

云南保山核桃坪铅锌矿成矿年龄及动力学背景分析*

陶琰¹ 胡瑞忠¹ 朱飞霖^{1,2} 马言胜^{1,3} 叶霖¹ 程增涛^{1,3}

TAO Yan¹, HU RuiZhong¹, ZHU FeiLin^{1,2}, MA YanSheng^{1,3}, YE Lin^{1,2} and CHENG ZengTao^{1,3}

1. 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, 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 有色金属华东地质勘查局, 南京 210007

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. East China Mineral Exploration and Development Bureau, Nanjing 210007, China

2010-03-02 收稿, 2010-05-04 改回.

Tao Y, Hu RZ, Zhu FL, Ma YS, Ye L and Cheng ZT. 2010. Ore-forming age and the geodynamic background of the Hetaoping lead-zinc deposit in Baoshan, Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6):1760–1772

Abstract Baoshan block hosts a range of Fe, Cu, Pb, Zn, Ag, Hg, Sn deposits. The Hetaoping Pb-Zn-Cu deposit is a typical one hosted in Paleozoic carbonites. The mineralization types include Cu-rich skarn copper, skarn magnetite, hydrothermal Pb-Zn deposit. The deposit has at least 1×10^6 t of Zn and Pb metal as well as potential 1×10^6 t of Cu metal evaluated by exploration department. Skarns and gabbroic dykes are common in this district, but silicic intrusions and stocks occur outside the mine. 10 sulfide mineral separates including sphalerite, chalcopyrite, pyrite, and paragenous related quartz were separated by hand picking. Rb-Sr analyzes yield isochron age of 116.1 ± 3.9 Ma and an initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of 0.71185. In addition, we have analyzed zircon U-Pb and Hf isotope for Zhibenshan and Kejie granite in Baoshan block by LA-ICPMS. The analyzes yield ages of 126.7 ± 1.6 Ma and 93 ± 13 Ma, respectively. It suggests a temporal relationship of the mineralization to the local silicic magmatism in Late-Yanshanian and contemporaneous with closure of the Bangong-Lujiang Paleo-ocean. Zhibenshan and Kejie granites are high-K and peraluminous. Hf isotope analyzes reveals the zircons of the Zhibenshan granite have $\varepsilon_{\text{Hf}}(i)$ between -3 and -8 , $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ values between 1.4 and 1.6 Ga, while the Kejie granite zircons have $\varepsilon_{\text{Hf}}(i)$ between -0.7 and -4 , and $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ values between 1.2 and 1.4 Ga. It suggests that the granites are related to the crustal anatexis of the Proterozoic basement, instead of melting of juvenile subduction material in Late-Yanshanian. Together with the composition of the granites which are most likely to be the derived melts of metagreywackes, it can be concluded that the silicic magmatism is related to melting of metagreywacke which induced by lithospheric stretching in thickened continental orogenic belt. Peraluminous granites related with crustal anatexis, gabbro dykes related with lithospheric stretching and skarn-magmatic hydrothermal deposits constitute a geological association in the Early-Cretaceous mineralization in Baoshan block. It is responsible to the closure of the Meso-Tethys “Lujiang” ocean. The Hetaoping Pb-Zn deposit is an important mineralization type in the complex Sanjiang orogenic setting.

Key words Baoshan block; Hetaoping Pb-Zn deposit; Late-Yanshanian granite; zircon U-Pb age; Hf isotope

摘要 保山地块成矿作用主要形成了铁铜铅锌银汞锡稀有金属的热液矿床, 核桃坪铅锌矿为保山地块中一个重要的典型矿床, 矿床赋存在寒武系碳酸盐岩地层中, 矿化类型包括矽卡岩型富铜矿体、矽卡岩型磁铁矿体和矽卡岩型-热液脉型铜铅锌多金属矿体, 估计铅锌储量大于 100 万吨、潜在铜资源量大于 100 万吨。矿区有矽卡岩及大量辉绿岩脉出露, 外围有多期花岗岩岩体、岩株产出。经人工分选出核桃坪铅锌矿矿石中的闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿及与矿石矿物密切共生的纯净石英共 10 件单矿物样品, 采用 Rb-Sr 同位素定年分析, 获得等时线年龄 116.1 ± 3.9 Ma、矿石硫化物铷同位素组成初值 0.71185。同时,

* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2009CB421005)、中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-111)、国家自然科学基金项目(40973039)和矿床地球化学国家重点实验室专项联合资助。

第一作者简介: 陶琰, 男, 1963 生, 博士, 研究员, 岩石学和矿床地球化学专业, E-mail: taoyan@vip.gyig.ac.cn

我们对保山地块内部出露的志本山花岗岩体和柯街岩体进行了锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成分析。志本山花岗岩、柯街花岗岩均为高钾过铝质花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄分析获得成岩年龄分别为 $126.7 \pm 1.6\text{Ma}$ 和 $93 \pm 13\text{Ma}$ 。同位素年龄测定的结果揭示成矿作用与地块内燕山晚期岩浆活动时期一致, 并与中特提斯班公湖-怒江洋的闭合时代大致相当。志本山、柯街花岗岩锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(i)$ 值变化范围分别为 $-3 \sim -8$ 和 $-0.7 \sim -4$, 亏损地幔模式年龄值分别在 1.5Ga 和 1.3Ga 左右, 指示岩浆来源于中元古代地壳物质的深熔作用, 与俯冲作用无关。花岗岩的地球化学组成表明其与变质杂砂岩熔出的熔体相当, 分析认为岩浆源区为中、下地壳变质杂砂岩, 岩浆活动形成于碰撞造山带后造山的拉张构造背景, 地壳缩短加厚基础上的剪切拉张导致地壳发生深熔作用。地壳深熔成因的过铝质花岗岩、岩石圈伸展有关的辉绿岩、矽卡岩型-岩浆热液型矿床构成了保山地块早白垩世成矿作用中相关联的地质体组合, 是中特提斯怒江洋闭合过程中碰撞造山作用的响应, 核桃坪铅锌矿为三江特提斯复合造山成矿系统中一种重要的成矿作用类型。

关键词 保山地块; 核桃坪铅锌矿; 燕山晚期花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素

中图法分类号 P618.42; P618.43; P588.121; P597.3

1 引言

保山地块是三江地区一个重要的构造单元, 位于澜沧江断裂以西, 怒江断裂至龙陵-路西断裂(怒江断裂南段西支)以东(莫宣学等, 1993)(图1), 成矿作用主要形成了铁铜铅锌银汞锡稀有金属的热液矿床。其中, 赋存在早古生代碳酸盐岩中的热液铅锌(铜)矿为最重要的矿床类型, 典型矿床有如保山核桃坪、镇康芦子园、龙陵勐糯铅锌矿等。

目前, 对保山地块内部主要铅锌矿成矿作用的动力学背景尚不清楚, 是三江地区成矿规律研究中的薄弱环节之一。上述一些典型矿床尚缺乏精确的同位素成矿年龄, 目前对成矿时代还没有明确认识, 现有研究主要依据地质现象进行推测并存在争议, 一般认为勐兴铅锌矿的成矿期为早古生代, 保山核桃坪、镇康芦子园铅锌矿与隐伏花岗岩有关, 推测可能为燕山晚期成矿, 但也存在不同看法。成矿年代的不确定性已严重制约对本区成矿作用的系统认识和进一步深入研究。本文研究选择典型矿床之一的保山核桃坪铅锌矿及保山地块内部的志本山花岗岩体和柯街花岗岩体为研究对象, 开展成矿年龄及成矿背景有关的年代学研究, 分析成矿的动力学背景, 以期对该区铅锌矿成矿过程和成矿预测提供进一步研究的基础。

2 矿床地质特征及区域地质背景

2.1 区域地质背景

保山地块西界怒江断裂, 东界澜沧江断裂, 北部在碧江一带由于澜沧江断裂和怒江断裂汇拢而消失, 南部延出国境, 构成滇缅泰马(Sibumasu)地体的一部分。地块两侧边界曾经分别为古特提斯(澜沧江洋)和中特提斯洋盆(怒江洋)。地块东侧以崇山群变质岩衔接兰坪-思茅盆地(南部东侧边界为昌宁-孟连缝合带), 西侧为怒江汇聚接合带衔接腾冲地块, 被认为是晚古生代时从冈瓦纳大陆上分离出来的一个独立地体(莫宣学和潘桂棠, 2006)。保山地块为滇缅泰地体的组成部分, 和羌塘地块、拉萨地块直到二叠纪时一直位

于冈瓦纳大陆边缘, 从早二叠世至晚三叠世, 羌塘地块和滇缅泰马地块一起快速向北漂移, 导致中特提斯洋的张开; 从晚三叠世至早白垩世, 拉萨地块快速向北漂移, 中特提斯洋进入闭合阶段, 在晚侏罗世-早白垩世闭合, 导致腾冲地块和保山地块的碰撞, 形成高黎贡碰撞构造带(李朋武等, 2005; 莫宣学和潘桂棠, 2006)。保山和思茅地块间的古特提斯洋可能于早志留世张开, 晚三叠世古特提斯洋的闭合(洋壳向思茅地块方向俯冲), 形成昌宁-孟连构造带(Wang *et al.*, 2000; Peng *et al.*, 2008)。

保山地块南部出露有早古生代花岗岩, 年龄范围大致在 $500 \sim 470\text{Ma}$ 之间, 形成于统一的冈瓦纳大陆时期(Chen *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2009)。可能形成于中新生的酸性岩体主要有志本山花岗岩、柯街花岗岩体, 可能形成于晚古生代的花岗岩体有木场花岗岩、岩房(大雪山)、耿马大山岩体(图1)。石炭(?)-二叠纪有基性火山岩活动(肖龙等, 2003), 在保山卧牛寺、镇康(勐汞-木场)等地分布在相应的地层中, 地块内局部产出可能与玄武岩同期的小型镁铁-超镁铁岩体并有铜镍矿化, 如保山纸厂铜镍矿、景谷半坡基性-超基性岩带等。保山地块内部以沉积建造为主, 发育一套浅海-半深海相碎屑岩、碳酸盐岩、硅质岩、笔石、页岩等早古生代台地沉积, 成矿作用主要形成了铁铜铅锌银汞锡稀有金属的热液矿床, 其中, 赋存在早古生代碳酸盐岩中的热液铅锌(铜)矿为最重要的矿床类型, 典型矿床有如保山核桃坪、镇康芦子园、龙陵勐糯铅锌矿等。

保山地块和思茅地块间的昌宁-孟连构造带中有多个火山岩带, 包括晚泥盆统一早石炭统洋脊玄武岩、早石炭统洋岛火山岩、早石炭统裂谷型基性火山岩和晚二叠统与洋壳岩石圈俯冲或消减有关的碱性玄武岩(沈上越等, 2002)。构造带上还产出大型的临沧花岗岩体, 长达 350km , 东西宽 $10 \sim 48\text{km}$, 被认为是古特提斯洋向东俯冲消减碰撞作用的产物(彭头平等, 2006)。保山地块东侧的思茅地块以中生代碎屑沉积建造为主, 受印-亚大陆碰撞影响, 产出一些中生代碱性岩体, 如永平卓潘岩体等(曾普胜等, 2002; 董方涑等, 2007), 成矿作用有远温热液铅锌矿等(侯增谦等, 2006; Hou *et al.*, 2007; Xue *et al.*, 2007)。

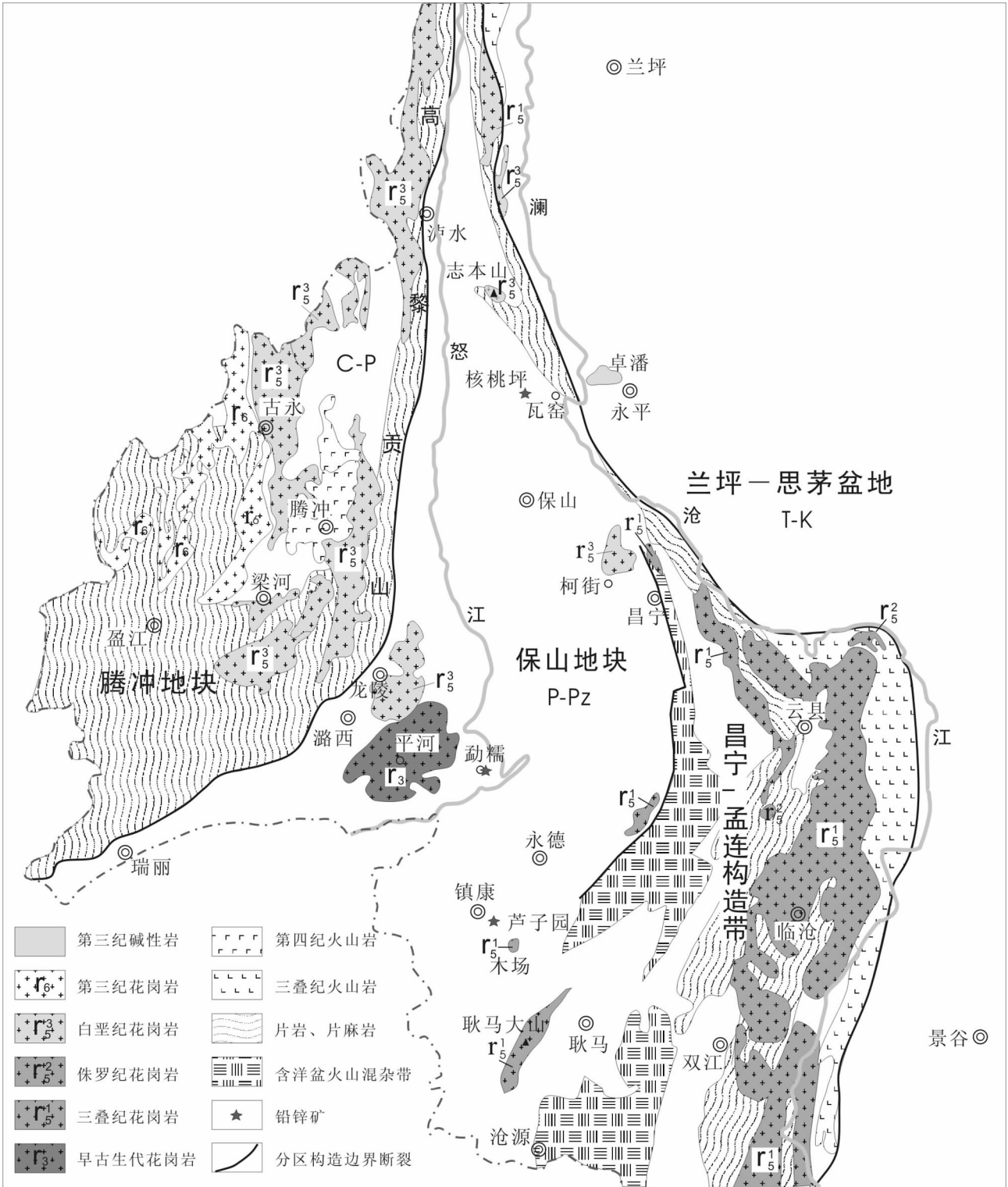


图1 保山地块及邻区构造与岩浆岩分布略图(据马丽芳, 2002 修编)

Fig.1 Tectonics and granitoid plutons in Baoshan block and adjacent area (modified after Ma, 2002)

保山地块和腾冲地块间的高黎贡碰撞构造带是中特提斯海槽在早侏罗世闭合时腾冲地块和保山地块的碰撞所形成。对高黎贡花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年表明, 岩体形成于早白垩世晚期 (126 ~ 118Ma), 认为其年龄、地球化学特

征与拉萨地块北缘花岗岩一致, 是中特提斯怒江洋洋壳向西侧俯冲和海洋闭合过程的岩浆响应(杨启军等, 2006)。西侧的腾冲地块, 由于强烈隆升及走滑剪切, 中元古界高黎贡群变质基底大量剥露并产出大量花岗岩及第四纪玄武岩, 古

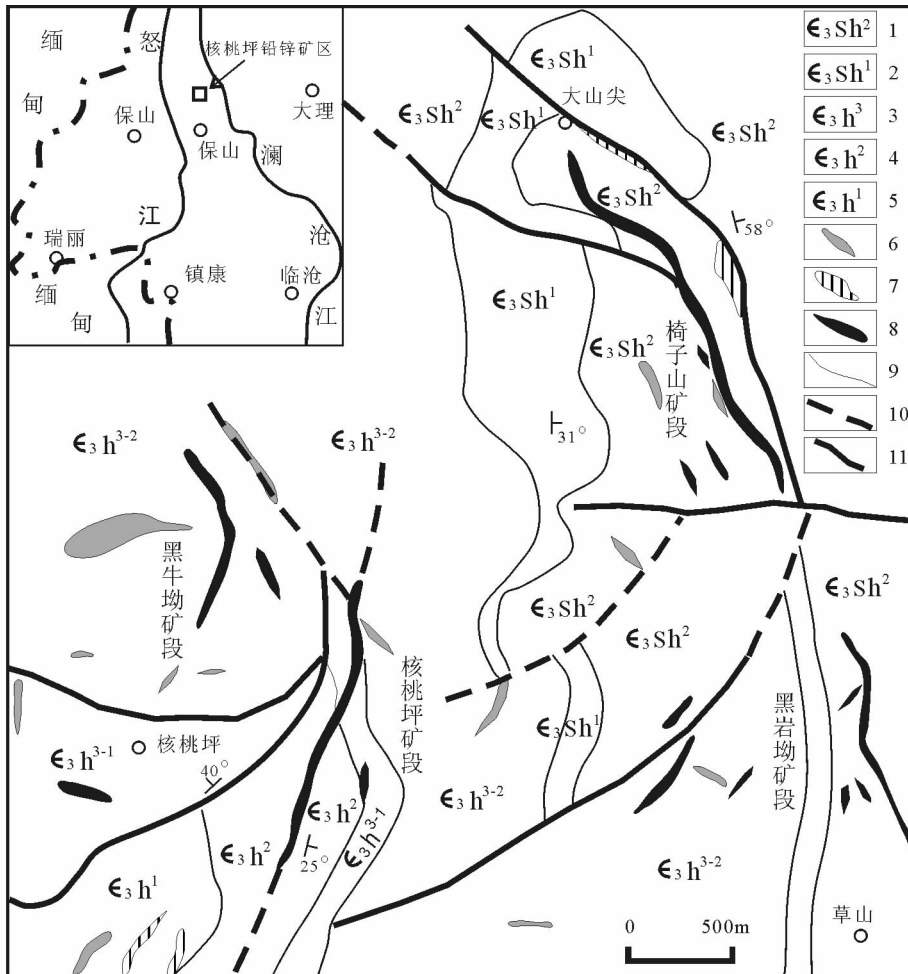


图2 保山核桃坪铅锌矿区地质简图(引自陈永清等, 2005)

1-上寒武统沙河厂组上段; 2-上寒武统沙河厂组下段; 3-上寒武统核桃坪组上段; 4-上寒武统核桃坪组中段; 5-上寒武统核桃坪组下段; 6-基性岩脉; 7-矽卡岩; 8-矿体; 9-地质界线; 10-推測断层; 11-断层

Fig.2 Simplified geological map of the Hetaoping Pb-Zn deposit, Baoshan, Yunnan (after Chen *et al.*, 2005)

生界盖层只零星出露,以印-亚大陆碰撞时限可分为两套花岗岩,即碰撞前燕山期花岗岩和碰撞期新生代花岗岩。碰撞前燕山期花岗岩与新特提斯洋壳板的俯冲有关,侵位时代和岩石组合与西段的冈底斯弧花岗岩基一致;碰撞期新生代花岗岩与燕山期花岗岩相依分布,早期富钾花岗岩主要集中于腾冲、梁河一带,晚期二云母花岗岩集中于察隅、波密一带(董方浏等, 2006),与花岗岩有关的成矿作用以锡为主及热泉型、卡林型金矿等(毛景文等, 1987; 李红阳等, 2001)。

2.2 矿床地质特征

核桃坪铅(铜)矿位于保山地块北部瓦窑镇,有核桃坪、椅子山、黑岩凹、金厂河等多个矿段(陈永清等, 2005; 朱余银等, 2006; 李志国等, 2006; 董文伟, 2007; 薛传东等, 2008)。矿化类型包括矽卡岩型富铜矿体、矽卡岩型磁铁矿体和矽卡岩型、热液脉型铜铅锌多金属矿体,矿体主要赋存于寒武系碳酸盐岩地层中(图2),围岩蚀变有矽卡岩化、大

理岩化、硅化、黄铁矿化、绿泥石化、方解石化。矿体主要赋存在大理岩化及矽卡岩化的岩石中,矿体顶板为薄-中层状大理岩化灰岩、泥质条带状灰岩、大理岩;底板以薄-中层状大理岩化纹层状、条带状泥质灰岩及钙质板岩、泥灰岩为主。矿体主要受断裂控制,矿体呈似层状、透镜状,总体产状与围岩产状基本一致(图3),规模最大的V1号矿体长度为885m,一般厚度为5.0~12.0m,最大厚度达27.65m,最大倾斜延深大于200m。矿石品位:Pb+Zn为5%~11%(薛传东等, 2008)。

矿石矿物有闪锌矿、铁闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、磁铁矿等。脉石矿物有石榴石、透辉石、钙铁辉石、黑柱石、阳起石、透闪石、绿帘石、绿泥石、石英、方解石、重晶石以及萤石(薛传东等, 2008)。

矿区有大量的矽卡岩产出,显示本区铜铅锌多金属矿化与隐伏酸性岩体间的联系,目前区内尚未发现中酸性岩体,保山核桃坪地区为区域重力负异常区,预测深部有隐伏

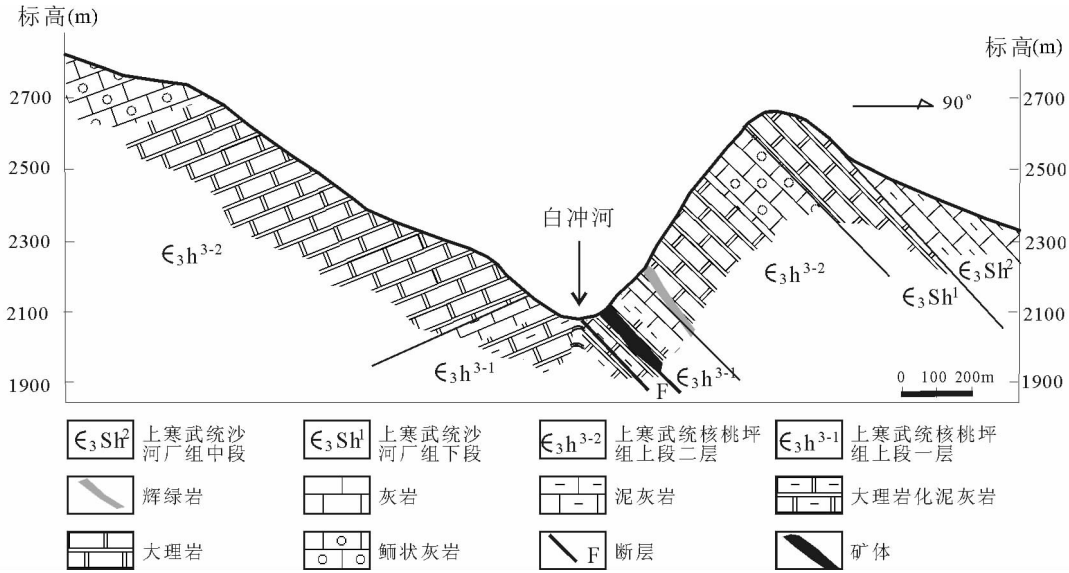


图3 保山核桃坪铅锌矿地质剖面图(引自朱余银等, 2006)

Fig. 3 A profile of the Hetaoping lead-zinc deposit (after Zhu *et al.*, 2006)

的中酸性岩体。矿区外有多期花岗岩岩体、岩株产出, 主要有志本山岩体、铁厂岩群、花渔村岩体等。矿区内见辉绿岩、辉绿辉长岩出露, 长几米至上百米, 最长 800m, 宽几厘米到 30m(图 2), 部分规模较小的辉绿岩脉沿断裂、层间破碎带及构造裂隙产出, 出露面积几平方米至几百平方米(云南省地质矿产局第四地质大队, 1993^①)(朱余银等, 2006)。

3 样品及分析结果

3.1 核桃坪铅锌矿 Rb-Sr 同位素等时线年龄分析

Rb、Sr 在石英、硫化物中的赋存状态还不十分清楚, 但大多数研究者认为, 这些元素主要赋存于流体包裹体中, 近年来将硫化物、石英作为 Rb-Sr 等时线法测定对象的方法, 得到了一定重视和发展(Christensen *et al.*, 1995; Pettke and Diamond, 1996; Yang and Zhou, 2001; 刘玉平等, 2000; 王林森和张利, 2002; 李华芹等, 2008; 张瑞斌等, 2008)。本文采用石英、闪锌矿等硫化物作为 Rb-Sr 等时线法的测定对象, 人工分选核桃坪铅锌(铜)矿矿石中闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿及与矿石矿物密切共生的石英共 10 件单矿物样品, 进行了 Rb-Sr 同位素定年分析。

分析方法和标样测定: 固体粉末样品经准确称重, 用无机混合酸的消化溶解成清液(盐酸介质), 上 $\phi 0.9 \times 9\text{cm}$ 阳离子交换树脂柱(AG50W-X8 200~400 目), 2.5M HCl 淋洗接收 Sr 馏份, 供质谱测定 Sr 同位素。测 Rb、Sr 含量要分别加入同位素稀释剂。样品中的 Rb 和 Sr 元素含量以及同位素比值测定由南京大学现代分析中心的英国制造的 VG354 多接收质谱计(Multi-Collector Mass Spectrometer)上完成。实验测定美国 NBS 987 Sr 同位素标准, 以 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 为

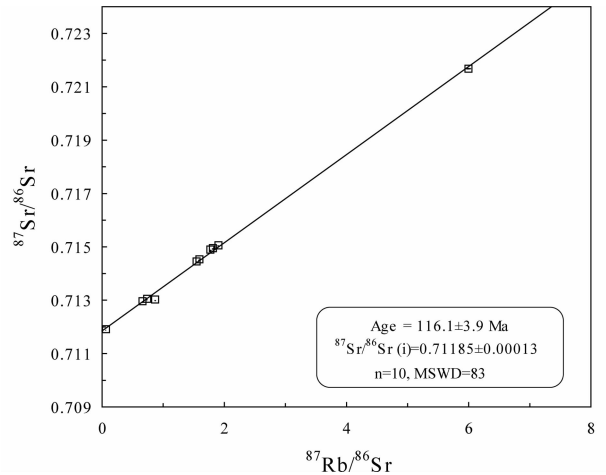


图4 核桃坪铅锌矿 Rb-Sr 同位素等时线

Fig. 4 Rb-Sr isochron plot of the Hetaoping deposit

标准化值、测得 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710224 \pm 8$ 。

分析结果获得等时线成矿年龄为 $116.1 \pm 3.9 \text{ Ma}$, 锶同位素组成初值为 0.71185(表 1, 图 4)。各个被分析样品的初始锶同位素组成 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t = 116\text{Ma})$ 落在一个较小的范围内(0.7116~0.7120), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t = 116\text{Ma}) - 1/\text{Sr}$ 图解无线性相关(图略), 从数据本身分析, 样品初始锶同位素组成 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$ 的变化具有随机性, 等时线年龄应为有效年龄。

3.2 志本山花岗岩、柯街花岗岩 LA-ICPMS 锆石分析

志本山花岗岩岩体出露在保山地块北部志本山一带, 分

① 云南省地质矿产局第四地质大队. 1993. 云南省保山市瓦窑乡核桃坪铅锌矿区普查地质报告

表1 核桃坪铅锌矿 Rb-Sr 同位素分析检测结果

Table 1 Rb-Sr isotopes of the samples from the Hetaoping Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{87}{86}\text{Rb}$	$\frac{87}{86}\text{Sr}$
HTP12Q	石英	0.4897	2.015	0.7382	0.713052 \pm 9
HTPA5Z	闪锌矿	0.8793	3.894	0.6628	0.712958 \pm 8
HTP7Z	闪锌矿	1.205	1.917	1.815	0.714951 \pm 8
HTP7bZ	闪锌矿	1.079	1.764	1.906	0.715056 \pm 8
HTP11Z	闪锌矿	1.753	2.983	1.772	0.714895 \pm 9
HTP12Z	闪锌矿	0.5234	1.806	0.8681	0.713024 \pm 7
HTP13Z	闪锌矿	4.502	2.618	5.996	0.721673 \pm 9
HTP7Cu	黄铜矿	1.243	2.236	1.547	0.714453 \pm 10
HTPD5F	黄铁矿	12.65	23.07	1.593	0.714532 \pm 9
HTPB2Cu	黄铜矿	0.3963	2.541	0.0645	0.711912 \pm 8

表2 志本山花岗岩、柯街花岗岩主量元素组成 (wt%)

Table 2 Major compositions of the granites of the Zhibenshan and the Kejie complex (wt%)

岩体	样品号	岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	LOI	总量
志本山	Z3	二云母花岗岩	69.25	0.44	16.4	3.34	1.08	2.94	1.73	3.50	0.07	0.12	0.49	99.36
	YP2773-1*	中粒二云母花岗岩	75.60	0.10	12.36	3.27	0.19	0.78	3.50	3.90	0.06	0.08	0.56	100.40
	YP9598-1*	含白云母花岗岩	75.78	0.20	13.33	2.06	0.17	0.53	2.88	3.73	0.05	0.16	1.11	100.00
	YP9599-1*	碎裂含二云母花岗岩	75.1	0.05	12.84	2.77	0.34	0.88	2.72	4.79	0.07	0.11	0.63	100.30
柯街	KJ	黑云母花岗岩	74.01	0.25	14.94	1.77	0.38	0.75	1.95	4.83	0.06	0.11	0.63	99.69
	* *	黑云母花岗岩	73.07	0.26	14.17	2.18	0.4	1.25	3.47	5.22	0.03	0.41		100.46
	**	黑云母花岗岩	71.12	0.54	15.27	2.85	0.74	2.13	3.17	4.36	0.05	0.39		100.62
	**	黑云母花岗岩	72.06	0.22	14.82	2.76	0.43	1.13	3.73	4.83	0.07	0.12		100.17

* 据云南省地质局区域地质调查队,1979; ** 据云南省地质局区域地质测量队,1965^②

表3 志本山花岗岩、柯街花岗岩微量元素组成 ($\times 10^{-6}$)Table 3 Trace element concentrations of the granites of the Zhibenshan and the Kejie complex ($\times 10^{-6}$)

样品号	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
Z3	164	278	21	81.1	11.7	529	24.7	50.1	5.63	20.4	4.54	1.11	3.59
KJ	303	139	34.9	130	54.8	347	52.1	105	11.2	37.7	7.33	0.759	5.51
样品号	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	Lu/Hf
Z3	0.646	3.88	0.811	2.28	0.339	2.29	0.336	2.8	1.53	27.2	14.2	4.30	0.120
KJ	1.05	6.04	1.27	3.67	0.535	3.83	0.545	4.43	6.04	40.7	40.0	11.7	0.123

的稀土配分形式图上看到(图6),两个花岗岩样品的稀土总量都较高,轻重稀土分异强烈,轻稀土高度富集, Eu 异常显著(柯街二云母花岗岩样品 KJ)或不明显(志本山黑云母花岗岩样品 Z3)。

2个花岗岩样品的锆石都是从大约 5kg 岩石中经人工重

布面积约 20km²,由片麻状黑云母花岗岩,弱片麻状斑状二云母花岗岩、中粗粒等粒二云母花岗岩、中细粒二云母花岗岩和浅色花岗岩等组成的复式岩体、包含混合岩化形成的混合花岗岩、片麻岩及深熔形成的岩浆结晶花岗岩(云南省地质局区域地质调查队,1979^①)。研究所用的样品二云母花岗岩呈灰白色,中细粒花岗结构,块状构造,主要矿物为斜长石 40%,微斜长石 25%,石英 30%,云母 5%。斜长石呈半自形晶,板柱状,粒径 0.5~3.5mm,个别呈聚片双晶,多为更长石;微斜长石呈半自形晶,板柱状,粒径 0.4~3.8mm;石英呈不规则粒状分布。副矿物有磁铁矿、锆石等。在柯街岩体采集的样品为黑云母花岗岩。

对志本山花岗岩、柯街花岗岩样品测定了主量、微量元素组成(表2、表3)。根据主量元素组成,志本山花岗岩、柯街花岗岩为高钾过铝质花岗岩(图5)。在球粒陨石标准化后

砂、重液、电磁仪等多种方法分离,并在双目显微镜下挑出无色透明、无裂痕、无包体的锆石。首先将其镶嵌在环氧树脂中并抛光,然后进行锆石的光学、CL 显微图像及 U-Pb 年龄分析及 Hf 同位素联机 LA-ICP-MS 分析。分析测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,分析步骤和数据处理

① 云南省地质局区域地质调查队.1979.永平幅 1:20 万区域地质调查报告

② 云南省地质局区域地质测量队.1965.1:100 万下关幅地质图说明书

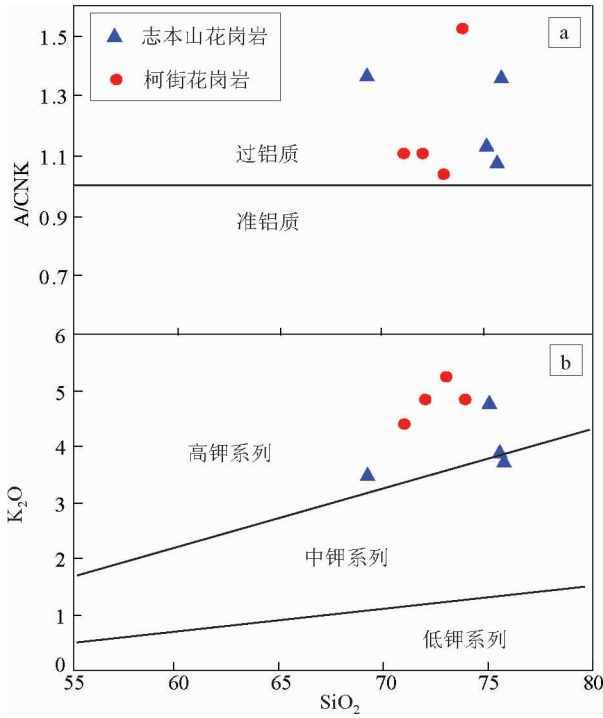


图5 花岗岩 SiO₂-A/CNK, K₂O 图解
 岩石类型及系列分界线: a-据 Chappell and White (1974); b-据 Pecerillo and Taylor (1976)
 Fig. 5 Variations of A/CNK, K₂O vs SiO₂
 Subdivision is after: a-Chappell and White (1974); b-Pecerillo and Taylor (1976)

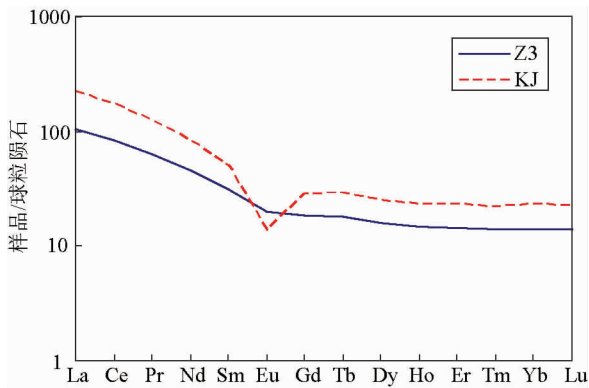


图6 花岗岩球粒陨石标准化稀土配分曲线(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
 Fig. 6 Chondrite-normalized rare-earth element patterns for the granites (the normalization values are from Sun and McDonough, 1989)

方法参见文献(Liu *et al.*, 2009)。

锆石形态特征如图7所示,形态上呈自形粒状,在CL图像上显示振荡环带发育,表现为酸性岩浆结晶锆石的特征。一小部分锆石颗粒内部有继承锆石内核,本次未对可能

表4 志本山二云母花岗岩和柯街黑云母花岗岩锆石 U-Pb 定年分析结果

样品号	²³⁸ U	²³² Th	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	年龄(Ma)	1σ
志本花岗岩																			
Z3-01	826.25	602.52	59.67	0.04841	0.00077	0.02010	0.00024	0.13388	0.00221	0.00565	0.00007	128.3	0.00007	1.52	127.6	0.00565	0.00007	114.0	1.40
Z3-02	697.05	571.98	56.79	0.04690	0.00107	0.02035	0.00025	0.13132	0.00303	0.00659	0.00009	129.9	0.00009	1.59	125.3	0.00659	0.00009	132.7	1.74
Z3-03	749.47	476.17	60.14	0.04635	0.00093	0.01967	0.00024	0.12545	0.00257	0.00590	0.00008	125.6	0.00008	1.52	120.0	0.00590	0.00008	118.9	1.63
Z3-04	214.46	178.05	17.45	0.04842	0.00118	0.01941	0.00025	0.12931	0.00318	0.00612	0.00009	123.9	0.00009	1.56	123.5	0.00612	0.00009	123.4	1.76
Z3-05	727.88	479.43	64.41	0.04770	0.00084	0.02005	0.00024	0.13164	0.00240	0.00667	0.00009	128.0	0.00009	1.54	125.6	0.00667	0.00009	134.4	1.72
Z3-06	417.19	459.33	37.60	0.04942	0.00099	0.02019	0.00025	0.13728	0.00281	0.00570	0.00008	128.8	0.00008	1.58	130.6	0.00570	0.00008	114.9	1.52
Z3-07	710.18	743.18	72.52	0.04512	0.00111	0.02062	0.00026	0.12802	0.00316	0.00586	0.00008	131.5	0.00008	1.65	122.3	0.00586	0.00008	118.0	1.60
Z3-08	588.28	339.39	58.32	0.04790	0.00113	0.01997	0.00025	0.13163	0.00314	0.00612	0.00010	127.5	0.00010	1.60	125.6	0.00612	0.00010	123.4	2.03
Z3-09	576.26	519.17	69.88	0.04646	0.00113	0.01999	0.00025	0.12783	0.00314	0.00613	0.00009	127.6	0.00009	1.61	122.1	0.00613	0.00009	123.4	1.78
柯街花岗岩																			
KJ-01	1263	574	64.4	0.04576	0.00082	0.10641	0.00202	0.01686	0.00022	0.00401	0.00006	102.7	0.00006	1.86	107.8	0.00401	0.00006	80.9	1.19
KJ-02	244	760	13.3	0.05320	0.00338	0.12106	0.00753	0.01650	0.00032	0.00484	0.00008	116.0	0.00008	6.82	105.5	0.00484	0.00008	97.6	1.56
KJ-03	489	213	23.7	0.04569	0.00135	0.08611	0.00258	0.01366	0.00019	0.00447	0.00008	83.9	0.00008	2.41	87.5	0.00447	0.00008	90.1	1.64
KJ-04	176	198	8.92	0.05402	0.00215	0.10663	0.00422	0.01431	0.00022	0.00509	0.00009	102.9	0.00009	3.87	91.6	0.00509	0.00009	102.7	1.87
KJ-05	149	280	7.17	0.05917	0.00275	0.10696	0.00491	0.01310	0.00021	0.00394	0.00007	103.2	0.00007	4.51	83.9	0.00394	0.00007	79.6	1.43

表5 花岗岩锆石 Hf 同位素组成

Table 5 Hf isotopic compositions of the zircons in granites

样品号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
志本山花岗岩											
Z3-01	0.032344	0.000121	0.001317	0.000005	0.282618	0.000007	0.282614	-2.8	907	1361	-0.96
Z3-02	0.037168	0.000206	0.001526	0.000007	0.282605	0.000009	0.282601	-3.3	930	1391	-0.95
Z3-03	0.034858	0.000179	0.001402	0.000006	0.282532	0.000008	0.282529	-5.8	1030	1552	-0.96
Z3-04	0.024892	0.000074	0.000970	0.000003	0.282459	0.000008	0.282457	-8.4	1121	1712	-0.97
Z3-05	0.033035	0.000161	0.001372	0.000007	0.282566	0.000009	0.282563	-4.6	982	1477	-0.96
Z3-06	0.027358	0.000322	0.001127	0.000011	0.282511	0.000010	0.282508	-6.6	1053	1598	-0.97
Z3-07	0.039961	0.000343	0.001587	0.000013	0.282567	0.000008	0.282563	-4.6	986	1475	-0.95
Z3-08	0.026996	0.000028	0.001151	0.000002	0.282581	0.000008	0.282578	-4.1	955	1442	-0.97
Z3-09	0.017766	0.000053	0.000821	0.000002	0.282622	0.000008	0.28262	-2.6	889	1349	-0.98
柯街花岗岩											
KJ-01	0.036123	0.000308	0.001378	0.000011	0.282667	0.000011	0.282665	-1.8	838	1285	-0.96
KJ-02	0.025960	0.000094	0.001038	0.000003	0.282655	0.000012	0.282653	-2.2	848	1312	-0.97
KJ-03	0.018243	0.000030	0.000718	0.000001	0.282697	0.000010	0.282695	-0.7	782	1217	-0.98
KJ-04	0.026042	0.000173	0.001019	0.000007	0.282603	0.000018	0.282601	-4.0	920	1427	-0.97
KJ-05	0.025744	0.000365	0.000998	0.000013	0.282607	0.000014	0.282605	-3.9	914	1419	-0.97

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)) / ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)) - 1) \times 10000$; $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln(1 + ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}) / ((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}))$; $t_{\text{DM2}} = 1/\lambda \times \ln(1 + ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{s,t} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}) / ((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_c - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}})) + t$; $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$; 其中, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s$ 为样品测定值, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_c = 0.015$, (Blichert-Toft and Albarède, 1997; Griffin *et al.*, 2000). $\lambda = 1.865 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$ (Soderland *et al.*, 2004). t 为样品形成时间(志本山花岗岩取 126Ma; 柯街花岗岩取 93Ma)



图7 志本山二云母花岗岩(Z3-1~09)和柯街黑云母花岗岩(KJ01~05)锆石 CL 图像

Fig. 7 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from the Zhibenshan granite (Z3-01 ~ 09) and the Kejie granite (KJ01 ~ KJ05)

存在的继承锆石进行分析。柯街花岗岩样品锆石粒径一般 50~100 μm , 志本山花岗岩锆石部分较大粒径一般 50~200 μm 。

锆石 U-Pb 定年分析结果如表 4, 采用 Isoplot3 程序 (Ludwig, 2003) 计算, 志本山岩体锆石样品 U-Pb 平均年龄为 126.7 \pm 1.6Ma(如图 8a), 柯街岩体锆石样品 U-Pb 平均年龄

93 \pm 13Ma(如图 8b)。

锆石 Hf 同位素组成如表 5, 志本山花岗岩锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t = 126\text{Ma})$ 值变化范围 -3 ~ -6, 其亏损地幔 Hf 模式年龄值 (t_{DM2}) 相对集中于 1.4~1.6Ga。柯街花岗岩锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t = 93\text{Ma})$ 值 0 值附近, 变化范围 -0.7 ~ -4, 其亏损地幔 Hf 模式年龄值 (t_{DM2}) 相对集中于 1.2~1.4Ga 之间。

4 讨论

4.1 核桃坪铅锌矿成矿年代及成因

核桃坪铅锌矿矿床赋存在早古生代碳酸盐岩中, 矿石硫化物 Rb-Sr 同位素等时线成矿年龄为 116.1 \pm 3.9Ma, 成矿时代与赋矿地层存在明显时差, 说明矿床不可能为喷流沉积成矿。其成矿时代与志本山等花岗岩体的形成年龄基本一致, 反映矿床成因上可能与燕山期构造-岩浆活动有关。核桃坪地区为区域重力异常区, 地球化学异常区内均有或强或弱的亲酸性岩元素异常(如 W, Sn, Bi 等), 推测有隐伏岩体存在(符德贵等, 2004; 董文伟, 2007)。薛传东等(2008)分析认为, 地表大量的矽卡岩分布, 显示本区铜铅锌多金属矿化与隐伏酸性岩体间的联系, 隐伏岩体可能为矽卡岩化、铜铅锌多金属矿化提供热源和流体基础, 同时也可作为矿化富集提

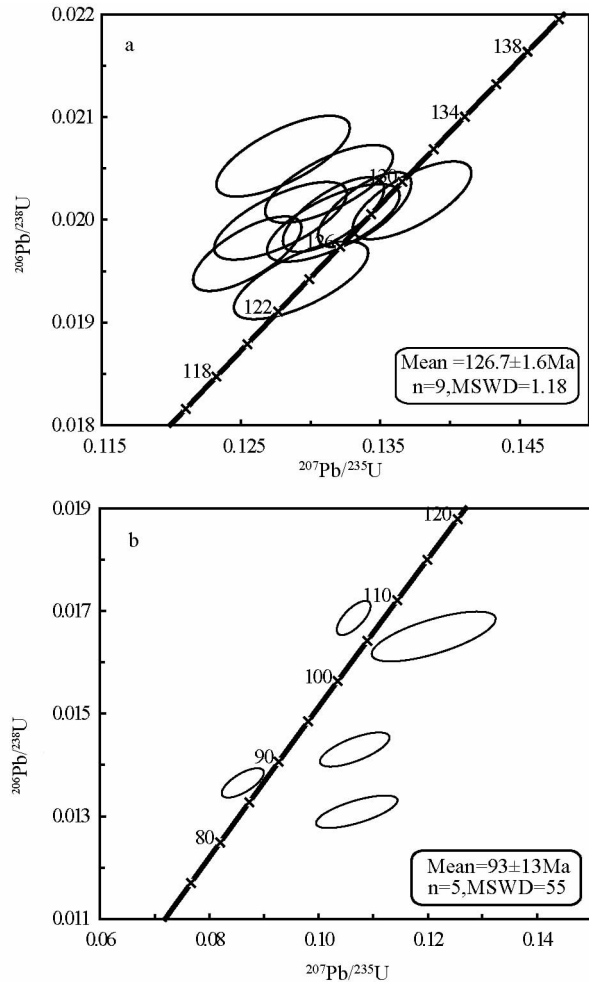


图8 志本山二云母花岗岩(a)和柯街黑云母花岗岩(b)锆石 U-Pb 谐和年龄

Fig. 8 Zircon U-Pb concordia diagrams of the Zhibenshan granite (a) and the Kejie granite (b)

供了物质来源。因此,可以认为核桃坪铅锌矿为与隐伏花岗岩有关的矽卡岩型-岩浆热液型矿床。

矿石硫化物 Sr 同位素组成初值 0.71185, 较成矿期时围岩地层寒武系灰岩的 Sr 同位素组成 (0.710 左右) 略高 (Burke *et al.*, 1982), 大致相当于保山地块同期花岗岩初始 Sr 同位素组成 (如志本山花岗岩为 0.716810, 张玉泉等, 1990), 反映出矿床成因上可能与花岗岩岩浆活动有直接关联。陈永清等 (2005) 对核桃坪矿床茅竹棚矿段矽卡岩型矿石中的方铅矿硫同位素组成分析结果为 1.95‰ ~ 0.99‰, 反映了深部岩浆硫源的同位素组成特点。薛传东等 (2008) 研究表明, V1 矿体中矿石的石英 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值变化范围为 6.1‰ ~ 7.6‰, 平均为 6.7‰, 其 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值变化范围为 -100‰ ~ -108‰, 平均 -104‰, 说明成矿流体主要来自深部岩浆分异水, 并在后期成矿作用过程中有地层建造水和大气降水的加入; 矿石中方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值分别为 -6.6‰ ~ -5.9‰ 和 5.0‰ ~ 5.2‰, 反映成矿流体的碳、氧具有深部

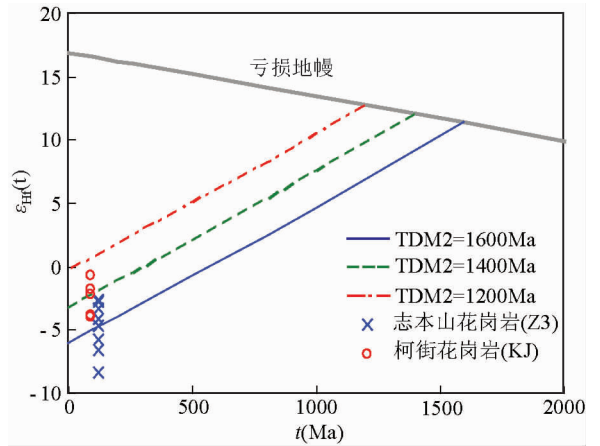


图9 锆石 Hf 同位素组成的两阶段演化模式

花岗岩源区 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.017$ (参见文中部分), 亏损地幔演化线据吴福元等 (2007)

Fig. 9 Diagram of Hf isotopic evolution in the zircons Using the $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ratio of 0.017 for the source crust (see text). The evolution of the depleted mantle is after Wu *et al.* (2007)

流体与围岩发生交代反应的特征。这些矿石矿物同位素特征的研究成果均指示成矿流体具深部岩浆来源的特点。

4.2 岩体成因及动力学背景分析

已有研究认为, 羌塘-保山地块与拉萨地块之间的中特提斯洋在早二叠世开始形成, 碰撞拼合的时间可能自晚侏罗世 (约 159 Ma) 开始、早白垩世末 (约 99 Ma) 完成, 形成班公湖-怒江缝合带构造 (莫宣学和潘桂棠, 2006), 包括腾冲地块和保山地块的碰撞形成高黎贡碰撞构造带。对高黎贡花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年研究表明, 岩体形成于早白垩世晚期 (126 ~ 118 Ma), 被认为是中特提斯怒江洋闭合过程的岩浆响应 (杨启军等, 2006)。

志本山、柯街花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 $126.7 \pm 1.6\text{Ma}$ 和 $93 \pm 13\text{Ma}$, 与班公湖-怒江洋所代表的中特提斯洋的闭合时代大致相当, 和高黎贡花岗岩基本同期, 地球化学性质上也与高黎贡花岗岩相似。志本山、柯街花岗岩的 Lu/Hf 比值相近, 在 0.12 左右, 明显高于腾冲地块东侧混合岩 (0.04 ~ 0.06) (陈福坤等, 2006), 也明显高于形成于 500 Ma 左右的腾冲地块平达花岗岩 (0.001 ~ 0.015) (Chen *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2009), 而与高黎贡花岗岩相当 (0.05 ~ 0.13) (杨启军等, 2006)。根据志本山、柯街花岗岩 Lu/Hf 比值 (0.12) 估算岩浆源区 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.017 (假定岩浆形成演化基本没有 Lu、Hf 分异并按同位素自然比例计算), 两阶段演化模式如图 9 所示, 其亏损地幔 Hf 模式年龄大致在 1.2 Ga 至 1.6 Ga 之间, 与高黎贡花岗岩 Nd 同位素亏损地幔模式年龄 (集中在 1.3 ~ 1.4 Ga) 相近 (杨启军等, 2006), 反映志本山、柯街花岗岩源区可能是与高黎贡花岗岩源区相似

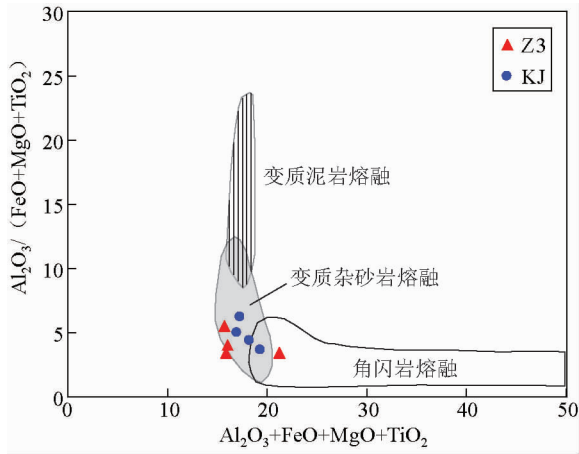


图 10 志本山、柯街花岗岩化学成分(%)与变质泥岩、变质杂砂岩及角闪岩实验熔体成份对比
实验熔体成份据 Patiño Douce (1999)

Fig. 10 Compositions of Zhibenshan and Kejie granites in comparison to the compositional fields of experimentally derived partial melts of metapelites, metagreywackes and amphibolites

Data for experimentally derived liquids from Patiño Douce (1999). All values are in %

的基底地壳,岩浆主要来源于中元古代地壳物质。

志本山、柯街花岗岩的锆石 Hf 同位素组成远远低于亏损地幔,与冈底斯南缘花岗岩 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(170\text{Ma}) = +14.1 \sim +17.7$) (张宏飞等, 2007) 明显不同,而且地块内缺乏相应的火山岩建造,结合 Nd 同位素亏损地幔模式年龄,分析认为保山地块在白垩纪的构造-岩浆活动与俯冲作用无关,其花岗岩的产出是由于地壳碰撞加厚引起地壳重熔形成的,花岗岩具有过铝质性质,也表明为岩浆活动与地壳缩短加厚作用有关(廖忠礼等, 2006; 张宏飞等, 2007),花岗岩可能形成于碰撞造山带后造山的拉张构造背景中(吴福元等, 2007; 范蔚茗等, 2009)。

志本山、柯街花岗岩的地球化学组成与变质杂砂岩熔出熔体相当(图 10),结合微量元素及锆石 Hf 同位素组成特点分析认为,岩浆来源于中、下地壳前寒武纪变质岩的深熔作用,花岗岩源区成分以变质杂砂岩为主。

4.3 保山地块的岩浆活动与成矿作用分析

根据本文分析结果及有关研究成果认为,保山地块在早古生代、印支期、燕山晚期和喜山期出现过花岗质岩浆活动。早古生代(500Ma 左右)的岩浆活动表现形成了平达岩体(Chen *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2009),同期成矿作用形成了勐糯铅锌矿(Liu *et al.*, 2009);印支期的岩浆活动形成的岩体有木场花岗岩、岩房(大雪山)、耿马大山岩体,成因上可能与古特提斯洋的闭合(晚三叠世)有关(彭头平等, 2006),在昌宁-孟连构造带主要形成与岛弧火山岩有关的矿产,如老

厂铅锌矿等(龙汉生等, 2009),该期在保山地块内部的成矿作用尚不清楚。燕山期的岩浆活动形成的岩体有志本山、柯街岩体等、包括混合岩化作用,相关的成矿作用形成了如保山核桃坪、镇康芦子园铅锌矿;喜山期的岩浆活动主要是受新特提斯印度板块向欧亚板块碰撞造山影响(钟大赉等, 2001; 毕献武等, 2005; Chen *et al.*, 2009; 董方浏等, 2006),有关成矿作用如云龙铁厂锡矿。

与保山核桃坪、镇康芦子园铅锌矿有关的燕山晚期岩浆活动,其动力学背景为中特提斯海槽闭合造山。由于腾冲地块和保山地块的碰撞形成高黎贡碰撞构造带,同时保山地块内部也受碰撞作用的影响,因地壳加厚及阶段性剪切拉张,导致地壳重熔产生岩浆活动、混合岩化作用及相应的成矿作用。矿区辉绿岩的广泛产出,反映地块内部存在地壳/岩石圈幕式拉张(范蔚茗等, 2003; 毛景文, 2005),类似于中国东部中生代岩石圈加厚同时出现幕式拉张时的成矿作用(华仁民和毛景文, 1999; 胡瑞忠等, 2008; Hu *et al.*, 2008)。因此认为,过铝质花岗岩、辉绿岩、矽卡岩型-岩浆热液型矿床构成了保山地块内部燕山晚期成矿作用中相关联的地质体组合,核桃坪(铜铁)铅锌矿的成矿作用是发生在地壳碰撞加厚与幕式剪切拉张的动力学背景下,是中特提斯怒江洋闭合时期碰撞造山作用的响应,为三江特提斯复合造山成矿系统中一种重要的成矿作用类型。

5 结论

(1) 保山核桃坪铅锌矿矿石硫化物 Rb-Sr 等时线成矿年龄为 $116.1 \pm 3.9\text{Ma}$, 总同位素组成初值为 0.71185, 为与燕山晚期隐伏花岗岩有关的矽卡岩型-岩浆热液型矿床。

(2) 志本山岩体锆石样品 U-Pb 平均年龄为 $126.7 \pm 1.6\text{Ma}$ 、柯街岩体锆石样品 U-Pb 平均年龄 $93 \pm 13\text{Ma}$, 亏损地幔模式年龄值分别为 1.5Ga 和 1.3Ga 左右。岩体形成于班公湖-怒江洋闭合时期,岩浆来源于中元古代变质杂砂岩的深熔作用,其岩浆活动是由于腾冲地块和保山地块碰撞造成地壳缩短加厚、并在幕式剪切拉张环境时发生地壳物质深熔。

(3) 过铝质花岗岩、辉绿岩脉、矽卡岩型-岩浆热液型矿床构成保山地块燕山晚期成矿作用中相关联的地质体组合、是中特提斯怒江洋闭合时期碰撞造山作用的响应,核桃坪(铜铁)铅锌矿为三江特提斯复合造山成矿系统中一种重要的成矿作用类型。

致谢 云南地矿资源股份有限公司勘查部周云满高级工程师、云南地调局尹光候高级工程师在野外地质考察中给予了大力支持和帮助,西北大学弓虎军教授在锆石 U-Pb 分析上给予热情指导和帮助,南京大学现代分析中心王银喜教授完成了本文的矿石硫化物 Rb-Sr 定年分析,在此表示感谢。

References

- Bi XW, Hu RZ, Peng JT, Wu KX, Su WC and Zhan XZ. 2005. Geochemical characteristics of the Yaoan and Machangqing alkaline-rich intrusions. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (1): 113 – 124 (in Chinese with English abstract)
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243 – 258
- Burke WH, Danison RE, Hetherington EA, Koepnick NF, Nelson NF and Otto JB. 1982. Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time. *Geology*, 10:516 – 519
- Chappell BW and White AJR. 1974. Two constricting granite types. *Pacific Geology*, 8:173 – 174
- Chen FK, Li QL, Wang XL and Li XH. 2006. Zircon age and Sr-Nd-Hf isotopic composition of migmatite in the eastern Tengchong block, western Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (2): 439 – 448 (in Chinese with English abstract)
- Chen FK, Li XH, Wang XL, Li QL and Siebel W. 2007. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China. *Int. J. Earth Sci.*, 96:1179 – 1194
- Chen YQ, Lu YX, Xia QL, Jiang CX, Liu HG and Lü ZC. 2005. Geochemical characteristics of the Hetaoping Pb-Zn deposit, Baoshan, Yunnan, and its genetic model and ore prospecting model pattern. *Chinese Geology*, 32 (1):90 – 99 (in Chinese with English abstract)
- Chen YQ, Huang JN, Zhai XM, Lu YX, Cheng ZH and Li JR. 2009. Zircon U-Pb age and geochemistry of granitoids within Jinla Pb-Zn-Ag poly-metallic ore field across China and Myanmar border. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 344 – 362
- Christensen JN, Halliday AN, Leigh KE, Randell RN and Kesler SE. 1995. Direct dating of sulfides by Rb-Sr: A critical test using the Polaris Mississippi Valley-type Zn-Pb deposit. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(24) 5191 – 5197
- Dong FL, Hou ZQ, Gao YF, Zeng PS and Jiang CX. 2006. Cenozoic granitoid in Tengchong, western Yunnan: Genesis type and implication for tectonics. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 927 – 937 (in Chinese with English abstract)
- Dong FL, Mo XX, Yu XH, Hou ZQ and Wang Y. 2007. Trace elements geochemical and Nd-Sr-Pb isotopes characteristics of the Zhuopan alkaline complex in Yongping, Yunnan Province and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (5): 986 – 994 (in Chinese with English abstract)
- Dong WW. 2007. The metallogenetic conditions and typical model in Baoshan-Zhenkuang massif. *Yunnan Geology*, 26 (1):56 – 61 (in Chinese with English abstract)
- Fan WM, Wang YJ, Guo F and Peng TP. 2003. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi provinces and the lithospheric extension. *Earth Science Frontiers*, 10 (3): 159 – 179 (in Chinese)
- Fan WM, Peng TP and Wang YJ. 2009. Triassic magmatism in the southern Lancangjiang zone, southwestern China and its constraints on the tectonic evolution of Paleo-Tethys. *Earth Science Frontiers*, 16(6):291 – 302 (in Chinese with English abstract)
- Fu DG, Cui ZL and Guan DR. 2004. The comprehensive ore-prospecting of Jinchanghe blind multi-metallic deposit, Baoshan. *Yunnan Geology*, 23(2): 188 – 198 (in Chinese with English abstract)
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Achterbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 133 – 147
- Hou ZQ, Mo XX, Yang ZM, Wang AJ, Pan GT, Qu XM and Nie FJ. 2006. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types. *Geology in China*, 33 (2): 340 – 351 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Zaw K, Pan GT, Mo XX, Xu Q, Hu YZ and Li XZ. 2007. The Sanjiang Tethyan metallogenesis in S. W. China: Tectonic setting, metallogenic epoch and deposit type. *Ore Geology Reviews*, 31:48 – 87
- Hu RZ, Mao JW, Bi XW, Peng JT, Song XY, Zhong H, Tao Y and Xie GQ. 2008. Several developing directions of relationship between continental geodynamics and mineralization. *Geochimica*, 37 (4): 344 – 352 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Bi XW, Zhou M F, Peng JT, Su WC, Liu S and Qi HW. 2008. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary. *Economic Geology*, 103: 583 – 598
- Hua RM and Mao JW. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in East China. *Mineral Deposits*, 18 (4): 300 – 307 (in Chinese with English abstract)
- Li HQ, Wang DH, Mei YP, Liang T, Chen ZY, Guo CL and Ying LJ. 2008. Lithogenesis and mineralization chronology study on the Lamo zinc-copper polymetallic ore deposit in Dachang orefield, Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 82(7):912 – 920 (in Chinese with English abstract)
- Li HY, Gao ZM, Yang ZS, Luo TY, Rao WB, Tao Y and Gao YF. 2001. Geological-geochemical characteristics of Shangmanggang gold deposit, western Yunnan. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(4):639 – 646 (in Chinese with English abstract)
- Li PW, Gao R, Cui JW and Guan Y. 2005. Paleomagnetic results from the Three Rivers region, SW China: Implications for the collisional and accretionary history. *Acta Geoscientia Sinica*, 26 (5):387 – 404 (in Chinese with English abstract)
- Li ZG, Zeng PS, Fu DG and Yu XH. 2006. Geological characteristics and primary research on the genesis of the deposits in Hetaoping mineralization-concentrated region. *Journal of East China Institute of Technology*, 29 (3): 211 – 215 (in Chinese with English abstract)
- Liao ZL, Mo XX, Pan GT, Zhu DC, Wang Q, Zhao ZD and Jiang XX. 2006. On peraluminous granites in Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 25(7):812 – 821 (in Chinese with English abstract)
- Liu S, Hu RZ, Gao S, Feng CX, Huang ZL, Lai SC, Yuan HL, Liu XM, Coulson IM, Feng GY, Wang T and Qi YQ. 2009. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and origin of Early Palaeozoic I-type granite from the Tengchong-Baoshan Block, western Yunnan Province, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences* 36: 168 – 182
- Liu YP, Li CY and Gu T. 2000. Isotopic constraints on the source of ore-forming materials of Dulong Sn-W polymetallic deposit, Yunnan. *Geology-geochemistry*, 28 (4): 75 – 82 (in Chinese with English abstract)
- Long HS, Luo TY, Huang ZL and Zhou MZ. 2009. Carbon and oxygen isotopic geochemistry of Laochang large scale Ag polymetallic deposit in Lancang Country of Yunnan Province and its significance. *Mineral Deposits*, 28(5):687 – 695 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for isoplot 3.00: A geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 4
- Ma LF. 2002. Geological Atlas of China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Mao JW, Zhang SL and Rossi P. 1987. The Tin-bearing granites and their relation to mineralization in Tenchong, Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 3 (4): 32 – 43 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Li XF, Zang ZH, Wang YT, Wang ZL, Zhao CS, Yang FQ and Li HM. 2005. Geodynamic process and metallogeny: History and present research trend, with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China. *Mineral Deposits*, 24 (3): 193 – 205 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Lu FX and Shen SY. 1993. Sanjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization. Beijing: Geological publishing house, 1 – 267 (in Chinese)

- Mo XX and Pan GT. 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: Constrained by tectono-magmatic events. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 43–51 (in Chinese with English abstract)
- Patiño Douce AE. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL (eds.). *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 168: 55–75
- Pecerrillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene cal-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81
- Peng TP, Wang YJ, Fan WM, Liu GY, Shi YR and Miao LC. 2006. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of Early Mesozoic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang and its tectonic implications. *Science in China (Series D)*, 49(10): 1032–1042
- Peng TP, Wang YJ, Zhao GC, Fan WM, Peng BX. 2008. Arc-like volcanic rocks from the southern Lancangjiang zone, SW China: Geochronological and geochemical constraints on their petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 102(1–2): 358–373
- Pettke T and Diamond LW. 1996. Rb-Sr dating of sphalerite based on fluid inclusion-host mineral isochrones: A clarification of why it works. *Economic Geology*, 91: 951–956
- Shen SY, Feng QL, Liu BP and Mo XX. 2002. Study on ocean ridge, ocean island volcanic rocks of Changnian-Menglian belt. *Geological Science and Technology Information*, 21(3): 13–17 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313–345
- Wang LS and Zhang L. 2002. Studies on determination of Rb-Sr isotope of liquid inclusions in chalcopyrite. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 101–104 (in Chinese with English abstract)
- Wang XF, Metcalf I, Jian P, He LQ and Wang CS. 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan suture zone, China: Tectonostratigraphy, age and evolution. *J. Asian Earth Sci.*, 18: 675–690
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract)
- Xiao L, Xu YG, Mei HJ and Yu RP. 2003. Petrogenesis of the basalts of Woniusi Formation at Baoshan area, Yunnan: Is it of mantle plume origin? *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 22(1): 20–28 (in Chinese with English abstract)
- Xue CD, Han RS, Yang HL, Yang ZM, Tian SH, Liu YQ and Hao BW. 2008. Isotope geochemical evidence for ore-forming fluid resources in Hetaoping Pb-Zn deposit, Baoshan, northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 27(2): 243–252 (in Chinese with English abstract)
- Xue CJ, Zeng R, Liu SW, Chi GX, Qing HR, Chen YC, Yang JM and Wang DH. 2007. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, China: A review. *Ore Geology Reviews*, 31: 337–359
- Yang JH and Zhou XH. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits. *Geology*, 29(8): 711–714
- Yang QJ, Xu YG, Huang XL and Luo ZY. 2006. Geochronology and geochemistry of granites in the Gaoligong tectonic belt, western Yunnan: Tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 817–834 (in Chinese with English abstract)
- Zeng PS, Mo XX and Yu XH. 2000. Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of the alkaline-rich porphyries in western Yunnan and its compression strike-slip setting. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 21(3): 231–241 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Xu WC, Guo JQ, Zong KQ, Cai HM and Yuan HL. 2007. Zircon U-Pb and Hf isotopic composition of deformed granite in the southern margin of the Gangdise belt, Tibet: Evidence for Early Jurassic subduction of Neo-Tethyan oceanic slab. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1347–1353 (in Chinese with English abstract).
- Zhang RB, Liu JM, Ye J and Chen FK. 2008. Chalcopyrite Rb-Sr isochron age dating and its ore-forming significance in Shouwangfen copper deposit, Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1353–1358 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Xie YW and Chen ZL. 1990. Rb-Sr isochron age for tin-bearing granites in the Sanjiang region. *Acta Petrologica Sinica*, (1): 75–81 (in Chinese with English abstract)
- Zhong DL, Ding L and Liu FQ. 2001. The poly-layered architecture of lithosphere in the orogen and its constraint on Cenozoic magmatism: A case study of Sanjiang and its adjacent area. *Science in China (Series D)*, 30: 1–8 (in Chinese)
- Zhu YY, Han RS, Xue CD, Lu SL, Zou HJ and Yuan ZH. 2006. Geological character of the Hetaoping lead-zinc deposit of Baoshan, Yunnan Province. *Mineral Resources and Geology*, 20(1): 32–35 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 苏文超, 战新志. 2005. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征. *岩石学报*, 21(1): 113–124
- 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. *岩石学报*, 22(2): 439–448
- 陈永清, 卢映祥, 夏庆霖, 蒋成兴, 刘红光, 吕志成. 2005. 云南保山核桃坪铅锌矿床地球化学特征与其成矿模式与找矿模型. *中国地质*, 32(1): 90–99
- 董方浏, 侯增谦, 高永丰, 曾普胜, 蒋成兴. 2006. 滇西腾冲新生代花岗岩成因类型与构造意义. *岩石学报*, 22(4): 927–937
- 董方浏, 莫宣学, 喻学惠, 侯增谦, 王勇. 2007. 云南永平卓潘新生代碱性杂岩体的元素地球化学和 Nd-Sr-Pb 同位素特征及地质意义. *岩石学报*, 23(5): 986–994
- 董文伟. 2007. 保山镇康地块成矿条件及典型矿床成矿模式. *云南地质*, 26(1): 56–61
- 范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 彭头平. 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展. *地学前缘*, 10(3): 159–179
- 范蔚茗, 彭头平, 王岳军. 2009. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录. *地学前缘*, 16(6): 291–302
- 符德贵, 崔子良, 官德任. 2004. 保山金厂河铜多金属隐伏矿综合找矿. *云南地质*, 23(2): 188–198
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 王安建, 潘桂荣, 曲晓明, 聂凤军. 2006. 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. *中国地质*, 33(2): 340–351
- 胡瑞忠, 毛景文, 毕献武, 彭建堂, 宋谢炎, 钟宏, 陶琰, 谢桂青. 2008. 浅谈大陆动力学与成矿关系研究的若干发展趋势. *地球化学*, 37(4): 344–352
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发. *矿床地质*, 18(4): 300–307
- 李红阳, 高振敏, 杨竹森, 罗泰义, 饶文波, 陶琰, 高永丰. 2001. 滇西上芒岗金矿床地质地球化学特征. *矿物学报*, 21(4): 639–646
- 李华芹, 王登红, 梅玉萍, 梁婷, 陈振宇, 郭春雨, 应立娟. 2008. 广西大厂拉么铜锌多金属矿床成岩成矿作用年代学研究. *地质学报*, 82(7): 912–920
- 李朋武, 高锐, 崔军文, 管焯. 2005. 西藏和云南三江地区特提斯洋盆演化历史的古地磁分析. *地球学报*, 26(5): 387–404
- 李志国, 曾普胜, 符得贵, 喻学惠. 2006. 云南核桃坪矿集区矿床特征

- 及成因初探. 东华理工学院学报, 29(3): 211-215
- 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 赵志丹, 江新胜. 2006. 初论西藏过铝花岗岩. 地质通报, 25(7): 812-821
- 刘玉平, 李朝阳, 谷团. 2000. 都龙锡锌多金属矿床成矿物质来源的同位素示踪. 地质地球化学, 28(4): 75-82
- 龙汉生, 罗泰义, 黄智龙, 周明忠, 杨勇, 钱志宽. 2009. 云南澜沧老厂大型银多金属矿床碳、氧同位素组成及其意义. 矿床地质, 28(5): 687-695
- 马丽芳. 2002. 中国地质图集. 北京: 地质出版社
- 毛景文, 张士鲁, Rossi P. 1987. 云南腾冲地区含锡花岗岩及其与成矿关系. 岩石学报, 3(4): 32-43
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张作衡, 王义天, 王志良, 赵财胜, 杨富全, 李厚民. 2005. 大陆动力学演化与成矿研究: 历史与现状兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用. 矿床地质, 24(3): 193-205
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1-267
- 莫宣学, 潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束. 地学前缘, 13(6): 43-51
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 刘敦一, 石玉若, 苗来成. 2006. 澜沧江南段早中生代酸性火成岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及构造意义. 中国科学(D辑), 36(2): 123-132
- 沈上越, 冯庆来, 刘本培, 莫宣学. 2002. 昌宁-孟连带洋脊、洋岛型火山岩研究. 地质科技情报, 21(3): 13-17
- 王林森, 张利. 2002. 黄铜矿中液态包裹体 Rb-Sr 同位素测定方法研究. 地质科技情报, 21(4): 101-104
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185-220
- 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 于荣萍. 2003. 云南保山卧牛寺组玄武岩成因: 地幔柱活动的产物? 岩石矿物学杂志, 22(1): 20-28
- 薛传东, 韩润生, 杨海林, 杨志明, 田世洪, 刘勇强, 郝百武. 2008. 滇西北保山核桃坪铅锌矿床成矿流体来源的同位素地球化学证据. 矿床地质, 27(2): 243-252
- 杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 罗震宇. 2006. 高黎贡构造带花岗岩的年代学和地球化学及其构造意义. 岩石学报, 22(4): 817-834
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠. 2000. 滇西富碱斑岩带的 Nd、Sr、Pb 同位素特征及其挤压走滑背景. 岩石矿物学杂志, 21(3): 231-241
- 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 宗克清, 蔡宏明, 袁洪林. 2007. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据. 岩石学报, 23(6): 1347-1353
- 张瑞斌, 刘建明, 叶杰, 陈福坤. 2008. 河北寿王坟铜矿黄铜矿铷锶同位素年龄测定及其成矿意义. 岩石学报, 24(6): 1353-1358
- 张玉泉, 谢应雯, 成忠礼. 1990. 三江地区含锡花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄. 岩石学报, (1): 75-81
- 钟大赉, 丁林, 刘凤清. 2001. 造山带岩石层多向层架构造及其对新生代岩浆活动约束: 以三江及邻区为例. 中国科学(D辑), 30: 1-8
- 朱余银, 韩润生, 薛传东, 陆森林, 邹海俊, 袁志红. 2006. 云南保山核桃坪铅锌矿床地质特征. 矿产与地质, 20(1): 32-35