

# 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学： 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件\*

刘玉平<sup>1</sup> 李正祥<sup>2,3</sup> 李惠民<sup>4</sup> 郭利果<sup>5,6</sup> 徐伟<sup>1,6</sup> 叶霖<sup>1</sup> 李朝阳<sup>1,5</sup> 皮道会<sup>1,6</sup>  
LIU YuPing<sup>1</sup>, LI ZhengXiang<sup>2</sup>, LI HuiMin<sup>3</sup>, GUO LiGuo<sup>1,4,5</sup>, XU Wei<sup>1,4</sup>, YE Lin<sup>1</sup>, LI ChaoYang<sup>1,5</sup> and PI DaoHui<sup>1,4</sup>

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. 西澳大学大地构造专门研究中心, Crawley 西澳大利亚州 6009

3. 科廷科技大学应用地质系, Bentley 西澳大利亚州 6102

4. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

5. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 430026

6. 中国科学院研究生院, 北京 100039

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

2. Tectonics Special Research Center (TSRC), The University of Western Australia, Crawley WA 6009, Australia

3. Department of Applied Geology, Curtin University of Sciences and Technology, Bentley WA 6102, Australia

4. Tianjin Centre of Geological Surveys, Chinese Geological Survey, Tianjin 300170, China

5. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 430026, China

6. The Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

2006-03-01 收稿, 2007-05-10 改回。

Liu YP, Li ZX, Li HM, Guo LG, Xu W, Ye L, Li CY and Pi DH. 2007. U-Pb geochronology of cassiterite and zircon from the Dulong Sn-Zn deposit: Evidence for Cretaceous large-scale granitic magmatism and mineralization events in southeastern Yunnan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5):967-976

**Abstract** The Dulong Sn-Zn deposit is one of the largest cassiterite-sulfide deposits in China. There are different opinions regarding the genesis of this deposit, partly due to the lack of reliable geochronological data. We report here results of the first attempt to determine the magmatic and mineralization ages of this deposit and related late-Yanshanian granites through U-Pb dating of cassiterite and zircon. Four cassiterite samples from the Manjiazhai section yields a means  $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$  age of  $79.8 \pm 3.2\text{Ma}$  (MSWD = 3.16), and a  $^{238}\text{U} / ^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$  isochronal age of  $82.0 \pm 9.6\text{Ma}$  (MSWD = 4.81) using the TIMS U-Pb method. Zircon from a concealed granite at the Manjiazhai section yielded a means  $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$  age of  $92.9 \pm 1.9\text{Ma}$  (N = 10, MSWD = 0.71), and zircon derived from a granitic-porphry outcrop at the Tongjie section yielded a means  $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$  age of  $86.9 \pm 1.4\text{Ma}$  (N = 9, MSWD = 3.70), both obtained using the SHRIMP U-Pb method. These ages suggest that the tin (copper) mineralization in the Dulong Sn-Zn deposit was mainly related to the late Cretaceous magmatic hydrothermal events. The geochronological data of the Gejiu (Sn) and the Bainiuchang (Ag) super-large deposits and related Yanshanian granites indicate that there was a large-scale granitic magmatism and mineralization event during the Cretaceous in southeastern Yunnan, which might have been related to the lithospheric extension of the South China Block in late Mesozoic.

**Key words** Cassiterite, Zircon, U-Pb dating, Cretaceous, Magmatism and mineralization event, Dulong Sn-Zn deposit, Southeastern Yunnan

**摘要** 都龙锡锌矿床是我国最大的锡石硫化物矿床之一。由于缺少可靠的年代学数据,对该矿床的成因尚存在较大争议。本文报道了利用锡石和锆石 U-Pb 法,首次获得的都龙锡锌矿床及相关的燕山晚期老君山花岗岩的年龄。其中,锡石 TIMS 法  $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $79.8 \pm 3.2\text{Ma}$  (MSWD = 3.16),  $^{238}\text{U} / ^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$  等时线年龄为  $82.0 \pm 9.6\text{Ma}$

\* 国家自然科学基金(批准号:4302026)、中国科学院2003年度留学基金(编号:2003023)和TSRC研究基金资助。

第一作者简介:刘玉平,男,1971年生,博士,副研究员,矿床学、地球化学专业, E-mail: yuping71liu@sohu.com

(MSWD=4.81); 隐伏花岗岩的锆石 SHRIMP 法  $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $92.9 \pm 1.9\text{Ma}$  ( $N=10$ , MSWD=0.71), 花岗斑岩的锆石 SHRIMP 法  $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $86.9 \pm 1.4\text{Ma}$  ( $N=9$ , MSWD=3.70), 表明锡(铜)矿化主要与晚白垩世岩浆热液活动有关。结合个旧、白牛厂两个超大型矿床和相关花岗岩体的年代学资料, 指示滇东南地区于白垩纪存在以锡矿化为特色的大规模花岗岩成岩-成矿事件, 可能与晚中生代以来华南地块岩石圈伸展有关。

**关键词** 锡石; 锆石; U-Pb 年龄; 白垩纪; 成岩-成矿事件; 都龙锡-锌矿床; 滇东南

**中图法分类号** P611.1; P597.3

## 1 引言

滇东南位于南岭燕山期花岗岩锡多金属成矿带的西南端, 该区由西向东依次产出了个旧锡多金属矿床、白牛厂银多金属矿床和都龙锡锌多金属矿床等三个与燕山晚期花岗岩关系密切的超大型矿床(涂光炽, 2002)。其中, 地处中越边境的云南省马关县都龙锡锌多金属矿床, 锡金属储量约 33 万吨、锌金属储量约 303 万吨, 并伴生铅、铜、铁、银、镉、铟等元素, 是继个旧、大厂之后探明的我国最大的锡石硫化物矿床之一, 被誉为“新疆明珠”(《云南省矿床发现史》编委会, 1996)。尽管前人开展了一定程度的研究, 但由于长期缺少精确可靠的年代学证据, 其成因仍然存在较大争议。

Gulson 和 Jones (1992) 指出, 锡石属于金红石族矿物, 当其具有较高的 U 含量时, 可以作为 U-Pb 和 Pb-Pb 法测年对象, 并报道了南非 Bushveld 杂岩 Zaaipiaats 锡钨稀土矿床和印尼 Belituna Island 锡矿床的锡石年代学研究结果, 开辟了直接利用矿石矿物测定成矿年代的一种新途径。McNaughton 和 Pollard (1993) 讨论了 Zaaipiaats 锡钨稀土矿床测年结果的合理性, 但没有对锡石 U-Pb 和 Pb-Pb 法测年本身提出质疑。此后, 该方法在国际上应用较广 (Sparrenberger *et al.*, 1999; Clayton *et al.*, 1999; 参考文献中有关的网页), 但国内鲜见报道。

本研究利用锡石和锆石 U-Pb 法, 首次研究了都龙锡锌矿床及相关的燕山晚期老君山花岗岩的成岩-成矿时代, 并获得了理想的结果, 揭示锡矿化主要与晚白垩世岩浆热液活动有关。结合区域地质地球化学资料, 提出滇东南地区都龙、个旧和白牛厂等三个与燕山晚期花岗岩有关的超大型矿床(特别是锡矿化), 可能是白垩纪华南岩石圈伸展背景下大规模花岗岩成岩-成矿事件的产物。

## 2 矿床地质特征

都龙锡锌多金属矿床位于云南省马关县都龙镇境内(图 1)。大地构造处于华南褶皱系西南端“越北古陆”与扬子地块、印支地块、哀牢山褶皱系等几大构造单元接合部位, 产出于老君山变质杂岩之西南翼(张世涛等, 1998; 李东旭等, 2000)。区内主要出露了低绿片岩相变质的新元古界(下寒武统)新寨岩组(相当于 20 万区域地质报告的中寒武统田蓬组第二段至第四段)和中寒武统田蓬组、龙哈组,

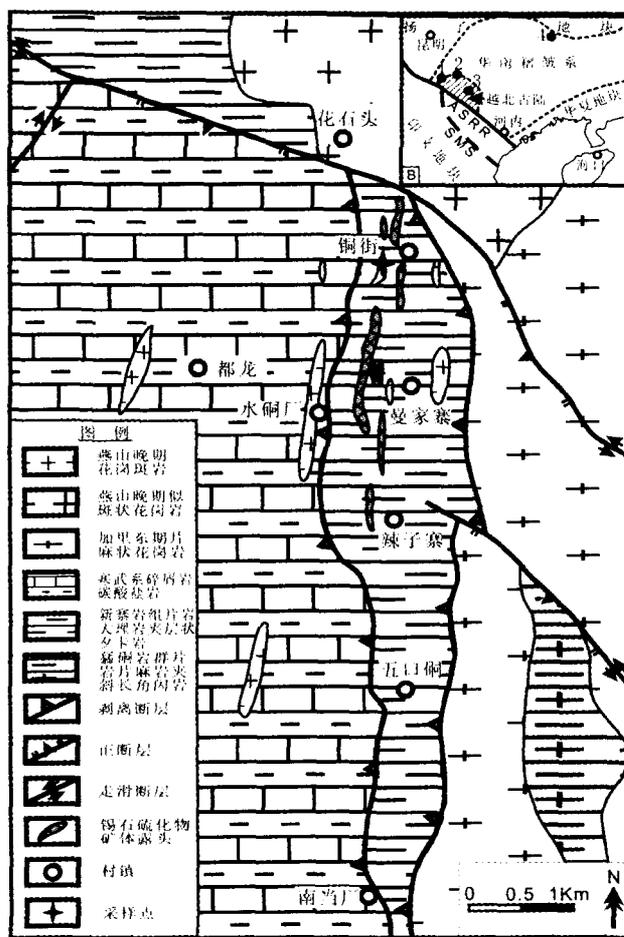


图 1 都龙锡锌矿床地质简图

(图 1-B: 1-个旧, 2-白牛厂, 3-都龙, 4-大厂, ASSR-哀牢山-红河剪切带, SMS-Song Ma 缝合带)

Fig. 1 Geological Sketch of the Dulong Sn-Zn deposit

其次为燕山晚期老君山复式花岗岩, 以及少量韧性变形、绿片岩相-角闪岩相变质的元古界猛洞岩群和加里东期南温河花岗岩(云南省区调队, 1999)。燕山晚期 S 型老君山复式花岗岩, 依据岩相学特征和同位素年龄可以划分为三个期次, 第一期为粗粒含斑二云母二长花岗岩, K-Ar 年龄为 118Ma ~ 101Ma; 第二期为中细粒含斑二云母二长花岗岩, K-Ar 年龄为 95Ma ~ 89Ma, Rb-Sr 等时线年龄为 93.4Ma; 第三期为花岗斑岩, K-Ar 年龄为 76Ma ~ 101Ma(安保华, 1990; 云南省地矿局, 1990)。该岩体的主体出露于矿区北侧, 钻孔揭露其第二期向南延伸呈隐伏花岗岩脊发育于主矿带之下(建刚

等,1993),矿区地表还出露了多条花岗斑岩脉。在老君山花岗岩体内部及其与沉积-变质围岩接触带,产出了以花石头为代表的多个云英岩型-石英脉型钨-锡-铜-钼中-小型矿床或矿点。

都龙矿区主要的控矿构造为铜街-五口洞、烟山-南当厂等两条南北向的剥离断层。最为重要的锡石硫化物矿体主要呈似层状、透镜状、囊状产出于上述两条南北向剥离断层之间,赋存于韧-脆性变形、绿片岩相变质的新寨岩组片岩、大理岩夹似层状夕卡岩中,在平面上呈南北串珠状延伸,在剖面上呈叠瓦状排列,与围岩产状基本一致,局部发生分支复合呈网脉状,在隐伏花岗岩脊和花岗斑岩脉附近,局部可见花岗斑岩脉和规模较小的脉状锡铜矿体穿截以锌矿化为主的似层状-透镜状矿体,并使锌矿化增强。随含矿层位向上,成矿元素大致具有锌+锡+铜→锌→锌+铅的变化趋势。矿石类型主要为夕卡岩型锡石硫化物矿石,其次为碳酸盐型硫化物矿石和萤石石英脉型锡石硫化物矿石。金属矿物主要为铁闪锌矿、磁黄铁矿、锡石、磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿和毒砂,脉石矿物主要为石英、绿泥石、角闪石(阳起石-透闪石系列为主)、透辉石、绿帘石、云母、斜长石等。矿石构造主要为纹层状-条带状构造、块状构造、片状-片麻状构造、斑点状-斑杂状构造、浸染状构造和脉状-网脉状构造。矿石中广泛发育变晶结构、交代结构和固溶体出溶结构,在一些夕卡岩型矿石中还可以见到变余鲕状黄铁矿(周建平等,1998;刘玉平等,2006a)。夕卡岩型锡锌矿石的矿相学研究显示,晚期的锡铜矿化呈细脉状穿截早期的锌矿化,脉体主要由半自形锡石和它形-半自形黄铜矿组成,并可见细粒黄铜矿沿闪锌矿解理和双晶面穿插交代形成“黄铜矿疾病”结构(Barton *et al.*, 1987)(图2)。根据矿石组构特征,可初步确定主要金属矿物的形成顺序为鲕状黄铁矿→铁闪锌矿→锡石+黄铜矿。野外观测和室内岩矿鉴定表明,锌矿化的主体可能早于锡(铜)矿化。

### 3 样品采集和分析方法

从采自曼家寨矿段 63 号脉群的锡石硫化物型矿石,采用常规重选法分选出重砂矿物,并在双目镜下挑选至锡石纯度 >99.5%。从曼家寨岩芯钻孔中采集隐伏花岗岩样品 ZK83049,从铜街露采场采集花岗斑岩样品 DN4037,采用常规重选法分别选出重砂矿物,在双目镜下挑选至锆石纯度 >99.5%。

锡石 U-Pb 同位素年代学在中国地质调查局天津地质调查中心分析测试室完成,所用仪器为 VG354 型热电离质谱仪。锡石 U-Pb 法前处理流程参考了 Gulson 和 Jones(1992)和 Jiang 等(2004)的方法,然后通过试验修正,采用以下流程:称取大约 5~10mg 200 目试样,置于 10mL 或 30mL 聚四氟乙烯烧杯中,用 7M HCl 约 2mL 清洗大约半小时;加入约 7M HCl 和 7M HNO<sub>3</sub> 各 1mL 溶解清洗大约半小时;用去离子

水清洗 3 遍,用无水乙醇清洗两遍,烘干。称量已清洗样品不超过 10mg,放入聚四氟乙烯容器,加入 2mL 12M HCl,加盖置于钢套中,放入烘箱,~200℃ 恒温保持三日以上,直至样品完全溶解。取出后将样品溶液分为 A、B 两份,其中 A 大约 1/3 左右,B 大约 2/3 左右,在 A 溶液中加入 <sup>208</sup>Pb-<sup>235</sup>U 混合稀释剂,然后将溶液 A、B 放在电热板上在 140℃ 蒸干,加 1:1 HCl 赶尽其它酸根离子,转为混合酸(2M HCl 和 1M HBr 以 2:1 混合)介质待用。将已转换成混合酸介质的样液,倒入装有 AG1-X8 树脂的阴离子交换柱中,待溶液流干后,用 0.1M 氢溴酸淋洗液 5~8mL 淋洗试样中的杂质离子两遍,再用 5mL 0.5M 的盐酸将树脂转型;最后分别用 5mL 6M 盐酸和 5mL 7M HNO<sub>3</sub> 将 Pb 和 U 解吸,弃去开始几滴流出液,用 10mL 聚四氟乙烯烧杯收集 3~4mL 解吸液,加入 2 滴 1M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>,待样品溶液蒸干后,用硅胶-磷酸溶液将不含和含有稀释剂的两份样品分别加在两个单铯带灯丝上,在 VG354 型热电离质谱仪上用高灵敏度 Daly 检测器进行 U、Pb 同位素测定,所有 U、Pb 同位素数据均对质量歧视效应进行校正。实验室全流程 Pb 空白在 0.80ng 以内,U 空白为 0.55ng 以内,数据处理使用 PBDAT 和 ISOPLOT 软件(Ludwig, 1994)。

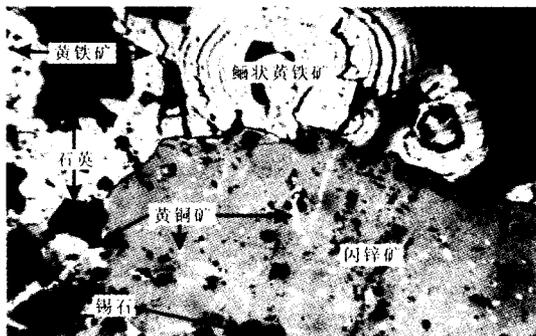


图2 夕卡岩型锡锌矿石显微照片(单偏光,100倍)

Fig.2 Microphoto of the skarn type Sn-Zn ore (plane-polarized light, ×100)

锆石的制靶、光学显微镜照相在中国地质科学院北京离子探针中心完成,阴极发光(CL)图像分析在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室完成,同位素测定在中国地质科学院北京离子探针中心和澳大利亚 Curtin 大学 John de Laeter 质谱中心 SHRIMP 实验室完成。待测锆石和标准锆石 TEM(年龄为 417Ma)在玻璃板上用环氧树脂固定,抛光到暴露出锆石的中心面,用反射光和透射光照相;然后镀金,进行阴极发光(CL)照相,以检查锆石的内部结构。根据锆石光学图像和 CL 图像,避开裂纹和包裹体,确定合适的测点位置。同位素分析所用仪器为 SHRIMP-II,详细的原理和实验流程参阅参考文献(Compston *et al.*, 1984; 宋彪等, 2002)。测试时所用的标准锆石为 CZ3(564Ma, U = 551 μg/g)和 TEM。前者用于标定 U、Th 和 Pb 的含量,后者用于校正元素间分馏和年龄。束斑直径约为 30μm,在 SHRIMP

分析过程中,对同一测点均连续进行5次扫描分析,并以这5次分析的加权平均值作为该测点的分析值。数据处理采用实测<sup>204</sup>Pb校正锆石中的普通铅,年龄计算采用 Ludwig 编写的 ISOPLOT 2.49 和 SQUID 1.02 (Ludwig, 2001a, 2001b), 单个测点的分析误差为 1σ。由于样品比较年轻,所以采用<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄(Griffin *et al.*, 2004),其加权平均值为 95% 置信度。

#### 4 分析结果

都龙锡锌矿床锡石和锆石的 U-Pb 年代学数据分别见表 1、表 2。

##### 4.1 锡石 TIMS 法 U-Pb 年龄

对采自曼家寨矿段 63 号脉群的锡石硫化物型矿石,进行了 4 个锡石(MJZ)分样的 TIMS 法 U-Pb 年龄测定。所测锡石主要为深褐色半透明它形-半自形浑圆状,U 含量为 8.2 ~ 11 μg/g,与 Zaaiplaats 锡钨稀土矿床的锡石接近(7.3 ~ 12.5 μg/g); Pb 含量仅为 0.19 ~ 0.48 μg/g,比后者(2.50 ~ 4.41 μg/g)约低一个数量级(Gulson *et al.*, 1992)。普通铅的含量变化范围为 0.09 ~ 2.50 ng,其中,3 号点具有最低的普通铅含量,约占总铅含量的 22.6%,<sup>206</sup>Pb / <sup>238</sup>U、<sup>207</sup>Pb / <sup>235</sup>U 和 <sup>207</sup>Pb / <sup>206</sup>Pb 表面年龄基本一致;其余 3 个测点的普通铅含量较高,约占总铅含量的 44.4 ~ 53.7%,三组表面年龄谐和性较差,反映可能混入了少量硫化物之类的高普通铅矿物。4 个测点<sup>206</sup>Pb / <sup>238</sup>U 表面年龄的变化范围为 76.7 ~ 81.5 Ma,加权平均值为 79.8 ± 3.2 Ma (MSWD = 3.16); <sup>238</sup>U/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 等时线年龄为 82.0 ± 9.6 Ma (MSWD = 4.81),与<sup>206</sup>Pb / <sup>238</sup>U 表面年龄加权平均值在误差范围内一致。因此,锡石 TIMS 法 U-Pb 定年结果,表明锡(铜)矿化的年龄约为 80 Ma(图 3)。

##### 4.2 隐伏花岗岩锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年龄

对采自曼家寨矿段矿体之下的隐伏花岗岩(ZK83049)中 12 颗锆石的 15 个点进行了 SHRIMP 法 U-Pb 年龄测定。测点 U、Th 含量变化范围较大,分别为 183 × 10<sup>-6</sup> ~ 4256 × 10<sup>-6</sup>和 91 × 10<sup>-6</sup> ~ 1626 × 10<sup>-6</sup>。测点 E-1 具有明亮而环带不发育的 CL 图像特征(图 4),可判断为继承锆石,其<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U、<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄分别为 753 ± 23 Ma 和 881 ± 36 Ma,表明源区存在新元古代岩浆岩组分(刘玉平等, 2006b); E-2、E-3、E-5、E-7 等 4 个点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄变化范围为 99.9 ~ 113.4 Ma,CL 图像显示出比较典型的岩浆震荡环带,表明可能存在 ~105 Ma 的较早一期岩浆活动;其余 10 个点<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄变化范围为 87.7 ~ 96.7 Ma, Th/U = 0.11 ~ 2.43、平均值为 0.72,且多数大于或接近 0.4,符合岩浆成因

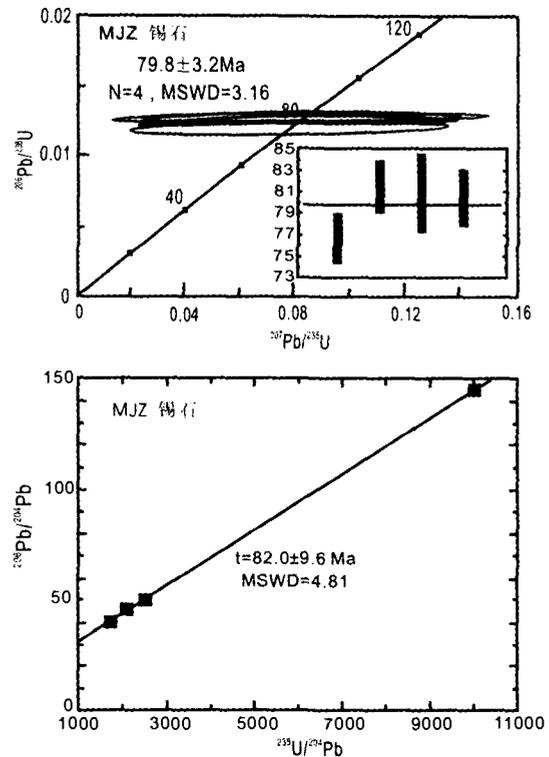


图 3 曼家寨矿段锡石 U-Pb 年龄图解

Fig. 3 The U-Pb dating figures of cassiterite from the Manjiazhai section

锆石的特征(Hoskin *et al.*, 2000),这与锆石在 CL 图像显示出典型的岩浆震荡环带的特征是一致的。这 10 个点均投影于谐和线上或附近,<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 表面年龄加权平均值为 92.9 ± 1.9 Ma, MSWD = 0.71(图 5),代表了隐伏花岗岩的岩浆结晶年龄,该结果与前人测定的老君山花岗岩第二期岩相的全岩 Rb-Sr 等时线年龄 93.4 Ma 一致(云南省地矿局, 1990; 忻建刚等, 1993)。

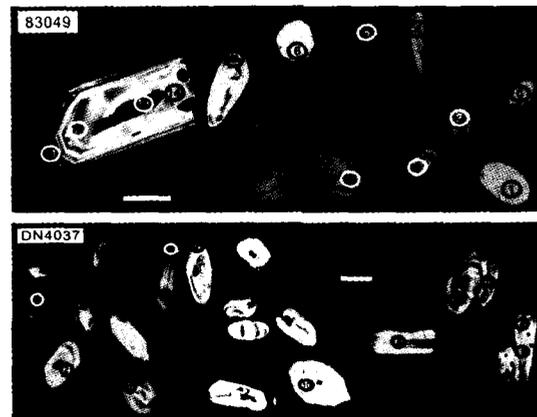


图 4 锆石测点 CL 图像

Fig. 4 CL images of selected zircons from the late Yanshanian granites

表 1 都龙锡锌矿床曼家寨矿段锡石 TIMS 法 U-Pb 定年结果

Table 1 The TIMS U-Pb dating of cassiterite from the Manjiashai section, the Dulong Sn-Zn deposit

锡石特征	测点	质量 (mg)	U ( $\times 10^{-6}$ )	Pb ( $\times 10^{-6}$ )	Pb <sub>c</sub> (ng)	同位素原子比率*				表面年龄 (Ma)			
						<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb
	1	9.70	10	0.48	2.50	40	-	0.01197 (37)	0.0792 (477)	0.0480 (276)	76.7	77.4	98.9
深褐色	2	9.36	8.7	0.36	1.70	45	-	0.01272 (37)	0.0711 (465)	0.0405 (255)	81.5	69.7	-317
半透明	3	2.10	11	0.19	0.09	145	0.04583	0.01263 (57)	0.0832 (493)	0.0478 (267)	80.9	81.1	88.5
浑圆状	4	8.0	8.2	0.31	1.10	50	0.08908	0.01256 (41)	0.0893 (515)	0.0516 (293)	80.4	86.9	267
1-4 号点 <sup>206</sup> Pb / <sup>238</sup> U 表面年龄加权平均值: 79.8 ± 3.2 Ma						1-4 号点 U-Pb 等时线年龄值: 82.0 ± 9.6 Ma							

\* <sup>206</sup>Pb / <sup>204</sup>Pb 已对实验空白 (Pb=0.80 ng, U=0.55 ng) 及稀释剂作了校正。其它比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素。括号内的数字为 2σ 绝对误差, 例如: 0.01197(37) 表示 0.01197 ± 0.00037(2σ)。

表 2 都龙锡锌矿床花岗岩锆石 SHRIMP 法 U-Pb 定年结果

Table 2 The SHRIMP U-Pb dating of zircon from the Dulong Sn-Zn deposit

样号	点号	<sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> (%)	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	<sup>232</sup> Th / <sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb* ( $\times 10^{-6}$ )	<sup>207</sup> Pb* / <sup>206</sup> Pb*	±%	<sup>207</sup> Pb* / <sup>235</sup> U	±%	<sup>206</sup> Pb* / <sup>238</sup> U	±%	<sup>206</sup> Pb / <sup>238</sup> U 年龄/Ma	<sup>207</sup> Pb / <sup>206</sup> Pb 年龄/Ma
DN4037	B-1	0.00	1931	32	0.02	50.5	0.0524	1.6	0.22	1.6	0.0305	0.4	193.4 ± 0.7	301 ± 35
	B-2	0.29	646	18	0.03	9.1	0.0463	4.0	0.10	4.1	0.0163	0.8	104.1 ± 0.9	12 ± 97
	B-3	0.64	543	637	1.21	6.4	0.0431	5.2	0.08	5.3	0.0137	1.0	87.8 ± 0.8	-161 ± 130
	B-4	0.14	986	67	0.07	35.9	0.0668	1.5	0.39	1.6	0.0423	0.6	266.8 ± 1.5	831 ± 31
	B-5	0.07	362	86	0.24	42.2	0.0671	1.4	1.25	1.6	0.1355	0.6	819.4 ± 5.0	842 ± 30
	B-6	0.69	321	251	0.81	3.8	0.0477	11.3	0.09	11.4	0.0138	1.4	88.1 ± 1.2	84 ± 268
	B-7	0.57	559	336	0.62	6.5	0.0441	5.6	0.08	5.7	0.0134	1.0	85.6 ± 0.8	-106 ± 139
	B-8	1.14	204	392	1.99	2.4	0.0432	11.9	0.08	12.0	0.0136	1.6	87.1 ± 1.4	-154 ± 295
	B-9	-1.10	330	682	2.14	3.9	0.0613	4.2	0.12	4.4	0.0139	1.2	89.0 ± 1.1	649 ± 91
	B-10	0.26	291	44	0.16	19.6	0.0732	2.8	0.79	3.0	0.0782	0.9	485.6 ± 4.4	1020 ± 57
	B-11	1.29	676	753	1.15	7.9	0.0500	15.1	0.09	15.1	0.0134	1.1	85.9 ± 1.0	195 ± 351
	B-12	0.93	662	309	0.48	7.3	0.0446	9.0	0.08	9.1	0.0128	1.0	81.9 ± 0.8	-77 ± 221
	B-13	0.00	609	289	0.49	6.9	0.0512	3.6	0.09	3.7	0.0132	0.9	84.7 ± 0.8	248 ± 83
	B-14	0.00	433	385	0.92	5.2	0.0536	4.1	0.10	4.2	0.0141	1.1	90.0 ± 1.0	356 ± 92
	B-15	1.23	240	504	2.17	2.8	0.0440	9.3	0.08	9.4	0.0134	1.4	85.6 ± 1.2	-112 ± 230
ZK83049	E-0	—	2111	218	0.11	26.5	0.0535	3.0	0.1082	4.4	0.01467	3.2	93.9 ± 2.9	351 ± 68
	E1	0.10	226	91	0.42	24.1	0.0684	1.7	1.169	3.7	0.1239	3.3	753 ± 23	881 ± 36
	E2	—	2066	378	0.19	27.6	0.0536	2.7	0.1155	4.2	0.01562	3.2	99.9 ± 3.1	355 ± 61
	E-3	—	4256	434	0.11	64.8	0.05026	1.5	0.1230	3.5	0.01774	3.1	113.4 ± 3.5	207 ± 34
	E-4	—	814	228	0.29	10.5	0.0530	4.5	0.1105	5.5	0.01512	3.2	96.7 ± 3.1	328 ± 100
	E-5	—	1927	1626	0.87	27.1	0.04975	2.0	0.1124	3.7	0.01638	3.2	104.7 ± 3.3	183 ± 46
	E-6	1.87	183	286	1.61	2.20	0.0549	16	0.104	16	0.01370	3.6	87.7 ± 3.2	410 ± 360
	E-7	—	1005	384	0.39	13.4	0.0572	5.7	0.1239	6.5	0.01570	3.2	100.4 ± 3.2	500 ± 130
	E-8	4.40	563	1323	2.43	7.12	0.075	18	0.145	18	0.01407	3.8	90.1 ± 3.4	1056 ± 360
	E-9	—	905	319	0.36	11.4	0.0541	4.7	0.1098	5.7	0.01471	3.2	94.2 ± 3.0	375 ± 110
	E-10	0.03	1218	284	0.24	15.1	0.0590	2.8	0.1172	4.2	0.01441	3.2	92.2 ± 2.9	567 ± 60
	E-11	0.24	721	382	0.55	9.23	0.0517	5.7	0.1061	6.6	0.01487	3.3	95.2 ± 3.1	273 ± 130
	E-12	1.26	335	471	1.45	4.22	0.0520	12	0.104	13	0.01450	3.4	92.8 ± 3.1	287 ± 280
	E-13	1.02	252	143	0.59	3.10	0.0506	8.9	0.0989	9.5	0.01416	3.5	90.7 ± 3.1	225 ± 200
E-14	—	1582	514	0.34	19.9	0.0516	2.0	0.1045	3.7	0.01469	3.2	94.0 ± 3.0	266 ± 45	

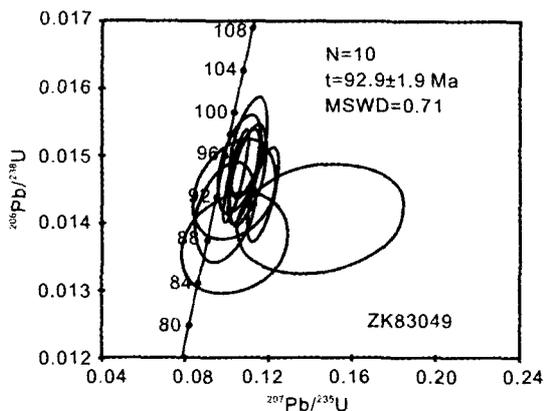


图5 ZK83049 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 zircon U-Pb concord figure of the samplpe ZK83049

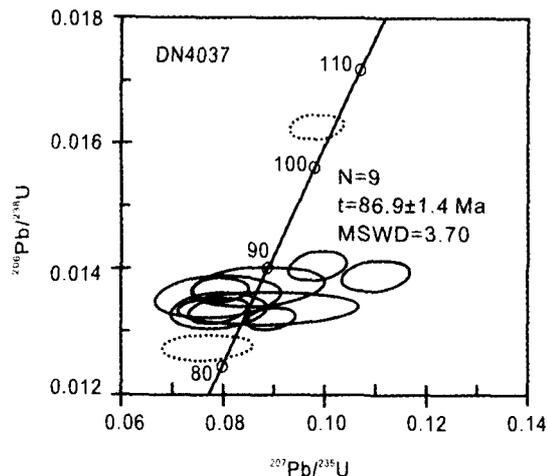


图6 DN4037 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 zircon U-Pb concord figure of the samplpe DN4037

#### 4.3 花岗斑岩锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年龄

对采自铜街矿段的花岗斑岩(DN4037)中9颗锆石的15个点进行了SHRIMP法U-Pb年龄测定。测点的U含量变化范围为 $204 \times 10^{-6} \sim 1931 \times 10^{-6}$ ,主要集中在 $204 \times 10^{-6} \sim 676 \times 10^{-6}$ ; Th含量较低,变化范围为 $18 \times 10^{-6} \sim 753 \times 10^{-6}$ ,主要集中在 $251 \times 10^{-6} \sim 753 \times 10^{-6}$ 。点B-1, B-2, B-4, B-5和B-10的Th/U比值较低,变化范围为0.02~0.24,结合CL图像判别应为继承锆石,其中, B-4、B-5和B-10的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $831 \pm 31\text{Ma}$ ,  $842 \pm 30\text{Ma}$ 和 $1020 \pm 57\text{Ma}$ ,指示了源区可能存在 $\sim 800\text{Ma}$ (刘玉平等, 2006b)和 $\sim 1100\text{Ma}$ 两期新元古代岩浆岩组分; 其余10个点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围为81.9~90.0Ma, Th/U=0.48~2.17, 平均值为1.20,符合岩浆成因锆石的特征(Hoskin *et al.*, 2000),并与锆石在CL图像显示出典型的岩浆震荡环带的特征吻合。这10个点均投影于谐和线上或附近,剔除偏离较大的B-12点,其余9个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $86.9 \pm 1.4\text{Ma}$ , MSWD=3.70(图6),代表了花岗斑岩的岩浆结晶年龄。

## 5 讨论

#### 5.1 锡石和锆石 U-Pb 年龄及都龙矿床成矿时代

矿床形成年代的精确测定,是矿床学研究的基本内容之一,对于理解矿床的形成过程、确定矿床的成因、探讨成矿事件与其它地质事件的耦合关系,以及成矿-找矿模型的确定均具有至关重要的意义。直接利用矿石矿物来测定成矿年代,是成矿年代学研究的重点和热点(陆松年等, 1999; 赵葵东等, 2004)。Gulson和Jones(1992)提出的锡石U-Pb/Pb-Pb年代学,为探讨成矿年代、特别是锡矿床的形成时代,提供了一种新的途径。

都龙锡矿床的成因尚存在较大争议(杜俊生等, 1983; 蔡德坤, 1983; 宋焕斌, 1989; 薛步高, 1990; 忻建刚等,

1993),原因之一是缺少精确的成矿年代学判据。本文获得的曼家寨矿段锡石TIMS法 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $79.8 \pm 3.2\text{Ma}$ ,  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}-^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 等时线年龄为 $82.0 \pm 9.6\text{Ma}$ ,表明锡石的结晶年龄(即锡-铜矿化)约为80Ma。与曼家寨矿段矿石/单矿物Rb-Sr等时线年龄,分别为 $79.1 \pm 9.1\text{Ma}$ 和 $76.7 \pm 3.3\text{Ma}$ (Liu *et al.*, 1999; 刘玉平等, 2000),在误差范围内一致,表明晚白垩世是该矿床(特别是锡-铜矿化)的主成矿期。值得注意的是,老君山花岗岩并非唯一的控矿因素,地层和构造也具有重要的意义,并已得到了找矿勘探实践的证实(付国辉, 1992; 晏建国, 1992)。另外,同处老君山地区的南秧田(钨锡)和新寨(锡锌)两个大型矿床获得的Rb-Sr矿石全岩等时线年龄,分别为 $214.3 \pm 15.6\text{Ma}$ 和 $243.2 \pm 34.9\text{Ma}$ (曾志刚, 1997),与印支期区域变形-变质事件年龄一致(Roger *et al.*, 2000; Maluski *et al.*, 2001; Yan *et al.*, 2006)。都龙矿床矿石Rb-Sr等时线的初始铯比值分别为 $0.7149 \pm 0.0064$ 和 $0.7162 \pm 0.0060$ (Liu *et al.*, 1999; 刘玉平等, 2000),均明显低于老君山花岗岩的初始铯比值0.732(云南省地矿局, 1990; 忻建刚等, 1993),而与南秧田和新寨两矿床的初始铯比值接近(曾志刚, 1997),反映铯来源的复杂性和区域的一致性。该矿床的S、Pb同位素组成,亦显示出多源的特征(刘玉平等, 2000)。上述这些证据表明,老君山地区具有比较复杂的成矿过程,即可能存在多期次成矿作用。根据野外观测和室内岩矿鉴定,我们认为都龙锡矿床的锡矿化之主体早于铜矿化。近期的研究多倾向于该矿床属于多成因成矿床(刘玉平, 1996; 周建平, 1998; 刘玉平等, 2000),认为锡矿化主要与燕山期花岗岩岩浆热液作用有关,而铜矿化可能与热水沉积作用和区域变质作用有关(涂光焱, 2002)。由于矿石的Rb-Sr同位素体系主要受其所经历的化学反应控制,因此,都龙矿床矿石Rb-Sr等时线年龄,应为花岗岩衍生的富Sn(Cu)成矿热液与含矿

地层发生水-岩反应,导致同位素体系混合-均一化的年龄,即该矿床基本定型于 77 ~ 82Ma。

矿区内的隐伏花岗岩(老君山花岗岩第二期)和花岗斑岩(老君山花岗岩第三期)的锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年龄分别为  $92.9 \pm 1.9$  Ma 和  $86.9 \pm 1.4$  Ma, 而由锡石 TIMS 法 U-Pb 年龄和矿石 Rb-Sr 等时线年龄指示锡(铜)矿化的主成矿年龄约为 77 ~ 82Ma, 表明长时间(至少 16Ma)的岩浆-热液活动可能是成矿元素超常富集的关键因素之一。锡铜成矿事件主要集中在岩浆-热液活动的中-晚阶段,即约 77 Ma ~ 82Ma, 持续时间约 5Ma, 尾随岩浆作用发生, 相对于整个岩浆-热液活动过程表现出短暂性和突发性的特点。老君山复式花岗岩长时间、脉动式的岩浆活动所提供的热能, 是含矿岩系中的成矿热液体系长期活动的关键控制因素。都龙锡锌多金属矿床的流体包裹体测温, 获得夕卡岩型锡锌矿床的成矿温度为 330℃ 左右(刘玉平, 1996)。而花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为  $86.9 \pm 1.4$  Ma, 大致代表了岩浆结晶的年龄(锆石 U-Pb 同位素体系的封闭温度约为 800℃), 但在此温度下不大可能发生大规模的矿质沉淀; 由花岗斑岩获得的全岩 K-Ar 年龄为 75.9Ma(安保华, 1990; 云南省地矿局, 1990), 则大致代表花岗斑岩降低到  $200 \pm 50$ ℃ (全岩 K-Ar 同位素体系的封闭温度)的年龄, 略晚于锡石 U-Pb 年龄和矿石 Rb-Sr 等时线年龄。根据锆石 U-Pb 年龄、全岩 K-Ar 年龄及相关的同位素封闭温度, 推算花岗斑岩的冷却速率约为 54.5℃/Ma, 指示了一种可能为地壳伸展的动力学背景下岩石发生快速冷却的过程。当花岗岩与围岩中的成矿热液体系都下降到 300℃ 左右而没有温差时, 岩浆-热液体系由于缺乏热驱动而开始衰竭并发生矿质沉淀。因此, 该矿床的成岩-成矿时差(以花岗斑岩为参照, 约为 5 ~ 10Ma), 反映了由于老君山花岗岩侵入而形成的热场, 温度逐步降低到 300℃ 左右这一动态过程的时限。

## 5.2 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件

滇东南地处南岭燕山期花岗岩锡钨成矿带的西南端, 是我国乃至世界重要的锡多金属成矿区之一。在个旧、薄竹山和老君山等三个燕山晚期复式花岗岩体附近, 分别产出了个旧、白牛厂和都龙等三个超大型矿床。上述三个矿床曾被普遍认为属于岩浆热液型矿床, 近年来随着一些沉积成因矿石组构的发现(周建平, 1998; 张欢等, 2004; 刘玉平等, 2006a), 不少研究者则将它们归属于多因复成矿床。

个旧锡矿床的矿体主要产于燕山晚期花岗岩与中三叠统个旧组碳酸盐岩夹基性火山岩的接触带附近。汪志芬(1983)对马拉格-松树脚黑云母花岗岩测得 Rb-Sr 全岩等时线年龄为  $87.8 \pm 3.1$  Ma, 老厂-卡房花岗岩等时线年龄为  $86.3 \pm 2.3$  Ma, 表明个旧花岗岩的主体形成于晚白垩世。秦德先等(2006)认为个旧锡矿经历了印支期海底基性火山-沉积成矿、海底喷流-沉积成矿和燕山晚期的花岗岩叠加改造成矿的作用, 并用 Ar-Ar、K-Ar 和 Pb-Pb 法研究了 3 个成矿

系列的成矿年龄。可信度较高的 Ar-Ar 法, 获得的坪年龄为  $82.27 \pm 2.07$  Ma ~  $191.81 \pm 2.26$  Ma, 主要集中在  $82.27 \pm 2.07$  Ma ~  $123.92 \pm 15.41$  Ma。其中, 锡矿化最强的花岗岩叠加改造成矿系列, 获得石英 Ar-Ar 法坪年龄和等时线年龄分别为  $82.27 \pm 2.07$  Ma 和  $85.22 \pm 2.38$  Ma, 与花岗岩形成年龄在误差范围内一致, 表明晚白垩世为个旧矿田花岗岩成岩-锡成矿最重要的时期。

白牛厂银多金属矿床的主要矿体产于中寒武统田蓬组碳酸盐岩、碎屑岩夹硅质岩中, 总体上距离燕山晚期薄竹山花岗岩较远, 与花岗岩有关的岩浆热液矿化范围和强度有限。该矿床保留了较多的沉积组构, 因而一般认为热水沉积成矿作用占主导地位(白金刚等, 1996; 陈学明等, 2000)。但在其东南部的阿尾矿段, 隐伏花岗岩附近发育了接触交代夕卡岩型 Sn-Cu-Mo 矿体(李晓波等, 2005)。新近完成的钻孔资料揭示, 在对门山矿段亦存在隐伏花岗岩及相关的锡石硫化物型锡铜多金属矿体(任治玠, 2006, 私人交流)。研究表明, 薄竹山花岗岩的 Rb-Sr 和 U-Pb 年龄主要集中在 115 ~ 79Ma, 亦属于中-晚白垩纪(张世涛等, 1997)。

区域地质资料(云南省地质局二大队, 1973, 1976a, 1976b)显示, 个旧、老君山、薄竹山等三个花岗岩体附近, 分别发育了蒙自、文山和马关等三个伴随有火山活动的中-新生代断陷盆地, 个旧花岗岩附近还发现了燕山晚期-喜山早期的基性-碱性岩, 与陆内碰撞造山的挤压环境并不匹配, 而暗示了当时岩石圈可能处于伸展状态。近期不少研究显示, 晚中生代-早新生代、特别白垩纪-第三纪, 华南存在岩石圈伸展-地壳减薄事件, 并且伴随大规模的岩浆活动, 形成了丰富多彩的矿产(Li, 2000; 华仁民等, 2003; 陈衍景等, 2004)。滇东南三个超大型矿床及相关花岗岩, 就可能是华南西段白垩纪中-晚期大规模花岗岩成岩-成矿作用的产物。

## 6 结论

(1) 都龙锡锌矿床属于多因复成矿床, 锌矿化的主体可能早于锡(铜)矿化。该矿床的锡石和锆石 U-Pb 年代学研究表明, 锡(铜)矿化年龄约为 80Ma, 主要与晚白垩世花岗岩岩浆-热液活动有关, 持续时限约 5Ma。阐明该矿床的成矿过程(特别是锌矿化年龄), 有待于进一步的年代学研究。

(2) 个旧、白牛厂、都龙等三个超大型矿床及相关花岗岩的年代学资料, 表明滇东南地区晚白垩世存在大规模的花岗岩成岩-成矿事件, 可能为晚中生代华南西段岩石圈伸展背景的产物。

致谢 北京大学地学院陈衍景教授和另外一位匿名审稿专家对本文的初稿提出了许多宝贵的意见和建议; 中国地质调查局天津地质调查中心分析测试室张慧英老师帮助完成了锡石 TIMS 法 U-Pb 测年; Curtin 大学 John de Laeter 质谱中心 SHRIMP 实验室 Mr. A. Frew, Dr. A. Kennedy, 西澳大学

TSRC Dr. B. De Waele, 中国地质科学院北京离子探针中心刘敦一先生、石玉若博士、陶华工程师、宋彪研究员、杨之清高级工程师等,对锆石 SHRIMP 法 U-Pb 测年给予了指导和帮助;中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室毛骞工程师和徐平研究员,对 CL 图像分析给予了指导和帮助。野外工作期间,得到了云南华联锌铜股份公司王金良和徐安华两位先生的大力支持和帮助。成文过程中,得到了云南省有色金属地质局任治玗、崔银亮、赵重顺等教授级高级工程师,中国科学院海洋研究所曾志刚研究员,中国科学院地球化学研究所张乾、战新志、胡瑞忠、毕献武等研究员的关心和指教,在此一并致以衷心的感谢。

## References

- An BH. 1990. Discussions on the Characteristics, genesis and exploration significance of the Laojunshan Granites. *Geology of ore deposits in Southwest China*, 4(1): 30 - 35 (in Chinese)
- Bai JG, Ci SC, Qin GJ. 1996. The sedimentary environments of the Bainiuchang Sedex Silver-polymetallic deposit, Yunnan. *Geological exploration for non-ferrous metals*, 5: 140 - 145 (in Chinese with English abstract)
- Barton BPJ, Bethke PM. 1987. Chalcopyrite disease in sphalerite: Pathology and epidemiology. *Am. Mineral*, 72: 451 - 467
- Cai DK. 1983. Forming and evolution of the Laojunshan Granites, and related Sn-W mineralization, Southeastern Yunnan. *Geology of Yunnan*, 2(2): 102 - 113 (in Chinese)
- Chen XM, Deng J, Bai JG, *et al.* 2000. Mineralization fluid system of Paleozoic sedimentary basin at the Bainiuchang, Yunnan Province. *Geosciences*, 14(2): 173 - 178 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Chen HR, Zaw K, *et al.* 2004. The geodynamic setting of large-scale metallogenesis in mainland China. Exemplified by skarn type gold deposits. *Earth Sciences Frontiers*, 11(1): 57 - 83 (in Chinese with English abstract)
- Clayton RE, Rojkovič I. 1999. Experimental Pb isotope studies of cassiterite from Hnilec granite, Slovakia. In: Stanley C J (Ed), *Mineral deposits: processes to processing*. Balkema, Rotterdam, 329 - 332
- Compston W, Williams IS, Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from Lunar Breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. *J Geophysical Res.*, 89: 525 - 534
- Du JS, *et al.* 1983. Meta-volcanic rocks and related strata-boundary Sn-W deposits in the Laojunshan area, Southeast Yunnan Province. *Metallurgical geology of Southwest China*, (3): 55 - 64 (in Chinese)
- Edition committee of "Founding history of deposits in Yunnan Province". 1996. *Founding history of deposits in Yunnan Province, China*. Beijing: Chinese Geology Press House (in Chinese)
- Fu GH. 1992. Geological characteristics and mineralization regularity of the Dulong Sn polymetallic deposit, Yunnan Province. *Geology of ore deposits in Southwest China*, 6(2): 25 - 37 (in Chinese)
- Griffin WL, Belousova EA, Shee SR, *et al.* 2004. Crustal evolution in the northern Yilarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Res.*, 131: 231 - 282
- Gulson BL, Jones MT. 1992. Cassiterite: Potential for direct dating of mineral deposits and a precise age for the Bushveld Complex granites. *Geology*, 20: 355 - 358
- Hua RM, Chen PR, Zhang WL, *et al.* 2003. Metallogenic systems related to Mesozoic and Cenozoic granitoids in South China. *Sciences in China (Series D)*, 33: 335 - 343
- Hoskin PWO, Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *J. Metamorph Geol.*, 18: 423 - 439
- Jiang SY, Yu JM, Lu JJ. 2004. Trace and rare-earth element geochemistry in tourmaline and cassiterite from the Yunlong tin deposit, Yunnan, China: implication for migmatitic - hydrothermal fluid evolution and ore genesis. *Chemical Geology*, 209: 193 - 213
- Li DX, Xu SS. 2000. Rotation-shearing of metamorphic core complex: Structure analysis of metamorphic core complex in Lajunshan, Southeastern Yunnan Province. *Geological Review*, 46(2): 113 - 119 (in Chinese with English Abstract)
- Li XB, Liu JS, Zhang HP, *et al.* 2005. The analysis to ore-controlling factors of Bainiuchang Ag-polymetal deposit of Mengzi county in Yunnan province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 20: 111 - 114 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *J. Asian Earth Sci.*, 18(3): 293 - 305
- Liu YP. 1996. A massive sulfide deposit reformed with metamorphism and superimposed with magmatic hydrothermal: The Dulong tin-zinc polymetallic deposit. Master Dissertation, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang (in Chinese with English abstract)
- Liu YP, Li CY, Gu T, Wang JL. 2000. Isotopic constrains on the source of ore-forming materials of Dulong Sn-Zn polymetallic deposit, Yunnan. *Geology-Geochemistry*, 28(4): 75 - 82 (in Chinese with English abstract)
- Liu YP, Li CY, Zeng ZG. 1999. The metallogenic epoch and ore-forming metal source of some large and superlarge deposits in the Laojunshan, Yunnan: Evidence from Rb-Sr isotopic studies. *Chinese Sci. Bulletin*, 1999, 44(S2): 30 - 32
- Liu YP, Li CY, Ye L, Liu SR. 2006a. The SEM studies on oolitic pyrite from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit and its significance to ore genesis. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 25 (Supp.): 165 - 167 (in Chinese with English abstract)
- Liu YP, Ye L, Li CY, *et al.* 2006b. Discovery of the Neoproterozoic magmatism in southeastern Yunnan: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and litho-geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 916 - 926 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Li HK, Li HM. 1999. Research on isotopic geochronology of mineralization events. *Earth Sciences Frontiers*, 6(2): 335 - 342 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig K R. 1994. Isoplot - A plotting and regression program for radiogenic-isotope data. USGS Open-file Report Version 275, 91 - 145
- Ludwig KR. 2001a. ISOPLOT/EX Version 2.49: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkley Geochronological Centre Special Publication, No. 1a
- Ludwig KR. 2001b. SQUID Version 1.02: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkley Geochronological Centre Special Publication, No. 2
- Maluski H, Lepvrier C, Jolivet L, *et al.* 2001. Ar-Ar and fission-track ages in the Song Chay Massif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in northern Vietnam. *J Asian Earth Sci* 19: 233 - 248
- McNaughton N J, Pollard P J. 1993. Cassiterite: Potential for direct dating of mineral deposits and a precise age for the Bushveld Complex granites (Comment). *Geology*, 21: 285 - 286
- Qin DX, Li YS, Tan SC, *et al.* 2006. Metallogenic ages of Gejiu tin ore deposit in Yunnan Province. *Chinese J of Geology*, 44: 122 - 132 (in Chinese with English abstract)
- Roger F, Leloup P H, Jolivet M, *et al.* 2000. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology. *Tectonophysics*, 321: 449 - 466
- Song B, Zhang YH, Wang YS, *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating *Geological Review*, 48(Suppl): 26

-30 (in Chinese with English abstract)

- Song HB. 1989. Ore-forming characteristics of the Dulong cassiterite-sulfide type ore deposit in Southeastern Yunnan. *Mineral Deposits*, 8 (4): 29-38 (in Chinese with English abstract)
- Sparrenberger I, Gaeta CC. 1999. Subprovincia Do Rio Paran (GO): Um exemplo de aplicao dos modos de datao U-Pb e Pb-Pb em cassiterita. *Revista Brasileira de Geocincias*, 29(3): 405-414
- Tu GC. 2002. Two unique mineralization areas in Southwest China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22: 1-2 (in Chinese)
- Wang ZF. 1983. Several problems of ore-forming of Gejiu ore deposit. *Acta Geology Sinica*, 1983 57(2): 154-163 (in Chinese)
- www.alschemex.com/services/SS-page19.html
- www.geology.utoronto.ca/faculty/davis.html
- www.rses.anu.edu.au/prise/applications/index.html
- Xin JG, Yuan KR. 1993. Geological characteristics and mineralization of the conceal granites in the Dulong ore-field Yunnan Province. *Bulletin of the Guilin College of Geology*, 13(2): 121-129 (in Chinese with English abstract)
- Xue BG. 1990. Discussion on mineralization characteristics of the Dulong Sn polymetallic deposit; Discussion with Song HB. *Geology of ore deposits in Southwest China*, 4(2): 28-35 (in Chinese)
- Yan DP, Zhou MF, Wang YC, et al. 2006. Structural and geochronological constraints on the tectonic evolution of Dulong-Song Chaytectonic dome in Yunnan province, SW China. *J. Asian Earth Sci.*, 28: 332-353
- Yan JG. 1992. Geological characteristics controls of the Dulong Sn polymetallic deposit and its major ore-bodies. *Geology of Ore Deposits in Southwest China*, 6(3): 26-31 (in Chinese)
- YNBGM. 1973. 1/200,000 (Gejiu area) regional geology survey report (in Chinese)
- YNBGM. 1976a. 1/200,000 (Maguan area) regional geology survey report (in Chinese)
- YNBGM. 1976b. 1/200,000 (Wenshan area) regional geology survey report (in Chinese)
- YNBGR. 1990. Yunnan regional geology. Beijing: Chinese Geology Press House (in Chinese with English abstract)
- YNBGR. 1999. 1/50,000 (Dulong area) regional geological and resources survey report (in Chinese)
- Zeng ZG. 1997. Geological and geochemical analysis of zinc-tin-tungsten polymetallic ore-forming system, Laojunshan metallogenic, southeastern Yunnan. Ph. D. Dissertation, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang (in Chinese with English abstract)
- Zhang H, Gao ZM, Ma DY, et al. 2004. Distribution and genetic significance of Sn in oolitic pyrite and colloiddally structured pyrite from gejiu tin deposits. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(1): 87-91 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ST, Chen GC. 1997. Geological Characteristics of the Bozhushan Granites and its evolutionary features Southeastern Yunnan. *Geology of Yunnan*, 16(3): 222-232 (in Chinese)
- Zhang ST, Feng MG. 1998. Analysis of the Nanwenhe metamorphic core Complex Southeastern Yunnan. *Chinese Regional Geology*, 17(4): 390-397 (in Chinese with English Abstract)
- Zhao KD, Jiang SY. 2004. Direct isotope dating of metallic ore deposits. *Earth Sciences Frontiers*, 11(2): 425-434 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JP, Xu KQ, Hua RM, et al. 1998. Characteristics and genesis of exhalative sedimentary massive sulfides in southeastern yunnan province. *Acta Mineralogica Sinica*, 18(2): 158-168 (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

- 安保华. 1990. 老君山岩体特征、成因及找矿意义探讨. *西南矿产地质*, 4(1): 30-35
- 白金刚, 池三川, 覃功炯. 1996. 云南白牛厂喷流沉积型银多金属矿床沉积环境分析. *有色金属矿产与勘查*, 5: 140-145
- 蔡德坤. 1983. 滇东南老君山花岗岩类岩石的形成演化与锡、钨的矿化富集作用. *云南地质*, 2(2): 102-113
- 陈学明, 邓军, 白金刚等. 2000. 云南厂矿区古生代沉积盆地的成矿流体系统. *现代地质*, 14(2): 173-178
- 陈衍景, 陈华勇, Zaw K 等. 2004. 中国陆区大规模成矿的地球动力学: 以夕卡岩型金矿为例. *地质前缘*, 11(1): 57-83
- 杜俊生等. 1983. 滇东南老君山地区变质火山岩及层控锡钨矿床. *西南冶金地质*, (3): 55-64
- 付国辉. 1992. 云南都龙锡多金属矿床地质特征及成矿规律. *西南矿产地质*, 6(2): 25-37
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰等. 2003. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统. *中国科学 D*, 33: 335-343
- 李东旭, 许顺山. 2000. 变质核杂岩的旋扭成因—滇东南老君山变质核杂岩的构造解析. *地质论评*, 46: 113-119
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性脉岩的年代学和地球化学. *地球化学*, 26: 14-31
- 李晓波, 刘继顺, 张洪培等. 2005. 云南省蒙自县白牛厂银多金属矿床控矿因素分析. *地质找矿论丛*, 20: 111-114
- 刘玉平. 1996. 一个受后期改造和岩浆热液叠加的块状硫化物矿床—都龙锡锌多金属矿床. 硕士学位论文, 中国科学院地球化学研究所, 贵阳, 1-79
- 刘玉平, 李朝阳, 谷团等. 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
- 刘玉平, 叶霖, 李朝阳等. 2006b. 滇东南发现新元古代岩浆岩: SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据. *岩石学报*, 22(4): 916-926
- 刘玉平, 李朝阳, 叶霖等. 2006a. 云南都龙锡锌多金属超大型矿床鳞片状黄铁矿 SEM 研究及其成因意义. *矿物岩石地球化学通报*, 25(增): 165-167
- 陆松年, 李怀坤, 李惠民. 1999. 成矿地质事件的同位素年代学研究. *地质前缘*, 6: 335-342
- 秦德先, 黎应书, 谈树成等. 2006. 云南个旧锡矿的成矿时代. *地质科学*, 44: 122-132
- 宋彪, 张玉海, 万渝生等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48(增刊): 26-30
- 宋焕斌. 1989. 云南东南部都龙锡石-硫化物型矿床的成矿特征. *矿床地质*, 8(4): 29-38
- 涂光炽. 2002. 我国西南两个别具一格的成矿带(域). *矿物岩石地球化学通报*, 22: 1-2
- 汪自芬. 1983. 关于个旧锡矿成矿的几个问题. *地质学报*, 57(2): 154-163
- 忻建刚, 袁荣奎. 1993. 云南都龙隐伏花岗岩的特征及其成矿作用. *桂林冶金地质学院学报*, 13(2): 121-129
- 薛步高. 1990. 试论都龙锡多金属矿床成矿特征—与宋焕斌商榷. *西南矿产地质*, 4(2): 28-35

- 晏建国. 1992. 云南都龙锡多金属矿床及厚大矿体控矿地质特征. 西南矿产地质, 6(3): 26-31
- 《云南省矿床发现史》编委会. 1996. 《云南省矿床发现史》. 北京: 地质出版社
- 云南省地质局第二区域地质测量大队. 1973. : 20万(个旧幅)区域地质调查报告
- 云南省地质局第二区域地质测量大队. 1976a. : 20万(马关幅)区域地质调查报告
- 云南省地质局第二区域地质测量大队. 1976b. : 20万(文山幅)区域地质调查报告
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 云南省地质矿产局区域地质调查院. 1999. : 5万(都龙幅)区域地质矿产调查报告
- 曾志刚. 1997. 滇东南老君山锌锡钨多金属成矿体系地质地球化学解析. 博士学位论文, 中国科学院地球化学研究所, 贵阳, 1-112
- 张欢, 高振敏, 马德云等. 2004. 个旧锡矿区鲕状黄铁矿和胶状结构黄铁矿中锡的分布及其成因意义. 矿物学报, 24(1): 87-91
- 张世涛, 陈国昌. 1997. 滇东南薄竹山复式岩体的地质特征及其演化规律. 云南地质, 16: 222-232
- 张世涛, 冯明刚. 1998. 滇东南南温河变质核杂岩解析. 中国区域地质, 17(4): 390-397
- 赵葵东, 蒋少涌. 2004. 金属矿床的同位素直接定年方法. 地学前缘, 11: 425-434
- 周建平, 徐克勤, 华仁民等. 1998. 滇东南喷流沉积块状硫化物特征与矿床成因. 矿物学报, 18(2): 158-168