综 述

华北克拉通破坏与岩浆-成矿的深部动力学过程

杨进辉^{1,2*}, 许蕾¹, 孙金凤², 曾庆栋³, 赵亚楠¹, 王浩¹, 朱昱升¹

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, 北京 100029;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所矿床资源重点实验室, 北京 100029

* 通讯作者, E-mail: jinhui@mail.igcas.ac.cn

收稿日期: 2020-10-26; 收修改稿日期: 2021-01-05; 接受日期: 2021-01-25; 网络版发表日期: 2021-04-15

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600109)和国家自然科学基金科学中心项目(批准号: 41688103)资助

摘要 华北克拉通在中生代发生强烈的破坏作用, 诱发强烈的岩浆、构造、热事件, 同时形成金等金属矿床。然而, 克拉通破坏如何控制巨量金等金属矿床的形成与分布尚不十分清楚。本文基于已发表大量资料和科技部重点研发专项项目研究成果, 系统总结了华北东部中生代岩浆岩岩石组合、年代学、地球化学和岩石成因、金等金属矿床成矿年代学、中生代盆地演化等最新资料, 恢复了华北东部中-新生代盆地伸展量和郯庐断裂的左行走滑位移距离, 确定了不同地质历史时期古太平洋板块俯冲带的位置, 重新构建了华北东部中生代金等金属矿床和岩浆活动的时空分布规律, 并发现早中侏罗世期间, 岩浆-成矿作用由东向西逐渐迁移, 而160~140Ma之后则由西向东迁移, 论证了华北东部中生代金等金属成矿与岩浆岩成岩之间的成因关系, 岩浆为金属矿床的形成提供了部分物源和成矿流体, 阐明克拉通破坏与巨量岩浆-成矿作用的深部动力学机制, 提出侏罗纪期间华北受到古太平洋板块向西低角度俯冲, 不仅在华北东部(乃至中国东部)形成了类似于南美安第斯型富含斑岩铜矿的大陆岩浆弧, 而且俯冲带流体交代地幔楔为早白垩世热液成矿奠定了物质基础。在早白垩世时期, 古太平洋板块俯冲角度由低变高, 俯冲板块和俯冲带发生后撤, 使华北克拉通东部发生强烈破坏, 并形成巨量岩浆和金等金属矿床。

关键词 克拉通破坏, 巨量金成矿, 中生代岩浆作用, 华北克拉通, 深部动力学

1 引言

华北克拉通北邻中亚造山带(兴蒙造山带), 南接秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带(图1), 是中国最大、最古老的陆块。它于约18.5亿年前最终克拉通化(Zhao等, 2001; 翟明国, 2011), 但在中生代期间发生了强烈的岩石圈减薄和岩石圈地幔性质的转变(Menzies等, 1993; Griffin等, 1998; Xu, 2001), 并伴有强烈的

岩浆作用(Wu等, 2005a, 2005b; Yang等, 2008a)、构造活动(Meng, 2003; Yang等, 2007a; Zhu等, 2005, 2009; Zhu G等, 2012)和巨量金等金属成矿作用(Yang等, 2003; 毛景文等, 2003; Li等, 2012; Zhu R X等, 2017; Zeng等, 2013, 2020), 这一现象被称之为克拉通破坏或去克拉通化(Yang等, 2008a; 朱日祥等, 2020), 其本质是克拉通失去稳定性(Yang等, 2008a; Wu等, 2019; 朱日祥等, 2012, 2020), 破坏发生的峰期时间为早白垩世

中文引用格式: 杨进辉, 许蕾, 孙金凤, 曾庆栋, 赵亚楠, 王浩, 朱昱升. 2021. 华北克拉通破坏与岩浆-成矿的深部动力学过程. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1401–1419, doi: [10.1360/SSTe-2020-0299](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0299)

英文引用格式: Yang J H, Xu L, Sun J F, Zeng Q, Zhao Y N, Wang H, Zhu Y S. 2021. Geodynamics of decratonization and related magmatism and mineralization in the North China Craton. Science China Earth Sciences, 64(9): 1409–1427, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9732-6>

图1 华北克拉通东部中生代岩浆岩和金、银/铜等矿床分布图

A和B点分别表示鄂尔多斯盆地西部和太平洋俯冲带位置

(Zhu R X等, 2012), 通常认为与古太平洋板块俯冲作用相关(Zhu R X等, 2012; 郑永飞等, 2018; Wu等, 2019; 朱日祥和徐义刚, 2019; 朱日祥等, 2020及其参考文献)。

作为我国的重要产金基地, 华北克拉通黄金产量和探明储量占全国的~50%, 仅胶东地区就约占全国的1/3 (Yang等, 2003; Deng和Wang, 2016). 近年来, 在探索克拉通破坏的深部过程与浅部效应时发现, 华北地区Au、Fe、Mo、Cu等矿床成矿时代主要集中在早白垩世(Yang等, 2003; 毛景文等, 2003; Mao等, 2008; Zhu R X等, 2017; Zeng等, 2013, 2020), 与中生代大规模岩浆作用和克拉通破坏同期(Zhu R X等, 2012). 其中, 金矿的矿床特征明显区别于世界其他克拉通上分布的造山带型金矿和绿岩带型金矿(翟明国等, 2004). 朱日祥等(2015)提出“克拉通破坏型”金矿新类型(Zhu R X等, 2017), 但克拉通破坏如何控制巨量金等金属成矿、巨量金等金属成矿与大规模岩浆作用之间存在何种联系、成矿物质的来源、大规模岩浆活动及巨量金成矿的深部动力学过程、中生代期间古太平洋板块俯冲带的位置和俯冲方式、古太平洋板块如何改造华北岩石圈并导致克拉通破坏等一系列科学问题仍未厘清. 本文在总结近年来大量已发表资料的基础上, 结合科技部重点研发专项项目的最新研究结果, 通过归纳华北

东部中生代岩浆岩岩石组合、同位素年代学、地球化学和岩石成因、金等金属矿床成矿年代学、中生代盆地演化等最新资料, 对上述部分问题尝试给予合理解答, 试图揭示克拉通破坏与巨量金等金属成矿之间的内在联系及其深部动力学机制。

2 华北东部中生代成矿作用

2.1 华北中生代金等金属矿床特征及成矿时代

中生代期间, 华北克拉通东部发生了大规模成矿作用, 形成了金、铁、钼、铜、铅、锌等矿床, 其中以金矿床最为典型. 华北金矿床主要分布在胶东地区、小秦岭、辽东地区、吉南地区、赤峰-朝阳、冀东-辽西、张家口-宣化、鲁西等地区, 其中胶东地区和小秦岭地区分别为我国第一、第二重要产金基地(Wang等, 1998; Yang等, 2003; Li等, 2012; Deng和Wang, 2016; 朱日祥等, 2015). 金成矿类型以热液成因的石英脉型和蚀变岩型为主, 有少量火山角砾岩和斑岩型(Yang等, 2003; Li等, 2003, 2012; Deng和Wang, 2016). 蚀变岩型金矿矿体多产在与脆韧性断裂带相关的破碎带中, 以浸染状或网脉浸染状矿化为特征, 如胶东的三山岛、新城、焦家等矿床和赤峰-朝阳的排山楼等矿床, 这些矿床以单一金为主, 少量矿床含Pb、

Zn、Mo等金属元素. 石英脉型金矿床多受控于区域次级断裂, 呈单脉或成群(带)状分布, 矿体主要为含金硫化物石英脉, 矿脉两侧发育强度不等的蚀变岩带, 通常包括硅化、绢云母化、黄铁矿化和钾化等蚀变作用(Deng和Wang, 2016). 火山-次火山角砾岩型金矿床在华北分布较少, 主要产在鲁西和小秦岭地区, 如小秦岭的祁雨沟金矿(Chen Y J等, 2009; Fan等, 2011; Duan等, 2020).

华北克拉通中生代铁矿床主要分布在太行山一带及鲁西、苏北等地区, 为玢岩型或矽卡岩型铁矿, 其形成与中生代闪长质侵入体有关, 产于侵入体或古生界碳酸岩地层之中(Shen等, 2012; Deng等, 2015; Wen等, 2017). 华北东部钼、铜(金)矿以斑岩型、矽卡岩型和热液型矿床为主, 主要分布在东秦岭-小秦岭成矿带, 包括金堆城等世界上著名的钼矿床(Zeng等, 2013及其参考文献). 以铜、钼成矿为主的燕辽成矿带, 则是我国继东秦岭钼矿带之后的第二大钼矿带, 已发现矿床20余处, 包括寿王坟、小寺沟等铜钼矿床和杨家杖子、肖家营子、撒袋沟门、大庄科、大草坪、柴家沟等钼矿床(Zeng等, 2013). 在华北东部其他地区也零星分布着同类型的钼(铜)矿床, 如胶东栖霞的尚家庄钼矿等(刘善宝等, 2011; Liu S L等, 2020). 这类矿床多分布在中生代侵入岩体附近, 与中生代中酸性斑岩岩体具有密切关系.

成矿时代是揭示矿床成因和成矿动力学的关键. 近年来, 国内外科学家先后研发了一系列高精度成矿时代测年方法, 如热液成因副矿物(如锆石、榍石、独居石等) U-Pb定年方法、脉石或蚀变矿物(黑云母、钾长石等)的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年方法、石英和硫化物流体包裹体Rb-Sr等时线和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等定年方法、矿石矿物(黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿)的Rb-Sr等时线法和Re-Os定年方法, 并获得了大量华北中生代金等金属矿床的成矿时代(Wang等, 1998; 杨进辉和周新华, 2000; Yang和Zhou, 2001; Zhang X O等, 2003; 胡芳芳等, 2004; Li等, 2003, 2006, 2008, 2012; 孙金凤等, 2012; Yang等, 2014; Deng等, 2020). 这些同位素年代学数据显示, 华北中生代成矿作用主要分为三期(图2a、2b): (1) 三叠纪Mo-Pb-Zn-Au成矿, 主要分布在华北克拉通南缘的东秦岭-小秦岭地区和北缘燕辽地区; (2) 侏罗纪Mo-Cu-Au-Pb-Zn-Ag成矿, 主要分布在东秦岭-小秦岭、燕辽和辽东地区, 在胶东地区也发现了零星侏罗纪Mo矿

图2 (网络版彩图)华北克拉通东部成矿时代和岩浆岩成岩时代分布图

数据来源: 黄典豪等, 1996; 毛景文等, 2003; 葛文春等, 2007; 刘善宝等, 2011; 邵建波等, 2016; 唐克非, 2014; 王强等, 2004; 吴福元等, 2006; 张连昌等, 2002; 翟明国, 2016; 高昕宇和赵太平, 2017及其参考文献; 朱日祥等, 2020及其参考文献; Wang等, 1998; 杨进辉和周新华, 2000; Yang和Zhou, 2001; Yang等, 2003; Zhang X O等, 2003; 胡芳芳等, 2004; Dai等, 2009; Deng等, 2015; Li等, 2003, 2006, 2008, 2012; Goss等, 2010; Sun J F等, 2010, 2019, 2020; Liu J C等, 2020及其参考文献; Zhu R X等, 2012, 2017; 朱日祥等, 2015, 2020; Yang和Wu, 2009; Yang等, 2014; Zeng等, 2013, 2020; Deng等, 2020; Shen等, 2012; Duan等, 2014, 2020; Xu等, 2020; Wu等, 2005a, 2005b, 2007, 2019及其参考文献

床; (3) 早白垩世Au-Fe-Mo成矿, 其中Au矿床广泛分布于华北克拉通东部, Fe矿床主要分布在鲁西和邯邢地区, 而Mo则分布于东秦岭-小秦岭, 少数分布在胶东和辽东地区. 华北克拉通巨量金成矿的主要时期是早白垩世, 且具有明显的时空分布规律, 在太行山、小秦岭等地区金的成矿时代主要集中在140~120Ma, 往东的胶东、辽东地区为125~115Ma, 在华北克拉通东缘的朝鲜地区则为110Ma左右(Wu等, 2007; 翟明国, 2016), 从而显示出从西至东逐渐变年轻的趋势(朱日祥等, 2015; Zhu R X等, 2017).

2.2 成矿物质来源与成矿机制

华北东部中生代矿床主要以热液型、斑岩型和矽卡岩型为主。热液成因石英脉型和蚀变岩型金矿是华北东部金矿床的主要类型。目前, 有关金成矿流体和成矿物质来源的成果大量发表, 尤其是关于成矿流体的来源。脉石矿物流体包裹体研究表明, 主成矿期成矿流体主要以 CO_2 和 H_2O 为主, 含少量的 CH_4 , 其盐度变化范围很大(0.5~15% NaCl eq.), 成矿温度为中-低温(200~330°C)(Fan等, 2003; Mao等, 2008; Yang等, 2009; Chen Y J等, 2009; Hu等, 2013; Wen等, 2015)。但隐爆角砾岩型金矿(如祁雨沟金矿)的成矿流体具有明显的高盐度(35~48% NaCl eq.) (Chen Y J等, 2009; Fan等, 2011)。流体包裹体的H和O同位素研究表明, 虽然金及含金硫化物沉淀过程中有大量大气降水的参与, 但成矿流体的主要来源是岩浆水。流体包裹体C和S同位素组成也显示成矿流体来源于岩浆水和大气降水(Fan等, 2003; Chen Y J等, 2009; Zeng等, 2013, 2020; 朱日祥等, 2015)。值得指出的是, 近年来硫化物原位微区S同位素分析技术的发展使得示踪精细成矿过程和成矿流体来源更为有效。华北东部金矿床(如胶东地区望儿山、辽东地区白云金矿等)硫化物微区S同位素分析结果显示, 主成矿期硫化物具有典型的岩浆 $\delta^{34}\text{S}$ 同位素组成(Hu等, 2020; Liu J C等, 2020; Sun G T等, 2020)。稀有气体同位素($^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^{40}\text{Ar}^*$)研究表明, 华北金矿中的硫化物具有壳幔混合组成特征(张连昌等, 2002; 毛景文等, 2003; 唐克非, 2014; Zhang等, 2019; Feng等, 2020; Liu J C等, 2020; Shen等, 2020), 胶东金矿床的探明储量与地幔端员组分含量成正比(Tan等, 2018)。上述观察表明, 岩浆水在成矿流体中占据重要组分。

关于华北东部金及多金属成矿物质的来源也一直存在着不确定性。无论是放射成因同位素(Sr、Nd、Pb等)还是稳定同位素(C、S等)的研究均表明, 成矿物质来源具有多元性(Yang和Zhou, 2001; 张连昌等, 2002; 毛景文等, 2003; 唐克非, 2014; Zhang等, 2019)。华北克拉通东部金成矿作用往往伴随着广泛发育的花岗岩及中基性脉岩, 尤其是含金石英脉在时空上与中基性岩脉相互穿切(Yang和Zhou, 2001)。Wang等(2020)通过建立岩石样品的Au和铂族元素高精度含量分析技术, 准确测定了华北东部不同时代基性岩和地幔包体中Au

的含量, 发现华北东部早白垩世基性岩的Au含量明显偏高。总结上述同位素资料及金含量的最新成果发现, 经历过显著交代的富集岩石圈地幔可能为巨量金成矿提供了主要物质来源, 但不能排除地壳物质或长英质岩浆对金成矿的物质贡献。

华北克拉通东部不同类型的金矿床(如石英脉型和蚀变岩型)流体成矿机制不同, 通常认为蚀变岩型金矿是成矿流体与围岩强烈水/岩相互作用的结果, 石英脉型金矿则是成矿流体相分离致使金成矿物质沉淀形成(Fan等, 2003, 2011; Mao等, 2008; Chen Y J等, 2009; Hu等, 2013; Wen等, 2015; Yang等, 2009)。然而, 近期我们对青城子地区Pb-Zn-Au-Ag矿黄铁矿和围岩的Nd-Fe同位素研究发现, 蚀变岩和石英脉中硫化物的Nd-Fe同位素具有明显耦合关系, 蚀变岩的Nd和Fe同位素组成呈负相关关系, 而石英脉中硫化物则具有正相关关系, 表明岩浆脱水形成的流体与围岩相互作用, 快速结晶形成具有轻 $\delta^{56}\text{Fe}$ 特征的黄铁矿, 残余流体在有利的构造位置结晶、沉淀形成具有重 $\delta^{56}\text{Fe}$ 同位素特征的黄铁矿(Xu等, 2020), 揭示了蚀变岩型与石英脉型金矿床形成于同一成矿系统。

华北东部中生代斑岩型和矽卡岩型矿床与中生代岩浆作用紧密相关(Deng等, 2015), 如华北东部以鲁西莱芜和邯邢地区铁矿为代表的中生代矽卡岩型铁矿, 其形成与早白垩世闪长岩侵位密切相关, 是闪长质岩浆结晶分异或岩浆脱水形成的流体与围岩相互作用的结果, 而成矿物质主要来源于闪长质岩浆(Shen等, 2012; Wen等, 2017)。斑岩型铜、金、钼矿的形成则与侏罗纪斑岩关系密切, 是中酸性岩浆在浅部侵位时脱水形成的成矿流体与围岩相互作用的结果(秦克章等, 1999; 葛文春等, 2007; Zeng等, 2013; Duan等, 2020)。

综上所述, 华北克拉通东部大规模金等金属矿床与晚中生代花岗岩、伴生基性岩在时间和空间上存在密切成因联系, 部分成矿流体和成矿物质来源于与成矿时空伴生的岩浆。由此表明, 华北东部中生代三期成矿事件与岩浆活动分别受控于同一深部动力学过程。

3 华北东部中生代岩浆作用

3.1 中生代岩浆岩的时空分布规律

华北克拉通东部发育着大面积中生代花岗岩类侵

入体(图1)及相同成分的火山岩. 高精度锆石U-Pb定年结果表明, 华北东部中生代岩浆作用主要分为三期: 三叠纪、侏罗纪和早白垩世, 其中以早白垩世岩浆活动最为强烈(图1和2c).

三叠纪岩浆岩主要分布在华北东部辽东和朝鲜地区, 岩性以钙碱性辉长岩-闪长岩-花岗岩为主(Yang等, 2007b, 2007c, 2007d; Yang J H等, 2012b; Yang和Wu, 2009). 在华北北缘和南缘分别分布着一套碱性霞石正长岩-正长岩-A型花岗岩侵入体(Yang等, 2005a; Yang J H等, 2012a; Zhu Y S等, 2016, 2017). 侏罗纪岩浆岩主要分布在华北东部的朝鲜、辽东、胶东、燕辽地区(Wu等, 2005b; 吴福元等, 2006), 少量分布在徐淮地区和东秦岭地区(Xu等, 2006; 高昕宇和赵太平, 2017及其参考文献), 岩性以中酸性侵入体为主, 基性岩很少, 以南大岭玄武岩和少量基性岩脉为代表(Wang等, 2007). 早白垩世岩浆岩空间上分布范围广、岩石类型复杂, 包括基性-酸性的亚碱性岩石系列的侵入体和火山岩、碱性岩及A型花岗岩(Zhang和Sun, 2002; Zhang H F等, 2003; Zhang等, 2002, 2009; Yang等, 2004a, 2004b, 2006a, 2007b, 2008a, 2008b; Sun J F等, 2010, 2019, 2020; Zhu R X等, 2012; Wu等, 2019; 孙金凤和杨进辉, 2009; 高昕宇和赵太平, 2017及其参考文献).

前人归纳了华北东部中生代岩浆岩的同位素年代学资料, 发现华北东部中生代岩浆活动具有明显的时空分布规律: 在侏罗纪期间, 从华北东缘的朝鲜半岛至华北中部太行山, 岩浆岩时代自东向西呈现变年轻; 而自160~140Ma之后, 早白垩世的岩浆则呈现自西向东变年轻趋势(Wu等, 2019; 朱日祥和徐义刚, 2019). 尽管认识到这一趋势是非常重要的, 但是对其成因的构造解释需要考虑以下两个因素: (1) 华北克拉通东部自中生代以来发生的多期挤压-伸展事件对其构造位置的改变, 尤其是造成日本海张开的新生代伸展事件; (2) 郯庐断裂带在中生代期间, 尤其是在早白垩世期间发生了强烈的左行走滑运动, 走滑距离达500km以上(Zhu等, 2005, 2009; Zhu G等, 2012). 这些因素致使华北东部现今的构造格局、岩浆岩(尤其是早白垩世之前的岩体)空间位置不能准确代表中生代期间的构造格局和空间分布.

鉴于此, 本文详细汇总了华北东部中-新生代盆地资料, 计算了中生代以来的伸展率和郯庐断裂带中生代大规模走滑位移, 恢复中生代时期太平洋板块西向

俯冲带的位置和岩浆活动的时空分布. 假定华北西部鄂尔多斯盆地东缘自中生代以来未发生强烈的伸展作用, 大量的沉积盆地分析研究表明(图3), 华北、渤海湾等盆地在早白垩世期间NW-SE向伸展率为110~120%, 新生代时期华北、渤海湾等盆地NW-SE向伸展率为120~160%, 而日本海盆地伸展率则高达220%(田在艺和韩屏, 1990; 曹忠祥, 2008; 雷超等, 2008; 刘超等, 2016; 刘见宝等, 2017; 李伟等, 2010, 2019; Liu S F等, 2010, 2013, 2017), 根据这些伸展率计算了华北东部中生代不同时期的AB点间长度(图1), 其中BA代表古太平洋板块的俯冲方向. 同时, 对郯庐断裂带左行走滑量进行反算, 得出侏罗纪、早白垩世期间古俯冲带的位置和每个岩体在AB线的垂直投影位置, 从而获得中生代期间华北东部岩浆活动分布规律(图4). 这一结果表面上与前人观察结果相似, 但中生代期间岩浆活动距离古俯冲带位置明显缩短. 其中, 侏罗纪岩体垂直古俯冲带距离总体上不超过1000km, 而早白垩世岩浆活动距离古俯冲带的最长垂直距离也小于1500km, 远远低于前人统计的结果(Wu等, 2019; 朱日祥和徐义刚, 2019). 除此之外, 纠正了郯庐断裂带以东岩体的空间位置: 侏罗纪岩浆活动分布自东向西具有连续性(图4), 明显区别于前人报道的在郯庐断裂两侧早侏罗世岩浆空间上的间断(Wu等, 2019; 朱日祥和徐义刚, 2019). 如果假定古太平洋板块俯冲诱发岩浆形成的深度为150km, 计算中生代期间古太平洋板块的西向俯冲角度, 结果显示古太平洋板块向华北克拉通俯冲角度在侏罗纪期间逐渐减小, 而在早白垩世期间则逐渐增大, 转折期为160~140Ma.

3.2 岩石成因与大陆岩石圈演化

华北克拉通东部中生代三期岩浆活动分别具有显著不同的岩石组合, 蕴含不同岩石成因和岩浆演化信息. 三叠纪岩浆岩包括华北北缘和东南缘的234~210Ma霞石正长岩-正长岩-A型花岗岩和碱性火山岩(Yang等, 2005a; Yang J H等, 2012a; Zhu Y S等, 2016, 2017及其参考文献)和辽东-朝鲜半岛的225~200Ma辉长岩-闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩两套岩石组合(Yang等, 2007b, 2007c, 2007d; Yang J H等, 2012b; Yang和Wu, 2009). 碱性岩和A型花岗岩形成于南北向造山后伸展背景, 岩浆来源于古老富集的造山带岩石圈, 是岩石圈地幔物质在高压下(石榴石相)低

图3 (网络版彩图)华北克拉通盆地中生代以来NW-SE向伸展率

数据来源: 田在艺和韩屏, 1990; 曹忠祥, 2008; 雷超等, 2008; 刘超等, 2016; 刘见宝等, 2017; 李伟等, 2010, 2019; Liu S F等, 2017及其参考文献

程度部分熔融的结果, 并在岩浆形成前经历了再循环古老地壳物质和大洋物质的交代作用(Zhu Y S等, 2017). 相比之下, 辽东-朝鲜地区220~210Ma辉长岩-闪长岩-花岗岩闪长岩-花岗岩组合的岩浆源区具有多元性, 全岩地球化学、Sr-Nd-Hf同位素(图5a)和锆石Hf-O同位素研究揭示, 这些岩石分别来源于受到再循环古老地壳物质交代的古老岩石圈地幔、新生岩石圈地幔、古老下地壳和新生下地壳, 是不同性质岩浆混合和结晶分异的产物(Yang等, 2007a; Yang J H等, 2012b).

华北东部侏罗纪岩浆岩以中酸性岩石为主, 岩性主要包括黑云母花岗岩、二云母花岗岩和少量英云闪长岩、闪长岩及花岗闪长岩(Wu等, 2005b; Sun J F等, 2020), 鲜有基性岩伴生. 基性岩以燕辽和京西地区的南大岭组碱性玄武岩和少量基性岩脉为代表(Wang等, 2007). 南大岭组碱性玄武岩和基性岩脉都具有富集的Sr-Nd同位素组成(图5b)和岛弧型微量元素标准化配分图, 表明其来源于古老富集岩石圈地幔, 形成于陆内伸展环境(Wang等, 2007; 郑永飞等, 2018). 侏罗纪花岗岩类岩石通常具有富集的Sr-Nd-Hf同位素(图5a)和锆

图 4 华北东部晚中生代岩浆岩时空分布规律

数据来源同图2

石Hf同位素组成,与华北东部古老下地壳物质组成相近(Sun J F等, 2020). 它们大多具有埃达克质岩石的地球化学特征,且锆饱和温度相对低(高昕宇和赵太平, 2017; Wu等, 2019及其参考文献),锆石的水含量类似于典型大陆弧岩浆岩中锆石的水含量,表明侏罗纪花岗岩形成于加厚下地壳在高压下加水部分熔融作用,残余相中通常含石榴石(Gao等, 2004, 2008; Wu等, 2019及其参考文献; Sun J F等, 2020).

与侏罗纪岩浆岩相比,华北东部早白垩世岩石类型复杂,包括辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩及分布在中生代拉分盆地中的火山岩,并伴生大量的正长岩、A型花岗岩等碱性岩岩体(Zhang和Sun, 2002; Zhang H F等, 2003; Zhang等, 2002, 2009; Yang等, 2004a, 2004b, 2006a, 2007b, 2008a, 2008b; Sun J F等, 2010, 2019, 2020; Zhu R X等, 2012; Wu等, 2019; 孙金凤和杨进辉, 2009; 高昕宇和赵太平, 2017及其参考文献). 野外地质观察显示,早白垩世A型和I型花岗岩中均发育火成微粒闪长质包体(Yang等, 2004a, 2006a),在成岩过程中经历了广泛的岩浆混合作用. 早白垩世花岗岩具有较高的锆饱和温度,这一结果与早白垩世富含碱性岩和A型花岗岩相一致(Yang等, 2008b). 它们具有变化较大的全岩Sr-Nd-Hf同位素组成(图5a)和锆石Hf-O同位素组成(Yang等, 2008b; Sun

等, 2019),进一步揭示了不同类型花岗岩在形成过程中有新生地壳乃至幔源岩浆的贡献. 地幔来源岩浆为花岗岩的形成既提供了热源也提供了部分物质(Yang等, 2006a, 2007b; Sun等, 2010, 2019). 同时,部分岩体中锆石具有极度亏损的Hf同位素组成(Yang等, 2007b, 2008a),指示新生镁铁质地壳发生部分熔融形成长英质岩浆(郑永飞等, 2015),标志着中生代期间华北东部大陆地壳发生了一定程度的垂向增生(Yang等, 2008a).

华北东部中生代基性岩具有变化范围较大的Sr-Nd-Hf同位素组成,多数地区基性岩具有富集的Nd同位素组成(图5b). 辽东半岛的三叠纪基性岩中,既有相对亏损同位素特征的,如岫岩岩体中的镁铁质包体和蚂蚁河岩体(Yang等, 2007a, 2007c; Yang J H等, 2012b),也有相对富集同位素特征的,如大连地区的粗玄岩(Yang等, 2007c; Fang等, 2020). 此外,在朝鲜地区三叠纪金伯利岩中发现的地幔包体为饱满的尖晶石二辉橄榄岩,具有亏损的Sr-Nd-Hf同位素组成和类似于对流地幔特征的Os同位素组成,标志着三叠纪期间辽东-朝鲜地区岩石圈地幔性质发生了转变,由典型古老克拉通型转变成新生岩石圈地幔(Yang J H等, 2010). 这一转变主要发生在早白垩世时期(Dai等, 2016; 郑永飞等, 2018; Wu等, 2019; Dai F Q等, 2019),

图5 华北东部中生代花岗岩类岩石(a)和基性岩(b)Sr-Nd同位素变化特征

数据来源: (a) 郭敬辉等, 2005; 高昕宇和赵太平, 2017及其参考文献; Chen B等, 2004, 2008, 2009; Liu A K等, 2010; Duan等, 2014; Dong等, 2015; Fan等, 2017; Gao等, 2013; Goss等, 2010; Gu等, 2013; He和Santosh, 2014; Li等, 2014, 2015; Liang等, 2015; Niu等, 2011; Pei等, 2011a, 2011b; Sun, 2011; Sun等, 2010; Sun J F等, 2010, 2020; Wang等, 2012; Wu等, 2005b; Xu, 2001; Xu等, 2004a, 2004b, 2004c; Yang D B等, 2010, 2012; Yang等, 2004a, 2005a, 2005b, 2007b, 2007c, 2007d, 2008b; Yang J H等, 2012a, 2012b; Ying等, 2011; Zhu等, 2016. (b) Gao等, 2004, 2008; Cai等, 2013; Chen B等, 2009; Chen L H等, 2009; Chung, 1999; Fan等, 2001, 2017; Fang等, 2020; Guo F等, 2004, 2013; Guo J T等, 2013; Huang等, 2012; Kuang等, 2012; Liu A K等, 2010; Liu S等, 2013, 2017; Liu等, 2008, 2018; Ma等, 2014, 2016; Pei等, 2011b; Sakuyama等, 2013; Wang等, 2005, 2006, 2007, 2011; Xie等, 2015; Xu等, 2004a, 2004b, 2004c, 2005, 2012, 2017; Xu, 2014; 闫峻等, 2005; Yang D B等, 2012; Yang等, 2004a, 2005a, 2005b; Yang和Li, 2008; Zhang和Sun, 2002; Zhang等, 2002; Zhang H F等, 2003; Zhao等, 2013; 钟福平等, 2015

但需要注意的是, 主要发生在辽东、胶东、朝鲜、辽西和鲁西地区(图5b), 而华北中部和南部(太行山、东秦岭-小秦岭、燕辽等地区)未发现具有同位素亏损特

征的基性岩, 这标志着在中生代期间华北岩石圈地幔性质的转变在时空上存在显著不均一性(Yang J H等, 2010).

4 克拉通破坏与巨量金属成矿的深部动力学机制

4.1 中生代岩浆岩与金等矿床的成因关系

通过总结华北克拉通东部中生代金及多金属矿床的成矿时代、成矿流体和成矿物质来源、中生代岩浆岩时空分布规律和成因等资料,发现华北东部中生代金等金属成矿与岩浆岩之间在成因上存在着紧密联系。

空间上,华北东部中生代金等金属矿床与岩浆岩紧密伴生,尤其是斑岩型、玢岩型、矽卡岩型和火山角砾岩型矿床多分布在岩体边部或岩体与围岩接触带上(Dai等, 2009; Wen等, 2017; Duan等, 2020)。热液成因石英脉型金等金属矿床多分布在花岗岩体或其围岩中,且与中基性脉岩相互穿切共生(Yang和Zhou, 2001; Wang等, 2020),而蚀变岩型金矿床产于区域次级断裂带上。但在胶东半岛西部三山岛金矿区岩金超深钻发现,矿体自地壳浅部一直延伸至隐伏花岗岩岩体或岩体与围岩接触带,表明蚀变岩型金矿床在空间上与岩体密切伴生。

时间上,华北东部中生代金等金属矿床的成矿时代与区域岩浆岩形成时间基本一致(图2)。斑岩型、矽卡岩型、火山角砾岩型矿床与中生代岩体密切伴生,岩体结晶年龄可代表成矿时代。热液成因石英脉型金矿床中含金黄铁矿的硫化物Rb-Sr、Re-Os同位素定年直接测定了其成矿时代(Yang和Zhou, 2001; Li等, 2012; Liu J C等, 2020及其参考文献),与矿区内岩浆岩形成时代相同。蚀变岩型金矿中热液榍石、独居石的U-Pb年龄与隐伏岩体中岩浆成因榍石U-Pb年龄相同(Deng等, 2020),也揭示了岩浆活动与成矿在时代上的相关性。

成矿流体方面,虽然大量H-O-C-S同位素数据表明大气降水广泛参与了热液成因金等金属矿床的形成,但与中生代岩浆活动相关的岩浆水在成矿过程中发挥了至关重要的作用(Fan等, 2003; Chen Y J等, 2009; Zeng等, 2013, 2020; Liu J C等, 2020; Sun G T等, 2020; Hu等, 2020)。对于矽卡岩型和斑岩型等矿床来说,其成矿流体主要来源于与成矿伴生的岩浆体系,是岩浆演化过程中脱水形成的成矿流体与围岩发生强烈水-岩相互作用的结果(秦克章等, 1999; 葛文春等, 2007; Shen等, 2012; Zeng等, 2013; Wen等, 2017;

Duan等, 2020)。

成矿物质来源方面,斑岩型和矽卡岩型矿床的成矿物质主要来源于富含Fe、Mo、Cu、Au等成矿元素的中生代闪长岩和斑岩岩浆。对于热液成因的金等矿床来说,放射成因同位素(Sr-Nd-Pb)研究表明,金等成矿元素来源具有多元性,部分成矿物质来源于与金矿伴生的花岗岩和基性脉岩(Yang和Zhou, 2001)。稀有气体同位素和高精度Au含量分析(张连昌等, 2002; 毛景文等, 2003; 唐克非, 2014; Zhang等, 2019; Liu J C等, 2020; Shen等, 2020; Wang等, 2020)也进一步证实了部分金等成矿元素来源于富集岩石圈地幔,被基性岩浆上升携带至地壳浅部,进而参与成矿。

因此,华北克拉通东部中生代金及多金属矿床与中生代岩浆岩之间成因关系密切:中生代岩浆作用一方面提供了部分成矿物质,另一方面岩浆脱水形成的流体形成成矿流体,混合广泛淋滤围岩的大气降水之后,与围岩发生强烈水-岩相互作用形成金等矿床,岩浆岩与矿床形成都是克拉通破坏的产物(Yang等, 2003; Zhu R X等, 2017; 朱日祥等, 2020)。

4.2 华北东部中生代岩浆-成矿与古太平洋板块俯冲

华北克拉通中生代岩浆活动主要分为三叠纪、侏罗纪和早白垩世三期(图2)。三叠纪岩浆岩从岩石组合上分为分布在南北缘的碱性岩带(235~210Ma)和辽东-朝鲜-辽西地区的钙碱性基性-中酸性火成岩带(225~200Ma)。华北北缘的碱性岩形成于碰撞后伸展或陆内伸展背景(Yang J H等, 2012b)。关于华北东南缘三叠纪岩浆作用, Yang和Wu(2009)详细讨论了这期岩浆活动的构造背景,认为是华北和华南陆块碰撞后岩石圈拆沉作用所引起的。之后, Yang J H等(2010)报道了朝鲜地区三叠纪金伯利岩及其地幔包体,发现地幔包体来自新生岩石圈地幔,而金伯利岩则来源于古老富集地幔,根据岩石地球化学资料,提出朝鲜地区三叠纪期间岩石圈地幔具有“下老上新”结构。Yang等(2012b)和Zhu Y S等(2017)先后在辽东地区辉长岩和碱性岩发现亏损地幔和再循环古老地壳物质组分,进一步支持朝鲜-辽东地区三叠纪期间岩石圈发生了拆沉作用。这一过程导致了一系列来自不同岩浆源区的基性-中酸性侵入岩和碱性岩形成,同时岩石圈地幔性质发生了改变。郑永飞等(2015, 2018)也认为其形成于

三叠纪深俯冲华南陆壳折返阶段的拉张环境。然而, 三叠纪岩浆作用是否与古太平洋板块俯冲有关一直存在争议, 具体涉及古太平洋板块西向俯冲到东亚大陆之下的时间。由于华南陆块向华北克拉通之下的俯冲受到古特提斯大洋板片的牵引, 在中国东部大陆的华南-华北交界岩石圈之下存在北向俯冲的大洋和大陆岩石圈板片, 势必会阻碍古太平洋板块的西向俯冲。如果这些俯冲的大洋和大陆岩石圈板片在晚三叠世发生断裂, 西太平洋板块才得以在那时俯冲到东亚大陆之下。虽然还存在这些争议, 但三叠纪期间华北东南缘岩石圈地幔性质的改变和强烈的岩浆活动、伸展事件标志着克拉通弱化的起始。

早-中侏罗世岩浆活动主要分布于朝鲜-辽东-辽西等地区。通过对侏罗纪期间古太平洋板块西向俯冲带位置及郯庐断裂带大于500km左行走滑位移的恢复计算(图4), 该时期岩浆活动分布位置距离俯冲带小于1000km, 远低于前人估计的距离(Wu等, 2019; 朱日祥和徐义刚, 2019), 而与南美安第斯山大陆弧岩浆分布规律相似, 南美安第斯山岩浆与太平洋板块俯冲带之间的距离远至1000km (Pilger, 1981; Aragón等, 2020)。汇总冀东、辽西等地区(乃至中国东部)分布的斑岩型Mo-Cu-Au矿床, 包括东北大兴安岭的多宝山(三矿沟铜矿, ~175Ma), 满洲里南的乌努格吐山钼矿(~182Ma), 张广才岭的弓棚子铜矿(~182Ma)、大黑山钼矿(~175Ma), 吉林中部的大石河钼矿(~187Ma)、季德屯钼矿(~169Ma)、石马洞钼矿(~172Ma), 辽西的肖家营子钼矿(~177Ma)、杨家杖子钼矿(~182Ma)和兰家沟钼矿(~186Ma), 冀东的唐杖子金钼矿(~170Ma), 胶东的尚家庄钼矿(~164Ma)以及江西的德兴斑岩铜矿(~171Ma)(黄典豪等, 1996; 秦克章等, 1999; 王强等, 2004; 吴福元等, 2006; 葛文春等, 2007; 邵建波等, 2016), 发现自北向南构成一个近NNE向的侏罗纪斑岩型Cu-Mo成矿带, 类似于南美安第斯斑岩成矿带(Sillitoe和Perelló, 2005)。华北东部早-中侏罗世岩浆岩以中酸性岩石为主, 具有显著低温、埃达克质岩石的地球化学特征及富集的Sr-Nd-Hf同位素组成(图5a), 表明它们的岩浆源区为加厚古老地壳物质, 可能是俯冲古太平洋板块脱水形成的流体加入下地壳而诱发部分熔融形成。因此, 我们认为华北东部早-中侏罗世岩浆作用与古太平洋板块俯冲有关, 产于区域挤压的大陆弧环境(Liu S F等, 2010, 2013)。与此同时, 在西侧的燕山

地区广泛发育着早-中侏罗世盆地(Liu S F等, 2010, 2013), 盆地中广泛发育巨厚的来源于东部隆升剥蚀的沉积物(Yang等, 2006b)和板内碱性玄武岩(南大岭组; Wang等, 2007), 标志着在大陆弧西侧应该是伸展环境。随着古太平洋板块的俯冲, 大陆弧岩浆作用逐渐向西迁移, 在晚侏罗世时期延伸到太行山一带, 也正是这一事件导致燕山地区在160Ma左右的隆升(Yang等, 2006b)。俯冲期间, 辽西地区侏罗纪是否发生岩石圈加厚拆沉(Gao等, 2004, 2008)仍存在一定争议。晚侏罗世(160~140Ma)是华北东部的转折期, 华北中部燕山、太行山和东秦岭等地区广泛发育160~140Ma的岩浆岩, 也是华北东部由挤压逐渐转变成伸展事件的标志。古太平洋板块的初始俯冲可能促进了大陆碰撞造山形成的山根发生拆沉, 这或许可以解释苏鲁-辽东-朝鲜地区与大别地区在山根拆沉时间上的不同。从另外一个角度来说, 造山带山根的拆沉为古太平洋板块向西俯冲的起始提供了空间。

自早白垩世以来, 华北东部岩浆活动逐渐向东迁移(图4), 且岩石类型复杂, 包括一系列基性-中酸性钙碱性岩石及伴生的碱性岩。一般认为, 华北东部的早白垩世岩浆活动是由古太平洋板块俯冲直接引起的(Wu等, 2005a; 朱日祥等, 2012; 郑永飞等, 2018)。冯亚洲等(2020)在辽东-吉南地区早白垩世火山岩中发现了来自于俯冲板块的物质记录, 为古太平洋板块俯冲诱发华北东部早白垩世岩浆活动提供了直接物质证据。这期岩浆活动与华北东部广泛分布的拉分盆地和变质核杂岩时空伴生(Meng, 2003; Yang等, 2007a), 表明其形成于伸展背景。岩石地球化学特征显示, 早白垩世岩浆具有多源性, 在~121Ma发育来源于亏损地幔源区的基性岩浆(Yang等, 2007b, 2008a; Dai等, 2016), 表明在早白垩世时期存在显著的软流圈地幔物质的上涌。但值得注意的是, 具有同位素亏损特征的岩浆岩仅分布在辽东、胶东、苏鲁、辽西等地区(图5b), 而在华北中部的燕山、太行山、鲁西等地区却未发现(Zhang等, 2002, 2009; 郑永飞等, 2018)。由此表明, 早白垩世期间华北的岩石圈地幔性质发生了转变, 但只发生在华北东缘。

综上所述, 华北东部中生代岩浆活动与古太平洋板块俯冲密切相关。至少自早侏罗世以来, 古太平洋板块俯冲诱发了华北东部大规模岩浆活动、成矿作用与克拉通破坏。

4.3 华北克拉通破坏与中生代成岩成矿的深部动力学

通过以上资料的总结, 结合大量的区域地质资料, 我们初步建立了古太平洋板块俯冲如何引起克拉通破坏及大规模岩浆活动和巨量金属成矿的模型(图6).

在三叠纪期间, 华南与华北大陆碰撞造山作用导致大别-苏鲁及相邻的华北东部地区岩石圈增厚, 形成巨厚的山根, 地壳的加厚使下地壳镁铁质岩石转变成高密度的榴辉岩相岩石(图6a). 朝鲜地区三叠纪期间岩石圈地幔“下老上新”结构和辽东地区三叠纪岩浆岩的研究揭示了大陆岩石圈的拆沉过程(Yang和Wu, 2009; Yang等, 2007c, 2007d; Yang J H等2012b; Zhu Y S等, 2017). 另外, 深俯冲陆壳折返阶段的构造拉张也有可能引起软流圈地幔局部上涌, 进而产生相对亏损的镁铁质岩浆活动(郑永飞等, 2018). 无论哪种机制, 不同性质和来源的岩浆经过分离结晶、地壳混染和岩浆混合等复杂演化过程形成华北东部晚三叠世复杂的侵入岩体. 苏鲁-朝鲜-辽东等地区造山带岩石圈失稳发生拆沉, 可能与古太平洋板块西向俯冲到东亚大陆之下相关. 山根的拆沉可能为古太平洋板块的俯冲提供了有利的空间条件, 促进了古太平洋板块向华北东部之下低角度俯冲(图6b).

进入侏罗纪, 持续的太平洋板块西向低角度俯冲, 与太平洋板块低角度向南美大陆俯冲相似(Pilger, 1981), 造成地壳增厚、隆升, 大陆岩浆弧从东部的朝鲜向西逐渐延伸迁移到辽东、辽西等地区. 而大陆弧西侧的燕辽地区则处于伸展背景, 形成一系列盆地. 在盆地中充填来源于东部大陆弧剥蚀的物质, 形成侏罗纪盆地中巨厚的陆相沉积岩. 同时, 在岩石圈伸展背景下, 古老岩石圈地幔减压发生低程度部分熔融, 形成侏罗纪盆地中的碱性玄武岩(Wang等, 2007). 古太平洋板块在200~160Ma期间向西持续的低角度俯冲形成向西迁移的大陆弧岩浆岩和俯冲带斑岩型Mo、Cu、Au等矿床(图6c). 该过程一直延续到160Ma, 进而引起燕山地区的整体隆升(Yang等, 2006b). 160~140Ma是古太平洋板块俯冲的转折期, 以分布在燕山地区西部、太行山和东秦岭-小秦岭地区不同性质的岩浆为标志.

自早白垩世以来, 古太平洋板块俯冲和俯冲带持续后撤造成华北东部发生强烈伸展作用, 形成拉分盆地和广泛分布的变质核杂岩. 克拉通岩石圈地幔减薄

图6 华北克拉通破坏与中生代岩浆-成矿的深部动力学模型

后所留下的空间被热的、饱满的软流圈物质所代替, 形成新生岩石圈地幔; 拆沉的古老岩石圈地幔在高压下增温发生不同程度的部分熔融, 形成了同位素相对富集的镁铁质和碱性岩浆. 与此同时, 上涌的软流圈发生减压部分熔融, 形成相对亏损的镁铁质岩浆岩. 地壳物质无论是受到上涌软流圈还是上升到地壳深度的幔源岩浆加热, 都会诱发下地壳物质发生部分熔融, 形成长英质岩浆. 因此, 俯冲板块的后撤引起高温软流圈物质上涌, 诱发上覆岩石圈发生部分熔融, 形成自西向东变年轻的、高温的岩浆活动(图6d). 这些岩浆携

带部分成矿物质上升至地壳不同深度, 形成岩性复杂的火山岩和侵入岩。岩浆在地壳浅部脱水形成的成矿流体, 与广泛淋滤围岩中成矿物质的大气降水混合, 经过强烈的水-围岩反应, 形成华北东部巨量金等金属矿床。

本文研究发现, 在早白垩世克拉通破坏期间, 华北东部岩石圈地幔的性质并没有全部被转变, 鲁西-燕山-太行山等地区的岩石圈地幔仍为古老克拉通型岩石圈地幔, 但晚白垩世和新生代玄武岩中地幔包体显示这些区域的岩石圈地幔是新生的。这个转变的构造机制有两种可能性: 一是克拉通破坏后不同性质的熔体与克拉通地幔之间的相互作用(Zhang等, 2002, 2005, 2008, 2009), 二是岩石圈减薄之后的大陆张裂引起的软流圈地幔上涌置换了古老克拉通地幔(郑永飞等, 2018)。另外, 本文在盆地构造分析和伸展率计算过程中, 未考虑NE-SW向伸展和不同时期古太平洋板块俯冲方向。但与前人工作相比较, 本文明确提出侏罗纪期间, 东亚大陆受到古太平洋板块西向低角度俯冲, 在华北东部(乃至中国东部)形成了类似于南美安第斯型富含斑岩铜矿的大陆岩浆弧(Pilger, 1981; Sillitoe和Perelló, 2005; Aragón等, 2020)。而早白垩世期间的地质演化则与美国西部盆岭省相似(Carlson等, 2005; Humphreys等, 2015; Snyder等, 2017), 富化富集的地幔楔及其上覆地壳发生部分熔融形成不同成分的岩浆岩及其衍生的热液金属矿床(Zheng等, 2019), 达到克拉通破坏的峰期。

5 总结

通过总结华北克拉通东部中生代以来盆地分析、岩浆、成矿、构造等最新研究成果, 提出华北东部中生代金等金属矿床成矿作用与岩浆活动密切相关, 岩浆为华北东部巨量金等金属成矿提供了部分物源和成矿流体。在恢复华北东部-新生代盆地伸展率和郯庐断裂左行走滑位移距离之后, 确定不同地质历史时期古太平洋板块俯冲带的位置。发现早中侏罗世期间, 岩浆-成矿作用由东向西逐渐迁移, 而160~140Ma之后则由西向东迁移。提出侏罗纪期间华北受到古太平洋板块向西低角度俯冲, 在华北东部(乃至中国东部)形成类似于南美安第斯型富含斑岩铜-钼矿的大陆岩浆弧, 而俯冲带流体交代地幔楔为早白垩世期间的克拉

通破坏及其成矿奠定了物质基础。在早白垩世古太平洋板块由低角度俯冲变成高角度俯冲并伴有俯冲带后撤, 引起华北克拉通东部发生强烈破坏, 并形成巨量岩浆和金等金属矿床。

致谢 感谢朱日祥、翟明国、徐义刚、吴福元、郑永飞、郑天愉、朱光、林伟等先生的指导、讨论和建议。感谢北京大学数学科学学院杨向谦同学帮助数学模型的建立和运算。感谢张拴宏研究员和两位匿名评审专家的评审意见和建议。感谢科技部重点研发专项华北项目组成员的大力支持。

参考文献

- 曹忠祥. 2008. 营口-潍坊断裂带新生代走滑拉分——裂陷盆地伸展量、沉降量估算. 地质科学, 43: 65–81
- 冯亚洲, 杨进辉, 孙金凤, 张吉衡. 2020. 中生代古太平洋板块俯冲诱发华北克拉通破坏的物质记录. 中国科学: 地球科学, 50: 651–662
- 高昕宇, 赵太平. 2017. 华北克拉通南缘中生代花岗岩岩浆作用与构造演化. 中国科学: 地球科学, 47: 1309–1328
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型Cu、Mo矿床成矿时代及其地球动力学意义. 科学通报, 52: 2407–2417
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Sibel W, 翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石U-Pb年代学. 岩石学报, 21: 1281–1301
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 万渝生, 刘敦一, 翟明国, 金成伟. 2004. 胶东乳山含金石英脉型金矿的成矿年龄: 热液锆石SHRIMP法U-Pb测定. 科学通报, 49: 1191–1198
- 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 刘兰笙, 孙亚莉, 邹晓秋. 1996. 华北地台钼(铜)矿床成矿年代学研究——辉钼矿铼-钨年龄及其地质意义. 矿床地质, 15: 365–373
- 雷超, 任建业, 吴梅莲, 祁鹏, 胡德胜. 2008. 济阳凹陷孤西负反转断层面形成演化定量研究及其油气地质意义. 大地构造与成矿学, 32: 462–469
- 李伟, 郭甜甜, 吴智平, 徐长贵, 吴奎, 陈兴鹏, 幽鹏飞, 郭睿鹏. 2019. 平衡剖面方法在伸展、走滑作用叠加、配比关系分析中的应用——以渤海海域辽东湾坳陷为例. 地质论评, 65: 1501–1514
- 李伟, 吴智平, 赵文栋. 2010. 渤海湾盆地燕山期构造特征与盆地转型. 地球物理学进展, 25: 2068–2077
- 刘超, 李伟, 吴智平, 张晓庆, 陈兴鹏, 李春锐. 2016. 渤海海域渤南区新生代断裂体系与盆地演化. 高校地质学报, 22: 317–326
- 刘见宝, 袁通甲, 宋志敏, 李冰, 曲艳伟, 任建刚. 2017. 济阳拗陷新生代构造演化及其动力学背景分析. 地质与资源, 26: 346–352
- 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 周会青, 屈文俊, 王成辉. 2011. 胶东半岛烟

- 台地区邢家山钨钼矿床地质特征及其辉钼矿Re-Os同位素测年. 地质通报, 30: 1294–1301
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 李晓峰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 289–299
- 秦克章, 汪东波, 王之田, 孙枢. 1999. 中国东部铜矿床类型、成矿环境、成矿集中区与成矿系统. 矿床地质, 18: 359–371
- 邵建波, 陈殿义, 潘月栋, 王洪涛. 2016. 吉林省中东部季德屯及石马洞大型钼矿床辉钼矿Re-Os同位素年龄及地质意义. 世界地质, 35: 717–728
- 孙金凤, 杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 杨岳衡. 2012. 榴石原位微区LA-ICPMS U-Pb年龄测定. 科学通报, 57: 1603–1615
- 孙金凤, 杨进辉. 2009. 华北东部早白垩世A型花岗岩与克拉通破坏. 地球科学, 34: 137–147
- 唐克非. 2014. 华北克拉通南缘熊耳山地区金矿床时空演化、矿床成因及成矿构造背景. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 田在艺, 韩屏. 1990. 渤海断陷盆地拉张量分析与油气潜力. 石油学报, 11: 1–12
- 王强, 赵振华, 简平, 许继峰, 包志伟, 马金龙. 2004. 德兴花岗闪长斑岩SHRIMP锆石U-Pb年代学和Nd-Sr同位素地球化学. 岩石学报, 20: 315–324
- 吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 柳小明. 2006. 辽西东南部中生代花岗岩时代. 岩石学报, 22: 315–325
- 闫峻, 陈江峰, 谢智, 高天山, Foland K A, 张希道, 刘明伟. 2005. 鲁东晚白垩世玄武岩及其中地幔包体的岩石学和地球化学研究. 岩石学报, 21: 99–112
- 杨进辉, 周新华. 2000. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物Rb-Sr等时线年龄与成矿时代. 科学通报, 45: 1547–1552
- 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: 85–98
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成. 中国科学: 地球科学, 41: 1037–1046
- 翟明国. 2016. 朝鲜半岛与华北地质之对比研究: 进展与问题. 岩石学报, 32: 2915–2932
- 张连昌, 沈远超, 刘铁兵, 曾庆栋, 李光明, 李厚民. 2002. 山东胶莱盆地北缘金矿Ar-Ar法和Rb-Sr等时线年龄与成矿时代. 中国科学D辑: 地球科学, 32: 727–734
- 郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 赵子福. 2015. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带. 中国科学: 地球科学, 45: 711–735
- 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
- 钟福平, 钟建华, Abdurahman A, 王毅, 由伟丰, 杨伟利. 2015. 华北克拉通破坏时间与破坏范围分布特征——来自银根-额济纳旗盆地苏红图拗陷早白垩世火山岩的启示. 中国地质, 42: 435–456
- 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, 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, 徐义刚. 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 49: 1346–1356
- 朱日祥, 朱光, 李建威. 2020. 华北克拉通破坏. 北京: 科学出版社. 417
- Aragón E, D'Eramo F, Cuffaro M, Doglioni C, Ficini E, Pinotti L, Nacif S, Demartis M, Hernando I, Fuentes T. 2020. The westward lithospheric drift, its role on the subduction and transform zones surrounding Americas: Andean to cordilleran orogenic types cyclicity. *Geosci Front*, 11: 1219–1229
- Cai Y C, Fan H R, Santosh M, Liu X, Hu F F, Yang K F, Lan T G, Yang Y H, Liu Y. 2013. Evolution of the lithospheric mantle beneath the southeastern North China Craton: Constraints from mafic dikes in the Jiaobei terrain. *Gondwana Res*, 24: 601–621
- Carlson R W, Pearson D G, James D E. 2005. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. *Rev Geophys*, 43: RG1001
- Chen B, Chen Z C, Jahn B M. 2009. Origin of mafic enclaves from the Taihang Mesozoic orogen, North China Craton. *Lithos*, 110: 343–358
- Chen B, Jahn B M, Arakawa Y, Zhai M G. 2004. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang orogen, North China Craton: Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Contrib Mineral Petrol*, 148: 489–501
- Chen B, Tian W, Jahn B M, Chen Z C. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages and *in-situ* Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusions in South Taihang, North China Craton: Evidence for hybridization between mantle-derived magmas and crustal components. *Lithos*, 102: 118–137
- Chen L H, Zeng G, Jiang S Y, Hofmann A W, Xu X S, Pan M B. 2009. Sources of Anfengshan basalts: Subducted lower crust in the Sulu UHP belt, China. *Earth Planet Sci Lett*, 286: 426–435
- Chen Y J, Pirajno F, Li N, Guo D S, Lai Y. 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling orogen, Henan Province, China: Implications for ore genesis. *Ore Geol Rev*, 35: 245–261
- Chung S L. 1999. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu fault with implications for the eastern plate boundary between North and South China. *J Geol*, 107: 301–312
- Dai F Q, Zhao Z F, Zheng Y F, Sun G C. 2019. The geochemical nature of mantle sources for two types of Cretaceous basaltic rocks from Luxi and Jiaodong in east-central China. *Lithos*, 344–345: 409–424
- Dai J Z, Mao J W, Zhao C S, Xie G Q, Yang F Q, Wang Y T. 2009. New U-Pb and Re-Os age data and the geodynamic setting of the Xiaojiayingzi Mo (Fe) deposit, western Liaoning Province, North-

- eastern China. *Ore Geol Rev*, 35: 235–244
- 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
- Deng J, Qiu K F, Wang Q F, Goldfarb R, Yang L Q, Zi J W, Geng J Z, Ma Y. 2020. *In situ* dating of hydrothermal monazite and implications for the geodynamic controls on ore formation in the Jiaodong Gold Province, Eastern China. *Econ Geol*, 115: 671–685
- Deng J, Wang Q F. 2016. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework. *Gondwana Res*, 36: 219–274
- Deng X D, Li J W, Wen G. 2015. U-Pb geochronology of hydrothermal zircons from the Early Cretaceous iron skarn deposits in the Handan-Xingtai District, North China Craton. *Econ Geol*, 110: 2159–2180
- 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
- Duan X X, Zeng Q D, Yang J H, Liu J M, Wang Y B, Zhou L L. 2014. Geochronology, geochemistry and Hf isotope of late Triassic magmatic rocks of Qingchengzi district in Liaodong Peninsula, Northeast China. *J Asian Earth Sci*, 91: 107–124
- Duan Z, Gleeson S A, Gao W S, Wang F Y, Li C J, Li J W. 2020. Garnet U-Pb dating of the Yinan Au-Cu skarn deposit, Luxi District, North China Craton: Implications for district-wide coeval Au-Cu and Fe skarn mineralization. *Ore Geol Rev*, 118: 103310
- Fan H R, Hu F F, Wilde S A, Yang K F, Jin C W. 2011. The Qiyugou gold-bearing breccia pipes, Xiong'ershan region, central China: Fluid-inclusion and stable-isotope evidence for an origin from magmatic fluids. *Int Geol Rev*, 53: 25–45
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, Yang J H. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong Gold Province, China. *Miner Depos*, 38: 739–750
- Fan W, Jiang N, Xu X, Hu J, Zong K. 2017. Petrogenesis of the middle Jurassic appinite and coeval granitoids in the eastern Hebei area of North China Craton. *Lithos*, 278–281: 331–346
- Fan W M, Guo F, Wang Y J, Lin G, Zhang M. 2001. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in Eastern China. *Phys Chem Earth Part A-Solid Earth Geodesy*, 26: 733–746
- Fang W, Dai L Q, Zheng Y F, Zhao Z F, Ma L T. 2020. Tectonic transition from oceanic subduction to continental collision: New geochemical evidence from Early-Middle Triassic mafic igneous rocks in southern Liaodong Peninsula, east-central China. *GSA Bull*, 132: 1469–1488
- Feng K, Fan H R, Groves D I, Yang K F, Hu F F, Liu X, Cai Y C. 2020. Geochronological and sulfur isotopic evidence for the genesis of the post-magmatic, deeply sourced, and anomalously gold-rich Daliuhang orogenic deposit, Jiaodong, China. *Miner Depos*, 55: 293–308
- Gao S, Rudnick R L, Xu W L, Yuan H L, Liu Y S, Walker R J, Puchtel I S, Liu X M, Huang H, Wang X R, Yang J. 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 270: 41–53
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C, Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton. *Nature*, 432: 892–897
- Gao Y F, Santosh M, Wei R H, Ma G X, Chen Z K, Wu J L. 2013. Origin of high Sr/Y magmas from the northern Taihang Mountains: Implications for Mesozoic porphyry copper mineralization in the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 78: 143–159
- Goss S C, Wilde S A, Wu F, Yang J. 2010. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton. *Lithos*, 120: 309–326
- Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, Ryan C G. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. *Geodyn Ser*, 27: 107–126
- Gu H O, Xiao Y L, Santosh M, Li W Y, Yang X Y, Pack A, Hou Z H. 2013. Spatial and temporal distribution of Mesozoic adakitic rocks along the Tan-Lu fault, Eastern China: Constraints on the initiation of lithospheric thinning. *Lithos*, 177: 352–365
- Guo F, Fan W M, Wang Y J, Zhang M. 2004. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in Eastern China: Implications for enrichment processes beneath continental collisional belt. *Lithos*, 78: 291–305
- Guo F, Guo J T, Wang C Y, Fan W M, Li C W, Zhao L, Li H X, Li J Y. 2013. Formation of mafic magmas through lower crustal AFC processes—An example from the Jinan gabbroic intrusion in the North China Block. *Lithos*, 179: 157–174
- Guo J T, Guo F, Wang C Y, Li C W. 2013. Crustal recycling processes in generating the Early Cretaceous Fangcheng basalts, North China Craton: New constraints from mineral chemistry, oxygen isotopes of olivine and whole-rock geochemistry. *Lithos*, 170–171: 1–16
- He X F, Santosh M. 2014. Crustal recycling through intraplate magmatism: Evidence from the Trans-North China orogen. *J Asian Earth Sci*, 95: 147–163
- Hu F F, Fan H R, Jiang X H, Li X C, Yang K F, Mernagh T. 2013. Fluid inclusions at different depths in the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Geofluids*, 13: 528–541
- Hu H L, Fan H R, Santosh M, Liu X, Cai Y C, Yang K F. 2020. Ore-

- forming processes in the Wang'ershan gold deposit (Jiaodong, China): Insight from microtexture, mineral chemistry and sulfur isotope compositions. *Ore Geol Rev*, 123: 103600
- Huang X L, Zhong J W, Xu Y G. 2012. Two tales of the continental lithospheric mantle prior to the destruction of the North China Craton: Insights from Early Cretaceous mafic intrusions in western Shandong, East China. *Geochim Cosmochim Acta*, 96: 193–214
- Humphreys E D, Schmandt B, Bezada M J, Perry-Houts J. 2015. Recent craton growth by slab stacking beneath Wyoming. *Earth Planet Sci Lett*, 429: 170–180
- Kuang Y S, Wei X, Hong L B, Ma J L, Pang C J, Zhong Y T, Zhao J X, Xu Y G. 2012. Petrogenetic evaluation of the Laohutai basalts from North China Craton: Melting of a two-component source during lithospheric thinning in the Late Cretaceous-Early Cenozoic. *Lithos*, 154: 68–82
- Li J W, Bi S J, Selby D, Chen L, Vasconcelos P, Thiede D, Zhou M F, Zhao X F, Li Z K, Qiu H N. 2012. Giant Mesozoic gold provinces related to the destruction of the North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 349–350: 26–37
- Li J W, Vasconcelos P M, Zhang J, Zhou M F, Zhang X J, Yang F H. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constraints on a temporal link between gold mineralization, magmatism, and continental margin transtension in the Jiaodong Gold Province, Eastern China. *J Geol*, 111: 741–751
- Li J W, Vasconcelos P, Zhou M F, Zhao X F, 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. *Econ Geol*, 101: 1023–1038
- Li Q L, Chen F K, Yang J H, Fan H R. 2008. Single grain pyrite Rb-Sr dating of the Linglong gold deposit, Eastern China. *Ore Geol Rev*, 34: 263–270
- Li Q L, Santosh M, Li S R, Guo P. 2014. The formation and rejuvenation of continental crust in the central North China Craton: Evidence from zircon U-Pb geochronology and Hf isotope. *J Asian Earth Sci*, 95: 17–32
- Li Q L, Santosh M, Li S R, Zhang J Q. 2015. Petrology, geochemistry and zircon U-Pb and Lu-Hf isotopes of the Cretaceous dykes in the central North China Craton: Implications for magma genesis and gold metallogeny. *Ore Geol Rev*, 67: 57–77
- Liang C Y, Liu Y J, Neubauer F, Jin W, Zeng Z X, Genser J, Li W M, Li W, Han G Q, Wen Q B, Zhao Y L, Cai L B. 2015. Structural characteristics and LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the deformed granitic rocks from the Mesozoic Xingcheng-Taili ductile shear zone in the North China Craton. *Tectonophysics*, 650: 80–103
- Niu X L, Chen B, Ma X. 2011. Petrogenesis of the Dengzhazi A-type pluton from the Taihang-Yanshan Mesozoic orogenic belts, North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 41: 133–146
- Liu A K, Chen B, Suzuki K, Liu L. 2010. Petrogenesis of the Mesozoic Zijinguan mafic pluton from the Taihang Mountains, North China Craton: Petrological and Os-Nd-Sr isotopic constraints. *J Asian Earth Sci*, 39: 294–308
- Liu J C, Wang Y T, Hu Q Q, Wei R, Huang S K, Sun Z H, Hao J L. 2020. Ore genesis of the Fancha gold deposit, Xiaolinling goldfield, southern margin of the North China Craton: Constraints from pyrite Re-Os geochronology and He-Ar, *in-situ* S-Pb isotopes. *Ore Geol Rev*, 119: 103373
- 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
- Liu S F, Su S, Zhang G W. 2013. Early Mesozoic basin development in North China: Indications of cratonic deformation. *J Asian Earth Sci*, 62: 221–236
- Liu S F, Zhang J F, Hong S Y, Ritts B D. 2010. Early Mesozoic basin development and its response to thrusting in the Yanshan Fold-and-Thrust Belt, China. *Int Geol Rev*, 49: 1025–1049
- Liu S L, Hu F F, Fan H R, Yang K F, Qiu Z J, Hu H L. 2020. Ore-forming processes in the Xingjiashan W-Mo skarn deposit (Jiaodong, China): Insights from multi-generation scheelite and garnet geochemistry. *Ore Geol Rev*, 124: 103645
- Liu S, Feng C X, Jahn B M, Hu R Z, Gao S, Coulson I M, Feng G Y, Lai S C, Yang C G, Yang Y H. 2013. Zircon U-Pb age, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of mafic dykes in the Shaanxi Province, North China Craton, China. *Lithos*, 175–176: 244–254
- Liu S, Feng C X, Santosh M, Feng G Y, Coulson I M, Xu M J, Guo Z, Guo X L, Peng H, Feng Q. 2018. Integrated elemental and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic studies of Mesozoic mafic dykes from the Eastern North China Craton: Implications for the dramatic transformation of lithospheric mantle. *J Geodyn*, 114: 19–40
- Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Qi L, Zhong H, Xiao T F, Qi Y Q, Wang T, Coulson I M. 2008. Zircon U-Pb geochronology and major, trace elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of mafic dykes in western Shandong Province, East China: Constrains on their petrogenesis and geodynamic significance. *Chem Geol*, 255: 329–345
- Liu S, Feng C X, Feng G Y, Xu M J, Coulson I M, Guo X L, Guo Z, Peng H, Feng Q. 2017. Timing, mantle source and origin of mafic dykes within the gravity anomaly belt of the Taihang-Da Hinggan gravity lineament, central North China Craton. *J Geodyn*, 109: 41–58
- Ma L, Jiang S Y, Hofmann A W, Dai B Z, Hou M L, Zhao K D, Chen L H, Li J W, Jiang Y H. 2014. Lithospheric and asthenospheric

- sources of lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: A consequence of rapid lithospheric thinning beneath the North China Craton? *Geochim Cosmochim Acta*, 124: 250–271
- Ma L, Jiang S Y, Hofmann A W, Xu Y G, Dai B Z, Hou M L. 2016. Rapid lithospheric thinning of the North China Craton: New evidence from Cretaceous mafic dikes in the Jiaodong Peninsula. *Chem Geol*, 432: 1–15
- Mao J, Wang Y, Li H, Pirajno F, Zhang C, Wang R. 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics. *Ore Geol Rev*, 33: 361–381
- Meng Q R. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369: 155–174
- Menzies M A, Fan W, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 76: 71–81
- Pei F P, Xu W L, Yang D B, Yu Y, Meng E, Zhao Q G. 2011a. Petrogenesis of Late Mesozoic granitoids in southern Jilin Province, Northeastern China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Pb isotopic evidence. *Lithos*, 125: 27–39
- Pei F P, Xu W L, Yang D B, Yu Y, Wang W, Zhao Q G. 2011b. Geochronology and geochemistry of Mesozoic mafic-ultramafic complexes in the southern Liaoning and southern Jilin Provinces, NE China: Constraints on the spatial extent of destruction of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 40: 636–650
- Pilger R H. 1981. Plate reconstructions, aseismic ridges, and low-angle subduction beneath the Andes. *Geol Soc Am Bull*, 92: 448–456
- Sakuyama T, Tian W, Kimura J I, Fukao Y, Hirahara Y, Takahashi T, Senda R, Chang Q, Miyazaki T, Obayashi M, Kawabata H, Tatsumi Y. 2013. Melting of dehydrated oceanic crust from the stagnant slab and of the hydrated mantle transition zone: Constraints from Cenozoic alkaline basalts in Eastern China. *Chem Geol*, 359: 32–48
- Shen J F, Santosh M, Li S R, Li C P, Zhang J Q, Zhang S Q, Alam M, Wang Y H, Xu K X. 2020. He-Ar, S, Pb and O isotope geochemistry of the Dabaiyang gold deposit: Implications for the relationship between gold metallogeny and destruction of the North China Craton. *Ore Geol Rev*, 116: 103229
- Shen J F, Santosh M, Li S R, Zhang H F, Yin N, Dong G C, Wang Y J, Ma G G, Yu H J. 2012. The Beiminghe skarn iron deposit, Eastern China: Geochronology, isotope geochemistry and implications for the destruction of the North China Craton. *Lithos*, 156–159: 218–229
- Sillitoe R H, Perelló J. 2005. Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Econ Geol*, 100th Anniv Vol: 845–890
- Snyder D B, Humphreys E, Pearson D G. 2017. Construction and destruction of some North American Cratons. *Tectonophysics*, 694: 464–485
- Sun G T, Zeng Q D, Zhou L L, Wang Y B, Chen P W. 2020. Trace element contents and in situ sulfur isotope analyses of pyrite in the Baiyun gold deposit, NE China: Implication for the genesis of intrusion-related gold deposits. *Ore Geol Rev*, 118: 103330
- Sun J F, Yang J H, Wu F Y, Li X H, Yang Y H, Xie L W, Wilde S A. 2010. Magma mixing controlling the origin of the Early Cretaceous Fangshan granitic pluton, North China Craton: *In situ* U-Pb age and Sr-, Nd-, Hf- and O-isotope evidence. *Lithos*, 120: 421–438
- Sun J F, Zhang J H, Yang J H, Yang Y H, Chen S. 2019. Tracing magma mixing and crystal-melt segregation in the genesis of syenite with mafic enclaves: Evidence from *in situ* zircon Hf-O and apatite Sr-Nd isotopes. *Lithos*, 334: 42–57
- Sun J F, Zhang J H, Yang J H, Zhu Y S, Chen J Y, Ling-Hu M M. 2020. Multi-stage Jurassic magmatism in the Liaodong Peninsula: Constraints on crustal evolution beneath the eastern North China Craton. *Lithos*, 105897
- Sun J F. 2011. Petrogenesis of the Early Cretaceous A-type granites in the northern Liaodong Peninsula: Implications for decratonization of the North China Craton. Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 1–187
- Tan J, Wei J H, He H Y, Su F, Li Y J, Fu L B, Zhao S Q, Xiao G L, Zhang F, Xu J F, Liu Y, Stuart F M, Zhu R X. 2018. Noble gases in pyrites from the Guocheng-Liaoshang gold belt in the Jiaodong Province: Evidence for a mantle source of gold. *Chem Geol*, 480: 105–115
- Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I, Luo Z K, Huang J Z, Miao L C, Liu Y K. 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids. *Ore Geol Rev*, 13: 275–291
- Wang T, Guo L, Zheng Y D, Donskaya T, Gladkochub D, Zeng L S, Li J B, Wang Y B, 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 Y, Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J J. 2011. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 125: 940–955
- Wang Y J, Fan W M, Peng T P, Zhang H F, Guo F. 2005. Nature of the Mesozoic lithospheric mantle and tectonic decoupling beneath the Dabie orogen, central China: Evidence from ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of early

- Cretaceous mafic igneous rocks. *Chem Geol*, 220: 165–189
- Wang Y J, Fan W M, Zhang H F, Peng T P. 2006. Early Cretaceous gabbroic rocks from the Taihang Mountains: Implications for a paleosubduction-related lithospheric mantle beneath the central North China Craton. *Lithos*, 86: 281–302
- Wang Z C, Cheng H, Zong K Q, Geng X L, Liu Y S, Yang J H, Wu F Y, Becker H, Foley S, Wang C Y. 2020. Metasomatized lithospheric mantle for Mesozoic giant gold deposits in the North China Craton. *Geology*, 48: 169–173
- Wang Z H, Zhao Y, Zou H B, Li W P, Liu X W, Wu H, Xu G, Zhang S H. 2007. Petrogenesis of the Early Jurassic Nandaling flood basalts in the Yanshan belt, North China Craton: A correlation between magmatic underplating and lithospheric thinning. *Lithos*, 96: 543–566
- Wen B J, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Pirajno F, Yang K F. 2015. Genesis of two different types of gold mineralization in the Linglong gold field, China: Constrains from geology, fluid inclusions and stable isotope. *Ore Geol Rev*, 65: 643–658
- Wen G, Bi S J, Li J W. 2017. Role of evaporitic sulfates in iron skarn mineralization: A fluid inclusion and sulfur isotope study from the Xishimen deposit, Handan-Xingtai district, North China Craton. *Miner Depos*, 52: 495–514
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O, Yang J H. 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 103–119
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Zhang X O. 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chem Geol*, 221: 127–156
- Wu F Y, Han R H, Yang J H, Wilde S A, Zhai M G, Park S C. 2007. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chem Geol*, 238: 232–248
- Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, Wilde S A, Walker R J. 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 47: 173–195
- Xie Q H, Zhang Z C, Hou T, Santosh M, Jin Z L, Han L, Cheng Z G. 2015. Petrogenesis of the Zhangmatun gabbro in the Ji'nan complex, North China Craton: Implications for skarn-type iron mineralization. *J Asian Earth Sci*, 113: 1197–1217
- Xu L, Yang J H, Zeng Q D, Xie L W, Zhu Y S, Li R, Li B. 2020. Pyrite Rb-Sr, Sm-Nd and Fe isotopic constraints on the age and genesis of the Qingchengzi Pb-Zn deposits, Northeastern China. *Ore Geol Rev*, 117: 103324
- Xu R, Liu Y S, Wang X H, Zong K Q, Hu Z C, Chen H H, Zhou L. 2017. Crust recycling induced compositional-temporal-spatial variations of Cenozoic basalts in the Trans-North China orogen. *Lithos*, 274-275: 383–396
- Xu W L, Wang Q H, Wang D Y, Guo J H, Pei F P. 2006. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, Eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. *J Asian Earth Sci*, 27: 454–464
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Phys Chem Earth Part A-Solid Earth Geodesy*, 26: 747–757
- Xu Y G, Chung S L, Ma J, Shi L. 2004a. Contrasting Cenozoic lithospheric evolution and architecture in the western and eastern Sino-Korean Craton: Constraints from geochemistry of basalts and mantle xenoliths. *J Geol*, 112: 593–605
- Xu Y G, Huang X L, Ma J L, Wang Y B, Iizuka Y, Xu J F, Wang Q, Wu X Y. 2004b. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. *Contrib Mineral Petrol*, 147: 750–767
- Xu Y G, Ma J L, Huang X L, Iizuka Y, Chung S L, Wang Y B, Wu X Y. 2004c. Early Cretaceous gabbroic complex from Yinan, Shandong Province: Petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton. *Int J Earth Sci*, 93: 1025–1041
- Xu Y G, Ma J L, Frey F A, Feigenson M D, Liu J F. 2005. Role of lithosphere-aesthenosphere interaction in the genesis of quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton. *Chem Geol*, 224: 247–271
- Xu Y G. 2014. Recycled oceanic crust in the source of 90–40Ma basalts in North and Northeast China: Evidence, provenance and significance. *Geochim Cosmochim Acta*, 143: 49–67
- Xu Z, Zhao Z F, Zheng Y F. 2012. Slab-mantle interaction for thinning of cratonic lithospheric mantle in North China: Geochemical evidence from Cenozoic continental basalts in central Shandong. *Lithos*, 146-147: 202–217
- Yang D B, Xu W L, Pei F P, Yang C H, Wang Q H. 2012. Spatial extent of the influence of the deeply subducted South China Block on the southeastern North China Block: Constraints from Sr-Nd-Pb isotopes in Mesozoic mafic igneous rocks. *Lithos*, 136-139: 246–260
- Yang D B, Xu W L, Wang Q H, Pei F P. 2010. Chronology and geochemistry of Mesozoic granitoids in the Bengbu area, central China: Constraints on the tectonic evolution of the Eastern North China Craton. *Lithos*, 114: 200–216
- Yang J H, Zhou X H. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits. *Geology*, 29: 711–714
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the

- North China Craton: An association with lithospheric thinning. *Ore Geol Rev*, 23: 125–152
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A, Chu M F. 2004a. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Gudaoling granite and its mafic enclaves, Northeast China. *Geochim Cosmochim Acta*, 68: 4469–4483
- Yang J H, Chung S L, Zhai M G, Zhou X H. 2004b. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73: 145–160
- Yang J H, Chung S L, Wilde S A, Wu F Y, Chu M F, Lo C H, Fan H R. 2005a. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chem Geol*, 214: 99–125
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A, Chu M F, Lo C H, Song B. 2005b. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, East China and their relationship to lithospheric thinning. *Chem Geol*, 222: 200–231
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A, Chu M F. 2006a. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, Northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Lithos*, 89: 89–106
- Yang J H, Wu F Y, Shao J A, Wilde S A, Xie L W, Liu X M. 2006b. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan fold and thrust belt, North China. *Earth Planet Sci Lett*, 246: 336–352
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Lo C H, Wilde S A, Davis G A. 2007a. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the Eastern North China Craton. *Geol Soc Am Bull*, 119: 1405–1414
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Xie L W, Yang Y H, Liu X M. 2007b. Tracing magma mixing in granite genesis: *In situ* U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons. *Contrib Mineral Petrol*, 153: 177–190
- Yang J H, Sun J F, Chen F, Wilde S A, Wu F Y. 2007c. Sources and petrogenesis of late Triassic dolerite dikes in the Liaodong Peninsula: Implications for post-collisional lithosphere thinning of the Eastern North China Craton. *J Petrol*, 48: 1973–1997
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Liu X M. 2007d. Petrogenesis of late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong peninsula, North China Craton. *Chem Geol*, 242: 155–175
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Belousova E, Griffin W L. 2008a. Mesozoic decratonization of the North China block. *Geology*, 36: 467–470
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Chen F K, Liu X M, Xie L W. 2008b. Petrogenesis of an alkali syenite-granite-rhyolite suite in the Yanshan fold and Thrust belt, Eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic evidence for lithospheric thinning. *J Petrol*, 49: 315–351
- Yang J H, Wu F Y. 2009. Triassic magmatism and its relation to decratonization in the Eastern North China Craton. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 52: 1319–1330
- Yang J H, O'Reilly S, Walker R J, Griffin W L, Wu F Y, Zhang M, Pearson N. 2010. Diachronous decratonization of the Sino-Korean Craton: Geochemistry of mantle xenoliths from North Korea. *Geology*, 38: 799–802
- Yang J H, Sun J F, Zhang M, Wu F Y, Wilde S A. 2012a. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension. *Chem Geol*, 328: 149–167
- Yang J H, Sun J F, Zhang J H, Wilde S A. 2012b. Petrogenesis of Late Triassic intrusive rocks in the northern Liaodong Peninsula related to decratonization of the North China Craton: Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence. *Lithos*, 153: 108–128
- Yang L Q, Deng J, Goldfarb R J, Zhang J, Gao B F, 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 Res*, 25: 1469–1483
- Yang L Q, Deng J, Guo C Y, Zhang J, Jiang S Q, Gao B F, Gong Q J, Wang Q F. 2009. Ore-forming fluid characteristics of the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Gold Province, China. *Resour Geol*, 59: 181–193
- Yang W, Li S G. 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, 102: 88–117
- Ying J F, Zhang H F, Tang Y J. 2011. Crust-mantle interaction in the central North China Craton during the Mesozoic: Evidence from zircon U-Pb chronology, Hf isotope and geochemistry of syenitic-monzonitic intrusions from Shanxi Province. *Lithos*, 125: 449–462
- Zeng Q D, Liu J M, Qin K Q, Fan H R, Chu S X, Wang Y B, Zhou L L. 2013. Types, characteristics, and time-space distribution of molybdenum deposits in China. *Int Geol Rev*, 55: 1311–1358
- Zeng Q D, Wang Y B, Yang J H, Guo Y P, Yu B, Zhou L L, Qiu H C. 2020. Spatial-temporal distribution and tectonic setting of gold deposits in the northern margin gold belt of the North China Craton. *Int Geol Rev*, 1–32
- Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, Sun M, Cai Y. 2009. Comprehensive refertilization of lithospheric mantle beneath the North China Craton: Further Os-Sr-Nd isotopic constraints. *J Geol Soc*, 166: 249–259

- Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, Sun M, Zheng J P, Cai Y. 2008. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath Eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts. *Contrib Mineral Petrol*, 155: 271–293
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Fan W M, Zhai M G, Yin J F. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contrib Mineral Petrol*, 144: 241–254
- Zhang H F. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 237: 768–780
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Zhou M F, Fan W M, Zheng J P. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the Eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochim Cosmochim Acta*, 67: 4373–4387
- Zhang H F, Sun M. 2002. Geochemistry of Mesozoic basalts and mafic dikes, Southeastern North China Craton, and tectonic implications. *Int Geol Rev*, 44: 370–382
- Zhang P, Kou L L, Zhao Y, Bi Z W, Sha D M, Li Z M, Han R P. 2019. Fluid inclusions, H-O, S, Pb, and noble gas isotope studies of the Baiyun gold deposit in the Qingchengzi orefield, NE China. *J Geochem Explo*, 200: 37–53
- Zhang X O, Cawood P A, Wilde S A, Liu R Q, Song H L, Li W, Snee L W. 2003. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China. *Miner Depos*, 38: 141–153
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 107: 45–73
- Zhao Z F, Dai L Q, Zheng Y F. 2013. Postcollisional mafic igneous rocks record crust-mantle interaction during continental deep subduction. *Sci Rep*, 3: 3413
- Zheng Y F, Mao J W, Chen Y J, Sun W D, Ni P, Yang X Y. 2019. Hydrothermal ore deposits in collisional orogens. *Sci Bull*, 64: 205–212
- 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*, 98: 135–155
- 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 R X, Yang J H, Wu F Y. 2012. Timing of destruction of the North China Craton. *Lithos*, 149: 51–60
- 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*, 106: 2233–2257
- Zhu Y S, Yang J H, Sun J F, Wang H. 2017. Zircon Hf-O isotope evidence for recycled oceanic and continental crust in the sources of alkaline rocks. *Geology*, 45: 407–410
- Zhu Y S, Yang J H, Sun J F, Zhang J H, Wu F Y. 2016. Petrogenesis of coeval silica-saturated and silica-undersaturated alkaline rocks: Mineralogical and geochemical evidence from the Saima alkaline complex, NE China. *J Asian Earth Sci*, 117: 184–207

(责任编辑: 郑永飞)