

穆龙套金矿地质和地球化学

谭娟娟, 朱永峰

北京大学 地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

摘 要:总结了世界最大造山型金矿穆龙套金矿(黄金储量 > 6100 t)的地质、地球化学特征。穆龙套金矿的赋矿围岩为晚奥陶世-早志留世黑色碳质页岩, 矿床产于剪切带和断裂的交汇部位, 受韧性剪切带控制。下部有强烈蚀变的白岗岩(约 287 Ma), 矿体北部出露火成岩岩墙(273 ~ 286 Ma)。金主要赋存于石英脉中, 矿石及其围岩蚀变组合的地球化学特征指示了岩浆流体对成矿作用的贡献, 但流体包裹体研究表明, 成矿流体中绝大多数 He 来自地壳, 惰性气体主要来自大气。金矿年龄被确定为约 275 Ma (Sm-Nd 等时线)、226 ~ 254 Ma (绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄)和约 290 Ma (毒砂 Re-Os)。在有限的地区内短时期形成巨型金矿需要特殊的机制和长期的流体演化过程。

关 键 词:穆龙套金矿; 黑色页岩; 剪切带; 成矿流体

中图分类号: P618.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2008)04-0391-08

Geology and Geochemistry of Muruntau Gold Deposit

TAN Juan-juan, ZHU Yong-feng

The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, China;

School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: This paper summarized the geological and geochemical features of the Muruntau gold deposit, the largest orogenic-type gold deposit in the world with gold reservoir of > 6100 t. The ore bodies locate at the intersection of shear zones and faults. The wall-rock of the gold veins is black carbon schist of Upper Ordovician-lower Silurian. Alaskite (~ 287 Ma), occurring beneath the Muruntau ore body, had been extensively altered. Igneous dikes (273 - 286 Ma) expose in the north of the ore region. Native gold grains occur in quartz veins. Geochemistry of the alteration assemblages and the ores suggested magmatic contributions of the ore-forming fluid in some degree. The fluid inclusion analysis, however, implied that overwhelming majority of He came from continental crust, and the noble gases were from atmosphere. Age of gold mineralization had been determined to be ~ 275 Ma (Sm-Nd isochrone), 226 - 254 Ma (sericite ⁴⁰Ar/³⁹Ar plateau) and ~ 290 Ma (arsenopyrite Re-Os). It requires special mechanisms and prolonged fluid evolution for such a giant ore deposit to form within a short time span and within a limited area. Shear zones, which control the terminal location of the Muruntau gold deposit, are the widespread signals and exploration indicators for gold deposits in the Central Asian Metallogenic area.

Key words: Muruntau gold deposit; black carbon schist; shear zone; ore-forming fluid

乌兹别克斯坦穆龙套金矿是世界上最大的金矿床之一^[1~6], 位于中亚成矿域西南天山成矿省西段。前苏联学者于上世纪 50 年代发现了大规模金异常, 1964 年开始开采。该矿床的黄金储量超过 6100 t, 是世界上最大的造山型金矿^[7]。本文系统总结了该

矿床的地质和地球化学特征, 期望对在我国寻找类似矿床的工作有所启迪。

1 区域地质概况

中亚成矿域由若干个成矿省组成, 其中最主要

收稿日期: 2008-01-10 收到, 05-16 改回

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B08)

作者简介: 谭娟娟(1985—), 女, 研究生, 专业方向: 矿床地球化学通讯作者: 朱永峰. E-mail: yfzhu@pku.edu.cn.

的金矿成矿省是西南天山成矿省^[8~10]。除西南部的穆龙套金矿外,该成矿省还有多个大型金矿,如吉尔吉斯斯坦的库姆托尔(Kumtor)^[11],塔吉克斯坦的吉拉乌(Jilau)^[12],我国新疆的萨瓦亚而顿^[13,14]、大山口^[15,16]和望峰-天格尔-萨日达拉金矿^[17]。西北向的塔拉斯-费尔干纳(Talas-Fergana)断裂把西

南天山成矿省分为东、西两段^[18,19],巨型金矿穆龙套和大中型金矿床缪坚拜(Myutenbai)、别索潘(Besopan)、道古兹套(Daugyzstau)等赋存在瓦雷里亚诺夫斯基(Valerianovsky)古生代火成岩带南部的山脉中(位于塔拉斯-费尔干纳断裂的西侧,图1)。



1. 海西花岗岩侵入杂岩体;2. 泥盆-石炭纪大陆边缘火山岩带;3. 前寒武纪地体;4. 蛇绿岩;5. 海西褶皱-断裂带;6. 缝合带
1. Hercynian granitic intrusive complex;2. D-C continental marginal volcanic belt;3. Precambrian massif;
4. Ophiolite;5. Hercynian fold/ faults;6. Suture

图1 西南天山成矿省中分布的重要金矿

Fig. 1 The major gold deposits in the southwestern Tianshan gold province

西天山地质构造复杂,广泛发育由不同时代的造山作用形成的剪切带、褶皱和断层^[6,18]。在穆龙套金矿北东方向发育的构造带(宽5~6 m、延伸超过1000 km)是卡拉库姆(Karakum)-塔里木板块和中哈萨克斯坦板块的碰撞缝合带。沿缝合带大量发育的北西西向剪切带,主带和分支断层又被北东走向的剪切带错开。在穆龙套金矿附近有两条重要的剪切带:桑格龙套-塔姆德套(Sangruntaur-Tamdytau)和穆龙套-道古兹套(图2,图3)。这两条剪切带形成的时间与卡拉库姆-塔里木和中哈萨克斯坦-北天山地块碰撞拼合的时间一致(晚石炭世-早二叠世)。晚古生代的挤压形成了一些北倾的推覆构造,北西西向扭压作用沿桑格龙套-塔姆德套和穆龙套-道古兹套剪切带(一系列断裂组合)先后发生左旋构造运动。剪切带的相互作用改变了推覆体的走向,在塔姆德套东南端形成了Z型褶皱,其核部就是穆龙套金矿(图2,图3)。桑格龙套-塔姆德套为一组北西西走向的宽缓的断裂,穆龙套-道古兹

套断裂组合走向北东东,穿切桑格龙套-塔姆德套断裂带和穆龙套矿区,向南西方向延伸超过40 km。乌兹别克斯坦的另外两个大金矿阿曼台套(Amantaitau)和道古兹套也产在这个剪切带中。

穆龙套地区出露的古老岩石是元宙-早古生代的沉积变质岩,主要为中元古代-早奥陶世的海相硅质碎屑岩、镁铁质火山岩、碳质页岩和白云质硅酸盐。泥盆纪-石炭纪火山-沉积地层(包括瓦雷里亚诺夫斯基古生代火山岩、含沥青白云岩、灰岩、富硬石膏的岩石和蒸发角砾岩)出露在穆龙套北部山区^[20,21]。上石炭统-下三叠统地层主要包括氧化红层、浅海和陆源碎屑沉积岩和蒸发岩(硬石膏),以及与裂谷有关的长英质熔岩和火山碎屑岩^[20],这些岩石主要出露在穆龙套金矿的东部山区。穆龙套金矿的赋矿地层是厚约5 km的别索潘组,由一套变质粉砂岩、砂岩和泥岩组成。根据其年龄、颜色、碎屑的粒度可分成四个段,从老到新为bS₁、bS₂、bS₃和bS₄(表1)。

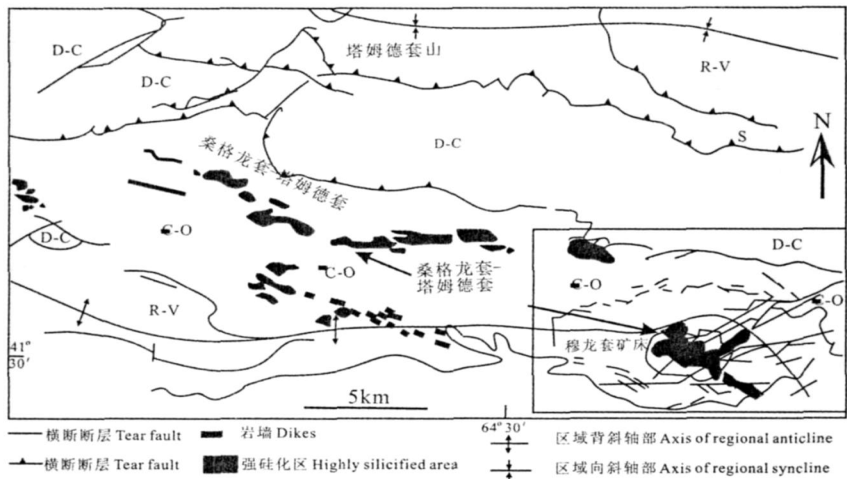


图 2 穆龙套金矿区域地质图
Fig. 2 Regional geological map of the Murantau deposit

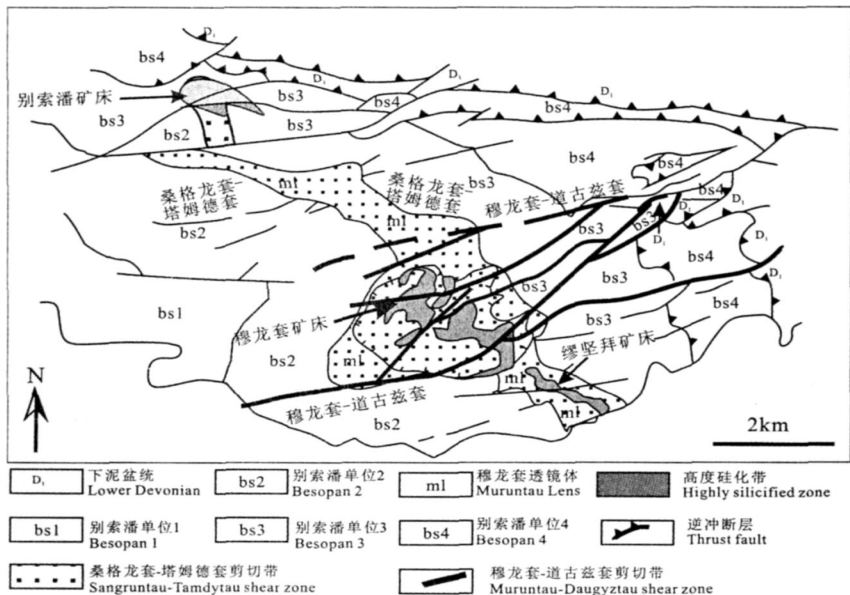


图 3 穆龙套矿区地质图^[6]
Fig. 3 The simplified geological map of the Murantau deposit^[6]

表 1 穆龙套金矿南部山区出露的主要地层单元

Table 1 Description of the major stratigraphic units in the southern Tamdytau Mountain in the vicinity of the Murantau mine

地层标识	厚度/ m	时 代	主要特征
D-C	1400	泥盆纪-石炭纪	灰岩和白云岩
-O	3900	寒武纪-奥陶纪	未分化的别索潘组
分化的别索潘组			
bs ₄	1000	寒武纪-奥陶纪	绿泥石片岩, 绢云母片岩, 不含碳质
bs ₃	2000	寒武纪-奥陶纪	赤铁矿千枚岩, 碳质粉砂岩, 绢云母绿泥石片岩, 燧石和凝灰岩
bs ₂	700	寒武纪-奥陶纪	绢云母-绿泥石片岩, 无碳质
bs ₁	1200	寒武纪-奥陶纪	绢云母-绿泥石片岩, 含碳质
R-V	2800	里菲代-文德期	石英, 白云石, 绿岩, 绿泥石-闪石-钠长石片岩

注: 资料来源于文献[1~6]

最下部岩层为淡黄褐色 - 绿色的 bS₁ (灰色别索潘段),由铁质绢云母绿泥石云母片岩构成,其原岩为夹灰岩和粘土层的粉砂岩;底部附近有些小的长英质火山岩透镜体;发育各种尺度的褶皱。bS₂ (又称黑色别索潘段)主要为变质粗砂岩和砾岩,以富含云母的暗色区而明显区别于下伏岩层,该段是别索潘组中唯一没有火山物质和燧石质的层位。bS₄ 段以含石英质砂岩为主,因为粘土变质成绿泥石和绢云母,故称为“绿色别索潘”,含变质粉砂岩、粘土岩和变质砂岩透镜体。bS₂ 和 bS₄ 段的 Rb-Sr 全岩等时线年龄分别为 ~ 403 Ma 和 ~ 393 Ma^[23]。穆龙套金矿的主要含矿地层是 bS₃ (晚奥陶世 - 早志留世),主要由赤铁矿千枚岩、碳质变质粉砂岩、变质砂岩和变质凝灰岩,及少量的含放射虫燧石、绢云母片岩和绿片岩组成,风化后的露头为红色、绿色等形成的混合色,因此被称为“斑杂别索潘”。bS₃ 单元是塔姆德套构造窗中的一个推覆体,由一个被糜棱岩分割为上、下盘的构造透镜体组成(即文献中常常提到的“穆龙套透镜体”)^[24]。

穆龙套南东方向约 7 km 处出露的萨尔达林斯基(Sardarinski)斑状花岗闪长岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 286.2 ±1.8 Ma^[23]。钻孔资料显示,穆龙套金矿下部 4005 m 处存在花岗岩体(白岗岩),该白岗岩已强烈蚀变(其中的石英含量超过 40 %),该岩体 Rb-Sr 等时线定年结果为 287.1 ±4.6 Ma^[23]。与上述侵入体有关的接触变质作用产生了黑云母、红柱石、堇青石等矿物的斑状变晶、变质层理,深部还存在角岩^[6, 26]。矿区北部出露的煌斑岩、闪长岩和碱性花岗岩岩墙(脉)均发生了热液蚀变。闪长岩岩墙的 Rb-Sr 等时线年龄约为 286 Ma,正长岩和煌斑岩

的年龄约为 273 Ma^[23]。萨尔达林斯基斑状花岗闪长岩、穆龙套白岗岩以及闪长岩岩墙(脉)的年龄在误差范围以内一致,可能属于同一期岩浆活动。

2 矿床地质

穆龙套金矿的赋矿围岩为早古生代的黑色碳质页岩,矿床产在剪切带和断层的交汇处,金主要赋存在石英脉中,与毒砂、黄铁矿、白钨矿等伴生。穆龙套金矿的矿脉形状复杂,至少存在三个分类。前苏联学者将其分为:“石英大脉型”和“石英网脉型”,前者产在近直立裂隙中(宽 0.5 ~ 20 m,长 100 ~ 700 m),金的平均品位 > 10 g/t,该类矿体中的金占矿床总储量的 12 % ~ 15 %。网脉型是主要的金矿化类型,由含金石英细脉、石英-硫化物细脉、石英-方解石细脉、石英-微斜长石细脉、石英-电气石脉交错发育构成,脉体有平缓顺层发育的,也有陡倾切层的,规模巨大但品位较低。Drew 将石英脉分成三类^[6]: 1) 由许多毫米到数厘米宽的脉组成的似层状带,常常发生石香肠化或褶皱,与泥盆纪或更早的逆冲断裂及相关变质作用有关;2) 在任意方向上不连续的几微米到几厘米的脉遍布整个矿床,是穆龙套金矿最丰富的石英脉类型;3) 走向延伸数米,并沿倾向连续的几厘米到几米宽的脉,也被前人称之为“母脉”^[6],为矿区主要含金矿石(金的平均品位 3.5 ~ 11 g/t)。距穆龙套矿区数千米处也有这类石英脉(未达到矿石品级),如矿区东北部约 2.5 km 处出露的乳白色石英脉厚约 10 cm,近垂直切割了主要层理。结合流体包裹体特征,石英脉被进一步分成四类^[22](表 2):早期水平石英脉(Q1)、网状脉(Q2)、中部矿脉(母脉,Q3)和晚期富银矿脉(Q4)。

表 2 穆龙套金矿的四类石英脉特征

Table 2 Major characteristics of the four types of quartz in the Muruntau gold deposit

	Q1	Q2	Q3	Q4
石英脉类型	早期水平石英脉	网状脉	中部矿脉又称母脉	晚期富银矿脉
厚度	很少超过几厘米	数毫米到数厘米	可达数米	含银和铅的硫化物
结构和构造	与千枚岩围岩的节理和残余层理平行或近平行,常常呈香肠状、等斜褶皱和裂隙缝合结构	与围岩的主要层理平行或斜交,矿化的网状脉,也有裂隙缝合结构,包裹了陡倾的穆龙套透镜体	往往与主要的北东东走向断层和相关的褶皱轴面平行或近平行,在穆龙套-道古兹套断层中发育最密集,穿越了主要面理和残余层理。主要由近垂直的石英、钾长石、富铁碳酸盐、电气石和硫化物脉组成	
包裹体特征	原生包裹体,温度 500 ~ 410 ,与区域变质温度一致;次生包裹体与金成矿阶段有关,主要为共生的低密度含水包裹体和高密度富 CO ₂ 气相包裹体	形成温度约 430 ,在矿脉形成时捕获了两相流体,观察到低密度水溶液和富 CO ₂ 流体均一的现象	有原生和假次生富 CO ₂ 包裹体,说明捕获了两相流体,均一时进入液相和气相,温度 150 ~ 350 。色谱和喇曼分析说明包裹体成分主要为 CO ₂ ,含少量 CH ₄ 和 N ₂	包裹体很小,爆裂温度为 150 ~ 200 ℃。随着 CO ₂ /CH ₄ 比值升高,Ag 品位增高

注:资料来源于文献[6]和[22]

阴极发光和透射电镜研究表明存在两类石英^[27]:1)产于变质岩中的石英细脉和发生了多期形变的平板状石英(类似于上述的“网脉型”);2)陡倾的热液矿脉和细脉(“大脉型”)。这两类石英的阴极发光颜色、内部结构和次生蚀变程度都不同。阴极发光图像显示,含金石英具生长环带。中部矿脉中发现了环带状石英晶体的碎片,说明其发生过大规模的角砾化。没有证据显示这些矿脉中有多期热液石英。

穆龙套金矿中的热液蚀变发育,早期高温阶段的热液蚀变包括含角闪石-辉石、黑云母和微斜长石的矿物组合。早期热液石英、钠长石和金云母等矿

物组合成一个透镜状矿体(即 bS₃ 中的穆龙套透镜体,延伸范围 8 km ×2 km),包围了金矿化带。这个蚀变组合沿缪坚拜与别索潘之间的桑格龙套-塔姆德套剪切带的北部分叉线发育,在小尺度上受早期层理控制^[6]。中温阶段的蚀变矿物组合为钠长石-碳酸盐-磷灰石-绿泥石-绢云母-钾长石-碳酸盐-金云母,这个组合与主要矿石沉淀过程有关,叠加在之前的蚀变矿物组合之上^[28]。穆龙套金矿核部是由绿泥石、绢云母和残余钠长石组成,沿北东方向延伸约 2 km(宽约 1 km)。系统的地质观察和岩相学研究在穆龙套金矿中识别出 8 个阶段的矿脉和蚀变组合^[6](表 3)。

表 3 与穆龙套金矿热液系统相关的热液蚀变和脉体

Table 3 Sequence of alteration and veining associated with the Muruntau hydrothermal system

阶段	规模	描 述
1	L	斑点片岩:浅部为黑云母-绿泥石-斜长石斑点,更深部为堇青石和硅线石斑点
2	R	石英-钠长石-黑云母-绿泥石-奥长石蚀变,近平行的石英脉和细脉带以及桑格龙套-塔姆德套剪切带北分支中初始“母矿脉”型脉体
3	R	含白云母的金云母-黄铁矿-毒砂细脉,镁绿泥石、石英、钾长石和 FeMnCO ₃ 镶边
4	L	石英-钾长石-FeMnCO ₃ -硫化物细脉,含磷灰石、独居石和板钛矿
5	L	含 FeMnCO ₃ 和硫化物石英细脉(中央脉体),含石英-钾长石-FeMnCO ₃ 蚀变
6	R	硅化岩墙的侵入
7	L	含钾长石、FeMnCO ₃ 、白云母、电气石和黄铁矿的石英细脉
8	L	方解石细脉和广泛的基质蚀变,形成一些黄铁矿、板钛矿和稀土矿物

注:蚀变和(或)矿脉的分布:R 为区域的,L 为局部的;资料来源:据文献[6]

穆龙套最主要的矿石矿物是自然金,主要含金矿物有黄铁矿、毒砂、白铁矿、磁黄铁矿、白钨矿、金和铋的碲化物、硒化物、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、辉钼矿、黑钨矿、磁铁矿和钛铁矿。在高品位的中部矿脉中可以识别出两个主要矿物组合:早期的石英-白钨矿-褐帘石-独居石-金红石-毒砂-铋化物-碲化物-自然金组合,这些矿物经历了角砾化,常呈棱角状碎片,变形的石英被未变形的矿物胶结。与早期变形石英共生的自然金颗粒细小(10 ~ 30 μm)。晚期矿物组合包括晚期石英-自然金-镁绿泥石-绢云母-方解石-白云石-黄铁矿-磷灰石,与围岩的高温和中温蚀变有关^[28]。最后阶段(对应 Q4 阶段)形成了含硫酸盐和碲化物的富银矿物组合,包括辉锑银矿、黝铜矿、砷黝铜矿、浓红银矿、硫锑铜银矿和自然银^[29]。

3 控矿构造

穆龙套金矿产于黑色页岩中,黑色碳质页岩对金矿的富集起到了决定性作用。穆龙套矿床总体位于两个层位之间,曾经被认为矿化过程主要受地层控制^[30]。然而,越来越多的学者认识到断裂构造和

剪切带对矿体的控制作用,矿脉沿断裂发育,产在剪切带内及其附近^[6, 28]。他们认为控制穆龙套金矿形态的主要因素是平行层理的桑格龙套-塔姆德套剪切带(表现为北西西走向的平缓断层)和北北东走向的穆龙套-道古兹套断层(北东东走向,图 2、图 3)。

4 成矿时代

穆龙套金矿处于未出露侵入岩的接触变质带上,高温热液蚀变岩墙沿断裂带分布。高温热液蚀变矿物的 Rb-Sr 分析和白钨矿的 Sm-Nd 分析表明,成矿时代约为 275 Ma^[31],含金矿脉中绢云母的⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 226 ~ 254 Ma,矿化蚀变组合中冰长石的⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 221.8 Ma^[22]。最近,露天矿井的 3 个粗粒毒砂样品^[32](1 个来自近垂直网状石英细脉,2 个来自南断层带陡峭倾斜的石英-毒砂细脉;毒砂中存在自然金包体) Re-Os 等时线年龄约为 290 Ma,与区内岩浆活动时间重合^[32](图 4)。毒砂的这个年龄被这些作者解释成穆龙套金矿的主要成矿时代。然而,由于毒砂中 Re 和 Os 含量很低,所获得的测试结果明显比前人获得的结果偏

老(图 2),这是由于同位素测年方法的差异所致,还是毒砂 Re-Os 同位素等时线年龄的地质意义需要深入研究?需要指出的是,西天山广泛发育的产在剪切带中的其它金矿的成矿年龄均比 290 Ma 年轻,例如库姆托尔金矿形成于 284~288 Ma^[11],我国新疆境内的该类金矿主要形成于印支期(~220 Ma)^[14, 17, 33, 34]。导致这种差异的主要原因是测试对象不同,还是存在多期金矿成矿过程?或者说西天山的金矿成矿作用与西天山晚古生代的火山岛弧^[35~37]类似,有自西向东逐渐年轻化的趋势?

5 成矿流体来源

矿区的煌斑岩围绕矿体从北向南弯曲,与断层走向一致,为成矿流体的通道。矿石及其围岩蚀变组合的地球化学特征指示有地幔物质的加入。高品位矿石中 Pt 和 Pd 的品位分别为 0.10 g/t 和 0.132 g/t^[22]。穆龙套矿床中与金矿化有直接联系的高温热液矿物(毒砂、石英和白钨矿等)的流体惰性气体、碳同位素和卤素研究表明,流体中绝大多数 He 来自地壳,惰性气体主要来自大气(图 5a)^[28]。

氩同位素和卤素特征表明主要成矿阶段有原生流体加入(图 5b^[28])。穆龙套白钨矿和毒砂中流体的³He/³⁶Ar 值表明³He 非大气来源,而高温热液中的 Ne、Ar、Kr 和 Xe 主要来自大气。石英和毒砂中³He/⁴He 明显比地壳值高,但比大气和岩石圈地

幔的低(多数采自地下矿区)。计算表明,地幔流体对 He 成分的贡献低于 5%,地壳来源的 He 超过 95%。这个结论与矿体中白钨矿 Sr-Nd 同位素的研究结果(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值 > 0.714 和 ε_{Nd} < -8)^[31]一致。

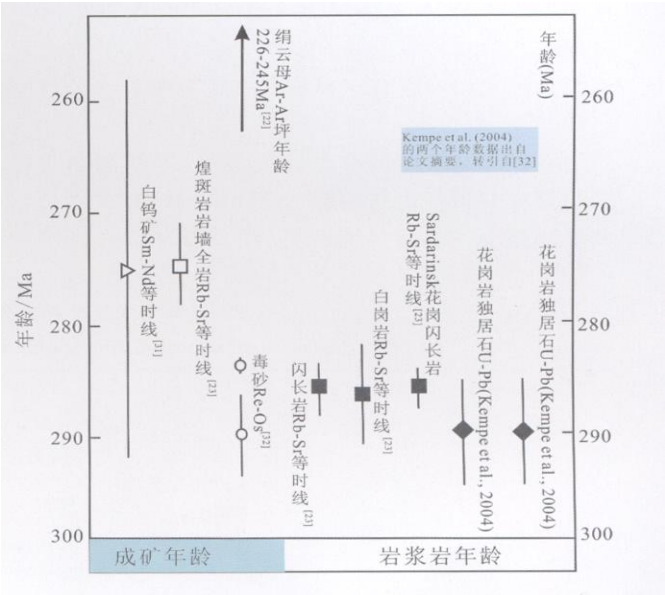


图 4 穆龙套金矿化年龄与岩浆岩同位素年龄比较
Fig. 4 Isotopic ages for the ore-forming stages of the Muruntau gold deposit and the related magmatic rocks in Muruntau region

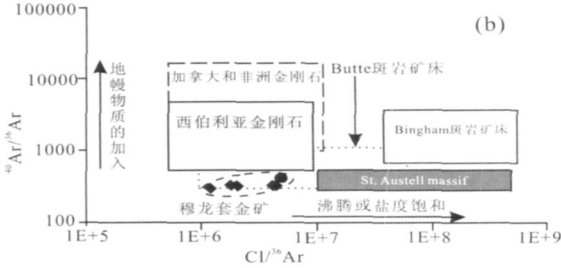
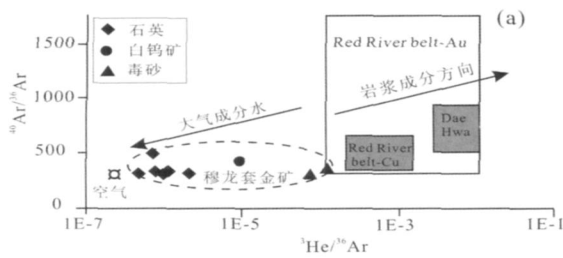


图 5 不同矿物流体包裹体的同位素测定:(a)穆龙套金矿中含石英、毒砂和白钨矿流体包裹体的³⁰Ar/³⁶Ar vs.³He/³⁶Ar;(b)穆龙套金矿中含石英和白钨矿中流体包裹体的⁴⁰Ar/³⁶Ar vs. Cl/³⁶Ar^[28]
Fig. 5 (a) ⁴⁰Ar/³⁶Ar vs. ³He/³⁶Ar for Muruntau fluid inclusions in quartz, arsenopyrite and scheelite from ore veins;
(b) ⁴⁰Ar/³⁶Ar vs. Cl/³⁶Ar for fluid inclusions in quartz and scheelite from Muruntau gold-bearing veins^[28]

毒砂钨初始比值和流体包裹体的氩同位素分析表明^[32],非放射成因 Os 和³He/⁴He 值都比地壳储库的 Os、He 数值高,说明穆龙套矿床有地幔来源成分,系通过岩浆活动进入成矿流体。比较穆龙套金矿中毒砂的 O_s 值和可能对高温热液系统补给 Os 的其他储矿层(包括上地壳、下地壳以及上地幔)结果显示,地壳岩石的区域变质不是穆龙套金矿高温

热液 Os 的唯一来源,因为上地壳 O_s 值有明显的放射性成因。穆龙套金矿的 O_s 和下地壳之间有限的重合说明不大可能存在一个单独的下地壳 Os 来源^[32]。穆龙套附近及其下伏花岗岩岩石的侵位与金矿化的时间重叠(约 290 Ma),以及一些侵入体含有非放射成因的 Sr^[32]的事实表明,成矿流体中的 Os 和 He 至少部分来自岩浆。

一个不大的地区短时期汇集形成巨型金矿,必然需要特殊的机制和长期的流体演化过程,包括不同成因和不同来源的 Os、He、Au 在复杂的壳-幔相互作用过程中演化成为成矿流体,并且通过约 290 Ma 时发育的构造环境(如巨型韧性剪切带和岩墙侵位)汇聚到穆龙套地区形成矿床。韧性剪切带最终控制着金矿的就位,这是中亚成矿域中金矿的主要特征及其重要找矿标志,西南天山和楚伊犁-北天山金矿成矿省中几乎所有金矿都受剪切带控制^[11~17, 38~40],成矿流体的主要组分为大陆地壳物质^[17]。

致 谢:薛云兴和安芳同学提供了诸多帮助,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Khamrabaev I Kh. Ore formations and basin principles of the metallogeny of gold in Uzbekistan [M]. FAN, Tashkent, 1969, 396. (in Russian)
- [2] Smirnov V I. The Muruntau deposit: Ore deposits of the USSR [M]. 1977, 3: 35 - 40. (in Russian)
- [3] Marakushev A A, Khoklov V A. A petrological model for the genesis of the Muruntau gold deposit [J]. International Geology Review, 1992, 34: 59 - 76.
- [4] Zairi N M, Kurbanov N K. Isotopic geochemical model of ore genesis in the Muruntau ore field [J]. International Geology Review, 1992, 34: 88 - 94.
- [5] Uspenskiy Y I, Aleshin A P. Patterns of scheelite mineralization in the Muruntau gold deposit, Uzbekistan [J]. International Geology Review, 1993, 35: 1037 - 1051.
- [6] Drew L J, Berger B R, Kurbanov N K. Geology and structural evolution of the Muruntau gold deposit, Kyzylkun desert, Uzbekistan [J]. Ore Geology Review, 1996, 11: 175 - 196.
- [7] Frimmel H E. Earth's continental crustal gold endowment [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 267(1 - 2): 45 - 55.
- [8] Seltmann R, Jenchuraeva R. Paleozoic geodynamics and gold deposits in the Kyrgyz Tien Shan [M]. IGCP Project 373, IAGOD Excursion Guidebook Series, vol. 9. National Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz Republic/ Natural History Museum, London, 2001: 180.
- [9] Yakubchuk A, Seltmann R, Shatov V. Tectonics and metallogeny of the western part of the Altaid orogenic collage [A]. Mao J, Goldfarb R J, Seltmann R, *et al.* Tectonic evolution and metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan. International association on the genesis of ore deposits/ centre for Russian and Central Asian mineral studies [C]. London: Natural History Museum, 2003: 7 - 16.
- [10] 朱永峰, 何国琦, 安芳. 中亚成矿域核心区地质演化与成矿规律[J]. 地质通报, 2007, 26(9): 1167 - 1177.
Zhu Yongfeng, He Guoqi, An Fang. Geological evolution and metallogeny in the core part of the Central Asian metallogenic domain [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(9): 1167 - 1177. (in Chinese with English abstract)
- [11] Mao J W, Konopelko D, Seltmann R, Lehmann B, Chen W, Usabaliev T. Postcollisional age of the Kumtor gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan, Kyrgyzstan [J]. Economic Geology, 2004, 99: 1771 - 1780.
- [12] Cole A, Wilkinson J J, Halls C, Serenko T J. Geological characteristics, tectonic setting and preliminary interpretations of the Jilau gold-quartz vein deposit, Tajikistan [J]. Mineralium Deposita, 2000, 35: 600 - 618.
- [13] 刘家军, 龙训荣, 郑明华, 李恩东, 王奖臻, 桑海清, 尹怀信. 新疆萨瓦亚尔顿金矿床石英的⁴⁰Ar/³⁹Ar 快中子活化年龄及其意义[J]. 矿物岩石, 2002, 22: 19 - 23.
Liu Jiajun, Long Xunrong, Zheng Minghua, Li Endong, Wang Jiangzhen, Sang Haiqing, Yin Huaixin. The metallogenic age of Sawaya'erdu gold deposit in southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2002, 22: 19 - 23. (in Chinese with English abstract)
- [14] Liu J J, Zheng M H, Cook N J, Long X, Deng J, Zhai Y. Geological and geochemical characteristics of the Sawaya'erdu gold deposit, southwestern Chinese Tianshan [J]. Ore Geology Review, 2007, 32: 125 - 156.
- [15] Yang F Q, Mao J W, Wang Y T, Bierlein F P. Geology and geochemistry of the Bulong quartz-barite vein-type gold deposit in the Xinjiang Uygur autonomous region, China [J]. Ore Geology Reviews, 2006, 29: 52 - 76.
- [16] Rui Z, Goldfarb R J, Qiu Y, Zhou T, Chen R, Pirajno F, Yun G. Paleozoic-early Mesozoic gold deposits of the Xinjiang Autonomous Region, Northwestern China [J]. Mineralium Deposita, 2002, 37: 393 - 418.
- [17] Zhu Y F, Zhou J, Zeng Y S. The Tianger (Bingdaban) shear zone hosted gold deposit, west Tianshan, NW China: Petrographic and geochemical characteristics [J]. Ore Geology Review, 2007, 32: 337 - 365.
- [18] 何国琦, 成守德, 徐新, 李锦轶, 郝杰. 中国新疆及邻区大地构造图 1: 1500000 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
He Guoqi, Cheng Shoude, Xu Xin, Li Jinyi, Hao Jie. An introduction to the explanatory text of the map of tectonics of Xinjiang and its neighboring area 1: 1500000 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (in Chinese)
- [19] 何国琦, 朱永峰. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 451 - 460.
He Guoqi, Zhu Yongfeng. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang, China, and its adjacent regions [J]. Geology in China, 2006, 33(3): 451 - 460. (in Chinese with English abstract)
- [20] Cook H E, Zhemchuzhnikov V G, Zempolich W G, Lehmann P J, Alexeiev D V, Zhaimina V Y. Devonian and Carboniferous carbonate platforms in the Karatau of S. Kazakhstan: Outcrop analogs for coeval carbonate reservoirs in the N. Caspian basin [J]. American Association of Petroleum Geolo-

- gists Bulletin, 1997, 81: 1367 - 1368.
- [21] Lapointe P A, Bernet-Rollande M C, Zhemchuzhnikov V G, Cook H E, Zempolich W G, Lehmann P J. Evaporite collapse breccia versus karst breccia: The late Devonian-lower Carboniferous Dalatorlan unit, Bolshoi Karatau Mountains, southern Kazakhstan[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1997, 81: 1393.
- [22] Wilde A R, Layer P, Mernach T, Foster J. The giant Muruntau gold deposit: Geologic, geochronologic, and fluid inclusion constraints on ore genesis [J]. Economic Geology, 2001, 96: 633 - 644.
- [23] Kostitsyn Y A. Rb-Sr isotopic study of the Muruntau deposit: Magmatism, metamorphism and mineralization [J]. Geochemistry International, 1996, 34: 1009 - 1023.
- [24] Mukhin P A, Savchuk, Y S, Kolesnikov A V. The position of the 'Muruntau Lens' in the structure of the metamorphic series in the southern Tamdytau area (central Kyzylkum region) [J]. Geotectonics, 1988, 22(2): 142 - 148. (in Russian)
- [25] Shayakubov T, Kremenetsky A A, Minzer E, Obratsov A, Graupner T. The Muruntau ore field [A]. Shayakubov T, Islamov F, Kremenetsky A, *et al.* Au, Ag, and Cu deposits of Uzbekistan [C]. Potsdam: GeoForschungs Zentrum (GFZ), 1999:37 - 64.
- [26] Kotov N V, Poritskaya L G. The Muruntau gold deposit: Its geologic structure, metasomatic mineral associations and origin [J]. International Geology Review, 1992, 34(1): 77 - 87.
- [27] Graupner T, Goetze J, Kempe U, Wolf D. CL for characterizing quartz and trapped fluid inclusions in mesothermal quartz veins: Muruntau Au ore deposit, Uzbekistan [J]. Mineralogical Magazine, 2000, 64(6): 1007 - 1016.
- [28] Graupner T, Niedermann S, Kempe U, Klemd R, Bechtel A. Origin of ore fluids in the Muruntau gold system: Constraints from noble gas, carbon isotope and halogen data [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70: 5356 - 5370.
- [29] Khamrabaev I K, Sidorova I P, Kustamikova A A. The role of deep lithospheric structure in the genesis of large and superlarge ore deposits in Uzbekistan: A review [J]. Global Tectonics Metallogeny, 2003, 8: 151 - 154. (in Russian)
- [30] 中国科学院资环局穆龙套金矿考察团. 穆龙套超大型金矿地质简况 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 1991, (3): 210 - 214. Bureau of Science and Technology for Resource and Environment of Chinese Academy of Sciences. The geology of giant Muruntau ore deposit [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1991, (3): 210 - 214. (in Chinese)
- [31] Kempe U, Belyatsky B V, Krymsky R S, Kremenetsky A A, Ivanov P A. Sm-Nd and Sr isotope systematics of scheelite from the giant Au(-W) deposit Muruntau (Uzbekistan): Implications for the age and sources of Au mineralization [J]. Mineralium Deposita, 2001, 36: 379 - 392.
- [32] Morelli R, Creaser R A, Seltmann R, Stuart F M, Selby D, Graupner T. Age and source constraints for the giant Muruntau gold deposit, Uzbekistan, from coupled Re-O-He isotopes in arsenopyrite[J]. Geology, 2007, 35(9): 795 - 798.
- [33] 朱永峰. 新疆的印支运动与成矿[J]. 地质通报, 2007, 26(5): 510 - 519.
- Zhu Yongfeng. Indosinian movement and metallogeny in Xinjiang, China [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(5): 510 - 519. (in Chinese with English abstract)
- [34] 陈文, 张彦, 秦克章, 王清利, 王义天, 刘新宇. 新疆东天山剪切带型金矿床时代研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 2007 - 2016.
- Chen Wen, Zhang Yan, Qin Kezhang, Wang Qingli, Wang Yitian, Liu Xinyu. Study on the age of the shear zone-type gold deposit of East Tianshan, Xinjiang, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(7): 2007 - 2016. (in Chinese with English abstract)
- [35] Zhu Yongfeng, Zhang Lifei, Gu Libing, Guo Xuan, Zhou Jing. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50: 2201 - 2212.
- [36] 朱永峰, 周晶, 宋彪, 张立飞, 郭璇. 新疆“大哈拉军山组”火山岩的形成时代问题及其解体方案[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 487 - 497.
- Zhu Yongfeng, Zhou Jing, Song Biao, Zhang Lifei, Guo Xuan. Age of the 'Dahalaunshan' formation in Xinjiang and its disintegration [J]. Geology in China, 2006, 33(3): 487 - 497. (in Chinese with English abstract)
- [37] Zhu Yongfeng, Guo Xuan, Zhang Lifei, *et al.* Geochemistry and zircon SHRIMP dating on the Late Paleozoic volcanic rocks in west Tianshan Mountains (Central Asia, Xinjiang) [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2006, 70(18): 755 - 755.
- [38] 朱永峰. 古老克拉通和古生代造山带中的韧性剪切带型金矿: 金矿成矿条件与成矿环境分析[J]. 矿床地质, 2004, 23(4): 509 - 519.
- Zhu Yongfeng. Ductile-shear zone related gold deposits in craton and Paleozoic orogenic belt: An analysis of their ore-forming processes and environments [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(4): 509 - 519. (in Chinese with English abstract)
- [39] 王义天, 张文智, 王磊, 杨富全, 陈文. 新疆东天山红石金矿床成矿流体和成矿物质来源示踪 [J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1998 - 2006.
- Wang Yitian, Zhang Wenzhi, Wang Lei, Yang Fuquan, Chen Wen. Tracing the sources of ore-forming fluids and materials of the Hongshi gold deposit in the Eastern Tianshan, Xinjiang, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8): 1998 - 2006. (in Chinese with English abstract)
- [40] 朱永峰, 王涛, 徐新. 新疆及邻近地质与矿产研究进展[J]. 岩石学报, 2008, 23(8): 1785 - 1794.
- Zhu Yongfeng, Wang Tao, Xu Xin. Progress of geology study in Xinjiang and its adjacent regions[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1785 - 1794. (in Chinese with English abstract)