

# 都龙锡锌多金属矿床 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 测年及其意义<sup>\*</sup>

王小娟<sup>1 2</sup> 刘玉平<sup>1\*\*</sup> 缪应理<sup>3</sup> 鲍谈<sup>1 2</sup> 叶霖<sup>1</sup> 张乾<sup>1</sup>

WANG XiaoJuan<sup>1 2</sup>, LIU YuPing<sup>1\*\*</sup>, MIAO YingLi<sup>3</sup>, BAO Tan<sup>1 2</sup>, YE Lin<sup>1</sup> and ZHANG Qian<sup>1</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. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 云南华联矿产勘探有限责任公司, 曲靖 655000

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Yunan Hualian Mineral Resource Exploration Lt. Co., Qujing 655000, China

2013-05-23 收稿, 2014-02-13 改回.

**Wang XJ, Liu YP, Miao YL, Bao T, Ye L and Zhang Q. 2014. In-situ LA-MC-ICP-MS cassiterite U-Pb dating of Dulong Sn-Zn polymetallic deposit and its significance. Acta Petrologica Sinica, 30(3): 867-876**

**Abstract** The Dulong Sn-Zn polymetallic deposit, Yunnan Province, is one of the largest cassiterite-sulfide deposits in China. Being lack of the accurate and reliable geochronological data, the genesis of this deposit is controversial greatly, so that it is very serious to restrict the further development of the geological prospecting. This paper has reported the U-Pb isotope dating of cassiterite by the method of in-situ LA-MC-ICP-MS from the Manjiazhai section of the Dulong ore-field. The result showed that the  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  isochron ages of cassiterite samples DL12-716, DL12-722 and DL12-740 were  $89.2 \pm 4.1\text{Ma}$  ( $N = 22$ ,  $\text{MSWD} = 4.5$ ),  $88.0 \pm 1.6\text{Ma}$  ( $N = 24$ ,  $\text{MSWD} = 2.3$ ) and  $87.2 \pm 3.9\text{Ma}$  ( $N = 31$ ,  $\text{MSWD} = 14$ ) respectively, and the  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  concordia ages of the corresponding cassiterite samples were  $96.6 \pm 3.5\text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 8.1$ ),  $93.6 \pm 1.6\text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 5.8$ ) and  $82.0 \pm 2.5\text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 11$ ) separately. Combining with geology and previous petrogenetic-mineralization geochronology, indicated that the tin mineralization of this deposit might mainly be in the Late Cretaceous, which related closely to the later Yanshanian magmatic hydrothermal events. Meanwhile, the basis of the geological facts revealed that the later Yanshanian magmatic hydrothermal events were the key factor of the W-Sn polymetallic deposit mineralization in the Laojunshan area. Moreover, regional geology and geochronology further suggested that there were Late Cretaceous larger-scale granitic magmatism and relative tin mineralization events in the southeastern Yunnan.

**Key words** Cassiterite; LA-MC-ICP-MS; U-Pb age; Dulong Sn-Zn polymetallic deposit; Yunnan Province

**摘要** 云南都龙锡锌多金属矿床是我国最大的锡石硫化物矿床之一。缺乏精确可靠的成矿年代学判据,是该矿床成因认识存在较大分歧的重要原因之一,严重制约了地质勘探工作的深入。本文应用 LA-MC-ICP-MS 微区原位 U-Pb 同位素测年技术对都龙矿区曼家寨矿段的锡石样品进行了研究,获得 DL12-716、DL12-722、DL12-740 等三件样品的  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  等时线年龄分别为  $89.2 \pm 4.1\text{Ma}$  ( $N = 22$ ,  $\text{MSWD} = 4.5$ )、 $88.0 \pm 1.6\text{Ma}$  ( $N = 24$ ,  $\text{MSWD} = 2.3$ ) 和  $87.2 \pm 3.9\text{Ma}$  ( $N = 31$ ,  $\text{MSWD} = 14$ ),  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  谐和年龄分别为  $96.6 \pm 3.5\text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 8.1$ )、 $93.6 \pm 1.6\text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 5.8$ ) 和  $82.0 \pm 2.5\text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 11$ )。结合矿床地质特征和前人成岩-成矿年代学成果,表明都龙矿区锡成矿作用主要发生在晚白垩纪,与燕山晚期岩浆热液活动关系密切。结合地质事实,表明燕山晚期岩浆热液活动是老君山矿集区锡钨多金属成矿的关键。通过区域地质及年代

\* 本文受云南华联锌锡股份有限公司委托项目(KY20120910)、中国科学院地球化学研究所“十二五”项目群(SKLOGD-ZY125-06)和中国科学院“西部之光”项目(2009-039)联合资助。

第一作者简介: 王小娟,女,1987年生,硕士生,地质工程专业, E-mail: 307153539@qq.com

\*\* 通讯作者: 刘玉平,男,1971年生,博士,研究员,矿床地球化学专业, E-mail: liuyuping@vip.gyig.ac.cn

学对比,表明滇东南地区晚白垩世存在大规模花岗岩成岩-锡成矿事件。

关键词 锡石; LA-MC-ICP-MS; U-Pb 年龄; 都龙锡锌多金属矿床; 云南

中图法分类号 P597.3; P618.43; P618.44

滇东南都龙锡锌多金属矿床是一个 Sn、Zn、In、Cu、Pb 等多元素共生的矿床,位于云南省马关县境内(云南省矿床发展史编委会,1996)。20 世纪 80 年代以来,许多学者(刘玉平,1996;刘玉平等,2000,2007;曾志刚等,1999;李文尧,2002;颜丹平等,2005;张春红等,2008;冯佳睿,2011;廖震等,2010)从不同角度对其进行了研究,取得了不少成果,极大地推动了地质找矿工作的深入。但是,由于本矿区先后经历了沉积、变形-变质、岩浆作用等复杂的地质作用过程,控矿因素多样,成矿作用复杂,加之缺少精确可靠的成矿年代学判据,长期以来对矿床成因认识存在较大分歧,存在岩浆热液成因(范承钧,1988;宋焕斌,1989)、热水沉积-热液改造成因(周建平等,1997,1998)、沉积-变质-热液改造成因(刘玉平,1996;刘玉平等,2000)等不同观点。

成矿年代的准确测定,对于确定矿床成因、探讨成矿事件极其重要。随着都龙矿区深部及外围找矿工作的深入,急需加强成矿年代学研究,进而对已有的矿床成因观点进行甄别,更好地提供理论指导。本次研究应用天津地质调查中心新近开发的 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年方法(李惠民等,2009),获得都龙矿区锡石  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  等时线年龄和  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  谐和年龄为 82~96.6Ma,表明锡矿化主要发生在晚白垩世,结合该矿床已有的锡石和锆石 U-Pb 年龄(刘玉平等,2007),进一步指示大规模的锡成矿作用与燕山晚期老君山花岗岩热液活动密切相关。

## 1 矿区地质概况

都龙矿区大地构造位于华南褶皱系西南端、滇东南褶皱带老君山穹窿构造的南西翼,主要包括铜街、曼家寨、辣子寨、金石坡等矿段,探明锡、锌、镉金属储量均达到超大型规模,并伴生有铅、铜、铁、银、镉等元素(周祖贵,2002)。矿区骨架构造为 NW 向马关-都龙断裂,以及近 N-S 向铜街-五口碛断裂、花石头-南当厂断裂(刘玉平,1996)。马关-都龙断裂延伸大,深部见花岗岩体。近 N-S 断裂起到运输矿液的作用,在其旁侧的张性断裂中沉淀成矿(宋焕斌和金世昌,1987)。矿区出露地层主要为新元古界-下寒武统新寨岩组和中寒武统田蓬组、龙哈组(云南省地质矿产局区域地质调查院,1999<sup>①</sup>)。区内岩浆活动强烈,燕山晚期老君山花岗岩主体出露于矿区北侧,并向南倾伏于矿区深部,地表见多条燕山晚期花岗岩斑岩脉。研究表明,老君山花岗岩出露面积约 150km<sup>2</sup>,根据岩体的产状、岩石结构构造特征及同位素年龄差异可以划分为三期:第一期( $\gamma_b^{3a}$ )为中-粗粒二云二长花岗岩,呈岩基产出,锆石 U-Pb 年龄为 87.2±0.6Ma~96±2Ma;第二期( $\gamma_b^{3b}$ )为中细粒二云母花岗岩,呈岩株侵入第一期岩

体中,锆石 U-Pb 年龄为 86.8±0.4Ma;第三期( $\gamma_b^{3c}$ )为花岗岩,呈岩脉、岩枝产出,锆石 U-Pb 年龄为 85.9±0.4Ma(刘玉平等,2007;冯佳睿等,2011;张斌辉等,2012)。此外,在矿区东南部还出露了已发生变形-变质的加里东期花岗岩(张世涛等,1998;徐伟,2007)(图 1)。

都龙矿区以层状砂卡岩型矿体为主,其次为规模较小的石英、方解石、萤石等脉型矿体。其中,层状砂卡岩型矿体在平面上呈南北向串珠状产出,剖面上呈叠瓦状排列,主要以似层状、透镜状、囊状产出,分支复合、尖灭再现较为常见(刘玉平等,2007)。矿石中金属矿物主要为锡石、铁闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、毒砂及磁铁矿,脉石矿物主要为石榴石、透辉石、钙铁辉石、透闪石、阳起石、绿泥石、绿帘石、石英、方解石、白云石、云母及萤石等。矿石结构主要为粒状变晶结构、热液交代结构、固溶体分离结构及交代残余结构等,矿石构造多为纹层状-条带状构造、块状构造、浸染状构造、脉状构造及斑点状构造等(宋焕斌,1989;刘玉平等,2007)。

## 2 LA-MC-ICP-MS 锡石微区原位 U-Pb 测年分析

### 2.1 样品采集及加工

本次研究分析的 DL12-716、DL12-722、DL12-740 等三件锡石样品,均采自都龙矿区曼家寨矿段(图 2)。光薄片显微镜观察显示,锡石通常呈半自形柱状集合体产出(图 2c,d),部分环带发育(图 2a),颜色多为黄褐色至深褐色,裂隙发育(图 2b),与石英、萤石、绿泥石等矿物密切共生(图 2)。进行 U-Pb 测年的锡石单矿物样品,采用常规重选法粗选,然后在双目镜下挑纯至 95% 以上。

锡石制靶在北京铅年领航科技有限公司完成,首先将锡石样品用双面胶粘在载玻片上,放上 PVC 环,然后将环氧树脂和固化剂进行充分混合后注入 PVC 环中,待树脂充分固化后将样品座从载玻片上剥离,对其进行抛光制靶。锡石反射光和透射光照相(图 3),在天津地质调查中心岩矿鉴定实验室完成。

### 2.2 分析方法

锡石 U-Pb 同位素定年在天津地质调查中心分析测试室完成。所用仪器为 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 193nm ArF 准分子激光取样系统(LA-MC-ICP-MS)。

实验流程具体如下:根据反射光和透射光图像,选择锡

① 云南省地质矿产局区域地质调查院. 1999. 1:5 万都龙幅区域地质矿产调查报告

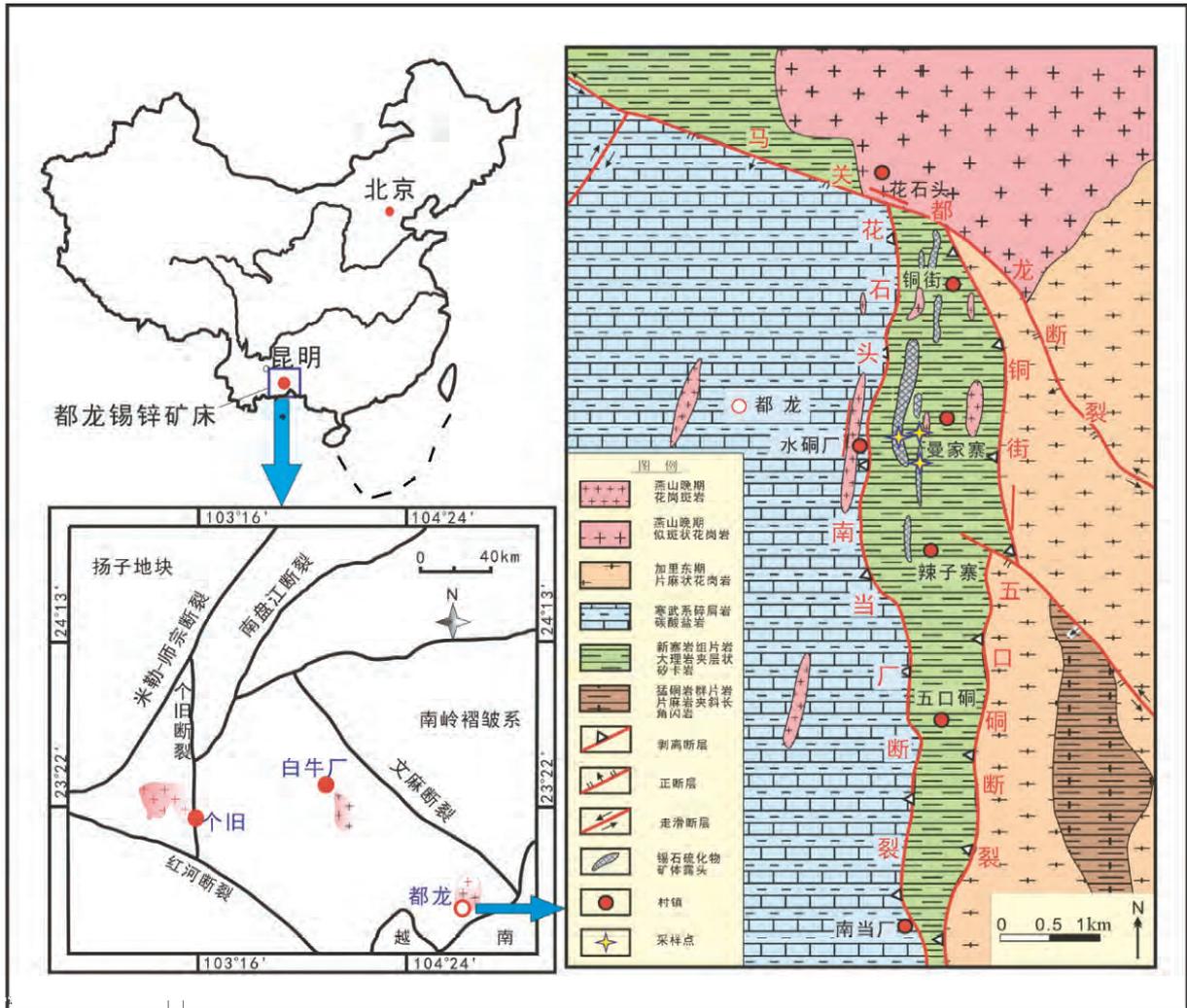


图1 都龙锡锌多金属矿床地质简图

Fig.1 Geological sketch map of the Dulong Sn-Zn polymetallic ore deposit

石颗粒的合适区域,避开包裹体和裂纹,以减少普通铅的影响(李惠民等 2009)。利用 193nm FX 激光器对选择好的锡石区域进行剥蚀,激光斑束一般为 50 或 75 $\mu$ m,频率为 15Hz,样品信号采集时间为 26s,激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune(MC-ICPMS),利用动态变焦扩大色散使质量数相差很大的 U-Pb 同位素可以同时接收,从而对 U-Pb 同位素进行测定(Yuan *et al.*, 2011)。

实验过程中<sup>204</sup>Pb 同位素离子信号较弱以及 Ar 气中<sup>204</sup>Hg 的干扰,致使<sup>204</sup>Pb 的含量难以准确测定,因此我们采用<sup>207</sup>Pb 代替<sup>204</sup>Pb 来作 U-Pb 等时线,即<sup>206</sup>Pb/<sup>207</sup>Pb-<sup>238</sup>U/<sup>207</sup>Pb 等时线代替传统的<sup>238</sup>U/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 等时线方法处理数据。这对于 U 含量不高,其中积累的放射成因<sup>207</sup>Pb 含量极少、可以忽略不计的年青锡石样品是可行的,从而获得与 TIMS 法吻合的年龄(李惠民等 2011)。但是随着锡石年龄的增大(如大于 400Ma),锡石晶格中积累的放射成因<sup>207</sup>Pb 含量也随之逐渐增加,再用<sup>207</sup>Pb 代替<sup>204</sup>Pb 来作等时线,势必

产生较大的误差。这种情况下,锡石 U-Pb 定年数据处理就不宜采用<sup>206</sup>Pb/<sup>207</sup>Pb-<sup>238</sup>U/<sup>207</sup>Pb 等时线法。鉴于上述等时线方法存在的一些小瑕疵,本文又分别作了各个样品的 Tera-Wasserburg U-Pb 年龄谐和图,通过图解的下交点来计算锡石年龄。锡石标样为天津地质矿产研究所测试实验室的内部标准 Lbiao(<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U TIMS 年龄 158.2 $\pm$ 0.4Ma),数据处理采用 Kenneth R. Ludwig 的 Isoplot 程序进行分析和作图(Ludwig, 2003)。

### 2.3 分析结果

LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 测年结果见表 1 和图 4。各样品分述如下:

DL12-716,为层状砂卡岩型矿石,锡石为黄褐色-深褐色,半自形晶体,共 22 个测点。其中,<sup>238</sup>U/<sup>206</sup>Pb 的比值变化范围为 5.7581 ~ 65.1690,<sup>238</sup>U/<sup>207</sup>Pb 的比值变化范围为 7.9386 ~ 951.8506,<sup>206</sup>Pb/<sup>207</sup>Pb 的比值变化范围为 1.2751 ~

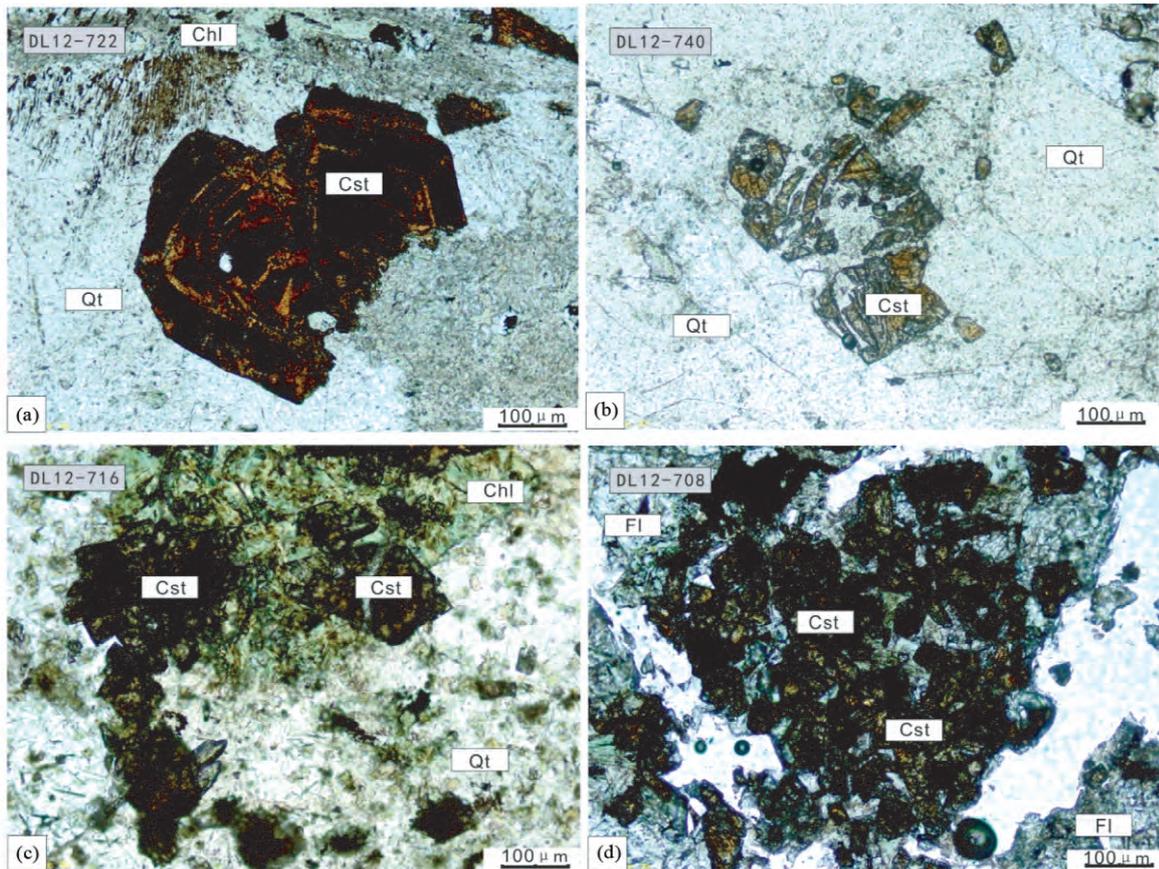


图2 都龙曼家寨矿段锡石单偏光图像

(a) -DL12-722 层状砂卡岩型锡矿石, 锡石的生长环带; (b) -DL12-740 石英脉型锡矿石, 锡石与石英共生; (c) -DL12-716 层状砂卡岩型锡矿石, 锡石与绿泥石、石英共生; (d) -DL12-708 萤石脉型锡矿石, 锡石与萤石共生

Fig. 2 Plane-polarized light images of cassiterite from the Manjiazhai section, Dulong

(a) -DL12-722, the tin ore of strataform skarn type. Growth zoning of cassiterite; (b) -DL12-740, the tin ore of quartz vein type. Quartz associated with cassiterite; (c) -DL12-716, the tin ore of strataform skarn type. Chlorite and quartz associated with cassiterite; (d) -DL12-708, the tin ore of fluorite vein type. Fluorite associated with cassiterite

14. 6059,  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  等时线年龄为  $89.2 \pm 4.1\text{Ma}$  ( $N=22$ ,  $\text{MSWD}=4.5$ ), 初始铅  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  比值为  $1.26 \pm 0.01$  (图 4a<sub>1</sub>),  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  谐和年龄为  $96.6 \pm 3.5\text{Ma}$  ( $N=22$ ,  $\text{MSWD}=8.1$ ) (图 4a<sub>2</sub>)。

DL12-722 为层状砂卡岩型矿石, 锡石为深褐色, 半自形晶体, 共 24 个测点。其中,  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  的比值变化范围为 13.1146 ~ 67.5201,  $^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  的比值变化范围为 18.9282 ~ 1059.3398,  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  的比值变化范围为 1.4433 ~ 15.6892,  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  等时线年龄为  $88.0 \pm 1.6\text{Ma}$  ( $N=24$ ,  $\text{MSWD}=2.3$ ), 初始铅  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  比值为  $1.180 \pm 0.028$  (图 4b<sub>1</sub>),  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  谐和年龄为  $93.6 \pm 1.6\text{Ma}$  ( $N=24$ ,  $\text{MSWD}=5.8$ ) (图 4b<sub>2</sub>)。

DL12-740 为石英脉型矿石, 锡石为深褐色-黑褐色, 半自形晶体, 共 31 个测点。其中,  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  的比值变化范围为 37.2235 ~ 81.3842,  $^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  的比值变化范围为 85.7683 ~ 1347.9684,  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  的比值变化范围为 2.6484 ~

20.0613,  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  等时线年龄为  $87.2 \pm 3.9\text{Ma}$  ( $N=31$ ,  $\text{MSWD}=14$ ), 初始铅  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  比值为  $1.63 \pm 0.34$  (图 4c<sub>1</sub>),  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  谐和年龄为  $82.0 \pm 2.5\text{Ma}$  ( $N=25$ ,  $\text{MSWD}=11$ ) (图 4c<sub>2</sub>)。

从矿石类型看, 层状砂卡岩型矿石 (DL12-716 和 DL12-722) 锡石  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  等时线年龄变化范围为  $88.0 \sim 89.2\text{Ma}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  谐和年龄变化范围为  $93.6 \sim 96.6\text{Ma}$ ; 石英脉型矿石 (DL12-740), 锡石  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  等时线年龄为  $87.2\text{Ma}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  谐和年龄为  $82\text{Ma}$ 。两类矿石的锡石等时线年龄与谐和年龄在误差范围内一致, 表明锡成矿作用主要为晚白垩纪。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 年代学

锡石是锡多金属矿床中重要的矿石矿物, 属于金红石族,

表1 都龙锡锌多金属矿床 LA-MC-ICP-MS 锡石微区原位 U-Pb 年龄测试结果

Table 1 In-situ LA-MC-ICP-MS U-Pb ages of cassiterite from the Dulong Sn-Zn Polymetallic ore deposit

| 测点号      | $\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$ | $2\sigma$ (%) | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{207}\text{Pb}}$ | $2\sigma$ (%) | $\frac{^{238}\text{U}}{^{207}\text{Pb}}$ | $2\sigma$ (%) | Rho    | 测点号      | $\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$ | $2\sigma$ (%) | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{207}\text{Pb}}$ | $2\sigma$ (%) | $\frac{^{238}\text{U}}{^{207}\text{Pb}}$ | $2\sigma$ (%) | Rho    |
|----------|--|---------------|---|---------------|--|---------------|--------|----------|--|---------------|---|---------------|--|---------------|--------|
| DL12-716 |  |               |   |               |  |               |        | 17       | 56.1799                                  | 1.13          | 5.3084                                    | 5.14          | 298.2245                                 | 5.98          | 0.7798 |
| 1        | 10.1215                                  | 7.24          | 1.2751                                    | 15.14         | 12.9063                                  | 17.11         | 0.5286 | 18       | 49.5765                                  | 0.91          | 3.6449                                    | 1.85          | 180.7033                                 | 2.18          | 0.5425 |
| 2        | 35.6839                                  | 3.83          | 2.0439                                    | 12.17         | 72.9336                                  | 12.78         | 0.3202 | 19       | 35.1183                                  | 1.03          | 2.3549                                    | 2.05          | 82.7005                                  | 2.60          | 0.6764 |
| 3        | 41.2413                                  | 2.14          | 2.8687                                    | 5.04          | 118.3096                                 | 4.54          | 0.5126 | 20       | 35.4414                                  | 1.40          | 2.1816                                    | 1.56          | 77.3198                                  | 1.88          | 0.5815 |
| 4        | 51.9651                                  | 2.39          | 3.8321                                    | 9.60          | 199.1331                                 | 9.02          | 0.6099 | 21       | 49.4186                                  | 0.74          | 3.5662                                    | 2.10          | 176.2351                                 | 2.41          | 0.5429 |
| 5        | 60.9140                                  | 1.58          | 9.1559                                    | 14.62         | 557.7251                                 | 16.96         | 0.6541 | 22       | 57.2962                                  | 0.65          | 5.6624                                    | 3.14          | 324.4333                                 | 4.17          | 0.4673 |
| 6        | 56.5462                                  | 2.39          | 7.2844                                    | 13.70         | 411.9070                                 | 15.90         | 0.5771 | 23       | 22.2072                                  | 1.74          | 1.6999                                    | 0.86          | 37.7505                                  | 1.14          | 0.9038 |
| 7        | 65.1690                                  | 0.94          | 14.6059                                   | 12.30         | 951.8506                                 | 12.55         | 0.3020 | 24       | 46.7625                                  | 1.28          | 3.2213                                    | 2.92          | 150.6343                                 | 3.55          | 0.6287 |
| 8        | 61.7774                                  | 1.82          | 8.2476                                    | 15.83         | 509.5128                                 | 19.95         | 0.6156 | DL12-740 |  |               |   |               |  |               |        |
| 9        | 32.1897                                  | 4.01          | 2.2141                                    | 17.33         | 71.2714                                  | 18.89         | 0.5219 | 1        | 74.9365                                  | 1.79          | 15.7475                                   | 22.88         | 1026.6553                                | 27.28         | 0.5947 |
| 10       | 50.1963                                  | 2.12          | 4.4323                                    | 7.99          | 222.4831                                 | 9.91          | 0.5448 | 2        | 62.2401                                  | 1.71          | 6.5492                                    | 4.25          | 354.6312                                 | 4.91          | 0.5307 |
| 11       | 25.0856                                  | 5.80          | 2.3469                                    | 3.74          | 58.8727                                  | 4.26          | 0.8724 | 3        | 74.3417                                  | 2.80          | 15.6779                                   | 7.48          | 1014.0060                                | 5.53          | 0.5690 |
| 12       | 31.6433                                  | 2.34          | 2.1052                                    | 8.09          | 66.6142                                  | 9.26          | 0.6808 | 4        | 64.2745                                  | 6.53          | 14.4536                                   | 6.29          | 808.2262                                 | 4.50          | 0.3983 |
| 13       | 55.1026                                  | 1.11          | 5.5400                                    | 5.06          | 305.2691                                 | 6.44          | 0.5227 | 5        | 79.8528                                  | 4.63          | 16.2753                                   | 9.48          | 1130.6771                                | 10.03         | 0.3477 |
| 14       | 55.4760                                  | 2.79          | 6.3618                                    | 16.66         | 352.9291                                 | 13.64         | 0.9008 | 6        | 70.0891                                  | 6.85          | 13.4785                                   | 12.14         | 821.8870                                 | 14.95         | 0.6011 |
| 15       | 58.5018                                  | 2.21          | 9.5974                                    | 20.87         | 561.4649                                 | 26.56         | 0.5798 | 7        | 79.4380                                  | 3.60          | 16.3205                                   | 9.17          | 1127.9288                                | 8.74          | 0.5835 |
| 16       | 50.3390                                  | 2.32          | 3.7237                                    | 5.83          | 187.4480                                 | 12.31         | 0.5301 | 8        | 49.1253                                  | 4.97          | 3.3849                                    | 6.07          | 144.6658                                 | 7.96          | 0.6463 |
| 17       | 62.5533                                  | 3.29          | 10.7345                                   | 21.29         | 671.4797                                 | 28.25         | 0.5404 | 9        | 74.7798                                  | 2.78          | 16.8120                                   | 13.21         | 1093.7603                                | 13.95         | 0.5590 |
| 18       | 50.0621                                  | 2.50          | 4.0442                                    | 7.13          | 202.4596                                 | 17.58         | 0.4193 | 10       | 81.3418                                  | 3.17          | 16.2233                                   | 7.06          | 1148.0827                                | 5.89          | 0.5380 |
| 19       | 60.4455                                  | 0.93          | 6.5849                                    | 5.07          | 398.0298                                 | 6.60          | 0.4871 | 11       | 70.5924                                  | 2.87          | 13.5284                                   | 9.34          | 830.8508                                 | 9.54          | 0.5169 |
| 20       | 5.7581                                   | 6.26          | 1.3787                                    | 2.06          | 7.9386                                   | 2.66          | 0.6254 | 12       | 77.0975                                  | 2.48          | 14.9423                                   | 11.04         | 1002.2523                                | 13.91         | 0.5229 |
| 21       | 57.7678                                  | 3.35          | 6.0601                                    | 21.48         | 350.0790                                 | 24.19         | 0.5379 | 13       | 81.3848                                  | 3.90          | 15.9860                                   | 22.26         | 1131.8809                                | 27.04         | 0.6899 |
| 22       | 44.8140                                  | 1.97          | 3.9045                                    | 7.11          | 174.9766                                 | 8.15          | 0.7042 | 14       | 78.6917                                  | 4.87          | 15.6777                                   | 7.56          | 1073.3226                                | 7.73          | 0.3507 |
| DL12-722 |  |               |   |               |  |               |        | 15*      | 49.8110                                  | 7.54          | 5.7108                                    | 3.96          | 247.4820                                 | 3.86          | 0.9633 |
| 1        | 57.1685                                  | 0.98          | 5.1325                                    | 4.48          | 293.4195                                 | 5.30          | 0.8669 | 16*      | 41.9314                                  | 2.02          | 5.0769                                    | 8.88          | 185.2087                                 | 5.16          | 0.5116 |
| 2        | 46.5674                                  | 0.87          | 3.3174                                    | 2.39          | 154.4806                                 | 2.78          | 0.5746 | 17       | 41.3138                                  | 9.02          | 2.8377                                    | 2.80          | 101.9936                                 | 2.53          | 0.7510 |
| 3        | 67.5201                                  | 0.46          | 15.6892                                   | 6.86          | 1059.3398                                | 7.70          | 0.7460 | 18       | 79.8415                                  | 1.38          | 18.8331                                   | 14.34         | 1308.1894                                | 15.79         | 0.8500 |
| 4        | 13.1146                                  | 4.50          | 1.4433                                    | 0.45          | 18.9282                                  | 0.53          | 0.2503 | 19*      | 43.6445                                  | 5.72          | 4.0057                                    | 23.44         | 152.0997                                 | 21.52         | 0.5187 |
| 5        | 45.0972                                  | 1.21          | 3.1536                                    | 2.09          | 142.2190                                 | 2.53          | 0.5706 | 20       | 63.1744                                  | 2.80          | 5.9447                                    | 4.27          | 326.7328                                 | 4.50          | 0.5895 |
| 6        | 43.7882                                  | 1.65          | 3.0985                                    | 2.59          | 135.6783                                 | 3.78          | 0.8241 | 21       | 58.4060                                  | 3.91          | 4.5141                                    | 8.57          | 229.3743                                 | 8.08          | 0.6115 |
| 7        | 56.1749                                  | 1.71          | 6.1414                                    | 7.14          | 344.9902                                 | 11.57         | 0.5725 | 22*      | 60.9826                                  | 2.89          | 3.6813                                    | 15.49         | 195.3087                                 | 10.45         | 0.6258 |
| 8        | 39.6796                                  | 1.46          | 2.6879                                    | 1.78          | 106.6543                                 | 2.04          | 0.5209 | 23*      | 64.6871                                  | 2.27          | 5.4031                                    | 5.58          | 304.0730                                 | 4.18          | 0.4542 |
| 9        | 56.3972                                  | 1.49          | 6.4754                                    | 6.98          | 365.1969                                 | 8.54          | 0.5401 | 24       | 77.2326                                  | 2.30          | 20.0613                                   | 17.11         | 1347.9684                                | 10.18         | 0.9205 |
| 10       | 39.6910                                  | 1.15          | 2.6275                                    | 1.42          | 104.2882                                 | 1.63          | 0.5218 | 25       | 69.5927                                  | 2.83          | 15.1084                                   | 9.62          | 914.7481                                 | 10.06         | 0.5912 |
| 11       | 29.3224                                  | 1.46          | 1.9012                                    | 2.34          | 55.7487                                  | 2.63          | 0.4657 | 26       | 59.4095                                  | 1.95          | 4.2632                                    | 2.88          | 220.3485                                 | 1.67          | 0.5606 |
| 12       | 46.8127                                  | 1.33          | 3.3169                                    | 2.78          | 155.2718                                 | 3.16          | 0.4828 | 27       | 37.2235                                  | 7.37          | 2.6484                                    | 2.83          | 85.7683                                  | 2.55          | 0.4056 |
| 13       | 63.5434                                  | 1.74          | 7.2345                                    | 12.04         | 459.7044                                 | 13.35         | 0.7779 | 28       | 39.1527                                  | 8.20          | 4.0075                                    | 11.82         | 136.5054                                 | 13.02         | 0.4543 |
| 14       | 41.8293                                  | 1.24          | 2.7544                                    | 2.24          | 115.2136                                 | 2.77          | 0.6079 | 29       | 53.1662                                  | 3.56          | 3.1326                                    | 6.60          | 144.8949                                 | 5.70          | 0.5424 |
| 15       | 31.2142                                  | 1.17          | 2.0744                                    | 1.39          | 64.7518                                  | 2.03          | 0.7488 | 30       | 63.8190                                  | 2.32          | 4.5121                                    | 3.75          | 250.5234                                 | 3.44          | 0.5976 |
| 16       | 34.1970                                  | 1.48          | 2.2581                                    | 2.23          | 77.2198                                  | 2.68          | 0.5553 | 31*      | 44.0024                                  | 4.01          | 4.6388                                    | 25.29         | 177.5819                                 | 19.20         | 0.6540 |

注: 同位素比值未扣除非放射成因铅; 带\* 测点在谐和图中以虚线绘出, 但未参与谐和年龄的计算

当 U 进入晶格且含量较高时, 可以作为 U-Pb 同位素的测年对象 (Gulson and Jones, 1992), 主要产在花岗岩类侵入体内部或近岩体围岩的热液脉中, 伟晶岩和花岗岩中也常有分布。其 U-Pb 体系的封闭温度较高, 随冷却条件的变化不大。在冷却速率为 10°C/Ma 的体系中, 有效扩散半径为 1μm 的锡石颗粒中 Pb 的封闭温度为 560°C, 1mm 级的锡石颗粒中 Pb 的封闭温度为 860°C (张东亮等 2011)。本次分析所用锡

石颗粒多数 > 100μm, U-Pb 体系封闭温度应 > 560°C。而都龙锡锌多金属矿床的成矿温度约 320°C (刘玉平, 1996), 远小于锡石 U-Pb 体系的封闭温度。因此, 锡石 U-Pb 测年结果可以代表其结晶年龄。

与传统的 TIMS 锡石 U-Pb 测年方法相比, 天津地质调查中心近年来开发的 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 测年方法, 可以省去样品溶解、铀-铅分离等复杂费时的化学前处理流程,

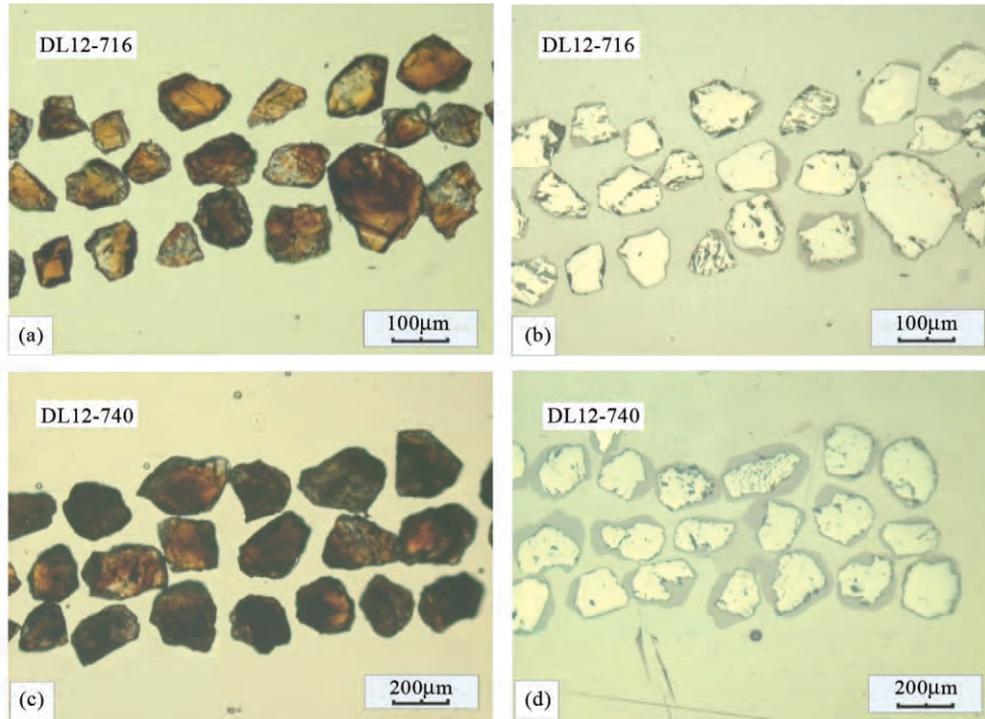


图3 都龙曼家寨矿段锡石透射光(a、c)和反射光(b、d)图像

Fig. 3 Transmission (a, c) and reflected (b, d) images of cassiterite from the Manjiazhai section, Dulong

分辨率高、地质意义明确,能极大地提高工作效率(李惠民等 2009)。近年来该方法获得了较广泛的应用,取得了不少成果(李惠民等 2009;袁顺达等 2010; Yuan *et al.*, 2011; 李开文等 2013; 马楠等 2013)。由于锡石与锆石相比,非放射成因铅含量较高,分布不均一,不同晶域中的含量差异较大且难以准确扣除,U、Th 含量也比锆石低 2~3 个数量级,放射性成因铅含量不容易精确地测定。同时,根据等时线获得都龙矿区三个锡石样品的初始铅 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值(即等时线与 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 轴的交点)分别为 $1.26 \pm 0.01$ 、 $1.180 \pm 0.028$ 、 $1.63 \pm 0.34$ ,与本课题组获得的 21 件老君山花岗岩长石 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值的平均值 1.181(待刊),或同时期普通铅 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值 1.187(根据 Stacey-Krasters 两阶段模式计算)对比,表明放射性成因铅含量高的样品,上述两种年龄计算方法获得的结果之间相对偏差较小,反之则较大。即由于实验过程中未对 U 含量进行测定,从而不能准确扣除非放射性成因铅,可能是造成两种计算方法获得的年龄结果存在一定差异的缘故。因此,建议在此后的类似实验中,最好进行锡石 U 含量测定,以便能获得更为准确可靠的年龄数据。

实验获得都龙矿区层状砂卡岩型矿石(DL12-716 和 DL12-722)和石英脉型矿石(DL12-740)锡石 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ 等时线年龄分别为 $89.2 \pm 4.1\text{Ma}$ ( $N=22$ , MSWD = 4.5)、 $88.0 \pm 1.6\text{Ma}$ ( $N=24$ , MSWD = 2.3)和 $87.2 \pm 3.9\text{Ma}$ ( $N=31$ , MSWD = 14), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 谐和年龄分别为 $96.6 \pm 3.5\text{Ma}$ ( $N=22$ , MSWD = 8.1)、 $93.6 \pm 1.6\text{Ma}$ ( $N=24$ , MSWD = 5.8)和 $82.0 \pm 2.5\text{Ma}$ ( $N=25$ , MSWD = 11),两类

矿石的锡石年龄数据在误差范围内基本一致。上述结果,与刘玉平等(2007)报道的 TIMS 锡石 U-Pb 测年结果, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值 $79.8 \pm 3.2\text{Ma}$ ( $N=4$ , MSWD = 3.16), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 等时线年龄 $82.0 \pm 9.6\text{Ma}$ ( $N=4$ , MSWD = 4.81)在误差范围内一致,均为晚白垩世,代表了锡石结晶、即锡矿化的年龄。

### 3.2 矿床成因

自 20 世纪 80 年代以来,许多学者从不同角度对老君山进行了研究,有关都龙锡锌多金属矿床的研究更是备受关注。然而缺乏精确的成矿年代学判据,是该矿床成因认识存在分歧的重要原因之一。

前人从矿床的产出位置、成矿元素和微量元素含量对比、矿石中硫同位素的岩浆型特征、成矿元素的分带特点以及成矿物理化学条件等方面研究了都龙锡矿与花岗岩的关系,认为该矿床的锡质主要来源于老君山花岗岩(宋焕斌, 1988, 1989; 安保华, 1990; 忻建刚和袁奎荣, 1993)。我们在采样过程中发现,锡以及钨、铜、钼等矿化较好的矿体,均产于隐伏花岗岩或花岗斑岩附近,空间关系十分密切。在矿区占主要地位的砂卡岩型矿体,主要沿大理岩与片岩之间的层间剥离断层产出,虽然在宏观上表现出较明显的层控特征,但分支复合、尖灭再现等现象亦较为普遍,局部甚至可见到沿切层高角度断裂产出的纹层-条带状矿体,揉皱现象明显。地表和钻孔中见较多热液活动痕迹,层状砂卡岩上覆地层中

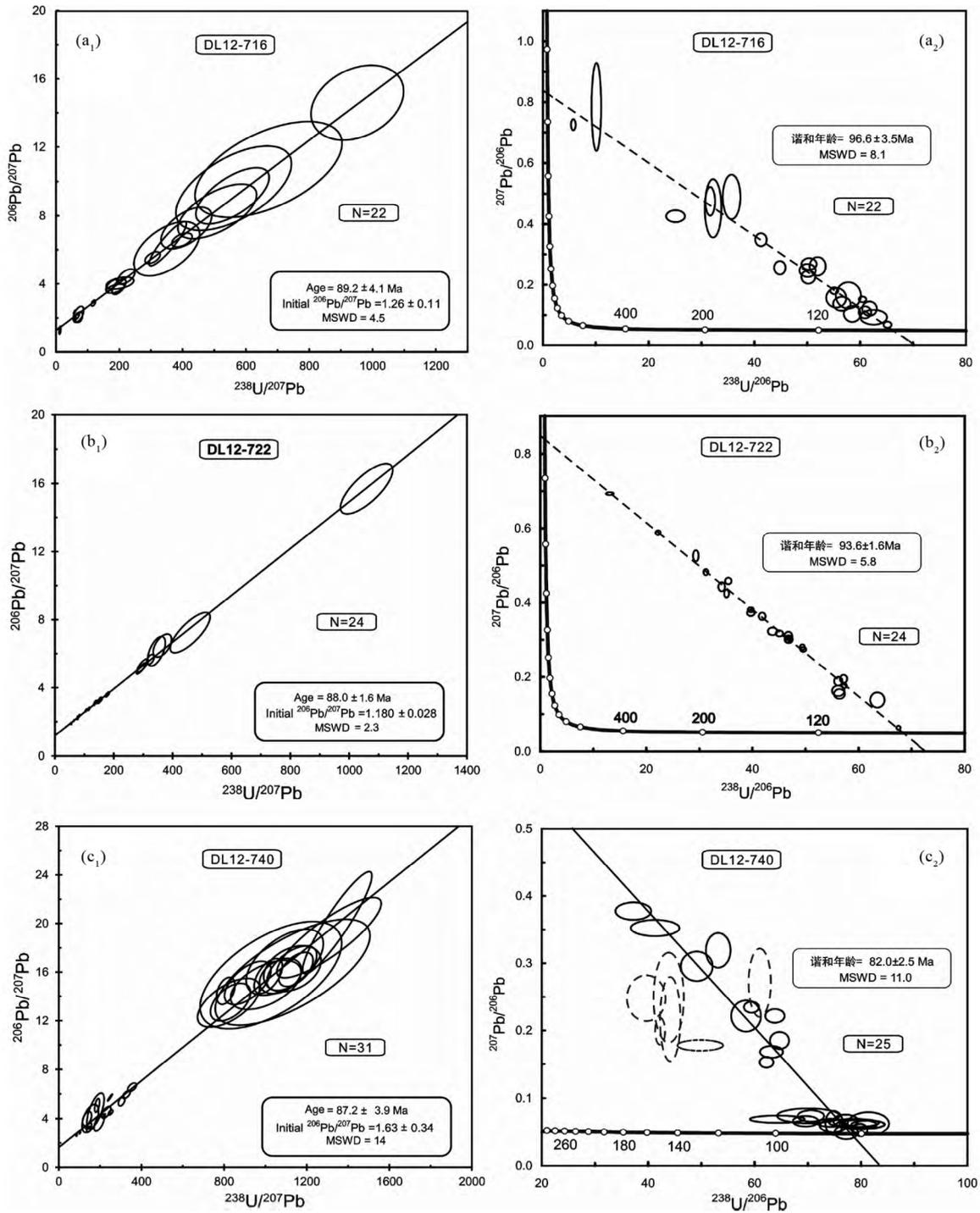


图4 都龙曼家寨矿段锡石 U-Pb 年龄等时线图( a<sub>1</sub>、b<sub>1</sub>、c<sub>1</sub>) 以及对应的 U-Pb 年龄谐和图( a<sub>2</sub>、b<sub>2</sub>、c<sub>2</sub>)

Fig.4 The U-Pb isochron diagram ( a<sub>1</sub> , b<sub>1</sub> , c<sub>1</sub>) and corresponding concordia diagram ( a<sub>2</sub> , b<sub>2</sub> , c<sub>2</sub>) of cassiterite from the Manjiazhai section , Dulong

见较多含矿石英萤石脉,而远离层状砂卡岩的上覆地层中则出现较多碳酸盐细网脉,这些均应为流体逃逸现象。此外,层状砂卡岩附近的大理岩多出现“漂白”(褪色)现象,应为热液流体影响的结果。上述现象表明,“层状”特征应主要是成矿流体沿规模不等的层间剥离断裂充填交代的结果。

本文获得的 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 年龄数据,表明都龙矿区锡石结晶年龄在 82.0 ~ 96.6Ma,接近于矿区隐伏花岗岩锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年龄 92.9 ± 1.9Ma 和花岗斑岩锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年龄 86.9 ± 1.4Ma(刘玉平等 2007),指示了都龙锡矿化与燕山晚期老君山岩浆热液活动关系密

切。近期,本课题组对都龙矿区的矽卡岩矿物学特征及方解石 C-O 同位素特征进行了研究,发现随距深部隐伏花岗岩体距离的不同,其石榴石、辉石成分发生规律性变化(待刊);方解石 C-O 同位素数据点基本落入幔源碳的范围内或其附近,明显偏离海相碳酸盐岩的范围,表明方解石的碳主要为岩浆来源(待刊)。因此,与燕山晚期老君山花岗岩有关的岩浆热液成矿作用,是都龙锡-锌多金属矿床形成的关键。

老君山地区作为我国一个重要的锡钨多金属矿集区,主要包括都龙、南秧田、新寨等三个大型-超大型矿床。但对这些典型矿床的成因,长期存在较大争议,南秧田和新寨已有的成矿年代学数据,也存在着较大差异。谭红旗等(2011)获得的南秧田钨矿床与白钨矿共生的金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $118.14 \pm 0.69\text{Ma}$ ,指示燕山期存在钨的大规模成矿作用。冯佳睿等(2011)对新寨锡矿床中的金云母及南秧田钨矿床中的辉钼矿进行了成矿时代的研究,获得金云母的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素坪年龄为 $209.5 \pm 1.1\text{Ma}$ 、等时线年龄为 $209.1 \pm 2.2\text{Ma}$ ,辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄为 $209.1 \pm 3.3\text{Ma} \sim 214.1 \pm 4.3\text{Ma}$ ,进而认为南秧田、新寨的锡钨成矿作用可能与印支期区域变质作用密切相关。近期,中国科学院地球化学研究所杜胜江博士获得新寨锡矿床锡石的 U-Pb 年龄约 $419\text{Ma}$ (内部交流),认为可能存在加里东期成矿作用。老君山矿集区是否存在多期成矿作用,有待于进一步研究,但毋庸置疑的是,区域内主要的锡钨多金属矿床均围绕老君山花岗岩分布,有关矿床热液蚀变发育等基本地质事实,表明燕山晚期岩浆活动是区域锡钨多金属大规模成矿的关键因素。

### 3.3 滇东南晚白垩世大规模花岗岩成岩-锡成矿事件

滇东南地区个旧、白牛厂和都龙等三个超大型矿床,均与燕山晚期花岗岩具有密切的空间关系。但对它们的成因,仍有较大争议(秦德先等,2006;杨宗喜等,2008;白金刚等,1996;张洪培,2007;宋焕斌,1989;周建平,1998;刘玉平,1996),焦点在于是否存在热水沉积成矿作用。

近年来,个旧和白牛厂两个矿床的成岩-成矿年代学研究也取得了不少进展。杨宗喜等报道的个旧锡多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄及等时线年龄分别为 $82.95 \pm 1.16\text{Ma}$ 和 $83.54 \pm 1.31\text{Ma}$ (杨宗喜等,2008),与个旧花岗岩体锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年龄 $77.4 \sim 88.3\text{Ma}$ 一致(程彦博等,2009),表明燕山晚期花岗岩浆作用与成矿关系密切。李开文等获得的白牛厂银多金属矿床 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 同位素年龄为 $87.4 \pm 3.7\text{Ma}$ 和 $88.4 \pm 4.3\text{Ma}$ ,与薄竹山花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $86.51 \sim 87.83\text{Ma}$ (程彦博等,2010)一致,表明锡的主成矿期为晚白垩纪。

到目前为止,并没有从沉积特征最为明显的层状矿体获得与围岩沉积时代一致或相近的成矿年龄。上述三个矿床的成岩-成矿年代学研究结果,进一步支持滇东南地区存在燕山晚期大规模的花岗岩成岩-锡成矿作用(刘玉平等,2007;毛景文等,2008;程彦博等,2010)。

### 3.4 结论

综上所述,可以得出如下初步认识:

(1) 都龙锡-锌多金属矿床 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 年龄为 $82.0 \sim 96.6\text{Ma}$ ,结合近年来都龙矿区成岩-成矿研究成果,表明锡(以及钨、钼、铜等)成矿作用主要为晚白垩纪,与燕山晚期老君山花岗岩浆热液关系密切。基于地质事实,认为燕山晚期岩浆热液活动是老君山矿集区锡钨多金属大规模成矿的关键因素。

(2) 个旧、白牛厂和都龙等三个超大型锡多金属矿床的成岩-成矿年代学研究表明,滇东南地区存在燕山晚期大规模的花岗岩成岩-锡成矿作用。

(3) LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 测年具有操作简单,工作效率及精度较高,地质意义明确等特点,是一种非常有潜力的成矿时代测定新方法。

致谢 匿名评审专家对本文初稿提出了宝贵的意见和建议;中国地质调查局天津地质调查中心分析实验室耿建珍老师帮助完成了 LA-MC-ICP-MS 法锡石同位素测年,李惠民研究员对样品测试和数据处理提出了宝贵的意见;野外考察与采样工作中,得到了中国科学院地球化学研究所王大鹏副研、蓝江波助研、何芳同学和蔡伊同学,云南华联矿产勘探有限责任公司苏航工程师、韦文彪工程师,云南华联锌铟股份有限公司李廷俊工程师、陶春梅工程师等地质同行的支持与帮助;在此一并表示衷心的感谢!

## 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, Chi SC and Tan GJ. 1996. The sedimentary environments of the Bainiuchang SEDEX silver-polymetallic deposit, Yunnan. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 5(3): 140-145 (in Chinese with English abstract)
- Cheng YB, Mao JW, Xie GQ *et al.* 2009. Zircon U-Pb dating of granites in Gejiu superlarge tin polymetallic orefield and its significance. *Mineral Deposits*, 28(3): 297-312 (in Chinese with English abstract)
- Cheng YB, Mao JW, Chen XL *et al.* 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Bozhushan granite in southeastern Yunnan Province and its significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 869-878 (in Chinese with English abstract)
- Edition Committee of "Founding History of Deposits in Yunnan Province". 1996. *Founding History of Deposits in Yunnan Province*, China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Fan CJ. 1988. The division and their regional metallogenic characteristics of Yunnan tin ore belts. *Yunnan Geology*, 7(1): 1-12 (in Chinese with English abstract)
- Feng JR. 2011. The ore-forming fluid and metallogenesis of Nanyangtian tungsten deposit in MaliPo, Yunnan Province, China. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1-133 (in Chinese with English summary)
- Feng JR, Mao JW, Pei RF *et al.* 2011. A tentative discussion on Indosinian ore-forming events in Laojunshan area of southeastern

- Yunnan: A case study of Xinzhai tin deposit and Nanyangtian tungsten deposit. *Mineral Deposit*, 30(1): 57 - 73 (in Chinese with English abstract)
- Gulson BL and Jones MT. 1992. Cassiterite: Potential for direct dating of mineral deposits and a precise age for the Bushveld complex granites. *Geology*, 20(4): 355 - 358
- Li HM, Hao S, Geng JZ *et al.* 2009. Direct determination of cassiterite U-Pb isotope age in the tin polymetallic deposit by laser ablation multiple receivers plasma mass spectrometry (LA-MC-ICP-MS). *Acta Mineralogica Sinica*, 29( Suppl. ): 313 (in Chinese)
- Li HM, Zhou HY, Hao S *et al.* 2011. Thinking of several key problems about the determination of cassiterite U-Pb isotope age in the tin polymetallic deposit by laser ablation multiple receivers plasma mass spectrometry (LA-MC-ICPMS). *Abstract of National Symposium on Petrology and Geodynamics ( Second Volume )*: 178 - 179 (in Chinese)
- Li KW, Zhang Q, Wang DP *et al.* 2013. LA-MC-ICP-MS U-Pb geochronology of cassiterite from the Bainiuchang polymetallic deposit, Yunnan Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(2): 523 - 528 (in Chinese with English abstract)
- Li WY. 2002. Geophysical and geochemical characteristics of Xinzhai tin ore deposit of Malipo. *Yunnan Geology*, 21(1): 72 - 82 (in Chinese with English abstract)
- Liao Z, Liu YP, Li CY *et al.* 2010. Characteristics of chlorites from Dulong Sn-Zn deposit and their metallogenic implications. *Mineral Deposit*, 29(1): 169 - 176 (in Chinese with English abstract)
- Liu YP. 1996. A massive sulfide deposit reformed with metamorphism and superimposed with magmatic hydrothermal: The Dulong tin-zinc polymetallic deposit. Master Degree Thesis. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1 - 79 (in Chinese with English summary)
- Liu YP, Li CY, Gu T *et al.* 2000. Isotopic constraints 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 ZX, Li HM *et al.* 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 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. Isoplot 3.0: A Geochronological Tool kit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication: 1 - 70
- Ma N, Deng J, Wang QF *et al.* 2013. Geochronology of the Dasongpo tin deposit, Yunnan Province: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and cassiterite LA-MC-ICP-MS U-Pb age. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1223 - 1235 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL *et al.* 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510 - 526 (in Chinese with English abstract)
- Qin DX, Li YS, Tan SC *et al.* 2006. Metallogenic ages of Gejiu tin ore deposit in Yunnan Province. *Chinese Journal of Geology*, 41(1): 122 - 132 (in Chinese with English abstract)
- Song HB and Jin SC. 1987. The ore control factors and the direction of regional prospecting of the Dulong tin ore deposit in southeastern Yunnan. *Yunnan Geology*, 6(4): 298 - 303 (in Chinese with English abstract)
- Song HB. 1988. The characteristic and the genesis of Laojunshan tin-bearing granite, southeastern Yunnan. *Mineral Resources and Geology*, 2(3): 45 - 52 (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)
- Tan HQ, Liu YP, Ye L *et al.* 2011. Phlogopite<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating and geological implication of the Nanyangtian W-Sn deposit in Southeastern Yunnan Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 31( Suppl. ): 639 - 640 (in Chinese)
- Xin JG and Yuan KR. 1993. The hidden granite and its metallization in Dulong, Yunnan. *Journal of Guilin College of Geology*, 13(2): 121 - 129 (in Chinese with English abstract)
- Xu W. 2007. Primary research on geochronology and geochemistry of Nanwenhe granite, Southeast Yunnan. Master Degree Thesis. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1 - 72 (in Chinese with English summary)
- Yan DP, Zhou MF, Wang Y *et al.* 2005. Structural styles and chronological evidences from Dulong-Song chay tectonic dome: Earlier spreading of South China sea basin due to Late Mesozoic to Early Cenozoic extension of South China block. *Earth Science*, 30(4): 402 - 412 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZX, Mao JW, Chen MH *et al.* 2008. Re-Os dating of molybdenite from the Kafang skarn copper (tin) deposit in the Gejiu tin polymetallic ore district and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1937 - 1944 (in Chinese with English abstract)
- Yuan SD, Li HM, Hao S *et al.* 2010. Situ LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of cassiterite and its significance in giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China. *Mineral Deposit*, 29( Suppl. ): 543 - 544 (in Chinese)
- Yuan SD, Peng JT, Hao S *et al.* 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 235 - 242
- Zeng ZG, Li CY, Liu YP *et al.* 1999. Geology and geochemistry of metamorphogenic skarn from Laojunshan metallogenic province. *Acta Mineralogica Sinica*, 19(1): 48 - 55 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BH, Ding J, Reng GM *et al.* 2012. Geochronology and geochemical characteristics of the Laojunshan granites in Maguan County, Yunnan Province, and its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 86(4): 587 - 601 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CH, Li YS, Wang JY *et al.* 2008. Ore body-controlling factors of Dulong tin/zinc poly-metallic ore-deposit at Maguan of Yunnan in China. *Nonferrous Metals*, 60(4): 140 - 143 (in Chinese with English abstract)
- Zhang DL, Peng JT, Hu RZ *et al.* 2011. The closure of U-Pb isotope system in cassiterite and its reliability for dating. *Geological Review*, 57(4): 549 - 554 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HP. 2007. Bainiuchang super-large silver-polymetallic ore deposit related to granitic magmatism in Mengzi, Yunnan, China. Ph. D. Dissertation. Changsha: Central South University, 1 - 155 (in Chinese with English summary)
- Zhang ST, Feng MG and Lü W. 1998. Analysis of the Nanwenhe metamorphic core complex in southeastern Yunnan. *Regional Geology of China*, 17(4): 390 - 397 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JP, Xu KQ, Hua RM *et al.* 1997. A discussion on genesis of the tin polymetallic sulfide deposits of southeastern Yunnan. *Yunnan Geology*, 16(4): 309 - 349 (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)
- Zhou ZG. 2002. Total value of resource in Dulong mine area. *Yunnan Metallurgy*, 31(5): 62 - 64 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 安保华. 1990. 老君山岩体特征、成因及其找矿意义探讨. *西南矿产地质*, 4(1): 30 - 35
- 白金刚, 池三川, 覃功炯. 1996. 云南白牛厂沉积喷流型银多金属矿床沉积环境分析. *有色金属矿产与勘查*, 5(3): 140 - 145
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青等. 2009. 与云南个旧超大型锡矿床有关的

- 花岗岩锆石 U-Pb 定年及意义. 矿床地质, 28(3): 297-312
- 程彦博, 毛景文, 陈小林等. 2010. 滇东南薄竹山花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义. 吉林大学学报(地球科学报), 40(4): 869-878
- 范承钧. 1988. 云南锡矿带之划分及其区域成矿地质特点. 云南地质, 7(1): 1-12
- 冯佳睿. 2011. 云南麻栗坡南秧田钨矿床成矿流体特征与成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1-133
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富等. 2011. 滇东南老君山地区印支期成矿事件初探—以新寨锡矿床和南秧田钨矿床为例. 矿床地质, 30(1): 57-73
- 李惠民, 郝爽, 耿建珍等. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱(LA-MC-ICPMS)直接原位测定锡多金属矿床中的锡石 U-Pb 同位素年龄. 矿物学报, 29(增刊): 313
- 李惠民, 周红英, 郝爽等. 2011. 激光烧蚀等离子体质谱(LA-ICPMS)法定测定锡多金属矿床中的锡石 U-Pb 同位素年龄几个关键问题的思考. 岩石学与地球动力学研讨会论文摘要(下册): 178-179
- 李开文, 张乾, 王大鹏等. 2013. 云南蒙自白牛厂多金属矿床锡石原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年代学. 矿物学报, 33(2): 523-528
- 李文尧. 2002. 云南麻栗坡新寨锡矿床物化探异常特征. 云南地质, 21(1): 72-82
- 廖震, 刘玉平, 李朝阳等. 2010. 都龙锡锌矿床绿泥石特征及其成矿意义. 矿床地质, 29(1): 169-176
- 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. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 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, 李正祥, 李惠民等. 2007. 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. 岩石学报, 23(5): 967-976
- 马楠, 邓军, 王庆飞等. 2013. 云南腾冲大松坡锡矿成矿年代学研究: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄证据. 岩石学报, 29(4): 1223-1235
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽等. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510-526
- 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, 41(1): 122-132
- 宋焕斌, 金世昌. 1987. 滇东南都龙锡矿床的控矿因素及区域找矿方向. 云南地质, 6(4): 298-303
- 宋焕斌. 1988. 老君山含锡花岗岩的特征及其成因. 矿床与地质, 2(3): 45-52
- 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
- 谭红旗, 刘玉平, 叶霖等. 2011. 滇东南南秧田钨锡矿床金云母  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年及意义. 矿物学报, 31(增刊): 639-640
- 忻建刚, 袁奎荣. 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): 122-129
- 徐伟. 2007. 滇东南南温河花岗岩年代学和地球化学初步研究. 硕士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1-72
- 颜丹平, 周美夫, 王焰等. 2005. 都龙—Song Chay 变质穹隆体变形与构造年代——南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据. 地球科学, 30(4): 402-412
- 杨宗喜, 毛景文, 陈懋弘等. 2008. 云南个旧卡房砂卡岩型铜(锡)矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 岩石学报, 24(8): 1937-1944
- 袁顺达, 李惠民, 郝爽等. 2010. 湘南芙蓉超大型锡矿锡石原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年及其意义. 矿床地质, 29(增刊): 543-544
- 云南省矿床发展史编委会. 1996. 云南省矿床发展史. 北京: 地质出版社
- 曾志刚, 李朝阳, 刘玉平等. 1999. 老君山成矿区变质成因夕卡岩的地质地球化学特征. 矿物学报, 19(1): 48-55
- 张斌辉, 丁俊, 任光明等. 2012. 云南马关老君山花岗岩的年代学、地球化学特征及地质意义. 地质学报, 86(4): 587-601
- 张春红, 黎应书, 王金良等. 2008. 云南马关都龙锡锌多金属矿床成矿控制条件. 有色金属, 60(4): 140-143
- 张东亮, 彭建堂, 胡瑞忠等. 2011. 锡石 U-Pb 同位素体系的封闭性及其测年的可靠性分析. 地质论评, 57(4): 549-554
- 张洪培. 2007. 云南蒙自白牛厂银多金属矿床—与花岗质岩浆作用有关的超大型矿床. 博士学位论文. 长沙: 中南大学, 1-155
- 张世涛, 冯明刚, 吕伟. 1998. 滇东南南温河变质核杂岩解析. 中国区域地质, 17(4): 390-397
- 周建平, 徐克勤, 华仁民等. 1997. 滇东南锡多金属矿床成因商榷. 云南地质, 16(4): 309-349
- 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
- 周祖贵. 2002. 都龙矿区资源总价值. 云南冶金, 31(5): 62-64