

# 哀牢山成矿带壳幔相互作用与金成矿关系探讨

## ——以元阳大坪金矿床为例\*

袁士松<sup>1,2</sup>, 葛良胜<sup>2</sup>, 路彦明<sup>2</sup>, 郭晓东<sup>1,2</sup>, 王美娟<sup>2</sup>, 王治华<sup>1,2</sup>, 邹依林<sup>1,2</sup>

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国人民武装警察部队黄金地质研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘 要** 哀牢山成矿带位于云南省中南部, 带内相续发现了墨江金厂、镇沅老王寨和元阳大坪等一批大型-超大型金多金属矿床。滇西南地区的莫霍面等深度特征、大陆地温梯度和大地热流高异常特征以及地球深层次结构特征, 一致表明哀牢山地区在新生代处于强烈的壳幔相互作用时期。以大坪超大型金矿床同位素组成为例开展了示踪学研究, 结果表明, 成矿物质及成矿流体均以上地幔或下地壳来源为主, 成矿过程中有少量地壳浅部的大气饱和水、岩浆水或它们的混合流体的加入。区域地球物理场特征及同位素示踪学研究一致表明, 在哀牢山成矿带内矿床形成过程中, 伴随有强烈的深部岩浆活动, 壳幔相互作用对该地区矿床的形成有重要贡献。

**关键词** 地质学; 壳幔相互作用; 哀牢山成矿带; 超大型矿床; 大坪金矿; 云南

**中图分类号**: P618.51

**文献标志码**: A

## Relationship between crust-mantle reaction and gold mineralization in Ailaoshan metallogenic belt: A case study of Daping gold deposit in Yuanyang

YUAN ShiSong<sup>1,2</sup>, GE LiangSheng<sup>2</sup>, LU YanMing<sup>2</sup>, GUO XiaoDong<sup>1,2</sup>, WANG MeiJuan<sup>2</sup>,  
WANG ZhiHua<sup>1,2</sup> and ZOU YiLin<sup>1,2</sup>

(1 School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Gold Geological  
Institute of CAPF, Langfang 065000, Hebei, China)

### Abstract

The Ailaoshan metallogenic belt is located in the middle-south part of Yunnan Province, where there are several large-superlarge gold-polymetallic deposits such as Jinchang in Mojiang, Laowangzhai in Zhenyuan and Daping in Yuanyang. Regional geophysical characteristics show that the NW-striking Ailaoshan metallogenic belt has a complicated crust-mantle structure. The Moho discontinuity isobath features reveal that the crust in the northeast is thicker than that in the southwest and represents a mantle-slope on the whole. Regional studies of the seismic wave velocity of the lower crust and the upper mantle indicate that there exists a large-area low-velocity anomalous belt in southwest Yunnan Province, which perhaps has relationship with the thermal dynamical effect caused by partial melt of the lower crust materials resulting from the uplift of the upper mantle materials in the crust-mantle boundary. Such a phenomenon also implies that there once occurred a strong crust-mantle reaction in the Ailaoshan metallogenic belt. The high anomalous features of the continental geothermal gradient and the terrestrial heat flow demonstrate that the metallogenic belt has characteristics of high-temperature and low-pressure mantle slope, which might be attributed to the heat flow uplift caused by intense crust-mantle reaction at depth. Detailed isotope studies of the Daping superlarge gold-polymetallic deposit shows that the main source of the ore-

\* 本文得到国家“十一·五”科技支撑项目(编号:2006BAB01B10)国家重点基础研究发展计划(编号:2009CB42100)的联合资助  
第一作者简介 袁士松,男,1977年生,工程师,在读硕士生,主要从事金矿地质研究工作。Email:yuan496111@yahoo.com.cn  
收稿日期 2009-04-17;改回日期 2009-11-24。许德焕编辑。

forming fluid was deep crust-mantle mixed fluid rather than gas-saturation water, magmatic water or their mixed water in the upper crust. The coherence between regional geophysical and isotope characteristics shows that the ore-forming progress was accompanied by the strong deep magmatic activity in the Ailaoshan metallogenic belt, and that the crust-mantle reaction made an important contribution to the mineralization in Ailaoshan area.

**Key words:** geology, crust-mantle reaction, Ailaoshan metallogenic belt, superlarge deposit, Daping gold deposit, Yunnan Province

近年来,哀牢山成矿带已成为矿床学研究的“热点”地区之一,但研究工作主要集中于矿床本身,而对区域深部地质作用在矿床形成中的影响则研究得较少。随着中国国民经济的发展,哀牢山成矿带深部地质作用对区内成岩成矿作用的影响已引起了一些学者的注意(曹显光等,2001,2005;葛良胜等,2009)。

目前,关于哀牢山成矿带内金成矿流体的来源分歧较大。部分学者认为,成矿流体以岩浆水为主,或成矿早期以岩浆水为主,成矿晚期有大气降水的加入(徐研非,1989;金世昌等,1994;韩润生等,1997);另一部分学者则认为,成矿流体来源于地球深部(毕献武等,1997;胡瑞忠等,1999;何明友等,1997;葛良胜等,2007a)。近年来,越来越多的资料显示出深部流体参与了哀牢山成矿带的成矿过程(孙晓明等,2006;2007)。通常研究成矿流体的方法是对矿石中透明矿物内的流体包裹体进行测定,获得成矿的物理化学条件及成矿流体的基本组成。此外,也可通过对成矿流体和相关矿物进行稳定同位素(如氢、氧、碳、硫、铅)和惰性气体同位素的测定来探讨成矿物质的来源。本次工作选择该成矿带内大坪金矿床进行了碳、氢、氧、硫、铅和铍同位素研究。本文基于区域地质、地球物理场特征的分析,通过大坪金矿床同位素示踪学研究,探讨了哀牢山成矿带内壳幔相互作用与金成矿作用的关系。

## 1 区域地质-地球物理场特征

哀牢山成矿带位于印支板块与欧亚板块两大构造单元的结合部位,主要受哀牢山-红河超岩石圈深断裂带的控制,元阳大坪超大型金矿床即位于其南段的西南侧,由NW向转变为NW向的转折部位(图1)。

诸多学者对哀牢山-红河断裂带构造运动学的特征开展了广泛而深入的研究(Tapponnier et al., 1990; Chun et al., 1998; 李齐等, 2000)。研究结果表明,哀牢山-红河断裂带左旋走滑的距离可达数百公里,吸收了印支及亚洲大陆10%~25%的地壳缩短量,其东南延伸部分可能导致了南中国海的扩张,沿着云南的雪山山、点苍山、哀牢山和越南的象背山形成了长约900 km、宽10~20 km的变质岩带。胥颐等(2003)认为,这种大规模的滑移不仅体现在浅表层的构造变形,同样也造成了岩石圈结构的变异,并且与地幔上涌引起的壳幔相互作用的热流有关。人工地震测深研究(胡鸿翔等,1986; 1996; 阙荣举等,1986; 林中洋等,1993)表明,总体上看,云南西部的地壳具有清楚的三层结构与两层结构并存的特征,且

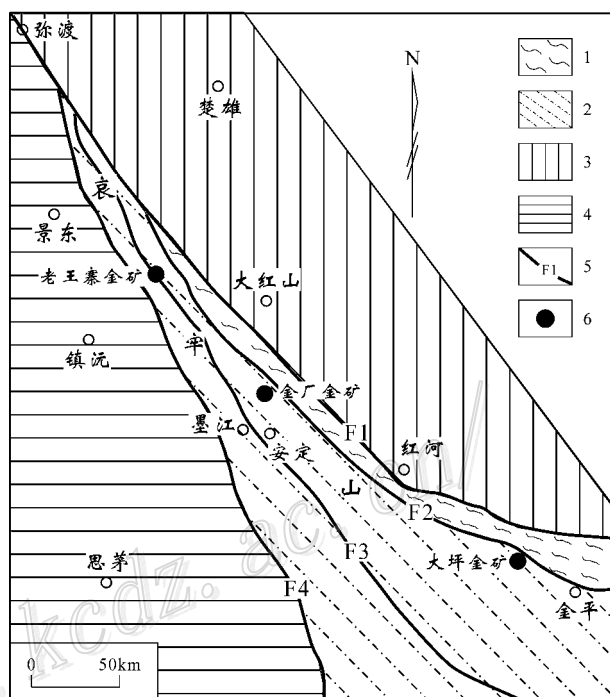


图1 哀牢山成矿带区域地质简图(据胡瑞忠等,1998;胥颐等,2003修改)

1—哀牢山深变质岩;2—哀牢山浅变质岩;3—扬子地块;4—中甸地块;5—深大断裂:F1—红河深大断裂,F2—哀牢山深大断裂,F3—九甲-安定深大断裂,F4—阿墨江深大断裂;6—金矿床

Fig. 1 Geological sketch map of the Ailaoshan metallogenic belt(modified after Hu et al., 1998; Xu et al., 2003)

1—Ailaoshan hypometamorphic rocks; 2—Ailaoshan epimetamorphic rocks; 3—Yangtze craton; 4—Zhongdian craton; 5—Deep fault: F1—Honghe deep fault, F2—Ailaoshan deep fault, F3—Jiujia-Anding deep fault, F4—Amojiang deep fault; 6—Gold deposit

其厚度具有明显的差异。人工地震剖面研究结果以及重力场反演计算的莫霍面等深度图(曹显光等,2001)表明,云南的上地幔顶界南浅北深,南部深度平均约38 km,向北渐增至58 km;东西方向上的深度也具有明显的差异,以哀牢山-红河断裂带为界,南西侧的深度比北东侧小5~10 km,思茅地块的约为38 km,哀牢山以东则增至45~48 km。利用接收函数求得红河断裂带西南侧的地壳平均厚约36~37 km,而其东北侧约为40~42 km(徐鸣洁等,2005)。莫霍面深度特征揭示了哀牢山地区可能为一慢坡带,并且沿元阳—墨江—镇沅为

一明显的NW向莫霍面隆起带,该隆起带与哀牢山成矿带的位置基本吻合,该成矿带内的矿床多分布于该隆起带的边缘。

胥颐等(2003)利用地震测深资料精细反演了云南的深部地球物理特征,并给出了滇西南地区的地壳和上地幔地震波速度扰动图像。其研究结果表明,滇西南地区的地壳内部存在着物质状态差异,其突出特点是地壳内部及壳幔之间存在着不同规模的低速带或低速区,具体表现为:①上、中地壳,沿哀牢山-红河断裂带呈现为带状的高速异常,该异常带的展布方向与哀牢山-红河断裂带的走向基本一致,其东、西两侧均为低速异常,形成了明显的速度差异;②下地壳,上、中地壳的高速异常带消失,取而代之的是跨越哀牢山-红河断裂带的大面积低速异常带,据前所述,哀牢山-红河一带的地壳厚度为36~48 km,接近该地区的莫霍面深度,因此,该异常低速层可能与壳-幔边界的热动力状况有关,是红河断裂附近存在的壳幔过渡带(钟大赉等,2000;Bai et al.,2003;黄金莉等,2003;胡鸿翔等,1986)。一般认为,简单的韧性剪切断裂不足以在中、下地壳产生700℃左右的高温,势必有地幔岩浆流体的侵入并造成下地壳的局部熔融(胥颐等,2003)。也就是说,这一低速区应该是下地壳岩石局部熔融的反映,由于壳幔相互作用而导致地幔物质的加入,因而表现出壳幔过渡带的特征;③上地幔,在71~120 km深度上,哀牢山-红河断裂带东、西两侧的速度差异很明显,其东侧除了少数地区出现局部低速异常之外,总体上平均速度偏高,显示出扬子地块岩石圈地幔的稳定性质,该断裂带的西侧则以低速异常为主,一方面反映出断裂带东侧的扬子地块西南缘岩石圈结构稳定、地幔活动十分弱的特征,另一方面说明断裂带西侧壳幔相互作用十分强烈;至171 km深度处,速度结构有明显的变化,哀牢山-红河断裂带的北段多为高速异常,仅局部表现为低速异常,反映出该地段的岩石圈受软流圈地幔上涌和热扰动影响而发生局部熔融,故表现出相对低速的特征,而该断裂带的南段则多为低速异常,反映出该地段存在大面积的软流圈地幔的上涌体。

袁玉松等(2006)讨论了中国南方地区现今的地热特征,结果显示,中国南方的地温梯度为7.82~162.5℃/km,平均24.1℃/km,其中,云南地区平均为30.2℃/km,是全地区最高的,大地热流变化于22~220 mW/m<sup>2</sup>之间,平均值为64.2 mW/m<sup>2</sup>,云南地区平均为76.7 mW/m<sup>2</sup>,也是全地区的最高值,结合云南的莫霍面深度特征,滇西南地区具有高温低压型幔坡区的特征,同时,地温梯度和大地热流在云南省境内的区域分布基本相似,而且这两者在云南省境内的两个极高值中心区域分别位于腾冲及大坪超大型矿床的正北方。袁玉松等(2006)进一步认为,对滇西南地区而言,印支板块对欧亚板块的碰撞作用是该地区高地热异常的深部地球动力学的浅表反映。滇西南地区靠近现代板块边界,新生代构造运动异常强烈,火山活动、地震活动频繁,软流圈隆起(其顶面埋深浅,为60~64 km),温度高(1460~1526℃),处于过热状态,是

形成该地区地热异常的原因。仅从板块碰撞、板块边界活动和高原隆升的角度去解释该地区的地热异常活动是不够的。结合上述区域地球物理场特征的分析,笔者认为,在滇西南地区,深部壳幔相互作用所导致的深部热流上涌才是该地区地温梯度及大地热流出现高异常的根本原因。

## 2 矿床地质概况

大坪矿区大面积出露桃家寨闪长岩体( $\delta_4$ 图2),周围分布有奥陶系、志留系、泥盆系,它们是一套碎屑沉积岩及碳酸盐岩地层。元古界哀牢山群片麻岩、变粒岩(Pta)出露于该矿区之北。矿区内构造发育,以NW向断裂为主,是主要的控矿构造,大量的含矿石英脉均赋存于其中。在该矿区内,自海西期以来,不同期次及类型的岩浆活动频繁,其中,海西期桃家寨闪长岩体是主要的赋矿围岩,主要金矿脉均产于其中;区内及外围还展布有大量的燕山期中酸性花岗岩(葛良胜等,2007a,2007b;金世昌等,1994)。矿区内的煌斑岩脉是哀牢山金矿带内普遍出现的新生代煌斑岩脉群的一部分,与矿脉具有相互穿插的现象(葛良胜等,2007a,2007b),并且其形成时代多为35 Ma左右(胡云中等,1995;王江海等,2001),与矿床的形成基本同时,表明两者具有一定的成因联系。

大坪矿床由近百条含金多金属石英脉组成,脉体大小不一,矿石矿物以黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、自然金为主,脉石矿物主要有石英、方解石、白云石、云母类等。围岩蚀变主要为硅化、黄铁矿化、绢云母化、钠长石化、绿泥石化及碳酸盐化等。Bi等(1996)利用电子自旋共振(ESR)法估算了大坪金矿床的成矿年龄,约为50 Ma,孙晓明等(2007)测得了大坪金矿床含金硫化物石英脉周围绢英岩化蚀变岩中绢云母的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年龄,为(33.76±0.65)Ma,表明大坪金矿床形成于喜马拉雅期。还有学者经研究认为,该矿床的形成具有多期叠加的特点(葛良胜等,2007a,2007b)。

## 3 样品采集及测试

大坪金矿床的矿石类型以金属硫化物-石英脉型为主,约占95%以上。因此,采集该矿床主成矿阶段石英脉型矿石的代表性样品进行了氢、氧、硫和铅同位素测试,对成矿后碳酸盐脉样品进行了碳、氧同位素测试,对新鲜的煌斑岩样品进行了铈-钕同位素测试。29件主成矿阶段的样品来自V3号脉地表及采矿坑道800和900矿段,11件成矿后碳酸盐样品及5件煌斑岩样品来自采矿坑道800矿段。在双目镜下挑选出单矿物石英、方铅矿、方解石、白云石和菱铁矿,纯度达99%以上,备用。

所有的样品均在国土资源部同位素地质开放重点实验室应用MAT-253EM型质谱计进行测试。碳酸盐样品的处理

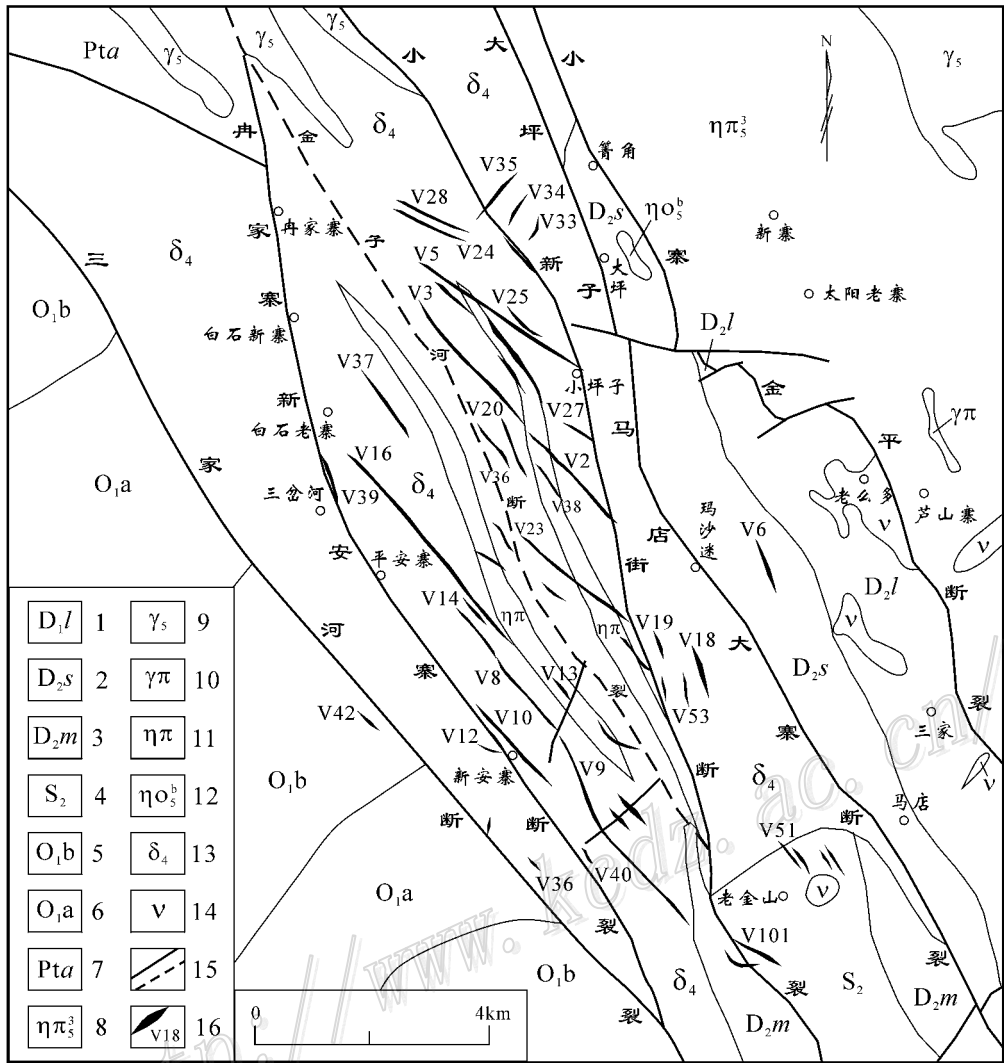


图 2 大坪金矿床地质简图(据葛良胜等,2007a,2007b)

1—下泥盆统老井寨组;2—中泥盆统宋家寨组;3—中泥盆统马鹿洞组;4—中志留统;5—下奥陶统中组;6—下奥陶统下组;7—哀牢山群阿龙组;8—二长花岗岩;9—花岗岩;10—花岗岩斑岩脉;11—二长斑岩脉;12—石英二长岩脉;13—闪长岩;14—辉绿岩体或岩脉;15—断裂或推测断裂;16—金矿脉及编号

Fig. 2 Geological sketch map of the Daping gold deposit (after Ge et al., 2007a; 2007b)

1—Lower Devonian Laojingzhai Formation; 2—Middle Devonian Songjiazhai Formation; 3—Middle Devonian Maludong Formation; 4—Middle Silurian; 5—Middle Formation of Lower Ordovician; 6—Lower Formation of Lower Ordovician; 7—Along Formation of Ailaoshan Group; 8—Monzonitic granite; 9—Granite; 10—Granite-porphry vein; 11—Monzonitic-porphry vein; 12—Quartz-monzontie vein; 13—Diorite; 14—Diabase body (vein); 15—Fault or conjectural fault; 16—Gold vein and its serial number

采用 McCrea (1950) 描述过的正磷酸法,将不同的碳酸盐矿物与 100% 的  $H_3PO_4$  在不同的温度下反应产生  $H_2O$  和  $CO_2$  气体,并通过恒温震荡使之达到氧同位素平衡,收集  $CO_2$  气体,分析精度均为  $\pm 0.2\text{‰}$ 。C 和 O 相对标准分别为 V-PDB 和 V-SMOW。选取 40~60 目的纯净石英样品,在 150℃ 低温下真空去气 4 小时以上,以彻底除去表面吸附水和次生包裹体水,然后在 400℃ 高温下爆裂提取水,并与金属锌反应生成  $H_2$ ,分析精度为  $\pm 2\text{‰}$ ,相对标准为 V-SMOW。对于石英内流体

包裹体中的  $H_2O$ ,首先需爆裂提取水,与 H 同位素取水方法相同,采用常规的  $BrF_5$  分析法 (Clayton et al., 1963),用  $BrF_5$  与  $H_2O$  在真空和高温条件下反应提取氧,并与灼热的石墨棒反应转化成  $CO_2$  气体,分析精度为  $\pm 0.2\text{‰}$ ,相对标准为 V-SMOW。对于石英、萤石内流体包裹体中的  $CO_2$ ,是在热爆法取水分析 H 同位素的同时分离和提取的,分析精度为  $\pm 0.2\text{‰}$ ,相对标准为 V-PDB。将方铅矿单矿物样品在玛瑙研钵中磨碎至 200 目,采用  $HNO_3$  或  $HCl$  等处理,然后通过阴离

子交换树脂,提取 Pb, 蒸干后以 1% HNO<sub>3</sub> 稀释, 备质谱测试。质谱测试采用英国 Nu Lustrum 公司生产的高分辨多接受等离子质谱仪( Nu Plasma HR MC-ICP-MS ), 以 Tl 作为内标进行质量分馏校正。在测试样品之前, 用 NBS981 标准校准仪器, 在测试过程中, 随时测定 NBS981 来监测仪器。样品的测试条件与 NBS981 的相同, 每一组数据由 20 个扫描构成。Nd 同位素分析方法: 测试仪器为 Nu Plasam HR MC-ICP-MS, 测试方法为 DSN-100 膜去溶, 标准测定结果为 JMC Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.511125 ± 10( 2σ ), Nd 同位素质量分馏采用 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.7219 来校正。Sm-Nd 含量分析方法: 测试仪器为 MAT262 固体同位素质谱计, 测试方法为同位素稀释法。

4 分析结果及讨论

4.1 氢、氧同位素特征

水是含金络合物迁移和沉淀的最重要介质。因此, 直接测定金矿床中的矿物和矿物内包裹体的氢同位素组成及含水矿物的氧同位素组成, 即可获得成矿流体的氢、氧同位素组成, 并据此可判断成矿过程中流体的来源。

表 1 列出了本次氢、氧同位素测试结果。该表内的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  是经计算获得的, 用于计算的同位素分馏公式为  $1000\ln = \delta^{18}\text{O}_{\text{含水矿物}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 3.306 \times 10^6 T^{-2} - 2.71$  (张理刚, 1989), 式中  $\delta^{18}\text{O}_{\text{含水矿物}}$  的测定对象为石英,  $T$  为主成矿阶段石英内流体包裹体均一温度的平均值 258℃ (葛良胜等, 2007a)。

由表 1 可见, 本次测定的主成矿期石英的氢、氧同位素组成:  $\delta^{18}\text{O}_{\text{石英-SMOW}}$  值为 12.0‰ ~ 14.2‰, 均值为 13.06‰;  $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$  值为 -82‰ ~ -57‰, 均值为 -71.13‰;  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-SMOW}}$  值为 2.99‰ ~ 5.19‰, 均值为 4.0‰。Taylor (1974) 认为, 地幔初生水的  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$  值在 -50‰ ~ -80‰ 之间; Kyser (1986) 以

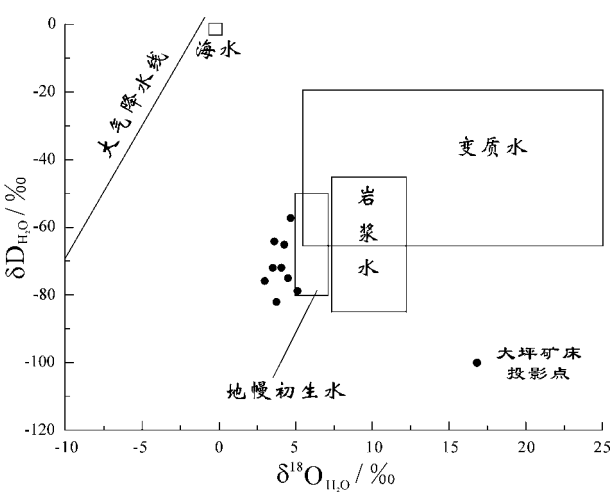


图 3 大坪金矿床氢氧同位素组成图解  
(底图据张理刚, 1985 地幔初生水据 Taylor, 1974; Kyser, 1986)

Fig. 3 Hydrogen and oxygen isotopic diagram of the Daping gold deposit

为地幔初生水的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  在 5‰ ~ 7‰ 之间。据本次所获的氢、氧同位素资料可见, 大坪金矿床的成矿流体具有幔源初生水的特征。

在  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  同位素组成图解 (图 3) 上可以看出, 大坪金矿床的投影点落在地幔初生水范围内及其左侧, 表明其成矿流体主要来自地幔, 并且在成矿过程中成矿流体内有壳源岩浆水的加入。

4.2 碳、氧同位素特征

碳、氧同位素被广泛用于追溯流体中 CO<sub>2</sub> 来源的研究, 是示踪地幔流体参与成矿作用的有效手段 (Rollinson, 1993; 毛景文等, 2002; 刘建明等, 2003)。本次碳、氧同位素测试结果列于表 2。共测试样品 11 件, 其中, 方解石 6 件, 白云石 1 件, 菱铁矿 4 件。方解石的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  值为 -4.5‰ ~ -6.1‰, 平均为 -4.85‰; 白云石的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  值为 -4.4‰; 菱铁矿的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  值为 -5.5‰ ~ -6.2‰, 平均为 -5.87‰。三者均位于地幔来源 C 同位素值 (正常值为 -2‰ ~ -10‰, 集中分布在 -5‰ 附近。储雪蕾, 1996; 王先彬等, 2000; 张铭杰等, 2000; Nadeau et al., 1990; Pineau et al., 1990)。11 件样品的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  值为 9.0‰ ~ 12.8‰。

将大坪金矿床的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  值和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  值投影于图 4 中, 可发现投影点均位于原生碳酸盐范围内, 并且未发现投影点向沉积碳酸盐漂移的现象, 这进一步说明, 大坪金矿床成矿过程中的碳主要来源于地幔流体体系, 而且未与沉积岩发生过明显的同位素交换。

4.3 硫同位素特征

确定成矿流体中硫同位素组成及硫的来源, 对于讨论矿床成因具有重要意义。一般认为, 各种矿物从成矿溶液中沉淀析出, 都是因为成矿溶液本身的物理化学条件发生了变化,

表 1 大坪金矿床氢氧同位素组成

Table 1 Oxygen and hydrogen isotopic data of the Daping gold deposit

样品号	测定对象	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-SMOW}}/\text{‰}$
DB11	石英	-65	13.3	4.29
DB14	石英	-75	13.5	4.49
DB15	石英	-82	12.7	3.69
DB19	石英	-64	12.6	3.59
DB20	石英	-79	14.2	5.19
DB23	石英	-76	12.0	2.99
DB24	石英	-72	12.5	3.49
DB25	石英	-72	13.1	4.14
DB27	石英	-57	13.7	4.69

测试单位: 国土资源部同位素实验室。

表 2 大坪金矿床碳酸盐碳氧同位素组成

Table 2 Carbon and oxygen isotopic data of the Daping gold deposit					
样品号	测试样品	测定对象	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$
DB8	铁白云石化煌斑岩	方解石	-4.5	-18.0	12.3
DB9	铁白云石化煌斑岩	方解石	-4.7	-17.6	12.7
DB10	铁白云石化煌斑岩	方解石	-4.7	-17.5	12.8
DB26	碳酸盐岩	方解石	-6.1	-19.7	10.6
DB38	碳酸盐化矿石	方解石	-4.5	-18.4	11.9
DB39	碳酸盐化矿石	方解石	-4.6	-17.8	12.5
DB40	碳酸盐化矿石	白云石	-4.4	-21.2	9.0
DB45	碳酸盐化矿石	菱铁矿	-6.2	-18.6	11.6
DB46	碳酸盐化矿石	菱铁矿	-6.2	-18.7	11.6
DB47	碳酸盐化矿石	菱铁矿	-5.6	-18.7	11.6
DB50	石英脉型矿石	菱铁矿	-5.5	-18.2	12.1

测试单位 国土资源部同位素实验室。

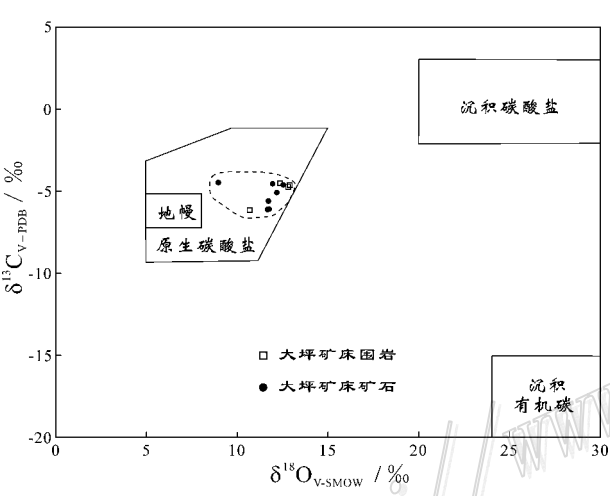


图 4 大坪金矿床碳氧同位素组成图解

(底图据刘建明等,2003;地幔、原生碳酸盐、沉积碳酸盐及沉积有机碳的范围综合引自 Ohmoto,1986;Valley,1986;Nelson et al.,1988;Hoefs,1997;Ray et al.,1999;郑永飞等,2000)

Fig. 4 Carbon and oxygen isotopic diagram of the Daping gold deposit

(after Liu et al.2003;Ohmoto,1986;Valley,1986;Nelson et al.,1988;Hoefs,1997;Ray et al.,1999;Zheng et al.,2000)

从成矿溶液中沉淀析出的各种硫化物的硫同位素组成不仅取决于成矿溶液的总硫同位素组成( $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ ),而且更主要的是取决于矿物沉淀时的物理化学条件。Ohmoto(1972)把影响 $\delta^{34}\text{S}$ 值的因素表达为: $\delta^{34}\text{S} = f(\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}, T, f(\text{O}_2), \text{pH}, I)$ ,式中 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 表示成矿溶液的总硫同位素组成, $T$ 表示矿物的形成温度(多用均一温度), $f(\text{O}_2)$ 表示成矿流溶液的氧逸度, $\text{pH}$ 表示成矿溶液的酸碱性, $I$ 表示成矿溶液的离子强度。

大坪矿床内的金属矿物以黄铁矿、方铅矿等硫化物为主。本次工作主要选择采自该矿区主矿脉的10件方铅矿样品进行了硫同位素组成特征的研究,样品分析结果见表3。由表3可见,该矿区不同矿段主成矿阶段方铅矿的硫同位素组成的

表 3 大坪金矿床硫同位素组成

Table 3 Sulfur isotopic data of the Daping gold deposit			
样品号	测试样品	测定对象	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
DB11	石英脉型矿石	方铅矿	2.3
DB14	石英脉型矿石	方铅矿	3.6
DB15	石英脉型矿石	方铅矿	2.7
DB19	石英脉型矿石	方铅矿	3.4
DB20	石英脉型矿石	方铅矿	3.8
DB23	石英脉型矿石	方铅矿	5.9
DB24	石英脉型矿石	方铅矿	4.3
DB25	石英脉型矿石	方铅矿	1.5
DB27	石英脉型矿石	方铅矿	4.7
DB36	石英脉型矿石	方铅矿	4.1

测试单位 国土资源部同位素实验室。

变化范围为1.5‰~5.9‰,平均值为3.63‰,以较小的正值为特征。Deines(1995)经研究认为,地幔来源的硫具有有限硫铁的硫同位素组成特征,变化于0附近, $\delta^{34}\text{S}$ 值的较大变化范围与地壳再循环组分有关,变化于-6‰~+6‰之间。大坪金矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值属于地幔硫变化范围,结合区域地质特征及构造演化,推测其与区域板块俯冲造山过程中地壳再循环组分加入成矿过程有关。

4.4 铅同位素特征

本次工作对大坪金矿床10件石英脉型矿石样品中的方铅矿进行了铅同位素研究,其测定结果列于表4。测试数据表明,该矿床的矿石铅具有较窄的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值(18.6821~18.7098),相对较高的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值(15.6712~15.6784)和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值(39.0608~39.0984),其变化范围均不大。

将表4中的数据投影于铅同位素组成图解(图5)上可发现,矿石铅投点位于造山带演化线与地幔演化线之间(图5a),或造山带演化线之上(图5b)。韩润生等(1990;1997)测得大坪矿区斜长花岗岩内长石的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值为18.786, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值为15.699, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值为39.077,

表 4 大坪金矿床铅同位素组成

Table 4 Lead isotopic data of the Daping gold deposit

样品号	测试矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$\mu$	$\omega$	k
DB11	方铅矿	18.6896	15.6752	39.0863	1.1923	9.58	38.32	3.87
DB14	方铅矿	18.6867	15.6732	39.0689	1.1923	9.58	38.24	3.86
DB15	方铅矿	18.6821	15.6716	39.0608	1.1921	9.58	38.22	3.86
DB19	方铅矿	18.6934	15.6734	39.0758	1.1927	9.58	38.24	3.86
DB20	方铅矿	18.7064	15.6784	39.0984	1.1931	9.59	38.30	3.87
DB23	方铅矿	18.6906	15.6751	39.0950	1.1924	9.58	38.34	3.87
DB24	方铅矿	18.7098	15.6720	39.0894	1.1938	9.57	38.19	3.86
DB25	方铅矿	18.6924	15.6712	39.0562	1.1928	9.57	38.14	3.86
DB27	方铅矿	18.6912	15.6765	39.0911	1.1923	9.59	38.34	3.87
DB36	方铅矿	18.7052	15.6739	39.0918	1.1934	9.58	38.24	3.86

测试单位 国土资源部同位素实验室。

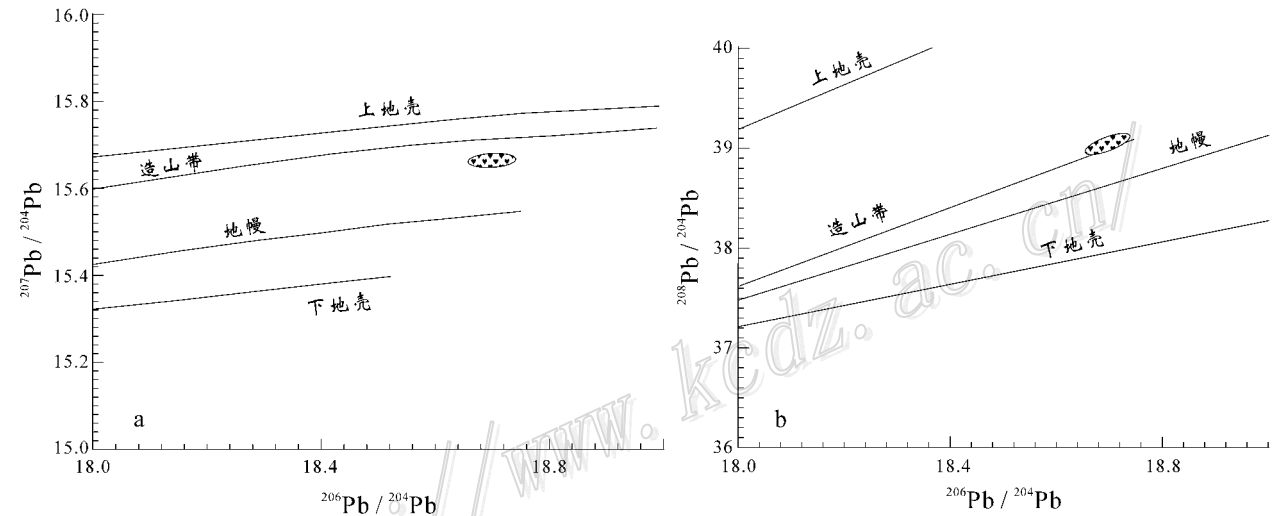


图 5 大坪金矿床铅同位素组成图解(据 Zartman et al. ,1981 改编)

Fig. 5  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagram of the Daping gold deposit (modified after Zartman et al. , 1981)

$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  平均值为 1.197 ;闪长岩全岩的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 18.463 ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 15.654 ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 38.707 ,  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  值为 1.181。这表明大坪金矿床的矿石铅主要为正常铅 ,且具有多来源特点 :来源于地幔及下地壳或它们的混合源区 ,即来源于深部。同时 ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值集中反映出源区具稳定的 U/Th 比率 ,表明成矿作用过程中未曾有含放射性成因铅的物质或流体的加入。

4.5 Rb-Sr 及 Sm-Nd 同位素特征

本次工作对大坪矿区内的 5 件煌斑岩样品进行了全岩铷-锶和钐-钕同位素测定 ,测定结果列于表 5。由表 5 可见 ,该区内与成矿关系密切的煌斑岩的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值为 0.512404~0.512509 ,低于原始地幔现代值 (0.51264 ) ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值为 0.706588~0.707416 ,高于原始地幔现代值 (0.7045 ) ,以煌斑岩的形成年龄为 35 Ma 来计算 ,其  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 -4.3~-0.7 ,平均为 -3.2 ,  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  值为 23.5~33.1 ,显

示出岩石具有源于富集地幔的特征 ,并明显有地壳物质的加入。

在  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  关系图(图 6 )上 ,该矿区煌斑岩的数据点都落在第四象限的哀牢山富碱侵入岩的范围内 ,表明该矿区的煌斑岩与哀牢山成矿带内的富碱侵入岩具有同源性 ,均来源于富集地幔。

应汉龙(1998)对大坪金矿床内的铁白云石进行了铷-锶和钐-钕同位素研究。铁白云石的 Rb/Sr 值为 0.70898 ,  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  为 64.14 ,矿石的 (  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ) 大于闪长岩 (0.70607 ) ,在判别岩浆岩源区的 Rb-Sr 同位素相关图解(图 7 )上可以看出 ,在  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解(图 7a )上 ,大坪矿区矿石的投点位于幔源演化线的延长线上 ,在  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解(图 7b )上 ,该区矿石的投点位于大陆岩石圈地幔区内 ,表明该区矿石中的相关元素的源区带有较强烈的幔源色彩 ,暗示其可能源于壳幔混合区。

表 5 大坪金矿床煌斑岩铷-锶及钐-钕同位素组成

Table 5 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data of the Daping gold deposit

样品号	测定对象	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$
DB1	煌斑岩	1.178	0.707237	14	0.1189	0.512422	14
DB2	煌斑岩	1.442	0.707416	14	0.1240	0.512426	10
DB3	煌斑岩	1.030	0.707194	15	0.1188	0.512404	8
DB4	煌斑岩	1.328	0.707359	20	0.1189	0.512408	7
DB5	煌斑岩	1.092	0.706588	14	0.1190	0.512509	10

测试单位 国土资源部同位素实验室。

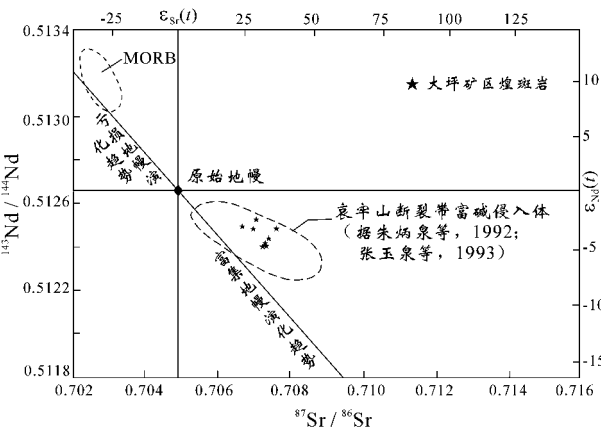


图 6 大坪金矿 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 关系图

Fig. 6  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  diagram of the Daping gold deposit

4.6 讨论

目前,关于大坪金矿床的成矿流体性质及成矿作用等问题,许多学者持有不同观点:①成矿流体以岩浆热液为主,

地表水被加热后所产生的改造热液、区域变质热液共同参与了成矿作用(徐研非,1989);②成矿流体为岩浆期后热液和地下水热液组成的混合流体,大气降水参与了成矿作用(金世昌等,1994;韩润生等,1997);③含金流体源于深部高压环境,属于上升高压流体,而非变质成因热液或岩浆热液分异演化而来的流体,成矿物质具有源于地球深部(以地幔为主)的统一来源(毕献武等,1997;李定谋等,1998;何明友等,1997);④成矿流体为热卤水,硫源可能为深源或高度均一化的产物,多数源于地层,少数源于岩浆,金主要源于地层及蛇绿岩带,铅具有壳幔混合源的特征(沈上越等,1997);⑤各成矿期流体均是以深源流体为主的壳-幔混合流体,但具有不同的地球化学特征,是相对独立的成矿流体体系(葛良胜等,2007a;2007b);⑥成矿流体主要来自地幔排气所形成的深源地幔流体和地下壳脱水所形成的富 $\text{CO}_2$ 流体,深源流体与闪长岩发生水-岩反应和沸腾作用导致矿质沉淀富集是矿床形成的主要原因(孙晓明等,2006,2007)。

本文对大坪金矿床同位素地球化学特征的研究表明:该矿床的成矿流体主要来源于深部岩浆水而非岩浆期后热液和地下水热液组成的混合热液,成矿流体的源区为下地壳或壳幔混合区,成矿热液中的硫主要源于深部岩浆体系,但并不排

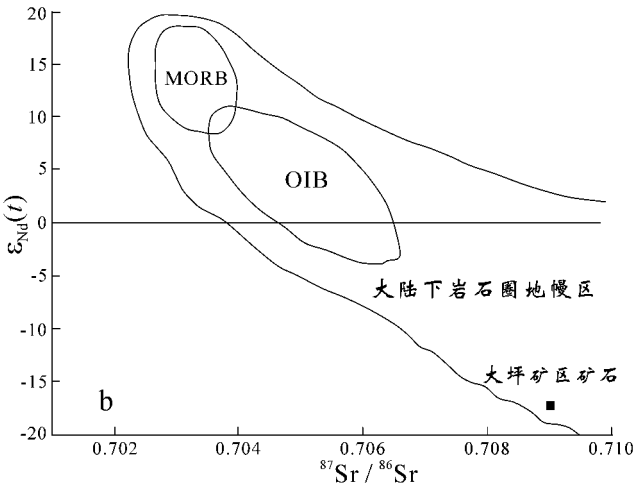
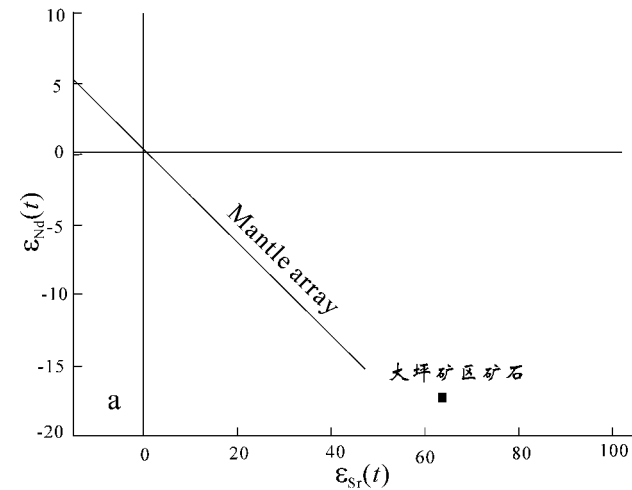


图 7 大坪金矿 Sr-Nd 同位素图解

Fig. 7 Sr-Nd isotopic diagram of the Daping gold deposit



除其他硫源(如围岩、地层的溶解硫)混入的可能性,矿石铅具有多来源特点,来源于地幔及下地壳或它们的混合区,即来源于深部,同时,成矿作用过程中未曾有含放射性成因铅的物质或流体的加入,铀-钍同位素特征反映出该区矿石中相关元素的源区带有较强烈的幔源色彩,暗示其可能源于壳幔混合区。总之,大坪金矿床成矿流体的主体为深部的壳幔混合流体,而不是地壳浅部的大气饱和水、岩浆水或它们的混合流体。

## 5 结 论

区域地球物理场特征分析表明,大坪金矿区壳幔边界存在着强烈的壳幔相互作用,区内大量新生代煌斑岩脉的出现表明了上地幔物质的上涌,该矿区内出露的煌斑岩脉属于哀牢山成矿带中普遍出现的新生代煌斑岩脉群的一部分,其形成时代多为30~34 Ma(胡云中等,1995;Bi et al.,1996;黄智龙等,1999),与区域上广泛出现的煌斑岩脉基本上同时形成,其间可能存在成因上的联系(Bi et al.,1996;孙晓明等,2007)。

大量研究表明,中生代哀牢山地区已处于板块俯冲造山期,大量陆壳物质随俯冲板块被带入地幔,与地幔物质发生熔融、混染,至喜马拉雅期,拉张构造运动(张玉泉等,1987;陈胜早,1990;从柏林等,1993;杨开辉等,1993)使岩石圈减薄、软流圈上涌,这一时期不仅有大量幔源岩浆上升至地表,还伴有大规模的变质作用和地幔去气,同时,地幔流体携带大量成矿物质及流体沿深断裂带向上运移,激发、活化地壳中的矿质,并且促进浅部流体的循环对流,萃取更多的成矿物质,在地壳浅部由于物理化学条件的改变,成矿物质从流体中卸载,在构造有利部位形成矿体,沿哀牢山深断裂带形成了老王寨、金厂、大坪等大型-超大型金矿床。

经综合分析认为,在哀牢山成矿带内金矿床的形成过程中,伴有较强烈的深部岩浆活动,壳幔相互作用对金矿床的形成有重要贡献。

## References

- Bai Z M and Wang C Y. 2003. Tomographic investigation of the upper crustal structure and seismotectonic environments in Yunnan Province [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 25(2): 2-14.
- Bi X W, Hu R Z and He M Y. 1996. Age determination of Ailaoshan gold metallogenic belt by ESR method and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 41(18): 1546-1549.
- Bi X W, Hu R Z and He M Y. 1997. Characteristics of ore-forming fluid of three gold deposits in Ailaoshan gold mineralization belt [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(4): 435-441 (in Chinese and with English abstract).
- Cao X G and Wang X B. 2001. A discussion about the relationship between Moho form and spatial distributeon of large ore deposit in Yunnan [J]. *Yunnan Geology*, 20(1): 73-80 (in Chinese and with English abstract).
- Cao X G, Zhang X S, Nian H and Li L. 2005. Study on the correlation of the (super)-large scale deposits with the crust-mantle boundary in Yunnan and its targeting [J]. *Engineering Science*, (Supp.): 213-217 (in Chinese and with English abstract).
- Chen S Z. 1990. Geophysical and geological features of the Mesozoic lower Yangtze rift zone [J]. *Acta Geological Sinica*, 64(2): 107-120 (in Chinese and with English abstract).
- Chu X L. 1996. Carbon isotope in mantle [J]. *Advance in Earth Sciences*, 11(5): 446-451 (in Chinese with English abstract).
- Chun S L, Lo C H, Lec T L, et al. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan Plateau starting 40 Myr ago [J]. *Nature*, 394: 769-773.
- Clayton R N and Mayeda T K. 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen and silicates for isotopic analysis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27: 43-52.
- Cong B L, Wu G Y, Zhang Q, Zhang R Y, Zhai M G, Zhao D S and Zhang W H. 1993. Petro-geotectonic evolution of Paleo-Tethyan tectonic zone in Western Yunnan, China [J]. *Science in China (Series B)*, 23(11): 1201-1207 (in Chinese).
- Deines P. 1995. Sulfides inclusion chemistry and carbon isotopes of Africa diamond [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3173-3188.
- Ge L S, Deng J, Li H G, Yang L Q, Zhang W Z, Yuan S S and Xing J B. 2007a. Superposed mineralization in Daping Au-Cu-Ag-Pb deposit, Yunnan Province: Evidences from geology, fluid inclusions and stable isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2131-2143 (in Chinese and with English abstract).
- Ge L S, Deng J, Yang L Q, Xing J B and Yuan S S. 2007b. Geology and geochemistry of Daping super-large gold polymetallic deposit in Yunnan Province, China [J]. *Geology and Prospecting*, 43(3): 17-24 (in Chinese and with English abstract).
- Ge L S, Deng J, Gou X D and Liu Y C. 2009. Deep-seated structure and metallogenic dynamics of the Ailaoshan polymetallic mineralization concentration area, Yunnan Province, China [J]. *Science in China (Series D)*, 39(3): 271-284 (in Chinese).
- Han R S and Jin S C. 1990. Lead isotope composition characteristics and genesis of Yunyang gold deposit [J]. *Journal of Kunming University of Technology*, 15(6): 27-38 (in Chinese).
- Han R S, Jin S C and Lei L. 1997. Geochemistry of ore-forming hydrothermal system of Daping reworked gold deposit, Yunnan [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(3): 337-344 (in Chinese and with English abstract).
- He M Y and Hu R Z. 1997. The deep fluid and its ore forming process of the Ailaoshan gold metallogenic belt [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 24(1): 73-77 (in Chinese and with English abstract).
- Hoefs J. 1997. Stable isotope geochemistry [M]. Heidelberg: Springer. 201p.
- Hu H X, Lu H X, Wang C Y, He Z Q, Zhu L B, Yan Q Z, Fan Y X, Zhang G Q and Deng Y E. 1986. Study on crustal structure using blast earthquake method in west Yunnan [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 29(2): 133-143 (in Chinese).
- Hu H X, Lin Z Y, Bian Y J, Wang C Y and Zhu L B. 1996. Study on

- the character of crust-mantle transition zone in the west of Yunnan Province, China[ J ]. *Acta Seismologica Sinica*, 18( 4 ): 444-450( in Chinese ).
- Hu R Z, Bi X W, He M Y, Liu B G, Turner G and Burnard P G. 1998. Mineralizer constraint on gold mineralization of Ailaoshan gold belt[ J ]. *Science in China( Series D )*, 28( Supp. ): 24-30( in Chinese ).
- Hu R Z and Bi X W. 1999. The He and Ar isotope geochemistry of Au ore-fluid in the Ailaoshan gold ore belt[ J ]. *Science in China( Series D )*, 29( 4 ): 321-330( in Chinese ).
- Hu Y Z and Tang S C. 1995. *Geology of gold deposit in Ailaoshan*[ M ]. Beijing : Geol. Pub. House. 278p( in Chinese ).
- Huang J L, Song X D and Wang S Y. 2003. Pn wave velocity structure of upper-most mantle in Sichuan and Yunnan Provinces, China[ J ]. *Science in China( Series D )*, 33( Supp. ): 144-151( in Chinese ).
- Huang Z L, Liu C Q and Zhu C M. 1999. The genesis of lamprophyres and its relation to gold mineralization in Laowangzhai gold deposit area, Yunnan[ M ]. Beijing : Geol. Pub. House. 252p( in Chinese ).
- Jin S C and Han R S. 1994. Geochemical characteristics of metallogenic hydrothermal system of the reformed deposit : Taking Yuanyang Daping gold deposit as an example[ J ]. *Yunnan Geology*, 15( 1 ): 17-22( in Chinese and with English abstract ).
- Kan R J and Lin Z Y. 1986. A preliminary study on crustal and upper mantle structures in Yunnan[ J ]. *Earthquake Research in China*, 2( 4 ): 50-61( in Chinese ).
- Kyser T K. 1986. Stable isotope variations in the mantle[ J ]. *Reviews in Mineralogy*, 16 : 491-559.
- Li D M, Cao Z M, He S X and Wang W X. 1998. The gold deposits of ophiolitic melange belt in Ailaoshan area[ M ]. Beijing : Geol. Pub. House. 137p( in Chinese ).
- Li Q, Chen W J, Wan J L and Li D M. 2000. New evidence of tectonic uplift and transform of movement style along Ailaoshan-Red River shear zone[ J ]. *Science in China( Series D )*, 31( 2 ): 30-38( in Chinese ).
- Lin Z Y, Hu H X, Zhang W B, Zhang H F, He Z Q, Lin Z M and Qiu T X. 1993. Study on velocity structure character of crust and upper mantle in West Yunnan[ J ]. *Acta Seismologica Sinica*, 15( 4 ): 427-440( in Chinese ).
- Liu J M, Zhang H F, Sun J G and Ye J. 2003. C-O and Sr-Nd isotope geochemistry of mantle-derived magmatic rock from Shandong[ J ]. *Science in China( Series D )*, 33( 10 ): 921-930( in Chinese ).
- Mao J W, He Y and Ding T P. 2002. Mantle fluids involved in metallogenesis of Jiaodong ( East Shandong ) gold district : Evidence of C, O and H isotopes[ J ]. *Mineral Deposits*, 21( 2 ): 121-128( in Chinese with English abstract ).
- McCrea J M. 1950. On the isotope chemistry of carbonates and a paleotemperature scale[ J ]. *Journal of Chemical Physics*, 18 : 849-857.
- Nadeau S, Pineau F, Javoy M and Francis D M. 1990. Carbon concentrations and isotopic ratios in fluid-inclusion-bearing upper-mantle xenoliths among the northwestern margin of North America[ J ]. *Chemical Geology*, 81 : 271-297.
- Nelson D R, Chivas A R, Chappel B W, et al. 1988. Geochemical and isotopic systematic in carbonatites and implications for the evolution of oceanic island source[ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52 : 1-17.
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[ J ]. *Econ. Geol.*, 67 : 551-578.
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[ J ]. *Rev. Miner.*, 16 : 491-559.
- Pineau F and Methez E A. 1990. Carbon isotopes in xenoliths from Hualalai volcano, Hawaii, and the generation of isotopic variability [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54 : 2117-2127.
- Ray J S, Ramesh R and Pande K. 1999. Carbon isotopes in Kerguelen plume-derived carbonites : Evidence for recycled inorganic carbon [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 170 : 205-214.
- Rollinson H R. 1993. *Using geochemical data : Evaluation, presentation, interpretation*[ M ]. New York : Longman Scientific and Technical Press. 352p.
- Shen S Y, Wei Q R, Cheng H L and Mo X X. 1997. An approach to genetic types of the gold deposits in the Ailaoshan gold ore belt, Yunnan[ J ]. *Tethyan Geology*, ( 21 ): 73-84( in Chinese and with English abstract ).
- Sun X M, Xiong D X, Wang S W, Shi G Y and Zhai W. 2006. Noble gases isotopic composition of fluid inclusions in scheelites collected from Daping gold mine, Yunnan Province, China, and its application for ore genesis[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 22( 3 ): 725-732( in Chinese and with English abstract ).
- Sun X M, Xiong D X, Shi G Y, Wang S W and Zhai W. 2007.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of gold deposit hosted in the Daping ductile shear zone in the Ailaoshan gold belt, Yunnan Province, China[ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 81( 1 ): 88-93( in Chinese and with English abstract ).
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. 1990. The Ailaoshan/Red River metamorphic belt : Tertiary left-lateral shear between Indochina and south China[ J ]. *Nature*, 343( 6257 ): 431-437.
- Taylor H P. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problem of hydrothermal alteration and ore disposition[ J ]. *Econ. Geol.*, 69( 6 ): 843-883.
- Valley J W. 1986. Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks [ A ]. In : Valley J W, Taylor H P Jr and O'Neil J R, eds. *Stable isotopes on high temperature geological processes*[ C ]. *Reviews in Mineralogy*, 16 : 445-489.
- Wang J H, Qi L, Yin A and Xie G H. 2001. Emplacement age and platinum-group elements geochemistry in Laowangzhai gold deposit, Yunnan Province[ J ]. *Science in China( Series D )*, 31( Supp. ): 122-127( in Chinese ).
- Wang X B, Wu M B and Zhang M J. 2000. Stable isotope geochemistry of mantle fluid[ J ]. *Geology-Geochemistry*, 28( 3 ): 69-75( in Chinese with English abstract ).
- Xu M J, Wang L S, Liu J H, Zhong K, Li H, Hu D Z and Xu Z. 2005. Study on the character of crust and upper mantle in Ailaoshan-Red River fault zone by receiver function[ J ]. *Science in China( Series D )*, 35( 8 ): 729-737( in Chinese ).
- Xu Y, Liu J H, Liu F T, Song H B, Yao T Y and Jiang W W. 2003. The crust and upper mantle texture of Ailaoshan-Red River fracture

- zone and its adjacent area [J]. Science in China (Series D), 33(12): 1021-1029 (in Chinese).
- Xu Y F. 1989. The geological characteristics of quartz vein gold deposit, Daping, Yuanyang [J]. Yunnan Geology, 8(2): 171-177 (in Chinese).
- Yang K H and Mo X X. 1993. Late Paleozoic rifting-related volcanic rocks and tectonic evolution in Southwestern Yunnan [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 12(4): 297-311 (in Chinese and with English abstract).
- Ying H L. 1998. The geochemistry characteristics of wallrock alteration and isotopes of the Daping gold deposit [J]. Gold Science and Technology, 4(4): 14-23 (in Chinese and with English abstract).
- Yuan Y S, Ma Y S, Hu S B, Guo T L and Fu X Y. 2006. Present-day geothermal characteristics in South China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(4): 1118-1126 (in Chinese).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics: The model [J]. Tectonophysics, 75: 135-162.
- Zhang L G. 1985. The application of stable isotope to geosciences [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press. 267p (in Chinese).
- Zhang L G. 1989. The theory of rock-forming and ore-forming, and prospecting [M]. Beijing: Beijing Polytechnic University Publishing House. 200p (in Chinese).
- Zhang M J, Wang X B and Li L W. 2000. Compositions of the mantle fluid [J]. Earth Science Frontiers, 7(2): 401-412 (in Chinese and with English abstract).
- Zhang Y Q, Xie Y W and Tu G Z. 1987. Preliminary studies of the alkali-rich intrusive rocks in the Ailaoshan-Jinshajiang belt and their bearing on rift tectonics [J]. Acta Petrologica Sinica, 1(1): 17-25 (in Chinese and with English abstract).
- Zhang Y Q, Zhu B Q and Xie Y W. 1983. Sr-Nd isotopes of alkaline-rich intrusive rocks from the Ailaoshan-Jinshajiang area [A]. In: Crust-mantle evolution and rock-forming and ore-forming isotope geochemistry [M]. Beijing: Seimologica Press.
- Zheng Y F and Chen J F. 2000. Stable isotope geochemistry [M]. Beijing: Science Press. 316p (in Chinese).
- Zhong D L, Ding L, Liu F T, Liu J H, Zhang J J, Ji J Q and Chen H. 2000. The multiway layer-frame structure of orogenic belt lithosphere and its restriction to the Cenozoic Era magmatic activity: Taking Three-River area and its adjacent area as an example [J]. Science in China (Series D), 30(Sup.): 1-8 (in Chinese).
- Zhu B Q, Zhang Y Q and Xie Y W. 1992. Nd-Sr-Pb isotope characteristics of Tertiary superpotash volcanic rocks from eastern Erhai of western Yunnan and continental mantle evolution in the Southwestern China [J]. Geochemistry (3): 201-212 (in Chinese with English abstract).
- 曹显光, 王兴彬. 2001. 云南莫莫霍面形态与大型矿床空间关系探讨 [J]. 云南地质, 20(1): 73-80.
- 曹显光, 张学书, 念红, 李雷. 2005. 云南大型超大型矿床与壳幔界面相关性研究及其预测 [J]. 中国工程科学 (增刊): 213-217.
- 陈胜早. 1990. 下扬子中生代裂谷带的地球物理-地质特征 [J]. 地质学报, 64(2): 107-120.
- 储雪蕾. 1996. 地幔的碳同位素 [J]. 地球科学进展, 11(5): 446-451.
- 从柏林, 吴根耀, 张旗, 张儒媛, 翟明国, 赵大升, 张雯华. 1993. 中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化 [J]. 中国科学 (B 辑), 23(11): 1201-1207.
- 葛良胜, 邓军, 李汉光, 杨立强, 张文钊, 袁士松, 邢俊兵. 2007a. 云南大坪大型金多金属矿床叠加成矿作用: 地质、流体包裹体和稳定同位素证据 [J]. 岩石学报, 23(9): 2131-2143.
- 葛良胜, 邓军, 杨立强, 邢俊兵, 袁士松. 2007b. 云南大坪超大型金多金属矿床地质地球化学特征 [J]. 地质与勘探, 43(3): 17-24.
- 葛良胜, 邓军, 郭晓东, 刘荫春. 2009. 哀牢山多金属矿集区深部构造与成矿动力学 [J]. 中国科学 (D 辑), 39(3): 271-284.
- 韩润生, 金世昌. 1990. 从元阳金矿铅同位素组成特征论矿床成因 [J]. 昆明学院学报, 15(6): 27-38.
- 韩润生, 金世昌, 雷丽. 1997. 云南元阳大坪改造型金矿床的成矿热液系统地球化学 [J]. 矿物学报, 17(3): 337-344.
- 何明友, 胡瑞忠. 1997. 哀牢山金矿带深源流体及其成矿作用 [J]. 成都理工大学学报, 24(1): 73-77.
- 胡鸿翔, 陆涵行, 王椿镛, 何正勤, 朱良保, 颜其中, 樊跃新, 张国庆, 邓英娥. 1986. 滇西地区地壳结构的爆破地震研究 [J]. 地球物理学报, 29(2): 133-143.
- 胡鸿翔, 林中洋, 边银菊, 王椿镛, 朱良保. 1996. 滇西地区壳幔过渡带性质的研究 [J]. 地震学报, 18(4): 444-450.
- 胡瑞忠, 毕献武, 何明友, 刘秉光, Turner G, Burnard P G. 1998. 哀牢山金矿带矿化剂对金成矿的制约 [J]. 中国科学 (D 辑), 28(增刊): 24-30.
- 胡瑞忠, 毕献武. 1999. 哀牢山金矿带成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学 [J]. 中国科学 (D 辑), 29(4): 321-330.
- 胡云中, 唐尚鹑. 1995. 哀牢山金矿地质 [M]. 北京: 地质出版社. 278 页.
- 黄金莉, 宋晓东, 汪素云. 2003. 川滇地区上地幔顶部 Pn 速度细结构 [J]. 中国科学 (D 辑), 33(增刊): 144-151.
- 黄智龙, 刘丛强, 朱成明. 1999. 云南老王寨金矿区煌斑岩成因及其与金矿化关系 [M]. 北京: 地质出版社. 252 页.
- 金世昌, 韩润生. 1994. 改造型矿床的成矿热液系统地球化学特征-以元阳金矿床为例 [J]. 云南地质, 15(1): 17-22.
- 阚荣举, 林中洋. 1986. 云南地壳上地幔构造的初步研究 [J]. 中国地震, 2(4): 50-61.
- 李定谋, 曹志敏, 何叔叔, 王文孝. 1998. 哀牢山蛇绿混杂岩带金矿床 [M]. 北京: 地质出版社.
- 李齐, 陈文寄, 万景林, 李大明. 2000. 哀牢山-红河剪切带构造抬升和运动形式转换时间的新证据 [J]. 中国科学 (D 辑), 30(6): 576-583.
- 林中洋, 胡鸿翔, 张文彬, 章惠芬, 何正勤, 林真明, 邱陶兴. 1993. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究 [J]. 地震学报, 15(4): 427-440.
- 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 叶杰. 2003. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和锶-

## 附中文参考文献

- 钨同位素地球化学研究[J]. 中国科学(D辑), 33(10): 921-930.
- 毛景文, 赫英, 丁悌平. 2002. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据[J]. 矿床地质, 21(2): 121-128.
- 沈上越, 魏启荣, 程惠兰, 莫宣学. 1997. 云南哀牢山金矿带成因类型探讨[J]. 特提斯地质(21): 73-84.
- 孙晓明, 熊德信, 王生伟, 石贵勇, 翟伟. 2006. 云南大坪金矿白钨矿惰性气体同位素组成特征及其成矿意义[J]. 岩石学报, 22(3): 725-732.
- 孙晓明, 熊德信, 石贵勇, 王生伟, 翟伟. 2007. 云南哀牢山金矿带大坪韧性剪切带型金矿  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  定年[J]. 地质学报, 81(1): 88-93.
- 王江海, 漆亮, 尹安, 解广轰. 2001. 云南老王寨金矿区煌斑岩的侵位年龄和铂族元素地球化学[J]. 中国科学(D辑), 31(增刊): 122-127.
- 王先彬, 吴茂炳, 张铭主. 2000. 地幔流体的稳定同位素地球化学综述[J]. 地质地球化学, 28(3): 69-75.
- 徐鸣洁, 王良书, 刘建华, 钟锴, 李华, 胡德昭, 徐震. 2005. 利用接收函数研究哀牢山-红河断裂带地壳上地幔特征[J]. 中国科学(D辑), 35(8): 729-737.
- 胥颐, 刘建华, 刘福田, 宋海斌, 郝天珧, 江为为. 2003. 哀牢山-红河断裂带及其邻区的地壳上地幔结构[J]. 中国科学(D辑), 33(12): 1021-1029.
- 徐研非. 1989. 元阳大坪石英脉型金矿床地质特征[J]. 云南地质, 8(2): 171-177.
- 杨开辉, 莫宣学. 1993. 滇西南晚古生代火山岩与裂谷作用及区域构造演化[J]. 岩石矿物学杂志, 12(4): 297-311.
- 应汉龙. 1998. 云南大坪金矿床围岩蚀变和同位素地球化学特征[J]. 黄金科学技术, 14(4): 14-23.
- 袁玉松, 马永生, 胡圣标, 郭彤楼, 付孝悦. 2006. 中国南方现今地热特征[J]. 地球物理学报, 49(4): 1118-1126.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社. 267页.
- 张理刚. 1989. 成岩成矿理论与找矿[M]. 北京: 北京工业大学出版社. 200页.
- 张铭杰, 王先彬, 李立武. 2000. 地幔流体组成[J]. 地学前缘, 7(2): 401-412.
- 张玉泉, 谢应雯, 涂光炽. 1987. 哀牢山-金沙江富碱侵入岩及其与裂谷构造关系初步研究[J]. 岩石学报(1): 17-25.
- 张玉泉, 朱炳泉, 谢应雯. 1993. 哀牢山-金沙江富碱侵入岩 Sr, Nd 同位素研究[A]. 见: 壳幔演化与成岩成矿同位素地球化学[M]. 北京: 地震出版社.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 316页.
- 钟大赉, 丁林, 刘福田, 刘建华, 张进江, 季建清, 陈辉. 2000. 造山带岩石层多向层架构造及其对新生代岩浆活动制约-以三江及邻区为例[J]. 中国科学(D辑), 30(增刊): 1-8.
- 朱炳泉, 张玉泉, 谢应雯. 1992. 滇西洱海东第三纪超 K 质火山岩的 Nd-Sr-Pb 同位素特征与西南大陆地幔演化[J]. 地球化学, (3): 201-212.

<http://www.kcdz.ac.cn/>