄铁矿 Rb-Sr 等时线定年 [J]. 科学通报, 52(11):1307-1311.
- 何龙清 陈开旭, 魏君奇, 余凤鸣. 2005. 云南白秧坪地区东矿带矿床地质地球化学特征及成因分析 [J]. 矿床地质, 24(1):61-70.
- 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 莫宣学, 杨志明, 王安建, 潘桂棠, 曲晓明, 聂凤军. 2006a. 青藏高原碰撞造山带成矿作用:构造背景、时空分布和主要类型 [J]. 中国地质, 33:348-359.
- 侯增谦 杨竹森, 徐文艺, 莫宣学, 丁林, 高永丰, 董方浏, 李光明, 曲晓明, 李光辉, 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. 2006c. 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, 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. 2008a. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag 矿床新类型:成矿基本特征与构造控矿模型 [J]. 矿床地质, 27(2):123-144.
- 侯增谦, 王二七, 莫宣学, 丁林, 潘桂棠, 张中杰. 2008b. 青藏高原碰撞造山与成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社. 1-950.
- 李秋立 陈福坤, 王秀丽, 李向辉, 李潮峰. 2006. 超低本底化学流程和单颗粒云母 Rb-Sr 等时线定年 [J]. 科学通报, 51(3):321-325.
- 李文博, 黄智龙, 陈进, 韩润生, 张正亮, 许成. 2004a. 会泽超大型铅锌矿床成矿时代研究 [J]. 矿物学报, 24(2):112-116.
- 李文博, 黄智龙, 王银喜, 陈进, 韩润生, 许成, 管涛, 尹牡丹. 2004b. 会泽超大型铅锌矿田方解石 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义 [J]. 地质论评, 50(2):189-195.
- 李小明, 谭凯旋, 龚革联, 龚文君. 2000. 裂变径迹法对兰坪盆地构造热演化与成矿作用的初步研究 [J]. 矿物岩石, 20(2):40-42.
- 李小明. 2001. 滇西金满铜矿床成矿年龄测定 [J]. 现代地质, 15:405-408.
- 李亚林, 王成善, 伊海生, 刘志飞, 李勇. 2006. 西藏北部新生代大型逆冲推覆构造与唐古拉山的隆起 [J]. 地质学报, 80:1118-1130.
- 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.
- 毛景文, 张光第, 杜安道, 王义天, 曾明果. 2001. 遵义黄家湾钼镍铂族元素矿床地质、地球化学和 Re-Os 同位素年龄测定——兼论华南寒武系底部黑色页岩多金属成矿作用 [J]. 地质学报, 75(2):234-243.
- 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其次及其动力学背景 [J]. 岩石学报, 21(1):169-18.
- 裴荣富. 1995. 中国矿床模式 [M]. 北京: 地质出版社. 1-357.
- 邱华宁, Wijbrans J R, 李献华, 朱炳泉, 朱崇林, 曾保成. 2002. “东川式”层状铜矿  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  成矿年龄研究: 华南地区晋宁-澄江期成矿作用新证据 [J]. 矿床地质, 21(2):129-136.
- 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, 19(3):246-253.
- 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. 2011. 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, 30(3): 355-380.
- 唐永永. 2013. 云南金顶铅锌矿床成矿元素超常富集机制研究(博士论文[D]). 导师: 毕献武. 北京: 中国科学院大学. 1-129.
- 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.
- 王光辉, 宋玉财, 侯增谦, 王晓虎, 杨竹森, 杨天南, 刘燕学, 江迎飞, 潘小菲, 张洪瑞, 刘英超, 李政, 薛传东. 2009. 兰坪盆地连城脉状铜矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(4): 413-424.
- 王晓虎, 侯增谦, 宋玉财, 杨天南, 张洪瑞. 2011. 兰坪盆地北部白秧坪铅锌铜银多金属矿床: 成矿年代及区域成矿作用[J]. 岩石学报, 29(9): 2625-2634.
- 王义昭, 李兴林, 段丽兰, 黄智勋, 崔春龙. 2000. 三江地区南段大地构造与成矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-79.
- 魏君奇. 2001. 云南河西铜多金属矿 S-Pb 同位素地球化学[J]. 华南地质与矿产(3): 36-39.
- 修群业, 王安建, 高兰, 刘俊来, 于春林, 曹殿华, 范世家, 翟世峰. 2006. 金顶超大型矿床容矿围岩时代探讨及地质意义[J]. 地质调查与研究, 29(4): 294-302.
- 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 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, 杨清标. 2002. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. 矿床地质, 21(1): 36-4.
- 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.
- 杨刚, 陈江峰, 杜安道, 屈文俊, 俞刚. 2004. 安徽铜陵老鸦岭含钼磁页岩的 Re-Os 定年[J]. 科学通报, 49(2): 1205-1208.
- 云南省地质调查院第三地质调查所. 2003. 云南兰坪白秧坪铜银铅锌钴矿化集中区评价地质报告[R]. 1-266.
- 张长青, 李向辉, 余金杰, 毛景文, 陈福坤, 李厚明. 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): 145-151.
- 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. 1-134.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社. 84-85.
- 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.