

贵州晴隆锑矿床成矿流体 He - Ar 同位素地球化学*

陈娴^{1 2} 苏文超^{1**} 黄勇^{1 2}

CHEN Xian^{1 2}, SU WenChao^{1**} and HUANG Yong^{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, 贵阳 550081
 2. 中国科学院大学, 北京 100049
 1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
- 2016-05-22 收稿, 2016-08-29 改回.

Chen X, Su WC and Huang Y. 2016. He and Ar isotope geochemistry of ore-forming fluids for the Qinglong Sb deposit in Guizhou Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3312-3320

Abstract The Qinglong Sb deposit locates within the Youjiang Au-Sb-As-Hg metallogenic province in South China low-temperature metallogenic domain. This paper reports He and Ar isotopic data of fluid inclusions trapped by stibnites from the Qinglong Sb deposit with age of about 150Ma. ³He/⁴He ratios range from 0.13 to 0.46Ra (where Ra is the ³He/⁴He ratio of air = 1.4 × 10⁻⁶), and ⁴⁰Ar/³⁶Ar from 305 to 327. Moreover, there are some positive correlations between He and Ar isotopic compositions. The results suggest that the ore-forming fluids are a mixture between a crustal fluid containing atmospheric Ar and crustal ⁴He and a fluid containing mantle components. It is likely that the former is a low temperature meteoric fluid, and the later is a fluid exsolved from a concealed Jurassic granitic magma, which might be formed by crustal melting induced by intrusion of a mantle-derived magma, similar to the contemporaneous W-Sn deposits-related granites in the Cathaysian Block of South China. The Jurassic deep-seated magma triggered the fluids of possibly meteoric origin to circulate and leach out ore-forming elements from sedimentary rocks underlain by the wallrock "Dachang Formation" of the deposit to form the Qinglong Sb deposit.

Key words Qinglong Sb deposit; Stibnite; Fluid inclusions; He and Ar isotopes; Mantle-derived He

摘要 晴隆锑矿床是华南中生代低温成矿域右江盆地 Au-Sb-As-Hg 矿集区内的大型锑矿床,成矿时代约 150Ma。本文以该矿床矿石辉锑矿中的流体包裹体为测试对象,研究了成矿流体的 He 和 Ar 同位素地球化学。研究表明,成矿流体的 ³He/⁴He 为 0.13~0.46Ra (Ra 为空气的 ³He/⁴He 值, 1.4 × 10⁻⁶), ⁴⁰Ar/³⁶Ar 为 305~327, He、Ar 同位素组成具有一定程度的正相关;成矿流体由两个端元组成:一是含地壳 He 的低温饱和空气的雨水,二是含地幔 He 的高温流体。含地幔 He 的高温流体可能来自右江盆地地下的侏罗纪壳幔混合成因花岗岩浆,这种岩浆的形成机制与华夏地块侏罗纪与钨锡成矿有关的花岗岩具有相似性。晴隆锑矿床以大气降水为主的成矿流体的加热、循环并浸取矿床围岩“大厂层”下伏地层中的成矿元素而成矿,受深部壳幔混合成因花岗岩浆释放出的含幔源 He 和岩浆 S 的热流所驱动。

关键词 晴隆锑矿床; 辉锑矿; 流体包裹体; He 和 Ar 同位素; 幔源 He

中图法分类号 P595; P618.66

液矿床,涂光炽,1998)大面积密集成群产出的区域(涂光炽, 2002; Hu and Zhou, 2012; 胡瑞忠等, 2015)。华南陆块西侧面积约 50 万平方千米的广大范围内,卡林型金矿和锑、汞、砷、铅、锌等低温矿床广泛发育。该区锑矿储量占全球的

1 引言

低温成矿域是指低温矿床(约 200~250℃ 以下形成的热

* 本文受国家自然科学基金重点项目(41230316)和国家“973”项目(2014CB440906,2014CB440904)联合资助。

第一作者简介:陈娴,女,1984年生,博士生,矿床地球化学专业, E-mail: chenxian@vip.gyig.ac.cn

** 通讯作者:苏文超,男,1965年生,研究员,主要从事矿床流体包裹体地球化学研究, E-mail: suwenchao@vip.gyig.ac.cn

50%以上,金矿储量约占全国 1/5,汞矿储量约占全国 80%,同时还是我国铅锌矿的主要产区之一,显示出大规模低温成矿特点,构成华南低温成矿域(胡瑞忠等,2010,2015)。虽然以往的研究取得了重要进展,但现有理论还无法合理解释华南低温成矿域的形成机制。例如,低温成矿是否受深部岩浆活动驱动一直悬而未决。

晴隆锑矿床位于黔西南地区,是一大型锑矿床(刘吉生,1993)。前人对其矿床地质特征、稀土元素地球化学、同位素地球化学、流体包裹体地球化学和成矿时代等方面进行了较多研究(陈豫等,1984;朱俊宾等,2010;彭建堂等,2003a,b;苏文超等,2015),但其成矿驱动机制如何一直未得到较好解决。晴隆锑矿床是华南低温成矿域中的一个重要矿床,确定其成矿驱动机制不仅对深入认识该矿床的成因具有重要意义,同时也是认识华南低温成矿域形成机制的重要基础。

稀有气体在地球各圈层具有特征的同位素组成,因其化学惰性,在其参与的各种地质作用过程中组成基本保持不变,是物质源区和地球化学过程的理想示踪剂(Turner *et al.*, 1993; Stuart *et al.*, 1995; Hu *et al.*, 1998a,b; Burnard *et al.*, 1999; 胡瑞忠等,1999; 马锦龙和陶明信,2002; Burnard and Polya, 2004; 李兆丽等,2005; Kendrick *et al.*, 2005, 2011; Li *et al.*, 2006, 2007; Wu *et al.*, 2011)。近年来,稀有气体同位素地球化学研究最令人瞩目的进展之一是,把示踪地球现代流体的研究拓展到了作为流体包裹体保存的成矿古流体的研究(Turner *et al.*, 1993; 胡瑞忠等,1999; 武丽艳等,2007)。稀有气体尤其是氦同位素组成在地壳与地幔中的差异极大,即使地壳流体中有少量幔源氦的加入,用氦同位素也易于判别(Simmons *et al.*, 1987; Turner and Stuart, 1992; Stuart *et al.*, 1995; Burnard *et al.*, 1999; Hu *et al.*, 2004, 2009, 2012a)。随着分析测试技术的提高,研究以流体包裹体形式保存的成矿古流体,在氦氩同位素测试方法上并不存在困难(胡瑞忠等,1999)。因此,稀有气体同位素对示踪成矿流体的形成演化具有重要意义。

本文从辉锑矿中流体包裹体的 He 和 Ar 同位素组成研究入手,探讨了晴隆锑矿床成矿流体的成因。研究表明,该矿床的成矿流体中存在地幔稀有气体,该区较深部位具壳幔混合成因的花岗岩浆活动对成矿可能起到了驱动作用。

2 地质背景

华南陆块由扬子地块和华夏地块在新元古代碰撞拼贴而形成。扬子地块川、滇、黔、桂、湘等省区面积约 50 万平方千米的广大范围内,卡林型金矿和锑、汞、砷、铅、锌等低温矿床广泛发育,构成华南低温成矿域(胡瑞忠等,2015)。

研究发现,华南低温成矿域的基底为元古代变质岩建造,盖层为显生宙碳酸盐-细碎屑岩建造,其中黑色岩系发育,二叠纪末期约 260Ma 的峨眉山玄武岩(Zhou *et al.*, 2006; Zhong *et al.*, 2011)在该成矿域西半部广泛分布。自古

生代以来,该区长期处于较稳定状态。相对于华夏地块中东部,该区中生代花岗岩浆活动微弱(涂光炽,1998,2000,2002; Hu and Zhou, 2012);该区的低温矿床主要集中分布在川滇黔接壤区的 Pb-Zn 矿集区、右江盆地 Au-Sb-As-Hg 矿集区、湘中盆地 Sb-Au 矿集区等三个矿集区,成矿温度主要在 100~250°C(Hu *et al.*, 2002; 彭建堂等,2003a,b; Peng *et al.*, 2003; 张长青等,2009; Su *et al.*, 2009a,b; Gu *et al.*, 2012; Hu and Zhou, 2012; Zhou *et al.*, 2014; 胡瑞忠等,2007, 2015)。

晴隆锑矿床位于扬子地块西南缘的黔桂地台凹陷带,是右江盆地 Au-Sb-As-Hg 矿集区的重要矿床之一。该矿床明显受北东向构造控制(图 1)。NE 向花鱼井断层、青山镇断层和马厂断层均以高角度逆冲断层形式出现,控制了该区玄武岩和锑矿的空间分布;具有工业开采价值的矿体仅分布于花鱼井、青山镇两个断层之间;锑矿体与 NE 向黑山菁一后坡背斜关系密切。矿区内出露的地层由老至新为:下二叠统茅口组灰岩(P_2m)、峨眉山玄武岩($P_2\beta$)和上二叠统龙潭组煤系地层(P_3l)(彭建堂等,2003a)。

矿床的锑矿体呈层状、似层状和透镜状产出,主要赋存于“大厂层”(P_2d)。“大厂层”由下二叠统茅口组灰岩的顶部、上二叠统峨眉山玄武岩的底部以及其间的火山碎屑岩组成,该套岩石以强烈硅化和粘土化为特征。按其野外地质特征和岩性特征,“大厂层”分为 3 段(陈豫等,1984):强硅化岩段、玄武质砾岩段和粘土岩段。下部强硅化岩段中,角砾状强硅化岩的顶部为锑矿产出的重要部位;中部玄武质砾岩段中,强硅化的角砾状粘土岩是锑矿的主要赋矿部位;上部粘土岩段中,蚀变玄武岩是赋矿的重要部位。

矿床的矿物组合简单,金属矿物主要为辉锑矿,脉石矿物主要有石英、萤石、方解石、高岭石以及少量重晶石和石膏。围岩蚀变包括硅化、萤石化、粘土化和少量碳酸盐化等。前人通过萤石的 Sm-Nd 等时线法确定,该矿床的形成时代约为 150Ma(彭建堂等,2003a),相当于燕山期。矿物流体包裹体研究表明,矿体萤石中流体包裹体的均一温度为 145~175°C,盐度为 0.2%~1.9% NaCl_{eq}(苏文超等,2015),成矿流体具有低温低盐度特征。

3 样品采集和分析方法

本次研究所用的辉锑矿样品采自晴隆锑矿床井下主矿段。在矿物岩相学、流体包裹体岩相学观察研究的基础上,选取矿床主成矿阶段的二种辉锑矿进行研究,分别为绿色石英-萤石-辉锑矿组合和白色石英-萤石-辉锑矿组合中的辉锑矿(图 2a,b)。绿色石英-萤石-辉锑矿组合主要产于“大厂层”底部的强硅化灰岩中,属于成矿早期,石英和萤石形成于辉锑矿之前,以辉锑矿晶体沿绿色石英和萤石的裂隙充填为特征(图 2a)。而白色石英-萤石-辉锑矿组合主要见于“大厂层”中上部的凝灰质粘土角砾岩中,属于成矿晚期,石英、萤

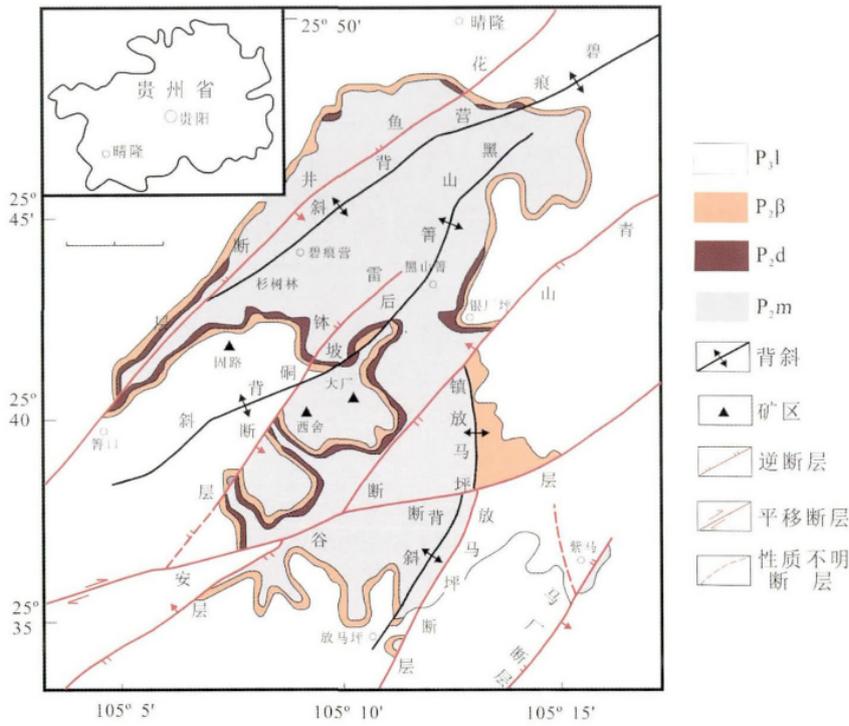


图1 贵州省晴隆锑矿床地质简图(据苏文超等 2015 修改)

P₃l-上二叠统龙潭组; P₂β-峨眉山玄武岩; P₂d-“大厂层”; P₂m-上二叠统茅口组

Fig. 1 Simplified geological map of the Qinglong antimony deposit in Guizhou Province(modified after Su *et al.* , 2015)

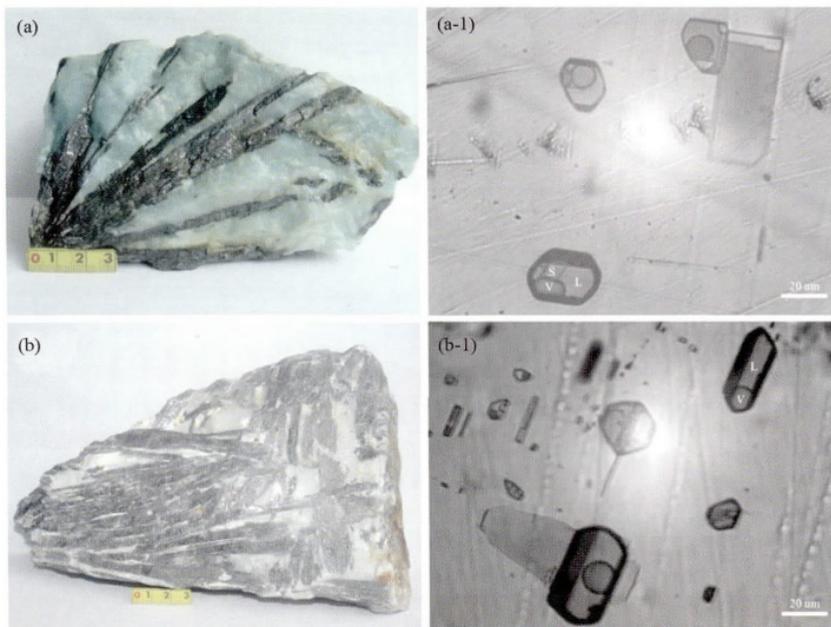


图2 晴隆锑矿床用于 He、Ar 同位素研究的辉锑矿及其中的流体包裹体特征

(a) 绿色石英-萤石-辉锑矿组合矿石; (b) 白色石英-萤石-辉锑矿组合矿石; (a-1) 和(b-1) 分别为(a)、(b) 两类辉锑矿中的流体包裹体

Fig. 2 Stibnites for He and Ar isotopic analysis and fluid inclusions trapped by stibnites from the Qinglong antimony deposit

石和方解石形成于辉锑矿之后,以石英、萤石和方解石沿辉锑矿晶体之间充填为特征(图 2b)。

选取不同矿石组合中的辉锑矿晶体制作出包裹体片。采用红外显微镜(Olympus BX51,配有 ROLERA-XR 红外数码相机)对辉锑矿中的流体包裹体进行观察。观察表明,辉锑矿中的流体包裹体主要有两类:(1)含子晶-气-液三相(L+V+S)包裹体;(2)气-液两相(L+V)包裹体,它们均为原生流体包裹体。这些流体包裹体通常沿平行或垂直于辉锑矿的(010)或(110)面分布(图 2),多呈负晶形,直径 10~150 μm ,气液比 10%~20%,其中含子晶-气-液三相包裹体仅发育在与绿色石英-萤石共生的辉锑矿之中,其子晶矿物形态呈片状或立方体(图 2)。对这类矿石样品进行镜下观察,发现辉锑矿晶体边缘有石膏等矿物,因此,推测这些子晶可能为石膏和氯化钠等矿物(苏文超等,2015)。

氦、氩同位素组成通过测定辉锑矿样品中的流体包裹体获得。分析所需辉锑矿样品采用人工分选方法,在双目显微镜下反复挑选,矿物纯度达 99% 以上。氦、氩同位素组成测定在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成。采用真空压碎法提取矿物流体包裹体中的稀有气体,纯化后的稀有气体由 GV5400 稀有气体质谱仪分析其 He 和 Ar 同位素组成,分析方法见 Su *et al.* (2014)。

本次研究测定了 6 件辉锑矿样品中流体包裹体的 He、Ar 同位素组成,其中成矿早期 3 件,成矿晚期 3 件。分析结果见表 1,氦和氩同位素的分析误差一般小于 5%。结果显示,流体包裹体中氦和氩的浓度变化范围较窄, ^4He 的浓度为 $(1.26 \sim 3.02) \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$, ^{40}Ar 的浓度为 $(3.48 \sim 9.13) \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 0.13~0.46Ra (Ra 为空气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为 305~327,早期辉锑矿中流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值总体高于晚期辉锑矿。

4 讨论

4.1 分析结果基本代表成矿流体的初始组成

矿物流体包裹体的 He、Ar 同位素测试值,能否代表流体包裹体的初始值,取决于流体包裹体被圈闭后一些后生过程的影响,主要包括稀有气体(后期宇宙成因和放射性衰变成因)加入流体包裹体和自流体包裹体扩散丢失两个方面(胡瑞忠等,1999; Hu *et al.*, 2012a)。

研究表明,黄铁矿流体包裹体中的稀有气体较难扩散丢失,其中的稀有气体通常能得到很好保存(Turner *et al.*, 1993; Burnard *et al.*, 1999; Hu *et al.*, 2004, 2009)。与黄铁矿基本相似,辉锑矿等硫化物矿物对 He 等稀有气体亦有很好的保存性,矿物形成后流体包裹体中的稀有气体在 100Myr 左右的时间尺度内(相当于晴隆锑矿床形成的时间尺度)基本不会产生大量扩散丢失(胡瑞忠等,1999)。本文采用的是真空压碎法来提取矿物流体包裹体中的稀有气体,这种方法的主要优点之一是很少有矿物晶格 He 和 Ar 能够释放出来

(Stuart *et al.*, 1994)。理论上而言,稀有气体释放的多少与矿物被压碎的粒度有关:矿物被压碎得越细,矿物的表面积就越大,因而在压碎过程中从矿物晶格释放出放射成因 He 和 Ar 的几率也越大。一般而言,随压碎次数的增加, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值都呈增加趋势或在误差范围内基本一致。这说明在压碎样品的过程中,矿物晶格内放射成因的 ^4He 并未释放出来(Stuart *et al.*, 1995; 胡瑞忠等,1999)。由于非铀矿床的硫化物矿物之流体包裹体中的 U、Th、K 等亲石元素含量极低(Th 在热液中几乎是不溶的),因此,硫化物矿物中的流体包裹体被圈闭后,由其中 U、Th、K 衰变形成的放射成因的 He 和 Ar 可以忽略不计(Turner and Wang, 1992; Qiu *et al.*, 1996; Burnard and Polya, 2004; Hu *et al.*, 2004, 2012a)。由于本文研究的辉锑矿样品均采自地下坑道,这些样品的流体包裹体内存在宇宙成因 ^3He 的可能性可以排除(Simmons *et al.*, 1987; Stuart *et al.*, 1995; 胡瑞忠等,1999)。

如上所述,本次研究所用辉锑矿中的流体包裹体,绝大多数都为与成矿有关的原生包裹体。由于这些原生流体包裹体形成后基本无稀有气体的丢失和后期稀有气体的加入,因此表 1 中的测定值,基本可以代表原生流体包裹体或成矿流体的氦、氩同位素初始组成。

4.2 成矿流体成因

据前人研究(Simmons *et al.*, 1987; Stuart *et al.*, 1995; Burnard *et al.*, 1999; Hu *et al.*, 2004, 2009),热液流体中的稀有气体有三个明显不同的源区,即饱和空气雨水中的稀有气体、地幔中的稀有气体和在地壳中由核过程形成的放射成因稀有气体。地壳流体中的稀有气体,通常被认为是这三个端元按不同比例混合而形成的混合物。与其它稀有气体相比,He 和 Ar 在这三个端元中具有很不相同的同位素组成(胡瑞忠等,1999)。分别为:①饱和空气的雨水, $^3\text{He}/^4\text{He} = 1\text{Ra}$ (Ra 代表大气氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值,为 1.4×10^{-6}), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$;②上地幔, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 特征值为 6~9Ra, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值变化较大;③地壳, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.01~0.05Ra, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值大于 295.5。He 在大气中的含量极低,不足以对地壳流体中 He 的丰度和同位素组成产生明显的影响(Marty *et al.*, 1989; Stuart *et al.*, 1994; Hu *et al.*, 2009)。因此,晴隆锑矿床成矿流体中的 He 只可能来自地壳和地幔两个源区。从图 3、图 4 和图 5 可以看出,在 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ 、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 、 $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 图解中,流体包裹体的 He-Ar 同位素组成,介于地壳和地幔之间,并具有较好相关性,由此可以确定成矿流体是由地壳组分和地幔组分两个端元流体混合而成。

地壳中 ^3He 的产生主要受中子反应 $6\text{Li}(n, \alpha) \rightarrow ^3\text{He}$ 控制。由于研究区缺乏含锂矿物,因此该区地壳 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值应与地壳特征值相似,即 0.01~0.05Ra。由表 1 可见,晴隆锑矿床成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.13~0.46Ra,明显高于地壳 He,但比地幔 He($^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 6~9Ra) 低。这表明成矿流体

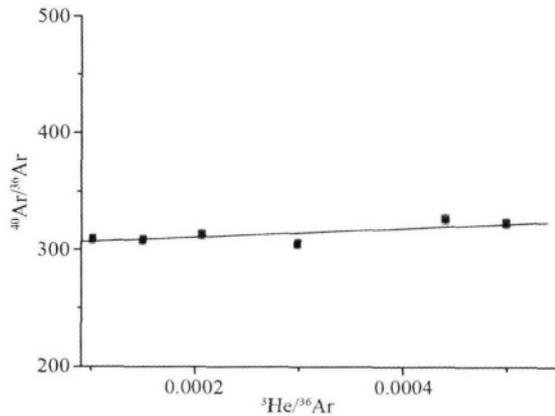


图3 晴隆锑矿床辉锑矿中流体包裹体 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解

Fig. 3 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ vs. $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ plot of inclusion trapped fluids in stibnites from the Qinglong antimony deposit

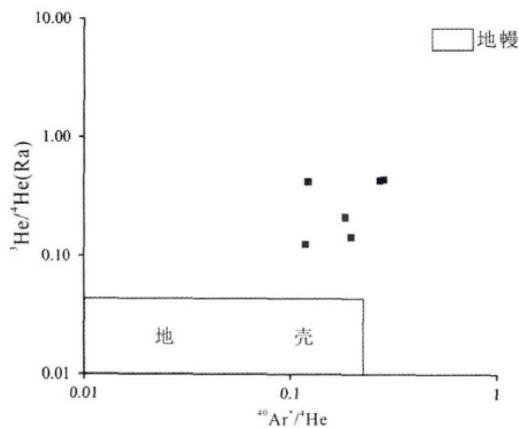


图4 晴隆锑矿床辉锑矿中流体包裹体 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ - $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Ra)图解(据胡瑞忠等, 1999 修改)

Fig. 4 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ vs. $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Ra) plot of inclusion trapped fluids in stibnites from the Qinglong antimony deposit (modified after Hu *et al.*, 1999)

中不仅存在地壳 He, 同时也有大量地幔 He。

虽然地壳放射成因氦和地幔氦都具有高 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的特点, 因而仅根据较高的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值无法区别它们究竟是放射成因氦还是地幔氦 (Xu *et al.*, 1995)。但是, 同时具有高 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和高含量的 ^3He , 则是地幔所特有的 (Hu *et al.*, 2004, 2009)。因此, 图3中由辉锑矿样品反映出的高 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和高 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ 端元, 应是含地幔流体端元。这一端元在图4中也反映得较明显, 在该图中高 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ 和高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的端元, 即为含地幔流体的端元。

晴隆锑矿床成矿流体的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为305~327(表1), 稍高于饱和大气雨水的 Ar 同位素组成。对图3中辉锑矿样品用最小二乘法拟合 ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 302.1 + 43129.7^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$)

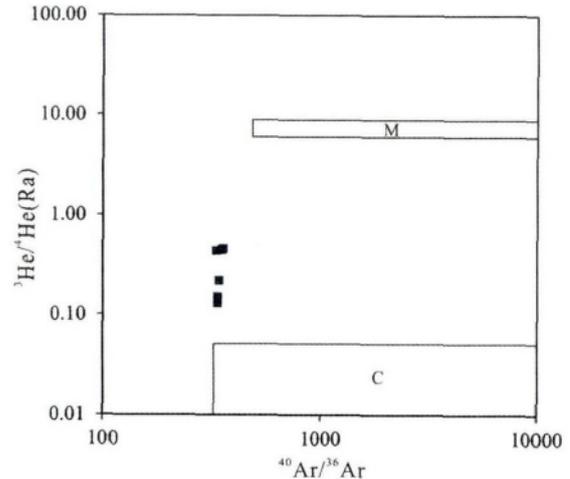


图5 晴隆锑矿床辉锑矿中流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Ra)图解(据丁德建等, 2014 修改)

M-地幔流体范围; C-地壳流体范围; 正方形为样品投影点

Fig. 5 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ vs. $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Ra) plot of inclusion trapped fluids in stibnites from the Qinglong antimony deposit (modified after Ding *et al.*, 2014)

当 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar} = 5 \times 10^{-8}$ (雨水的 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ 值) 时, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} \approx 302$, 其值在误差范围内与大气氩的同位素组成 ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} \approx 295.5$) 相似, 其中过剩氦很少, 这就是晴隆锑矿床成矿流体中具雨水性质的地壳端元 (胡瑞忠等, 1999)。由图4外推到地壳范围时, 这一端元的 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He} \approx 0.02$, 大大低于地壳岩石的 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ 特征值 (约0.2; Stuart *et al.*, 1995)。地下水从地壳岩石中获取放射成因 ^4He 和 ^{40}Ar , 与它们的封闭温度有关。氦的封闭温度通常较低 (<200°C, 许多含铀矿物 <100°C), 而氩的封闭温度则相对较高 (>200°C) (Lippolt and Weigel, 1988; McDougall and Harrison, 1988)。Torgersen *et al.* (1989) 的研究表明, 现代地下水 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ 值的降低, 是其从流经岩石中优先获取 ^4He (相对于 ^{40}Ar) 的结果。晴隆锑矿床成矿流体中具雨水性质的地壳流体端元较多获取了地壳氦但基本未能获取其中氩的特性, 说明它可能是一种低温 (<200°C) 流体 (胡瑞忠等, 1999)。

由此可见, 晴隆锑矿床的成矿流体由两个端元组成。一是地壳流体端元, 它具有饱和空气雨水的 Ar 同位素组成特征, 但是由于水岩相互作用的结果获得了较多地壳岩石中的放射性成因 ^4He , 是一种变化了的低温饱和空气雨水。另一端元是含地幔 He 的流体。

4.3 提供地幔 He 的地质体

如前所述, 晴隆锑矿床的赋矿围岩主要是以峨眉山玄武岩为主体的“大厂层”。以往对晴隆锑矿床的成因进行了较多研究, 但存在很大争议。主要有以下观点 (彭建堂等, 2003b 及其中的参考文献): (1) 与峨眉山玄武岩有关, 属于火山热液矿床; (2) 属于火山沉积-热液改造矿床。但是, 峨

表1 晴隆锑矿床辉锑矿中流体包裹体 He、Ar 同位素组成

Table 1 He and Ar isotopic compositions of fluid inclusions trapped in stibnites from the Qinglong antimony deposit

样品号	阶段	重量 (g)	$^3\text{He}/\text{cm}^3$ ($\times 10^{-14}$)	$^4\text{He}/\text{cm}^3$ ($\times 10^{-7}$)	$^{36}\text{Ar}/\text{cm}^3$ ($\times 10^{-9}$)	$^{40}\text{Ar}/\text{cm}^3$ ($\times 10^{-7}$)	$^{40}\text{Ar}^*/\text{cm}^3$ ($\times 10^{-7}$)	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$ (Ra)	$^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$	$^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ ($\times 10^{-5}$)
QL 3-21	早期	0.8908	5.246	1.264	1.755	5.359	0.129	305.35 ± 4.02	0.44 ± 0.03	0.102	2.989
QL09-11	早期	0.7576	5.488	2.688	2.659	8.327	0.402	313.11 ± 4.13	0.22 ± 0.02	0.149	2.064
QL09-10-1	早期	0.4812	5.939	1.629	1.348	4.167	0.365	326.62 ± 4.30	0.46 ± 0.04	0.224	4.406
QL 09-1	晚期	0.6404	5.376	1.274	1.077	3.484	0.272	323.19 ± 4.26	0.45 ± 0.04	0.214	4.992
QL09-10-2	晚期	0.8191	2.989	2.073	2.955	9.132	0.327	309.06 ± 4.06	0.15 ± 0.01	0.158	1.012
QL09-10-3	晚期	0.8192	4.258	3.018	2.847	8.782	0.298	308.46 ± 4.07	0.13 ± 0.01	0.099	1.496

眉山玄武岩形成于约 260Ma (Zhou *et al.*, 2006; Zhong *et al.*, 2011), 晴隆锑矿床形成于 150Ma 左右 (彭建堂等, 2003a), 该矿床不可能为火山热液成因。再者, 成矿流体的 Sr 同位素和稀土元素组成与峨眉山玄武岩有很大差异, 而与矿床底部岩石一致, 成矿物质具有赋矿围岩以外的来源 (彭建堂等 2003b; 朱俊宾等 2010); H、O 同位素地球化学研究显示, 成矿流体中的水主要是大气降水, 矿床不可能是热液对赋矿玄武岩原地改造的产物 (彭建堂等 2003b; 熊灿娟等, 2013)。可见, 峨眉山玄武岩除作为赋矿围岩外, 在成矿物质上并无重要贡献, 成矿流体是从异地迁移到“大厂层”成矿的。因此, 成矿流体中的地幔 He 也不可能是通过水-岩作用从地幔成因的峨眉山玄武岩获得。实际上, 由于晴隆锑矿床与峨眉山玄武岩有 110Myr 的时差, 玄武岩对地幔 He 的贡献很小 (Hilton *et al.*, 1990)。

已有研究表明, 晴隆锑矿床大致形成于 150Ma (彭建堂等 2003b), 同扬子地块东侧华夏地块内部侏罗纪花岗岩浆活动相关的钨锡多金属矿床的成矿时代相当 (150Ma 左右; Hu and Zhou, 2012; Hu *et al.*, 2012b; Mao *et al.*, 2013)。尽管右江盆地 Au-Sb-As-Hg 矿集区的中生代岩浆活动相对微弱, 但是遥感资料显示的环状构造和地球物理资料显示的异常特征表明, 此矿集区之下可能有隐伏岩体存在 (周永峰, 1993)。朱经经等 (2016) 和甘成势等 (2016) 的研究证明, 右江盆地下部确有 150Ma 左右的隐伏花岗岩体和安山岩, 是板内伸展环境幔源岩浆同化混染地壳物质的产物。因此, 我们推测这一时期右江盆地深部壳幔混合成因的花岗岩浆, 是晴隆锑矿床成矿流体中含地幔组分端元的提供者, 这与该矿床辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 0‰ 左右、成矿流体中的硫可能主要为岩浆成因的事实 (苏文超等 2015) 相一致。因此, 晴隆锑矿床以大气降水为主的成矿流体 (彭建堂等, 2003b; 熊灿娟等, 2013) 的加热、循环并浸取矿床围岩“大厂层”下伏地层中的成矿元素 (彭建堂等 2003b; 朱俊宾等 2010) 而成矿, 很可能是在 150Ma 左右, 受深部壳幔混合成因花岗岩浆释放出的、含幔源 He 和岩浆 S 的高温热流驱动的。

Li *et al.* (2006, 2007)、Wu *et al.* (2011) 和 Hu *et al.* (2012a) 研究了华夏地块形成于 150Ma 左右、与花岗岩有关的钨锡多金属矿床成矿流体的 He、Ar 同位素组成, 发现其中也含大量幔源 He, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的最大值约为 2Ra, 说明与其有

关的花岗岩是壳幔相互作用的产物。因为在 150Ma 左右的侏罗纪, 右江盆地与华夏地块具有相似的动力学背景 (甘成势等 2016), 其 150Ma 左右的隐伏花岗岩应与华夏地块同时期的钨锡成矿花岗岩的成因相似。如果把华夏地块钨锡矿床成矿流体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的最大值 (约为 2Ra) 作为壳幔混合成因花岗岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 组成, 则可大致估算出晴隆锑矿床成矿流体中来自壳幔混合成因花岗岩浆的 He 的比例。

根据二元体系混合模式, 可以计算样品中岩浆氦加入的百分比 (丁德建等 2014) 为:

$$\text{岩浆 He}(\%) = \frac{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{样品}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}}{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{岩浆}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}} \times 100$$

取地壳和壳幔混合成因花岗岩浆两个端元的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值分别为 0.03Ra (地壳 He 平均值) 和 2Ra, 可得到晴隆锑矿床成矿流体中来自壳幔混合成因花岗岩浆的 He 比例约为 5% ~ 22%。

5 结论

(1) 晴隆锑矿床成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 0.13 ~ 0.46Ra (Ra 为空气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为 305 ~ 327。成矿流体由两个端元混合而成。一是地壳流体, 另一端元是含地幔 He 的流体。

(2) 地壳流体具有饱和空气雨水的 Ar 同位素组成特征, 但由于水-岩相互作用的结果, 获得了较多地壳岩石中的放射性成因 ^4He , 是一种低温含地壳 He 的饱和空气雨水。

(3) 含地幔 He 的高温流体, 很可能来自右江盆地深部侏罗纪壳幔混合成因的花岗岩浆, 这种岩浆的形成机制类似于华夏地块侏罗纪与钨锡成矿有关的花岗岩。

(4) 晴隆锑矿床以大气降水为主的成矿流体的加热、循环并浸取矿床围岩“大厂层”下伏地层中的成矿元素而成矿, 是受深部壳幔混合成因花岗岩浆释放出的含幔源 He 和岩浆 S 的热流驱动的。

致谢 晴隆锑矿对野外工作给予了大力支持; 中国科学院地质与地球物理研究所贺怀宇研究员对氦、氩同位素分析给予了大力帮助; 胡瑞忠研究员对论文写作给予了指导和帮助; 两位匿名审稿人对论文的修改提出了宝贵意见; 在此一

并表示感谢。

References

- Burnard PG, Hu RZ, Turner G and Bi XW. 1999. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(10): 1595–1604
- Burnard PG and Polya DA. 2004. Importance of mantle derived fluids during granite associated hydrothermal circulation: He and Ar isotopes of ore minerals from Panasqueira. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(7): 1607–1615
- Chen Y, Liu XC and Zhang QH. 1984. A tentative discussion on the genesis of the Dachang antimony deposit, Qinglong County, Guizhou Province. *Mineral Deposits*, 3(3): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Ding DJ, Liang JL, Sun WD, Guo JH, Li H and Ye XR. 2014. He–Ar isotopes tracing for ore genesis of the Yangshan gold deposit. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(6): 813–819 (in Chinese with English abstract)
- Gan CS, Wang YJ, Zhang YZ, Liu HC and Zhang LM. 2016. The identification and implications of the Late Jurassic shoshonitic high-Mg andesite from the Youjiang basin. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3281–3294 (in Chinese with English abstract)
- Gu XX, Zhang YM, Li BH, Dong SY, Xue CJ and Fu SH. 2012. Hydrocarbon- and ore-bearing basal fluids: A possible link between gold mineralization and hydrocarbon accumulation in the Youjiang basin, South China. *Mineralium Deposita*, 47(6): 663–682
- Hilton DR, Gronvold K, O’Nions RK and Oxburgh ER. 1990. Regional distribution of ^3He anomalies in the Icelandic crust. *Chemical Geology*, 88(1): 53–67
- Hu RZ, Burnard PG, Turner G and Bi XW. 1998a. Helium and argon isotope systematics in fluid inclusions of Machangqing copper deposit in West Yunnan Province, China. *Chemical Geology*, 146(1–2): 55–63
- Hu RZ, Turner G, Burnard PG, Zhong H, Ye ZJ and Bi XW. 1998b. Helium and argon isotopic geochemistry of Jinding superlarge Pb–Zn deposit. *Science in China (Series D)*, 41(4): 442–448
- Hu RZ, Bi XW, Turner G and Burnard PG. 1999. He and Ar isotopic geochemistry of gold ore-forming fluids in the Ailaoshan gold mineralization belt. *Science in China (Series D)*, 29(4): 321–330 (in Chinese)
- Hu RZ, Su WC, Bi XW, Tu GZ and Hofstra AH. 2002. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China. *Mineralium Deposita*, 37(3–4): 378–392
- Hu RZ, Burnard PG, Bi XW, Zhou MF, Peng JT, Su WC and Wu KX. 2004. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River–Jinshajiang fault belt, SW China. *Chemical Geology*, 203(3–4): 305–317
- Hu RZ, Peng JT, Ma DS, Su WC, Shi CH, Bi XW and Tu GC. 2007. Epoch of large-scale low-temperature mineralizations in southwestern Yangtze massif. *Mineral Deposits*, 26(6): 583–596 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Burnard PG, Bi XW, Zhou MF, Peng JT, Su WC and Zhao JH. 2009. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: Evidence from He, Ar and C isotopes. *Chemical Geology*, 266(1–2): 86–95
- Hu RZ, Mao JW, Fan WH, Hua RM, Bi XW, Zhong H, Song XY and Tao Y. 2010. Some scientific questions on the intra-continental metallogeny in the South China continent. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 13–26 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ and Zhou MF. 2012. Multiple Mesozoic mineralization events in South China: An introduction to the thematic issue. *Mineralium Deposita*, 47(6): 579–588
- Hu RZ, Bi XW, Jiang GH, Chen HW, Peng JT, Qi YQ, Wu LY and Wei WF. 2012a. Mantle-derived noble gases in ore-forming fluids of the granite-related Yaogangxian tungsten deposit, southeastern China. *Mineralium Deposita*, 47(6): 623–632
- Hu RZ, Wei WF, Bi XW, Peng JT, Qi YQ, Wu LY and Chen YW. 2012b. Molybdenite Re–Os and muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Xihuashan tungsten deposit, central Nanling district, South China. *Lithos*, 150: 111–118
- Hu RZ, Mao JW, Hua RM and Fan WM. 2015. Intra-Continental Mineralization of South China Craton. Science Press, Beijing, 1–903 (in Chinese)
- Kendrick MA, Burgess R, Harrison D and Bjørlykke A. 2005. Noble gas and halogen evidence for the origin of Scandinavian sandstone-hosted Pb–Zn deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(1): 109–129
- Kendrick MA, Honda M, Oliver NHS and Phillips D. 2011. The noble gas systematics of late-orogenic H_2O – CO_2 fluids, Mt Isa, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(6): 1428–1450
- Li ZL, Hu RZ, Peng JT, Bi XW and Li XM. 2005. Advances in tracing the ore-forming fluids using rare gas isotopes. *Advances in Earth Science*, 20(1): 57–63 (in Chinese with English abstract)
- Li ZL, Hu RZ, Peng JT, Bi XW and Li XM. 2006. Helium isotope geochemistry of ore-forming fluids from Furong tin orefield in Hunan Province, China. *Resource Geology*, 56(1): 9–15
- Li ZL, Hu RZ, Yang JS, Peng JT, Li XM and Bi XW. 2007. He, Pb and S isotopic constraints on the relationship between the A-type Qitianling granite and the Furong tin deposit, Hunan Province, China. *Lithos*, 97(1–2): 161–173
- Lippolt HJ and Weigel E. 1988. ^4He diffusion in ^{40}Ar -retentive minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(6): 1449–1458
- Liu JS. 1993. Reviews on the reserves of antimony in China. *Mineral Geology of Southwest*, (4): 61–64 (in Chinese with English abstract)
- Ma JL and Tao MX. 2002. The advances in the research of noble gas isotopic geochemistry. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(5): 471–476 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Cheng YB, Chen MH and Pirajno F. 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Mineralium Deposita*, 48(3): 267–294
- Marty B, Jambon A and Sano Y. 1989. Helium isotopes and CO_2 in volcanic gases of Japan. *Chemical Geology*, 76(1–2): 25–40
- McDougall I and Harrison TM. 1988. *Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method*. Oxford: Oxford University Press
- Peng JT, Hu RZ and Burnard PG. 2003. Samarium-neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit (Hunan, China): The potential of calcite as a geochronometer. *Chemical Geology*, 200(1–2): 129–136
- Peng JT, Hu RZ and Jiang GH. 2003a. Samarium–Neodymium isotope system of fluorites from the Qinglong antimony deposit, Guizhou Province: Constraints on the mineralizing age and ore-forming materials’ sources. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 785–791 (in Chinese with English abstract)
- Peng JT, Hu RZ and Jiang GH. 2003b. Strontium isotope geochemistry of fluorites from Qinglong antimony deposit in Guizhou Province. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 244–251 (in Chinese with English abstract)
- Qiu HN. 1996. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the quartz samples from two mineral deposits in western Yunnan (SW China) by crushing in vacuum. *Chemical Geology*, 127(1–3): 211–222
- Simmons SF, Sawkins FJ and Schlutter DJ. 1987. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits. *Nature*, 329(6138): 429–432
- Stuart FM, Turner G, Duckworth RC and Fallick AE. 1994. Helium isotopes as tracers of trapped hydrothermal fluids in ocean-floor sulfides. *Geology*, 22(9): 823–826
- Stuart FM, Burnard PG, Taylor RP and Turner G. 1995. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He–Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W–Mo mineralisation,

- South Korea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(22): 4663-4673
- Su F, Xiao Y, He HY, Su BX, Wang Y and Zhu RX. 2014. He and Ar isotope geochemistry of pyroxene megacrystals and mantle xenoliths in Cenozoic basalt from the Changle-Linqu area in western Shandong. *Chinese Science Bulletin*, 59(4): 396-411
- Su WC, Hu RZ, Xia B, Xia Y and Liu YP. 2009a. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China. *Chemical Geology*, 258(3-4): 269-274
- Su WC, Heinrich CA, Pettke T, Zhang XC, Hu RZ and Xia B. 2009b. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: Products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids. *Economic Geology*, 104(1): 73-93
- Su WC, Zhu LY, Ge X, Shen NP, Zhang XC and Hu RZ. 2015. Infrared microthermometry of fluid inclusions in stibnite from the Dachang antimony deposit, Guizhou. *Acta Petrologica Sinica*, 31(4): 918-924 (in Chinese with English abstract)
- Torgersen T, Kennedy BM, Hiyagon H, Chiou KY, Reynolds JH and Clarke. 1989. Argon accumulation and the crustal degassing flux of ^{40}Ar in the Great Artesian Basin, Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 92(1): 43-56
- Tu GC. 1998. *Low Temperature Geochemistry*. Beijing: Science Press, 1-266 (in Chinese)
- Tu GC. 2000. *Super-Large Ore Deposits in China (I)*. Beijing: Science Press, 1-588 (in Chinese)
- Tu GC. 2002. Two unique mineralization areas in Southwest China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 21(1): 1-2 (in Chinese with English abstract)
- Turner G and Stuart F. 1992. Helium/heat ratios and deposition temperatures of sulphides from the ocean floor. *Nature*, 357(6379): 581-583
- Turner G and Wang SS. 1992. Excess argon, crustal fluids and apparent isochrons from crushing K-feldspar. *Earth and Planetary Science Letters*, 110(1-4): 193-211
- Turner G, Burnard PB, Ford JL, Gilmour JD, Lyon IC, Stuart FM, Gruszczynski M and Halliday A. 1993. Tracing fluid sources and interaction. *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering*, 344(1670): 127-140
- Wu LY, Hu RZ and Bi XW. 2007. Some advances in the research on noble gas isotopic geochemistry. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(1): 88-93 (in Chinese with English abstract)
- Wu LY, Hu RZ, Peng JT, Bi XW, Jiang GH, Chen HW, Wang QY and Liu YY. 2011. He and Ar isotopic compositions and genetic implications for the giant Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo deposit, Hunan Province, South China. *International Geology Review*, 53(5-6): 677-690
- Xiong CJ, Liu JZ, Liu S, Wang DF, Yang CF, Wang ZP and Chen R. 2013. Study on fluid inclusion of Qinglong Dachang antimony deposit. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 30(6): 47-52 (in Chinese with English abstract)
- Xu S, Nakai S, Wakita H and Wang XB. 1995. Mantle-derived noble gases in natural gases from Songliao Basin, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(22): 4675-4683
- Zhang CQ, Yu JJ, Mao JW and Rui ZY. 2009. Advances in the study of Mississippi Valley-type deposits. *Mineral Deposits*, 28(2): 195-210 (in Chinese with English abstract)
- Zhong H, Campbell IH, Zhu WG, Allen CM, Hu RZ, Xie LW and He DF. 2011. Timing and source constraints on the relationship between mafic and felsic intrusions in the Emeishan large igneous province. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(5): 1374-1395
- Zhou JX, Huang ZL, Zhou MF, Zhu XK and Muecher P. 2014. Zinc, sulfur and lead isotopic variations in carbonate-hosted Pb-Zn sulfide deposits, Southwest China. *Ore Geology Reviews*, 58: 41-54
- Zhou MF, Zhao JH, Qi L, Su WC and Hu RZ. 2006. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(1): 1-19
- Zhou YF. 1993. The application of regional gravity to the deep geology and mineralization prognosis in Guangxi. *Geology of Guangxi*, 6(2): 15-24 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JB, Fang WX, Liu JJ and Hu YZ. 2010. The REE characteristics and genetic study of Qinglong antimony deposit, Guizhou. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 25(2): 118-123 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JJ, Zhong H, Xie GQ, Zhao CH, Xu LL and Lu G. 2016. Provenance and geological implication of the inherited zircon from felsic dykes, Youjiang Basin, China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3269-3280 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈豫, 刘秀成, 张启厚. 1984. 贵州晴隆大厂锑矿床成因探讨. *矿床地质*, 3(3): 1-12
- 丁德建, 梁金龙, 孙卫东, 郭俊华, 李贺, 叶先仁. 2014. 阳山金矿成矿流体的 He-Ar 同位素示踪. *矿物岩石地球化学通报*, 33(6): 813-819
- 甘成势, 王岳军, 张玉芝, 刘汇川, 张立敏. 2016. 右江盆地晚侏罗世钾玄质高镁安山岩的厘定及其构造意义. *岩石学报*, 32(11): 3281-3294
- 胡瑞忠, 毕献武, Turner G and Burnard PG. 1999. 哀牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学. *中国科学(D 辑)*, 29(4): 321-330
- 胡瑞忠, 彭建堂, 马东升, 苏文超, 施春华, 毕献武, 涂光炽. 2007. 扬子地块西南缘大面积低温成矿时代. *矿床地质*, 26(6): 583-596
- 胡瑞忠, 毛景文, 范蔚茗, 华仁民, 毕献武, 钟宏, 宋谢炎, 陶琰. 2010. 华南陆块陆内成矿作用的一些科学问题. *地学前缘*, 17(2): 13-16
- 胡瑞忠, 毛景文, 华仁民, 范蔚茗. 2015. 华南陆块陆内成矿作用. 北京: 科学出版社, 1-903
- 李兆丽, 胡瑞忠, 彭建堂, 毕献武, 李晓敏. 2005. 稀有气体同位素示踪成矿古流体研究进展. *地球科学进展*, 20(1): 57-63
- 刘吉生. 1993. 中国锑矿资源储量综述. *西南矿产地质*, (4): 61-64
- 马锦龙, 陶明信. 2002. 稀有气体同位素地球化学研究进展. *地球学报*, 23(5): 471-476
- 彭建堂, 胡瑞忠, 蒋国豪. 2003a. 萤石 Sm-Nd 同位素体系对晴隆锑矿床成矿时代和物源的制约. *岩石学报*, 19(4): 785-791
- 彭建堂, 胡瑞忠, 蒋国豪. 2003b. 贵州晴隆锑矿床中萤石的 Sr 同位素地球化学. *高校地质学报*, 9(2): 244-251
- 苏文超, 朱路艳, 格西, 沈能平, 张兴春, 胡瑞忠. 2015. 贵州晴隆大厂锑矿床辉锑矿中流体包裹体的红外显微测温学研究. *岩石学报*, 31(4): 918-924
- 涂光炽. 2002. 我国西南地区两个别具一格的成矿带(域). *矿物岩石地球化学通报*, 21(1): 1-2
- 涂光炽. 1998. *低温地球化学*. 北京: 科学出版社, 1-266
- 涂光炽. 2000. *中国超大型矿床(I)*. 北京: 科学出版社, 1-588
- 武丽艳, 胡瑞忠, 毕献武. 2007. 稀有气体同位素地球化学研究的某些进展. *矿物岩石地球化学通报*, 26(1): 88-93
- 熊灿娟, 刘建中, 刘帅, 王大福, 杨成富, 王泽鹏, 陈睿. 2013. 晴隆大厂锑矿流体包裹体研究. *贵州大学学报(自然科学版)*, 30

(6): 47-52

张长青, 余金杰, 毛景文, 芮宗瑶. 2009. 密西西比型(MVT) 铅锌矿床研究进展. 矿床地质, 28(2): 195-210

周永峰. 1993. 区域重力资料研究在广西深部地质和成矿预测中的应用. 广西地质, 6(2): 15-24

朱俊宾, 方维萱, 刘家军, 胡煜昭. 2010. 贵州晴隆锑矿稀土元素特征与成因探讨. 地质找矿论丛, 25(2): 118-123

朱经经, 钟宏, 谢桂青, 赵成海, 胥磊落, 陆刚. 2016. 右江盆地酸性岩脉继承锆石成因及地质意义. 岩石学报, 32(11): 3269-3280