

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.988



新疆东准噶尔顿巴斯套金矿床含金黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄及地质意义

李欢¹, 李艳军^{1, 2*}, 魏俊浩^{1, 2}, 石文杰^{1, 2}, 李红梅³

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 固体矿产勘查国家级实验教学示范中心, 湖北武汉 430074

3. 湖北省地质调查院, 湖北武汉 430034

摘要:新疆东准噶尔地区金矿床矿石矿物的直接定年研究比较缺乏。顿巴斯套金矿床位于该地区阿尔曼泰构造带东段北东侧, 为该构造带中规模最大的金矿床。应用 Rb-Sr 同位素定年方法对该矿床 9 件黄铁矿样品进行了成矿时代测定, 获得等时线年龄为 268 ± 3 Ma (MSWD=0.7), 该年龄与矿区西北部高钾钙碱性花岗岩成岩时代一致, 成矿与中二叠世构造岩浆活动具有密切关系。同时结合近些年来金矿床成矿年代学研究成果, 认为中二叠世(270~260 Ma)为东准噶尔地区一个重要的金成矿时限。黄铁矿 Rb-Sr 年龄的厘定, 显示顿巴斯套金矿床为中二叠世东准噶尔地区后碰撞伸展背景下构造-岩浆-流体活动的产物, 也为东准噶尔金矿床成矿作用对比和找矿实践提供了参考。

关键词: Rb-Sr 同位素定年; 黄铁矿; 中二叠世; 顿巴斯套金矿床; 东准噶尔; 地质年代学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)12-4606-15

收稿日期: 2018-06-06

Rb-Sr Isochron Age of Auriferous Pyrites from Dunbasitao Gold Deposit in East Junggar, Xinjiang, and Its Geological Significance

Li Huan¹, Li Yanjun^{1, 2*}, Wei Junhao^{1, 2}, Shi Wenjie^{1, 2}, Li Hongmei³

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. National Demonstration Center for Experiment of Mineral Exploration Education, Wuhan 430074, China

3. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, China

Abstract: The study on direct dating of ore minerals in gold deposits in East Junggar is relatively scarce. The Dunbasitao gold deposit, located in the northeastern part of eastern Aermantai structural belt, is one of typical gold deposits in the region. Rb-Sr isotopic dating of 9 pyrites separated from the Dunbasitao gold deposit yielded an isochron age of 268.3 ± 2.8 Ma (MSWD=0.7), and this result is in good agreement with the high-potassium calc-alkaline granite in the northwestern part of ore district, indicating that gold mineralization was related to granite crystallization. Meanwhile, combining with the studies about metallogenic chronology of diagenetic and mineralization in East Junggar in recent years, it is suggested that Middle Permian from 270 Ma to 260 Ma may be an important time range of gold mineralization in East Junggar, Xinjiang. According to previous studies and the Rb-Sr ages reported, it is interpreted that the Dunbasitao gold deposit was formed in an post-collision extended environment related to lithospheric extension with tectonic, magma and fluid activities during the Middle Permian in East Junggar. The age of Dunbasitao gold deposit reported in this study is of great significance both for comparison studies in mineriza-

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.41672083, 41772071); 中央高校基本科研业务费区域引导专项(No.CUGQYZX1708)。

作者简介: 李欢(1987-), 男, 博士后, 主要从事矿床地球化学研究工作。ORCID: 0000-0001-6061-6083. E-mail: lihuandz@163.com

*** 通讯作者:** 李艳军, ORCID: 0000-0001-6855-8711. E-mail: liyanjun21023@163.com

引用格式: 李欢, 李艳军, 魏俊浩, 等, 2018. 新疆东准噶尔顿巴斯套金矿床含金黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄及地质意义. 地球科学, 43(12): 4606-4620.

tion of gold deposits in the region and practice for mineral exploration.

Key words: Rb-Sr isotopic dating; pyrite; Middle Permian; Dunbasitao gold deposit; East Junggar; geochronology.

阿尔泰造山带南缘、准噶尔盆地东北缘的东准噶尔地区为新疆北部一个重要的金多金属成矿区,也为中亚成矿域的重要组成部分之一(Zhu *et al.*, 2016).区内自北向南分布有额尔齐斯、阿尔曼泰和卡拉麦里 3 条大型构造带,已发现的金矿床(点)均分布于这些构造带中及其附近(图 1).近年来,该区

先后发现并评价了多个金矿床(点),如北部额尔齐斯构造带及其附近的萨尔布拉克、阿克塔斯、喀拉萨依、科克萨依—阿拉塔斯、布尔根等金矿床(点)和南部卡拉麦里构造带及其以北地段的清水 48 号、金水泉、红柳沟、双泉、苏吉泉东、南明水、野马泉、库布苏等金矿床(点)(图 1b).矿床成因类型主要有岩浆热

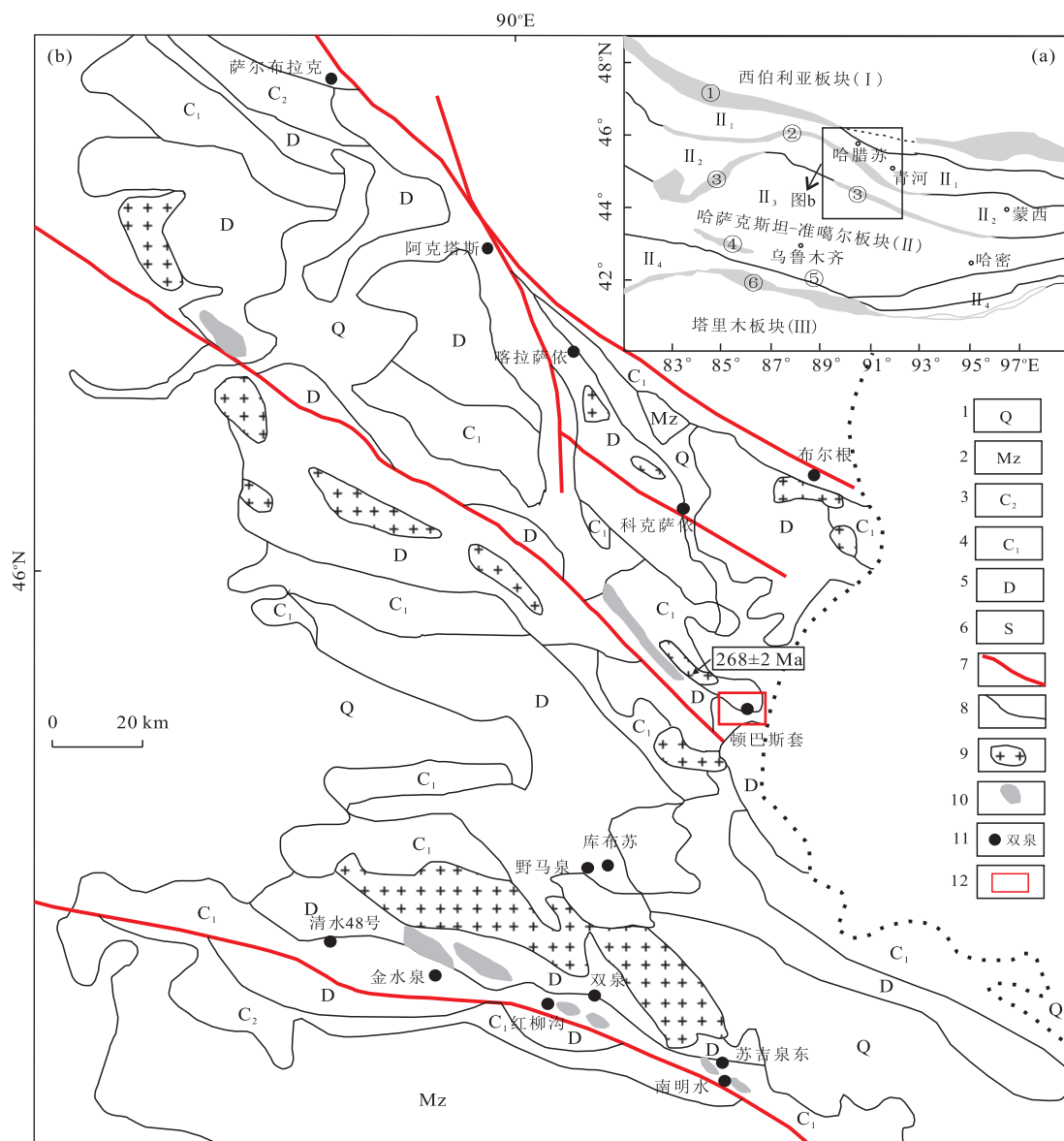


图 1 东准噶尔大地构造位置(a)及地质矿产简图(b)

Fig.1 Sketch map of tectonic location(a) and the geological mineral resources (b) of East Junggar

a.据董连慧等(2009)修改;b.据张栋等(2011)修改;①布尔根蛇绿岩带;②阿尔曼泰蛇绿岩带;③卡拉麦里蛇绿岩带;④冰达坂蛇绿岩带;⑤红柳河蛇绿岩带。I.西伯利亚板块;II.哈萨克斯坦—准噶尔板块;II₁.萨吾尔山晚古生代大洋岛弧;II₂.野马泉早古生代大陆岛弧;II₃.准噶尔—吐哈陆块;II₄.天山地区古生代复合弧盆系统;III.塔里木板块。1.第四系;2.中生界;3.上石炭统;4.下石炭统;5.泥盆系;6.志留系;7.深大断裂带;8.地层界线;9.后碰撞花岗岩;10.蛇绿岩;11.金矿床(点);12.研究区

液型、火山热液型、变质热液型和沉积型(杨富全和吴海,2000).而路彦明等(2010)提出了不同的分类方案,如产于晚古生代凝灰岩、杂砂岩、浊积岩中的金矿床,产于海西期中酸性(偏碱性)侵入岩及其接触带中的金矿床和产于晚古生代火山岩系中的金矿床.已有的年代学数据表明,晚石炭—中二叠世是东准噶尔地区最为重要的金属矿床成矿时期(李华芹等,1998;李华芹和陈富文,2004;路彦明,2008).然而,除了科克萨依—阿拉塔斯金矿床(闫升好等,2006a,2006b)和双泉金矿床(路彦明,2008;徐斌等,2009)采用了绢云母 Ar-Ar 定年测试方法,其他金矿床的成矿时代或者是采用了石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线定年测试方法(李华芹和陈富文,2004)来确定,或者是通过测试与成矿有关的岩浆岩或地层来间接限定,缺乏对主成矿阶段矿石矿物(如含金黄铁矿等)的直接定年.区内早期变质变形作用过程中往往也形成大量的云母、石英等蚀变矿物,特别是伴生在脆—韧性剪切带中的云母和石英,很难确定其是否形成于金矿床的主成矿阶段,这些蚀变矿物的年龄可能并不能代表真实的成矿年龄.前人对区内金矿床的成矿构造背景认识普遍缺乏可靠的成矿年代学证据.因此,直接利用矿石矿物来精确厘定区内金矿床的成矿时代是十分有必要的.

顿巴斯套金矿床位于阿尔曼泰构造带东段北东侧附近,是新疆有色地勘局 701 地质队于 2009 年在该构造带上发现的唯一一个金矿床,详查工作已探获主矿体(编号 L8 和 L2)333+334 金资源量约为 5 t,但矿床预估金资源量大于 10 t,平均品位约为 3 g/t.自发现以来前人仅在矿床地质特征、控矿因素和矿床成因等方面进行了初步研究(郭海棠,2013;王永,2013;肖飞等,2014;李欢等,2018),一致认为其是受 NWW 向断裂构造控制的中低温破碎蚀变岩型金矿床,然而未见成矿时代相关方面的研究报道.本文在矿床地质、矿石学研究基础上,选取矿区 L8 号矿体中主成矿阶段含金黄铁矿采用 Rb-Sr 同位素等时线方法厘定成矿时代,为探讨成矿构造背景提供依据.同时,也为东准噶尔地区金矿床成矿作用对比和找矿实践提供参考信息.

1 成矿地质背景

阿尔曼泰东准噶尔地区位于哈萨克斯坦—准噶尔板块,其北以额尔齐斯蛇绿岩带为界与西伯利亚板块(I)相邻,南侧以卡拉麦里蛇绿岩带为界与塔里木

板块(III)相邻,在阿尔曼泰蛇绿岩带南北两侧发育有萨吾尔晚古生代大洋岛弧(II_1)和野马泉早古生代大陆岛弧(II_2)(图 1a)(董连慧等,2009).早古生代时期由于板块俯冲作用,形成了准噶尔和阿勒泰地块,以及野马泉陆弧和萨吾尔洋弧.晚泥盆世—早石炭世期间,准噶尔板块、野马泉陆弧、萨吾尔洋弧及阿勒泰地块发生全面碰撞,准噶尔与西伯利亚拼合.早石炭世末—二叠纪,在大规模陆间碰撞造山、构造隆起之后,地壳运动表现为强烈的陆内伸展走滑,造山带步入以岩石圈伸展为主的陆内后碰撞伸展期.在碰撞造山挤压—伸展转换期,沿早期俯冲带或板块碰撞缝合带等特定位置产生一系列大规模区域断裂构造带(图 1b)(张栋等,2011;张玉杰等,2013).其中,额尔齐斯构造带、阿尔曼泰构造带和卡拉麦里构造带为 3 个大型的板块碰撞缝合带,以出现蛇绿岩为其典型特征,而之间的 2 个构造带为火山(岩浆)弧带.构造带内岩石均塑性变形和变质,普遍片理化,显示右行韧性剪切性质.各种岩脉及石英脉发育且大多沿构造带附近同方向的次级断裂侵位.东准噶尔至今已发现的金矿床(点)绝大多数均分布于这些构造带内及附近.区域上主要出露古生代志留系—石炭系、中生界及第四系(图 1b).萨吾尔晚古生代岛弧带由老到新主要出露:下泥盆统托让格库都克组(D_1t)、中泥盆统北塔山组(D_2bt)、中泥盆统蕴都喀拉组(D_2yd)、上泥盆统卡希翁组(D_3k)、下石炭统姜巴斯套组(C_1j)、上石炭统吉木乃组(C_2jm),主要为一套浅变质的火山—沉积碎屑岩,受呈 NW 向展布的区域性深大断裂带控制,区内以发育 NW 和 NWW 向的褶皱、断裂及韧性剪切带为其典型特征.深大断裂带及其北东侧次一级的与其呈一定夹角并平行展布的 NWW 向构造构成该区的主要构造格局.区内岩浆岩较发育,侵入时代主要为晚石炭世—早二叠世,泥盆纪、三叠纪次之,大多呈岩基或岩株状侵入泥盆系、石炭系中,其展布方向与区域构造线方向基本一致(图 1b).中酸性岩脉普遍发育,绝大多数沿与构造走向近似一致的次级断裂侵位且常见片理化现象.金矿化往往产于这些岩脉内部及其与地层接触部位附近.

顿巴斯套金矿区内出露的地层主要为下石炭统姜巴斯套组(C_1j),是一套陆源碎屑岩沉积建造.该组地层分为上下两段,第 1 岩性段(C_1j^1)主要为粉砂岩(st)、岩屑砂岩(ds)、砂砾岩(scg)及凝灰质粉砂岩(图 2a),第 2 岩性段(C_1j^2)主要为沉凝灰岩及流纹质玻屑凝灰岩,偶夹泥晶灰岩和砂岩.受阿尔曼泰断裂及岩浆活动影响,该套地层往往发生脆—韧

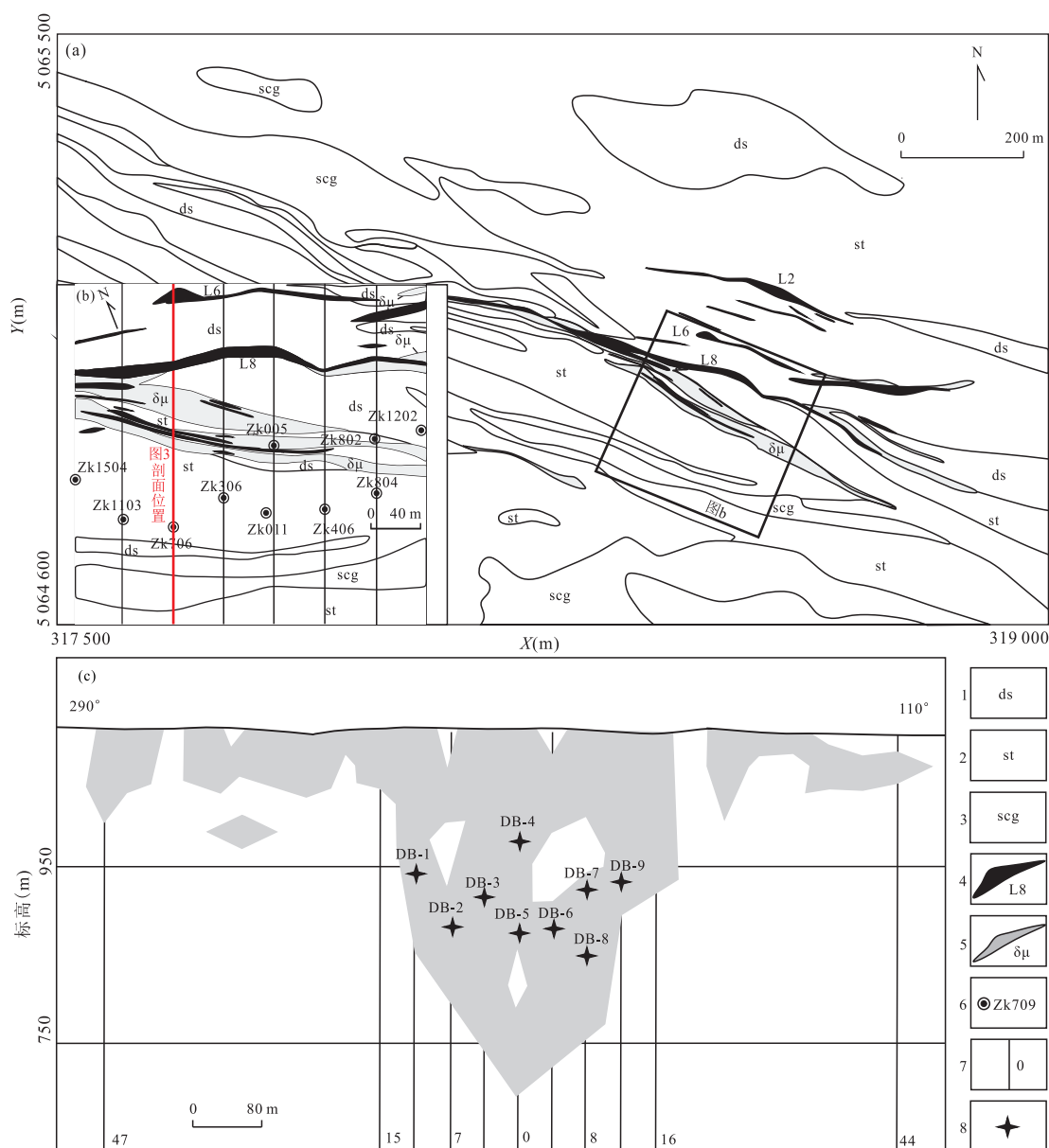


图 2 东准噶尔顿巴斯套金矿床地质简图(a)、采样钻孔平面分布(b)和 L8 号矿体垂直纵投影图(c)

Fig.2 Sketch geological map (a), distribution of the sampling drills of Dunbasitao gold deposit (b) and vertical projection map of No.8 orebody (c) in East Junggar

据魏贤峰等(2013)修改.1.长石岩屑砂岩;2.粉砂岩;3.砂砾岩;4.矿体及其编号;5.闪长(玢)岩脉;6.取样钻孔及编号;7.勘探线及编号;8.采样位置及编号

性变形,局部岩石片理化较强.矿体产在姜巴斯套组第 1 岩性段(C_{1j}^1)中.矿区位于区域性阿尔曼泰断裂带的北东侧,主构造线方向呈 NW 向,发育一系列密集分布的向南陡倾的 NW 和 NWW 向断裂构造,这些断裂在成矿过程中都起到了不同的控制作用,在某种程度上控制了矿区或矿体的分布.阿尔曼泰断裂从矿区西南角向两端延伸,走向为 $110^{\circ}\sim 123^{\circ}$,向南西陡倾,为矿区的成矿边界断裂.受其影响在矿区内形成南北两条近平行的脆—韧性构造蚀

变带,构造特征明显,呈 NWW 向展布,宽约为 $400\sim 600$ m,长约为 $1\,800\sim 6\,000$ m,与边界断裂呈一定夹角近平行展布.构造蚀变带两侧断裂的走向为 $90^{\circ}\sim 110^{\circ}$,向南陡倾,倾角为 $70^{\circ}\sim 85^{\circ}$,带内岩石均塑性变形和变质,普遍发生了强烈的片理化,可见糜棱岩化、剪切褶皱、面理置换以及 S-C 组构等,总体显示右行剪切特征.矿(化)体均赋存在这 2 条脆—韧性构造蚀变带中陡倾断裂破碎带内.矿区内侵入岩主要以中酸性脉岩为主,脉宽一般为 $0.5\sim$

80 m, 长度一般为 5~200 m, 最长可达 300~500 m, 其形成受区域断裂构造控制较为明显, 多沿构造带中同方向的次级断裂侵位, 金矿化大多产在这些岩脉与地层接触部位附近且更靠近地层一侧。

2 矿化特征

顿巴斯套金矿床矿体主要赋存于南部 NWW 向脆—韧性构造蚀变带中, 大致平行分布的石英闪长玢岩及石英脉与姜巴斯套组第 1 岩性段(C_{1j}^1)粉砂岩(st)、岩屑砂岩(ds)、砂砾岩(scg)接触部位附近, 且更靠近地层一侧的次级断裂、裂隙、破碎带和片理化带中(图 2a, 2b)。矿体及矿化体走向与构造蚀变带基本一致, 沿蚀变带断续分布。通过地表工程笔者共圈定了 31 条金矿体(编号为 L1~L31)。矿体地表长为 40~850 m, 平均厚度为 1.00~16.20 m, 平均品位为 1.00~33.47 g/t, 金矿体产状为($205^\circ \sim 215^\circ$) $\angle$ ($70^\circ \sim 85^\circ$), 为陡倾的脉状体, 偶呈透镜状, 局部近于直立甚至存在倾向北的情况, 但总体向南倾。大部分矿体向深部延伸较大, 一般 ≥ 200 m, 个别矿体延深达到 450 m。其中, 东矿区 L8 号矿体规模

最大, 位于 47 线—44 线之间, 沿 NWW 走向延伸, 地表断续长为 850 m, 向深部延伸稳定, 控制深度为 40~450 m, 尤其在 11 线—16 线向深部延伸较稳定, 平均深度为 230 m(图 2c)。矿体向南陡倾, 倾角一般为 $70^\circ \sim 85^\circ$ 。含矿构造延伸稳定, 向深部产状有所变缓。矿体向深部和走向上普遍存在尖灭再现、尖灭侧现现象, 上下盘普遍存在近平行盲矿体(图 2a, 2b 和图 3)。

矿石类型主要为蚀变岩型(图 4a~4e)和石英脉型(图 4f)。蚀变岩型包括蚀变浅变质细碎屑岩型和蚀变浅成中酸性脉岩型。前者主要为绢云母化蚀变粉砂岩型(图 4b, 4c, 4d)、绢云母化蚀变长石岩屑砂岩型(图 4a, 4e)、蚀变含砾砂岩及砂砾岩型, 后者主要为蚀变石英闪长玢岩型。其中, 蚀变浅变质细碎屑岩型矿化强度和规模相对较好, 金品位也相对较高。地表往往为含特征黄褐色、红褐色粉末状褐铁矿构造蚀变破碎带。钻孔中所见原生矿石矿化以赋矿的浅变质细碎屑岩发育微裂隙浸染状硅化(石英)细网脉(往往较破碎)及金属硫化物细(网)脉为特征(图 4a, 4b, 4c)。蚀变石英闪长玢岩型矿石分布局限, 且多为矿化体, 极少数情况下形成工业矿体。石英脉

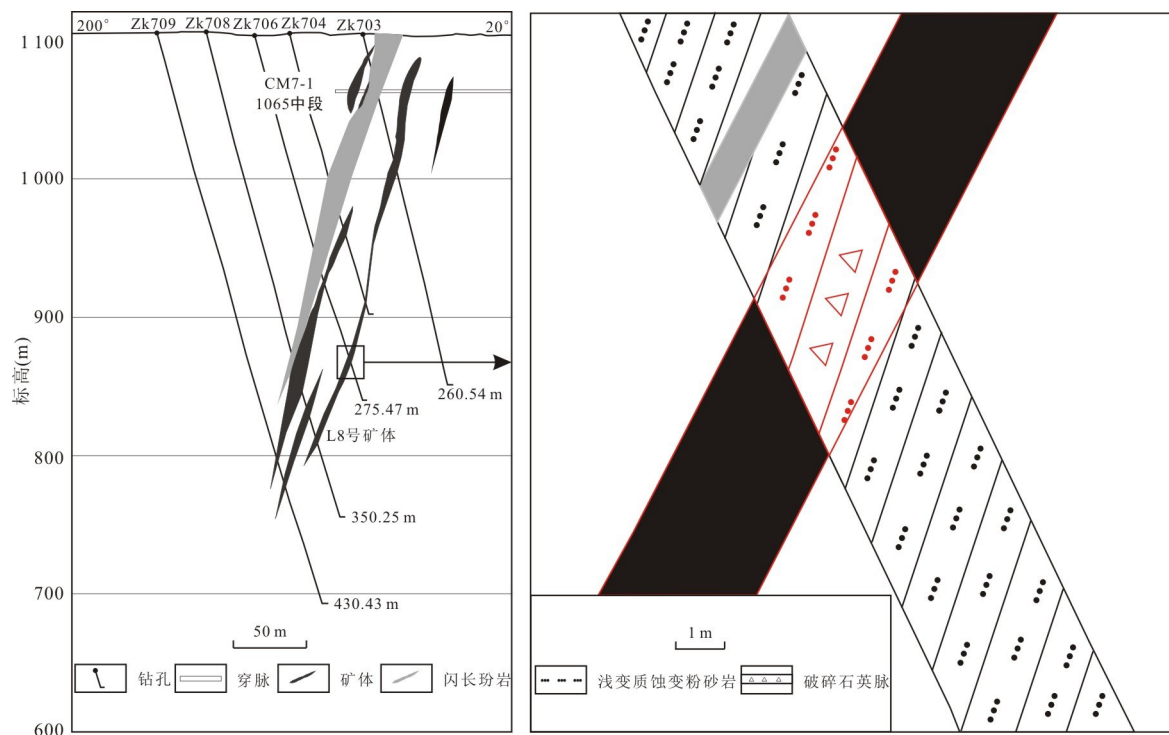


图 3 东准噶尔顿巴斯套金矿床东矿区 8 号矿体 7 线地质勘探线剖面

Fig.3 The 7th line geological exploration section of the No.8 orebody in eastern mineralized district of Dunbasitao gold deposit in East Junggar

据魏贤峰等(2013)修改

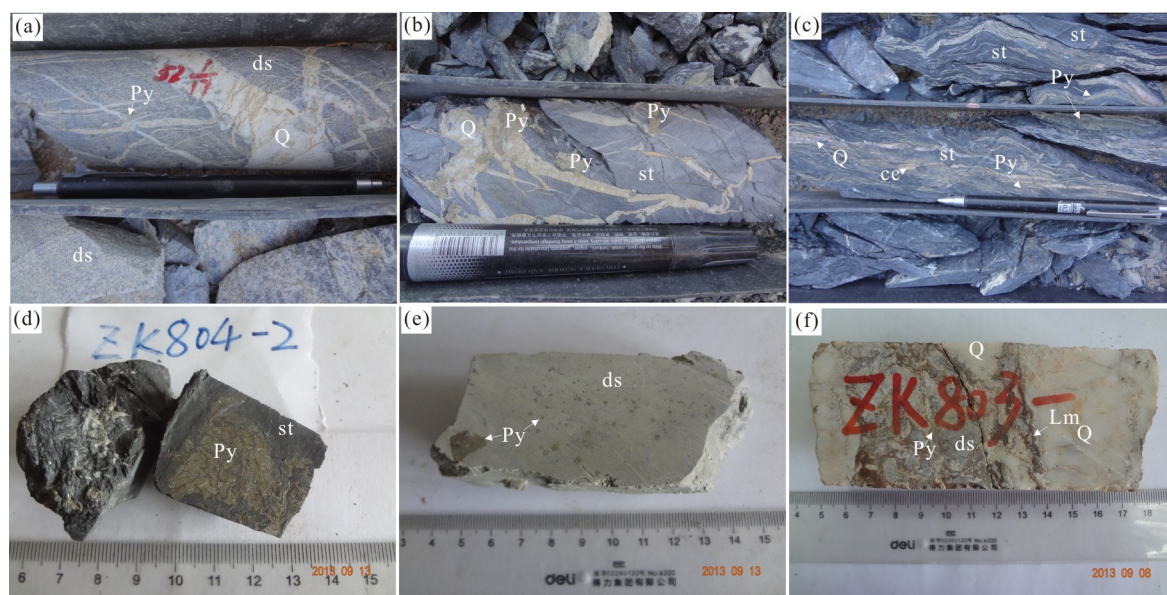


图 4 东准噶尔顿巴斯套金矿床矿石类型以及矿化特征

Fig.4 Ore type and mineralization features of Dunbasitao gold deposit in East Junggar

a.网脉状蚀变长石岩屑砂岩型矿石; b.细脉状蚀变粉砂岩型矿石; c.条带状蚀变粉砂岩型矿石; d.团块状含炭质蚀变粉砂岩型矿石; e.浸染状蚀变岩屑砂岩型矿石,显示可能至少存在两期黄铁矿; f.角砾状石英脉型矿石,显示石英脉、粉砂岩碎块被黄铁矿及褐铁矿等矿物胶结。Q.石英; Py.黄铁矿; st.粉砂岩; Lm.褐铁矿; cc.方解石; ds.长石岩屑砂岩

型包括细网脉石英脉型和大脉石英脉型。在以 L8 号矿体为代表的主矿带垂向成矿层次范围内,上部多表现为大脉石英脉型矿化,中部过渡为细网脉石英脉和构造蚀变岩复合型,下部往往为构造蚀变岩型矿化,细网脉石英脉和构造蚀变岩型矿化强度和规模较好。矿石构造主要有细脉、网脉状(图 4a,4b)、条带状(图 4c)、团块状(图 4d)、稀疏浸染状(图 4e)、角砾状(图 4f)及蜂窝状构造等。矿石结构主要有自形一半自形粒状结构、脉状结构、共结边结构、交代溶蚀结构、包含结构、固溶体出溶结构、碎裂结构等。

矿石中主要金属矿物为自然金、黄铁矿、毒砂、褐铁矿,及少量黄铜矿、方铅矿和闪锌矿,非金属矿物主要为绢云母、石英、方解石,及少量的绿泥石、长石、高岭土。其中,黄铁矿和毒砂是最主要的载金矿物(图 5)。金的主要存在形式为自然金、包体金及裂隙金,主要呈微细粒状分布于矿物裂隙及晶隙之间(图 5f),局部沿石英脉裂隙呈细脉状分布。在地表及近地表矿石往往被氧化形成赭石、褐铁矿、黄钾铁矾、石膏等,偶见孔雀石。根据矿物共生组合,矿石有 3 种基本组合类型:黄铁矿—金—石英组合类型、黄铁矿—毒砂—金—石英组合类型和金—石英组合类型。其中第 1、2 种是矿区最主要的矿石组合类型。

通过地表工程及钻探成果分析,金矿化与石英大脉、不规则石英细网脉、黄铁矿化、毒砂化发育程

度关系密切,近矿围岩蚀变主要是黄铁矿化、毒砂化、硅化、绢云母化,其次为绿泥石化、碳酸盐化等。蚀变主要沿赋矿断裂分布,形成线状分布的蚀变带,与矿化或矿体在空间上伴生或大致重合。蚀变强度具有近矿脉强远离变弱、矿体上盘强下盘弱的特点。蚀变在空间上具有由中温到低温的横向水平分带趋势:硅化、黄铁矿化、毒砂化、绢云母化—粘土化、绿泥石化—碳酸盐化。

依据矿石结构构造、矿物共生组合及相互穿插、交代关系,顿巴斯套金矿床成矿作用可划分为热液期和表生期 2 个成矿期。热液期又进一步划分为 4 个成矿阶段:早期石英脉阶段、粗粒黄铁矿—石英脉阶段、细粒黄铁矿(毒砂)—石英脉阶段和石英—碳酸盐阶段,其中第 3 阶段为矿区最主要的成矿阶段。

I 早期石英脉阶段:主要为较大型的石英脉,早期的石英脉结晶程度较好,不含硫化物。

II 粗粒黄铁矿—石英脉阶段:早期的石英脉结晶程度较好,硫化物多为自形一半自形粒状黄铁矿,颗粒较为自形,晶形较大,多被后期的动力作用压碎,为早期第 1 世代黄铁矿(Py1)(图 5a,5b),此阶段的石英脉含矿性较差,金矿化明显较弱。

III 细粒黄铁矿(毒砂)—石英脉阶段:矿物以黄铁矿、毒砂为主,有极少量黄铜矿、方铅矿和闪锌矿。石英脉结晶程度较差,形成第 2 世代中细粒自形一

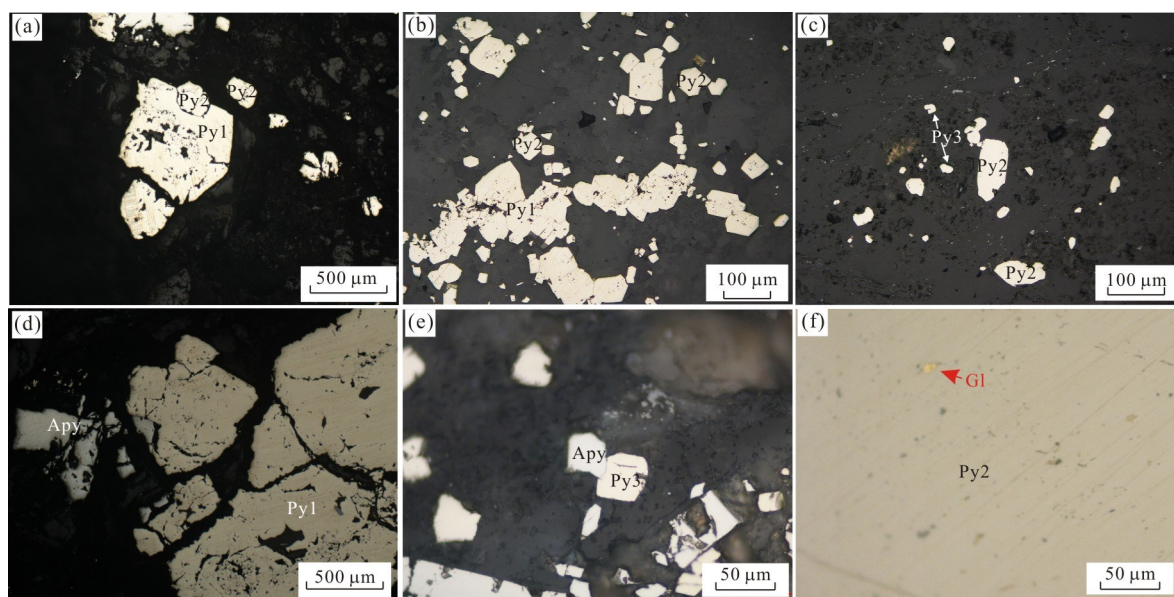


图 5 东准噶尔顿巴斯套金矿床矿石镜下照片

Fig.5 Photomicrographs of selected ores from Dunbasitao gold deposit in East Junggar

a.早期自形一半自形黄铁矿(Py1)被中细粒黄铁矿(Py2)交代; b.粗粒黄铁矿(Py1)呈自形一半自形粒状结构,多被后期的动力作用压碎;中细粒半自形黄铁矿(Py2)晶形完整,无微裂隙或微孔隙; c.中细粒半自形黄铁矿(Py2)和细粒黄铁矿(Py3),无明显穿插; d.早期粗粒黄铁矿(Py1)被后期毒砂(Apy)交代; e.后期细粒的黄铁矿(Py3)和毒砂(Apy)呈共结边结构,表明同期形成; f.黄铁矿(Py2)颗粒中呈椭圆状分布的包裹金。Py1.第1世代黄铁矿; Py2.第2世代黄铁矿; Py3.第3世代黄铁矿; Apy.毒砂; Gl.自然金

半自形黄铁矿(Py2)和第3世代自形、半自形和他形粒状细粒黄铁矿(Py3)(图5b,5c),无微裂隙或微空隙,多呈细脉浸染状、网脉状充填在碎屑岩裂隙中。毒砂的晶形较为自形,呈银白色针状,常交代早期第1世代黄铁矿(图5d),与第3世代黄铁矿呈共结边结构(图5e),表明同期形成。该阶段黄铁矿中产出包裹金(图5f)。

IV 石英—碳酸盐阶段: 在热液晚期阶段,随着温度的降低,石英和方解石组合共生,形成了石英—碳酸盐脉,并将早期形成的细粒他形黄铁矿颗粒和针状毒砂包裹起来,使其沿着石英—碳酸盐脉壁生长。

表生期: 原生矿石发生氧化淋滤,形成赭石化、褐铁矿化、黄钾铁矾化、碳酸盐化和粘土化,偶见孔雀石化,呈角砾状和蜂窝状。褐铁矿和黄钾铁矾,沿岩石裂隙呈脉状分布,或呈不规则状星点分布,主要呈蜂窝状、星点状充填在石英脉及围岩的裂隙中。

3 样品采集及分析方法

9件测试的黄铁矿样品均采自顿巴斯套金矿东矿区钻孔中代表性金矿石(图3b),沿L8号矿体走向在11线—16线上近等距进行(图3c),以细脉、网脉状矿石为主,样品新鲜,无氧化,均为热液期第3

成矿阶段的矿石,即细粒黄铁矿(毒砂)—石英脉阶段金矿石,矿石矿物主要为黄铁矿。镜下观察不同世代黄铁矿粒度、自形程度。第1世代粗粒黄铁矿多被后期的动力作用压碎(图5b,5d),并被后期脉石矿物穿插,粒径一般为0.5~2.5 mm;第2世代黄铁矿主要呈中细粒自形一半自形,很少有后期矿物穿插,后期破碎较弱、极少有微裂隙或微孔隙(图5a~5c),粒径为0.1~0.5 mm;第3世代黄铁矿粒度最细(图5c,5e),呈自形—他形,粒度均小于0.1 mm,基本无后期破碎与脉石矿物穿插。基于上述不同阶段黄铁矿之间粒径的差别,将采集的矿石样品在双目镜下反复挑选出黄铁矿单矿物,纯度达99%以上,挑选其中较为自形、裂隙不发育、很少有后期脉石矿物穿插的、粒径在0.1~0.5 mm的第2世代黄铁矿颗粒,用蒸馏水清洗,低温蒸干,并在加工时在玛瑙研钵内将样品研磨至200目以下供测试使用。

笔者在南京大学现代分析中心同位素分析室对黄铁矿样品进行微量元素Rb、Sr含量的草测,在此基础上,挑选适合定年的样品在该实验室进行Rb、Sr含量和同位素组成测定。具体分析方法如下:9件待测黄铁矿样品经过不同浓度HCl+HNO₃混合酸、H₂SO₄和HNO₃+HClO₄混合酸的多次消化溶解成清液,蒸干后以酸为介质溶解成清液,并将该溶液一

分为二:一份为测定同位素比值样品(不加 Rb-Sr 同位素稀释剂),另一份为测定同位素含量样品(加进口高纯丰度的 Rb-Sr 同位素稀释剂).静置 12 h 以达同位素平衡,待上分离柱.样品中的 Rb-Sr 同位素比值测定均在南京大学现代分析中心由英国制造的新近改造的 VG354 多接收同位素质谱计上完成.测定 Rb-Sr 同位素与含量,一般采用单接收系统.测 Sr 同位素比值采用 5 个多接收器,用峰跳式扫描测定软件程序进行测定.为了获取高精度 Sr 同位素比值,采用相对低些的发射电流和高效率的发射剂,每一个样品测定要用 3~5 h 以上的测定时间.实验测定美国国家标准局 NBS-987 碳酸盐锶同位素标准样品中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的测定值为 $0.710\,236\pm0.000\,007(2\sigma, n=8)$, $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.119\,4$ 为标准化值.Sr 的全流程本底为 3×10^{-9} g.实验给出 TIMS 测定的 Rb、Sr 含量, $^{85}\text{Rb}/^{87}\text{Rb}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值,同时给出测定的美国 NBS-987 Sr 同位素标准值,以 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}=0.119\,4$ 为标准化值,测得 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710\,241\pm0.000\,008, n=9$; Sr 全流程本底为 3×10^{-9} g.详细的 Rb-Sr 同位素化学制备、质谱测定方法以及各类标准样品测定结果可参考文献(王银喜等,2007; Wang *et al.*, 2007). $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值采用 2‰ 误差, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 误差(2 σ)采用 0.01‰ 计算, $\lambda(^{87}\text{Rb})=1.42\times10^{-11}\text{a}^{-1}$.等时线年龄采用 ISOPLOT 程序计算(Ludwig, 1998).

4 结果

本次实验全流程本底 Sr 为 3×10^{-9} g,远小于所测样品中 Sr 含量,因此,不会影响实验中 Sr 含量的准确测定.采用的标准物质美国 NBS 的测定结果 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710\,241\pm0.000\,008, n=9$,与推荐值

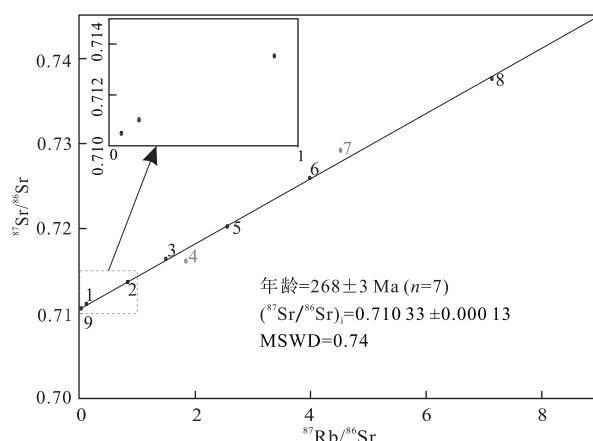


图 6 东准噶尔顿巴斯套金矿床黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄

Fig.6 Rb-Sr isochron for pyrite samples from Dunbasitao gold deposit in East Junggar

4 和 7 号测试点未参与等时线拟合,原因见正文

一致,说明实验分析条件良好,所获得的测试数据可靠.9 件黄铁矿样品的 Rb、Sr 含量和 Rb-Sr 同位素组成测试数据见表 1,计算结果见图 6.

本次测试的 9 件黄铁矿样品 Rb 变化范围为 $0.132\,8\times10^{-6}\sim3.579\,0\times10^{-6}$, Sr 为 $1.475\times10^{-6}\sim7.269\times10^{-6}$, Rb/Sr 比值为 0.02~2.43,变化范围较大. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.710 503~0.737 582) 和 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (0.065 3~7.153 0) 分布较分散.在分析过程中,由于测点 4 和 7 样品的 $^{85}\text{Rb}/^{87}\text{Rb}$ 比值误差较大,其与稀释剂混合的比例可能也偏离了最佳稀释比,实际测试误差偏大(表 1),在等时线计算时将这 2 个离散点去除.其余 7 个测点可以拟合一条理想的等时线,得到黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 268 ± 3 Ma (MSWD = 0.7), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 $0.710\,33\pm0.000\,13(n=7)$ (图 6).

表 1 东准噶尔顿巴斯套金矿床 9 件黄铁矿样品 Rb-Sr 同位素比值及含量测定结果

Table 1 Rb-Sr isotopic data of 9 pyrite samples from Dunbasitao gold deposit in East Junggar

序号	样品号	Rb(10^{-6})	Sr(10^{-6})	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	误差(2 σ)
1	DB-1	0.389 7	7.269	0.158 7	0.711 031	0.000 008
2	DB-2	2.031 0	6.753	0.874 2	0.713 543	0.000 009
3	DB-3	0.956 4	1.847	1.536 0	0.716 292	0.000 007
4	DB-4	1.573 0	2.471	1.879 0	0.715 989	0.000 015
5	DB-5	1.986 0	2.258	2.594 0	0.720 171	0.000 009
6	DB-6	2.874 0	2.115	4.017 0	0.725 775	0.000 007
7	DB-7	3.012 0	1.956	4.538 0	0.729 101	0.000 017
8	DB-8	3.579 0	1.475	7.153 0	0.737 582	0.000 010
9	DB-9	0.132 8	5.967	0.065 3	0.710 503	0.000 009

注: $\lambda(^{87}\text{Rb})=1.42\times10^{-11}\text{a}^{-1}$.

5 讨论

5.1 成矿时代

黄铁矿中的 Rb 和 Sr 并不能进入黄铁矿的晶格之中,而主要是以类质同象、包裹体和机械混入物形式赋存在其内部的长石、云母等含钾矿物包裹体或流体包裹体中(陈光远等,1989; Lüders and Ziemann,1999; 韩以贵等,2007; Li *et al.*,2008).测定黄铁矿中 Rb 和 Sr 的含量,实质上是对其中的矿物包裹体或流体包裹体的测定.不同黄铁矿中 Rb、Sr 的赋存形式和状态各异,尤其是长石、云母包裹体可导致 Rb、Sr 含量及 Rb/Sr 比值的显著变化,为其直接定年提供了可能(Yang and Zhou,2001; Li *et al.*,2008).在成矿过程中,黄铁矿结晶温度高(227~320 °C)、能力强,在中温热液条件下能迅速结晶并形成完好晶形,从而保持良好的封闭状态,不再受成矿热液的影响(陈光远等,1989; 杨进辉等,2000).如果黄铁矿和其中的包裹体同时结晶或形成后达到 Rb-Sr 同位素平衡,定年结果可以代表黄铁矿的形成年龄(Li *et al.*,2008).因此,在满足同源、同时、封闭性、一致的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 以及不同的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值(李文博等,2002)的基本前提下,进行黄铁矿 Rb-Sr 等时线测年是可行的.将主成矿阶段含金黄铁矿全溶,测其 Rb-Sr 同位素组成,可以确定其形成年龄,也能代表金的成矿时代.近年来,直接、准确测定矿石矿物年龄的技术逐渐成熟.利用矿石矿物中黄铁矿样品的 Rb-Sr 同位素体系来直接获取成矿年龄的成功实例已有很多报道,如胶东玲珑金矿床(杨进辉和周新华,2000; 杨进辉等,2000; Yang and Zhou,2001; Li *et al.*,2008)、安徽铜陵新桥铜金矿床(王彦斌等,2004)、豫西祁雨沟金矿床(韩以贵等,2007)及郟庐断裂带龙泉站金矿床(石文杰等,2014)等.此外,黄铁矿 Rb-Sr 定年在测试仪器低本底、高灵敏度和所需样品量少等方面显示出很大的优势.

根据显微镜和电子探针观察,第 2 世代黄铁矿颗粒很少发育微裂隙,并且发现有原生的黑云母和钾长石等含钾矿物包裹体(图 7).这些包裹体随机分布,直径一般小于 0.1 mm.钾化是顿巴斯套金矿主成矿期的重要蚀变,故黄铁矿在结晶生长过程中很可能捕获了这些含钾矿物.黄铁矿中的 Rb 和 Sr 可能主要赋存于其内部的长石、云母等包裹体中,黄铁矿 Rb-Sr 定年实际上是对含钾矿物的 Rb-Sr 定年.

本次测试的 9 件黄铁矿样品采自矿区同一矿体 L8 走向上的不同部位,尽量保证同源.在测试分析时利用超低本底来分别测定 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值,避免误差叠加.测试样品 Rb、Sr 含量和 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围较大, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 分布较分散,表明黄铁矿中存在 Rb 和 Sr 的分异,符合 Rb-Sr 同位素的等时线要求.不同样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 相对稳定变化,说明在黄铁矿生长期间其初始比值基本保持不变,Rb、Sr 含量的变化可能与黄铁矿中存在的矿物包裹体有关(Li *et al.*,2008).因此可以认为该成矿阶段黄铁矿结晶以后保持了良好的封闭状态,与其中的矿物包裹体同时生长并达到了 Sr 同位素平衡,所获得的等时线年龄应能代表黄铁矿的形成年龄.完整黄铁矿颗粒即使遭受后期透入性变形、变质仍可保持物化性质稳定,保证 Rb、Sr 同位素体系的封闭,但若发生脆性破裂后,由于晶体表面积大幅增加,后期流体作用将使其较容易发生溶解或交代反应,从而扰动 Rb、Sr 同位素体系(Craig *et al.*,1998; 韩以贵等,2007).本文选择主成矿期第 2 世代黄铁矿(Py2)开展 Rb-Sr 同位素测年,该期黄铁矿与金近于同时形成,其结晶完好,裂隙不发育,与第 3 世代黄铁矿(Py3)及毒砂共生,无明显穿插关系(图 5c,5e),基本未受到后期构造事件的改造,也没有受后期热液交代作用的影响,保证了 Rb-Sr 同位素体系的封闭.再者,黄铁矿是顿巴斯套金矿床矿石中主要的金属矿物,也是最重要的载金矿物,矿石中金的含量与中细粒黄铁矿(Py2 和 Py3)的含量呈正相关关系,金绝大多数呈微细粒状赋存在黄铁矿晶体裂隙中或晶隙之间,因此,本次测试的黄铁矿给出的 Rb-Sr 等时线年龄(268 ± 3 Ma)能代表顿巴斯套金矿床主成矿阶段金成矿作用的时代.该年龄数据与矿区西北部克泽勒阔依塔斯—加马特单元中高钾钙碱性的细粒花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(268 ± 2 Ma,魏贤峰等,2013)一致,明显晚于矿区内侵入姜巴斯套组地层中的成矿前的(石英)闪长玢岩脉(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 378 ± 2 Ma;周红智等,2019).黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄与野外观测的地质关系相一致,表明测年结果真实可靠.

近年来,不同学者主要运用了石英、云母类 Ar-Ar 和石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线方法或通过测试与成矿有关的岩浆岩或地层来间接限定,对东准噶尔地区的主要金矿床进行了测年(图 1,表 2),缺乏对热液蚀变矿物或金属硫化物的直接定年.以往的同位素年龄数据总体显示早石炭世初至三叠世发生过 3 次构造流体热事件,同位素年龄记录的时间

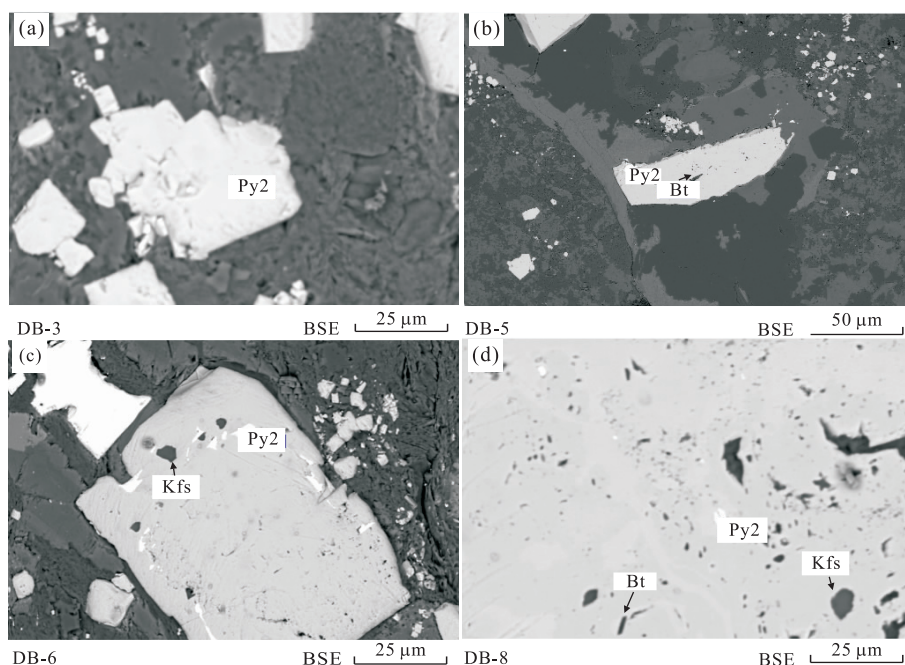


图7 黄铁矿及其中原生包裹体的BSE图像

Fig.7 BSE images of pyrite and its primary inclusions

测试分析在武汉理工大学材料测试中心电子探针实验室完成。a.第2世代(Py2)黄铁矿,极少发育微裂隙或微孔隙;b.黄铁矿中黑云母(Bt)包裹体;c.黄铁矿中钾长石(Kfs)包裹体;d.黄铁矿中黑云母(Bt)和钾长石(Kfs)包裹体

表 2 东准噶尔金矿成矿年龄统计

Table 2 Mineralization ages of gold deposits from East Junggar

地区	金矿	测试对象	测试方法	成矿时代(Ma)	资料来源
额尔齐斯带	科克萨依	石英	Rb-Sr	227±24	李华芹和陈富文(2004)
	科克萨依	绢云母	Ar-Ar	275.8±5.2	闫升好等(2006a)
	阿拉塔斯	绢云母	Ar-Ar	283.1±5.2	闫升好等(2006b)
	萨尔布拉克	毒砂	Pb-Pb	304.1±7.4	李华芹等(1998)
	萨尔布拉克	流纹斑岩	Rb-Sr	292.1±7.3	李华芹等(1998)
	萨尔布拉克	石英	Rb-Sr	271±30	李华芹和陈富文(2004)
	阿克塔斯	斜长花岗岩锆石	SIMS U-Pb	309.9±6.7	纪珊珊(2013)
阿尔曼泰带	顿巴斯套	黄铁矿	Rb-Sr	268±3	本文
卡拉麦里带	库布苏	石英	Rb-Sr	269±11	李华芹和陈富文(2004)
	野马泉	石英	Rb-Sr	300±36	李华芹和陈富文(2004)
	野马泉	石英钠长斑岩	Rb-Sr	302±11	李华芹和陈富文(2004)
	双泉	绢云母	Ar-Ar	269±9	路彦明(2008)
	双泉	绢云母	Ar-Ar	265±2	
	双泉	绢云母	Ar-Ar	260±4	
	双泉	石英	Ar-Ar	269±8	徐斌等(2009)
	清水 48 号	石英	Rb-Sr	311±46	
	清水 48 号	玄武玢岩	Rb-Sr	315±30	
	索尔巴斯套	凝灰岩	Rb-Sr	265±7	李华芹和陈富文(2004)

分别约为晚石炭世—早二叠世(320~280 Ma)、中二叠世(270~260 Ma)和晚三叠世(230~220 Ma)(李华芹等,1998;李华芹和陈富文,2004;闫升好等,2004,2006a,2006b;路彦明,2008;徐斌等,2009;纪珊珊,2013)。前已述及,此次工作采用矿石

矿物黄铁矿的 Rb-Sr 测年方法直接测定了东准噶尔顿巴斯套金矿主成矿阶段的年龄(268±3 Ma),为中二叠世的产物。这与东准噶尔南部卡拉麦里带双泉金矿热液石英和绢云母 Ar-Ar 等时线年龄(269±9 Ma~260±4 Ma)(路彦明,2008;徐斌等,2009)

一致,也与北部额尔齐斯带科克萨依和阿拉塔斯 2 个金矿含金绢英质糜棱岩中云母类矿物 Ar-Ar 等时线年龄(275.8 ± 5.2 Ma 和 283.1 ± 5 Ma,代表金成矿之前的韧性剪切活动时代)相吻合(闫升好等, 2006a, 2006b),表明中二叠世(270~260 Ma)为新疆东准噶尔地区一个重要的金成矿时限。

5.2 成矿构造背景及地质意义

阿尔曼泰顿巴斯套金矿床为东准噶尔地区众多的金矿床之一,现阶段 L8 号主矿体已在进行局部开采,金矿化主要产于下石炭统姜巴斯套浅变质细碎屑岩地层中,并与韧性构造变形带具有密切的空间关系,前人多将区域上具有类似地质特征的金矿床归结为韧性剪切型或造山型金矿床,如双泉金矿床(路彦明等, 2007, 2008; 徐斌等, 2009)和萨尔布拉克金矿床(王燕海等, 2011),并且强调中酸性脉岩、韧性剪切和区域变质作用对成矿的影响。顿巴斯套金矿黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄(268 ± 3 Ma)能代表金的主成矿阶段时代,其明显晚于矿区内(石英)闪长玢岩(378 ± 2 Ma; 周红智等, 2019),而与矿区西北部高钾钙碱性花岗岩年龄(268 ± 2 Ma)相一致,显示该期金的成矿作用与晚泥盆世中酸性脉岩并无直接联系,很可能与中二叠世的岩浆活动有关。矿区西南部侵入到姜巴斯套组地层中的二长花岗岩与赋矿的 NWW 向韧性构造蚀变带近平行分布,其边部具有明显韧性剪切变形特征,发育 NW 向透入性叶理,形成弱片麻状构造,变形向岩体内部逐渐减弱,该侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 330 ± 2 Ma 基本上可反映韧性剪切变形时代的上限。北部额尔齐斯带和南部卡拉麦里带含金剪切带云母类和石英 Ar-Ar 年龄一致地记录了东准噶尔地区韧性剪切活动的时限约为 290~270 Ma(闫升好等, 2004; 路彦明, 2008; 徐斌等, 2009)。显然,金的成矿作用要滞后于韧性剪切构造变形事件,这与矿体普遍斜切韧性构造蚀变带内早期变质透入性面理或片理而多产于斜交的脆性断裂、裂隙中的地质事实相吻合。本文认为区内金的主成矿阶段时代要稍晚于区域变质作用和韧性剪切变形的时限。主成矿阶段 9 件黄铁矿样品的 Sr 同位素初始比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.710 33,高于地幔 Sr 同位素初始值(0.704; Faure, 1986),但明显低于大陆地壳 Sr 同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值(0.719; 孙省利, 2001),表明其成矿物质为壳幔混合来源。这与区域中二叠世后碰撞背景下的大规模岩浆混合作用具有密切联系(韩宝福等, 2006; 童英等, 2010; 李涤等, 2013;

Li *et al.*, 2014)。矿石中黄铁矿和毒砂的 $\delta^{34}\text{S}$ 分别为 3.0‰~5.8‰和 4.2‰~5.6‰,指示硫源具有岩浆硫特征,有深源硫参与(李欢等, 2018),矿石中黄铁矿的 Pb 同位素组成基本一致, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 17.875~18.102、15.483~15.625 和 37.699~38.148,指示成矿物质铅源以地幔铅为主,并同化了壳源铅,具有壳幔混源铅的特征(李欢等, 2018)。这些 S-Pb 同位素数据均为顿巴斯套金矿属岩浆热液成因提供了佐证。因此,顿巴斯套金矿床应是和中二叠世岩浆活动有关的热液矿床。

东准噶尔碰撞造山带是在早石炭世中后期至二叠纪(韩宝福等, 1999),由于西伯利亚板块与哈萨克斯坦—准噶尔板块强烈碰撞和随后发生的陆内俯冲推覆造山运动而逐步形成(韩宝福等, 1998, 1999, 2006)。前人根据大量花岗岩类锆石 U-Pb 年龄总结出东准噶尔地区后碰撞深成岩浆活动发生在 330~265 Ma(韩宝福等, 2006)。卡拉麦里一带甚至发现更早的后碰撞和双峰式火山岩($346.8 \sim 320$ Ma; 王富明等, 2014; 罗婷等, 2016)。阿尔曼泰构造带西段扎河坝地区也存在后碰撞的中钾玄武岩、英安岩($317 \sim 315$ Ma; Li *et al.*, 2014)及 A 型花岗岩(319 Ma; 韩宝福等, 2006)。这些后碰撞岩浆活动共同限定了该区构造体制由碰撞挤压到后碰撞伸展转换发生在早一晚石炭世(韩宝福等, 2006; Li *et al.*, 2014)。在此之前基本已经完成洋壳的关闭和弧陆或弧弧碰撞,并伴随有斑岩型或矽卡岩型的铜(钼)成矿作用,如东准噶尔北缘希勒库都克和索尔库都克铜(钼)矿床(辉钼矿 Re-Os 平均模式年龄和等时线年龄分别为 323 Ma 和 318 Ma)(Liu and Liu, 2013)。在碰撞造山过程早期经历了挤压环境下的以陆内推覆兼具右行为特点的剪切构造变形(路彦明, 2008; 张栋等, 2011; 张玉杰等, 2013)。在近 SN 向挤压作用下,多形成与区域 NNW 向韧性剪切变形带走向一致的呈断续透镜状分布的无矿化的无根石英脉,代表了早期无矿的变质流体。北部额尔齐斯带和南部卡拉麦里带含金韧性剪切带云母类和石英 Ar-Ar 年龄一致地记录了东准噶尔地区韧性剪切活动的时限约为 290~270 Ma(闫升好等, 2004; 路彦明, 2008; 徐斌等, 2009)。在该时间范围内及以前,构造带在空间上由韧性向脆性、脆性变形转换,由深层次向浅层次构造变形过渡,构造体制由碰撞造山的挤压向拉张伸展转变,随着构造隆起,地壳发生强烈的陆内伸展走滑运动,沿先存的剪切

构造系统中的各类剪裂面或裂隙,发生以脆性变形为主的构造变形(路彦明,2008;张栋等,2011;张玉杰等,2013)。同时,区域上也存在大规模岩浆活动响应,如也布山(268 Ma)、别拉格库都克(273 Ma;韩宝福等,2006)、白坡南(278 Ma;郭芳放等,2008)、二台北(279 Ma;童英等,2010)及蕴都卡拉地区上石炭统巴塔玛依内山组流纹岩(276~280 Ma;李涤等,2013)。这些碱性侵入岩、A 或 I 型花岗岩、基性岩脉以及共生的幔源玄武质火山岩组合共同反映了早—中二叠世全面伸展的构造背景(韩宝福等,2006;童英等,2010;李涤等,2013;Li *et al.*,2014)。在此背景下形成地壳规模的大型伸展减薄剪切带,或使先前的逆冲断裂带活化。而强烈的壳幔相互作用则为金的成矿提供了大量成矿物质。顿巴斯套金矿黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 268 ± 3 Ma,很可能为东准噶尔地区中二叠世伸展构造背景下岩浆—构造—流体活动的产物。同时,东准噶尔地区也分布有大量同时代的金矿床(点),典型矿床如双泉金矿床(蚀变绢云母 Ar-Ar 年龄为 269~260 Ma;路彦明,2008;徐斌等,2009)、萨尔布拉克金矿床(271 Ma;李华芹和陈富文,2004)、库布苏金矿床(270 Ma;李华芹和陈富文,2004)等,一致表明中二叠世(270~260 Ma)为新疆东准噶尔地区后碰撞伸展背景下一个重要的金的成矿时限。在岩石圈的伸展作用下,沿先存剪切构造系统中的各类剪裂面或裂隙,特别是 R 型剪裂隙,发生以脆性变形为主的构造变形,深部含金热液向上运移到低压扩容带,最终在该有利地段沉淀富集成矿。

6 结论

(1) 顿巴斯套金矿床主成矿阶段含金黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 268 ± 3 Ma (MSWD=0.7),代表了矿床形成于中二叠世。结合区域金矿床成矿年代学研究成果,笔者认为中二叠世(270~260 Ma)为新疆东准噶尔地区一个重要的金成矿时限。

(2) 顿巴斯套金矿床为中二叠世东准噶尔地区后碰撞伸展背景下构造—岩浆—流体活动的产物。

致谢:感谢匿名审稿人在论文评审过程中提出的宝贵修改意见和编委会对本文的帮助。成文过程中谭俊和付乐兵副教授、赵少卿博士给予了极大帮助;野外工作中新疆有色 701 地质队提供了便利的条件,在此一并感谢。

References

- Chen, G. Y., Shao, W., Sun, D. S., 1989. Genetic Mineralogy of Gold Deposits in Jiadong Region with Emphasis on Gold Prospecting. Chongqing Science and Technology Publishing House, Chongqing (in Chinese).
- Craig, J. R., Vokes, F. M., Solberg, T. N., 1998. Pyrite: Physical and Chemical Textures. *Mineralium Deposita*, 34(1): 82—101.
- Dong, L. H., Xu, X. W., Qu, X., et al., 2009. Tectonic Setting and Formation Mechanism of the Circum-Junggar Porphyritic Copper Deposit Belts. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 713—737 (in Chinese with English abstract).
- Faure, G., 1986. Principles of Isotope Geology (2nd Edition). John Wiley & Sons, New York, 183—199.
- Guo, F. F., Jiang, C. Y., Su, C. Q., et al., 2008. Tectonic Settings of A-Type Granites of Shaerdalan Area, South-eastern Margin of Junggar Block, Xinjiang, Western China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2778—2788 (in Chinese with English abstract).
- Guo, H. T., 2013. Dunbasitao Gold Deposits Genesis and Prospecting Mark, Qinghe County, Xinjiang. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 36(6): 1—4 (in Chinese).
- Han, B. F., He, G. Q., Wang, S. G., 1999. Postcollisional Mantle-Derived Magmatism, Underplating and Implications for Basement of the Junggar Basin. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 29(1): 16—21 (in Chinese).
- Han, B. F., He, G. Q., Wang, S. G., et al., 1998. Postcollisional Mantle-Derived Magmatism and Vertical Growth of the Continental Crust in North Xinjiang. *Geological Review*, 44(4): 396—406 (in Chinese with English abstract).
- Han, B. F., Ji, J. Q., Song, B., et al., 2006. Late Paleozoic Vertical Growth of Continental Crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of Post-Collisional Plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077—1086 (in Chinese with English abstract).
- Han, Y. G., Li, X. H., Zhang, S. H., et al., 2007. Single Grain and Fragmentation Pyrite Rb-Sr Isochron Dating of the Qiyugou Gold Deposit in the Western Henan Province. *Chinese Science Bulletin*, 52(11): 1307—1311 (in Chinese).
- Ji, S. S., 2013. Geological Characteristics and Genesis Analysis of the Aktas Gold Deposit in Fuyun County, Xinjing (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Yunnan, 1—69 (in Chinese with English abstract).
- Li, D., He, D. F., Fan, C., et al., 2013. Early Permian Post-Collisional Magmatic Events, East Junggar: Constraints from Zircon SHRIMP U-Pb Age, Geochemistry and Hf Isotope of Rhyolite in the Yundukala Area. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 317—337 (in Chinese with English abstract).

- Li, D., He, D. F., Fan, C., et al., 2014. Petrogenesis of Late Paleozoic Volcanics from the Zhaheba Depression, East Junggar: Insights into Collisional Event in an Accretionary Orogen of Central Asia. *Lithos*, 184—187(1): 167—193.
- Li, H., Wei, J. H., Li, Y. J., et al., 2018. Origin of the Dunbasitao Gold Deposit in Eastern Junggar, Xinjiang: H-O-C-S-Pb Isotopic Constraints. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(5): 846—861(in Chinese with English abstract).
- Li, H. Q., Chen, F. W., 2004. Regional Mineralization in Altay Area of Northern Xinjiang, China. Geological Publishing House, Beijing, 19—220 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Q., Xie, C. F., Chang, H. L., 1998. Mineralization in Altay Area of Nonferrous and Noble Metal of Northern Xinjiang China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. L., Chen, F. K., Yang, J. H., et al., 2008. Single Grain Pyrite Rb-Sr Dating of the Linglong Gold Deposit, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 34(3): 263—270.
- Li, W. B., Huang, Z. L., Xu, D. R., et al., 2002. Rb-Sr Isotopic Method on Zinc-Lead Ore Deposits: A Review. *Geotectonica et Metallogenia*, 26(4): 436—441 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. J., Liu, W., 2013. Re-Os Dating of the Suoerkuduke Cu (Mo) Deposit, Fuyun County, Xinjiang, and Its Geodynamic Implications. *Journal of Earth Science*, 24(2): 188—202.
- Lu, Y. M., 2008. Structural Control and Prospecting of the Gold Deposits in Shuangquan Area, Eastern Junggar (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 1—102 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y. M., Zhang, D., Fan, J. J., et al., 2008. Spatial-Temporal Coupling of Rock-Forming and Ore-Forming Processes and Tectonic Evolution in Eastern Junggar Basin, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 27(S1): 33—41 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y. M., Zhang, Y. J., Pan, M., et al., 2010. Types and Geological Characteristics of Gold Deposits in East Junggar, Xinjiang. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 434—442 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y. M., Zhao, J., Chen, X., et al., 2007. The Relationship between Ductile-Brittle Shear Zones and Mineralization of Gold Deposits in Shuangquan Area, Eastern Junggar. *Xinjiang Geology*, 25(2): 164—168 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 1998. Using Isoplot/Ex: Age of Chronological Toolkit for Microsoft Excel, Version 1.00. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 1: 1—4.
- Lüders, V., Ziemann, M., 1999. Possibilities and Limits of Infrared Light Microthermometry Applied to Studies of Pyrite-Hosted Fluid Inclusions. *Chemical Geology*, 154(1—4): 169—178.
- Luo, T., Chen, S., Liao, Q. A., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Late Carboniferous Bimodal Volcanic Rocks in the Eastern Junggar. *Earth Science*, 41(11): 1845—1862 (in Chinese with English abstract).
- Shi, W. J., Wei, J. H., Tan, J., et al., 2014. Late Early Cretaceous Gold Mineralization in Tan-Lu Fault Zone: Evidence from Rb-Sr Isotopic Dating of Pyrite from Longquanzhan Gold Deposit. *Earth Science*, 39(3): 325—340 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. L., 2001. The Study on Metallogenic Series of Hydrocarbon Alkali-Fluids in Devonian in Xicheng Concentrated Mineralization Area, West Qinling, Gansu Province (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu, 43—44 (in Chinese with English abstract).
- Tong, Y., Wang, T., Hong, D. W., et al., 2010. Spatial and Temporal Distribution of the Carboniferous-Permian Granitoids in Northern Xinjiang and Its Adjacent Areas, and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 619—641 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. M., Liao, Q. A., Fan, G. M., et al., 2014. Geological Implications of Unconformity between Upper and Middle Devonian, and 346.8 Ma Post-Collision Volcanic Rocks in Karamaili, Xinjiang. *Earth Science*, 39(9): 1243—1257 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., 2013. Analysis of the Relationship between the Region Faults and Dunbasitao Gold Deposits, Qinghe, Xinjiang. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 36(S2): 65—67 (in Chinese).
- Wang, Y. B., Tang, S. H., Wang, J. H., et al., 2004. Rb-Sr Dating the Pyrite of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au Deposit, Tongling, Anhui Province. *Geological Review*, 50(5): 538—542 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. H., Xu, J. H., Liu, Z. Q., et al., 2011. Tectonic-Mineralizing Fluids in the Sarbulak Gold Deposit, Ertix Metallogenic Belt, Xinjiang. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 55—66 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. X., Gu, L. X., Zhang, Z. Z., et al., 2007. Sr-Nd-Pb Isotope Geochemistry of Rhyolite of the Late Carboniferous Dashitou Group in Eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1749—1755 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. X., Yang, J. D., Chen, J., et al., 2007. The Sr and Nd Isotopic Variations of the Chinese Loess Plateau during

- the Past 7 Ma; Implications for the East Asian Winter Monsoon and Source Areas of Loess. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 249 (3–4): 351–361.
- Wei, X. F., Zhao, Y. X., Zhao, M. M., et al., 2013. Detailed Investigation Report on the Gold Deposits outside Tunbasu Set, Qinghe, Xinjiang. 701 Geological Team of Xinjiang Nonferrous Prospecting Bureau, Changji, 1–120 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, F., Li, H., Xia, F., et al., 2014. Analysis on Geological Characteristics and Metallogenic Condition of Dunbasitao Gold Deposit, Qinghe County, Xinjiang. *Gold*, 35 (1): 11–17 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Lu, Y. M., Gu, X. X., et al., 2009. Metallogenic Epoch of the Shuangquan Gold Deposit in Qitai Area, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 28 (12): 1871–1884 (in Chinese with English abstract).
- Yan, S. H., Chen, W., Wang, Y. T., et al., 2004. ⁴⁰Ar–³⁹Ar Dating and Its Significance of the Ertix Gold Metallogenic Belt in the Altay Orogen, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 78 (4): 500–506 (in Chinese with English abstract).
- Yan, S. H., Teng, R. L., Wang, Y. T., et al., 2006a. ⁴⁰Ar–³⁹Ar Dating of the Bu'ergen Gold-Bearing Shear Zone on the Southern Margin of the Altay Mountains, Xinjiang, and Its Significance. *Geology in China*, 33 (3): 648–655 (in Chinese with English abstract).
- Yan, S. H., Wang, Y. T., Zhang, Z. C., et al., 2006b. Metallogenic Type, Tectonic Setting, and Resource Potential of Ertix Gold Ore Belt in Northern Xinjiang. *Mineral Deposits*, 25 (6): 693–704 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F. Q., Wu, H., 2000. Genetic Types and Geological Features of Au Deposits in East Junggar Region. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 15 (1): 39–45 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Zhou, X. H., 2000. The Rb-Sr Isochron of Ore and Pyrite Subsamples from Linglong Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China and Their Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 45 (14): 1547–1553 (in Chinese).
- Yang, J. H., Zhou, X. H., 2001. Rb-Sr, Sm-Nd and Pb Isotope Systematics of Pyrite; Implications for the Age and Genesis of Lode Gold Deposits. *Geology*, 29 (8): 711–714.
- Yang, J. H., Zhou, X. H., Chen, L. H., 2000. Dating of Gold Mineralization for Super-Large Altered Tectonite-Type Gold Deposits in Northwestern Jiaodong Peninsula and Its Implications for Gold Metallogeny. *Acta Petrologica Sinica*, 16 (3): 454–458 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D., Lu, Y. M., Guo, X. D., et al., 2011. Au(Cu) Mineralization Associated with Ductile-Brittle Shear Zone in East Junggar Area; Conversion of Structural Deformation, Metallogenic Time and Geodynamics Background. *Gold*, 32 (3): 8–15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. J., Zhang, D., Lu, Y. M., et al., 2013. Multi-Stage Tectonic Deformation and Superimposed Gold Mineralization in the Karamaili Structural Belt of Eastern Junggar, Xinjiang. *Geology and Exploration*, 49 (5): 797–812 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. Z., Wei, J. H., Chen, J. J., et al., 2019. Geochemical Characteristics and Tectonic Implications of Late Devonian Quartz Diorite Porphyry in the Dunbasitao Area, Northern Margin of the East Junggar Basin, Xinjiang. *Earth Science*, 44 (4) (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.270>
- Zhu, Y. F., An, F., Feng, W. Y., et al., 2016. Geological Evolution and Huge Ore-Forming Belts in the Core Part of the Central Asian Metallogenic Region. *Journal of Earth Science*, 27 (3): 491–506.

附中文参考文献

- 陈光远, 邵伟, 孙岱生, 1989. 胶东金矿成因矿物学与找矿. 重庆: 重庆科技出版社.
- 董连慧, 徐兴旺, 屈迅, 等, 2009. 初论环准噶尔斑岩铜矿带的地质构造背景与形成机制. 岩石学报, 25 (4): 713–737.
- 郭芳放, 姜常义, 苏春乾, 等, 2008. 准噶尔板块东南缘沙尔德兰地区 A 型花岗岩构造环境研究. 岩石学报, 24 (12): 2778–2788.
- 郭海棠, 2013. 新疆青河县顿巴斯套金矿床成因及找矿标志. 新疆有色金属, 36 (6): 1–4.
- 韩宝福, 何国琦, 王式洸, 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 29 (1): 16–21.
- 韩宝福, 何国琦, 王式洸, 等, 1998. 新疆北部后碰撞幔源岩浆活动与陆壳纵向生长. 地质论评, 44 (4): 396–406.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等, 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长 (I)——后碰撞深成岩浆活动的时限. 岩石学报, 22 (5): 1077–1086.
- 韩以贵, 李向辉, 张世红, 等, 2007. 豫西祁雨沟金矿单颗粒和碎裂状黄铁矿 Rb-Sr 等时线定年. 科学通报, 52 (11): 1307–1311.
- 纪珊珊, 2013. 新疆富蕴县阿克塔斯金矿床地质特征及成因分析 (硕士学位论文). 云南: 昆明理工大学, 1–69.
- 李涤, 何登发, 樊春, 等, 2013. 东准噶尔早二叠世后碰撞岩浆活动: 蕴都卡拉流纹岩 SHRIMP U-Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位素的制约. 岩石学报, 29 (1): 317–337.
- 李欢, 魏俊浩, 李艳军, 等, 2018. 新疆东准噶尔顿巴斯套金矿床成因: H-O-C-S-Pb 同位素制约. 大地构造与成矿学,

- 42(5):846—861.
- 李华芹,陈富文,2004.中国新疆区域成矿作用年代学.北京:地质出版社,19—220.
- 李华芹,谢才富,常海亮,等,1998.新疆北部主要有色贵金属矿床成矿期同位素年代学研究.北京:地质出版社.
- 李文博,黄智龙,许德如,等,2002.铅锌矿床 Rb-Sr 定年研究综述.大地构造与成矿学,26(4):436—441.
- 路彦明,2008.新疆东准双泉地区金矿构造控矿规律及勘查找矿方向(博士学位论文).北京:中国地质大学,1—102.
- 路彦明,张栋,范俊杰,等,2008.新疆东准地区成岩、成矿与构造演化时空耦合.矿床地质,27(S1):33—41.
- 路彦明,张玉杰,潘懋,等,2010.新疆东准噶尔地区金矿类型、地质特征.地球学报,31(3):434—442.
- 路彦明,赵军,陈祥,等,2007.东准噶尔双泉地区韧—脆性剪切带与金矿成矿.新疆地质,25(2):164—168.
- 罗婷,陈帅,廖群安,等,2016.东准噶尔晚石炭世双峰式火山岩年代学、地球化学及其构造意义.地球科学,41(11):1845—1862.
- 石文杰,魏俊浩,谭俊,等,2014.祁连山断裂带晚白垩世金成矿作用:来自龙泉站金矿床黄铁矿 Rb-Sr 年代学证据.地球科学,39(3):325—340.
- 孙省利,2001.西秦岭泥盆系西成矿化集中区烃碱流体成矿系列研究(博士学位论文).成都:成都理工学院,43—44.
- 童英,王涛,洪大卫,等,2010.北疆及邻区石炭—二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义.岩石矿物学杂志,29(6):619—641.
- 王富明,廖群安,樊光明,等,2014.新疆卡拉麦里上—中泥盆统间角度不整合和 346.8 Ma 后碰撞火山岩的意义.地球科学,39(9):1243—1257.
- 王永,2013.新疆青河县顿巴斯套金矿与区内断裂关系的分析.新疆有色金属,36(S2):65—67.
- 王彦斌,唐索寒,王进辉,等,2004.安徽铜陵新桥铜金矿床黄铁矿 Rb/Sr 同位素年龄数据——燕山晚期成矿作用的证据.地质论评,50(5):538—542.
- 王燕海,徐九华,刘泽群,等,2011.额尔齐斯成矿带萨尔布拉克金矿床的构造—成矿流体.地学前缘,18(5):55—66.
- 王银喜,顾连兴,张遵忠,等,2007.东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究.岩石学报,23(7):1749—1755.
- 魏贤峰,赵永勋,赵美满,等,2013.新疆青河顿巴斯套外围金矿详查报告.昌吉:新疆有色地勘局 701 地质队,1—120.
- 肖飞,李欢,夏芳,等,2014.新疆青河顿巴斯套金矿床地质特征及控矿因素分析.黄金,35(1):11—17.
- 徐斌,路彦明,顾雪祥,等,2009.新疆奇台地区双泉金矿床的成矿时代.地质通报,28(12):1871—1884.
- 闫升好,陈文,王义天,等,2004.新疆额尔齐斯金矿带的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义.地质学报,78(4):500—506.
- 闫升好,腾荣丽,王义天,等,2006a.新疆布尔根含金剪切带的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义.中国地质,33(3):648—655.
- 闫升好,王义天,张招崇,等,2006b.新疆额尔齐斯金矿床的成矿类型、地球动力学背景及资源潜力.矿床地质,25(6):693—704.
- 杨富全,吴海,2000.新疆东准噶尔金矿成因类型及地质特征.地质找矿论丛,15(1):39—45.
- 杨进辉,周新华,2000.胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代.科学通报,45(14):1547—1553.
- 杨进辉,周新华,陈立辉,2000.胶东地区破碎带蚀变岩型金矿时代的测定及其地质意义.岩石学报,16(3):454—458.
- 张栋,路彦明,郭小东,等,2011.东准噶尔地区与韧—脆性剪切带有关的金(铜)成矿——构造变形转换与成矿时限及地球动力学背景.黄金,32(3):8—15.
- 张玉杰,张栋,路彦明,等,2013.新疆东准噶尔卡拉麦里构造带多期变形和金叠加成矿.地质与勘探,49(5):797—812.
- 周红智,魏俊浩,陈加杰,等,2019.新疆东准噶尔北缘顿巴斯套地区晚泥盆世石英闪长玢岩地球化学特征及构造意义.地球科学,44(4).