

东天山中段晚古生代面状剪切带 形成机制与金成矿关系研究

张忠义,肖文进,杨国龙,高军辉

有色金属矿产地质调查中心,北京, 100012



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

内容提要:东天山晚古生代康古尔塔格构造—金矿带的中段南带开展构造控矿研究,为区域金矿定位预测与勘探提供依据。采用区域构造分析和构造解析方法,在雅满苏北部厘定出一类已发生变形改造的大型面状脆韧性—韧性剪切带,构造恢复表明,其形成于晚古生代造山早期向北的分层剪切或低角度逆冲剪切($S_i//S_0$)作用,并作为区域金矿的一级控矿构造而成为俯冲带深源成矿流体向上运移成矿的主通道。在造山过程中递进变形的分层剪切或低角度逆冲剪切晚期、向南北向横向缩短转换阶段,伴随区域抬升和断褶作用,拆离剪切带分支断裂开始成生并向上突破,导致封闭在拆离带内运移的深源含矿流体以断层阀方式分流排泄,成矿流体沿分支断裂向上运移,在断裂上盘或上盘背斜枢纽处的低序次的断裂、破裂中聚集卸载,形成充填石英脉和交代蚀变岩型(造山型)金矿,并有时限为 276.5 ± 2.9 Ma的石英闪长斑岩侵入产出;晚期褶皱、断裂等叠加构造则对矿床(体)破坏、改造及保存起了重要作用。

关键词:东天山;面状剪切带;金矿;晚古生代;控矿机制

造山型金矿(Orogenic gold deposit)指与汇聚板块边缘的造山作用密切相关,受韧—脆性断裂控制的脉型和浸染型金矿床系列(Groves et al., 1998; Goldfarb et al., 2001; Weatherley and Henley, 2013);金矿主要形成于造山过程中的1~2期构造阶段,最终定位在地壳强烈收缩变形而成的造山带中。厘定控矿构造与构造控矿机制、确定成矿构造或成矿构造部位是造山型金矿定位预测与勘探的关键(Groves et al., 2018)。康古尔塔格构造带是东天山晚古生代造山带的重要组成部分,也是东天山重要的金成矿带和具良好远景黄金产区,以发育造山型金矿为特征。前人围绕该构造—成矿带的形成背景机制(Allen et al., 1993;徐兴旺,1996;杨兴科等,1997;1999;Liu Biao et al., 2021; Xiao Wenjiao et al., 2004; Wang Bo et al., 2007)、构造类型和变形特征(徐兴旺,1996;1998;Xu Xingwang, 2003;杨兴科等,1997;1999a;木合塔尔·扎日等,2009;王凯等,2019)、构造及成矿年代学(李华芹等,1998;姬金生等,1996;杨兴科等,1999b;陈文等,2005;张达玉等,2012)、构造与金矿的关系(徐兴旺,1996;王京彬等,2006;王义天等,2006)、成矿机制和矿床成

因(Zhang Lianchang et al., 2003; 2004;张达玉等,2012)、成矿规律和预测(徐兴旺,1996;杨兴科等,1997;2000;王义天等,2006)等方面开展了大量卓有成效的研究工作,取得诸多成果。近几年东天山中段的面上调查工作,为从造山带、特别是康古尔塔格构造带的结构、构造分析入手,继续深化构造控矿机制研究、认识提供了新依据和新的视角资料(张忠义等,2018;2020;2021),且推测构造带东延与甘肃北山地区红石山蛇绿混杂岩带和脆韧性剪切带相连接(方维萱等,2021),康古尔塔格—翠岭—红石山脆韧性剪切带为造山型金成矿带;深化构造金矿带的构造控矿机制研究、确定构造成矿与定位机制,仍是当前和今后一段时间内金矿勘探亟待解决的重要任务和研究课题。但对于造山带内脆韧性剪切带发育规模、内部组构、形成机制,及东西两侧连接与区域构造演化和造山型金成矿关系等,一直是悬而未决的科学问题;本文工作将有助于以上问题、特别是造山带内剪切带组构、形成机制、构造演化和造山型金成矿关系等的解决。

本文结合新的调查和测试资料,采用区域构造分析与重点构造剖析的方法,在康古尔塔格构造带

注:本文为新疆地勘基金资助项目(编号:T14-1-LQ12)及中国地质调查局地质调查二级项目(编号:DD20160011;DD20190011)的成果。

收稿日期:2022-05-09;改回日期:2023-04-23;网络首发:2023-05-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2023.05.015

作者简介:张忠义,男,1969年生,博士,教授级高级工程师,主要从事构造地质学与矿田构造研究等工作;Email:zy_zhang2003@sina.com。

中段南部开展构造控矿研究,厘定控矿剪切构造系统的组构与发育特征,分析、确定金矿的构造成矿与构造定位机制,为区域金矿的定位预测与勘探提供依据。研究认为,早期指向北的俯冲型面状剪切带构成康古尔塔格构造—金矿带南带的一级控矿构造与深源成矿流体运移主通道,大约在 276.5 ± 2.9 Ma 的分层剪切或低角度逆冲剪切向南北向横向缩短转换阶段,于面状拆离带上部或上盘的低级构造系统中定位成矿。

1 地质背景

东天山位于古亚洲洋洋南缘,是中亚增生型造山带的一个重要组成部分。一般认为,东天山古生代造山带是准噶尔地块和塔里木板块的拼合碰撞产物。自北向南,包括大南湖—头苏泉岛弧带、康古尔塔格构造带和阿奇山—牙满苏岛弧带三个构造单元(图 1)。

大南湖—头苏泉岛弧带主要由锆石 U-Pb 年龄为 472.2 ± 2.2 Ma ~ 313 ± 8.5 Ma(苏春乾等,2009;张维峰等,2017)的弧火山—沉积岩及花岗岩组成(Du Long et al., 2019; 龙灵利等,2019; Ao Songjian et al., 2021)。阿奇山—雅满苏岛弧带主要由锆石 U-Pb 年龄集中于 $294 \sim 349.7$ Ma(苏春乾等,2009; 卿兴全等,2015; 郑加行等,2017)的岛弧火山—沉积岩和花岗岩组成(方维萱等,2006a; 2006b; Chen Zhengyu et al., 2019; Liu Biao et al., 2021; 龙灵利等,2019);它们分属准噶尔地块和塔里木板块古生代边缘构造演化生成的复合岛弧或边缘弧。晚古生代康古尔洋向南、北两侧的双向俯冲(Wang Yinhong

et al., 2014; 张忠义等,2018; 舍建忠等,2018; 龙灵利等,2019; Chen Zhengyu et al., 2019; Ao Songjian et al., 2021),导致准噶尔地块和塔里木板块最终于晚石炭世—早中二叠世在东天山拼合碰撞造山,康古尔塔格构造带即为二者的弧—弧碰撞缝合带,南北分别以雅满苏断裂带和康古尔塔格断裂带为界,总体呈中部宽、向两侧收敛变窄的南向凸出的近东西向弧形展布于东天山中部(图 1)。带内主要出露晚古生代造山中形成及卷入的建造、构造—岩石组合,包括具海相复理石或浊流特征的火山—沉积岩系,有下石炭统雅满苏组、上石炭统梧桐窝子组和干墩组等;少量洋壳残片(辉长岩、玄武岩等)和上覆岩系(放射虫硅质岩、碧玉岩、灰岩、砂泥岩等)等;并有较多时限为 $261.0 \sim 298.37$ Ma(李锦轶等,2002; 李永军等,2007; 周涛发等,2010; 陈继平等,2016)的晚古生代中酸性、少量基性—超基性的侵入岩;广泛发育多期次、不同成因的热液石英(网)脉。另外,沿构造带已发现 60 多个规模不等的金矿床(点)呈线状、局部面状集中分布发育,构成东天山最重要的金矿带(图 1)。

康古尔塔格构造带具较复杂的内部组构,包括部分古生代侵入岩在内的岩石普遍卷入时限为 $260.6 \sim 300.0$ Ma(李华芹等,1998; 杨兴科等,1999; 王瑜等,2002; 姬金生等,1996; 陈文等,2005; 2007)的中浅层次(绿片岩变质变形相)韧性—脆韧性剪切变形,先后形成面状和线状二类(期)具明显叠加特征剪切带(张忠义等,2018; 2020);同时发育挤压冲断—褶皱构造。总体呈现为不同构造岩片相互叠置而形成的近东西向大型逆冲推覆构造带。

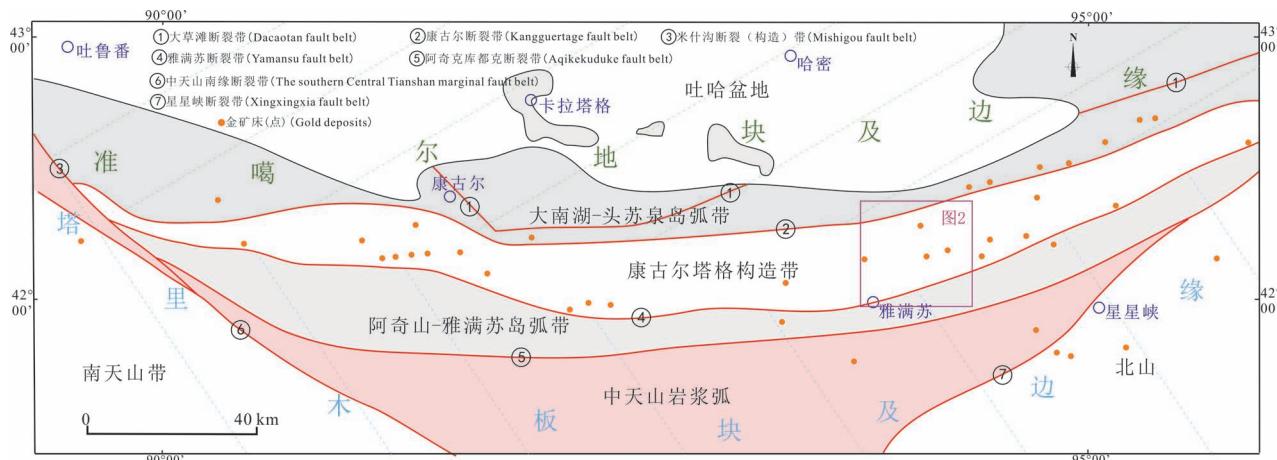


图 1 东天山构造单元与金矿床分布简图(据杨兴科等,1999;王京彬等,2006;龙灵利等,2019)

Fig. 1 Schematic map of tectonics and gold distribution in the Eastern Tianshan orogeny (modified from Yang Xingke et al., 1999&; Wang Jingbin et al., 2006&; Long Lingli et al., 2019&)

研究表明,区域金矿的成矿时代集中于290~244Ma(李华芹等,1995;韩春明等,2002;Zhang Lianchang et al., 2003;张达玉等,2012),成矿作用略晚于或与剪切构造带同步,金矿化类型以热液填充石英脉型为主,次为蚀变岩型;地球化学和流体包裹体研究(姬金生等,1997;张连昌等,2000;薛春纪等,1999;王丽娟等,2008;张达玉等,2012)揭示了金成矿物质主要来源于深部上地幔和下地壳,成矿流体为 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Cl}^-$ 型,变质流体和岩浆流体贡献较大,具有造山型金矿特点。

在靠近构造带中部最宽处的土墩—雅满苏廊带上(图1),康古尔塔格构造带由南北二个褶皱—冲断带组成,它们具相似的结构、组成和构造样式,一起构成明显对称结构特征的对冲型组合样式,而各自内部又被脆韧性—韧性断裂(带)分割或围限成规模不等的次级组构、构造单元(图2,3);它们都具与B型俯冲有关的褶皱—冲断构造的主要特点,揭示了晚古生代洋壳的南北向双向俯冲—碰撞是构造

带的主控构造因素,也是晚古生代造山型金矿的成矿地质背景(张忠义等,2018;2020)。其中南带在平面上包括三个单元(图2,3):①雅满苏断裂带和白石滩断裂所围限的南部单元(I),主要由强劈理和片理化的上洋壳玄武岩和硅质岩、浊积岩相砂泥岩断片组成,岩层连续性较差,少见玄武岩等以岩块状产于砂泥质板片岩基质中的构造—岩石组合或混杂岩面貌,在硅质岩和玄武岩中分别获得 $370 \pm 5.0\text{ Ma} \sim 432 \pm 5.6\text{ Ma}$ 及 $419 \pm 3.2\text{ Ma}$ 的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄(本文)。②以苦水断裂带和白石滩断裂为界的中部单元(II),主要由发育断裂和线性紧密褶皱的雅满苏组海相浊积岩系组成,下部为灰岩、泥岩和砂质泥岩,上部则以砂岩为主,岩层总体连续完整,该单元的苦水断裂带及翠岭南一带,亦见少量玄武岩、硅质岩或二者的岩石组合成断块状冲起产出(图2,3)。③位于冲向北的苦水断裂带下盘的北部单元(III),由发生相对弱的断裂和宽缓—中常褶皱变形的晚石炭世干墩组深海—半深海复理石建造组成,主要为硅质岩和凝灰质砂泥岩;北部单元(III)还构成分属南北二个褶皱—冲断带的苦水断裂带和山口北断裂带的共同下盘(图2)。组成三个单元的岩系具明显的俯冲增生杂岩的构造—岩石组合特征;自南向北取自其中浊积砂岩的碎屑锆石年龄变年轻($384\text{ Ma} \sim 317\text{ Ma}$),认为与古生代洋壳向南俯冲时的增生杂岩向北生长有关(Chen Zhengyu et al., 2019)。另外,构造带的南带还分布有少量中酸性的花岗岩,锆石LA-ICP-MS年龄集中于 $246 \pm 8.9\text{ Ma} \sim 315.6 \pm 5.5\text{ Ma}$ (张忠义等,2021);区域岩系普遍卷入了古生代造山中的绿片岩相变质作用,结合同构造的深成侵入岩出露,推测剥蚀深度为5~10km。区域构造带中部已发现的金矿在北带主要沿康古尔断裂带线性分布,在南带则主

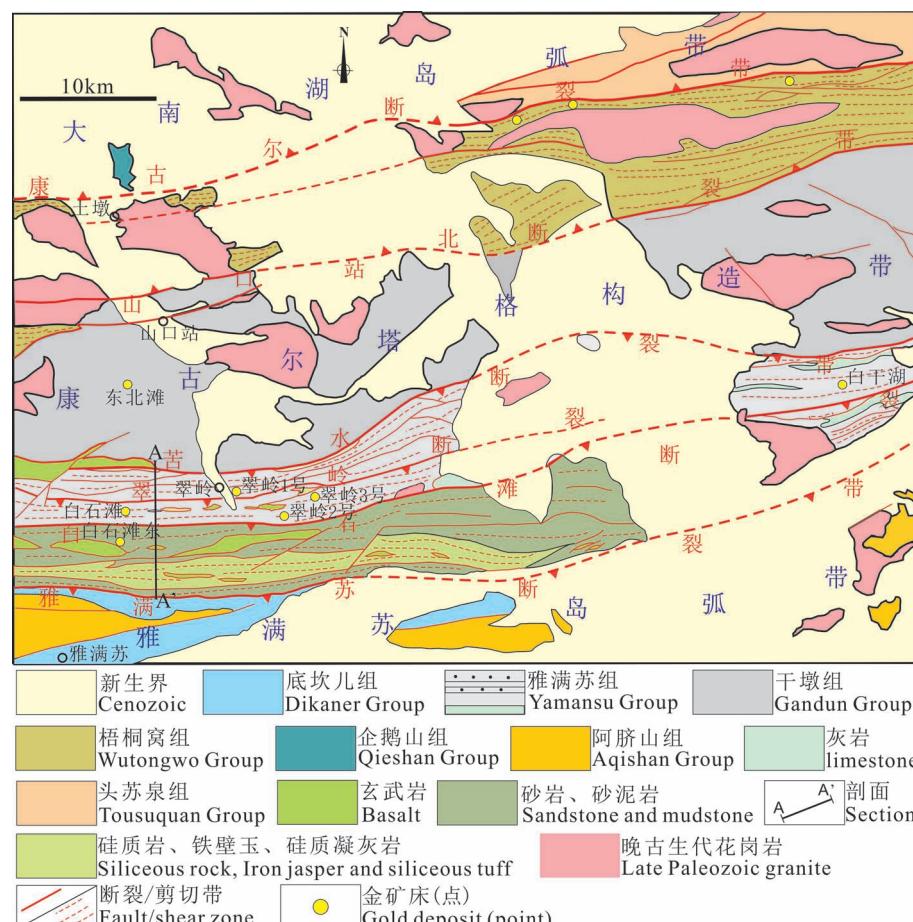


图2 东天山中段土墩—雅满苏地区地质构造图

Fig. 2 Geological and structural map of Tudun—Ymansu areas in the central of Eastern Tianshan Mountains

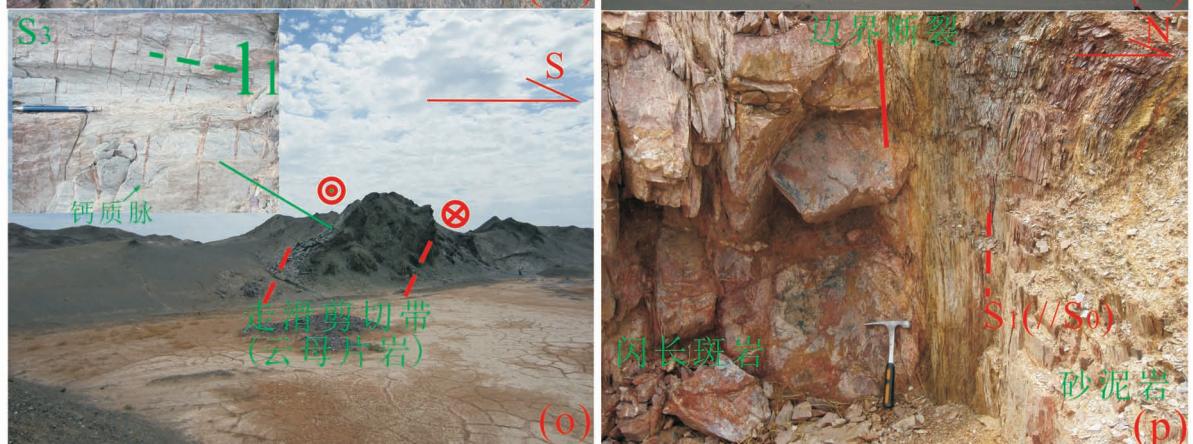
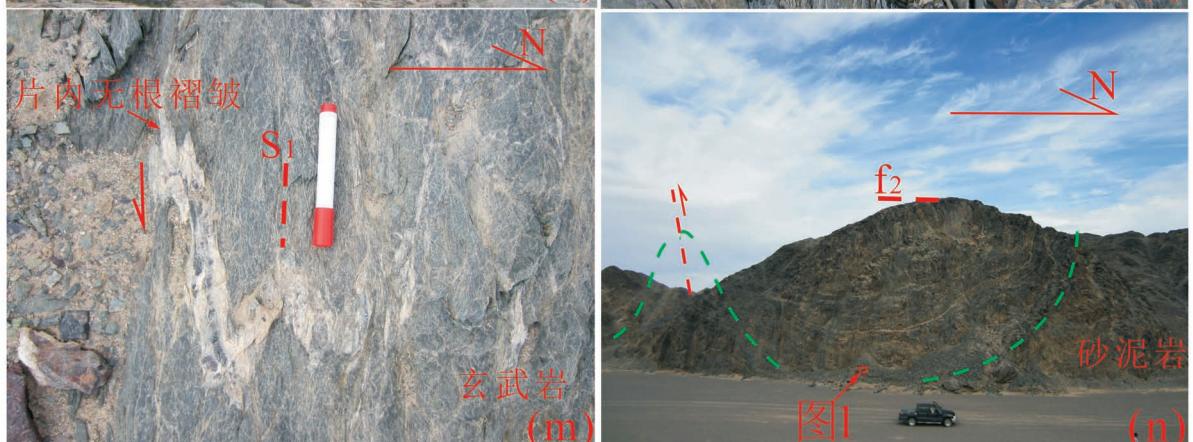
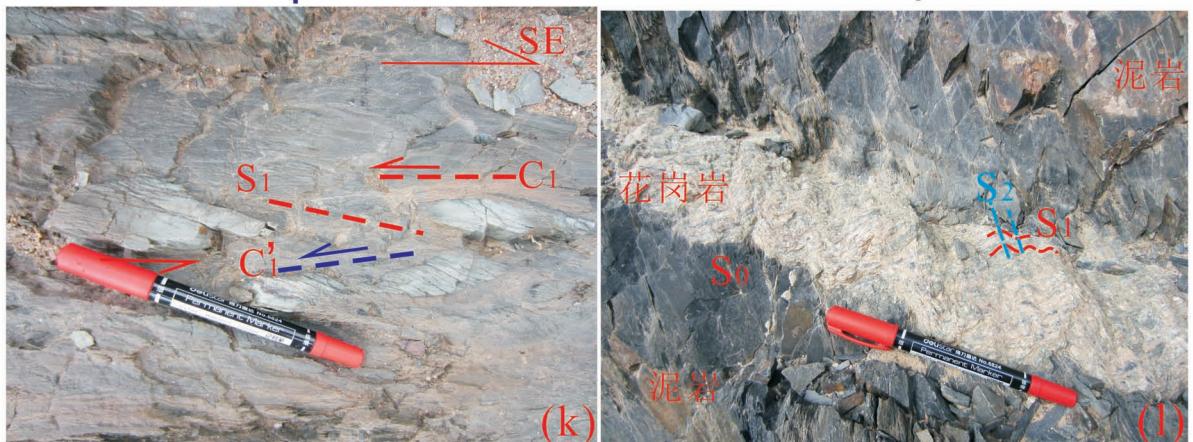
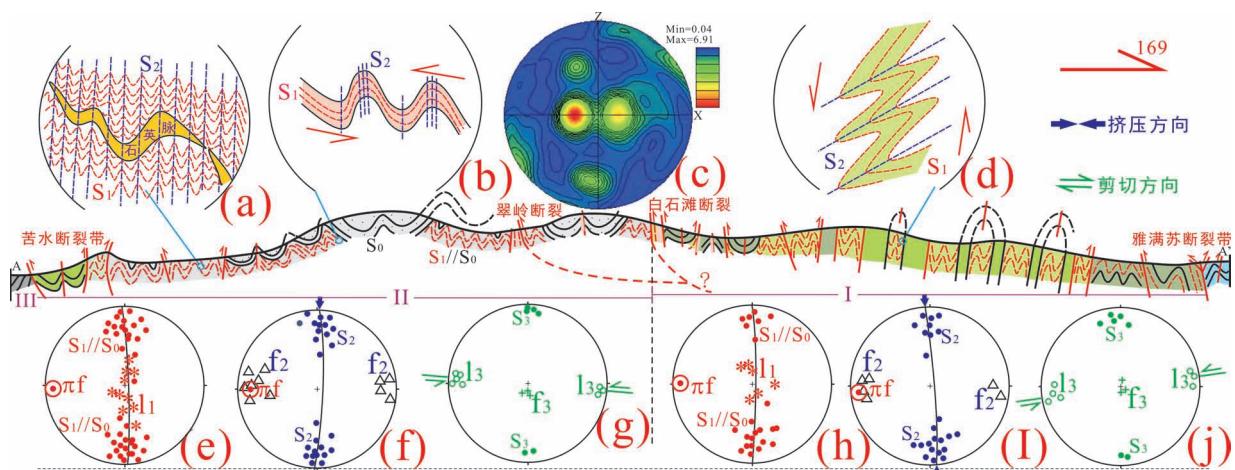


图 3 东天山中段构造剖面(剖面位置见图 2)及构造变形特征(下半球投影)

Fig. 3 Cross-section of the structure (Location of the cross-section trace is in Fig. 2) and structural deformation (Lower hemisphere projections) in the central of Eastern Tianshan Mountains(a) 褶皱的石英细脉;(b) 褶皱的花岗岩侵入体;(c) 糜棱岩化花岗岩中石英晶格优选方位;(d) 硅质砂泥岩中的从属小褶皱;(e)–(j) 构造要素分析图;(k) 砂泥岩中的 S—C(C') 组构;(l) 顺早期剪切构造侵位的花岗岩;(m) 玄武岩的韧性变形特征;(n) 砂泥岩中的高级别褶皱;(o) 砂泥岩中的左行走滑剪切带;(p) 沿断裂侵位的闪长斑岩
 S_0 —层理; S_1 —第一组劈理; S_2 —第二组劈理; S_3 —第三组劈理; f_1 —第一组褶皱枢纽; f_2 —第二组褶皱枢纽; f_3 —第三组褶皱枢; πf —褶皱π轴; l_1 — S_1 面上 a 型线理; l_3 — S_3 面上 a 型线理; F—断裂; Fl—断层擦痕与生长线理
(a) Folded quartz veins; (b) folded granite intrusion; (c) lattice preferred orientations of quartz from mylonitized granite; (d) parasitic folds in siliceous sandstone and mudstone; (e)–(j) schematic interpretation of the stucture in study area; (k) S—C (C') fabrics; (l) the intrusion of synkinematic granitoid body along the ductile zone; (m) the ductile structures in basalt; (n) large-scale folds in sandstone and mudstone; (o) sinistral strike-slip shear zone; (p) diorite porphyry emplaced along fault
 S_0 —bedding; S_1 —first order foliation; S_2 —scend order foliation; S_3 —third order foliation; f_1 —hinge of first folds; f_2 —hinge of second folds; f_3 —hinge of third folds; πf —fold axis determined by π -circle; l_1 —first order type A lineation (stretching lineation); l_3 —third order type A lineation (stretching lineation); F—fault; Fl—fault slip vectors

要以面、带状分布于翠玲、白石滩和白干湖等地(图 2),初步分析认为反映了二者控矿构造的不同,前者为晚古生代造山晚期走滑型剪切构造系统控矿,后者属造山早期面状剪切构造系统控矿(张忠义等,2018;2020),本次以南带为重点,进一步开展晚古生代造山早期面状剪切系统的金控矿机制研究。

2 构造变形期次与特征

通过区域构造分析和重点区段的构造剖析,厘定出三期与晚古生代俯冲碰撞造山运动相关的构造变形事件,形成了相应的构造变形岩相、变形构造样式与构造组合。

2.1 第一期构造变形

主要将南部单元(I)和中部单元(II)卷入变形,二者具有相似的构造变形特征,而北部单元(III)未发生或该期变形表现不明显(图 3)。形成变质变形相为绿片岩相的韧性—脆韧性剪切带,发育透入性剪切劈理 $S_1(S_1//S_0)$ 。具明显域构造,强应变带主要位于不同岩性界面或砂泥质、灰质、硅质等非能干层中;而玄武岩、粗碎屑岩等强硬岩层构成弱变形域,发生碎裂岩化和劈理化、部分香肠化,较多或较好地保留了原始组构构造面貌。见矿物拉伸线理(l_1),发育石英纹带及 S—C(C')(图 3k)组构,常见片内无根同斜紧闭小褶皱和少量 a 型褶皱,未见较大规模的褶皱。有时见发生同构造剪切变形的晚古生代中酸性花岗岩顺构造($//S_1$)呈板片状侵位(图 3b,l),区域东部对应构造岩(糜棱岩化花岗岩)的岩组图(图 3c)上,石英 c 轴为较明显的点极密型,主要呈现简单剪切变形特征,除主极密外,c 轴附近

还有两个次极密,可能受到后期叠加变形影响。劈理 $S_1(S_1//S_0)$ 及其上的拉伸线理(l_1)一般呈向南或向北的倾向变化(图 3e,h),而 $S_1(S_1//S_0)$ 在 I 单元和 II 单元的极点均沿相近或相似的大圆弧分布(图 3e,h),表明可能因共同卷入了褶轴(π -轴)近东西的近水平晚期褶皱所致。

自北向南靠近雅满苏断裂带的剪切变形明显增强,玄武岩亦发生韧性变形(图 3m),指示了根部带部位,大部分运动学标志则指示上盘向北的剪切运动。该期构造的总体样式和特征显示向北的分层剪切或小切层角的逆冲剪切($S_1//S_0$)作用。结合剪切带中有晚古生代花岗岩以板片状同构造侵位等,综合推测该期构造开始于早石炭世、持续到晚石炭世—早二叠世早中期。发育与构造剪切过程中靠近能干层一侧、或剪切变形相对晚期阶段形成的破裂石英(网)脉,属里德尔剪裂及张裂细(网)脉。

2.2 第二期构造变形

三个构造单元均卷入了变形,为韧性—韧脆性的横向缩短构造变形,发育近东西向的褶皱—冲断及相关构造,形成区域上的第二组透入性劈理 S_2 ,间隔劈理或褶劈理为主,多属轴面劈理。

以 S_0 或 S_1 为形面发生褶皱(f_2),具连续波状的纵弯褶皱特征,大的或高级别褶皱(图 3n)的轴面近直立、对称性好,枢纽向两侧缓倾伏(图 3f,i),表明大致形成于顺层的双向挤压;其中 I 单元和 II 单元多为较紧密的线状褶皱,而 III 单元为宽缓—中常褶皱。压扁作用在构造变形中起了重要作用,特别是在厚的、缺乏构造各向异性的泥岩中,因强烈压扁而劈理发育,露头上仅见早期石英(网)脉等强硬体

(层)的纵弯小褶皱(图 3a);明显的纵弯失稳发生在砂岩、玄武岩等能干层出现时,总体以尖棱褶皱为主,砂岩中见箱状褶皱和类隔挡式褶皱样式,并见露头尺度上的多级协调褶皱(图 3b,d),表明下部存在滑脱面。

断裂构造以逆冲断层为主,依其形成时间和方式大致可分为二类,一类为拆离断层及其分支断层,多稍晚或与褶皱同时开始发育,活动时间长,规模较大,与褶皱一起控制了断褶带的主体结构和构造样式(图 3);另一类属褶皱相关断裂,形成于褶皱演化较晚期因调节应变而成的次级断裂,最常见的是产于褶皱核部的高角度逆断层(图 3,3n)。

该期构造的总体结构和样式指示近南北向(垂直造山带)的双向近水平挤压下的纵弯失稳作用,构造的中存在(多层次)拆离滑脱层,位于灰岩、泥岩和硅质泥岩等非能干层中。在 II 单元中部,与早期剪切同构造产出的晚古生代花岗岩亦卷入该期褶皱(图 3b,l),表明当时花岗岩可能仍未完全冷却变强硬,同时,常有更晚、但不晚于二叠世的花岗岩顺该期断裂侵入;因此推测该期构造的时限为早—中二叠世,与早期剪切变形的间隔时间较短,二者分属同一构造事件中的相对离散的连续变形阶段。该期构造相关的石英脉常产于背斜核部及靠近核部一带,或沿断裂及相关的破裂裂隙充填,表明与近南北向横向缩短作用有关。多为大脉,宽者达 10~20 余米。

2.3 第三期构造变形

表现为近东西向的韧脆性—脆性走滑剪切活动,具低绿片岩变质变形相的简单剪切变形特征。主要沿苦水断裂、雅满苏断裂带等发育,形成宽数米—数十米不等的高角度线性剪切带,发育新生剪劈理(S_3)及走向拉伸线理(l_3)(图 3g,j,o),常形成宽约数米的狭窄高应变新生劈理带,见相关的倾竖剪切小褶皱及 S—C 组构、愈合石英、方解石脉等,指示左形走滑运动为主(图 3g,j)。高角度走滑型剪切带是新生的叠加构造(张忠义等,2018;2020),属拼贴碰撞后的造山晚期陆内走滑调整构造,时限为中—晚二叠世。区域上的韧脆性—脆性走滑剪切带控制的石英(网)脉,但规模较前二期构造相关石英脉小很多。

2.4 区域面状剪切带与成矿流体通道确定

第二期变形广泛发育高角度劈理 S_2 及轴面近直立、对称性好的纵弯褶皱(图 3f,i),指示近南北向(垂直造山带)的双向近顺水平“层”挤压下的纵弯失稳作用,并将早期剪切劈理 S_1 ($S_1//S_0$) 卷入变形(图 3e,h),而早期变形为指向北的分层剪切或小切层角的逆冲剪切($S_1//S_0$);因此,恢复后的早期构造为一指向北的大型低角度面状剪切带,其根带位于南部,将南部单元(I)和中部单元(II)岩系普遍卷入变形,是绿片岩变质变形相(5~10 km 深度)条件下形成的剪切带。另外,区域上二期构造的样式和叠加关系表明,它们分属早石炭—早、中二叠世连续造山中相对离散的变形阶段,可能反映了俯冲—碰撞造山的构造连续变形、变动过程,从而可将早期构造归为俯冲相关的低角度俯冲型拆离剪切带,晚期褶皱为碰撞造山型褶皱。

目前资料尚难确定面状俯冲型拆离剪切带的厚度,其内广泛发育的石英网脉、云母类含水矿物及强硅化蚀变等表明,其可能作为构造中的主流体活动通道而与俯冲通道相连通、或部分曾为俯冲通道的一部分。研究表明,俯冲拆离剪切带是深源含金流体沿俯冲板片向上运移至浅部成矿重要的流体通道(Moore et al., 1988; Peacock, 1990; Sibson, 2004; 2013; Richard ang David, 2015; Hyndman et al., 2015);区域金矿地球化学和流体包裹体资料(姬金生等,1997;张连昌等,2000;薛春纪等,1999;王丽娟等,2008;张达玉等,2012)显示,成矿物质主要来源于深部的上地幔和下地壳,且多有变质流体和岩浆流体的贡献。表明区内确定的俯冲拆离剪切带可能是区域成矿流体的一级运移通道。

面状拆离剪切带的剪应变主要沿非能干层(泥岩、灰岩、硅质泥岩等)发生,它们连同未出露(?)的剪切带底界拆离断层,在稍后或稍晚的连续变形中仍作为拆离滑脱(构造)层而控制冲断—褶皱带的发育、并卷入后续或后继递进变形。从而构成区域金矿控矿构造系统的一级控矿构造和俯冲带深源成矿流体向上、向前运移成矿的主通道。

3 金成矿时代与成矿特征

3.1 金成矿特征与成矿时代

区内金矿化类型以热液填充石英脉型为主,次为脉体旁侧的流体交代蚀变岩型,主要发育于砂泥质夹砂质板片岩中(图 4a),部分产于附近的石英闪长斑岩中;石英脉宽一般数厘米—数十厘米,

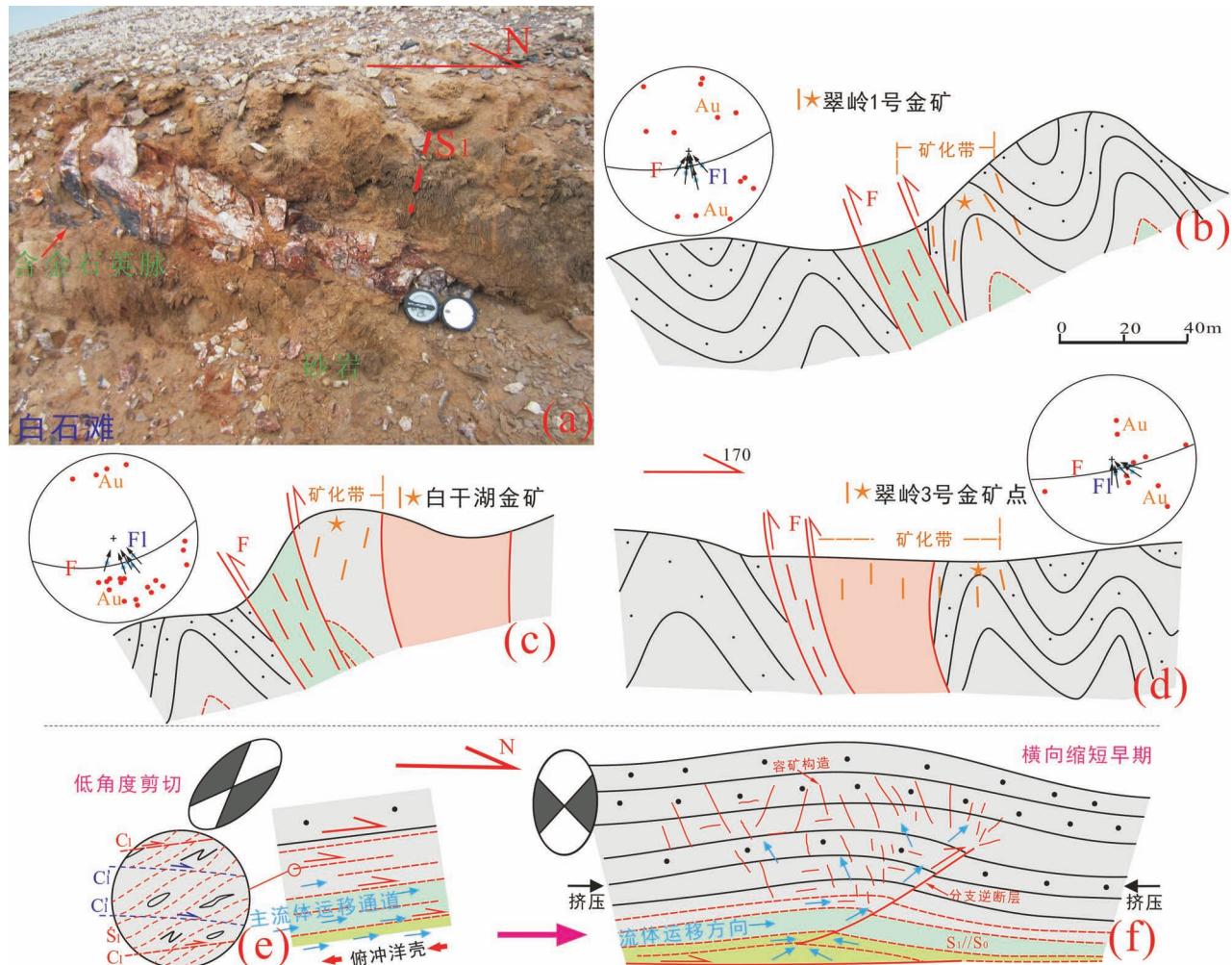


图 4 区域成矿控矿构造模型图(下半球投影)

Fig. 4 Schematic interpretation of the structural controls on gold mineralization (Lower hemisphere projections)

(a) 砂质板片岩中的含金石英脉;(b)、(c)、(d) 典型金矿地质特征(大圆弧代表断裂(F)产状,Fl为断层擦痕和矿物生长线理,红圆点(Au)为含金石英脉的极点);(e)、(f) 区域成矿控矿构造模型图

(a) Auriferous quartz veins at Baishitan; (b), (c), (d) geological characteristics of typical gold deposits (Orientation of fault plane represented by the great circle, Fl and Red Dot (Au) represents respectively fault slip vectors and auriferous quartz vein poles); (e), (f) schematic interpretation of the structural controls on gold mineralization

宽者达 10 余米,为边界不规则状张—张剪脉或网脉,近东西向为主,其它方向相对不发育,多陡倾(图 4b,c,d),已发生断褶改造,见片理劈理化等现象,相对集中成群、束状产出,构成总体近东西向分布的矿带或矿化带(图 4b,c,d)。主要金属矿物有黄铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿等,金矿物主要为自然金和银金矿,呈粒状或片状,赋存状态主要为粒间金、包裹金和裂隙金;围岩蚀变有硅化、绢云母化、绿泥石化和黄铁矿化等。研究(屈文军等,2002)表明,白干湖金矿的热液成矿成矿期包括三个阶段:第一成矿阶段为黄铁矿—毒

砂—石英阶段,未见金矿化;第二成矿阶段为金—黝铜矿—方铅矿—闪锌矿—石英阶段,是主成矿阶段;第三成矿阶段为石英—碳酸盐阶段,未见金矿化。

产于石英闪长斑岩中的石英脉为与围岩矿脉产状相近或相似的不规则状的张—张剪(网)脉(图 5a),近东西走向者为主,宽一般 0.5~10cm,倾角变化较大,为 28°~83°,表明是在区域构造控制下的气液充填原生裂隙破裂而成,金矿化即发生于该类石英脉及蚀变围岩中;岩体沿大致与岩性和构造界面(//S₁//S₀)平行的断裂(图 3p)被动就位,缺乏定向组构的块状构造,未发生或记录第一期剪切变形,但

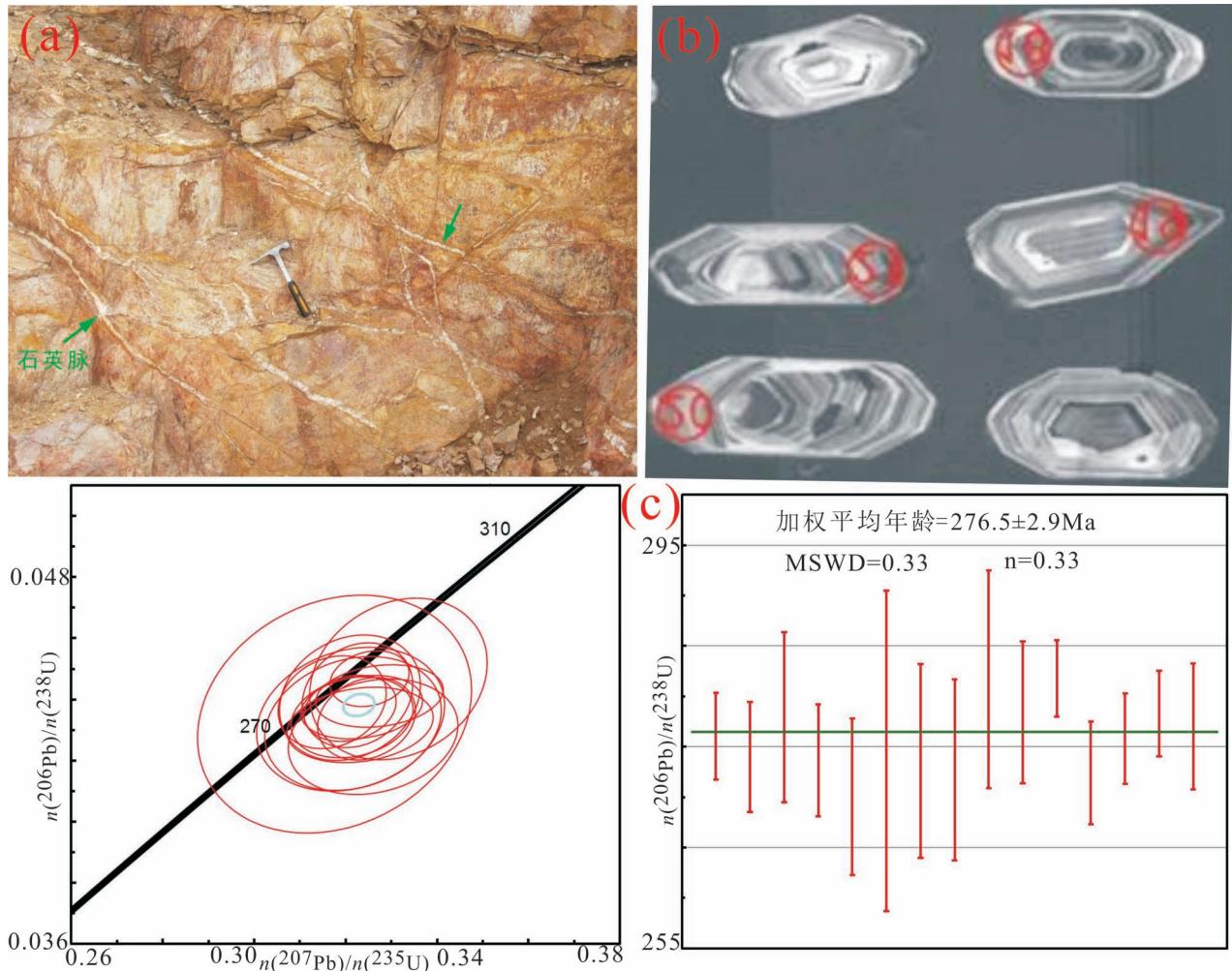


图 5 (a) 含石英脉石英闪长斑岩;(b) 石英闪长斑岩锆石阴极发光图像;(c) 石英闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 (a) Quartz vein-bearing quartz dioritic porphyry; (b) zircons CL images of the quartz dioritic porphyry;
(c) U-Pb concordia diagram of zircons the quartz dioritic porphyry

明显与围岩一同卷入第二期断褶变形,发育相关的破裂劈理。综合分析表明是与构造成矿同时的岩浆活动产物,成矿作用发生于岩浆成岩晚期。

对翠岭 3 号金矿点赋矿石英闪长斑岩开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法年龄测试来约束成矿和构造变形年龄,测试数据见表 1。锆石分选由河北省区域地质矿产调查研究所完成,将挑选好的锆石制靶,经打磨抛光至核部出露,之后进行阴极发光(CL)照相。测试分析在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学实验室完成。锆石 U-Pb 定年工作所用的 MC-ICP-MS 为美国 Thermo Fisher 公司最新一代 Neptune Plus 型多接收等离子体质谱仪;激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司生产的 GeoLasPro193nm。采用中国地质大学研发的 ICPMSDataCal 程序进行数据处理。阴极发光图像

显示锆石多呈晶形较好的长柱状,具较清晰的岩浆结晶环带或条带结构,内部基本无残留老核,外部无变质边,表明为岩浆锆石(图 5b);在锆石的 U-Pb 谐和曲线图中,锆石的数据分析点均落于谐和线上或其附近的一个很小区域内,获得 276.5 ± 2.9 Ma 的岩体成岩年龄(图 5c),大致代表金矿的成矿年龄,时代划归早二叠世早中期。时间上相当于第一期面状剪切晚期、或面状剪切向第二期横向挤压的构造转换期。

研究区内已发现的含金石英脉一般宽数厘米至十余米,为边界不规则状张—张剪脉或网脉,而蚀变岩型矿化多发育于脉体旁侧,以硅化、绢云母化和绿泥石化蚀变等为主,具黄铁矿、方铅矿、闪锌矿及少量黄铜矿的金属硫化物组合特征;蚀变矿物自形程度高、缺乏定向性,叠加在定向性好的早期绿片岩变

表 1 翠岭 3 号金矿点闪长斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 数据表

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from the quartz dioritic porphyry in Ciling-3 gold mineralization point

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						同位素年龄(Ma)						
	Pb	Th	U	Th/U			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			
				测值	1σ	测值	测值	1σ	测值	测值	1σ	测值	1σ	测值		
D18-01	40.7	54.5	118.1	0.4614	0.0524	0.0012	0.3496	0.0101	0.0484	0.0010	301.9	55.6	304.5	7.7	304.5	6.0
D18-02	86	112.2	210.4	0.5330	0.0540	0.0008	0.3712	0.0092	0.0499	0.0009	368.6	37.0	320.6	6.9	313.8	5.8
D18-03	51.8	65.3	119.1	0.5482	0.0559	0.0012	0.3980	0.0099	0.0516	0.0009	450.0	46.3	340.2	7.3	324.4	5.9
D18-04	18.6	15.9	71.1	0.2231	0.0622	0.0018	0.4422	0.0164	0.0515	0.0010	683.3	-97.2	371.8	11.6	323.8	6.0
D18-05	46.6	66.7	142.3	0.4690	0.0528	0.0011	0.3564	0.0086	0.0490	0.0010	320.4	46.3	309.5	6.5	308.2	6.3
D18-06	32.1	33.5	105.3	0.3183	0.0703	0.0018	0.4664	0.0148	0.0481	0.0009	1000.0	51.7	388.7	10.3	303.0	5.9
D18-07	33.5	48.8	129.5	0.3767	0.0564	0.0014	0.3582	0.0109	0.0460	0.0010	477.8	55.6	310.8	8.2	290.1	6.2
D18-08	81	129.9	190.6	0.6814	0.0525	0.0009	0.3420	0.0076	0.0472	0.0007	309.3	37.0	298.7	5.8	297.3	4.6
D18-09	64	87.2	176.4	0.4942	0.0534	0.0011	0.3680	0.0093	0.0500	0.0012	346.4	23.2	318.2	7.0	314.5	7.2
D18-10	40.9	69.9	139.2	0.5024	0.0536	0.0012	0.3235	0.0088	0.0437	0.0007	353.8	46.3	284.6	6.8	276.0	4.3
D18-11	62	98.4	171.3	0.5743	0.0551	0.0012	0.3539	0.0090	0.0466	0.0008	416.7	46.3	307.7	6.8	293.4	4.9
D18-12	38.4	58.7	152.6	0.3848	0.0598	0.0020	0.3661	0.0118	0.0444	0.0010	598.2	74.1	316.8	8.8	280.2	6.2
D18-13	89	163.3	251.1	0.6502	0.0537	0.0010	0.3214	0.0088	0.0434	0.0009	366.7	37.0	283.0	6.8	274.0	5.5
D18-14	155	272.0	376.5	0.7224	0.0530	0.0007	0.3338	0.0088	0.0456	0.0010	331.5	50.9	292.4	6.8	287.6	6.4
D18-15	105	186.7	332.8	0.5608	0.0528	0.0009	0.3209	0.0102	0.0441	0.0014	320.4	13.9	282.6	7.9	277.9	8.4
D18-16	94	168.1	305.2	0.5507	0.0543	0.0009	0.3246	0.0071	0.0434	0.0009	383.4	37.0	285.4	5.5	273.7	5.6
D18-17	179	334.6	413.8	0.8086	0.0553	0.0015	0.3260	0.0122	0.0428	0.0012	433.4	64.8	286.5	9.4	270.0	7.8
D18-18	212	118.7	290.6	0.4085	0.0725	0.0007	1.2651	0.0465	0.1265	0.0048	1011.1	18.5	830.2	21.0	767.9	27.3
D18-19	116	206.2	465.0	0.4436	0.0529	0.0009	0.3176	0.0198	0.0435	0.0026	324.1	37.0	280.0	15.3	274.6	15.9
D18-20	47.0	82.4	207.9	0.3963	0.0537	0.0014	0.3211	0.0136	0.0434	0.0016	366.7	64.8	282.7	10.5	273.6	9.6
D18-21	160	283.7	415.0	0.5835	0.0563	0.0013	0.3448	0.0223	0.0444	0.0029	464.9	55.6	300.8	16.9	280.2	18.1
D18-22	70	128.7	245.6	0.5240	0.0540	0.0010	0.3216	0.0127	0.0432	0.0014	368.6	37.0	283.1	9.8	272.7	9.0
D18-23	42.2	71.7	165.0	0.4344	0.0538	0.0012	0.3315	0.0128	0.0447	0.0017	364.9	55.6	290.7	9.8	281.7	10.8
D18-24	60	107.8	242.4	0.4446	0.0530	0.0010	0.3226	0.0080	0.0441	0.0011	327.8	46.3	283.9	6.2	278.4	7.0
D18-25	127	222.6	421.0	0.5287	0.0528	0.0007	0.3252	0.0057	0.0447	0.0006	320.4	4.6	285.9	4.5	281.8	3.8
D18-26	93	164.2	326.0	0.5036	0.0543	0.0013	0.3231	0.0106	0.0432	0.0008	383.4	55.6	284.3	8.2	272.4	5.1
D18-27	88	158.9	309.7	0.5131	0.0533	0.0010	0.3210	0.0067	0.0437	0.0007	338.9	37.0	282.6	5.2	275.8	4.5
D18-28	63	111.5	228.0	0.4891	0.0538	0.0014	0.3274	0.0092	0.0441	0.0007	364.9	64.8	287.6	7.1	278.3	4.2
D18-29	169	323.0	428.6	0.7535	0.0524	0.0007	0.3170	0.0078	0.0439	0.0010	301.9	37.0	279.6	6.1	277.0	6.2
D18-30	43.9	72.0	168.6	0.4273	0.0540	0.0010	0.3567	0.0074	0.0479	0.0008	372.3	60.2	309.8	5.6	301.6	4.7

质变形矿物相之上,显示更趋于脆性变形域的矿物成生发育特征;另外,含金石英脉多已卷入第二期断褶变形,结合本次的 276.5 ± 2.9 Ma 成矿年龄推断,属第一期面状剪切晚期、向第二期横向挤压的构造转换期或横向挤压早期形成的石英脉。未发现韧性—脆韧性变形域形成的里德尔剪裂及张裂石英细(网)脉状或蚀变糜棱岩型矿化和矿化体,即第一期韧性—脆韧性构造变形阶段未发生明显矿化。区内第三期构造变形阶段形成受韧性—脆性走滑剪切带控制的石英(网)脉,其分布发育较前二期构造相关石英脉局限的多,亦未发现矿化现象。

3.2 金成矿构造系统

区内金矿主要分布于冲断—褶皱带向前锋的 II 单元中,其中翠岭 1 号和白干湖金矿位于苦水断裂带上盘,翠岭 2 号、3 号和白石滩金矿位于翠岭断裂上盘,白石滩东金矿位于白石滩断裂上盘(图 2)。

矿体主要发育于雅满苏组上部的砂泥质夹砂质板片岩、少石英闪长斑岩中,以石英脉型矿化为主、次为脉体旁侧的蚀变岩型,矿石结构主要有自形一半自形粒状结构和交代结构,矿石构造包括块状构造、浸染状构造、团块状构造、条带状构造、梳状构造、角砾状构造等;表现为宽数厘米—十余米的边界不规则状张—张剪脉或网脉,并成群、集束构成近东西的矿带和矿化带,产于同向的高角度逆冲断层上盘、或断层上盘背斜核部附近(图 34b,c,d)。逆断层走向近东西—北东东,一般由发育于灰岩、泥岩中或大致顺灰岩、泥岩与砂岩、砂泥岩的岩性或构造界面($/S_1//S_0$)发育的 2~4 条次级断裂组成,断面上的运动擦痕及共生的石英和方解石等生长线理均指示向北的冲断活动,沿断裂时有年龄为 276.5 ± 2.9 Ma 的石英闪长斑岩侵位产出,岩体边界与围岩亦总体协调($/S_1//S_0$)(图 4b,c,d);综合表明,逆冲断层由初始于滑脱拆离带内的分支断裂发育而来,其初始产状很缓或与滑脱拆离带一致($/S_1//S_0$)(图 4e,f),在后续或后继的向上突破变形过程中逐步旋转而变陡立;并构成金矿二级控矿构造与成矿流体的二级运移通道,其上盘含矿破裂裂隙是断裂及其上盘背斜的低序次构造,归属容矿构造或成矿构造圈闭,它们连同作为一级控矿构造和成矿流体主通道的下部剪切拆离带,共同构成了区域金矿的控矿构造系统。

4 讨论:面状剪切带形成机制与金成矿关系

以上分析表明,石炭纪开始的南向俯冲碰撞造

山是康古尔塔格构造带南带造山型金矿的成矿地质背景,其间主要经历了向北的分层剪切或低角度逆冲剪切($S_1//S_0$)—南北向横向缩短—近东西向走滑剪切等三个阶段的构造演化。早期的分层剪切或低角度逆冲剪切($S_1//S_0$)形成面状剪切带,剪应变主要沿非能干层(泥岩、灰岩、硅质泥岩等)发生,在后续或后继递进变形中仍作为拆离滑脱(构造)层而控制冲断—褶皱带的发育;并构成区域金矿控矿构造系统的一级控矿构造和俯冲带深源流体(含岩浆流体)向上运移的主通道,成为控制区域金矿成生发育与空间分布产出的主控构造因素。同时,区内已发现的矿(化)体更具韧性变形域的成生发育特征,属第一期面状剪切晚期、向第二期横向挤压的构造转换期或横向挤压早期形成的矿化石英脉与蚀变岩;而早期面状韧性—脆韧性剪切带主要产于渗透率低的细碎屑组成非能干岩系中,递进剪切变形中产生的里德尔剪、张裂化细(网)脉表明在提高剪切带内构造渗透性、促使密封的超高压流体流体聚集、加快向前运移起了重要作用,但未发生流体集中卸载、沉淀成矿。结合同构造侵位石英闪长斑岩 276.5 ± 2.9 Ma 的年代学依据,推测有意义(价值)的金成矿作用发生于早二叠世早中期,即造山中递进变形的分层剪切或低角度逆冲剪切的晚期、向南北向横向缩短转换阶段,伴随区域抬升和断褶作用,拆离剪切带内发生流体助力的缓产状或与滑脱拆离带一致($/S_1//S_0$)断裂破裂,并以拆离带分支逆断层形式向上(盘)突破发育、逐渐旋转变陡立,导致封闭在拆离带内运移的深源含矿流体以断层阀(Sibson et al., 1988; Cox, 2005)方式分流排泄、聚集成矿(图 4e,f)。作为区域金矿的二级成矿构造,分支逆断层不但是成矿流体的二次运移、分配通道,还为石英闪长斑岩提供了就位空间,而发育于断裂上盘或上盘背斜枢纽处的低序次破裂裂隙为流体卸载、成矿提供了构造圈闭、定位形成充填石英脉和旁侧的交代蚀变岩型(造山型)金矿(图 4e,f)。后续或后继递进变形及后期叠加构造明显对矿床(体)破坏、改造及保存起了重要作用,包括褶皱的进一步紧闭,矿体的断错、劈理化等。

东天山—甘肃北山晚古生代造山过程与韧性剪切带是地区研究热点和问题(杨兴科等,1998; 1999; 王凯等,2019; 查雁鸿等,2020; 方维萱等,2021);甘肃北山的最新工作(方维萱等,2021)表明,北山北部的红石山弧—弧碰撞带与西部的东天山康古尔塔格弧—弧碰撞带具相似的组成、结构和

晚古生代演化过程,东天山大南湖和雅满苏晚古生代岛弧东延、分别可与红石山的雀儿山和白山泉晚古生代岛弧对比连接,而东天山康古尔塔格构造带亦可与红石山蛇绿混杂岩带和脆韧性剪切带相互对比;这进一步拓展了区域造山带晚古生代造山型金矿的成矿和找矿空间。

5 结论

通过区域上的构造分析和重点区段的构造剖析基础上的构造控矿机制研究,确定早期指向北的俯冲型面状剪切带构成康古尔塔格构造—金矿带南带的一级控矿构造与深源成矿流体(含岩浆流体)向上运移成矿的主通道;大约在 276.5 ± 2.9 Ma 的分层剪切或低角度逆冲剪切的晚期、向南北向横向缩短转换阶段,面状拆离带上部或上盘的次级或低级控矿成矿构造系统开始成生发育,导致封闭在面状构造带内向前运移的深源含矿流体以断层阀方式分流排泄、定位聚集成矿。造山过程中的剪切构造系统不但控制了金矿的分布,还控制了金矿的发育与产出,而低角度剪切向挤压缩短转换阶段的应力应变、化学及温度等梯度变化则促使了流体中矿质的聚集、沉淀成矿。这不但能较合理解释区域金矿于康古尔塔格构造带南部冲断—褶皱带前锋、以面、带状分布产出的规律,也为广泛发育多期次、不同成因的热液石英(网)脉的区域开展石英脉型金矿的定位预测与勘探提供了依据和帮助。

成文于近几年东天山中段地质矿产调查与专题研究工作的资料积累与初步认识,相关工作有待深入,望能抛砖引玉。构造带内部结构构造厘定基础上的构造控矿机制研究,是将来进一步工作的方向。

致谢:陈柏林研究员审阅初稿,并提出宝贵修改意见,此致以诚挚谢意。

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)

- 陈文,孙枢,张彦,肖文交,王义天,王清利,姜立丰,杨俊涛. 2005. 新疆东天山秋格明塔什—黄山韧性剪切带 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究. 地质学报,79(6):790~804.
- 陈文,张彦,秦克章,王清利,王义天,刘新宇. 2007. 新疆东天山剪切带型金矿床时代研究. 岩石学报,23(8):2007~2016.
- 陈继平,王晖,廖群安,张雄华,罗婷,王杰杰,孟秦宇,陈恩科,闫江涛,晁旭,张志敏,胡奎,柳小明. 2016. 东天山土墩铜镍硫化物矿床成岩时代及岩石成因. 地质科技情报,35(6):44~54.
- 韩春明,毛景文,杨建民,王良忠,崔斌. 2002. 东天山晚古生代内生金属矿床类型及地球动力学演化. 地质学报,76(2):222~234.

- 方维萱,高珍权,贾润幸,刘正桃,李丰收,徐国端. 2006a. 东疆沙泉子铜和铜铁矿床(矿)石地球化学研究与地质找矿前景. 岩石学报,22(02):1413~1424.
- 方维萱,黄转盈,唐红峰,高珍权. 2006b. 东天山库姆塔格—沙泉子晚石炭世火山—沉积岩相学地质地球化学特征与构造环境. 中国地质,33(3):529~544.
- 方维萱,方同辉,郑小明,倪杰才,郭玉乾,李建旭. 2021. 甘肃红石山地区泥盆—石炭纪有限洋盆重建与蛇绿混杂岩深部结构. 地质通报,40(5):649~673.
- 李锦铁,王克卓,李文铅,郭华春,宋彪,王瑜,莫申国,赵子然,朱志新,潘成泽. 2002. 东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查. 新疆地质,20(4):295~301.
- 李华芹,谢才富,常海亮. 1998. 新疆北部有色金属贵金属矿床成矿作用年代学. 北京:地质出版社,202~220.
- 李永军,童丽莉,杜志刚,杨俊泉,司国辉,李新光. 2007. 东天山库姆塔格东岩体岩石地球化学特征及构造意义. 地质科技情报,6:25~30.
- 龙灵利,王京彬,王玉往,邓小华,毛启贵,孙燕,孙志远,张忠义. 2019. 东天山古弧盆体系成矿规律与成矿模式. 岩石学报,35(10):3161~3188.
- 姬金生,张连昌,曾章仁,卢登蓉,杨兴科,杨建国. 1996. 东天山康古尔塔格金矿带年代学研究. 地质科学,31(1):80~89.
- 姬金生,薛春纪,曾章仁,杨兴科. 1997. 新疆东天山康古尔塔格金矿带研究. 地质论评,43(1):69~77.
- 木合塔尔·扎日,张晓帆,吴兆宁,吴昌志,陈川. 2009. 东天山准噶尔—哈萨克斯坦板块与塔里木板块缝合线的再厘定及其意义. 地学前缘(中国地质大学(北京),北京大学),16(3):138~148.
- 届文军,兰翔,韩照信. 2002. 新疆白干湖与浅成斑岩有关的石英脉型金矿床. 浙江大学学报(理学版),29(2):209~212.
- 苏春乾,姜常义,夏明哲,魏巍,潘荣. 2009. 北天山东段阿齐山组火山岩的地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄. 岩石学报,25(4):901~915.
- 卿兴全,陈岳龙,包创,邱天亮,鲁震,张少博. 2015. 东天山觉罗塔格阿奇山地区石炭纪花岗斑岩年代学、地球化学特征及其地质意义. 地质学报,89(增刊):341~342.
- 舍建忠,冯长丽,贾健,邸晓辰,段旭杰. 2018. 东天山中段造山带构造单元划分及演化特征. 新疆地质,36(2):135~141.
- 徐兴旺. 1996. 新疆觉罗塔格韧性挤压带形成演化及金矿成矿作用. 导师:孙殿卿. 北京:中国地质科学院地质力学研究所博士学位论文.
- 徐兴旺,马天林,孙立倩,李贵书,张学勤,徐湘康. 1998. 新疆东天山觉罗塔格韧性挤压带基本特征及动力学意义. 地质科学,33(2):147~157.
- 薛春纪,姬金生,张连昌,丰成友,杨建国. 1999. 新疆西滩金矿床同位素年代学研究. 西安工程学院学报,21(4):6~10.
- 杨兴科,姬金生,陈强,陶洪祥. 1999a. 东天山区域韧性剪切带特征. 新疆地质,17(1):55~64.
- 杨兴科,姬金生,张连昌,曾章仁. 1998. 东天山大型韧性剪切带基本特征与金矿预测. 大地构造与成矿学,22(3):209~218.
- 杨兴科,程宏宾,姬金生,陈强,罗桂昌. 1999b. 东天山碰撞造山与金铜成矿系统分析. 大地构造与成矿学,23(4):315~322.
- 王京彬,王玉往,何志军. 2006. 东天山大地构造演化的成矿示踪. 中国地质,33(3):461~469.
- 王义天,毛景文,陈文,杨富全,杨建民. 2006. 新疆东天山康古尔塔格金矿带成矿作用的构造制约. 岩石学报,22(1):236~244.
- 王瑜,李锦铁,李文铅. 2002. 东天山造山带右行剪切变形及构造演化与 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据. 新疆地质,20(4):315~319.
- 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.
- 王凯, 计文化, 孟勇, 张欣, 朱晓辉, 李平. 2019. 天山造山带东段构造变形对增生造山末期的响应. 大地构造与成矿学, 43(5): 894~910.
- 张忠义, 刘海鹏, 方同辉, 肖文进, 高军辉, 杨国龙, 郑小明, 贺昕宇, 李坡, 王宏伟, 杨欢, 鹿志忠. 2018. 东天山雅满苏构造带的晚古生代构造演化与金成矿的关系. 地质力学学报, 第五届全国矿田构造与深部找矿预测学术研讨会论文集: 55.
- 张忠义, 贺昕宇, 肖文进. 2020. 东天山中段晚古生代剪切带叠加特征及构造控矿作用. 矿产勘查, 11(11): 2341~2346.
- 张忠义, 肖文进, 郑晓明, 杨国龙, 高军辉. 2021. 东天山康古尔塔格构造带的组成、结构与晚古生代构造演化. 矿产勘查, 12(7): 1530~1538.
- 张达玉, 周涛发, 袁峰, 范裕, 刘帅, 宁福泉, 孙海怀. 2012. 新疆东天山康古尔剪切带西段金矿床的成矿流体特征及其地质意义. 矿床地质, 31(3): 555~568.
- 张维峰, 陈华勇, 江宏君, 陆万俭, 梁培, 许超, 严学录, 杨俊弢. 2017. 新疆东天山多头山铁—铜矿区花岗岩类的年代学、地球化学、岩石成因及意义. 大地构造与成矿学, 41(6): 1171~1191.
- 张连昌, 姬金生, 李华芹, 沈远超. 2000. 东天山康古尔塔格金矿带两类成矿流体地球化学特征及流体来源. 岩石学报, 16(4): 536~541.
- 郑加行, 赵同阳, 韩琼, 李平, 唐智, 孙耀锋, 刘鑫, 李航, 常璨. 2017. 东天山阿奇山组火山岩锆石 U-Pb 年龄地球化学特征及意义. 新疆地质, 35(4): 446~454.
- 周涛发, 袁峰, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建滇. 2010. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究. 岩石学报, 26(2): 478~502.
- Allen M B, Windley B F, Zhang Chi. 1993. Paleozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tian Shan, Central Asia. Tectonophysics, 220: 89~115.
- Ao Songjian, Mao Qigui, Brian F, Windley, Song Dongfang, Zhang Zhiyong, Zhang Jien, Wan Bo, Han Chunming, Xiao Wenjiao. 2021. The youngest matrix of 234 Ma of the Kanguer accretionary mélange containing blocks of N-MORB basalts: Constraints on the northward subduction of the Paleo-Asian Kanguer Ocean in the Eastern Tianshan of the southern Altaiids. International Journal of Earth Sciences, 110: 791~808.
- Chen Zhengyu, Xiao Wenjiao, Windley B F, Schulmann K, Mao Qigui, Zhang Zhiyong, Zhang Jien, Deng Chen, Song Shuaihua. 2019. Composition, provenance and tectonic setting of the Southern Kangurtag accretionary complex in the Eastern Tianshan, NW China: Implications for the Late Paleozoic evolution of the North Tianshan Ocean. Tectonics, 38(24): 2779~2802.
- Chen Wen, Sun Shu, Zhang Yan, Xiao Wenjiao, Wang Yitian, Wangqingli, Jiang Lifeng, Yang Juntao. 2005&. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Qiugemingtashi—Huangshan ductile shear zone in East Tianshan, Xinjiang, NW China. Acta Geologica Sinica, 79(6): 790~804.
- Chen Wen, Zhang Yan, Qin Kezhang, Wang Qingli, Wang Yitian, Liu Xinyu. 2007&. Study on the age of the shear zone-type gold deposit of East Tianshan, Xinjiang, China. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 2007~2016.
- Chen Jiping, Wang Hui, Liao qunan, Zhang Xionghua, Luo Ting, Wang Jiejie, Meng Qinyu, Chen Enke, Yan Jiangtao, Chao Xu, Zhang Zhiming, Hu Kui, Liu Xiaoming. 2016&. Geochronological and geochemical of tudun Cu—Ni-sulfide deposits, east tiananhan, geological science and technology information, 35(6): 44~54.
- Cox S F. 2005. Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust. Economic Geology, 100th Anniversary: 39~75.
- Du Long, Zhang Yunying, Huang Zongying, Li Xuping, Yuan Chao, Wu Bin, Long Xiaoping. 2019. Devonian to carboniferous tectonic evolution of the Kanguer Ocean in the Eastern Tianshan NW China: Insights from three episodes of granitoids. Lithos, 350~351.
- Fang Weixuan, Gao Zhenquan, Jia Runxing, Liu Zhengtao, Li Fengshou and Xu Guoduan. 2006&. Geological exploration potentials and geochemical study on rocks and ores in Shaquanzi copper and copper—iron deposits, east Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1413~1424.
- Fang Weixuan, Huang Zhuanying, Tang Hongfeng, Gao Zhenquan. 2006&. Lithofacies, geological and geochemical characteristics and tectonic setting of Late Carboniferous volcanic—sedimentary rocks in the Kumtag—Shaquanzi area, East Tianshan. Geology in China, 33(3): 529~544.
- Fang Weixuan, Zheng Xiaoming, Fang Tonghui, Ni Jiecai, Guo Yuqian, Li Jianxu. 2021&. Restoration of the Devonian—Carboniferous limited ocean basin and deep structure of ophiolitic melange in the Hongshishan area of Gansu Province. Geological Bulletin of China, 40(5): 649~673.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre M M. 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.
- 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.
- Han Chunming, Mao Jingwen, Yang Jianmin, Wang Zhiliang, Cui Bin. 2002&. Types of Late Paleozoic endogenetic metal deposits and related geodynamical evolution in the East Tianshan. Acta Geologica Sinica, 76(2): 222~234.
- Hyndman R D, McCrory P A, Wech A, Kao H, Ague J. 2015. Cascadia subducting plate fluids channelled to fore-arc—mantle corner: ETS and silica deposition. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(6): 4344~4358.
- Ji Jinsheng, Zhang Lianchang, Zeng Zhangren, Lu Dengrong, Yang Xingke and Yang Jianguo. 1996&. Chronology study of Kanggultage gold metallogenetic belt, East Tianshan. Scientia Geologica Sinica, 31(1): 80~89.
- Ji Jinsheng, Xue Chunji, Zeng Zhangren and Yang Xingke. 1997&. Study on the Kanggur Tag gold zone in the Eastern Tianshan Mountains. Geological Review, 43(1): 69~77.
- Liu Biao, Wu Jinghua, Li Hua, Mathur R, Wu Qianhong, Zheng Han, Jiang Jiangbo. 2021. Late Paleozoic tectonic evolution of the Kanguer Shear Zone and Yamansu Arc Belt, Eastern Tianshan (NW China): Constraints from structure, petrogenesis and geochronology of granitoids. Lithos, 380~381: 1~24.
- Li Jinyi, Wang Kezhuo, Li Wenqian, Guo Huachun, Song Biao, Wang Yu, Mo Shenguo, Zhao Ziran, Zhu Zhixin, Pan Chengze. 2002&. Tectonic evolution since the Late Paleozoic and mineral prospecting in Eastern Tian shan Mountains, NW China. Xinjiang Geology, 20(4): 295~30.
- Li Huaqin, Xie Caifu, Chang Hailiang. 1998&. Study on metallogenetic chronology of nonferrous and precious metallic ore deposits in north Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House: 1~244.
- Li Yongjun, Tong Lili, Du Zhigang, Yang Junquan, Si Guohui, Li Xinguang. 2007&. Geochemical characteristics and tectonic significance of Longdong granitoid rock in Kumutage area, Eastern Tianshan. Geological Science and Technology Information, 6: 25~

30.

- Long Lingli, Wang Jingbin, Wang Yuwang, Deng Xiaohua, Mao Qigui, Sun Yan, Sun Zhiyuan, Zhang Zhongyi. 2019&. Metallogenic regularity and metallogenic model of the paleo arc—basin system in eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 35 (10):3161~3188.
- Moore J C, Alain M, Elliott T, Patric A and 24 others. 1988. Tectonics and hydrogeology of the northern Barbados Ridge: Results from ODP Leg 110. *Geological Society of America Bulletin*, 100:1578~1593.
- Muhetaer Zhari, Zhang Xiaofan, Wu Zhaoning, Wu Changzhi and Chen Chuan. 2009&. Redefinition of the suture zone between the Juggar—Kazakhstan and Tarim plates in Eastern Tianshan, Xinjiang, China, and its significance. *Earth Science Frontiers*, 16 (3): 138~148.
- Peacock S A. 1990. Fluid processes in subduction zones. *Science*, 248 (4953):329~337.
- Qu Wenjun, Lan Xiang, Han Zhaoxin. 2002&. Baiganhu quartz vein type gold deposit concerned with hypabyssal porphyry, Xinjiang. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 29 (2): 209~212.
- Qing Xingquan, Chen Yuelong, Bao Chuang, Qiu Tianliang, Lu Zhen, Zhang Shaobo. 2015&. Geological significance of Carboniferous granite porphyry in Giorotag Archi region of the East Tianshan. *Acta Geological Sinica*, 89 (Supp):341~342.
- Richard J, Goldfarba B C, David I G. 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 7 (11):1~93.
- Roves D I, Santosh M, Goldfarb R J. 2018. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits. *Geoscience Frontiers*, 9 (4):1163~1177.
- Sibson R H, Robert F, Poulsen K H. 1988. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold deposits. *Geology*, 16:551~555.
- Sibson R H. 2004. Controls on maximum fluid overpressure defining conditions for Mesozonal Mineralisation. *Journal of Structural Geology*, 26 (6~7):1127~1136.
- Sibson R H. 2013. Stress switching in subduction forearcs: Implications for overpressure containment and strength cycling on megathrusts. *Tectonophysics*, 600: 142~152.
- Su Cunqian, Jiang Changyi, Xia Mingzhe, Wei Wei and Pan Rong. 2009&. Geochemistry and zircons SHRIMP U-Pb age of volcanic rocks of Aqishan Formation in the eastern area of North Tianshan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (4): 901~915.
- She Jianzhong, Feng Changli, Jia Jian, Di Xiaochen and Duan Xujie. 2018&. The division of the tectonic units of the orogenic belt in the middle East Tianshan Mountain and its evolution characteristics. *Xinjiang Geology*, 36 (2):135~141.
- Wang Yinzhong, Xue Chunji, Liu Jiajun, Wang Jianping, Yang Juntao, Zhang Fangfang, Zhao Zenan, Zhao Yunjiang, Liu Bin. 2014. Early Carboniferous adakitic rocks in the area of the Tuwu deposit, eastern Tianshan, NW China: Slab melting and implications for porphyry copper mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103:332~349.
- Weatherley D K, Henley R W. 2013. Flash Vaporization during Earthquakes Evidenced by Gold Deposits. *Nature Geoscience*, 6 (4): 294~298.
- Wang Jingbin, Wang Yuwang and He Zhijun. 2006&. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains, NW China. *Geology in China*, 33 (3): 461~469.
- Wang Yitian, Mao Jingwen, Chen Wen, Yang Fuquan, Yang Jianmin. 2006&. Tectonic constraints on mineralization of the Kanggurtag gold belt in the Eastern Tianshan, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (1): 236~244.
- Wang Yu, Li Jingyi, Li Wenqian. 2002&. ^{40}Ar - ^{39}Ar Chronological evidence of dextral shear and tectonic evolution of the eastern Tianshan orogenic belt. *Xinjiang Geology*, 20 (4):315~319.
- Wang Lianchang, 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 Kai, Ji Wenhua, Meng Yong, Zhang Xin, Zhu Xiaohui, Li Ping. 2019&. Deformation in Eastern Tianshan Orogenic Belt: Response to the final stage of accretionary orogenesis. *Geotectonica et Metallogenesis*, 43 (5):894~910.
- Wang Bo, Chen Yan, Zhan Sheng, Shu Liangshu, Faure M, Cluzel D, Charvet J, Laurent C S. 2007. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan Belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 263 (3~4): 288~308.
- Xiao Wenjiao, Zhang Lianchang, Qin Kezhang, Sun Shu, Li Jiliang. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of Central Asia. *American Journal of Science*, 304 (4): 370~395.
- Xu Xingwang, Ma Tianlin, Sun Liqian, Cai Xinpeng. 2003. Characteristics and dynamic origin of the large-scale Jiaoluotage ductile compressional zone in the eastern Tianshan Mountains, China. *Journal of Structural Geology*, 25 (11):1901~1915.
- Xu Xingwang. 1996&. Formation and Evolution of Ductile Compressed Zone and Mineralization of Gold in Jiaoluotage, Xinjiang. Tutor: Sun Dianqing. Beijing: Doctoral dissertation, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences.
- Xu Xingwang, Ma Tianlin, Sun Liqian, Li Guishu, Zhang Xueqin, Xu Xiankang, Wu Jixiu. 1998&. Characteristics and dynamic significance of the ductile compressed zone in eastern Tianshan Mts. in Jiaoluotage area in Xinjiang Province. *Chinese Journal of Geology*, 33 (2): 147~157.
- Xue Chunji, Ji Jinsheng, Zhang Lianchang, Feng Chengyou, Yang Jianguo. 1999&. Research on isotopic chronology of Xitan gold deposit, Xinjiang. *Journal of Xi'an Engineering University*, 21 (4): 6~10.
- Yang Xingke, Ji Jinsheng, Chen Qiang, Tao Hongxiang. 1999&. Features and significance of regional ductile shear zone, Eastern Tianshan. *Xinjiang Geology*, 17 (1):55~64.
- Yang Xingke, Ji Jinsheng, Zhang Lianchang, Zeng Zhangren. 1998a&. Basic features and gold prognosis of the regional ductile shear zone in Eastern Tianshan. *Geotectonica et Metanogenia*, 22:209~218.
- Yang Xingke, Cheng Hongbing, Ji Jinsheng, Cheng Qiang, Luo Guichang. 1999b&. Analysis on gold and copper ore-forming system with collision orogeny of Eastern Tianshan. *Geotectonica et Metallogenesis*, 23 (4): 315~322.
- Zhang Lianchang, Shen Yuanchao, Ji, Jinsheng. 2003. Characteristics and genesis of Kanggur gold deposit in the Eastern Tianshan Mountains, NW China: Evidence from geology, isotope distribution and chronology. *Ore Geology Reviews*, 23 (1~2): 71~90.
- Zhang Lianchang, Xiao Wenjiao, Qin Kezhang, Ji Jinsheng, Yang Xingke. 2004. Types, geological features and geodynamic significances of gold—copper deposit in the Kanggurtag metallogenic belt, Eastern Tianshan, NW China. *International Journal of Earth Science*. 93: 224~240.
- Zhang Lianchang, Ji Jinsheng, Li Huaqin, Shen Yuanchao. 2000&. Geochemical characteristics and source of two-type ore-forming fluids

- in Kanggultage gold ore belt, East Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4):536~541.
- Zhang Zhongyi, Liu Haipeng, Fang Tonghui, Xiao Wenjin, Gao Junhui, Yang Guolong, Zheng Xiaoming, He Xinyu, Li Po, Wang Hongwei, Yang Huan, Lu Zhizhong. 2018#. The relationship between late Paleozoic tectonic evolution and gold mineralization in the Yamansu tectonic belt of East Tianshan Mountains. *Journal of Geomechanics, Proceedings of the 5th National Symposium on Ore Field Structure and Deep Prospecting Prediction*: 55.
- Zhang Zhongyi, He Xinyu, Xiao Wenjin. 2020&. Superposition of Late Paleozoic shear zones and its structural ore-controlling function in the central of Eastern Tianshan. *Mineral Exploration*, 11(11):2341~2346.
- Zhang Zhongyi, Xiao Wenjin, Zheng Xiaoming, Yang Guolong, Gao Junhui. 2022&. Composition, structure and the Late Paleozoic evolution of Kanggurtag structural belt in Eastern Tianshan. *Mineral Exploration*, 12(7):1530~1538.
- Zhang Dayu, Zhou Taofa, Yuan Feng, Fan Yu, Liu Shuai, Sun Haihuai. 2012&. Ore-forming fluids of main Au deposits in western Kangguer shear zone of Eastern Tianshan Mountains and their geological implications. *Mineral Deposits*, 31(3):555~568.
- Zhang Weifeng, Chen Huayong, Jiang Hongjun, Lu Wanjian, Liang Pei, Xu Chao, Yan Xuelu and Yang Junkai. 2017&. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of granitoids in the Duotoushan Fe—Cu deposit, Eastern Tianshan, Xinjiang: Implications on tectonic setting of Late Paleozoic magmatism. *Geotectonica et Metallogenesis*, 41(6):1171~1191.
- Zheng Jiaxing, Zhao Tongyang, Han Qiong, Li Ping, Tang Zhi, Sun Yaofeng, Liu Xin, Li Hang, Chang Can. 2017&. Volcanic zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Aqishan Formation in Eastern Tianshan Mountain and its significance. *Xinjiang Geology*, 35(4):446~454.
- Zhou Taofa, Yuan Feng, Zhang Dayu, Fan Yu, Liu Shuai, Peng Mingxing and Zhang Jiandian. 2010&. Geochronology, tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, eastern Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2):478~502.

Structural controls on gold mineralization of Late Paleozoic horizontal shear in the central of Eastern Tianshan Mountains

ZHANG Zhongyi, XIAO Wenjin, YANG Guolong, GAO Junhui

China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing, 100012

Abstract: To remain the geological underpinnings of location prognosis and exploration programs, the study on the structural controls of gold mineralization have been carry out in the southern kanggurtag structural gold belt of the central Eastern Tianshan. And a deformed flat-lying shear structure is distinguished by detailed regional structural analysis and structural examination in northern Yamansu. Removing later deformation effects suggests it resulted from a large-scale horizontal brittle ductile to ductile shear zone associated with northward layer-parallel shearing or low-angle thrust shearing ($S_1//S_0$) in the early stage of Late Paleozoic orogeny. The shear zone represents the first-order ore-controlling structure and provides a major fluid pathway for deeply sourced fluids escaping upward from subduction-zone. During the late stage of horizontal shearing, or transition from horizontal shearing to horizontal shortening resulted from two successive deformation phases in a progressive deformation event, the regional crust uplifted accompanied by the initiation of thrusting and folding. And a splay fault rising from the detachment zone had resulted in drainage and redistribution of deeply sourced fluids entrapped in detachment shear zones through fault-valve action. Ore-forming fluids upward migrate along fault, discharge and the gold deposited in secondary fracture networks to form vein-type to disseminated deposits in the hanging wall or hinge area of hanging wall anticline of fault. This is coincided with the emplacement of the quartz diorite porphyry bodies dated at 276.5 ± 2.9 Ma. The later folding and faulting play an important role on the reconstruction and preservation to the gold ore.

Keywords: Eastern Tianshan Mountains; horizontal shear zone; superposed deformation; Late Paleozoic; structural analyses

Acknowledgements: This study was supported by the Xinjiang Geological Exploration Foundation of China (T14-1-LQ12) and the project of China Geological Survey (Nos. DD20160011, DD20190011)

First author: ZHANG Zhongyi, male, born in 1969, doctor, professor senior engineer, mainly engaged in structural geology and orefield structure; Email: zy_zhang2003@sina.com

Manuscript received on: 2022-05-09; **Accepted on:** 2023-04-23; **Published online on:** 2023-05-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2023.05.015

Edited by: ZHANG Yuxu

