

文章编号: 0258-7106(2014)02-0386-11

新疆哈勒尕提铜铁矿床的成矿年代学研究*

高景刚^{1,2}, 李文渊², 薛春纪³, 张照伟², 刘拓², 董福辰², 闫永红³

(1 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 2 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054; 3 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要 首次采用锆石 SHRIMP 微区 U-Pb 测年技术, 对新疆西天山哈勒尕提铜铁多金属矿床成矿岩体进行了年代学研究, 通过对角闪石黑云母二长花岗岩中单颗粒锆石 12 个样品点的分析, 获得²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 362.7~381.7 Ma, 加权平均值为(367.3±2.2) Ma, 表明岩体的结晶年龄为晚泥盆世。通过 ICP-MS 法测定了哈勒尕提铜铁多金属矿床中的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄, 获得其模式年龄的加权平均值为(370.1±2.4) Ma, 等时线年龄为(371±12) Ma, 代表了哈勒尕提铜铁多金属矿床的成矿年龄。两种测年方法获得的年龄在误差范围内基本一致, 因此该测试结果表明哈勒尕提铜铁多金属矿床与晚泥盆世角闪石黑云母二长花岗岩侵入作用密切相关, 角闪石黑云母二长花岗岩为哈勒尕提铜铁多金属矿床的形成提供了成矿物质和热源。

关键词 地球化学, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄, Re-Os 同位素, 哈勒尕提铜铁多金属矿床, 西天山, 新疆

中图分类号: P618.41; P618.31

文献标志码: A

Zircon SHRIMP U-Pb and molybdenite Re-Os dating of Halegati Cu-Fe polymetallic deposit in West Tianshan Mountains and its geological implications

GAO JingGang^{1,2}, LI WenYuan², XUE ChunJi³, ZHANG ZhaoWei², LIU Tuo²,
DONG FuChen² and YAN YongHong³

(1 College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The first high-precision dating of the mineralization and rock-forming process in the Halegati Cu-Fe polymetallic deposit of West Tianshan Mountains was conducted in this paper. The zircon SHRIMP U-Pb dating of the Halegati Cu-Fe polymetallic deposit yielded a group of ages, in which 12 analyses presented ²⁰⁶Pb/²³⁸U concordant ages from 362.7 Ma to 381.7 Ma, with a weighted mean age of (367.3±2.2) Ma, which suggests that the crystallization epoch of the rock body is late Devonian. In addition, the ¹⁸⁷Re and ¹⁸⁷Os values of molybdenite from the Halegati Cu-Fe polymetallic deposit were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), with analytical errors of Re and Os between 0.04 and 0.56. The results show that the Re-

* 本研究得到中国地质调查局我国典型三稀金属矿床研究与靶区优选(12120113078200)、新疆北部晚古生代大规模岩浆作用与成矿耦合关系研究(1212011121092)、新疆西天山斑岩铜矿找矿突破研究(1212011085069)、中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2010JC128)和长安大学基础研究支持计划专项基金项目的共同资助

第一作者简介 高景刚,男,1974年生,副教授,从事矿床学、矿产普查与勘探专业教学和科研工作。Email: jggao@chd.edu.cn

收稿日期 2013-03-05; 改回日期 2014-01-06。苏杭编辑。

Os model ages of the deposit are between 368.7 Ma and 384.6 Ma, the weighted average of model ages is (370.1 ± 2.4) Ma, and the isochron age is (371 ± 12) Ma. The authors obtained the same age from the two kinds of methods, which should represent the ore-forming age of the Halegati Cu-Fe polymetallic deposit, and it indicates that the rock-forming age is almost identical with the ore-forming age. The test result suggests that the Halegati Cu-Fe polymetallic deposit was closely related to the intrusion of late Devonian Hornblende biotite adamellite, and the hornblende biotite adamellite had close connection with metallogeny and provided metallogenic materials and heat for the Halegati Cu-Fe polymetallic deposit.

Key words: geochemistry, zircon SHRIMP U-Pb dating, Re-Os isotope, Halegati Cu-Fe polymetallic deposit, West Tianshan Mountains, Xinjiang

哈勒尔提铜铁多金属矿床位于新疆西天山博罗霍洛山主峰南侧,矿区地形陡峻,大部分被冰雪覆盖,仅在夏季才有部分基岩出露。近年,随着交通条件的改善,勘查程度的不断深入,区域内矿产勘查及成矿规律研究取得了显著成果(曹景良,2005)。在区域上目前已经发现有可可萨拉、艾木斯呆依、莱利斯高尔、3571、哈勒尔提、肯登高尔、色勒特果勒等铜铁钼金多金属矿床多处,有进一步发展成为重要铜钼多金属资源基地的潜力(李华芹等,2006;张东阳等,2009a;2009b;程松林等,2009;冯京等,2010;陈波,2011)。哈勒尔提铜铁多金属矿床与其他矿床呈环形分布于博罗科努大岩基周围,是该区近年勘查工作取得重要成果的一个矿区,由于缺乏可靠的年代学数据和地质依据,多认为哈勒尔提铜铁多金属矿床的形成与区域内晚石炭世正长花岗岩有关(曹景良,2005;冯京等,2010;陈波,2011)。为了获得精确的成矿年龄资料,本文采用锆石 SHRIMP 微区 U-Pb 测年技术,对哈勒尔提铜铁多金属矿区的角闪石黑云母二长花岗岩岩体进行年代学研究;并利用 ICP-MS 测定了哈勒尔提铜铁多金属矿床中辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄;在准确厘定成岩成矿年龄的基础上,探讨了成岩与成矿关系,为哈勒尔提一带多金属矿床的找矿及该区岩体的形成时代提供了重要证据。

1 地质概况

哈勒尔提铜铁多金属矿床位于博罗霍洛山坡大断裂之南,大地构造位置处于西天山博罗霍洛古生代复合岛弧带内。区内出露地层主要有奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系及二叠系等,其中,上奥陶统呼独克达坂组由深灰色、灰色碳酸盐岩夹少量中基性火山岩组成;上志留统博罗霍洛山组为细碎屑岩;中

泥盆统拜辛德组为一套火山碎屑岩-细碎屑岩;下石炭统大哈拉军山组主要是一套中基性火山岩;上石炭统东图津河组主要为灰色生物碎屑灰岩夹砂岩、粉砂岩及沉凝灰岩;在矿区东部有下二叠统乌朗组出露。区域上断裂较为发育,以北西向为主,控制了海西期岩体的分布。侵入岩主要为泥盆纪角闪石黑云母二长花岗岩,石炭纪正长花岗岩。岩体呈岩基状产出,延伸方向与区域性断裂走向一致。个别浅成侵入体分布于大岩体边部,呈岩枝和岩墙状产出。石炭纪正长花岗岩主要侵位于上志留统博罗霍洛山组的碎屑岩地层中,在接触带多发生角岩化。泥盆纪角闪石黑云母二长花岗岩体侵位于上奥陶统呼独克达坂组,被下二叠统乌朗组不整合覆盖,岩体南侧接触带普遍发生砂卡岩化热变质作用,哈勒尔提铜铁多金属矿床就位于岩体向南凸起的接触带上(图1)。

2 矿床地质特征

矿区出露的地层主要有上奥陶统呼独克达坂组、上志留统博罗霍洛山组和下二叠统乌朗组。呼独克达坂组主要出露于矿区的南侧,为一套浅海相碳酸盐岩建造。岩性主要为灰色-灰白色大理岩、大理岩化灰岩夹灰色-灰绿色硅质粉砂岩。该组与上覆的博罗霍洛山组主要呈断层接触,在矿区东南部被博罗霍洛山组及乌朗组不整合覆盖于其上(图2)。

控制砂卡岩铜铁矿化体的岩体分布在矿区北部,岩体是由黑云母二长花岗岩和角闪石黑云母花岗岩闪长岩组成的复式岩体,两者为侵入接触关系,是同期不同次的侵入产物(图2、3、5)。该复式岩体呈不规则岩株状侵入于上奥陶统呼独克达坂组及上志留统博罗霍洛山组中。岩体侵入界线清晰,边缘多有岩枝穿入围岩中,接触面外倾。在黑云母二长花岗

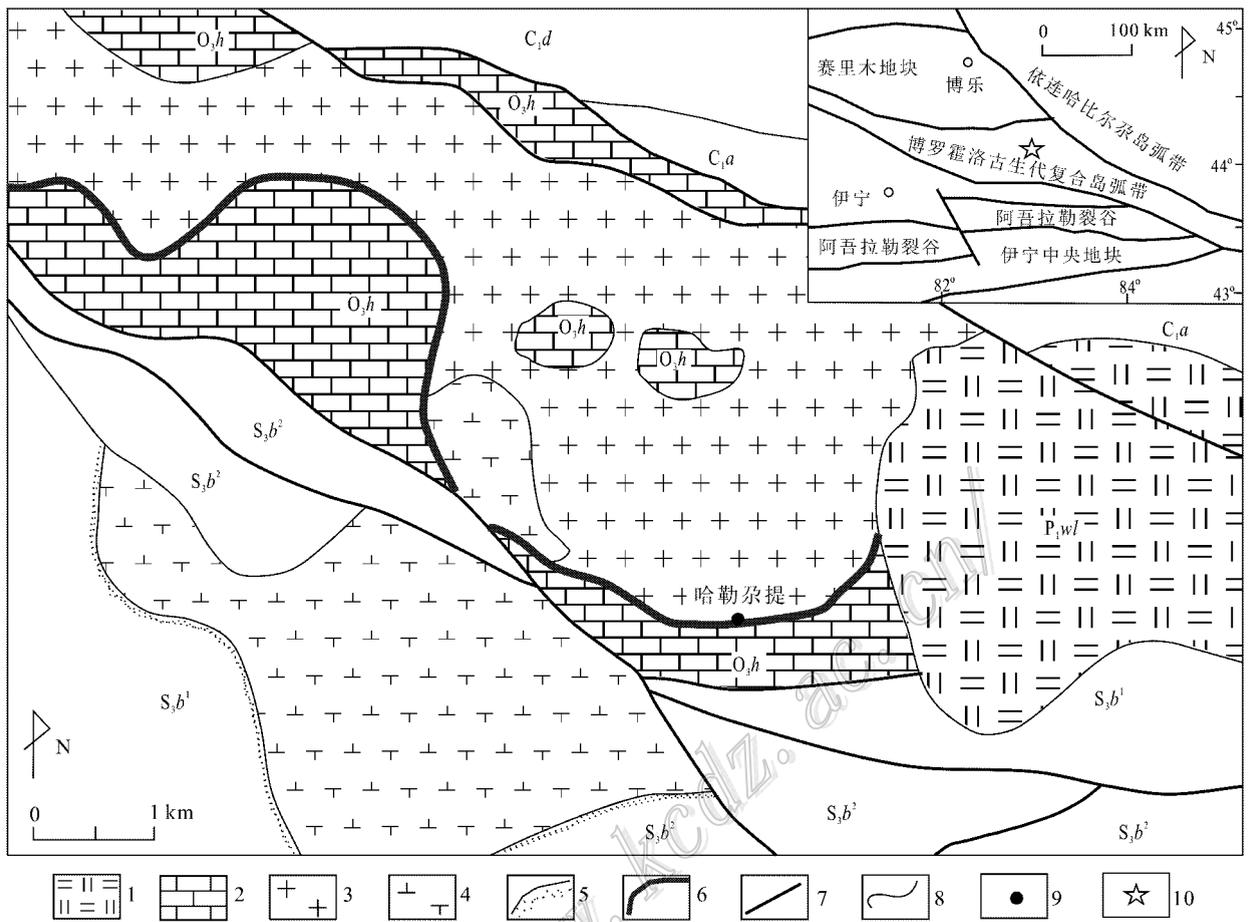


图1 西天山哈勒尕提一带区域地质图(据王志良等,2006;L44E024021图幅资料)

1—二叠纪基性火山岩;2—奥陶纪灰岩;3—黑云母二长花岗岩;4—正长花岗岩;5—角闪化;6—砂卡岩化;7—断层;8—地质界线;
9—哈勒尕提铜铁多金属矿床;10—研究区; P_{1wl} —下二叠统乌郎组; C_{1a} —下石炭统阿克沙克组; C_{1d} —下石炭统大哈拉军山组;
 S_{3b^1} —上志留统博罗霍洛山组第一岩性段; S_{3b^2} —上志留统博罗霍洛山组第二岩性段; O_{3h} —上奥陶统呼独克达坂组

Fig. 1 Simplified regional geological map of Halegati area in West Tianshan Mountains
(after Wang et al., 2006; data of L44E024021 Sheet)

1—Permian basic volcanic rock; 2—Ordovician limestone; 3—Biotite monzonitic granite; 4—Syenogranite; 5—Hornfels alteration; 6—Skarnization; 7—Fault; 8—Geological boundary; 9—Halegati Cu-Fe polymetallic deposit; 10—Study area; P_{1wl} —Lower Permian Wulang Formation; C_{1a} —Lower Carboniferous Akeshake Formation; C_{1d} —Lower Carboniferous Dhalajunshan Formation; S_{3b^1} —First lithologic member of Upper Silurian Boluohuoluoshan Formation; S_{3b^2} —Second lithologic member of Upper Silurian Boluohuoluoshan Formation; O_{3h} —Upper Ordovician Hudukedaban Formation

岩和角闪石黑云母花岗闪长岩与呼独克达坂组灰岩组成的接触带上形成了长约数公里的砂卡岩带,具黄铜矿化、磁铁矿化和辉钼矿化等,为赋矿母岩。其中,黑云母二长花岗岩主要控制了砂卡岩化带的分布,角闪石黑云母花岗闪长岩体呈岩株,岩滴状分布在岩基边缘或者内接触带上。角闪石黑云母花岗闪长岩体的侵位处,砂卡岩化增强,矿体变厚,矿化类型以铜铁矿化和铜钼铅多金属矿化为主(图5)。

矿区共发现7个矿体,总体走向呈NW向,倾角

60~80°。矿体形态多为似层状和透镜状,长40~380 m,厚1.10~5.35 m,均产于岩体与围岩接触带的含矿砂卡岩中。围岩蚀变有大理岩化、砂卡岩化和绿泥石化,砂卡岩化与铁铜钼矿的形成有关。砂卡岩具明显分带性,由岩体向围岩方向依次出现透辉石钙铝榴石砂卡岩、钙铝榴石砂卡岩、矿化钙铝榴石砂卡岩和大理岩化带。其中含钼矿体主要产于靠近岩体的砂卡岩化带中,铜铁矿体多靠近围岩的砂卡岩化带中(图5)。

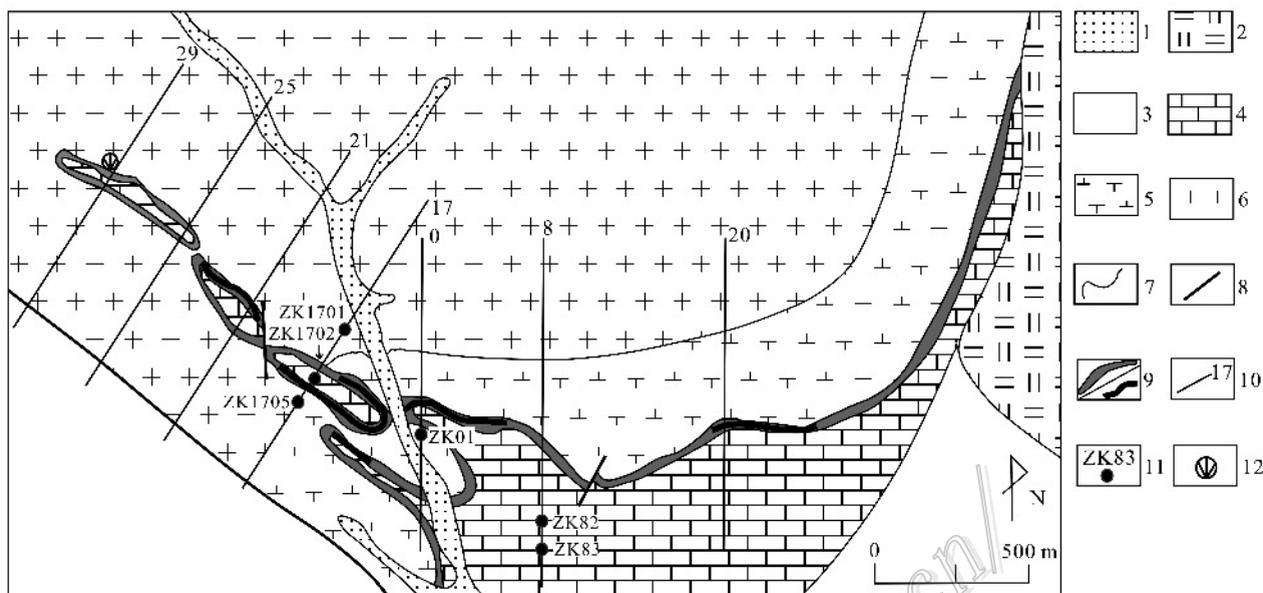


图2 哈勒尕提矿区地质简图(据曹景良,2005修改)

1—第四系冲积物; 2—下二叠统乌郎组; 3—上志留统博罗霍洛山组; 4—上奥陶统呼独克达板组; 5—角闪石黑云母花岗闪长岩; 6—黑云母二长花岗岩; 7—地质界线; 8—断层; 9—砂卡岩化带/矿体; 10—勘探线及编号; 11—钻孔及编号; 12—取样点

Fig. 2 Simplified geological map of the Halegati mining area (modified after Cao, 2005)

1—Quaternary alluvium; 2—Lower Permian Wulang Formation; 3—Upper Silurian Boluohuoluoshan Formation; 4—Upper Ordovician Hudukedaban Formation; 5—Hornblende biotite granodiorite; 6—Biotite adamellite; 7—Geological boundary; 8—Fault; 9—Skarnization zone/ore body; 10—Prospecting line and its number; 11—Drill hole and its serial number; 12—Sampling location



图3 15号勘探线黑云母二长花岗岩与角闪石黑云母花岗闪长岩接触界线

Fig. 3 Boundary of biotite adamellite and hornblende biotite granodiorite along No.15 exploration line

矿石以原生矿石为主,氧化矿不发育。原生矿石主要类型有含铜磁铁矿(图 4a)、含铜砂卡岩(图

4b)、含铜大理岩、含辉钼矿砂卡岩(图 4c、d)和块状黄铜矿-斑铜矿5种。矿石矿物主要有黄铜矿、斑铜矿、

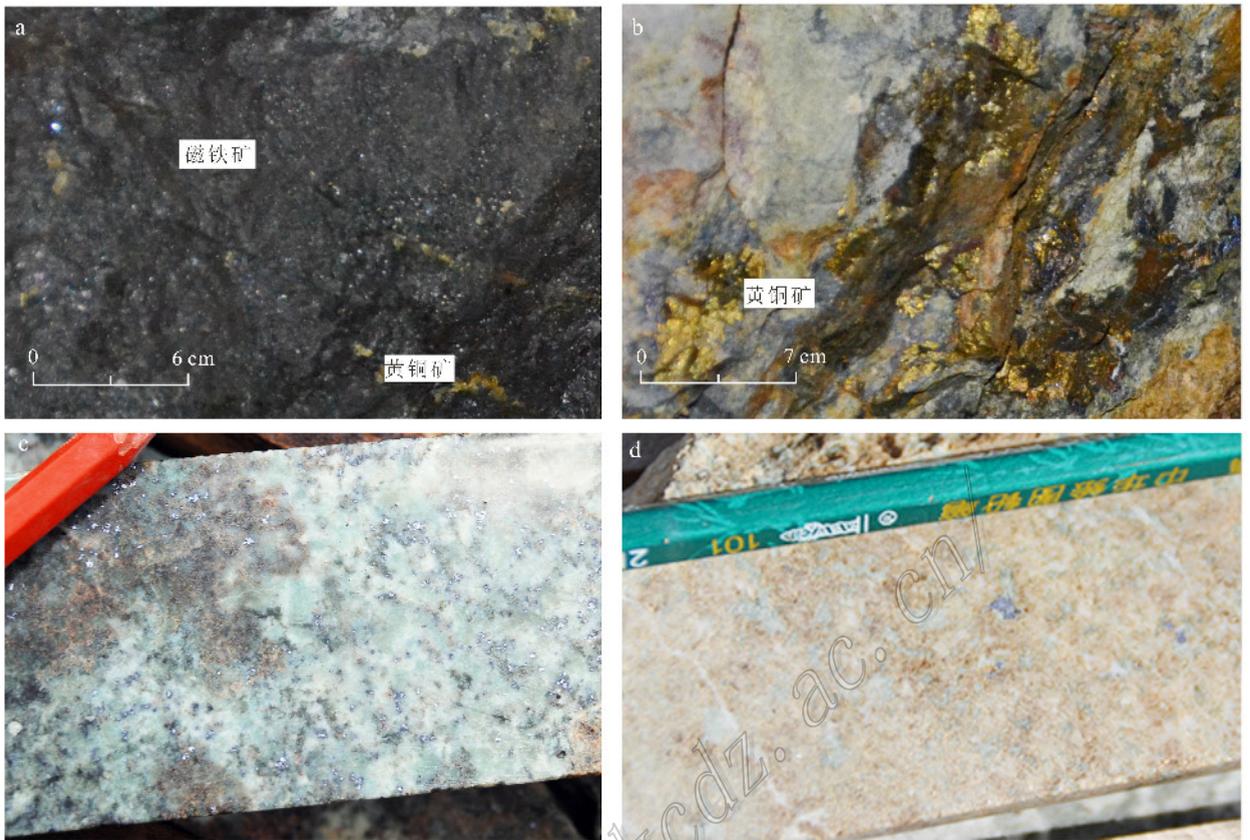


图4 哈勒奈提矿区主要矿石类型

a. 含铜磁铁矿(PD171); b. 含铜砂卡岩(PD171); c、d. 含辉钼矿砂卡岩(ZK01)

Fig. 4 the main ore types of Halegati mining area

a. Cupreous magnetite (PD171); b. Cupreous skarn(PD171); c-d. Molybdenum skarn (ZK01)

辉铜矿、磁铁矿、辉钼矿和少量的闪锌矿、方铅矿、金银矿、白钨矿等;次生矿物以孔雀石和褐铁矿为主。脉石矿物主要有透辉石、石榴子石、方解石、石英、黝帘石和少量的绿帘石、绿泥石、磷灰石、锆石、榍石。

根据矿物共生关系、结晶程度和穿插关系等特征,将成矿作用分为晚期砂卡岩阶段(形成均匀浸染状含铜砂卡岩矿石)和金属硫化物2个阶段,矿床为典型的晚期砂卡岩型铜铁多金属矿床(曹景良,2005)。

3 样品采集和分析方法

3.1 样品采集

本次锆石年代学研究对象为矿体下盘的角闪石黑云母二长花岗岩,因此在ZK2902钻孔中120 m处采集10~15 kg新鲜样品(HZ1),无风化、无矿化,同时采集薄片标本。角闪石黑云母二长花岗岩呈不均

粒花岗岩结构、交代结构,轻碎裂块状构造。主要由更长石、正长石、石英和少量黑云母、普通角闪石组成。更长石含量40%左右,粒度为 0.3×1.5 mm,半自形板状。正长石含量25%~30%,粒度为0.5~1.5 mm,他形不规则粒状,分布不均。石英含量25%左右,粒度为0.5~1.5 mm,他形粒状,均匀分布于长石间,基本无波状消光。黑云母含量为3%~5%,呈亮黄色-茶褐色多色性,原粒度0.5~1 mm,大部分已解体成细鳞片集合体,分布于长英质矿物间,部分被绿泥石+白钛石集合体取代。副矿物有磁铁矿、磷灰石和锆石等。

Re-Os同位素测试样品分别采自ZK01和ZK1705两个钻孔的含辉钼矿砂卡岩中,辉钼矿呈细脉状、浸染状、团块状产出。

3.2 分析方法和流程

用于锆石年代学测试的样品在河北省地勘局廊坊实验室内完成处理。样品破碎后,经淘洗、浮选和

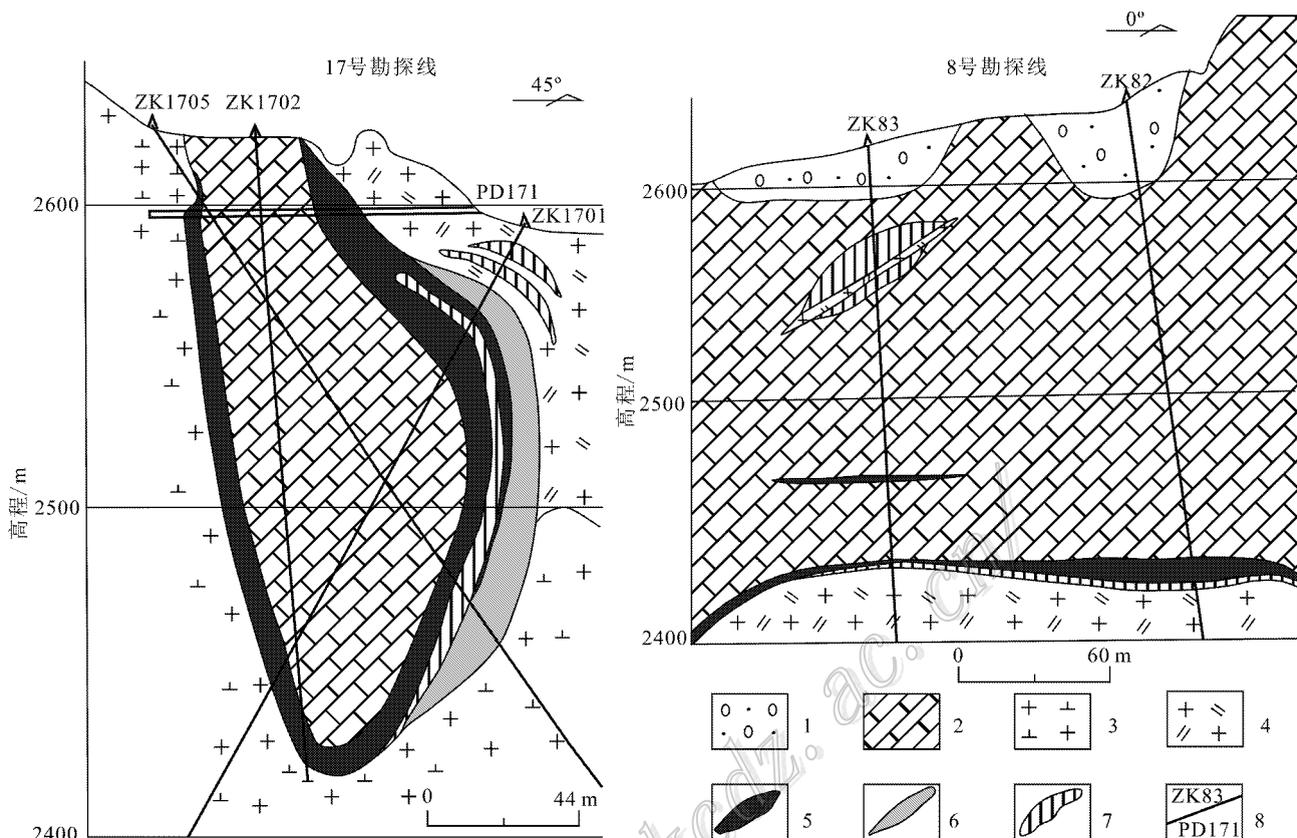


图 5 哈勒尔提矿区 17 号和 8 号勘探线剖面地质图

1—第四系冲积物；2—上奥陶统呼独克达坂组灰岩；3—角闪石黑云母花岗岩闪长岩；4—黑云母二长花岗岩；5—铜铁矿体；6—钼矿体；7—矽卡岩；8—钻孔/平硐

Fig. 5 Geological section along No. 17 and No. 8 exploration line of the Halegati mining area

1—Quaternary alluvium ; 2—Limestone of Upper Ordovician Hudukedaban Formation ; 3—Hornblende biotite granodiorite ; 4—Biotite adamellite ; 5—Cu-Fe ore body ; 6—Mo ore body ; 7—Skarn ; 8—Drill hole/Adit

电磁选富集锆石，再在双目镜下人工逐个精选单颗粒锆石。然后，把选好的锆石用环氧树脂固定于样品靶上，待树脂充分固化后将样品座从载玻片上剥离，并对其进行抛光至光洁的平面（不镀金），在大量的透射和反射显微镜观察的基础上，选择合适的样品进行阴极发光照相。锆石阴极发光研究在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针研究室完成。锆石的 U-Pb 年龄数据是在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的网络虚拟实验室，通过 SHRIMP 远程共享控制系统（SHRIMP Remote Operation System, SROS）操作位于澳大利亚 Curtin 理工大学（Curtin University of Technology）的 SHRIMP II 仪器而获得的。通过 Internet 公共网络，远程控制仪器，采用标准流程进行测试（Compston et al., 1992），应用 RSES 参考锆石 TEM（417 Ma）进行元素间的分馏校正，应用 SL13（年龄 572 Ma； $\mu(U)$

$=238 \times 10^{-6}$ ）标定样品的 U、Th 和 Pb 含量。数据处理采用 Ludwig SQUID 1.0 及 ISOPLT 程序自动完成。应用实测 ^{204}Pb 校正锆石中的普通铅，采用年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。

将野外采集的 6 件含辉钼矿的样品，破碎至 20 目，在双目镜下挑选纯度较高的辉钼矿单矿物，纯度达到 98% 以上。辉钼矿样品的 Re-Os 同位素的化学分离和等离子体质谱（ICP-MS）测试均在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成。分析方法详见有关文献（Shirey et al., 1995；Du et al., 2004；徐辉煌等，2009）。采用美国 TJA 公司生产的 TJA X-series ICP-MS 测定同位素比值。对于 Re 的测定，选择质量数 185、187，用 190 监测 Os。对于 Os 的测定，选择质量数为 186、187、188、189、190、192，用 185 监测 Re。最后，所获 Re-Os 同位素分析数据用 Isoplot 软件进行处理作等时线图（Ludwig 2003）。

Re-Os 模式年龄 t 按下式计算: $t = \frac{1}{\lambda(^{197}\text{Re})} (\ln(1 + \frac{^{197}\text{Os}}{^{197}\text{Re}}))$, 其中 $\frac{1}{\lambda(^{187}\text{Re})} = 1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$.

4 分析结果

4.1 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

采自哈勒尕提铜铁多金属矿区 ZK2902 钻孔中角闪石黑云母二长花岗岩(HZ1)的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析结果见表 1, 所分析的锆石为无色透明或浅黄色、结晶较好的晶体, 呈长柱状, 少数为等粒。阴极发光电子图像特征均显示出典型的岩浆结晶韵律环带结构(图 6)。样品锆石中的 Th/U 比值介于 0.53~0.61, 均大于 0.1, 清楚地指示它们为典型的岩浆成因锆石(Pidgeon, 1996)。样品中部分锆石颗粒的 CL 图像及锆石 U-Pb 同位素原位分析点见图 6。图 7 显示角闪石黑云母二长花岗岩样品中测定的 12 个点的分析结果在锆石 U-Pb 谐和图上几乎都落在谐和线附近, 而且分布相对集中。所有测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(367.3 \pm 2.2) \text{ Ma}$ (MSWD=1.05), 代表岩浆结晶年龄(图 7)。

4.2 Re-Os 同位素

哈勒尕提铜铁多金属矿床的 6 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素分析数据及其特征比值列于表 2。获得的模式年龄介于 $(368.7 \pm 5.2) \text{ Ma} \sim (384.6 \pm 5.4) \text{ Ma}$, 平均值为 $(372.6 \pm 5.4) \text{ Ma}$, 大多数样品的

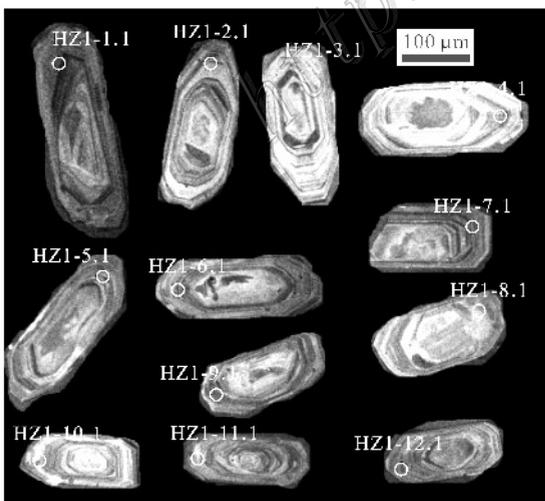


图 6 HZ1 锆石阴极发光图像特征

Fig. 6 CL images of HZ1 zircons

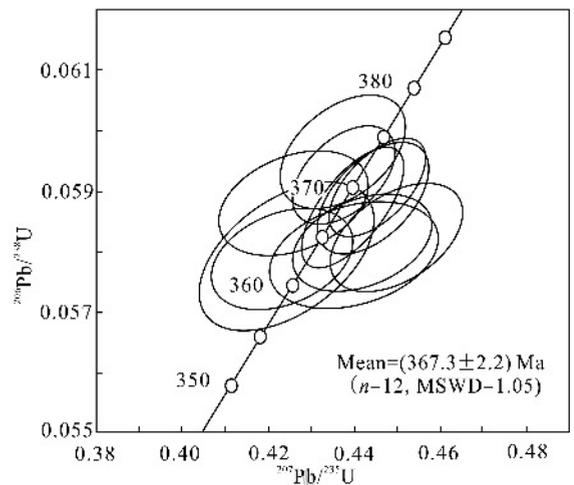


图 7 哈勒尕提岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谱和图

Fig. 7 Concordia diagram of SHRIMP U-Pb zircon dating results from Halegati granitic pluton

模式年龄在 370 Ma 左右, 仅 ZK-1705-1 样品的模式年龄较大, 比同一个钻孔的 ZK-1705-2 样品的模式年龄大 13 Ma, 很可能是由于辉钼矿中 Re-Os 同位素发生失耦现象造成的(李超等, 2009), 剔除 Re-Os 同位素模式年龄较大的 ZK-1705-1 样品后, 平均值为 $(370.2 \pm 5.4) \text{ Ma}$ 。

根据表 2 辉钼矿 Re-Os 同位素的测试结果, 采用 Isoplot 软件对分析数据进行处理做等时线图, 在等值线数据处理过程中剔除模式年龄值较大的 ZK-1705-1 样品, 获得 5 件辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄 $(371 \pm 12) \text{ Ma}$ (MSWD=0.26), 辉钼矿 Re-Os 模式年龄加权平均值为 $(370.1 \pm 2.4) \text{ Ma}$ (MSWD=0.13), 两者在误差范围内均指示成矿时代为晚泥盆世(图 8)。该等时线年龄能精确地代表哈勒尕提铜铁多金属矿床的成矿年龄, 即该矿床的成矿时代应为晚泥盆世, 这一结果与矽卡岩内接触带的角闪石黑云母二长花岗岩的形成时代基本一致。

5 讨论

5.1 成岩成矿时代

关于哈勒尕提铜铁多金属矿区内出露的岩体的年代学研究成果较少, 没有开展过较为精确的成岩年代学研究。1990 年新疆维吾尔自治区地质矿产局第一区调大队五分队开展 1:20 万阿拉尔幅(L-44-

表 1 哈勒尔提岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) 测试结果

Table 1 SHRIMP U-Pb isotopic analyses ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) for zircons from Halegati granitic pluton

测试点号	$\alpha(B) \times 10^{-6}$				Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	1 σ	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1 σ
	$^{206}\text{Pb}_c$	U	Th	^{206}Pb								
HZ1-1.1	0.14	636	338	32.2	0.55	368.0 ± 4.1	0.05426	1.4	0.4396	1.8	0.05875	1.1
HZ1-2.1	-	599	305	31.4	0.53	381.7 ± 3.3	0.05437	1.1	0.4574	1.4	0.06100	0.9
HZ1-3.1	0.33	499	258	25.5	0.53	371.4 ± 3.3	0.05351	1.5	0.4375	1.8	0.05930	0.9
HZ1-4.1	0.04	536	294	26.8	0.57	364.3 ± 3.2	0.05510	2.2	0.4420	2.4	0.05815	0.9
HZ1-5.1	0.17	267	158	13.3	0.61	363.1 ± 3.6	0.05510	2.8	0.4400	2.9	0.05795	1.0
HZ1-6.1	0.08	306	160	15.2	0.54	363.0 ± 5.2	0.05310	2.7	0.4240	3.1	0.05793	1.5
HZ1-7.1	0.10	453	244	23.0	0.56	369.1 ± 3.7	0.05469	1.7	0.4444	2.0	0.05893	1.0
HZ1-8.1	0.42	303	168	15.6	0.58	373.6 ± 3.7	0.05320	2.0	0.4374	2.2	0.05967	1.0
HZ1-9.1	-	442	263	22.4	0.61	370.0 ± 3.4	0.05469	1.3	0.4455	1.6	0.05907	1.0
HZ1-10.1	0.22	298	171	15.1	0.59	368.4 ± 3.7	0.05250	2.4	0.4260	2.6	0.05881	1.0
HZ1-11.1	0.29	344	197	17.1	0.59	362.7 ± 3.5	0.05310	2.4	0.4230	2.6	0.05787	1.0
HZ1-12.1	-	180	98	9.03	0.56	364.9 ± 3.8	0.05600	1.9	0.4500	2.2	0.05824	1.1

注：误差为 1 σ ； Pb_c 和 Pb^* 分别表示普通铅和放射性成因铅，普通铅用实测的 ^{204}Pb 校正；“-”表示未检出。

表 2 哈勒尔提铜铁多金属矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素数据

Table 2 Molybdenite Re-Os isotope data in the Halegati Cu-Fe polymetallic deposit

样品号	$\alpha(B) \times 10^{-6}$				$\alpha(B) \times 10^{-9}$				模式年龄/Ma	
	Re	2 σ	^{187}Re	2 σ	Os	2 σ	^{187}Os	2 σ	测定值	2 σ
ZK-01	10.52	0.08	6.613	0.053	0.0329	0.0569	40.74	0.34	368.7	5.2
ZK-01-1	10.77	0.09	6.772	0.058	0.4988	0.0632	41.89	0.35	370.1	5.3
ZK-01-2	17.02	0.16	10.690	0.100	0.0515	0.0397	66.15	0.56	370.1	5.5
ZK-01-3	12.55	0.10	7.886	0.064	0.0096	0.0216	48.83	0.41	370.5	5.3
ZK-1705-1	8.40	0.06	5.282	0.040	0.0599	0.0228	33.96	0.30	384.6	5.4
ZK-1705-2	10.78	0.10	6.776	0.060	0.0100	0.0337	42.05	0.37	371.4	5.5

注： Re 、 Os 质量分数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%。

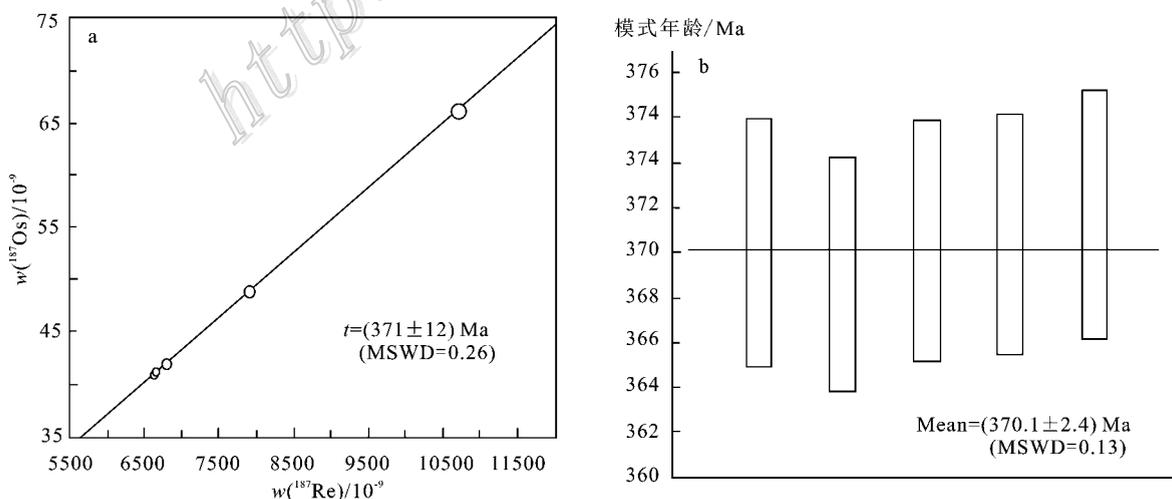


图 8 哈勒尔提铜铁多金属矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (a) 和模式年龄加权平均值 (b) (除样品 ZK-1705-1)

Fig. 8 Re-Os isochron age (a) and weighted average of model ages of molybdenite (b) in the Aimujin Mo-Au polymetallic deposit (except for ZK-1705-1 sample)

XXVI)地质填图工作,将该岩体侵入时代定为石炭纪。陈哲夫等(1997)根据矿区西北侧的呼斯特岩体锆石的 U-Pb 年龄 415 Ma,认为其形成时间可能为加里东期。2005 年新疆地矿局第七地质大队实施《新疆尼勒克县博罗科努山一带 1:5 万区域地质矿产调查》项目,在区域上自西向东圈定尼勒克河、艾木斯呆依、当本第二个达坂(哈勒尕提)等 3 个泥盆纪岩体,但都没有准确的同位素年龄,认为尼勒克河岩体是呼斯特岩体的东延部分,仅根据前人的研究成果定为早泥盆世。本次选用哈勒尕提铜铁多金属矿区的角闪石黑云母二长花岗岩体样品进行锆石 SHRIMP U-Pb 法定年,结果显示成岩年龄为(367.3 ± 2.2) Ma (MSWD=1.05),该年龄代表了角闪石黑云母二长花岗岩体的形成时代,说明岩体形成于晚泥盆世。同时,本次获得的年龄数据误差较小,可信度较高。本文采用辉钼矿 Re-Os 法定年,获得模式年龄加权平均值为(370.1 ± 2.4) Ma (MSWD=0.13),指示成矿时代为晚泥盆世。考虑到辉钼矿 Re-Os 体系对后期热液作用的抵抗能力和对古老事件的记忆性(Suzuki et al., 1996),将模式年龄较小的单样品(ZK-01)辉钼矿 Re-Os 年龄(368.7 ± 5.2) Ma 作为成矿年龄。该年龄略晚于矿区中砂卡岩化内接触带的角闪石黑云母二长花岗岩体的锆石年龄,显示角闪石黑云母二长花岗岩与砂卡岩型钼矿化属于同一构造岩浆作用的产物。

5.2 成矿物质来源

Re-Os 同位素体系是硫化物矿床形成的强有力的示踪剂和成矿过程中地壳物质混入程度的高度灵敏的指示剂(Foster, 1960)。在成矿过程中混入地壳物质越多,则产生的放射性¹⁸⁷Os 含量就越多,相应的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始值也越大。在图 8 中可以看出,所测得的 5 件辉钼矿样品数据均排列在一条直线上,

相关系数大于 0.995。该直线对应的等时线年龄值为(371 ± 12) Ma (MSWD=0.26),等时线¹⁸⁷Os 初始比值较低,说明辉钼矿中¹⁸⁷Os 主要是¹⁸⁷Re 的衰变产物,可能存在极少量普通 Re,表明该矿床成矿物质来源以深部为主。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,在不同类型钼矿床中辉钼矿的 Re 含量呈规律性变化,从地幔到壳幔混源再到地壳,辉钼矿中的 Re 含量呈 10 倍下降,从幔源、I 型到 S 型花岗岩有关的矿床, $\alpha(\text{Re})$ 从 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ 规律性递减(Mao et al., 1999),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。哈勒尕提铜铁多金属矿床 6 件辉钼矿的 $\alpha(\text{Re})$ 介于 $8.40 \times 10^{-6} \sim 17.02 \times 10^{-6}$,平均值为 11.67×10^{-6} ,与区域内莱利斯高尔、肯登高尔铜钼矿床中辉钼矿的 $\alpha(\text{Re})$ 接近(表 3),显示壳幔混源岩浆矿床的特征。笔者对角闪石黑云母二长花岗岩的岩石化学成分进行了分析研究,得出岩体属钙碱性系列,具准铝质-弱铝质的“I”型花岗岩特征, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于 -3.0 ~ -2.6,显示以地壳物质为主,混有部分幔源物质。上述特征表明哈勒尕提铜铁多金属矿床的成矿物质可能来自下地壳,但混有少量地幔组分,这一结果与王新利(未发表资料)测得的矿石硫、铅同位素的指示物源结果相同。

5.3 地质意义

研究区地处伊犁地块北缘,夹持于准噶尔板块和伊犁板块之间,经历了复杂的造山演化过程。在晚古生代完成了大洋向大陆的转换,古生代洋盆在晚泥盆世—早石炭世最终闭合(Xia et al., 2006),随后进入大规模石炭纪—二叠纪裂谷拉伸事件(Xia et al., 2006; 徐学义等, 2005),强烈的构造岩浆活动,发生大规模的成矿作用(李华芹等, 2010; 李文渊,

表 3 区域内典型矿床成岩成矿时代

Table 3 Rock-forming and ore-forming ages of typical deposits in Wutujin-Kendenggaer region

矿床名称	矿床类型	成矿时代/Ma	测试方法	$\alpha(\text{Re})$ 平均值/ 10^{-6}	资料来源
莱利斯高尔	斑岩型	354 ± 0.65	SHRIMP U-Pb	18.458	张东阳等, 2009a 李华芹等, 2006 李华芹等, 2006 李华芹等, 2006
		359.2 ± 7.8	Re-Os 同位素		
		350 ± 15	Rb-Sr 同位素		
		362 ± 12	SHRIMP U-Pb		
3571 铜矿	斑岩型	346 ± 1.2	SHRIMP U-Pb		张东阳等, 2009a
肯登高尔	砂卡岩型	313 ± 4	SHRIMP U-Pb	40.83	陈波, 2011 陈波, 2011
		313.9 ± 2.5	Re-Os 同位素		
哈勒尕提	砂卡岩型	367.3 ± 2.2	SHRIMP U-Pb	11.67	本文 本文
		368.7 ± 5.2	Re-Os 同位素		

2006)在研究区形成了晚泥盆世—早石炭世和晚石炭世2个时期的多金属矿床,在空间、时间分布与海西期构造岩浆作用关系密切的矿床(表3)。本次获得哈勒尕提矿区与矽卡岩化关系密切的角闪石黑云母二长花岗岩的成岩时代为 (367.3 ± 2.2) Ma, 辉钼矿的 Re-Os 年龄为 (368.7 ± 5.2) Ma。李华芹等(2006)获得研究区西4 km处莱利斯高尔矿区斑岩体的锆石 U-Pb 年龄和全岩 Rb-Sr 年龄分别为 (362 ± 12) Ma 和 (350 ± 15) Ma。张东阳等(2009a)获得西邻区莱利斯高尔和3571矿区斑岩体的锆石 U-Pb 年龄分别为 (354 ± 0.65) Ma 和 (346 ± 1.2) Ma, 将岩体的形成时代确定为早石炭世,并根据岩石地球化学、Sr-Nd 同位素地球化学特征认为岩浆源区主要来源于地壳,并有少量地幔物质的混入。莱利斯高尔铜钼矿床、肯登高尔铜钼矿床和艾姆劲钼金矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄分别为 (359.2 ± 7.8) Ma、 (313.9 ± 2.5) Ma 和 (302.4 ± 2.4) Ma(待发表),与赋矿岩体的锆石 U-Pb 年龄基本一致(表3),进一步制约了哈勒尕提铜多金属矿床的形成时代。晚泥盆世—石炭纪剧烈的构造-岩浆作用,在区域内形成了以 Cu-Mo、Fe-Cu、Pb-Zn 等与岩浆活动关系密切的多金属矿床。其中区域上分布的晚泥盆世岩体控制着可可萨拉、艾木斯呆依、哈勒尕提等矽卡岩型 Cu-Fe 多金属矿床的分布,石炭纪岩体控制了莱利斯高尔、肯登高尔、艾姆劲等 Cu-Mo-Au 多金属矿床,它们共同构成博罗霍洛地区的矽卡岩-斑岩-热液脉型铜铁钼铅锌多金属矿床系列组合,是晚古生代博罗科努铜、铁、钼、铅锌成矿带的重要组成部分。

6 结论

(1)通过对角闪石黑云母二长花岗岩中单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定,确定哈勒尕提岩体形成于 (367.3 ± 2.2) Ma,对哈勒尕提铜铁多金属矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素测定,获得了该矿床的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (371 ± 12) Ma。以上数据表明哈勒尕提铜铁多金属矿床成岩成矿时代基本一致,形成于晚泥盆世。

(2)哈勒尕提铜铁多金属矿与角闪石黑云母二长花岗岩关系密切,其成矿物质主要来源于下地壳,并混有少量地幔组分。

(3)哈勒尕提铜铁多金属矿的铜铁钼矿体产于中深成侵入岩与碳酸盐岩的接触带中,接触带上矽

卡岩发育,并受侵入于上奥陶统呼独克达坂组的角闪石黑云母二长花岗岩和黑云母花岗闪长岩的控制。

志 谢 感谢 Curtin 理工大学实验室在装载样品,仪器调试和仪器监控方面提供的帮助,北京离子探针中心在远程实验协助和数据处理方面提供的帮助。Re-Os 同位素数据测试中得到国家地质实验测试中心屈文俊、杜安道、李超等人的大力支持,作者在此深表感谢!

参考文献/References

- 曹景良. 2005. 新疆尼勒克县哈勒尕提铜铁矿地质特征及找矿前景[J]. 地质找矿论丛(增刊),20:120-124.
- 陈波. 2011. 新疆西天山莱利斯高尔-肯登高尔铜钼铅锌矿床成矿作用研究[博士论文][D]. 长安大学, 1-91.
- 陈哲夫,成守德,梁云海. 1997. 新疆开合构造与成矿[M]. 乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社, 121-156.
- 程松林,冯京,涂其军,薛春纪,王晓刚,张兵,万闾. 2009. 新疆莱利斯高尔铜钼矿地质特征及找矿前景[J]. 新疆地质, 27(3):236-240.
- 冯京,薛春纪,吴淦国. 2010. 西天山莱利斯高尔-达巴特一带与斑岩相关的铜钼金矿产预测[M]. 北京:地质出版社, 1-317.
- 李超,屈文俊,杜安道. 2009. 大颗粒辉钼矿 Re-Os 同位素失耦现象及 ^{187}Os 迁移模式研究[J]. 矿床地质, 28(5):707-712.
- 李华芹,王登红,万闾,屈文俊,张兵,路远发,梅玉萍,邹少利. 2006. 新疆莱利斯高尔铜钼矿的同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 22(10):2437-2443.
- 李华芹,陈富文. 2010. 中国新疆区域成矿作用年代学[M]. 北京:地质出版社, 1-391.
- 李文渊. 2006. 西北地区矿产资源找矿潜力[M]. 北京:地质出版社, 1-438.
- 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.
- 徐辉煌,熊峥嵘,伍式崇. 2009. 湘东龙王排钼多金属矿地质特征及辉钼矿铼-钨同位素定年[J]. 岩矿测试, 28(3):244-248.
- 徐学义,马中平,夏祖春,夏林圻,李向民,王立社. 2005. 天山石炭-二叠纪后碰撞花岗岩的 Nd、Sr、Pb 同位素源区示踪[J]. 西北地质, 38(2):1-18.
- 张东阳,张招崇,艾羽,苏慧敏. 2009a. 西天山莱利斯高尔-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.
- 张东阳,张招崇,艾羽,苏慧敏. 2009b. 西天山莱利斯高尔一带铜

(钼)矿成矿斑岩体矿物学特征及其成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(1):3-16.

- Compston W, Williams L S and Kirschvink J L. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. Journal of the Geological Society of India, 149:171-184.
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, Qu W J, Richard M H S, John M and Dmitry M. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J], Geo-standard and Geoanalytical Research, 28(1):41-52.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral mica[J]. Geological Survey Professional Paper, 354-B:11-49.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A Geochronology toolkit for Microsoft Excel[M]. Special Publication. Berkeley Geochronological Center, Berkeley. 74 p.
- Mao J W, Zhang Z C and Zhang Z H. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in the Northern

Qilian Mountains and its geological significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(11-12):1815-1818.

- Pidgeon R T. 1996. Zircons: What we need to know[J]. Journal of the Royal Society of Western Australia, 79(1):119-122.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis[J]. Analytical Chemistry, 67: 2136-2141.
- Suzuki K, Shimizu H and Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenum and the cooling history of molybdenum ore deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(16):3151-3159.
- Xia L Q, Li X G, Xia Z C, Xu X Y, Ma Z P and Wang L S. 2006. Carboniferous-Permian rift-related volcanism and mantle plume in the Tianshan, northwestern China[J]. Northwestern Geology, 39(1):1-49.

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