辽东半岛晚侏罗-早白垩世挤压-伸展构造转折及金成矿意义

颜丹平^{1*}, 孔若颜¹, 董小宇¹, 邱亮¹, 刘会龙^{1,2}

1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质调查局地球物理调查中心, 廊坊 065000

* 通讯作者, E-mail: yandp@cugb.edu.cn

收稿日期: 2020-10-17; 收修改稿日期: 2021-03-17; 接受日期: 2021-04-09; 网络版发表日期: 2021-05-21

国家重点研究计划项目(编号: 2016YFC0600102)、国家自然科学基金项目(批准号: 42030306)和高等学校学科创新引智计划(“111计划”)(编号: BP0719021)资助

摘要 由于缺少沉积、岩浆和变质作用记录, 挤压构造向伸展构造的转折过程是研究的盲点和难点. 东部华北克拉通东缘的辽东半岛, 在经历早中侏罗世褶皱-逆冲挤压构造作用后, 至早白垩世转变为区域性的伸展构造. 其间晚侏罗世-早白垩世早期至少有约13Myr构造活动性较弱, 理解程度较低, 是区域构造演化与构造动力学分析的盲点. 本文选取辽东半岛北部通远堡-爱阳地区进行了详细的构造调查与解析, 识别出一系列小规模SN向逆冲-左行走滑为主、NW向右行逆冲-走滑为辅的断层和相关褶皱. 根据断层及其擦痕线理与构造运动学关系分析, 恢复的构造应力场以走滑机制为主, 最大主压应力场为NW-SE向. 区域上这些近SN向逆冲-走滑断层组合表现为右列排列, 控制了断层桥区的局部挤压抬升和剥蚀, 切割分解并在相邻岩桥之间保存了早中侏罗世大型火山-沉积的残留盆地, 在随后的演化中, 在通远堡、方家隈子等上覆形成早白垩世小型火山-沉积盆地. 通过对盆地性质和形成时间的分析, 结合区域岩浆作用年代综合分析, 辽东半岛的构造转折开始于156~153Ma, 结束于约140~139Ma. 我们提出上述逆冲-走滑断层组合是晚侏罗世-早白垩世早期郯庐断裂带持续左行走滑和沿渤海湾地区向北扩展过程中形成的R-R'破裂组合, 是古太平洋板块俯冲方向由向NW转向NNW的过程中, 构造应力场逐渐减弱导致, 从而提出了挤压构造向伸展构造转折的构造模式, 并认为这个过程可能为金元素活化和含金流体开始迁移提供有利条件, 从而开启了新一次金成矿富集过程.

关键词 挤压-伸展构造体制转折, 辽东半岛, 晚侏罗世-早白垩世, R-R'破裂, 郯庐断裂带, 金成矿富集

1 引言

构造体制转折(tectonic mode switching), 又称为“构造转换”或者“变形体制转换”, 以造山带形成演化

或者板块俯冲汇聚背景下的挤压-构造埋藏-升温向伸展-剥蚀剥露-冷却相转化为特征(Lister等, 2001; Collins, 2002; Beltrando等, 2008). 这类构造现象虽然被越来越多地识别出来, 但其转折的过程和运动学交替

中文引用格式: 颜丹平, 孔若颜, 董小宇, 邱亮, 刘会龙. 2021. 辽东半岛晚侏罗-早白垩世挤压-伸展构造转折及金成矿意义. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1536–1557, doi: [10.1360/SSTe-2020-0285](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0285)

英文引用格式: Yan D P, Kong R, Dong X, Qiu L, Liu H. 2021. Late Jurassic-Early Cretaceous tectonic switching in Liaodong Peninsula of the North China Craton and the implications for gold mineralisation. Science China Earth Sciences, 64(9): 1537–1556, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9770-6>

的动力学机制并未被很好地理解(Beltrando等, 2007; Wells等, 2012; White等, 2019).

挤压、伸展和走滑构造具有不同的构造应力场, 代表了构造作用过程中不同的构造体制(Anderson, 1951; 单文琅, 1991; Wells等, 2012). 通常认为造山后伸展构造会立即伴随着造山挤压构造的结束而开始, 其中挤压构造与伸展构造的变形几何学与运动学样式, 以及样式组合具有鲜明的差别, 通过区域地质调查与构造解析能够较好地确认和区分出来(单文琅, 1991; Kettermann和Urai, 2015). 然而, 从造山期挤压构造至造山后伸展构造转折过程中形成的构造变形, 表现一般不突出、不典型, 容易为后期构造叠加和改造, 从而湮没在后期的叠加构造之中. 这个构造过程一般并没有显著的地质记录来约束其变形时间, 例如沉积和岩浆记录缺失、变质作用较弱或无. 目前, 对于挤压构造向伸展构造演变的构造表现认识并不清楚, 是构造过程解析的难点和盲点.

华北克拉通在经历侏罗纪区域性挤压构造后, 至早白垩世演变为大规模伸展构造事件, 这个过程被认为是华北克拉通破坏的关键事件(Zhu R X等, 2015; 朱光等, 2018; 朱日祥和徐义刚, 2019). 在分析和讨论早白垩世伸展构造的动力学原因时, 一般是将构造几何学和运动学证据与太平洋板块俯冲方式直接关联, 对于侏罗纪挤压构造向早白垩世伸展构造转折的几何学、运动学及其组合样式理解却非常薄弱, 对于早白垩世伸展构造的前因和形成过程缺少必要的约束. 辽东半岛发育并相对完整地保存了早中侏罗世挤压构造和早白垩世伸展构造的证据, 而且前人对挤压与伸展构造事件均有详细的研究(Liu等, 2005; Lin和Wang, 2006; Lin等, 2008; Li等, 2012; Zhu G等, 2015; Qiu等, 2018). 然而, 在辽东半岛普遍存在下白垩统角度不整合于中下侏罗统之上的现象, 并缺失晚侏罗世-早白垩世早期的沉积、岩浆和变质记录, 成为区域挤压构造向伸展构造转折研究的盲点.

针对上述科学问题, 本文选择辽东半岛北部通远堡-爱阳地区进行详细的区域构造解析. 针对早中侏罗世挤压构造事件向早白垩世伸展构造事件的构造转折展开了研究, 主要针对新识别的一系列近SN向逆冲-左行走滑, 以及NW向逆冲-右行走滑的小规模高角度断层和断层相关褶皱, 分析变形样式和组合、构造运动学, 恢复构造应力场, 并对其控制的盆地组合及活

动时限进行分析, 表明右列断层组合在断层桥区形成局部挤压隆升, 导致早中侏罗世大型盆地被分割并在相邻断层桥区之间的局部伸展区域保存残留. 通过区域性岩浆作用年代分析, 将构造转折的起始时间限制在约156~153Ma, 结束时间限制在约140~139Ma. 我们提出是古太平洋板块俯冲方向由向NW转向NNW的过程中(Liu等, 2017; Müller等, 2019), 郯庐断裂带持续左行走滑和沿渤海湾地区向北扩展过程中形成R-R'破裂, 导致早中侏罗世大型盆地被分割残留和上覆盆地的形成. 上述构造转折导致金元素被激发活化和成矿流体活化迁移, 可能促进了金成矿富集作用.

2 区域地质背景

以NNE走向的太行山隆起为界, 华北克拉通可划分为西部华北克拉通和东部华北克拉通, NNE走向的郯庐断裂带又将东部华北克拉通一分为二(Zhao等, 2001, 2005; Zhai等, 2005)(图1a). 辽东半岛位于东部华北克拉通的东部边缘, 并以发育中生代挤压收缩构造与伸展构造为特征(Faure等, 2001; Lin和Wang, 2006; Lin等, 2008; Yan等, 2006, 2011; Yang等, 2007a, 2007b; Liu等, 2011, 2013; Wang等, 2011; Yang等, 2011; Zhu G等, 2015; 朱光等, 2018; Qiu等, 2018; Kong等, 2020).

2.1 东部华北克拉通

东部华北克拉通夹持于北侧的中亚造山带、南侧的苏鲁-大别造山带和东侧的古太平洋板块之间(图1a). 东部华北克拉通包括基底太古代英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩组合(TTG)和广泛分布的古元古代浅海相地层(Zhao等, 2001; Zhai等, 2005; Wang等, 2011; Li等, 2017; Wang等, 2017). 上覆盖层层序包括新元古代-古生代浅海相和陆相交互变化的沉积地层, 以及中生代与收缩构造和伸展构造相关的陆相沉积地层(Wang等, 2011; Yang等, 2011; Kong等, 2020).

华北克拉通北侧于二叠纪-晚三叠世与西伯利亚克拉通发生碰撞形成中亚造山带(Cogné等, 2005; Metelkin等, 2010; Zhu等, 2010; Zhu G等, 2015; Pei J等, 2011; Wang等, 2011; 朱光等, 2018; Yan和Qiu, 2020), 南侧于三叠纪与华南板块碰撞并形成秦岭-大别造山带和苏鲁造山带(Hacker等, 2006; Yang等, 2011). 辽东半岛夹持于中亚造山带与苏鲁造山带间, 形成了同时期的近EW走

图1 辽东半岛区域构造略图

其中(a)为华北克拉通及边缘主要构造单元图(据Kong等, 2020修改)

向, 或者NEE走向的褶皱-逆冲构造。东部华北克拉通随后受到了侏罗纪-白垩纪古太平洋板块俯冲的强烈影响(Liu等, 2011; Wang等, 2011; Li等, 2012; 朱光等, 2018; Qiu等, 2020)。在早中侏罗世, 俯冲导致NW-SE向收缩作用, 并形成NE-SW向褶皱逆冲构造和挤压坳陷盆地(Yang等, 2011; Qiu等, 2018; Ren等, 2021)。同时, 作为弧后区域在华北克拉通的东部边缘形成大量A型花岗岩(Wu等, 2005b)。晚侏罗世-早白垩世古太平洋板块回撤导致东部华北克拉通从挤压向伸展构造转换, 并于

早白垩世形成变质核杂岩构造、伸展盆地和同构造期岩浆侵位(Wu等, 2005a; Xu等, 2007; Yang等, 2007a; Lin等, 2008; Wang等, 2011; Zhu G等, 2012; Zhu R X等, 2012; Liu等, 2013; Kong等, 2020)。

2.2 中生代郯庐断裂带

中三叠世华北克拉通与华南板块碰撞, 沿大别-苏鲁造山带东部形成具左行走滑特点的郯庐断裂带(Zhu等, 2009; Zhao等, 2016)。中生代以来, NNE走向郯庐断

裂带经历多次构造事件, 将秦岭-大别与苏鲁造山带左行错断达500~550km, 并将华北克拉通北缘边界错断达220km(Gilder等, 1999; Zhu等, 2009). 中侏罗世末在古太平洋板块俯冲作用下, 郯庐断裂带表现为持续的左行走滑作用并不断向北扩展(Xu等, 1987; Zhu等, 2005, 2010; Wang, 2006).

白垩纪郯庐断裂带经历了多次左行走滑和正断层作用. 较早的左行走滑主要发生于渤海湾盆地南部, 黑云母和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为约143~136Ma(Zhu等, 2005). 构造应力场重建结果指示为NS向挤压, 是古太平洋板块低角度快速俯冲与蒙古-鄂霍茨克洋关闭共同作用的结果(Metelkin等, 2010; Pei F P等, 2011; 朱光等, 2018). 早白垩世中晚期郯庐断裂带转变为正断层作用, 与东部华北克拉通区域上同时期变质核杂岩、裂谷盆地和大规模的岩浆作用一致, 是古太平洋板块回撤俯冲的结果(Liu等, 2011; Wang等, 2011; 朱光等, 2018). 早白垩世末期, 在古太平洋板块低角度俯冲作用下, 郯庐断裂带又转化为左行走滑作用(Wu等, 2005a; Zhu R X等, 2012). 在古太平洋板块回撤俯冲作用下, 晚白垩世正断层作用、区域抬升和裂谷盆地的形成等均指示区域性弱伸展特征(Zhu G等, 2012).

2.3 辽东半岛区域地质背景

辽东半岛位于东部华北克拉通东缘, 以郯庐断裂带作为西界(图1b). 辽东半岛基底包括太古代TTG岩石组合、约7km厚的古元古代辽河群和主要分布于辽南地区的中元古代榆树砬子群(图2和图3a). 不整合覆盖于基底之上约有8km厚的浅变质盖层, 主要包括青白口系互层的碎屑岩与碳酸盐岩、震旦纪-奥陶纪浅海碳酸盐岩夹少量砂岩和页岩、石炭纪-二叠纪含煤碎屑岩和浅海碎屑岩(Yang等, 2011). 上述地层均经历多期次变形改造, 并被中下侏罗统和下白垩统碎屑岩不整合覆盖(Yang等, 2011)(图2).

太古宙TTG岩石组合广泛出露于辽东半岛南部和北部. 辽东半岛南部的辽南变质核杂岩下盘TTG岩石锆石U-Pb年龄约为2500~2436Ma(杨振升, 1985; Liu等, 2005; Lu等, 2006), 其受到早白垩世拆离断层改造(Liu等, 2013). 在辽东半岛北部, 一系列3800~3000Ma TTG片麻岩构成华北克拉通内最古老的岩石, 并被约2500Ma花岗岩侵入, 被新太古代表壳岩角度不整合覆盖(Liu等, 1992; Song等, 1996; Liu D Y等, 2008).

广泛出露的辽河群从下至上可划分为浪子山组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组以及盖县组, 从下至上从变质砂岩、火山岩向碳酸盐岩和泥质变质岩变化(Li等, 2005; 辽宁省地质勘查院, 2014). 5个组均经历古元古代晚期胶辽吉造山作用阶段的绿片岩相至角闪岩相变质作用和中等至宽缓褶皱作用, 以及同造山和造山后岩浆侵位的改造(Tian等, 2017). 基底岩石局部被新元古代-下寒武统碎屑岩和灰岩角度不整合覆盖.

中生界角度不整合于下伏岩石之上, 主要包括中下侏罗统(辽南为瓦房店组)含煤碎屑岩, 被下白垩统小岭组(与辽南桂云花组相当)和普兰店组火山岩与碎屑岩角度不整合覆盖(图2). 区内中生代岩浆岩主要包括约230~153Ma和139~117Ma侵入岩和火山岩, 均与中生代构造事件时间一致(图2)(Wu等, 2005a, 2005b).

中生代挤压逆冲构造事件主要包括印支期近EW向的褶皱-逆冲构造和早中侏罗世NE-SW向褶皱逆冲构造, 广泛发育于辽东半岛北部和南部(Qiu等, 2018). 辽南变质核杂岩是NW-SE向强烈伸展作用的结果, 同构造岩浆岩锆石U-Pb年龄和糜棱岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄确定其活动时间为约130~110Ma(Liu等, 2005, 2011; Lin等, 2008, 2011). 变质核杂岩相关拆离断层强烈改造前期挤压构造, 并因此限定了从挤压至伸展构造的转换. 根据侵位于褶皱逆冲构造中的未变形斑岩岩脉的锆石U-Pb年龄, 确定约132Ma为构造置换的中值时间(Qiu等, 2018). 辽东半岛确切的晚侏罗世构造变形特征尚未见报道.

3 挤压-伸展构造样式与运动学

辽东半岛下白垩统与中下侏罗统整体表现为角度不整合关系, 局部可能表现为平行不整合. 在辽东南部, 表现为下白垩统小岭组(与桂云花组相当)角度不整合于中侏罗统瓦房店组之上, 在辽东半岛北部则表现为下白垩统小岭组角度不整合于中下侏罗统之上, 指示发生过一次区域性构造事件(图2). 由于角度不整合关系约束的构造变形时间为中侏罗世末至早白垩世早期, 因此, 本文将被下白垩统小岭组和其相当层位超覆的, 以及切割中下侏罗统盆地的断层确定为这一构造转换阶段的变形, 并主要针对青城子-井峪一带早中侏罗世盆地、早白垩世盆地和典型断层等进行了调查和解析(图3).

图 2 (网络版彩图)辽东半岛区域地层关系

据辽宁省地质调查院(2014)、Qiu等(2018)和Kong等(2020)综合编制

图 3 通远堡-爱阳地区区域地质构造图和构造剖面简图

3.1 沉积地层与盆地

在辽东地区, 除赛马盆地同时发育和保存了下白垩统和中下侏罗统外, 没有发现下白垩统直接覆盖于中下侏罗统之上的露头. 在北部通远堡-井峪地区和南部瓦房店盆地均发现了一系列孤立和零星发育的中晚侏罗世盆地和早白垩世盆地(图1和图3).

以通远堡-爱阳地区为例, 分散孤立的早中侏罗世残留盆地大致呈NE走向, 并明显受区域性NE向逆冲断层控制, 因此属于挤压拗陷盆地(图3). 然而, NE向孤立盆地被NNW向断块隆起分割, 根据出露和保存地层分析, 这些断块隆起的隆升和剥蚀规模不大. 在南部瓦房店盆地仅残留有中侏罗统瓦房店组(图2和图3).

中下侏罗统下部主要包括安山质火山沉积岩、粗碎屑砾岩、砂岩, 并夹页岩, 上部为砂岩、页岩夹煤层, 或者煤线. 富含植物化石 *Anomozamites major* (Brongn.) (较大异羽叶)、*B. furcata* (L. et H.) Braum (叉状拜拉)、*B. asadai* (浅田拜拉)、*Cladophlebis punctate* (Thomas) Chow et Yeh. (斑点枝脉蕨)、*Toditis williamsoni* (Brongn.) Seward (威廉姆逊拟托第蕨)、*Clathropteris meniscioides* Brongn., *Coniopteris burejensis* (Zal.) Sewad (布列亚锥叶蕨)、*C. hymenophylloides* Brongn. (膜蕨型锥叶蕨)、*C. tatungensis* Sze (大同锥叶蕨)、*Ctenis kaneharai* Yabe et Oishi (金原菟羽叶)、*Eboracia lobifolia* (Phillips) Thomas (裂叶爱博拉契蕨)、*G. sibiricus* (Heer) Sward (西伯利亚似银杏)、*Marattiopsis orientalis* Chow et Yeh (东方拟合囊蕨)、*M. munsteri* (Goeppert) Schimper (敏斯特拟合囊蕨)、*Neocalamites carrerei* (Z.) Halle (卡勒新芦木)、*N. hoerensis* (Schimper) Helle (霍尔新芦木)、*Phoenicopsis manchurica* Yabe et Oishi. (东北拟刺葵)、*Podozamites lanceolatus* (L. et H.) Braum (披针苏铁杉)、*Pterophyllum angustum* (Braun.) Gothan (狭细侧羽叶) 等, 并据此确定其时代为早中侏罗世, 但缺失晚侏罗世地层(辽宁省地质勘查院, 2014).

据辽宁省地质勘查院总结, 早侏罗世包括北庙组和长梁子组两个二级旋迴层序, 分别由喷发相-冲积扇-辫状河-干化湖相, 以及冲积相-辫状河-湖沼组成. 中侏罗统包括转山子组、大堡组、三个岭组和小东沟组四个二级旋迴层序, 主要表现为辫状河-湖沼相、冲积扇-辫状河-湖沼相、冲积扇-辫状河-湖沼相加顶部

煤层、冲积扇-辫状河-干化湖. 建立的地层基本格架含煤碎屑建造和横向快速相变, 但区域上基本可以对比, 表明这些分割的盆地具有统一的成因联系. 以中下侏罗统下部安山质火山沉积岩和粗碎屑沉积层为标志, 通过横向追索, 可以看出赛马、郭家堡和井峪盆地层序基本可以对比, 虽然在郭家堡盆地上部的含煤碎屑岩沉积层序被剥蚀, 但各盆地间层序完全可以对比, 沉积相相互连接后保持完整; 根据野外观测到的局部含煤碎屑层序推测, 在通远堡盆地下白垩统以下, 可能有中下侏罗统沉积的残留(图3A-A'剖面). 因此我们认为通远堡-赛马-郭家堡-井峪盆地原型是早中侏罗世NE向的大型统一盆地, 其现今盆地格局是近SN向和NW向断层分割残留后的结果(图3及剖面A-A').

下白垩统主要包括小岭组和普兰店组. 小岭组主要岩性包括流纹岩、安山岩、角砾岩、凝灰岩夹玄武岩和沉积岩. 普兰店组主要为页岩夹细砂岩、粉砂岩和岩屑砂岩, 局部为凝灰岩和火山碎屑岩. 小岭组和普兰店组均以孤立小盆地形式发育, 并且因为各盆地沉积相相对完整而表现为原始隔离. 例如, 方家隈子和通远堡盆地均具有相对完整的下白垩统沉积相带, 表明各自均为独立的沉积盆地. 最新的研究表明, 早白垩世各个小盆地形成时间具有向西南变年轻的特点(Kong等, 2020).

根据岩石组合、地层层序以及盆地发育特点和区域地层产状关系推测, 下白垩统与中下侏罗统间表现为角度不整合接触关系, 表明中侏罗世之后和早白垩世之前发生过区域性构造变形. 因此, 青城子地区现今孤立的盆地可能是中晚侏罗世大型统一盆地被变形分割而形成的残留盆地(辽宁省地质勘查院, 2014; Kong等, 2020)(图3).

3.2 断层变形特征

在通远堡-爱阳地区, 我们识别出来一系列形成于中侏罗世之后和早白垩世之前的小型断层. 根据断层区域分布、总体产状和构造特征, 选取了部分代表性的断层进行描述(图4、图5和图6).

方家隈子盆地西缘断层(QC061点)(图3和图4)是由一系列西倾或者东倾的高角度断层组成, 以近SN走向为主, 有少量为NW向, 倾角均在70°以上, 断层面平直, 断层产状稳定; 单条断层带宽度10~15cm, 局部达100cm以上, 并发育构造角砾岩和断层泥D_{S2}(图4a、

图4 方家隈子盆地西缘断层(40°41'35"N, 123°45'15"E, 350m)及其构造特点

(a) 断层 D_{22} 出露, 以及切割中元古代花岗岩和被小岭组不整合覆盖情况, 注意露头上包括近SN向和NW向两组断层; (b) 断层带中的角砾岩、断层泥和粗糜棱岩 D_{s1} ; (c) 粗糜棱岩及其S-C组构 D_{s1} 切割和改造了早期长英质糜棱岩 D_{e1} ; (d) 由云母膝折带构成的S面理 D_{s1} 和沿C面理残留的长英质糜棱岩 D_{e1} ; (e) 粗糜棱岩中局部变形云母重结晶作用与核幔构造; (f) 断层面与擦痕线理测量统计结果(数据见表1), 下半球投影, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为构造应力场计算恢复的结果(Marrett and Allmendinger, 1990; Allmendinger等, 2012)

4b), 局部改造了较早阶段形成的韧-脆性剪切带和粗糜棱岩 D_{s1} (图4c~4e)。角砾岩化岩石原岩为中元古代花岗岩, 角砾间形成断层泥, 角砾呈雁列状定向排列, 指

示向西的逆冲作用; 粗糜棱岩化岩石主要由大颗粒云母变形和碎裂的石英组成, 发育S-C组构, 其中S面理由云母膝折带表现出来。膝折带与云母面大角度相交,

图5 通远堡西断层(QC069点)变形特征

(a) 通远堡西断层远观, 基岩为大石桥组大理岩, 若干平行断层总体向北延伸; (b) 断层面, 以及面上石墨和方解石组成的擦痕线理; (c) 断层面上擦痕线理中定向绢云母与石墨交互生长关系; (d) 石墨沿富方解石域和富绢云母域边界发育生长; (e) 粗糜棱岩中方解石核幔构造与亚颗粒、新颗粒、膝折带和变形分解作用; (f) 断层面及其擦痕线理测量统计结果, 下半球投影, 数据见表1, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为构造应力场计算恢复的结果(Marrett和Allmendinger, 1990; Allmendinger等, 2012)

并形成云母波状消光; 沿C面理残留有早期细粒化重结晶的云母和石英(新颗粒) D_e 。S-C组构指示NW走向断层变形主要为右行剪切, SN向断层主要表现为左行剪切(图4c~4e)。断层带 D_{S2} 与粗糜棱岩 D_{S1} 变形综合指

示的运动学特征与沿断层擦痕线理和阶步等运动学标志一致, 均指示近SN向断层具逆冲-左行走滑作用, 而NW向断层具逆冲-右行走滑作用(图4f)。以上表明, D_{S2} 与 D_{S1} 可能代表同一期构造变形的不同阶段, 指示

图 6 草河口向斜盖县岩组的叠加改造特征

(a) 变质砂岩中发育的断层与构造角砾岩; (b) 紧闭向斜叠加的宽缓向斜; (c)~(e) 早期糜棱岩叠加的膝折带和分划性劈理; (f) 主要的劈理面产状投影结果

递进剪切变形, 而残留的 D_0 糜棱岩可能代表了早期韧性变形。

分析野外测得的断层面产状、断层面上擦痕及其空间位态关系, 结合走滑-逆冲断层性质, 使用FaultKin 8软件对区域构造应力场进行了计算恢复(Marrett和Allmendinger, 1990; Allmendinger等, 2012)(图4)。结果

表明, 方家隈子盆地西缘断层形成的最大主压构造应力场方向为NW-SE向, 其中 σ_1 为 $118^\circ \angle 20^\circ$, σ_2 为 $292^\circ \angle 71^\circ$, σ_3 为 $27^\circ \angle 2^\circ$, 最大和最小主压应力轴近于水平, 显示典型左行走滑, 并兼具逆冲作用的主要运动学特征(图4f和表1)。

方家隈子盆地西缘断层主要切割了盆地基底中元

表 1 断层及其擦痕线理测量数据与构造应力场恢复结果^{a)}

构造单元	断层面	擦痕线理
图4f 方家隈子盆地西缘断层 (QC061, 40°41'34.8"N, 123°45'14.3"E) ^{a)}	24°∠79°	111°∠14°, 111°∠17°, 110°∠19°, 111°∠15°, 111°∠16°, 111°∠16° 155°∠30°, 160°∠33°, 149°∠31°, 147°∠32°, 150°∠32°, 162°∠42°, 156°∠33°, 156°∠33°, 147°∠34°, 158°∠31°, 160°∠44°, 155°∠34°, 150°∠32°, 140°∠47°, 162°∠32°, 160°∠43°, 160°∠34°, 152°∠33°, 165°∠40°, 159°∠30°, 165°∠34°, 154°∠33°, 154°∠34°, 155°∠36°, 168°∠36°, 162°∠32°, 148°∠32°, 150°∠32°, 148°∠33°, 160°∠34°, 146°∠31°, 145°∠31°, 146°∠33°, 156°∠31°, 137°∠39°, 165°∠29°, 150°∠32°, 145°∠32°, 147°∠36°, 143°∠41°, 164°∠37°, 146°∠36°, 150°∠40°, 175°∠32°, 150°∠38°, 148°∠36°, 149°∠31°, 144°∠35°, 153°∠36°, 148°∠39°, 150°∠37°, 146°∠41°, 151°∠38°, 172°∠34°, 143°∠44°
	75°∠78°, 80°∠76°, 75°∠80°, 234°∠75°, 228°∠72°, 244°∠76°, 238°∠74°	155°∠19°, 154°∠22°, 147°∠33°, 147°∠34°, 149°∠31°, 154°∠23°, 153°∠26°, 147°∠36°, 146°∠38°, 147°∠1°, 153°∠27°, 155°∠18°, 147°∠35°, 148°∠32°, 147°∠0°, 147°∠2°
	71°∠76°, 70°∠72°, 67°∠73°, 57°∠78°, 56°∠78°, 69°∠74°, 70°∠72°, 71°∠69°, 57°∠76°, 55°∠78°, 68°∠73°, 71°∠69°, 68°∠78°, 60°∠80°, 66°∠88°	21°∠69°, 26°∠72°, 16°∠65°, 19°∠67°, 18°∠66°, 23°∠70°, 17°∠65°, 20°∠68°
	87°∠81°	138°∠13°, 140°∠18°, 138°∠12°, 138°∠11°, 138°∠10°, 139°∠15°, 139°∠14°, 139°∠15°
	225°∠75°	130°∠5°, 129°∠4°, 129°∠2°, 130°∠7°, 128°∠1°, 130°∠6°, 128.9°∠3°
	218°∠72°	170°∠0°, 169°∠2°, 169°∠2°, 168°∠3°, 170°∠1°
	80°∠56°	132°∠14°, 132°∠15°, 131°∠17°, 133°∠13°, 131°∠16°
	50°∠61°	344°∠15°, 345°∠14°, 344°∠19°, 344°∠17°, 343°∠20°, 344°∠16°, 344°∠18°
	77°∠80°	
	277°∠89°	187°∠10°, 187°∠11°, 187°∠9°, 187°∠13°, 187°∠8°, 187°∠12°
图5f 通远铺盆地西缘断层 (QC069, 40°47'18.1"N, 123°53'56.2"E) ^{b)}	114°∠73°, 125°∠90°	195°∠27°, 194°∠29°, 215°∠5°, 215°∠7°, 215°∠4°, 194°∠30°, 195°∠28°, 215°∠6°
	330°∠64°	60°∠1°, 59°∠2°
	280°∠74°	200°∠31°, 199°∠29°, 201°∠33°, 199°∠30°, 199°∠28°, 200°∠32°
	150°∠77°, 287°∠32°	65°∠21°, 66°∠23°, 63°∠13°, 215°∠11°, 217°∠12°, 65°∠20°, 66°∠22°, 62°∠9°, 213°∠10°, 219°∠13°, 65°∠21°, 63°∠12°, 62°∠10°, 216°∠11°, 310°∠30°, 64°∠19°, 63°∠11°, 214°∠10°, 212°∠9°
	335°∠43°	64°∠1°, 65°∠1°, 64°∠1°, 63°∠2°
图6f 草河口向斜劈理 (40°51'56.5"N, 123°51'3.8"E; 40°51'15.4"N, 123°52'11.7"E)		91°∠90°, 87°∠87°, 87°∠86°, 95°∠87°, 86°∠84°, 95°∠90°, 86°∠85°, 89°∠87°, 92°∠86°, 90°∠90°, 89°∠86°, 86°∠85°, 88°∠87°, 95°∠84°, 90°∠89°, 86°∠87°, 86°∠84°, 90°∠86°, 92°∠85°, 91°∠89°, 87°∠85°, 87°∠84°, 89°∠86°, 95°∠86°, 89°∠86°, 86°∠86°, 86°∠84°, 90°∠85°, 92°∠85°, 86°∠87°, 305°∠44°, 308°∠43°, 295°∠36°, 296°∠36°, 300°∠37°, 303°∠45°, 302°∠45°, 302°∠40°, 297°∠38°, 301°∠39°, 306°∠39°, 305°∠39°, 296°∠36°, 301°∠40°, 397°∠37°, 303°∠38°, 310°∠40°, 305°∠35°, 299°∠37°, 302°∠37°, 310°∠38°, 312°∠35°, 300°∠38°, 298°∠37°, 298°∠36°, 306°∠39°, 311°∠42°, 310°∠39°, 292°∠37°, 297°∠39°
	292°∠84°, 284°∠87°, 289°∠85°, 288°∠82°, 285°∠86°, 286°∠84°, 291°∠83°, 287°∠82°, 286°∠81°, 289°∠80°, 285°∠89°, 286°∠82°, 289°∠87°, 283°∠80°, 287°∠87°, 286°∠87°, 284°∠85°, 286°∠89°, 285°∠84°, 289°∠88°	195°∠53°, 196°∠56°, 198°∠45°, 194°∠52°, 197°∠58°, 196°∠55°, 196°∠51°, 193°∠54°, 198°∠46°, 193°∠50°, 196°∠58°, 196°∠45°, 193°∠46°, 192°∠53°, 193°∠54°, 196°∠60°, 197°∠45°, 193°∠47°

a) 计算获得 σ_1 : 118°∠20°, σ_2 : 292°∠71°, σ_3 : 27°∠2°; b) 计算获得 σ_1 : 130°∠28°, σ_2 : 349°∠54°, σ_3 : 231°∠19°; c) 计算获得 σ_1 : 138°∠32°, σ_2 : 14°∠39°, σ_3 : 253°∠30°

古代花岗岩, 大部分区域被早白垩世小岭组碎屑岩角度不整合覆盖(图4a), 局部地段向上延伸成为早白垩世方家隈子盆地西缘控盆断层. 虽然无法直接获得其构造活动的下限年龄, 但区域上, 相同产状和性质断层在赛马-爱阳一带切割并分割了早中侏罗世盆地(图3). 因此, 估计其形成时间主要为中侏罗世以后和早白垩世以前, 但可能在早白垩世具有持续的活动特点.

通远堡西断层(QC069点)(图3和图5)是发育于大石桥组大理岩中的一系列近平行的SN向断层带, 由一系列总体向西高角度倾斜的断层组成, 局部转变为NE向高角度倾向SE的断层, 倾角 70° 以上, 断层产状稳定(图5a). 单条断层带宽度一般为10~15cm, 断层面平直, 并发育碎裂岩, 属于 D_{S2} ; 沿断层面发育由石墨和石英组成的多方向擦痕线理, 单组线理方向稳定, 但多组线理间产状变化较大, 属于 D_{S1} (图5b).

沿断层带发育的 D_{S1} 期粗糜棱岩, 发育S-C构造, C面理由重结晶绢云母富集域和方解石富集域边界区分, 沿面理发育有颗粒状以及同变形的石墨, 而且云母的生长与石墨的富集呈交错关系, 表明石墨是糜棱岩化过程中同期形成(图5c、5d). 方解石重结晶过程中, 受到绢云母富集程度的限制, 在云母富集区域重结晶颗粒明显要小于方解石富集区域, 从而表现出方解石糜棱岩的C面理(图5e). 糜棱岩中方解石重结晶时发育有核幔构造、亚颗粒和新颗粒等, 并在幔部发育有多组呈共轭关系的膝折带, 表明糜棱岩化方解石重结晶作用是从膝折作用开始, 通过从外向核的变形分解作用而演化(图5e). 对断层面、擦痕线理和阶步的测量与统计结果, σ_1 为 $130^\circ \angle 28^\circ$, σ_2 为 $349^\circ \angle 54^\circ$, σ_3 为 $231^\circ \angle 19^\circ$, 最大和最小主压应力轴近水平, 显示上述断层主要表现为左行走滑, 并兼具逆冲作用特征, 通远堡盆地西最大主压构造应力场方向为NW-SE向(图5f).

在通远堡-爱阳地区, QC011、QC057、QC047、LD1920和LD2010等点均观察到与QC061点和QC069点类似的断层, 断层规模均较小, 延伸均在数公里以内, 以近SN走向为主, 部分为NW向, 高角度西倾, 或者东倾, 由构造角砾岩、断层泥和粗糜棱岩组成, 显示具有韧-脆性变形特征, 断层带延伸均小于10km, 甚至仅1~2km. 根据断层运动学标志分析, SN向断层具逆冲-左行走滑特征, 而NW向断层则具有逆冲-右行走滑特征. 虽然这些断层均直接发育于辽河群或者古生界

中, 无法获得直接或者间接的时间约束, 但根据上述几何学和运动学特征的配套分析, 我们统一归入中侏罗世后、早白垩世早期前的变形系统.

3.3 草河口向斜的断层相关叠加褶皱

草河口向斜位于青城子地区东部、方家隈子-通远堡北西, 总体为轴向近EW向和向东倾伏的、以中元古代盖县组为核的复式向斜. 研究证明, 草河口向斜主体形成于印支期(辽宁省地质调查院, 2014; 刘会龙, 2020), 并经历后期多次改造, 从而构成复式向斜几何形态(图6).

在草河口向斜东段, 与上述走滑-逆冲断层配套, 叠加于草河口向斜之上的变形具有以下特征: 小规模近SN向的逆冲-左行走滑断层和NW向逆冲-右行走滑断层, 沿断层向上位移逐渐变小并转化为褶皱等变形(图3和图6a、6b); 褶皱规模均比较小, 以宽缓褶皱为主, 区域内轴向延伸均在数百米至2km之内, 具有断展褶皱特征, 叠加于草河口向斜之上. 虽然表现为横跨或者斜跨叠加褶皱, 但由于褶皱规模太小, 没有明显的叠加褶皱干涉样式(图3); 后期变形的分划性劈理叠加于前期透入性劈理带之上, 在宏观和微观上均形成了膝折构造, 但一般并没有新生矿物形成, 表明变质程度很浅(图6c~6e); 区域内分划性劈理走向以近SN向为主, 但受膝拆带变化影响, 倾角可从近直立至缓倾变化, 并导致褶皱走向多变(图3和图6f). 综上所述, 叠加于草河口向斜之上的是一期近SN向或者NW向的宽缓断层相关褶皱, 并由相关逆冲-走滑断层所控制.

3.4 构造应力场分析

在辽东半岛初步构造应力场计算基础上(图4和图5), 现以井峪盆地盆缘断层(LD2010点)为例作进一步的构造应力场恢复(图7). 井峪盆地盆缘断层总体呈近SN向, 但局部地段变化为NNE向甚至NW向(图3); 断层擦痕和阶步等解析结果表明, 井峪盆地盆缘SN向断层具有逆冲-左行走滑构造特征, 与前述方家隈子盆地西缘断层、通远堡西断层构造样式与运动学一致. 断层切割了井峪盆地中下侏罗统, 并将盆地分割为多个小型残留小盆地(图3), 但被后期火炬状张节理等早白垩世伸展构造变形典型构造叠加(图7a、7b), 表明属于晚侏罗世-早白垩世早期变形(图7).

通过对测得的断层面产状、断层面上擦痕线理及

图7 (网络版彩图)井峪盆地盆缘断裂

井峪盆地LD2010点(位置见图3)切割中下侏罗统的断层(a), 以及叠加于断层之上的早白垩世伸展构造下形成的火炬状张节理(b); (c) 近SN向断层、断层擦痕线理及其赤平投影, 均为下半球投影, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为构造应力场计算恢复的结果(Marrett和Allmendinger, 1990; Allmendinger等, 2012)

其空间位态关系分析, 确定井峪盆地盆缘断层LD2010点为近SN向(NNE向)逆冲-左行走滑断层。构造应力场计算恢复结果表明, σ_1 为 $138^\circ \angle 32^\circ$, σ_2 为 $14^\circ \angle 39^\circ$, σ_3 为 $253^\circ \angle 30^\circ$, 最大主压构造应力场方向为NW-SE向, 左行走滑占主导, 兼具逆冲作用(图7c), 与方家隈子和通远堡盆地早期盆缘断层构造应力场分析结果一致(图4和图5)。

4 锆石年代学分析

鉴于中侏罗世至早白垩世构造事件的沉积和岩浆记录缺失, 以及出露岩石变质作用轻微, 为限定构造转折过程对金成矿作用的时间, 本研究选取金矿的同构造岩脉和岩浆作用的锆石U-Pb年代进行时代补充约束。煌斑岩脉样品(LD19117-1)采自小佟家堡子金矿48-1号穿脉, 围岩为大石桥组黑云变粒岩, 岩脉切穿矿

脉并且本身也被矿化。样品较为新鲜, 灰色或者灰黑色, 煌斑结构(图8)。

样品碎样及锆石单矿物挑选工作在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成, 锆石制靶、抛光、拍照均在北京锆年领航科技有限公司完成。锆石U-Pb同位素定年和微量元素测试工作均是在中国地质大学(北京)矿物激光微区分析实验室(Milma Lab)进行的, 采取LA-ICP-MS方法。采用ICPMSDataCal软件进行数据处理(Liu Y S等, 2008; Liu等, 2010a, 2010b; Hu等, 2012)和Isoplot软件进行谐和图和年龄均值图的绘制(Ludwig, 2001)。

分离后获得的锆石多呈短柱状, 长度多介于50~100 μm 内, 长短轴比在1:1~2:1, CL图像显示锆石边界清晰, 晶形良好, 部分锆石颗粒呈现浑圆状, 颗粒边缘局部磨圆, 内部结构较为清晰; 少部分锆石呈长柱状, 长度大于100 μm , 长短轴比约为3:1; 大多数锆石颗

图 8 (网络版彩图)青城子小佟家堡子金矿勘探线剖面图(a)、井下含矿煌斑岩脉侵位于矿体(b)和不含矿煌斑岩脉侵位于围岩的照片(c)

粒发育有明显的振荡环带(图9)。锆石U-Pb定年测试共计25个分析点, 分析点样品锆石的Th/U比值在0.59~1.1, 明显大于0.1, 显示锆石为岩浆成因, 说明其为岩浆锆石(表2)。其中11个点测试结果集中在129~132Ma, 加权平均年龄为 $(130.2 \pm 0.75)\text{Ma}$ ($n=11$; MSWD=0.53), 代表煌斑岩脉的结晶年龄, 说明煌斑岩脉形成于中生代早白垩世(图9); 其余14个分析点中, 11个分析点年龄分散在219~249Ma, 1个分析点年龄为263Ma, 另有2个分析点协和度低于90%, 没有参与年龄计算。测年结果说明岩浆上涌的过程中可能经过隐伏的三叠纪岩体并捕获了岩体中的锆石。此外, 前人通过重力反演, 也推测矿区深部可能隐伏着规模较大的三叠纪岩体(Niu等, 2020)。

以上结果表明, 金矿矿下煌斑岩的形成年龄为约130Ma, 由于含矿岩脉截切了矿脉, 说明在130Ma前经历了金成矿阶段。在含矿煌斑岩脉侵位前, 经历了含矿流体的活化和迁移过程。

5 构造模式与Au成矿控制意义

5.1 辽东地区侏罗纪-白垩纪挤压构造与伸展构造

在郯庐断裂以西, 对侏罗纪挤压事件(燕山运动)已经进行了深入和广泛研究(Dong等, 2015; Li等, 2017)。然而, 在郯庐断裂以东的辽东半岛目前仅有少数报道。在旅顺-大连地区, Ren等(2021)解析出一系列向SW倾伏的大尺度褶皱变形, 具有指向NW的剪切运

图9 (网络版彩图)成矿煌斑岩中锆石及其U-Pb测年结果

(a) 锆石年龄协和图; (b) 锆石平均年龄图; (c) 代表性锆石的阴极发光照片、分析点位以及年龄

动力学特征, 并改造了早期指向NE的褶皱和脆性逆冲断层, 被解释为中-晚侏罗世古太平洋板块向NW俯冲作用的结果。在元台地区, Qiu等(2018)通过野外露头和钻孔数据揭示了砗窑构造窗, 表现为SW-NE向挤压; 通过对卷入变形的中侏罗统碎屑岩和侵入逆冲推覆构造的未变形斑岩岩墙分析, 将变形时代大致限定于174~128Ma。在五龙地区, Zhang等(2020)识别出一期倾向SE的剪切带和NE-SW走向的褶皱, 认为其代表了古太平洋板块俯冲背景下的NW-SE向挤压; 同时根据卷入变形的岩体和岩脉年龄将该期变形时间限定于157~146Ma。考虑到本文报道的晚侏罗世-早白垩世早期变形较弱, 以上变形最可能是在中侏罗世-晚侏罗世早期古太平洋板块俯冲作用下, 在辽东半岛发育了一期总体指向NW或者NE的挤压褶皱逆冲构造。

大约135Ma开始, 在华北克拉通经历了大规模

NW-SE向伸展作用, 构造组合包括半地堑盆地、同构造花岗岩、拆离断层和变质核杂岩构造, 表现出统一运动学、不对称几何学和构造-岩浆共同作用(Yang等, 2004, 2007a; Wu等, 2005a; Xu等, 2007; Li等, 2012, 2019; Lin和Wang, 2006; Lin等, 2008, 2011; Liu等, 2005, 2011, 2013; Shen等, 2011; Wang等, 2011; Zhu等, 2010; Zhu G等, 2015; 朱光等, 2018; 朱日祥和徐义刚, 2019)。在辽南地区发育的辽南和万福变质核杂岩具有相同的下盘, 通过同构造侵入体和拆离断层带糜棱岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年, 确定其形成年龄为130~110Ma(Liu等, 2005, 2011; Lin等, 2008, 2011)。辽东中东部发育了大营子拆离断层, 以及断层上盘半地堑伸展盆地, 如普兰店-瓦房店盆地、桂云花盆地、本溪盆地等。通过对同伸展构造侵入岩和伸展盆地火山岩年代学分析, 确定伸展构造发育于135~106Ma(Yang等, 2004; Liu等,

表 2 小佟家堡子矿下煌斑岩脉LA-ICP-MS锆石U-Pb数据表^{a)}

分析点号	Pb (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	误差(%)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	误差(%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	误差(%)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	谐和度 (%)
LD19117-1 01	11	322	447	0.72	0.0517	0.0013	0.1466	0.0038	0.0205	0.0002	272.3	59.3	138.9	3.4	131.1	1.2	94
LD19117-1 02	7	235	278	0.84	0.0501	0.0019	0.1412	0.004	0.0204	0.0002	211.2	88.9	134.1	3.6	130.1	1.2	96
LD19117-1 03	8	317	328	0.96	0.051	0.0022	0.1443	0.0061	0.0205	0.0003	239.0	72.2	136.9	5.4	131.1	1.6	95
LD19117-1 04	19	338	447	0.76	0.0562	0.0017	0.2685	0.0074	0.0346	0.0003	461.2	68.5	241.5	6.0	219.4	2.0	90
LD19117-1 05	8	264	332	0.79	0.0516	0.0021	0.146	0.0051	0.0206	0.0002	333.4	94.4	138.4	4.5	131.3	1.4	94
LD19117-1 06	40	642	969	0.66	0.0558	0.001	0.268	0.0047	0.0347	0.0002	455.6	38.9	241.1	3.8	220.1	1.5	90
LD19117-1 07	23	442	467	0.95	0.0501	0.001	0.2712	0.0052	0.0391	0.0003	198.2	44.4	243.7	4.2	247.5	1.6	98
LD19117-1 08	17	321	358	0.90	0.0568	0.0018	0.2925	0.0089	0.0373	0.0003	483.4	70.4	260.5	7.0	235.9	1.9	90
LD19117-1 09	16	284	350	0.81	0.0513	0.0011	0.2769	0.0058	0.039	0.0003	253.8	48.1	248.2	4.6	246.5	1.6	99
LD19117-1 10	12	227	215	1.05	0.225	0.0146	0.9728	0.0678	0.0298	0.0007	3017.0	104.6	689.9	34.9	189.4	4.6	-14
LD19117-1 11	10	337	427	0.79	0.0492	0.0013	0.1385	0.0034	0.0205	0.0002	166.8	63.0	131.7	3.1	130.7	1.1	99
LD19117-1 12	32	475	802	0.59	0.0524	0.0008	0.2534	0.004	0.035	0.0002	301.9	37.0	229.3	3.3	221.6	1.4	96
LD19117-1 13	32	503	805	0.63	0.051	0.0009	0.2501	0.0043	0.0355	0.0002	239.0	40.7	226.6	3.5	224.8	1.5	99
LD19117-1 14	8	298	320	0.93	0.0473	0.0027	0.1347	0.0076	0.0208	0.0004	64.9	129.6	128.3	6.8	132.6	2.2	96
LD19117-1 15	16	593	627	0.95	0.0518	0.0023	0.1449	0.0042	0.0203	0.0002	279.7	100.0	137.4	3.8	129.4	1.2	94
LD19117-1 16	9	263	372	0.71	0.0497	0.003	0.1501	0.0082	0.0205	0.0002	189.0	145.4	142.0	7.3	131.0	1.4	91
LD19117-1 17	25	443	522	0.85	0.0541	0.0012	0.294	0.0061	0.0394	0.0003	376.0	54.6	261.7	4.8	249.1	1.8	95
LD19117-1 18	14	487	564	0.86	0.0483	0.0016	0.135	0.0043	0.0203	0.0002	122.3	77.8	128.6	3.8	129.6	1.2	99
LD19117-1 19	23	773	973	0.79	0.0509	0.0017	0.1422	0.0037	0.0203	0.0002	239.0	77.8	135.0	3.3	129.6	1.2	95
LD19117-1 20	26	397	562	0.71	0.0489	0.0027	0.2693	0.0081	0.0395	0.0005	142.7	-33.3	242.2	6.5	249.6	3.2	96
LD19117-1 21	20	773	773	1.00	0.0592	0.0017	0.1623	0.0044	0.0199	0.0002	576.0	63.0	152.7	3.9	127.0	1.2	81
LD19117-1 22	30	460	748	0.62	0.0499	0.0008	0.2494	0.0043	0.0362	0.0003	190.8	38.9	226.1	3.5	228.9	1.7	98
LD19117-1 23	33	494	828	0.60	0.0527	0.0009	0.2595	0.0045	0.0357	0.0002	322.3	40.7	234.3	3.6	226.3	1.5	96
LD19117-1 24	14	511	593	0.86	0.048	0.0012	0.1336	0.0032	0.0202	0.0002	98.2	57.4	127.4	2.9	129.1	1.0	98
LD19117-1 25	26	436	534	0.82	0.0549	0.0012	0.3154	0.0073	0.0418	0.0005	409.3	45.4	278.4	5.6	263.7	3.0	94

a) 1ppm=1 $\mu\text{g/g}$

2005, 2011, 2013; Wu等, 2005a; Lin和Wang, 2006; Lin等, 2008, 2011; Shen等, 2011).

5.2 转折构造样式、组合、运动学和构造应力场

辽东半岛经历早中侏罗世逆冲挤压作用后, 在早白垩世伸展作用前, 经历了相对平缓的构造作用阶段. 本文的区域调查和构造解析结果表明, 这个阶段形成的断层和褶皱规模均比较小, 其中断层以高角度韧-脆性变形为特征, 发育构造角砾岩和粗糜棱岩; 构造运动学标志指示近SN向断层表现为逆冲-左行走滑作用, 而局部发育的NW向断层表现为逆冲-右行走滑作用; 通过断层-擦痕线理计算恢复, 确定区域构造应力场最大和最小主压应力近水平, 最大主压应力方向为NW-SE向(图4、图5和图7). SN向与NW向断层组合呈右列排列, 断层桥区在综合构造作用下表现为隆升和剥蚀作用(图3).

在通远堡-爱阳地区, 从北东向南西发育井峪、郭家堡、赛马、通远堡和方家隈子等5个主要盆地, 大致右列组合排列, 正好被右列排列的NW向与SN向断层组合分割开来(图3). 盆地内分别有中下侏罗统、下白垩统或者下白垩统角度不整合上覆于中下侏罗统之上. 从地层层序和标志层恢复的原型盆地分析, 早中侏罗世可能存在一个由井峪、郭家堡、赛马、通远堡和方家隈子等组成的大型统一盆地, 而早白垩世则表现为独立的小盆地(图3).

综合断层组合右列排列和早中侏罗世盆地分割残留特征, SN向逆冲-左行走滑断层与NW向逆冲-右行走滑断层组合不但分解切割了早中侏罗世大型统一盆地, 而且使得分解切割后的残留盆地被保存在两个相邻断层桥区的局部拉张区域, 从而形成小型雁列盆地(图3). 由于断层、褶皱规模均很小, 推测本期构造应力场强度较小. 从NE向SW方向, 断层逐渐转化为小型褶皱, 或者膝折(图3和图6), 至早白垩世盆地沉积规模有加大趋势.

5.3 构造变形时间约束

由于没有系统、准确地厘定上覆下白垩统底部年龄以及下伏中侏罗统顶界年龄, 对于下白垩统与中下侏罗统间区域性角度不整合的时限, 目前并没有确切的年龄限定. 与区内早中侏罗世挤压构造相配套, 形成了区域性岩浆作用, 包括花岗岩和岩脉侵位. 通过

系统地收集和整理前人有关岩浆侵位年龄及岩石地球化学数据结果, 辽东半岛南部大规模岩浆作用结束时间为约156Ma, 而辽东半岛北部大规模岩浆活动结束时间为约153Ma(Li等, 2004; Wu等, 2005b; Gu等, 2018; 顾玉超, 2019; Wang等, 2019), 显示岩浆活动结束可能是由南向北完成的. 此外, 岩石地球化学研究显示, 区内晚侏罗世花岗质岩体岩浆主要来源于先存古老地壳的部分熔融或来源于地幔底侵作用形成的新生地壳, 指示其可能形成于古太平洋板块俯冲作用下的挤压-造山背景(Wu等, 2005b; Gu等, 2018; 顾玉超, 2019). 因此, 我们将156~153Ma作为挤压构造结束并开始进入转折的时间.

关于早白垩世岩浆作用开始时间, 辽东半岛南部的最老年龄为140Ma, 而辽东半岛北部的最老年龄为139Ma(Wu等, 2005a; 吴福元等, 2005; Pei等, 2011; 刘杰勋等, 2016; 顾玉超, 2019; Li等, 2019; 李浩等, 2019; Wang等, 2019). 岩石地球化学研究显示, 这些岩体主要来源于地壳物质或岩石圈地幔的部分熔融, 可能形成于古太平洋板块俯冲作用下岩石圈拆沉导致的伸展环境(Wu等, 2005a; Pei等, 2011; 刘杰勋等, 2016). 辽东地区断陷盆地、拆离断层和变质核杂岩等伸展构造的年代学研究也表明, 早白垩世伸展构造开始于135Ma左右或更早, 并伴随着大规模的岩浆活动(纪沫等, 2009; 刘俊来等, 2011; Shen等, 2011). 显然, 辽东半岛南北几乎同时于139~140Ma开始新一轮岩浆活动, 代表了挤压向伸展作用转折期的结束时间. 因此, 挤压-伸展作用转折期是从156~153Ma开始, 并于140~139Ma结束.

5.4 构造意义与Au成矿构造控制作用

区域上, 晚侏罗世-早白垩世是太平洋板块俯冲方向由向NW转向NNW的时段(Kadarusman等, 2004; Liu等, 2017; Li等, 2019; Müller等, 2019; Yin等, 2020). 在板块构造体制和构造运动学变化的主导下, 东部华北克拉通内部的郯庐断裂带开始向北扩展, 并在渤海湾地区持续左行走向滑动(Zhang等, 2015, 2018, 2020; 朱光等, 2018). 然而, 这一时期板块俯冲作用强度相对较弱, 并且区域构造应力场作用强度逐渐减小, 导致辽东半岛构造、岩浆和变质作用较弱, 并没有形成明显的沉积盆地, 而主要表现为与左行走滑郯庐断裂配套的SN向R破裂(Riedel破裂)和NW向R'破裂. R-R'破

裂组合和右列排列共同作用, 造成中晚侏罗世大型统一盆地的分解切割作用(Rao等, 2011). 在上述分析基础上, 建立构造模式如图10所示.

在总体NW-SE向区域构造构造应力场作用下, 郯庐断裂带沿渤海湾地区向北扩展并持续左行走滑作用. 强度较弱的区域构造应力场产生的应变收缩和拉伸都不足以主导变形, 因此无法形成单纯的逆冲断层或者正断层, 而是在郯庐断裂带向北扩展背景下, 形成R-R'破裂组合和左行-逆冲与右行-逆冲共存的格局. 同时, R-R'组合排列形成右列形式, 在R-R'组合和区域NW-SE向构造应力场共同作用下, 断层桥区域形成隆起和剥蚀, 在两个相邻的R-R'组合断层桥区之间形成局部伸展区域, 从而保存了被分割破坏的早中侏罗世残留盆地(图10). 随着郯庐断裂带向北扩展和近NW-SE向主压应力场的不断减弱, R-R'破裂组合不断向SW发展并相应转变为褶皱变形(图3和图10).

沿草河口向斜向西仰起端形成的青城子金矿集区, 包括白云金矿和小佟家堡子金矿等, 主要发育于大石桥组上部向盖县组过渡的岩石组合部位, 并受控于草河口向斜转折端断层相关褶皱断端线的三角形变形区域. 因此, 青城子矿集区金矿形成时代主要为印支期(刘国平和艾永富, 2000; 薛春纪等, 2003; 张朋等, 2016; Liu等, 2019)(图8).

小佟家堡子金矿勘探与井下调查结果表明, 穿插于主要金矿体中的130Ma煌斑岩也具有金矿富集, 然而当同时期煌斑岩穿插于无矿围岩中时, 则不具有金成矿性(图7). 这种同期侵位煌斑岩既有含矿脉也有不含矿脉的现象表明, 煌斑岩侵位前以及侵位过程中可能对原始含矿层进行了改造, 并造成金元素的再活化和成矿流体的迁移, 显示本期成矿作用具有改造早期矿体和再富集的特点. 显然, 金成矿作用的活化与煌斑岩侵位同时, 或者要早. 推测晚侏罗世-早白垩世早期挤压-伸展的转折构造, 特别是R-R'构造组合及其右列排列, 是促成这一期成矿元素活化和迁移的关键.

6 结论

通过详细的构造解析、构造应力场恢复和年代学约束, 明确辽东半岛经历了晚侏罗世-早白垩世早期挤压向伸展的转折期, 明确这一期构造变形和变质作用较弱, 基本没有明显的岩浆和沉积作用. 综合前人岩

图10 盆地分解、构造迁移与上覆盆地形成构造模式图

浆岩和沉积岩年代学综合分析, 确定本期构造转折起始于156~153Ma, 并于140~139Ma结束.

在辽东半岛北部, 这次转折的构造样式主要包括近SN向逆冲-左行走滑和NW向逆冲-右行走滑断层组合, 以及断层相关的宽缓褶皱、膝折带等. 其断层组合呈右列排列, 并在相邻断层组合的断层桥区之间保留分解后的早中侏罗世残留盆地. 区域与矿床成矿作用分析表明, 本期挤压-伸展构造的转折可能导致了青城子矿集区早白垩世金成矿元素的活化和含矿液体的迁移, 是这一期成矿的关键控制因素.

上述构造样式组合和运动学主要受控于左行走滑和向北扩展的郯庐断裂带, 是NW-SE向区域构造应力场逐渐减弱条件下在断裂带东盘形成的R-R'破裂. 大地构造上, 可能与这一阶段太平洋板块从向NW俯冲开始转向向NNW俯冲有关.

致谢 丹东丹银矿冶有限责任公司赵民总经理陪同井下工作并提供了相关井下数据, 王安平、李晓双、杨文静和付宇同学参加了部分野外工作, 在中国地质大学(北京)矿物激光微区分析实验室完成锆石U-Pb年代学分析工作, 中国科学院南京地质古生物研究所董重博士协助

厘定了侏罗纪地层中的植物化石和年代,五位匿名审稿人提出了极具建设性的意见和建议并促成稿件质量改进提高,在此一并致谢。

参考文献

- 顾玉超. 2019. 辽东五龙金矿区中生代构造-岩浆作用对金成矿制约. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1-156
- 纪沫, 刘俊来, 胡玲, 关会梅, Davis G A, 张维. 2009. 辽南变质核杂岩饮马湾山和赵房岩体锆石SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义. 岩石学报, 25: 173-181
- 李浩, 李勇, 马双, 王鹏, 魏巍, 樊金虎, 郑军, 刘怀金. 2019. 辽东大东沟金矿岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及岩石地球化学特征. 地质通报, 38: 1543-1555
- 辽宁省地质勘察院. 2014. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社. 1433
- 刘国平, 艾永富. 2000. 辽东白云金矿床成矿时代探讨. 岩石学报, 16: 627-632
- 刘杰勋, 郭巍, 朱凯. 2016. 辽东岫岩地区早白垩世侵入岩的年代学、地球化学及地质意义. 岩石学报, 32: 2889-2900
- 刘会龙. 2020. 辽东草河口地区构造变形特征及金成矿预测分析. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1-61
- 刘俊来, 纪沫, 申亮, 关会梅, Davis G A. 2011. 辽东半岛早白垩世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵. 中国科学: 地球科学, 41: 618-637
- 单文琅. 1991. 构造变形分析的理论、方法和实践. 武汉: 中国地质大学出版社
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. 高校地质学报, 11: 305-317
- 薛春纪, 陈毓川, 路远发, 李华芹. 2003. 辽东青城子矿集区金、银成矿时代及地质意义. 矿床地质, 22: 177-184
- 杨振升. 1985. 韧性变形带与太古宙杂岩. 吉林大学学报(地), 2: 1-11
- 张朋, 李斌, 李杰, 柴鹏, 王希今, 沙德铭, 时建民. 2016. 辽东裂谷白云金矿载金黄铁矿Re-Os定年及其地质意义. 大地构造与成矿学, 40: 731-738
- 朱光, 刘程, 顾承串, 张帅, 李云剑, 苏楠, 肖世椰. 2018. 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, 48: 415-435
- 朱日祥, 徐义刚. 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 49: 1346-1356
- Allmendinger R W, Cardozo N, Fisher D. 2012. Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors in Structural Geology. Cambridge: Cambridge University Press
- Anderson E M. 1951. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Application to Britain. Edinburgh: Oliver & Boyd
- Beltrando M, Hermann J, Lister G, Compagnoni R. 2007. On the evolution of orogens: Pressure cycles and deformation mode switches. *Earth Planet Sci Lett*, 256: 372-388
- Beltrando M, Lister G, Hermann J, Forster M, Compagnoni R. 2008. Deformation mode switches in the Penninic units of the Urtier Valley (Western Alps): Evidence for a dynamic orogen. *J Struct Geol*, 30: 194-219
- Cogné J P, Kravchinsky V A, Halim N, Hankard F. 2005. Late Jurassic-Early Cretaceous closure of the Mongol-Okhotsk Ocean demonstrated by new Mesozoic palaeomagnetic results from the Trans-Baikal area (SE Siberia). *Geophys J Int*, 163: 813-832
- Collins W J. 2002. Hot orogens, tectonic switching, and creation of continental crust. *Geology*, 30: 535-538
- Faure M, Lin W, Le Breton N. 2001. Where is the North China-South China block boundary in eastern China? *Geology*, 29: 119-122
- Dong S, Zhang Y, Zhang F, Cui J, Chen X, Zhang S, Miao L, Li J, Shi W, Li Z, Huang S, Li H. 2015. Late Jurassic-Early Cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: A synthesis of the Yanshan Revolution. *J Asian Earth Sci*, 114: 750-770
- Gilder S A, Leloup P H, Courtillot V, Chen Y, Coe R S, Zhao X, Xiao W, Halim N, Cogné J P, Zhu R. 1999. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data. *J Geophys Res*, 104: 15365-15390
- Gu Y C, Chen R Y, Li D T, Yang J L, Yang F C, Jia H X, Dick J, Hu Q H, Ju N, Cao J. 2018. Jurassic ca. 160 Ma crustal remelting and Paleoproterozoic intrusive rock residues in the Liaodong Peninsula, East China: Evidence from in situ zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopic analysis. *Geol J*, 53: 174-188
- Hacker B R, Wallis S R, Ratschbacher L, Grove M, Gehrels G. 2006. High-temperature geochronology constraints on the tectonic history and architecture of the ultrahigh-pressure Dabie-Sulu Orogen. *Tectonics*, 25: TC5006
- Hu Z, Liu Y, Gao S, Liu W, Zhang W, Tong X, Lin L, Zong K, Li M, Chen H, Zhou L, Yang L. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. *J Anal At Spectrom*, 27: 1391-1399
- Kadarusman A, Miyashita S, Maruyama S, Parkinson C D, Ishikawa A. 2004. Petrology, geochemistry and paleogeographic reconstruction of the East Sulawesi Ophiolite, Indonesia. *Tectonophysics*, 392: 55-83
- Kettermann M, Urai J L. 2015. Changes in structural style of normal faults due to failure mode transition: First results from excavated scale models. *J Struct Geol*, 74: 105-116
- Kong R, Yan D P, Qiu L, Wells M L, Wang A, Dong X, Mu H, Gong L

- X. 2020. Early Cretaceous tectonic transition and SW-ward basin migration in northern Liaodong Peninsula, NE China: Sedimentary, structural, and geochronological constraints. *Geol J*, 55: 5681–5702
- Li C, Zhang C, Cope T D, Lin Y. 2016. Out-of-sequence thrusting in polycyclic thrust belts: An example from the Mesozoic Yanshan belt, North China Craton. *Tectonics*, 35: 2082–2116
- Li S Z, Zhao G, Sun M, Fuyuan W, Liu J, Hao D, Han Z, Luo Y. 2004. Mesozoic, not Paleoproterozoic SHRIMP U-Pb zircon ages of two liaoji granites, eastern block, north China Craton. *Int Geol Rev*, 46: 162–176
- Li S Z, Zhao G, Sun M, Han Z, Luo Y, Hao D, Xia X. 2005. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohé assemblage in the Eastern Block of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 24: 659–674
- Li S Z, Zhao G, Dai L, Liu X, Zhou L, Santosh M, Suo Y. 2012. Mesozoic basins in eastern China and their bearing on the deconstruction of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 47: 64–79
- Li S Z, Jahn B M, Zhao S, Dai L, Li X, Suo Y, Guo L, Wang Y M, Liu X C, Lan H Y, Zhou Z Z, Zheng Q, Wang P. 2017. Triassic southeastward subduction of North China Block to South China Block: Insights from new geological, geophysical and geochemical data. *Earth-Sci Rev*, 166: 270–285
- Li S Z, Suo Y, Li X, Zhou J, Santosh M, Wang P, Wang G, Guo L, Yu S, Lan H, Dai L, Zhou Z, Cao X, Zhu J, Liu B, Jiang S, Wang G, Zhang G. 2019. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Earth-Sci Rev*, 192: 91–137
- Lin W, Wang Q. 2006. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China block: A crustal response to subcontinental mantle removal? *Bull de la Société Géologique de France*, 177: 287–297
- Lin W, Faure M, Monie P, Schärer U, Panis D. 2008. Mesozoic extensional tectonics in eastern Asia: The South Liaodong Peninsula metamorphic core complex (NE China). *J Geol*, 116: 134–154
- Lin W, Monié P, Faure M, Schärer U, Shi Y, Breton N L, Wang Q. 2011. Cooling paths of the NE China crust during the Mesozoic extensional tectonics: Example from the south-Liaodong peninsula metamorphic core complex. *J Asian Earth Sci*, 42: 1048–1065
- Lister G S, Forster M A, Rawling T J. 2001. Episodicity during orogenesis. *Geol Soc Lond Sp Publ*, 184: 89–113
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, Wu J S, Shen Q H. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20: 339–342
- Liu D Y, Wilde S A, Wan Y, Wu J, Zhou H, Dong C, Yin X. 2008. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton. *Am J Sci*, 308: 200–231
- Liu J L, Davis G A, Lin Z, Wu F. 2005. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. *Tectonophysics*, 407: 65–80
- Liu J L, Ji M, Shen L, Guan H M, Davis G A. 2011. Early cretaceous extensional structures in the liaodong peninsula: Structural associations, geochronological constraints and regional tectonic implications. *Sci China Earth Sci*, 54: 823–842
- Liu J L, Shen L, Ji M, Guan H, Zhang Z, Zhao Z. 2013. 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*, 32: 1121–1141
- Liu J, Liu F X, Li S H, Lai C K. 2019. Formation of the Baiyun gold deposit, Liaodong gold province, NE China: Constraints from zircon U-Pb age, fluid inclusion, and C-H-O-Pb-He isotopes. *Ore Geol Rev*, 104: 686–706
- Liu S, Gurnis M, Ma P, Zhang B. 2017. Reconstruction of northeast Asian deformation integrated with western Pacific plate subduction since 200 Ma. *Earth-Sci Rev*, 175: 114–142
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chem Geol*, 257: 34–43
- Liu Y, Gao S, Hu Z, Gao C, Zong K, Wang D. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-North China orogen: U-Pb Dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *J Petrol*, 51: 537–571
- Liu Y, Hu Z, Zong K, Gao C, Gao S, Xu J, Chen H. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chin Sci Bull*, 55: 1535–1546
- Lu X P, Wu F Y, Guo J H, Wilde S A, Yang J H, Liu X M, Zhang X O. 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern block in the North China Craton. *Precambrian Res*, 146: 138–164
- Ludwig K R. 2001. User's manual for Isoplot/EX (Rev. 2.49): A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronol Center Sp Publ, 1: 55
- Marrett R A, Allmendinger R W. 1990. Kinematic analysis of fault-slip data. *J Struct Geol*, 12: 973–986
- Metelkin D V, Vernikovsky V A, Kazansky A Y, Wingate M T D. 2010. Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence. *Gondwana Res*, 18: 400–419
- Müller R D, Zahirovic S, Williams S E, Cannon J, Seton M, Bower D J, Tetley M G, Heine C, Le Breton E, Liu S, Russell S H J, Yang T, Leonard J, Gurnis M. 2019. A global plate model including lithospheric deformation along major rifts and orogens since the

- Triassic. *Tectonics*, 38: 1884–1907
- Niu M, Yu Y, Tian L, Niu W, Xu H. 2020. Ore-controlling effect of structure and distribution of deep rock mass on Pb-Zn deposit in Qingchengzi ore concentration area, Liaoning. *Glob Geol*, 23: 24–30
- Pei F P, Xu W L, Yang D B, Yu Y, Wang W, Zhao Q G. 2011. Geochronology and geochemistry of Mesozoic mafic-ultramafic complexes in the southern Liaoning and southern Jilin provinces, NE China: Constraints on the spatial extent of destruction of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 40: 636–650
- Pei J, Sun Z, Liu J, Liu J, Wang X, Yang Z, Zhao Y, Li H. 2011. A paleomagnetic study from the Late Jurassic volcanics (155 Ma), North China: Implications for the width of Mongol-Okhotsk Ocean. *Tectonophysics*, 510: 370–380
- Qiu L, Kong R, Yan D P, Wells M L, Wang A, Sun W, Yang W X, Han Y G, Li C, Zhang Y, Ariser S. 2018. The Zhayao tectonic window of the Jurassic Yantai thrust system in Liaodong Peninsula, NE China: Geometry, kinematics and tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 164: 58–71
- Qiu L, Yan D P, Xu H, Shi H, Dong W, Sun S. 2020. Late Cretaceous mud volcanism in the southwestern Songliao basin records slab rollback of the subducted paleo-Pacific Plate underneath NE China. *J Asian Earth Sci*, 3: 100028
- Rao G, Lin A, Yan B, Jia D, Wu X, Ren Z. 2011. Co-seismic Riedel shear structures produced by the 2010 Mw 6.9 Yushu earthquake, central Tibetan Plateau, China. *Tectonophysics*, 507: 86–94
- Ren Z, Lin W, Faure M, Meng L, Qiu H, Zeng J. 2021. Triassic-Jurassic evolution of the eastern North China Craton: Insights from the Lushun-Dalian area, South Liaodong Peninsula, NE China. *GSA Bull*, 133: 393–408
- Shen L, Liu J L, Hu L, Ji M, Guan H M, Davis G A. 2011. The Dayingzi detachment fault system in Liaodong Peninsula and its regional tectonic significance. *Sci China Earth Sci*, 54: 1469–1483
- Song B, Nutman A P, Liu D, Wu J. 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Res*, 78: 79–94
- Tian Z, Liu F, Windley B F, Liu P, Wang F, Liu C, Wang W, Cai J, Xiao W. 2017. Polyphase structural deformation of low- to medium-grade metamorphic rocks of the Liaohe Group in the Jiao-Liao-Ji Orogenic Belt, North China Craton: Correlations with tectonic evolution. *Precambrian Res*, 303: 641–659
- Wang W, Cawood P A, Liu S, Guo R, Bai X, Wang K. 2017. Cyclic formation and stabilization of Archean lithosphere by accretionary orogenesis: Constraints from TTG and potassic granitoids, North China Craton. *Tectonics*, 36: 1724–1742
- Wang Y. 2006. The onset of the Tan-Lu fault movement in eastern China: Constraints from zircon (SHRIMP) and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Terra Nova*, 18: 423–431
- Wang Y, Wang F, Shi W, Yang L, Wu L. 2019. Timing and processes of ore formation in the Qingchengzi polymetallic Orefield, Northeast China: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 94: 789–800
- Wang T, Zheng Y, Zhang J, Zeng L, Donskaya T, Guo L, Li J. 2011. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes. *Tectonics*, 30: TC6007
- Wells M L, Hoisch T D, Cruz-Urbe A M, Vervoort J D. 2012. Geodynamics of synconvergent extension and tectonic mode switching: Constraints from the Sevier-Laramide orogen. *Tectonics*, 31: TC1002
- White L T, Hall R, Gunawan I, Kohn B. 2019. Tectonic mode switches recorded at the northern edge of the Australian plate during the Pliocene and Pleistocene. *Tectonics*, 38: 281–306
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O, Yang J H. 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 103–119
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Zhang X O. 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chem Geol*, 221: 127–156
- Xu J, Zhu G, Tong W, Cui K, Liu Q. 1987. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 134: 273–310
- Xu Y G, Wu X Y, Luo Z Y, Ma J L, Huang X L, Xie L W. 2007. Zircon Hf isotope compositions of Middle Jurassic-Early Cretaceous intrusions in Shandong Province and its implications. *Acta Petrol Sin*, 23: 307–316
- Yan D P, Zhou M F, Song H L, Wang G H, Sun M. 2006. Mesozoic extensional structures of the Fangshan tectonic dome and their subsequent reworking during collisional accretion of the North China Block. *J Geol Soc*, 163: 127–142
- Yan D P, Zhou M F, Zhao D, Li J W, Wang G H, Wang C L, Qi L. 2011. Origin, ascent and oblique emplacement of magmas in a thickened crust: An example from the Cretaceous Fangshan adakitic pluton, Beijing. *Lithos*, 123: 102–120
- Yan D P, Qiu L. 2020. Geology of China and adjacent regions: An introduction. *J Asian Earth Sci*, 203: 104533
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A, Chu M F. 2004. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Gudaoling granite and its mafic enclaves, northeast China. *Geochim Cosmochim Acta*, 68: 4469–4483
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Lo C H, Wilde S A, Davis G A. 2007a. 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*, 119: 1405–1414
- Yang J H, Sun J F, Chen F, Wilde S A, Wu F Y. 2007b. Sources and petrogenesis of Late Triassic dolerite dikes in the Liaodong Peninsula: Implications for post-collisional lithosphere thinning of the eastern North China Craton. *J Petrol*, 48: 1973–1997
- Yang T N, Peng Y, Leech M L, Lin H Y. 2011. Fold patterns indicating Triassic constrictional deformation on the Liaodong Peninsula, eastern China, and tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 40: 72–83
- Yin H, Zhu G, Wu X, Su N, Lu Y, Zhang S. 2020. Continental response to mid-Cretaceous global plate reorganization: Evidence from the Tan-Lu Fault Zone, eastern China. *Gondwana Res*, 86: 23–45
- Zhai M, Guo J, Liu W. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. *J Asian Earth Sci*, 24: 547–561
- Zhang J, Hao T, Dong S, Chen X, Cui J, Yang X, Liu C, Li T, Xu Y, Huang S, Re F. 2015. The structural and tectonic relationships of the major fault systems of the Tan-Lu fault zone, with a focus on the segments within the North China region. *J Asian Earth Sci*, 110: 85–100
- Zhang S, Zhu G, Liu C, Li Y, Su N, Xiao S, Gu C. 2018. Strike-Slip Motion within the Yalu River fault zone, NE Asia: The development of a shear continental margin. *Tectonics*, 37: 1771–1796
- Zhang S, Zhu G, Xiao S, Su N, Liu C, Wu X, Yin H, Li Y, Lu Y. 2020. Temporal variations in the dynamic evolution of an overriding plate: Evidence from the Wulong area in the eastern North China Craton, China. *GSA Bull*, 132: 2023–2042
- Zhao G, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and P - T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 107: 45–73
- Zhao G, Sun M, Wilde S A, Li S Z. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Res*, 136: 177–202
- Zhao T, Zhu G, Lin S, Wang H. 2016. Indentation-induced tearing of a subducting continent: Evidence from the Tan-Lu Fault Zone, East China. *Earth-Sci Rev*, 152: 14–36
- Zhu G, Wang Y, Liu G, Niu M, Xie C, Li C. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China. *J Struct Geol*, 27: 1379–1398
- Zhu G, Liu G S, Niu M L, Xie C L, Wang Y S, Xiang B. 2009. Syn-collisional transform faulting of the Tan-Lu fault zone, East China. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 98: 135–155
- Zhu G, Niu M, Xie C, Wang Y. 2010. Sinistral to Normal Faulting along the Tan-Lu Fault Zone: Evidence for geodynamic switching of the East China continental margin. *J Geol*, 118: 277–293
- Zhu G, Jiang D, Zhang B, Chen Y. 2012. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics. *Gondwana Res*, 22: 86–103
- Zhu G, Chen Y, Jiang D, Lin S. 2015. Rapid change from compression to extension in the North China Craton during the Early Cretaceous: Evidence from the Yunmengshan metamorphic core complex. *Tectonophysics*, 656: 91–110
- Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, Zhang H F, Xia Q K, Zheng T Y. 2012. Destruction of the North China craton. *Sci China Earth Sci*, 55: 1565–1587
- Zhu R X, Fan H R, Li J W, Meng Q R, Li S R, Zeng Q D. 2015. Decratonic gold deposits. *Sci China Earth Sci*, 58: 1523–1537

(责任编辑: 刘少峰)