

中国大陆中东部早白垩世伸展穹隆构造 与多金属成矿

林伟^{1,2}, 许德如^{3,4}, 侯泉林², 李双建⁵,
孟令通^{1,2}, 任志恒^{1,2}, 邱华标^{1,2}, 褚杨^{1,2}

(1.中国科学院 地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 中国科学院 地球科学研究所, 北京 100029; 2.中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049; 3.东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 4.中国科学院 广州地球化学研究所 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 5.中国石油化工集团公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 中国中东部晚中生代伸展构造十分显著, 表现为大量发育伸展成因的穹隆构造和地堑-半地堑盆地。对这些伸展穹隆系统的分析、归纳和总结, 将中国中东部早白垩世伸展构造发育区划分为: 华北西部带、华北东部带、华北南缘及秦岭-大别带和华南内陆带。区域上, 这些伸展构造均具有 NW-SE 的伸展方向, 与蒙古及俄罗斯泛贝加尔-鄂霍茨克带一同构成了全球最大的大陆岩石圈伸展地区。这些伸展构造使中下地壳的结构发生了强烈的改造, 并使一些中深变质岩出露到地表。在华北地区, 这期伸展构造具有对称性的特点, 即华北西部带向 NW 拆离, 相关的岩石变形大体上具有上部向 SE 的运动学特征; 而华北东部带向 SE 拆离, 伸展穹隆主体具有上部向 NW 的运动学特征。同位素年代学研究揭示伸展穹隆形成的峰期时间十分相近: 集中在 130~120 Ma 之间。高大地热流值背景所代表的岩石圈伸展环境, 与地球化学研究结果所揭示的大规模壳-幔作用具有非常好的耦合性, 并诱发了我国中东部晚中生代岩浆-热液活动及其相关大规模的成矿作用。中东部的成矿带与同时代的伸展构造具有很好的吻合性。

关键词: 伸展穹隆; 对称拆离; 早白垩世等时折返; 中国中东部伸展构造; 大规模成矿

中图分类号: P542, P612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2019)03-0409-022

0 引言

自从板块构造扩展到对大陆构造分析研究以来, 大陆岩石圈伸展模式成为被关注的热点问题, 是影响岩石圈-软流圈系统的一种非常重要的地球动力学过程(Corti et al., 2003)。根据岩石圈的流变学特点, Buck (1991)将大陆岩石圈伸展模式划分为窄裂谷、宽裂谷和变质核杂岩三种。变质核杂岩作为一类特

殊的伸展构造, 被认为是地壳厚度大(约为 60 km)、地表热流值非常高(100 mW/m²)的宽裂谷中的一种独特表现形式。

中国东部的华南板块和华北板块在中-新生代受复杂的板块相互作用的影响, 尤其是晚中生代以来遭受强烈的沉积-构造-岩浆-变质事件的改造继而造成了成矿大爆发。这一过程在我国的华北地区由于有可推断的古生代岩石圈厚度和新生代岩石圈

Yang et al., 2005; Lin and Wang 2006; Lin et al., 2007; 王涛等, 2007; Wang et al., 2012)。同时由于中下地壳的岩石拆离折返至地表, 为研究克拉通破坏过程中地壳不同层次的岩石变形特征和构造演化及相关的成矿过程提供了窗口, 是揭示中国大陆中东部克拉通破坏、岩石圈减薄及地壳响应最为有效的途径。

1 地质背景及研究现状

中国大陆中东部及邻区发育有众多与区域伸展作用相关的穹隆构造, 如: 俄罗斯泛贝加尔-蒙古国地区的 Ulan-Ude 穹隆(变质核杂岩)、Buteel-Burgutui 穹隆(变质核杂岩)、Zagan 穹隆(变质核杂岩)、Ereendavaa 穹隆(变质核杂岩)、Nartyn 穹隆(同构造岩浆穹隆)和 Yablonevy 穹隆(变质核杂岩), 我国东北地区的新开岭穹隆和松辽盆地中部隆起穹隆(变质核杂岩), 阴山-燕山地区的亚干穹隆、呼和浩特穹隆、房山穹隆、云蒙山穹隆、喀喇沁穹隆、医巫闾山穹隆、岫岩穹隆、古道岭穹隆和辽南穹隆等, 山东地区的玲珑-郭家岭穹隆和胶南背形, 华北南缘的北大别穹隆、桐柏山穹隆和小秦岭穹隆, 华南内陆的洪镇穹隆、庐山穹隆、武功山核部泮坑岩浆穹隆、大云山穹隆、衡山穹隆和邓阜仙穹隆(Wang et al., 2011a, 2012; 张岳桥等, 2012; 林伟等, 2013; Lin and Wei, 2018)。前人对这些伸展构造进行了不同程度的研究, 讨论了拆离正断层展布的几何形态、核部岩浆岩的年龄和热演化历史等(Zheng et al., 1988, 1991; Davis et al., 1996, 2001; Yin and Nie, 1996; Webb et al., 1999; Zorin, 1999; Liu et al., 2005; Mazukabzov et al., 2006; 刘俊来等, 2006; Lin and Wang, 2006; Lin et al., 2007, 2008; Yang et al., 2007; Donskaya et al., 2008; Daoudene et al., 2009, 2011; Wang et al., 2011a, 2012; Zhu et al., 2011, 2015)。而对有关岩石变形的运动学特点、变形时间、成因机制及相关成矿作用则涉及不多(Wang et al., 2012; 林伟等, 2013; 朱日祥等, 2015; 宋超等, 2016; Xu et al., 2017a)。

2 中国大陆中东部晚中生代伸展穹隆构造与成矿特征

从区域构造上, 根据伸展构造展布特点, 以华北克拉通及邻区为代表的中国大陆中东部晚中生代伸展构造由北向南大致分以下几个区域: ①华北西部带; ②华北东部带; ③华北南缘及秦岭-大别带; ④华南内陆带。其中华北西部带和东部带是依据伸

展穹隆展布的对称性特点(参见讨论部分), 大致沿松辽盆地、阜新盆地和渤海湾盆地中残余的白垩纪盆地展布空间进行划分(图 1)。以下依次对这些地区的伸展穹隆构造的特点及相关的多金属成矿进行归纳、总结与分析(图 1、2)。虽然在俄罗斯远东及蒙古共和国的泛贝加尔-鄂霍次克带(或称之为泛贝加尔-蒙古带)也存在大量的伸展穹隆构造(Zorin, 1999; Mazukabzov et al., 2006; Donskaya et al., 2008; Daoudene et al., 2009, 2011; Wang et al., 2011a, 2012), 但其由于主题相关性的原因, 本文不对其进行讨论。

2.1 华北西部带早白垩世伸展穹隆构造与成矿

由于国家自然科学基金委员会“华北克拉通破坏”研究计划的实施, 华北西部带是中国中东部晚中生代伸展构造研究最为深入的地区之一。从内蒙古西部阿拉善沙漠地区到北京北部山区发育了大量的以穹隆为主的晚中生代伸展构造(Wang et al., 2012; 林伟等, 2013)。由西向东依次为亚干穹隆(变质核杂岩, Zheng et al., 1991; Webb et al., 1999; Wang et al., 2004)、英巴穹隆(变质核杂岩, Zhou et al., 2012; Yin et al., 2017)、呼和浩特穹隆(变质核杂岩, Davis et al., 2002; Davis and Darby, 2010; Guo et al., 2011)、云蒙山穹隆(变质核杂岩, Zheng et al., 1988; Davis et al., 1996, 2001; 刘翠等, 2004; Zhu et al., 2015)和喀喇沁穹隆(变质核杂岩? Han et al., 2001; 王新社和郑亚东, 2005; 变质核杂岩, 林少泽等, 2014)。沿太行山展布有西山(房山)穹隆(同构造岩浆穹隆, Yang et al., 2005; Yan et al., 2006; Wang et al., 2011b)和紫荆关穹隆(同构造岩浆穹隆, Wang and Li, 2008; 图 1)。这些伸展穹隆构造不仅发育于阴山-燕山褶皱带所代表的陆内构造带之中, 同样发育在华北稳定克拉通的内部。

在构造几何学上, 这些伸展穹隆呈椭圆状, 长轴沿 NE-SW 向展布(图 1)。穹隆核部通常为二叠纪-白垩纪花岗岩或花岗片麻岩、古元古代斜长角闪片麻岩、变火山岩和变沉积岩。其中变沉积岩的原岩时代从古元古代到侏罗纪不等, 并伴随有侏罗纪-白垩纪岩浆岩侵入。通常侏罗纪和早白垩世早期的岩浆岩表现为在边缘存在较为明显的面理化, 局部甚至糜棱岩化; 而岩体核部则表现为块状, 些许面理化或未变形(Han et al., 2001; Wang et al., 2004; Zhou et al., 2012; Yin et al., 2017); 局部发育一些白垩纪岩浆岩具有非常明显的同构造侵入的特点, 如岩体边缘具有与拆离断层相关或相似的韧性剪切变形、叠加的脆性破裂等(Han et al., 2001; Wang and Li,

2008)。在阴山-燕山褶冲带内,穹隆周边发育未变质的二叠纪-侏罗纪火山岩和沉积岩(Davis et al., 1996; Han et al., 2001; Wang et al., 2004; Davis and Darby, 2010; Guo et al., 2011)。通常在这些伸展穹隆边缘发育有不同厚度的强应变带(百米-千米级),沿这些强应变带,岩石变形面理通常表现为中-低倾角的几何形态,并使不同变质级别的岩石发生了并置等现象,具有典型拆离断层的特点(Davis et al., 1996, 2002; Webb et al., 1999; Wang et al., 2004, 2011a; Lin and Wang, 2006; Davis and Darby, 2010)。除喀喇沁穹隆外,大多数伸展穹隆边缘的拆离断层带中的面理上,一个突出的特征就是NW-SE向矿物拉伸线理发育稳定而清晰(Wang et al., 2011a; 林伟等, 2013)。

在华北西部带,晚中生代伸展构造另一个突出的特点是伸展过程中的不均一性。阿拉善地区的亚干、英巴穹隆和大青山地区呼和浩特穹隆的拆离断层由于核部杂岩在同折返过程发生弯曲,进而形成具有NE-SW轴向的“弧形”(arching)构造(Davis et al., 2002; 图1)。具体表现为在亚干、英巴和呼和浩特穹隆的NW翼和SE翼均有分布拆离断层,且均发育NW-SE向矿物拉伸线理。这些线理代表岩石剪切变形的运动学特征,即无论是亚干还是呼和浩特穹隆均为上部指向SE(Webb et al., 1999; Davis et al., 2002; Wang et al., 2004; Guo et al., 2011; 图1)。例外的是英巴穹隆,其运动学特征却是上部指向NW的剪切指向(Zhou et al., 2012; Yin et al., 2017)。这些特征暗示从区域构造分区上,亚干和英巴穹隆似乎置于泛贝加尔-鄂霍次克带更为合适(林伟等, 2013)。更有意思的是,位于更东部的云蒙山穹隆,与呼和浩特穹隆一样,虽然具有相同的NW-SE向矿物拉伸线理和上部指向SE的剪切变形特征,但是其拆离断层仅仅分布在穹隆的SE翼,具有单向拆离的特点(Davis et al., 1996, 2001; Lin and Wang, 2006; 图1)。这种韧性单向拆离的特点在更东部的喀喇沁岩浆穹隆中同样存在。而同样位于穹隆东侧的韧性剪切带却为NE-SW向的矿物拉伸线理和上部指向NE的剪切变形,与传统的构造观察近乎垂直,这一运动学特征在整个中国大陆中东部晚中生代伸展构造中非常少见,其成因机制有待于进一步深入研究(Han et al., 2001; 王新社和郑亚东, 2005)。野外观察表明,喀喇沁岩浆穹隆核部早白垩世的岩浆杂岩记录了NW-SE向伸展过程:长石长轴沿NW-SE向定向,岩浆流线也同样指示了同构造岩浆沿该方向流动的特征;浅层次的脆性构造研究也表明,在喀喇沁穹

隆的NW和SE两翼分别发育了NE-SW走向、倾向相背的脆性正断层,控制了上盘早白垩世半地堑盆地的形成和演化,喀喇沁穹隆作为地垒,表现为隆升而非变质核杂岩的拆离折返(林少泽等, 2014)。相似的晚中生代伸展构造在华北克拉通内部同样发育:房山岩体记录了NE-SW向的挤压作用或NW-SE向伸展构造的存在(纪新林等 2010; Wang et al., 2011b);太行山内部的紫荆关穹隆清晰地记录了该期隆升过程中岩浆的快速冷却过程(Wang and Li, 2008)。除此之外,与区域伸展作用相伴生的早白垩世拆离断层上叠半地堑盆地(supradetachment basin)展布在伸展穹隆的SE部(Lin and Wang, 2006; 图1)。这些浅表伸展构造表现为东倾的高角度脆性正断层叠加在韧性拆离断层之上。脆性变形使卷入拆离断层的糜棱岩发生碎裂,并沉积于其东侧的半地堑盆地中,体现了相同的伸展背景上浅表脆性断裂发生时间较晚的特点,典型陆相沉积的红层填充其中(Ren et al., 2002; Meng, 2003; Meng et al., 2003)。

关于华北西部带伸展穹隆的成因时间,我们并没有观察到前人所论述的具有向SE变新的趋势(Wang et al., 2012)。亚干穹隆拆离断层黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 给出了129~126 Ma年龄(Webb et al., 1999; Wang et al., 2012),核部杂岩在130~125 Ma表现出一个明显的快速冷却过程,对应于穹隆的拆离折返过程(Wang et al., 2012; 林伟等, 2013; 图2)。英巴穹隆拆离断层中,有限的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年给出了131.5~117.6 Ma较为宽泛的结果,很难约束穹隆快速冷却的时间(Zhou et al., 2012; 图2)。相比较而言,呼和浩特穹隆的同位素年代学工作具有较大的进展,拆离断层具有相对较为年轻的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,给出了122~119 Ma的较窄时限,为其快速冷却的时间(Davis et al., 2002; Davis and Darby, 2010; Guo et al., 2011; 林伟等, 2013; 图2)。相应地,134~125 Ma的喀喇沁穹隆、133~125 Ma的西山穹隆和142~126 Ma的紫荆关穹隆同样记录了这一时段的伸展构造(张晓晖等, 2002b; 王新社和郑亚东, 2005; Wang and Li, 2008; Wang et al., 2011b; 图2)。

华北西部带由于经历了中生代蒙古-鄂霍茨克洋闭合与华北克拉通破坏的影响以及侏罗纪和早白垩世两期大规模岩浆作用,其成矿过程相对较为复杂,且成矿时间也存在较大的争议(Wu et al., 2008; Li and Santosh, 2014, 2017)。区域上,金、铜、银、铅锌等多金属矿床大致沿东西方向从西部的狼山-喀喇沁地区向东展布、绵延超过1000 km,称之为燕辽

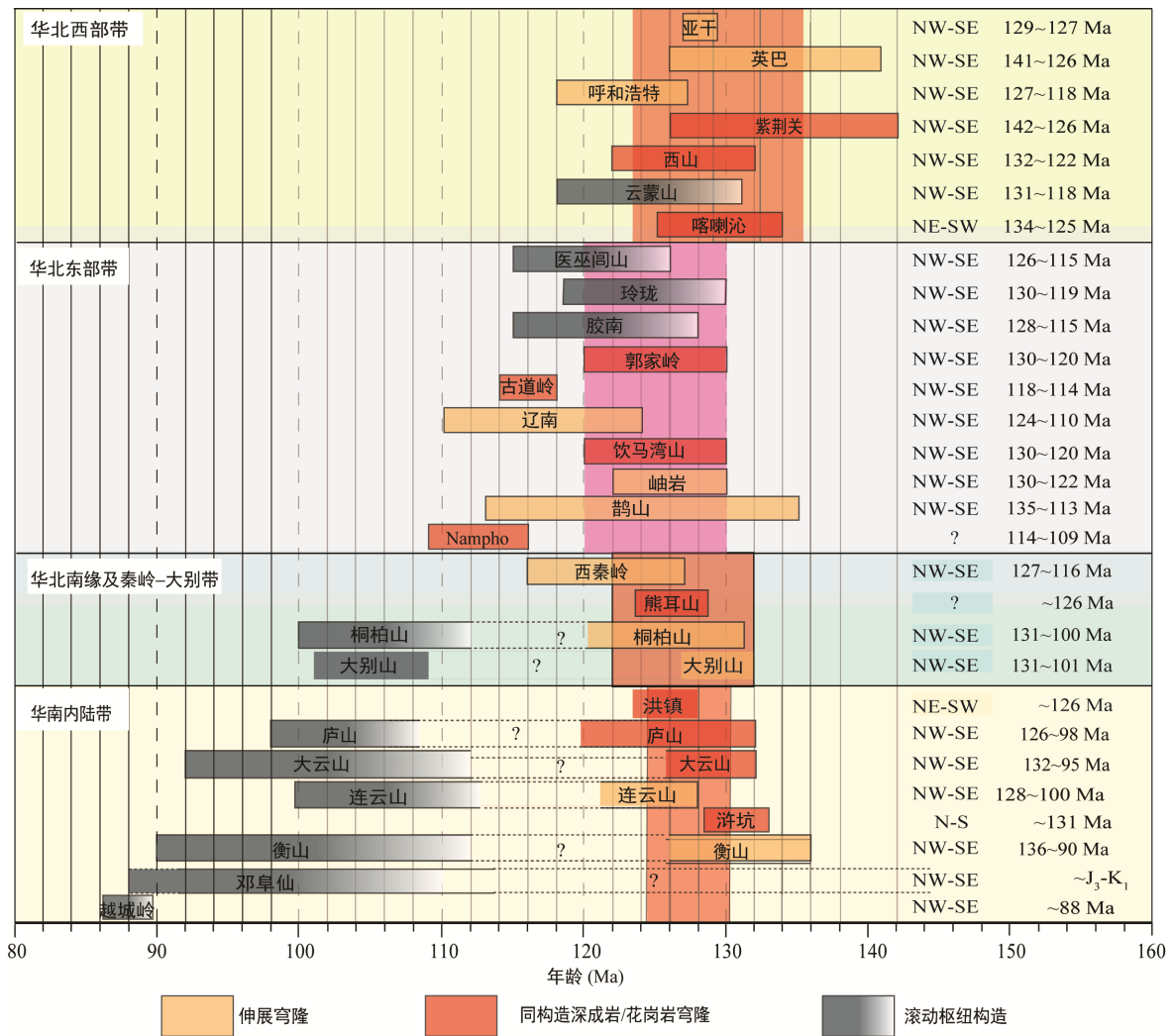


图 2 中国大陆中东部晚中生代伸展穹隆构造时空展布图(修改自 Lin and Wei, 2018, 相关 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学资料的参考文献参见正文)

Fig.2 Extensional domal structures (extensional dome, syntectonic plutons, detachment faults and basins) and their geochronological ages in the central and eastern China

成矿带(Li et al., 2017)。主要金属矿床类型有: ①与中-酸性岩浆活动有关的斑岩型钼矿和浅成热液金、银、铅锌矿等, 主要成矿时代为 148~134 Ma, 较区内伸展穹隆的成因时间稍早; ②与基底重熔和深成侵位花岗质岩体有关的大规模爆发式金成矿作用, 遍布在华北东部的克拉通边缘以及克拉通内部, 主成矿期在 120 Ma 左右, 与伸展穹隆形成的时间一致(翟明国, 2010)。华北克拉通北部赤峰地区的安家营子金矿床构成了一个非常典型的、与区域伸展相关的矿床范例: 所有金矿体均赋存于喀喇沁伸展穹隆下盘的鸡冠子岩体内部, 其产出严格受 NE 向韧-脆性和脆性断裂带控制, 含矿断裂带是区域内 NE 向左旋剪切向 NW-SE 方向伸展转换阶段的产物, 矿床形成于 133~126 Ma 之间, 与核部杂岩快速隆升时间

相一致, 成矿流体被认为沿拆离断层带上升并最终导致金的沉淀(付乐兵等, 2015)。

2.2 华北东部带早白垩世伸展穹隆构造与成矿

华北东部带也是中国大陆中东部晚中生代伸展构造研究最为深入的地区之一。其中郯庐断裂及邻区晚中生代伸展穹隆尤为明显(Liu et al., 2005; Wang et al., 2011a, 2012; Lin et al., 2007, 2013; 图 1)。由北向南依次为辽西的医巫闾山穹隆(变质核杂岩, Darby et al., 2004; Lin et al., 2013), 辽东半岛中部的岫岩穹隆(岩浆穹隆或变质核杂岩, Lin et al., 2007; 林伟等, 2011)、古道岭穹隆(同构造岩浆穹隆, 关会梅等, 2008; Charles et al., 2012)、饮马湾山穹隆(同构造岩浆穹隆, Charles et al., 2012)、辽南穹隆(变质核杂岩, Yin and Nie, 1996; Liu et al., 2005; Lin and Wang,

2006; Yang et al., 2007; Lin et al., 2008)和朝鲜的 Nampho 穹隆(同构造岩浆穹隆? Wu et al., 2007), 山东的玲珑和郭家岭穹隆(杂岩体, Charles et al., 2011)、鹊山穹隆(变质核杂岩, 夏增明等, 2016)及胶南背形(滚动枢纽构造, Lin et al., 2015; 图 1)。

从构造几何学的角度, 这些伸展穹隆或背形构造表现为 NE-SW 向展布的椭圆形(图 1)。穹隆核部通常为晚太古代-古元古代片麻岩、云母片岩及不同程度面理化的花岗岩, 唯一例外的是岫岩岩浆穹隆中包含少量变火山岩和变沉积岩(林伟等, 2011)。伸展穹隆发育过程中伴随有侏罗纪-白垩纪岩浆岩侵入, 不同程度的面理化指示了这些岩浆作用具有同构造侵入的特点(翟明国等, 2003; 杨进辉等, 2007; 林伟等, 2011; Charles et al., 2011)。具有拆离正断层特征的低角度强应变带展布于这些穹隆周围或一侧(图 1)。最北部的医巫闾山穹隆表现为单向拆离的特点, 拆离断层仅仅分布在穹隆的 NW 翼(Lin et al., 2013), 这一点与北京北部的云蒙山非常相似, 只不过呈现出镜像的特征(Davis et al., 1996; Lin and Wang, 2006; 林伟等, 2013; Zhu et al., 2015)。与亚干和呼和浩特伸展穹隆拆离断层相似, 南部的辽南穹隆、岫岩穹隆、玲珑和郭家岭穹隆、鹊山穹隆及胶南背形的拆离断层在穹隆的 NW 翼和 SE 翼均有分布, 同样具有伴随核部杂岩同构造折返过程发生弯曲、进而形成具有 NE-SW 轴向的“弧形”(arching)构造, 与华北西部带亚干和呼和浩特伸展穹隆构成非常“完美”的镜像对称。与华北西部带另一个相似特征是, 拆离断层的糜棱面理上发育的 NW-SE 向矿物拉伸线理稳定而清晰(Wang et al., 2011a; 林伟等, 2013; 图 1)。沿区域上广泛发育的矿物拉伸线理, 无论是医巫闾山、辽南、还是岫岩、鹊山穹隆抑或是胶南背形, 上部指向 NW 的剪切变形均非常一致(Faure et al., 2003; Lin and Wang, 2006; Lin et al., 2007, 2008; Hacker et al., 2009; Charles et al., 2011; 林伟等, 2013)。虽然矿物拉伸线理的方向相同, 古道岭、玲珑穹隆的剪切指示却为上部指向 SE 方向, 体现了较为特殊的情况(Charles et al., 2011, 2012)。对于发育明显的、与区域伸展作用相伴生的早白垩世拆离断层上叠盆地(如胶莱盆地和瓦房店盆地)均分布在伸展穹隆的 NW 侧(图 1)。而处于华北西部带和东部带过渡地区的阜新-义县盆地则表现出完整的地堑构造(李思田, 1994)。

由于“华北克拉通破坏”研究计划和对胶东多金属矿产大量勘查工作的实施, 东部带成为整个中国

大陆中东部乃至欧亚大陆东部中生代伸展构造年代学研究最为深入的地区。医巫闾山穹隆相关拆离断层 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果表明核部杂岩在 125~120 Ma 存在一个明显的快速冷却过程(张晓晖等, 2002a; Darby et al., 2004; Zhang et al., 2012; Lin et al., 2013; 图 2)。岫岩穹隆相关的拆离断层中的白云母和黑云母给出了 130~122 Ma 的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(林伟等, 2011)。辽南穹隆 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素结果给出了 124~110 Ma 较为宽泛的时段(Yin and Nie, 1996; Yang et al., 2007; Lin et al., 2008), 且拆离断层记录了 118~113 Ma 的快速冷却过程(Lin et al., 2011)。郭家岭穹隆北部的强应变带给出了 130 Ma(锆石 U-Pb)~120 Ma(黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)的中等速度的冷却过程(Charles et al., 2013; Jiang et al., 2016)。玲珑穹隆 SE 部的拆离断层 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 云母(白云母、黑云母和绢云母)定年也给出了相同时段的冷却过程(Charles et al., 2013; Yang et al., 2014)。胶南背形带 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年也给出了 128~115 Ma 的快速冷却过程(Lin et al., 2015)。通过对东部带上述伸展穹隆的快速冷却过程的统计与分析, 134~107 Ma 对应于穹隆核部杂岩的冷却过程; 而快速冷却的峰期过程则在 130 Ma 左右, 这一点同华北西部带非常相似(图 2)。

华北东部带的伸展构造区构成了我国中东部两个最大的中生代成矿带——辽吉成矿带和胶东成矿带。辽吉成矿带南部的辽东半岛多金属矿产地多达 348 处, 尤其以金矿著名, 其中大型金矿 2 处、中小型 8 处, 其余皆为矿化点(李士江等, 2010), 显示出辽东半岛金成矿的巨大潜力。辽东半岛的金矿大多受韧性剪切带的控制, 与中生代同构造花岗岩密切相关, 成因类型主要为岩浆热液型, 少数为变质热液型(倪培和徐克勤, 1993; 吕贻峰和秦松贤, 1998)。在同构造花岗岩与作为矿源层的“盖县组”接触部位的韧性剪切带中, 金成矿尤其明显, 著名的五龙金矿床即属此类。五龙金矿床受控于三股流岩体边部的 NE 向韧性剪切带, 矿化类型为含金石英脉型, 叠加在韧性剪切带上的脆性断裂控制了含金石英脉的形成和分布。锆石 LA-ICP-MS 定年结果显示三股流岩体形成于 131~120 Ma, 岩体边部韧性剪切带内成矿前强变形闪长岩和成矿后未变形闪长岩定年结果分别为 125 Ma 和 117 Ma, 进而将五龙金矿床形成时间限定为 120 Ma 左右(吴福元等, 2005)。这一成矿年龄与中国东部早白垩世大规模金矿成矿作用时代相匹配(魏俊浩等, 2003), 为早白垩世伸展构造的

重要产物(杨进辉等, 2004)。依据辽东半岛金成矿的一般规律, 即大型金矿多受控于同构造花岗岩边部的韧性剪切带, 侵入于早白垩世伸展构造的经典代表——辽南-万福变质核杂岩中的古道岭、饮马湾山等大规模同构造花岗岩体边部的韧性剪切带似乎应控制更多的大型金矿床, 但实际上与辽南-万福变质核杂岩相关的金矿床鲜有报道。杨中柱等(1996)在阐释辽南变质核杂岩时认为, 变质核杂岩的强烈伸展作用易于形成具有工业价值的矿床, 沿韧性剪切带存在大规模的金属、非金属矿化, 并在局部富集成矿, 如普兰店孙家沟和核桃房金矿床。但李士江等(2010)认为辽南-万福变质核杂岩区主要分布一些矿化点, 仅在普兰店东存在一处金矿化点。造成这一现状的主要原因, 可能是辽南变质核杂岩两侧缺失被认为是矿源层的盖县组, 而辽南地区金矿绝大多数仅与基底变质岩系有关, 尤其与下元古界辽河群具有密切的空间分布关系(吕贻峰和魏俊浩, 1998)。

胶东金成矿省作为中国金储量最高的地区, 也是亚洲最重要的金矿矿集区之一(Santosh and Pirajno, 2015; 图 3)。尤其是在 2015 年, 金储量达 470 t 的三山岛超大型金矿床的发现, 使得胶东半岛的金储量高达 4000 t(Hao et al., 2016)。同时, 胶东地区还分布

着铜、铅、锌、钼等有色金属矿床(图 3)。

位于胶东半岛西侧呈 NNE-SSW 展布的玲珑-郭家岭杂岩体主要由晚侏罗世的玲珑二长花岗岩(163~155 Ma)和早白垩世的郭家岭花岗闪长岩、斑状花岗岩(~130 Ma)组成(苗来成等, 1998; Yang et al., 2012; Jiang et al., 2016)。岩体周围发育三条韧-脆性剪切带, 自西向东分别为三山岛-仓上断裂、龙口-莱州断裂(郭家岭韧性剪切带)和招远-平度断裂(玲珑剥离断层)。后两者构成了岩体与太古宙-古元古代岩石岩相分隔的界线, 玲珑-郭家岭杂岩整体构成一个复式穹隆的几何形态。同时, 胶东地区近 60% 的金矿床出露于玲珑-郭家岭穹隆内部及周围, 其产出主要受三条韧-脆性剪切带及其次级断层的控制, 提供了早白垩世伸展穹隆控矿的实例。

玲珑-郭家岭穹隆最西侧为三山岛-仓上断裂, 断层呈 NE-SW 走向, 倾向 SE, 倾角约 40°。其下盘为斑状花岗岩, 岩体形成时代为 130 Ma(Yang et al., 2012), 上盘为第四系及其下覆的古元古界粉子山群。同时, 断裂下盘的岩体发生了强烈的韧性变形(杨奎锋等, 2017), 指示了三山岛-仓上断裂为叠加在韧性剪切带之上的脆性正断层, 二者具有相同的上部向 SE 的运动学特征, 且为三山岛、仓上等蚀变岩型金矿床(焦家式)提供了容矿空间(Fan et al., 2003)。

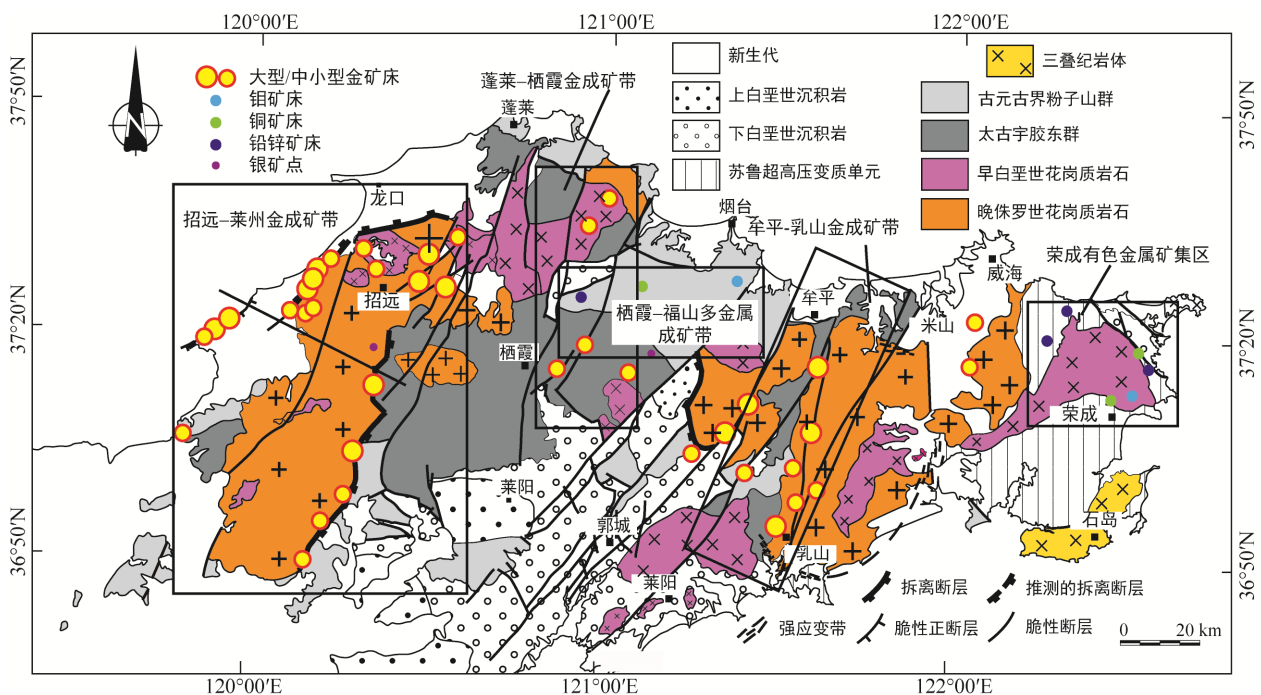


图 3 胶东地区构造地质简图及主要有色金属矿分区带(区)分布图

Fig.3 Simplified map showing the structural geology of the Jiaodong massif and associated main nonferrous metallic metallogenic regions and belts

呈 ENE-WSW 的郭家岭韧性剪切带主要分布于郭家岭岩体的北缘,使得郭家岭岩体发生了韧性变形,糜棱岩面理向 NW 缓倾且发育 NW-SE 的矿物拉伸线理以及上部向 NW 的运动学特征,为胶东地区早白垩世 NW-SE 向伸展构造的产物(Charles et al., 2011)。该韧性剪切带可向南延伸至莱州一带,主体表现为脆性断裂,糜棱岩则出露不连续(王中亮, 2012)。断裂沿玲珑岩体与胶东群接触部位呈 NE-SW 走向,向 NW 缓倾,下盘玲珑岩体破碎强烈,且普遍发育与金成矿相关的钾长石化、黄铁绢英岩化等,控制了焦家、新城、河西、望儿山等焦家式金矿床的产出。

与三山岛-仓上断裂的构造几何形态十分相似,位于玲珑-郭家岭穹隆最东侧的招远-平度断裂发育强烈的韧性变形,使下盘的玲珑岩体发生糜棱岩化。糜棱岩面理向 SE 缓倾,发育 NW-SE 向的矿物拉伸线理,岩石的剪切变形具有上部向 SE 的运动学指示特征,被解释为早白垩世 NW-SE 向伸展背景下形成的拆离断层(Charles et al., 2011)。而大尹格庄、夏甸等金矿床的产出则受叠加在韧性拆离断层之上低角度脆性正断层的控制(Yang et al., 2014, 2016)。同时,区域伸展作用使得玲珑岩体内部发育了一系列次级的高角度正断层,它们多数呈 NE-SW 走向,向 NW 陡倾(>70°),控制了石英脉型金矿(玲珑式)的产出。

从成矿年龄和构造活动时间的关系来看,玲珑-郭家岭穹隆 SE 部的韧性剪切带的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 定年给出了 142~126 Ma 的冷却年龄,代表拆离断层冷却过程发生的时间(Charles et al., 2013; Yang et al., 2014)。而受其脆性断裂控制的夏甸、大尹格庄金矿床的成矿年龄被认为在 130 Ma 左右(Yang et al., 2014, 2016),近同时或稍晚于韧性剪切带的活动时间。对

于玲珑式金矿的成矿年龄目前没有得到很好的限定,且时间跨度比较大,年龄分布于 120~100 Ma 之间(翟明国等, 2004; Qiu et al., 2008; Yang and Zhou, 2001),总体晚于拆离断层的活动时间。穹隆北部的郭家岭韧性剪切带给出了 130~120 Ma 的中速冷却过程(Charles et al., 2013; Jiang et al., 2016)。而与之相关的低角度正断层控制的焦家金矿田、新城金矿床和望儿山金矿床中绢云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 定年给出了较为一致的 120 Ma 的成矿年龄(Guo et al., 2013),也与郭家岭韧性剪切带的活动时间相近。目前虽然没有对三山岛-仓上断裂底部的糜棱岩进行过年代学研究,但是卷入变形的岩体(130 Ma, Yang et al., 2012)显示出了高温变形的特征,被认为是同构造岩体(杨奎锋等, 2017)。同时,受三山岛-仓上断裂控制的三山岛、仓上金矿床的绢云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年代学研究也给出~120 Ma 的成矿年龄(Guo et al., 2013),显示出伸展构造与金成矿的相关性。

招远-莱州成矿带中的金矿床受控于早白垩世 NW-SE 向伸展背景下形成的玲珑-郭家岭伸展穹隆。空间上金矿床主要受伸展穹隆边部的三条韧-脆性剪切带控制,低角度正断层控制了焦家式金矿的产出,而高角度正断层控制了玲珑式金矿的产出(图 4)。这些脆性正断层不仅为含金成矿流体的运移提供通道,也为后期成矿物质的沉淀提供了容矿空间。时间上,焦家式金矿的形成近同时或稍晚于韧性剪切带的活动时间,而玲珑式金矿的形成晚于韧性剪切带的活动时间。

总体而言,胶东金矿同早白垩世伸展构造息息相关,玲珑金矿田(玲珑式)中矿床的分布受控于走向 ENE、倾向 SE 的断裂带,即沿拆离断层发育的浅表张裂隙为含金石英脉提供了容矿构造(Lu et al., 2007; 郭林楠, 2016; 图 3)。三山岛矿床、焦家金矿

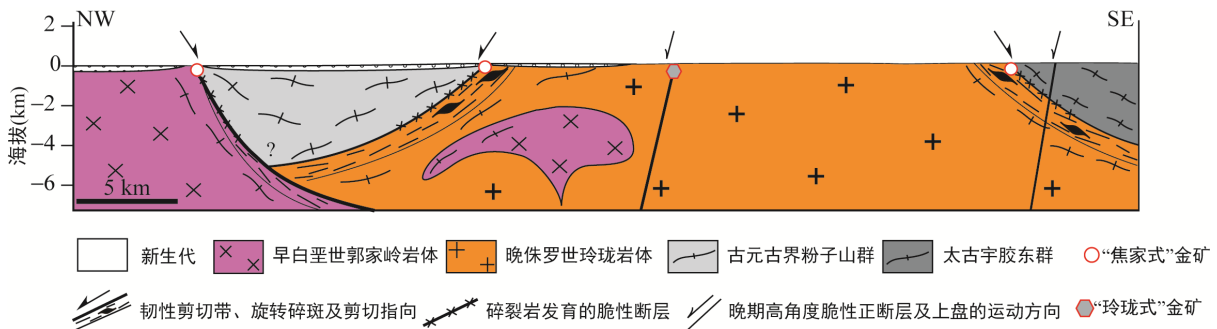


图 4 胶东西部玲珑和郭家岭穹隆伸展构造剖面及相关的金矿床成因位置耦合关系

Fig.4 Cross section and related Au deposits of the Linglong and Guojialing extensional domes, the western Jiaodong massif

田等(焦家式)则主要受控于一系列 NE 走向的韧性剪切带(Zhang et al., 2003; Zeng et al., 2006; 杨奎峰等, 2017), 主干断裂呈雁列式分布, 并在其间发育一系列次级断裂, 整体呈菱形构造(王中亮, 2012; 图 3)。在蚀变岩型矿床下部, 还存在有少量的脉状矿体, 赋存在剪切带次级的 R 和 T 型破裂中, 这些破裂也被认为是拆离断层带在浅表的脆性表现(Lu et al., 2007)。分布在玲珑拆离断层和鹊山拆离断层附近的大尹格庄、夏甸金矿床以及蓬家乔金矿床等, 主要为受控于 NE-SW 走向的低角度韧性拆离断层的侵染状蚀变岩型金矿, 部分金矿则以石英脉型产于上盘的高角度正断层之中(Li et al., 2006; Yang et al., 2014, 2016)。

胶东地区钼钨矿、钼矿、铜矿及多金属矿床的分布主要受早白垩世晚期岩体(例如牙山岩体、伟德山岩体等)所控制(图 3), 除了少数矿床有可靠的辉钼矿 Re-Os 年龄以外, 大多数矿床形成时代与岩体相近, 为 120~110 Ma。这一时期, 区域的伸展构造活动强烈, 伴随着壳幔混源岩浆活动的发生, 大量的成矿流体通过岩浆分异作用形成, 并在岩体内或接触带的适当部位发生沉淀, 形成斑岩型钼钨矿、铜矿以及铅锌矿; 而在岩体与灰岩接触带的位置又形成了矽卡岩型矿床, 整体构成了统一的斑岩型-矽卡岩型成矿系统。

在华北东部带, 无论是金矿床还是有色金属矿床, 其形成和分布具有统一的动力学背景与地质时代, 均与早白垩世华北克拉通破坏息息相关。一方面, 早白垩世岩石圈地幔性质的转变, 使得幔源熔/流体与地壳发生相互作用, 形成了大量壳幔混源的岩浆岩, 并带来了丰富的成矿物质, 使得金矿以及有色金属矿床的物质来源也具有了壳幔混源的特征; 另一方面, 巨量的伸展构造为流体的大规模运移、矿体和岩体的就位提供了空间, 使得具有正断层性质的断裂带控制了金矿的产出, 而有色金属矿床则主要赋存于早白垩世(120~110 Ma)斑岩体、围岩接触带以及断裂构造带(包括岩体内部的节理裂隙带)。

2.3 华北南缘及秦岭-大别带早白垩世伸展穹隆构造与成矿

华北南缘及秦岭-大别造山带在早白垩世同样也经历了大规模的伸展作用。由 NW 向 SE 依次为小秦岭穹隆(变质核杂岩, Zhang et al., 1997)、熊耳山穹隆(岩浆穹隆, 王志光和张录星, 1999)、桐柏山穹隆(变质核杂岩, 许光和王二七, 2010; Cui et al.,

2012)和北大别穹隆(变质核杂岩, Wang et al., 1998, 2011c; 冀文斌等, 2011; 图 1)。

这一伸展构造带明显不同于中国大陆中东部其他的伸展构造带(华北西部带、华北东部带和华南内陆带), 华北南缘及秦岭-大别带展布的伸展穹隆呈椭圆状, 总体上沿 WNW-ESE 方向延伸, 且单个伸展穹隆的长轴方向也沿此方向延伸(图 1)。而且晚中生代伸展构造发育的薄弱带与高压-超高压造山带并不重叠: 小秦岭和熊耳山穹隆发育在古老的华北克拉通之上, 而桐柏山和北大别穹隆发育在高压-超高压造山带之中(图 1)。穹隆核部通常为花岗质片麻岩、片麻状混合岩和变火山岩、石英岩、大理岩及少量榴辉岩。白垩纪岩浆岩大规模侵入于穹隆之中, 鲜有侏罗纪岩浆作用。伸展穹隆周边发育各种不同类型的岩石, 从浅变质-未变质的沉积岩到高压、超高压榴辉岩均有出露; 二者之间通常发育较厚的糜棱岩带, 构成了变质核杂岩的拆离断层(Zhang et al., 1997; Wang et al., 2011c; 冀文斌等, 2011)。在糜棱面理上, 最为显著的几何学特征是 NW-SE 向的矿物拉伸线理近平行于穹隆的长轴方向展布, 这一点明显不同于其他伸展构造带的穹隆的构造几何学特点(图 1); 但是卷入拆离断层的岩石变形所代表的运动学却与华北东部带一致: 均表现为沿 NW-SE 向的矿物拉伸线理具有上部指向 NW 的剪切变形特征(Zhang et al., 1997; 许光和王二七, 2010; Wang et al., 2011c; 冀文斌等, 2011; Cui et al., 2012)。通常白垩纪狭窄的半地堑盆地伴随着形成这些穹隆的伸展过程而发育, 红色陆缘碎屑填充其中(许光和王二七, 2010; 冀文斌等, 2011)。

如前所述, 华北南缘及秦岭-大别带的伸展构造及相关年代学的研究程度相当有限。绝大多数同位素定年结果为高压-超高压造山带研究的附带物, 且被解释为超高压造山带晚期热事件重置, 而非区域伸展构造的表现(Ratschbacher et al., 2000 及相关的参考文献)。只是最近才将其同华北克拉通破坏相关的伸展构造结合起来(Wang et al., 2011c; Ji et al., 2014, 2017, 2018)。华北南缘及秦岭-大别带不同伸展构造冷却史发育的突出特点是, 作为造山带尺度的北大别伸展穹隆记录了两期伸展构造: 早期(142~130 Ma)伸展穹隆构造具有变质核杂岩的特征, 其核部的混合岩代表了中地壳尺度的伸展(冀文斌等, 2011; Ji et al., 2017); 晚期(110~100 Ma)伸展构造则体现为滚动枢纽构造, 其发生的层次近于地壳

浅表,与郯庐断裂的脆性正断层相对应(Ratschbacher et al., 2000)。相似的两期伸展构造在桐柏山穹隆也有十分明显的表现(许光和王二七, 2010; Lin et al., 2015)。

华北南缘及秦岭-大别带也是我国重要的成矿带之一。伴随着早白垩世大规模的伸展构造,具有同构造花岗岩特征的高钾钙碱系列花岗岩和钾玄岩系列火山-侵入岩类以及代表伸展构造晚期持续作用的碱性花岗岩沿 NW-SE 向构造带展布(图 1)。这些岩浆岩侵位过程与拆离断层上盘不同类型的岩石相互作用形成了金、铜、钼、铅、锌及萤石矿等矿产(阴江宁等, 2016)。豫陕交界的小秦岭金矿田中几个大中型石英脉型金矿床多分布于太古宙片麻岩与晚中生代岩体接触部位,并呈脉状或脉群平行排列或斜列;成矿过程中韧性剪切带、断裂破碎带和晚中生代花岗岩的侵入为金矿的形成提供了有利的构造-岩浆条件,最终导致金的富集成矿(朱广彬等, 2005)。桐柏-大别北缘韧性剪切带在区域上控制了一系列金矿床的产出,沿走向上百公里范围均有明显的显示,如桐柏一带的老湾、上上河、白杨庄、三里岗、黄竹园等金矿床,大别山一带的凉亭、余冲等小型金矿床(阴江宁等, 2016);其中,老湾金矿床位于河南省桐柏山北麓,赋存于老湾花岗岩体北侧的龟山岩组内,为桐柏地区重要的大型金矿床之一,平行于桐柏山伸展穹隆拆离断层的 WNW 走向的两条主断裂和韧性剪切带构成了矿区的主要控矿构造,金成矿深度可达 1000 m。

同时,秦岭-大别造山带也是我国重要的斑岩型钼成矿带之一,成矿期次多,断裂构造较为发育,构造活动剧烈,中生代、尤其是燕山期岩浆作用强烈。近年来该造山带的斑岩型钼矿找矿勘查已获得重大突破,典型的如大别山北缘的河南罗山至安徽金寨一线的大型-特大型斑岩型钼矿床(彭三国等, 2012)。

2.4 华南内陆早白垩世伸展穹隆构造与成矿

由于华南板块显生宙经历了复杂的构造演化,很难确定其是否如华北一样在晚中生代经历了岩石圈厚度上的变化。但是其在晚中生代发育了巨量的岩浆活动和大规模的伸展构造,并形成了丰富的矿产资源,是我国钨、锡、铋、钼、铜、铅、锌、金、铋等多金属矿产最为丰富的地区。相对于华北地区展现的大规模岩浆作用及其所反映的伸展条件下的构造背景(Li et al., 2007),华南地区晚中生代伸展构

造研究较为局限,其构造表现以同构造岩浆穹隆和拉张程度有限的伸展盆地为主(舒良树和周新民, 2002; 舒良树等, 2004; 舒良树和王德滋, 2006; 张岳桥等, 2012 及其相关的参考文献)。而代表典型大规模伸展作用的变质核杂岩则发育的非常有限。事实上,华南板块内部所展现的陆内伸展作用可分为两个阶段: 140~125 Ma 和 110~80 Ma。由北向南,依次发育有青阳-九华穹隆(同构造岩浆穹隆, Wei et al., 2014)、洪镇穹隆(同构造岩浆穹隆, Zhu et al., 2010)、庐山穹隆(同构造岩浆底劈, Lin et al., 2000)、大云山穹隆(滚动枢纽构造, Ji et al., 2018)、连云港穹隆(Li et al., 2016)、衡山穹隆(滚动枢纽构造, 张岳桥等, 2012; Li et al., 2013; Wei et al., 2016)、武功山核部浒坑穹隆(同构造岩浆穹隆, Faure et al., 1996)、邓阜仙穹隆(宋超等, 2016; Wei et al., 2017)和越城岭穹隆(滚动枢纽构造——我们的野外观察)。这些伸展穹隆沿华南内陆的郴州-临武断裂附近构成一个向 NE 张开的“V”型区域,由北向南逐渐变窄,代表了华南板块晚中生代伸展构造区域向 SW 逐渐变小(图 1)。

华南内陆伸展穹隆整体呈近椭圆状,与华北东部带伸展穹隆相似,长轴沿 NE-SW 向展布(图 1)。不同的是大云山-幕阜山变质核杂岩长轴沿 NW-SE 方向展布,从几何学特征的角度分析,其似乎更应该归结于秦岭-大别带,位于超高压造山带的前陆地区(图 1)。华南内陆伸展穹隆的核部通常为花岗岩片麻岩,局部发育少量元古宙浅变质沉积岩(Lin et al., 2000; 朱光等, 2007; 张岳桥等, 2012; Ji et al., 2018; 褚杨, 2017)。作为岩浆活动十分剧烈的地区,这些伸展穹隆核部发育有不同时代的侵入体,以晚侏罗世-早白垩世岩浆岩居多,如洪镇和庐山穹隆;少数为晚三叠世岩体和晚志留世岩体,如衡山、邓阜仙穹隆及越城岭穹隆(Wei et al., 2016, 2017);有些伸展穹隆本身即为同构造岩浆穹隆,如浒坑岩浆穹隆(图 1)。位于核部的一些岩浆岩边缘存在不同程度的面理化(Faure et al., 1996; 喻爱南等, 1998; 张岳桥等, 2012; Li et al., 2013; Wei et al., 2016)。除了同构造浒坑穹隆外,作为典型拆离断层特征的低角度展布糜棱岩带分布在穹隆西翼(邓阜仙穹隆例外,发育在穹隆的 SE 翼; Wei et al., 2017; 图 1),与华北东部带的医巫闾山穹隆特征相似,体现了单向拆离的特点(Lin et al., 2013)。与其他构造带伸展穹隆相比,这些糜棱岩带发育规模较为局限,只有几米-十

几米厚。在与拆离断层相关的糜棱面理上, 大多数的伸展穹隆具有 NW-SE 向矿物拉伸线理(Faure et al., 1996; 张岳桥等, 2012; Li et al., 2016; Ji et al., 2018)。较为特殊的是洪镇穹隆西侧的糜棱岩和浒坑岩浆穹隆中的矿物拉伸线理为 NE-SW 向(图 1)。

与其他伸展构造带显著不同的是, 华南内陆 E-W 向伸展构造发育具明显不均一性: 西部伸展幅度较大的大云山-幕阜山、衡山和越城岭穹隆表现为具有正断层性质的滚动枢纽相关的韧性剪切带(Li et al., 2016; Ji et al., 2018); 东部的庐山穹隆为经历复杂演化的岩浆底辟和浅层低温的顺层拆离-滑脱构造(Lin et al., 2000), 浒坑岩浆穹隆则为典型的同构造花岗岩(Faure et al., 1996)。到目前为止, 华南内陆还未发现类似于华北地区具有较高伸展幅度特征的拆离断层弯曲而形成“弧形”构造的报道。这种 E-W 向伸展构造不均一性和单向拆离的伸展穹隆的特点, 似乎暗示了华南内陆较为有限的伸展幅度。

目前对于伸展过程中岩石变形所代表的运动学研究也相对有限, 衡山穹隆具有上部向 WNW 剪切变形的特征(张岳桥等, 2012; Li et al., 2013; Wei et al., 2016; 图 1)。湘东北的连云山穹隆典型的韧性变形并不十分发育, 主体表现为在浅表的脆-韧性过渡带形成的正断层(Li et al., 2016)。野外观察表明, 大云山-幕阜山穹隆拆离断层所记录的岩石变形所代表的剪切运动学特征具有上部指向 WNW 的特点; 但其 SW 部却发育有 NE-SW 向矿物拉伸线理和上部指向 SW 剪切变形特征, 指示其经历了多期的构造过程(Ji et al., 2018)。庐山穹隆 NW 向伸展型式则表现为浅层低温上部向 NW 的滑脱构造(Lin et al., 2000)。湘东邓阜仙穹隆典型的韧性剪切变形在地表并不十分发育, 其主体上表现为浅表的脆性正断层, 局部应变集中的区域具有韧-脆性过渡的特点, 该剪切带控制了湘东无锡矿床的成矿作用(宋超等, 2016); 表现为正断层控制了其东南部茶陵盆地的形成与演化(Wei et al., 2017; 图 1)。赣西武功山地区的浒坑穹隆则表现为典型同构造花岗岩, 就位过程中代表上部向 S 剪切的韧性变形(Faure et al., 1996; 舒良树等, 1998)。位于鄱庐断裂东部的洪镇穹隆西侧韧性剪切带却具有 NE-SW 向的矿物拉伸线理和上部指向 SW 的剪切变形特征(朱光等, 2007; Zhu et al., 2010); 这一点同华北地区的喀喇沁穹隆非常相似, 暗示着 NE-SW 向伸展构造的存在。除有限拉张的同

构造岩浆穹隆和局部发育拆离断层外(邓阜仙穹隆), 分布十分有限的早白垩世半地堑盆地(茶陵盆地除外)展布在伸展穹隆的 NW 侧(图 1)。盆地东部的正断层明显控制了晚中生代盆地的沉积, 形成了一系列的半地堑盆地, 典型的陆相沉积红层填充其中(Ren et al., 2002; 张岳桥等, 2012)。

由于缺少像华北一样的重大研究计划的支持, 华南内陆晚中生代伸展构造的年代学研究较为零星和局限(图 1)。庐山穹隆晚中生代伸展构造年代学研究较为深入, 对应的同构造岩浆岩给出了 126 Ma 相关事件的年龄, 而东部对应于鄱阳湖盆地张开的五里牌韧性正断层则给出了 98 Ma 的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(Lin et al., 2000)。洪镇穹隆西缘糜棱岩带白云母定年给出了较为一致的 126 Ma 左右的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(朱光等, 2007; Zhu et al., 2010; 图 2)。大云山-幕阜山、连云山和衡山变质核杂岩年代学的研究程度较为有限; 新近的研究结果表明大云山穹隆存在两期冷却过程(132 Ma 和 95 Ma; 图 2), 西缘韧性剪切带云母(黑云母和白云母) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果为 109~92 Ma, 较大别山穹隆第二期伸展稍微年轻一些(Ji et al., 2018)。连云山西部的脆性强应变带的白云母和钾长石分别给出了 128 Ma 和 100 Ma 的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄, 似乎也对应了两期冷却过程(Li et al., 2016)。更南部的衡山地区锆石 U-Pb 及云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年也给出了两期冷却过程(~136 Ma 和 ~90 Ma); 西部具有拆离断层性质的韧性剪切带中白云母和黑云母给出了 108~86 Ma 的结果(Li et al., 2016), 指示了衡山穹隆晚期伸展构造发生的时间。而浒坑穹隆边缘的糜棱岩则给出了 131.7 ± 1.7 Ma 的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(Faure et al., 1996; 舒良树等, 1998), 指示了同构造岩体就位的时间。作为华南“V”形伸展带最南端的越城岭穹隆, 初步研究结果给出了更为年轻的 88 Ma 的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(图 2; 褚杨, 2017)。

华南内陆伸展构造带对应着多个成矿带(图 5)。长江中下游成矿带, 位于华南内陆伸展构造带的北侧, 发育大量铜铁金矿床, 同时也伴生钨多金属矿床。这一地区大量早白垩世花岗岩体侵位, 形成时代集中在 150~130 Ma, 与成矿时代一致(周涛发等, 2017)。当深源岩浆沿深部断裂系统上升侵入到地壳浅部, 在不同层位和不同位置形成不同类型的矿床。例如, 在志留系和泥盆系五通组砂岩中, 产生了深部斑岩型铜金矿化和浅部斑岩型钼(钨)矿化, 而在浅部晚古生代碳酸盐岩地层中, 矽卡岩型铜、金、

铅-锌矿化则与之对应(Mao et al., 2011; 周涛发等, 2017)。通常这些矿床受晚中生代 NNE 或 E-W 向展布切穿基底的深大断裂控制。在区域伸展环境之下, 正断层的活动产生了大量空间, 使得岩浆沿断裂带上涌, 并就位于这些开放空间(Wei et al., 2014), 在岩体周边形成矿床; 同时, 成矿流体/热液也可顺断层运移, 导致矿化作用发生在远离岩体的地方。而宁芜和庐枞火山断陷盆地中, 还发育了玢岩型铁矿。

位于长江中下游成矿带南侧的江南成矿带是华南内陆重要的金-锑-钨-铜-铅锌多金属成矿带, 尤其是在该成矿带的湘东北地区发育一系列大型-超大型金矿床、铅锌矿床等, 著名的如万古金矿床、黄金洞金矿床、桃林铅锌-萤石矿床、栗山铅锌矿床以及七宝山铜多金属矿床等, 且这些矿床主要呈脉型、破碎蚀变岩型和蚀变角砾岩型产出(Xu et al., 2017a, 2017b)。目前研究表明, 这些矿产的形成与早白垩世伸展构造事件在华南导致的盆-岭构造和变质核杂岩构造或伸展穹隆等密切相关。如位于湘东北地区幕阜山-望湘隆起带中部晚中生代望湘-金井岩体北缘的万古金矿床, 产于 NW-WNW 向层间滑脱断层破碎带, 成矿时代为 142~130 Ma(锆石 U-Pb 和白云母 Ar-Ar 年龄: Deng et al., 2017), 与区内伸展变形事件时限相一致(舒良树和王德滋, 2006; 文志林等, 2016)。又如产于幕阜山-望湘隆起带北侧大云山-幕阜山岩体边缘的桃林铅锌-萤石矿床, 典型受大云山-幕阜山变质核杂岩所控制, 矿体均赋存在该核杂岩北缘 NE-SW-SE 向弧形脆-韧性拆离断层内(傅昭仁等, 1992; 喻爱南等, 1998)。虽然目前尚无精确成矿时代约束, 但根据变质核杂岩核部的大云山-幕阜山岩体的侵位时代(154~146 Ma: 锆石 U-Pb 年龄; Wang et al., 2014), 以及矿体主要赋存在拆离断层带内角砾岩中的事实, 认为桃林矿床应是伸展变形环境下的产物。

华南内陆伸展区南侧, 虽然同南岭大规模多金属成矿带无法类比, 但沿白垩纪断陷盆地/伸展穹隆也存在着一定数量的与伸展构造相关的热液型多金属矿床(图 5), 如岩背锡矿床、淘锡坝锡矿床和红山斑岩铜矿床、寻乌县铜坑斑岩钼矿床、粤北银岩斑岩锡矿床、湘南界牌岭锡矿床、赣北曾家垄锡矿床和香炉山钨矿床等(毛景文等, 2008)。赣南红山铜矿床与闽西紫金山铜金矿床受 NW 向断裂带控制, 形成于花岗斑岩、花岗闪长斑岩及隐爆角砾岩中, 含矿石英脉 K-Ar 年龄为 97~80 Ma(周济元等,

2000); 位于武夷山西侧断陷带中的铜坑斑岩钼矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素年龄在 135 Ma 左右(许建祥等, 2007); 湘南界牌岭锡矿床中成矿黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 91.1 ± 1.1 Ma(毛景文等, 2007), 与粤北银岩斑岩锡矿床有关花岗斑岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 87 Ma(胡祥昭, 1989)。尽管存在 150~130 Ma 的金属矿床, 但是该地区最重要的成矿高峰期集中在 100~90 Ma。大陆内部广泛发育与花岗岩岩体有关的锡钨多金属矿床, 白垩纪火山盆地中的斑岩型-浅成热液型金铜矿床和浅成热液型银铅锌矿床及卡林型金矿, 均受控于伸展构造, 如断陷盆地和变质核杂岩的拆离断层(罗庆坤等, 1995; 毛景文等, 2008)。在伸展构造中, 断层系统与深部岩浆共同作用之下, 形成金属矿床。

3 中国大陆中东部早白垩世伸展穹隆构造对区域大规模成矿作用的控制

中生代是中国大陆中东部构造发生重大转折的时期, 从早期的特提斯构造域转化为太平洋构造域, 总体上是由挤压构造体制转化为伸展构造体制, 由 EW 向转变为 NNE 向的盆岭构造格局(Wang et al., 2011a, 2012; 林伟等, 2013)。从岩石圈的尺度, 这一过程以华北地区发生的克拉通破坏及伴生的构造为代表。变质核杂岩或伸展穹隆作为一类特殊的伸展构造, 其发生背景被认为是地表热流值非常高(100 mW/m^2)的大陆岩石圈伸展环境, 这种高大地热流背景同克拉通破坏过程中大规模壳-幔作用具有非常好的耦合性, 最为直接的表现是岩浆-热液活动及其相关的大规模的成矿作用。事实上, 早白垩世大规模成矿作用大多同变质核杂岩的展布区域燕辽构造带、辽吉构造带(华北西部带和东部带)、秦岭-大别构造带及邻区和华南内陆带相对应; 形成了与中酸性岩浆岩密切相关的金、钼、铅锌银以及少量的铜、铂、钨、锰、银和铁等矿床(图 5; 裴荣富和吴良士, 1990; 蔡发田等, 2002; 陈毓川等, 2003; Mao et al., 2011, 2013; 朱日祥等, 2015; 秦克章等, 2017)。特别是这一阶段金矿床形成具有“爆发式”的特点而被命名为“克拉通破坏型金矿”或“陆内活化型金矿”(朱日祥等, 2015; Xu et al., 2017b)。



图 5 中国大陆中东部晚中生代伸展构造及相关成矿带展布空间示意图(穹隆的位置和构造特点修改自 Lin and Wei, 2018, 各项相关数据的参考文献参见正文)

Fig.5 Simplified central and eastern China topographic map with the distribution of the Late Mesozoic extension tectonics and related metallogenic belts

构造转换过程中, 中国大陆中东部受周围板块俯冲-碰撞及大规模壳-幔作用这两大地质过程的共同影响, 区内岩石圈响应强烈, 产生一大批对应于这两种地质过程的花岗岩。而受中生代构造-岩浆-热液活动的控制, 还发生了大规模成矿作用。早中生代我国中东部整体处于挤压的构造环境, 较为局限的伸展部位形成了石英脉型或碳酸岩脉型的钨矿, 而金在较大的断裂内则产生了局部金矿化现象; 直至晚中生代, 区域构造环境由挤压转为伸展, 大规模的成岩成矿作用集中爆发, 形成了一大批与中酸性岩浆岩密切相关的金、钨、银铅锌以及少量的铜、铂、钨、锰、银和铁等矿床(蔡发田等, 2002; 陈毓川等, 2003)。

受到克拉通破坏(岩石圈减薄)和古太平洋板块俯冲作用的影响, 华南地区在晚中生代发育了巨量的岩浆活动和大规模的伸展构造, 并形成了丰富的矿产资源, 是我国多金属矿产最为丰富的地区(图 5)。主要矿产资源包括了占世界储量 50% 的钨、锑和 20% 的锡, 而铌、钽、铜、铀和重稀土金属储量也在国内名列前茅(Zhou and Li, 2000; 毛景文等,

2004b; Sun et al., 2011)。在整个华南地区, 金属矿床均与岩浆活动呈现明显的亲缘关系。北部为长江中下游成矿带, 从西向东有鄂东、九瑞、月山-贵池、铜陵和宁镇 5 个矿集区, 同位素年龄显示成矿时间为 150~130 Ma(毛景文等, 2004a; Li et al., 2010; Wu et al., 2012; 周涛发等, 2017); 长江中下游成矿带南部为江南成矿带, 产有丰富的金、锑、钨、铜、铅、锌多金属矿产, 其中金的储量可达 970 t, 并产有大型-超大型钨(铜)矿床, 晚中生代早白垩世也是其主要成矿时期(Xu et al., 2017b 及其相关参考文献); 中部为南岭成矿带, 主要为钨锡稀有金属矿, 成矿时代可能在 170~92 Ma 之间(毛景文等, 2004b); 西部为湘西-鄂西成矿带, 东部为东南沿海成矿带, 形成时代集中在 110~90 Ma(毛景文等, 2008; 毛建仁等, 2014)。这些成矿区带或多或少与早白垩世伸展构造及同期大规模岩浆作用具有直接或间接的关系。

4 讨论和结论

我国中东部晚中生代广泛发育伸展构造及相关

的大规模构造变形、多种类型盆地、火山活动、岩浆侵入和变质作用,并形成大量金属矿产等。老一辈科学家将其归纳为“燕山运动”或“地台活化”。地球化学家在此基础上率先提出了岩石圈减薄、克拉通破坏、去克拉通化及克拉通活化等不同表述来论述这一过程,推断我国中-东部板块岩石圈地幔的性质发生了根本性的变化(周新华, 2009)。但是对地壳是否存在相应的变化则涉及不多(吴福元等, 2008)。我国中东部晚中生代伸展穹隆将中下地壳的岩石拆离折返至地表,从而使地壳的组成也随之发生相应地改变,也就是说东部克拉通破坏过程不仅破坏了岩石圈地幔,而且也破坏了地壳,并构成了我国中东部大规模金属矿产形成的基础(林伟等, 2013)。现有的研究工作表明,我国中东部晚中生代大规模发育的伸展穹隆,除沿华北南缘及秦岭-大别带外,几乎所有穹隆具有 NE-SW 的长轴方向,代表了区域尺度上 NW-SE 方向伸展(Ratschbacher et al., 2000; Lin and Wang, 2006; Wang et al., 2011a)。绝大多数与深部岩石折返相关的拆离断层面上发育的矿物拉伸线理为 NW-SE 方向;但是喀喇沁、洪镇和浒坑穹隆表现出例外的情形,与伸展相关的矿物拉伸线理表现为近 N-S 方向。中下地壳物质折返过程中岩石变形所代表的运动学也存在一定的规律性,即在区域上似乎存在对称性拆离的特点:除英巴穹隆外,在华北西部带的伸展穹隆,如亚干、呼和浩特和云蒙山等伸展穹隆,沿 NW-SE 向的矿物拉伸线理,与拆离断层相关的岩石变形展示了上部向 SE 的剪切指向(Lin and Wang, 2006; Wang et al., 2011a);而在华北东部带,医巫闾山穹隆、岫岩穹隆、辽南穹隆、郭家岭穹隆、鹊山穹隆和胶南背形,沿代表伸展方向的 NW-SE 向矿物拉伸线理,拆离断层所展现的运动学特征却是上部指向 NW,当然古道岭和玲珑穹隆并没有体现出这个特点而作为特例值得进一步研究(Lin and Wang, 2006; Charles et al., 2011; Lin et al., 2015; 图 1)。对称性还体现在几何学方面:华北西部带伸展穹隆的拆离断层和上叠半地堑盆地位于穹隆的 SE 部,而华北东部带伸展穹隆的拆离断层和上叠半地堑盆地位于穹隆的 NW 翼。伸展构造对称拆离轴线大致沿松辽盆地、阜新盆地、渤海湾盆地中残余的白垩纪盆地展布(图 1)。沿轴线发育的伸展盆地如阜新-义县盆地表现为地堑和地垒构造,而在两翼则表现为半地堑盆地,如辽东的大营子盆地和瓦房店盆地,胶东的胶莱盆地及内蒙的河套盆地等。

在华北北部,伸展构造的对称性展布还体现在拆离断层的构造几何学上:靠近对称中心的医巫闾山和云蒙山穹隆,低角度拆离断层表现为单向拆离,而远离中心西部带的呼和浩特、英巴、亚干穹隆和东部带的岫岩、辽南、郭家岭穹隆和胶南背形则表现为拆离断层弯曲的“弧形”构造(图 1)。需要指出的是,华北南缘及秦岭-大别带及华南内陆并没有表现出类似于华北北部这种伸展构造“对称性”拆离和展布的特点,这似乎体现了我国中东部晚中生代伸展构造具有向 S 或 SW 减弱的趋势,同时伸展穹隆的发育时间也具有向 SW 变年轻的趋势(图 2)。

科迪勒拉型变质核杂岩(伸展穹隆构造为较为宽松的表述)起源于对美国西部的盆岭地区伸展构造的研究(Lister and Davis, 1989 及相关的参考文献)。在美国西部的盆岭省,变质核杂岩平行于造山带方向分布在 150~250 km 带状范围内(Coney and Harms, 1984)。我国东部的伸展穹隆(部分是变质核杂岩)及其相关的拉张型盆地不仅沿着构造线(NE-SW 方向)分布(如医巫闾山穹隆-岫岩穹隆-辽南穹隆-胶南背形和洪镇穹隆),而且垂直于构造线方向(NE-SW 方向)也有大规模发育(如朝鲜北部的 Nampho 穹隆-辽南穹隆-医巫闾山穹隆-云蒙山穹隆-呼和浩特穹隆-英巴穹隆-亚干穹隆),而且这个范围宽达 1200 km。也就是说,其分布状态呈“面状”。同时这些伸展穹隆的发育是以“对称性拆离”为背景的、具有等时、等效及对称特点的拆离伸展过程(Lin and Wang, 2006)。这种不同势必归结于岩石圈尺度的动力学机制的差异。明显不同于美国西部的盆岭省东西向伸展的弧后扩张机制,华北克拉通及其周缘地区的伸展构造成因的动力学机制很大程度上受岩石圈根部拆沉作用所控制,揭示了在华北克拉通岩石圈性质和厚度发生变化的过程中,不仅地幔,而且中下地壳的结构也受到强烈的改造,这种规模巨大的改造为我国中东部大规模多金属矿产的形成奠定了成因上的基础。

致谢: 十分感谢合肥工业大学朱光教授及两位匿名审稿专家对本文提出的许多宝贵修改意见。

参考文献(References):

- 蔡发田, 李祥才, 毛展新. 2002. 辽西地区侵入岩与内生金属成矿. 矿产与地质, 16(3): 155-159.
- 陈毓川, 薛春纪, 王登红, 李华芹, 路远发. 2003. 华北陆块北缘区域矿床成矿谱系探讨. 高校地质学报, 9(4):

- 520-535.
- 褚杨. 2017. 白垩纪越城岭伸展构造演化. 第十六届矿物岩石地球化学年会.
- 付乐兵, 魏俊浩, 谭俊, 李艳军, 张道涵, 陈加杰. 2015. 喀喇沁变质核杂岩内安家营子金矿床成矿与剥蚀历史. 矿物学报, (S1): 15-16.
- 傅昭仁, 李德威, 李先福, 王显达. 1992. 变质核杂岩及剥离断层的控矿构造解析. 武汉: 中国地质大学出版社: 17-27.
- 关会梅, 刘俊来, 纪沫, 赵胜金, 胡玲, Davis G A. 2008. 辽宁南部万福变质核杂岩的发现及其区域构造意义. 地学前缘, 15(3): 199-208.
- 郭林楠. 2016. 胶东型金矿成矿机理. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 胡祥昭. 1989. 银岩含锡花岗岩斑岩的岩石学特征及成因研究. 地球化学, 18(3): 251-263.
- 纪新林, 王磊, 潘永信. 2010. 北京房山岩体的磁组构特征及其对岩体侵位的约束. 地球物理学报, 53(7): 1671-1680.
- 冀文斌, 林伟, 石永红, 王清晨, 褚杨. 2011. 大别山早白垩世变质核杂岩的结构与演化. 地质科学, 46(1): 161-180.
- 李士江, 马宏岩, 姜国超. 2010. 辽南地区金矿与侵入岩的关系. 矿产勘查, 1(3): 239-243.
- 李思田. 1994. 断陷盆地分析与煤聚积规律. 北京: 地质出版社: 1-125.
- 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(32): 3174-3189.
- 林伟, 王军, 刘飞, 冀文斌, 王清晨. 2013. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论. 岩石学报, 29(5): 1791-1810.
- 林伟, 王清晨, 王军, 王非, 褚杨, 陈科. 2011. 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, 41(5): 638-653.
- 刘翠, 邓晋福, 苏尚国, 肖庆辉, 罗照华, 王启航, 许立权. 2004. 北京云蒙山片麻状花岗岩锆石SHRIMP定年及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 23(2): 141-146.
- 刘俊来, 关会梅, 纪沫, 胡玲. 2006. 华北晚中生代变质核杂岩构造及其对岩石圈减薄机制的约束. 自然科学进展, 16(1): 21-26.
- 罗庆坤, 刘国生, 王彪, 项新葵, 许建华. 1995. 庐山-彭山地区伸展构造演化及其对矿产形成的制约. 地质科学, 30(2): 117-129.
- 吕贻峰, 秦松贤. 1998. 辽南地区构造演化与构造控矿. 辽宁地质, (3): 161-168.
- 吕贻峰, 魏俊浩. 1998. 辽南金矿集中区成矿地质异常分析及其成矿预测. 地质与勘探, 34(4): 20-25.
- 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景. 中国科学: 地球科学, 44(12): 2593-2617.
- 毛景文, Stein H, 杜安道. 2004a. 长江中下游地区铜金矿Re-Os年龄精测及其对成矿作用的指示. 地质学报, 78(1): 121-131.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景. 岩石学报, 23(10): 2329-2338.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510-526.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004b. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. 地学前缘, 11(1): 45-55.
- 苗来成, 罗振宽, 关康, 黄佳展. 1998. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱U-Pb年龄及其岩石学意义. 岩石学报, 14(2): 198-206.
- 倪培, 徐克勤. 1993. 辽南半岛地质演化及金矿床的成因. 矿床地质, 12(3): 231-245.
- 裴荣富, 吴良士. 1990. 中国东部区域成矿研究述评. 矿床地质, 9(1): 91-94.
- 彭三国, 蔺志永, 胡俊良, 刘劲松. 2012. 武当-桐柏-大别成矿带区域成矿特征与找矿前景展望. 华南地质与矿产, 28(3): 237-242.
- 秦克章, 翟明国, 李光明, 赵俊兴, 曾庆栋, 高俊, 肖文交, 李继亮, 孙枢. 2017. 中国陆壳演化、多块体拼合造山与特色成矿的关系. 岩石学报, 33(2): 305-325.
- 舒良树, 孙岩, 王德滋, Faure M, Charvet J, Monie P. 1998. 华南武功山中生代伸展构造. 中国科学(D辑), 28(5): 431-438.
- 舒良树, 王德滋. 2006. 北美西部与中国东南部盆岭构造对比研究. 高校地质学报, 12(1): 1-13.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造格架. 地质论评, 48(3): 249-260.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 余心起, 王彬, 祖辅平. 2004. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化. 地质通报, 23(9-10): 876-884.
- 宋超, 卫巍, 侯泉林, 刘庆, 张宏远, 伍式崇, 朱浩峰, 李晖. 2016. 湘东茶陵地区老山坳剪切带特征及其与湘东钨矿的关系. 岩石学报, 32(5): 1571-1580.
- 王涛, 郑亚东, 张进江, 王新社, 曾令森, 童英. 2007. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义. 地质通报, 26(9): 1154-1166.

- 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(5): 574–582.
- 王志光, 张录星. 1999. 熊耳山变质核杂岩构造研究及找矿进展. 有色金属矿产与勘查, 8(6): 388–392.
- 王中亮. 2012. 焦家金矿田成矿系统. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 魏俊浩, 刘丛强, 李志德, 赵永鑫. 2003. 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, 77(1): 113–119.
- 文志林, 邓腾, 董国军, 邹凤辉, 许德如, 王智琳, 林舸, 陈根文. 2016. 湘东北万古金矿床控矿构造特征与控矿规律研究. 大地构造与成矿学, 40(2): 281–294.
- 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(6): 1145–1174.
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗岩岩浆作用的年代学格架. 高校地质学报, 11(3): 305–317.
- 夏增明, 刘俊来, 倪金龙, 张婷婷, 施性明, 吴云. 2016. 胶东东部鹊山变质核杂岩结构、演化及区域构造意义. 中国科学: 地球科学, 46(3): 356–373.
- 许光, 王二七. 2010. 桐柏杂岩的中生代隆升机制及其与南阳盆地沉降的耦合关系. 地质科学, 45(3): 626–652.
- 许建祥, 曾载淋, 李雪琴. 2007. 江西寻乌铜坑钨矿床地质特征及其成矿时代. 地质学报, 81(7): 924–928.
- 杨进辉, 吴福元. 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏. 中国科学(D辑), 39(7): 910–921.
- 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 谢烈文, 杨岳衡. 2007. 辽东半岛小黑山岩体成因及其地质意义: 锆石U-Pb年龄和Hf同位素证据. 矿物岩石地球化学通报, 26(1): 29–43.
- 杨进辉, 吴福元, 罗清华, 钟孙霖, 张艳斌, Wilde S A. 2004. 辽东丹东地区侏罗纪花岗岩的变形时代: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约. 岩石学报, 20(5): 1205–1214.
- 杨奎峰, 朱继托, 程胜红, 刘玄, 江鹏, 范宏瑞. 2017. 胶东三山岛金矿构造控矿规律研究. 大地构造与成矿学, 41(2): 272–282.
- 杨中柱, 孟庆成, 江江, 韩小平. 1996. 辽南变质核杂岩构造. 辽宁地质, (4): 241–250.
- 阴江宁, 邢树文, 肖克炎. 2016. 武当-桐柏-大别Mo-Ree-Au-Ag-Pb-Zn多金属成矿带主要地质成矿特征及资源潜力分析. 地质学报, 90(7): 1447–1457.
- 喻爱南, 叶柏龙, 彭恩生. 1998. 湖南桃林大云山变质核杂岩构造与成矿关系. 大地构造与成矿学, 22(1): 82–88.
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. 矿床地质, 29(1): 24–36.
- 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 苗来成. 2004. 非造山带型金矿—胶东型金矿的陆内成矿作用. 地学前缘, 11(1): 85–98.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学(D辑), 33(10): 913–920.
- 张晓晖, 李铁胜, 蒲志平. 2002a. 辽西医巫闾山两条韧性剪切带的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄: 中生代构造热事件的年代学约束. 科学通报, 47(5): 697–701.
- 张晓晖, 李铁胜, 蒲志平, 王辉. 2002b. 内蒙古赤峰委子店-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(12): 951–956.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33(3): 257–279.
- 周济元, 崔炳芳, 陈宏明. 2000. 赣南红山-锡坑迳地区铜锡矿地质及预测. 北京: 地质出版社: 1–195.
- 周涛发, 范裕, 王世伟, White N C. 2017. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式. 岩石学报, 33(11): 3353–3372.
- 周新华. 2009. 华北中-新生代大陆岩石圈转型的研究现状与方向——兼评“岩石圈减薄”和“克拉通破坏”. 高校地质学报, 15(1): 1–18.
- 朱光, 谢成龙, 向必伟, 胡召齐, 王勇生, 李鑫. 2007. 洪镇变质核杂岩的形成机制及其大地构造意义. 中国科学(D辑), 37(5): 584–592.
- 朱广彬, 刘国范, 姚新年, 杨振军. 2005. 东秦岭铅锌银金钼多金属成矿带成矿规律及找矿标志. 地球科学与环境学报, 27(1): 44–52.
- 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(8): 1153–1168.
- 朱日祥, 潘永信, 史瑞萍, 施光海, 邵济安, 李大明. 2002. 辽西白垩纪火山岩古地磁测定与陆内旋转运动. 科学通报, 47(17): 1335–1340.
- 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(8): 1135–1159.
- Buck W R. 1991. Modes of continental lithospheric extension. *Journal of Geophysical Research*, 96(B12): 20161–20178.
- Charles N, Augier R, Gumiaux C, Monié P, Chen Y, Faure M and Zhu R X. 2013. Timing, duration and role of magmatism in wide rift systems: Insights from the Jiaodong Peninsula (China, East Asia). *Gondwana*

- Research*, 24: 412–428.
- Charles N, Gumiaux C, Augier R, Chen Y, Faure M, Lin W and Zhu R X. 2012. Metamorphic Core Complex dynamics and structural development: Field evidences from the Liaodong Peninsula (China, East Asia). *Tectonophysics*, 560–561: 22–50.
- Charles N, Gumiaux C, Augier R, Chen Y, Lin W and Zhu R X. 2011. Metamorphic Core Complex vs Synkinematic pluton in continental extension setting: Insights from key structures (Shandong Province, eastern China). *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(1): 261–278.
- Chen L, Zheng T Y and Xu W W. 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. *Journal of Geophysical Research*, 111(9): B09312.
- Coney P J and Harms T A. 1984. Cordilleran metamorphic core complexes: Cenozoic extensional relics of Mesozoic compression. *Geology*, 12(9): 550–554.
- Corti G, Bonini M, Conticelli S, Innocenti F, Manetti P and Sokoutis D. 2003. Analogue modelling of continental extension: A review focused on the relations between the patterns of deformation and the presence of magma. *Earth-Science Reviews*, 6(3): 169–247.
- Cui J J, Liu X C, Dong S W and Hu J M. 2012. U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Tongbai complex, central China: Implications for Cretaceous exhumation and lateral extrusion of the Tongbai-Dabie HP/UHP terrane. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 155–170.
- Daoudene Y, Gapais D, Ledru P, Cocherie A, Hocquet S and Donskaya T V. 2009. The Ereendavaa Range (north-eastern Mongolia): An additional argument for Mesozoic extension throughout eastern Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1381–1393.
- Daoudene Y, Ruffet G, Cocherie A, Ledru P and Gapais D. 2011. Timing of exhumation of the Ereendavaa metamorphic core complex (north-eastern Mongolia)-U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constraints. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 98–116.
- Darby B J, Davis G A, Zhang X H, Wu F Y, Wilde S and Yang J H. 2004. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulüshan, western Liaoning province, Northwest China. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 145–155.
- Davies G A, Qian X L, Zheng Y D, Yu H, Wang C, Tong H M, Gehrels G E, Muhammad S and Fryxell J E. 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A Chinese metamorphic core complex north of Beijing, China // Yin A and Harrison T A. *The Tectonic Evolution of Asia*. New York: Cambridge University Press: 253–280.
- Davis G A and 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. *Earth Science Frontiers*, 1(1): 1–20.
- Davis G A, Darby B J, Zheng Y D and Spell T L. 2002. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geology*, 30(11): 1003–1006.
- Davis G A, Zheng Y D, Wang C, Darby B J, Zhang C H and Gehrels G E. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China // Hendrix M S and Davis G A. *Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central and Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation*. *Geological Society of American Memoir*, 194: 171–194.
- Deng T, Xu D, Chi G X, Wang Z L, Jiao Q Q, Ning J T, Dong G J and Zou F H. 2017. Geology, geochronology, geochemistry and ore genesis of the Wangu gold deposit in northeastern Hunan Province, Jiangnan Orogen, South China. *Ore Geology Reviews*, 88: 619–637.
- Donskaya T V, Windley B F, Mazukabzov A M, Kröner A, Sklyarov E V, Gladkochub D P, Ponomarchuk V A, Badarch G, Reichow M K and Hegner E. 2008. Age and evolution of late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia. *Journal of Geological Society of London*, 165(1): 405–421.
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H and Yang J H. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. *Mineralium Deposita*, 38(6): 739–750.
- Fan W M and Menzies M A. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of Asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotectonic et Metallogenia*, 16: 171–180.
- Faure M, Lin W, Schärer U, Shu L S, Sun Y and Arnaud N. 2003. Continental subduction and exhumation of UHP rocks: Structural and geochronological insights from the Dabieshan (East China). *Lithos*, 70(3): 213–241.
- Faure M, Sun Y, Shu L S, Monié P and Charvet J. 1996.

- Extensional tectonics within a subduction-type orogen. The case study of the Wugongshan dome (Jiangxi Province, SE China). *Tectonophysics*, 263(1): 77–108.
- Guo L, Wang T, Zhang J J, Liu J, Qi G W and Li J B. 2011. Evolution and time of formation of the Hohhot metamorphic core complex, North China: New structural and geochronological evidence. *International Geology Review*, 54(11): 1309–1331.
- Guo P, Santosh P and Li S R. 2013. Geodynamics of gold metallogeny in the Shandong Province, NE China: An integrated geological, geophysical and geochemical perspective. *Gondwana Research*, 24(3–4): 1172–1202.
- Hacker B R, Wallis S R, McWilliams M O and Gans P B. 2009. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Constraints on the tectonic history and architecture of the ultrahigh-pressure Sulu orogen. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(9): 827–844.
- Han B F, Zheng Y D, Gan J W and Chang Z S. 2001. The Louzidian normal fault near Chifeng, Inner Mongolia: Master fault of a quasi-metamorphic core complex. *International Geology Review*, 43: 254–264.
- Hao Z G, Fei H C, Hao Q Q and Liu L. 2016. Two super-large gold deposits have been discovered in Jiaodong Peninsula of China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(1): 368–369.
- Ji W B, Faure M, Lin W, Chen Y, Chu Y and Xue Z H. 2018. Multiple emplacement processes and tectonic significance of the Late Mesozoic Dayunshan-Mufushan batholith in Southeast China. *Journal of Geophysics Research Solid Earth*, doi: 10.1002/2017JB014597.
- Ji W B, Lin W, Faure M, Chu Y, Wu L, Wang F, Wang J and Wang Q C. 2014. Origin and tectonic significance of the Huangling massif within the Yangtze craton, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 86: 59–75.
- Ji W B, Lin W, Faure M, Shi Y H and Wang Q C. 2017. The early Cretaceous orogen-scale Dabieshan metamorphic core complex: Implications for extensional collapse of the Triassic HP-UHP orogenic belt in east-central China. *International Journal of Earth Sciences*, 106(4): 1311–1340.
- Jiang P, Yang K F, Fan H R, Liu X, Cai Y C and Yang Y H. 2016. Titanite-scale insights into multi-stage magma mixing in Early Cretaceous of NW Jiaodong terrane, North China Craton. *Lithos*, 258–259: 197–214.
- Li J H, Dong S W, Zhang Y Q, Zhao G C, Johnston S T, Cui J J and Xin Y J. 2016. New insights into Phanerozoic tectonics of south China: Part 1, polyphase deformation in the Jiuling and Lianyunshan domains of the central Jiangnan Orogen. *Journal of Geophysics Research Solid Earth*, 121(4): 3048–3080.
- Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, Su J B, Li Y, Cui J J and Shi W. 2013. The Hengshan low-angle normal fault zone: Structural and geochronological constraints on the Late Mesozoic crustal extension in South China. *Tectonophysics*, 606: 97–115.
- Li J W, Vasconcelos P M, Zhou M F, Zhao X F and Ma C Q. 2006. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan gold deposits, Eastern Jiaodong gold province, Northeastern China: Implications for regional mineralization and geodynamic setting. *Economic Geology*, 101(5): 1023–1038.
- Li S R and Santosh M. 2014. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 56: 376–414.
- Li S R and Santosh M. 2017. Geodynamics of heterogeneous gold mineralization in the North China Craton and its relationship to lithospheric destruction. *Gondwana Research*, 50: 267–292.
- Li X H, Li W X, Wang X C, Li Q L, Liu Y, Tang G Q, Gao Y Y and Wu F Y. 2010. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, eastern China: Magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension. *Lithos*, 119(3–4): 427–438.
- Li X H, Li Z X, Li W X, Liu Y, Yuan C, Wei G J and Qi C S. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96(1): 186–204.
- Li Y J, Li S R, Mo X X and Santosh M. 2017. Isotope geochemistry and geochronology of the Niujuan silver deposit, northern North China Craton: Implications for magmatism and metallogeny in an extensional tectonic setting. *Ore Geology Reviews*, 90: 36–41.
- Lin W, Chen Y, Faure M and Wang Q C. 2003. Tectonic implications of new Late Cretaceous paleomagnetic constraints from eastern Liaoning Peninsula, NE China. *Journal of Geophysical Research*, 108: 2313.
- Lin W, Faure M, Chen Y, Ji W B, Wang F, Wu L, Charles N, Wang J and Wang Q C. 2013. Late Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Yiwulüshan massif, NE China and its bearing on the evolution of the Yinshan-

- Yanshan orogenic belt. Part I: Structural analyses and geochronological constraints. *Gondwana Research*, 23: 54–77.
- Lin W, Faure M, Monié P and Wang Q C. 2007. Polyphase Mesozoic tectonics in the eastern part of North China Block: Insights from the Eastern Liaoning Peninsula massif (NE China) // Zhai M G, Mindley B F, Kusky T M and Meng Q R. Mesozoic Sub-continental Lithospheric Thinning Under Eastern Asia. *Geological Society, London, Special Publications*, 280(1): 153–169.
- Lin W, Faure M, Monié P, Schärer U and Panis D. 2008. Mesozoic extensional tectonics in Eastern Asia: The South Liaodong Peninsula metamorphic core complex (NE China). *Journal of Geology*, 116(2): 134–154.
- Lin W, Faure M, Monié P, Schärer U, Zhang L S and Sun Y. 2000. Tectonics of SE China, new insights from the Lushan massif (Jiangxi Province). *Tectonics*, 19(5): 852–871.
- Lin W, Ji W B, Faure M, Wu L, Li Q L, Shi Y H, Scharer U, Wang F and Wang Q C. 2015. Early Cretaceous extensional reworking of the Triassic HP-UHP metamorphic orogen in Eastern China. *Tectonophysics*, 662: 256–270.
- Lin W, Monié P, Faure M, Schärer U, Shi Y H, Le Breton N and Wang Q C. 2011. Cooling paths of the NE China crust during the Mesozoic extensional tectonics: Example from the south-Liaodong peninsula metamorphic core complex. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 1048–1065.
- Lin W and Wang Q C. 2006. Late Mesozoic extensional tectonics in North China Block—Response to the lithosphere removal of North China Craton? *Bulletin de la Société Géologique de France*, 177: 287–294.
- Lin W and Wei W. 2018. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China Craton and its adjacent regions: A review and synthesis. *International Geology Review*, doi: 10.1080/00206814.2018.1477073
- Lister G S and Davis G A. 1989. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, USA. *Journal of Structural Geology*, 11(1–2): 65–94.
- Liu J L, Davis G, Lin Z Y and 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(1): 65–80.
- Lu H Z, Archambault G, Li Y S and Wei J X. 2007. Structural geochemistry of gold mineralization in the Linglong-Jiaojia district, Shandong Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 26(3): 215–234.
- Mao J W, Chen Y B, Chen M H and Pirajno F. 2013. Major types and timespace distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Mineralium Deposita*, 48(3): 267–294.
- Mao J W, Xie G Q, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D and Chen Y C. 2011. A tectonogenetic model for porphyry skarn strata bound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite apatite deposits along the Middle Lower Yangtze River Valley, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 294–314.
- Mazukabzov A M, Donskaya T V, Gladkochub D P, Sklyarov E V, Ponomarchuk V A and Sal'nikova E B. 2006. Structure and age of the metamorphic core complex of the Burgutui ridge (Southwestern Transbaikal region). *Doklady Earth Sciences*, 407(1): 179–183.
- Meng Q R. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369(3–4): 155–174.
- Meng Q R, Hu J M, Jin J Q, Zhang Y and Xu D F. 2003. Tectonics of the late Mesozoic wide extension basin system in the China-Mongolia border region. *Basin Research*, 15(3): 397–415.
- Menzies M A, Fan W M and Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithosphere and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China // Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W., Magmatic Processes and Plate Tectonics. *Geological Society, London, Special Publications*, 76(1): 71–811.
- Qiu L L, Chen F K, Yang J H and Fan H R. 2008. Single grain pyrite Rb-Sr dating of the Linglong gold deposit, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 34(3): 263–270.
- Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, McWilliams M, Ireland T, Dong S W, Calvert A and Chateigner D. 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. *Journal of Geophysical Research*, 105(B6): 13303–13338.
- Ren J Y, Tamaki K, Li S T and Zhang J X. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344(3–4): 175–205.
- Santosh M and Pirajno F. 2015. The Jiaodong-type gold

- deposits: Introduction. *Ore Geology Reviews*, 65: 565–567.
- Sun W D, Zhang H, Ling M X, Ding X, Chung S L, Zhou J B, Yang X Y and Fan W M. 2011. The genetic association between adakites and Cu-Au ore deposits. *International Geology Review*, 53(5–6): 691–703.
- Wang L X, Ma C Q, Zhang C, Zhang J Y and Marks M A W. 2014. Genesis of leucogranite by prolonged fractional crystallization: A case study of the Mufushan complex, South China. *Lithos*, 206: 147–163.
- Wang T, Guo L, Zheng Y D, Donskaya T V, Gladkochub D, Zeng L S, Li J B, Wang Y B and Mazukabzov A. 2012. Timing and processes of late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes. *Lithos*, 154: 315–345.
- Wang T, Zheng Y D, Li T B and Gao Y J. 2004. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and their implications for crustal growth. *Journal of Asian Earth Science*, 23(5): 715–729.
- Wang T, Zheng Y D, Zhang J P, Zeng L S, Donskaya T, Guo L and Li J B. 2011a. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes. *Tectonics*, 30(6): TC6007. doi: 10.1029/2011TC002896.
- Wang X D, Neubauer F, Genser J and Yang W R. 1998. The Dabie UHP unit, Central China: A Cretaceous extensional allochthon superposed on a Triassic orogen. *Terra Nova*, 10(5): 260–267.
- Wang Y and Li H M. 2008. Initial formation and Mesozoic tectonic exhumation of an intracontinental tectonic belt of the northern part of the Taihang Mountain Belt, Eastern Asia. *Journal of Geology*, 116(2): 155–172.
- Wang Y S, Xiang B W, Zhu G and Jiang D Z. 2011c. Structural and geochronological evidence for Early Cretaceous orogen-parallel extension of the ductile lithosphere in the northern Dabie orogenic belt, East China. *Journal of Structural Geology*, 33(3): 362–380.
- Wang Y, Zhou L Y and Li J Y. 2011b. Intracontinental superimposed tectonics-A case study in the Western Hills of Beijing, eastern China. *Geological Society of America Bulletin*, 123(5–6): 1033–1055.
- Webb L E, Graham S A, Johnson C L, Badarch G and Hendrix S. 1999. Occurrence, age, and implications of the Yagan-Onch Hayrhan metamorphic core complex, southern Mongolia. *Geology*, 27(2): 143–146.
- Wei W, Chen Y, Faure M, Martelet G, Lin W, Wang Q C, Yan Q and Hou Q L. 2016. An early extensional event of the South China Block during the Late Mesozoic recorded by the emplacement of the Late Jurassic syntectonic Hengshan Composite Granitic Massif (Hunan, SE China). *Tectonophysics*, 672–673: 50–67.
- Wei W, Martelet G, Le Breton N, Shi Y H, Faure M, Chen Y, Hou Q L, Lin W and Wang Q C. 2014. A multidisciplinary study of the emplacement mechanism of the Qingyang-Jiuhua massif in Southeast China and its tectonic bearings. Part II: Amphibole geobarometry and gravity modeling. *Journal of Asian Earth Sciences*, 86: 94–105.
- Wei W, Song C, Hou Q L, Chen Y, Faure M, Yan Q R, Liu Q, Sun J F and Zhu H F. 2017. The Late Jurassic extensional event in the central part of the South China Block-evidence from the Laoshan'ao shear zone and Xiangdong Tungsten deposit (Hunan, SE China). *International Geology Review*, 60(11–14): 1–21. doi: 10.1080/00206814.2017.1395714
- Wu F Y, Han R H, Yang J H, Wilde S A, Zhai M G and Park S C. 2007. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 238(3): 232–248.
- Wu F Y, Ji W Q, Sun D H, Yang Y H and Li X H. 2012. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui Province, China. *Lithos*, 150: 6–25.
- Xu D R, Chi G X, Zhang Y H, Zhang Z C and Sun W D. 2017a. Yanshanian (Late Mesozoic) ore deposits in China. *Ore Geology Reviews*, 88: 481–490.
- Xu D R, Deng T, Chi G X, Wang Z L, Zou F H and Zhang J L. 2017b. Gold mineralization in the Jiangnan Orogen (JOB) of South China: Geological characteristics, ore deposit-type and geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 88: 565–618.
- Xu J W, Zhu G, Tong W X, Cui K R and Liu Q. 1987. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northwest Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 134(4): 273–310.
- Yan D P, Zhou M F, Song H L, Wang G H and Sun M. 2006. Mesozoic extensional structures of the Fangshan tectonic dome and their subsequent reworking during

- collisional accretion of the North China block. *Journal of the Geological Society*, 163(1): 127–142.
- Yang J H, Chung S L, Wilde S A, Wu F Y, Chu M F, Lo C H and Fan H R. 2005. Petrogenesis of post orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronology, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214: 99–125.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Lo C H, Wilde S A and Davis G A. 2007. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from ^{40}Ar - ^{39}Ar thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton. *The Geological Society of America Bulletin*, 119(11): 1405–1414.
- Yang J H and Zhou X H. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits. *Geological Society of America*, 229(8): 711–714.
- Yang K F, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Wilde S A, Lan T G, Lu L N and Liu Y S. 2012. Reactivation of the Archean lower crust: Implications for zircon geochronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of late Mesozoic granitoids from northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton. *Lithos*, 146–147: 112–127.
- Yang L Q, Deng J, Goldfarb R J, Zhang J, Gao B F and Wang Z L. 2014. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: New implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong gold province, China. *Gondwana Research*, 25: 1469–1483.
- Yang L Q, Deng J, Goldfarb R, Zhang J, Gao B F and Wang Z H. 2014. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: New implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong gold province, China. *Gondwana Research*, 25(4): 1469–1483.
- Yang L Q, Deng J, Wang Z L, Zhang L, Goldfarb R J, Yuan W M, Weinberg R F and Zhang R Z. 2016. Thermochronologic constraints on evolution of the Linglong Metamorphic Core Complex and implications for gold mineralization: A case study from the Xiadian gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 72: 165–178.
- Yin A. 2004. Gneiss domes and gneiss dome systems // Whitney D L, Teyssier C and Siddoway C S. Gneiss Dome in Orogeny: Boulder, Colorado. *Geological Society of America Special*, 380: 1–14.
- Yin A and Nie S. 1996. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions // Yin A and Harrison T A. The Tectonic Evolution of Asia. New York: Cambridge University Press: 442–485.
- Yin C Y, Zhang B, Han B F, Zhang J J, Wang Y and Ai S. 2017. Structural analysis and deformation characteristics of the Yingba metamorphic core complex, northwestern margin of the North China craton, NE Asia. *Journal of Structural Geology*, 94: 195–212.
- Zeng Q D, Liu J M, Liu H T, Shen P and Zhang L C. 2006. The ore forming fluid of the gold deposits of Muru gold belt in eastern Shandong, China: A Case Study of Denggezhuang gold deposit. *Resource Geology*, 56(4): 375–384.
- Zhang H F. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3): 768–780.
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Zhou M F, Fan W M and Zheng J P. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4373–4387.
- Zhang J J, Zheng Y D, Shi Q, Yu X and Zhang Q. 1997. The Xiaoqinling detachment fault and metamorphic core complex of China: Structure, kinematics, strain and evolution. *Proceedings of the 30th International Geological Congress*, 14: 158–172.
- Zheng Y, Wang S Z and Wang Y F. 1991. An enormous thrust nappe and extensional metamorphic core complex newly discovered in Sino-Mongolian boundary area. *Science in China (series B)*, 34: 1146–1152.
- Zheng Y D, Wang Y F, Liu R X and Shao J A. 1988. Sliding-thrusting tectonics caused by thermal uplift in the Yunmeng Mountains, Beijing, China. *Journal of Structural Geology*, 10(2): 135–144.
- Zhou X M and Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3–4): 269–287.
- Zhou Y Z, Han B F, Zhang B, Xu Z, Ren R, Li X W and Su L. 2012. The Yingba shear zone on the Sino-Mongolian border: Southwestern extension of the Zuunbayan Fault from Mongolia to China and implications for Late

- Mesozoic intracontinental extension in Eastern Asia. *Tectonophysics*, 574: 118–132.
- Zhu G, Chen Y, Jiang D Z and Lin S Z. 2015a. 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, Jiang D Z, Zhang B L and Chen Y. 2011. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics. *Gondwana Research*, 22(1): 86–103.
- Zhu G, Xie C L, Chen W, Xiang B P and Hu Z Q. 2010. Evolution of the Hongzhen metamorphic core complex: Evidence for Early Cretaceous extension in the eastern Yangtze craton, eastern China. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3): 506–516.
- Zorin Y A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia. *Tectonophysics*, 306(1): 33–56.

Early Cretaceous Extensional Dome and Related Polymetallic Mineralization in the Central and Eastern China

LIN Wei^{1,2}, XU Deru^{3,4}, HOU Quanlin², LI Shuangjian⁵, MENG Lingtong^{1,2}, REN Zhiheng^{1,2}, QIU Huabiao^{1,2} and CHU Yang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences/Institution of Earth Science, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China; 2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China Technology of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 4. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 5. SINOPEC Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: The Late Mesozoic extensional tectonics was quite significant on the central and eastern China. This extensional tectonics was expressed by the metamorphic core complexes (MCC), syn-tectonic magmatic domes or syn-tectonic plutons, rolling-hinge structures, and vast graben/half graben basins. According to ours and previous research work, four extension tectonic regimes have been determined: the western part of the North China domain, the eastern part of the North China domain, the southern margin of the North China and Qinling-Dabie domain, the interior of the South China Block domain. The direction of this Early Cretaceous extension tectonic was NW-SE in these four domains. As the largest crustal scale extensional tectonic in the world, this extreme extensional event exhumed the different levels of the crust rocks to the surface along detachment faults. This exhumation process destructed the crust of the eastern part of the North China Craton. In North China, the extensional tectonic is characterized by symmetry. Related geochronological works on the detachment faults constrain the activity period of the Early Cretaceous (ca. 130–120 Ma). The lithospheric extension represented by the high geothermal flow corresponding well to the large-scale crust-mantle reaction revealed by the geochemical work. This interaction induced extensive magmatic-hydrothermal activities and related massive polymetallic mineralization in the central and eastern China.

Keywords: extensional dome; symmetric extension tectonic; narrow temporal of the exhumation; Early Cretaceous extensional tectonics; central and eastern China; massive polymetallic mineralization belt