



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

新疆东准噶尔顿巴斯套金矿地质特征 及矿床成因

刘文祥¹⁾, 邓小华²⁾, 吴艳爽³⁾, 韩申¹⁾, 陈西³⁾, 李巽¹⁾, 王永⁴⁾, 陈衍景^{1,3)}

1) 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京, 100871;

2) 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京, 100012;

3) 中国科学院新疆生态与地理研究所新疆矿产资源研究中心, 乌鲁木齐, 830011;

4) 西部黄金股份有限公司, 乌鲁木齐, 830002

内容提要:新疆东准噶尔地区自北向南发育额尔齐斯、阿尔曼太、卡拉麦里三条大型构造带, 南北两条构造带已发现大量造山型金矿, 而阿尔曼太构造带与南北构造带具有相似的成矿地质背景, 却未见造山型金矿的报道。因此, 笔者等选取了该构造带最重要的金矿床——顿巴斯套金矿, 开展了详细的岩相学、矿相学研究以及构造解析。研究表明, 该矿床具有区域性断裂的次级断裂控矿、脆—韧性剪切带控矿、背斜核部控矿“三位一体”的控矿特征, 其中, NW—SE 向脆—韧性剪切带是最重要的控矿构造, 金矿化显著晚于矿区赋矿岩浆岩——石英闪长玢岩, 且该矿床与相邻构造带典型的造山型金矿地质地球化学特征相似。结合成矿流体具有中低温、富 CO₂ 的特征, 综合认为顿巴斯套金矿是典型的造山型金矿。将该矿床成矿过程划分为 3 期: ① 以产出草莓状黄铁矿为典型特征的沉积期; ② 以黄铁矿压实、结核、重结晶为特征的成岩期; ③ 以产出热液脉和金的矿化为典型特征的热液期。热液期进一步划分为两个阶段: 以脆—韧性变形为主的铁白云石—石英—黄铁矿阶段和由脆—韧性变形向脆性变形转变的石英—钠长石—方解石阶段。黄铁矿可划分为 6 个世代、毒砂可划分为 3 个世代: ① Py1 为沉积成因的黄铁矿, 具有草莓状、胶状等特殊结构; ② Py2 为成岩作用形成的黄铁矿, 具有顺层分布、呈结核状等特征; ③ 热液期毒砂 Apy1, 粒度 50~100 μm, 自形、半自形, 常与金共生; ④ 热液期毒砂 Apy2, 自形, 粒度 300~700 μm; ⑤ 热液期黄铁矿 Py3, 他形—自形, 粒度 50~150 μm, 以内部包体多、空洞多为显著特征; ⑥ 热液期黄铁矿 Py4, 半自形—自形, 粒度 150~300 μm, 以包体多, 空洞少, 发育压力影为特征; ⑦ 热液期 Py5, 以背散射下亮度高、显著富 As 为特征; ⑧ 热液期毒砂 Apy3: 以颗粒粗大、自形、内部包体少、发育碎裂结构和压力影为特征; ⑨ 热液期黄铁矿 Py6: 以颗粒粗大、半自形到自形、内部包体少、发育碎裂结构和压力影为特征。随着脆—韧性变形作用进行, 黄铁矿、毒砂的粒度有序递增, 自形程度逐渐升高, 而品位逐渐降低, 金的沉淀主要发生在脆—韧性变形阶段, 脆性变形阶段无金矿化。主成矿阶段标志性的铁白云石化蚀变、微细浸染状的黄铁矿化、毒砂化蚀变可以作为找矿标志。

关键词: 脆—韧性变形; 金矿化; 黄铁矿; 造山型金矿; 顿巴斯套金矿; 东准噶尔

造山型金矿的概念, 最初由 Böhlke (1982) 针对美国内华达山脉的含金石英脉提出。Groves 等 (1998) 对造山型金矿的概念进行了系统论证, 指出造山型金矿是变质地体中受构造控制的脉状后生金矿床。陈衍景等 (2006, 2007, 2001, 2010, 2013) 补充了陆陆碰撞背景下的造山型金矿类型, 并将造山型金矿的概念向造山型矿床进行了拓展, 一批造山型

银矿、铜矿、钼矿、铅锌矿等相继被发现 (陈衍景等, 2009; Zhang Li et al., 2012; Arbaoui et al., 2019)。造山型金矿的本质是变质热液矿床, 具有以下标志性特征: 成矿事件是增生型或碰撞型造山作用的结果, 成矿时间同步或尾随于造山事件, 区域性断裂的二级或更次级断裂、褶皱构造等控制矿床的定位; 脆性—韧性转变带是富矿体发育有利地带; 侧向蚀变

注: 本文为 NSFC—新疆联合基金“新疆北部造山型矿床成矿规律研究” (编号: U1803242) 和国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项 (编号: 2017YFC0601203) 的成果。

收稿日期: 2020-09-17; 改回日期: 2021-02-03; 网络首发: 2021-02-20; 责任编辑: 黄道表、章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.02.*
作者简介: 刘文祥, 男, 1999 年生, 博士研究生, 矿床学专业; Email: 1801110590@pku.edu.cn。通讯作者: 陈衍景, 男, 1962 年生, 教授, 主要从事矿床学研究; Email: yjchen@pku.edu.cn。

分带清晰;成矿流体具有低盐度(3%~7% NaCl eq),富 CO₂[$n(\text{CO}_2)=5\%\sim 20\%$]的特点;成矿温度 200~650 ℃,成矿压力 50~500 MPa(陈衍景等, 2007;Groves et al., 2015;Goldfarb et al., 2015)。我国增生型和碰撞型造山带均十分发育,近年来吸引了大批国内外学者对我国的造山型金矿开展详细解剖(Goldfarb et al., 2014;Gao Shen et al., 2018;刘洪等, 2018;丁嘉鑫等, 2019;Zhang Liang et al., 2019; Li Nan et al., 2020;Groves et al., 2020),侧面验证了我国造山金矿床成矿潜力。因此,利用现有成矿模型,识别新的造山型金矿,对我国矿产勘查具有重要

意义。

东准噶尔地区位于阿尔泰造山带南缘、准噶尔盆地东北缘(图 1a、1b),是古生代中亚成矿域的重要组成部分,也是新疆北部重要的金铜多金属成矿带之一(陈衍景等, 1995;沈远超等, 1998;廖启林等, 2000;王莉娟等, 2008;王军等, 2010;Yang Fuquan et al., 2012, 2014;李高峰等, 2015;张栋等, 2015;严加永等, 2017;Wu Chao et al., 2018;Liang Pei et al., 2018;李欢等, 2018)。近年来,区内南北两条大型构造带均发现了多个金矿床(图 2),如北部额尔齐斯构造带附近的萨尔布拉克、扎克特、科克萨依、马热

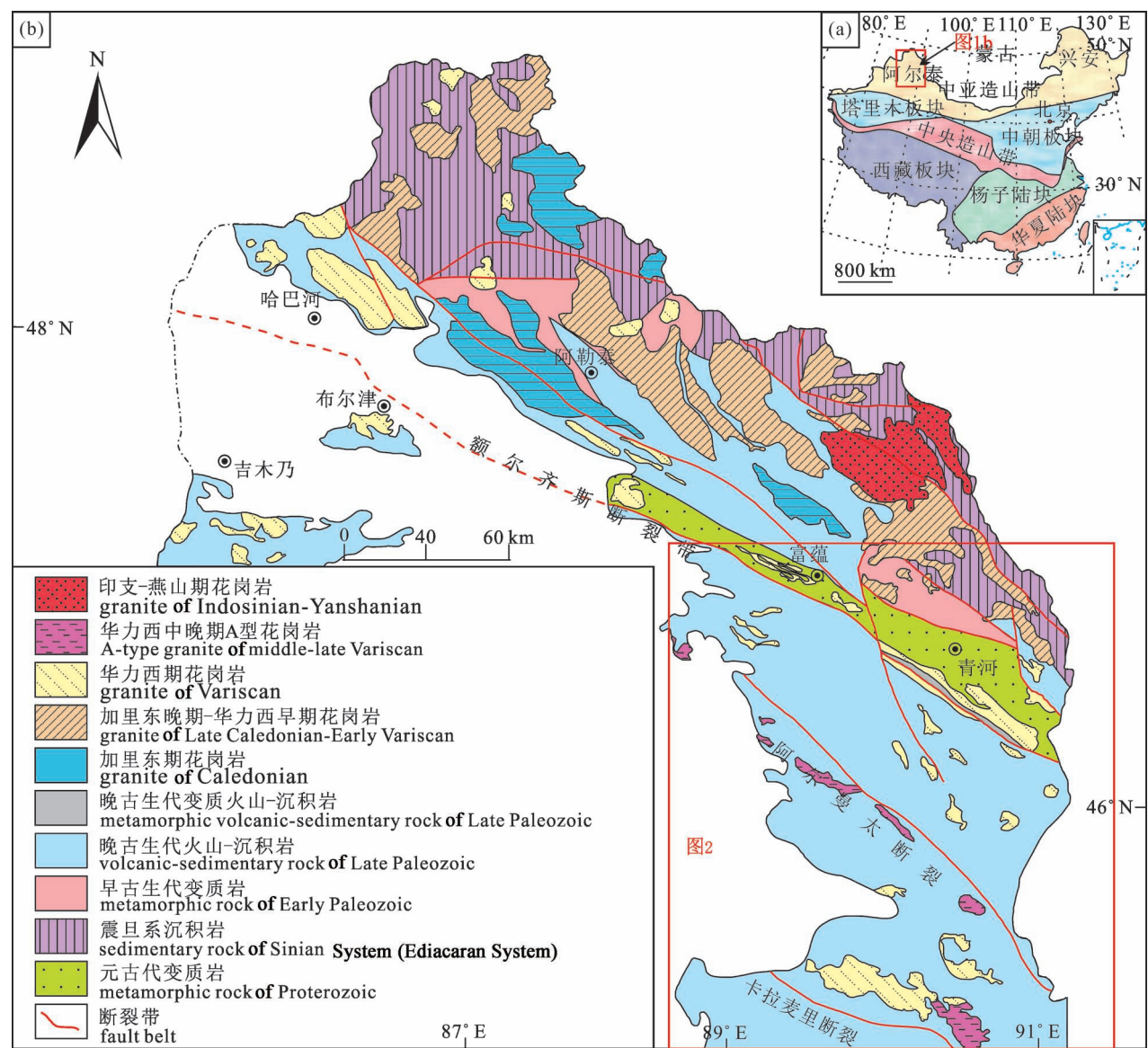


图 1 东准噶尔顿巴斯套金矿构造位置及区域地质简图

Fig. 1 Tectonic location and regional geological map of Dunbastau gold deposit, eastern Junggar

(a) 中国构造分区简图(据 Zhou Zhenju et al., 2014 修改);(b) 中国阿尔泰—东准噶尔地区区域地质简图(据周刚, 2007 修改)

(a) schematic map of China tectonic zoning (modified from Zhou Zhenju et al., 2014); (b) regional geological map of Altay—Eastern Junggar area, China (modified from Zhou Gang, 2007&)

此问题,笔者等选取了阿尔曼太构造带最重要的金矿床——顿巴斯套金矿,开展矿床地质研究。

2009年新疆维吾尔自治区有色地质勘查局701队在阿尔曼太构造带东段发现了顿巴斯套金矿床(图2),提交金资源量约5 t。前人测得了顿巴斯套成矿流体的包裹体均一温度主要为180~260℃,获得了黄铁矿 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 268.3 ± 2.8 Ma,认为其是产于伸展体制的岩浆热液型金矿床(李欢,2018)。然而,顿巴斯套明显受脆—韧性剪切构造体系中的各种裂隙或薄弱带控制,兼具有造山型金矿的特征,因此,其成因类型有待进一步研究。

矿床地质特征是厘定矿床成因、探讨成矿过程最根本依据。本文通过对矿区主要地层、岩体、矿体的岩石学、岩相学、矿相学研究,厘定矿床成因类型,初步探讨金的成矿过程。

1 区域地质

研究区位于中亚造山带西段,阿尔泰造山带南缘的东准噶尔成矿区(图1a)(肖飞等,2014),大地构造位置处于西伯利亚板块与哈萨克斯坦—准噶尔板块的结合部位(张栋等,2015),区域上呈现出“三带两弧”的大地构造格局(图1b和图2)，“三带”为额尔齐斯蛇绿岩带、阿尔曼太蛇绿岩带、卡拉麦里蛇绿岩带,其中以阿尔曼太蛇绿岩带为界,北侧为晚古生代大洋岛弧(萨吾尔山岛弧),南侧为早古生代陆缘弧和晚古生代大陆岛弧的复合岛弧(谢米斯台—琼河坝岛弧)(李锦轶,1995;何国琦等,2001;董连慧等,2009;李振生等,2016;李欢,2018)。

额尔齐斯断裂带蛇绿岩出露零星,主要包括科克森套、乔夏哈拉、布尔根、吐尔库班套蛇绿岩等,岩性主要为超镁铁岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、硅质岩、复理石建造。额尔齐斯蛇绿岩带与西部哈萨克斯坦境内的查尔斯克蛇绿岩以及东部蒙古国比基蛇绿岩带一起,构成了分割西伯利亚板块和哈萨克斯坦—准噶尔板块的斋桑—科克森套—南蒙古缝合带,为晚古生代闭合的古亚洲洋的残余(董连慧等,2009;吴波,2006;王玉往,2011)。

阿尔曼太蛇绿岩带呈南东—北西走向从中蒙边界附近的北塔山北坡,向北西通过阿尔曼太山北坡,沿乌伦古河向北西延伸到扎河坝地区,可以见到除席状岩墙群外所有组成蛇绿岩的岩石类型,包括蛇纹石化方辉橄榄岩、纯橄榄岩、堆晶辉长岩、辉绿岩、枕状和块状玄武岩、放射虫硅质岩等。阿尔曼太为

早古生代蛇绿岩带,代表晚奥陶世到早志留世萎缩、闭合的东准噶尔洋盆洋壳残片(何国琦等,2001;董连慧,2009;陈晓玫,2014)。

卡拉麦里蛇绿岩带位于准噶尔盆地东北部,呈N—WW向延伸,向东与蒙古南部的佐林蛇绿岩相连,以构造岩片的形式夹持于中泥盆统与早石炭统火山岩和碎屑岩之中。卡拉麦里蛇绿岩层序主要由强蛇纹石化的变质橄榄岩、辉长质堆晶岩、辉绿岩、基性熔岩和硅质岩等岩块组成。该蛇绿岩带主体为早古生代的洋壳残留并叠加有晚古生代的局部扩张洋壳、垂向增生与岩浆活动(李锦轶等,1990,1995;李锦轶,1991;徐新等,2006;何国琦等,2007;唐红峰等,2007;杨富全等,2008;董连慧等,2009;陈晓玫,2014)。

萨吾尔山岛弧指介于乔夏哈拉—布尔根蛇绿岩带与阿尔曼太—扎河坝—蛇绿岩带之间的火山岩带(梅厚钧等,1993),为晚古生代岛弧,以泥盆系—石炭系火山岩和碎屑岩为主体(徐志华等,2019)。下一中泥盆统为海相中基性—基性火山岩,晚泥盆世为海陆交互的磨拉石建造,其上被石炭系和二叠系海陆交互陆源碎屑—火山岩建造和陆相火山

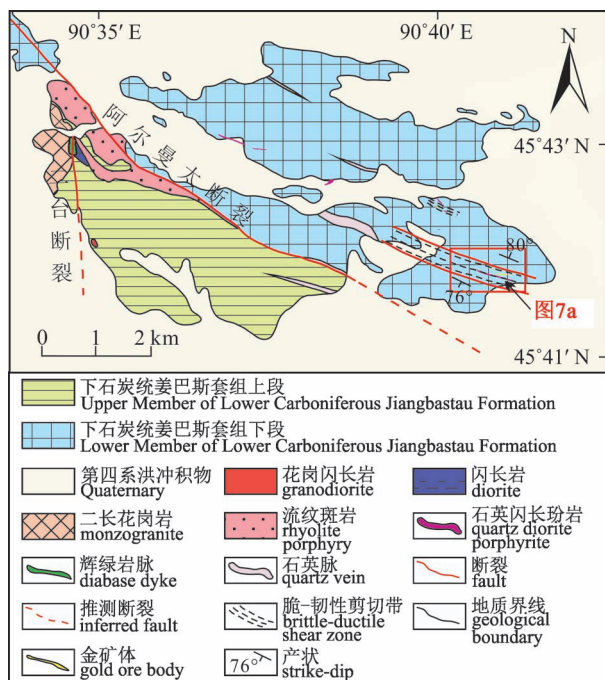


图3 东准噶尔顿巴斯套金矿区地质图(据新疆维吾尔自治区有色地质勘查局701队资料修改)

Fig. 3 Geological map of Dunbastau gold deposit, eastern Junggar (modified from the figure of Team 701 of Xinjiang Uygur Autonomous Region Nonferrous Geological Exploration Bureau)

磨拉石建造所不整合覆盖。

谢米斯台—琼河坝岛弧指介于阿尔曼太—扎河坝—洪古勒楞蛇绿岩带与卡拉麦里—达拉布特—克拉玛依—唐巴勒蛇绿岩带之间的古生代火山岩带。塔尔巴哈台—洪古勒楞—库兰卡孜干—纸房—琼河坝早古生代岛弧是陆缘岛弧,谢米斯台—琼河坝地区晚古生代大陆岛弧叠置发育在早古生代岛弧之上,主体由泥盆系—石炭系火山岩和碎屑岩组成,泥盆系主要为滨海、浅海相中基性、中酸性火山岩、火山碎屑岩。石炭系主要为滨海、浅海相碎屑岩和中性火山岩(董连慧等,2009)。

顿巴斯套金矿产于阿尔曼太蛇绿岩带北侧的萨吾尔山岛弧带内(图 2)。区内主要出露上古生界泥

盆系、石炭系火山—沉积地层和第四系冲洪积层(郭海棠等,2013)。其中泥盆系地层为一套中—基性火山熔岩、浅海相火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩、碳酸盐岩、陆源碎屑沉积岩建造,岩性主要为浅变质的安山岩、凝灰岩、火山角砾岩、灰岩、砂岩、粉砂岩等。石炭系为一套浅海相火山碎屑—陆源碎屑沉积岩建造,岩性主要为凝灰岩、灰岩、砂岩、粉砂岩等。

区内褶皱构造主要为与一系列逆冲—逆掩推覆构造伴生的挤压褶皱,轴向为北西向,与区域构造线方向一致,且普遍遭受到断裂构造和侵入岩的叠加改造。区域内断裂构造较为发育,多呈 NW—SE 向展布,与区域构造线方向大体一致,断层总体以脆性逆断层为主,主要为 N—W 向、NN—W 向,其次为近

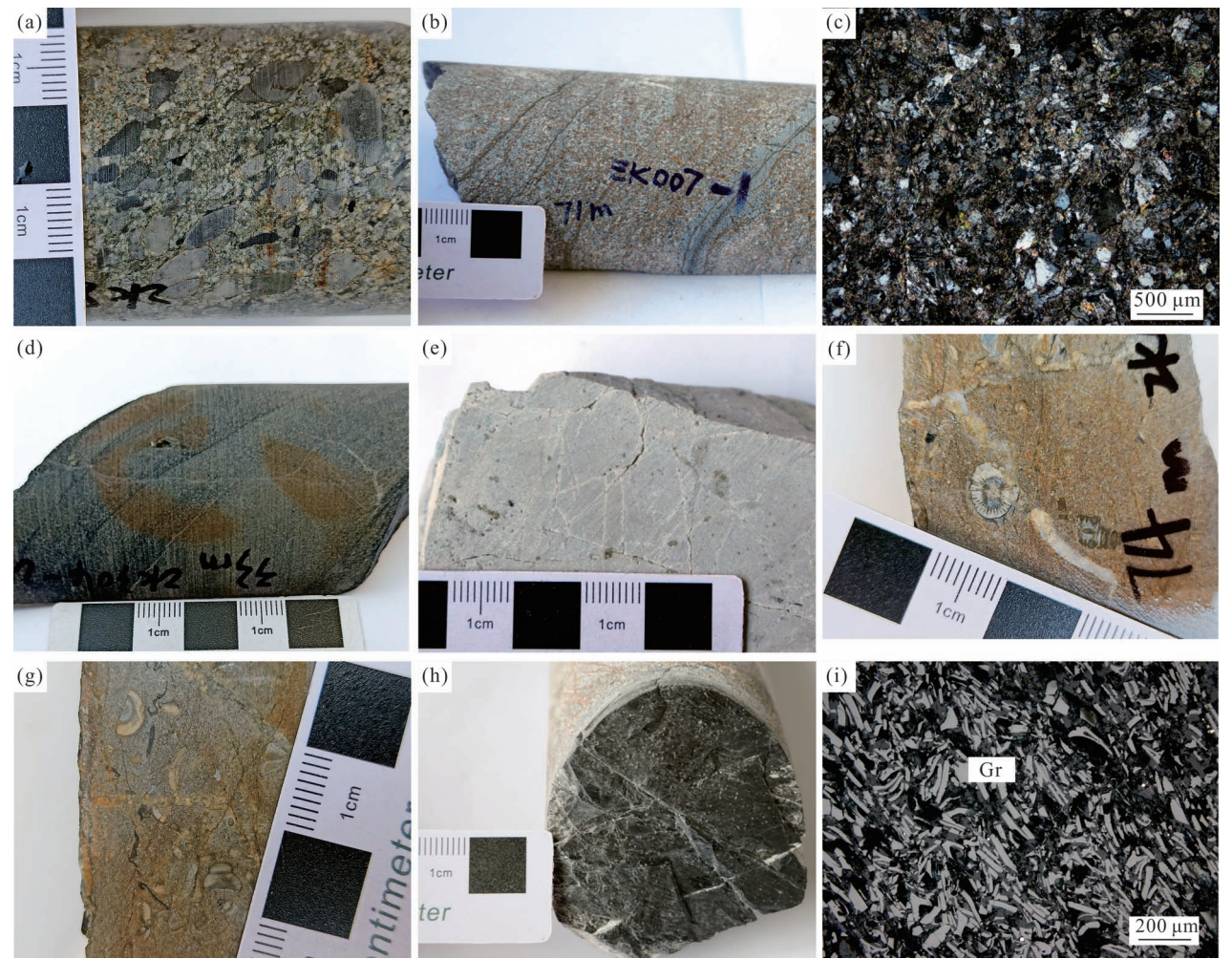


图 4 东准噶尔顿巴斯套矿区下石炭统姜巴斯套组下段岩石手标本及镜下照片
Fig. 4 Hand specimens and microscopic photographs of the Lower Member of the Jiangbasta Formation, Lower Carboniferous, in the Dunbastau gold deposit, eastern Junggar

(a) 砾岩;(b), (c) 砂岩及镜下照片;(d) 凝灰质粉砂岩;(e) 泥晶灰岩;(f), (g) 地层中的动物化石;(h) 碳质夹层;(i) 地层中的石墨;Gr—石墨
(a) conglomerate; (b), (c) sandstone and its microscopic photograph; (d) tuff siltstone; (e) micrite; (f), (g) animal fossils in the strata; (h) carbonaceous interlayer; (i) graphite in the strata; Gr—graphite

S—N 向和近 E—W 向。阿尔曼太断裂是区域内最重要的断裂构造,呈 N—W 向延伸,倾向 SW,倾角陡,约 70 °~85 °,为一高角度逆冲断层,具右旋压扭性质。沿断裂带断续分布蛇绿岩残片(李欢,2018)。

区内侵入岩主要形成于晚石炭世—早二叠世(图 1b 和图 2),多呈不规则状岩株产出,岩石类型主要有闪长(玢)岩、花岗岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、花岗斑岩、钾长花岗岩、石英正长岩等(常雪生等,2013;王永,2013;肖飞等,2014;李欢,2018)。

2 矿床地质

研究区位于阿尔曼太断裂北东侧萨吾尔—二台

Cu—Ni—Au 成矿带的南东部,行政区划隶属新疆青河县。矿区出露的地层主要为下石炭统姜巴斯套组和第四系冲洪积层(图 3)。下石炭统姜巴斯套组为一套浅变质的火山—沉积碎屑岩夹碳酸盐岩建造,可分为上、下两个岩性段。

姜巴斯套组下部岩性段主要分布于阿尔曼太断裂北东部(图 3),是金的主要赋矿层位。该段地层沉积旋回显著,碎屑物粒度变化极大,岩性主要为轻微变质的砾岩(图 4a)、含砾砂岩、砂岩(图 4b、4c)、凝灰质砂岩、粉砂岩、凝灰质粉砂岩(图 4d)、泥晶灰岩(图 4e)等。该组地层中可见动物化石(图 4f、4g)和碳质夹层(图 4h),镜下可观察到细粒石墨(图 4i)和沉积成因的黄铁矿(图 5a)。在脆—韧性剪切

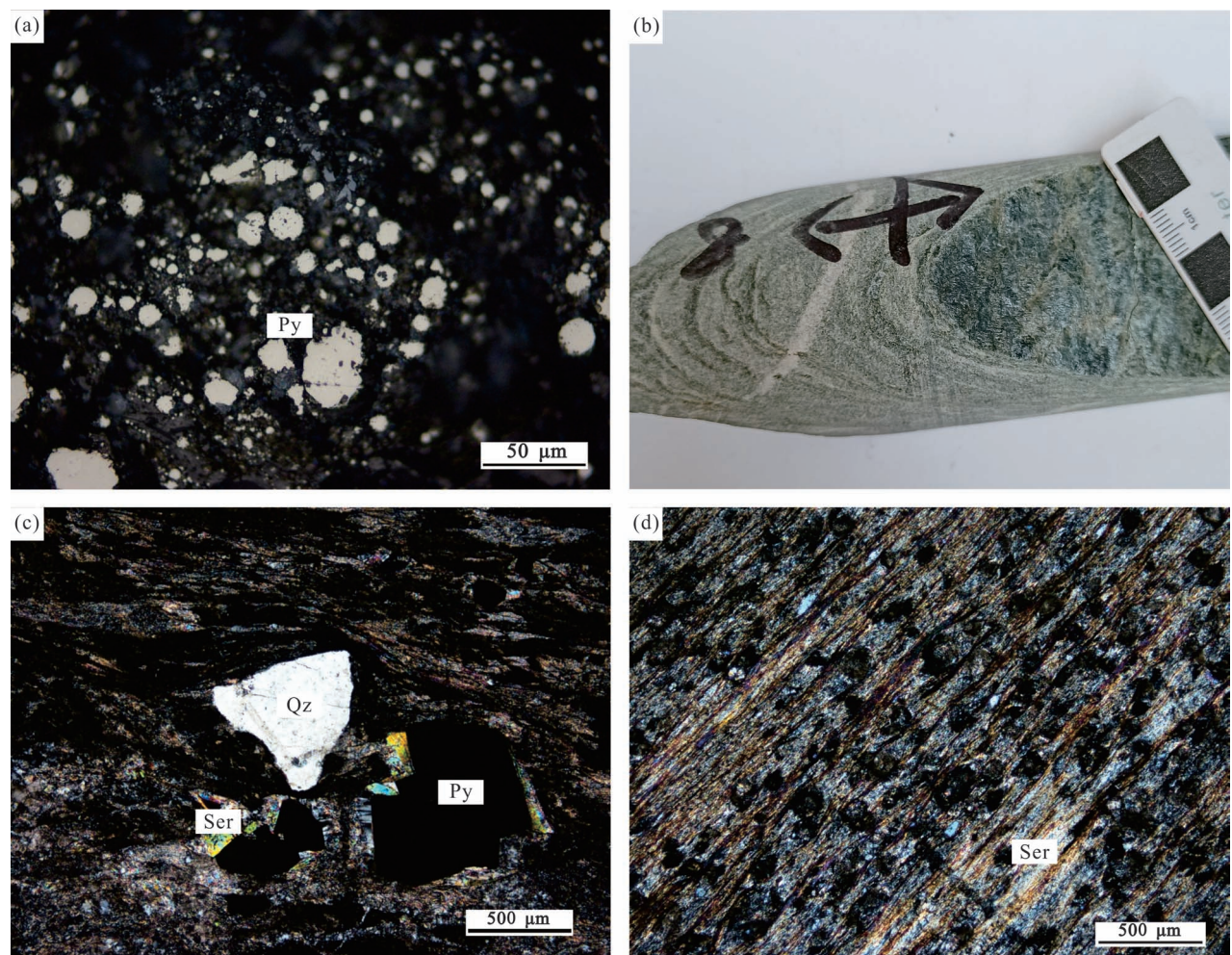


图 5 东准噶尔顿巴斯套矿区下石炭统姜巴斯套组岩石手标本及镜下特征

Fig. 5 Hand specimens and microscopic characteristics of the rocks from the Lower Member of the Jiangbastau Formation, Lower Carboniferous, in the Dunbastau gold deposit, eastern Junggar

(a) 地层中的草莓状黄铁矿;(b) 地层片理化;(c) 糜棱岩化地层,可见明显的韧性基质与石英、黄铁矿残斑晶;(d) 动力变质造成的绢云母定向排列;Qz—石英;Py—黄铁矿;Ser—绢云母
(a) pyrite framboids in the strata; (b) foliated strata rock; (c) mylonitic strata with obvious ductile matrix and quartz and pyrite residual phenocrysts; (d) oriented arrangement of sericite resulting from dynamic metamorphism; Qz—quartz; Py—pyrite; Ser—sericite

带内,地层普遍发育动力变质作用,主要表现为千枚岩化、糜棱岩化(图 5b、5c、5d)。

上部岩性段分布于阿尔曼太断裂的南西部(图 3),岩性主要为凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质粉砂岩、泥晶灰岩等(常雪生等,2013;李欢,2018)。

矿区内侵入岩相对简单,出露面积小,主要产出五种岩体。其中,石英闪长玢岩以岩脉的形式产出于矿区内部。流纹斑岩、二长花岗岩、闪长岩、辉绿岩脉出露于矿区外围西侧,距矿体较远(图 3)。流

纹斑岩产出于阿尔曼太断裂和二台断裂的交汇处,长轴走向 NW—SE,受阿尔曼太断裂控制,在平面上呈狭长状伸展,向南东逐渐变窄(图 6a、6b)。二长花岗岩出露于矿区西北部,流纹斑岩的西侧(图 6c、6d)。闪长岩被二长花岗岩和流纹斑岩所夹持,西部以二台断裂为界与二长花岗岩毗邻,仅能人工挖出露头(图 6e)。辉绿岩脉沿着二台断裂呈岩脉产出,位于闪长岩和二长花岗岩的界线处,规模较小,风化严重(图 6f)。



图 6 东准噶尔顿巴斯套矿区侵入岩露头及镜下照片

Fig. 6 Intrusive rock outcrops and microscopic photographs in the Dunbastau gold deposit, eastern Junggar

(a) 阿尔曼太断裂作为流纹斑岩与第四系的界线;(b) 流纹斑岩露头;(c) 二台断裂作为二长花岗岩与姜巴斯套组上段的岩性界线;(d) 二长花岗岩露头,可见暗色包体;(e) 闪长岩人工露头;(f) 辉绿岩脉露头;(g) 石英闪长玢岩钻孔样品;(h) 石英闪长玢岩中斜长石斑晶发生绢云母化蚀变;(i) 石英闪长玢岩基质由斜长石细晶构成,岩石发生广泛而强烈的碳酸盐化、绢云母化蚀变;Pl—斜长石;Cal—方解石;Ser—绢云母

(a) the Armantai fault serves as the lithologic boundary between the rhyolite porphyry and the Quaternary strata; (b) the outcrop of rhyolite porphyry; (c) the Ertai fault serves as the lithologic boundary between monzogranite and the Upper Member of the Jiangbastau Formation; (d) the outcrop of the monzogranite with a dark inclusion; (e) the artificial outcrop of diorite; (f) the outcrop of diabase dyke; (g) a sample of quartz diorite porphyrite from drill hole; (h) the sericitization of plagioclase phenocryst in the quartz diorite porphyrite; (i) the matrix of quartz diorite porphyrite are composed of distinct plagioclase fine crystals, and the rock underwent extensive and intense carbonatization and sericitization; Pl—plagioclase; Cal—calcite; Ser—sericite

石英闪长玢岩在矿区地表仅有少量露头,主要依靠钻孔揭露(图 6g)。该岩体侵入矿区地层,与金矿的产出具有密切的空间关系,常常构成金矿体的顶底板。具斑状结构(图 6h),斑晶约占 15 %,主要为斜长石(10 %)、石英(4 %)、钾长石(1 %),粒度一般大于 1 mm,其中石英斑晶含量变化较大,局部甚至仅见斜长石斑晶;基质约占 85 %,为细粒—微晶斜长石、石英。该岩体广泛发生绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化、绿泥石化蚀变(图 6i)。

矿区东部发育轴部向东倾伏的陡立背斜,两翼地层产状近直立,翼部地层向两侧由砂砾岩过渡为粉砂岩,核部地层主要为岩屑砂岩和粉砂岩,总体南倾,金矿体即产在核部地层中(图 3,图 7a)。区内的断裂构造主要为阿尔曼太断裂及其次级断裂和其他陡倾断裂。阿尔曼太断裂整体走向约 115°,向南西陡倾。受变质变形作用影响在阿尔曼太断裂的北东侧形成两条北西西向的脆—韧性剪切构造蚀变带。最重要的脆—韧性构造蚀变带位于矿区东南部(图 3,图 7a),走向 110°~123°,向南西陡倾(倾角 70°~85°),被两条高角度断层夹持,显示右行剪切特征。蚀变带内岩性主要为姜巴斯套组下部岩性段火山岩、碎屑岩及石英闪长玢岩,带内碎屑岩挤压片理化、劈理化较强,剪切褶皱、面理置换、膝折及 S—C 组构等现象明显。

矿区内变质作用以动力变质为主,主要有脆—韧性剪切作用和碎裂岩化作用两种类型。矿区内产出的糜棱岩化岩石,分布局限于矿区南部的脆—韧性剪切带附近。后期叠加的脆性变形则形成典型的断层角砾岩等碎裂岩。

金矿体主要赋存于 N—WW 向脆—韧性剪切带中,大致平行于石英闪长玢岩与姜巴斯套组下部岩性段粉砂岩、岩屑砂岩、砂砾岩(图 7a)。矿区共圈定出 31 个金矿体,矿体长度(40~850 m)、厚度(1.0~16.2 m)及品位(1.00~33.47 g/t)变化均较大,矿化不连续,分布不均匀。金矿体产状为 205°~215°∠70°~85°,总体为向南陡倾的脉状体(图 7b)。其中 L8 号矿体规模最大,占矿区金资源量 80 %以上,沿 NWW 向延伸,地表总长 850 m,向深部延伸稳定,品位 1~33 g/t,局部地段可见自然金,矿体厚度 1~16 m。矿体向南陡倾,倾角一般 70°~85°。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(李欢,2018)。钻孔 ZK005 揭露了 L8 号矿体、石英闪长玢岩和主要地层(图 7a、7b),其部分柱状图如图 8。

3 矿化、蚀变及成矿期次

矿区主要发育硅化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化、黄铁矿化、毒砂化蚀变。矿石矿物

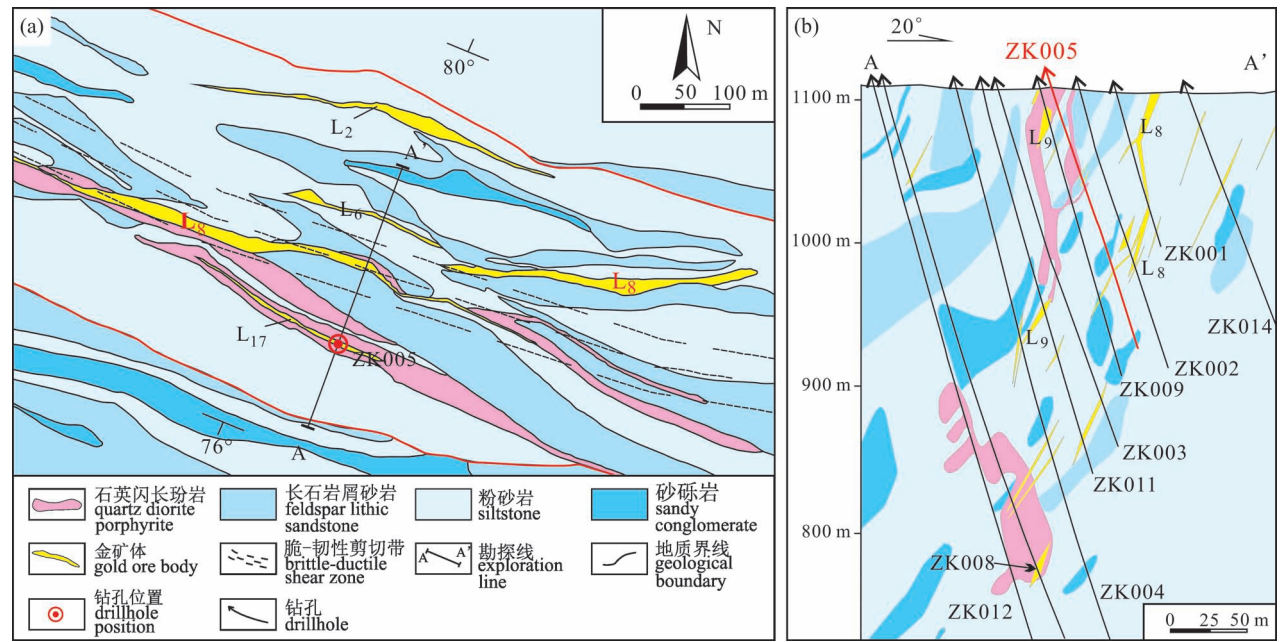


图 7 东准噶尔顿巴斯套矿区地质图(局部)与 0 号勘探线剖面图
(据新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 701 队资料修改)

Fig. 7 Geological map (local) and the section of No. 0 exploration line of the Dunbastau gold deposit, eastern Junggar (modified from the figures of Team 701 of Xinjiang Uygur Autonomous Region Nonferrous Geological Exploration Bureau)

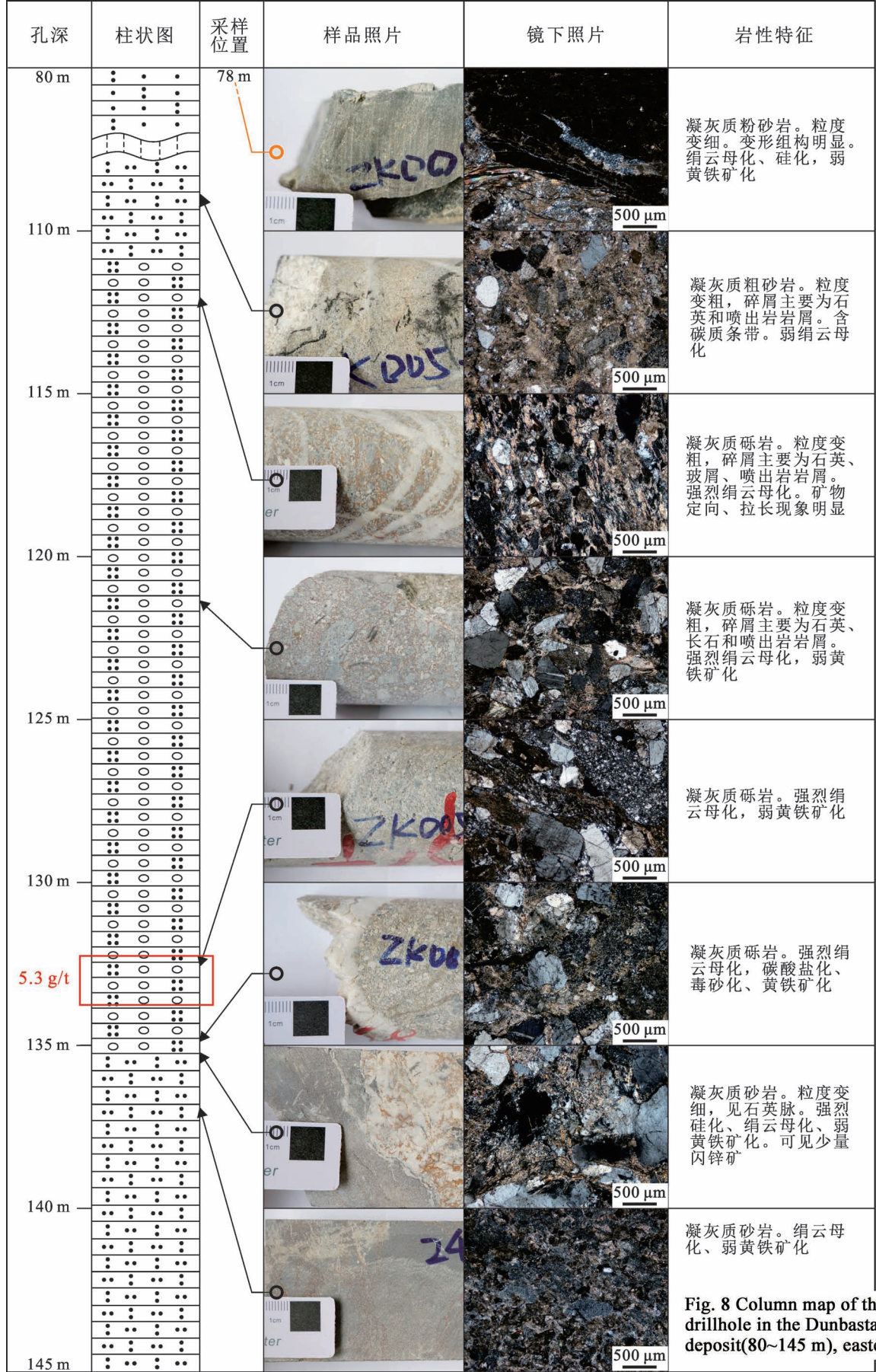


图8 东准噶尔顿巴斯套金矿ZK005钻孔柱状图(80~145 m)

Fig. 8 Column map of the ZK005 drillhole in the Dunbastau gold deposit(80~145 m), eastern Junggar

主要为自然金、黄铁矿、毒砂、闪锌矿、黄铜矿、褐铁矿、赤铁矿、菱铁矿等,脉石矿物主要为石英、钠长石、铁白云石、绿泥石、绿帘石、绢云母、方解石等。矿石构造类型主要包括浸染状构造、脉状构造;矿石结构主要包括包含结构、交代结构、自形粒状结构、碎裂结构、填隙结构等。

根据野外及手标本的脉体穿切关系,结合矿物组合和镜下特征,将成矿过程划分为沉积期、成岩期和热液期。热液期进一步分为铁白云石—石英—黄铁矿阶段和石英—钠长石—方解石阶段。

3.1 沉积期

沉积期伴随着碎屑物的沉积作用,主要表现为姜巴斯套组下部岩性段砂岩、粉砂岩中黄铁矿和少量其他硫化物的沉积,依据产出形态将该期黄铁矿分为 4 个亚类:一是草莓状的微细粒黄铁矿集合体 Py1a,集合体直径多集中于 5~25 μm,在背散射图像下可以观察到微细粒黄铁矿的八面体自形晶,粒度 1 μm 左右,还可见与黄铁矿共生的沉积成因方铅矿(图 9a、9b、9c);二是胶状结构的微细粒黄铁矿 Py1b,可以独立存在,也可以包裹草莓状黄铁矿,叠加生长,粒度 10 μm 左右(图 9b);三是以半自形—

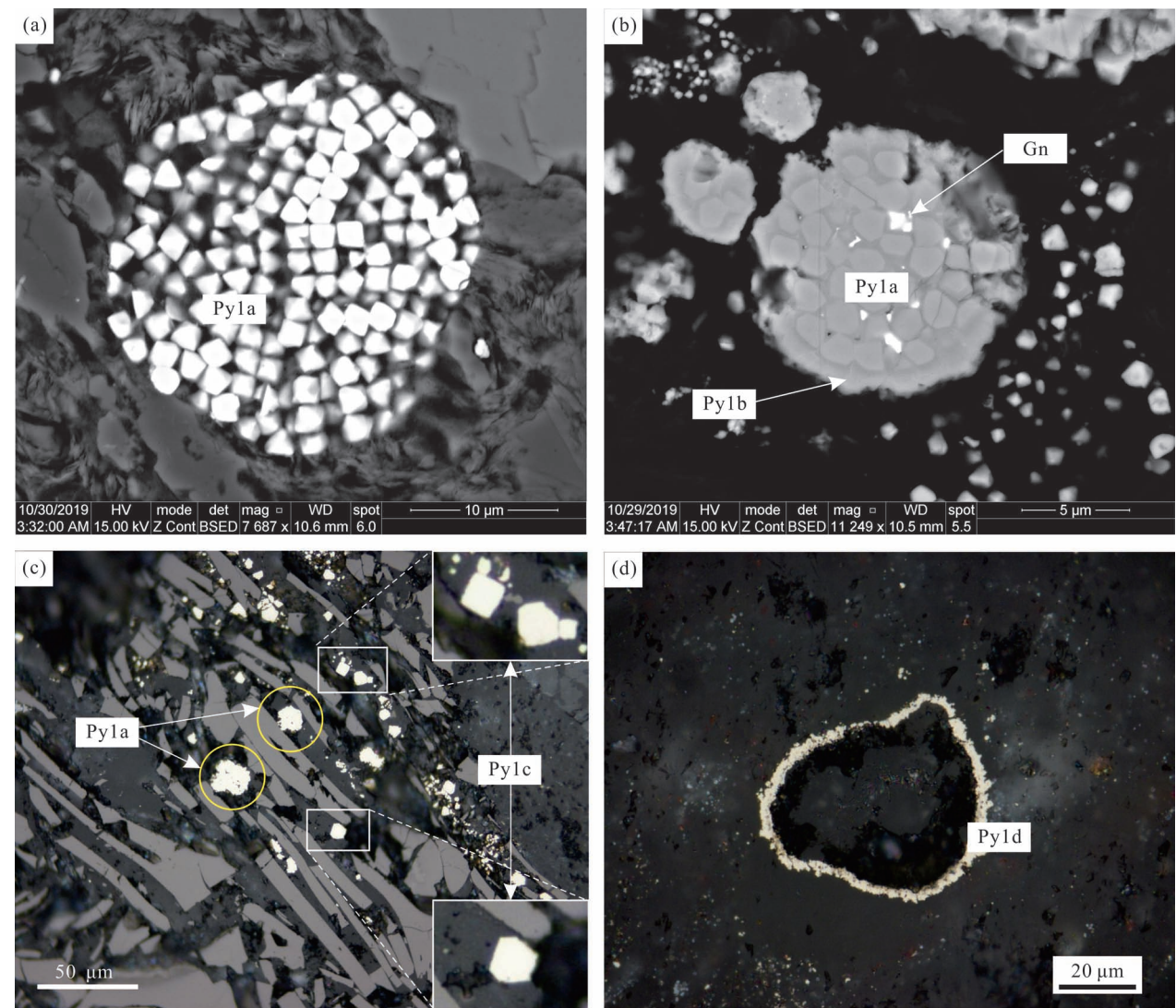


图 9 东准噶尔顿巴斯套矿区沉积期黄铁矿显微镜下及背散射照片

Fig. 9 Microscopic and backscattering images of sedimentary pyrites from the Dunbastau gold deposit, eastern Junggar
(a) 由微细粒八面体黄铁矿颗粒组成的草莓状集合体 Py1a; (b) 胶状结构的 Py1b 包裹草莓状黄铁矿 Py1a 生长,内部见沉积成因方铅矿; (c) 与石墨共生的 Py1a 和 Py1c, Py1c 呈半自形; (d) 围绕碎屑生长的球壳状 Py1d; Py—黄铁矿; Gn—方铅矿
(a) a Py1a framboid composed of fine octahedral pyrites; (b) colloidal Py1b grew coating Py1a, and sedimentary galena was found inside Py1b; (c) Py1a and Py1c coexisted with graphite, Py1c are subhedral; (d) spherical shell-shaped Py1d grew around a clast; Py—pyrite; Gn—galena

自形微细颗粒存在的 Py1c,一般 5~20 μm (图 9c);四是围绕其他碎屑颗粒呈球壳状的 Py1d(图 9d)。

3.2 成岩期

成岩期主要表现为沉积期黄铁矿的压实、成核和重结晶作用。成岩期黄铁矿 Py2 均产出于地层中,粒度变化较大,依据产出形态、粒度的不同将其划分为四个亚类。

Py2a 粒度一般 20~60 μm ,个别可达 80 μm ,显著大于沉积成因黄铁矿,又小于热液期黄铁矿,具有顺层理分布的特征(图 10a、10b)。Py2a 可以是不规则的微型结核(图 10c),也可以作为结核的外壳(图 10d),或者以自形程度更高的颗粒出现(图 10e、10f),但往往和 Py1 伴生。Py2a 与 Py1c 粒度都很小且都可以具有较好的晶形,有一定相似性,但当它们分布于同一视域时,粒度的显著差异依然可以将它们轻易区分开来(图 10e、10f)。

Py2b 则为肉眼可见的他形黄铁矿集合体,粒度 0.1~1.0 mm,同样具有典型的顺层理分布特征,但粒度明显大于 Py2a(图 10a、10g);Py2c 为大颗粒的黄铁矿成岩结核,一般呈椭圆状,长轴 0.3~3 cm,可见上下层理显著绕过结核弯曲,两侧层理被切割(图 10a);Py2d 为与沉积球粒共生的球壳状黄铁矿(图 10h)。部分 Py2 经受后期韧性变形作用,发育压力影(图 10g)。

3.3 热液期

3.3.1 铁白云石—石英—黄铁矿阶段

该阶段以矿石、围岩发育脆—韧性变形组构,并且产出铁白云石—石英—黄铁矿—绢云母脉为典型特征(图 11a、11b)。围岩发育强烈的绢云母化、铁白云石化、硅化、黄铁矿化、毒砂化蚀变。该阶段矿物组合为铁白云石—石英—绢云母—黄铁矿—毒砂—黄铜矿—方铅矿—闪锌矿,铁白云石具有沿脉壁向内梳状生长的特点(图 11c、11d),近地表常常被风化呈红褐色。该阶段的脉体常被石英—钠长石—方解石阶段的脉体穿切(图 11e)。典型的递进变形现象(图 11f)、压溶作用形成的脉体(图 11g)、石英的变形纹(图 11h)、围岩糜棱岩化、黄铁矿的压力影(图 11i)现象,都指示了该成矿阶段与脆—韧性变形作用同步。

该阶段是该矿床的主成矿阶段,也是产出自然金、载金黄铁矿和毒砂的主要阶段。可见金主要以自然金方式,作为石英裂隙金(图 12a)及毒砂和黄铁矿中的包体金产出(图 12b)。由于沉积期、成岩期的黄铁矿只能产出于沉积地层中,而热液成因黄

铁矿对围岩不具有选择性,因此可以将热液期黄铁矿与前两者轻易区别开来,即产于石英闪长玢岩内的黄铁矿必定属于热液期(黄铁矿为石英闪长玢岩内原生矿物的情况基本排除)。依据穿插、交代、包含等关系,我们将该阶段的黄铁矿划分为四个世代,毒砂划分为三个世代,依据时间顺序各自特征如下:

Apy1:粒度小,短轴一般 20~50 μm ,长轴一般 50~100 μm ,绝大多数呈菱形、针柱状自形晶,少量为半自形。Apy1 常包含 Py1、Py2,并且常与自然金共生(图 12c、d、e)。

Apy2:粒度中等,短轴一般 80~120 μm ,长轴一般 300~700 μm ,具有良好的自形晶,内部局部可见沉积、成岩期的黄铁矿包体和黄铜矿包体,可包含 Apy1(图 12d、e、f)。

Py3:他形—自形,自形程度变化较大,粒度一般 50~150 μm ,以内部包体、孔洞多为显著特征,包体主要为绢云母、石英、铁白云石、闪锌矿、黄铜矿等,可交代早期毒砂(图 12f、g)。

Py4:半自形—自形,晶形优于 Py3,粒度 150~300 μm 左右,常常沿着 Py3 边缘生长,形成典型的核幔结构,以包体多,孔洞少为显著特征(图 12b、g),可发育压力影。

Py5:半自形—自形,粒度一般 0.1~0.4 mm,少数可达 0.8 mm,包体少,孔洞少,背散射图像下显著高亮,主要以环带或边部的形式分布在多重环带的黄铁矿中,少量独立产出(图 12g)。

Apy3:以颗粒粗大为典型特征,自形程度高,主要呈针状晶、菱形晶,一般短轴在 0.3~0.4 mm,最大可达 0.6 mm,长轴一般 0.7~1.5 mm,最大可达 3 mm。内部空洞少,少量硫化物包体,常受晚期应力作用发育碎裂结构和压力影(图 12e、h)。

Py6:颗粒最大,粒度 0.5~5 mm,半自形—自形晶,与粗粒毒砂 Apy3 近同时,两者常共生,局部包含 Apy3,时间上略晚于 Apy3(图 12g、h)。表面麻点较多,含少量硫化物包体。广泛发育碎裂结构和压力影(图 12i)。

各世代黄铁矿、毒砂的典型鉴别特征如表 1。

具典型核幔结构黄铁矿的能谱面扫结果初步显示,Py3、Py4、Py5、Py6 内 Fe 的含量无明显差异(图 13a、b);相较而言,Py5 明显贫 S(图 13c)、Pb(图 13d),富集 As(图 13e)、Mg(图 13f)、Se(图 13g),与其他三个世代的黄铁矿有显著区别;Py3、Py4、Py6 中,Py3 由于包体较多,明显富 Si(图 13h),相对贫 As(图 13e)、Mg(图 13f);Au 在四种世代黄铁矿中

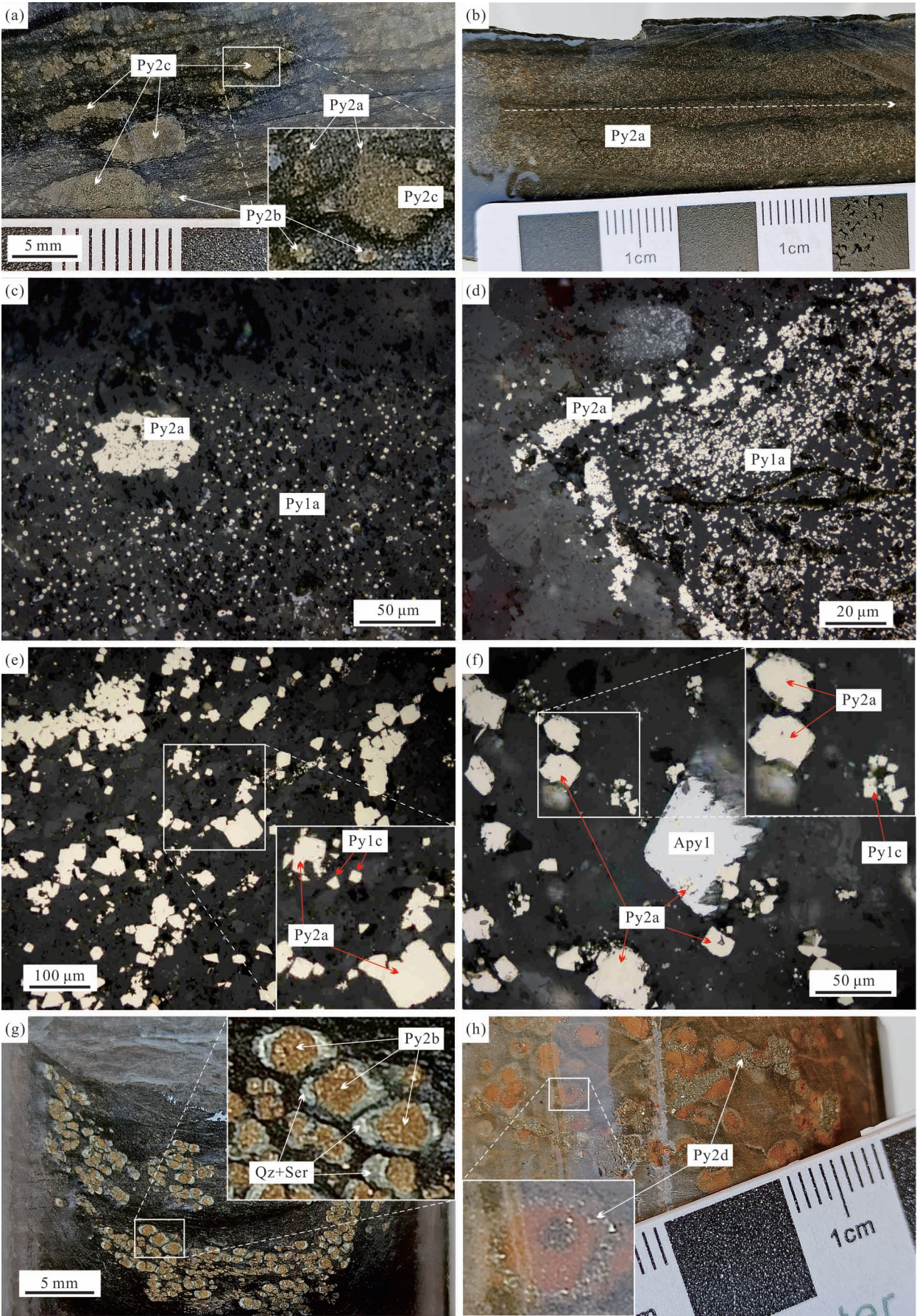


图 10 东准噶尔顿巴斯套矿区成岩期黄铁矿 Py2 手标本及镜下特征

Fig. 10 Hand specimens and microscopic characteristics of diagenetic Py2 from the Dunbastau gold deposit, eastern Junggar

(a) 顺层产出的 Py2a、Py2b 和 Py2c,Py2c 上下层理显著弯曲;(b) 顺层产出的 Py2a;(c) Py2a 呈结核状与 Py1a 伴生;(d) Py2a 作为 Py1a 结核的外壳;(e)、(f) 半自形到自形的 Py2a 和 Py1c,二者显示出明显的粒度差异;(f) Apy1 包含 Py2a;(g) Py2b 及其典型的压力影,压力影内矿物组合为石英和绢云母;(h) 呈球壳状产出的 Py2d;Py—黄铁矿;Qz—石英;Ser—绢云母;Apy—毒砂

(a) Py2a, Py2b, and Py2c are consistent with bedding. The bedding above and below Py2c are significantly curved. (b) Py2a are consistent with bedding. (c) nodule-shaped Py2a coexisted with Py1a. (d) Py2a are as a shell of Py1a nodule. (e), (f) Py2a and Py1c are both subhedral to euhedral, but they have significant grain size differences. (f) Apy1 contain Py2a. (g) Py2b and their typical pressure shadows, in which the mineral assemblage is composed of quartz and sericites. (h) Py2d are spherical shell-shaped. Py—pytite; Qz—quartz; Ser—sericite; Apy—arsenopyrite

的分布差异不明显,但可以观察到 Au 的细粒包体(图 13i)。

3.3.2 石英—钠长石—方解石阶段

该阶段是晚阶段,以产出石英—钠长石脉和发育脆性变形为典型特征,钠长石常常沿着脉壁与围岩的接触部位呈梳状生长(图 14a、14b)。该阶段矿物组合为石英—钠长石—方解石—绿泥石—绿帘石—黄铁矿—黄铜矿,可形成石英—钠长石—绿泥石脉、石英—绿帘石脉,绿泥石—绿帘石脉等(图 14c),围岩发育碳酸盐化、钠长石化、绿泥石化、绿帘石化蚀变。Py6 在该阶段仍有产出(图 14d),具有穿时性,但不含金。该阶段脉体宽度变化较大,可形成较粗的石英脉,石英脉多呈乳白色,含金性较差。该阶段早期仍有一定脆—韧性变形特征,可见 Py6 发育绿泥石压力影(图 14e),晚期变形作用转

换为了脆性,常发育脆性破裂并形成热液角砾岩(图 14d、14f)。

综合各成矿期矿物特征,得出矿物共生顺序如图 15。

4 讨论

4.1 构造与金的成矿

顿巴斯套金矿处于晚古生代萨吾尔岛弧带,大量的岩浆侵入,火山活动,褶皱断裂活动在区域上提供了良好的大地构造条件。

顿巴斯套金矿严格受阿尔曼太断裂和二台断裂的控制(图 3),金矿床几乎全部矿体都产在阿尔曼太—二台断裂的北东部,断裂带南西一侧几乎没有工业矿体,说明区域性阿尔曼太—二台断裂是本区起决定性作用的重要成矿边界条件(肖飞等,2014;

表 1 东准噶尔顿巴斯套矿区各世代黄铁矿、毒砂典型鉴别特征

Table 1 Typical identification characteristics of pyrites and arsenopyrites in different generations of the Dunbastau gold deposit, eastern Junggar

世代	亚类	成因	粒度集中范围*	平均粒度*	自形程度	截面形态	典型鉴别特征
Py1	Py1a	沉积	5~25 μm	10 μm	他形	草莓状	微细粒的黄铁矿结合体,具典型的草莓状结构
	Py1b	沉积	3~15 μm	10 μm	他形	球形、椭球形	具典型的胶状结构
	Py1c	沉积	5~20 μm	15 μm	他形—半自形	四边形、六边形、不规则形	粒度稍大,有一定晶形
	Py1d	沉积	/	/	他形	球壳状	呈球壳状围绕其他矿物
Py2	Py2a	成岩	20~60 μm	30 μm	他形—半自形	四边形、六边形	多顺层分布,粒度小,有一定晶形
	Py2b	成岩	0.1~1 mm	0.4 mm	他形	球形、椭球形、不规则形	多顺层分布,集合体状,肉眼可见
	Py2c	成岩	3~30 mm	5 mm	他形	球形、椭球形、长条形、不规则形	多顺层分布,集合体状,颗粒大,两侧层理弯曲
	Py2d	成岩	/	/	他形—半自形	球形、不规则状	与沉积球粒伴生,呈球形
Apy1	/	热液	50~100 μm	80 μm	自形	菱形、针状	晶形好,粒度很小
Apy2	/	热液	300~700 μm	500 μm	自形	菱形、针状	晶形好,粒度中等
Py3	/	热液	50~150 μm	100 μm	他形—自形	四边形、六边形、不规则形	晶形差,内部包体多,空洞多,背散射下暗
Py4	/	热液	150~300 μm	200 μm	半自形—自形	五边形、四边形	内部孔洞少,包体多,背散射下亮度稍高
Py5	/	热液	0.1~0.4 mm	0.2 mm	半自形—自形	四边形	多呈环状或位于边部,背散射下亮度最高
Apy3	/	热液	0.7~1.5 mm	1.0 mm	自形	菱形、针状	晶形好,颗粒大,发育碎裂结构和压力影
Py6	/	热液	0.5~5 mm	2 mm	半自形—自形	四边形	晶形好,颗粒大,内部孔洞少,麻点多,发育碎裂结构和压力影

注: * —粒度均以长轴计。

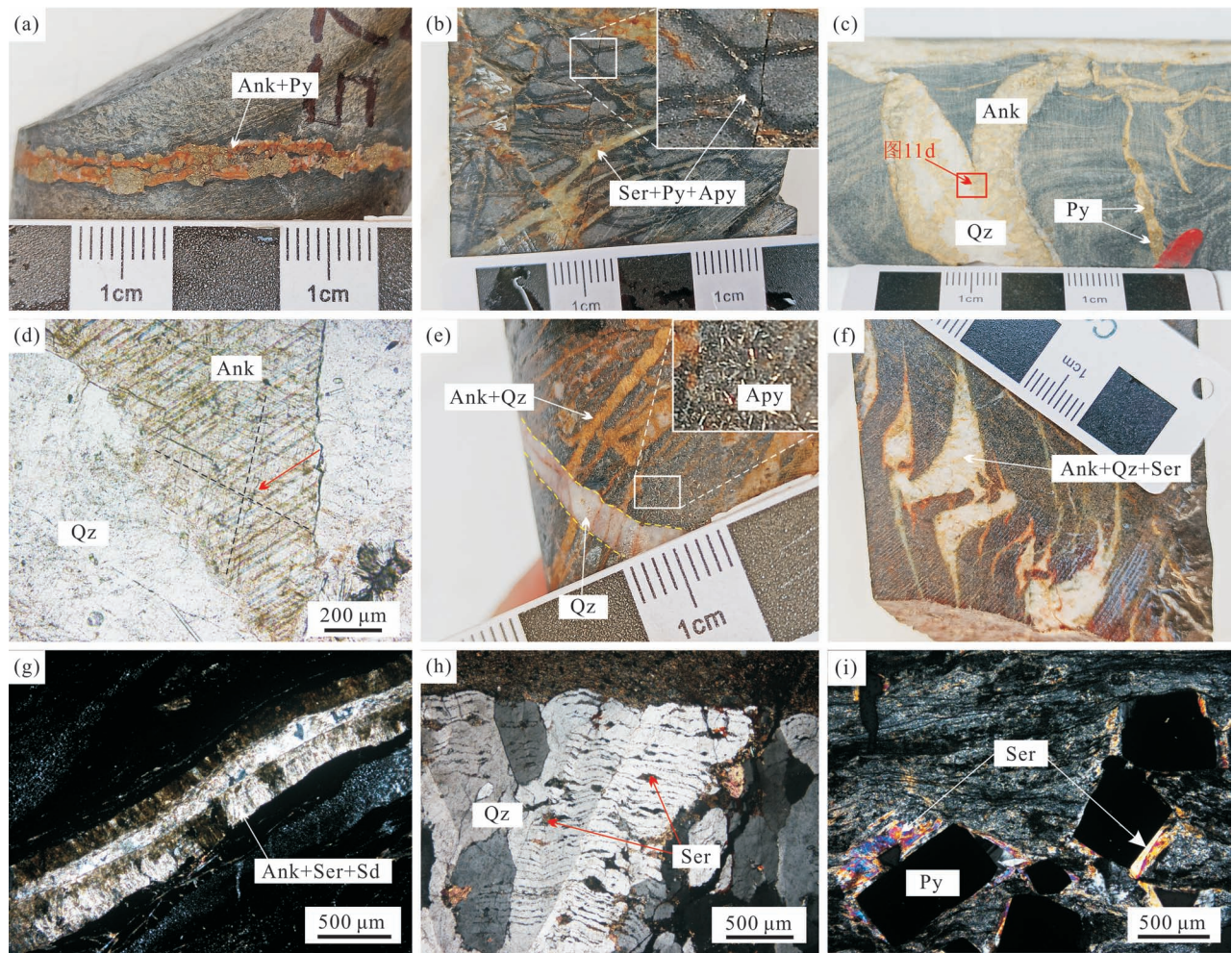


图 11 东准噶尔顿巴斯套矿区主成矿阶段矿脉等手标本及镜下特征

Fig. 11 Hand specimens and microscopic characteristics of the veins at the main metallogenic stage from the Dunbastau gold deposit, eastern Junggar

(a) 铁白云石—黄铁矿脉;(b) 绢云母—硫化物细网脉;(c) 典型的石英—铁白云石脉,铁白云石沿壁生长;(d) 石英—铁白云石脉显微照片,铁白云石呈叶片状,双晶纹平行于解理的短对角线方向;(e) 石英—铁白云石脉被晚阶段石英脉穿切,围岩强烈毒砂化蚀变,毒砂呈针状;(f) 递进变形过程中形成的典型的雁列状张裂脉,脉内矿物组合为 Ank+Qz+Ser,指示了该阶段脉体的同变形成因;(g) 脆—韧性变形过程中压溶作用形成的脉体,可见清晰的菱铁矿和铁白云石向内生长纤维;(h) 石英脉内部的应变条纹,充填有细粒绢云母;(i) 脆—韧性变形导致的围岩糜棱岩化,黄铁矿边缘发育绢云母压力影;Py—黄铁矿;Qz—石英;Ser—绢云母;Apy—毒砂;Ank—铁白云石;Sd—菱铁矿

(a) ankerite—pyrite veins. (b) sericite—sulfide stockwork. (c) typical quartz—ankerite veins with ankerites growing along the wall of veins. (d) micrograph of quartz—ankerite vein. Ankerites are foliaceous with its twin stripes paralleling to the short diagonal of cleavages. (e) quartz—ankerite veins are cross-cut by quartz veins of late stage. The host rocks suffered intense arsenopyrite alteration, and these arsenopyrites are acicular. (f) typical echelon tension veins formed during progressive deformation, and the mineral assemblage of these veins is Ank + Qz + Ser, indicating the production of veins at this stage were simultaneous with the deformation. (g) veins formed by pressure solution during brittle—ductile deformation, with transparent inward growing fibers of siderite and ankerite. (h) strain stripes inside quartz veins are filled with fine sericites. (i) host rock suffered mylonitization caused by brittle—ductile deformation, and sericite pressure shadows developed at the edge of pyrites. Py—pyrite; Qz—quartz; Ser—sericite; Apy—arsenopyrite; Ank—Ankerite; Sd—siderite

王永,2013)。矿区内几种侵入岩也主要出于两条断裂的交汇位置,由其派生的 N—W、N—WW 向次级断裂、裂隙、破碎带和脆—韧性剪切带则直接控制了金矿体的产出。

金矿体在平面上多呈长条状,其延伸方向与剪切带的走向完全一致,品位较高的金矿体(如 L8 矿体)则直接产于脆—韧性剪切带内。研究区的变形作用横向上差别明显:距离阿尔曼太断裂较近位置,

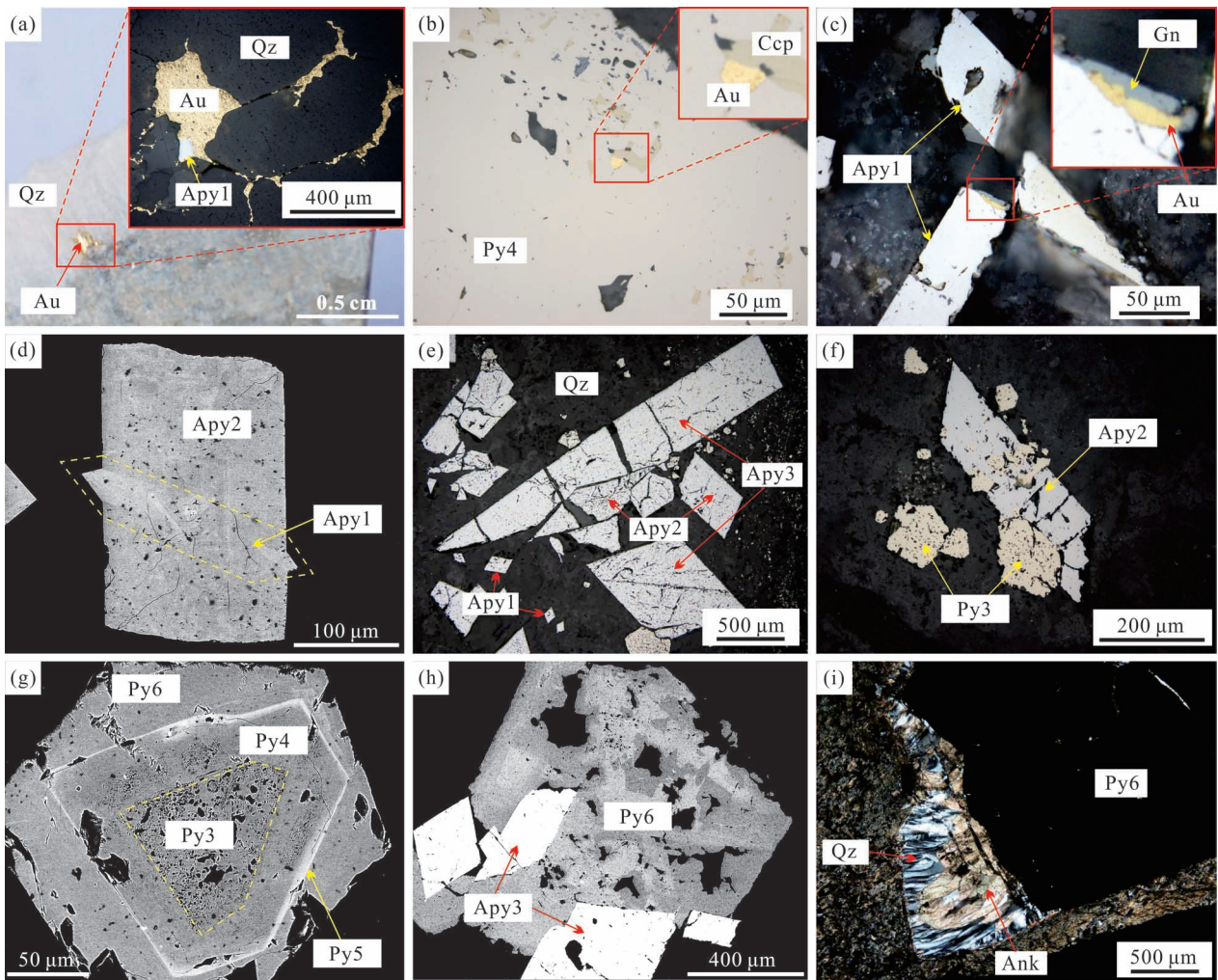


图 12 东准噶尔顿巴斯套矿区主成矿阶段金属矿物特征

Fig. 12 Metal mineral characteristics of the main metallogenic stage from the Dunbastau gold deposit, eastern Junggar

(a) 含金石英脉,肉眼可见自然金,自然金他形充填于石英裂隙中,和 Apy1 共生;(b) 表面相对干净的 Py4,内部见黄铜矿和自然金包体;(c) 自形 Apy1 和方铅矿、自然金共生;(d) Apy2 包含 Apy1,均呈自形晶;(e) 同一视域下三种世代的毒砂,均呈自形晶,具有显著的粒度差异,碎裂现象明显;(f) 自形 Apy2 被他形 Py3 交代;(g) 热液期黄铁矿的背散射图像,发育显著的多重环带,Py3 位于核部,显示出典型的多孔、多包体、背散射下较暗的特征;Py4 围绕 Py3 生长,有包体,但孔洞明显减少,亮度明显高于 Py3;Py5 显示出明显的高亮环带;Py6 位于最外侧,包体少,孔洞少,亮度稍高于 Py4;(h) 大颗粒的 Py6 包含自形 Apy3;(i) Py6 发育典型的压力影结构,压力影内为主阶段典型矿物组合:铁白云石+石英;Py—黄铁矿;Qz—石英;Apy—毒砂;Ank—铁白云石;Gn—方铅矿;Au—自然金;Ccp—黄铜矿

(a) gold-bearing quartz vein with visible native gold. Native gold grains are anhedral. They filled in the quartz fissure and coexisted with Apy1. (b) Py4 has a relatively smooth surface with chalcopyrite and native gold inclusions inside. (c) euhedral Apy1 coexisted with galena and native gold. (d) Apy2 contain Apy1, both are euhedral. (e) there are three generations of arsenopyrite in the sample. All of them are euhedral. There are significant differences in grain size and apparent fragmentation. (f) euhedral Apy2 were replaced by anhedral Py3. (g) backscattering image of hydrothermal pyrite. This pyrite developed zoned texture: Py3 located at the core showing the typical characteristics of porous, inclusion-rich and dark in backscattering image; Py4 overgrew on Py3, Py4 have some inclusions, but the holes inside decreased significantly and its brightness is markedly higher than Py3; Py5 is an exceptionally bright zone; Py6 is located at the edge, with fewer inclusions, fewer holes, and its brightness is slightly higher than Py4. (h) coarse Py6 contain euhedral Apy3. (i) typical pressure shadow developed around Py6. The mineral assemblage in the pressure shadow is consistent with a representative assemblage of the main stage: ankerite + quartz. Py—pyrite; Qz—quartz; Apy—arsenopyrite; Ank—Ankerite; Gn—galena; Au—native gold; Ccp—chalcopyrite

以脆—韧性剪切作用为主,片理化、劈理化发育;而远离阿尔曼太断裂的区域,以脆性变形为主,大多充填无矿石英脉且连续性差(李欢,2018),这表明,相

对于晚期脆性变形,脆—韧性剪切作用才是成矿最重要的动力机制。在显微尺度上,递进变形、矿物定向拉长、压力影等现象十分典型,成矿最重要的热液

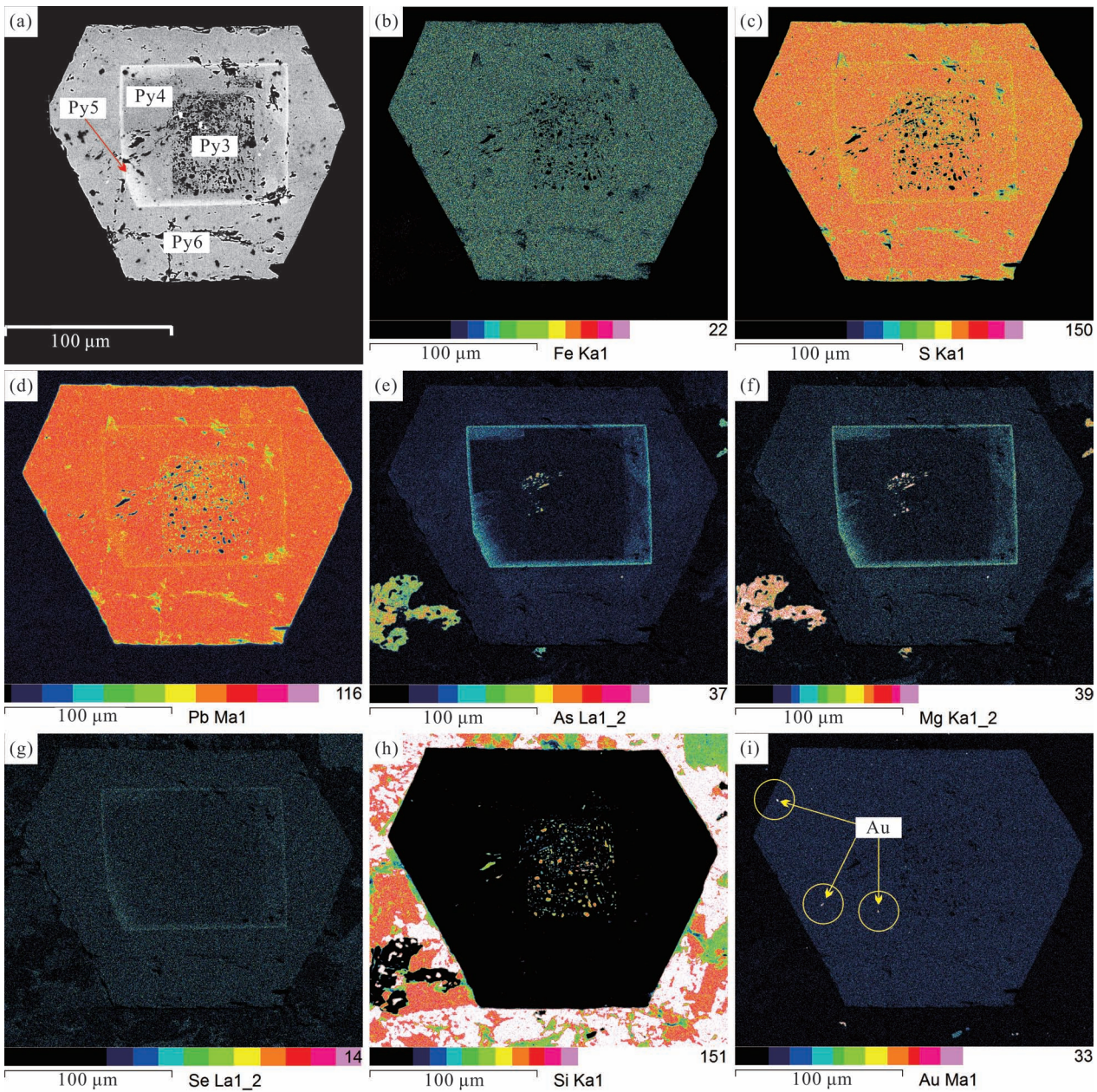


图 13 东准噶尔顿巴斯套矿区具有典型核幔结构黄铁矿的能谱面扫图像
Fig. 13 The energy spectrum surface scanning images of pyrite with typical zoned texture
from the Dunbatau gold deposit, eastern Junggar

脉及蚀变均与脆—韧性变形作用直接相关,甚至直接产自变形作用过程(图 11f)。黄铁矿的压力影结构以及压力影中的矿物组合显示(图 12i 和图 14e),成矿与脆—韧性变形作用同步,并且在主成矿阶段后仍有持续。在晚阶段以脆性变形为主导的热液脉体几乎无矿化。

背斜褶皱的核部是薄弱位置,加之遭受了断裂构造和侵入体的破坏,使得矿区轴部向东倾伏的陡立背斜具有良好的容矿条件,金矿体正产于该背斜

的核部地层中。

由此可见,区域性断裂的次级断裂、脆—韧性剪切带和背斜构造“三位一体”的优越构造条件,联合控制了金矿体的产出。

4.2 岩体与金的成矿

顿巴斯套金矿区主要发育有五种侵入岩,但除了石英闪长玢岩与金矿体具有空间联系外,由于其他四种岩体均距矿体 4 km 以上,我们可以初步认为这四种岩体在空间上与金矿体没有直接联系,由于

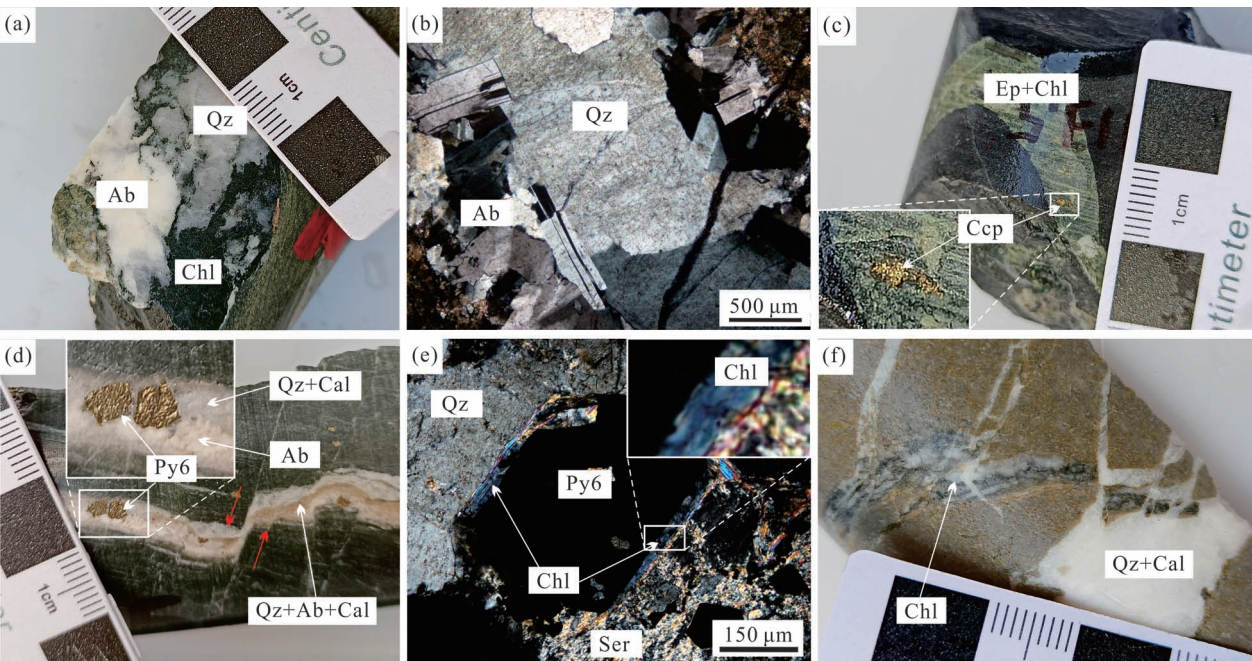


图 14 东准噶尔顿巴斯套矿区晚阶段脉体及矿物特征

Fig. 14 Vein and mineral characteristics of late stage of the Dunbastau gold deposit, eastern Junggar

(a) 典型的石英—钠长石—绿泥石脉；(b) 石英—钠长石脉，钠长石分布于脉壁向内梳状生长；(c) 绿泥石—绿帘石脉内的黄铜矿，围岩强烈绿泥石化蚀变；(d) 晚阶段石英—钠长石—方解石脉发生脆性断裂，脉内产出 Py6；(e) Py6 周围的绿泥石压力影，表明晚阶段脆—韧性变形作用仍有持续；(f) 晚阶段脆性破裂形成的热液角砾岩，脉内为石英—方解石组合；Py—黄铁矿；Qz—石英；Ccp—黄铜矿；Cal—方解石；Ser—绢云母；Chl—绿泥石；Ab—钠长石；Ep—绿帘石

(a) typical quartz—albite—chlorite veins; (b) quartz—albite vein. Albites are distributed in the vein wall and grew inwards as comb; (c) chalcopyrite within the chlorite—epidote vein. The host rock suffered intense chloritization; (d) the quartz—albite—calcite vein with Py6 produced suffered brittle fracture in the late stage; (e) chlorite Pressure shadows developed around Py6, indicating that brittle—ductile deformation continued at the late stage; (f) hydrothermal breccia formed by a brittle fracture in the late stage, with quartz and calcite in the vein; Py—Pyrite; Qz—quartz; Ccp—calchopyrite; Cal—calcite; Ser—sericite; Chl—Chlorite; Ab—Albite; Ep—Epidote

这几个侵入岩尚缺乏研究，尤其是年代学研究，不排除这些岩浆活动可能为成矿元素的活化迁移提供热能(肖飞等,2014)。

石英闪长玢岩是矿区内出露的最重要的侵入岩,矿区金矿化大多数产在石英闪长玢岩脉与姜巴斯套组接触带附近,靠近碎屑岩地层一侧的次级断裂、裂隙、破碎带和片理化带中。在深部矿体石英闪长玢岩则成为主要的赋矿围岩,因此有前人认为成矿元素的富集与石英闪长玢岩脉就位过程中的分离、分异、结晶作用相关(常雪生等,2013;郭海棠等,2013)。然而,矿体的产出并不受该岩体的控制,肖飞等(2014)也明确指出矿区内金的成矿对围岩无明显的选择性,李欢(2018)获得该石英闪长玢岩的锆石 U-Pb 年龄加权平均年龄为 378 ± 2 Ma (MSWD=0.37),获得黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 268.3 ± 2.8 Ma,金矿化显著晚于石英闪长玢岩所代表的岩浆活动。石英闪长玢岩由于与地层具有岩性

界线,可能充当了部分流体通道的作用(王永,2013)。

4.3 地层与金的成矿

矿区下石炭统姜巴斯套组的陆源碎屑岩、火山碎屑沉积岩,具有 Au、Ag、As 高背景值的地球化学特点,其含量高出地壳同类岩石丰度值 5~10 倍(常雪生等,2013)。该组地层中广泛发育草莓状黄铁矿,草莓状黄铁矿常共生有沉积成因的方铅矿等硫化物(图 9b),在成岩期和热液期重结晶,许多载金的热液成因黄铁矿以草莓状黄铁矿为核或在其边部叠加生长。因此该组地层很可能为成矿提供了重要物质来源。

这套碎屑岩富含碳质夹层,常见石墨(图 4h,图 4i),且石墨常常与草莓状黄铁矿共生(图 9c)。前人研究显示,碳质地层与金的成矿具有显著联系,碳质可能吸附自然金,或者将金的络合物还原,或者以其他方式参与金的迁移和成矿作用(罗镇宽,1984;

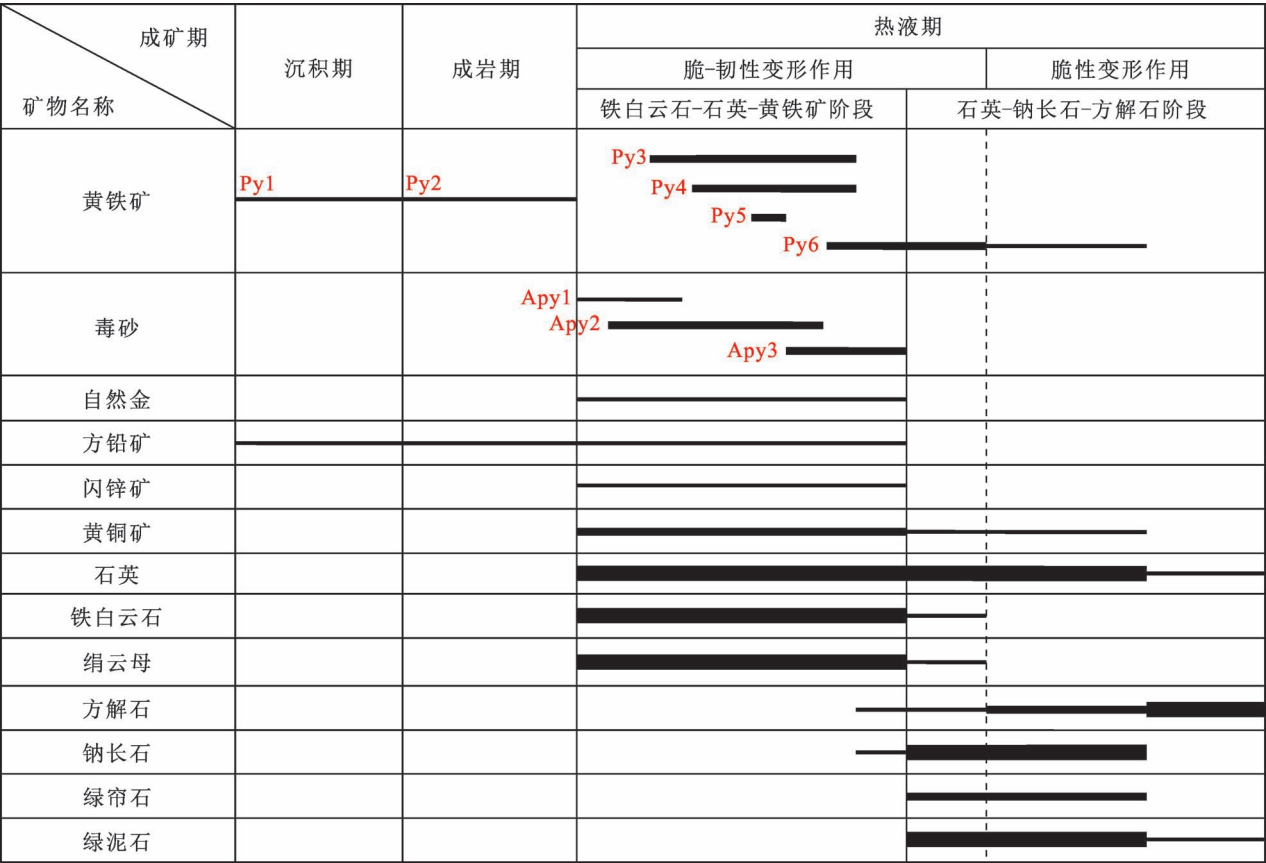


图 15 东准噶尔顿巴斯套矿区矿物共生顺序

Fig. 15 Paragenesis sequence of the minerals in the Dunbastau gold deposit, eastern Junggar

王莉娟等,2006)。肖飞等(2014)认为由于碳质的还原性,该组地层中丰富的碳质可能起到了金从热液中沉淀的催化剂作用。

此外,该套碎屑岩具有显著的沉积旋回,从粉砂岩到砾岩均有产出,粒度变化极大,使得同一组地层内部能干性变化剧烈,在构造应力作用下易于形成破碎带、片理化带及断裂、裂隙,加之碎屑颗粒大使得岩层孔隙度高,能够提供良好的张性容矿空间,有利于矿液运移、充填和交代,并沉淀成矿,例如钻孔 ZK005 中金的最高品位就产于砾岩部位(图 8)。

4.4 矿床成因类型

李欢(2018)测得顿巴斯套金矿床流体包裹体均一温度集中于 180~260℃,成矿流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 和 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值分别为 1.1‰~3.9‰和-116‰~-121‰,黄铁矿和毒砂 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值分别为 3.0‰~5.8‰和 4.2‰~5.6‰,认为其与岩浆流体类似;并且获得黄铁矿的 Rb-Sr 年龄为 268.3±2.8 Ma,与矿区外围细粒花岗岩(268±2 Ma)近同期,而滞后于东准噶尔地区脆—韧性剪切活动(290~270 Ma)(闫

升好等,2006;路彦明,2008;徐斌等,2009),因此得出顿巴斯套为岩浆热液矿床。然而,顿巴斯套金矿床发育含 CO₂ 的包裹体,而未见含子晶包裹体(李欢,2018),显示低盐度、富 CO₂ 特征,与高温、高盐度、富 CO₂ 的岩浆热液明显不同,和变质热液的流体特征十分吻合(陈衍景等,2007)。顿巴斯套 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 和 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值显示大气降水混合特征,无法确定成矿流体是岩浆热液还是变质热液。而硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值略高于典型岩浆硫源,指示地层硫的贡献,而非单一岩浆硫源,如,东昆仑开荒北金矿为典型造山型金矿(张德全等,2001,2007;赵俊伟,2008),其硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 介于 3.0‰~6.1‰(丰成友等,2003),与顿巴斯套相似。事实上,大部分造山型金矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 是正值,且变化范围有限,主体集中在 0~10‰(汪在聪等,2010)。因此,顿巴斯套金矿的成因类型还需要进一步厘定,尤其是地质特征方面的依据。

东准噶尔地区韧性剪切活动的时限约为(290~270 Ma),而顿巴斯套金成矿约在 270 Ma,如

此相近的年龄数据,恰恰证明了金的成矿与此次脆—韧性剪切作用密切相关。大量岩相学证据也表明,顿巴斯套金矿成矿作用是明显同步于脆—韧性变形作用的。递进变形过程中形成的典型的雁列状张裂脉,脉内矿物组合与主成矿阶段的矿物组合完全一致(图 11f),广泛发育的压溶作用形成的脉体(图 11g),石英脉的应变纹(图 11h),都指示了含金脉体的同变形成因。黄铁矿压力影结构十分典型,压力影中可见晚阶段标志性矿物绿泥石(图 14e),指示了在主成矿阶段后,脆—韧性变形作用仍有持续,成矿作用均在脆—韧性变形作用时限内。石英—钠长石—方解石阶段各种脆性破裂、脉体充填的围岩并无品位,表明应力作用转换为脆性后是不成矿的。

脆—韧性剪切带是顿巴斯套金矿重要的控矿构造,这是目前所有开展顿巴斯套金矿相关研究的学者的共识(常雪生等,2013;郭海棠等,2013;王永,2013;毛亮,2017;李欢,2018)。肖飞等(2014)强调区内 N—WW 向的脆—韧性构造变形带是首要的控矿构造,并指出构造带内岩石变形所发生的差异滑动为成矿流体在岩石中的运移开辟了通道,有利于深部变质产生的热液沿构造带上升,深部含金热液上升和变质作用引起原岩中的金的迁移和富集,亦即肯定了变质热液和变质作用是顿巴斯套金矿的重要成矿机制;常雪生等(2013)和郭海棠等(2013)认为顿巴斯套金矿是中—低温破碎蚀变岩型金矿;王永(2013),毛亮(2017)认为顿巴斯套为石英网脉及复脉带型金矿。而造山型金矿的概念包括了过去有些文献中常见的石英脉型、韧性剪切带型、构造蚀变岩型以及一些网脉状的金矿床,它们本质上都是变质热液成矿系统(Goves et al., 1998; Kerrich et al., 2000; Goldfarb et al., 2001; 陈衍景, 2006; 陈衍景等, 2007),因此以上这些学者的观点也支持顿巴斯套属造山型金矿。

与相邻的额尔齐斯、卡拉麦里构造带典型的造山型金矿对比(表 2),不难发现顿巴斯套金矿与这些矿床具有极其相似的地质特征:矿床受区域性断裂及其次级断裂控制;脆—韧性剪切带是重要的控矿构造;赋矿地层均为岛弧区典型的火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩和陆源碎屑岩;岩浆岩往往在矿区不发育,或者不起主导作用;金矿体多呈脉状,与石英脉密切相关;黄铁矿和毒砂是重要的载金矿物;硅化和黄铁矿化是与矿化联系最密切的围岩蚀变,此外毒砂化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化也

是具有标志性的蚀变类型;晚阶段多具有石英—碳酸盐的矿物组合;成矿年代非常集中,均在 $260 \pm 4 \sim 314.9 \pm 3.2$ Ma,表明东准噶尔地区晚石炭世—早二叠世是重要的造山型金矿成矿期。

4.5 金的成矿过程

同构造脉体指示了成矿与构造变形的同步性(图 11f)。由于矿区石英闪长玢岩均已蚀变,现有的该岩体的品位数据不能反映其原始金含量,因此不排除石英闪长玢岩提供了金的来源。考虑到下石炭统姜巴斯套组具有高 Au 背景值(常雪生等, 2013),且广泛含有碳质和草莓状黄铁矿的特点,金可能部分来源于地层。在沉积—成岩过程中,黄铁矿和其他硫化物的沉淀,可能造成了金的初步富集。

Apy1、Apy2 和 Py3 产于主成矿阶段早期。Apy1 粒度小,晶形好,是热液期最早产出的载金矿物,常与沉积期和成岩期黄铁矿伴生,可见其与自然金共生(图 12c);Apy2 粒度也较小,自形程度好,并且分布广泛,常被晚期黄铁矿包含;Py3 具有非常典型的多孔,富含硅酸盐、方铅矿、闪锌矿包体的特征(图 12g, 图 13a、h),与之后更纯净的热液成因黄铁矿具有显著区别,Py3 的结构特征很可能是由于早期热液对于沉积、成岩期黄铁矿的继承,可能是通过溶解—再沉淀过程,或者直接在原有基础上结晶(Li Rucao et al., 2020)。Py3 晶型相对不规则,粒度较细,一般 $50 \sim 150 \mu\text{m}$,较细的粒度意味着更大的比表面积,在标型特征上明显有利于载金(李晶等, 2004;刘一浩等,2020)。

Py4、Py5 形成于主成矿阶段中期。Py4 具有相对更完整的晶形,表面干净,粒度相对大,一般 $150 \sim 300 \mu\text{m}$,相对 Py3,其内部孔洞和硅酸盐包体明显减少,硫化物包体多,镜下可见自然金的包体(图 12b),也是重要的载金黄铁矿。Py5 可能是一期富 As 热液事件的产物,主要是以环带或边部的形式出现在多重环带黄铁矿颗粒中,独立的 Py5 颗粒相对较少。

Apy3 和 Py6 是主成矿阶段晚期的产物,粒度均较大,晶形好,内部几乎无包体,常常共生,发育碎裂结构和压力影,受晚期应力作用明显,从标型特征来看,含金性预期较差。Py6 在晚阶段也有产出,但不含金。

以上现象表明,热液期金的沉淀是一个逐渐减弱的过程。在主成矿阶段早期金矿化最强,硫化物标型特征更利于载金,随着脆—韧性变形作用进行,黄铁矿、毒砂的粒度有序递增,自形程度逐渐提高,

而品位逐渐降低。金的沉淀发生在脆—韧性变形阶段,脆性变形阶段无金矿化。

在手标本尺度上,相对细粒的、微细浸染状

的黄铁矿化、毒砂化蚀变(即 Apy1、Apy2、Py3、Py4、Py5),与高品位的金矿体具有密切联系;而大颗粒黄铁矿化蚀变部位(即 Py6),品位往往较差。铁白

表 2 顿巴斯套金矿与相邻构造带典型造山型金矿特征对比

Table 2 Comparison of the characteristics of Dunbastau gold deposit and typical orogenic gold deposits in the adjacent tectonic belts

金矿床	所处构造带	赋矿地层	岩浆岩	控矿构造	矿体形态	矿石类型	矿石矿物	脉石矿物	围岩蚀变	成矿阶段	成矿年代	资料来源
顿巴斯套	阿尔曼太	下石炭统姜巴斯套组火山碎屑岩、碎屑沉积岩	石英闪长玢岩	阿尔曼太断裂的次级断裂、脆—韧性剪切带	脉状、透镜状	石英脉型、蚀变岩型	自然金、黄铁矿、毒砂、闪锌矿、黄铜矿、石墨、褐铁矿、赤铁矿、菱铁矿	石英、钠长石、铁白云石、绿泥石、绿帘石、绢云母、方解石等	硅化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化蚀变、黄铁矿化、毒砂化	1) 铁白云石—石英—黄铁矿—绢云母阶段, 2) 石英—钠长石—方解石阶段	268. 3 ± 2. 8 Ma (黄铁矿 Rb-Sr 等时线)	本文;李欢,2018
萨尔布拉克	额尔齐斯	下石炭统南明水组碳酸盐岩、火山碎屑岩、碎屑沉积岩	不发育,少量花岗岩脉、流纹斑岩等	额尔齐斯断裂和乌伦古断裂的次级断裂、韧性剪切带、紧闭褶皱	脉状、透镜状、囊状	蚀变岩型	毒砂、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黝铜矿、硫锑铅矿、锡石、磁铁矿、钦铁矿、赤铁矿、自然金	长石、石英、铁白云石、方解石、绢云母、绿泥石、绿帘石	毒砂化、黄铁矿化、硅化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、高岭土化、石墨化	1) 韧性变形—黄铁矿化—硅化阶段; 2) 韧脆性变形—黄铁矿—毒砂—石英脉阶段; 3) 多金属硫化物阶段; 4) 石英—碳酸盐阶段	285 ± 43 Ma (流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄); 304 ± 7 Ma (Pb-Pb 表面年龄)	董永观等, 1994;王燕海, 2010;闫升好等, 2006
科克萨依	额尔齐斯	下泥盆统托让格库都克组中基性火山岩、火山碎屑岩、碎屑沉积岩	闪长岩	布尔根韧性剪切带及其次级剪切带、紧闭背斜	脉状、透镜状	石英脉型、蚀变岩型	黄铁矿、毒砂、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿、银金矿、自然金	石英、方解石、绢云母、绿泥石等	硅化、黄铁矿化、绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化	1) 绿泥石—石英—绢云母阶段; 2) 金—石英—绢云母阶段; 3) 金—石英—硫化物阶段; 4) 石英—方解石阶段	275. 8 ± 5. 2 Ma (绢云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar 等时线)	廖启林等, 1999;王军升等, 1999;闫升好等, 2006;王颖维等, 2018
马热勒铁	额尔齐斯	中泥盆统北塔山组火山岩、火山碎屑岩	不发育,少量花岗岩闪长岩脉和辉绿岩脉	玛因鄂博断裂的次级断裂、韧性剪切带	脉状、透镜状	石英脉型、蚀变岩型	黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、黝铜矿、辉铋矿、闪锌矿、赤铁矿、毒砂及少量自然金、银金矿、深红银矿	石英、方解石、绿泥石、电气石、绢云母、重晶石	绿泥石化、绿帘石化、硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铁矿化、褐铁矿化、黏土化等	1) 黄铁矿—石英—金阶段; 2) 多金属硫化物—石英—金阶段; 3) 石英—碳酸盐—金阶段	/	肖惠良等,2002
札克特	额尔齐斯	下石炭统南明水组碳酸盐岩、中性火山碎屑岩、火山岩	安山岩、霏细斑岩	玛因鄂博断裂的次级断裂、韧性剪切带	脉状、透镜状、豆荚状	石英脉型	自然金、黄铁矿、方铅矿、毒砂、白铅矿、银金矿、褐铁矿	石英、绢云母、绿泥石等	硅化、绿泥石化、绢云母化、褐铁矿化	/	/	高荣新, 2002

金矿床	所处构造带	赋矿地层	岩浆岩	控矿构造	矿体形态	矿石类型	矿石矿物	脉石矿物	围岩蚀变	成矿阶段	成矿年代	资料来源
金水泉	卡拉麦里	中泥盆统北塔山组火山碎屑岩、下石炭统姜巴斯套组火山碎屑岩、碎屑沉积岩	蛇绿岩组合,包括蛇纹岩、辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、斜长花岗岩、玄武岩等	卡拉麦里深断裂与清水—苏吉泉大断裂及次一级断层、褶皱构造、韧—脆性剪切带	呈脉状、透镜状、扁豆状	石英脉型、蚀变岩型	黄铁矿、毒砂、自然金、闪锌矿、黄铜矿	石英、方解石、菱镁矿、滑石、绢云母、绿泥石、绿帘石	黄铁矿化、绢云母化、硅化、碳酸盐化、滑石化、绿泥石化、绿帘石化	1) 石英—毒砂阶段; 2) 石英—黄铁矿—毒砂阶段; 3) 乳白色石英阶段	314. 9 ± 3. 2 Ma (热液锆石 U-Pb 加权平均年龄)	陈伟志等,2019
双泉	卡拉麦里	下石炭统南明水组火山岩和火山碎屑岩	辉长岩、辉橄岩	卡拉麦里深断裂与清水—苏吉泉大断裂、韧性剪切带	脉状、网脉状、透镜状	石英脉型、蚀变岩型	自然金、银金矿、黄铁矿、毒砂、黄铜矿、黝铜矿、磁黄铁矿、孔雀石	石英、绿泥石、方解石、绢云母、高岭土、斜长石、磷灰石、白云石、玉髓	硅化、碳酸盐化、绿泥石化、绢云母化等	1) 毒砂—黄铁矿阶段; 2) 金—石英—毒砂—黄铁矿阶段; 3) 金—石英—多金属硫化物阶段	(269±9) ~ (260±4) Ma (石英、绢云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar等时线)	徐斌等,2009;李建军等,2017
南明水	卡拉麦里	下石炭统姜巴斯套组火山碎屑岩	安山质玄武岩、玄武岩	卡拉麦里深断裂与清水—苏吉泉大断裂及次一级断层、褶皱构造、韧—脆性断裂	脉状、团块状、透镜体状、网脉状	石英脉型、蚀变岩型	毒砂、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、赤铁矿、自然金、磁黄铁矿、褐铁矿	石英、电气石、绢云母、方解石、白云母、绿泥石	硅化、毒砂化、黄铁矿化、绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化、绿帘石化	1) 乳白色石英阶段; 2) 石英—电气石—自然金—多金属硫化物阶段; 3) 石英—方解石—绢云母阶段	晚石炭世(?)	葛战林等,2018;朱少华,2016

云石化蚀变(主阶段典型蚀变)部位品位相对较高,而绿泥石化、绿帘石化、钠长石化、方解石化蚀变(晚阶段典型蚀变)部位往往品位较差。

5 结论

顿巴斯套金矿具有区域性断裂的次级断裂控矿、脆—韧性剪切带控矿、背斜核部控矿“三位一体”的控矿特征,NW—SE 向脆—韧性剪切带是最重要的控矿构造。

热液期变形作用经历了由脆—韧性变形向脆性变形的转变。金的成矿发生于脆—韧性变形过程,随着脆—韧性变形作用持续,黄铁矿、毒砂的粒度有序递增,自形程度逐渐提高,而品位逐渐降低。脆性变形阶段无金矿化。

铁白云石化蚀变以及细粒的、他形的、微细浸染状的黄铁矿化、毒砂化蚀变是主成矿阶段的典型蚀变类型,可以作为找矿标志;绿泥石化、绿帘石化、钠长石化、方解石化蚀变以及大颗粒的黄铁矿化蚀变是晚阶段的典型蚀变类型,发育该类蚀变的部位往

往品位较差。

顿巴斯套金矿是典型的受脆—韧性剪切带控制的造山型金矿。

致谢:野外工作得到了西部黄金股份有限公司的大力支持,得到了新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 701 队的协作和帮助,在此表示衷心的感谢!此外,对审稿专家和编辑部提出的宝贵意见和建议深表感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “*” is in Chinese without English abstract)

常雪生,魏贤峰,赵永勋. 2013. 新疆青河顿巴斯套金矿地质特征及控矿因素浅析. 新疆地质,31(S1):128~132.

陈伟志,顾雪祥,章永梅,何格,黄岗,李静婷. 2019. 新疆东准噶尔金水泉金矿床地质特征、成矿时代及其地质意义. 地质通报,38(7):1240~1255.

陈晓玫. 2014. 新疆准噶尔盆地东北部蛇绿岩带研究综述. 山西煤炭管理干部学院学报,27(3):42~44.

陈衍景,富士谷,吴德华,吴锡丹,靖军. 1995. 新疆北部金矿化与碰撞造山作用的耦合及金等矿床的分布规律. 黄金地质,1(3):8~

- 16.
- 陈衍景,刘丛强. 2001. 试论中国陆相油气侧向源——碰撞造山成岩成矿模式的拓展和运用. 地质论评, 47(3): 261~271.
- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力. 中国地质, 33(6): 1181~1196.
- 陈衍景,倪培,范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征. 岩石学报, 23(9): 2085~2108.
- 陈衍景,翟明国,蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. 岩石学报, 25(11): 2695~2726.
- 陈衍景. 2010. 初论浅成作用和热液矿床成因分类. 地学前缘, 17(2): 27~34.
- 陈衍景. 2013. 大陆碰撞成矿理论的创建及应用. 岩石学报, 29(1): 1~17.
- 丁嘉鑫, 韩申, 黄柏诚, 吴艳爽, 张博, 肖飞, 王永. 2019. 西准噶尔地区造山型金矿床时空分布、成矿动力学背景及模式. 地质论评, 65(6): 143~165.
- 董连慧, 徐兴旺, 屈迅, 李光明. 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.
- 董永观, 朱绍华, 芮行健, 廖永璋. 1994. 新疆萨尔布拉克金矿床地球化学及矿床成因. 火山地质与矿产, 15(4): 21~34.
- 丰成友, 张德全, 李大新, 余宏全. 2003. 青海东昆仑造山型金矿床、铅同位素地球化学. 地球学报, 24(6): 593~598.
- 高荣新. 2002. 青河县札克特金矿地质特征及成因探讨. 新疆有色金属, 25(1): 5~7.
- 葛林林, 章永梅, 顾雪祥, 陈志伟, 徐劲驰, 武若晨, 黄岗. 2018. 新疆东准噶尔南明水金矿床成矿流体特征: 流体包裹体及氢氧同位素证据. 现代地质, 32(5): 28~42.
- 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): 13~16.
- 何国琦, 李茂松, 贾进斗, 周辉. 2001. 论新疆东准噶尔蛇绿岩的时代及其意义. 北京大学学报(自然科学版), 37(6): 852~858.
- 何国琦, 刘建波, 张越迁, 徐新. 2007. 准噶尔盆地西缘克拉玛依早古生代蛇绿混杂岩带的厘定. 岩石学报, 23(7): 1573~1576.
- 李高峰, 张丽婷. 2015. 新疆东准噶尔琼河坝地区早古生代斑岩矿床的发现及意义. 地质论评, 61(supp): 329~330.
- 李欢. 2018. 新疆东准噶尔顿巴斯套及邻区古生代金的成矿模式与找矿模型. 导师: 魏俊浩. 武汉: 中国地质大学博士学位论文; 1~176.
- 李建军, 王莉丽, 王旭, 陈炜华. 2017. 新疆奇台地区双泉金矿床矿体特征. 陕西地质, 35(2): 40~47.
- 李建军, 韩张雄, 刘强, 陈炜华. 2018. 新疆富蕴县金水泉金矿地质特征和矿床成因规律分析. 陕西地质, 36(2): 62~67.
- 李锦铁, 肖序常, 汤耀庆, 赵民, 朱宝清, 冯益民. 1990. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征. 地质论评, 36(4): 305~316.
- 李锦铁. 1991. 试论新疆东准噶尔早古生代岩石圈板块构造演化. 中国地质科学院院报, 12(23): 1~12.
- 李锦铁. 1995. 新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史. 岩石学报, 11(s1): 73~84.
- 李晶, 陈衍景, 刘迎新. 2004. 华北克拉通若干脉状金矿的黄铁矿标型特征与流体成矿过程. 矿物岩石, 24(3): 93~102.
- 李振生, 聂峰, 田晓莉, 石永红, 牛浩, 王创. 2016. 东准噶尔构造带晚古生代地层时代的厘定及其对区域构造演化意义. 地质学报, 90(3): 569~588.
- 廖启林, 戴塔根. 1999. 布尔根韧性剪切带金矿找矿前景. 桂林理工大学学报, 19(2): 95~100.
- 廖启林, 戴塔根. 2000. 新疆北部浅成低温热液型金矿床成矿地球化学特征初探. 地质地球化学, 28(2): 19~25.
- 刘洪, 李光明, 黄瀚霄, 肖万峰, 闫国强, 马东方, 张海, 张红. 2018. 藏北商旭造山型金矿床成矿物质来源探讨: C、S、Pb 同位素证据. 地质论评, 64(5): 1285~1301.
- 刘一浩, 薛春纪, 赵云, 赵晓波, 褚海霞, 刘城先, 余亮, 王璐, 吴得海. 2020. 我国热液金矿中黄铁矿的载金性研究. 现代地质, 34(1): 1~12.
- 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. 导师: 张世红. 北京: 中国地质大学博士论文; 1~111.
- 罗镇宽. 1984. 金矿床中碳质的来源及其在成矿过程中的作用. 黄金, 5(1): 22~24.
- 毛亮. 2017. 新疆青河县顿巴斯套金矿地质特征. 世界有色金属, (6): 176~177.
- 梅厚钧, 杨学昌, 王俊达, 于学元, 刘铁庚, 白正华. 1993. 额尔齐斯河南侧晚古生代火山岩的微量元素地球化学与构造环境的变迁史. 见: 涂光炽. 主编. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社; 199~216.
- 彭剑刚. 2017. 新疆奇台县苏吉泉金矿成矿地质条件与控矿因素分析. 中国金属通报, (11): 92~93.
- 沈远超, 杨金中, 刘洪涛, 杨忆. 1998. 新疆北部金矿床的时空分布规律及找矿方向. 大地构造与成矿学, 22(2): 103~110.
- 唐红峰, 屈文俊, 苏玉平, 侯广顺, 杜安道, 丛峰. 2007. 新疆萨惹什克锡矿与萨北碱性 A 型花岗岩成因关系的年代学制约. 岩石学报, 23(8): 1989~1997.
- 田红彪, 弓小平, 韩琼, 宋相龙. 2013. 奇台双泉金矿成矿模式研究. 新疆地质, 31(3): 196~200.
- 汪在聪, 刘建明, 刘红涛, 曾庆栋, 张松, 王永彬. 2010. 稳定同位素热液来源示踪的复杂性和多解性评述——以造山型金矿为例. 岩石矿物学杂志, 29(5): 577~590.
- 王军, 李廷栋, 耿树方, 聂凤军. 2010. 新疆东准噶尔地区斑岩铜矿地质特征与成因. 地球学报, 31(3): 423~433.
- 王军升, 邓吉牛. 1999. 科克萨依金矿地质特征及矿床成因分析. 有色金属矿产与勘查, 8(6): 530~535.
- 王莉娟, 王京彬, 王玉往, 朱和平. 2006. 新疆准噶尔—东天山地区产于韧性剪切带中的金矿床成矿流体与碳、硫、铅同位素. 地质论评, 52(4): 486~493.
- 王莉娟, 王京彬, 王玉往, 朱和平. 2008. 新疆北部准噶尔—东天山地区金矿床成矿流体主要特征. 岩石学报, 24(4): 753~761.
- 王燕海. 2010. 额尔齐斯成矿带萨尔布拉克金矿床的构造—成矿流体. 导师: 徐九华, 丁汝福. 北京: 北京科技大学硕士学位论文; 1~71.
- 王颖维. 2018. 新疆额尔齐斯成矿带金矿床成矿规律与成矿模式研究. 导师: 徐九华. 北京: 北京科技大学博士学位论文; 1~174.
- 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(s1): 65~67.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 龙灵利, 唐萍芝, 廖震, 张会琼. 2011. 新疆吐尔库班套蛇绿混杂岩的发现及其地质意义. 地学前缘, 18(3): 151~165.
- 吴波, 何国琦, 吴泰然, 李会军, 罗红玲. 2006. 新疆布尔根蛇绿混杂岩的发现及其大地构造意义. 中国地质, 33(3): 476~486.
- 肖飞, 李欢, 夏芳, 魏清峰, 贺小平, 魏贤峰. 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.
- 肖惠良, 董永观, 王鹤年, 周济元, 芮行健. 2002. 新疆马热勒铁金矿床特征及其流体成矿作用. 资源调查与环境, 23(2): 130~139.
- 徐斌, 路彦明, 顾雪祥, 章文忠. 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.
- 徐新, 何国琦, 李华芹, 丁天府, 刘兴义, 梅绍武. 2006. 克拉玛依蛇绿混杂岩带的基本特征和锆石 SHRIMP 年龄信息. 中国地质, 33

(3):470~475.

陈志华,尹继元,陈文,李大鹏,孙敬博,喻顺,杜秋怡,吴春燕. 2019. 新疆东准噶尔东北部晚泥盆世 I-型花岗岩年代学、地球化学及构造意义. 地质学报, 93(11): 2797~2812.

严加永,孟贵祥,杨岳清,邓震,赵金花,汤贺军. 2017. 新疆东准噶尔伊克勒克岩浆砂卡岩型富铜—铁矿的发现及其成矿特征. 地质论评, 63(2): 413~426.

闫升好,滕荣丽,王义天,陈文,张招崇,陈柏林. 2006. 新疆布尔根含金剪切带的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其地质意义. 中国地质, 33(3): 648~655.

杨富全,毛景文,闫升好. 2008. 新疆东准噶尔贝勒库都克锡矿床成矿时代及成矿作用. 地质论评, 54(5): 52~66.

张德全,丰成友,李大新,徐文艺,阎升好,余宏全,董英君,崔艳合. 2001. 柴北缘—东昆仑地区的造山型金矿床. 矿床地质, 20(2): 137~146.

张德全,张慧,丰成友,余宏全,李进文,李大新. 2007. 柴北缘—东昆仑地区造山型金矿床的流体包裹体研究. 中国地质, 34(5): 843~854.

张栋,路彦明,郭小东,范俊杰,潘爱军,张玉杰,朝银银. 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.

张栋,路彦明,葛良胜,王治华,李波,范俊杰,张玉杰. 2015. 东准噶尔卡拉麦里地区金铜多金属成矿系统和地球动力学. 地质论评, 61(4): 797~816.

赵海滨,李杰美,田红彪,韦定君,朝银银. 2013. 韧—脆性剪切带对新疆金水泉金矿床的控制作用. 黄金, 34(7): 13~18.

赵俊伟. 2008. 青海东昆仑造山带造山型金矿床成矿系列研究. 导师: 孙丰月. 吉林: 吉林大学博士学位论文: 1~189.

周刚. 2007. 新疆阿尔泰玛因鄂博断裂带两侧后碰撞花岗岩类的年代学、岩石学和地球化学研究. 导师: 张招崇. 北京: 中国地质科学院博士学位论文: 1~158.

朱少华. 2016. 新疆东准噶尔南明水东金矿区金矿地质特征及成因研究. 导师: 刘建朝,刘凤明. 西安: 长安大学硕士学位论文: 1~97.

Arbaoui A E, Bouabdellah M, Wafik A, Klügel A, Jébrak M, Castorina F, Lowry D, Lecumberri-Sanchez P, Essaifi A, Maacha L. 2019. The Roc Blanc orogenic Pb—Zn—Ag—Au deposit (Morocco): a product of metamorphic dehydration and CO₂ devolatilization during exhumation of the Variscan Jebilet massif. Mineralium Deposita, 54(3): 437~458.

Böhlke J K. 1982. Orogenic (metamorphic-hosted) gold—quartz veins. US Geological Survey Open-File Report, 82~795: 70~76.

Chang Xuesheng, Wei Xianfeng, Zhao Yongxun. 2013. Analysis on the geological feature and ore-controlling factors of Dunbasitao gold deposit in Qinhe county, Xinjiang. Xinjiang Geology, 31(s1): 128~132.

Chen Weizhi, Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, He Ge, Huang Gang, Li Jingting. 2019. Geological features and geochronology of the Jinshuiquan gold deposit in the east Junggar, Xinjiang. Geological Bulletin of China, 38(7): 1240~1255.

Chen Xiaomei. 2014. A research review of ophiolite belts in northeastern Junggar Basin, Xinjiang. Journal of Shanxi Coal-Mining Administrators College, 27(3): 42~43.

Chen Yanjing, Fu Shigu, Wu Dehua, Wu Xidan, Jing Jun. 1995. The coupling of the gold mineralization with the collision orogenesis and the distribution of the gold deposits, northern Xinjiang. Gold Geology, 1(3): 8~16.

Chen Yanjing, Liu Congqiang. 2001. The lateral source of the continental oil and gas of China: Extension and application of the CPMF Model. Geological Review, 47(3): 261~271.

Chen Yanjing. 2006. Orogenic-type and their metallogenic model and exploration potential. Geology In China, 33(6): 1181~1196.

Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, Pirajno F, Lai Yong, Su Wenchao, Zhang Hui. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. Acta Petrologica Sinica, 23(9): 2085~2108.

Chen Yanjing, Zhai Mingguo, Jiang Shaoyong. 2009. Significant achievement and open issue in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent. Acta Petrologica Sinica, 25(11): 2695~2726.

Chen Yanjing. 2010. On epizonogenism and genetic classification of hydrothermal deposits. Earth Science Frontiers, 17(2): 27~34.

Ding Jiaxin, Han Shen, Huang Bochong, Wu Yanshuang, Zhang Bo, Xiao Fei, Wang Yong. 2019. The orogenic gold deposits in Western Junggar, NW China: Geochronological framework, spatial distribution and tectonic implication. Geological Review, 65(6): 143~165.

Dong Lianhui, Xu Xingwang, Qu Xun, Li Guangming. 2009. Tectonic setting and formation mechanism of the circum-Junggar porphyritic copper deposit belts. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 713~737.

Dong Yongguan, Zhu Shaohua, Rui Xingjian, Liao Yongzhang. 1994. The ore-forming geochemistry and genesis of Salbulak gold deposit, Xinjiang. Volcanology & mineral resources, 15(4): 21~34.

Feng Chengyou, Zhang Dequan, Li Daxin, She Hongquan. 2003. Sulfur and lead isotope geochemistry of the orogenic gold deposits in east Kunlun area, Qinghai province. Acta Geoscientica Sinica, 24(6): 593~598.

Gao Rongxin. 2002. Geological characteristics and genesis of Zhaketie gold deposit in Qinghe county. Xinjiang Nonferrous Metal, 25(1): 5~7.

Gao Shen, Xu Hong, Quan Shaolong, Zang Yanqing, Wang Ting. 2018. Geology, hydrothermal fluids, H—O—S—Pb isotopes, and Rb-Sr geochronology of the Daxintun orogenic gold deposit in Heilongjiang province, NE China. Ore Geology Reviews, 92: 569~587.

Ge Zhanlin, Zhang Yongmei, Gu Xuexiang, Chen Zhiwei, Xu Jingchi, Wu Ruochen, Huang Gang. 2018. Characteristics of ore-forming fluids of the Nanmingshui gold deposit in the east Junggar, Xinjiang: Evidences from fluid inclusions and H-O isotopes. Geoscience, 32(5): 28~42.

Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. Ore Geology Reviews, 18(1~2): 1~75.

Goldfarb R J, Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique?. Geoscience Frontiers, 5(2): 139~153.

Goldfarb R J, Groves D I. 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. Lithos, 233: 2~26.

Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G, Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore Geology Reviews, 13(1~5): 7~27.

Groves D I, Santosh M. 2015. Province-scale commonalities of some world-class gold deposits: Implications for mineral exploration. Geoscience Frontiers, 6(3): 389~399.

Groves D I, Santosh M, Deng Jun, Wang Qingfei, Yang Liqiang, Zhang Liang. 2020. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. Mineralium Deposita, 55(2): 275~292.

Guo Haitang. 2013. Genesis and prospecting indicators of Dunbasitao gold deposit in Qinghe county, Xinjiang. Xinjiang Nonferrous Metal, 36(6): 13~16.

- He Guoqi, Li Maosong, Jia Jindou, Zhou Hui. 2001&. A discussion on age and tectonic of ophiolite in eastern Junggar, Xinjiang. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 37 (6): 852 ~ 858.
- He Guoqi, Liu Jianbo, Zhang Yueqian, Xu Xin. 2007&. Keramay ophiolitic mélange formed early paleozoic in western Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1573~1576.
- Kerrick R, Goldfarb R J, Groves D I, Garwin S, Jia Yiefei. 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China (Series D)*, 43(s1): 1~68.
- Li Gaofeng, Zhang Liting. 2015#. Discovery and significance of the Early Paleozoic porphyry deposits in Qionghaba area, East Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 61(Supp): 329~330.
- Li Huan. 2018&. The metallogenic and prospecting model of Paleozoic gold deposits in the Dunbasitao and adjacent area, East Junggar, Xinjiang province. Tutor: Wei Junhao. Wuhan: Doctoral dissertation of China University of Geosciences: 1~176.
- Li Jianjun, Wang Lili, Wang Xu, Chen Weihua. 2017&. Geology and occurrences of gold ore bodies in the Shuangquan gold deposit in Xinjiang. *Geology of Shanxi*, 35(2): 40~47.
- Li Jianjun, Han Zhangxiong, Liu Qiang, Chen Weihua. 2018&. Geology and genesis of Jinshuiquan gold ore deposit in Fuyun county of Xinjiang. *Geology of Shanxi*, 36(2): 62~67.
- Li Jing, Chen Yanjing, Liu Yingxin. 2004&. Typomorphic characteristic of pyrite the lode gold deposit in north China carton: implications for fluid mineralization. *Mineral Petrol*, 24(3): 93~102.
- Li Jinyi, Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Zhao Min, Zhu Baoqing, Feng Yimin. 1990&. Main characteristics of Late Paleozoic plate tectonics in the southern part of east Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 36(4): 305~316.
- Li Jinyi. 1991&. Early paleozoic evolution of lithosphere plate, east Junggar, Xinjiang. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Science*, 12(23): 1~12.
- Li Jinyi, 1995&. Main characteristics and emplacement process of the east Junggar ophiolites, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 11(s1): 73~84.
- Li Nan, Yang Liqiang, Groves D I, Li Haixian, Liu Xingwu, Liu Ji, Ye Ying, Li Hongrui, Liu Chunxian, Yin Chao. 2020. Tectonic and district to deposit-scale structural controls on the Ge'erke orogenic gold deposit within the Dashui—Zhongqu District, West Qinling Belt, China. *Ore Geology Reviews*, 120: 103436.
- Li Rucao, Chen Huayong, Large R R, Zhao Liandang, Liu Yunhua, Jiao Jiangang, Xia Xiaoping, Yang Qing. 2020. Ore-forming fluid source of the orogenic gold deposit: Implications from a combined pyrite texture and geochemistry study. *Chemical Geology*, 552: 119781.
- Li Zhensheng, Nie Feng, Tian Xiaoli, Shi Yonghong, Niu Hao, Wang Chuang. 2016&. Redefinition of formation age of Late Paleozoic strata in the eastern Junggar tectonic zone and its implications for evolution of regional geological structure. *Acta Geologica Sinica*, 90(3): 569~588.
- Liang Pei, Chen Huayong, Wu Chao, Zhang Weifeng, Xu Deru, Xia Xiaoping, Liu Zhenjiang, Zhang Zengjie. 2018. Mineralization and ore genesis of the Qiaoxiahala Fe—Cu—(Au) deposit in the northern margin of East Junggar terrane, Central Asian Orogenic Belt: Constraints from fluid inclusions and stable isotopes. *Ore Geology Reviews*, 100: 360~384.
- Liao Qilin, Dai Tagen. 1999&. On prospect of gold deposit in Buergen ductile shear zone. *Journal of Guilin Institution of Technology*, 19(2): 95~100.
- Liao Qilin, Dai Tagen. 2000&. A preliminary analysis on metallogeno—geochemical characteristics of epithermal gold deposit northern Xinjiang. *Geology Geochemistry*, 28(2): 19~25.
- Liu Hong, Li Guangming, Huang Hanxiao, Xiao Wanfeng, Yan Guoqiang, Ma Dongfang, Zhang Hai, Zhang Hong. 2018&. Sources of Ore-forming materials in the Shangxu orogenic gold deposit, northern Xizang (Tibet): constraints from C, S and Pb isotopes. *Geological Review*, 64(5): 1285~1301.
- Liu Yihao, Xue Chunji, Zhao Yun, Zhao Xiaobo, Chu Haixia, Liu Chengxian, Yu Liang, Wang Lu, Wu Dehai. 2020&. Research on auriferous pyrite in hydrothermal gold deposits, China. *Geoscience*, 34(1): 1~12.
- Lu Yanming. 2008&. Structural control and prospecting of the gold deposit in Shuangquan area, eastern Jungger, Xinjiang province. Tutor: Zhang Shihong. Beijing: Doctoral Dissertation of China University of Geoscience: 1~111.
- Luo Zhenkuan. 1984#. The origin of carbon in gold deposits and its role in metallogenic process. *Gold*, 5(1): 22~24.
- Mao Liang. 2017&. Geological characteristics of Dunbasitao gold deposit, Qinghe county, Xinjiang. *World Nonferrous Metals*, (6): 176~177.
- Mei Houjun, Yang Xuechang, Wang Junda, Yu Xueyuan, Liu Tiegeng, Bai Zhenghua. 1993. The trace element geochemistry of Late Paleozoic volcanic rocks on the south side of the Ertix River and the evolution of tectonic environmental history. In: Tu Guangzhi. Editor. *New Advances in Solid Earth Science in Northern Xinjiang*. Beijing: Science Press: 199~216.
- Peng Jiangang. 2017#. Analysis of metallogenic geological conditions and ore-controlling factors of Sujiquan gold deposit in Qitai county, Xinjiang. *China Metal Bulletin*, (11): 92~93.
- Shen Yuanchao, Yang Jinzhong, Liu Hongtao, Yang Yi. 1998&. The regularity and exploratory direction of gold deposit in the north part of Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 22(2): 103~110.
- Tang Hongfeng, Qu Wenjun, Su Yuping, Hou Guangshun, Du Andao, Cong Feng. 2007&. Genetic connection of Sareshike tin deposit with alkaline A-type granites of Sabei body in Xinjiang: constraint from isotopic ages. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1989~1997.
- Tian Hongbiao, Gong Xiaoping, Han Qiong, Song Xianglong. 2013&. Study on the metallogenic model of Shuangquan gold deposit in Qitai. *Xinjiang Geology*, 31(3): 196~200.
- Wang Jun, Li Tingdong, Geng Shufang, Nie Fengjun. 2010&. Geological characteristics and genesis of porphyry copper deposits in east Junggar region. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(3): 423~433.
- Wang Junsheng, Deng Jiniu. 1999&. Geology and Metallogenesis of the Kekeshayi gold deposit in Xinjiang. *Geological Exploration for Nonferrous Metals*, 8(6): 530~535.
- Wang Lijuan, Wang Jingbin, Wang Yuwang, Zhu Heping. 2006&. Ore-forming fluids and carbon, sulphur and lead isotope studied on ductile-shear-zone-type gold deposits in Junggar—East Tianshan Mts. Area, Xinjiang. *Geological Review*, 52(4): 486~493.
- Wang Lijuan, Wang Jingbin, Wang Yuwang, Zhu Heping. 2008&. The characteristics of ore-fluid of gold deposit in Junggar—East Tianshan Mountain area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 753~761.
- Wang Yanhai. 2010&. Tectonic—mineralizing fluids in the Saerbulake gold deposit, Erqis metallogenic belt, Xinjiang. Tutor: Xu Jiuhua, Ding Rufu. Beijing: Master's dissertation of University of Science and Technology Beijing: 1~71.
- Wang Yingwei. 2018&. Study on metallogenic regularity and

- metalogenic model of gold deposit in the Ertix metallogenic belt, Xinjiang. Tutor: Xu Jiuhua. Beijing: Doctoral Dissertation of University of Science and Technology Beijing: 1~174.
- Wang Yong. 2013#. Relationship between Dunbasitao gold deposit and faults in the area, Qinghe county, Xinjiang. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 36(s1): 65~67.
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan, Long Lingli, Tang Pingzhi, Liao Zhen, Zhang Huiqiong. 2011#. Discovery of Tuerkubantao ophiolitic mélange in Xinjiang and its significance. *Earth Science Frontier*, 18(3): 151~165.
- Wang Zaicong, Liu Jianming, Liu Hongtao, Zeng Qingdong, Zhang Song, Wang Yongbin. 2010#. Complexity and uncertainty of tracing fluid sources by means of H, O, C, S, N isotope systems: a case study of orogenic lode gold deposits. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(5): 577~590.
- Wu Bo, He Guoqi, Wu Tairan, Li Huijun, Luo Hongling. 2006#. Discovery of the Buergen ophiolitic mélange belt in Xinjiang and its tectonics significance. *Geology China*, 33(3): 476~486.
- Wu Chao, Chen Huayong, Liang Pei, Han Jinshen, Liu Zhenjiang, Fang Jing, Xu Deru. 2018. Paragenesis and fluid evolution of the Halasu III porphyry Cu deposit, East Junggar (NW China): Implications for the Paleozoic multiphase superimposing mineralization in the Central Asian Orogenic Belt. *Ore Geology Reviews*, 100: 183~204.
- Xiao Fei, Li Huan, Xia Fang, Wei Qingfeng, He Xiaoping, Wei Xianfeng. 2014#. Analysis on geological characteristics and metallogenic condition of Dunbasitao gold deposit, Qinghe county, Xinjiang province. *Gold*, 35(1): 11~17.
- Xiao Huiliang, Dong Yongguan, Wang Henian, Zhou Jiyuan, Rui xingjian. 2002#. Fluid mineralization and characteristics of the Mareletie gold deposit in Xinjiang. *Resources Survey & Environment*, 23(2): 130~139.
- Xu Bin, Lu Yanming, Gu Xuexiang, Zhang Wenzhong. 2009#. Metallogenic epoch of the Shuangquan gold deposit in Qitai area, Xinjian, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1871~1884.
- Xu Xin, He Guoqi, Li Huaqin, Ding Tianfu, Liu Xingyi, Mei Shaowu. 2006#. Basic characteristics of the Karamay ophiolitic mélange, Xinjian, and its zircon SHRIMP dating. *Geology in China*, 33(3): 470~475.
- Xu Zhihua, Yin Jiyuan, Chen Wen, Li Dapeng, Sun Jingbo, Yu Shun, Du Qiuyi, Wu Chunyan. 2019#. Chronology, geochemistry of Late Devonian I-type granite in the northeast of eastern Junggar, Xinjiang and their tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 93(11): 2797~2812.
- Yan Jiayong, Meng Guixiang, Yang Yueqing, Deng Zhen, Zhao Jinhua, Tang Hejun. 2017#. Discovery and Metallogenic Characteristics of Layikeleke Magmatic Skarn Type of Rich Copper—Iron Deposit, Eastern Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 63(2): 413~426.
- Yan Shenghao, Teng Rongli, Wang Yitian, Chen Wen, Zhang Zhaochong, Chen Bolin. 2006#. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Bu'ergen gold-bearing shear zone on the southern margin of the Altay Mountain, Xinjiang. *Geology In China*, 33(3): 648~655.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Yan Shenghao. 2008#. Ore-forming age and ore-formation of the Beilekuduke tin deposit in East Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 54(5): 52~66.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Pirajno F, Yan Shenghao, Liu Guoren, Zhou Gang, Zhang Zhixing, Liu Feng, Geng Xinxia, Guo Chunli. 2012. A review of the geological characteristics and geodynamic setting of Late Paleozoic porphyry copper deposits in the Junggar region, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 80~98.
- Yang Fuquan, Chai Fengmei, Zhang Zhixing, Geng Xinxia, Li Qiang. 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and Sr—Nd—Hf isotopes of granitoids in the Yulekenhalasu copper ore district, northern Junggar, China: Petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 190~191: 85~103.
- Zhang Dequan, Feng Chengyou, Li Daxin, Xu Wenyi, Yan Shenghao, She Hongquan, Dong Yingjun, Cui Yanhe. 2001#. Orogenic gold deposits in the north Qaidam and east Kunlun orogen, west China. *Mineral Deposit*, 20(2): 137~146.
- Zhang Dequan, Zhang Hui, Feng Chengyou, She Hongquan, Li Jinwen, Li Daxin. 2007#. Fluid inclusions in orogenic gold deposits in the northern Qaidam margin—East Kunlun region. *Geology In China*, 34(5): 843~854.
- Zhang Dong, Lu Yanming, Guo Xiaodong, Fan Junjie, Pan Aijun, Zhang Yujie, Zhao Yinyin. 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.
- Zhang Dong, Lu Yanming, Ge Liangsheng, 2015#. Metallogenic systems of polymetallic gold and copper deposits and related metallogenic geodynamic model in Karamaili of eastern Junggar, Xinjiang. *Geology Review*, 61(4): 797~816.
- Zhang Li, Zheng Yi, Chen Yanjing. 2012. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tiemurt Pb—Zn—Cu deposit, Altay, Xinjiang, China: A case study of orogenic-type Pb—Zn systems. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 69~79.
- Zhang Liang, Yang Liqiang, Weinberg R F, Groves D I, Wang Zhongliang, Li Guangwei, Liu Yue, Zhang Chao, Wang Zhaokun. 2019. Anatomy of a world-class epizonal orogenic-gold system: A holistic thermochronological analysis of the Xincheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China. *Gondwana Research*, 70: 50~70.
- Zhao Haibin, Li Jiemei, Tian Hongbiao, Wei Dingjun, Zhao Yinyin. 2013#. Ore-controlling ductile—brittle shear zone in Jinshuiquan gold deposit in Xinjiang. *Gold*, 34(7): 13~18.
- Zhao Junwei. 2008#. Study on orogenic gold metallogenic series in eastern Lulun orogenic belt, Qinghai province. Tutor: Sun Fengyue. Jinlin: Doctoral dissertation of Jilin University: 1~189.
- Zhou Gang. 2007#. Geochronology, petrology and geochemistry of the post-collisional granites along the Mayinebo fault zone, Altay, Xinjiang. Tutor: Zhang Zhaochong. Beijing: Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences: 1~158.
- Zhou Zhenju, Chen Yanjing, Jiang Shaoyong, Zhao Haixiang, Qin Yan, Hu Chunjie. 2014. Geology, geochemistry and ore genesis of the Wenyu gold deposit, Xiaoqinling gold field, Qinling Orogen, southern margin of North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 59: 1~20.
- Zhu Shaohua. 2016#. The rare metals metallogenesis and ore prospecting potential in KeKetuoahai area, Xinjiang, China. Tutor: Liu Jianchao, Liu Suming. Xi'an: Master's Dissertation of Chang'an University: 1~97.

Geological characteristics and genesis of Dunbastau gold deposit in eastern Junggar, Xinjiang

LIU Wenxiang¹⁾, DENG Xiaohua²⁾, WU Yanshuang³⁾, HAN Shen¹⁾, CHEN Xi³⁾,

LI Xun¹⁾, WANG Yong⁴⁾, CHEN Yanjing^{1, 3)}

1) *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution of Ministry of Education, Peking University, Beijing, 100871;*

2) *Beijing Institute of Mineral Geology Co., Ltd, Beijing, 100871*

3) *Xinjiang Mineral Resources Research Center, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, 830011*

4) *Western Region Gold Co., Ltd. Urumqi, 830002*

Objectives: Erqis, Armantai, and Kalamaili are three major tectonic belts developed from north to south in the eastern Junggar area of Xinjiang. A large number of orogenic gold deposits have been discovered in the Erqis and Kalamaili belts. Although Armantai tectonic belt has a similar metallogenic background with the north and south tectonic belts, no orogenic gold deposit is reported. Given this problem, we focus on the most important gold deposit in this tectonic belt, the Dunbastau gold deposit.

Methods: In this paper, detailed field investigation and microscopic observation are conducted to provide petrography, mineralography, and structural evidences.

Results: The Dunbastau gold deposit's metallogenic process can be divided into three periods: ①The sedimentary period characterized by framboidal pyrites; ②The diagenesis period characterized by compaction, nodule-formation, and recrystallization of pyrites; ③The hydrothermal period characterized by hydrothermal veins production and gold mineralization. The hydrothermal period is further divided into two stages: the ankerite—quartz—pyrite stage accompanied by brittle—ductile deformation and the quartz—albite—calcite stage with the transition from brittle—ductile to brittle deformation. Pyrites can be divided into six generations. Arsenopyrite can be divided into three generations. ①Py1 is of sedimentary origin, with particular structures such as framboidal and colloid; ②Py2 was formed by diagenesis and distributed stratification consistently. Py2 often show recrystallization or nodule-like shape and other characteristics; ③Hydrothermal Apy1, from subhedral to euhedral, with a grain size of 50~100 μm , often paragenesis with gold; ④Hydrothermal Apy2 are euhedral, with a grain size of 300~700 μm ; ⑤Hydrothermal Py3 are anhedral to euhedral, with a grain size of 50~150 μm , characterized by inclusions and pores internally; ⑥Hydrothermal Py4 are subhedral to euhedral, with a grain size of 150~300 μm , characterized by inclusions, few pores, and developing pressure shadow; ⑦Hydrothermal Py5 are characterized by high brightness under backscattering and rich in As significantly; ⑧Hydrothermal Apy3 are coarse-grained, and euhedral shaped, with few inclusions internally, developed cataclastic texture and pressure shadows; ⑨Hydrothermal Py6 are coarse-grained, from subhedral to euhedral, with few inclusions internally, developed cataclastic texture and pressure shadows.

Conclusions: The Dunbastau gold deposit has the “tri-in-one” ore-controlling characteristics: secondary fractures of regional faults, brittle—ductile shear zones, and anticline cores. Among them, the brittle—ductile shear zone with NW—SE strike is the most critical ore-controlling structure. The gold mineralization is significantly later than the host magmatic rock, quartz diorite porphyrite. The geological and geochemical characteristics of the deposit are similar to those typical orogenic gold deposits in the adjacent structural belts. Combined with the nature of ore-forming fluid is medium—low temperature and CO_2 rich, it can be concluded that the Dunbastau gold deposit is a typical orogenic gold deposit. Along with the brittle—ductile deformation process, the grain size of pyrites and arsenopyrites increased orderly, the degree of self-shape gradually improved, while the grade of Au gradually decreased. The precipitation of gold mainly occurred in the brittle—ductile deformation process. In contrast, there was no gold mineralization in the brittle deformation process. The fine-grained, disseminated pyrite and arsenopyrite

alteration and the ankerite alteration of the main metallogenic stage can be used as indicators for prospecting.

Keywords: brittle—ductile deformation; gold mineralization; pyrite; orogenic gold deposit; Dunbastau gold deposit; eastern Junggar

Acknowledgements: This paper was supported by the NSFC—Xinjiang Joint Fund of “Study on Metallogenic Regularity of Orogenic Deposit in Northern Xinjiang” (No. U1803242) and the National Key Research and Development Program of “Deep Earth Resources Exploration and Exploitation” (No. 2017YFC0601203) . The fieldwork got the support of Western Region Gold Co. , Ltd. , got the cooperation and help of 701 team of Xinjiang Uygur Autonomous Region Nonferrous Geological Exploration Bureau, here express heartfelt thanks! Besides, we would like to express our deep appreciation to the reviewers and the editorial department for their valuable comments and suggestions!

First author: LIU Wenxiang, male, born in 1999, doctor student, majors in economic geology; Email: 1801110590@pku.edu.cn

Corresponding author: CHEN Yanjing, male, born in 1962, professor, mainly engages in economic geology. Email: yjchen@pku.edu.cn

Manuscript received on: 2020-09-17; Accepted on: 2021-02-03; Network published on: 2021-02-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.02.* **Edited by:** HUANG Daomao, ZHANG Yuxu

