综 述

华北克拉通早白垩世地壳变形规律与动力学

朱光^{*}, 陆元超, 苏楠, 吴晓冬, 尹浩, 张帅, 谢成龙, 牛漫兰

合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

^{*} 通讯作者, E-mail: zhuguang59@hotmail.com

收稿日期: 2020-10-24; 收修改稿日期: 2021-02-08; 接受日期: 2021-02-25; 网络版发表日期: 2021-04-14

国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项项目(编号: 2016YFC0600102)和国家自然科学基金项目(批准号: 41830213, 41688103)资助

摘要 华北克拉通破坏峰期出现在早白垩世。综合分析这期间的地壳变形规律是揭示其破坏过程与动力学的重要途径。华北克拉通破坏峰期发生了强烈的伸展活动, 代表性的地壳变形产物为变质核杂岩、伸展穹窿与裂谷盆地。变质核杂岩集中在克拉通的南、北边缘, 是强烈伸展与岩浆活动共同作用下的产物, 在诸多方面有别于经典的造山带核杂岩。在相对较弱的伸展与隆升状况下, 变质核杂岩被伸展穹窿所取代。这期间的裂谷盆地呈面状分布于克拉通东部, 皆为中、小型盆地, 有别于西部稳定背景下的大型拗陷型盆地。在渤海湾以北, 东部的裂谷盆地具有主动裂谷特征, 而以南则呈现为被动裂谷性质。破坏峰期所发育的各类伸展构造一致指示NW-SE向拉张的应力状态, 在空间上十分稳定, 反映了板缘驱动的应力场特征。破坏峰期的伸展构造分布指示了宽达1800 km的弧后伸展区, 与平板块俯冲之后的板片后撤背景相吻合。而峰期伸展与火山活动起始时间的空间变化规律也支持平板块俯冲后的板片后撤驱动模式。地壳变形演化表明, 华北克拉通峰期破坏发生在早白垩世初燕山运动B幕挤压事件(平板块俯冲结果)之后, 又因晚白垩世初C幕挤压事件的出现而结束。

关键词 克拉通破坏峰期, 变质核杂岩, 伸展穹窿, 裂谷盆地, 动力学背景

1 引言

近年来, 人们对大陆演化认识上的一个重要进展是发现了克拉通破坏。全球克拉通破坏的典型代表是华北克拉通, 相关的研究已取得了丰硕的成果(如吴福元等, 2008, 2014; 朱日祥等, 2011, 2012; Zhu等, 2017)。克拉通破坏是指其稳定性的丧失, 其实质是岩石圈地幔的组成与性质发生了根本性的转变(成为大洋型), 而主要的表现是岩石圈的减薄、强烈的岩浆活动与地壳伸展(吴福元等, 2008, 2014; 朱日祥等, 2011, 2012,

2015; 郑永飞等, 2018)。已有的研究表明(如朱日祥等, 2011, 2012, 2015), 华北克拉通破坏的峰期出现在早白垩世, 相应的深部作用与浅部响应最为强烈, 发生了广泛而强烈的地壳变形。克拉通破坏峰期的地壳变形不但是理解破坏过程、机制与动力学的重要对象, 也关系到同期的资源效应, 包括克拉通破坏型金矿(朱日祥等, 2015; Zhu等, 2017)。

所谓克拉通破坏峰期, 是指克拉通正经历破坏的最强时期, 主要表现形式是克拉通转型期最强的岩浆与伸展活动。依据岩浆活动的强弱及岩石圈地幔性质

中文引用格式: 朱光, 陆元超, 苏楠, 吴晓冬, 尹浩, 张帅, 谢成龙, 牛漫兰. 2021. 华北克拉通早白垩世地壳变形规律与动力学. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1420–1443, doi: [10.1360/SSTe-2020-0297](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0297)

英文引用格式: Zhu G, Lu Y, Su N, Wu X, Yin H, Zhang S, Xie C, Niu M. 2021. Crustal deformation and dynamics of Early Cretaceous in the North China Craton. Science China Earth Sciences, 64(9): 1428–1450, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9749-0>

的转变时间, 一些学者主张华北克拉通破坏的峰期为 130~120Ma, 峰值为 125Ma, 至 121Ma 时已全面转变为新生的岩石圈地幔(如 Wu 等, 2005; 吴福元等, 2008; 朱日祥等, 2011; Dai 等, 2016; 郑永飞等, 2018). 然而, 华北克拉通东部早白垩世相似的岩浆活动一直持续到早白垩世末(如鲁东青山组火山岩; Zhu 等, 2010), 变质核杂岩与裂谷盆地指示整个早白垩世期间皆为强烈伸展期(Liu 等, 2005, 2013; Lin 等, 2008, 2012; Zhu 等, 2012; Li 等, 2020; Wu 等, 2020). 因而, 综合考虑伸展与岩浆活动的强弱, 将早白垩世作为华北克拉通破坏的峰期应更为合适(Zhu 等, 2012; 朱日祥等, 2015, 2020). 然而, 华北克拉通破坏峰期的准确时限, 以及这一峰期是如何出现与结束的, 仍然是没有解决的重要问题.

早白垩世华北克拉通峰期破坏中, 地壳呈现强烈的伸展活动, 导致了一系列变质核杂岩与伸展穹窿的形成, 以及大量正断层及其所控制裂谷盆地的发育. 对于这些伸展构造的变形规律与时空变化, 及其所揭示的动力学信息, 仍然缺乏系统的总结、对比与综合分析. 全球典型的变质核杂岩发育于碰撞或俯冲型造山带的后造山伸展背景下. 华北克拉通破坏阶段发育的变质核杂岩与造山型变质核杂岩在特征、发育过程及成因方面有何异同, 也是值得全面对比与系统总结的. 全面分析相关的地壳变形过程与演变历史, 也是限定克拉通峰期破坏开始与结束的有效途径. 华北克拉通破坏发生在弧后拉张的动力学背景下已被广泛接受(Zhu 等, 2012, 2015; Kusky 等, 2014; Zhang 等, 2014; 吴福元等, 2014; Wang 等, 2018; 郑永飞等, 2018; 朱光等, 2018). 然而, 详细的动力作用过程与弧后拉张机制却理解得仍然有限. 对克拉通破坏峰期地壳变形规律的系统分析有助于深入揭示克拉通破坏的动力学过程与机制.

本文以华北克拉通破坏峰期所发育的变质核杂岩、伸展穹窿及裂谷盆地对象, 对比克拉通型与造山型变质核杂岩的异同点, 总结地壳伸展变形的特征与时空变化规律, 以此探讨华北克拉通破坏的动力学过程与机制. 还通过分析地壳变形的演化历史, 探讨克拉通破坏峰期发生与结束的时间及其原因.

2 变质核杂岩与伸展穹窿

2.1 变质核杂岩

大陆变质核杂岩代表了陆壳最强烈拉伸的产物,

其发育过程中将上地壳拉断, 从而出露中-下地壳. 变质核杂岩发育过程中, 中-下地壳以形成低角度或平缓的伸展型韧性剪切带为特征, 具有一致的运动学特征, 分割了脆性的上拆离盘与韧性的下拆离盘. 地壳浅部的上拆离盘发育一系列脆性正断层, 控制了上叠盆地的发展. 岩浆活动多与变质核杂岩相伴生, 均衡隆升对中-下地壳的最终剥露具有重要贡献, 抬升过程中伸展韧性剪切带逐渐被拆离断层所叠加(Whitney 等, 2013; Platt 等, 2015; Brun 等, 2018). 变质核杂岩一般发育单条伸展韧性剪切带与拆离断层, 呈不对称结构. 少数情况下变质核杂岩也可以发育两条倾向相背的伸展韧性剪切带与拆离断层, 呈对称结构, 称为双向(bivergent)变质核杂岩.

华北克拉通早白垩世发育的变质核杂岩包括北部的呼和浩特变质核杂岩、云蒙山变质核杂岩、瓦子峪变质核杂岩和辽南与万福变质核杂岩, 以及南部的小秦岭变质核杂岩(图1).

2.1.1 呼和浩特变质核杂岩

呼和浩特变质核杂岩位于华北克拉通北部的阴山构造带内, 呈近东西向展布(图2). 该区发育一系列近东西向的燕山运动B幕逆冲构造(Davis 等, 2002; Davis 和 Darby, 2010; Guo 等, 2012), 如大青山逆冲断层. 随后的早白垩世期间, 很快就转变为伸展活动, 形成了呼和浩特变质核杂岩. 其核部杂岩介于北侧小井伸展剪切带与南侧呼和浩特拆离剪切带之间, 由晚太古代-古元古代变质基底、中元古代盖层及晚古生代与早白垩世岩体构成. 北部上盘主要出露变质基底、中元古界、海西期岩体及局部的早白垩世裂谷盆地. 南部上盘呈现类似的构成, 但早白垩世盆地更为发育.

呼和浩特变质核杂岩北侧的小井伸展剪切带向北倾, 呈上盘向北西的伸展运动(Guo 等, 2012). 而南侧的呼和浩特拆离剪切带向南倾, 为该变质核杂岩的主拆离剪切带, 上盘向南东运动(Guo 等, 2012). 因而, 该变质核杂岩属于对称型的双向变质核杂岩(Malavieille, 1993). 已有的构造与年代学研究表明(Davis 等, 2002; 张进江等, 2009; Davis 和 Darby, 2010; Guo 等, 2012), 呼和浩特变质核杂岩第一阶活动发生在 140~132Ma 期间, 首先沿着呼和浩特拆离剪切带发生上盘向南东的伸展运动, 同时伴随着较强的岩浆活动及上叠盆地的发育. 在 132~114Ma 伸展活动期间, 发生了均衡隆升,

图1 华北克拉通早白垩世伸展构造简图

据Li等(2020)及其中参考文献

导致北侧小井伸展剪切带利用早期逆冲断层活动, 同时南侧的呼和浩特主拆离剪切带在剪切活动中上拱与弯曲, 使得核部杂岩剥露。该核杂岩已获得的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄显示(张进江等, 2009; Davis和Darby, 2010), 其快速隆升与剥露发生在122~120Ma期间。与燕山构造带的同期变质核杂岩类似, 呼和浩特核杂岩下拆离盘也没有发生大规模的流动变形, 其形成主要受控于南、北两侧的伸展剪切带活动与均衡隆升。

2.1.2 云蒙山变质核杂岩

云蒙山变质核杂岩位于燕山构造带中部南侧, 呈北东向展布。其上拆离盘由晚太古代变质基底、中元古界、寒武系、上侏罗统、早白垩世岩体及怀柔裂谷盆地构成(图3)。下拆离盘主体为早白垩世云蒙山岩基(145~141Ma; Davis等, 1996; Zhu等, 2015)及晚侏罗世岩体(Davis等, 1996; Zhu等, 2015), 局部出露太古界与中元古界。上、下拆离盘之间的大水峪剪切带呈北东至北北东走向, 向南东缓倾, 为上盘向南东运动的伸

展剪切带(Davis等, 1996; Zhu等, 2015)。该剪切带下盘同期韧性变形带宽约2km, 没有出现大规模下拆离盘韧性变形。大水峪伸展剪切带开始活动时间为135Ma, 并伴随着岩浆活动与浅部怀柔裂谷盆地的发育(Davis等, 1996; Wang T等, 2011; Zhu等, 2015)。114Ma之后的早白垩世期间, 该核杂岩发生了均衡隆升, 下拆离盘加速向浅部剥露, 而大水峪剪切带被上拱弯曲。大水峪剪切带在晚期均衡隆升阶段, 一方面向浅部剥露, 另一方面又被同倾向的高角度河防口正断层所切割(图3; Zhu等, 2015)。在均衡隆升阶段, 核部杂岩同时也叠加了一系列北东走向的脆性正断层。云蒙山变质核杂岩发育过程也符合滚动枢纽模式, 低角度伸展剪切带活动与均衡隆升共同控制了该变质核杂岩的形成。

云蒙山变质核杂岩下拆离盘北部还发育了弧形展布的逆冲型(上盘向南南西运动)四合堂韧性剪切带。一系列年代学研究表明, 该剪切带形成于早白垩世初(138~137Ma; Zhu等, 2015)区域挤压作用下, 为云蒙山岩基侵位之后发育的逆冲构造, 但形成于云蒙山变质

图2 呼和浩特变质核杂岩平面(a)与剖面图(b)

据Guo等(2012)修改

核杂岩出现之前.

2.1.3 瓦子峪变质核杂岩

瓦子峪变质核杂岩位于燕山构造带东部的辽西地区,呈北北东向展布(图4).其西侧的上拆离盘为白垩纪阜新-义县裂谷盆地(上叠盆地).东侧的下拆离盘(下盘)为核部杂岩,由晚太古代高级变质基底、中-晚侏罗世至早白垩世岩体及局部的中元古界构成.盆地东缘局部出露中元古代浅变质沉积岩.介于上、下拆离盘之间的瓦子峪剪切带总体呈北北东走向,其西侧被同倾向、较陡的闾山正断层所切.该剪切带倾向北西,上盘向北西运动,属于伸展型剪切带(Darby等, 2004;

Lin等, 2012; Zhang等, 2012).剪切带下盘卷入同期变形的宽度不超过5km.一系列年代学研究及东侧早白垩世上叠盆地(阜新-义县盆地)的发育,表明瓦子峪变质核杂岩形成于早白垩世(Lin等, 2012; Zhang等, 2012).该变质核杂岩的开始时间约为135Ma,主要受控于铲形瓦子峪剪切带的伸展活动,浅部相应发育了半地堑式阜新-义县裂谷盆地(图4).约125Ma时,岩浆活动加强,地壳加热,剪切带的伸展活动与均衡隆升同时发生,下拆离盘快速抬升.在此过程中,拆离剪切带不断上拱和弯曲,浅部高角度正断层——闾山断层切割早期的瓦子峪剪切带.由此可见,瓦子峪变质核杂岩的演化符合滚动枢纽模式(Wernicke, 1981),拆离剪

图 3 云蒙山变质核杂岩平面(a)与剖面图(b)
据Zhu等(2015)修改

切带活动与均衡隆升共同导致变质核杂岩的形成与剥露。至早白垩世末,该变质核杂岩演化结束。

阜新-义县盆地在晚白垩世期间再次断陷,充填了上白垩统。但是,这一阶段变质核杂岩不再活动。该变

质核杂岩下盘还发育了医巫闾山韧性剪切带,呈椭圆形分布(图4),其上盘向南南西运动,并且下盘伴生了广泛的韧性变形。Zhang等(2012)认为医巫闾山韧性剪切带是晚侏罗世伸展活动的产物,代表了又一期的变

图4 辽西瓦子峪变质核杂岩平面(a)与剖面图(b)

据Zhang等(2012)修改

质核杂岩。

2.1.4 辽南与万福变质核杂岩

辽东半岛南部发育了辽南变质核杂岩,而北部发育了万福变质核杂岩。辽南变质核杂岩呈北北东向展

布,其下拆离盘核部杂岩由太古代变质基底和晚侏罗-早白垩世岩体构成(Wu等, 2005),而上拆离盘为中元古-古生代海相盖层及局部的早白垩世瓦房店裂谷盆地(图5)。上、下拆离盘之间为金州拆离韧性剪切带,现今呈不完整的椭圆形。该剪切带西支向北西缓倾,

上盘向北西运动; 而东支向南东缓倾, 上盘也向北西运动, 表明原始应为统一的、平缓的、上盘向北西运动的拆离剪切带(Liu等, 2005, 2013; Lin等, 2008). 剪切带下盘约2 km范围内出现了同期韧性变形带(图5), 而所剥露的下拆离盘太古界内没有出现大规模的同期流动变形与混合岩化现象. 一系列年代学研究表明(Wu等, 2005; Liu等, 2005, 2013; Yang等, 2007; Lin等,

2008), 辽南变质核杂岩的开始发育时间约为135Ma, 首先沿着平缓的金州拆离剪切带活动. 在130~120Ma期间发生了强烈的同构造岩浆活动, 而120~113Ma期间发生了快速折返与拆离剪切带的上拱、弯曲及下拆离盘的剥露. 该变质核杂岩的活动在107Ma左右结束. 辽南变质核杂岩发育过程与均衡隆升模式较为吻合, 其拆离剪切带经历了早期平缓的伸展剪切与后期均衡

隆升中的弯曲与剥露。

万福变质核杂岩呈南北向展布(图5), 其核部杂岩主体为早白垩世岩体, 局部为晚侏罗世岩体与太古界高级变质岩, 没有出现大规模的韧性流动变形。西侧上盘为中元古-古生界, 东侧上盘为古元古代变质基底、早白垩世岩体及桂花云裂谷盆地(图5)。核部杂岩的西界为东倾的金州剪切带北支, 也为上盘向西运动的伸展韧性剪切带。而东界为南北走向、东倾的万福剪切带, 呈上盘向东的伸展运动(Liu等, 2013)。Liu等(2013)认为万福核杂岩西侧的金州伸展剪切带在约135Ma就已开始活动, 并在130~120Ma期间伴生了强烈的岩浆活动。东侧的万福剪切带在120Ma时开始发育, 导致核部杂岩的快速隆升与冷却, 并持续至早白垩世末。由此可见, 万福核杂岩在135~120Ma期间受控于西侧金州剪切带(北支), 而在120Ma以后同时受控于倾向相背的金州和万福剪切带, 后期发展具有伸

展穹窿或双向核杂岩的特征。

2.1.5 小秦岭变质核杂岩

小秦岭变质核杂岩是郯庐断裂带以西、华北克拉通南缘唯一发育的早白垩世变质核杂岩(Zhang和Zheng, 2000)。该核杂岩位于华北克拉通古元古代中部造山带南侧, 呈北东至东西向的弧形展布(图6)。其核部杂岩由太古代-古元古代变质基底(太华杂岩)及晚三叠-早白垩世岩体构成。北部与西部上盘发育新生代渭河地堑, 而南部上盘主要出露新元古界及下古界(图6)。近年来的研究表明(Li等, 2020), 小秦岭变质核杂岩区所出露的东部变质基底(东西向展布)界于东西向的、倾向相背的太要-故县与小河正断层之界。这两条正断层形成于新生代(前者是渭河地堑的边界正断层), 指示东部变质基底的剥露主要是新生代地垒式伸展穹窿发育的结果, 与渭河地堑同期活动。

图6 小秦岭变质核杂岩平面(a)与剖面图(b)

据Li等(2020)修改

近年来的野外调查发现, 小秦岭变质核杂岩的伸展剪切带沿核部杂岩西缘发育, 呈北东走向, 向北西缓倾(图6)。该伸展剪切带称为小秦岭拆离剪切带(Li等, 2020), 上盘向北西运动。剪切带顶部发育了平行于糜棱面理的拆离断层, 抬升至浅部时又被高角度华县正断层所切割。该核杂岩下盘内还发育了一系列北东走向的伸展剪切带, 晚期也被同一走向的脆性正断层所叠加。一系列构造与年代学研究表明(Zhang和Zheng, 2000; Li等, 2020), 小秦岭核杂岩经历了早阶段(138~126Ma)的拆离剪切带活动与晚阶段(125~100Ma)的均衡隆升, 并且均衡隆升中仍然伴有正断层活动(伸展背景下的隆升)。这些年代学结果还指示了小秦岭变质核杂岩的冷却速率为 $8^{\circ}\text{C Ma}^{-1}$ (缓慢冷却), 活动的持续时间为38Ma。小秦岭核杂岩的演化也符合滚动枢纽模式。

2.2 伸展穹窿

伸展穹窿是指伸展构造控制的隆起, 常发育于后造山伸展活动中(Zheng, 2021), 也可见于板内环境。伸展穹窿边界以发育脆性正断层为特征, 但不发育低角度或平缓的伸展韧性剪切带, 从而有别于经典的科迪勒拉型变质核杂岩。伸展穹窿可以是伸展型片麻岩穹窿, 边界上具有两条或两条以上倾向相背、运动学相反的脆性正断层; 也可以是岩浆侵位隆升与正断层活动共同控制形成的伸展型岩浆穹窿, 隆起的核部常是一大型岩体或岩基, 而边界上也会发育正断层。伸展穹窿的伸展量一般小于变质核杂岩, 隆起幅度有限。华北克拉通东部在早白垩世伸展期代表性的伸展穹窿有喀喇沁、玲珑与五龙伸展穹窿。

2.2.1 喀喇沁伸展穹窿

喀喇沁伸展穹窿位于赤峰南部的燕山构造带北缘, 呈北东向展布(图7)。穹窿的东、西两侧分别为早白垩世半地堑式的平庄盆地和小牛盆地。穹窿内部主体为三叠纪喀喇沁岩基与太古代高级变质基底, 局部出露晚古生代与侏罗-白垩纪岩体(图7)。平庄盆地受控于穹窿东界上北东走向的楼子店-八里罕正断层。该断层向南东倾, 上盘向南东运动。小牛盆地受控于穹窿西界上北东走向的喀喇沁-东风正断层, 断层向北西倾, 沿倾向下滑。林少泽等(2014)认为, 在早白垩世期间这两条倾向相背的正断层同时活动, 一方面共同控

制了其间地垒的隆升, 从而形成喀喇沁伸展穹窿; 另一方面还分别控制平庄盆地和小牛盆地半地堑式的沉降。因而, 早白垩世期间该区是在NW-SE向拉伸中发育了伸展穹窿和两侧的裂谷盆地。该伸展穹窿所伴生的岩浆活动与盆地断陷, 指示活动时限为134~100Ma(林少泽等, 2014)。该穹窿内部还发育了一系列小型的、北东走向的早阶段伸展韧性剪切带与晚阶段正断层, 反映了隆升与断裂活动相伴生。总之, 喀喇沁伸展穹窿是早白垩世期间发育的地垒式伸展穹窿。

喀喇沁穹窿北部东缘发育了北东走向的楼子店-大城子韧性剪切带, 向南东缓倾, 上盘向北东运动(呈左行走滑)。而西缘发育了北东走向的喀喇沁-美林韧性剪切带, 向北西缓倾, 上盘也向北东运动(呈右行走滑)。这两个韧性剪切带的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为134~125Ma(张晓晖等, 2002; 王新社和郑亚东, 2005)。早期研究者认为该区属于早白垩世变质核杂岩(张晓晖等, 2002; 王新社和郑亚东, 2005), 这两条韧性剪切带原先为一条伸展拆离剪切带, 在早白垩世早期上盘向北东伸展运动(指示NE-SE向拉张)。楼子店-八里罕和喀喇沁-东风正断层被认为是在早白垩世晚期隆升中形成的(重力下滑的结果)。然而, 近年的研究发现(林少泽等, 2014), 楼子店-大城子和喀喇沁-美林剪切带形成于晚侏罗世, 是当时所发育变质核杂岩的产物, 其中的早白垩世 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄应代表后期隆升的冷却年龄。

2.2.2 玲珑伸展穹窿

玲珑伸展穹窿位于华北克拉通东南缘的胶东半岛, 为招远金矿田所在地。其东南部为苏鲁造山带, 西侧为郯庐断裂带。该伸展穹窿呈北北东向展布(图8), 内部被晚侏罗世岩体(玲珑与郭家店岩体)与早白垩世岩体(郭家岭、丛家、北节、尚庄、南天门、大泽山等岩体)所占据。穹窿的东、西两侧出露太古-古元古代变质基底及晚侏罗-早白垩世岩体。该穹窿东边界为北北东-北东走向的招远-平度(招平)断裂带, 向南东缓倾; 西边界为相似走向的焦家断裂, 向北西缓倾, 两者主体上沿着晚侏罗世玲珑岩基的边界发育。这两条断裂带的下盘在活动早期还发育了具有相同运动学特征的伸展韧性剪切带, 从而也可称为双向变质核杂岩(Charles等, 2011; Wu等, 2020)。该穹窿两边界断层之间还发育了一系列低角度至近水平的伸展韧性剪切带, 后期也被一系列正断层所叠加(图8)。显微构造分析表明, 这些

图7 喀喇沁伸展穹窿平面(a)与剖面图(b)

据林少泽等(2014)修改

剪切带活动时处于脆-韧性转换带深度。玲珑伸展穹窿的发育与区内早白垩世岩体侵位同期。韧性组构与脆性正断层应力场反演表明这一穹窿是在NW-SE向拉张

中发育的(Wu等, 2020)。一系列年代学研究成果表明(Charles等, 2011; Wu等, 2020), 玲珑伸展穹窿起始于137Ma, 在137~123Ma处于韧性变形阶段, 123~108Ma

抬升至浅部而叠加脆性变形。总之, 玲珑伸展穹窿属于地垒式伸展穹窿, 由于两侧伴生双向拆离剪切带也可称为双向变质核杂岩(Malavieille, 1993)。

2.2.3 五龙伸展穹窿

五龙伸展穹窿位于华北克拉通东北部, 东邻中朝边界的鸭绿江(图1和图9)。该伸展穹窿是五龙金矿区所在的隆起区, 出露晚侏罗世五龙岩体、早白垩世五龙背和三股流岩体与局部的古元古代辽河群(李三忠等, 2004)。区内五龙背岩体侵位后, 在晚侏罗世经历了NW-SE向挤压下的缩短变形(D_1), 导致了一系列逆冲型韧性剪切带的发育及其间岩体的透入性韧性变形(肖世椰等, 2018; Zhang等, 2020)。早白垩世期间(146~132Ma; Zhang等, 2020), 该区又发生了南北向挤压(D_2), 形成了一系列北东走向的脆性左行平移断层(图9)。随后的早白垩世期间(132~100Ma; Zhang等, 2020), 该区经历了NW-SE拉张(D_3)与岩浆活动, 造成早期北东走向断层转变为正断层, 以及一系列新生的正断层发育, 并伴生大规模的金成矿。这一系列正断层皆向北西陡倾, 呈现为阶梯状组合。正是这些阶梯状正断层的活动与同时的岩浆侵位隆升导致了五龙伸展穹窿的形成, 并使后者成为独特的阶梯式伸展穹窿(图9)。

2.3 变质核杂岩发育特征与形成机制

变质核杂岩首先发现于北美西部科迪勒拉(俯冲型)造山带盆-岭省(Davis和Coney, 1979), 随后在全球多数俯冲或碰撞型造山带内都发现了此类构造, 从而被认为是后造山伸展的代表性构造(Whitney等, 2013; Platt等, 2015; Brun等, 2018)。对于全球造山带变质核杂岩的大量研究表明, 它们常形成于造山带增厚地壳背景下, 伸展活动中伴随着下地壳流动或重力垮塌(Teyssier等, 2005; Tirel等, 2008)。典型的造山带变质核杂岩也称为科迪勒拉型(Cordillera-type)变质核杂岩, 发育了单条低角度或平缓的拆离韧性剪切带, 前者多呈滚动枢纽模式演化, 而后者通过均衡隆升模式演化。变质核杂岩内的拆离韧性剪切带分割脆性上地壳(发育上叠盆地)与韧性的中-下地壳, 最终通过伸展运动与均衡隆升共同作用而使中-下地壳裸露地表, 实现上地壳的完全拉断。造山带变质核杂岩的演化多伴生岩浆活动、中-下地壳流动变形以及下地壳广泛的混合岩化作用, 核部常出露广泛卷入伸展变形的混合岩化

片麻岩与同构造侵入岩。

2.3.1 发育背景

华北克拉通上变质核杂岩主要发育在中-东部的南、北边缘。在早白垩世期间, 克拉通中-东部处于古太平洋板块俯冲背景下的弧后环境, 而非岩浆弧或俯冲型造山带部位(Zhu等, 2012, 2018)。因而, 华北克拉通峰期破坏中发育的变质核杂岩属于克拉通型或弧后型, 而非造山带型。

华北克拉通北部(阴山-燕山带构造带)在晚古生代北部索伦克洋向南俯冲中成为岩浆弧环境(Zhang S H等, 2009), 而在古生代末至早中生代索伦克洋的最终关闭中成为前陆缩短变形带(林少泽等, 2013; Zhang等, 2014; Gu等, 2018)。三叠纪, 沿秦岭-大别-苏鲁造山带的碰撞造山作用(Li等, 2011)也使得华北克拉通南缘(包括辽南地区)成为前陆缩短变形带(Zhao等, 2016)。华北克拉通南、北部在前陆缩短变形中导致了地壳中等程度的加厚(约35~40km; Wang等, 2015; Wei等, 2016), 但与造山带显著的地壳加厚仍然有别。

典型的造山带核杂岩形成于重力垮塌或拆沉诱发的后造山伸展中, 因地壳的显著加厚与加热而伴生广泛的下地壳流动(Whitney等, 2013; Platt等, 2015; Brun等, 2018)。但是, 华北克拉通变质核杂岩的发育背景显然不同于后造山环境。Wang等(2015)通过数值模拟分析发现, 在软弱下地壳、较高的Moho面初始温度($>800^{\circ}\text{C}$)和较慢的伸展速率($<1\text{cm a}^{-1}$)条件下, 变质核杂岩也可以形成于非增厚的大陆地壳环境。华北克拉通在早白垩世峰期破坏中, 因地幔底侵而诱发广泛的下地壳部分熔融(朱日祥等, 2012; 吴福元等, 2014; Zhu等, 2017), 从而导致大规模的岩浆活动, 使得下地壳升温而变软(Wang等, 2015)。早白垩世期间, 具有中等加厚地壳的华北克拉通边缘也具有较强的岩浆活动, 从而成为克拉通上变质核杂岩发育的最有利环境。然而, 华北克拉通变质核杂岩发育的深部过程机理仍需要今后更加深入的研究加以揭示。

2.3.2 变形特征与演化模式

华北克拉通变质核杂岩下拆离盘均没有显示同期混合岩化与广泛的流动变形现象, 仅出露中地壳层次。这些现象与造山带变质核杂岩下拆离盘常为下地壳裸露、强烈的混合岩化(多裸露混合岩化片麻岩)及广泛

图 8 玲珑伸展穹窿平面(a)与剖面图(b)

据Wu等(2020)修改

图 9 五龙伸展穹窿平面(a)与剖面图(b)
据肖世桡等(2018)

的流动变形形成了鲜明的对照。这反映了克拉通核杂岩下拆离盘加热与软化程度有限，应变主要集中在拆离剪切带上(Zhang等, 2012)。克拉通核杂岩区地壳加厚程度有限，背景温度不高，岩浆活动导致的地壳加热和软化有限，从而限制了中-下地壳的透入性流动变形与隆升幅度。

造山带核杂岩拆离韧性剪切带早期常呈平缓至近水平产状，伴随着显著的下地壳流动，然后通过均衡隆升而剥露至浅部(Teyssier等, 2005)。华北克拉通核杂岩除辽南核杂岩具有原始近水平的拆离韧性剪切带及符合均衡隆升模式外，其他均发育低角度拆离韧性剪切带，通过滚动枢纽模式演化。华北克拉通变质核杂岩

这些特征指示中地壳仍然是应变局限化占主导, 也与克拉通中-下地壳软化程度有限相吻合。

造山带变质核杂岩一般持续时间小于20Myr, 常为快速伸展活动(Rey等, 2009; Whitney等, 2013; Platt等, 2015; Rabillard等, 2018)。由上文可见, 华北克拉通变质核杂岩伸展活动的持续时间为35~40Myr, 显示了较长的持续时间。以小秦岭为例, 其拆离剪切带记录的冷却速率为 $8^{\circ}\text{C Ma}^{-1}$, 指示了较为缓慢的伸展活动。因而, 与造山带核杂岩相比较, 克拉通核杂岩以长期、慢速伸展为特征。

华北克拉通变质核杂岩与伸展穹窿发育经历了两个阶段。早阶段为伸展剪切带或断层活动占主导, 晚阶段以均衡隆升为主。早阶段多发生在135~126Ma, 而晚阶段主要为125~100Ma。已有研究表明(Zhu等, 2015; Li等, 2020), 这些核杂岩均衡隆升阶段仍然伴随着伸展活动。这两个伸展阶段均伴随着岩浆活动, 指示两者的密切伴生关系。然而, 它们的均衡隆升开始时间与岩浆活动峰期(125Ma; 朱日祥等, 2012; 吴福元等, 2014)相吻合, 指示主要是岩浆活动的加热作用导致均衡隆升的发生与相应的核部杂岩剥露。

2.3.3 时空变化规律

华北克拉通变质核杂岩的空间分布, 除了集中在南、北边缘外, 还显示了与同期岩浆活动密集程度的正相关性, 以及总体上向东增加的趋势(图1)。岩浆活动的加热作用促进了地壳的软化与强度降低, 从而有助于变质核杂岩的发育。变质核杂岩向东增多的原因是向东更接近大洋俯冲带而伸展强度增大, 这也是大洋板片后撤的必然结果。

综合对比华北克拉通早白垩世变质核杂岩与伸展穹窿的起始时间(图1), 西部比东部的起始时间略偏早。最西部的呼和浩特与小秦岭变质核杂岩的开始时间分别为140Ma(Guo等, 2012)和138Ma(Li等, 2020), 而东部多开始于134~135Ma, 只有玲珑伸展穹窿起始于137Ma(Wu等, 2020)。总体上, 变质核杂岩与伸展穹窿所记录的峰期起始伸展时间具有西早东晚的特点, 但内部总体上又具有准同时特点。

华北克拉通峰期破坏中所发育的伸展穹窿集中在克拉通北部(房山岩浆穹窿偏内部)。它们在发育时代、演化历史、变形运动学及其与岩浆活动的关系等诸多方面与变质核杂岩具有相似性。不同的是, 这些伸

展穹窿为两条倾向相反正断层所控制, 呈现为地垒式结构。它们多没有出露拆离韧性剪切带, 核部至多出露脆-韧性过渡带层次。显然, 伸展穹窿的正断层位移及核部隆升幅度均小于变质核杂岩, 表明是在相对较弱的伸展与隆升状况下取代了变质核杂岩的发育。

3 伸展盆地

3.1 空间分布与充填特征

在华北克拉通早白垩世破坏峰期, 其浅部地质另一突出现象是一系列伸展盆地的发育(Li等, 2012; Zhu等, 2012)。克拉通东、西部早白垩世盆地的格局具有显著的差异。西部鄂尔多斯盆地为南北向展布的大型盆地(图1)。盆地西界为一个近南北走向、向东倾的大型正断层, 东界为超覆边界, 主体呈大型半地堑格局(图1)。华北克拉通西部早白垩世期间的盆地发育特征, 以及同期岩浆活动的缺失, 指示了弱伸展背景, 反映了稳定的克拉通环境。这期间华北克拉通东部的盆地格局却与西部形成鲜明对照, 呈现为一系列中、小型断陷盆地, 正断层十分发育, 总体上具有宽裂谷特征(图1)。东部盆地内普遍发育火山岩, 盆外侵入岩广布。东部面状分布的中、小型裂谷盆地和同期强烈岩浆活动指示了华北克拉通东部发生了强烈的地壳或岩石圈伸展作用, 反映了显著的克拉通破坏。

在燕山构造带和辽东及辽南地区, 早白垩世期间除了发育变质核杂岩与伸展穹窿外, 还形成了一系列裂谷盆地(图1、3、4、5、7、9)。这些盆地的边界断层主要为北东-北北东走向的正断层。盆地内下部充填早白垩世中-酸性火山岩(张家口组/义县组/桂云花组), 上部为陆相碎屑岩充填。以瓦子峪变质核杂岩西侧的阜新-义县盆地为例(图4), 属于该变质核杂岩的上叠盆地。该盆地东界上的控盆断裂为北北东走向、西倾的闾山正断层, 控制了半地堑式盆地发育。盆地内自下而上充填了早白垩世义县组(火山岩)、九佛堂组、沙海县与阜新组。

大量钻孔与地震勘探资料揭示, 渤海湾盆地早白垩世期间也发育一系列裂谷盆地(Li等, 2012; Zhu等, 2012), 称为渤海湾盆地群(图1)。这些裂谷盆地下部为大套中-酸性火山岩(石臼坨组下段), 上部为陆相碎屑岩(石臼坨组上段)。这一盆地充填序列与燕山构造带同期裂谷盆地十分相似。

郯庐断裂带在早白垩世期间也转变为正断层活动(Zhang等, 2003; Zhu等, 2012), 在山东段(也称为沂沭断裂带)发育了四条大型正断层, 控制了其间的两个沂沭地堑与中部的汞丹山地垒(图10)。两个平行的沂沭地堑内, 自下而上充填了早白垩世莱阳组碎屑岩(局部发育)与青山组火山岩(125~100Ma; Zhu等, 2010), 其上为晚白垩世王氏组所角度不整合覆盖。

郯庐断裂带以东的胶莱盆地, 位于华北克拉通东南缘, 紧邻苏鲁造山带(图10)。该盆地在早白垩世断陷活动期间自下而上充填了莱阳组陆相碎屑岩和青山组火山岩。盆地内沉积受控于东侧北东向牟平断裂、南界上北东向五莲断裂和西界上北东向景芝断层, 显示主要受北东向正断层控制的裂谷盆地。盆地内部下白垩统的沉降中心带也呈北东向展布, 指示北东向断层活动最强, 与区域NW-SE向拉张相吻合(Zhu等, 2012)。

郯庐断裂带以西的合肥盆地位于华北克拉通南缘, 与大别造山带相邻(图11)。早白垩世盆地的沉降中心位于郯庐断裂的西侧, 呈北东向展布, 明显受控于郯庐正断层的活动。盆地沉降格局也指示, 早白垩世区域应力状态为NW-SE向拉张(Zhu等, 2012)。在此区域应力状态下, 盆地内原先存在的近东西向断层处于斜向拉张的弱活动状态, 垂直落差有限, 所控制的沉积厚度不大。合肥盆地东部自下而上充填了早白垩世朱巷组碎屑岩、毛坦厂组火山岩(局部发育)与响导铺组碎屑岩。而盆地南部, 继周公山组碎屑岩沉积之后, 发育了大套的早白垩世毛坦厂组中-酸性火山岩(130~115Ma; 王薇等, 2017)。

综上所述, 华北克拉通东部早白垩世裂谷盆地主要受控于北东-北北东走向正断层活动, 其他方位活动的断层多为基底断层的复活, 活动性相对较弱。这些裂谷盆地内的沉降带主体上呈现为北东走向, 与主边界

图 10 早白垩世胶莱盆地与郯庐断裂带沂沭地堑平面图(a)与剖面图(b)

图 11 早白垩世合肥盆地平面图(a)与剖面图(b)

断层方位相吻合。一系列早白垩世断层擦痕反演应力场结果(Zhu等, 2012)皆指示了NW-SE向区域拉张, 与盆地的控盆断裂方位及沉积格局相吻合。值得指出的是, 华北克拉通东部一系列早白垩世变质核杂岩与伸展穹隆的韧性组构也指示中-下地壳的拉张方向为NW-SE向, 与地壳浅部一致, 且在整个克拉通范围乃至中国东部均具有一致性。

3.2 盆地演化对比

华北克拉通早白垩世盆地在东部呈现为面状分布的中、小型裂谷盆地, 中部为盆地缺失区, 而西部则为稳定环境下发育的大型拗陷式盆地(图1)。这种盆地分布格局与克拉通东部破坏、西部稳定相吻合。

已有的资料显示(如Zhu等, 2010, 2012; Li等, 2012; 王薇等, 2017; Zhang等, 2019; Su等, 2020), 华北克拉通东部所发育的裂谷盆地在南北方向上起始时间总体没有显著的差异, 结束时间也没有明显的区别。它们的起始时间多为135Ma, 而结束时间多为100Ma左右(图12)。然而, 在克拉通北部, 东西向方向上存在着盆地的起始与结束时间的明显差异。该带早白垩世

盆地的起始时间明显西早东晚, 相应的峰期火山活动起始时间也具有同样的变化规律。西部普遍存在着130~135Ma的盆地火山喷发(张家口或东岭台组), 指示了较早的起始时间。而东部(如辽西)缺失早阶段的张家口组火山喷发(135~130Ma), 盆地与火山活动的起始时间为130~131Ma。该带早白垩世盆地的结束时间也是西早东晚。下花园盆地与京西盆地皆缺失张家口组以上的下白垩统, 而承德盆地缺失九佛堂组以上的下白垩统, 辽西地区则发育了早白垩世晚阶段的沙海组与阜新组(图12)。

华北克拉通东部在早白垩世裂谷盆地发育中, 皆伴随有火山喷发, 但是发育的层位在空间上具有差异(图12)。渤海湾及其以北的早白垩世裂谷盆地皆是先有火山喷发, 后有碎屑岩充填。而渤海湾以南的同期裂谷盆地却是先有碎屑岩充填, 再有火山岩喷发。在火山活动的持续时间方面, 北部至多持续15Ma, 而南部却持续较长, 多达25Ma。这种现象表明, 渤海湾及其以北在早白垩世伸展活动早阶段就伴生岩浆活动, 而以南却在伸展活动晚阶段才出现岩浆活动。这些现象显示克拉通破坏中伸展与岩浆活动并非因果关系, 而

图 12 (网络版彩图) 华北克拉通早白垩世盆地地层与演化对比

据Zhu等(2010, 2012)、王薇等(2017)、Zhang等(2019)、Su等(2020)及其内文献

是伴生关系,从而在空间上具有先后的差异.这种南北方向上的差异可能与先存岩石圈结构与组成的差异有关.

4 峰期破坏的开始与结束

侏罗-白垩纪期间, 华北克拉通经历了著名的燕山运动, 具体包括三期挤压事件, 分别称为燕山运动A、B、C幕(Wong, 1927, 1929; 李三忠等, 2004; 赵越等, 2004; Wang Y等, 2011; Wang等, 2013; Dong等, 2015)。华北克拉通的峰期破坏表现为强烈的区域伸展活动。依据已确定的各期构造演化时限, 早白垩世期间的伸展活动出现在燕山运动B幕与C幕之间(图12), 显示克拉通峰期破坏发生在一期区域挤压事件之后, 又因另一期区域挤压而结束(Dong等, 2015; 朱光等, 2018)。

4.1 燕山运动B幕

燕山运动B幕是指发生在早白垩世初的一次挤压事件,其标志为下白垩统张家口组与下伏土城子组/后城组之间的角度不整合。这一期区域挤压作用在华北克拉通中-东部影响广泛,所产生的构造包括平移断层、逆冲断层与褶皱(图13)。

燕山运动B幕挤压作用的一个突出表现是导致了

巨型郯庐断裂带一期左行平移活动(朱光等, 2018). 这期左行平移活动在该断裂带上被广泛识别, 皆呈现为陡立的北东-北北东走向的走滑韧性剪切带. 在大别造山带东缘, 这期剪切带糜棱岩的一系列白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为139~121Ma(Zhu等, 2005, 2010). 在大别与苏鲁造山带之间的张八岭隆起段, 这期剪切带糜棱岩内角闪石给出了143Ma的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄, 而黑云母给出了137~119Ma的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 冷却年龄值(Zhu等, 2005). 苏鲁造山带西缘的这期剪切带的角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 冷却年龄为132Ma(Zhu等, 2009). 郯庐断裂带北段的依兰-伊通和敦化-密山断裂带也普遍经历了早白垩世初的左行平移, 被认为是代表了两者的起源(顾承串等, 2016; Liu等, 2018). 在郯庐断裂带的这期左行平移活动中, 其旁侧还同时发育了一系列同方位的左行平移断层, 显示为大陆边缘巨型的压扭性走滑断裂系(Xu等, 1987; Zhang等, 2018).

在华北克拉通中-东部, 燕山运动B幕还造成了广泛的褶皱, 导致角度不整合常见, 褶皱影响的最新地层为上侏罗统. 在燕山构造带内, 侏罗系普遍卷入了这期褶皱, 局部还发生了地层倒转(张长厚等, 2011; Li 等, 2016). 大型的褶皱包括承德向斜与马兰峪背斜、西山的北岭向斜、九龙山向斜、妙峰山向斜、长峪沟向斜、老窑沟背斜等. 这些褶皱总体呈近东西向展布,

图 13 (网络版彩图)华北克拉通燕山运动B幕断裂构造简图

指示了燕山运动B幕近南北向挤压作用。

燕山运动B幕挤压事件在华北克拉通北部与中部导致了较为广泛的逆冲构造(图13)。燕山构造带上这期活动的大型逆冲构造包括丰宁-隆化逆断层、大庙-娘娘庙逆断层、承德县逆断层、尚义-赤城逆断层、古北口-平泉逆断层、兴隆逆断层、冷口逆断层、蓟县逆断层等(张长厚等, 2011)。它们主体为近东西走向, 以向南逆冲为主, 但也发育了一些向北逆冲的反冲断层。这些逆冲断层常切割上侏罗统, 局部被早白垩世岩体所侵入, 指示活动发生在侏罗纪与白垩纪之交。在早白垩世云蒙山岩基北缘, 发育了著名的四合堂逆冲型剪切带。其中的韧性组构指示上盘向南南西逆冲, 一系列年代学研究限定其活动时间为138~137Ma(早白垩世初; Davis等, 1996; Wang T等, 2011; Zhu等, 2015)。在随后的早白垩世云蒙山变质核杂岩活动中, 该剪切带抬升与弯曲(Zhu等, 2015), 明显指示这期挤压是发生在克拉通峰期破坏之前。在阴山构造带, 也发育了一系列近东西走向的逆冲-推覆构造(图13)。该带中段北部发育色尔腾山逆冲-推覆构造

体系, 南部发育大青山逆冲-推覆构造体系, 侏罗系卷入了逆冲活动(刘正宏等, 2002; Guo等, 2012)。另外, 在华北克拉通的中部带, 也发育有早白垩世初的逆冲断层, 多利用早期的北东走向断层活动(张岳桥等, 2007)。

总之, 燕山运动B幕压扭性变形广泛影响了华北克拉通中-东部。这期变形构造多指示了近南北向区域挤压应力场。通过该事件角度不整合上、下地层(张宏等, 2005; 孙立新等, 2007)以及一系列走滑与逆冲韧性剪切带的同位素定年(如Davis等, 1996; Zhu等, 2005, 2009, 2010; Wang Y等, 2011; Zhang等, 2018), 可以限定该事件发生在144~138Ma(早白垩世初), 属于较为短暂的区域性挤压。紧随着这一强挤压事件, 华北克拉通在早白垩世期间转变为较为长期而强烈的伸展活动, 呈现为克拉通的峰期破坏(Zhu等, 2015)。

4.2 晚白垩世初挤压事件

华北克拉通破坏峰期的强烈伸展与岩浆活动在晚白垩世发生了突变, 转变为岩浆活动的平静期, 构造活

动微弱, 盆地仅零星发育. 这一重大转折是因为发生了燕山运动C幕挤压事件.

近年来的深入研究发现, 燕山运动C幕挤压事件在整个郯庐断裂带上造成了一期广泛的左行平移活动. 在该断裂带的张八岭隆起段, 这期活动形成了北东走向的走滑韧性剪切带, 带内的早白垩世岩体与岩脉变形成为糜棱岩(朱光等, 2018). 在郯庐断裂带山东段(沂沭断裂带), 这期左行平移活动在南部形成了韧性剪切带, 而北部呈现为脆性平移断层. 卷入这期左行平移活动的最年轻青山组火山岩的锆石U-Pb年龄为97Ma, 最年轻的岩脉锆石U-Pb年龄为104Ma(Yin等, 2020). 在渤海湾以北的敦化-密山断裂带上, 这期左行平移活动主要呈现为脆性平移断层. 依据该断裂带内火山岩与岩体的定年, 可以限定平移活动时间为102~96Ma(Liu等, 2018).

在华北克拉通东部, 上、下白垩统之间的角度不整合已被广泛报道(黄汲清, 1960; 朱大岗等, 1999; 马寅生等, 2002; Zhang等, 2003; Liu等, 2018; Su等, 2020), 代表了燕山运动C幕挤压的结果. 克拉通内一系列早白垩世裂谷盆地的反转、抬升与消亡, 也是这一期区域挤压作用所致(Zhang等, 2003; Zhu等, 2012; Zhang等, 2019; Su等, 2020). 克拉通北部东缘北北东向的鸭绿江断裂带及辽西地区同方位的药王庙断裂在晚白垩世初所发生的左行平移活动(Liu等, 2018; Zhang等, 2019)也记录了燕山运动C幕挤压活动.

综上所述, 华北克拉通东部在晚白垩世初经历了一期燕山运动C幕挤压事件, 区域应力状态为近南北向挤压(Liu等, 2018; Zhang等, 2019; Su等, 2020). 正是这期区域挤压事件的出现, 结束了华北克拉通早白垩世峰期破坏中的强烈伸展作用, 使得克拉通的峰期破坏中止.

5 早白垩世动力学背景

华北克拉通的各种峰期破坏现象, 包括强烈的伸展与岩浆活动及岩石圈转型与减薄的范围, 只出现在其东部. 克拉通西部长期维持着稳定性, 并没有发生破坏. 在中国东部其他部位(东北与东南沿海地区), 早白垩世期间也呈现为类似的伸展与岩浆活动(Li, 2000; Xu等, 2013; Li等, 2014; Liu等, 2018). 这些现象明显指示, 华北克拉通破坏与古太平洋板块俯冲密切相关, 并

被广泛认可(如朱日祥等, 2012; Zhang等, 2014; 吴福元等, 2014; Wang等, 2018; 郑永飞等, 2018; 朱光等, 2018; Li等, 2019). 在早白垩世古太平洋板块俯冲期间, 锡霍特-阿林增生造山带及日本岛处于岩浆弧(俯冲型造山带)的部位(Maruyama等, 1997; Khanchuk等, 2016; Li等, 2019), 而其以西的华北克拉通东部则处于弧后地区, 即华北克拉通破坏实质上是发生在活动大陆边缘的弧后区(图14). 华北克拉通早白垩世峰期破坏中的强烈地壳伸展活动, 指示克拉通破坏具体是发生在弧后拉张背景下, 是俯冲的古太平洋(伊泽奈崎)板块(板片)后撤的结果(Zhu等, 2012; Kusky等, 2014; 郑永飞等, 2018). 然而, 关于该板片的原始状况与后撤细节, 目前了解仍然十分有限.

近年来, 通过对小秦岭变质核杂岩变形特征与伸展时限的详细厘定(Li等, 2020), 再加之先前厘定的呼和浩特变质核杂岩(Guo等, 2012), 可以认为这两个伸展构造基本上代表了华北克拉通早白垩世伸展变形的西边界, 即弧后伸展影响的西缘. 依据早白垩世期间古太平洋海沟的位置(Maruyama等, 1997; Liu等, 2017; Li等, 2019), 可以算出这一弧后伸展区宽达1800 km左右(图14b). 这一范围显然超出了大洋板块正常倾斜俯冲所能影响的空间, 指示板片后撤之前应存在着平板俯冲(Zhang J J等, 2009; Kiminami和Imaoka, 2013; Liu等, 2019). 对比燕山运动B幕挤压变形构造所影响的范围(图13), 其基本上与早白垩世伸展构造的影响空间(图1)相吻合, 表明这一平板俯冲至少源自早白垩世初的前进式(海沟前进)俯冲(图14a). 早白垩世伸展期的板块后撤是前期平俯冲板片的后撤, 从而在大陆边缘具有宽阔的影响空间.

对比华北克拉通变质核杂岩与伸展穹窿的起始时间, 西侧呼和浩特与小秦岭核杂岩起始时间分别为140和138Ma(Guo等, 2012; Li等, 2020), 而其以东伸展起始时间多为135~134Ma, 显示了西早东晚的特征. 但是, 在弧后伸展西缘以东的广大地域, 伸展活动起始时间集中在135~134Ma, 又显示整体上具有准同时性. 在华北克拉通北部的早白垩世盆地, 早阶段皆为火山喷发, 定年结果显示它们也具有西早东晚的特征. 在西侧的京西与承德盆地, 早白垩世盆地底部火山喷发时间为135~134Ma; 而东侧的阜新-义县与集安盆地, 盆地底部火山喷发时间却为131~130Ma(图12), 明显记录了空间上火山活动的西早东晚现象, 与伸展起始

图 14 华北克拉通早白垩世动力学过程演化模式图

(a) 早白垩世初(144~138Ma)平板俯冲背景下的弧后挤压; (b) 早白垩世期间(138~100Ma)板片后撤背景下的弧后伸展与克拉通峰期破坏

时间的空间变化规律相一致。这种峰期伸展及火山活动起始时间的西早东晚现象与自西向东开始的板片后撤相吻合。在该弧后区内部, 峰期伸展起始时间的准同时性又与平板俯冲之后板片后撤中的整体下沉(成为地幔过渡带的滞留板片)相一致(图14)。因而, 华北克拉通早白垩世地壳变形规律及伴生的火山活动迁移特征支持板片后撤模式解释弧后伸展, 并与古太平洋板块平板俯冲后的后撤相吻。正是古太平洋板片的大规模后撤导致了华北克拉通东部强烈的弧后伸展, 形成了

一系列变质核杂岩与裂谷盆地。而大洋板块后撤所诱发的软流圈上涌, 加热上覆大陆岩石圈, 再加之同期的断裂减压作用, 造成了广泛的地幔底侵与下地壳熔融(郑永飞等, 2018), 导致华北克拉通东部大规模的岩浆活动。因此, 华北克拉通破坏中所发生的伸展与岩浆活动是俯冲大洋板片后撤的共内结果, 为伴生关系。正是在此弧后伸展、岩石圈加热与大规模部分熔融背景下, 华北克拉通东部发生了地幔属性的转变(成为大洋型地幔)与岩石圈的巨量减薄, 克拉通最终丧失稳定性

而破坏。

地壳变形演化历史表明, 华北克拉通早白垩世期间的峰期破坏发生在两期挤压事件之间, 分别是燕山运动B幕(早白垩世初)与C幕(晚白垩世初)挤压。俯冲板片驱动模式表明(Molnar和Atwater, 1978; Royden, 1993; Schellart, 2008), 弧后挤压发生在低角度至平板俯冲的背景下, 而弧后拉张对应高角度俯冲与板片后撤。已有的研究指示(Zhu等, 2005, 2010, 2015, 2018; Kusky等, 2014; Liu等, 2018; Zhang等, 2019), 燕山运动B幕与C幕挤压皆发生在古太平洋板块快速的、平板或低角度俯冲背景下。上述的平板俯冲实际上就是燕山运动B幕挤压期所发生的平板俯冲(图14a), 而华北克拉通的峰期破坏发生在这一平板俯冲之后的后撤阶段, 也由此出现了近水平板片后撤背景下的大地幔楔环境(图14b; Kusky等, 2014; 郑永飞等, 2018)。

6 结论

通过综合分析早白垩世期间华北克拉通峰期破坏中的地壳变形特征与演化, 得出主要结论如下:

(1) 华北克拉通峰期破坏中发育的变质核杂岩属于克拉通型或弧后型核杂岩, 在一些方面有别于经典的造山带变质核杂岩。它们集中出现在克拉通边缘的早期前陆变形带上, 常以滚动枢纽模式演化, 具有长期发育、慢速伸展的特征。

(2) 在早白垩世期间, 华北克拉通中-东部发育了大量的、面状分布的中、小型裂谷盆地(135~100Ma), 指示了克拉通稳定性的丧失; 而克拉通西部呈现为大型的拗陷型盆地, 呈现为稳定的克拉通现象。

(3) 华北克拉通早白垩世各类伸展构造均指示当时的区域应力状态为NW-SE向拉张, 反映这期间整个克拉通中-东部处于统一的应力场作用下, 具有相同的动力学背景。

(4) 峰期破坏中的伸展构造分布空间指示华北克拉通中-东部约1800km宽范围卷入了弧后伸展, 与大洋板块平板俯冲之后的后撤相吻合。峰期伸展与岩浆活动的空间迁移现象一方面支持板片后撤的动力学背景, 另一方面也表明之前发生过平板俯冲。

(5) 华北克拉通早白垩世期间的峰期破坏(138~100Ma)紧随燕山运动B幕挤压事件(144~138Ma)之后, 又因晚白垩世初C幕挤压事件的出现而结束。

参考文献

- 顾承申, 朱光, 翟明见, 林少泽, 宋利宏, 刘备. 2016. 依兰-伊通断裂带中生代走滑构造特征与起源时代. 中国科学: 地球科学, 46: 1579-1601
- 黄汲清. 1960. 中国地质构造基本特征的初步总结. 地质学报, 40: 1237-1238
- 李三忠, 刘建忠, 赵国春, 吴福元, 韩宗珠, 杨中柱. 2004. 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, 20: 633-646
- 林少泽, 朱光, 严乐佳, 宋利宏, 刘备. 2013. 燕山构造带晚古生代挤压变形事件的构造与年代学证据. 科学通报, 58: 3597-3609
- 林少泽, 朱光, 赵田, 宋利宏, 刘备. 2014. 燕山地区喀喇沁变质核杂岩的构造特征与发育机制. 科学通报, 59: 3174-3189
- 刘正宏, 徐仲元, 杨振升. 2002. 阴山中生代地壳逆冲推覆与伸展变形作用. 地质通报, 21: 246-250
- 马寅生, 胡玲, 曾庆利, 吴满路. 2002. 燕山地区燕山期的挤压与伸展作用. 地质通报, 21: 218-223
- 孙立新, 赵凤清, 王惠初, 谷永昌, 冀世平. 2007. 燕山地区土城子组划分、时代与盆地性质探讨. 地质学报, 81: 445-453
- 王新社, 郑亚东. 2005. 楼子店变质核杂岩韧性变形作用的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学约束. 地质论评, 51: 574-582
- 王薇, 朱光, 张帅, 刘程, 顾承申. 2017. 合肥盆地中生代地层时代与源区的碎屑锆石证据. 地质论评, 63: 956-977
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24: 1145-1174
- 吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 张国伟. 2014. 克拉通岩石圈减薄与破坏. 中国科学: 地球科学, 44: 2358-2372
- 肖世柳, 朱光, 张帅, 刘程, 苏楠, 尹浩, 吴晓冬, 李云剑. 2018. 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, 63: 3022-3036
- 张长厚, 李程明, 邓洪菱, 刘阳, 刘磊, 魏波, 李寒滨, 刘孜. 2011. 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, 41: 593-617
- 张宏, 袁洪林, 胡兆初. 2005. 冀北滦平地区中生代火山岩地层锆石U-Pb测年及启示. 地球科学: 中国地质大学学报, 30: 707-720
- 张进江, 戚国伟, 郭磊. 2009. 内蒙古大青山逆冲推覆体系中生代逆冲构造活动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年. 岩石学报, 25: 609-620
- 张晓晖, 李铁胜, 王辉, 蒲志平. 2002. 内蒙古赤峰旗子店-大城子韧性剪切带的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄及其构造意义. 科学通报, 47: 951-956
- 张岳桥, 董树文, 赵越, 张田. 2007. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识. 地质学报, 81: 1462-1480
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 杨振宇, 张岳桥, 胡健民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 11: 319-328
- 郑永飞, 徐峥, 赵子福, 戴立群. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏. 中国科学: 地球科学, 48: 379-414

- 朱大岗, 吴珍汗, 崔盛芹. 1999. 燕山地区中生代岩浆活动特征及其与陆内造山作用关系. *地质论评*, 45: 163–172
- 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, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. *中国科学: 地球科学*, 41: 583–592
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏. *中国科学: 地球科学*, 42: 1135–1159
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 孟庆任, 李胜荣, 曾庆栋. 2015. 克拉通破坏型金矿床. *中国科学: 地球科学*, 45: 1153–1168
- 朱日祥, 周忠和, 孟庆任. 2020. 华北克拉通破坏对地表地质与陆地生物的影响. *科学通报*, 65: 2954–2965
- Brun J P, Sokoutis D, Tirel C, Gueydan F, Driessche J V D, Beslier M O. 2018. Crustal versus mantle core complexes. *Tectonophysics*, 746: 22–45
- Charles N, Gumiaux C, Augier R, Chen Y, Zhu R X, Lin W. 2011. Metamorphic core complexes vs. synkinematic plutons in continental extension setting: Insights from key structures (Shandong Province, eastern China). *J Asian Earth Sci*, 40: 261–278
- Dai L Q, Zheng Y F, Zhao Z F. 2016. Termination time of peak decratonization in North China: Geochemical evidence from mafic igneous rocks. *Lithos*, 240–243: 327–336
- Darby B J, Davis G A, Zhang X H, Wu F Y, Wilde S, Yang J H. 2004. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulüshan, western Liaoning Province, Northwest China. *Earth Sci Front*, 11: 145–155
- Davis G A, Qian X, Zheng Y, Tong H, Yu H, Gehrels G E, Shafiqullah M, Fryxell J. 1996. Mesozoic Deformation and Plutonism in the Yunneng Shan: A Metamorphic Core Complex North of Beijing, China. *The Tectonic Evolution of Asia*. New York: Cambridge University Press. 253–280
- Davis G A, Darby B J, Zheng Y D, Spell T L. 2002. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geology*, 30: 1003–1006
- Davis G A, Darby B J. 2010. Early Cretaceous overprinting of the Mesozoic Daqing Shan fold-and-thrust belt by the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geosci Front*, 1: 1–20
- Davis G H, Coney P J. 1979. Geologic development of the cordilleran metamorphic core complexes. *Geology*, 7: 120–124
- Dong S W, Zhang Y Q, Zhang F Q, Cui J J, Chen X H, Zhang S H, Miao L C, Li J H, Shi W, Li Z H, Huang S Q, Li H L. 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
- Gu C C, Zhu G, Li Y J, Su N, Xiao S Y, Zhang S, Liu C. 2018. Timing of deformation and location of the eastern Liaoyuan Terrane, NE China: Constraints on the final closure time of the Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Res*, 60: 194–212
- Guo L, Wang T, Zhang J J, Liu J, Qi G W, Li J B. 2012. Evolution and time of formation of the Hohhot metamorphic core complex, North China: New structural and geochronologic evidence. *Int Geol Rev*, 54: 1309–1331
- Khanchuk A I, Kemkin I V, Kruk N N. 2016. The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data. *J Asian Earth Sci*, 120: 117–138
- Kiminami K, Imaoka T. 2013. Spatiotemporal variations of Jurassic–Cretaceous magmatism in eastern Asia (Tan-Lu Fault to SW Japan): Evidence for flat-slab subduction and slab rollback. *Terra Nova*, 25: 414–422
- Kusky T M, Windley B F, Wang L, Wang Z, Li X, Zhu P. 2014. Flat slab subduction, trench suction, and craton destruction: Comparison of the North China, Wyoming, and Brazilian cratons. *Tectonophysics*, 630: 208–221
- Li C M, Zhang C H, 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 J H, Zhang Y Q, Dong S W, Johnston S T. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis. *Earth-Sci Rev*, 134: 98–136
- Li S Z, Kusky T M, Zhao G C, Liu X C, Wang L, Kopp H, Hoernle K, Zhang G W, Dai L M. 2011. Thermochronological constraints on two-stage extrusion of HP/UHP terranes in the Dabie-Sulu orogen, east-central China. *Tectonophysics*, 504: 25–42
- Li S Z, Zhao G C, Dai L M, Liu X, Zhou L H, Santosh M, Suo Y H. 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, Suo Y H, 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
- Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *J Asian Earth Sci*, 18: 293–305
- Li Y J, Zhu G, Su N, Xiao S Y, Zhang S, Liu C, Xie C L, Yin H, Wu X D. 2020. The Xiaolinling metamorphic core complex: A record of Early Cretaceous backarc extension along the southern part of the North China Craton. *Geol Soc Am Bull*, 132: 617–637
- 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, Faure M, Chen Y, Ji W B, Wang F, Wu L, Charles N, Wang J, Wang Q C. 2012. Late Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Yiwulüshan massif, NE China and its bearing on the evolution of the Yinshan-Yanshan orogenic belt. *Gondwana Res*, 23: 54–77
- Liu C, Zhu G, Zhang S, Gu C C, Li Y J, Su N, Xiao S Y. 2018. Mesozoic strike-slip movement of the Dunhua-Mishan Fault Zone in NE China: A response to oceanic plate subduction. *Tectonophysics*, 723: 201–222
- Liu J G, Cai R H, Pearson D G, Scott J M. 2019. Thinning and destruction of the lithosphericMantle root beneath the North China Craton: A review. *Earth-Sci Rev*, 196: 102873
- Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, Wu F Y. 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, 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 S F, Gurnis M, Ma P F, Zhang B. 2017. Reconstruction of northeast Asian deformation integrated with western Pacific plate subduction since 200 Ma. *Earth-Sci Rev*, 175: 114–142
- Malavieille J. 1993. Late orogenic extension in mountain belts: Insights from the basin and range and the late Paleozoic Variscan belt. *Tectonics*, 12: 1115–1130
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, Terabayashi M C. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Isl Arc*, 6: 121–142
- Molnar P, Atwater T. 1978. Interarc spreading and cordilleran tectonics as alternates related to the age of subducted oceanic lithosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 41: 330–340
- Platt J P, Behr W M, Cooper F J. 2015. Metamorphic core complexes: Windows into the mechanics and rheology of the crust. *J Geol Soc*, 172: 9–27
- Rabillard A, Jolivet L, Arbaret L, Bessière E, Laurent V, Menant A, Augier R, Beaudoin A. 2018. Synextensional granitoids and detachment systems within Cycladic metamorphic core complexes (Aegean Sea, Greece): Toward a regional tectonomagmatic model. *Tectonics*, 37: 2328–2362
- Rey P F, Teyssier C, Whitney D L. 2009. The role of partial melting and extensional strain rates in the development of metamorphic core complexes. *Tectonophysics*, 477: 135–144
- Royden L H. 1993. The tectonic expression slab pull at continental convergent boundaries. *Tectonics*, 12: 303–325
- Schellart W P. 2008. Subduction zone trench migration: Slab driven or overriding-plate-driven? *Phys Earth Planet Inter*, 170: 73–88
- Su N, Zhu G, Liu C, Zhang S, Li Y J, Yin H, Wu X D. 2020. Alternation of back-arc extension and compression in an overriding plate: Evidence from Cretaceous structures in the western Liaoning region, eastern China. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 109: 707–727
- Teyssier C, Ferre E C, Whitney D L, Norlander B, Vanderhaeghe O, Parkinson D. 2005. Flow of partially molten crust and origin of detachments during collapse of the Cordilleran orogen. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 245: 39–64
- Tirel C, Brun J P, Burov E. 2008. Dynamics and structural development of metamorphic core complexes. *J Geophys Res*, 113: B04403
- Wang K, Burov E, Gumiaux C, Chen Y, Lu G, Mezri L, Zhao L. 2015. Formation of metamorphic core complexes in non-over-thickened continental crust: A case study of Liaodong Peninsula (East Asia). *Lithos*, 238: 86–100
- 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
- Wang Y, Zhou L Y, Li J Y. 2011. Intracontinental superimposed tectonics—A case study in the Western Hills of Beijing, eastern China. *Geol Soc Am Bull*, 123: 1033–1055
- Wang Y, Zhou L Y, Zhao L J. 2013. Cratonic reactivation and orogeny: An example from the northernMargin of the North China Craton. *Gondwana Res*, 24: 1203–1222
- Wang Y, Zhou L, Liu S, Li J, Yang T. 2018. Post-cratonization deformation processes and tectonic evolution of the North China Craton. *Earth-Sci Rev*, 177: 320–365
- Wei Z G, Chen L, Li Z W, Ling Y, Li J. 2016. Regional variation in Moho depth and Poisson's ratio beneath eastern China and its tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 115: 308–320
- Wernicke B. 1981. Low-angle normal faults in the Basin and Range Province: Nappe tectonics in an extending orogen. *Nature*, 291: 645–648
- Whitney D L, Teyssier C, Rey P, Buck W R. 2013. Continental and oceanic core complexes. *Geol Soc Am Bull*, 125: 273–298
- Wong W H. 1927. Crustal movement and igneous activities in eastern China since Mesozoic time. *Geol Soc China Bull*, 6: 9–37
- Wong W H. 1929. The Mesozoic orogenic movement in eastern China. *Geol Soc China Bull*, 8: 33–44
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O, Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 103–119

- Xu W L, Pei F P, Wang F, Meng E, Ji W Q, Yang D B, Wang W. 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. *J Asian Earth Sci*, 74: 167–193
- Wu X, Zhu G, Yin H, Su N, Lu Y, Zhang S, Xie C. 2020. Origin of low-angle ductile/brittle detachments: Examples from the Cretaceous Linglong metamorphic core complex in Eastern China. *Tectonics*, 39: e06132
- Xu J W, Zhu G, Tong W X, Cui K R, 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
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Lo C H, Wilde S A, Davis G A. 2007. 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
- Yin H, Zhu G, Wu X D, Su N, Lu Y C, 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
- Zhang B, Zhu G, Jiang D, Li C, Chen Y. 2012. Evolution of the Yiwulushan metamorphic core complex from distributed to localized deformation and its tectonic implications. *Tectonics*, 31: TC4018
- Zhang J J, Zheng Y D. 2000. Application of general shear theory to the study of formation mechanism of the metamorphic core complex: A case study of Xiaoqinling in central China. *Acta Geol Sin*, 73: 139–147
- Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 110: 305–326
- Zhang S, Zhu G, Liu C, Li Y J, Su N, Xiao S Y, Gu C 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, Liu C, Li Y, Su N, Xiao S. 2019. Episodicity of stress state in an overriding plate: Evidence from the Yalu River Fault Zone, East China. *Gondwana Res*, 71: 150–178
- 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. *Geol Soc Am Bull*, 132: 2023–2042
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, Hu J M, Liu S W, Yang Y H, Chen F K, Liu X M, Liu J. 2009. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications. *Geol Soc Am Bull*, 121: 181–200
- Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, Ye H, Wu F. 2014. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization. *Earth-Sci Rev*, 131: 49–87
- Zhang Y Q, Dong S W, Shi W. 2003. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu Fault Zone in Shandong Province, eastern China. *Tectonophysics*, 363: 243–258
- Zhao T, Zhu G, Lin S Z, Wang H Q. 2016. Indentation-induced tearing of a subducting continent: Evidence from the Tan-Lu Fault Zone, East China. *Earth-Sci Rev*, 152: 14–36
- Zheng Y F. 2021. Convergent plate boundaries and accretionary wedges. *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*. London: Elsevier Ltd. 770–787
- Zhu G, Wang Y S, Liu G S, Niu M L, Xie C L, Li C 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 W. 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 L, Xie C L, Wang Y S. 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 Z, Zhang B L, 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 Z, Lin S Z. 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 G, Liu C, Gu C C, Zhang S, Li Y J, Su N, Xiao S Y. 2018. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: Constraint from Late Mesozoic evolution of the Tan-Lu Fault Zone. *Sci China Earth Sci*, 61: 386–405
- Zhu R X, Zhang H F, Zhu G, Meng Q R, Fan H R, Yang J H, Wu F Y, Zhang Z Y, Zheng T Y. 2017. Craton destruction and related resources. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 106: 2233–2257

(责任编辑: 刘少峰)