

文章编号: 0258-7106(2012)06-1149-14

个旧卡房层状铜矿床金云母和云英岩化白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄及意义*

张娟¹, 毛景文^{1,2}, 程彦博^{1,2}, 李肖龙^{1,3}

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3 中国地质调查局河南省地质调查院, 河南 郑州 450001)

摘要 在个旧锡铜多金属矿集区发育有矽卡岩型和热液脉型等锡铜矿化体, 其形成时代是晚白垩世, 属与花岗岩有关的岩浆热液成因矿床。赋存于三叠纪蚀变玄武岩层中, 呈(似)层状的铜矿体的精确年龄尚未有报道, 成因仍备受争议。文章选择赋存于卡房矿田蚀变玄武岩层中, 呈(似)层状分布的铜矿体中的金云母, 及新山岩体接触带云英岩中的白云母为研究对象, 利用 ^{40}Ar - ^{39}Ar 阶段加热同位素定年方法对它们进行了年代学研究, 获得了金云母和白云母的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素坪年龄分别为 $(79.55 \pm 0.47) \text{ Ma}$ 和 $(79.53 \pm 0.57) \text{ Ma}$, 对应等时线年龄分别为 $(79.8 \pm 1.3) \text{ Ma}$ 和 $(79.7 \pm 1.0) \text{ Ma}$, 反等时线年龄分别为 $(79.7 \pm 2.0) \text{ Ma}$ 和 $(79.61 \pm 0.75) \text{ Ma}$, 两者年龄基本一致。结合矿物共生组合特征和流体包裹体测温资料, 认为金云母的坪年龄 $(79.55 \pm 0.47) \text{ Ma}$, 可以代表卡房蚀变玄武岩中(似)层状铜矿的形成时代, 而白云母的坪年龄 $(79.53 \pm 0.57) \text{ Ma}$, 则代表新山岩体形成后期岩浆热液活动的年龄。这2个年龄与个旧锡铜多金属矿床的成矿时代基本一致, 应是同一构造-岩浆-流体活动形成的成矿系列产物。

关键词 地球化学; ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄; 金云母; 白云母; 层状矿体; 新山岩体; 卡房铜矿; 个旧
中图分类号 P618.41; P618.44 **文献标志码** A

^{40}Ar - ^{39}Ar phlogopite dating of stratified ore body and muscovite dating of greisens from Xinshan granite intrusion of Kafang tin-copper deposit in Gejiu area, Yunnan Province

ZHANG Juan¹, MAO JingWen^{1,2}, CHENG YanBo^{1,2} and LI XiaoLong^{1,3}

(1 School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
3 Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract

The skarn type and hydrothermal vein type tin copper deposits in the Gejiu polymetallic tin copper ore district, formed in late Cretaceous, are referred to as the magmatic hydrothermal genesis. The stratified ore body, closely related to meta-basalt, has not been given accurate age, so there still exists controversy about its genesis. This paper presents new ^{40}Ar - ^{39}Ar phlogopite age for the stratified ore body and muscovite age for the greisens from the contact zone of Xinshan granite intrusion in the Kafang tin-copper deposit so as to constrain the timing and duration of mineralization and the timing of the magmatic thermal activity after the formation of Xinshan

* 本文受到国家自然科学基金重点项目(40930419)、国土资源部公益性行业科研专项(200911007-12)、云南锡业集团有限责任公司科研项目(2010-04A)和国家973项目(1212011120994)联合资助

第一作者简介 张娟,女,1987年生,在读硕士,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: zhangjqtds@126.com

收稿日期: 2012-03-20; 改回日期: 2012-04-17。张绮玲编辑。

granite body. Phlogopite and muscovite yielded ^{40}Ar - ^{39}Ar plateau ages of (79.55 ± 0.47) Ma and (79.53 ± 0.57) Ma, isochronal ages of (79.8 ± 1.3) Ma and (79.7 ± 1.0) Ma, and inverse isochronal ages of (79.7 ± 2.0) Ma and (79.61 ± 0.75) Ma. In combination with studies of mineral paragenesis and fluid inclusions, the authors have concluded that the ^{40}Ar - ^{39}Ar system in phlogopite is closely related to ore deposition, and constrains the formation of the stratified ore body at (79.55 ± 0.47) Ma. The ^{40}Ar - ^{39}Ar system in muscovite constrains the activity of the magmatic hydrothermal solution at (79.53 ± 0.57) Ma after the formation of Xinshan granite intrusion. These results are coincident with the data of the Gejiu polymetallic tin-copper deposits, and hence the above tin-copper deposits belong to the same structure-magma-fluid system.

Key words: geochemistry, ^{40}Ar - ^{39}Ar age, phlogopite, muscovite, stratified ore body, Xinshan granite intrusion, Kafang copper deposit, Gejiu

个旧是全球最大的锡多金属矿集区(图1),已探明的锡资源储量超过300万吨,占世界储量的24.66%(程彦博等,2010)。Sn、Cu、Pb、Zn、W、Bi、Mo、Ga、Cd、Nb、Ta、Be、Fe、Au、Ag等有色、稀有及贵金属矿产达20余种,其资源总量超过了1000万吨(庄永秋,1996;程彦博等,2010)。由于锡矿床通常与花岗岩的关系密切,因而长期以来认为个旧锡多金属矿床是与燕山期花岗岩有密切成因联系的热液矿床(彭程电,1985;朱金初等,1991;罗君烈,1995;郑庆鳌等,1997)。二十世纪八九十年代,随着国际同生矿床成矿理论的发展,一些学者对个旧层状矿床的成因有了不同的看法,如金祖德(1981;1991)认为个旧锡矿是典型的三叠纪同生沉积矿床,彭张翔(1992)认为个旧锡矿床是一个成因比较复杂的层控型锡多金属矿床。随着矿山勘探和开发的深入,矿集区内大量层状和似层状矿体被揭露,以及具条带状构造的胶状和鲕状黄铁矿矿石、藻类化石的发现,致使许多学者对个旧锡多金属矿床的岩浆热液成因提出质疑,周怀阳等(1989)、周建平等(1997;1998;1999)、张欢等(2003;2007)提出并论证了海底喷流沉积成矿的认识,秦德先等(2006a;2006b)将个旧锡矿的成矿作用分为3个系列,即:印支期海底基性火山沉积成矿系列、印支期海底喷流沉积成矿系列和燕山期花岗岩叠加改造成矿系列。然而,杨宗喜等(2008;2009)利用辉钨矿Re-Os和白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素测年方法,分别获得了个旧卡房砂卡岩型锡铜矿床和个旧老厂细脉带型锡矿床的精确成矿年龄为 (83.4 ± 2.1) Ma和 (82.7 ± 0.7) Ma,与成矿有关的新山花岗岩和老厂-卡房花岗岩的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄分别为 (83.1 ± 0.42) Ma和 (85 ± 0.85) Ma(程彦博等,2008a;Cheng et al.,2010),因而可以认为个旧锡铜多金属矿床的成矿作用与白垩

纪花岗岩的侵位密切相关。

个旧矿集区内铜锡矿主要有3类:砂卡岩型、热液脉型及与蚀变玄武岩有关的层状铜锡矿(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984),后者即指前人所谓的“变玄武岩型”、“块状硫化物型”、“基性火山岩型”铜矿。如上所述,砂卡岩型铜锡矿和热液脉型锡矿的精确成矿年龄已经得到,而与蚀变玄武岩有关的层状(锡)矿的精确成矿年龄尚未有报道。秦德先等(2006a)运用Ar-Ar、K-Ar和Pb-Pb法得到了其划分的成矿系列(印支期海底基性火山沉积成矿系列)内矿体的年龄,为Ar-Ar法坪年龄和等时线年龄 $95.93 \sim 123.91$ Ma,K-Ar法表观年龄为112.50 Ma,普通铅法年龄为210~240 Ma,数据范围较大,不能很好限定其成矿时限,且不利于理解铜锡矿的成矿作用及成矿环境。尤其是对矿集区内蚀变玄武岩中的(似)层状铜矿体,由于缺乏可靠的成矿年龄数据,因而其成因还存在岩浆热液型和海底喷流沉积型两种截然不同的认识。

卡房矿田(图2)位于个旧锡多金属矿集区东区的南部,是矿集区内的重要铜矿产区,与三叠纪蚀变玄武岩有关的(似)层状(锡)矿,是卡房矿田重要的原生锡铜矿化类型,而新山岩体是矿田内重要的成矿岩体,并显示出与矿体密切的空间关系(图3)。本文在详细了解卡房矿田与蚀变玄武岩有关的层状铜矿床及新山岩体的地质特征基础上,选择与蚀变玄武岩有关的层状铜矿体密切共生的金云母,及新山岩体边部云英岩中白云母作为研究对象,利用 ^{40}Ar - ^{39}Ar 阶段加热同位素测年方法,对层状铜矿床及新山岩体热液活动时代进行了精确定年,厘定了蚀变玄武岩型铜锡矿化的成矿时限,为进一步探讨个旧锡铜多金属矿床的成因和完善成矿模式提供了新的数据,对下一步找矿具有帮助。

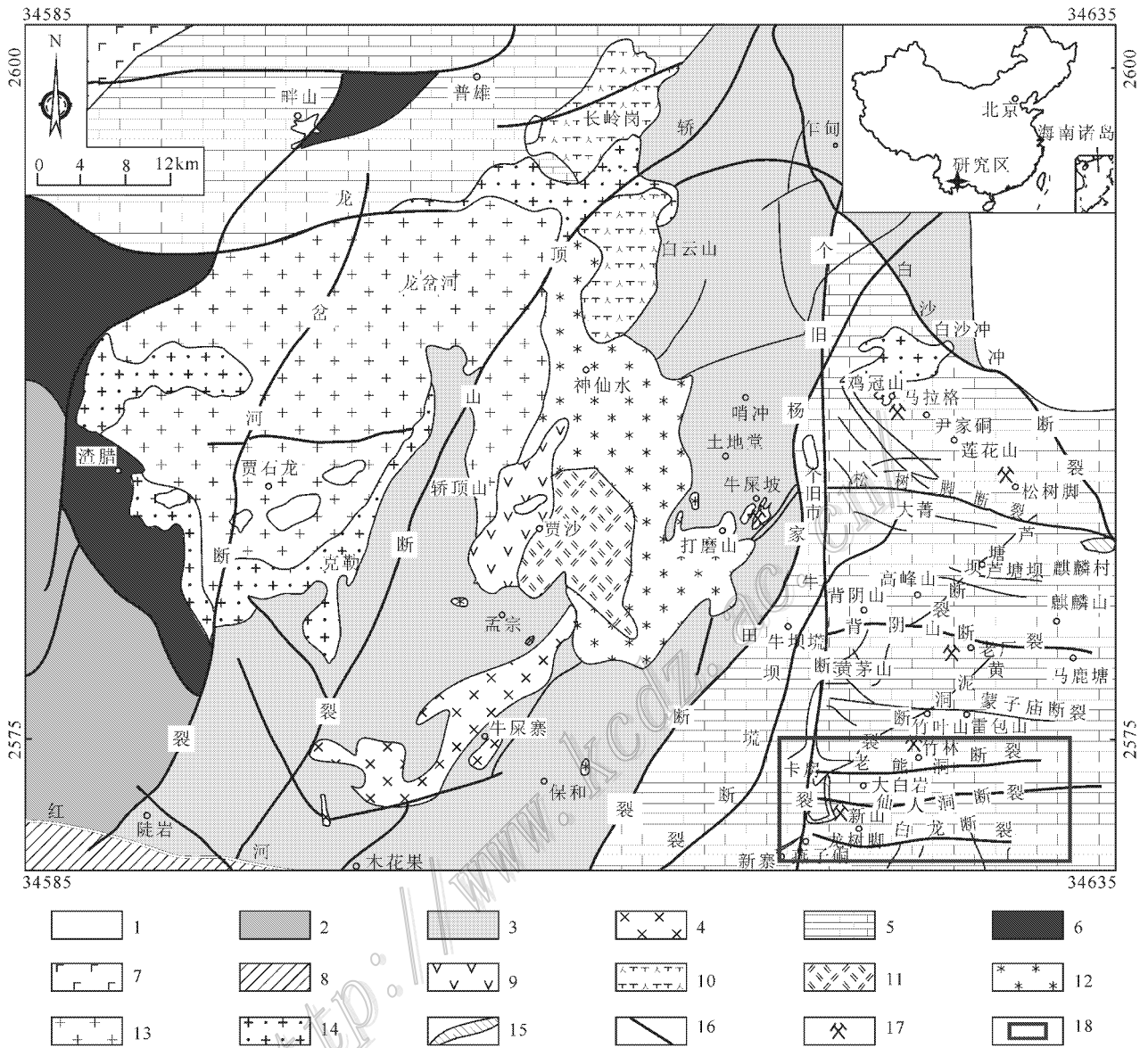


图 1 个旧地区地质简图及主要锡多金属矿床分布图(据毛景文等 2008,该图在冶金工业部西南冶金地质勘探公司, 1984 文献基础上修编)

1—第四系沉积物;2—上三叠统火把冲组板岩、砂岩、砂砾岩;3—中三叠统法郎组砂岩、页岩夹凝灰岩和玄武质熔岩;4—中三叠统法郎组玄武质熔岩;5—中三叠统个旧组碳酸盐岩;6—下三叠统紫红色砂岩夹绿色砂岩、泥灰岩;7—二叠纪峨眉山溢流玄武岩;8—哀牢山变质带;9—辉长岩;10—霞石正长岩;11—碱长花岗岩(原二长岩);12—碱性花岗岩;13—斑状黑云母花岗岩;14—等粒黑云母花岗岩;15—辉绿岩墙;16—断层;17—主要矿床;18—图 2 位置

Fig. 1 Geological sketch map of Gejiu area, showing the distribution of polymetallic tin deposits (after Mao et al., 2008a; SMGPC, 1984)

1—Quaternary; 2—Upper Triassic Huobachong Formation: slate, sandstone, and glutinite; 3—Middle Triassic Falang Formation: sandstone, shale intercalated with tuff and basaltic lava; 4—Middle Triassic Falang Formation: basaltic lava; 5—Middle Triassic Gejiu Formation: carbonate rock; 6—Lower Triassic purplish red sandstone intercalated with green sandstone and marlite; 7—Permian Emeishan flood basalt; 8—Ailao Mountain metamorphic zone; 9—Gabbro; 10—Nepheline syenite; 11—Alkali feldspar granite (formerly monzonite); 12—Alkali granite; 13—Porphyritic biotite granite; 14—Equigranular biotite granite; 15—Diabase dike; 16—Fault; 17—Main ore deposit; 18—Location of Fig. 2

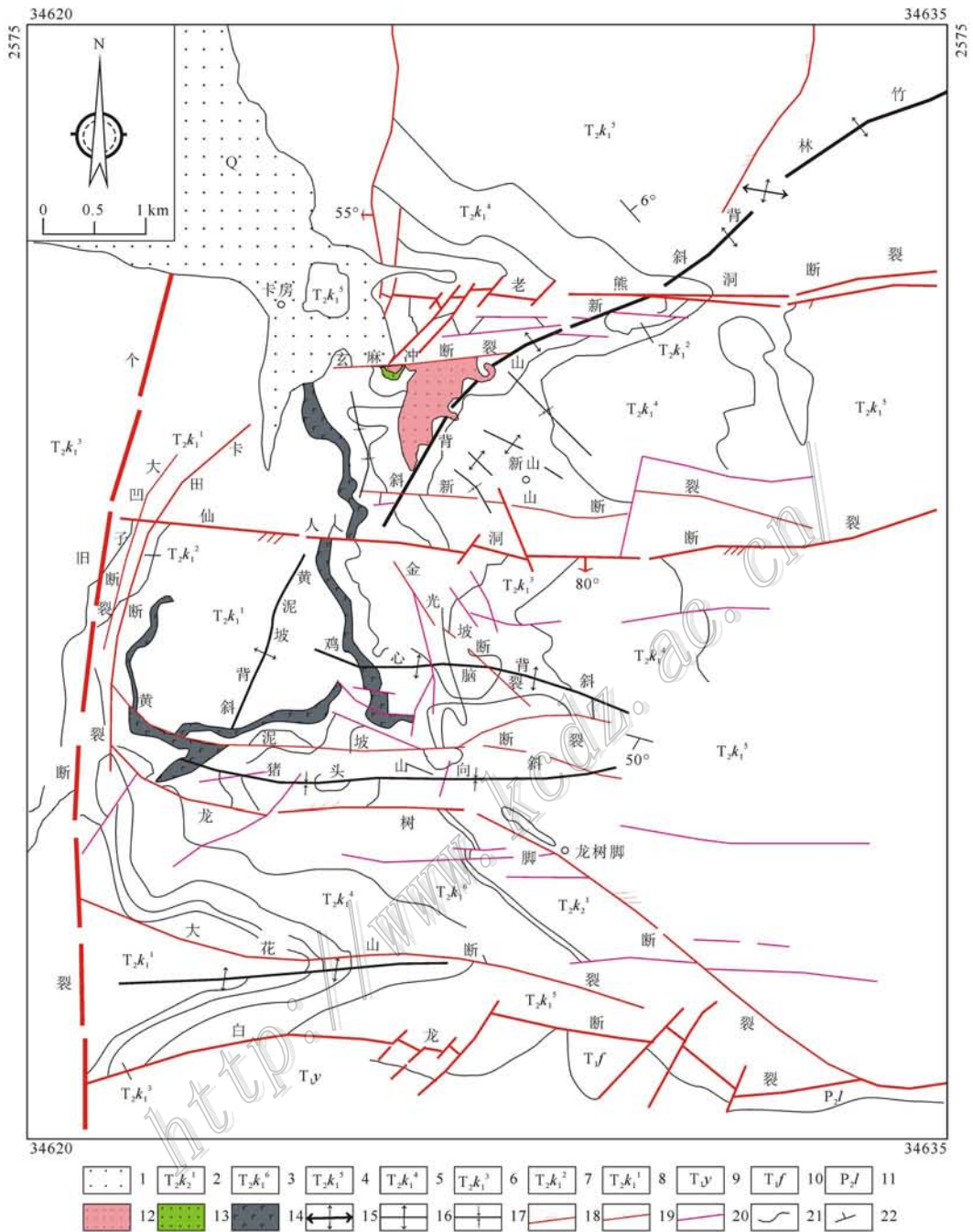


图 2 卡房矿田地质图(据冶金工业部西南冶金地质勘探公司(308地质队),1984修编)

1—第四纪沉积物; 2—9: 个旧组: 2—中至厚层状白云岩; 3—薄至中厚层状灰质白云岩与灰岩互层; 4—中厚层状石灰岩; 5—薄至中厚层状灰质白云岩与灰岩互层; 6—石灰岩与泥质灰岩互层; 7—灰质白云岩与灰岩互层; 8—石灰岩夹泥质灰岩; 9—永宁镇组绿色泥灰岩夹灰岩; 10—飞仙关组紫红色砂页岩泥岩; 11—龙潭组黄绿色砂页岩; 12—燕山期中细粒黑云母花岗岩; 13—砂卡岩; 14—蚀变玄武岩; 15—穹窿; 16—背斜轴线; 17—向斜轴线; 18—压扭性断层; 19—张扭性断层; 20—性质不明断层; 21—地层界线; 22—岩层产状

Fig. 2 Geological map of the Kafang orefield (modified after No. 308 Geological Party, 1984)

1—Quaternary; 2—9: Gejiu Formation: 2—Medium-thick stratified dolomite; 3—Thin-medium interbedded calcite dolomite and limestone; 4—Medium-thick stratified limestone; 5—Thin-thick interbedded calcite dolomite and limestone; 6—Interbedded limestone and argillaceous limestone; 7—Interbedded calcite dolomite and limestone; 8—Limestone and argillaceous dolostone; 9—Yongningzhen Formation: green argillaceous limestone and limestone; 10—Feixianguan Formation: purplish red sandy shale and mudstone; 11—Longtan Formation: yellow-green sandy shale; 12—Yan-shannian fine-medium grained biotite granite; 13—Skarn; 14—Basaltic lava; 15—Dome; 16—Anticline axis; 17—Syncline axis; 18—Compresso-shear fault; 19—Tension-shear fault; 20—Unknown fault; 21—Stratigraphic boundary; 22—Attitude of rocks

1 区域地质背景

个旧锡铜多金属矿集区位于华南地块西部边缘,以区域性红河断裂带为界与三江褶皱带相邻。矿集区出露的地层自下而上分别是:二叠纪玄武岩、上二叠统龙潭组细粒碎屑岩及煤系、下三叠统飞仙关组杂色砂页岩、下三叠统永宁镇组砂泥岩、中三叠统个旧组碳酸盐岩、中三叠统法郎组细粒碎屑岩和碳酸盐岩、上三叠统乌格组和火把冲组细粒碎屑岩夹透镜状烟煤层和砂砾岩层、第三系砂砾岩以及第四系残积-坡积堆积物(庄永秋等,1996)。其中,中三叠统个旧组碳酸盐岩在区内广泛发育,按岩性组合可分为3段:上部为白泥洞段,以灰岩为主,内含不规则状白云岩;中部为马拉格段,以白云岩为主,夹不规则状灰岩;下部为卡房段,为灰岩和灰质白云岩互层,内有基性火山岩。另外,在中三叠统法郎组的下部和上部分别夹有基性火山岩。上述各地层间,第三系、第四系与其余各地层为不整合接触,二叠纪飞仙关组与龙潭组、个旧组与法郎组之间为假整合接触,其余均为整合接触(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984;庄永秋等,1996)。

NS向个旧断裂属小江岩石圈断裂南延部分,这条区域性超壳深大断裂,将个旧矿集区分为东、西2个区,锡铜多金属矿主要产于东区,面积上百平方千米。此外,还有NNE向龙岔河、轿顶山、杨家田等断裂带、NW向白沙冲断裂和EW向断裂带。东区的褶皱构造主要为NS-NNE向、EW向的复式褶皱。其中,NE向、NNE向及EW向断裂为个旧地区最重要的控矿构造。东区内5条EW向的压扭性大断裂(松树脚断裂、背阴山断裂、老熊洞断裂、仙人洞断裂和白龙断裂),将个旧东区自北而南分为马拉格、松树脚、老厂、竹林和卡房5个矿田。5个矿田内有几十个矿体群产出,已探明的大小矿体有1300多个(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984)。

在个旧地区,二叠纪和三叠纪发生了2次基性火山喷溢活动,白垩纪还发生了大规模的岩浆侵入。与成矿有关的主要为三叠纪玄武岩和白垩纪花岗岩。三叠纪玄武岩主要有3期:中三叠世安尼期(个旧组下段)、拉丁尼克早期(法郎组下段)和拉丁尼克晚期-诺利克期(法郎组上段),均呈层状产出,与围岩呈整合接触关系。安尼期玄武岩分布在个旧东区诸矿田的地表及井下;拉丁尼克早期的玄武岩主要

分布于水塘寨-保和-木花果以及木卜玲一带的法郎组下部;拉丁尼克晚期-诺利克期玄武岩分布在西区贾沙以南的他白、林和村-尼得、德胜冲、牛屎寨一带的法郎组上部。由于白垩纪花岗岩体的侵入,该区玄武岩广泛遭受到不同程度的蚀变作用,虽然矿物成分已经发生变化,但是仍然保留了基性火山岩的结构和构造特征(黎应书等,2006a)。三叠纪玄武岩为碱性玄武岩,形成于大陆张裂环境(黎应书等,2009)。

白垩纪岩浆岩有辉长岩、似斑状花岗岩、等粒花岗岩、碱长花岗岩(神仙水岩体)、碱性岩和煌斑岩等。其中,斑状花岗岩和等粒花岗岩与成矿具有明显的时空分布关系(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984;朱金初等,1990)。程彦博等(2008a;2008b;2009)和Cheng等(2010)运用锆石SHRIMP或者LA-ICP-MS U-Pb法,对矿集区内侵入岩的形成时代进行了精确厘定,得到神仙水等粒花岗岩主要形成于81~83 Ma,闪长质岩浆包体形成于82 Ma,辉长岩形成于80 Ma,白沙冲等粒花岗岩形成于77~79 Ma,龙岔河似斑状花岗岩主要形成于81~83 Ma,马拉格-松树脚似斑状花岗岩形成于82.8 Ma,老厂似斑状花岗岩形成于83 Ma,白云山碱性岩的形成时代约为76.6 Ma,羊坝底煌斑岩的形成时代约为77 Ma,老卡等粒花岗岩岩体形成于85 Ma,新山等粒花岗岩体形成于83 Ma。可见,个旧矿集区内不同类型岩浆岩的形成时代基本一致,集中在76~85 Ma之间,为晚白垩世。

矿集区内矿化类型多样,主要有矽卡岩型、云英岩型、Manto型(或层间交代型)、脉型(包括石英-电气石脉、矽卡岩脉、金云母和锡石硫化物脉)和与蚀变玄武岩有关的(似)层状矿体等。除了与蚀变玄武岩有关的(似)层状矿床为单一铜矿或以铜为主的锡铜矿外,其余都是以锡为主的(锡、铜)多金属矿,尽管还曾报道有石英黑钨矿脉、风化壳型铌钽稀有元素矿和含锡白云岩型矿床等,但不具有重要工业意义(毛景文等,2008)。铜矿化主要有与蚀玄武岩有关的(似)层状铜矿、矽卡岩型铜矿和热液脉型铜矿等,以前两者为主。与蚀变玄武岩有关的(似)层状铜矿主要分布在卡房和老厂,矿体呈(似)层状位于三叠纪蚀变玄武岩层内或蚀变玄武岩与碳酸盐岩(大理岩)层间断裂、裂隙带中,此类矿体规模较大,品位高,但变化大,主要呈单一铜矿出现;矽卡岩型铜矿主要产于花岗岩与碳酸盐岩接触带中,矿物成分较

复杂,平均品位 $\alpha(\text{Cu})$ 0.5% ~ 1%,有的矿体 $\alpha(\text{Cu})$ 达到 2% ~ 3%(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984)。

2 卡房铜锡矿床特征和采样位置

2.1 矿田地质

卡房矿田位于个旧矿集区东区的南部(图1),矿田北部以老熊洞断裂与老厂矿田为界,南界为白龙断裂(图2);西至大黑山,东抵蒋家坪-龙头寨,面积约 42 km²,由新山矿段,鸡心脑矿段及龙树脚矿段组成(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984)。

矿田出露的地层为上二叠统龙潭组泥砂岩,下三叠统永宁镇组泥质灰岩、泥砂岩及飞仙关组砂页岩,中三叠统个旧组碳酸盐岩,新近系黏土层、砂页岩层、砂砾岩层以及第四系沉积物。其中,中三叠统个旧组下部卡房段在矿田内分布最广,其岩性为灰色、深灰色薄-中厚层状白云岩、灰岩、灰质白云岩、白云质灰岩及其互层(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984;庄永秋等,1996)。

卡房矿田内褶皱与断裂构造发育,共同控制着矿体的产出。褶皱构造主要有 NNE 向的新山弧形背斜和黄泥坡背斜、东西向的鸡心脑背斜、猪头山向斜、大花山背斜。断裂构造主要有 NNE 向的卡田断裂和大凹子断裂,EW 向的老熊洞断裂、仙人洞断裂、黄泥坡断裂、龙树脚断裂和白龙断裂(图2)。NNE 向断裂属于低级构造,常明显地错断或限制了 EW 向断裂。两组断裂对花岗岩形态均有控制作用,且这些断裂具有多期活动性,与它们的次生断裂、裂隙一起,为矿液提供了通道和沉淀空间(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984;庄永秋等,1996)。

矿田内出露的岩浆岩主要为中三叠世安尼期玄武岩和白垩纪新山花岗岩。安尼期玄武岩主要产于个旧组下段的碳酸盐层中,呈层状产出,有 3 层,单层最厚 30 m,一般厚 5~10 m,单剖面累积厚度 50~70 m,在较厚的基性岩内常有厚 0.2~4 m 的若干碳酸盐岩夹层(黎应书等,2006b)。主要的岩石类型有变余斑状玄武岩、阳起石金云母化玄武岩、金云母化玄武岩和阳起石化玄武岩;具块状构造、杏仁状构造、火山角砾构造,变余斑状结构、变余间片结构、变余间隐结构、鳞片状变晶结构等(黎应书等,2006a);主要矿物有普通辉石、斜长石、橄榄石、透辉石、透闪

石、阳起石;次要矿物为金云母、绢云母,副矿物为榍石、白钛石、磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿。蚀变玄武岩中的云母属金云母-镁质黑云母系列,具富镁的特点,闪石类矿物属阳起石-镁角闪石系列(杨宗喜等,2010)。

新山花岗岩体呈岩株状侵入于中三叠统个旧组中下部碳酸盐岩及玄武岩层中,岩体露头北宽南窄(图2),面积约 0.3 km²,大致呈 NE 向展布,岩体凸起的最高部位处于新山短背斜核部。岩浆沿玄武岩与碳酸盐岩层间滑动或层间剥离构造贯入形成岩舌、岩枝及顶部凹陷带等形态。岩体由内部相和边缘相组成。内部相中-细粒黑云母花岗岩具块状构造、中细粒花岗结构,主要矿物有微斜长石、斜长石、石英、黑云母等,副矿物有锆石、磷灰石、独居石、电气石、萤石等。边缘相中-细粒浅色花岗岩,主要由石英、长石组成(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984;程彦博等,2008a;Cheng et al.,2010)。岩体受岩浆期后气化热液交代蚀变,普遍发育钾长石化、萤石化、绢云母化等(李家和,1985);岩体顶部及岩舌伸出部位常发育云英岩化及弱钠长石化,这些部位往往伴有锡铜和稀有、稀土元素矿化(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984;程彦博等,2008a)。新山岩体经过高度的演化和分异,具富硅、富铝、富碱、贫镁及铁的特点,受控于晚白垩世华南陆块陆内背景下岩石圈伸展而导致的岩浆作用,形成于晚白垩世(程彦博等,2010)。

2.2 卡房铜矿床

2.2.1 矿体特征

矿田内原生铜锡矿(图3)主要有矽卡岩型铜锡矿和与蚀变玄武岩有关的(似)层状铜(锡)矿,少量的云英岩型铜锡矿及蚀变岩型铜锡矿。矽卡岩型铜锡矿产于新山花岗岩与碳酸盐类岩层或蚀变玄武岩接触带上(图3),以铜矿化为主,伴生钨(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984)。矿体形态受矽卡岩产出形态控制,呈透镜状、扁豆状等,铜平均品位为 1.2% ~ 1.8%。云英岩型铜锡矿通常产于等粒花岗岩隆起的上部,少量产于岩体接触带附近的大理岩中,云英岩矿物组成主要为白云母和石英,多呈似层状平行于接触界面产出,这类矿体规模小,但有时形成富锡矿体(毛景文等,2008)。新山矿段冬瓜林坑中可见蚀变岩型铜锡矿主要产于岩体四周的内蚀变带中(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984)。下面重点介绍与蚀变玄武岩有关的(似)层状铜锡矿。

2.2.2 与蚀变玄武岩有关的(似)层状铜锡矿

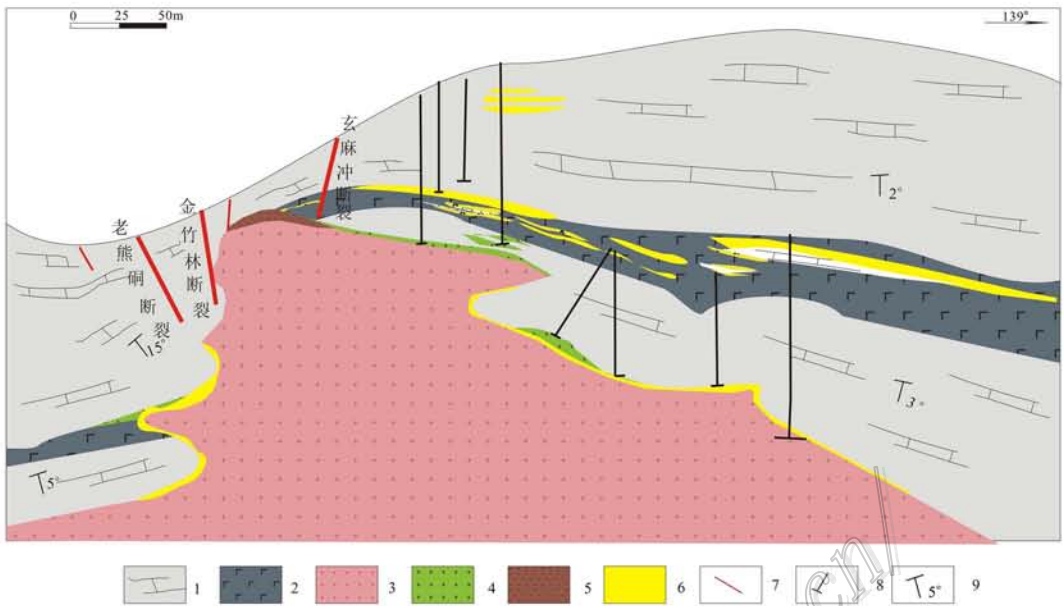


图 3 卡房铜矿典型剖面图(据冶金工业部西南冶金地质勘探公司(308地质队),1984 修编)

1—三叠系个旧组碳酸盐岩; 2—三叠系个旧组蚀变玄武岩; 3—等粒黑云母花岗岩; 4—砂卡岩; 5—云英岩型铜矿化; 6—铜矿体;
7—断裂构造; 8—钻孔位置线; 9—地层产状

Fig. 3 Reprehensive cross-section of the Kafang copper deposit (modified after No. 308 Geological Party, 1984)

1—Triassic Gejiu Formation: carbonate; 2—Triassic Gejiu Formation: meta-basalt; 3—Equigranular biotite granite; 4—Skarn; 5—Greisen type Cu-mineralization; 6—Copper ore body; 7—Fault; 8—Drill hole; 9—Attitude of strata

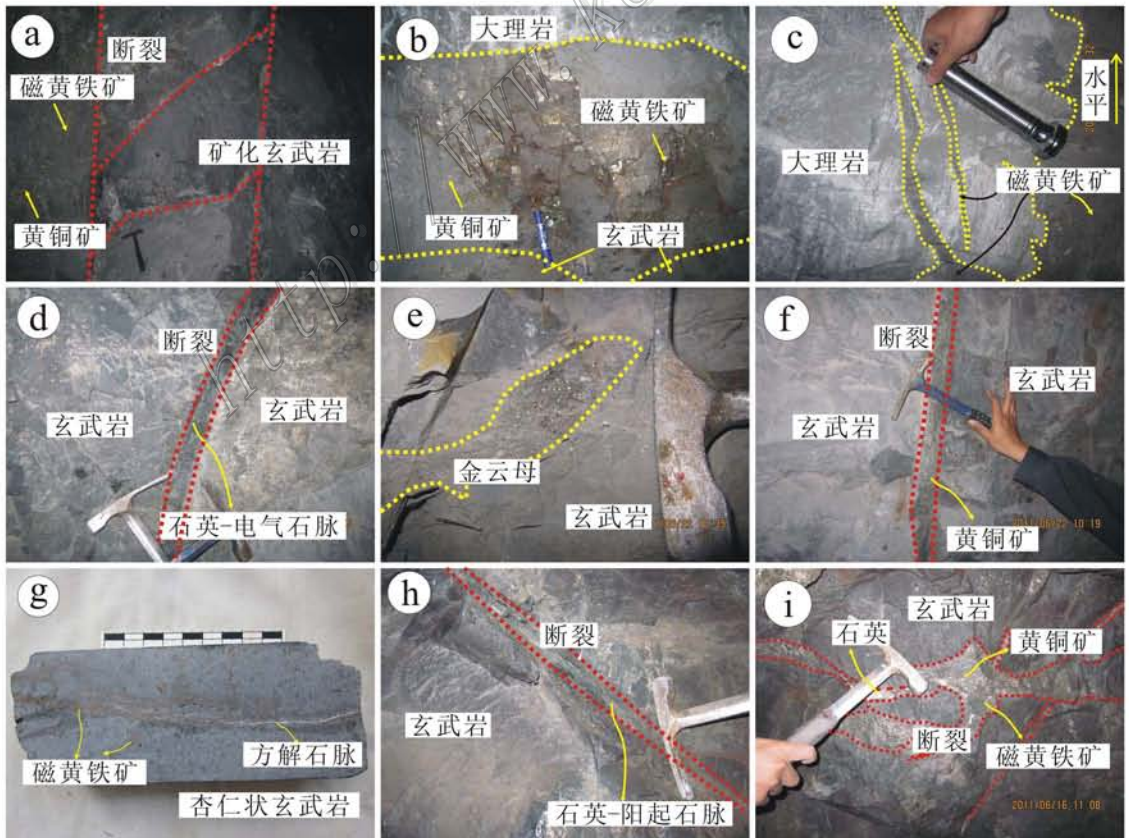


图 4 玄武岩中矿体与围岩及构造的关系

- a. 玄武岩层发生矿化; b. 层状矿体产在玄武岩与大理岩层间; c. 层状矿体在大理岩中的延伸细脉; d. 玄武岩中矿化石英电气石脉; e. 玄武岩中矿化金云母脉; f. 玄武岩中黄铜矿脉; g. 方解石-磁黄铁矿脉切穿杏仁状玄武岩层; h. 玄武岩中矿化阳起石脉; i. 玄武岩中铜矿体沿构造裂隙产出

Fig. 4 Relationship between basalt, wall rock and structure

- a. Mineralized basalt; b. Stratified ore body between basalt and marble; c. Extended veinlet from stratified ore body to marble; d. Mineralized quartz-tourmaline vein in basalt; e. Mineralized phlogopite vein in basalt; f. Chalcopyrite vein filling cracks in basalt; g. Mineralized calcitepyrrhotite vein cutting amygdaloidal basalt; h. Mineralized actinolite vein in basalt; i. Fault controlling ore body in basalt

此类矿体产在蚀变玄武岩层中(图4a)或蚀变玄武岩与大理岩层间(图4b),矿体通常长200~400 m,厚0~10 m,呈层状、似层状、板状等形态,沿蚀变玄武岩中构造裂隙产出,也常有充填于构造裂隙的脉状矿体穿插地层、矿化蚀变玄武岩或层状矿体(图4c、4d、4e、4f、4g、4h)。无论是层状、似层状或是脉状产出的矿体都明显受构造控制,蚀变玄武岩层中节理、断裂等构造特别发育的地方,Cu矿体一般较富(图4i),矿体规模随着节理或断裂裂隙的规模变化,切穿围岩或矿体。蚀变玄武岩与大理岩由于岩石韧性差异,形成的构造滑脱带(毛景文等,2008)是良好的容矿空间,Cu矿体沿此发育,规模较大(图4b),且矿体周围往往有含Cu矿脉沿断裂、裂隙或节理切穿大理岩(图4c)。此类矿体中心部分往往含Cu较高,品位最高可达30%,而在矿体两侧Cu含量往往下降到工业品位以下(Cheng et al., 2012)。

玄武岩层状Cu矿体中金属矿物组成较为单一,主要为磁黄铁矿和黄铜矿,二者所占比例变化较大,有的地方以黄铜矿为主,有的地方以磁黄铁矿为主,矿体中锡石含量较少。矿石矿物有2种产出形态,伴随着如金云母、阳起石、透闪石等蚀变矿物出现,而蚀变较弱的玄武岩中很少或没有矿化,或者与石英、方解石、萤石、电气石等热液矿物呈脉状产出,这些矿脉穿切蚀变玄武岩或矿体(Cheng et al., 2012)。

3 样品及分析方法

3.1 采样位置

金云母样品(编号ZKF08-29)(图5)采自卡房矿田前进坑1820中段15线1号采场1-9-3矿体,矿体呈层状位于大理岩与玄武岩层间(图5a),厚约2~3 m,铜平均品位为8%~10%。上盘围岩为白色大理岩,与矿体接触部位发生矽卡岩化,矽卡岩矿物主要为透辉石、石榴子石等,下盘为玄武岩,玄武岩发生蚀变,主要为金云母化、阳起石化等。金云母呈团块状分布于磁黄铁矿、黄铜矿矿石中,呈绿色鳞片状,

粒径约0.5~1.5 cm,与磁黄铁矿和黄铜矿密切共生(图5b、5c、5d)。根据矿床中矿石矿物特征、穿插关系、围岩蚀变、矿物共生组合及矿石组构特征,将其成矿过程划分为石英-磁黄铁矿-黄铜矿阶段、石英-方解石-黄铜矿-黄铁矿阶段和石英-方解石阶段。金云母样品(编号ZKF08-29)采自于石英-磁黄铁矿-黄铜矿阶段(张娟等,2012)。

白云母样品(编号ZKF08-49)采自卡房矿田大坑1800中段21线的新山等粒黑云母花岗岩边部的云英岩(图5e),样品位置距花岗岩与灰色大理岩接触部位约10 m,以石英-白云母(萤石)脉形式产出。白云母呈细粒鳞片状,粒度约0.01~0.1 cm(图5f)。

3.2 分析方法

样品在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司经粉碎过筛后,对碎样样品进行水漂、磁选和重液分离等步骤,分选出60~80目大小的云母样品,最后在双目镜下手工挑选出金云母、白云母各200 mg,样品纯度达到99.9%以上,送实验室测试。

将挑选出的金云母、白云母用超声波清洗,先用经过2次亚沸蒸馏净化的纯净水清洗3次,每次3分钟,将矿物表面和解理缝中在天然状态下和碎样过程中吸附的粉末和杂质清除。然后在丙酮中清洗两次,每次3分钟,在此过程中,矿物表面吸附的油污等有机物质被清除。

用纯铝铂纸将0.18~0.28 mm粒径的样品包装成直径约6 mm的球形,封闭于石英玻璃瓶中,置于中国原子能科学研究院49-2反应堆B4孔道进行中子照射,照射时间为24小时,中子通量为 2.2464×10^{18} 。用于中子通量监测的样品是中国周口店K-Ar标准黑云母(ZBH-25,年龄为132.7 Ma)。同时对纯物质CaF₂和K₂SO₄进行同步照射,得出的校正因子为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000271$ ($^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000652$ ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.00703$ 。

照射后的样品冷置后,装入圣诞树状的样品架中,密封去气之后,装入系统。

样品测试在北京大学造山带与地壳演化教育部

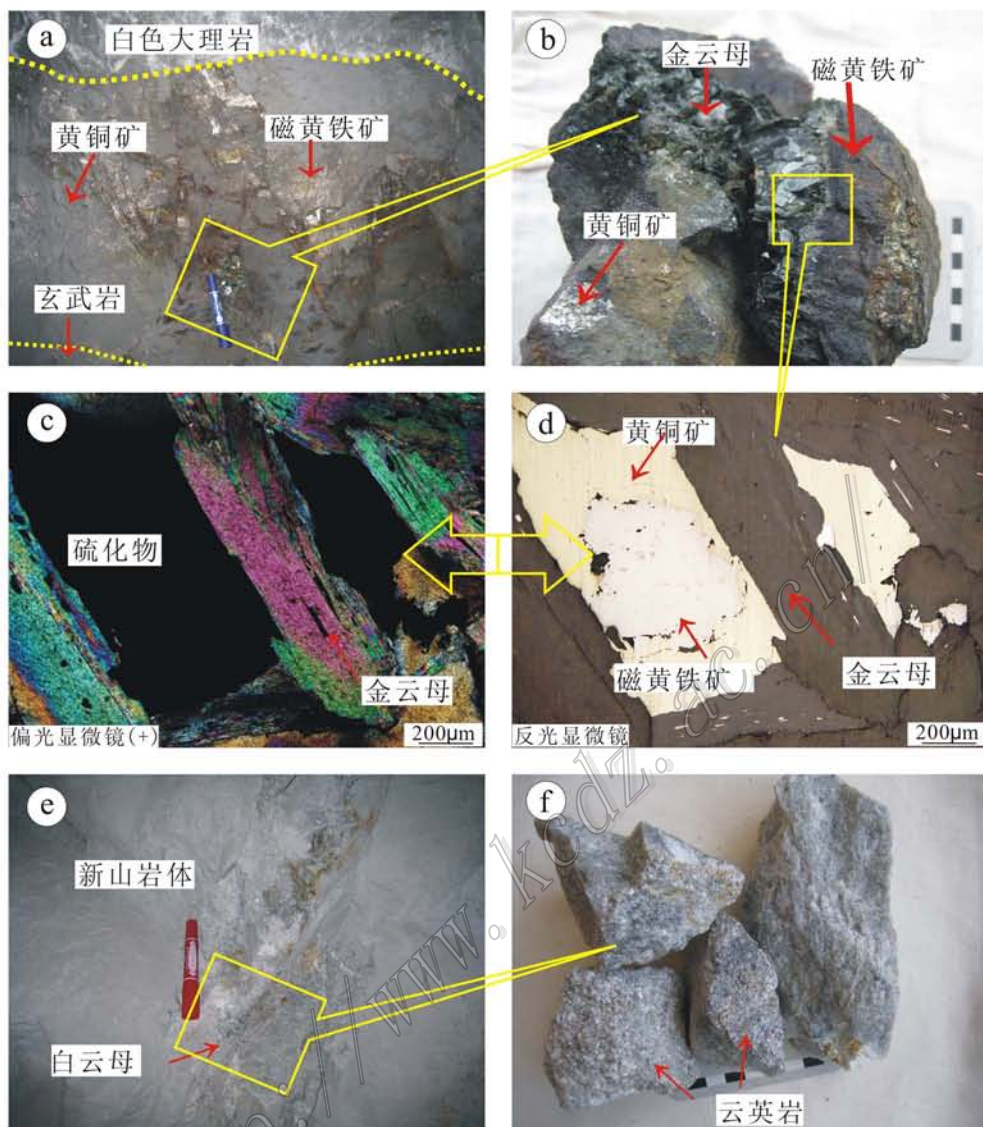


图5 样品位置、手标本及显微镜照片

- a. 蚀变玄武岩与大理岩之间的层状矿体; b. 金云母样品; c、d. 金云母与磁黄铁矿和黄铜矿密切共生; e. 新山岩体边部的云英岩;
f. 白云母样品

Fig. 5 Sampling positions, hand specimens and microscopic photos

- a. Stratified ore body between meta-basalt and marble; b. Sample of phlogopite; c, d. Mineral association of phlogopite, chalcopyrite and pyrrhotite; e. Greisens from Xinshan granite body; f. Sample of muscovite

重点实验室常规⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年系统完成。测定采用钽(Ta)熔样炉对样品进行阶步升温熔样, 每个样品分为 8~12 步加热释气, 温阶范围为 800~1500°C, 每个加热点在恒温状态下保持 20 分钟。系统分别采用海绵钛炉、活性炭冷阱及锆钒铁吸气剂炉对气体进行纯化, 海绵钛炉的纯化时间为 20 分钟, 活性炭冷阱的纯化时间为 10 分钟, 锆钒铁吸气剂炉的纯化时间为 15 分钟。使用 RGA10 型质谱仪

记录 5 组 Ar 同位素信号, 信号强度以毫伏(mV)为单位记录。质谱峰循环测定 9 次, 用峰峰值减去前后基线的平均值来获得 Ar 同位素的数据(邱华宁, 2006)。

数据处理时, 采用该实验室编写的⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating 1.2 数据处理程序对各组 Ar 同位素测试数据进行校正计算, 再采用 Isoplot 3.0 计算坪年龄及等时线年龄(Ludwig, 2003)。

4 定年结果

金云母(ZKF08-29)白云母(ZKF08-49)的阶段加热 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄数据见表1,金云母共11个加热阶段,白云母共12个加热阶段,温度变化均为850~1400℃。金云母阶段升温年龄图谱及坪年龄见图6a,所有构成坪年龄的数据点均绘制了相应的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线和反等时线图(图6b、6c)。白云母阶段升温年龄图谱及坪年龄见图6d,所有构成坪年龄的数据点均绘制相应的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线和反等时线图(图6e、6f)。坪年龄计算据Dalrymple等(1971)提出的标准(存在不少于3个加热阶段且释放 ^{39}Ar 达50%以上)加以计算。

由表1可知,本次测定的金云母低温释放阶段(850℃)视年龄较小, ^{39}Ar 仅占总析出量4.15%,可能由于矿物晶格缺陷或矿物边部少量的氩丢失所造成(邱华宁等,1997)。6个中高温释放阶段(900~1150℃)形成了(79.55±0.47)Ma(2 σ)年龄坪(^{39}Ar

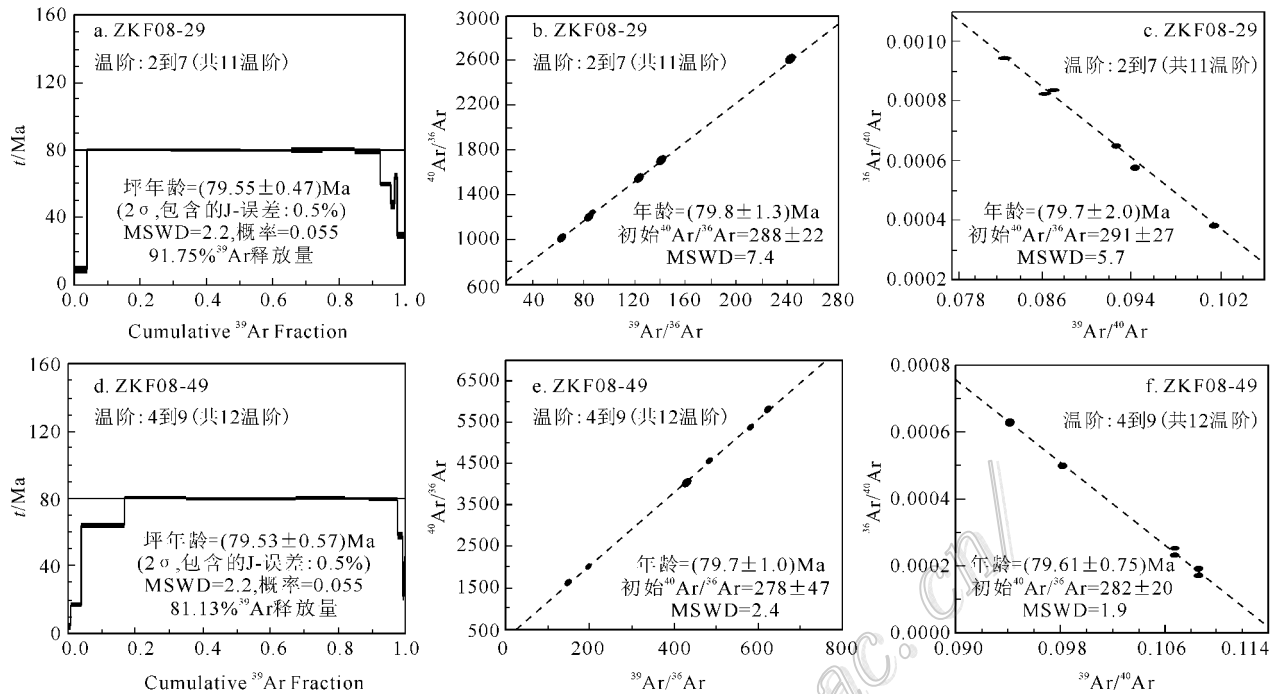
占总析出量91.75%)(图6a),等时线年龄为(79.8±1.3)Ma(图6b),初始值 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为(288±22),MSWD=7.4,反等时线年龄为(79.7±2.0)Ma(图6c),初始值 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为(291±27),MSWD=5.7,等时线和反等时线年龄与坪年龄在误差范围内完全一致。虽然样品初始值误差相对较大,但在误差范围内与尼尔值(295.5±5)基本一致;且样品呈正常的平坦型年龄谱,不存在任何异常的坪年龄谱图,各数据点具有良好的线性关系,表明金云母形成以后未受到后期热事件的扰动,得到的年龄数据是可靠的(谢桂青等,2008;袁顺达等,2010)。因此,金云母的坪年龄具有地质意义,可以代表金云母形成的冷却年龄。

本次测定的白云母低温释放阶段(850~950℃)视年龄较小且变化较大, ^{39}Ar 仅占总析出量16.84%,可能是矿物晶格缺陷或矿物边部少量的氩丢失(邱华宁等,1997)或样品照射过程中 ^{39}Ar 反冲丢失造成的(杨锋等,2009)。6个中高温释放阶段(1000~1250℃)形成了(79.53±0.57)Ma(2 σ)年龄坪

表1 金云母及白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定结果

Table 1 Ar-Ar data for phlogopite and muscovite

加热阶段	$t/^\circ\text{C}$	t/Ma	$\pm \text{Age}$	^{39}Ar Cum/%	^{39}Ar (mols)	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$
金云母(ZKF08-29), $J=0.005160$										
1	850	8.15	2.31	4.15	3.19E-14	16.06759	0.10981	5.24689	0.05281	0.87791
2	900	79.9	0.46	29.59	1.96E-13	10.58597	0.03028	0.28466	0.00618	8.7757
3	950	79.66	0.55	50.35	1.60E-13	9.86881	0.03086	0.13494	0.00381	8.74893
4	1000	79.04	0.42	65.99	1.20E-13	10.74456	0.02778	0.18982	0.00702	8.67937
5	1050	79.67	1.35	75.47	7.29E-14	12.11057	0.02716	0.29466	0.01143	8.75009
6	1100	79.93	0.61	84.88	7.24E-14	11.59636	0.02449	0.21841	0.00957	8.77972
7	1150	78.65	1.82	95.90	6.08E-14	11.4485	0.02748	0.24743	0.00957	8.63589
8	1200	59.03	1.33	95.91	2.40E-14	13.68498	0.03114	0.75199	0.02469	6.44554
9	1250	47.07	2.48	96.94	8.04E-15	16.6384	0.01192	1.81698	0.03946	5.12325
10	1300	63.6	1.87	97.90	7.37E-15	12.9381	0.01193	1.97129	0.02079	6.95396
11	1400	28.24	1.95	100.00	1.61E-14	13.96204	0.0153	1.04359	0.03717	3.05703
白云母(ZKF08-49), $J=0.005163$										
1	850	3.13	1.52	1.03	1.89E-14	13.97454	0.07965	3.45352	0.04707	0.33667
2	900	16.2	0.76	4.00	5.41E-14	9.25817	0.08417	4.13742	0.02653	1.74759
3	950	63.64	1.57	16.84	2.34E-13	9.61882	0.03656	1.27407	0.00936	6.9538
4	1000	79.93	0.84	35.33	3.37E-13	9.36135	0.0309	1.24109	0.00232	8.7739
5	1050	79.22	0.95	67.64	5.89E-13	9.18746	0.01565	0.18636	0.0017	8.69458
6	1100	79.7	1.36	82.06	2.63E-13	9.34961	0.01487	0.15504	0.00206	8.74843
7	1150	79.66	0.79	89.35	1.33E-13	9.22103	0.01476	0.04053	0.0016	8.7441
8	1200	79.11	1.22	95.59	1.14E-13	10.17844	0.01343	0.2562	0.00511	8.68261
9	1250	79.06	1.38	97.97	4.34E-14	10.60815	0.01654	0.37399	0.00662	8.67627
10	1300	57.16	2.25	99.16	2.18E-14	13.46249	0.02009	1.3858	0.02483	6.2352
11	1350	21.26	2.74	99.77	1.11E-14	16.82374	0.02797	2.57898	0.04985	2.29544
12	1400	41.93	3.33	100.00	4.17E-15	31.58045	0.01845	6.06967	0.09314	4.5545

图 6 金云母和白云母的⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄、等时线和反等时线年龄图Fig. 6 ⁴⁰Ar-³⁹Ar spectrum, isochronal and inverse isochronal age diagram of phlogopite and muscovite

(³⁹Ar 占总析出量 81.13%)(图 6d),等时线年龄为(79.7±1.0)Ma(图 6e),初始值⁴⁰Ar/³⁶Ar 为(278±47),MSWD=2.4,反等时线年龄为(79.61±0.75)Ma(图 6f),初始值⁴⁰Ar/³⁶Ar 为(282±20),MSWD=1.9。等时线、反等时线年龄与坪年龄在误差范围内完全一致。虽然样品初始值误差相对较大,但在误差范围内与尼尔值(295.5±5)基本一致。由于白云母中 Ar 对后期地质作用很敏感,即使部分受到后期叠加改造的影响,白云母也能够形成明显的扩散丢失图谱(Hanson et al., 1975),而未受扰动的白云母则形成平坦的年龄谱(邱华宁等, 1997)。本次测定的白云母都呈正常的平坦型年龄谱,不存在任何异常的坪年龄谱图,说明白云母在 79 Ma 左右形成之后没有受到高于其封闭温度的构造-热事件的影响。因此,白云母的坪年龄具有地质意义,可以代表白云母形成的冷却年龄(Yuan et al., 2007)。

5 讨论

5.1 成矿时代

矿石的脉石矿物的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄记录着成矿期的同位素封闭时间(Selby et al., 2002),可能是矿物

的结晶年龄,也可能是矿物被彻底改造后⁴⁰Ar*重新积累的后期热事件的时间(郑建民等, 2007)。卡房矿区金云母形成之后未受到后期热事件的影响,表明本文所获得的金云母的冷却年龄近似等于金云母的结晶年龄。金云母与黄铜矿及磁黄铁矿密切共生,为同一矿化蚀变的产物,且笔者通过对卡房矿田与蚀变玄武岩有关的层状铜矿矿石(石英-磁黄铁矿-黄铜矿成矿阶段)中石英内流体包裹体的系统研究,得到原生流体包裹体的均一温度范围为 245.7~452.0℃,峰值为 350~450℃(张娟等, 2012),与金云母的⁴⁰Ar-³⁹Ar 封闭温度(约 400~480℃)(Dodson, 1973; Gilletti et al., 1977)基本一致,因此可以认为金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄能够近似代表成矿年龄。本文测定的白云母在形成之后没有受到后期热事件的影响,所获得的白云母冷却年龄近似等于其结晶年龄。从白云母产状上看,所采的云英岩可能是新山岩体自交代产物,而新山岩体的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(83.1±0.42)Ma(Cheng et al., 2010),故本文获得的白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄可代表岩体云英岩化的年龄。

与蚀变玄武岩有关的层状铜矿床与新山岩体在空间上相距很近,所获得年龄数据分别为(79.55

Ma)和(79.53 Ma),表明两者为同一事件的产物。个旧地区与蚀变玄武岩有关的层状铜矿、矽卡岩型和热液脉型铜矿的成矿年龄集中在79~83 Ma,表明其形成于晚白垩世,均为白垩纪花岗岩成矿系统的组成部分。

程彦博等(2010)总结出个旧锡铜多金属矿集区的成岩成矿年龄集中在85~76 Ma,表明个旧矿集区大规模成岩成矿事件发生于中生代晚白垩世。本文获得的蚀变玄武岩型层状铜矿体的精确成矿年龄79.6 Ma和新山岩体形成后某期热液事件的活动年龄79.5 Ma,与上述成矿事件时代一致。近年来,很多学者(张世涛,1997;王登红等,2004;蔡明海等,2004,2005,2006;刘玉平等,1999,2000,2007;蔺志永等,2008;李水如等,2008;谭俊等,2008;程彦博等,2010)对包括个旧、都龙、白牛厂、大厂以及大明山在内的滇东南-桂西成矿带进行了成岩成矿时代研究,获得的年龄数据表明,其成岩成矿事件基本限定在95~76 Ma,暗示它们可能形成于同一成矿事件。

5.2 锡铜多金属矿化类型间的成因联系

通过测定矿田内玄武岩、花岗岩岩体、地层的Cu元素含量值(冶金工业部西南冶金地质勘探公司,1984;彭张翔,1992;罗君烈,1995;庄永秋等,1996;郑庆鳌等,1997;李石锦,1998;张丽红,2004;刘明等,2007;路红记,2008;吴练荣,2009;黎应书等,2009),大多数学者认为三叠系个旧组卡房段层内的碱性玄武岩是铜的矿源层,为成矿提供了主要的物质来源。杨宗喜等(2010)及张娟等(2012)在前人资料及稳定同位素地球化学分析的基础上,认为三叠系玄武岩为卡房铜矿层状矿体提供了主要成矿物质,而燕山期花岗岩则和玄武岩共同为接触带铜矿体提供了成矿物质。

野外观察到矿田内发育不同类型的矿化作用,矿体均受构造的控制,明显为后生成矿作用形成。张娟等(2012)对矿田内与蚀变玄武岩有关的层状铜矿进行了流体包裹体及氢、氧同位素研究,发现形成层状矿体的成矿流体,早期属岩浆流体性质,后期有大气降水的参与。因此,矿田内虽然存在大规模的层状矿体,并且与三叠纪玄武岩关系密切,但是其成矿作用明显为后生成矿,而非同生成因。

因此,据个旧矿集区的矿化类型(毛景文等,2008)及岩体的特点,笔者认为,个旧地区主体的花岗岩类(S型花岗岩,强烈分异演化,高硅富碱多挥

发组分)(Lehmann,1990;陈毓川等,1995;程彦博等,2008a,2008b,2009),在分异演化的晚期,富含挥发分及多金属元素的成矿流体在岩体隆起部位聚集,首先发育云英岩型矿化,也可以平行、垂直或斜交接触带断裂、节理等形成(似)层状矿体、脉状矿体。与此同时,在富含挥发分及成矿物质的流体作用下,岩浆与碳酸盐岩和三叠纪玄武岩相互作用,形成矽卡岩矿化。在岩隆部位含矿流体异常富集,逐渐向外运移,沿层间、切层断裂发生水岩反应和成矿作用,从接触带向外呈现出成矿元素的分带现象。当以三叠纪玄武岩为围岩时,成矿元素以铜或铜锡为主,即形成与玄武岩有关的矿化。在矿化剂的影响下,成矿元素向外接触带运移,出现细网脉状(石英-电气石脉,绿柱石-电气石脉,氟硼镁石-萤石-锂白云母-电气石脉,电气石-长石脉,电气石-长石钙矽卡岩脉等)矿化,向内形成锡石硫化物矿化。云英岩型矿体和矽卡岩型矿体分布在内外接触带(毛景文等,2008)。

结合个旧地区成岩成矿年龄(集中在85~76 Ma)及上述讨论,笔者认为个旧矿集区内不同类型的锡铜多金属矿化与白垩纪花岗岩密切相关,是统一的构造-岩浆-流体活动的产物。

6 结 论

(1)三叠纪个旧组中与蚀变玄武岩有关的Cu矿与晚白垩世新山岩体侵入、构造-流体活动、玄武岩的蚀变作用密切相关。

(2)与蚀变玄武岩有关的(似)层状铜矿床的成矿年龄(79.55 Ma)和新山岩体岩浆期后热液活动年龄(79.53 Ma)基本一致,时代为晚白垩世,表明该类型矿体并非同生矿床,而是与白垩纪花岗岩岩浆活动密切相关,是白垩纪花岗岩成矿系统的组成部分。

(3)个旧矿集区内不同类型的锡铜多金属矿化与白垩纪花岗岩密切相关,是统一的构造-岩浆-流体活动的产物。

志 谢 在野外期间得到云南锡业集团莫国培教授级高级工程师、童祥高级工程师、武俊德高级工程师及卡房矿田各级领导的大力支持和帮助;冯佳睿博士、李宝龙博士后、叶会寿研究员、谢桂青研究员等在野外工作和论文书写中给予了重要帮助,在此一并感谢。

参考文献/References

- 蔡明海,梁婷,吴德成,黄惠民. 2004. 广西大厂矿田花岗岩地球化学特征及其构造环境[J]. 地质科技情报, 23(2):57-62.
- 蔡明海,梁婷,吴德成. 2005. 广西大厂锡多金属矿田充马锡矿床地质特征及成矿时代[J]. 地质学报, 79:262-268.
- 蔡明海,何龙清,刘国庆,吴德成,黄惠民. 2006. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质论评, 52:409-414.
- 陈毓川,毛景文. 1995. 桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨迹[M]. 南宁:广西科学技术出版社. 1-433.
- 程彦博,毛景文,谢桂青,陈懋弘,赵财胜,杨宗喜,赵海杰,李向前. 2008a. 云南个旧老厂-卡房花岗岩体成因:锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学约束[J]. 地质学报, 82(11):1478-1493.
- 程彦博,毛景文,陈懋弘,杨宗喜,冯佳睿,赵海杰. 2008b. 云南个旧锡矿田碱性岩和煌斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 35(6):1082-1093.
- 程彦博,毛景文,谢桂青,陈懋弘,杨宗喜. 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[J]. 矿床地质, 28(3):297-312.
- 程彦博,董祥,武俊德,莫国培. 2010. 华南西部地区晚中生代与 W-Sn 矿有关花岗岩的年代学格架及地质意义[J]. 岩石学报, 26(3):809-818.
- 金祖德. 1981. 个旧土状赤铁矿型锡矿成因的商榷[J]. 地质与勘探, 17(1):32-34.
- 金祖德. 1991. 个旧层间赤铁矿锡矿热液成因之否定[J]. 地质与勘探, 27(1):19-20.
- 黎应书,秦德先,党玉涛. 2006a. 云南个旧东区玄武岩岩石学特征[J]. 科技导报, 24(2):70-72.
- 黎应书,秦德先,党玉涛,薛传东,谈树成,洪托. 2006b. 云南个旧锡矿的玄武岩成矿[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(3):326-335.
- 黎应书,秦德先,郭宁宁,罗曦,邹涛,万朝英,周年胜. 2009. 个旧东区印支期玄武岩大地构造环境及其成矿意义[J]. 有色金属, 61(2):104-109.
- 李家和. 1985. 个旧花岗岩特征及成因研究[J]. 云南地质, 4(4):327-352.
- 李石锦. 1998. 云南个旧矿区富锡、铜矿体成矿学浅析[J]. 大地构造与成矿学, 22(2):148-155.
- 李水如,王登红,梁婷,屈文俊,应立娟. 2008. 广西大明山钨矿床成矿时代及其找矿前景分析[J]. 地质学报, 82:873-879.
- 蒯志永,王登红,李水如. 2008. 广西王社铜矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 82(11):1565-1571.
- 刘明,彭省临,王力,杨斌. 2007. 个旧老-卡岩体接触-凹陷带锡-铜多金属矿床地质特征及成因分析[J]. 矿产与地质, 21(4):395-403.
- 刘玉平,李朝阳,曾志刚,王金良. 1999. 都龙锡锌矿床单矿物 Rb-Sr 等时线年龄测定[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 15(2):5-8.
- 刘玉平,李朝阳,谷团,王金良. 2000. 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, 28:75-82.
- 刘玉平,李正祥,李惠民,郭利果,徐伟,叶霖,李朝阳,皮道会. 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[J]. 岩石学报, 23:967-976.
- 路红记. 2008. 个旧东区基性火山岩型铜矿床地质特征和成因探讨[J]. 有色金属, 60(1):21-33.
- 罗君烈. 1995. 滇东南锡、钨、铅锌、银矿床的成矿模式[J]. 云南地质, 14(4):319-832.
- 毛景文,程彦博,郭春丽,杨宗喜,冯佳睿. 2008. 云南个旧锡矿田:矿床模型及若干问题讨论[J]. 地质学报, 82(11):1455-1467.
- 彭程电. 1985. 试论个旧锡矿成矿条件及矿床类型、模式[J]. 云南地质, 4:154-163.
- 彭张翔. 1992. 个旧锡矿成矿模式商榷[J]. 云南地质, 11:362-368.
- 秦德先,黎应书,谈树成,陈爱兵. 2006a. 云南个旧锡矿的成矿时代[J]. 地质科学, 41(1):122-132.
- 秦德先,黎应书,范国柱,陈爱兵,谈树成,洪托,李连举,林小平. 2006b. 个旧锡矿地球化学及成矿作用演化[J]. 中国工程科学, 8(1):30-39.
- 邱华宁,彭良. 1997. ⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学与流体包裹体定年[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社. 54-65.
- 邱华宁. 2006. 新一代实验室建设与发展趋势:以中国科学院广州地球化学研究所 Ar-Ar 实验室为例[J]. 地球化学, 35(2):133-140.
- 谭俊,魏俊浩,李水如,王忠铭,付乐兵,张可清. 2008. 广西昆仑关 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义[J]. 地球科学, 33(6):743-754.
- 王登红,陈毓川,陈文. 2004. 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, 78:132-138.
- 吴练荣. 2009. 云南个旧卡房地区成矿规律及资源潜力预测[J]. 南方国土资源, 1:30-31.
- 谢桂青,毛景文,李瑞玲,蒋国豪,赵财胜,赵海杰,侯可军,潘怀军. 2008. 鄂东南地区大型砂卡岩型铁矿床金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年龄及其构造背景初探[J]. 岩石学报, 24(8):1917-1927.
- 杨锋,李晓峰,冯佐海,白艳萍. 2009. 栗木锡矿云英岩化花岗岩白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其地质意义[J]. 桂林工学院学报, 1(29):21-24.
- 杨宗喜,毛景文,陈懋弘,董祥,武俊德. 2008. 云南个旧卡房砂卡岩型(锡)矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(8):1937-1944.
- 杨宗喜,毛景文,陈懋弘,董祥,武俊德,程彦博,赵海杰. 2009. 云南个旧老厂细脉带型锡矿白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(3):336-344.
- 杨宗喜,毛景文,陈懋弘,程彦博,常勇. 2010. 云南个旧卡房铜矿地质地球化学与矿床成因探讨[J]. 岩石学报, 26(3):830-844.
- 冶金工业部西南冶金地质勘探公司(308地质队). 1984. 个旧锡矿地质[M]. 北京:冶金工业出版社. 10-220.
- 袁顺达,侯可军,刘敏. 2010. 安徽宁芜地区铁氧化物-磷灰石矿床中金云母 Ar-Ar 定年及其地球动力学意义[J]. 岩石学报, 26(3):797-808.
- 张欢,高振敏,马德云,陶琰. 2003. 云南个旧锡矿床成因研究

- 综述 J]. 地质地球化学, 31(3): 70-75.
- 张欢, 童祥, 武俊德, 罗泰义, 陶炎, 朱丹. 2007. 个旧锡矿-红海型热水沉积登陆的实例 [J]. 矿物学报, 27(3-4): 335-341.
- 张娟, 毛景文, 程彦博, 李肖龙. 2012. 云南个旧卡房矿田锡-铜矿床成矿作用过程探讨: 成矿流体约束 [J]. 岩石学报, 28(1): 166-182.
- 张丽红. 2004. 个旧矿区玄武岩地球化学特征及其成矿关系 [J]. 有色金属设计, 31(3): 20-22.
- 张世涛. 1997. 滇东南薄竹山复式岩体的地质特征及其演化规律 [J]. 云南地质, 16: 222-232.
- 郑建民, 谢桂青, 刘珺, 陈懋弘, 王三民, 郭少峰, 高雄, 李广栋. 2007. 河北省南部邯郸-邢台地区西石门矽卡岩型铁矿床金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar定年及意义 [J]. 岩石学报, 23(10): 2513-2518.
- 郑庆鳌, 杨涤生. 1997. 云南个旧锡多金属矿成矿演化与成矿模式 [J]. 有色金属矿产与勘查, 6(2): 82-87.
- 周怀阳, 徐克勤, 叶俊. 1989. 关于锡矿成因的若干认识——以大厂、个旧锡矿为例 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 4: 263-264.
- 周建平, 徐克勤, 华仁民, 赵懿英. 1997. 滇东南锡多金属矿床成因商榷 [J]. 云南地质, 16(4): 309-349.
- 周建平, 徐克勤, 华仁民, 赵懿英, 朱金初. 1998. 滇东南喷流沉积块状硫化物特征与矿床成因 [J]. 矿物学报, 18(1): 158-168.
- 周建平, 徐克勤, 华仁民, 赵懿英, 朱金初. 1999. 个旧等锡矿中沉积组构的发现与矿床成因新探 [J]. 自然科学进展, 9(5): 419-422.
- 朱金初, 沈渭洲. 1990. 个旧锡矿田两个主要成矿花岗岩的对比研究及其地质和找矿意义 [J]. 南京大学学报(地球科学版), 66-75.
- 朱金初, 王新光, 殷成玉. 1991. 个旧锡矿区不同岩石中锡的富集特征及成矿模式 [J]. 地质找矿论丛, 6(2): 11-16.
- 庄永秋, 王任重, 杨树培. 1996. 云南个旧锡铜多金属矿床 [M]. 北京: 地震出版社. 1-183.
- Cheng Y B and Mao J W. 2010. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan province, SW China: Constraints on their petrogenesis and tectonic setting [J]. Lithos, 120: 258-276.
- Cheng Y B, Mao J W, Rusk B and Yang Z X. 2012. Geology and genesis of Kafang Cu-Sn deposit, Gejiu district, SW China [J]. Ore Geology Reviews, (in Press).
- Dodson M H. 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems [J]. Contrib. Miner. Petrol., 40: 259-274.
- Giletti B J and Tullis J. 1977. Studies in diffusion: Pressure dependence of Ar diffusion in phlogopite mica [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 35: 180-183.
- Hanson G N, Smimons K R and Bence A E. 1975. ⁴⁰Ar/³⁹Ar spectrum ages for biotite, hornblende and muscovite in a contact metamorphic zone [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 39: 1269-1273.
- Lehmann B. 1990. Metallogeny of tin [M]. Springer-Verlag, 211.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication. No. 4: 170.
- Selby D, Creaser R A, Hart C J, Rombach C S, Thompson J F H, Smith M T, Bakke A A and Goldfarb R J. 2002. Absolute timing of sulfide and gold mineralization: A comparison of Re-Os molybdenite and Ar-Ar mica methods from the Tintina gold belt, Alaska [J]. Geology, 30: 791-794.
- Yuan S D, Peng J T, Shen N P, Hu R Z and Dai T M. 2007. ⁴⁰Ar-³⁹Ar isotopic dating of the Xianghualing Sn-polymetallic orefield in southern Hunan, China and its geological implications [J]. Acta Geologica Sinica, 81(2): 278-286.