

文章编号: 1000-4734(2015)03-0309-09

云南都龙锡锌多金属矿床铅同位素组成: 成矿金属来源制约

何芳^{1,2}, 张乾^{1*}, 刘玉平¹, 叶霖¹, 缪应理³, 王大鹏¹
苏航³, 鲍谈^{1,2}, 王小娟^{1,2}

(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, 贵州 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, 云南 曲靖 655000)

摘要: 都龙锡锌多金属矿床位于云南省马关县境内, 是中国已探明的第三大锡矿床。本文在野外系统观测基础上, 对该矿床金属矿化分带特征进行了初步总结。矿化分带在水平和垂直方向都有体现, 具典型夕卡岩矿床分带特征。选取了该矿床矿石矿物、花岗斑岩长石、大理岩、片岩和基底片麻岩, 进行铅同位素示踪研究, 结果显示矿石矿物铅同位素组成分布集中, 具有均一的较浅源区, 与老君山花岗岩长石铅同位素组成一致, 而与基底片麻岩长石铅同位素组成有一定差异, 表明该矿床的 Pb 主要来源于老君山花岗岩, 基底片麻岩对 Pb 贡献很小; 片岩和大理岩分布分散, 明显偏离矿石矿物铅同位素组成, 基本对该矿床的铅来源没有贡献。结合前人对该矿床所做成岩-成矿年龄和近期本项目组所做 S-C-O 同位素分析结果, 认为该矿床与老君山花岗岩关系密切, 属于典型的夕卡岩矿床。

关键词: Pb 同位素; 矿化分带特征; 成矿金属来源; 都龙锡锌多金属矿床

中图分类号: P597; P618.2

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2015.03.005

作者简介: 何芳, 女, 1986年生, 硕士, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: hfhfx@163.com

Lead Isotope Compositions of Dulong Sn-Zn Polymetallic Deposit, Yunnan, China: Constraints on Ore-forming Metal Sources

HE Fang^{1,2}, ZHANG Qian¹, LIU Yu-ping¹, YE Lin¹, MIAO Ying-li³, WANG Da-peng¹,
SU Hang³, BAO Tan^{1,2}, WANG Xiao-juan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550180, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;
3. Hualian mineral exploration limited liability company, Qujing 655000, China)

Abstract: Dulong Sn-Zn Polymetallic Deposit, located in the county of Maguan, Yunnan Province, China, is the third largest Sn deposit in China. This paper briefly generalizes the metal mineralization zonation which behaviors both in horizontal and vertical directions as well as the typical character of the skarn deposit. Lead isotope compositions of mineral, feldspar, marble, schist and gneiss are analyzed, combined with the previous obtained Pb isotope compositions. Results show that lead isotope compositions of ore minerals have concentrated distribution with a uniform shallow source region, consistent with the lead isotope compositions of feldspar of magma, otherwise, they deviate from gneiss lead isotope compositions, indicating that Pb of the deposit mainly come from Laojunshan granite; schist and marble with scattered distribution deviate significantly from the ore minerals, suggesting that schist and marble nearly have no contribution to the lead source of the deposit. Combined with published diagenesis-mineralization age and S-C-O isotope

收稿日期: 2014-07-04

基金项目: 中国科学院 2009 年度“西部之光”项目 (批准号: 2009-039); 云南华联锌铜股份有限公司科研项目 (项目号: KY20120910); 矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群 (批准号: SKLOGD-ZY125-04)

* 通讯作者, E-mail: zhangqian@vip.gyig.ac.cn

compositions, we think that the deposit has a close relation with Laojunshan granite and belongs to skarn deposit.

Keywords: lead isotope; ore-forming metal sources; Dulong Sn-Zn polymetallic deposit

都龙锡锌多金属矿床位于云南省马关县境内，是南岭西段四大锡多金属矿床（个旧、大厂、白牛厂和都龙）之一。该矿床以锡、锌为主，伴生银、铟、镉、铜、铅、镓和锗等 20 余种有益组分，目前，累计已探明锡储量 0.33 Mt（平均质量分数为 0.56%）、锌储量 3.02 Mt（平均质量分数为 5.12%）、其中伴生铟约 6000 t，这些有用元素均达到超大型规模^[1]。

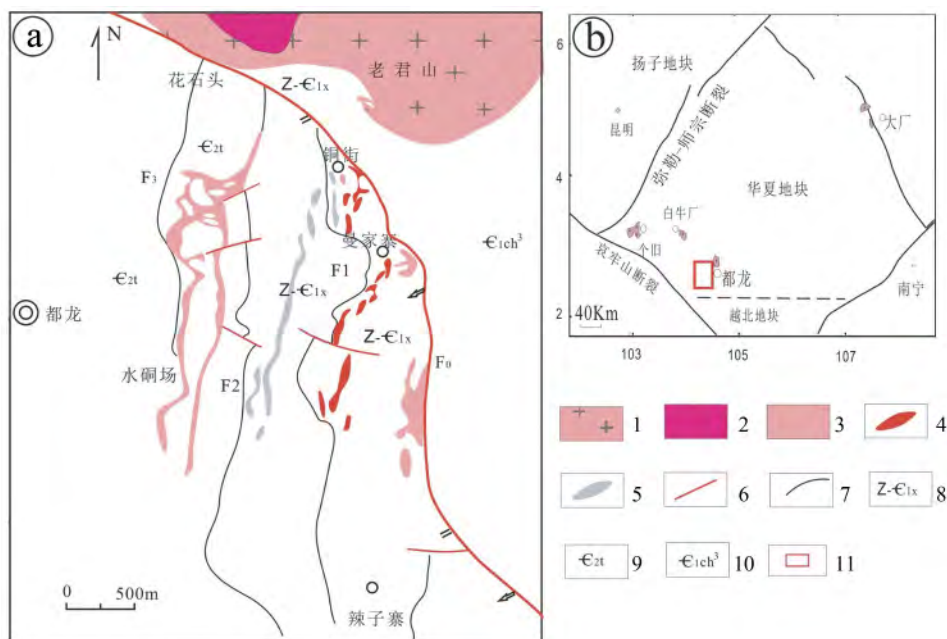
该矿床的开采历史长达百余年，从上世纪 80 年代以来在矿床地质及与该矿床有密切关系的老君山花岗岩体地球化学研究方面已积累了大量研究成果，极大地推动了矿区地质找矿勘探的深入。但由于本矿床成矿作用复杂，在矿床成因认识方面仍然存在较大分歧，岩浆热液成因^[2-4]、喷流沉积成因^[5-7]和热水沉积-区域变质-岩浆热液多成因^[8-10]三种观点相持不下，矿床成因的不确定直接制约了下一步找矿方向。成矿物质来源对矿床成因的确定是至关重要的。因此本文在总结该矿床金属矿化分带特征基础上，重点通过对该矿床不同硫化物、燕山期和加

里东期花岗岩中的长石、大理岩和片岩进行铅同位素分析以确定铅的来源。并结合前人所取得的成岩-成矿年龄和本课题组近期获得 S-C-O 同位素数据及野外地质现象观测，进一步探讨了该矿床的成因。

1 区域地质概况

都龙锡锌多金属矿床位于华夏地块西南缘，北以师宗弥勒断裂与扬子地块交接，西与印支地块毗邻（图 1）。区域发育大规模的北西向推覆构造^[11]，矿床正处于哀牢山—红河断裂和文山—麻栗坡断裂这两大北西向断层之间。区域岩浆活动频繁，南岭西段四大锡多金属矿床（个旧、大厂、白牛厂和都龙）依次伴有个旧岩体、龙箱盖岩体、薄竹山岩体和老君山岩体（图 1b），岩体年龄显示均为燕山晚期^[12-15]。

该区自新元古代至古生代经历了沉积-抬升-沉积的复杂演化过程，主要发育了震旦纪类复理石建造和古生代厚层泥沙质和碳酸盐建造^[16-17]。中生代以来在个旧、老君山和薄竹山等 3 个花岗岩体附近，分别发育了蒙自、文山和马关等 3 个伴随有火山活



1-老君山第一期花岗岩 $\gamma 5^{3a}$; 2-老君山第二期花岗岩 $\gamma 5^{3b}$; 3-老君山第三期花岗岩斑岩 $\gamma 5^{3c}$; 4, -矿体; 5-夕卡岩; 6-区域断层; 7-次断裂; 8-新寨岩组片岩夹大理岩及似层状夕卡岩; 9-寒武系田蓬组泥质碎屑碳酸盐岩; 10-寒武系冲庄组二云斜长片麻岩; 11-研究区

图 1 都龙锡锌多金属矿床地质简图

Fig.1. Geological sketch map for Dulong Sn-Zn Polymetallic Deposit.

动的中-新生代断陷盆地^[10]。围绕老君山花岗岩体, 各种矿产星罗棋布, 主要的有南秧田大型钨矿床、新寨大型锡矿床、大丫口祖母绿矿床和都龙超大型锡锌多金属矿床。

2 矿床地质特征

都龙锡锌多金属矿床从北至南包括铜街、曼家寨、辣子寨、五口碛和南当厂 5 个矿段^[16], 其中, 曼家寨达到超大型规模, 铜街为大型规模, 辣子寨、五口碛和南当厂为中型规模。矿区主要出露浅变质的新元古界新寨岩组片岩夹大理岩、中寒武统田蓬组 and 龙哈组泥质灰岩夹砂岩, 主要赋矿地层为新元古界新寨岩组片岩夹大理岩中的似层状夕卡岩 (图 1)。

矿区构造发育, 主要控矿构造首先为北西向马关-都龙区域断裂 (F0), 产状向西倾斜 35°~50°, 走向近南北, 比地层产状略陡, 该断裂在铜街-曼家寨转向为近南北, 一直延伸至越南境内; 其次是近南北向铜街-辣子寨断裂 (F1), 产状向西倾斜 40°~60°, 走向近南北向, 为该矿床最重要的控矿和容矿构造。分析钻孔资料发现, F0 断裂没有穿切进入隐伏的老君山花岗岩体, 从岩体与围岩接触带存在大规模的破碎带判断, 岩体侵入后 F0 的活动可能是沿接触带活动的。以 F1、F2、F3 等为主的近南北向断层, 均为顺层剥离断层, 与其伴随的派生顺层小断层非常发育, 可能是 F0 断层及隐伏岩体侵入形成的派生断裂, 也是控制区内小规模矿体的最主要断裂构造。矿化主要分布在 F0 西侧, 而 F0 东侧矿化明显变弱。

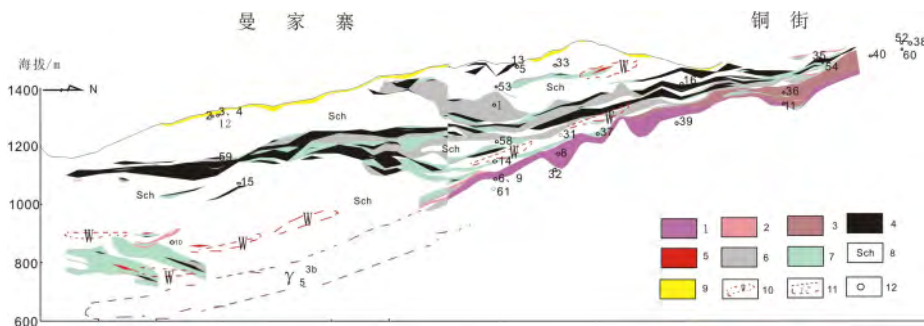
矿床北侧出露与该矿床矿化具密切关系的燕山晚期 S 型老君山花岗岩。老君山花岗岩主要由 γ_5^{3a} 、 γ_5^{3b} 和 γ_5^{3c} 三个亚期组成复式岩体^[10], 第一期 (γ_5^{3a})

为粗粒二云二长花岗岩, 占岩体面积约三分之二, 呈岩基侵入寒武系地层; 第二期 (γ_5^{3b}) 中细粒二云二长花岗岩, 呈岩株侵入第一期; 第三期 (γ_5^{3c}) 花岗斑岩, 呈岩脉状侵入第一、第二期或外接触带围岩中, 后者通常沿顺层断裂贯入。据钻孔资料揭露, 矿体下部出露有隐伏岩体, 为老君山花岗岩体的南延部分, 呈北浅南深的山脊状向南隐伏于该矿床深部 (图 2、3)。

在曼家寨东段有较好稳定出露, 主要以白钨矿石英碳酸盐 (细) 脉和网脉状产于隐伏花岗斑岩内接触带之硅化花岗 (斑) 岩、外接触带石榴石透辉石夕卡岩和大理岩 (少量片体都是沿顺层断裂贯入形成的, 矿体形态在宏观上给人一种层状矿体的假象, 因为矿体内各种矿物的交代与充填非常发育, 矿化与不同种类的夕卡岩化同时存在, 粒度粗大、交代强烈的夕卡岩矿物如阳起石、石榴石、透辉石和绿帘石等以及强烈的大理岩化很难与同生的热水喷流沉积成矿联系起来。

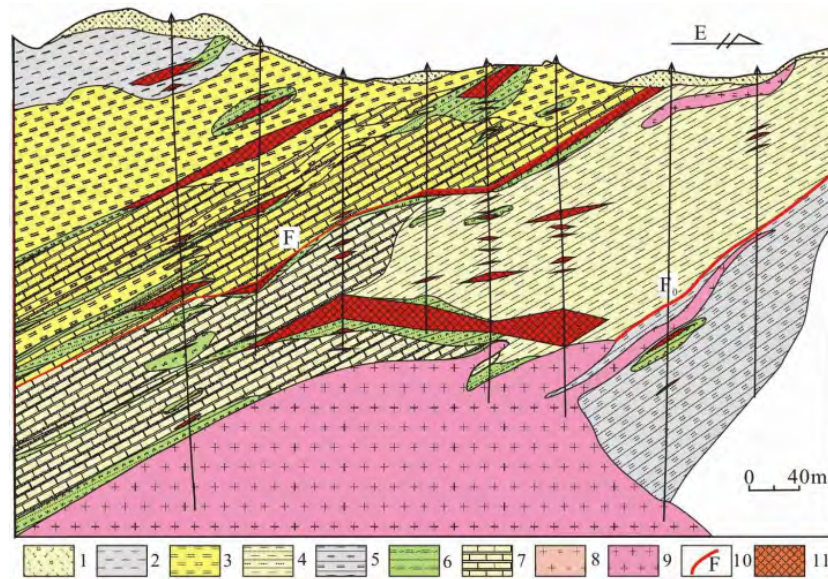
都龙锡锌多金属矿床矿物种类繁多, 矿石矿物主要以铁闪锌矿和锡石为主, 其次为磁铁矿、白钨矿、辉钼矿、黄铜矿、毒砂、磁黄铁矿、方铅矿和黄铁矿等, 据镜下特征和野外观察分析, 金属矿物依产出先后顺序主要分为氧化物阶段 (磁铁矿-白钨矿)、早期硫化物阶段 (石英-萤石-辉钼矿-黄铜矿-毒砂-磁黄铁矿) 和晚期硫化物阶段 (石英-方解石-萤石-闪锌矿-方铅矿-黄铁矿)。非金属矿物主要有石榴石、透辉石、阳起石、绿泥石、绿帘石、石英、萤石、方解石等。夕卡岩化现象普遍, 且与矿化关系密切 (图 2、3)。

都龙锡锌多金属矿床金属矿化具有明显的分带性, 这种分带性在水平方向和垂直方向都有体现, 距花岗岩由近而远, 矿物共生组合由白钨矿、磁铁



1-老君山第二期花岗岩 γ_5^{3b} ; 2-花岗斑岩 γ_5^{3c} ; 3-片麻岩; 4-矿体 (以 Sn、Zn 矿化为主); 5-W 矿体; 6-大理岩; 7-夕卡岩; 8-片岩; 9-残积层; 10-W 矿化示意图; 11-老君山第二期花岗岩 γ_5^{3b} 示意图; 12-表 1 中的采样位置 (本次研究分析)

图 2 铜街-曼家寨矿段剖面图
Fig. 2. Section of Tong Jie-Man jiazhai of Dulong Deposit.



1-坡积-残积层; 2-云母石英片岩; 3-二云母片岩; 4-大理岩; 5-石英云母片岩; 6-片麻岩; 7-夕卡岩; 8-花岗斑岩; 9-花岗岩; 10-断层; 11-矿体

图 3 都龙矿床曼家寨矿段 99 号勘探线剖面图

Fig.3. Section of the line 99 of Manjiazhai Ore Block in Dulong Deposit.

矿等高温组合向闪锌矿、方铅矿等中低温组合过渡, 如图 3。下文按垂直方向分将其为内带、中带和外带分别具体阐述:

内带: 主要成矿元素组合为 W-Fe-Sn, W 矿化主要产出在距底部隐伏岩体 50~100 m 的内接触带中, 岩) 裂隙中。磁铁矿主要在铜街地表和曼家寨最南端揭露最深的地表可见, 最新电子探针显示, 磁铁矿与白云石、蛇纹石和数量不等的锡石共生。锡石主要呈它形-半自形晶结构, 常以浸染状分布于闪锌矿、磁黄铁矿和绿泥石中, 偶见交代石榴石, 分布于后者边部。

中带: 主要成矿元素组合为 Cu-Mo-Zn, Cu 以黄铜矿形式常与闪锌矿形成黄铜矿的“病毒”结构, 主要分布于铜街和曼家寨东部。Mo 矿化出露较少, 一般见于钻孔深部靠近隐伏花岗岩上方石榴石透辉石夕卡岩中, 在构造滑动界面亦可见。闪锌矿为该矿床最广泛分布的矿物, 常呈块状、浸染状结构, 矿区最大矿体 13 号主要产出铁闪锌矿。

外带: Pb-Zn-Ag, 方铅矿在辣子寨有较多出露, 银常与铅相伴产出, 两者具正相关关系。

在水平分带方向上, 成矿元素分带大致特征自北向南依次为 Cu、Fe-Zn、W (集中于深部)、Sn-Pb、Ag。

3 铅同位素分析及结果

此次研究选取了矿石硫化物单矿物 16 件、花岗

(斑) 岩长石 14 件、基底片麻岩长石 1 件、大理岩 4 件和片岩 3 件, 共 38 件样品进行铅同位素组成分析。首先对样品破碎至 60 目以下, 常规重力法粗选, 然后在双目镜下挑纯至 98% 以上, 再用水清洗表面杂质 2 遍, 在无水乙醇中浸泡 20 分钟以上, 低温蒸干, 最后在玛瑙研钵中研磨至 200 目以下。

测试在国土资源部中南矿产资源监督检测中心完成, 使用仪器为固体质谱计 MAT261。样品在聚四氟乙烯 PFA 管形瓶中分解, 硫化物样品用 HCl+HNO₃ 分解, 分解完全后蒸发到近干燥并转化为 0.15 mol/L HCl+0.65 mol/L HBr 介质。在阴离子 Bio-RadAG 1×8 交换柱上分离, 用 1.0 mol/L HNO₃ 淋洗 Pb, 然后将溶液加热至干燥。闪锌矿样品在淋洗 Pb 前先用大量 0.15 mol/L HBr 溶液淋洗 Zn, 所有试剂都经过 2 次双瓶亚沸蒸馏, 分析结果见表 1, 本次分析的样品采样位置参考图 2。分析结果显示, 矿石矿物铅同位素组成 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb (16 件) 分别为 18.174~18.684、15.541~15.769、38.111~39.008; 老君山花岗(斑)岩长石铅同位素组成 (14 件) 分别为 18.264~18.776、15.622~15.713、38.014~39.044; 基底片麻岩长石铅同位素组成 (1 件) 分别为 18.523、15.743、38.174; 片岩全岩铅同位素组成 (3 件) 分别为 18.918~20.665、15.670~15.853、39.667~42.688; 大理岩全岩铅同位素组成 (4 件) 分别为 17.314~18.658、15.449~15.681、37.808~38.865。

4 铅的来源及矿床成因

4.1 矿石铅的来源

在对矿床成矿物质来源研究中, 铅同位素已普遍应用于金属, 甚至非金属矿床。其方法主要有模式年龄法、等时线年龄法、构造模式法、 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图解法和全方位对比法, 前人对比了以上方法的优缺点后认为全方位对比法具较高可靠性而逐渐被广泛认可和接受^[17-19]。对于都龙锡锌多金属矿床, 目前还无法直接确定某种金属元素的来源, 也不需要肯定成矿元素是不是来自地幔, 关键在于铅是否来自深部基底岩石(热水沉积来源), 或燕山期岩浆作用(岩浆热液来源), 或寒武系地层(沉积改造), 亦或来自各种铅的混合。因此, 利用矿区内各种地质单元铅同位素组成的对比可能是最有效的方法。

一般认为, 岩浆岩长石铅可近似代表岩浆铅同位素组成; 硫化物和长石中 U、Th 含量低, 当其形成后 U、Th 衰变产生的放射成因铅数量少, 对铅同位素组成的影响可以忽略。对于本次分析的围岩铅, 由于成矿年龄较新, 所产生的放射成因铅对铅同位素组成影响较小, 所以并未对其进行校正。

为了更全面地判断矿床铅的来源, 同时收集了笔者早期所做 6 件和前人的 29 件样品, 共 73 件样品的铅同位素组成分析结果列于表 1, 并投影于铅构造模式图^[20]如图 4。从整体上看, 本次 38 件样品的分析结果, 对应于早期不同岩(矿)石单元的分析结果基本上是一致的, 说明不同样品、不同时间和

不同仪器下的分析结果是可信的, 可以用来判断铅的来源。

数据显示, 矿石矿物(30 件)铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 18.286~18.6967、15.541~15.771 和 38.111~39.338, 老君山花岗(斑)岩长石(21 件)铅同位素组成分别为 18.264~18.662、15.637~15.738 和 38.014~39.187, 可以看出矿石与该期岩浆岩具有非常一致的铅同位素组成。在图 4a 和 4b 中, 二者具有一致的分布范围和变化趋势, 并且铅同位素组成投影于上地壳与造山带铅演化线附近, 说明该矿床的铅具有均一的较浅源区, 可能来自老君山花岗岩岩浆分异作用。将矿石铅和岩浆岩长石铅样品投入图 4c 中, 部分矿石的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值略低于长石, 结合图 4a, 矿石中一部分铅有可能来自灰岩向大理岩转化及夕卡岩化过程中(泥质)释放出来的铅。但是从图 4d 来看, 矿石与岩浆岩长石具有几乎相同的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值。由此判断, 图 4a 中二者的差异极有可能是部分矿石样品 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的分析误差造成的, 众所周知, 由于样品中 ^{207}Pb 含量低, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值是不容易测准的。明确了这一点, 我们可以肯定地认为, 该矿床的铅主要来自于岩浆作用。

基底片麻岩长石(6 件)的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 18.434~19.119、15.644~15.743 和 38.174~38.921, 与矿石矿物铅同位素组成有一定偏离, 在图 4 中, 分布范围及变化趋势与矿石铅不同, 暗示矿石铅来自基底岩石的可能性不大。

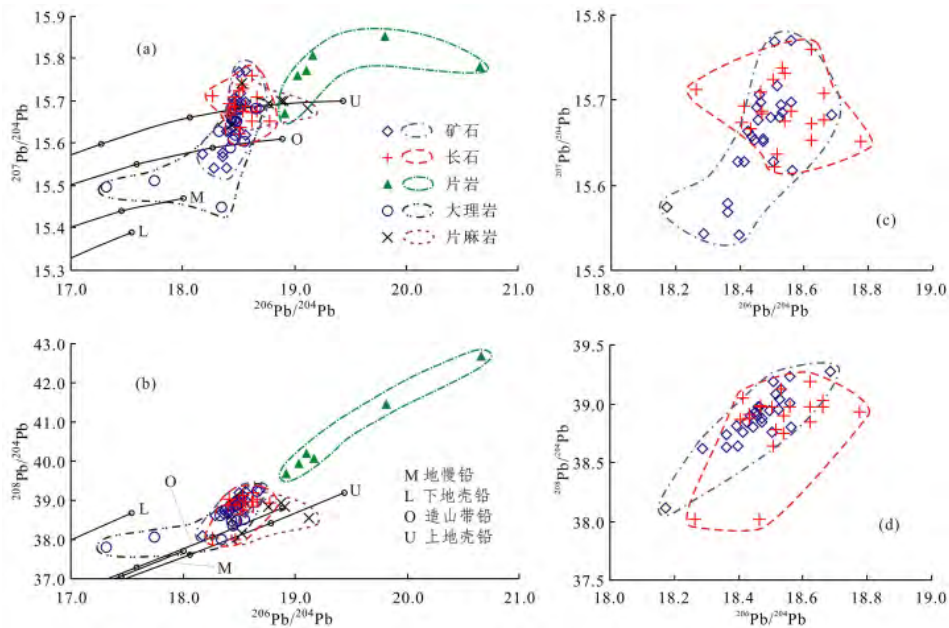


图 4 都龙锡锌多金属矿床铅同位素组成
Fig.4. Plots of Lead isotope composition for Dulong Deposit.

表 1 都龙锡锌多金属矿床铅同位素组成

Table 1. Lead isotope composition of Dulong Sn-Zn Polymetallic Deposit

序号	样品号	矿物名称	采样位置	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
1	ZK67031-4	毒砂	钻孔 67031-160m	18.452±0.003	15.692±0.003	38.931±0.006
2	DL12-100	闪锌矿	曼家寨南端	18.436±0.004	15.658±0.003	38.900±0.016
3	DL12-89-3	闪锌矿	曼家寨南端	18.460±0.003	15.706±0.002	38.970±0.006
4	DL12-89-3	方铅矿	曼家寨南端	18.427±0.002	15.664±0.002	38.845±0.005
5	DL12-525	方铅矿	曼家寨中端	18.508±0.003	15.769±0.003	39.187±0.007
6	ZK67031-13	磁黄铁矿	钻孔 67031-605m	18.684±0.002	15.682±0.002	39.274±0.005
7	DL12-713	磁黄铁矿	曼家寨地表	18.363±0.007	15.578±0.004	38.630±0.014
8	ZK79021-2	黄铁矿	钻孔 79021-470m	18.561±0.006	15.698±0.003	39.008±0.008
9	ZK67031-13	黄铁矿	钻孔 67031-605m	18.174±0.004	15.574±0.002	38.111±0.006
10	ZK19021-37	黄铁矿	钻孔 19021-550m	18.399±0.008	15.541±0.006	38.640±0.014
11	ZK123037-A	黄铁矿	钻孔 123037-400m	18.364±0.003	15.569±0.006	38.741±0.008
12	DL12-89-1	黄铁矿	曼家寨南端	18.456±0.003	15.676±0.004	38.898±0.011
13	DL12-539	黄铁矿	曼家寨中端	18.394±0.005	15.627±0.004	38.807±0.010
14	ZK67031-29	黄铁矿	钻孔 67031-508m	18.286±0.006	15.543±0.006	38.616±0.012
15	ZK31021-61	黄铁矿	钻孔 31021-361m	18.413±0.006	15.627±0.005	38.755±0.015
16	ZK101027-235	黄铁矿	钻孔 101027-235m	18.464±0.004	15.698±0.004	38.974±0.011
17	MJ-65	闪锌矿	曼家寨矿石	18.444	15.653	38.806
18	MJ-68	闪锌矿	曼家寨矿石	18.505	15.627	38.759
19	MJ-73	闪锌矿	曼家寨矿石	18.564	15.618	38.798
20	MJ-65	闪锌矿	曼家寨矿石	18.444	15.653	38.806
21	MJ-68	闪锌矿	曼家寨矿石	18.505	15.627	38.759
22	MJ-73	闪锌矿	曼家寨矿石	18.564	15.618	38.798
23	LDL-76	磁黄铁矿	矿石	18.524	15.679	38.951
24	LDL-76	铁闪锌矿	矿石	18.527	15.694	39.043
25	LDL-90	铁闪锌矿	矿石	18.533	15.685	39.126
26	LDL-95	铁闪锌矿	矿石	18.474	15.652	38.848
27	LDL-25	黄铜矿	矿石	18.56	15.771	39.226
28	LDL-102	闪锌矿	矿石	18.515	15.717	39.082
29	LDL-104	方铅矿	矿石	18.473	15.655	38.873
30	LDL-105	黄铁矿	矿石	18.495	15.679	38.946
31	ZK79021-345	长石	斑岩, 79021-345m	18.662±0.001	15.677±0.004	38.978±0.010
32	MG12-01	长石	花岗岩, 79033-741m	18.432±0.005	15.666±0.004	38.907±0.007
33	DL12-171	长石	斑岩, 曼家寨最北端	18.412±0.005	15.693±0.002	39.044±0.006
34	DL12-391	长石	斑岩, 铜街地表	18.469±0.001	15.687±0.001	38.986±0.003
35	ZK129023-2	长石	花岗岩, 129023	18.621±0.004	15.673±0.003	38.977±0.010
36	ZK123037-263	长石	斑岩, 123037-263m	18.560±0.004	15.687±0.003	38.972±0.005
37	ZK87033-51	长石	斑岩, 87033-354m	18.509±0.002	15.622±0.002	38.638±0.012
38	ZK145013	长石	花岗岩, 钻孔 145013	18.467±0.005	15.684±0.004	38.971±0.010
39	ZK101033-389	长石	花岗岩, 101033-389m	18.623±0.006	15.653±0.005	38.843±0.015
40	ZK135031-127	长石	斑岩, 135031-127m	18.776±0.005	15.652±0.004	38.929±0.005
41	DL12-378	长石	斑岩, 铜街地表	18.465±0.004	15.710±0.004	38.014±0.008
42	DL12-370	长石	斑岩, 铜街地表	18.433±0.005	15.666±0.007	38.879±0.015
43	DL12-386	长石	花岗岩, 老君山主峰	18.505±0.005	15.724±0.005	38.974±0.015
44	DL12-375	长石	斑岩, 铜街地表	18.264±0.005	15.713±0.003	38.020±0.006
45	HST-1	长石	花石头花岗岩	18.538	15.731	38.749
46	HST-3	长石	花石头花岗岩	18.514	15.637	38.777
47	LDL-57	长石	花岗岩	18.404	15.674	38.869
48	LDL-56	长石	花岗岩	18.533	15.738	39.127
49	LJS-5	长石	花岗岩	18.662	15.708	39.025
50	YX-4	长石	花岗岩	18.623	15.76	39.187
51	ZK83049-56	长石	花岗岩斑岩	18.538	15.675	38.902
52	ZK141015-K13	片岩	钻孔 141015-95.3m	19.169±0.006	15.807±0.005	40.061±0.015
53	ZK6804-K34	片岩	6804-	19.814±0.005	15.853±0.004	41.463±0.010
54	ZK129023-K4	片岩	129023-	19.105±0.004	15.772±0.002	40.198±0.007

续表 1

55	ZP-8	片岩	全岩	19.032	15.76	39.931
56	ZP-29	片岩	全岩	20.665	15.782	42.688
57	P13-1	片岩	全岩	18.918	15.67	39.667
58	ZK6804-K31	大理岩	钻孔 6804	18.476±0.003	15.619±0.005	38.499±0.009
59	ZK27021-K33	大理岩	钻孔 27021	18.547±0.004	15.605±0.004	38.507±0.006
60	ZK141015-K20	大理岩	141015-133.7m	18.450±0.002	15.607±0.004	38.367±0.005
61	ZK6804-K71	大理岩	钻孔 6804	18.433±0.004	15.589±0.004	38.489±0.005
62	ZP-21	大理岩	全岩	18.33	15.627	38.605
63	P12-1	大理岩	全岩	17.744	15.513	38.057
64	P12-2	大理岩	全岩	18.658	15.681	39.219
65	P13-2	大理岩	全岩	17.314	15.496	37.808
66	LDL-82	大理岩	全岩	18.349	15.449	38.016
67	LDL-103	大理岩	全岩	18.481	15.653	38.865
68	DL12-739	长石	片麻岩	18.525±0.001	15.743±0.002	38.174±0.003
69	JZ-38	长石	都龙片麻岩	19.119	15.681	38.554
70	JZ-39	长石	眼球状片麻岩	18.905	15.701	38.828
71	JZ-40	长石	眼球状片麻岩	18.879	15.700	38.921
72	Stp-1	长石	花岗片麻岩	18.763	15.693	38.832
73	DLG-30	长石	花岗片麻岩	18.434	15.644	38.514

注: ① 序号 20-30、45-51、55-57、62-67 和 72-73 来自文献[9], 序号 17-19、69-71 为作者早期未发表数据, 其余数据均为本次研究分析结果;

② 某些早期样品未给出采样地点和分析误差。

大理岩全岩(10 件)的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 17.314~18.658、15.449~15.681 和 37.808~38.865, 部分样品的铅同位素比值明显低于矿石。片岩全岩(6 件)的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 18.918~20.665、15.670~15.853、39.667~42.688, 明显高于矿石的相应比值。在图 4 中, 大理岩与片岩的铅同位素组成分布范围及变化趋势与矿石完全不同, 与矿石相比, 大理岩中放射成因铅较低, 而片岩中放射成因铅较高, 如果大理岩的低放射成因铅或片岩中的高放射成因铅大量进入矿石, 必然引起矿石铅的变化, 由此可以判断以大理岩和片岩为代表的围岩没有对矿床提供铅。部分大理岩具有与矿石一致的铅同位素组成, 可能有 2 个原因, 其一是大理岩的铅同位素变化范围就是如此, 其二是这些样品取自钻孔中, 距离岩体和矿体较近, 除大理岩化外, 直观上看似没有发生蚀变及矿化, 但仍然不能排除大理岩化过程中岩浆热液扩散交代的影响。

根据上述讨论, 我们认为, 都龙锡锌多金属矿床的铅主要来自燕山期花岗岩浆的结晶分异, 这一认识从矿质来源方面基本上排除了该矿床属于热水喷流沉积成因的观点。当然, 对于该矿床, 除铅以外的其他金属元素如锡、锌、铜、铁等, 没有直接的方法来确定它们的来源。因此, 下文我们将提供其他方面的证据。

4.2 矿床成因探讨

从总体上来看, 似层状夕卡岩型矿体与地层产

状基本一致, 以及局部地段鲕状黄铁矿的存在被持喷流沉积观点的学者当作喷流沉积成因的有力证据。而我们所观察到的野外地质现象和所获实验分析数据结果与上述观点不符。受益于该矿床露天开采, 各种矿体和地质现象揭露较全, 所以能细致观察各种地质现象。强烈的大理岩化以及夕卡岩与大理岩甚至片岩错综复杂的交代关系普遍(图 5a、b), 似层状矿体大多与剥离断层相伴产出, 局部发育揉皱现象(图 5c)。同时可以看到大理岩中穿插很多碳酸盐网脉(图 5c), 靠近矿体的大理岩多呈现“漂白”现象。此外, 在某些地段如曼家寨南端, 矿体明显切穿围岩(图 5d)。因此这些似层状矿体应该是底部岩浆热液沿隐伏岩体上拱产生的断裂构造运移, 在顺层断裂充填交代, 并与碳酸盐岩地层相互作用形成夕卡岩型矿体。

都龙锡锌多金属矿床矿石矿物 Pb 同位素组成与花岗岩长石 Pb 同位素组成范围一致, 表明铅与老君山花岗质岩浆具密切关系。S 同位素组成主要集中在-1.27‰~4.85‰, 均值 2.1‰, 具岩浆硫特性; C-O 同位素组成集中在-6‰~-8‰之间, 均值-6.57‰^[21]。Pb-S-C-O 同位素组成信息一致支持都龙锡锌多金属矿床的成矿物质主要来源于燕山晚期老君山花岗质岩浆。前人测得该矿床锡石年龄为(82.0±9.6) Ma, 隐伏花岗岩锆石年龄为(92.9±1.9) Ma^[10]; 辉钼矿模式年龄为(75.04±1.78)~(79.16±2.43) Ma, 老君山花岗岩年龄为(84.3±2.2)~(91.7±1.8) Ma^[22]; 本课题组最新获得的锡石 LA-

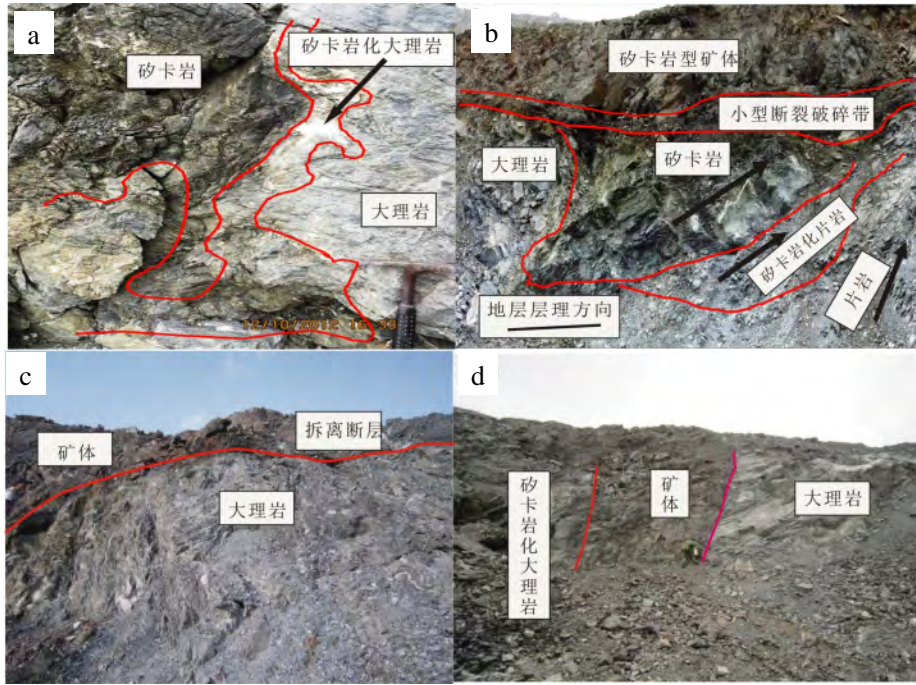


图 5 都龙锡锌多金属矿床野外地质现象照片
Fig. 5. Geological phenomena photo for Dulong Deposit.

MC-ICP-MS 年龄为 $87.2 \pm 3.9 \sim 89.2 \pm 4.1$ Ma。这些成矿年龄与老君山花岗岩年龄均在误差范围内一致，表明锡矿化与老君山岩体关系密切，属于岩浆热液成因矿床。

华南地区中生代存在岩石圈多阶段伸展^[23-27]，与大规模成矿作用具密切关系，特别是在晚白垩纪，为华南地区中生代成矿的高峰期。都龙锡锌多金属矿床形成于这一地质动力背景下，产于都龙-Song Chay 变质穹窿体和老君山变质核杂岩中。同时，个旧、白牛厂和大厂矿床的成岩-成矿年龄显示与都龙锡锌多金属矿床一致，其中，个旧矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 83.4 ± 2.1 Ma^[28]与成矿有关的花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $77.4 \pm 0.85 \sim 85.0 \pm 0.85$ Ma^[12]。李开文等^[15]获得白牛厂矿床锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄为 87.4 ± 3.7 Ma 和 88.4 ± 4.3 Ma，程彦博等^[14]获得薄竹山花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $86.51 \sim 87.83$ Ma；梁婷等^[13]系统测定了大厂矿田中部龙箱盖岩体锆石 U-Pb 年龄，结果显示岩体经历了 $(103.8 \sim 102)$ Ma、 $(96.6 \sim 93.86)$ Ma 和 $(90.1 \sim 85.1)$ Ma 三期活动，均属于燕山晚期。而大厂矿床矿石中石英等时线年龄为 $95.37 \pm 0.45 \sim 94.56 \pm 0.45$ Ma^[29]，数据均表明矿床成岩成矿年龄在误差范围内一致，矿体与岩体具

密切关系。

因此，我们认为都龙锡锌多金属矿床，与个旧、大厂和白牛厂矿床都形成于同一地质背景下和同一时期，即在华南岩石圈伸展这一地质动力背景下，岩浆热液沿断裂向上运移，并与围岩发生交代反应，最终在有利部位成矿。

5 结论

(1) 都龙锡锌多金属矿床具有典型的夕卡岩矿床金属矿化分带特征：内带为高温组合 W-Fe-Sn，中带为中温组合 Cu-Mo-Zn，而外带为低温组合 Pb-Zn-Ag；

(2) Pb 同位素组成分析结果表明，矿石矿物铅同位素组成分布均一，与老君山花岗岩长石铅一致，说明都龙锡锌多金属矿床的 Pb 来源于老君山花岗岩的分异作用；

(3) 都龙锡锌多金属矿床形成于老君山花岗岩西南缘，是燕山晚期华南地区伸展背景下，岩浆热液沿断裂运移并与围岩反应交代，最终成矿。

致谢：云南华联锌铜股份有限公司李廷俊工程师等人提供资料和野外帮助，中南矿产资源监督检测中心帮助完成 Pb 同位素实验分析，在此一并致谢！

参 考 文 献:

- [1] 《中国矿床发现史-云南卷》编委会. 中国矿床发现史-云南卷[M]. 北京:地质出版社,1996.
- [2] 宋焕斌. 老君山含锡花岗岩的特征及其成因[J]. 矿产与地质,1988,2:45-52.
- [3] 宋焕斌. 云南东南部都龙锡石-硫化物型矿床的成矿特征[J]. 矿床地质,1989,8:29-38.
- [4] 张洪培,刘继顺,李晓波,章霞林,等. 滇东南花岗岩与锡、银、铜、铅、锌多金属矿床的成因关系[J]. 地质找矿论丛,2006,21:87-90.
- [5] 周建平,徐克勤,华仁民,赵懿英,等. 滇东南锡多金属矿床成因商榷[J]. 云南地质,1997,16(4):309-349.
- [6] 周建平,徐克勤. 滇东南喷流沉积块状硫化物特征与矿床成因[J]. 矿物学报,1998,2:158-168.
- [7] 贾福聚,秦德先,张文源,伍伟,杨晓坤,等. 云南都龙锡锌多金属矿床矿化趋势分析及成矿规律[J]. 有色金属,2010,62:84-87.
- [8] 刘玉平. 一个受后期改造和热液叠加的块状硫化物矿床—都龙超大型锡锌多金属矿床[J]. 矿物岩石地球化学通报,1998,17(1):22-24.
- [9] 刘玉平,李朝阳,谷团,王金良,等. 都龙锡锌多金属矿床成矿物质来源的同位素示踪[J]. 地质地球化学,2000,28:75-81.
- [10] 刘玉平,李正祥,李蕙民,郭利果,徐伟,叶霖,李朝阳,皮道会,等. 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[J]. 岩石学报,2007,5:967-976.
- [11] 颜丹平,周美夫,王焰,汪昌亮,赵太平,等. 都龙-Song Chay 变质穹窿体变形与构造年代—南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2005,30(4):403-412.
- [12] Cheng Yanbo, Mao Jingwen. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan province, SW China: Constraints on their petrogenesis and tectonic setting [J]. *Lithos*, 2010, 120: 258-276.
- [13] 梁婷,王登红,侯可军,李华芹,黄慧明,王东明,等. 广西大厂龙箱盖复式岩体的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报,2011,27(6):1624-1636.
- [14] 程彦博,毛景文,陈小林,李伟,等. 滇东南薄竹山花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2010,40(4):869-878.
- [15] 李开文,张乾,王大鹏,蔡伊,张永斌,等. 滇东南白牛厂多金属矿床铅同位素组成及铅来源新认识[J]. 地球化学,2013,42(2):116-130.
- [16] 毛圣洁. 云南都龙锡锌多金属矿工业指标研究[J]. 有色金属矿产与勘查,1992,1:179-184.
- [17] 张乾,潘家永,邵树勋,等. 中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J]. 地球化学,2000,29(3):231-238.
- [18] 吴开兴,胡瑞忠,毕献武,彭建堂,唐群力,等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学,2002,30(3):73-81.
- [19] 张建芳,张刚阳. 铅同位素在矿床研究和找矿勘探中的应用综述[J]. 地质找矿论丛,2009,24(4):322-348.
- [20] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75: 135-162.
- [21] 何芳,张乾,王大鹏,刘玉平,叶霖,鲍谈,王小娟,廖应理,张世奎,苏航,韦文彪. 云南都龙锡锌多金属矿床成矿物质来源—硫-碳-氧稳定同位素证据[J]. 矿物岩石地球化学通报,2014,33(6):900-907.
- [22] 李进文,裴荣富,王永磊,余宏全,丰成友,郭志军,王浩琳,徐可,等. 云南都龙锡锌矿区同位素年代学研究[J]. 矿床地质,2013,32(4):767-782.
- [23] Glider S A, Gill J, Coe R S, Zhao Xixi, Liu Zhongwei, Wang Genxian, Yuan Kuirong, Liu Wenlong, Kuang Guodun, Wu Haoruo. Journal of Geophysical Research [J]. *Tectonophysics*, 1996, 101(B7): 16137-16154.
- [24] Chen Jiangfeng, Jahn Bor-ming. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence [J]. *Tectonophysics*, 1998, 284: 101-133.
- [25] Hong Dawei, Xie Xilin, Zhang Jisheng. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny [J]. *Resource Geology*, 1998, 48(4): 251-263.
- [26] 毛景文,谢桂青,李晓峰,张长青,梅燕雄,等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘,2004,11(1):46-55.
- [27] 华仁民,陈佩忍,张文兰,陆建军,等. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用[J]. 矿床地质,2005,24(2):99-107.
- [28] 杨宗喜,毛景文,陈懋弘,童祥,武俊德,程彦博,赵海杰,等. 云南个旧卡房夕卡岩型铜(锡)矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报,2008,24(8):1937-1944.
- [29] 王登红,陈毓川,陈文,桑海清,李华芹,路远发,陈开礼,林枝茂,等. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代[J]. 地质学报,2004,78(1):132-139.