

辽东五龙金矿区成矿期构造过程与岩脉就位机制

肖世柳*, 朱光, 张帅, 刘程, 苏楠, 尹浩, 吴晓冬, 李云剑

合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

* 联系人, E-mail: xsy0564335@163.com

2018-07-09 收稿, 2018-08-10 修回, 2018-08-13 接受, 2018-08-30 网络版发表

国家重点研发计划重点专项(2016YFC0600102)和国家自然科学基金(41472186)资助

摘要 五龙金矿是华北克拉通东部辽东矿集区的典型代表, 属于石英脉型金矿。但是, 对于其构造控矿机制长期没有明确的认识。本次构造与年代学研究表明, 该区在早白垩世初经历了近南北向挤压, 形成了多条北东走向左行平移断裂, 及其派生的共轭剪破裂。在随后的早白垩世期间(约131~113 Ma), 该区遭受了西北西-东南东向拉伸, 形成了北东至北北东走向正断层, 并且使得前期构造复活。在此早白垩世伸展期, 五龙金矿区南部侵位了三股流岩体(131~120 Ma), 北部侵位了五龙背岩体(127~126 Ma), 而矿区内侵位了一系列闪长岩脉、花岗岩脉、花岗伟晶岩脉、煌斑岩脉、辉绿岩脉等, 前两者与含金石英脉紧密伴生。本次锆石U-Pb定年, 指示区内闪长岩脉与花岗岩脉的侵位时间为127~113 Ma, 属于伸展活动中的同构造侵位岩脉。这些早白垩世岩脉, 一方面沿着新生的北东至北北东向张裂面就位, 另一方面沿着复活的早期构造就位, 从而导致了区内多方位岩脉的共生现象。五龙金矿含金石英脉与这些同期岩脉具有类似的形成机制, 两者常呈伴生关系, 推断区内金成矿发生127~113 Ma期间, 属于华北克拉通破坏峰期形成的金矿。但是, 五龙金矿具体成矿时间还需矿石矿物直接定年的证据。

关键词 五龙金矿, 伸展活动, 岩脉就位, 锆石 U-Pb 年龄, 早白垩世

华北克拉通破坏近年来引起了国内外学者的广泛关注。在早白垩世克拉通峰期破坏中, 发育了一系列金矿, 包括由胶东-辽东-吉南矿集区构成的东金矿带和由小秦岭-熊耳山-冀北-冀东矿集区构成的西金矿带^[1]。东金矿带南部的胶东矿集区, 目前我国规模最大的金矿区。但是, 其北延的辽东矿集区仅发现了一些中、小型金矿, 能否成为我国大型金矿的接替区为大家所关注。辽东矿集区中最具代表性的五龙金矿, 是认识该区成矿背景与远景的重要对象。

五龙金矿位于辽宁省丹东市西侧, 地处华北克拉通东部(图1(a))。该金矿属于石英脉型金矿, 赋矿围岩为中侏罗世五龙花岗岩体。矿区内发育了一系列岩脉, 走向上主要为北北东、近南北与北西向, 岩性上包括闪长岩、花岗岩、煌斑岩、辉绿岩等。对于

这些岩脉的就位机制, 前人没有明确的观点。区内含金石英脉常与闪长岩脉和花岗岩脉伴生^[6-9]。一些学者据此将这些岩脉划分为成矿前的闪长岩脉、成矿期的花岗岩脉以及成矿后的煌斑岩脉和辉绿岩脉^[10,11]。前人报道过区内闪长岩脉的两个原位微区锆石U-Pb年龄, 分别为121和117 Ma, 代表了侵位时代^[3]。但是, 区内其他岩脉的侵位时代仍不清楚。关于成矿时代, 多数学者依据地质关系认为成矿发生于区内三股流岩体侵位(131~120 Ma^[3])之后的燕山期^[6-11]。依据石英流体包裹体Rb-Sr定年, 区内成矿时代被限定为120~112 Ma^[12-14]。关于五龙金矿的构造控矿机制, 也就是岩脉与石英脉发育的构造控制规律, 研究程度不高, 认识上分歧较大。一种观点认为, 矿区内先后经历了早阶段南北向挤压与晚阶段沿北北东方向

引用格式: 肖世柳, 朱光, 张帅, 等. 辽东五龙金矿区成矿期构造过程与岩脉就位机制. 科学通报, 2018, 63: 3022-3036

Xiao S Y, Zhu G, Zhang S, et al. Structural processes and dike emplacement mechanism in the Wulong gold field, eastern Liaoning (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 3022-3036, doi: 10.1360/N972018-00682

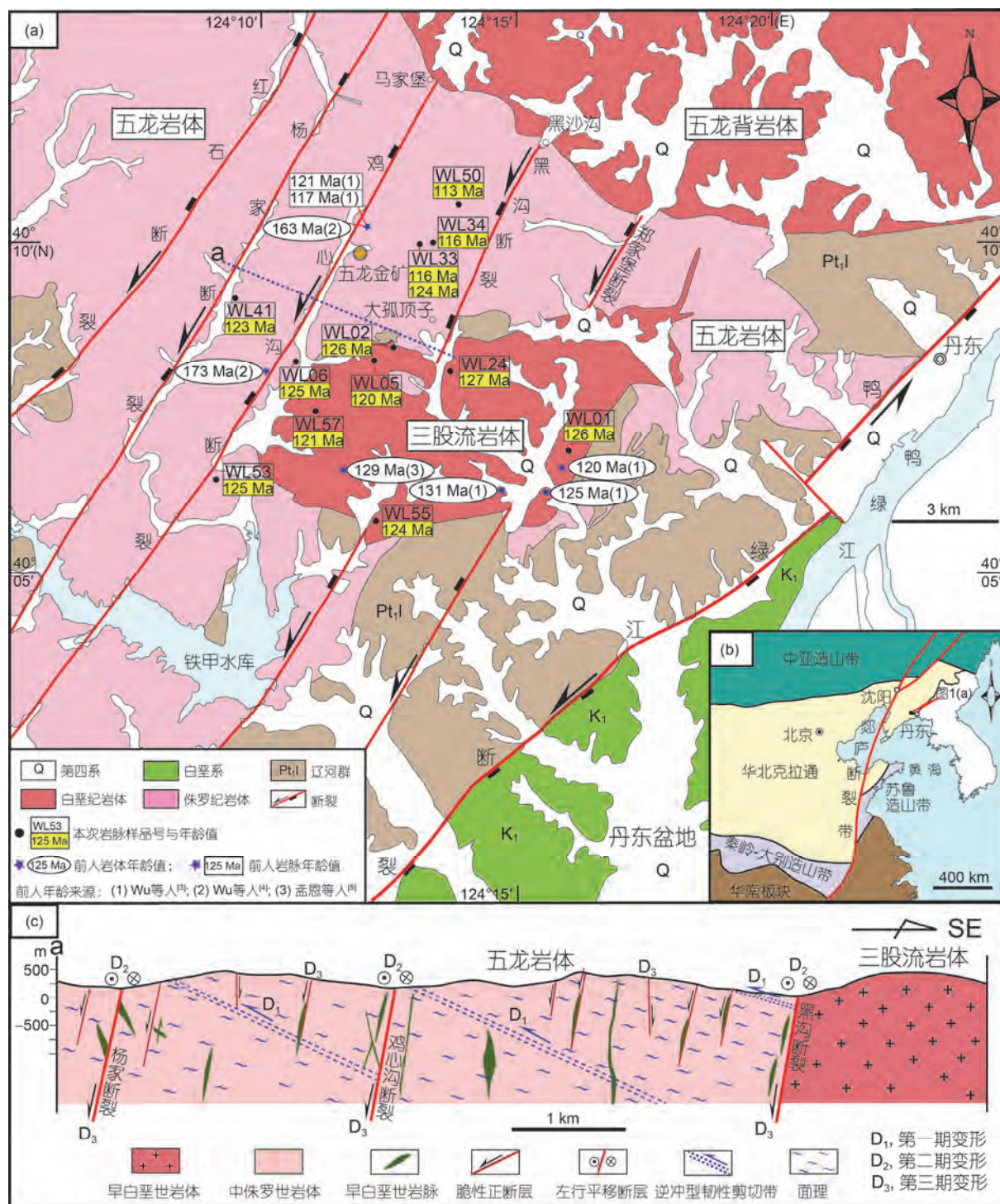


图1 五龙金矿区域地质图(a)及其大地构造简图(b), 据文献[2]修改与剖面图(c)

Figure 1 Geological map of the Wulong gold field (a), tectonic sketch map (b) (modified after Ref. [2]) and a cross-section (c)

的左行剪切^[11]。早阶段主要形成东西走向逆冲断裂与北东、北西向共轭剪切断裂;而晚阶段一方面形成北北东向左行平移断层,另一方面复活早期断裂。这

两阶段形成的断裂就成为区内后期金矿脉的容矿构造。另一种观点认为,区内成矿发生在北北东向断裂左行平移活动之中,同时伴生南北向与北西向共轭

断裂或节理,相应就充填了这3个方位的含金石英脉^[7].还有一种观点认为^[8,9],区内先在南北向挤压中形成北东与北西向共轭平移断层;继而闪长岩脉沿着这两组断层充填,伴生含金石英脉;随后又发育了南北向的正断层与花岗岩脉.前人这些构造演化的观点,皆没有明确的时代限定,也没有实测的应力场数据支持.

基于上述背景,本次工作对五龙金矿的构造控矿机制与岩脉发育规律进行了详细的调查与研究.通过野外观察与测量及室内分析,明确了与成矿相关的构造演化过程,查清了各演化阶段所发育的构造特征,恢复了各阶段的区域应力场.工作中还对区内岩脉进行了系统的观测,开展了锆石U-Pb定年,限定了闪长岩脉与花岗岩脉的侵位时代.在此基础上,综合分析了岩脉侵位及相应金成矿的构造控制机制.本次工作的结果,为正确认识五龙金矿的构造控矿机制、成矿时代及形成背景提供了重要的信息.

1 区域地质背景

辽东矿集区所在的华北克拉通,是世界上古老的克拉通之一(图1(b))^[2].该克拉通早期经历过多个阶段的陆壳生长与微陆块拼合^[15],最终东部和西部陆块在~1.85 Ga沿着中部造山带拼贴,从而形成了克拉通统一基底^[2,16,17].华北克拉通至此以后进入了稳定的克拉通阶段,发育了中元古代至古生代沉积盖层.

进入三叠纪,华北克拉通北部的中亚造山带经历了增生造山作用,而南部经历了与华南板块的碰撞,从而抬升成陆,并在克拉通边缘出现了缩短变形^[18~21].受古太平洋板块俯冲作用影响,华北克拉通在晚侏罗世初与早白垩世初又分别经历了两期挤压变形事件^[22~27],分别称为燕山运动A幕及B幕^[28].其中燕山运动A幕以形成北东走向的缩短变形构造为主,而燕山运动B幕则主要形成北东走向的左行平移断层及近东西走向缩短变形构造^[26,27,29~32].进入晚中生代,华北克拉通东部发生了破坏,峰期为早白垩世^[33].这一早白垩世峰期破坏,发生在区域伸展背景下,不但导致了强烈的岩浆活动,还形成了一系列伸展盆地及变质核杂岩^[3,4,34~36].华北克拉通破坏型金矿就是在此峰期强烈伸展与岩浆活动背景下形成的^[1].

五龙金矿区出露的岩石包括变质岩与侵入岩(图1(a)).变质岩仅零星出露在矿区南部,属于早元古代

辽河群,为一套中等程度变质的火山-沉积岩^[17,37~39].矿区内大面积出露的是中生代侵入岩.五龙金矿主体产于五龙岩体内.该岩体为粗粒二长花岗岩,已获得锆石U-Pb年龄为 173 ± 6 和 163 ± 7 Ma^[4],表明其为中侏罗世侵位的岩体.五龙岩体南部发育三股流岩体,已获得锆石U-Pb年龄为 131 ± 2 , 129 ± 1 , 125 ± 3 和 120 ± 2 Ma^[3,5],为早白垩世侵位的复式岩体.三股流岩体中心相为似斑状花岗岩、黑云母花岗岩和黑云母角闪石花岗岩,边缘相为花岗闪长岩和石英二长闪长岩^[10,40].五龙岩体北部发育五龙背花岗闪长岩体,其锆石U-Pb年龄为 127 ± 5 和 125.8 ± 0.7 Ma^[3],也属于早白垩世岩体.

五龙金矿区岩脉十分发育,岩性上包括闪长岩、花岗岩、煌斑岩、辉绿岩等,以细粒和斑状结构为特征,局部可见花岗伟晶岩脉.前人对其中两个闪长岩脉进行过锆石U-Pb定年,年龄值为 121 ± 4 和 117 ± 7 Ma^[3],指示为早白垩世中期侵位的岩脉.但其他类型岩脉的锆石U-Pb定年数据未见报道.在空间分布上,这些岩脉多围绕着三股流岩体与五龙背岩体展布,并在这两个岩体之间的五龙金矿区最为发育.在三股流岩体与五龙背岩体内部,这些岩脉也局部发育.

区内早白垩世三股流岩体与五龙背岩体普遍没有卷入韧性变形,同期岩脉内也普遍未见韧性变形.但是,中侏罗世五龙岩体却呈现为透入性的韧性变形,露头上广泛可见片麻状构造.前人研究表明^[41],五龙岩体内变形面理呈北东-南西走向,多向南东缓倾,优势倾角为 $20^{\circ}\sim30^{\circ}$;矿物拉伸线理多向南东东缓倾.各类运动学指向标志显示,该期韧性变形呈现为上盘向北西西逆冲^[41].这期韧性变形中,局部应变集中处还发育了北东走向、向南东缓倾的逆冲型韧性剪切带(图1(c)).由此可见,五龙岩体所卷入的这期韧性变形,是西北西-东南东向挤压的结果,与华北克拉通燕山运动A幕构造相吻合.

区内叠加在上述韧性逆冲构造之上的是北东走向的脆性断裂.研究区东侧发育了大型的北东向鸭绿江断裂带(图1(a)).该断裂带为早白垩世初左行平移活动的产物^[42],随后的伸展活动控制发育了一系列早白垩世断陷盆地,包括研究区东侧的丹东盆地.在五龙金矿区一带,发育了五条北东走向的脆性平移断层,自东向西分别为郑家堡断裂、黑沟断裂、鸡心沟断裂、杨家断裂与红石断裂(图1(a)).前人多认为

这些北东向断裂为左行平移断裂^[7-9,11],但展示的构造证据十分有限。

五龙金矿发育于五龙背岩体与三股流岩体之间的五龙岩体内,金矿化集中分布在北东向鸡心沟断裂东侧。该金矿区发育了3个北北东向展布的矿化带(总宽达2.5 km),西带发育于鸡心沟断裂东盘(下盘),中带与东带沿着两条大型北北东向花岗岩脉及其两侧分布^[8]。各矿化带内以石英脉型金矿为主,与闪长

岩脉和花岗岩脉紧密伴生,局部岩脉破碎带内也出现蚀变岩型金矿^[8](图2(a))。这些矿脉以高角度陡倾为特征,走向主要为北北东至北东向与近南北向,少数为北西向,与区内花岗岩脉具有类似的产状变化规律。

2 北东向平移断裂特征

北东走向的郑家堡断裂、黑沟断裂、鸡心沟断裂、

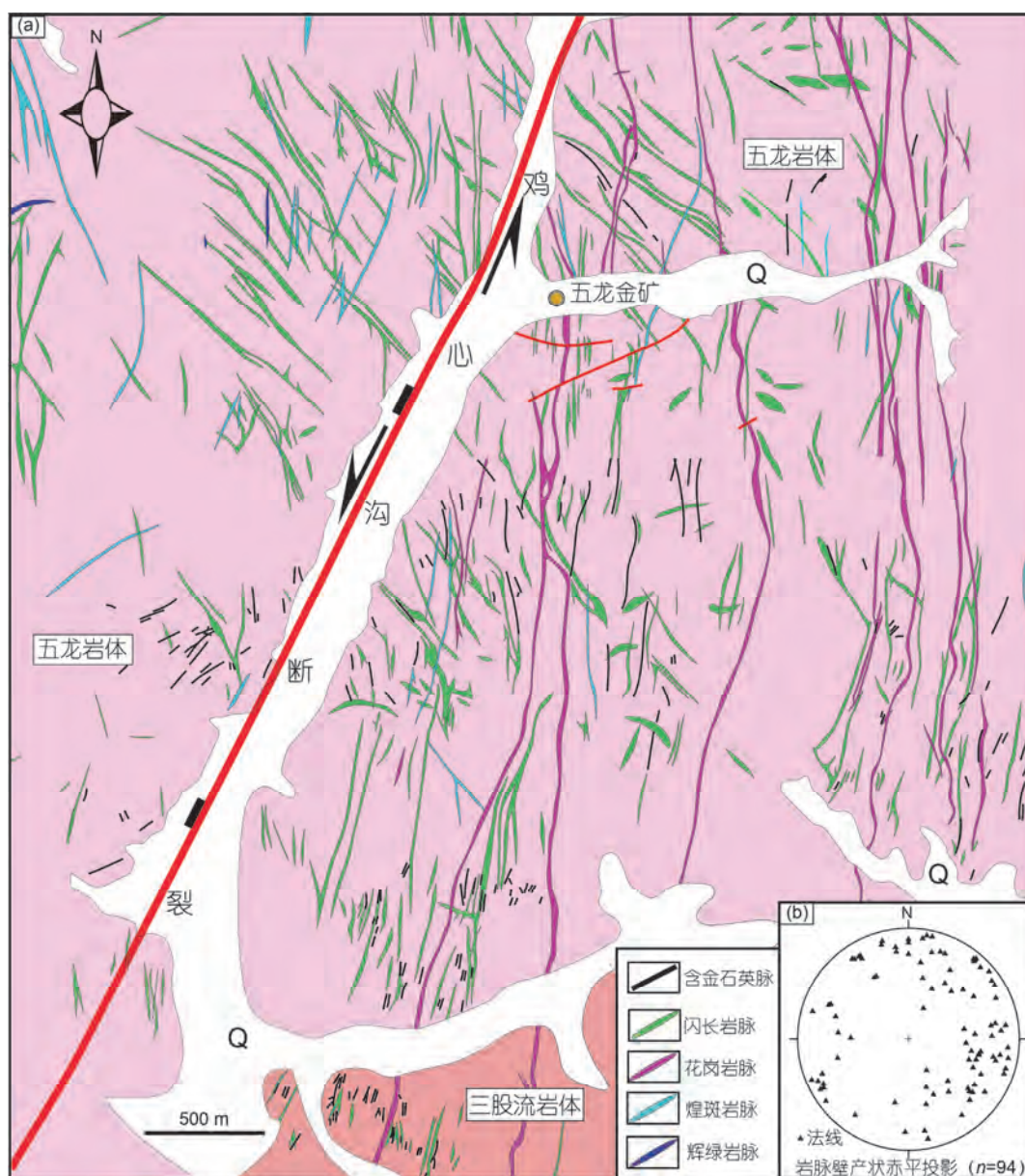


图2 五龙金矿区岩脉与含金石英脉平面图(a,据文献[43]修改)及脉壁产状赤平投影(b)

Figure 2 Planar map showing igneous dikes and auriferous quartz vein in the Wulong gold field (a) (modified after Ref. [43]) and stereograms of the dike attitudes (b)

杨家断裂与红石断裂(图1(a)), 构成了五龙金矿区周边最为突出的脆性断裂构造. 这5条断裂相互平行展布, 各自相距2~4 km. 它们皆发育在中侏罗世五龙岩体及其围岩的辽河群内, 并且切割岩体内透入性的韧性变形构造. 但是, 这些断裂皆不切入早白垩世三股流岩体与五龙背岩体.

五龙金矿位于北东走向的鸡心沟断裂与黑沟断裂之间. 本次工作中, 重点对这两条断裂及其西侧的杨家断裂开展了详细的野外调查. 鸡心沟断裂是区内最主要的控矿断裂, 区内金矿脉主要发育于该断裂东侧(下盘), 其紧邻的下盘直接发育了该区最重要的西成矿带. 该断裂出露在铁甲水库以北, 向北延伸至马家堡附近, 中止在五龙岩体与五龙背岩体接触带上. 该断层走向 20° ~ 30° , 倾向北西, 倾角为 70° ~ 80° . 野外可见该断裂在五龙岩体内形成的断裂角砾岩带、断层劈理带, 总宽约3~5 m. 在陡立的断面上, 可见平缓的擦痕, 向北东或南西缓倾, 倾伏角一般为 20° 左右, 指示了第一期断层活动痕迹. 依据断面上擦痕、阶步以及派生的共轭里德剪切(分别为大、小角度相交的 R' 和 R 剪切), 均指示该断裂形成于左行剪切活动.

黑沟断裂位于南部三股流岩体与北部五龙背岩体之间, 发育在五龙岩体内. 断裂的南端出现在大孤顶子东侧, 北端至黑沙沟, 均中止在五龙岩体与上述两个早白垩世岩体的接触带上. 野外观测表明, 黑沟断裂走向 $NE30^{\circ}$ 左右, 也向NW陡倾, 倾角为 55° ~ 80° . 断层面上擦痕多向北东缓倾, 倾伏角一般为 5° ~ 15° . 露头上的断层擦痕、阶步及派生的里德剪切也指示左行平移运动, 并具有少量的逆冲分量. 这些现象显示, 该断裂形成于压扭性活动之中.

区内杨家断裂出露在铁甲水库以北, 向北在五龙岩体内延伸至与五龙背岩体接触带上. 该断层走向 10° ~ 35° , 也向北西陡倾, 倾角为 50° ~ 75° . 野外露头上可见该断裂的角砾岩带与劈理带, 出露总宽度4~6 m. 在此断裂带内, 断面上发育向北东或南西缓倾的擦痕, 倾伏角为 5° ~ 15° . 野外所见擦痕、阶步及里德剪切等运动学指向标志, 也指示了杨家断裂的左行平移活动.

本次野外工作中, 还对郑家堡断裂与红石断裂进行了观察, 发现总体与上述3条断裂具有相似的几何学与运动学特征. 总之, 五龙金矿周边这些北东断层, 走向优势方位为 30° , 一致向北西陡倾, 倾角多

大于 70° . 这些断层发育平缓的擦痕, 倾伏角多小于 15° . 各类运动学标志表明, 它们形成于左行平移活动中(图S1(a)和(b)), 具有压扭性成因特征.

野外工作中发现, 这些北东走向的左行平移断层旁侧, 普遍派生有共轭里德剪切, 呈现为剪节理或小型的平移断层. 其中一组剪切破裂(R)走向为北北西-南南东至近南北向, 为左行剪切; 而另一组剪破裂(R')为北西西-南东东向, 为右行剪切. 远离这些北东走向左行平移断层, 还能见到北西-南东走向的右行剪节理或小型平移断层, 可能为区域应力作用下的共轭(相对于北东向平移断层)破裂产物.

3 正断层特征

在五龙金矿区, 野外可见的另一期脆性断层为正断层. 上述北东走向的郑家堡断裂、黑沟断裂、鸡心沟断裂、杨家断裂与红石断裂, 均可见它们的走滑断面上叠加有第二期的正断层活动. 在这些左行平移断裂面上, 常可见第一期近水平擦痕被第二期近倾向的擦痕所叠加(图S1(c)和(d)). 第二期的运动学标志(擦痕、阶步、里德剪切)均指示上盘下降的正断层活动. 另外, 研究区上述北西至北西西走向右行平移断层面上, 局部也可见叠加晚期的张扭性活动, 应是上述第二期正断层活动的另一种表现.

研究区还常见一系列新生的正断层. 它们不但发育在中侏罗世五龙岩体内(图S1(e)), 还出现在附近的早白垩世三股流岩体与五龙背岩体内(图S1(f)). 这些正断层一般规模不大, 走向为北东-南南向至近南北向, 产状多较陡($>55^{\circ}$), 倾向北西或南东, 并呈现为倾向擦痕(侧伏角 $>60^{\circ}$). 断面上的擦痕、阶步与里德剪切均指示它们为上盘下降的正断层活动.

4 岩脉特征

密集发育的岩脉是五龙金矿区重要的地质特征(图2(a)). 这些岩脉的岩性多样, 包括闪长岩脉、花岗(斑)岩脉、花岗伟晶岩脉、煌斑岩脉、辉绿岩脉等. 在数量上, 区内以闪长岩脉最发育, 其次为花岗岩脉, 而煌斑岩脉与辉绿岩脉相对较少. 在空间上, 这些岩脉围绕着早白垩世三股流岩体与五龙背岩体分布, 多侵位在中侏罗世五龙岩体内. 但是, 在三股流岩体与五龙背岩体内部, 也发育有这些岩脉, 只是数量上相对减少. 区内这些岩脉的宽度一般为几十厘米至几米, 最长者可被追踪达3 km左右. 区内一般北东

走向花岗岩脉延伸较长,其次为闪长岩脉、煌斑岩脉与辉绿岩脉相对较短。本次野外观察发现,区内北东至北北东走向岩脉普遍宽于北西走向岩脉。

五龙金矿区岩脉倾角一般较大,优势倾角约 60° 。这些岩脉的走向多变,主要走向包括北东向、近南北向与北西向,少数为近东西向(图2(a))。闪长岩脉多为北西与近南北走向,而大型的花岗岩脉主要为北北东与近南北走向。在统计上,区内以北北东走向岩脉最多。

五龙金矿区岩脉常与石英脉伴生。区内含金石英脉主要赋存在闪长岩脉与花岗岩脉内,而与煌斑岩脉和辉绿岩脉伴生的较少^[6-9]。区内金矿开采中发现,一些部位岩脉与石英脉的发育宽度互为消长,明显指示了同期发育的特征^[11]。值得指出的是,区内石英脉还发育在不同方位的节理与断层带内,特别是上述北东走向断层带内常发育与伸展活动相伴生的石英脉。

区内各种岩脉的脉壁,作为构造薄弱面,常被利用为断层活动(图S1(g)和(h))。野外调查中发现,北东、北北东与近南北走向的脉壁,常被利用为正断层活动,发育倾向至近倾向的擦痕(图S1(h))。它们的构造特征及运动学与区内岩体中发育的同方位正断层相似。对于区内北西至北西西走向脉壁,可见张扭性活动现象,表现为左行正断层运动(图S1(g))。

5 应力场

断面和擦痕不但记录了脆性断层活动的运动学,还可被用来反演断层活动时的应力场。利用断面和擦痕反演应力场,是目前针对脆性断层最为有效而便捷的方法。该方法基于断层面上平均滑动方向(剪切方向)与最大剪应力平行这一假设^[44,45],采用^[46,47]提出的古应力场反演方法,应用应力场反演软件^[48]计算出3个主应力(σ_1 , σ_2 和 σ_3)方向。该方法既适用于新生的断层,也适用于复活的老断层。在野外工作中,当确定了一期断层运动学后,实测至少8组断面与擦痕产状^[49],包括派生的里德剪切产状。然后在室内应用上述应力场反演软件,不但计算出3个主应力的空间方位,还得到相应的误差角(ANG)。该误差角为剪应力与实测滑动方向(擦痕)之间偏角的平均值,其 $\leq 22.5^{\circ}$ 时才被认为较为可靠而可以应用^[50]。本次工作所反演数据的ANG皆小于 16° (表S1),指示反演结果是可信的。

5.1 左行平移活动应力场

对于五龙金矿区的北东向左行平移断裂,为了获得它们活动时的应力场,本次选择了其中的鸡心沟断裂、杨家断裂和黑沟断裂进行了系统的断面与擦痕产状实测(包括它们派生的里德剪切)。测量点处,这些左行平移断层切割的岩石皆为五龙岩体。本次工作中,在野外18个平移断层出露点上(图3(a)),实测了断层擦痕数据,进而在室内计算出了各自的应力场(图3(b);表S1)。反演结果显示,研究区各观测点所获得的左行平移断裂活动时的应力场相互吻合,指示为同一期活动特征。所反演的应力场,均为平移断层型或压扭型,呈现为最大与最小主应力轴(σ_1 , σ_3)近水平,中间主应力轴(σ_2)近直立(图3(b))。这些反演结果指示,挤压方位(σ_1)介于NEN-SWS至NWN-SES向,优势方位为近南北方向(图3(b))。这表明,在近南北向挤压作用下,五龙金矿区周边形成了一系列北东走向的左行平移断裂,并派生北北西至近南北向与北西至北西西向共轭剪切破裂,伴生北西走向的右行平移断层。

5.2 正断层活动应力场

研究区正断层活动期间,一方面是利用早期左行平移断裂复活,另一方面发育新生的正断层,还有沿不同方位岩脉壁的活动。这些伸展期断层所切割岩石包括五龙岩体、三股流岩体与岩脉。本次工作中,对于这三类正断层都进行了断面与擦痕的系统测量,共获得了24个观察点(图3(a))的断层擦痕数据。经过应力场反演(图3(d));表S1),显示它们多为正断层型应力场,即 σ_3 与 σ_2 近水平,而 σ_1 近直立,指示为区域伸展的应力状态。应力场反演结果指示,拉张方位(σ_3)介于WNW-ESE至NW-SE向,优势方位为WNW-ESE方向(图3(d))。这表明,在五龙金矿区该期正断层活动发生在区域WNW-ESE拉张中。值得指出的是,本次工作中从该期北东至近南北走向正断层(张性)擦痕数据反演的应力场,与北西至近东西走向张扭性断层反演的结果相吻合(图3(d)),指示这些不同方位断层(图3(e))的伸展活动属于同一期。

6 岩脉锆石U-Pb定年

为了确定研究区岩脉的侵位时间,本次工作中采集了岩脉样品进行锆石U-Pb定年。其中13个闪长岩脉、花岗岩脉与花岗伟晶岩脉样品成功地给出了侵

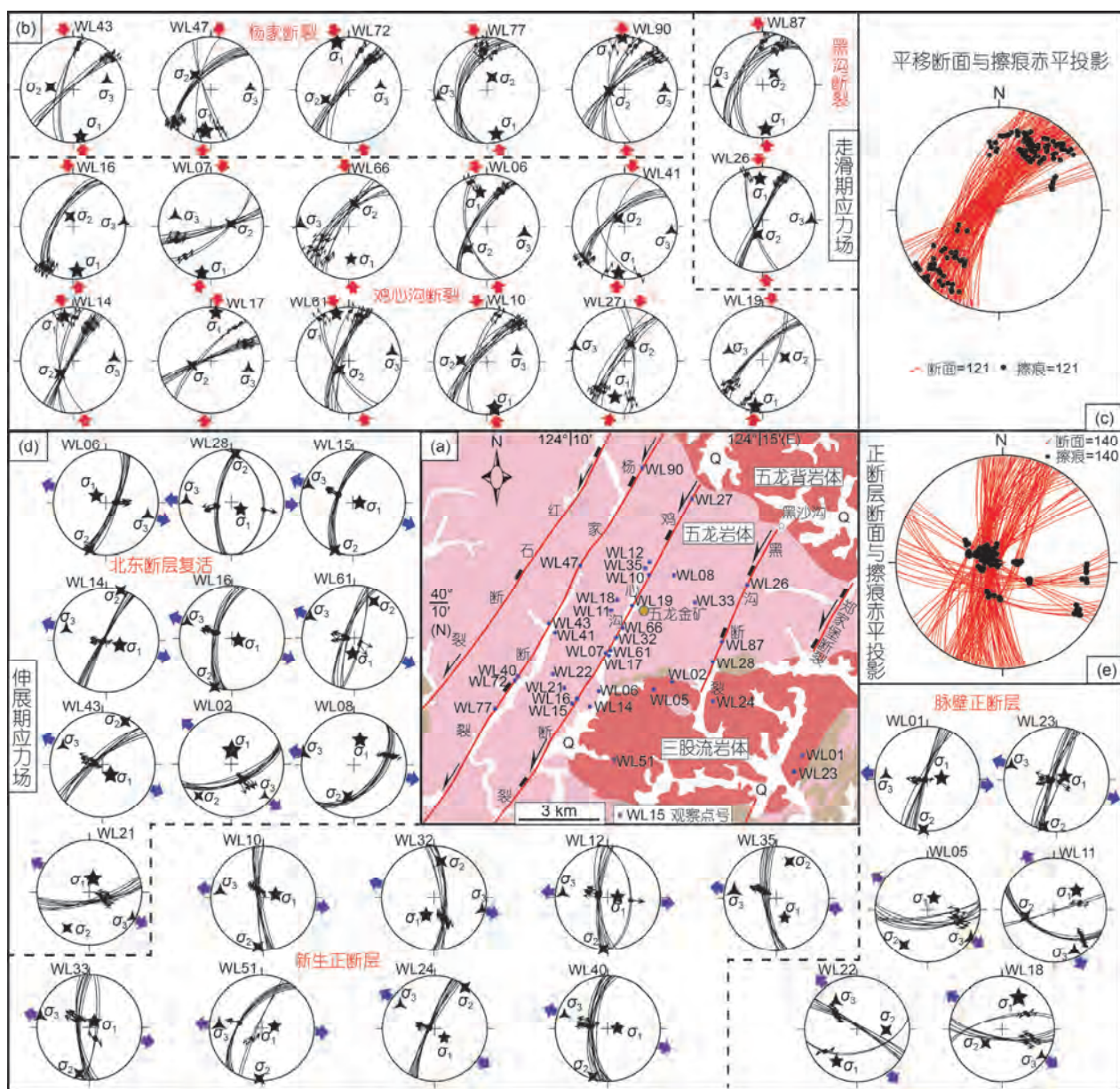


图3 五龙金矿区断层擦痕反演应力场结果. (a) 观测点平面位置图; (b) 走滑期应力场; (c) 走滑期平移断层主断面及擦痕赤平投影图; (d) 伸展期应力场; (e) 伸展期张性与张扭性断面及擦痕赤平投影图

Figure 3 Stress field computed from fault-slip data from the Wulong gold field. (a) Location map for the observation sites; (b) stress field for the strike-slip stage; (c) stereograms of the strike-slip fault planes and striations; (d) stress field for the extensional stage; (e) stereograms of the tensile and transtensional fault planes and striations

位时间, 而煌斑岩与辉绿岩脉样品均未能被分选出新生锆石.

6.1 测试方法

对所采集的岩脉样品, 经过破碎(河北省廊坊欣航测绘院完成)后采用浮选、电磁选等方法分选出单颗粒锆石. 然后, 在双目显微镜下手工挑选出晶型较

为完好的锆石颗粒, 制成环氧树脂样品靶, 再进行抛光处理, 随后进行背散射照相以及阴极发光照相. 锆石U-Pb定年在合肥工业大学资源与环境工程学院质谱实验室完成. 锆石原位U-Pb同位素定年采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)分析, 激光剥蚀系统采用波长193 nm激光器的GEOLAS, 激光脉冲频率6 Hz, 能量密度10 MJ/cm², 剥蚀束斑直

径32 μm , 测试质谱仪为Agilent 7500a. 采用NIST SRM 610作为元素外标, ^{91}Zr 为内标校正,以91500为内标进行同位素分馏校正,以锆石标样Plesovice作为同位素监控样. 本次实验测定的锆石标样结果与误差和推荐值一致,应为可靠数据. 锆石测定点的同位素比值、U-Pb表面年龄以及元素含量的计算采用ICPMSDataCal 9.6程序完成,并且使用Andersen^[51]方法进行普通铅校正. 最后选取谐和度大于90%的数据,应用Isoplot 4.1进行加权平均年龄的计算以及谐和图的绘制(图S2,表S2). 对于本次中生代的岩脉样品,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄.

6.2 定年结果

本次所定年岩脉样品,各自具有一组年轻的锆石. 这些年轻的锆石,呈半自形-自形长柱或短柱状,长短轴比大多在3:1~1:1之间. 它们的CL图像皆显示了岩浆振荡生长环带. 这些较年轻锆石的Th/U比值均大于0.1(表S2). 这些特征指示,它们为岩浆锆石成因. 通过它们加权平均所获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄,代表了各岩脉岩石的结晶或侵位年龄(图S2,表1).

本次定年的7个闪长岩脉样品(WL24, WL34-2, WL06-1, WL33-4, WL55, WL41, WL53-1),给出的加权平均年龄值分别为127.1 $\pm$ 2.6, 121.3 $\pm$ 3.3, 124.7 $\pm$ 2.6, 124.4 $\pm$ 2.8, 124.1 $\pm$ 3.9, 123.1 $\pm$ 2.3和112.9 $\pm$ 2.9 Ma (图

S2,表1). 这些年龄值代表了岩脉的结晶时间,显示皆为早白垩世侵位.

本次定年的5个花岗岩脉样品(WL01-4, WL02-2, WL05-3, WL33-1, WL50),给出的加权平均年龄值分别为125.7 $\pm$ 2.9, 125.6 $\pm$ 2.0, 120.2 $\pm$ 2.3, 115.8 $\pm$ 1.2和112.9 $\pm$ 1.3 Ma (图S2;表1). 这些年龄值也代表了岩脉的结晶时间,均属于早白垩世.

本次定年仅获得了一个花岗伟晶岩脉样品的锆石U-Pb年龄. 该样品(WL57)最年轻一组锆石给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为121.1 $\pm$ 1.9 Ma (图S2,表1),也指示了早白垩世结晶或侵位时间.

总之,本次定年结果表明,区内闪长岩脉的侵位时间为127~113 Ma,花岗岩脉的侵位时间为126~113 Ma,而花岗伟晶岩脉只有一个121 Ma的侵位年龄. 由此对比可见,区内闪长岩脉与花岗岩脉的开始侵位时间基本一致(考虑到定年误差),而结束时间也一致. 前人所报道的该区两个闪长岩脉锆石U-Pb年龄值121~117 Ma^[3]与本次定年结果相吻合,从而相互验证.

7 问题讨论

7.1 早白垩世构造演化史

五龙金矿区位于五龙岩体内. 这一粗粒二长花岗岩体,侵位时代为中侏罗世173~163 Ma^[4]. 五龙岩

表1 五龙金矿区岩脉特征与锆石LA-ICP-MS U-Pb定年结果

Table 1 Attitudes of dikes in the Wulong gold field and their LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results

样品号	纬度(N)	经度(E)	定年对象	脉壁倾向与倾角(走向)	结晶年龄(Ma)
WL24	40°07'51.7"	124°13'31.5"	闪长岩脉	237° $\angle$ 70°(NW-SE)	127.1 $\pm$ 2.6
WL34-2	40°09'50.8"	124°12'45.7"	闪长岩脉	113° $\angle$ 76°(NE-SW)	121.3 $\pm$ 3.3
WL06-1	40°08'04.2"	124°10'39.7"	闪长岩脉	320° $\angle$ 78°(NE-SW)	124.7 $\pm$ 2.6
WL33-4	40°09'48.0"	124°12'41.3"	闪长岩脉	265° $\angle$ 80°(N-S)	124.4 $\pm$ 2.8
WL55	40°05'25.9"	124°11'55.0"	闪长岩脉	297° $\angle$ 72°(NNE-SSW)	124.1 $\pm$ 3.9
WL41	40°09'0.4"	124°09'23.7"	闪长岩脉	228° $\angle$ 67°(NW-SE)	123.1 $\pm$ 2.3
WL53-1	40°06'31.6"	124°08'58.7"	闪长岩脉	310° $\angle$ 70°(NE-SW)	112.9 $\pm$ 2.9
WL01-4	40°06'28.7"	124°15'46.2"	花岗岩脉	211° $\angle$ 72°(NW-SE)	125.7 $\pm$ 2.9
WL02-2	40°08'14.9"	124°12'30.2"	花岗岩脉	275° $\angle$ 84°(N-S)	125.6 $\pm$ 2.0
WL05-3	40°08'01.8"	124°11'57.8"	花岗岩脉	65° $\angle$ 82°(NW-SE)	120.2 $\pm$ 2.3
WL33-1	40°09'48.0"	124°12'41.3"	花岗岩脉	305° $\angle$ 80°(NE-SW)	115.8 $\pm$ 1.2
WL50	40°10'01.4"	124°12'59.4"	花岗岩脉	95° $\angle$ 65°(N-S)	112.9 $\pm$ 1.3
WL57	40°07'17.3"	124°10'47"	花岗伟晶岩脉	12° $\angle$ 61°(NNW-SEE)	121.1 $\pm$ 1.9

体侵位之后,经历了西北西-东南东向缩短变形,发育了透入性的、北东-南西走向的片麻理(变形面理)及局部的逆冲型韧性剪切带^[41].本次工作定义该期变形属于(五龙岩体侵位后)第一期变形(D_1).前人及本次野外调查表明,研究区 D_1 变形构造没有进入早白垩世的三股流岩体与五龙背岩体,指示发生于这两个岩体侵位之前.依据与华北克拉通北部中生代缩短变形事件对比,推断五龙岩体所记录的这期韧性变形(D_1)可能发生于晚侏罗世初,属于燕山运动A幕^[22,25,28,32].

五龙岩体在上述韧性变形之中或之后发生了抬升,在脆性构造域叠加了北东走向的左行平移断裂.五龙岩体内这期变形属于第二期变形(D_2).研究区所发育的北东向郑家堡断裂、黑沟断裂、鸡心沟断裂、杨家断裂与红石断裂,均为 D_2 变形的产物,切割岩体内早期的韧性构造.本次断层擦痕应力场反演表明,这期(D_2)构造活动是区域近南北向挤压作用的结果.这些左行平移断裂皆不延伸进入早白垩世三股流岩体和五龙背岩体,表明断裂形成时代早于131 Ma.华北克拉通在燕山运动A幕之后,接着又发生了B幕事件,为近南北向挤压作用,时间为早白垩世初^[26,27,29~32].区域对比发现,北北东走向的郯庐断裂带,其南段与北段的依兰-伊通断裂和敦化-密山断裂也在早白垩世初发生了左行平移活动^[32,52,53].近年来研究表明,研究区东侧的北东走向鸭绿江断裂,也形成于早白垩世初的左行平移,在随后的早白垩世期间转变为伸展活动^[42].据此区域对比可以推断,五龙金矿区在近南北向挤压下所形成的一系列北东向左行平移断裂,应形成于早白垩世初(145~131 Ma),与区域上燕山运动B幕构造相吻合,也与郯庐断裂带同期左行平移活动一致.

野外观察表明,上述北东向左行平移断裂活动之后,又叠加了一期正断层活动,表现为断层面上的两期擦痕叠加.该期变形在五龙岩体内属于第三期变形(D_3).这期变形不但影响中侏罗世五龙岩体,还影响早白垩世三股流岩体和五龙背岩体内,形成了一系列北东至近南北走向的正断层(包括充填的岩脉).研究区早白垩世岩脉(127~113 Ma)的脉壁,常被应用为正断层或张扭性断层活动,指示岩脉的侵位是发生在伸展活动之中.这些正断层与张扭性断层擦痕应力场反演表明(图3(d)),伸展活动是发生在统一的西北西-东南东向拉张之中.研究区侵入岩与

构造之间关系指示,这些早白垩世岩体与岩脉均是在伸展活动中侵位的,属于同伸展岩浆活动.这些侵入岩的同位素年龄,指示伸展活动时限为131~113 Ma.众所周知,华北克拉通峰期破坏出现在早白垩世期间,当时在克拉通东部出现了强烈的伸展与岩浆活动,区域拉张方向也为西北西-东南东向^[3,4,27,32,35].显然,五龙金矿区早白垩世期间的强烈伸展与岩浆活动,与华北克拉通东部的峰期破坏相吻合.

总之,五龙金矿区在早白垩世初(145~131 Ma)经历了近南北向挤压(D_2),形成了一系列北东向左行平移断层.在随后的早白垩世期间(131~113 Ma,结束时间可能还偏晚),该区转变为伸展背景,在西北西-东南东向拉张作用下发生了强烈的伸展与岩浆活动(D_3).

7.2 岩脉就位机制

研究区的岩脉包括闪长岩、花岗岩、花岗伟晶岩、煌斑岩、辉绿岩等.它们在空间上以五龙背岩体与三股流岩体的外围最为发育,特别是这两岩体之间的五龙岩体内(图2(a)).在这两个早白垩世岩体内部,也局部发育上述岩脉.本次及前人定年结果指示^[3](表1),区内闪长岩脉与花岗岩脉的侵位时间为127~113 Ma,与五龙背岩体127~126 Ma^[3]及三股流岩体的侵位时间131~120 Ma^[3,5]基本吻合,指示为同一期岩浆活动产物.

岩脉的就位与张裂脉形成具有相似之处,所不同的是前者为岩浆充填与冷却,而后者为流体充填与结晶.岩脉优先充填的空间是新生的或先存的破裂面,特别是正在活动的张裂面与张扭面.在伸展活动中,均质岩石内(如岩体)新生的张裂面或正断层,其走向垂直于拉张方向,断面上显示倾向擦痕,属于正向拉张.对于复活的先存破裂面,若其走向垂直于拉张方向,也发生正向拉张;若斜交于拉张方向,则发生斜向拉张,显示张扭性活动与斜向擦痕^[54].

五龙金矿区发育的早白垩世岩脉,均以陡立的产状为特征.这表明它们的就位与早期平缓或中等倾斜的面理(片麻理)或低角度逆冲型韧性剪切带无关.这些岩脉的另一个特征是走向多变,优势走向分别为北东-南西向、近南北向与北西-南东向(图2(a)).一种可能是,这些岩脉侵位过程中拉张方向在发生变化,从早至晚形成不同方位的张裂面,相应就位不同走向的岩脉.然而,本次定年结果显示(表1),同一

年龄岩脉的具有不同走向, 岩脉的年龄与其走向没有相关性. 野外观察也发现(图S3(a), (b)和(c)), 一方面可见辉绿岩脉分别切割较早的闪长岩脉与花岗岩脉; 另一方面不同方位的闪长岩脉与花岗岩脉相互切割, 指示这两类岩脉的方位与就位时间无关. 本次野外调查中还发现, 一些部位岩脉的侵位, 追踪早期不同方位的破裂, 呈多变的折线状产出(图S3(d)). 另外, 本次对不同走向、不同时代岩脉壁的擦痕反演应力场, 均指示了同一应力状态(图3(d)), 表明这些岩脉就位过程中应力状态没有发生变化.

本次构造与年代学研究表明, 五龙金矿区在早白垩世初经历了近南北向挤压, 发育了北东走向左行平移断层, 派生近南北向与北西向共轭剪切(图4(a)). 但是, 这一压扭性活动期间, 该区并没有伴生岩浆活动而形成岩脉或岩体. 在随后的早白垩世期间, 该区转变为西北西-东南东向拉张, 经历了强烈的伸展活动, 并伴生岩浆活动, 从而侵位了岩体与不同方位岩脉(图4(b)). 研究区在此拉张作用下, 无论是北东-北北东走向新生正断层, 还是复活的老方位正断层, 均显示为倾向擦痕, 属于正向拉张. 区内这些方位的岩脉就是沿着这些张裂面就位的(图4(b)). 这些岩脉壁上所显示的倾向擦痕也支持这一推断. 在此拉张作用下, 区内不会新生近南北、北北西与北西走向张裂面. 但是, 这些方位的先存破裂面会复活, 显示斜向擦痕与张扭性活动, 属于斜向拉张. 研究区内所发育的近南北、北北西与北西走向岩脉, 就是沿着这些复活的先存破裂面充填(图4(b)).

总之, 五龙金矿区所发育的早白垩世岩脉, 是在西北西-东南东向拉张作用下侵位的. 这些同构造岩脉沿着正在活动的张裂面或张扭性面就位. 一方面, 该区早期(早白垩世初)北东走向左行平移断层及其派生的共轭剪破裂(N-S至NNW与NW走向)的复活(张性至张扭性)控制了岩脉的就位; 另一方面新生的北东至北北东走向破裂面(张性)也控制着岩脉的就位, 从而导致该地区发育了方位多变的早白垩世岩脉(图4(b)).

7.3 成矿时代探讨

五龙金矿以石英脉型金矿为主, 仅局部出现破碎带型金矿. 前人采矿实践与综合研究表明, 该区一些含金石英脉独立发育, 而另一些却明显与闪长岩脉、花岗岩脉紧密伴生, 局部可见破碎带型金矿出现在岩脉内^[6-9]. 该地区岩脉集中出现在三股流岩体与五龙背岩体之间的五龙岩体内, 而成矿区也在这一部位, 空间关系上也指示岩脉侵位与金成矿的紧密伴生.

一些学者将五龙金矿区发育的早白垩世岩脉划分为成矿前的闪长岩脉、成矿期的花岗岩脉以及成矿后的煌斑岩脉和辉绿岩脉^[10,11]. 本次定年结果表明, 区内闪长岩脉的侵位时间为127~113 Ma, 而花岗岩脉的侵位时间为126~113 Ma (表1), 两者在误差范围内基本吻合. 野外观察也发现, 闪长岩脉与花岗岩脉互为切割, 可见闪长岩脉晚于花岗岩脉的切割现象(图S3(b)). 由此可以推断, 在127~113 Ma期间, 该区

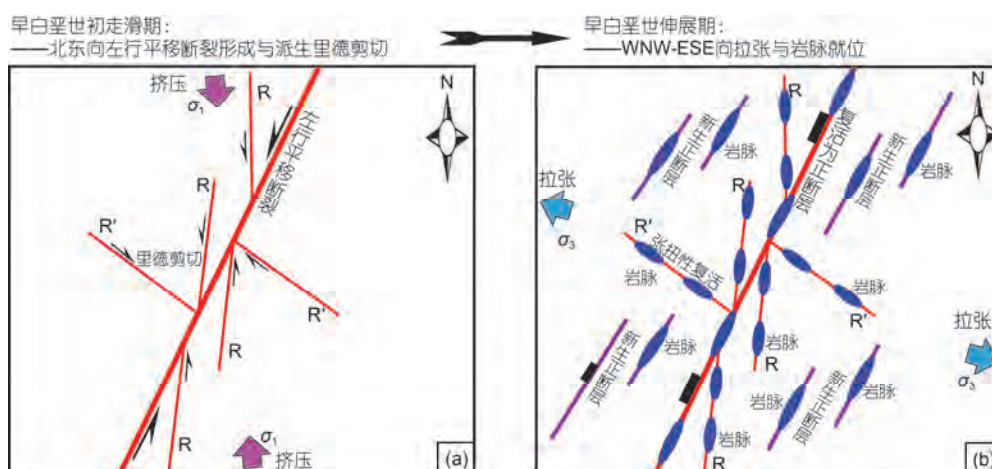


图4 五龙金矿区岩脉就位平面模式图

Figure 4 Planar model for dike emplacement in the Wulong gold field

幔源的闪长岩浆与壳源花岗岩浆同时侵位,沿着不同方位破裂面就位,从而两者互为切割.综合本次及前人成果,五龙金矿区早白垩世岩脉的侵位顺序应为闪长岩脉+花岗岩脉→煌斑岩脉→辉绿岩脉.

五龙金矿的含金石英脉不但出现在(细粒)闪长岩脉内,也出现在花岗岩脉内(包括细粒花岗岩脉、花岗斑岩脉、花岗伟晶岩脉等)^[6-9].含金石英脉与闪长岩脉、花岗岩脉的伴生现象,指示两者同期形成.特别是一些岩脉内所见石英脉与岩脉宽度相为消长现象^[11],进一步证明了两者的共生关系.如前所述,张裂脉(如石英脉)与岩脉一般具有相似的就位机制.研究区在127~113 Ma岩脉侵位期,处于伸展活动之中,遭受着西北西-东南东向拉张.在此期间,岩浆所携带的大量岩浆热液,也会在类似于岩脉就位的空间就位,包括北东至北东东走向新生与复活的张裂面,及北北西至北西走向复活的张扭面.依据五龙金矿区含金石英脉与闪长岩脉、花岗岩脉的共生关系及这两类岩脉的锆石U-Pb定年结果(表1),可以推断区内金成矿应发生在127~113 Ma期间(早白垩世中期).前人在该区获得的120~112 Ma流体包裹体Rb-Sr年龄值^[12-14],也处于本次限定的成矿时限范围内.由此可见,辽东五龙金矿形成于华北克拉通破坏峰期,并与南部的胶东金矿具有相似的成矿时代与构造背景^[11,55,56].然而,五龙金矿具体的成矿时间,还需要金矿的直接定年结果,仍需更深入的研究与分析.

8 结论

通过对五龙金矿构造与年代学的系统研究,得到主要结论如下:

(1) 五龙金矿区一系列北东走向断裂,为早白垩世初近南北向挤压作用下形成的左行平移断裂,并派生一系列共轭剪破裂.

(2) 在随后的早白垩世期间(约131~113 Ma),五龙金矿区转变为遭受西北西-东南东向拉张,一方面新生一系列北东至北北东走向正断层,另一方面使得早期断层或破裂复活.

(3) 该区在早白垩世伸展期间,侵位了三股流岩体(131~120 Ma)与五龙背岩体(127~126 Ma),以及一系列岩脉.本次对区内闪长岩脉、花岗岩脉与花岗伟晶岩脉的定年结果,指示它们的侵位时间为127~113 Ma,属于早白垩世伸展活动中同构造侵位的岩脉.该区早白垩世岩脉的侵位顺序应为闪长岩脉+花岗岩脉→煌斑岩脉→辉绿岩脉.

(4) 该区早白垩世岩脉,一方面沿着新生的北东至北北东走向张性破裂就位,另一方面沿着前期左行平移断裂与派生共轭剪破裂就位.后两者属于复活的张裂面与张扭面.

(5) 依据金矿与闪长岩脉、花岗岩脉的共生关系及本次岩脉的定年结果,推断该区金成矿发生在127~113 Ma期间,出现在华北克拉通破坏峰期,但具体的成矿时代仍需直接定年结果.

参考文献

- 1 Zhu R X, Fan H R, Li J W, et al. Decratonic gold deposits. *Sci China Earth Sci*, 2015, 45: 1153–1168 [朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等. 克拉通破坏性金矿床. *中国科学: 地球科学*, 2015, 58: 1523–1537]
- 2 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Res*, 2005, 136: 177–202
- 3 Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 233: 103–119
- 4 Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chem Geol*, 2005, 221: 127–156
- 5 Meng E, Liu F L, Shi J R, et al. Zircon U-Pb chronology, geochemistry of the previously “Pre-Sinian” intrusive rocks in Dandong area of southeastern Liaoning Province, and its tectonic implications (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2013, 29: 421–436 [孟恩, 刘福来, 施建荣, 等. 辽宁省丹东地区“前震旦纪”侵入岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义. *岩石学报*, 2013, 29: 421–436]
- 6 Lü Y F, Li J F, Li L, et al. Mineralization type of gold and its control mechanism of structure in Wulong gold deposit, Dandong, Liaoning Province (in Chinese). *GeoSci*, 1994, 8: 309–316 [吕贻峰, 李江风, 李龙, 等. 辽宁丹东五龙金矿矿化类型及其构造控制机理. *现代地质*, 1994, 8: 309–316]
- 7 Yang C F, Ji Z J, Zhang G X, et al. Restraining mechanism of veins in Wulong gold deposit on Au orebodies (in Chinese). *Geol Prospec*, 1997, 33: 7–11 [杨春福, 纪兆家, 张国宪, 等. 五龙金矿脉岩对金矿体的制约机制. *地质与勘探*, 1997, 33: 7–11]

- 8 Xiao G H, Liu T X, Zhang G X. Probing into the origin and mineralization model of Wulong gold deposit, Liaoning Province (in Chinese). *Gold*, 2003, 24: 17–21 [肖国洪, 刘铁侠, 张国宪. 辽宁五龙金矿床成因与成矿模式探讨. *黄金*, 2003, 24: 17–21]
- 9 Xiao G H, Zhang G X. Preliminary analysis of west-north fault structure ore control in Wulong gold mine, Liaoning Province (in Chinese). *Gold*, 2004, 25: 15–17 [肖国洪, 张国宪. 辽宁五龙金矿北西向断裂构造控矿浅析. *黄金*, 2004, 25: 15–17]
- 10 Peng Y D. Study on genesis of Wulong gold deposit in Liaoning Province (in Chinese). *Geol Resour*, 1994, 3: 21–31 [彭艳东. 五龙金矿成因研究. *地质与资源*, 1994, 3: 21–31]
- 11 Zhan B G. Geological characteristics and exploration regularities of Wulong gold deposit (in Chinese). *J Mater Metall*, 1994, 13: 323–329 [战宝贵. 五龙金矿地质特征及找矿规律. *材料与冶金学报*, 1994, 13: 323–329]
- 12 Wei J H, Liu C Q, Zhao Y X, et al. Time span of the major ore-forming stage of the Wulong gold deposit, Liaoning (in Chinese). *Geol Rev*, 2001, 47: 433–437 [魏俊浩, 刘丛强, 赵永鑫, 等. 辽宁五龙金矿主成矿阶段成矿持续时限. *地质评论*, 2001, 47: 433–437]
- 13 Wei J H, Liu C Q, Li Z D, et al. U-Pb, Rb-Sr isotopic dating of the diagenesis and mineralization of gold deposits in the Dandong area (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2003, 77: 113–119 [魏俊浩, 刘丛强, 李志德, 等. 论金矿床成矿年代的确定——以丹东地区成岩成矿 Rb-Sr、U-Pb 同位素年代为例. *地质学报*, 2003, 77: 113–119]
- 14 Wei J H, Liu C Q, Tang H F. Rb-Sr isotopic chronology of the Au-bearing quartz veins in gold deposits in the eastern part of North China Platform. *Chin J Geol*, 2002, 21: 374–382
- 15 Zhai M G, Santosh M. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth. *Gondwana Res*, 2013, 24: 275–297
- 16 Li S Z, Zhao G C, Sun M, et al. Are the South and North Liaohe groups of North China Craton different exotic terranes? Nd isotope constraints. *Gondwana Res*, 2006, 9: 198–208
- 17 Li S Z, Hao D F, Han Z Z, et al. Paleoproterozoic deep processes and tectono-thermal evolution in Jiao-Liao massif (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2003, 77: 328–340 [李三忠, 郝德峰, 韩宗珠, 等. 胶辽地块古元古代构造-热演化与深部过程. *岩石学报*, 2003, 77: 328–340]
- 18 Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 2003, 22: 1069–1090
- 19 Wu Y B, Zheng Y F. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in Central China. *Gondwana Res*, 2013, 23: 1402–1428
- 20 Liu Y J, Li W M, Feng Z Q, et al. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Res*, 2017, 43: 123–148
- 21 Li S Z, Kusky T M, Zhao G C, et al. Two-stage Triassic exhumation of HP-UHP terranes in the western Dabie orogen of China: Constraints from structural geology. *Tectonophysics*, 2010, 490: 267–293
- 22 Zhao Y, Xu G, Zhang S H, et al. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2004, 11: 319–328 [赵越, 徐刚, 张拴宏, 等. 燕山运动与东亚构造体制的转变. *地质前缘*, 2004, 11: 319–328]
- 23 Liu J, Zhao Y, Liu X M. Age of the Tiaojishan Formation volcanics in the Chengde basin, northern Hebei Province (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2006, 22: 3–16 [刘健, 赵越, 柳小明. 冀北承德盆地髫髻山组火山岩的时代. *岩石学报*, 2006, 22: 3–16]
- 24 Sun L X, Zhao F Q, Wang H C, et al. Correlation of Tuchengzi formation and implications of the basin tectonic evolution in the intracontinental Yanshan Orogenic Belt (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2007, 81: 445–453 [孙立新, 赵凤清, 王惠初, 等. 燕山地区土城子组划分、时代与盆地性质探讨. *地质学报*, 2007, 81: 445–453]
- 25 Dong S W, Zhang Y Q, Long C X, et al. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan movement (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2007, 81: 1449–1461 [董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. *地质学报*, 2007, 81: 1449–1461]
- 26 Chen Y, Zhu G, Jiang D Z, et al. Timing determination of phase B of the Yanshanian movement in the eastern North China Craton: Evidence from dating of a ductile shear zone in Sihetang, northeastern Beijing (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2013, 87: 295–310 [陈印, 朱光, 姜大志, 等. 四合堂剪切带活动时代及其对燕山运动 B 幕时间的限定. *地质学报*, 2013, 87: 295–310]
- 27 Zhu G, Chen Y, Jiang D Z, et al. Rapid change from compression to extension in the North China Craton during the Early Cretaceous: Evidence from the Yunmengshan metamorphic core complex. *Tectonophysics*, 2015, 656: 91–110
- 28 Wong W H. The Mesozoic orogenic movement in Eastern China. *Acta Geol Sin*, 1929, 8: 33–44
- 29 Zhang Y Q, Dong S W, Zhao Y, et al. Jurassic tectonics of North China: A synthetic view (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2007, 81: 1462–1480 [张岳桥, 董树文, 赵越, 等. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识. *地质学报*, 2007, 81: 1462–1480]
- 30 Wang Y, Zhou L Y, Li J Y. Intracontinental superimposed tectonics—A case study in the Western Hills of Beijing, Eastern China. *Geol Soc Am Bull*, 2011, 123: 1033–1055
- 31 Zhang C H, Li C M, Deng H L, et al. Mesozoic contraction deformation in the Yanshan and northern Taihang mountains and its implications to the destruction of the North China Craton. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54: 798–822 [张长厚, 李程明, 邓洪菱, 等. 燕山-太行

- 山北段中生代收缩变形与华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 593–617]
- 32 Zhu G, Liu C, Gu C C, et al. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: Constraint from late Mesozoic evolution of the Tan-Lu fault zone. *Sci China Earth Sci*, 2018, 61: 386–405 [朱光, 刘程, 顾承串, 等. 郯庐断裂带晚中生代演化对西太平洋俯冲历史的指示. 中国科学: 地球科学, 2018, 48: 415–435]
- 33 Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, et al. Destruction of the North China Craton. *Sci China Earth Sci*, 2012, 42: 1135–1159 [朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 2012, 55: 1565–1587]
- 34 Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton. *Geol Soc Am Bull*, 2007, 119: 1405–1414
- 35 Liu J L, Shen L, Ji M, et al. The Liaonan/Wanfu metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: Two stages of exhumation and constraints on the destruction of the North China Craton. *Tectonics*, 2013, 5: 1121–1141
- 36 Lin W, Wang Q C, Wang J, et al. Late Mesozoic extensional tectonics of the Liaodong Peninsula massif: Response of crust to continental lithosphere destruction of the North China Craton. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54: 843–857 [林伟, 王清晨, 王军, 等. 辽东半岛晚中生代伸展构造-华北克拉通破坏的地壳响应. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 638–653]
- 37 Zhang Q S, Yang Z S, Liu L D. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong Peninsula, China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1988. 1–552 [张秋生, 杨振升, 刘连登. 辽东半岛早期地壳与矿床. 北京: 地质出版社, 1988. 1–552]
- 38 Li S Z, Liu J Z, Zhao G C, et al. Key geochronology of Mesozoic deformation in the Eastern Block of the North China Craton and its constraints to regional tectonics—A case of Jiandong Peninsula (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2004, 20: 633–646 [李三忠, 刘建忠, 赵国春, 等. 华北克拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约——以胶辽地区为例. 岩石学报, 2004, 20: 633–646]
- 39 Li S Z, Zhao G C, Liu X, et al. Paleoproterozoic structural evolution of the southern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Res*, 2012, 200–203: 59–73
- 40 Liu Y D. Discussion on the geological characters and genesis of granite in Sanguliu of Liaoning (in Chinese). *Liaoning Geol*, 1987, 3: 55–70 [刘义德. 辽宁省三股流花岗岩地质特征及成因探讨. 辽宁地质, 1987, 3: 55–70]
- 41 Lü Y F, Li J F. The structural characteristic of ductile shear zone and its effect during mineralization process in Wulong gold deposit, Dandong (in Chinese). *Earth Sci-J China Univ Geosci*, 1993, 18: 415–424 [吕贻峰, 李江凤. 丹东韧性剪切带变形特征及其在五龙金矿成矿过程中的意义. 地球科学: 中国地质大学学报, 1993, 18: 415–424]
- 42 Zhang S, Zhu G, Liu C, et al. Strike-slip motion within the Yalu River fault zone, NE Asia: The development of a shear continental margin. *Tectonics*, 2018, 37: 1771–1796
- 43 Qiu Z H, Liu F X, Zhou H G, et al. Ore control regularity and prospect direction determination in the Liaodong Wulong gold deposit (in Chinese). *Chin Technol Ent*, 2011, 3: 70–72 [仇志寒, 刘福兴, 周洪鸽, 等. 辽东五龙金矿床构造控矿规律研究及找矿方向确定. 中国高新技术企业, 2011, 3: 70–72]
- 44 Wallace R E. Geometry of shearing stress and relation to faulting. *J Geol*, 1951, 59: 118–130
- 45 Bott M H P. The mechanics of oblique slip faulting. *Geol Mag*, 1959, 96: 109–117
- 46 Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets. *J Geophys Res*, 1984, 89: 5835–5848
- 47 Angelier J. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *J Struct Geol*, 1989, 11: 37–50
- 48 Jacques M, Pierre V. *Tectonique (Collection Geosciences)*. Paris: Dunod, 1992. 1–214
- 49 Orife T, Lisle R J. Assessing the statistical significance of palaeostress estimates: Simulations using random fault-slips. *J Struct Geol*, 2006, 28: 952–956
- 50 Angelier J. Fault-slip analysis and paleostress reconstruction. In: Hancoc K P, ed. *Continental Deformation*. New York: Pergamon, 1994. 53–100
- 51 Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem Geol*, 2002, 192: 59–79
- 52 Xu J W, Zhu G, Tong W X, et al. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northern of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 1987, 134: 273–310
- 53 Liu C, Zhu G, Zhang S, et al. Mesozoic strike-slip movement of the Dunhua–Mishan fault zone in NE China: A response to oceanic plate subduction. *Tectonophysics*, 2018, 723: 201–222
- 54 Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W, et al. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: Examples from the rifts of Thailand. *J Struct Geol*, 2004, 26: 1803–1829
- 55 Lin S Z, Zhu G, Yan L J, et al. Discussion on uplifting mechanism of the Linglong Batholith in Eastern Shandong (in Chinese). *Geol Rev*, 2013, 59: 832–844 [林少泽, 朱光, 严乐佳, 等. 胶东地区玲珑岩基隆升机制探讨. 地质论评, 2013, 59: 832–844]
- 56 Wen B J, Fan H R, Santosh M, et al. Genesis of two different types of gold mineralization in the Linglong gold field, China: Constrains from geology, fluid inclusions and stable isotope. *Ore Geol Rev*, 2015, 65: 643–658

补充材料

- 图 S1** 五龙金矿区平移断层、正断层和脉壁断层野外照片
图 S2 五龙金矿区岩脉锆石 U-Pb 年龄谐和图
图 S3 五龙金矿区不同方位岩脉切割关系野外照片
表 S1 五龙金矿区北东向左行平移断层与正断层擦痕应力场反演结果
表 S2 五龙地区定年样品 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素定年结果

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “辽东五龙金矿区成矿期构造过程与岩脉就位机制”

Structural processes and dike emplacement mechanism in the Wulong gold field, eastern Liaoning

Shiye Xiao^{*}, Guang Zhu, Shuai Zhang, Cheng Liu, Nan Su, Hao Yin, Xiaodong Wu & Yunjian Li

School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

^{*} Corresponding author, E-mail: xsy0564335@163.com

The Wulong gold deposits are typical representative of deposits in the Liaodong ore concentration area in the eastern North China Craton. The gold deposits occur as the quartz-vein type. However, gold mineralization time of the Wulong gold deposits was uncertain, and structural controlling mechanism for them remains unclear. We present structural and geochronological data to constrain structural evolution and dike emplacement mechanism before and during the gold mineralization. The Wulong monzonitic granite pluton, the host intrusion for the gold deposits, was dated at 173–163 Ma (Middle Jurassic). The pluton suffered WNW-ESE shortening probably at the beginning of Late Jurassic, as shown by penetrative, ductile deformation and local ductile reverse shear belts in the pluton. The Wulong pluton was then subjected to nearly N-S compression that led to formation of several NE-striking sinistral faults and associated conjugate fractures at the beginning of Early Cretaceous. The compression was followed by WNW-ESE extension during the Early Cretaceous (ca. 131–113 Ma). The Early Cretaceous extension caused a series of NE- to NNE-striking normal faults and reactivated previous faults or fractures with varied orientations. Our fault-slip data gave reliable constraints on the stress fields during the compression and extension. The extension was also associated with emplacement of the Sangouliu pluton (131–120 Ma) in the south, the Wulongbei pluton (127–126 Ma) in the south and a series of diorite, granite, granitic pegmatite, lamprophyre and diabase dikes in the gold mine field. Previous work demonstrates that the diorite and granite dikes often coexist with the auriferous quartz veins. Our zircon U-Pb dating gave 127–113 Ma intrusion ages for the dated diorite dikes, 126–113 Ma ages for the granite dikes and a 121 Ma age for the granitic pegmatite dike. These demonstrate that the diorite and granite dikes in the Wulong gold field are synchronous and their emplacement of 127–113 Ma happened during the extensional stage. These Early Cretaceous dikes were emplaced along both the newly-formed, NE- to NNE-striking normal faults and the previous faults or fractures reactivated during the extension. The dike emplacement along the new and previous structures resulted in varied orientations in the study area. We propose that the auriferous quartz veins share the similar emplacement mechanism with the synchronous dikes in the Wulong gold field. This inference is supported by the common coexistence of the both. It is suggested therefore that the gold mineralization in the Wulong gold field took place during the period of 127–113 Ma when the North China Craton experienced the peak destruction. However, direct dating results from ore minerals are needed to constrain the accurate gold mineralization time in the Wulong gold field.

Wulong gold deposit, extensional activity, dike emplacement, zircon U-Pb age, early Cretaceous

doi: 10.1360/N972018-00682