

郭周平, 赵辛敏, 白赟, 等. 北祁连浪力克铜矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 691-701.
Guo Zhouping, Zhao Xinmin, Bai Yun, et al. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Langlike copper deposit in North Qilian Mountain and its geological implications[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 691-701(in Chinese with English abstract).

北祁连浪力克铜矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义

郭周平¹ 赵辛敏¹ 白赟² 张江伟¹ 孔会磊¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054;
2. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 浪力克铜矿床是北祁连造山带中段冷龙岭火山岩带内的一个中型铜矿床, 铜矿体主要赋存于火山通道内的石英闪长玢岩及其邻近的安山岩中, 文章在对矿化特征分析的基础上, 对其进行了成岩成矿年代学研究。采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年技术, 得到含矿岩体石英闪长玢岩的成岩年龄为(461.5±7.3) Ma, 通过含辉钼矿矿石中辉钼矿的 Re-Os 同位素分析, 获得其模式年龄为(467.1±6.3) Ma~(471.3±6.7) Ma, 等时线年龄为(470.5±3.4) Ma, 表明矿床形成于中奥陶世, 成矿与石英闪长玢岩具有密切的时空关系。综合分析表明, 浪力克成岩成矿作用发生在北祁连洋俯冲形成的岛弧环境, 矿床具有斑岩(次火山岩)型矿床的特征, 这对浪力克铜矿床成因类型的进一步查明和指导找矿工作具有重要意义。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 辉钼矿 Re-Os 年龄; 浪力克铜矿; 斑岩(次火山岩)型矿床; 北祁连
中图分类号: P597.3; P618.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2015)03-0691-11

Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Langlike copper deposit in North Qilian Mountain and its geological implications

GUO Zhou-ping¹, ZHAO Xin-min¹, BAI Yun², ZHANG Jiang-wei¹, KONG Hui-lei¹

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Earth Science & Resources College, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Located in the Lenglongling volcanic belt of North Qilian Mountain, the Langlike copper deposit is a medium-sized deposit with mineralization mainly occurring in quartz dioritic porphyrite. Based on an analysis of the mineralization features of the deposit, the authors used the zircon LA-ICP-MS U-Pb and molybdenite ICP-MS Re-Os highly precise dating techniques to study the ore-bearing quartz dioritic porphyrite and five samples of molybdenum collected from the deposit. Zircon U-Pb dating yielded an age of (461.5±7.3) Ma for quartz dioritic porphyrite. The Re-Os model ages of the molybdenite samples vary from (467.1±6.3) Ma to (471.3±6.7) Ma and the Re-Os isochron age is (470.5±3.4) Ma. The similar zircon U-Pb and molybdenite Re-

收稿日期: 2015-01-27; 改回日期: 2015-01-30

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212011221043)资助。

作者简介: 郭周平, 男, 1980年生, 助理研究员, 从事区域成矿及成矿规律研究; E-mail: zhouping.guo@163.com。

Os isotopic ages suggest that the Langlike copper deposit formed in middle Ordovician and it had a close temporal relationship with the quartz dioritic porphyrite. Combined with the tectonic evolution of the North Qilian, the authors hold that the deposit was produced in an island arc tectonic setting triggered by slab subduction and was similar to the porphyry deposit. These characteristics are of important significance for investigating the genetic type of the Langlike copper deposit and for further prospecting work.

Key words: zircon U-Pb age; molybdenite Re-Os age; Langlike copper deposit; porphyry (subvolcanic rock) type deposit; North Qilian Mountain

About the first author: GUO Zhou-ping, male, born in 1980, assistant researcher, mainly engages in the study of regional metallogenic and metallogenetic regularity; E-mail: zhouping.guo@163.com.

北祁连造山带位于秦祁昆巨型多旋回复合造山带中段,夹持于华北板块、塔里木板块和中祁连—柴达木板块之间。作为中国最重要的加里东期有色金属成矿带^[1-2],自20世纪50年代以来,白银厂块状硫化物铜多金属矿床和镜铁山铁矿床的被先后发现并受到重视。浪力克铜矿位于青海省门源县仙米乡,该矿由青海省东部地质队1957年发现,后经青海省祁连山队于1958—1961年进行地表和初步检查工作及1988年青海省第二地质队的详查工作,探明矿床已达中型规模,但其科学研究程度很低,如矿床成岩成矿时代、与成矿有关火山岩的研究等还未起步,矿床成因类型也存在海相火山岩型与斑岩(次火山岩)型矿床的讨论,大量制约找矿的科学问题尚待解决。本文在浪力克铜矿床矿化特征分析的基础上,采用锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os先进的精细测年技术,选择矿区内与成矿有关的石英闪长玢岩和含辉钼矿矿石样品分别进行锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os同位素年代学研究,在准确厘定成岩成矿年代的基础上,探讨成矿与成岩的关系,为进一步阐明矿床的成因类型提供依据,并结合区域构造演化资料探讨其形成的地球动力学背景。

1 区域地质背景

研究区位于门源县东北部,隶属于北祁连构造带中段(图1),区内出露地层奥陶系下统火山岩组、奥陶系下统碎屑岩组、奥陶系中统大梁组、泥盆系老君山组、石炭系羊虎沟组、二叠系大黄沟组、二叠系窑沟组、三叠系大西沟组、三叠系南营儿组和第四系。其中,主要地层为奥陶系下统火山岩组,该套火山岩岩石组成较复杂,下部以喷溢相为主,由玄武岩、玄武安山岩、安山岩组成,自下而上岩性显示出由基性变为酸性的趋势;上部以爆发相为主,除中基性火山熔岩外,主要是火山碎屑岩,包括火

山集块岩、火山角砾岩、凝灰岩及石英安山岩等。区域断裂构造发育,多呈NW-SE向展布,发育紧闭型线状褶皱及NW向断裂,局部发育北东或北北东向短轴褶皱平移断层。褶皱构造主要为冷龙岭复式向斜,断裂以红直大断裂、下红沟—银灿剪切断裂等为主。该带火山机构发育,形成若干火山喷发中心,呈NW-SE向长条状分布。区内岩浆活动强烈,分布面积广泛,从中性—酸性至碱性均较发育。

2 矿床地质特征

2.1 地质概况

浪力克矿区产于北祁连造山带中段冷龙岭早古生代岛弧火山岩带内。矿区出露地层主要为下奥陶统阴沟群火山岩组及第四系(图1),下奥陶统阴沟群火山岩组为一套浅变质的中—中基性火山岩—碎屑岩建造,以海相安山质或玄武安山质熔岩为主,厚度由几米到几十米不等,也有火山角砾岩、安山质、玄武安山质角砾熔岩和凝灰熔岩等火山爆发作用形成的碎屑岩类产出。浪力克矿区为一火山喷发中心,从矿区各类火山岩厚度变化很大,延伸不稳定,走向上呈半环状弧形展布,次火山岩呈半环状或岩栓、岩钟状产出,可推测火山以中心式喷发为主。矿区岩浆岩主要为石英闪长玢岩,其次为隐爆角砾岩、闪长岩、辉绿玢岩、辉长辉绿玢岩等组成,均呈岩枝、岩脉状产出。

2.2 含矿岩体特征

矿区发育2期石英闪长玢岩,第1期石英闪长玢岩主要分布于三个矿体群范围内,且出露较广,与围岩多为顺层产出,少数斜切围岩,一般与围岩呈渐变关系,界线不清,岩石中常含有较多的黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物且蚀变强烈,与成矿关系密切。第2期石英闪长玢岩主要分布于矿区北部远离矿体群,一般为顺层侵入,在矿体群附近见有斜

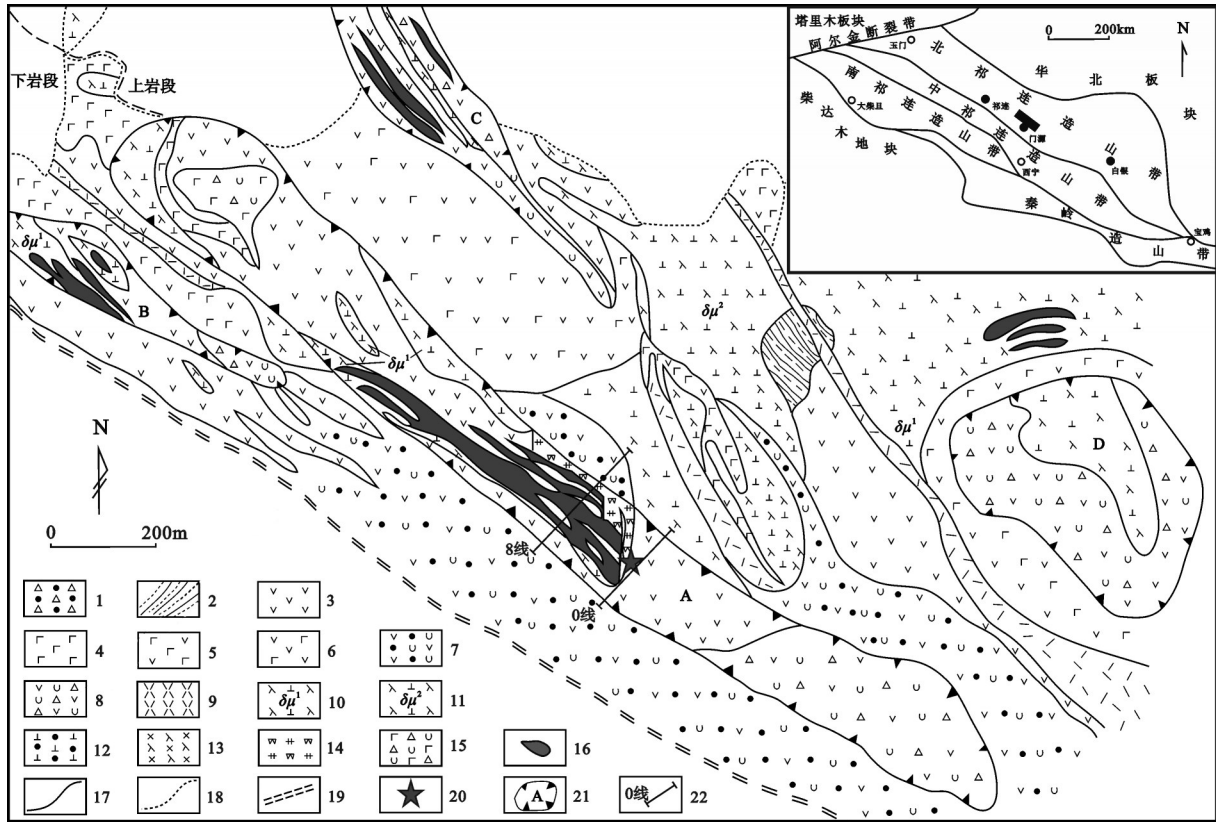


图1 浪力克铜矿矿区地质图^①

1—第四系坡积物; 2—含炭板岩夹灰岩; 3—安山岩; 4—玄武岩; 5—安山玄武岩; 6—玄武安山岩; 7—安山凝灰熔岩; 8—安山质角砾熔岩; 9—流纹岩; 10—第1期石英闪长玢岩; 11—第2期石英闪长玢岩; 12—石英闪长岩; 13—辉绿玢岩; 14—风化碎裂岩; 15—玄武角砾熔岩; 16—铜矿体; 17—岩相、岩性界线; 18—第四系与基岩界线; 19—基底断裂; 20—采样位置; 21—火山通道及编号; 22—勘探线编号及位置

Fig. 1 Geological map of the Langlike Copper ore district^①

1—Quaternary slopewash sediments; 2—Carbonaceous slate limestone; 3—Andesite; 4—Basalt; 5—Andesitic basalt; 6—Basaltic andesite; 7—Andesitic tuff lava; 8—Ansan breccia lava; 9—Rhyolite; 10—First stage quartz dioritic porphyrite; 11—Second stage quartz dioritic porphyrite; 12—Quartz diorite; 13—Diabase; 14—Weathered shattered rock; 15—Basaltic breccia lava; 16—Copper orebody; 17—Facies, lithologic boundary; 18—Quaternary and bedrock boundary; 19—Basement fault; 20—Sampling point; 21—Volcanic conduit and its serial number; 22—Serial number and position of exploration line

切第1期石英闪长玢岩和矿体的现象。与成矿关系密切的第1期石英闪长玢岩和成矿后形成的第2期石英闪长玢岩在岩石结构构造及矿物组成方面差别不大。下面就与成矿关系密切的石英闪长玢岩的岩相学特征进行如下描述:

石英闪长玢岩为灰绿色, 块状构造, 多斑结构, 基质为细粒—隐晶质结构(图2-a, b), 岩石中斑晶由斜长石和角闪石组成, 含量超过65%, 斜长石多呈自形板状, 晶体大小不等, 多在0.3~1 mm, 常发生绿帘石化、黝帘石化蚀变, 角闪石多呈自形一半自形柱状, 颗粒大小多在0.3~0.5 mm, 棕色—浅黄色, 多色性较强, 常发生绿泥石化。基质主要由细小的斜

长石与石英组成。

2.3 矿化与围岩蚀变

矿床由3个矿体群组成, 包括大小矿体23个, I矿群为矿区的主要矿体, 每个矿群中的矿体均具有平行分布、成群产出的特点, 在平面上平行排列, 在剖面上呈叠瓦状产出。矿体主要赋存于石英闪长玢岩及其邻近的安山岩中, 矿体走向NW-SE, 向南东倾伏, 与区域构造线一致(图3)。矿石矿物由黄铁矿、黄铜矿及少量磁黄铁矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿组成(图2-c~f), 偶见黝铜矿、磁铁矿, 地表见孔雀石、褐铁矿, 脉石矿物为石英和长石。矿石组构为浸染状、碎裂结构、条带状构造。

① 顾群, 蔡智民, 肖天保. 青海省门源县浪力克铜矿详查报告[R]. 青海省第二地质队, 1988, 1-82.

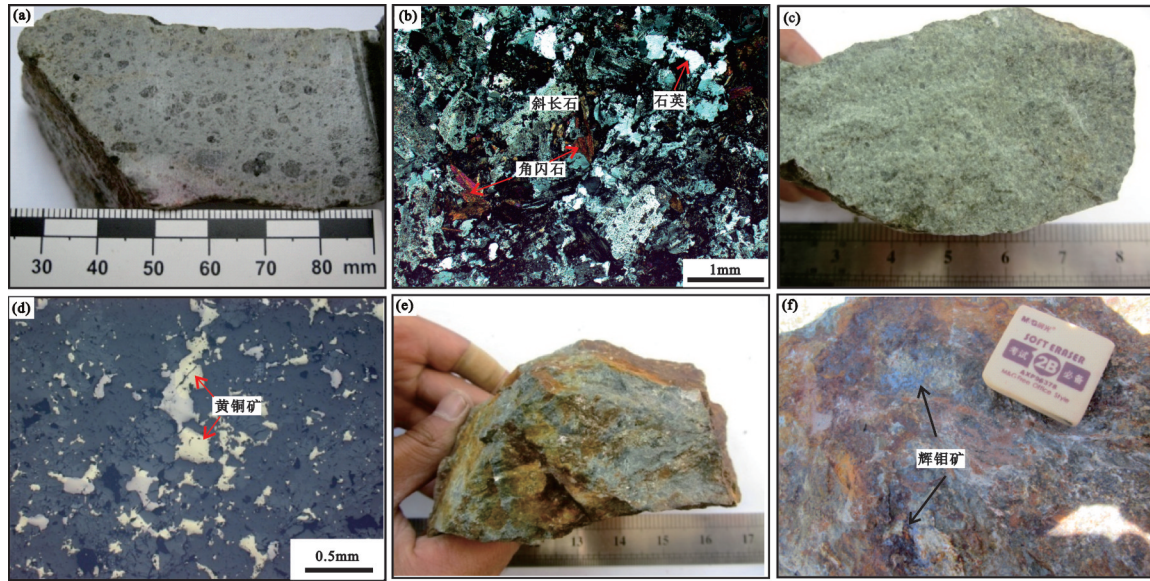


图2 浪力克矿区石英闪长玢岩和典型矿石照片
 a、b—石英闪长玢岩手标本及镜下(正交偏光); c、d—矿化的石英闪长玢岩受标本及镜下(反射光)照片; e—浸染状铜矿石;
 f—呈浸染状、薄膜状产于铜矿石中的辉钼矿

Fig. 2 Quartz dioritic porphyrite and typical ore photograph of the Langlike deposit

a, b—Hand specimen photograph and micrograph of quartz dioritic porphyrite (crossed nicols); c, d—Hand specimen photograph and micrograph of ore-bearing quartz dioritic porphyrite (reflected plainlight); e—Disseminated copper mineralization; f—Disseminated and membrane molybdenite developed in copper mineralization

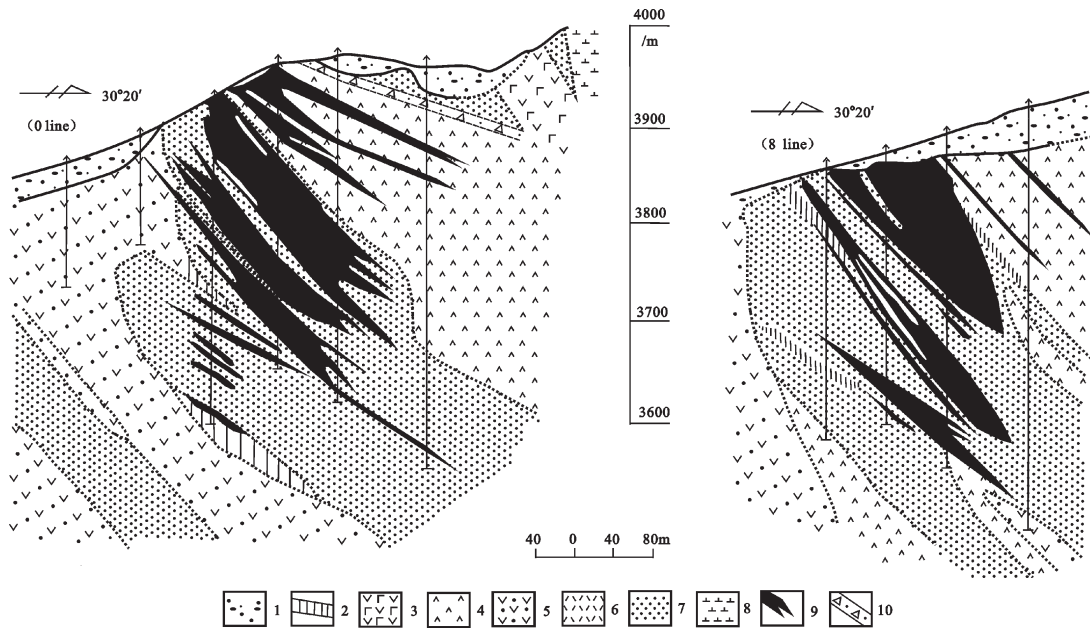


图3 浪力克铜矿床I号矿体剖面图^①

1—第四系; 2—辉绿岩; 3—安山质玄武质凝灰熔岩; 4—安山岩; 5—安山质凝灰熔岩; 6—流纹岩; 7—石英闪长玢岩;
 8—闪长岩; 9—铜矿体; 10—构造角砾岩

Fig. 3 Geological section of No. I orebody in the Langlike copper deposit^①

1—Quaternary; 2—Diabase; 3—Basaltic andesitic tuff lava; 4—Andesite; 5—Andesitic tuff lava; 6—Rhyolite; 7— Quartz dioritic porphyrite;
 8—Diorite; 9—Copper orebody; 10—Tectonic breccias

① 顾群, 蔡智民, 肖天保. 青海省门源县浪力克铜矿详查报告[R]. 青海省第二地质队, 1988, 1-82.

围岩蚀变主要为硅化、绿帘石化、绢云母化、阳起石化、绿泥石化、黄铁矿化及高岭土化等。近矿围岩蚀变可分出3个带:首先是绿帘石-阳起石化带,岩石主要由绿帘石、阳起石组成,呈灰、灰绿、黄灰色等,风化面因常有褐铁矿等而呈铁锈色、褐色,其他矿物尚有石英、绢云母、绿泥石、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、辉铜矿、斑铜矿等,该带范围广,其产出基本与矿体相一致,为主要的成矿围岩蚀变。其次是硅化带,岩石矿物组合较为简单,主要由微粒变晶石英组成,另有少量绢云母、绿帘石、黄铁矿、黄铜矿等,此带在绿帘石-阳起石化带的外侧产出,与其呈渐变过渡关系,与矿体的关系也较密切。最后是绢云母-绿泥石化带,主要由细粒至微粒及鳞片状的绢云母、绿泥石、石英组成,黄铁矿、黄铜矿偶尔见之,分布于矿体的南北两侧,矿化微弱。

3 样品及分析方法

3.1 样品采集与矿物分选

在浪力克铜矿区采集了1件与成矿有关的第1期石英闪长玢岩样品(12LLK-H6)和5件辉钼矿样品(12LLK-H1~H5)分别进行LA-ICP-MS锆石U-Pb定年和Re-Os定年,采样位置见实测地质剖面(图4)。

用于锆石U-Pb定年的第1期石英闪长玢岩样品较新鲜,锆石分选在河北区域地质调查研究所采用人工破碎重砂淘洗法从石英闪长玢岩样品分离锆石,最后在双目镜下挑纯,锆石纯度达99%以上,

无氧化、无污染。

5件辉钼矿样品采于浪力克矿区不同位置的含辉钼矿矿石中,辉钼矿呈浸染状、薄膜状分布于铜矿石内(图2-f),辉钼矿单矿物的分离在河北区域地质调查研究所完成,先后经过粉碎、重力分离、电磁分离、粗选和精选,最后在实体显微镜下挑选获得,辉钼矿纯度在99%以上,晶体新鲜、无氧化、无污染,符合测试要求。

3.2 锆石U-Pb测年方法

锆石的CL图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室电子探针仪加载的阴极发光仪上完成。LA-ICP-MS锆石U-Pb定年测试分析在西北大学大陆动力学教育部重点实验室完成,采用Agilent 7500型ICP-MS和德国Lambda Physik公司的ComPex 102ARF准分子激光器(工作物质ArF,波长193 nm)以及MicroLas公司GeoLas 200M光学系统联机进行。激光剥蚀斑束直径为30 μm,激光剥蚀样品的深度为20~40 μm,以He为载气。采取单点剥蚀,每完成5个测点的样品测定,加测标样一次。在所测锆石样品分析40个点之前、后各测1次NISTSRM610,锆石年龄计算采用国际标准锆石91500作为外标,元素含量采用NISTSRM610作为外标,²⁹Si作为内标元素进行校正,详细分析步骤和处理方法可参见相关文献^[3-5]。分析结果见表1。

3.3 辉钼矿Re-Os测年方法

辉钼矿样品Re、Os同位素测试工作在国家地质实验测试中心Re-Os同位素实验室完成。采用

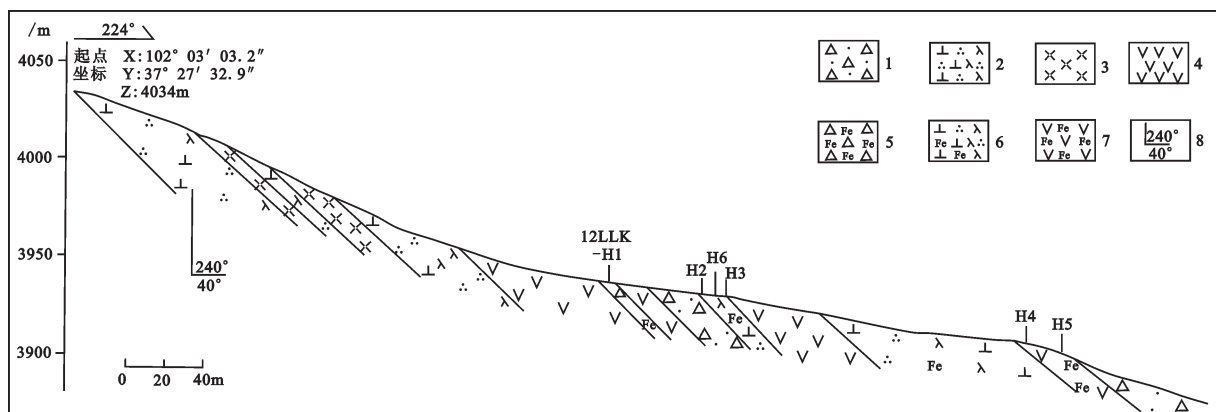


图4 浪力克铜矿区采样剖面图

1—坡积物; 2—石英闪长玢岩; 3—流纹岩; 4—安山岩; 5—褐铁矿化蚀变破碎带; 6—矿化的石英闪长玢岩; 7—矿化的安山岩; 8—岩层产状

Fig. 4 Sampling profiles in the Langlike copper ore district

1-Slopewash sediments; 2-Quartz diorite; 3-Rhyolite; 4-Andesite; 5-Limonite altered fracture; 6-Quartz diorite (mineralization);

7-Andesite porphyrite (mineralization); 8-Attitude of rocks

表1 浪力克石英闪长玢岩LA-ICP-MS锆石U-Pb分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb analytical data of zircons from the Langlike copper deposit

测试点	Pb 含量/ 10^{-6}	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
					比值	误差/ 1σ	比值	误差/ 1σ	比值	误差/ 1σ	年龄/Ma	误差/ 1σ	年龄/Ma	误差/ 1σ	年龄/Ma	误差/ 1σ
12LLK-H6-01	80	288	891	0.32	0.0584	0.0021	0.5999	0.0205	0.0746	0.0008	542.6	77.8	477.1	13.0	463.7	4.9
12LLK-H6-02	105	471	1070	0.44	0.0555	0.0015	0.5680	0.0155	0.0740	0.0006	431.5	65.7	456.7	10.0	460.5	3.8
12LLK-H6-03	58	365	647	0.56	0.0576	0.0038	0.5592	0.0503	0.0749	0.0100	522.3	143.5	451.0	32.7	465.6	6.0
12LLK-H6-04	181	716	692	1.04	0.0660	0.0017	1.2616	0.0344	0.1381	0.0014	805.6	53.7	828.6	15.4	833.7	7.7
12LLK-H6-05	118	293	623	0.47	0.0662	0.0018	1.2881	0.0371	0.1401	0.0014	813.0	55.6	840.4	16.5	845.2	7.7
12LLK-H6-06	439	1954	2105	0.93	0.0645	0.0015	1.0450	0.0246	0.1169	0.0010	761.1	50.0	726.4	12.2	712.9	5.9
12LLK-H6-07	108	456	1105	0.41	0.0665	0.0062	0.6287	0.0248	0.0742	0.0011	833.3	194.4	495.3	15.5	461.2	6.7
12LLK-H6-09	143	532	713	0.75	0.0635	0.0020	1.0750	0.0326	0.1226	0.0015	727.8	66.7	741.2	15.9	745.8	8.9
12LLK-H6-10	114	454	578	0.78	0.0640	0.0018	1.1011	0.0301	0.1247	0.0012	742.6	258.3	753.9	14.6	757.7	7.1
12LLK-H6-11	227	1301	1978	0.66	0.0585	0.0020	0.6012	0.0227	0.0742	0.0009	546.3	71.3	478.0	14.4	461.4	5.2
12LLK-H6-12	59	183	695	0.26	0.0578	0.0020	0.5910	0.0203	0.0743	0.0009	520.4	77.8	471.5	13.0	461.8	5.3
12LLK-H6-13	62	222	686	0.32	0.0583	0.0018	0.5930	0.0175	0.0740	0.0009	542.6	66.7	472.8	11.1	460.3	5.2
12LLK-H6-14	92	448	888	0.50	0.0548	0.0016	0.5618	0.0162	0.0742	0.0007	405.6	69.4	452.7	10.6	461.4	4.0
12LLK-H6-15	85	365	893	0.41	0.0554	0.0017	0.5666	0.0175	0.0744	0.0008	431.5	65.7	455.8	11.3	462.7	5.0
12LLK-H6-16	81	194	451	0.43	0.0650	0.0018	1.2112	0.0349	0.1352	0.0015	772.2	54.6	805.7	16.0	817.7	8.7
12LLK-H6-17	163	904	1405	0.64	0.0574	0.0014	0.5860	0.0140	0.0741	0.0008	505.6	56.5	468.3	9.0	460.8	4.9
12LLK-H6-18	268	1327	1020	1.30	0.0650	0.0016	1.1265	0.0294	0.1254	0.0013	772.2	56.5	766.1	14.0	761.4	7.5
12LLK-H6-19	18	147	215	0.69	0.0552	0.0062	0.5554	0.0591	0.0739	0.0020	420.4	251.8	448.5	38.6	459.8	11.8

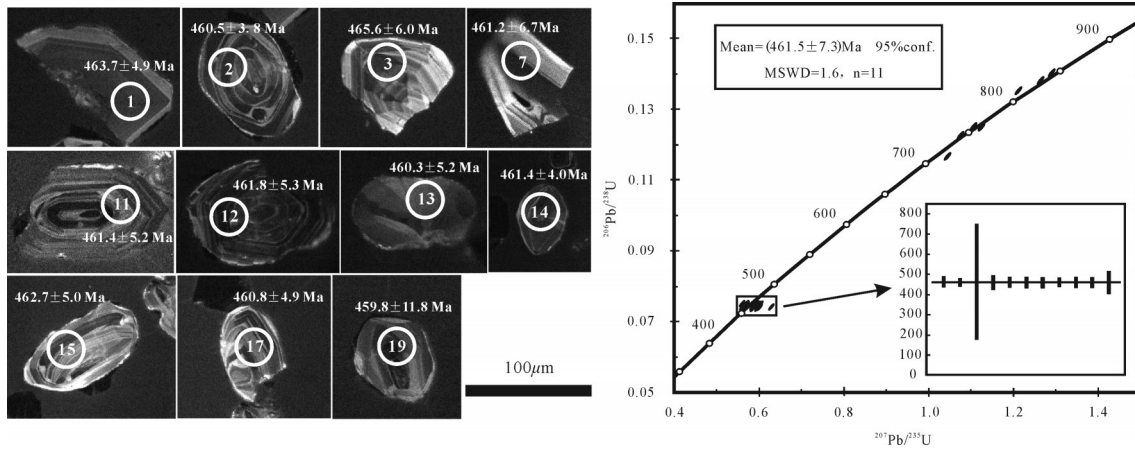


图5 浪力克矿区石英闪长玢岩(12LLK-H6)的锆石阴极发光图像和锆石U-Pb谐和图
Fig. 5 CL images and concordia diagram of zircon from quartz dioritic porphyrite in the Langlike deposit

美国TJA公司生产的电感耦合等离子体质谱仪TJA X-series ICP-MS测定Re、Os同位素比值,对于Re-Os含量很低的样品采用美国热电公司(Thermo Fisher Scientific)生产的高分辨电感耦合等离子体质谱仪HR-ICP-MS Element 2进行测量。对于Re:选择质量数185、187,用190监测Os。对于Os:选择质量数为186、187、188、189、190、192,用185监测Re。TJA X-series ICP-MS测得的Re、Os和¹⁸⁷Os的空白值分别为(0.0033±0.0001)×10⁻⁹、(0.00021±0.00004)×10⁻⁹、(0.00014±0.00003)×10⁻⁹,远小于所测样品和标样中Re、Os含量,因此不会影响实验结果。普通Os是根据Nier值的Os同位素丰度,通过测定¹⁹²Os/¹⁹⁰Os比值算得。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,监控化学流程和分析数据的可靠性。分析标样(HLP)Re和¹⁸⁷Os及模式年龄与标准值在误差范围内完全一致,表明所获辉钼矿的数据准确可靠(表2)。Re-Os同位素分析原理及详细分析流程参见相关文献^[6-9]。模式年龄*t*按下式计算: $t = \ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})/\lambda$,其中, $\lambda(^{187}\text{Re} \text{ 衰变常数}) = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。

4 测试结果

4.1 锆石U-Pb年龄

石英闪长玢岩(12LLK-H6)样品中锆石以自形粒状为主,颗粒较大,粒径多为50~100 μm。阴极发光图像(图5)揭示大部分锆石具有清晰的岩浆韵律环带,锆石中U含量为215×10⁻⁶~2105×10⁻⁶,Th含量为147×10⁻⁶~1954×10⁻⁶,Th/U比值介于0.26~1.3,平均0.61,显示出岩浆锆石的特点^[10]。

石英闪长玢岩(12LLK-H6)样品共测定20个点,8、20号点的测试异常已删去,剩余18个分析点

表2 浪力克铜矿中辉钼矿Re-Os同位素测试结果
Table 2 Re-Os isotope data for molybdenite from the Langlike copper deposit

样号	样重/g	Re/10 ⁻⁶		普Os/10 ⁻⁹		¹⁸⁷ Re/10 ⁻⁶		¹⁸⁷ Os/10 ⁻⁶		模式年龄/Ma	
		测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ
12LLK-H1	0.00209	1.11	0.01	0.9230	2.0690	0.701	0.005	5474	43	467.1	6.3
12LLK-H2	0.00116	6.67	0.06	0.9985	2.2382	4.19	0.04	33021	264	471.3	6.7
12LLK-H3	0.00214	6.98	0.07	0.8804	1.9734	4.39	0.04	34510	274	470.1	7.0
12LLK-H4	0.00215	7.15	0.06	0.9040	3.0394	4.50	0.04	35365	302	470.2	6.7
12LLK-H5	0.00102	5.32	0.04	0.9138	2.0484	3.35	0.03	26201	210	468.1	6.5

中有 11 个测点均投影于谐和线上或谐和线附近, 具有非常一致的年龄, 变化于(459.8±11.8) Ma~(465.6±6.0) Ma, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为(461.5±7.3) Ma, MSWD=1.6 (图 5), 代表了岩浆结晶年龄, 表明其形成于中奥陶世。

4.2 辉钼矿 Re-Os 年龄

浪力克铜矿 5 件矿石样品内辉钼矿 Re-Os 测试结果见表 2。5 件辉钼矿 Re 的含量变化范围为(1.11±0.01)×10⁻⁶~(7.15±0.06)×10⁻⁶, Re 与 ^{187}Os 含量变化协调, 给出的模式年龄变化范围为(467.1±6.3) Ma~(471.3±6.7) Ma, 加权平均值为(469.3±2.9) Ma, MSWD=0.28(图 6), 采用 ISOPLOT 软件对 5 件样品中辉钼矿数据进行等时线拟合(图 6), 获得 Re-Os 等时线年龄为(470.5±3.4) Ma, MSWD=0.22, 等时线年龄与模式年龄的加权平均值在误差范围内基本一致。

5 讨 论

5.1 成岩成矿时代

成岩成矿年代学研究是分析矿床成因和阐明构造-岩浆-成矿关系的关键, 也是建立区域成矿体系及成矿时间结构的必要途径, 因此成为近年来矿床学研究领域的热点。本次工作首次对浪力克铜矿床进行了与成矿有关的石英闪长玢岩高精度 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和含辉钼矿矿石的 Re-Os 测年, 获得与成矿有关的石英闪长玢岩的成岩年龄为(461.5±7.3) Ma。尽管近年来关于锆石 U-Pb 年龄能否代表岩体侵位年龄还存在一些争论^[11-12], 但对于面积较小(<100 km²)的岩体, 公认其侵位-结晶时差很小(<1.5 Ma), 锆石 U-Pb 年龄能代表岩体的侵位年龄, 本文所研究的石英闪长玢岩面积很小, 为火山通道内的次火山岩体, 岩体侵位年龄与结晶冷却的时差很小, 因此, 本文获得的锆石年龄在误差范围内完全可以代表岩体的形成时代。通过对含辉钼矿矿石中的辉钼矿进行 Re-Os 同位素分析, 获得其模式年龄为(467.1±6.3) Ma~(471.3±6.7) Ma, 等时线年龄为(470.5±3.4) Ma。虽然部分学者认为, 辉钼矿中 Re 和 Os 在低温成矿溶液中可能会发生活化^[13], 但由于辉钼矿 Re-Os 同位素体系的封闭温度较高(约 500℃)^[14], 不易受到后期热液、变质和构造事件的影响^[15], 因此, 辉钼矿能够精确代表硫化物的形成时代^[16]。另外, 辉钼矿 Re-Os 同位

素体系容易发生失耦作用, 造成样品测试结果的重现性较差^[15], 但在颗粒较细(<2 mm)的情况下进行测试以及采用等时线年龄, 可以消除失耦作用^[17-18]。因此, 本次测试所获的 Re-Os 等时线年龄(470.5±3.4) Ma 代表了成矿年龄。上述高精度成岩和成矿年龄在误差范围内一致, 表明浪力克铜矿形成于中奥陶世, 也为浪力克铜矿床与石英闪长玢岩的亲缘关系提供了时代证据。

5.2 成矿动力学背景

对北祁连造山带的板块构造体制和构造格局, 已有不少研究者做过较详细研究和讨论, 并有较一致的共识, 大多数人认为北祁连从古元古代中期开始, 大陆岩石圈拉伸、减薄, 发生裂谷化, 发育元古宙大陆溢流玄武岩^[19-22]; 至新元古代, 裂谷作用进一步加强, 发育以双峰式火山岩为特征的大陆裂谷火山作用; 至晚寒武世, 最终发生大陆裂解和分离, 形成北祁连早古生代洋盆, 之后奥陶纪北祁连洋盆开始了俯冲消减作用(可贯穿整个奥陶纪)^[19-21, 23-25], 对于俯冲消减样式, 李文渊等^[26-27]认为存在构造转换, 西段为洋-陆俯冲的活动大陆边缘, 东段为洋-洋俯冲的沟-弧-盆系大陆边缘。随着高精度锆石 U-Pb 定年方法的广泛应用和大量年龄数据的产生, 现可在区域构造演化的年代学框架内限定岩浆活动的时限, 综合区域构造演化和成岩成矿年代学数据, 浪力克矿床的成岩成矿发生于中奥陶世, 对应于北祁连洋俯冲背景下的沟-弧-盆环境。浪力克矿床的岩石地球化学数据显示(作者待刊数据), 安山岩和石英闪长玢岩的化学特征相似, 均具有高镁(>4%)的特点, 为一套高镁安山质岩石组合, 其特点可以和世界某些高镁安山岩相对比, 形成于岛弧背景, 即浪力克铜矿形成于中奥陶世北祁连洋俯冲背景下的岛弧环境, 这也为前人论述的北祁连岛弧阶段主要在中晚奥陶世提供了进一步的证据^[23]。

5.3 矿床类型及找矿意义

对于浪力克铜矿的矿床类型, 目前有海相火山岩型铜矿床与斑岩(次火山岩)型矿床的讨论。与斑岩铜矿床有关的侵入体内及其周围通常都有由热液引起的强烈的蚀变反应, 并形成稳定的矿物组合, 众所周知的经典斑岩铜矿床的蚀变分带模型是 Lowell et al.^[28]基于美国圣马纽埃-卡拉马祖矿床得出的经典蚀变-矿化分带模型, 其热液蚀变通常

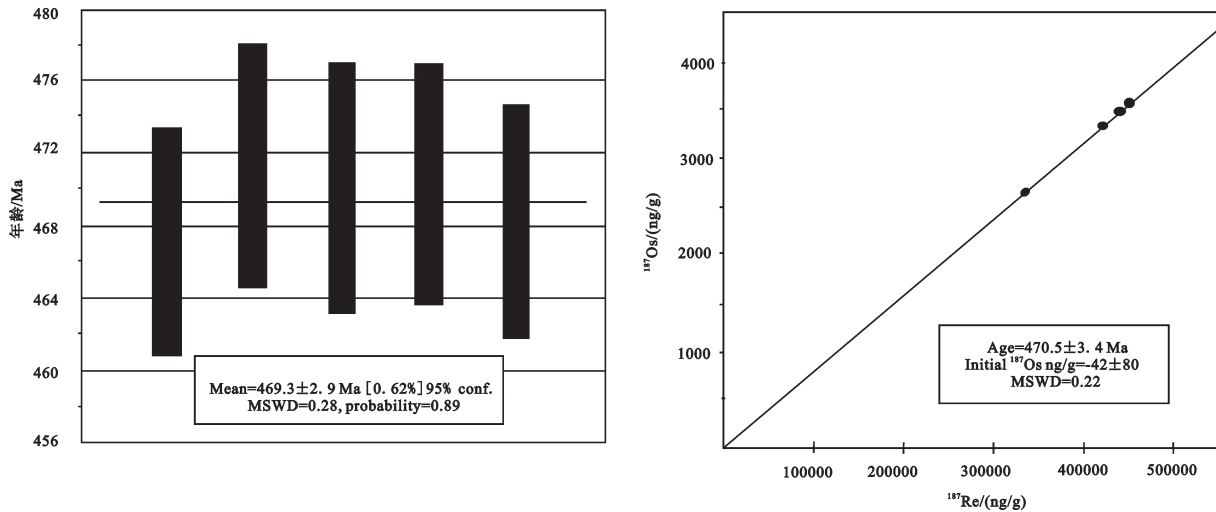


图6 浪力克铜矿床辉钼矿 Re-Os 模式年龄加权平均值和等时线年龄

Fig. 6 Molybdenite Re-Os weighted average model ages and isochron age of the Langlike copper deposit

含有一个钾蚀变核心,并有石英绢云母化、泥化蚀变和青磐岩化蚀变,呈同心圆状围绕着钾蚀变核心。但后来, Hollister et al. [29]发现,洛厄尔模型只适用于与钙碱性侵入岩体有关的斑岩铜矿蚀变分带,含矿岩体多属石英二长岩的范围,可称之为“二长岩模型”,它不能包括所有的含矿岩体,因此他们又提出一种“闪长岩模型”,适用于与闪长岩有关的斑岩铜矿蚀变分带,这种蚀变分带常含有一个钾蚀变核心,周围是青磐岩化蚀变带,而石英-绢云母化蚀变发育较弱甚至缺失。铜矿化在“二长岩模型”中的石英-绢云母化蚀变带特别发育,而在“闪长岩模型”中,铜矿化在钾蚀变带及其周围的青磐岩化蚀变带都有出现。

浪力克矿区的蚀变和矿化具有次火山岩(石英闪长玢岩)岩控的特征,空间上,铜矿化主要发育在石英闪长玢岩内,时间上,石英闪长玢岩的成岩年龄为(461.5±7.3) Ma,含辉钼矿矿石中的辉钼矿等时线年龄为(470.5±3.4) Ma,成岩与成矿年龄在误差范围内一致,表明成矿与石英闪长玢岩有密切时空关系。另外,浪力克矿床的矿化蚀变分带与斑岩型铜矿的“闪长岩模型”具有相似性,只是本矿区目前勘探程度较低,未见到大规模的钾化蚀变,其成矿作用与青磐岩化(绿帘石化)作用关系密切,因此笔者初步认为浪力克铜矿床为斑岩(次火山岩)型铜矿。

北祁连山大规模成矿作用主要集中于大规模

大陆裂解的中元古代早期和古板块汇聚环境的早古生代^[26],在早古生代,北祁连洋壳的俯冲作用使得壳幔物质急剧交换,既发育有海底火山岩浆流体循环成矿作用(以白银厂、石居里沟矿床为代表)^[26,30-32],也有活动大陆边缘花岗岩岩浆热液成矿作用(以塔尔沟、小柳沟为代表)^[33-37],形成了祁连山最具特色的铜、钨、铅、锌、金等金属矿床的聚集,也具有斑岩型铜矿的成矿地质条件,但至今未发现有价值的斑岩型铜矿。浪力克铜矿床类型的初步确定,说明北祁连除蕴含大量海相火山岩型铜矿外,在寻找斑岩(次火山岩)型铜矿方面也具有一定的前景,值得进一步关注。

6 结 论

(1) 浪力克矿床的铜矿体主要赋存于火山通道内的石英闪长玢岩及其邻近的安山岩中, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年表明,含矿石英闪长玢岩的成岩年龄为(461.5±7.3) Ma,含辉钼矿矿石中辉钼矿的 Re-Os 模式年龄为(467.1±6.3) Ma~(471.3±6.7) Ma,等时线年龄为(470.5±3.4) Ma,表明矿床形成于中奥陶世,成矿与石英闪长玢岩具有密切的时空关系。

(2) 结合区域构造演化综合分析,浪力克成矿作用发生在北祁连洋俯冲形成的岛弧环境,矿床具有斑岩(次火山岩)型矿床的特征,这对浪力克铜矿床成因类型的进一步查明和指导找矿工作具有

重要意义。

致谢: 审稿专家及编辑部杨艳老师对本文提出了宝贵修改意见, 在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, et al. 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*, 1999, 63: 1815-1818.
- [2] Tang Z L, Bai Y Li, Li Z L. Geotectonic settings of large and superlarge mineral deposits on the Southwestern margin of the North China plate[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(3): 367-377.
- [3] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 2009, 28(4): 481-492.
Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(4): 481-492 (in Chinese with English abstract).
- [4] 陈迪, 陈焰明, 马爱军, 等. 湖南锡田岩体的岩浆混合成因: 岩相学、岩石地球化学和 U-Pb 年龄证据[J]. *中国地质*, 2014, 41(1): 61-78.
Chen Di, Chen Yanming, Ma Aijun, et al. Magma mixing in the Xitian pluton of Hunan Province: Evidence from petrography, geochemistry and zircon U-Pb age[J]. *Geology in China*, 2014, 41(1): 61-78 (in Chinese with English abstract).
- [5] 段士刚, 张作衡, 魏梦元, 等. 新疆西天山雾岭铁矿闪长岩地球化学及锆石 U-Pb 年代学[J]. *中国地质*, 2014, 41(6): 1757-1770.
Duan Shigang, Zhang Zuoheng, Wei Mengyuan, et al. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the diorite associated with the Wuling iron deposit in Western Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2014, 41(6): 1757-1770 (in Chinese with English abstract).
- [6] Shirey S B, Walker R J. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 1995, 67: 2136-2141.
- [7] Markey R, Stein H, Morgan J. Highly precise Re-Os dating for molybdenite using alkaline fusion and NTIMS[J]. *Talanta*, 1998, 45: 935-946.
- [8] Du A D, Wang S X, Sun D, et al. Precise Re-Os dating of molybdenite using Carius tube, NTIMS and ICP-MS[C]// Piestrzynski A, et al. *Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century*. Balkema, Rotterdam, 2001: 405-407.
- [9] Du A D, Wu S Q, Sun D Z, et al. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 2004, 28: 41-52.
- [10] Hoskin P W O, Black LP. Metamorphic zircon formation by solid state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *J. Metamorph. Geol.*, 2000, 18: 423-439.
- [11] 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. “花岗岩锆石 U-Pb 年龄能代表花岗岩侵位年龄”质疑-花岗岩锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄对比证据[J]. *地质论评*, 2008, 54(6): 775-785
Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Hongfei, et al. Doubts about “the representation of zircon U-Pb age to the emplacement age of granite”: Evidence of comparison between the zircon U-Pb ages and the whole-rock Rb-Sr ages of granite plutons[J]. *Geological Review*, 2008, 54(6): 775-785 (in Chinese with English abstract).
- [12] 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 花岗岩浆侵位与结晶固化时差的研究与构造意义: 以南岭骑田岭花岗岩基为例[J]. *高校地质学报*, 2010, 16(1): 103-118.
Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Hongfei, et al. On the time elapsed from magma emplacement to crystallization-solidification of granites and its tectonic implication: Taking the Qitianling granite batholith of Nanling range in south China as an example[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(1): 103-118 (in Chinese with English abstract).
- [13] Suzuki K, Kagi H, Nara M, et al. Experimental alteration of molybdenite: Evaluation of the Re-Os system, infrared spectroscopic profile and polytype[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2000, 64: 223-232.
- [14] Suzuki K, Shimizu H, Masuda A. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1996, 60: 3151-3159.
- [15] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. *Terra Nova*, 2001, 13: 479-486.
- [16] Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, et al. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2008, 72: 4607-4626.
- [17] Selby D, Creaser R A. Macroscale NTIMS and microscale LA-MC-ICP-MS Re-Os isotopic analysis of molybdenite: Testing spatial restrictions for reliable Re-Os age determinations, and implications for the decoupling of Re and Os within molybdenite[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2004, 68: 3897-3908.
- [18] 杜安道, 屈文俊, 王登红, 等. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ¹⁸⁷Os 的失耦现象[J]. *矿床地质*, 2007, 26(5): 572-580.
Du Andao, Qu Wenjun, Wang Denghong, et al. Subgrain-size decoupling of Re and ¹⁸⁷Os within molybdenite[J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(5): 572-580 (in Chinese with English abstract).
- [19] 左国朝, 刘奇陈. 北祁连早古生代大地构造演化[J]. *地质科学*, 1987, 1: 15-24.
Zuo Guochao, Liu Jichen. The evolution of tectonic of early Paleozoic in North Qilian range, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1987, 1: 15-24 (in Chinese with English abstract).
- [20] 葛肖虹, 刘俊来. 北祁连造山带的形成与背景[J]. *地学前缘*,

- 1999, 6(4): 223-230.
Ge Xiaohong, Liu Jiulai. Formation and tectonic background of the Northern Qilian orogenic belt[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 223-230 (in Chinese with English abstract).
- [21] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山构造-火山岩浆演化动力学[J]. 西北地质科学, 1995, 16(1): 1-28.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. Dynamics of tectono-volcano-magmatic evolution from North Qilian Mountains, China[J]. Northwest Geoscience, 1995, 16(1): 1-28 (in Chinese with English abstract).
- [22] 夏林圻, 夏祖春, 赵江天, 等. 北祁连山西段元古宙大陆溢流玄武岩性质的确定[J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(1): 1-8.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Zhao Jiangtian, et al. The determination of the nature of Proterozoic continental flood basalts in Northwest Qilian[J]. Science in China(Series D), 2000, 30(1): 1-8(in Chinese).
- [23] 夏林圻, 夏祖春, 任有祥. 北祁连山构造-火山岩浆-成矿动力学[M]. 北京: 中国大地出版社, 2001: 170-199.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang. North Qilian Mountains-Lava-Mineralization Kinetics[M]. Beijing: China Land Press, 2001: 170-199(in Chinese).
- [24] 张旗, 周国庆, 王焰. 中国蛇绿岩的分布、时代及其形成环境[J]. 岩石学报, 2003, 19(1): 1-8.
Zhang Qi, Zhou Guoqing, Wang Yan. The North Qilian oceanic basin of the early Paleozoic age: an aulacogen or a large oceanic basin: A discussion with Ge Xiaohong[J]. Chinese Journal of Geology, 2000, 35(1): 121-128(in Chinese with English abstract)
- [25] 曾建元, 杨怀仁, 杨宏仪, 等. 北祁连东草河蛇绿岩: 一个早古生代的洋壳残片[J]. 科学通报, 2007, 52(7): 825-837.
Zeng Jianyuan, Yang Huairan, Yang Hongyi, et al. The ophiolite of Dongcaohe in North Qilian: A fragment from Oceanic crust of Early Paleozoic[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(7): 825-837(in Chinese).
- [26] 李文渊. 祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析[J]. 地球学报, 2004, 6(3): 313-320.
Li Wenyuan. Main mineral deposit associations in the Qilian Mountains and their metallogenic dynamics[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 6(3): 313-320 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李文渊, 郭周平, 王伟. 北祁连山加里东期聚敛作用的构造转换及其成矿响应[J]. 地质论评, 2005, 51(2): 120-127.
Li Wenyuan, Guo Zhouping, Wang Wei. Caledonian convergent transformation and metallogenetic response in the North Qilian Mountains[J]. Geological Review, 2005, 51(2): 120-127 (in Chinese with English abstract).
- [28] Lowell J D, Guilbert J M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits[J]. Econ. Geo., 1970, 165: 373-408.
- [29] Hillister V F. Geology of the Porphyry Copper Deposits of the Western Hemisphere[M]. New York: Soc. Mining Engineers AIME, 1978, 219.
- [30] 孙海田, 郭介人, 李锦平. 北祁连金属成矿省时空格局、演化及成矿作用[J]. 地质学报, 1997, 71(2): 170-179.
Sun Haitian, Wu Jieren, Li Jinping. Spacious-temporal frame, evolution and mineralization of the Northern Qilian metallogenetic province[J]. Acta Geologica Sinica, 1997, 71(2): 170-179 (in Chinese with English abstract).
- [31] Yang K, Scott S D. Possible contribution of a metal rich magmatic fluid to a sea floor hydrothermal system[J]. Nature, 1996, 38(3): 420-423.
- [32] 杨合群, 宋忠宝, 王兴安, 等. 北祁连山中西段塞浦路斯型铜矿特征、成矿作用及找矿标志[J]. 西北地质, 2002, 35(4): 65-85.
Yang Hequn, Song Zhongbao, Wang Xingan, et al. The characteristics, mineralization and prospecting indications of Cyprus-type copper deposits in mid-west section of the North Qilian mountains, China[J]. Northwest Geology, 2002, 35(4): 65-85(in Chinese with English abstract).
- [33] 毛景文, 张招崇, 杨建民, 等. 北祁连山西段铜金铁钨多金属矿床成矿系列和找矿评价[M]. 北京: 地质出版社, 2003, 1-437.
Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Yang Jianmin, et al. Metallogenic Series and Prospecting Evaluation of Cu-Au-Fe-W Polymetallic Deposits in Northwest Qilian Orogen[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003(in Chinese).
- [34] 贾群子, 杨忠堂, 肖朝阳, 等. 祁连山铜金钨铅锌矿床成矿规律和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
Jia Qunzi, Yang Zhongtang, Xiao Zhaoyang, et al. Metallogenic Regularity and Prediction of Cu-Au-Pb-Zn Deposits in the Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007 (in Chinese).
- [35] 张作衡, 毛景文, 杨建民, 等. 北祁连加里东造山带塔尔沟砂卡岩-石英脉型钨矿床地质及成因[J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 200-211.
Zhang Zuoheng, Mao Jingwen, Yang Jianmin, et al. Geology and genesis of Ta'ergou skarn-quartz vein type tungsten deposit in North Qilian Caledonian Orogen, Northwest China[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(2): 200-211 (in Chinese with English abstract).
- [36] 赵辛敏, 张作衡, 刘敏, 等. 北祁连西段小柳沟矿区花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 16-34.
Zhao Xinmin, Zhang Zuoheng, Liu min, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the granites from the Xiaoliugou deposit in the western of the North Qilian[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(1): 16-34(in Chinese with English abstract).
- [37] 杨钟堂, 肖思云, 肖朝阳, 等. 祁连成矿带钨矿成矿特征及其区域找矿标志[J]. 中国地质, 2004, 31(3): 301-307.
Yang Zhongtang, Xiao Siyun, Xiao Chaoyang, et al. Minerogenic features of tungsten deposits in the Qilian metallogenetic belt and regional ore indications[J]. Geology in China, 2004, 31(3): 301-307(in Chinese with English abstract).