

编号: 0258-7106(2011)01-0074-13

# 新疆肯登高尔铜钼矿地质和 S、Pb、O、H 同位素组成及 Re-Os 测年\*

贾志业<sup>1</sup>, 薛春纪<sup>1\*\*</sup>, 屈文俊<sup>2</sup>, 赵强<sup>3</sup>, 张权<sup>1</sup>

(1 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 3 新疆地质矿产勘探开发局第七地质大队, 新疆 乌苏 833000)

**摘要** 肯登高尔是新疆西天山备受关注的一处铜钼矿,它处于博罗霍洛古生代岛弧带。矿体呈板状、不规则脉状和透镜状产在晚石炭世花岗岩闪长岩与上石炭统碳酸盐岩外接触带矽卡岩中,矿石中金属矿物以黄铜矿、辉钼矿为主,脉石矿物以透辉石、钙铁榴石为主,硫化物矿物呈自形晶或他形结构,网脉状、浸染状分布于矽卡岩中。内生成矿作用明显经历了矽卡岩和石英-硫化物 2 期。肯登高尔铜钼矿石中辉钼矿、黄铜矿的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  值介于  $-0.55\%$  ~  $1.90\%$ ,集中在零值附近;  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.963 \sim 18.256$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.549 \sim 15.605$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.802 \sim 38.271$ ,成矿物质显示上地幔与下地壳混合来源特点。石英-硫化物铜钼矿石中石英的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}(\text{V-SMOW})} = -2.82\%$  ~  $-3.65\%$ ,  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}(\text{V-SMOW})} = -96\%$  ~  $-82\%$ ,显示成矿流体为岩浆水并有大气降水的混合。铜钼矿石中辉钼矿的  $\alpha(\text{Re})$  介于  $11.13 \sim 59.72 \mu\text{g/g}$ , Re-Os 等时线测年获得  $(313.9 \pm 2.5) \text{Ma}$  的晚石炭世成矿年龄。铜钼成矿与早石炭世中期依连哈比尕小洋盆向南俯冲有关。

**关键词** 地球化学; 铜钼矿; S、Pb、O、H 同位素组成; Re-Os 法测年; 肯登高尔; 新疆西天山

中图分类号: P618.41; P618.65

文献标志码: A

## Geology, S, Pb, O and H isotopic compositions and Re-Os chronology of Kendengaoer Cu-Mo deposit in Xinjiang

JIA ZhiYe<sup>1</sup>, XUE ChunJi<sup>1\*\*</sup>, QU WenJun<sup>2</sup>, ZHAO Qiang<sup>3</sup> and ZHANG Quan<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources; School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 National Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China; 3 No. 7 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Wusu 833000, Xinjiang, China)

### Abstract

Located in Bolohuoluo palaeozoic arc belt, the Kendengaoer Cu-Mo deposit has aroused much attention among geologists. The ore bodies, in the tabular, laminated and lenticular forms, occur in the outer contact zone between Late Carboniferous granodiorite and Upper Carboniferous carbonate rocks. Metallic minerals in the ore include mainly chalcopyrite and molybdenite, while gangue minerals are mainly diopside and andradite. Sulfide minerals, existing as euhedral or xenomorphic crystals with stockwork and dissemination structures, are distributed in the skarn rocks. Endogenic ore-forming process has obviously experienced two stages of mineralization i. e., skarn and quartz-sulfide.  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  values of molybdenite and chalcopyrite in the ore vary from

\* 本文得到国家科技支撑计划(2006BAB07B01-02)、高等学校学科创新引智计划(B07011)及长江学者和创新团队计划(IRT0755)联合资助

第一作者简介 贾志业,男,1984年生,硕士研究生,矿产普查与勘探专业。Email: jiazhiye@126.com

\*\* 通讯作者 薛春纪,男,博士,教授,博士生导师,从事矿床学、矿产普查与勘探专业教学和研究。Email: chunji.xue@cugb.edu.cn

收稿日期 2010-06-03; 改回日期 2010-10-21。张绮玲编辑。

-0.55‰ to 1.90‰, concentrated around zero. The ratios of  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  are from 17.963 to 18.256, 15.549 to 15.605, and 36.802 to 38.271, respectively, suggesting that metallogenic materials are derived from both upper mantle and lower crust.  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O v-SMOW}}$  and  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O v-SMOW}}$  values of quartz as well as the water in the inclusions from the Cu-Mo ores of the quartz-sulfide stage are from -2.82‰ to 3.65‰ and from -96‰ to 82‰, respectively, implying that ore-forming fluids were mainly magmatic water, with the mixture of small quantities of precipitate water. Re content of molybdenite in Cu-Mo ores is in the range of 11.13~59.72  $\mu\text{g/g}$ . Isochron dating of Re-Os is  $(313.9 \pm 2.5)$  Ma, indicating that the metallogenic age is Late Carboniferous. Therefore, the ore-forming process was related to the southward subduction of the Yilianhabierga oceanic basin in the middle of Early Carboniferous.

**Key words:** geochemistry, Cu-Mo deposit, S, Pb, O and H isotopic geochemistry, Re-Os isotopic chronology, Kendengaoer, West Tianshan Mountains

新疆西天山是中国重要贵重、有色金属成矿带(沙德铭,1998;隗合明等,1999;李华芹等,2004;张良臣等,2006;赵仁夫等,2006)构造-岩浆-热液成矿作用受人关注(李华芹等,2004;2006;王志良等,2004;2006;陈毓川等,2007),但斑岩型铜钼金找矿工作面临严峻的挑战,对重要铜钼矿的剖析研究十分重要。肯登高尔铜钼矿于1956年由新疆有色金属地质703队进行1:5万路线地质调查时发现,它位于新疆精河县城南偏东约60 km处,矿区面积约2 km<sup>2</sup>。受自然条件和交通不便的限制,对这个铜钼矿的勘查、研究程度都较低。新疆有色金属地质703队和新疆地矿局第一区调大队先后在矿区进行了地形地质草测和平硐等工作,基本查明了矿区地质、矿体产状及品位变化等特征,求得铜品位平均为0.56%~1.2%,钼品位平均为0.036%~0.31%,铜资源量约19 000 t,钼资源量约1 000 t(新疆地矿局第一区调大队,1991<sup>①</sup>)。1960年新疆生产建设兵团农八师及精河硫酸厂曾在矿区进行过小规模的开发。刘德权等(1996)和李华芹等(2004)依据矿区所处区域地质背景,认为该铜钼矿与早石炭世汇聚背景下花岗岩的侵入有关,成因属矽卡岩型。邓洪涛(2001)在对博罗科努山北坡金铜矿成因类型分析时,根据矿体地质特征及矿石结构,认为该铜钼成矿物质来自花岗岩及其期后热液。王志良等(2006)认为该铜钼矿为海西中期斑岩型矿床,含矿主岩为花岗闪长岩。本文以区域成矿地质背景和矿床地质研究为基础,对肯登高尔铜钼矿石中辉钼矿及黄铜矿的硫和铅同位素组成、石英-硫化物矿石中石英的氧和氢同位素组成、铜钼矿石中辉钼矿的 Re-Os 同

位素年龄等开展了研究,试图进一步揭示矿床地质特征,认识成矿金属和成矿流体的性质,测定矿床的形成时代,探讨铜钼矿的成因类型,为研究区域成矿规律和寻找与斑岩相关的铜矿提供参考。

## 1 区域地质背景

肯登高尔铜钼矿产于博罗霍洛北坡断裂以北,哈萨克斯坦-伊犁地块东北缘博罗霍洛古生代岛弧带内,北侧为伊连哈比尔尕残留海盆地,西北侧为赛里木地块,南侧是伊宁中央地块和阿吾拉勒晚古生代裂谷系(图1B)。矿床所在区域主要出露中泥盆统拜辛德组、下石炭统大哈拉军山组及上石炭统东图津河组(图1A)。拜辛德组为一套类复理石建造,主要岩性为含放射虫泥质硅质岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,与上覆下石炭统大哈拉军山组呈角度不整合接触;大哈拉军山组为一套陆相中酸性火山岩建造,岩性主要为流纹斑岩、石英霏细斑岩、熔结凝灰岩等;东图津河组为一套海相碳酸盐岩-碎屑岩建造,下部为灰岩夹粉砂岩,上部为变质粉砂岩夹流纹岩,与大哈拉军山组呈角度不整合接触。区域泥盆纪、石炭纪岩浆侵入活动强烈,以岩基、岩株、岩墙等形式沿NNW向带状分布,其中以海西期中酸性岩体最为发育,岩性为二长花岗岩、石英闪长岩和正长岩,石英闪长岩被二长花岗岩侵入并捕虏,正长岩侵入二长花岗岩,强烈的岩浆活动是本区铜钼成矿有利的物质和动力条件。区域发育近EW向断裂,NE向断裂构造切穿近EW向构造;区域断裂构造具有控岩和控矿特点,不同方向断裂交汇部位、断裂引张

① 新疆地矿局第一区调大队,1991.阿拉尔幅L-44-36 1:20万区域地质调查报告:区域矿产.

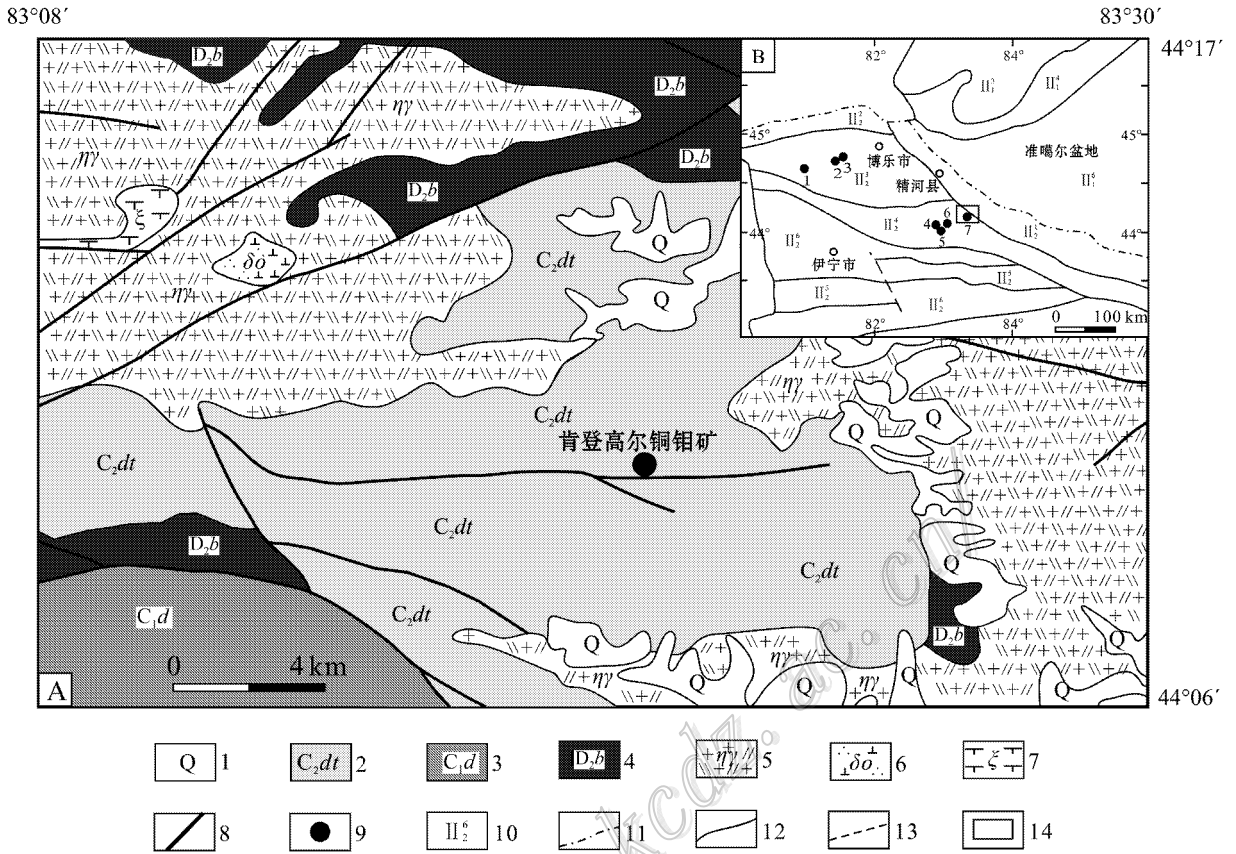


图1 新疆肯登高尔铜钼矿区域地质图(A,据新疆地矿局<sup>①</sup>,2005资料修绘)和西天山大地构造单元示意图(B,转引自罗小平等,2009)

A: 1—第四系沉积物; 2—上石炭统东图津河组; 3—下石炭统大哈拉军山组; 4—中泥盆统拜辛德组; 5—二长花岗岩; 6—石英闪长岩; 7—正长岩; 8—断裂; 9—矿点; 10—构造单元; 11—构造单元边界; 12—次级构造单元边界; 13—断裂带; 14—研究区。B: 构造单元: II<sub>1</sub><sup>3</sup>—谢米斯台-库兰卡兹古生代复合岛弧带; II<sub>1</sub><sup>4</sup>—唐巴勒-克拉迈里古生代复合岛弧带; II<sub>1</sub><sup>6</sup>—准噶尔中央地块; II<sub>1</sub><sup>2</sup>—伊连哈比尕尔残余海盆地; II<sub>1</sub><sup>2</sup>—阿拉套晚古生代陆缘盆地; II<sub>1</sub><sup>3</sup>—赛里木地块; II<sub>1</sub><sup>4</sup>—博罗霍洛古生代岛弧带; II<sub>1</sub><sup>5</sup>—阿吾拉勒晚古生代裂谷系; II<sub>1</sub><sup>6</sup>—伊宁中央地块; 矿床名称: 1—喇嘛苏; 2—达巴特; 3—冬吐劲; 4—3571; 5—莱历斯高尔; 6—七兴; 7—肯登高尔

Fig. 1 Regional geological map of the Kendenggaocer Cu-Mo ore district (A modified after Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 2005) and Diagrammatic map showing tectonic units of Western Tianshan (B, adapted from Luo et al., 2009)

A: 1—Quaternary sediments; 2—Upper Carboniferous Dongtujinhe Formation; 3—Lower Carboniferous Dahalajunshan Formation; 4—Middle Devonian Baixinde Formation; 5—Monzogranite; 6—Quartz diorite; 7—Syenite; 8—Fracture; 9—Ore spot; 10—Tectonic unit; 11—Boundary of tectonic unit; 12—Boundary of secondary tectonic unit; 13—Fault zone; 14—Study area. B: Tectonic units: II<sub>1</sub><sup>3</sup>—Xiesitai-kulakazhi Paleozoic composite island arc; II<sub>1</sub><sup>4</sup>—Tangbale-Kela maili compound Paleozoic trench-arc zone; II<sub>1</sub><sup>6</sup>—Central Junggar block; II<sub>1</sub><sup>2</sup>—Yilianhabierga residual sea basin; II<sub>1</sub><sup>2</sup>—Alatao Late Paleozoic continental margin basins; II<sub>1</sub><sup>3</sup>—Sailimu block; II<sub>1</sub><sup>4</sup>—Boluohuoluo Paleozoic island arc belt; II<sub>1</sub><sup>5</sup>—Awulale Late Paleozoic rift system; II<sub>1</sub><sup>6</sup>—Yining central block; Names of ore deposits: 1—Lamasu; 2—Dabate; 3—Dongtujin; 4—3571; 5—Lailisigaocer; 6—Qixing; 7—Kendenggaocer

扩容部位是区域岩浆及期后热液活动和成矿的良好场所。区域金属矿产包括莱历斯高尔钼矿、3571铜矿、哈拉尔提铁铜矿、呼独克达坂铅锌矿、七兴铅锌多金属矿等。构造-岩浆-热液成矿作用显著。

## 2 矿床地质

矿区出露地层为上石炭统东图津河组一段,为

① 新疆地矿局. 2005. 新疆北部斑岩型铜(钼、金)矿成矿规律研究与找矿靶区优选报告.

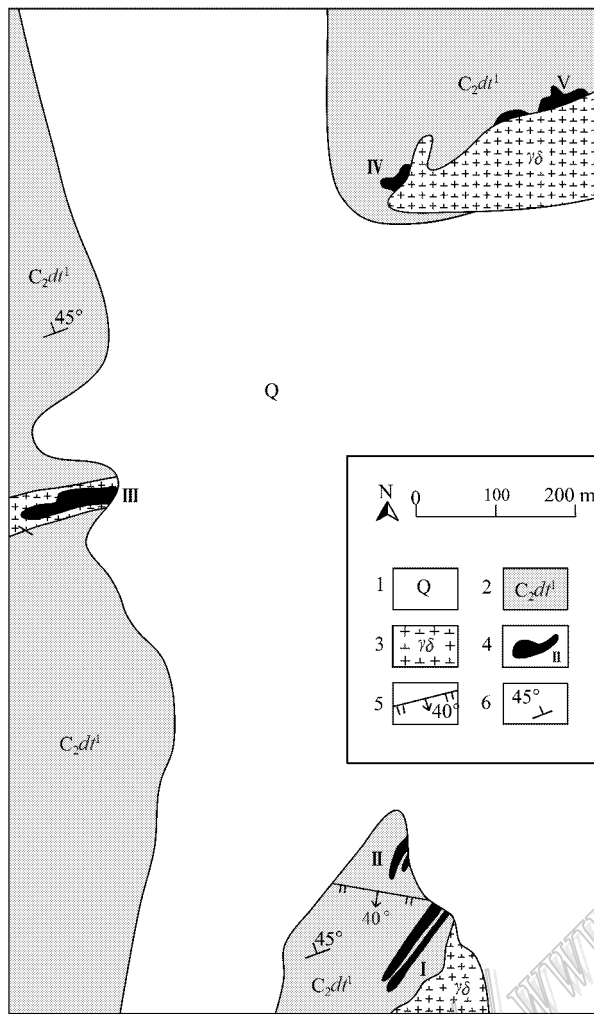


图2 新疆西天山肯登高尔铜钼矿区地质简图(据新疆第七地质大队<sup>①</sup>资料修绘)

1—第四系冰碛物;2—上石炭统东图津河组一段;3—花岗闪长岩;4—矿体及编号;5—正断层及其倾角;6—岩层产状

Fig. 2 Simplified geological map of the Kengdenggaor Cu-Mo deposit, western Tianshan, Xinjiang modified after No. 7 Geological Party of Xinjiang)

1—Quaternary moraine; 2—1st Member of Upper Carboniferous Dongtujinhe Formation; 3—Granodiorite; 4—Ore body and its serial number; 5—Normal fault; 6—Attitude of strata

一套海相碳酸盐岩夹细碎屑岩建造,包括浅灰白色微晶粒屑灰岩、砂质微晶灰岩、生物碎屑灰岩、大理岩化灰岩夹细粒岩屑长石砂岩、砂岩、粉砂岩,其中有细晶岩脉及少量石英脉穿入。矿区中部被第四系冰水堆积砾石、砂土覆盖(图2)。

矿区侵入岩为侵位于上石炭统东图津河组灰岩中的晚石炭世浅灰白色花岗闪长岩体(图2)接触面向外陡倾,平面形态为不规则的波状弯曲,矿区内共有3个岩体,出露面积较小,不到0.1 km<sup>2</sup>。岩石呈中细粒花岗结构,块状构造,主要由钾长石、斜长石、石英、黑云母等组成。其中钾长石多为他形粒状,含量10%~15%,粒度1~2 mm,斜长石呈自形-半自形柱状、板状,含量40%~55%,粒度0.5~3 mm,可见简单双晶、聚片双晶、卡钠复合双晶,多数聚片双晶纹细密,环带结构较发育,局部绢云母化;黑云母,自形-半自形片状,浅黄或深褐色,含量5%~10%,粒度0.2~2.5 mm,部分颗粒可见沿解理缝发生绿泥石化而具墨水蓝的异常干涉色;角闪石,自形-半自形柱状,含量3%~5%,粒度1~4 mm,局部发生绿泥石化,可见角闪石简单双晶;石英呈他形粒状充填于长石等矿物的粒间,其边界多呈港湾状,具微弱波状消光,含量20%~30%,粒度0.2~3 mm。岩石中另见锆石、磁铁矿等副矿物。

矿区构造简单,为一由东图津河组构成的单斜,倾向340°,倾角40~45°。断裂不甚发育,多为一些断距很小的张性或张扭性小断层,走向北西,大致平行排列。矿区南部见较明显的正断层,倾向175°,倾角40°(图2)。这些断裂均为成矿后断裂,个别断层对矿体有破坏作用。

花岗闪长岩与上石炭统东图津河组一段灰岩接触带形成透辉石石榴子石砂卡岩、硅灰石透辉石透闪石砂卡岩、阳起石绿帘石砂卡岩、绿泥石绿帘石砂卡岩等,砂卡岩及其伴随出现的铜钼矿化主体发生在外接触带(图2)。铜钼矿体赋存于砂卡岩体内及其附近,共圈定出5个矿体。I、II、III号为主要矿体(图2),呈板状和不规则脉状、透镜状,NE或NEE走向,倾角多变,产状与接触带构造基本一致,膨大、尖缩现象明显,长20~135 m,厚度变化于2.5~20 m,以铜钼矿化为主,铜品位0.56%~1.2%,钼品位0.036%~0.31%。IV、V号矿体矿化弱,呈透镜状和不规则脉状,NEE走向,长20~40 m,厚4~20 m,以铜铁矿化为主。

铜钼矿石中主要金属矿物有黄铜矿、辉钼矿、斑铜矿,次要金属矿物有黄铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等,偶见毒砂,表生矿物孔雀石、蓝铜矿

<sup>①</sup> 新疆第七地质大队, 2008. 新疆西天山博罗科努金铜钼多金属矿成矿带成矿规律研究与靶区优选项目成果报告.

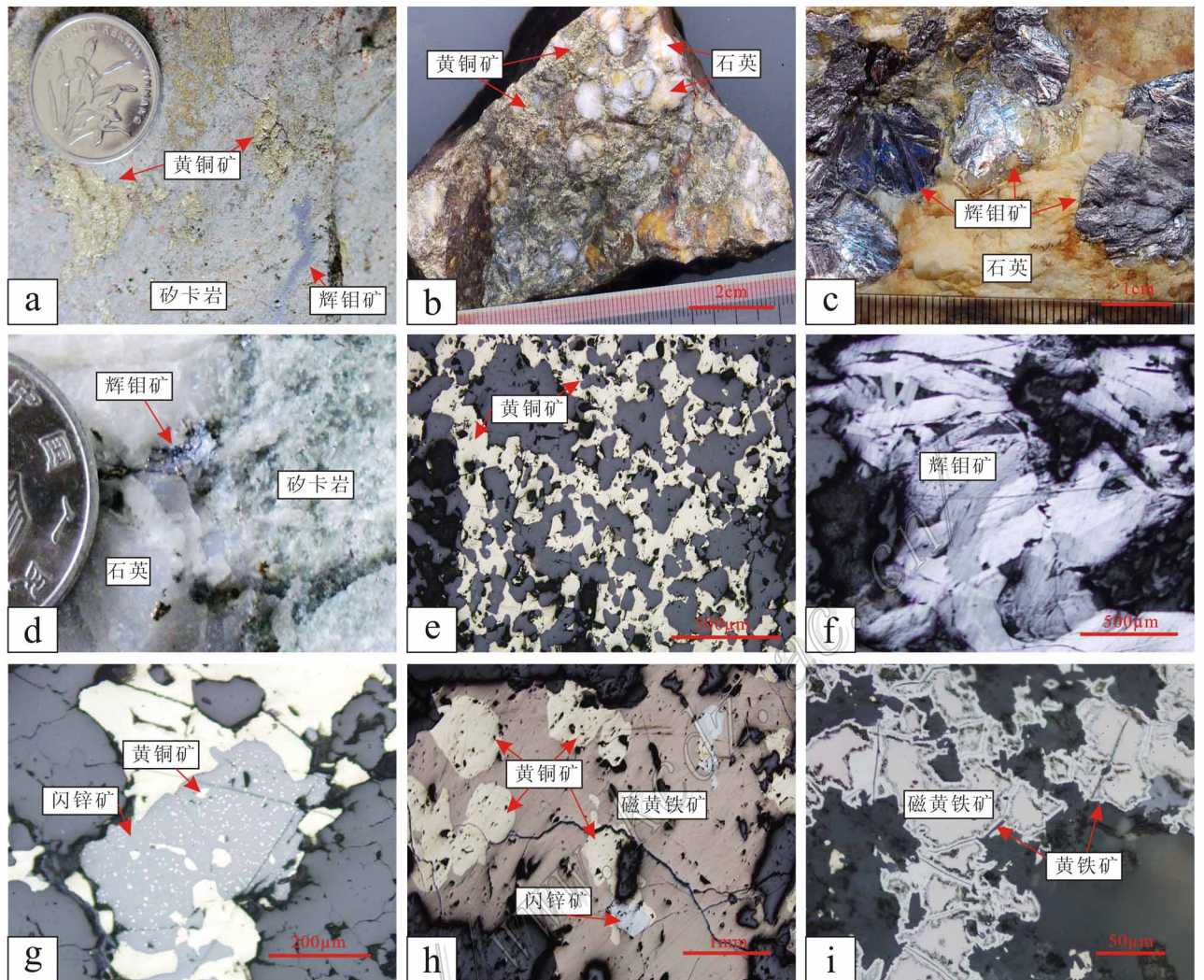


图3 新疆西天山肯登高尔铜钼矿石标本及显微照片

a. 黄铜矿化、辉钼矿化矽卡岩；b. 黄铜矿呈他形充填于石英颗粒之间；c. 石英脉中呈放射状产出的辉钼矿；d. 呈不规则细脉状产于石英和矽卡岩接触带之间的辉钼矿；e. 黄铜矿呈他形粒状交代透明矿物；f. 叶片状辉钼矿；g. 黄铜矿呈乳滴状分布于闪锌矿中；h. 黄铜矿、闪锌矿交代磁黄铁矿；i. 黄铁矿沿磁黄铁矿边缘交代呈反应边结构

Fig. 3 Specimen and microscopic photos of Cu-Mo ore from the Kendenggaocer deposit, Western Tianshan, Xinjiang

a. Skarn with chalcopritization and molybdenitization; b. Xenomorphic chalcopyrite filled in the pores of quartz particles; c. Molybdenite with radial structure in quartz veins; d. Molybdenite existing as fine irregular veins at the contact zone between quartz and skarn; e. Anhedral granular chalcopyrite replacing transparent minerals; f. Leafy molybdenite; g. Chalcopyrite in the form of emulsion droplets distributed in sphalerite; h. Pyrrhotite replaced by chalcopyrite and sphalerite; i. Pyrite and sphalerite replaced by pyrrhotite along the edge assuming reaction rim texture

多见。脉石矿物主要有透辉石、钙铁榴石、钙铝榴石、阳起石、绿帘石、石英、硅灰石，次要脉石矿物有透闪石、符山石、绿泥石等。铜钼矿石中黄铜矿、辉钼矿显示斑杂状构造(图 3a)、网脉状构造(图 3b)、团块状构造(图 3c)、不规则细脉状构造(图 3d)、浸染状构造(图 3e)。铜钼矿石中辉钼矿呈放射状晶簇结构(图 3c)和半自形片状结构(图 3f)，黄铜矿呈他

形粒状结构(图 3e)，黄铜矿常与闪锌矿呈现固溶体分离结构(图 3g)，黄铜矿和闪锌矿交代早期形成的磁黄铁矿形成交代结构(图 3h)，磁黄铁矿可见黄铁矿的交代反应边结构(图 3i)。矿石中金属矿物生成顺序大体为毒砂—黄铁矿 1—磁黄铁矿—辉钼矿 1—黄铜矿—闪锌矿—辉钼矿 2—斑铜矿—黄铁矿 2(邓洪涛, 2001)。根据矿体特征、穿插关系、矿物共生组

合、生成顺序及矿石组构等特征,将内生热液成矿过程初步划分为2期:即矽卡岩期和石英-硫化物期。矽卡岩期以形成矽卡岩矿物(石榴子石、辉石、绿帘石、阳起石等)和少量黄铜矿、辉钼矿等金属矿物为特征(图3a);石英-硫化物期为石英和辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿等矿物组合,常交代早期矿物形成交代结构,为最主要成矿时期(图3b、3c、3d、3i)。

### 3 样品及分析方法

#### 3.1 样品采集和处理

本文用于稳定同位素地球化学及 Re-Os 同位素测年的样品均取自肯登高尔铜钼矿区Ⅲ号矿体中,样品新鲜无氧化,为黄铜矿辉钼矿矽卡岩和铜钼硫化物石英脉。用于稳定同位素地球化学研究的样品经表面清洗、晾干、粉碎后,对40~60目样品进行淘洗和低温烘干,然后在实体显微镜下挑选纯度达99%以上的辉钼矿、黄铜矿、石英单矿物样品,以备硫、铅、氧、氢同位素组成分析。用于 Re-Os 同位素测定的辉钼矿样品先用蒸馏水洗净、晾干,再选择样品中辉钼矿较富集部位,用单面刀片和细钢针等工具直接从手标本上分离辉钼矿(粒度 $< 2\text{ mm}$ ),然后按照无其他矿物连晶、晶体无氧化、无污染等要求,在实体镜下逐粒挑选辉钼矿,纯度大于99.9%,通过不断的粉碎和混合使颗粒细化均一。

#### 3.2 分析方法

铜钼矿石中辉钼矿、黄铜矿的硫同位素分析工作在地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,所用仪器为 MAT-251 质谱仪。以氧化铜和五氧化二钒作为混合氧化剂,在高温真空条件下与样品反应,将 S 氧化成  $\text{SO}_2$ 。相对标准采用 V-CDT,分析精度为  $\pm 0.2\text{ ‰}$ 。

矿石中辉钼矿、黄铜矿的铅同位素分析工作在核工业北京地质研究院分析测试中心完成,所用仪器为 ISOPROBE-T 热电离质谱仪,1  $\mu\text{g}$  的  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  测量精度  $\leq 0.005\%$ 。同位素测量精度以  $2\sigma$  计,详细的分析流程见李科等(2009)。

铜钼硫化物石英脉矿石中石英的氧、氢同位素组成分析工作在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成,所用仪器为 MAT-251 质谱仪。石英的氧同位素分析用  $\text{BrF}_5$  法(Clayton et al., 1963),首先将纯净的石英样品分别与  $\text{BrF}_5$  反应 15 h,萃取氧,分离出的氧进入  $\text{CO}_2$  转化系统,温度为  $700^\circ\text{C}$ ,

时间为 12 min,最后收集  $\text{CO}_2$  进行氧同位素质谱分析。石英中流体包裹体的氢同位素组成分析时,先用爆裂法在  $100^\circ\text{C}$  真空条件下去气 4 h 以上,除去矿物中吸附水和次生流体包裹体;在  $200\sim 350^\circ\text{C}$  下加热,使其中原生流体包裹体爆破,释放挥发分,提取原生流体包裹体中的  $\text{H}_2\text{O}$ ,并在  $400^\circ\text{C}$  条件下与 Zn 反应 30 min 制取  $\text{H}_2$ ,再用液氮冷冻后,收集到有活性炭的样品瓶中(Coleman et al., 1982)供氢同位素质谱分析。氧、氢同位素组成以 V-SMOW 为标准,氧、氢同位素分析精度均为  $\pm 0.2\text{ ‰}$ 。

铜钼矿石中辉钼矿 Re-Os 同位素组成分析在国家地质实验测试中心完成,所用仪器为美国 TJA 公司生产的电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS。样品化学前处理及测试方法参见杜安道等(1994)、Shirey 等(1995)和屈文俊等(2003)。普 Os 是根据原子量表(Wieser, 2006)和同位素丰度表(Bohlkea et al., 2005)通过  $^{192}\text{Os}/^{190}\text{Os}$  测量比计算得出。Re、Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差。置信水平 95%。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%),置信水平 95%。实验采用国家标准物质 GBW04435(HLP)为标样,以监控化学流程和分析数据的可靠性。本次实验全流程空白 Re 为  $0.1061\sim 0.1145\text{ ng}$ ,普 Os 为  $0.0002\text{ ng}$ , $^{187}\text{Os}$  为  $0.0002\sim 0.0004\text{ ng}$ ,远远小于所测样品中 Re、Os 含量,因此不会明显影响实验中 Re、Os 含量的测定。

#### 3.3 分析结果

分析结果表明,肯登高尔铜钼矿石 10 件硫化物样品的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  变化于  $-0.55\text{ ‰}\sim 1.90\text{ ‰}$ ,极差为  $2.45\text{ ‰}$ ,平均值为  $1.14\text{ ‰}$ (表 1),变化范围较窄且接近零值,与陈岳龙等(2005)总结的矽卡岩型铜钼矿硫同位素组成特征相似,显示矿床硫化物硫的组成比较稳定,均一化程度较高。其中 5 件辉钼矿的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  值变化范围为  $-0.55\text{ ‰}\sim 1.36\text{ ‰}$ ,平均值为  $0.69\text{ ‰}$ ,5 件黄铜矿  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  值变化范围为  $1.21\text{ ‰}\sim 1.90\text{ ‰}$ ,平均值为  $1.53\text{ ‰}$ 。

肯登高尔铜钼矿石 10 件硫化物样品的铅同位素组成  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.963\sim 18.256$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.549\sim 15.605$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.802\sim 38.271$ (表 2)。其中,辉钼矿的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.178\sim 18.256$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.554\sim 15.605$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.802\sim 37.992$ ,黄铜矿的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.963\sim 18.205$ 、

表 1 新疆肯登高尔铜钼矿石中硫化物的硫同位素组成  
Table 1 S isotopic compositions of ore sulfides in the  
Kendenggaer Cu-Mo deposit, Xinjiang

样品号	测定矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
K5	黄铜矿	1.21
K15	辉钼矿	1.28
K16	辉钼矿	1.36
K18	辉钼矿	1.11
K26	黄铜矿	1.90
K27	黄铜矿	1.90
k32	黄铜矿	1.39
k36	黄铜矿	1.57
k38	辉钼矿	-0.55
K39	辉钼矿	0.22

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.549\sim 15.604$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.085\sim 38.271$ 。不同矿物铅同位素组成变化范围不大,表明铅同位素组成较均一,铅有着大体相同的来源和演化历史。利用 H-H 阶段铅演化模式,计算得到肯登高尔铜钼矿矿石铅同位素组成的相关参数(见表 2)。其中,  $\mu$  值介于 9.40~9.49,均值为 9.46,  $\omega$  值的均值为 35.26, Th/U 比值介于 3.12~3.89, 均值 3.61。

肯登高尔铜钼硫化物-石英脉矿石中石英及其

中流体包裹体的氧和氢同位素组成测试结果见表 3。5 件石英样品的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  值集中于 13.2‰~16.8‰,极差为 3.6‰,平均为 15.2‰;依据  $1000\ln\alpha_{\text{石英-水}}=4.48\times 10^6/T^2-4.77\times 10^3/T+1.71$ (郑永飞等, 2000)计算( $t$  取所测流体包裹体均一温度)石英平衡热液流体中水的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O(V-SMOW)}}$  值介于 -2.82~3.65‰,极差为 6.47‰,平均值为 0.71‰。5 件石英样品中流体包裹体的  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O(V-SMOW)}}$  值变化于 -96‰~-82‰,极差为 14‰,平均为 -91.6‰。

肯登高尔铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果见表 4。辉钼矿中  $w(\text{Re})$  变化于 11.13~59.72  $\mu\text{g/g}$ ,平均 40.83  $\mu\text{g/g}$ ;  $w(\text{普 Os})$  变化于 0.0036~0.3484 ng/g,含量较低;  $w(^{187}\text{Re})$  变化于 6.994~37.53  $\mu\text{g/g}$ ;  $w(^{187}\text{Os})$  变化于 37.15~197.2 ng/g。模式年龄为  $(312.9\pm 4.5)\sim(318.0\pm 4.4)$  Ma,加权平均值为  $(315.4\pm 1.8)$  Ma(图 4)。样品中除 K39 为辉钼矿化石英脉外,其余均为辉钼矿化砂卡岩,模式年龄数据显示,石英-硫化物阶段的矿化年龄比砂卡岩阶段稍晚,这一特征与砂卡岩矿床的特征相吻合。利用 ISOPLOT 软件将 7 件样品的结果进行等时线加权拟合,得到一条相关性较好的等时线

表 2 肯登高尔铜钼矿矿石铅同位素组成及相关参数

Table 2 Pb-isotopic compositions and characteristic parameters of ore sulfides in the Kendenggaer Cu-Mo deposit

样品号	测定矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$t/\text{Ma}$	$\mu$	$\omega$	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
K5	黄铜矿	17.963	15.549	38.271	429	9.41	37.87	3.89	58.78	15.4	34.99
K15	辉钼矿	18.178	15.554	37.992	279	9.40	35.51	3.66	71.46	15.73	27.44
K16	辉钼矿	18.256	15.605	36.802	285	9.49	30.59	3.12	76.05	19.06	-4.74
K18	辉钼矿	18.181	15.588	37.671	319	9.47	34.46	3.52	71.63	17.95	18.76
K26	黄铜矿	18.186	15.574	38.085	298	9.44	36.04	3.69	71.93	17.03	29.96
K27	黄铜矿	18.205	15.604	38.183	321	9.49	36.63	3.74	73.05	18.99	32.61
k32	黄铜矿	18.198	15.598	38.164	318	9.48	36.53	3.73	72.64	18.6	32.09
k36	黄铜矿	18.192	15.598	38.159	323	9.48	36.54	3.73	72.28	18.6	31.96
k38	辉钼矿	18.229	15.605	37.633	305	9.49	34.20	3.49	74.46	19.06	17.73
K39	辉钼矿	18.232	15.589	37.681	283	9.46	34.24	3.50	74.64	18.01	19.03

注 相关参数由路远发研发的 Geokit 软件计算得到。

表 3 肯登高尔铜钼矿氧、氢同位素组成

Table 3 Oxygen and hydrogen isotopic composition of quartz from the Kendenggaer Cu-Mo deposit

样品号	测试矿物	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O(V-SMOW)}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O(V-SMOW)}}/\text{‰}$	$t/^\circ\text{C}$
K3	石英	15.4	-2.82	-96	123
K5	石英	15	3.04	-93	195
K26	石英	15.5	0.49	-93	155
K27	石英	16.8	3.65	-94	178
K36	石英	13.2	-0.80	-82	167

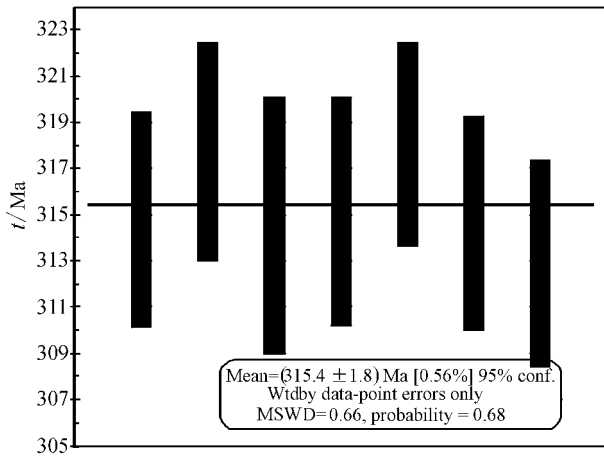


图 4 肯登高尔铜钼矿中辉钼矿 Re-Os 模式年龄加权平均值

Fig. 4 Weighted mean value of Re-Os model age of molybdenite in the Kendenggaocer Cu-Mo deposit

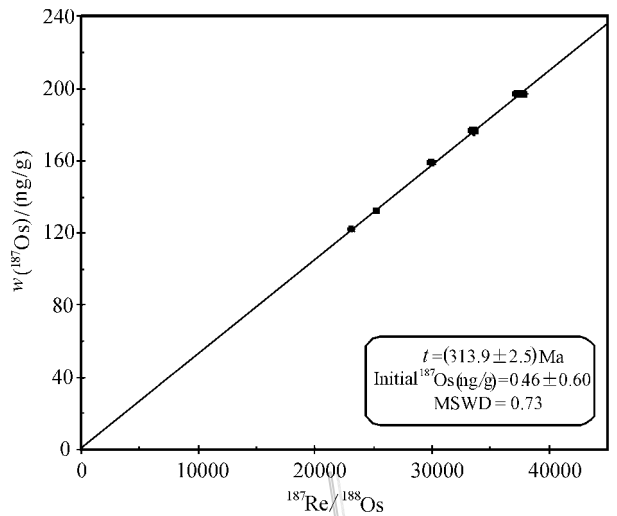


图 5 肯登高尔铜钼矿中辉钼矿 Re-Os 同位素等时线图

Fig. 5 Re-Os isotope isochron diagram of molybdenite in the Kendenggaocer Cu-Mo deposit

表 4 新疆肯登高尔铜钼矿中辉钼矿的 Re-Os 同位素测年结果

Table 4 Re-Os isotopic analytical results of molybdenite from the Kendenggaocer Cu-Mo deposit

样号	m/g	$\alpha(\text{Re}) (\mu\text{g/g})$		$\alpha(\text{普 Os}) (\text{ng/g})$		$\alpha(^{187}\text{Re}) (\mu\text{g/g})$		$\alpha(^{187}\text{Os}) (\text{ng/g})$		模式年龄/Ma	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
K14	0.08026	36.83	0.32	0.1262	0.0219	23.15	0.20	121.7	1.1	314.8	4.7
K15	0.08048	47.70	0.44	0.0036	0.0244	29.98	0.28	159.1	1.3	317.7	4.7
K16	0.08002	59.72	0.79	0.0748	0.0126	37.53	0.50	197.2	1.7	314.5	5.6
K18	0.08054	53.39	0.54	0.0915	0.0502	33.55	0.34	176.6	1.6	315.1	5.0
K22	0.08018	11.13	0.09	0.0834	0.0126	6.994	0.054	37.15	0.31	318.0	4.4
K38	0.08048	36.84	0.33	0.3484	0.0255	23.16	0.21	121.7	1.0	314.6	4.7
K39	0.08045	40.21	0.30	0.0173	0.0267	25.27	0.19	132.1	1.2	312.9	4.5

(图 5),等时线年龄为  $(313.9 \pm 2.5) \text{ Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 0.73$ , 初始  $^{187}\text{Os}$  值为  $(0.46 \pm 0.60) \text{ ng/g}$ , 接近于 0, 表明辉钼矿形成时几乎不含 Os, 辉钼矿中的 Os 可看作完全由 Re 衰变而成, 符合 Re-Os 同位素体系模式年龄的计算条件(蒋少涌等 2000), 说明所获得的模式年龄是有效的。一般认为模式年龄代表同位素与母体分离的时间, 而等时线年龄则是同位素体系最后均一化的时间, 因此, 上述等时线年龄代表了成矿年龄。

## 4 讨论

### 4.1 成矿物质来源

关于热液矿床中硫来源的讨论, 必须依据源区物质  $\delta^{34}\text{S}$  值和含硫物质在热液中迁移沉淀时的物理化学条件(Hoefs, 1997)。肯登高尔铜钼矿矿石中含硫矿物主要为辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿和少量磁黄

铁矿、方铅矿等硫化物, 不含重晶石等硫酸盐矿物, 且石英流体包裹体激光拉曼实验中出现  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  峰(贾志业等, 2010), 显示成矿背景为低氧逸度、还原环境, 因此硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  平均值可近似代表热液的总  $\delta^{34}\text{S}$  值(Ohmoto et al., 1979), 为  $1.14\text{‰}$ , 非常接近原始地幔硫  $(0 \pm 3\text{‰}, \text{Chaussidon et al., 1990})$ , 根据硫化物产于与花岗闪长岩体关系密切的矽卡岩中, 可以推断硫主要来自花岗闪长岩岩浆。

铅同位素演化特征对研究成矿金属元素来源具有重要意义, 因而铅同位素被用于追溯成矿物质的来源(朱炳泉, 1998)。通常认为, 铅同位素源区特征值的变化能反映铅的来源。肯登高尔铜钼矿  $\mu$  值介于  $9.40 \sim 9.49$ , 高于地幔原始铅  $\mu$  值范围, 但低于  $9.58$ ,  $\omega$  值低于地壳平均值  $36.84$ ,  $\text{Th/U}$  比值变化于  $3.12 \sim 3.89$ , 接近地幔值  $3.45$ , 表明矿石铅可能来自上地幔, 且矿床在形成过程中有岩浆热液参与



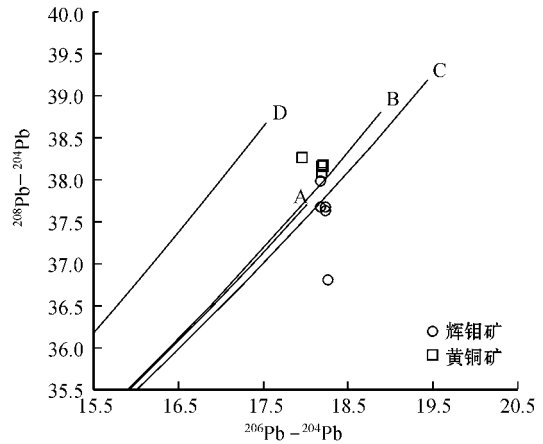
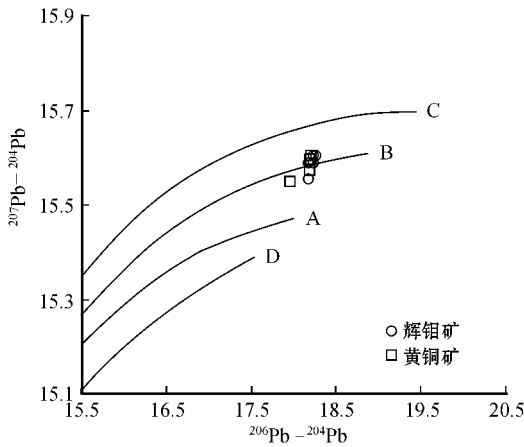


图 6 肯登高尔铜钼矿铅同位素构造模式图(底图据 Zartman et al., 1981)

A. 地幔; B. 造山带; C. 上地壳; D. 下地壳

Fig. 6 Plumbotectonics model diagram for the Kendenggaer Cu-Mo deposit (after Zartman et al., 1981)

A. Mantle; B. Orogeny; C. Upper crust; D. Lower Crust

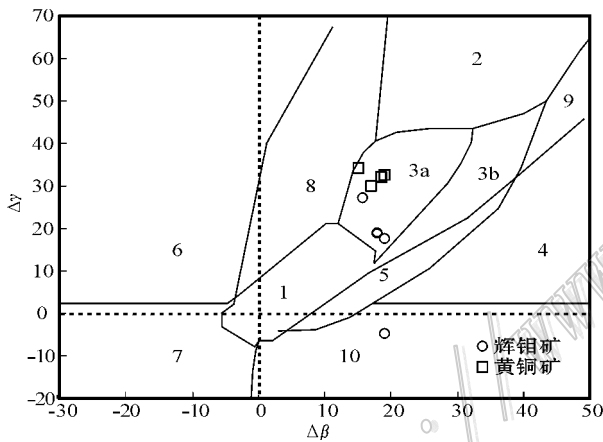


图 7 肯登高尔铜钼矿矿石铅成因 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图解

(据朱炳泉, 1998)

1—地幔源铅; 2—上地壳铅; 3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a—岩浆作用; 3b—沉积作用); 4—化学沉积型铅; 5—海底热水作用铅; 6—中深变质作用铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅

Fig. 7 Genetic classification of  $\Delta\beta-\Delta\gamma$  diagram of lead isotopes from the Kendenggaer Cu-Mo deposit (after Zhu, 1998)

1—Mantle-derived lead; 2—Upper crust-derived lead; 3—Lead from the subduction zone characterized by the mixture of the mantle and upper crust (3a—Magmatism; 3b—Sedimentation); 4—Lead from chemical precipitation; 5—Lead from thermal water in sea floor; 6—Lead from medium and high grade metamorphism; 7—Lead from high-grade metamorphic lower crust; 8—Lead from orogeny; 9—Lead from old shale in the upper crust; 10—Lead from retrogressive metamorphism

(吴开兴等, 2002; Zartman et al., 1981)。为了进一步探讨肯登高尔铜钼矿矿石铅的来源, 将铅同位素组成数据投影到铅同位素构造模式图解(图6)中, 数据点主要落在造山带演化线附近, 反映成矿物质具壳幔混合特点。朱炳泉(1998)通过 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图解来追踪矿石铅的源区, 由于消除了时间因素的影响, 因而具有更好的示踪意义。将数据点投到 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图解中(图7), 基本落入与岩浆作用有关的上地壳与地幔混合的俯冲带铅范围内, 只有一个样品点(K16)落入退变质铅中。这一特征反映成矿物质来源与岩浆作用有关, 与地质特征相吻合。因此, 成矿物质来源具壳幔混合特点, 且与岩浆活动有关。

Re-Os 同位素体系不仅可以精确确定硫化物矿床形成的时间, 而且还可以示踪成矿物质来源以及提示成矿过程中不同来源物质混入的程度(Foster et al., 1996)。Re 是不相容的亲铜、亲铁元素, 在熔融液相中富集, 且 Re 的地球化学行为与 Mo 相似, 在辉钼矿中能达到最大的富集程度, 因此一般用辉钼矿中 Re 元素的含量示踪相关矿床的物质来源。前人在综合分析、对比了各种类型钼矿床中辉钼矿的 Re 含量后认为, 成矿物质以幔源为主的钼矿, 其辉钼矿  $w(\text{Re})$  基本为  $100\sim 1\,000\ \mu\text{g/g}$ ; 成矿物质具壳幔混合源的钼矿床, 其辉钼矿中  $w(\text{Re})$  大多在十几~几十  $\mu\text{g/g}$ ; 成矿物质完全来自壳源的矿床, 其辉钼矿  $w(\text{Re})$  为  $1\sim n\ \mu\text{g/g}$  或更低, 因此, 辉钼矿的 Re 含量可以指示成矿物质的来源(Mao et al., 1999;

Stein et al., 1997; 孟祥金等, 2007)。本研究获得的肯登高尔铜钼矿中辉钼矿的  $w(\text{Re})$  为 11.13 ~ 59.72  $\mu\text{g/g}$ , 平均 40.83  $\mu\text{g/g}$ , 相当于壳幔源岩浆矿床辉钼矿的含量, 表明成矿物质可能来自壳幔混合作用。

以上 S、Pb 同位素组成及辉钼矿 Re 含量均显示, 肯登高尔铜钼矿的成矿物质可能主要来源于幔源或下地壳, 在俯冲过程中发生壳幔混合作用而显示壳幔混合源特点, 与花岗闪长岩岩浆活动关系密切。

#### 4.2 成矿流体来源

不同来源的流体具有不同的氢、氧同位素组成特征(张理刚, 1985), 因而可根据热液矿物流体中水的氢氧同位素组成有效地判别成矿热液来源(郑永飞等, 2000)。赵一鸣等(1990)通过对中国矽卡岩型矿床的研究表明, 成矿流体中水的  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} = -90.3\text{‰} \sim -48.3\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 3.35\text{‰} \sim 9.59\text{‰}$ , 氢、氧同位素组成基本落于岩浆水或接近岩浆水范围, 成矿流体中岩浆水占据主要地位, 大气降水的混合很少。本文 5 件铜钼矿石的脉石矿物石英样品中  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{V-SMOW})$  值介于  $-96\text{‰} \sim -82\text{‰}$ , 平均为  $-91.6\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{V-SMOW})$  值介于  $-2.82 \sim 3.65\text{‰}$ , 平均值为  $0.71\text{‰}$ , 明显偏离正常岩浆水范围( $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}: -80\text{‰} \sim -40\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}: 5.5\text{‰} \sim 9.0\text{‰}$ ; Taylor, 1974)。在  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  图解中(图 8), 样品点落在靠近岩浆水的区域, 各点分布由近岩浆水转到近大气降水线, 这

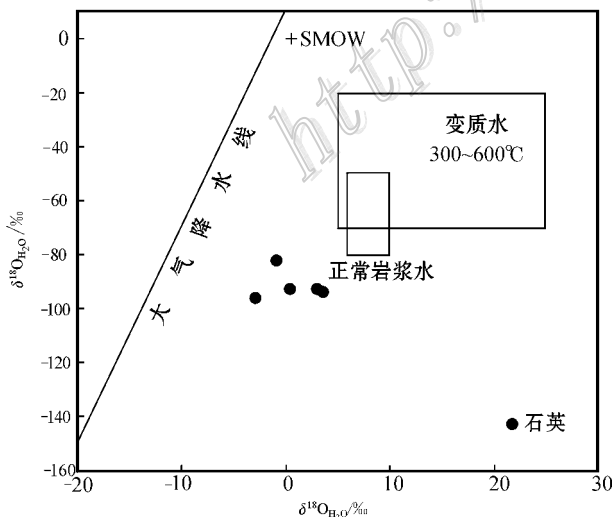


图 8 肯登高尔铜钼矿成矿流体  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  图解

Fig. 8 Diagram of  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$  versus  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  values of ore-forming fluid in the Kendengaoer Cu-Mo deposit

种变化趋势表明成矿热液为岩浆水, 并与大气降水混合。结合地质特征分析, 热液的这种特征可能是由于来自深部的岩浆热液在上升过程中与围岩地层中的大气降水混合, 发生了某种同位素交换反应, 使得含矿热液中的  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  发生了明显漂移所致。

#### 4.3 成矿时代

近年来西天山已经积累了丰富的斑岩-矽卡岩矿床的成矿年代学资料, 达巴特斑岩型铜钼矿中辉钼矿 Re-Os 等时线显示  $(301 \pm 20)$  Ma 的成矿年龄(张作衡等, 2006); 莱历斯高尔-3571 斑岩型铜钼矿床中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为  $(359.2 \pm 7.8)$  Ma(李华芹等, 2006); 喇嘛苏铜矿中含铜石英脉石英流体包裹体的 Rb-Sr 等时线年龄为  $(328 \pm 16)$  Ma(李华芹等, 2004)。本文所测肯登高尔铜钼矿 7 件辉钼矿样品模式年龄平均值为  $(315.4 \pm 1.8)$  Ma, 等时线年龄为  $(313.9 \pm 2.5)$  Ma, 吻合较好, 与花岗闪长岩体成岩年龄一致(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄  $(313 \pm 4)$  Ma, 另文发表), 表明肯登高尔铜钼矿成岩成矿时代为晚石炭世。以上年龄数据显示, 包括肯登高尔铜钼矿在内的这些斑岩-矽卡岩型铜(钼)矿的成矿时代接近, 集中在晚泥盆世—晚石炭世, 这一时期西天山构造运动强烈, 地壳拉张、聚合交替出现, 岩浆活动频繁发生, 为斑岩-矽卡岩型矿床的形成提供了条件。

#### 4.4 成矿过程或成矿动力学背景

区域构造演化表明, 西天山是古生代古中亚洋经过复杂的扩张-闭合过程形成的造山带。博罗霍洛古生代岛弧带经历了中元古代末古克拉通形成, 震旦纪—寒武纪稳定盖层沉积, 在中晚寒武世—奥陶纪期间, 准噶尔板块和伊犁板块发生分离, 形成古准噶尔洋(程松林等, 2009; 张东阳等, 2009)。奥陶纪—志留纪, 准噶尔洋板块向南俯冲到伊犁地块之下, 在西天山形成早古生代岛弧带(张良臣等, 1985; 肖序常等, 1992; 王志良等, 2004)。中泥盆世—早石炭世初, 在依连哈比尔尕一带形成依连哈比尔尕小洋盆, 早石炭世中期依连哈比尔尕小洋盆向南俯冲, 至晚石炭世形成了一个完整的沟-弧-盆体系(王志良等, 2004; 张作衡等, 2006; 张良臣等, 2006), 该阶段是新疆天山斑岩-矽卡岩铜钼矿最主要的成矿时期(刘德权等, 2001; 张洪涛等, 2004)。晚石炭世—二叠纪, 伊犁地块南北两侧逐渐隆起, 中、新生代进入稳定陆壳阶段。

结合区域地质特征和矿床地质特征, 推测肯登

高尔铜钼矿成矿机制与石炭纪依连哈比尔尕小洋盆聚合、向南俯冲相关,洋壳构造残片被挤压推覆定位于微板块缝合带中,在此过程中岩石遭受到剧烈的构造作用,使之变形、变质,随之持续俯冲,随着温度、压力升高,物质熔融后形成花岗闪长岩浆上升侵位到博罗科努古生代复合岛弧带,伴随岩浆侵入,在花岗闪长岩与东图津河组一段灰岩接触带附近,形成矽卡岩,并伴有少量矿化。在矽卡岩化晚阶段和之后,含矿的岩浆热液沿外接触带运移,并由于温度、压力降低、水岩交换反应和循环大气降水的混入,导致了含矿热液中络合物分解,大量铜、钼和铅锌沉淀富集,形成板状、不规则脉状和透镜状铜钼矿体。

## 5 结 论

新疆肯登高尔铜钼矿位于哈萨克斯坦-伊犁地块北部博罗霍洛古生代岛弧带,矿体呈板状、不规则脉状和透镜状产于晚石炭世花岗闪长岩与上石炭统碳酸盐岩外接触带矽卡岩中,受接触带构造控制,铜钼硫化物内生热液成矿经历了矽卡岩期和石英-硫化物期,属矽卡岩型铜钼矿。

矿石  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  值为  $-0.55\% \sim 1.90\%$ , 矿石铅同位素组成  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.963 \sim 18.256$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.549 \sim 15.605$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.802 \sim 38.271$ , 辉钼矿  $\alpha(\text{Re})$  为  $11.13 \sim 59.72 \mu\text{g/g}$ , 反映肯登高尔铜钼矿成矿物质来源于上地幔和下地壳,与洋壳俯冲过程中壳幔相互作用引起的中酸性岩浆活动关系密切。

矿石中石英指示铜钼成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{V-SMOW})$  为  $-2.82\% \sim 3.65\%$ ,  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{V-SMOW})$  为  $-96\% \sim -82\%$ , 属岩浆水,并受到大气降水的某种混合。

矿石中辉钼矿  $\text{Re-Os}$  同位素精确定年得到模式年龄为  $(315.4 \pm 1.8) \text{Ma}$ , 等时线年龄为  $(313.9 \pm 2.5) \text{Ma}$ , 铜钼成矿发生在晚石炭世,与早石炭世中期依连哈比尔尕小洋盆向南俯冲有关。

志 谢 野外工作得到了新疆地矿局第七地质大队大力的支持和帮助,样品测试过程中得到中国地质科学院矿产资源研究所李延河、罗续荣、万德芳等老师及核工业北京地质研究院刘牧老师的帮助,成文中曾与段士刚博士、薛伟硕士、李志丹硕士、石海岗硕士进行过有益的探讨,在此一并志谢!

## References

- Bohlkea J K, Laeter J R and Bievre P D. 2005. Isotopic Compositions of the Elements [ J ]. Phys. Chem. Ref. Data, 34( 1 ): 57-67.
- Chaussidon M and Lorand J P. 1990. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariège ( North-eastern Pyrenees, France ): An ion microprobe study [ J ]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54 : 2835-2846.
- Chen Y C, Liu D Q, Tang Y L, Wang D H, Zhou R H, Wang J L, Li H Q and Wang X D. 2007. The research of strategic solid ore deposits gathered zone in Xinjiang, China [ M ]. Beijing : Geol. Pub. House. 1-467 ( in Chinese ).
- Chen Y L, Yang Z F and Zhao Z D. 2005. Isotopic geochronology and geochemistry [ M ]. Beijing : Geol. Pub. House. 262-276 ( in Chinese ).
- Cheng S L, Feng J, Tu Q J, Xue C J, Wang X G, Zhang B and Wan Y. 2009. Geolical characteristics and prospecting potential of copper-molybdenum mineralization in Laligar, Xinjiang [ J ]. Xinjiang Geology, 27( 3 ): 236-240 ( in Chinese with English abstract ).
- Clayton R N and Mayeda T K. 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis [ J ]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 27 : 43-52.
- Coleman M L, Sheppard T J, Durham J J, Rouse J E and Moore G R. 1982. Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis [ J ]. Analytical Chemistry, 54 : 993-995.
- Deng H T. 2001. Genesis type discussion of Au-Cu deposit alone northern foothill of Boluokenu mountain [ J ]. Xinjiang Geology, 27( 3 ): 123-127 ( in Chinese with English abstract ).
- Du A D, He H L, Yin N W, Zou X Q, Sun Y L, Sun D Z, Chen S Z and Qu W J. 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites [ J ]. Acta Geologica Sinica, 68( 4 ): 339-347 ( in Chinese with English abstract ).
- Foster J G, Lambert D D, Frick L R and Maas R. 1996. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites [ J ]. Nature, 382 : 703-706.
- Hoefs J. 1997. Stable isotope geochemistry ( the forth edition ) [ M ]. Berlin : Springer-Verlag. 119-120.
- Jia Z Y and Xue C J. 2010. Ore-forming fluid characteristics and genesis of Kendenggaocer Cu-Mo deposit, Xinjiang, Western Tianshan [ J ]. Mineral Deposits, 29( Supp. ): 581-582 ( in Chinese ).
- Jiang S Y, Yang J H, Zhao K D and Yu J M. 2000. Re-Os isotope tracer and dating methods in ore deposits research [ J ]. Journal of Nanjing University ( Natural Sciences ), 36( 6 ): 669-677 ( in Chinese with English abstract ).
- Kui H M, Wu W K and Xue C J. 1999. Metallogenic Series and their formation and evolution in Western Tianshan, Xinjiang [ J ]. Acta Geologica Sinica, 73( 3 ): 29-40 ( in Chinese with English abstract ).
- Li H Q, Wang D H, Wan Q, Qu W J, Zhang B, Lu Y F, Mei Y P and Zou S L. 2006. Isotopic geochronology study and its significance of the Lailisigao'er Mo deposit, Xinjiang [ J ]. Acta Petrologica Sinica,

- 2X(10):2437-244X in Chinese with English abstract)
- Li H Q and Chen F W. 2004. Isotopic geochronology of regional mineralization in Xinjiang, China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 169-20X in Chinese with English abstract).
- Li K, Gu X X and Dong S Y. 2009. Isotopic geochemistry of Yinan Au-Cu-Fe deposit in Shandong Province [J]. Mineral Deposits, 28(1): 93-10X in Chinese with English abstract).
- Liu D Q, Tang Y L and Zhou R H. 1996. Minerogenic series in Xinjiang, China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 117-126 in Chinese with English abstract).
- Liu D Q, Tang Y L and Zhou R H. 2001. The metallogenic environment and potential of the porphyry copper in Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 19(1): 42-4X in Chinese with English abstract).
- Luo X P, Xue C J, Li H X, Feng J and Zhang B. 2009. Geology, mode of occurrence of gold and geochemistry of the Chahansala gold deposit, in western Tianshan, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 28(5): 558-568 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Tang Z C, Zhang Z H and Du A D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou (Mo) deposit in the northern Qilain mountains and its geological significance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(11-12): 1815-1818.
- Meng X J, Hou Z Q, Dong G Y, Liu J G, Qu W J, Yang Z S, Zuo L Y, Wan L J and Xiao M Z. 2007. The geological characteristics and Re-Os isotope age of molybdenite of the xiongjiashan molybdenum deposit, Jiangxi Province [J]. Acta Geologica Sinica, 81(7): 946-950 (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon [A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits [M]. New York: Wiley-Interscience. 509-567.
- Qu W J and Du A D. 2003. Highly precise Re-Os dating of Molybdenite by Icp-MS with carius tube sample digestion [J]. Rock and Mineral Analysis, 2X(4): 254-257 (in Chinese with English abstract).
- Sha D M. 1998. The fluid inclusion of Axi gold deposit in West Tianshan mountains [J]. Journal of Precious Metallic Geology, 7(3): 180~18X in Chinese with English abstract).
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-molybdenum analysis [J]. Anal. Chem., 67: 2136-2141.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Du A D and Sun Y. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China [J]. Econ. Geol., 92: 827-835.
- Taylor H P. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition [J]. Econ. Geol., 69(6): 843-883.
- Wang Z L, Mao J W, Zhang Z H, Zuo G Z and Wang L S. 2004. Types, characteristics and metallogenic evolution of the Paleozoic polymetallic copper-gold deposits in the western Tianshan Mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 78(6): 836-84X in Chinese with English abstract).
- Wang Z L, Mao J W, Zhang Z H, Zuo G Z and Wang L S. 2006. Geology, time-space distribution and metallogenic geodynamic evolution of porphyry copper (molybdenum) deposits in the Tianshan Mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 80(7): 943-95X in Chinese with English abstract).
- Wieser M E. 2006. Atomic weights of the elements 2005 (IUPAC technical report) [J]. Pure Appl. Chem., 78(11): 2051-2066.
- Wu K X, Hu R Z, Bi X W, Peng J T and Tang Q L. 2002. Ore lead isotopes as a trace for ore-forming material sources: A review [J]. Geology-Geochemistry, 30(3): 73-8X in Chinese with English abstract).
- Xiao X C, Tang Y Q, Feng Y M, Zhu B Q, Li J Z and Zhao M. 1992. Tectonic evolution of northern Xinjiang and its adjacent regions [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-169 in Chinese with English abstract).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics-the model [J]. Tectonophysics, 75(1-2): 135-162.
- Zhang D Y, Zhang Z C, Ai Y and Sun H M. 2009. Geochronology, geochemistry of the ores-bearing porphyries in the Lailisigaoer region, western Tianshan: Implications for their tectonic setting and mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 25(6): 1319-1331 in Chinese with English abstract).
- Zhang H T, Chen R Y and Han F L. 2004. Reunderstanding of metallogenic geological conditions of porphyry copper deposits in China [J]. Mineral Deposits, 23(2): 150-163 in Chinese with English abstract).
- Zhang L G. 1985. Geological application for the stable isotopes [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House. 23-151 in Chinese).
- Zhang L C and Wu N Y. 1985. The geotectonics and its evolution of Tianshan [J]. Xinjiang Geology, 3(3): 1-14 in Chinese with English abstract).
- Zhang L C and Liu D Q. 2006. The ore-forming regularity of predominant metal deposits in Xinjiang, China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 116-150 in Chinese with English abstract).
- Zhang Z H, Mao J W, Wang Z L, Du A D, Zuo L C, Wang L S, Wang J W and Qu W J. 2006. Geology and metallogenetic epoch of the Dabate porphyry copper deposit in west Tianshan mountains, Xinjiang [J]. Geological Review, 52(5): 683-689 (in Chinese with English abstract).
- Zhao R F, Cheng X H, Wang Q M, Liu T, Bai H H, Yuan Y J, Yao W G and Li C A. 2006. New discoveries and prospecting potential in western-southwestern Tianshan metallogenic [J]. Northwestern Geology, 39(2): 35-56 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y L, Lin W W, Bi C S, Li D X and Jiang C J. 1990. Skarn deposits of China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 123-136 in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F, Xu B L and Zhou G T. 2000. Geochemical studies of stable isotopes in minerals [J]. Earth Science Frontiers, 7(2): 299-320 in Chinese with English abstract).
- Zhu B Q. 1998. Application of isotopic system in earth sciences [M]. Beijing: Science Press. 216-23X in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 王登红, 周汝洪, 王金良, 李华芹, 王晓地. 2007. 中国新疆战略性固体矿产大型矿集区研究[M]. 北京: 地质出版社. 1-467.
- 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 2005. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 262-276.
- 程松林, 冯京, 涂其军, 薛春纪, 王晓刚, 张兵, 万闾. 2009. 新疆莱历斯高尔铜钼矿地质特征及找矿前景[J]. 新疆地质, 27(3): 236-240.
- 邓洪涛. 2001. 博罗科努山北坡金铜矿成因类型探讨[J]. 新疆地质, 19(2): 123-127.
- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. 地质学报, 68(4): 339-347.
- 贾志业, 薛春纪. 2010. 新疆西天山肯登高尔铜钼矿成矿流体特征及成因[J]. 矿床地质, 29(增刊): 581-582.
- 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 于际民. 2000. 金属矿床  $Re-Os$  同位素示踪与定年研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 36(6): 669-677.
- 魏合明, 吴文奎, 薛春纪. 1999. 新疆西天山金属矿床成矿系列和形成演化规律[J]. 地质学报, 73(3): 29-40.
- 李华芹, 陈富文. 2004. 中国新疆区域成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社. 169-205.
- 李华芹, 王登红, 万闾, 屈文俊, 张兵, 路远发, 梅玉萍, 邹绍利. 2006. 新疆莱历斯高尔铜钼矿的同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 22(10): 2437-2443.
- 李科, 顾学祥, 董树义. 2009. 山东沂南金铜铁矿床同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 28(1): 93-103.
- 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 1996. 中国新疆矿床成矿系列[M]. 北京: 地质出版社. 117-126.
- 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 2001. 新疆斑岩铜矿的成矿条件和远景[J]. 新疆地质, 19(1): 42-48.
- 罗小平, 薛春纪, 李怀祥, 冯京, 张兵. 2009. 新疆西天山查汗萨拉金矿地质、金赋存状态及同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 28(5): 558-568.
- 孟祥金, 侯增谦, 董光裕, 刘建光, 屈文俊, 杨竹森, 左力艳, 万祿进, 肖茂章. 2007. 江西金溪熊家山钼矿床特征及其  $Re-Os$  年龄[J]. 地质学报, 81(7): 946-950.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4): 254-262.
- 沙德铭. 1998. 西天山阿希金矿流体包裹体研究[J]. 贵金属地质, 7(3): 180-188.
- 王志良, 毛景文, 张作衡, 左国朝, 王龙生. 2004. 西天山古生代铜金多金属矿床类型、特征及其成矿地球动力学深化[J]. 地质学报, 78(6): 836-847.
- 王志良, 毛景文, 张作衡, 左国朝, 王龙生. 2006. 新疆天山斑岩铜钼矿地质特征、时空分布及其成矿地球动力学演化[J]. 地质学报, 80(7): 943-955.
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 唐群力. 2002. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 30(3): 73-81.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社. 1-169.
- 张东阳, 张招崇, 艾羽, 苏慧敏. 2009. 西天山莱历斯高尔一带铜(钼)矿成矿斑岩年代学、地球化学及其意义[J]. 岩石学报, 25(6): 1319-1331.
- 张洪涛, 陈仁义, 韩芳林. 2004. 重新认识中国斑岩铜矿的成矿地质条件[J]. 矿床地质, 23(2): 150-163.
- 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. 23-151.
- 张良臣, 刘德权. 2006. 中国新疆优势金属矿产成矿规律[M]. 北京: 地质出版社. 116-150.
- 张良臣, 吴乃元. 1985. 天山地质构造及演化史[J]. 新疆地质, 3(3): 1-14.
- 张作衡, 毛景文, 王志良, 杜安道, 左国朝, 王龙生, 王见菡, 屈文俊. 2006. 新疆西天山达巴特铜矿床地质特征和成矿时代研究[J]. 地质论评, 52(5): 683-689.
- 赵仁夫, 程晓红, 王庆明, 刘拓, 白洪海, 袁永江, 姚文光, 李长安. 2006. 西天山-西南天山成矿带勘查新发现及找矿远景[J]. 西北地质, 39(2): 35-56.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 李大新, 蒋崇俊. 1990. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社. 123-136.
- 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 2000. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. 地学前缘, 7(2): 299-320.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用[M]. 北京: 科学出版社. 216-235.