新疆西天山莱历斯高尔-3571 斑岩铜钼矿田地质地球化学和成矿年代

薛春纪[1], 陈 波[2], 贾志业[1], 张 兵[3], 万 阈[3]

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室; 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083
2. 长安大学 地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054
3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局 第七地质大队, 新疆 乌苏 833000

Xue Chunji[1], Chen Bo[2], Jia Zhiye[1], Zhang Bing[3], Wan Yu[3]

1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources; School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*
2. *Faculty of Earth Sciences and Land and Resources, Chang'an University, Xi'an* 710054, *China*
3. *No. 7 Geological Party, Xinjiang Uighur Bureau of Geology and Mineral Resources, Wusu* 833000, *China*

Xue Chunji, Chen Bo, Jia Zhiye, et al. Geology, geochemistry and chronology of Lailisigao'er-3571 porphyry Cu-Mo ore-field, western Tianshan, Xinjiang. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(1): 149-165

Abstract: It faces much difficulty to find the porphyry copper deposit in western Tianshan, Xinjiang, and it is essential to research on the Cu-Mo mineralization. The 3571 Cu deposit was recently found next to the Lailisigao'er Mo deposit, and they constitute the Lailisigao'er-3571 Cu-Mo ore-field. It is suggested that the Cu-Mo ore-field occurred in the Early Carboniferous continental margin arc which was formed by the Junggar oceanic crust subduction under the Kazakhstan-Yili Plate. The Siluric silt-mud hornstones were intruded by several small granodiorite porphyry bodies in the ore-field, and Cu-Mo mineralization may have happened during the structure movement, magma activity and hydrothermal processes on the continental margin arc setting. The Cu-Mo sulfide ore-body in shape of veins, tabular and lens occurred in the top or edge parts of the granodiorite porphyry, contact belts and the wall-rock nearby. The hydrothermal alterations changed from K-silication to sericitization, and then propylitization, and the mineralization shows the change in the structure of ores from dissemination to vein-dissemination, and then veins. The major ore minerals include molybdenite, chalcopyrite, pyrrhotine, bornite, and pyrite. The mineralization is characterized by a porphyry Cu-Mo type. The granodiorite porphyry is rich in Si, Al, K, Na, Rb, Ba, Th, and poor in Mg, Ta, Hf, Zr, Sm, Sr, Y, and Yb, and the trace element character is similar to that of continental margin granites. The average ΣREE of the porphyry is 133.84×10^{-6} and lower than that of S-type granites. I_{Sr} is from 0.7079 to 0.7103, $\varepsilon_{Nd}(t)$ is from -0.61 to -3.71, and the magma was from the mantle-crust mixing or the lower crust. The ore $\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$ is from 2.7‰ to 4.3‰, $^{206}Pb/^{204}Pb$ from 18.0997 to 18.2588, $^{207}Pb/^{204}Pb$ from 15.6052 to 15 6242, $^{208}Pb/^{204}Pb$ from 38.1245 to 38.3078, and the metal was from the upper mantle and lower crust directely related to the continental margin arc magma. The $\delta^{18}O_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$ of the late stage ore-forming fluid is

收稿日期: 2010-06-21; 修回日期: 2010-11-10
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAB07B01-02); 高等学校学科创新引智计划(B07011); 长江学者和创新团队计划(IRT0755)
作者简介: 薛春纪(1962—), 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。E-mail: chunji.xue@cugb.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

from -1.33‰ to 5.46‰, $\delta D_{H_2O\text{-}SMOW}$ from -81‰ to -101‰, and the water in the ore-forming fluid is mainly the magma water with meteoric water mixed. The porphyry was dated as 346±1.2 Ma in the Lailisigao'er Mo ore-district and 350±0.65 Ma in the 3571 Cu ore-district by LA-ICP-MS U-Pb method. The Cu-Mo mineralization occurred in the Early Carboniferous Period. The Lailisigao'er-3571 Cu-Mo ore-field should have been in the same metallogenic series with the Axi Au ore-field, and this is very important for the exploration in western Tianshan, Xinjiang.

Key words: porphyry Cu-Mo ore deposit; magma; ore geology; S-, Pb-, O- and H-isotopes; U-Pb dating; Lailisigao'er-3571; western Tianshan

摘 要:新疆西天山斑岩型矿床面临找矿攻坚,重要铜钼矿化研究十分必要。近年在毗邻莱历斯高尔钼矿新发现3571铜矿,构成重要铜钼矿田。研究认为,莱历斯高尔-3571铜钼矿田形成于准噶尔洋壳向南俯冲在哈萨克斯坦—伊犁板块东北缘形成的早石炭世陆缘弧环境中。矿田内强烈角岩化的志留系粉砂泥岩中侵入了花岗闪长斑岩小岩体群,伴随陆缘弧构造-岩浆-热液过程发生了铜钼矿化。铜钼硫化物矿体呈脉状、板状和透镜状产在花岗闪长斑岩体顶部或边部、接触带和附近围岩中。从岩体到围岩,热液蚀变具有从钾硅酸盐化到绢云母化、再到青磐岩化的分带性,铜钼硫化物矿化显示从浸染状、细脉浸染状、细脉网脉状等矿石构造变化。矿石中金属矿物主要为辉钼矿、黄铜矿、磁黄铁矿、斑铜矿、黄铁矿等,斑岩型铜钼矿化特征明显。花岗闪长斑岩高硅、低镁、富铝、富碱、高钾,Rb、Ba、Th等大离子元素富集和Ta、Hf、Zr、Sm、Sr、Y、Yb等高场强元素亏损,微量元素洋中脊花岗岩标准化分布曲线与陆缘弧花岗岩分布型式相似;岩体的平均ΣREE为133.84×10^{-6},I_{Sr}为0.707 9~0.710 3,$\varepsilon_{Nd}(t)$为-0.61~-3.71,明显低于地壳重熔S型花岗岩,初始岩浆属壳幔混源或下地壳源。铜钼硫化物矿石$\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$=2.7‰~4.3‰,$^{206}Pb/^{204}Pb$=18.099 7~18.258 8,$^{207}Pb/^{204}Pb$=15.605 2~15.624 2,$^{208}Pb/^{204}Pb$=38.124 5~38.307 8,成矿金属元素来自上地幔和下地壳,与陆缘弧岩浆直接有关;成矿晚阶段流体$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$=-1.33‰~5.46‰,$\delta D_{H_2O\text{-}SMOW}$=-81‰~-101‰,属岩浆水混合了大气降水。LA-ICP-MS U-Pb法测得莱历斯高尔钼矿化花岗闪长斑岩形成于(346±1.2) Ma,3571铜矿化花岗闪长斑岩形成于(350±0.65) Ma,成岩成矿时代为早石炭世。新疆西天山莱历斯高尔-3571斑岩型铜钼矿与阿希浅成低温热液型金矿同属西天山海西期陆缘弧构造-岩浆-热液铜钼金成矿系列,具有实际找矿指导意义。

关键词:斑岩型Cu-Mo矿;岩浆;矿床地质;S、Pb、O、H同位素;U-Pb测年;莱历斯高尔-3571;新疆西天山
中图分类号:P618.41;P618.65;P597 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2011)01-0149-17

新疆北部首个斑岩铜矿于20世纪50年代在准噶尔东北缘卡拉先格尔被发现,随后莱历斯高尔和群吉等斑岩钼矿被发现[1-2]。1997年新疆地矿局在东天山发现土屋大型斑岩铜(钼)矿[3],同期南蒙古发现并勘探了Oyu Tolgoi超大型斑岩铜金矿[4]。近年来,在东准噶尔和西准噶尔取得了斑岩铜矿重要找矿新突破[5-8],但新疆西天山斑岩铜(钼)找矿目前面临攻坚,重要斑岩铜钼矿化的地质地球化学和成矿年代学研究十分必要。

新疆西天山莱历斯高尔钼矿产于西天山博罗霍洛构造-岩浆成矿带内奈楞格勒达坂地区,北距精河县城约58 km,1954年由新疆地质调查所进行区域地质调查和地表检查时发现。莱历斯高尔地区原生地球化学异常显示出斑岩型铜钼成矿重要远景[9],区域成矿学研究多将莱历斯高尔作为重要铜钼矿化集中区[10-14],同位素年代学研究表明成岩成矿作用时代为晚泥盆世—晚石炭世[15-17]。2005年新疆地矿局在紧邻莱历斯高尔钼矿西侧(1 km左右)进行化探异常查证时新发现3571铜矿①。莱历斯高尔-3571成为西天山重要铜钼矿田,但地处高寒山区,工作条件差,研究程度低。本文对矿田铜钼矿化地质特征、矿区岩浆岩岩石学和地球化学、矿石中矿石矿物和脉石矿物的S、Pb、O、H同位素组成、矿化岩体中单颗粒锆石的LA-ICP-MS U-Pb年龄等进行了研究,旨在为西天山斑岩相关铜钼金矿的找矿突破研究积累资料。

1 区域地质环境

莱历斯高尔-3571铜钼矿田产于哈萨克斯坦—伊犁古生代板块东北缘博罗霍洛古生代岛弧带中北

① 新疆地矿局第七地质大队. 新疆精河县莱历斯高尔一带铜钼矿及外围金多金属矿普查报告. 新疆乌苏, 2008: 1-229.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

部[13-14]。博罗霍洛古生代岛弧带北以博罗霍洛北坡断裂与赛里木地块为邻, 东北侧为依连哈比尔尕残留海盆地, 南侧是伊犁微板块及阿吾拉勒晚古生代裂谷系(图 1A)。莱历斯高尔-3571 铜钼矿田处在北侧元古代基底隆起带与南侧古生代岛弧带间的过渡位置, 在区域地球物理中表现为明显的航磁负异常(ΔT = －150~－300 nT), 布格重力异常值低(－230~－240 mGal), 地壳厚度相对较大①。

矿田区域基底为中元古界, 盖层从上到下依次为二叠系下统乌朗组(P_1w)陆相酸性玻屑或晶屑凝灰岩、岩屑长石砂岩及底砾岩等组成的磨拉石建造; 石炭系上统科古琴山组(C_2kg)海相泥质粉砂岩、钙质粉砂岩及长石岩屑砂岩夹流纹岩; 石炭系上统东图津河组(C_2dt)海相粉砂岩、砂岩、英安岩、流纹岩、灰岩、黑色页岩; 石炭系下统阿克沙克组(C_1a)海相长石砂岩、岩屑砂岩、粉砂岩、生物碎屑灰岩; 石炭系下统大哈拉军山组(C_1d)海相砂岩、泥质粉砂岩夹灰岩、安山岩、流纹岩和火山碎屑岩; 泥盆系中统汗吉尕组(D_2hj)海相泥质粉砂岩、岩屑砂岩、粉砂质泥岩、砂砾岩夹海相玄武岩; 泥盆系中统头苏泉组(D_2ts)海相安山岩、英安岩、玄武安山岩及其火山碎屑岩和凝灰岩; 志留系上统博罗霍洛山组(S_3b)海相粉砂岩和岩屑砂岩夹粉砂泥岩、泥灰岩, 含腕足和珊瑚; 志留系上统库茹尔组(S_3k)海相粉砂岩和泥质粉砂岩夹沉凝灰岩及生物灰岩, 上与 S_3b 整合接触; 志留系中统基夫克组(S_2j)海相灰岩夹少量钙质粉砂岩及沉凝灰岩, 含珊瑚化石; 志留系下统尼勒克河组(S_1n)海相绢云母钙质粉砂岩、泥质粉砂岩及碳酸盐岩; 奥陶系上统呼独克达坂组(O_3h)海相灰岩和白云质灰岩, 局部夹岩屑长石砂岩; 奥陶系中统奈楞格勒群(O_2nl)海相粉砂岩、结晶灰岩夹玄武岩, 上与 O_3h 微角度不整合; 震旦—寒武系冰碛砾岩、泥质粉砂岩、硅质砂质泥岩和含磷粉砂岩、硅质岩、石灰岩(图 1B)。莱历斯高尔-3571 铜钼矿田内主要出露博罗霍洛山组。

区域出露海西早—中期(D—C)侵入体(图 1B)。泥盆纪侵入体多分布在中偏西部, 包括花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩、钾长花岗岩等, 其中花岗岩呈岩基状沿博罗霍洛北坡断裂带侵入于奥陶系上统呼独克达坂组(O_3h), 被石炭系上统东图津河组(C_2dt)不整合覆盖; 花岗闪长岩和石英闪长岩多呈岩枝、岩脉等小岩体侵入于志留系上统博罗霍洛山组(S_3b)和奥陶系上统呼独克达坂组(O_3h), 钾长花岗岩被泥盆系中统头苏泉组(D_2ts)和新生界不整合覆盖, 尤其分布在区域中部的 8 个滴状花岗闪长岩小岩体构成莱历斯高尔-3571 小岩体群, 单个岩体均小于 1 km^2。它们与莱历斯高尔-3571 铜钼矿田的形成关系密切, 全岩 U-Pb 法和 Rb-Sr 法分别测得(362±12) Ma 和(350±15) Ma 的同位素年龄[17]。石炭纪侵入体多分布在中偏东部(图 1B), 包括花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩等, 主要呈岩基状, 全岩 Rb-Sr 法年龄为(311±37) Ma[15], SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(308±5.4) Ma[16]。这些海西期侵入岩浆起源于下地壳, 具有 I 型花岗岩类的性质[15-16]。

矿田区域断裂发育, 主体构造为北西走向。大型断裂构造主要是博罗霍洛北坡断裂(图 1B), 呈波状北西西走向通过区域中部, 是博罗霍洛成矿带与其北侧赛里木地块的分界, 控制了浅成斑岩体和铜钼矿化带的分布, 其南侧次级北西西走向断裂发育, 导致古生界呈断块状构造。区域岩石建造记录博罗霍洛成矿带地质构造大致经历了元古宙克拉通结晶基底形成、震旦—寒武纪克拉通陆表海稳定盖层沉积、奥陶—志留纪次稳定型陆缘类复理石沉积和古克拉通解体开始并伴随火山活动、泥盆—石炭纪拉张与聚合交替、以下古生界为基础发育上叠碎屑岩-火山岩盆地和较大规模的岩浆侵入、二叠纪造山成陆伴随出现火山磨拉石建造和中—新生代不断隆升并伴有山间盆地沉积。

矿田区域 1∶5 万土壤地球化学测量显示明显 Cu、Mo、Au 异常。古生代构造-岩浆-热液过程是莱历斯高尔-3571 铜钼矿田形成的重要地质环境, 区域内还发现七兴铅锌多金属矿、哈拉尕提铜铁矿、胡苏木萨拉金银矿以及其他一些铅锌矿、铁铜矿等; 在赛里木地块产有肯登高尔铜钼矿等(图 1B)。

2　矿田地质和铜钼矿化特征

矿田内有较大面积第四纪冰水堆积物覆盖, 出露地层为志留系上统博罗霍洛山组海相细碎屑岩, 从下向上可划分为两个岩性段。第一段(S_3b^1)为灰黑色泥岩夹粉砂岩和岩屑砂岩, 分布在矿田中东部; 第二段(S_3b^2)为紫红色夹灰绿色、灰黑色泥岩, 分布

① 新疆地矿局第七地质大队. 新疆精河县莱历斯高尔一带铜钼矿及外围金多金属矿普查报告. 新疆乌苏, 2008: 1-229.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

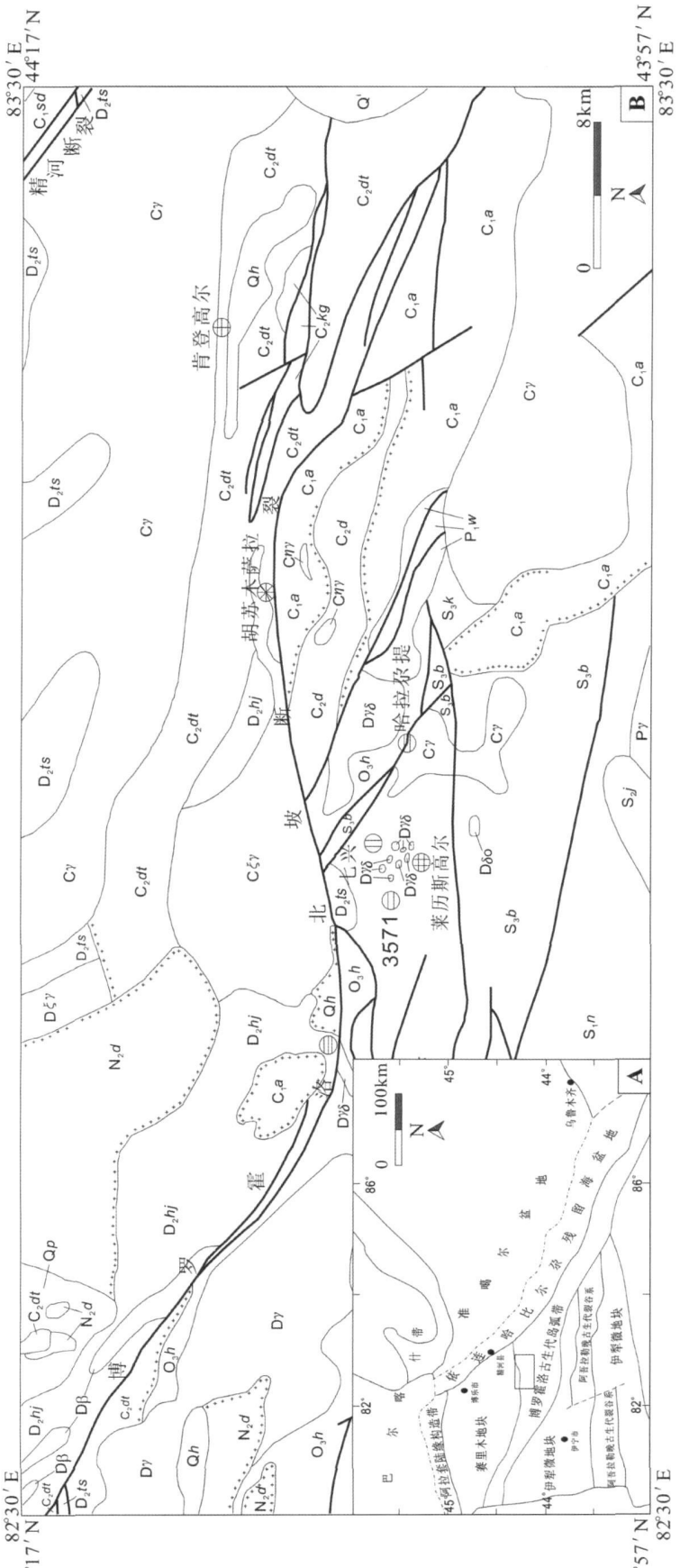


图1 西天山区域构造单元简图(A)和莱历斯高尔-3571铜钼矿田区域地质图(B)
(据文献[13-14]修编)

Fig. 1 A regional tectonic units of west Tianshan (A) and the regional geological map of Lailisigao'er-3571 Cu-Mo ore-field (B)

Q'—雪被区;Qh—第四系复合成因堆积物;Qp—第四系冲洪积物;N_2d—新近系独山子组;$E_{2-3}a$—古近系安集海组;P_1w—二叠系下统乌朗组;C_2kg—石炭系上统科古琴山组;C_2dt—石炭系上统东图津河组;C_1a—石炭系下统阿克沙克组;C_1d—石炭系下统大哈拉军山组;D_2hj—泥盆系中统汗吉尕组;D_2ts—泥盆系上统博罗霍洛山组;S_3k—志留系上统库茹尔组;S_2j—志留系中统基夫克组;S_1n—志留系下统尼勒克河组;O_3h—奥陶系上统呼独克达坂组;O_2nl—奥陶系中统奈楞格勒群;Pγ—二叠纪花岗岩;Cηγ—石炭纪二长花岗岩;Cγ—石炭纪花岗岩;Cξγ—石炭纪钾长花岗岩;Dβ—泥盆纪玄武岩;Dδo—泥盆纪石英闪长岩;Dγδ—泥盆纪花岗闪长岩;Dγ—泥盆纪花岗岩;Dξγ—泥盆纪钾长花岗岩;1—地质界线;2—不整合界线;3—断层;4—铜钼矿;5—金银矿;6—铜矿;7—铅锌多金属矿;8—钼矿;9—铅锌矿;10—铜铁矿;11—研究区。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在矿田西部(图 2)。地层走向 NW, 倾向 SW, 在矿田内构成单斜岩层。受岩浆活动影响, 矿田内博罗霍洛山组普遍发生角岩化和青磐岩化为主的杂色蚀变。

矿田中部和东南部出露 4 个花岗闪长斑岩岩枝和小岩株, 侵入于博罗霍洛山组第一段(S_3b^1)(图 2)。它们长约 68~ 1 340 m, 宽约 30~ 720 m, 延深一般大于 200 m, 产状多向北陡倾, 与围岩界线清晰, 接触带不规则。在其顶边部、接触带及附近角岩化粉砂泥质围岩中发生了明显铜钼矿化。矿田内还见石英闪长玢岩, 呈 NW 走向或近 SW 走向脉状产出, 长 230~ 460 m, 宽 2~ 17 m, 未见相关铜钼矿化现象。

矿田断裂构造发育, 主体 NW 走向, 与花岗闪长斑岩、角岩化带、矿化蚀变带等整体走向一致, 反映对后者具有明显的控制作用(图 2)。矿田内隐约可见近 SN 向线性构造, 与石英闪长玢岩脉的走向大体一致。

莱历斯高尔钼矿区共圈定钼矿体 39 个、钼矿化体 34 个。矿体呈脉状、透镜状平行岩体与围岩接触带产在花岗闪长斑岩体边部(顶部)、接触带及其附近角岩中(图 2、3), 长 27~ 204 m, 厚 1~ 32 m, 最厚可达 72 m, 钼品位多在 0.06% ~ 0.19%, 最高达 0.32%。矿体与围岩渐变过渡, 无明显界线。3571 铜矿区没有明显出露的斑岩体, 但见博罗霍洛山组角岩化粉砂泥岩中发育多方向断裂、裂隙构造系统, 并伴随强烈的杂色热液蚀变(图 5 中 A、B、C、D), 形成含黄铜矿、磁黄铁矿的蚀变岩(图 2), 表现为"绿泥石+绿帘石+绢云母+黝帘石+黄铜矿+磁黄铁矿+石英+方解石"构成的青磐岩化矿物组合。铜矿体呈多

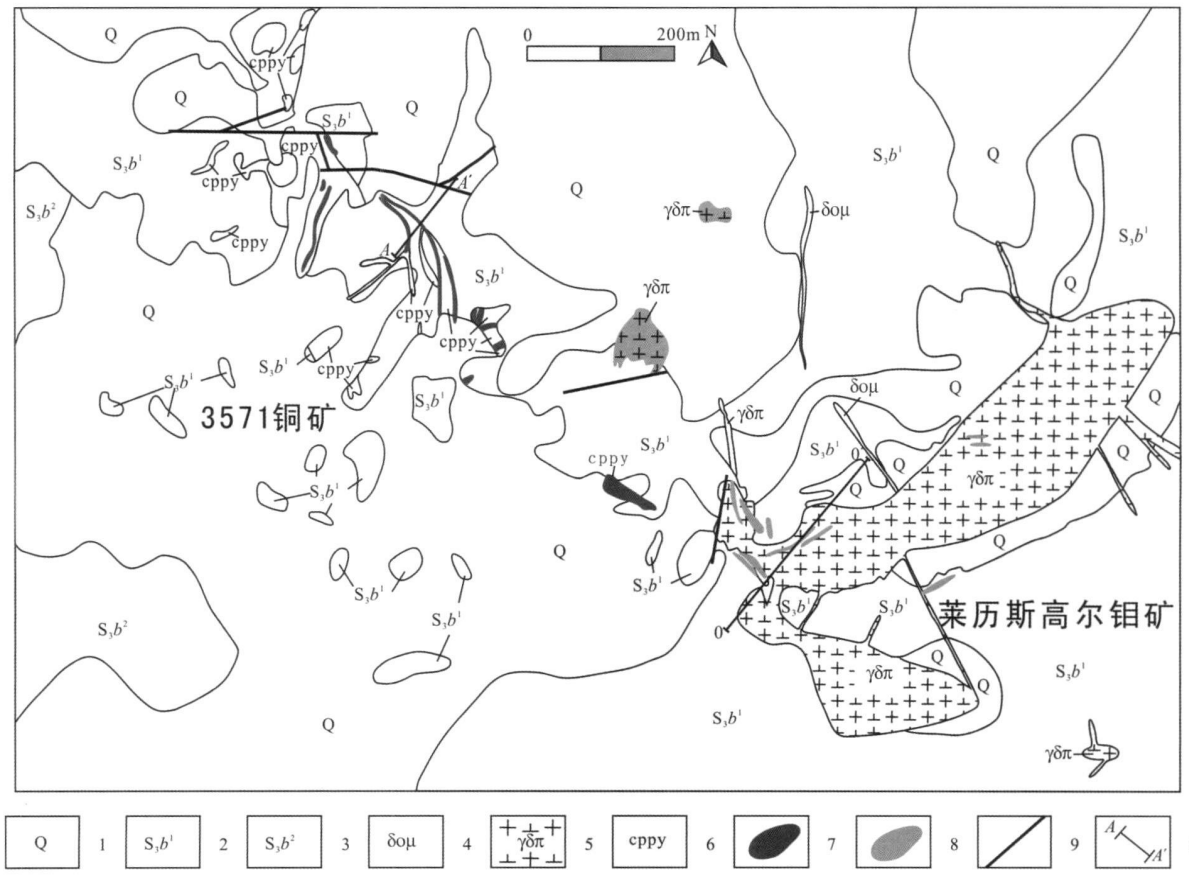


图 2　新疆四天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿田地质图
(据新疆地矿局第七地质大队①编绘)

Fig 2　A geologic map of Lailisigao'er-3571 Cu-Mo ore-field, western Tianshan, Xinjiang

1—第四系; 2—博罗霍洛山组一段; 3—博罗霍洛山组二段; 4—石英闪长玢岩; 5—花岗闪长斑岩; 6—黄铜矿-磁黄铁矿蚀变岩; 7—铜矿体; 8—钼矿体; 9—断层; 10—勘探线。

① 新疆地矿局第七地质大队. 新疆精河县莱历斯高尔一带铜钼矿及外围金多金属矿普查报告. 新疆乌苏, 2008: 1-229.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

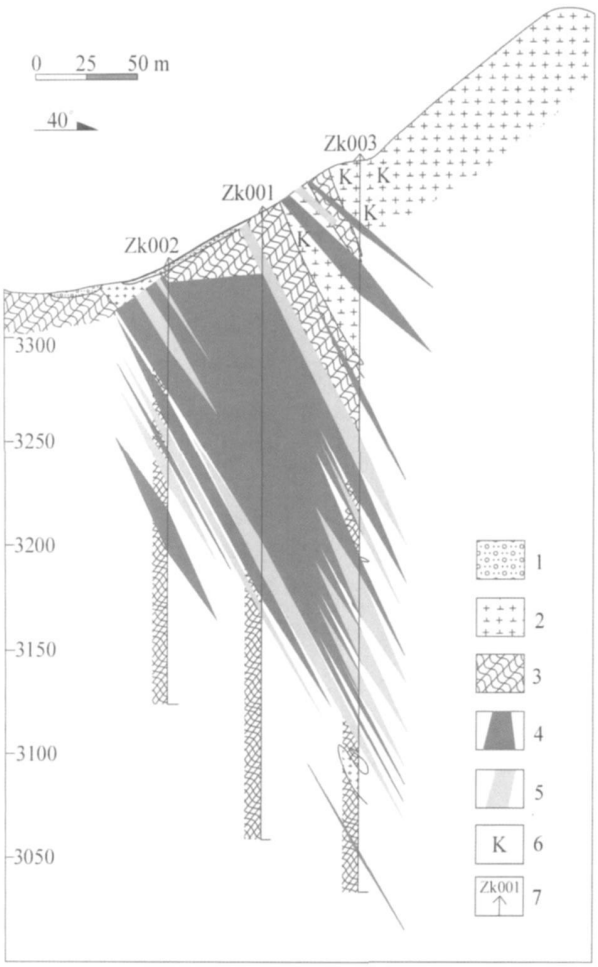


图 3 新疆西天山莱历斯高尔钼矿 0 号勘探线剖面图
(据新疆地矿局第七地质大队①编绘)

Fig 3 No. 0 exploration section of Lailisigaoʹer Mo ore district, western Tianshan, Xinjiang

1—第四系沉积物; 2—花岗闪长斑岩; 3—角岩; 4—钼矿体; 5—钼矿化体; 6—钾硅酸盐蚀变; 7—钻孔及编号。

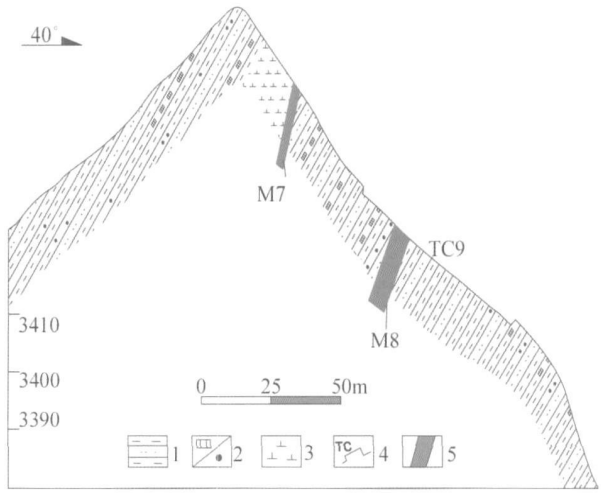


图 4 新疆西天山 3571 铜矿 *A*-*A*′勘探线剖面图
(据新疆地矿局第七地质大队①编绘)

Fig 4 *A*-*A*′ exploration section of 3571 Cu ore district, western Tianshan, Xinjiang

1—角岩化泥岩夹粉砂岩; 2—黄铁矿化或黄铜矿化; 3—闪长岩; 4—探槽; 5—铜矿体。

方向脉状、网脉状产在这种蚀变岩中(图 2、4),已圈定铜矿体 33 个,矿体长 40~ 377 m,厚 1~ 18 m,铜品位多在 0. 40%~ 1. 27%,伴生银 1. 8~ 23. 6 g/t,铜矿体与围岩无明显界线。

莱历斯高尔钼矿区热液蚀变在花岗闪长斑岩中表现为钾长石化、黑云母化及叠加其上的强烈硅化(图 5D)。在接触带多见绢云母化,在角岩化围岩中为具有青磐岩化矿物组合特征的杂色蚀变,3571 铜矿区未见明显斑岩体出露和钾硅酸盐热液蚀变,角岩化粉砂泥岩中普遍发育以青磐岩化矿物组合为特征的杂色蚀变,即含黄铜矿、磁黄铁矿的蚀变岩(图 2、5B、5C)。矿田空间上表现出从斑岩体到接触带再到角岩化围岩,热液蚀变类型发生由钾硅酸盐化到绢云母化再到青磐岩化的变化趋势,处在核部的钾硅酸盐蚀变带之上明显叠加了晚阶段强烈硅化蚀变,形成了"硅核"。金属矿化自岩体向围岩、由深处向浅处,矿石构造大致出现浸染状、细脉浸染状、细脉网脉状等变化,矿石中金属矿物大致表现为辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿、方铅矿和闪锌矿等空间变化和分带。这种热液蚀变矿化分带趋势具有较典型的斑岩铜钼矿特点。

矿田内铜钼矿体氧化带垂深多不超过 2 m,地表仅见有少量褐铁矿、孔雀石、铜蓝等氧化矿物,矿石主体为原生铜钼硫化物矿石。矿石中金属矿物主要为辉钼矿、黄铜矿,其次还有磁黄铁矿、斑铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等。脉石矿物主要为石英、钾长石、黑云母、绿泥石、绢云母、绿帘石、黝帘石、方解石等。铜钼矿石中辉钼矿、黄铜矿主要呈浸染状(图 5C)、细脉状(图 5A、D)产在钾硅酸盐蚀变花岗闪长斑岩、青磐岩化粉砂泥岩中。铜钼矿石中辉钼矿为自形-半自形鳞片状(图 5D、F),粒度为 0. 02~ 3. 0 mm,含量 1‰~ 3‰,与黄铜矿呈共边结构(图 5F)。黄铜矿呈他形粒状(图 5C、E),大小不一,粒度为 0. 002~ 2 mm,质量分数为 1%~ 5%,与磁黄铁矿紧密共生(图 5G),常见黄铜矿与闪锌矿呈固溶体分离结构(图 5H)。

① 新疆地矿局第七地质大队. 新疆精河县莱历斯高尔一带铜钼矿及外围金多金属矿普查报告. 新疆乌苏, 2008: 1-229.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

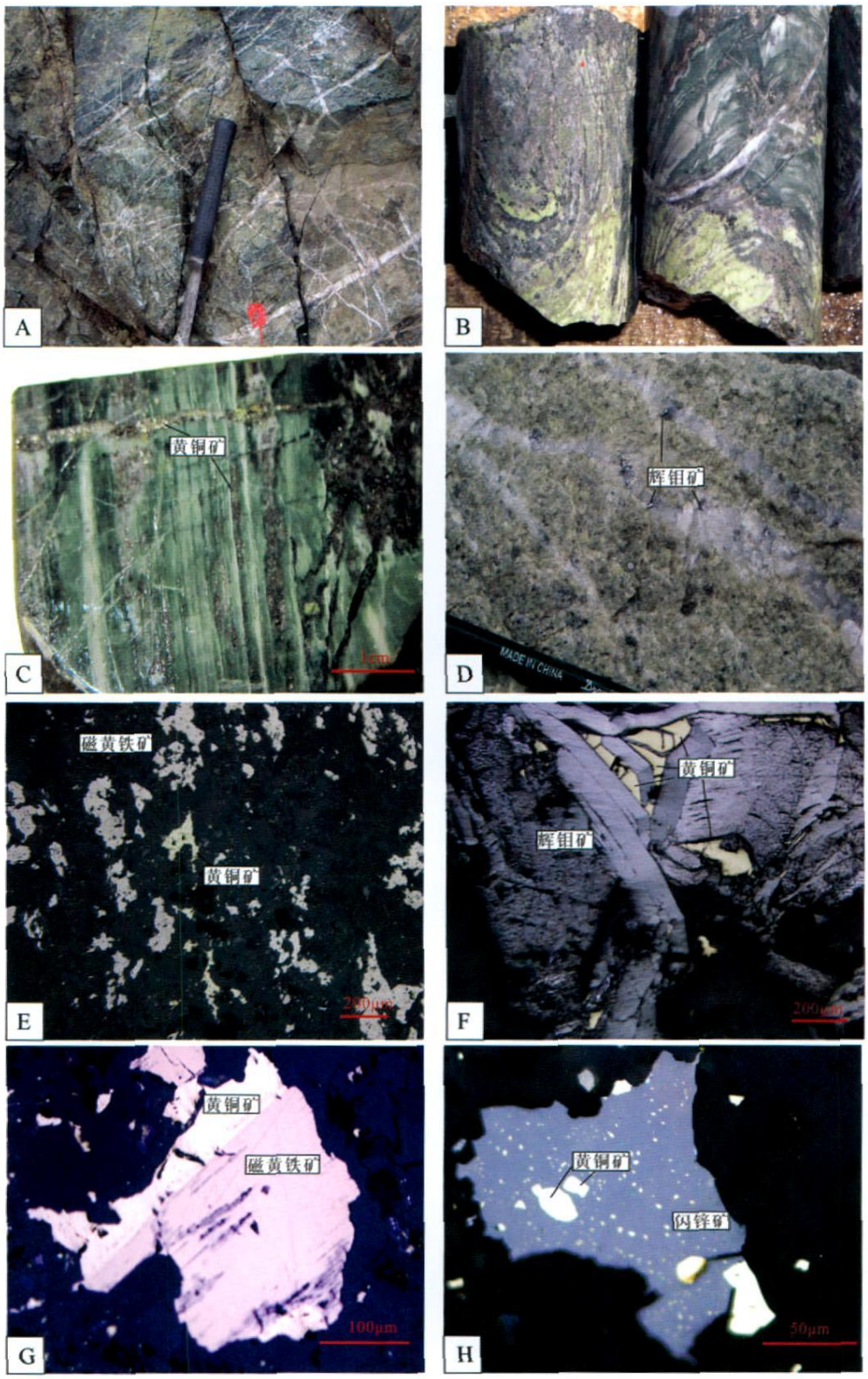


图 5　新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿田矿石组构

Fig 5　The ore fabric of Lailisigaoʼer-3571 Cu-Mo ore district, western Tianshan, Xinjiang

A—杂色蚀变岩中多组各方向石英细脉穿插,有些石英细脉中可见辉钼矿; B—矿田内粉砂泥岩发生蚀变-矿化, 蚀变组合为(黑云母)-绿帘石-绿泥石-石英, 矿化组合为斑铜矿-黄铜矿-辉钼矿-黄铁矿(图中岩心直径 5 cm); C—黄铜矿、磁黄铁矿呈浸染状分布于角岩中(标本照片); D—辉钼矿呈细脉浸染状分布于硅化花岗闪长斑岩中; E—黄铜矿、磁黄铁矿呈浸染状分布于角岩中(反射偏光显微镜单偏光, 10× 5); F—花岗闪长斑岩中叶片状辉钼矿与黄铜矿呈共生边结构(反射偏光显微镜单偏光, 10× 5); G—角岩中黄铜矿与磁黄铁矿呈共生边结构(反射偏光显微镜单偏光, 10× 10); H—花岗闪长斑岩中黄铜矿与闪锌矿呈固溶体分离结构(反射偏光显微镜单偏光, 10× 20)。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 花岗闪长斑岩矿物和化学组成

莱历斯高尔-3571 铜钼矿田花岗闪长斑岩与成矿关系密切,它呈灰白色,斑状结构,块状构造。斑晶主要为斜长石、石英、角闪石和黑云母。斜长石呈板条状半自形晶,粒径为 0.35 mm×0.6 mm~4 mm×6 mm,质量分数为 15%~20%。石英呈它形粒状,粒径为 0.7 mm~3 mm×4.5 mm,质量分数为 5%~20%。角闪石呈半自形柱状,粒径为 0.3 mm×1.0 mm~2 mm×6 mm,质量分数为 1%~5%。黑云母为片状,粒径为 0.4~2 mm,质量分数为 1%~5%。基质由斜长石、钾长石、石英、黑云母、角闪石组成,粒径为 0.03~0.75 mm,多呈半自形-它形粒状,质量分数为 30%~50%。副矿物为榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿等。

对莱历斯高尔-3571 铜钼矿田未蚀变未矿化的新鲜花岗闪长斑岩样品进行了主量、微量及 Sr、Nd 同位素组成分析。主量元素在中国科学院地质与地球物理研究所 XRF 实验室完成分析,精度优于 0.1%~1.0%,其中 FeO 含量用湿化学法测定,分析精度优于 0.5%~1.0%,分析结果见表 1。样品中 SiO_2 质量分数为 58.49%~70.31%,平均 67.27%;K_2O+Na_2O 质量分数为 3.09%~8.24%,K_2O/Na_2O=0.31~1.95,多数大于 1,碱质含量较高且以富钾为主;Al_2O_3 质量分数为 12.65%~16.63%,A/CNK=0.66~1.33,A/NK=1.34~1.94,指示岩石具有准铝质和过铝质特征;MgO 质量分数为 0.54%~2.41%,里特曼指数(σ)介于 0.28~2.71,属于钙碱性系列。从化学成分上看,花岗闪长斑岩样品具有高硅、低镁、富铝、富碱、高钾的特点。

花岗闪长斑岩的微量元素组成分析在地质过程与矿产资源国家重点实验室通过 ICP-MS 完成分析,结果见表 2。花岗闪长斑岩中 Rb、Ba、Th 等大离子元素富集和 Ta、Hf、Zr、Sm、Sr、Y、Yb 等高场强元素亏损,洋中脊花岗岩[18]标准化的分布曲线(图 6)与陆缘弧花岗岩分布型式相似。花岗闪长斑岩样品的稀土总量为(87.73~199.98)×10^{-6},平均 133.84×10^{-6},略低于地壳岩浆岩平均值(165×10^{-6}),明显低于地壳重熔 S 型花岗岩的相应值[19]。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线右倾(图 7),$(La/Sm)_N$=3.16~6.11,$(Tb/Lu)_N$=1.05~1.55,轻重稀土元素分馏明显,δEu=0.6~0.97。

矿田花岗闪长斑岩的 Sr、Nd 同位素组成在中国科学院地质与地球物理研究所 Finnigan MAT-262 质谱实验室分析,选用 Sr 标样 NBS987 ($^{87}Sr/^{86}Sr$=0.710 252±11)和 Nd 标样 Jndi-1 ($^{143}Nd/^{144}Nd$=0.512 112±11),用 $^{87}Sr/^{86}Sr$=0.119 4 和 $^{143}Nd/^{144}Nd$=0.712 9 进行 Sr 和 Nd 同位素质量歧视校正。分析时 Rb-Sr 和 Sm-Nd 的全流程本底约为 10^{-10} g 和 10^{-11} g。Sr、Nd 同位素组成分析结果见表3。花岗闪长斑岩的Sr同位素初始值 I_{Sr}=

表 1 新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿田花岗闪长斑岩主量元素分析结果

Table 1 Major elemental compositions of granodiorite porphyry in Lailisigaoer-3571 Cu-Mo ore district, western Tianshan, Xinjiang

样品号	w_B/%														K_2O/Na_2O	A/CNK	A/NK	σ
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	Total	FeO(T)	Na_2O+K_2O			
3571 铜矿																		
D3-1	76.55	0.41	7.19	1.24	2.72	0.1	2.41	3.39	2.36	0.73	0.19	1.94	99.26	3.83	3.09	0.31	0.66	1.54	0.28
D7-3	65.76	0.54	14.97	0.09	2.38	0.08	1.91	3.71	3.4	4.44	0.13	1.7	99.13	2.46	7.84	1.31	0.87	1.44	2.64
莱历斯高尔铜矿																		
D8-1	70.21	0.32	14.54	0.63	1.97	0.08	0.91	2.36	3.06	4.04	0.09	0.86	99.1	2.54	7.1	1.32	1.06	1.55	1.84
D9-2	70.31	0.35	14.08	1.1	2.31	0.07	1.28	0.52	2.83	4.57	0.11	1.58	99.13	3.3	7.4	1.61	1.33	1.47	1.98
D10-1	69.03	0.35	14.51	0.05	2.96	0.08	0.93	2.29	3.19	4.11	0.12	1.5	99.15	3.01	7.3	1.29	1.05	1.5	2.02
D12-1	69.43	0.41	13.7	0.76	2.18	0.1	1.3	2.04	2.84	5.12	0.12	1.22	99.24	2.86	7.96	1.8	0.98	1.34	2.37
D14-1	69.91	0.36	14.13	0.53	1.77	0.07	1.09	2.11	2.75	5.36	0.1	1	99.19	2.25	8.11	1.95	1	1.37	2.42
LLK-1	67.55	0.37	15.29	0.3	2.05	0.08	0.85	2.33	2.86	5.38	0.14	2.02	99.24	2.32	8.24	1.88	1.04	1.45	2.71
LLK-7	58.49	0.62	16.3	0.92	3.36	0.11	1.68	4.3	3.07	3.41	0.2	6.82	99.32	4.18	6.48	1.11	0.98	1.87	2.43
LLK-15	69.96	0.24	13.59	0.44	1.31	0.06	0.54	2.57	2.66	4.7	0.11	3.06	99.26	1.71	7.36	1.77	0.96	1.44	1.97
LLK-9	58.67	0.51	12.65	1.89	4.19	0.15	1.89	5.21	2.07	2.89	0.14	8.58	98.89	5.89	4.96	1.4	0.79	1.94	1.37
LLK-12	66.64	0.32	14.73	0.68	0.82	0.07	0.58	4.15	2.32	4.03	0.13	4.76	99.24	1.43	6.35	1.74	0.94	1.8	1.64
LLK-13	61.97	0.65	16.63	0.42	4.62	0.13	2.02	2.88	3.87	2.9	0.19	2.54	98.87	4.99	6.77	0.75	1.13	1.75	2.31

注:在中国科学院地质与地球物理研究所 XRF 实验室分析完成。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿田花岗闪长斑岩微量元素组成分析结果

Table 2 Trace elemental compositions of granodiorite porphyry in Lailisigao'er-3571 Cu-Mo ore district, western Tianshan, Xinjiang

样品号	$w_B/10^{-6}$																						Sr/Y	Zr/Hf	Nb/Ta
	Sc	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U			
3571 铜矿																									
D3-01	6.14	62.9	76.7	823	11	30.8	515	54.4	10.9	32.6	67.6	17.3	99.9	11.9	24.7	0.82	85.4	2.39	0.67	20	5.89	1.9	3.91	41.88	17.86
D7-3	8.09	69.3	20.1	635	7.39	30	22.7	60.4	20.3	217	147	17.3	143	15.8	11.3	3.41	599	3.29	1.09	43.4	8.92	2.53	8.51	43.39	14.56
莱历斯高尔钼矿																									
D8-01	4.46	28.6	13.1	556	5.47	6.02	223	169	19.4	115	244	19.3	141	24.4	162	1.7	431	3.53	2.05	20.2	14.3	5.58	12.67	40	11.92
D9-02	4.9	36.5	12.9	549	7.26	6	1125	39.7	20.6	146	152	20.7	133	20.4	23.2	3.07	600	3.27	1.57	14.1	13.2	2.81	7.33	40.62	12.96
D10-01	5.21	29.2	11.2	611	5.28	5.14	125	106	23.2	114	271	29.6	208	30.8	20	2.38	508	4.71	2.16	21.6	13.9	2.96	9.14	44.16	14.24
D12-01	6.29	47.8	14.2	751	5.33	5.96	208	145	17.9	132	374	26.6	184	19	19.8	3.35	501	4.05	1.34	375	11.3	2.27	14.08	45.35	14.13
D14-01	5.82	37.6	21.2	753	5.16	14.3	36.5	63.1	20.9	176	357	18.6	181	22.3	193	3.77	607	4.11	1.62	21.4	15.2	2.28	19.23	44.16	13.79
LLK-1	5.94	27.1	9.17	523	4.93	4.63	235	57.9	22.3	185	302	28.5	236	27	21.7	5.89	635	5.67	2.18	19.5	16.7	4.57	10.6	41.55	12.34
LLK-7	7.99	64.5	8.53	794	5.31	5.88	49.5	71.5	23.2	189	191	20.7	181	19	13.5	6.94	172	4.07	1.16	13.8	5.49	1.9	9.19	44.4	16.35
LLK-15	3.72	17.9	13.3	433	4.68	6.19	168	60.9	17.3	164	190	16.9	99.2	14.2	44.9	5.36	471	2.93	1.67	14.6	9.53	2.06	11.22	33.87	8.51
LLK-9	10	69.2	11.8	1060	22.6	9.45	8017	1662	20.1	149	281	23.1	125	16.7	106	5.19	238	3.04	1.38	40.4	5.84	1.91	12.19	41.21	12.08
LLK-12	4.92	24.6	8.02	557	1.98	3.04	90.9	39.9	19.1	167	187	22.4	163	20.5	65.4	5.38	353	4.02	1.72	9.7	13.3	1.97	8.34	40.42	11.94
LLK-13	8.72	72.1	35.7	1039	9.96	7.26	1485	220	23.8	121	435	20.5	164	18.4	90.8	2.87	489	3.71	1.06	19.8	6.21	2.62	21.25	44.18	17.32

样品号	$w_B/10^{-6}$															LREE/HREE	δEu	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Tb/Lu)_N$
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑REE					
3571 铜矿																				
D3-01	16.9	34.5	4.12	16.4	3.46	0.95	3.34	0.5	3.09	0.62	1.76	0.27	1.6	0.22	87.7	6.7	0.85	0.04	1.12	0.04
D7-3	20.7	43.2	4.94	19.2	3.92	1.19	3.56	0.53	3.13	0.62	1.78	0.27	1.71	0.25	105	7.86	0.97	0.04	1.25	0.03
莱历斯高尔钼矿																				
D8-01	23.1	53	5.31	19.3	3.92	0.89	3.56	0.55	3.5	0.68	2.06	0.32	2.09	0.31	119	8.07	0.73	0.03	1.12	0.04
D9-02	31.2	57.9	6.65	24.1	4.64	0.87	4.06	0.62	3.87	0.75	2.21	0.34	2.2	0.32	140	8.72	0.61	0.03	1.2	0.04
D10-01	40.3	80.7	9.08	33.4	6.65	1.24	5.97	0.91	5.48	1.04	3.04	0.46	2.89	0.4	192	8.49	0.6	0.03	1.21	0.05
D12-01	28.3	59.3	6.84	25.5	5.71	1.35	4.99	0.76	4.61	0.87	2.51	0.39	2.33	0.34	144	7.56	0.77	0.04	1.24	0.05
D14-01	25.9	49.8	5.6	20.5	3.96	1.06	3.62	0.55	3.25	0.64	1.96	0.3	1.97	0.3	119	8.48	0.86	0.03	1.22	0.04
LLK-1	43.1	84.7	9.39	34.7	6.53	1.44	5.89	0.88	5.38	1.08	3.04	0.46	3.01	0.44	200	8.91	0.71	0.03	1.21	0.05
LLK-7	29.2	56.5	6.42	24.5	4.8	1.06	4.35	0.65	3.93	0.77	2.23	0.34	2.21	0.32	137	8.28	0.71	0.03	1.22	0.04
LLK-15	22	43.4	4.96	18.5	3.69	0.91	3.39	0.52	3.18	0.64	1.78	0.26	1.7	0.24	105	7.97	0.79	0.04	1.16	0.03
LLK-9	22	47.6	5.71	22	4.45	1.04	4.33	0.68	4.28	0.88	2.46	0.36	2.3	0.34	119	6.58	0.72	0.04	1.04	0.05
LLK-12	30.8	60	6.8	25.2	4.98	1.12	4.49	0.66	4.1	0.82	2.36	0.36	2.31	0.34	144	8.35	0.72	0.03	1.21	0.04
LLK-13	26.5	52.7	6.14	23.4	4.52	1.24	4.27	0.62	3.8	0.76	2.15	0.34	2.14	0.32	129	7.94	0.86	0.04	1.19	0.04

注:在地质过程与矿产资源国家重点实验室通过 ICP-MS 分析。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3 新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿田花岗闪长斑岩 Sr、Nd 同位素组成分析结果

Table 3 Sr- and Nd-isotopic compositions of granodiorite porphyry in Lailisigaoer-3571 Cu-Mo ore district, western Tianshan, Xinjiang

样品号	$w_B/10^{-6}$		$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	2σ	I_{Sr}	$w_B/10^{-6}$		$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	2σ	I_{Nd}	$\varepsilon_{Nd}(t)$
	Rb	Sr					Sm	Nd					
3571 铜矿													
D3-01	31.03	66.47	1.352	0.715 22	11	0.708 49	3.328	15.85	0.126 9	0.512 29	11	0.512	-3.71
D7-02	230	215.1	3.099	0.725 72	11	0.710 28	4.198	20.34	0.124 8	0.512 36	1	0.512 1	-2.30
莱历斯高尔钼矿													
D8-01	116.7	253.1	1.334	0.715 13	11	0.708 48	4.264	20.43	0.126 2	0.512 33	12	0.512	-2.90
D9-02	134.7	137	2.849	0.722 37	11	0.708 17	4.272	22.37	0.115 5	0.512 335	12	0.512 1	-2.29
D10-01	108.1	257.5	1.216	0.715	11	0.709	6.381	31.83	0.121	0.512	11	0.512	-2.19
D12-01	128.8	383.9	0.972	0.712 84	11	0.708	5.698	25.25	0.136 4	0.512 47	14	0.512 2	-0.61
D14-01	145.4	306.8	1.372	0.715 77	11	0.708 93	3.359	17.06	0.119	0.512 382	17	0.512 1	-1.52
LLK-1	175.5	271.2	1.874	0.717 55	11	0.708 21	5.832	30.61	0.115 2	0.512 3	12	0.512	-2.94
LLK-7	174.4	184.3	2.742	0.723 07	11	0.709 41	3.544	16.92	0.126 6	0.512 441	11	0.512 2	-0.72
LLK-13	116.3	426.3	0.789	0.711 79	11	0.707 86	4.494	22.93	0.118 5	0.512 425	11	0.512 2	-0.66

注: 在中国科学院地质与地球物理研究所 Finnigan MAT-262 质谱实验室分析, 计算样品的 I_{Sr}、I_{Nd}、$\varepsilon_{Nd}(t)$ 都统一校正到 t= 350 Ma。Rb 衰变常数 λ_{Rb}= 1.42× 10^{-11} a^{-1}; Sm 衰变常数 λ_{Sm}= 6.54× 10^{-12} a^{-1}。

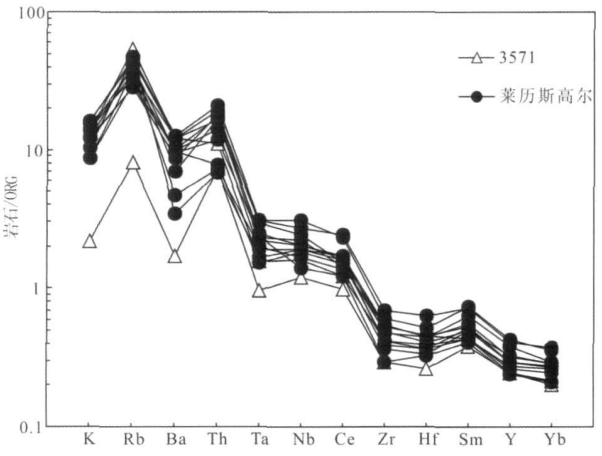


图 6 新疆西天山莱历斯高尔-3571 矿田花岗闪长斑岩微量元素分布曲线
(ORG 标准据文献[18])

Fig. 6 Trace elements distribution curves of granodiorite porphyry in Lailisigaoer-3571 Cu-Mo ore district, western Tianshan, Xinjiang

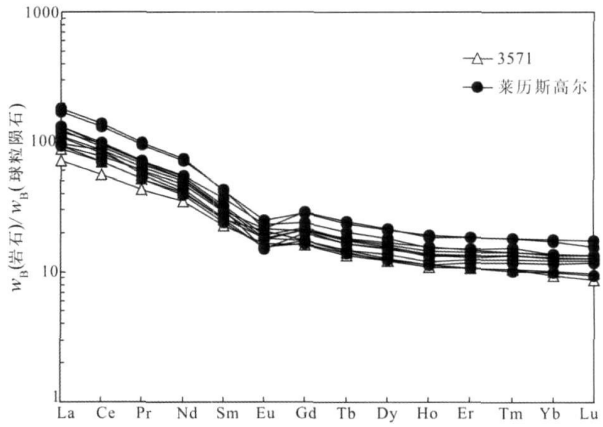


图 7 新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿田花岗闪长斑岩稀土元素配分曲线
(球粒陨石标准数据据文献[20])

Fig. 7 REE distribution curves of granodiorite porphyry in Lailisigaoer-3571 Cu-Mo ore district, western Tianshan, Xinjiang

0.707 9~ 0.710 3, 花岗闪长斑岩的 Nd 同位素的初始值 I_{Nd} = 0.512 0~ 0.512 2, 以 350 Ma 计算得 $\varepsilon_{Nd}(t)$= -0.61~ -3.71。相对于原始地幔, 莱历斯高尔-3571 花岗闪长斑岩的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 偏低, I_{Sr}偏高, 但相对于壳源花岗岩, I_{Sr}明显偏低, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 高。

4 矿石同位素组成

同位素研究样品取自矿田平硐及钻孔中的铜钼矿石, 矿石样品新鲜未受风化。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, 最后在实体显微镜下挑选出矿石中的黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、石英 4 种单矿物样品, 纯度达 99% 以上, 以备 S、Pb、O、H 同位素组成分析。

硫化物矿物硫同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所同位素地质实验室完成。样品以氧化铜和五氧化二钒作为混合氧化剂制样, 用 MAT-251EM 型质谱仪分析。$\delta^{34}S$ 采用 V-CDT 标准, 分析精度为 ±0.2‰, 分析结果见表 4。矿石 $\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$ 值为 2.7‰~ 4.3‰, 极差为 1.6‰, 平均值 3.8‰, 峰

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

值4‰(图8)。黄铜矿 $\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$ = 2.7‰~4.3‰, 平均值为3.7‰, 磁黄铁矿 $\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$ = 4.0‰~4.1‰, $\delta^{34}S_{黄铜矿} < \delta^{34}S_{磁黄铁矿}$, 硫化物沉淀过程中硫同位素基本达到分馏平衡。

表4　新疆西天山莱历斯高尔-3571铜钼矿石中硫化物矿物硫同位素组成分析结果

Table 4　S-isotopic compositions of Laulisigao'er-3571 Cu-Mo sulfide ores, western Tianshan, Xinjiang

样品编号	矿石矿物	$\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$ / ‰
07L-01	黄铜矿	3.5
07L-03	黄铜矿	2.7
07L-08	黄铜矿	3.9
07L-09	黄铜矿	3.9
07L-10	黄铜矿	4.3
07L-23	磁黄铁矿	4.0
07L-26	磁黄铁矿	4.1

注: 在中国地质科学院矿产资源研究所同位素地质实验室分析。

矿石Pb同位素组成在中国地质科学院地质研究所同位素地质实验室完成分析, 所用仪器为英国Nu Instrument公司产高分辨多接受等离子质谱仪(Nu Plasma HR), 全流程空白值< 50 pg, 分析结果见表5。矿石中硫化物矿物$^{206}Pb/^{204}Pb$= 18.099 7~18.258 8, 平均值为38.221 8, 极差为0.159 1; $^{207}Pb/^{204}Pb$= 15.605 2~15.624 2, 平均值为15.615 3, 极差为0.019; $^{208}Pb/^{204}Pb$= 38.124 5~38.307 8, 平均值为38.221 8, 极差为0.183 3。利用H-H单阶段铅演化模式, 计算得到莱历斯高尔-3571铜钼矿石铅同位素组成的相关参数(表5), μ= 9.51~9.53, 均值为9.52; ω= 36.56~37.48, 均值为37.01; Th/U= 3.72~3.81, 均值为3.76。

针对铜钼矿石中矿化蚀变晚阶段生成的石英的O同位素及石英中流体包裹体的H同位素组成分析在中国地质科学院矿产资源研究所同位素地质实验室完成。O同位素组成分析用BrF_5法制样, MAT-251EM型质谱仪分析, $\delta^{18}O$采用SMOW标准, 分析误差为±0.2‰。用爆裂法获取石英流体包裹体中的水, H同位素组成分析用锌法制氢, 用MAT-251EM型质谱仪分析, 采用SMOW标准, δD分析误差为±2‰。O、H同位素组成分析结果见表6。石英 $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ = 10.6‰~11.8‰, 平均11.0‰, 极差1.2‰。依据1 000 $\ln\alpha_{石英\text{-}水} = 4.48\times10^6/T^2 - 4.77\times10^3/T + 1.71$[21]计算石英平衡热液流体中水的 $\delta^{18}O_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$ 值为-1.33‰~5.46‰, 平均值为3.28‰, 极差为6.79‰(T取实测流体包裹体均一温度)。石英流体包裹体中水的 $\delta D_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$= -81‰~-101‰, 平均值为-94‰, 极差20‰。

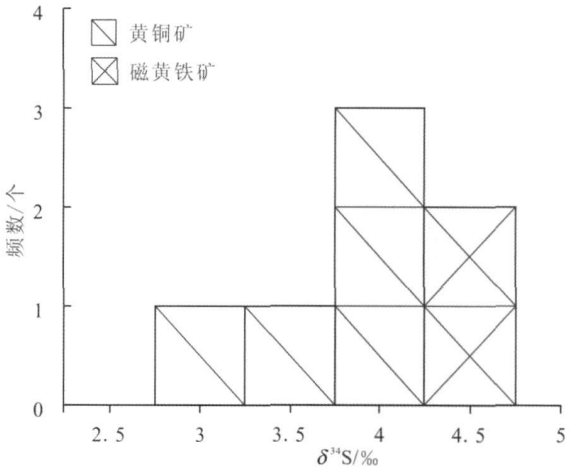


图8　新疆西天山莱历斯高尔-3571铜钼矿石中硫化物矿物硫同位素组成直方图

Fig 8　S-isotopic composition histogram of Laulisigao'er-3571 Cu-Mo sulfide ores, western Tianshan, Xinjiang

表5　新疆西天山莱历斯高尔-3571铜钼矿石铅同位素组成分析结果

Table 5　Pb-isotopic compositions and related parameters of Lailisigao'er-3571 Cu-Mo ores, western Tianshan, Xinjiang

样品号	矿物	$^{208}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{206}Pb/^{204}Pb$	t/Ma	μ	ω	Th/U	Δα	Δβ	Δγ
07L-01	黄铁矿	38.124 5	15.617 4	18.181 8	353.2	9.52	36.63	3.72	74.85	20.07	32.76
07L-03	黄铁矿	38.241 7	15.605 2	18.099 7	397.3	9.51	37.48	3.81	73.58	19.51	37.90
07L-08	黄铁矿	38.150 6	15.619 7	18.218 6	329.6	9.52	36.56	3.72	75.11	20.10	32.42
07L-09	黄铁矿	38.305 8	15.612 5	18.189 7	341.7	9.51	37.31	3.80	74.38	19.69	37.16
07L-10	黄铁矿	38.199 4	15.621 6	18.242 4	314.9	9.53	36.65	3.72	75.32	20.15	33.09
07L-23	磁黄铁矿	38.307 8	15.624 2	18.258 8	306.2	9.53	37.04	3.76	75.59	20.27	35.64
07L-26	黄铁矿	38.222 6	15.606 3	18.104	395.5	9.51	37.39	3.81	73.69	19.57	37.31

注: 在中国地质科学院矿产资源研究所同位素地质实验室分析。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 6 新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿石中石英及其流体包裹体的 O、H 同位素组成分析结果

Table 6 O- and H-isotopic compositions of the quartz and fluid inclusion in Lailisigao'er-3571 Cu-Mo ores, western Tianshan, Xinjiang

样号	测试矿物	$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ / ‰	$\delta^{18}O_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$ / ‰	$\delta D_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$ / ‰	T / ℃
07L-07	石英	11.2	4.21	-101	301
07L-12	石英	10.6	3.47	-100	297
07L-13	石英	10.7	-1.33	-91	194
07L-14	石英	10.6	4.65	-95	336
07L-15	石英	11.1	4.93	-98	328
07L-16	石英	11.8	1.56	-95	224
07L-18	石英	11.0	5.46	-81	352

注: 在中国地质科学院矿产资源研究所同位素地质实验室分析, T 为包裹体均一温度实测值。

5 U-Pb 法测年

用于 U-Pb 同位素测年的样品 D14 和 D7 分别为采自莱历斯高尔钼矿区和 3571 铜矿区铜钼矿化的新鲜花岗闪长斑岩。样品经机械粉碎到 80 目、重液和水力分离、蒸馏水洗涤、电磁分选仪初步分选后, 在实体显微镜下逐粒挑选出锆石单矿物, 2 件样品中均分别选出几十粒锆石单矿物。

锆石样品在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成锆石 U-Pb 法测年。在实体显微镜下将锆石颗粒固定于环氧树脂并研磨到锆石露出中部平面, 经抛光和清洗等操作制成样品靶。在阴极发光(CL)显微镜下观测锆石的阴极发光特征并照相(图 9), LA-ICP-MS 实验室分析 U、Pb 同位素组成, 实验流程见参考文献[22-23]。激光剥蚀系统为德国 Micro Las 公司产 GeoLas200M, 剥蚀深度 20~40 μm, 激光脉冲 10 Hz, 能量 34~40 mJ。ICP-MS 为美国 Agilent 公司产 Agilent7500a 型。采集方式为单点剥蚀, 数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式, 本次激光剥蚀半径为 30 μm。采用国际标准 91500 锆石作为外标, 微量元素采用美国国家标样技术研究院的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 作外标, 以 ^{29}Si 作为内标[23]。数据用 Isoplot[24] 处理, 采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄, 测年结果见表 7、图 10。锆石为自形短柱状, 无色-淡玫瑰色, 内部结晶环带清楚(图 9), Th/U = 0.43~1.40, 属典型岩浆锆石。莱历斯高尔钼矿区样品(D14) 25 个测点的结果(表 7) 中, 除分析点号为 D14-2、3、6、16、17 结果偏年轻, D14-5、12 明显偏老外, 其他 18 个有效测点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值变化于(341±2)~(349±2) Ma, 加权平均年龄(346±1.2) Ma(图 10), MSWD = 1.4; 3571 铜矿区样品(D7) 24 个点结果(表 7) 中, 除分析点号为 D7-12 的结果明显偏老, D7-04、D7-11、D7-16、D7-17、D7-18 偏年轻外, 其余 18 个测点基本落在谐和曲线上或附近, $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值变化于(350±1)~(356±1) Ma, 加权平均年龄为(354±0.65) Ma, MSWD = 1.5(图 10)。

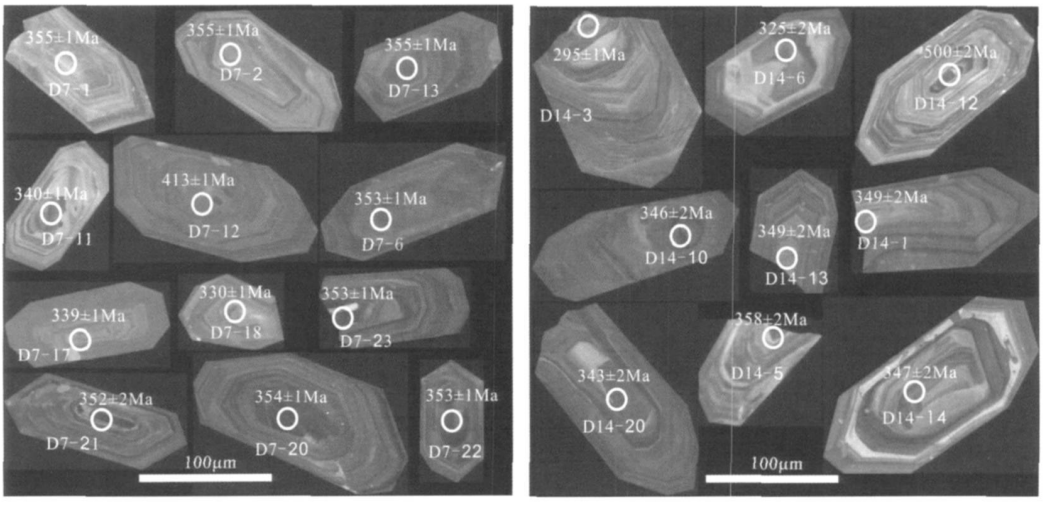


图 9 新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿田矿化花岗闪长斑岩中锆石阴极发光图像

Fig 9 CL images of zircons in granodiorite porphyry of Lailisigao'er-3571 Cu-Mo ore-field, western Tianshan, Xinjiang

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

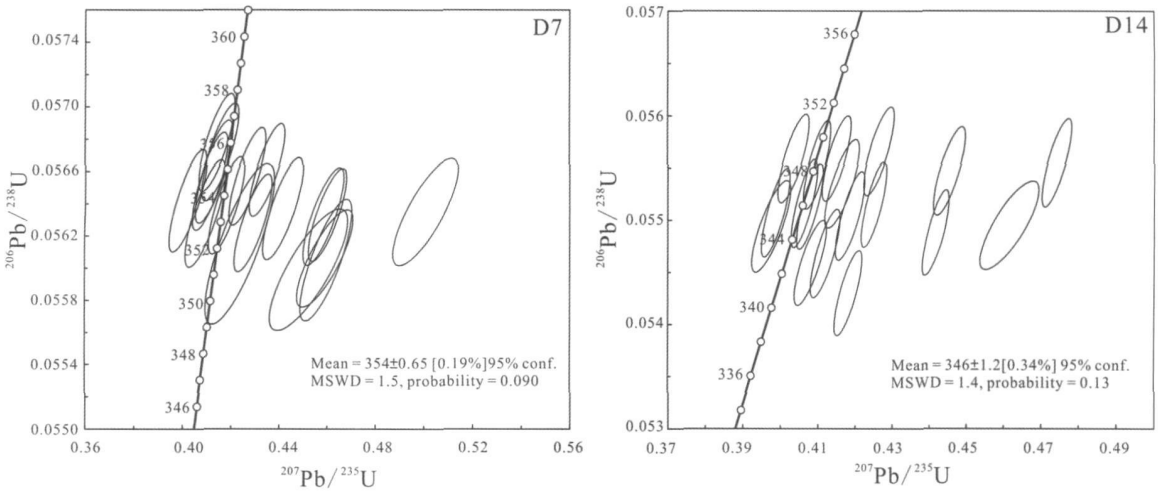


图 10　新疆莱历斯高尔钼矿(D14)和 3571 铜矿(D7)矿化花岗闪长斑岩中锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig 10　U-Pb concordant plot of zircons in the ore-bearing granodiorite porphyry in Lailisigaoer Mo ore district (D14) and 3571 Cu ore district (D7), western Tianshan, Xinjiang

6　讨论

新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿田形成于博罗霍洛古生代岛弧带中[8, 10, 13-14], 这个岛弧带应属于哈萨克斯坦-伊犁板块的东北部边缘, 北侧于古生代发育准噶尔洋[25]。矿田内强烈角岩化志留系粉砂泥岩中侵入了海西中期花岗闪长斑岩小岩体群(图 1), 铜钼矿化很可能伴随该期构造-岩浆-热液过程而发生。这些花岗闪长斑岩小岩体具有高硅、低镁、富铝、富碱、高钾等特点, Rb、Ba、Th 等大离子元素富集和 Ta、Hf、Zr、Sm、Sr、Y、Yb 等高场强元素亏损, 洋中脊花岗岩[18]标准化的微量元素分布曲线与陆缘弧花岗岩分布型式相似(图 6)。花岗闪长斑岩 REE 总量明显低于地壳重熔 S 型花岗岩的相应值[19], 具有 I 型或 M 型花岗岩浆的性质, 初始值 I_{Sr} = 0.707 9~ 0.710 3, $\varepsilon_{Nd}(t)$ = -0.61~ -3.71, 指示岩浆具壳幔混源或下地壳来源特点。铜钼硫化物矿体呈脉状、板状和透镜状, 产在花岗闪长斑岩体顶部或边部、接触带和附近角岩(围岩)中。从岩体到围岩, 热液蚀变具有从钾硅酸盐化到绢云母化再到青磐岩化的分带性, 铜钼硫化物矿化也显示从浸染状、细脉浸染状到细脉网脉状等矿石构造变化趋势。矿石中金属矿物主要为辉钼矿、黄铜矿, 次要矿物见磁黄铁矿、斑铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等, 脉石矿物为热液蚀变矿物组合。这些反映出较典型的斑岩型铜钼矿化特征。

在讨论硫化物矿石中硫的来源时, 须依据硫化物沉淀期间热液的总硫同位素组成; 在硫化物矿物组合较简单情况下, 矿石中不同硫化物 $\delta^{34}S$ 的平均值可大致代表热液的总硫同位素组成[26]。莱历斯高尔-3571 铜钼矿石中硫化物矿物主要为铜钼硫化物, 故热液中总 $\delta^{34}S$ 值相当于硫化物矿物 $\delta^{34}S$ 的平均值, 即 3.8‰, 该值指示矿石硫总体具有深源岩浆硫特征。如果以地层中的海水硫酸盐(古生代海水硫酸盐 $\delta^{34}S$ 最大值 30‰)与幔源岩浆硫($\delta^{34}S$ 为 0‰)[27]作为硫来源的两个端员, 则地层能够提供的硫仅 9%~ 15%, 而深源岩浆能提供 85%~ 91% 的矿石硫。

矿石铅同位素组成是成矿金属元素来源的示踪剂。莱历斯高尔-3571 铜钼矿石在铅同位素构造模式图解[28]中位于造山带演化线附近, 并与地幔铅关系密切(图 11), 反映成矿金属物质具壳幔混合来源特点。铅同位素源区特征值常用于指示铅的来源, 莱历斯高尔-3571 铜钼矿石铅的 μ 值集中分布在 9.51~ 9.53, 高于地幔原始铅 μ 值范围, 但明显低于地壳铅(μ= 9.58); ω= 36.56~ 37.48, 接近地壳平均值 36.84; Th/U = 3.72~ 3.81, 接近地幔值(3.45)。表明成矿金属具有上地幔或下地壳深源性质[28-29]。在考虑了矿石形成时代基础上, 通过矿石铅同位素 $\Delta\beta$-$\Delta\gamma$ 图解可以更好的示踪矿石铅的源区性质[30]; 莱历斯高尔-3571 铜钼矿石的铅同位素组成特征参数在 $\Delta\beta$-$\Delta\gamma$ 图解中落入地壳与地幔混合的俯冲铅区域(图12中3a), 这个区域正好处在

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 7 新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿田矿化花岗闪长斑岩中锆石 U-Pb 年龄测试结果

Table 7 Zircon U-Pb dating results of the ore-bearing granodiorite porphyry in Lailisigaoer-3571 Cu-Mo ore-field, western Tianshan, Xinjiang

样品号	点号	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄/Ma	σ	$^{207}Pb/^{235}U$	σ	$^{206}Pb/^{238}U$	σ	$w_B/10^{-6}$ Th	$w_B/10^{-6}$ U	Th/U
D7	D7-01	355	1	0.435 1	0.004 9	0.056 6	0.000 2	238.83	424.12	0.56
	D7-02	355	1	0.413 0	0.005 2	0.056 6	0.000 2	390.16	518.31	0.75
	D7-03	356	1	0.415 6	0.005 1	0.056 7	0.000 2	226.50	281.15	0.81
	D7-04	353	1	0.517 9	0.006 3	0.056 5	0.000 2	275.74	423.13	0.65
	D7-05	355	1	0.411 4	0.004 9	0.056 5	0.000 2	373.37	353.52	1.06
	D7-06	353	1	0.409 5	0.005 5	0.056 3	0.000 2	294.59	370.49	0.80
	D7-07	354	1	0.402 3	0.005 1	0.056 4	0.000 2	184.49	282.24	0.65
	D7-08	354	1	0.441 7	0.005 6	0.056 4	0.000 2	219.55	307.79	0.71
	D7-09	352	1	0.516 0	0.005 6	0.056 6	0.000 2	265.83	495.23	0.54
	D7-10	353	1	0.460 2	0.005 3	0.056 3	0.000 2	422.38	516.29	0.82
	D7-11	340	1	0.408 8	0.005 1	0.054 2	0.000 2	533.25	504.52	1.06
	D7-12	413	1	0.585 0	0.006 7	0.066 2	0.000 2	119.51	280.79	0.43
	D7-13	355	1	0.426 9	0.005 1	0.056 6	0.000 2	214.73	346.04	0.62
	D7-14	373	4	3.466 2	0.041 8	0.085 0	0.000 4	135.11	245.25	0.55
	D7-15	351	2	0.532 8	0.007 6	0.056 7	0.000 2	201.78	289.77	0.70
	D7-16	336	1	0.741 0	0.008 6	0.055 9	0.000 2	566.29	699.94	0.81
	D7-17	339	1	0.440 7	0.005 2	0.054 2	0.000 2	171.64	295.13	0.58
	D7-18	330	1	0.639 6	0.006 6	0.054 6	0.000 2	482.32	1 103.46	0.44
	D7-19	356	1	0.414 2	0.005 0	0.056 8	0.000 2	207.52	308.95	0.67
	D7-20	354	1	0.418 2	0.005 0	0.056 4	0.000 2	303.40	490.81	0.62
	D7-21	352	2	0.459 6	0.007 1	0.056 1	0.000 3	254.36	369.41	0.69
	D7-22	353	1	0.429 2	0.005 2	0.056 3	0.000 2	275.74	389.42	0.71
	D7-23	353	1	0.458 5	0.005 6	0.056 3	0.000 2	500.41	571.57	0.88
	D7-24	352	2	0.423 7	0.009 4	0.056 2	0.000 3	164.27	294.19	0.56
D14	D14-01	349	2	0.415 1	0.002 6	0.055 6	0.000 3	220.19	299.55	0.74
	D14-02	323	2	0.385 9	0.002 2	0.051 4	0.000 3	156.95	318.06	0.49
	D14-03	295	1	0.547 1	0.003 7	0.046 8	0.000 2	1 153.79	825.84	1.40
	D14-04	343	2	0.408 1	0.002 8	0.054 6	0.000 3	150.03	207.07	0.72
	D14-05	358	2	0.459 4	0.005 2	0.057 2	0.000 3	128.31	275.01	0.47
	D14-06	325	2	0.416 2	0.005 5	0.051 7	0.000 3	168.78	306.00	0.55
	D14-07	346	2	0.407 9	0.002 3	0.055 1	0.000 3	350.05	429.23	0.82
	D14-08	341	2	0.418 1	0.002 4	0.054 3	0.000 3	237.65	420.37	0.57
	D14-09	345	2	0.461 6	0.005 2	0.055 0	0.000 3	283.71	508.84	0.56
	D14-10	346	2	0.425 1	0.002 3	0.055 2	0.000 3	252.25	492.28	0.51
	D14-11	344	2	0.441 7	0.002 4	0.054 9	0.000 3	395.40	529.02	0.75
	D14-12	500	2	0.729 0	0.003 7	0.080 7	0.000 4	421.98	746.33	0.57
	D14-13	349	2	0.426 5	0.002 8	0.055 7	0.000 3	333.95	447.90	0.75
	D14-14	347	2	0.416 6	0.003 1	0.055 4	0.000 3	285.94	380.45	0.75
	D14-15	349	2	0.403 6	0.002 8	0.055 6	0.000 3	118.20	263.27	0.45
	D14-16	341	2	0.506 6	0.003 2	0.054 4	0.000 3	382.72	302.25	1.27
	D14-17	334	2	0.542 1	0.007 8	0.053 1	0.000 3	231.17	295.73	0.78
	D14-18	348	2	0.409 9	0.002 5	0.055 5	0.000 3	213.96	417.15	0.51
	D14-19	345	2	0.418 7	0.002 6	0.055 0	0.000 3	274.77	456.50	0.60
	D14-20	343	2	0.412 0	0.002 6	0.054 7	0.000 3	172.51	274.34	0.63
	D14-21	345	2	0.397 6	0.003 4	0.054 9	0.000 3	78.82	120.75	0.65
	D14-22	346	2	0.406 5	0.002 3	0.055 2	0.000 3	209.60	315.68	0.66
	D14-23	346	2	0.398 8	0.002 5	0.055 1	0.000 3	187.51	272.06	0.69
	D14-24	348	2	0.445 6	0.003 0	0.055 5	0.000 3	345.71	459.88	0.75
	D14-25	349	2	0.474 4	0.002 6	0.055 6	0.000 3	698.29	625.16	1.12

注: 在西北大学大陆动力学国家重点实验室用 LA-ICP-MS 分析。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

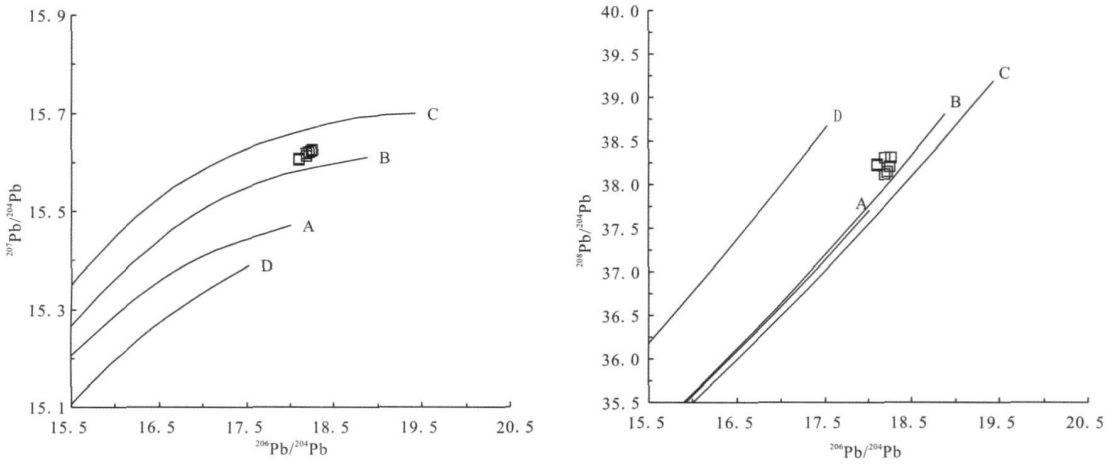


图 11　新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿石铅同位素构造模式图[28]

Fig. 11　Pb-isotopic tectonic model diagram of Lailisigao'er-3571 Cu-Mo ores, western Tianshan, Xinjiang[28]

A—地幔; B—造山带; C—上地壳; D—下地壳。

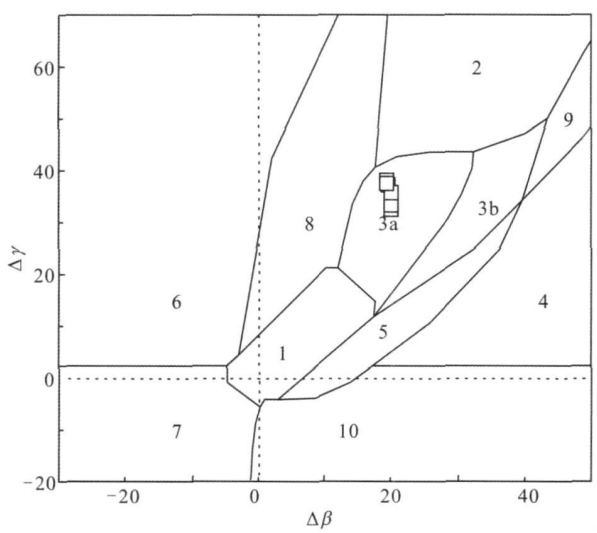


图 12　新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿石铅同位素组成的 $\Delta\beta$-$\Delta\gamma$ 图解[30]

Fig. 12　Pb-isotopic $\Delta\beta$-$\Delta\gamma$ diagram of Lailisigao'er-3571 Cu-Mo ores, western Tianshan, Xinjiang[30]

1—地幔源铅; 2—上地壳源铅; 3—地壳与地幔混合的俯冲铅(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。

幔源铅与上地壳源铅之间, 且指示与岩浆作用关系密切, 反映铜钼成矿与洋壳俯冲过程中的岩浆活动有关, 成矿金属可能来自于俯冲洋壳熔融的岩浆。矿石铅的这种源区性质能得到莱历斯高尔-3571 铜钼矿田处在古生代准噶尔洋南缘陆缘弧的地质环境的印证。

岩浆水和大气降水被认为是斑岩成矿系统中水的重要来源, 但不同矿区二者所占比例不相同[1, 31-33]。新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿化蚀变晚阶段生成的石英样品 $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ = 10.6‰~11.8‰, 与花岗岩类($\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ = 7‰~13‰) 相似, 结合流体包裹体测温计算出石英平衡热液中水的 $\delta^{18}O_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$ = -1.33‰~5.46‰。石英中流体包裹体的 $\delta D_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$ = -81‰~-101‰。在自然界水的 $\delta^{18}O_{H_2O}$-δD_{H_2O} 图解(图 13) 中, 莱历斯高尔-3571 铜钼晚阶段成矿流体处在岩浆水左下方, 可能指示晚阶段成矿流体主体为岩浆水, 但在成矿过程中混入了少量大气降水, 导致热液中 O 同位素向轻同位素方向漂移。东天山土屋斑岩型铜成矿流体 $\delta D_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$ = -70‰~-66‰, $\delta^{18}O_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$ = 1.2‰~5.1‰, 被解释为岩浆水混合大气降水[34]; 西准噶尔包古图斑岩型铜矿成矿流体 $\delta D_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$ = -107‰~-86‰, $\delta^{18}O_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$ = 4.4‰~9.3‰, 被解释为岩浆水[35]。

前人对莱历斯高尔-3571 铜钼矿田成岩成矿时代的研究多为地质推测[10-12]。本次对铜钼矿化花岗闪长斑岩中单颗粒岩浆成因锆石进行的 LA-ICP-MS 测定表明, 莱历斯高尔钼矿区花岗闪长斑岩形成于(346±1.2) Ma, 3571 铜矿区花岗闪长斑岩形成于(350±0.65) Ma, 代表了早石炭世成岩时代, 即准噶尔洋壳向南俯冲于哈萨克斯坦—伊犁板块之下的洋-陆俯冲时代。这个测年结果与利用 SHRIMP 测得(362±12) Ma[17] 的成岩年龄(晚泥盆世) 有较大差别, 而与其全岩 Rb-Sr 等时线年龄(350±15) Ma[17] 接近。针对莱历斯高尔钼矿石中辉钼矿的 Re-Os 法测年曾获得(359.2±7.8) Ma 的

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

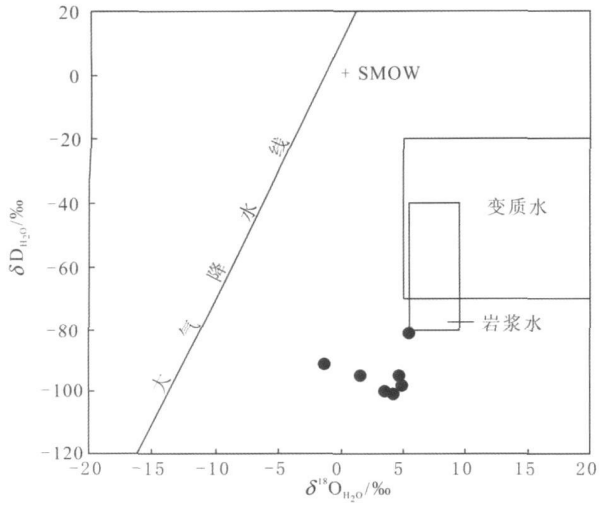


图 13 新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼成矿流体的 δD_{H_2O}-$\delta^{18}O_{H_2O}$图解

Fig. 13 δD_{H_2O}-$\delta^{18}O_{H_2O}$ diagram of Lailisigao'er-3571 Cu-Mo ore-forming fluid, western Tianshan, Xinjiang

成矿年龄[17], 这与本文获得的铜钼矿化斑岩体成岩年龄在误差范围内一致, 证实了莱历斯高尔-3571 斑岩型铜钼成矿作用发生在早石炭世。在矿田所在区域的博罗霍洛古生代岛弧带中, 广泛分布的大哈拉军山组火山岩形成于 345~ 325 Ma(早石炭世)[36], 阿希金矿灰白色含金石英脉中石英流体包裹体的 Rb-Sr 等时线年龄为(340±8) Ma(早石炭世)[36]。可见, 早石炭世大规模岩浆活动、斑岩型铜钼和浅成低温热液型金成矿作用是相同地质过程中的不同表现形式, 新疆西天山海西期斑岩-浅成低温热液铜钼金成矿系列客观存在, 并具有找矿预测意义。

7 结论

新疆西天山莱历斯高尔-3571 铜钼矿田形成于博罗霍洛早石炭世陆缘弧。矿田内强烈角岩化志留系粉砂泥岩中侵入了花岗闪长斑岩小岩体群, 伴随陆缘弧构造-岩浆-热液过程发生铜钼矿化。测得花岗闪长斑岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(350±0.65) Ma 和(346±1.2) Ma, 成岩成矿时代为早石炭世。

铜钼硫化物矿体呈脉状、板状和透镜状, 产在花岗闪长斑岩体顶部或边部、接触带和附近围岩中。从岩体到围岩, 热液蚀变具有从钾硅酸盐化到绢云母化再到青磐岩化的分带性, 铜钼硫化物矿化显示从浸染状、细脉浸染状到细脉网脉状等矿石构造变化。矿石中金属矿物主要为辉钼矿、黄铜矿、磁黄铁矿、斑铜矿、黄铁矿等, 具有斑岩型铜钼矿化特征。

花岗闪长斑岩小岩体高硅、低镁、富铝、富碱、高钾, Rb、Ba、Th 等大离子元素富集和 Ta、Hf、Zr、Sm、Sr、Y、Yb 等高场强元素亏损, 微量元素洋中脊花岗岩标准化分布曲线与陆缘弧花岗岩分布型式相似。REE 总量(133.84×10^{-6})明显低于地壳重熔 S 型花岗岩, 初始值 I_{Sr}= 0.7079~ 0.7103, $\varepsilon_{Nd}(t)$= -0.61~ -3.71, 岩浆具壳幔混合源或下地壳源性质。

铜钼矿石 $\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$= 2.7‰~ 4.3‰, $^{206}Pb/^{204}Pb$= 18.0997~ 18.2588, $^{207}Pb/^{204}Pb$= 15.6052~ 15.6242, $^{208}Pb/^{204}Pb$= 38.1245~ 38.3078, 成矿金属元素来自上地幔和下地壳, 与准噶尔洋壳向南向哈萨克斯坦-伊犁板块之下俯冲伴随的陆缘弧岩浆直接有关。成矿晚阶段流体 $\delta^{18}O_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$= -1.33‰~ 5.46‰, $\delta D_{H_2O\ V\text{-}SMOW}$= -81‰~ -101‰, 为岩浆水混合了大气降水。

新疆西天山莱历斯高尔-3571 斑岩型铜钼矿与阿希浅成低温热液型金矿同形成于早石炭世, 应划归为哈萨克斯坦-伊犁板块东北部早石炭世陆缘弧环境中的铜钼金成矿系列, 具有实际找矿勘查指导意义。

在研究和成文过程中得到陈毓川院士、翟裕生院士、董连慧总工程师、冯京教授级高级工程师等专家的指导和帮助, 在地质过程与矿产资源国家重点实验室、中国科学院地质与地球物理研究所和中国地质科学院等相关实验室完成了本文相关实验测试工作, 笔者对他们表示衷心感谢!

参考文献

[1] 芮宗瑶, 黄崇柯, 齐国明, 等. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 1-350.

[2] 吴淦国, 董连慧, 薛春纪, 等. 新疆北部主要斑岩铜矿带[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-335.

[3] 刘德全, 陈毓川, 王登红, 等. 土屋—延东铜钼矿田与成矿有关问题的讨论[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 334-344.

[4] Perello J, Cox D, Garamjav D, et al. Oyu Tolgoi, Mongolia: Silure-Devonian porphyry Cu-Au-(Mo) and high-sulfidation Cu mineralization with a Cretaceous chalcocite blanket[J]. Economic Geology, 2001, 96: 1407-1428.

[5] 杨文平, 张招崇, 周刚, 等. 阿尔泰铜矿带南缘希勒克特哈腊苏斑岩铜矿的发现及其意义[J]. 中国地质, 2005, 32(1): 107-114.

[6] 赵战锋, 薛春纪, 张立武, 等. 准噶尔东北缘玉勒肯哈腊苏

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

铜矿的发现及意义[J]. 有色金属, 2009, 61(4): 124-128.
[7] 张锐, 张云孝, 佟更生, 等. 新疆西准包古图地区斑岩铜矿找矿的重大突破及意义[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1354-1360.
[8] 薛春纪, 赵战锋, 吴淦国, 等. 中亚构造域多期叠加斑岩铜矿化: 以阿尔泰东南缘哈腊苏铜矿床地质、地球化学和成岩成矿时代研究为例[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 53-82.
[9] 孙继东, 王崇礼, 于风池. 新疆精河莱历斯高尔铜钼矿床原生地球化学异常[J]. 西安地质学院学报, 1992, 14(4): 29-35.
[10] 隗合明, 吴文奎, 薛春纪. 新疆西天山金属矿床成矿系列及形成演化规律[J]. 地质学报, 1999, 73(3): 219-230.
[11] 王志良, 毛景文, 张作衡, 等. 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演化[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 836-847.
[12] 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 中国新疆铜矿床和镍矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 30-34.
[13] 张良臣, 刘德权. 中国新疆优势金属矿产成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 203-208.
[14] 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 等. 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, 2007: 311-418.
[15] 李伍平, 姜常义, 谢广成, 等. 博罗科努加里东褶皱带海西早期花岗岩地质特征[J]. 西安地质学院学报, 1995, 17(1): 43-49.
[16] 朱志新, 王克卓, 徐达, 等. 依连哈比尔尕山石炭纪侵入岩锆石 SHIRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质通报, 2006, 25(8): 986-991.
[17] 李华芹, 王登红, 万阈, 等. 新疆莱历斯高尔铜钼矿床的同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2437-2443.
[18] Pearce J A, Harris B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956-983.
[19] 邱家骧. 应用岩浆岩岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 225-248.
[20] Sun S S, McDonoung W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in Ocean Basins. London: Geological Society Special Publications, 1989, 42: 313-345.
[21] 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 299-320.
[22] Anczkiewicz R, Oberli F, Burg J P, et al. Timing of normal faulting along the Indus Suture in Pakistan Himalaya and a case of major $^{231}Pb/^{235}U$ initial disequilibrium in zircon[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 1991: 101-114.
[23] Gao S, Liu X M, Yuan H L, et al. Determination of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICP-MS[J]. Geostandard Newsletters, 2002, 26: 181-195.
[24] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Geochronology Center, Special Publication, 2003(4): 1-70.
[25] Xiao W J, Han C M, Yuan C. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32: 102-117.
[26] Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon[M]// Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1979: 509-567.
[27] Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry[M]. 4th ed. Berlin: Springer-Verlag, 1997: 119-120.
[28] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics: The model[J]. Tectonophysics, 1981, 75: 135-162.
[29] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 2002, 30(3): 73-81.
[30] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 216-235.
[31] Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Economic Geology, 1974, 69(6): 843-883.
[32] Sheets R W, Nesbitt B E, Muehlenbachs K. Meteoric water component in magmatic fluids from porphyry copper mineralization, Babine Lake area, British Columbia[J]. Geology, 1996, 24: 1091-1094.
[33] Zhu Y F, Jiang N, Zeng Y S. Geochemistry of the ore-forming fluids in gold deposits from the Taihang Mountains, northern China[J]. International Geology Review, 2001, 43: 457-473.
[34] 刘敏, 王志良, 张作衡, 等. 新疆东天山土屋斑岩铜矿床流体包裹体地球化学特征[J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1446-1455.
[35] 张志欣, 杨富全, 闫升好, 等. 新疆包古图斑岩铜矿床成矿流体及成矿物质来源: 来自硫、氢和氧同位素证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 707-716.
[36] 李华芹, 陈富文. 中国新疆区域成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 169-205.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net