中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 8 期: 1153 ~ 1168
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

克拉通破坏型金矿床

朱日祥[①*], 范宏瑞[①], 李建威[②], 孟庆任[①], 李胜荣[③], 曾庆栋[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 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;
③ 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083
* E-mail: rxzhu@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2015-03-03; 接受日期: 2015-06-04; 网络版发表日期: 2015-07-23
国家自然科学基金委员会华北克拉通破坏重大研究计划集成项目(批准号: 91414301)和岩石圈演化国家重点实验室项目(编号: 专 1303)资助

摘要 华北克拉通金矿床主要形成于早白垩世, 具有爆发性成矿的特点, 成矿时代与克拉通破坏峰期一致. 成矿流体主要源于岩浆或地幔脱挥发分, 这与世界其他克拉通内造山型金矿床显著不同, 后者的成矿流体主要来自区域变质过程中的变质脱挥发分. 结合华北克拉通破坏的时空范围、破坏机制等研究成果, 本文系统分析了华北克拉通金矿床的时空分布规律、矿床成因和成矿机制等问题. 我们认为, 华北克拉通早白垩世金矿床不属于"造山型", 而是"克拉通破坏型", 其与"造山型"金矿床的本质区别在于成矿构造背景(伸展背景)和成矿流体来源(主要与来自克拉通破坏相关的岩浆活动有关). 由于早白垩世古西太平洋板块(Izanagi 板块)俯冲、回转与后撤、在地幔过渡带的滞留, 改变了所在区域地幔过渡带和上覆地幔的物性与流动状态-出现非稳态流动, 导致华北克拉通经历了来自深部熔/流体的强烈交代改造, 形成强烈富集的岩石圈地幔. 正是这种强烈交代富集的岩石圈地幔熔融产生的熔/流体与地壳的相互作用造成金元素短期巨量聚集成矿. 通过对比分析北美克拉通破坏过程, 我们发现美国内华达州卡林(Carlin)型金矿与华北克拉通早白垩世金矿具有相似的形成机制, 两者差别仅表现在成矿流体最终就位的赋矿岩石类型不同. 内华达州卡林型金矿实际上也属于克拉通破坏型金矿, 克拉通破坏型金矿具有爆发性成矿规律. 根据成矿地理位置, 我们推断早白垩世古西太平洋俯冲板块后撤速率约为 8.8 cm/a, 始新世古东太平洋板块(Farallon 板块)俯冲后撤速率约为 3.3 cm/a.

关键词
早白垩世
克拉通破坏
克拉通破坏型金矿
成矿模式

克拉通是大陆的稳定构造单元, 其基本属性是古老(形成于太古代和早古元古代)、岩石圈巨厚(>150 km)、稳定(缺乏明显地壳变形、大规模岩浆活动和大地震)、岩石圈地幔难熔并且有同位素组成富集组分(方辉橄榄岩$Mg^{\#}$>92、高$^{87}Sr/^{86}Sr$和低$^{143}Nd/^{144}Nd$)以及强烈的壳幔耦合(Pollack, 1986; Hieronymus等, 2007; Zhang等, 2008; 吴福元等, 2014). "克拉通破坏"因此被定义为克拉通基本属性的整体丧失.

地质、地球物理和地球化学综合研究表明, 华北克拉通东部(太行山以东)、中部(太行山-吕梁山之间)

中文引用格式: 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
英文引用格式: Zhu R X, Fan H R, Li J W, Meng Q R, Li S R, Zeng Q D. 2015. Decratonic gold deposits. Science China: Earth Sciences, 58: 1523–1537, doi: 10.1007/s11430-015-5139-x

和西部(鄂尔多斯地块)分别为破坏区、改造区和未破坏区. 东部和中部发生破坏和改造的峰期为~125 Ma(Zhu等, 2012). 古西太平洋板块俯冲引发的地幔非稳态流动是导致华北克拉通东部发生破坏的主要动力(朱日祥和郑天愉, 2009). 晚中生代古西太平洋板块的俯冲效应主要表现为: (1) 俯冲作用导致东亚大陆之下的地幔呈快速流动和不稳定状态, 造成华北克拉通上地幔中熔/流体含量的明显增加和岩石圈黏度的大幅降低(Zheng等, 2008a); (2) 俯冲带回转与后撤或不稳定地幔流动造成华北克拉通东部岩石圈发生强烈伸展; (3) 在岩石圈地幔熔/流体含量的增加、黏度降低以及强烈伸展的共同作用下, 华北克拉通东部古老岩石圈地幔发生了根本性变化, 其属性趋于类似年轻(<200 Ma)大洋岩石圈地幔的组成和性质(Zhang等, 2009; Tang Y J等, 2013, 及其所附参考文献), 或完全丧失了克拉通岩石圈的属性(朱日祥等, 2011). 古东太平洋板块俯冲对美洲克拉通的影响与古西太平洋板块俯冲对华北克拉通的影响非常相似, 前者造成了北美怀俄明(Wyoming)克拉通(Carlson等, 2005; Lee等, 2001)和南美巴西克拉通(Beck和Zandt, 2002)的局部破坏或改造. 综合分析全球克拉通破坏机制, 我们认为克拉通破坏与六种因素的共同作用相关: (1) 大洋板块的俯冲; (2) 俯冲大洋板块的回转与后撤; (3) 俯冲板片在地幔过渡带的滞留脱水(Niu, 2005, 2014); (4) 滞留俯冲板片脱水导致所在过渡带上覆地幔发生熔融; (5) 熔融过程导致上地幔发生非稳态流动; (6) 非稳态地幔流动导致岩石圈地幔属性的改变——"克拉通破坏". 仅仅大洋板块俯冲不能造成克拉通的破坏, 这是很重要的概念.

克拉通内部矿产资源的赋存通常与克拉通形成过程密切相关. 稳定后的克拉通由于缺乏大规模构造变形和岩浆活动, 所以很少"改造"形成新的金属矿产资源(Groves和Bierlein, 2007). 然而, 华北克拉通东部在晚中生代发生了强烈岩浆活动和大规模成矿作用, 形成大型和超大型金、钼等多金属矿床. 胶东和小秦岭地区已成为我国最重要的金矿集区, 探获的黄金储量可达4000吨, 为世界最为重要的金矿集区之一(Goldfarb和Santosh, 2014). 在华北克拉通的南缘和北缘, 已探明的钼资源量为世界第一, 是全球最重要的钼矿带, 早白垩世是华北克拉通钼矿的主要成矿时代(Mao等, 2011; Li C Y等, 2012; Zeng等, 2013), 但成矿机制还有待深入研究. 华北克拉通大型和超大型金矿床主要形成于早白垩世(Yang等, 2003), 成矿时代与克拉通破坏峰期基本一致. 这种时代上的吻合表明华北克拉通大规模金成矿作用与华北克拉通破坏过程密切相关. 稳定同位素和稀有气体同位素地球化学资料进一步揭示, 幔源熔/流体是华北克拉通金矿床成矿物质的重要组成部分(Mao等, 2008). 这与世界上形成于克拉通化过程中的造山型金矿床显著不同, 指示了在克拉通破坏过程中形成的金矿具有鲜明的特殊性. 我们注意到, 华北克拉通除早白垩世金成矿, 还有一些晚三叠世-晚侏罗世的金矿床, 如金厂峪地区、夹皮沟地区和熊耳山地区少数金矿床. 本文仅以华北克拉通早白垩世金矿床为例, 系统总结了主要金矿床的地质特征、成矿流体和成矿物质来源, 并深入分析研究了克拉通破坏与大规模金成矿的内在联系. 基于上述分析结果, 本文提出一个新的金成矿类型——克拉通破坏型金矿.

1 金矿床的时空分布

华北克拉通是我国最重要的金成矿省, 也是世界上重要的黄金产地之一. 华北克拉通金矿床通常被划分为辽东-吉南、胶东、小秦岭-熊耳山、太行山中段、冀北-冀东和赤峰—朝阳等数个金矿集区(陈衍景等, 1998; Yang等, 2003). 这些金矿集区实际上主要沿华北克拉通东部陆块的边缘分布, 大致构成了两条近北北东向延伸的东、西成矿带(图1). 这两条金成矿带的赋矿围岩具有相似性, 主要为太古代-古元古代变质岩系、中新元古代火山岩和显生宙花岗岩类. 东成矿带以胶东、辽东和吉南金矿集区为代表(图1). 胶东金矿集区位于苏鲁超高压变质带北段西侧和郯庐断裂以东区域, 围岩主要为前寒武纪变质基底和超高压变质岩块. 胶东金矿集区的中生代构造变形和岩浆活动强烈, 金矿众多, 储量巨大. 已探明超大型金矿床7个, 大型金矿床10余个, 中小型金矿床100余个. 探明黄金储量占全国储量的1/4强, 是我国第一大金矿集区(Fan等, 2003; Wen等, 2015; 网络版附录, http://earth.scichina.com). 辽东金矿集区同样经历了中生代强烈构造变形和岩浆活动, 发育以五龙金矿、四道沟和金厂峪金矿为代表的大型金矿(Zeng等, 2001). 吉南金矿集区位于老岭变质核杂岩

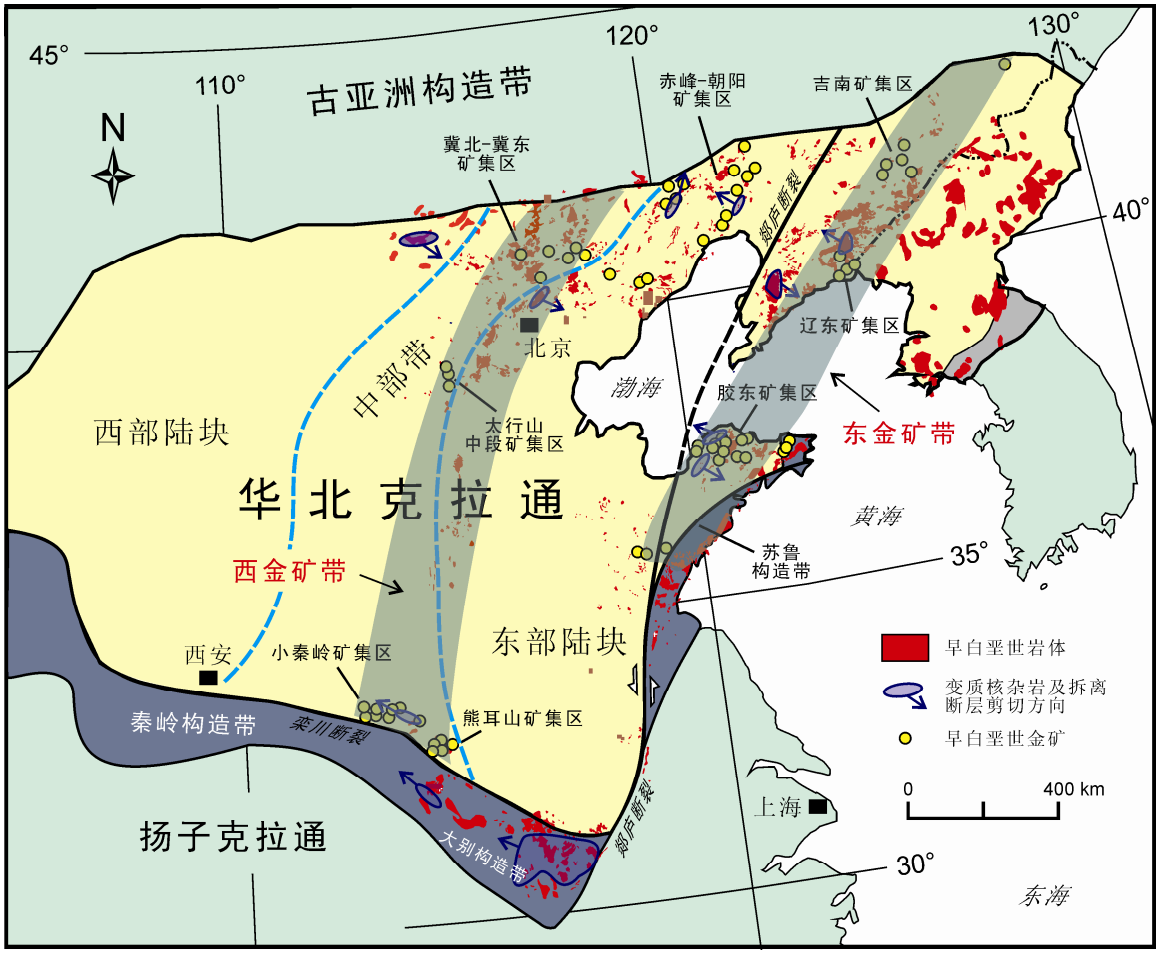

图 1　华北克拉通早白垩世主要金矿集区分布

华北克拉通东西陆块划分参见 Zhao 等(2005), 郯庐断裂北延依据 Xu 等(1987)和孙晓猛等(2010)

构造内, 以荒沟山、南岔和白山等金矿为代表. 西成矿带主要包括小秦岭-熊耳山、太行山中段和冀北-冀东等金矿集区(图1). 小秦岭-熊耳山金矿集区位于西成矿带的南端, 金储量仅次于胶东, 是我国第二大金矿集区(陈衍景和富士谷, 1992; Mao等, 2002; Li J W等, 2012a; 网络版附录). 太行山中段金矿集区位于西成矿带中部, 主要包括石湖、西石门、义兴寨、辛庄和茶坊等金矿和后峪铜钼金矿(Li Q等, 2013; Li等, 2014). 冀东-冀北金矿以柏杖子金矿为代表. 赤峰-朝阳金矿集区以金厂沟梁金矿为代表, 还产出有排山楼、二道沟和安家营子等金矿(Zhang等, 2005).

通过对主成矿阶段形成的绢云母、黑云母、白云母、黄铁矿、黄铜矿和钾长石的Ar/Ar定年、含金石英脉石英流体包裹体的Ar-Ar定年、载金矿物黄铁矿的Rb-Sr等时线定年、共生辉钼矿的Re-Os定年和含金石英脉中锆石的U-Pb定年等, 近10余年来已获得大量华北金矿床成矿时代数据(Yang和Zhou, 2000, 2001; 杨进辉等, 2000; 魏俊浩等, 2001; 叶荣等, 1999; Li J W等, 2003, 2006, 2012a, 2012b, Li Q L等, 2008; Li S等, 2013, 2014; 张连昌等, 2003; Zhang X O等, 2003; 李厚民等, 2003; 苗来成等, 2003; Hu等, 2004, 2013; 侯明兰等, 2006; 王荣湖等, 2008; 姚军明等, 2009; 蔡亚春等, 2011; Tang K F等, 2013; Yang等, 2014). 这些同位素年代学数据一致表明, 华北金矿床的成矿时代主要集中在130~120 Ma(图2).

在早白垩世早期(140~138 Ma), 华北克拉通北缘曾发生过一次短暂挤压构造变形, 导致张家口组(ca. 136 Ma)角度不整合在下伏地层之上(张长厚等, 2004),

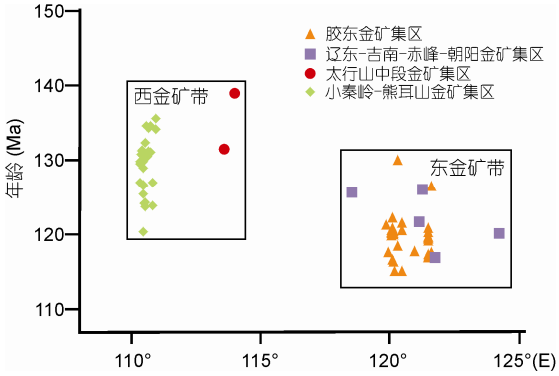

图 2　华北克拉通东、西金矿带主要金矿集区金矿床成矿年龄和空间分布

之后华北克拉通在早白垩世大部分时期(135~100 Ma)为伸展构造体制, 大面积发育裂谷盆地和变质核杂岩, 没有强烈挤压构造作用的地质记录(Liu等, 2005; Wang等, 2011; Charles等, 2012), 早白垩世金矿形成的时代(图2)与伸张构造发育时代一致. 华北克拉通东部的东、西金成矿带实际上也是两个构造-岩浆带, 在早白垩世经历了大规模岩浆活动和伸展构造变形. 对不同金矿集区成矿时代的分析结果显示, 东成矿带金成矿年龄总体小于西成矿带金矿年龄(图2). 华北克拉通巨量金成矿与克拉通破坏在时间和空间上的一致性反映, 金成矿与克拉通破坏的演化过程可能有成因关联. 下面我们从矿床特征、成矿类型和成矿机理等方面深入探讨这种成因关联的缘由.

2　华北克拉通早白垩世金矿床特征

2.1　矿床类型

华北克拉通金矿床工业类型以蚀变岩型和石英脉型为主. 蚀变岩型金矿主要以东金矿带胶东三山岛、焦家、新城和大尹格庄等矿床以及西金矿带赤峰-朝阳排山楼、熊耳山前河等矿床为代表. 矿体多赋存于缓倾斜的韧-脆性和脆性断裂带中, 以浸染状或细网脉浸染状矿化为特征(陈衍景等, 1998; Fan等, 2003; Yang等, 2003, 2014; Li J W等, 2003, 2012a; Li Q L等, 2008; Li S R等, 2013). 由于强烈的热液蚀变和后期脆性变形叠加, 许多断裂早期韧性变形组构已被破坏, 仅见有角砾状蚀变糜棱岩; 石英脉型金矿以东金成矿带胶东玲珑、台上、邓格庄、金青顶, 辽东五龙、吉南海沟, 以及西金矿带小秦岭文峪、东闯、枪马, 太行山中段的石湖、义兴寨等矿床为代表. 含金石英脉一般产于区域主干断裂的次级构造中, 多成群、成带分布, 单条矿脉在走向和倾向上多具舒缓波状、尖灭再现、分枝复合等特征, 脉体两侧发育强度和宽度不等的硅化、绢云母化、黄铁矿化和钾化等蚀变.

2.2　成矿流体性质

在东金矿带不论是蚀变岩型还是石英脉型金矿, 成矿流体在成矿早期都属于中-高温(250~410℃)、富含CO_2、低盐度(<9 wt% NaCl eq.)的H_2O-CO_2-NaCl流体体系; 主成矿期, 成矿流体演化为中-低温(200~330℃)、含少量CO_2、盐度变化范围较大(0.5~15 wt% NaCl eq.)的CO_2-H_2O-NaCl流体体系; 成矿晚期流体演化为低温(<100~230℃)、低盐度(<5 wt% NaCl eq.)、基本不含CO_2的H_2O-NaCl体系流体, 流体成分简单(Fan等, 2003; Yang等, 2009; Hu等, 2013; Wang等, 2015; Wen等, 2015). 西金矿带中小秦岭、熊耳山及太行山中段的石湖、义兴寨等金矿床成矿流体性质与东金矿带基本一致(Jiang等, 1999; Fan等, 2000; 倪智勇等, 2008), 但少数矿床, 如熊耳山祁雨沟、太行山义兴寨等受隐爆角砾岩筒控制的金矿床, 成矿流体盐度较高, 可达35 wt% NaCl eq.(Chen等, 2009; Fan等, 2011; 路英川等, 2012), 但主要矿床集中在6~22 wt% NaCl eq., 峰值小于或接近10 wt% NaCl eq., 推测与下伏侵入体、冷凝有关.

虽然华北克拉通石英脉型和蚀变岩型金矿的流体性质和流体演化过程相似, 但两者的流体成矿机制截然不同. 成矿流体的相分离作用是导致石英脉型金矿床金沉淀的主要原因; 蚀变岩型金矿通常发育大规模蚀变带, 成矿流体与围岩发生强烈的水/岩相互作用, 从而改变了成矿流体的物理化学性质, 进而诱发金的沉淀(Fan等, 2003; Wen等, 2015).

2.3　成矿流体和成矿物质来源

华北克拉通不同地区早白垩世金矿床的氢一氧同位素组成及范围比较类似(图3). 除少数样品位于岩浆水范围外, 大部分位于岩浆水与大气降水线之间, 表明成矿流体主要来自岩浆体系, 但在流体循环演化过程中有大气降水等外部流体的混入. 而不同时代造山型金矿床热液脉石英内流体氧同位素在

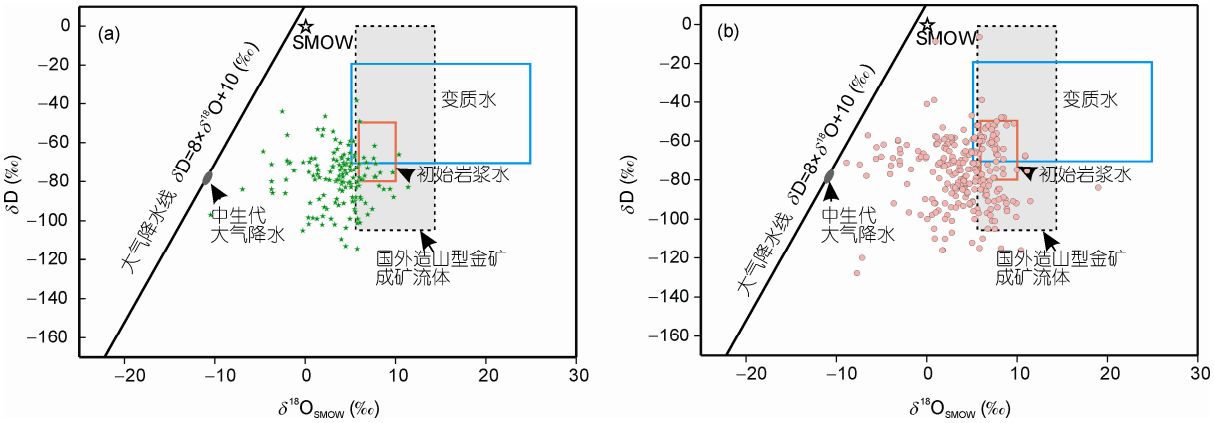

图 3　华北克拉通西金矿带(a)和东金矿带(b)早白垩世金矿床成矿流体氢-氧同位素组成

阴影区为典型造山带型金矿床成矿流体氢-氧同位素组成. 据 Bierlein 等(2000)、Hagemann 等(2000)和 Partington 等(2000)

6‰~14‰, 氢同位素在−105‰~0(图3), 显示其主要为变质流体来源, 这与华北克拉通金矿床成矿流体有较大差别.

华北克拉通早白垩世金矿床的碳同位素组成(δ^{13}C)比较一致, 主要集中于−7‰~−3‰(图4(a)), 也与花岗岩类侵入岩和玄武岩中的高温碳同位素组成一致(Hoefs, 2009), 暗示部分成矿热液可能来自岩浆冷却过程中的脱挥发分或地幔脱气过程. 金矿床硫同位素组成变化范围较大, 其中东金矿带金矿床硫同位素组成(δ^{34}S)为−5.6‰~14.1‰(图4(b)), 其组成明显偏离陨石或亏损地幔岩石的硫同位素组成. 金矿床的这种硫同位素组成可能反映成矿流体中的硫主要来自富^{34}S的岩浆岩(Hoefs, 2009)或俯冲带高氧逸度的地幔脱气作用. 中生代古西太平洋板块向中国大陆之下俯冲并部分滞留于华北克拉通之下的地幔转换带中(朱日祥等, 2012), 引起地幔过渡带熔融发生, 导致上地幔发生非稳态流动和岩石圈地幔的强烈交代富集以及氧逸度显著升高, 从而形成富^{34}S岩浆(Ionov等, 1992). 另外, 流体混合可能也是导致胶东地区金矿床显著富集^{34}S的另一重要原因. 西金矿带的小秦岭和太行山中段早白垩世金矿床的硫同位素δ^{34}S为−2‰~6‰(图4(b)), 重的硫同位素也可能指示来自氧化性的岩浆, 或反映岩浆/流体运移过程中有一定的蒸发岩层加入. 吉南海沟金矿δ^{34}S值变化较大, 出现较大的负值, 这一现象可能反映某些富有机质围岩中的硫对成矿流体有一定贡献, 或反映来自岩浆的初始成矿流体在演化过程中曾发生过流体氧化而导致从中沉淀的硫化物富集^{32}S(Tang Y等, 2013).

在氦-氩同位素^{3}He/^{4}He-^{40}Ar*/^{4}He图解中(图5(a)), 华北克拉通早白垩世金矿的所有样品均位于地壳和地幔端元之间, 且较为靠近地幔端元. 在^{3}He-^{4}He丰度图解中(图5(b)), 多数样品位于地壳氦和地幔氦之间且接近地幔氦, 少数样品位于地幔氦组成端元的边缘, 说明幔源流体是成矿热液的重要组成部分. 然而, 这种幔源流体是来自俯冲的洋壳玄武岩还是软流圈地幔则有待进一步深入研究.

华北克拉通早白垩世金矿床与中-基性脉岩具有密切的时空关系. 这些脉岩的时代集中在130~110 Ma(Tan等, 2012; Cai等, 2013; Ma等, 2013), 与金矿床的成矿时代基本一致, 暗示基性岩浆活动有可能为金成矿提供了金等成矿元素和流体. 此外, 西金矿带金矿床中发育大量碲金矿、碲金银矿、碲铋矿和碲铅矿等碲化物以及自然碲和自然铋, 一些矿床的围岩为(变质)火山岩. 依据国内外相关研究, 富含碲化物矿床大多与岩浆作用有关, 从而间接证明华北克拉通富含碲化物的金矿床在成因上与早白垩世岩浆作用相关, 或成矿物质来源于围岩火山岩.

3　克拉通破坏型金矿床及其成因

3.1　克拉通破坏型金矿床

世界金矿床类型主要有斑岩型、浅成低温热液型、造山型、卡林型和沉积砾岩型等. 造山型金矿床

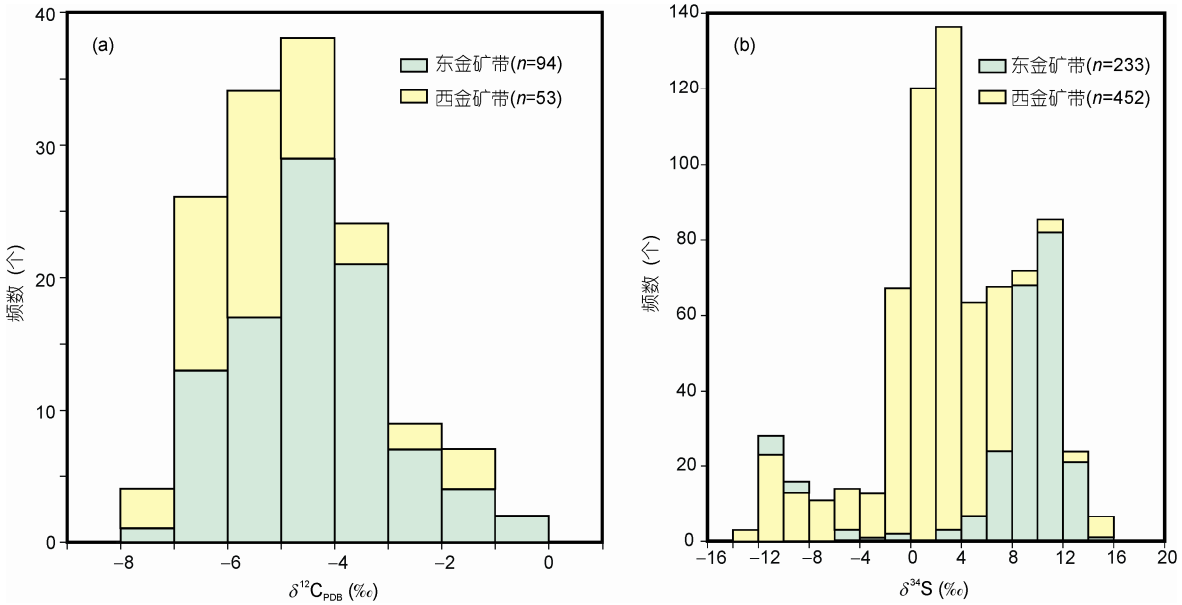

图 4　华北克拉通早白垩世主要金矿集区金矿床碳同位素(a)和硫同位素(b)组成

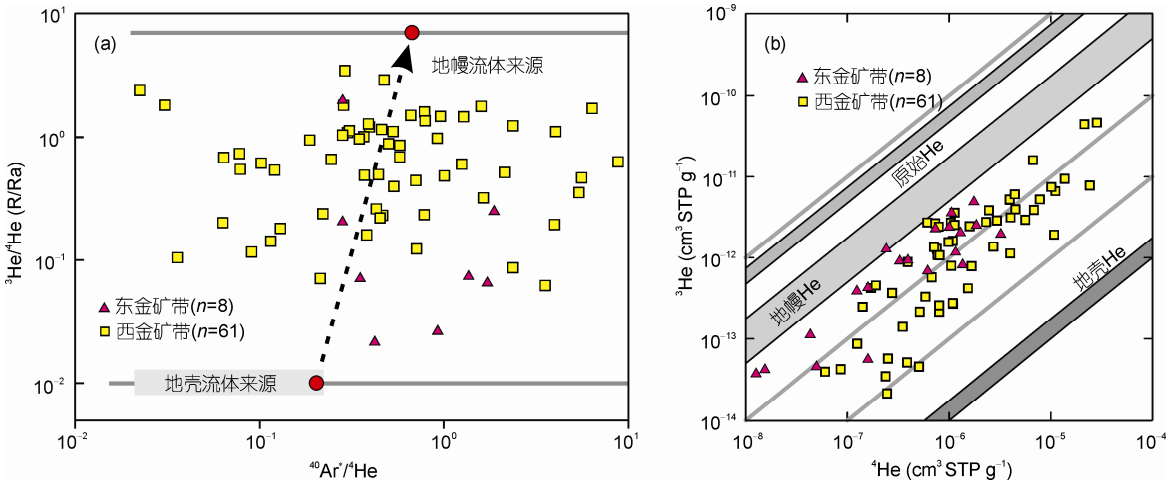

图 5　华北克拉通早白垩世金矿床稀有气体同位素组成图解

实际是指赋存在造山带的热液金矿床, 但其成矿过程未必与克拉通化过程中的增生/碰撞造山作用有关. 成矿构造主要为挤压或压扭性变形, 成矿时代则未必与碰撞造山带区域变质作用的峰期一致, 但是成矿流体与赋存岩石成分具有一定的相似性, 因此一般认为主要来自区域变质过程中的脱挥发分, 以壳源变质流体为主(Groves等, 1998; Goldfarb等, 2001). 全球许多克拉通内发育的脉状金矿多被归于造山型金矿床, 如澳大利亚西部Yilgarn克拉通和北美Superior克拉通的脉状金矿(Goldfarb等, 2001; Robert等, 2005). 根据对华北克拉通金矿床地质结构、矿化特征、成矿时代、成矿流体和成矿物质来源、成矿构造背景等方面的综合分析, 我们认为华北克拉通脉状金矿的蚀变矿化特征虽与造山型金矿有一定的相似性, 但二者在以下方面存在显著区别, 如成矿构造背景、成矿流体和成矿物质来源、矿物和元素组合等. 华北克拉通破坏导致富含熔/流体的强烈交代富集地幔的形成, 地幔与地壳之间强烈的相互作用应是金元素短期巨量聚集成矿的主要控制因素. 考虑到早白垩世华北脉状金矿的形成与克拉通破坏源于同一

构造作用, 本文将其定义为“克拉通破坏型金矿床”. 克拉通破坏型金矿床与典型造山型金矿床的主要区别如下:

(1) 华北克拉通早白垩世金矿床中热液碳酸盐的含量远低于典型造山型金矿床的热液碳酸盐含量. 华北克拉通早白垩世金矿床以含金石英脉型和构造蚀变岩型为主, 缺少成矿早期和主成矿阶段的石英-碳酸盐脉型金矿化, 而这种矿化类型是造山型金矿的重要特征之一. 另外, 造山型金矿热液碳酸盐的沉淀可从成矿早期一直持续到成矿晚期阶段, 热液碳酸盐矿物含量为5%~15%(Groves等, 1998), 这主要是因为造山型金矿床成矿流体主要来自区域变质作用, 在此过程中碳酸盐的分解和有机碳的水解均可产生大量CO_2, 因此成矿早阶段至晚阶段流体中均有大量CO_2并形成热液碳酸盐. 相比而言, 华北克拉通早白垩世金矿仅在成矿晚期才出现少量热液碳酸盐沉淀, 与造山型金矿明显不同, 暗示来自变质脱挥发分的成矿流体是有限的.

(2) 华北克拉通早白垩世金矿床的常见矿石元素组合为Au-Ag-Te-Pb-Zn-Cu, 矿石中As的含量很低(Mills等, 2015). 与此相反, 造山型金矿普遍富As和含大量毒砂, 例如河南银洞坡金矿(Zhang等, 2013)、甘肃阳山金矿(齐金忠等, 2003)、新疆萨瓦亚尔顿金矿(杨富全等, 2005)、乌兹别克斯坦穆龙套(Muruntau)金矿(Drew等, 1996)、澳大利亚Bendigo金矿(Li X等, 1998)等. As的富集反映沉积岩或沉积-火山岩及这类岩石在变质过程中的脱挥发分作用对造山型金矿的形成有着重要的影响.

(3) 元素组合、稳定同位素和稀有气体同位素(He, Ne, Ar)组成的研究(图3~5)表明, 华北克拉通早白垩世金矿成矿流体和成矿物质中含有显著的地幔组分(Mao等, 2008; Li S R等, 2013). 造山型金矿的成矿流体则主要与区域变质过程的脱挥发分作用相关(Phillips和Powell, 2010).

(4) 华北克拉通早白垩世金成矿具短期爆发性特点, 东、西金矿带的金成矿时代分别集中在130和120 Ma(Yang等2003; Sun等, 2007, 2013). 造山型金矿床的成矿作用通常持续50~70 Ma或或更长时间(Goldfarb等, 2001; Robert等, 2005).

(5) 华北克拉通早白垩世金矿床总体形成于强烈伸展构造背景, 只在局部地段出现短暂的走滑挤压过程, 与造山型金矿床的长期挤压构造环境不同.

综上所述, 华北克拉通早白垩世脉状金矿床既不同于前寒武纪克拉通脉状造山型金矿, 也不同于世界其他地区的典型造山型金矿, 有其自己的专属特征, Li L等(2015)将其称为“胶东型金矿”, 为了突出其与克拉通破坏的成因联系, 我们将其称为克拉通破坏型金矿床.

3.2 克拉通破坏型金矿床成因

古西太平洋板块俯冲在地幔过渡带的滞留脱水(Niu, 2005, 2014)以及上覆地幔的非稳态流动(朱日祥和郑天愉, 2009), 可能是导致华北克拉通东部发生破坏的主要动力. 在早白垩世全球地幔增温背景下(Machetel, 2003), 不稳定的地幔流动体系造成华北克拉通东部岩石圈地幔中熔/流体含量的大幅增加和岩石圈黏滞度的显著降低, 原来古老岩石圈地幔发生强烈熔/流体交代, 转变为强烈交代富集的地幔属性. 正是这种富含熔/流体和强烈交代富集地幔与下地壳的直接接触, 以及熔/流体与壳源长英质岩浆相互作用, 产生了富金岩浆, 并出溶形成含金热液(图6(a)).

值得注意的是, Huang等(2006)利用地震层析成像揭示的东亚大陆之下的滞留板块是新生代西太平洋俯冲的产物, 从日本海沟到东亚大陆地幔过渡带滞留体的最西端总长约2000 km. 根据洋壳磁异常观测、全球板块重建模型、数值模拟和海洋盆地动力学研究结果(Funiciello等, 2003; Seton等, 2012; Müller等, 2008a, 2008b; Bird, 2003), 现今在日本海沟处西太平洋板块的年龄约为130 Ma, 俯冲速率约为10 cm/a, 西太平洋板块从日本海沟俯冲到东亚大陆滞留体最西段大约需要20 Ma. 尽管现今滞留在东亚大陆之下太平洋板块的年龄为110~130 Ma, 但滞留板块是在最近20 Ma才俯冲到地幔过渡带, 所以它不可能对早白垩世华北克拉通破坏产生影响. 真正导致华北克拉通破坏的主要原因是早白垩世古西太平洋板块的俯冲与滞留过程(图6(a)). 现今西太平洋俯冲板块滞留体的西边还存在次高速体, 并断续延伸到100°E; 在该次高速体的下面也还存在另二个次高速体(图6(b)). 这些次高速体可能就是图6(a)所示的早白垩世古西太平洋俯冲板块在东亚大陆地幔过渡带的残留和沉陷.

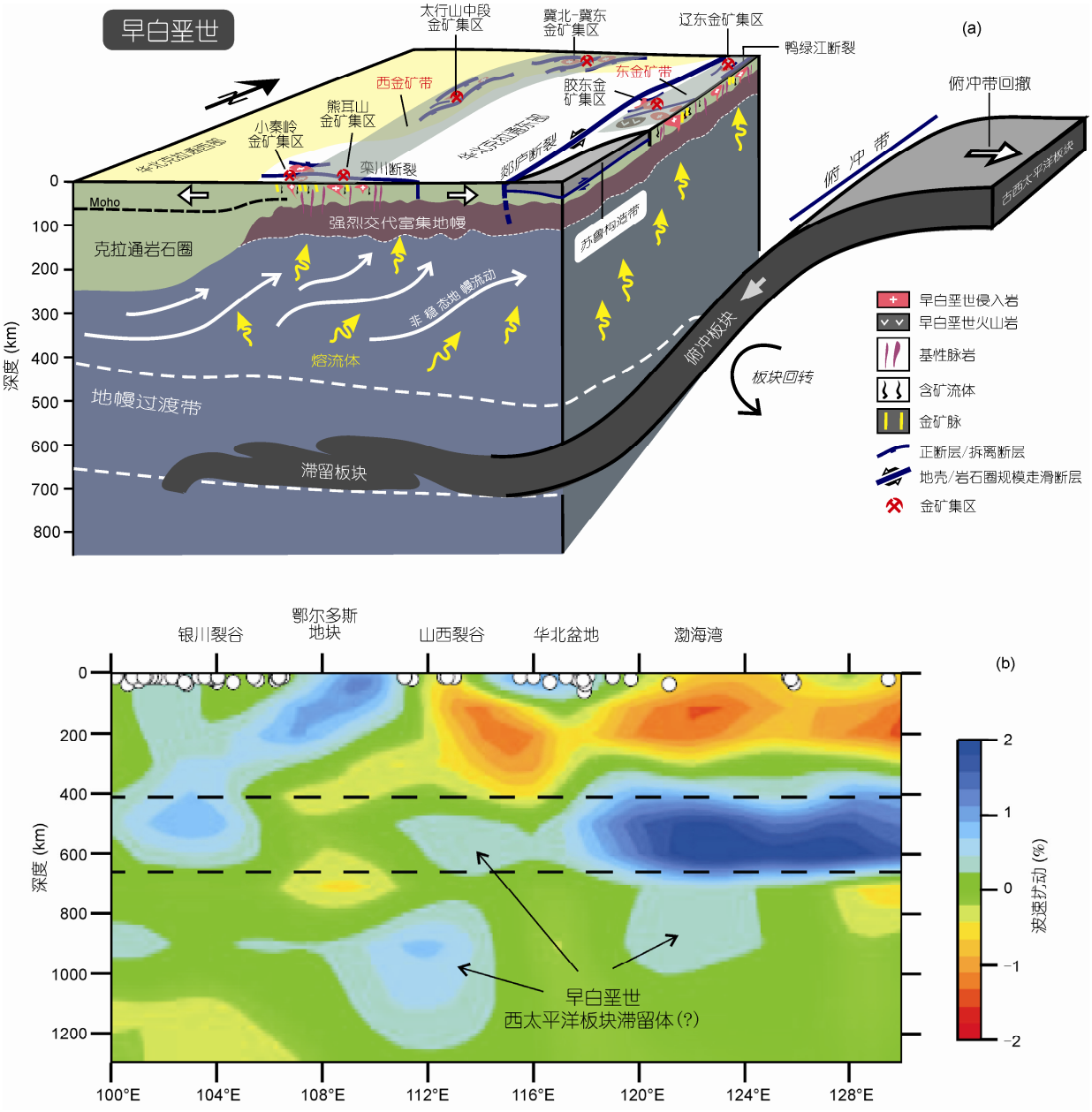

图 6　早白垩世华北克拉通深部过程以及克拉通破坏与金成矿关系(a)和华北克拉通地幔过渡带速度结构(b)

向东亚大陆俯冲的板块是推测的早白垩世古西太平洋(Izanagi ?)板块. 现今观测结果虽无法揭示古西太平洋板块在早白垩世向东亚大陆之下的俯冲状态, 但根据全球板块重建模型和海洋盆地动力学研究结果(Seton 等, 2012; Müller 等, 2008a, 2008b; Bird, 2003), 我们可将现今西太平洋板块向东亚大陆之下的俯冲(Huang 和 Zhao, 2006)作为早白垩世古西太平洋板块俯冲状态的参照物. 据此推论, 早白垩古西太平洋俯冲板块在东亚大陆之下的长度大约 2000 km(图 6(a)中板块俯冲部分与在过渡带滞留部分之和). 根据 Seton 等(2012)全球板块重建模型, 当时海沟处俯冲板块的年龄约为 160 Ma, 俯冲速率大约 60~120 km/Ma. 按 80 km/Ma 的平均俯冲速率来计算, 当时东亚大陆之下古俯冲板块的年龄约为 135~160 Ma(从西到东). 据 Huang 等(2006)图 12(a)

观测图2可见, 华北克拉通东、西金矿带的金成矿时代分别集中在120和130 Ma(Yang等, 2003), 相差约10 Ma. 我们认为东、西金矿带的金成矿年代的差异可能与早白垩世古西太平洋俯冲板块后撤有关. 基于上述分析, 我们推断古西太平洋俯冲板块的前缘在130 Ma左右开始在华北克拉通东部西缘的地幔

过渡带发生滞留. 值得注意的是, 由于俯冲板块后撤和上覆东亚大陆的东向运动, 在130 Ma时华北克拉通东部块体的西缘要比现今更靠西; 如图6(b)所示, 可能至少位于100°E, 这也说明当时古西太平洋的俯冲带比现今西太平洋俯冲带更靠西. 正是上述俯冲板块在地幔过渡带的滞留脱水改变了所在区域和上覆地幔的物性和黏性度, 导致上覆地幔产生局部不稳定流动, 俯冲板块的脱水和上覆地幔的不稳定流动进一步造成岩石圈地幔中熔流体含量急剧增加, 并使其逐步转变为强烈交代富集的年轻地幔, 富集的岩石圈地幔与下地壳相互作用形成富含金元素的流体. 这些成矿流体沿西缘地壳构造薄弱带上升, 从而形成西金矿带的金矿床. 随着俯冲板块向东后撤, 120 Ma左右俯冲板块开始在东金矿带之下的地幔过渡带滞留, 华北克拉通东部岩石圈地幔此时全部转变为强烈交代富集地幔. 该地幔熔融形成的熔流体与下地壳作用形成的成矿流体沿郯庐和鸭绿江等大型主断裂和次级断裂上升, 从而形成东金矿带. 东、西金矿带的经度相差约10°, 沿38°纬线相距约880 km. 如果俯冲板块在10 Myr期间向东后撤了880 km, 那么早白垩世古西太平洋板块的后撤速率为8.8 cm/a, 这与现今根据海洋洋壳磁异常和动力学模拟获得的现今西太平洋板块后撤速率(~10 cm/a, Funiciello等, 2003)基本一致.

不仅华北克拉通发生了破坏和改造, 其他一些克拉通岩石圈也经历了类似的地质过程. 北美克拉通西部盆岭省地壳厚度30~35 km(Mooney和Braile, 1989), 岩石圈厚度60~70 km(Zandt等, 1995), 与华北克拉通东部一致. 北美克拉通西缘被认为在始新世已被破坏(图7(a)), 虽然对其破坏机制还存在很大的争议. 基于对华北克拉通破坏的研究, 我们认为北美克拉通的破坏与古东太平洋板块(Farallon板块)的俯冲、回转、后撤、在地幔过渡带的短暂滞留脱水以及上覆地幔的非稳态流动是导致北美克拉通西部发生破坏的主要动力. 类似于华北克拉通的破坏, 始新世不稳定的上地幔流动体系造成北美克拉通西部岩石圈地幔被改造为强烈交代富集地幔, 同时上覆岩石圈和地壳的强烈伸展形成了美国西部的盆岭省. 强烈交代富集地幔熔融形成的熔/流体与下地壳相互作用, 产生了富含金流体的岩浆. 上升的含金流体具高H_2S含量, 并经历了相变以及与大气降水的混合; 这种流体在地表之下几公里范围内使碳酸盐岩围岩发

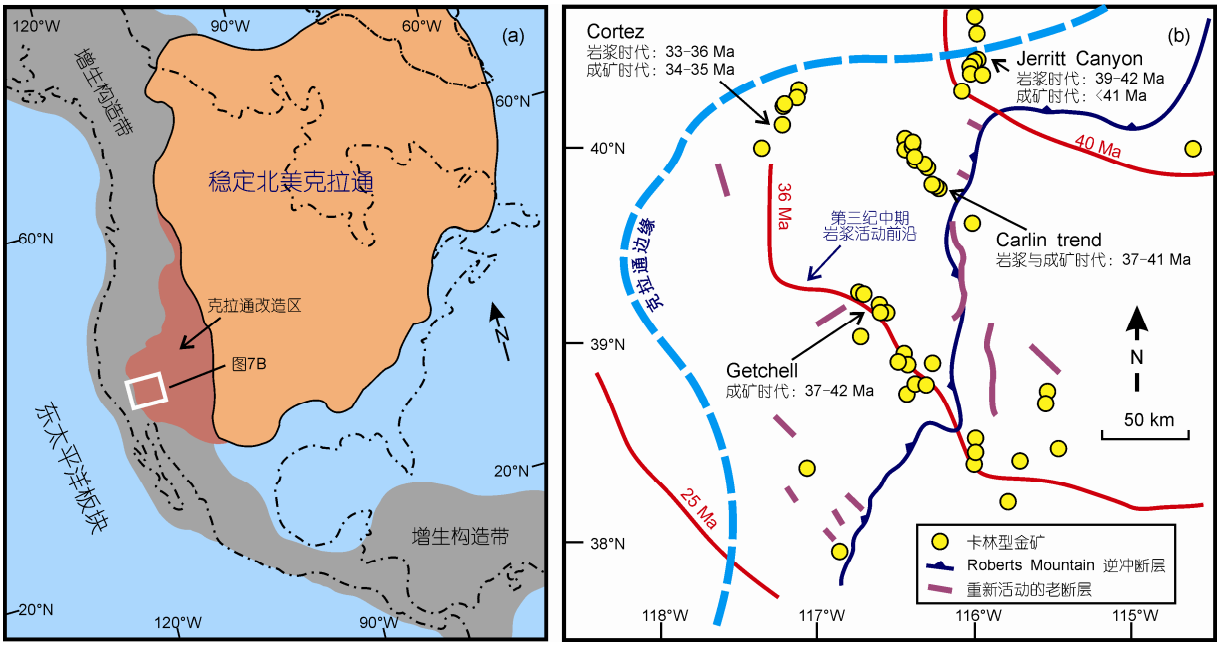

图 7　北美克拉通分布范围及改造区位置(a)和美国内华达金矿时空分布(b)

(a) 修改自 North America Craton nps.gif; (b) 修改自 Muntean 等(2011)

生溶解和硫化, 导致含金黄铁矿的沉淀和卡林(Carlin)型金矿的形成(Muntean等, 2011). 因此, 卡林型金矿从其成因机制来讲就是克拉通破坏引起的幔源熔/流体与地壳相互作用的结果. 内华达卡林型金矿与华北克拉通破坏型金矿主要差别是其成矿流体侵入到浅部地壳岩石类型的差别; 华北克拉通金矿主要赋矿围岩是太古代-古元古代变质岩、中新元古代火山岩和显生宙花岗岩类, 而内华达卡林型金矿的赋矿围岩主要是碳酸盐岩. 成矿岩浆和流体在成因上的相似性造成华北克拉通和内华达两地成矿都具有爆发的特点. 赋矿围岩的差别造成华北克拉通金矿具有品位高和水平分布范围小的特点; 而内华达卡林型金矿则表现为金品位低但水平分布范围广.

与华北克拉通类似, 内华达东、西金矿带的金成矿时代分别集中在40和36 Ma(Muntean等, 2011), 相差约4 Myr(图7(b)). 不同金矿带在金成矿时差也可归因于古东太平洋板块(Farallon板块)的俯冲后撤. 内华达东、西金矿带相距约130 km, 根据两个金矿带成矿时间的差异, 推断始新世Farallon俯冲板块的后撤速率为3.3 cm/a, 相当于早白垩世古西太平洋俯冲板块后撤速率的40%. 上述分析说明古东太平洋(Farallon)板块后撤速度低于古西太平洋(Izanagi)板块的后撤速度. 较低的回撤速率可能导致古东太平洋俯冲板块在过渡带滞留时间较短, 因此古东太平洋板块俯冲对北美克拉通稳定性的影响不如古西太平洋板块俯冲对华北克拉通的影响那样强烈. 晚新生代以来, 东、西太平洋板块在俯冲过程中都发生了后撤, 但两者的后撤速度明显不同, 西太平洋板块的回撤速率大约为100 km/Ma(Bird, 2003), 在地幔过渡带形成滞留体(Huang和Zhao, 2006; Li C等, 2008); 东北太平洋板块的回撤速率较低, 大约为20 km/Ma (Bird, 2003), 这可能是它没有在北美大陆地幔过渡带形成滞留体的一个原因. 因此, 俯冲板块是否能在地幔过渡带滞留主要取决于俯冲板块的年龄和后撤速度(van der Hilst, 1995; Niu, 2014).

认识克拉通破坏型金矿床成因的切入点是金矿床成矿流体和成矿物质的来源、成矿作用, 及其与克拉通破坏的内在联系. 我们的研究表明, 幔源岩浆是克拉通破坏型金矿床的主要物质/流体来源, 金矿床形成于总体强烈伸展构造背景, 这二者是克拉通破坏型金矿的基本地质特性. 软流圈和岩石圈地幔来源的岩浆对克拉通破坏型金矿成矿作用的控制主要表现在4个方面: (1) 幔源岩浆直接提供了部分金元素和挥发分. (2) 幔源岩浆底侵或内侵于下地壳引发大范围下地壳的部分熔融, 产生的镁铁质和长英质岩浆在中-下地壳发生强烈混合, 导致岩浆房中中酸性岩浆的氧逸度降低. 硫化物在此过程中发生饱和熔离, 形成局部硫化物富集区域, 岩浆中的金也在此过程中进入硫化物中(Botcharnikov等, 2011). 硫化物被后期基性岩浆或岩浆挥发分溶解, 最终形成富金岩浆和热液. (3) 岩浆房中局部富集的硫化物可能在晚期岩浆流体出溶过程中被溶解进入岩浆热液内, 或被注入岩浆房晚期基性岩浆内, 形成更为富金的岩浆. 当这种岩浆侵位到上地壳后, 因压力迅速降低而发生流体出溶, 从而形成含金热液. 这种源于岩浆的热液, 沿断裂迁移、经长距离搬运、短时成矿的流体, 其流体温度和盐度等变化梯度较小(Muntean等, 2011). 胶东三山岛金矿深钻揭示的成矿流体变化就属于这种类型. 胶东三山岛和美国内华达卡林地区克拉通破坏型金矿岩浆流体的上述变化特征与变质流体很相似, 因此有的研究者认为胶东三山岛属于变质流体成矿. (4) 幔源岩浆为成矿作用提供了充足热源, 并驱使地壳流体发生广泛循环. 这种循环流体可使华北克拉通地壳内基性变质火山岩发生变质中的金元素部分淋滤出来(Sun等, 2013). 图8示意了上述成矿过程. 在华北克拉通破坏峰期之后, 富集地幔中富含挥发分的易熔组分熔融殆尽, 大规模金成矿作用也随之停止. 克拉通破坏型金矿床也因此而表现出爆发型特点.

克拉通破坏的重要标志是发生大规模岩浆活动、出现强烈韧性伸展变形和发育伸展盆地, 克拉通岩石圈的稳定性发生了根本变化(朱日祥等, 2012). 早白垩世变质核杂岩和伸展断陷盆地的广泛发育表明华北克拉通东部陆块处于强烈伸展构造环境. 侵位于中-上地壳的基性岩浆和经过岩浆混合的中酸性岩浆因压力迅速减小而发生强烈的流体出溶, 形成含金流体. 当岩浆侵位速度较大并且侵位深度较浅时, 岩浆流体会快速饱和出溶, 从而导致隐爆作用和形成隐爆角砾岩性金矿床, 如熊耳山矿集区的祁雨沟金矿床. 胶东和小秦岭金矿集区还发育大量同期煌斑岩脉, 指示华北克拉通东部岩石圈地幔在早白垩世明显富水. 岩石圈强烈伸展使富水岩石圈地幔发

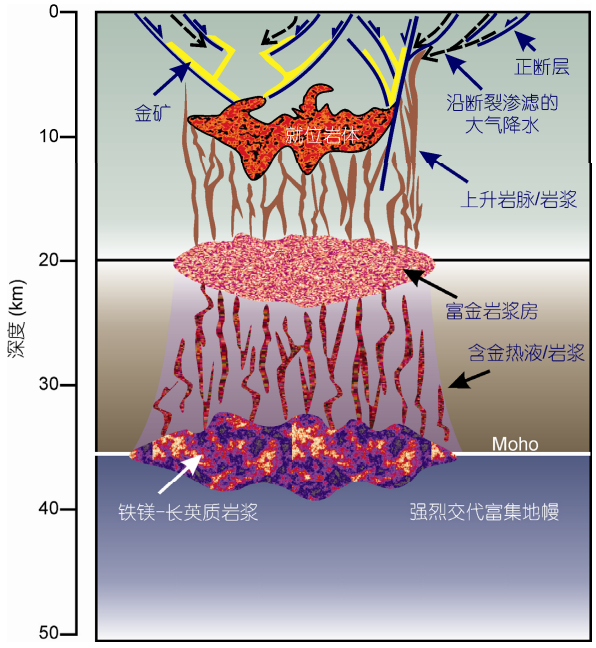

图 8　克拉通破坏型金矿成矿过程

Moho 厚度和地壳内部结构主要参照 Zheng 等(2008a, 2008b, 2009)和王帅军等(2008, 2014)

生部分熔融和脱气作用, 形成的幔源流体沿岩石圈规模的深大断裂, 如郯庐断裂和栾川断裂, 向上运移和进入成矿系统, 这是华北克拉通早白垩世金矿床主要分布在东部陆块边缘(如胶东和小秦岭金矿集区等)的主要原因. 岩石圈伸展作用可在中-上地壳层次形成大量次级断裂网络, 从而控制了金矿脉、金矿床和矿田的定位和分布, 如胶东金矿集区的金矿床明显受郯庐断裂次级构造的控制. 另一方面, 古西太平洋板块俯冲也使克拉通边缘早期深大断裂、基底断裂和次级构造再次活化, 成为含金热液运移和沉淀的有利场所. 克拉通破坏过程中形成的伸展构造体系也有利于大气降水和深部地壳流体沿断裂向下渗透和侧向运移, 并最终与以幔源流体为主的成矿热液混合. 这种流体混合作用可能是导致金沉淀的另一重要机制.

4　成矿远景分析

随着国家经济的快速发展, 我国矿产资源短缺日益严重, 后备探明储量严重不足. 认识和合理开发深部资源是我国资源勘查的重要战略选择之一. 但由于深部矿埋深大、矿化信息弱、综合地质研究程度低、勘探开发投入大等特点, 传统的成矿理论、勘查技术方法和开采开发都面临严峻挑战. 例如, 胶东和小秦岭金矿集区的浅部(<500 m)金储量日益枯竭, 亟待寻找新的大矿富矿. 要确定这些金矿集区的深部潜力就必须了解华北克拉通金矿床的成因. 本文研究表明, 华北克拉通早白垩世金矿床的主体属于克拉通破坏型金矿床, 是克拉通破坏过程中幔源熔/流体与地壳相互作用的结果. 我们推测华北克拉通东部陆块的东、西两条近NNE向延伸的金矿带应是探寻深部大型金矿最有利的区带. 最近, 山东黄金集团公司在胶东金矿集区三山岛西岭矿区实施了“中国岩金第一深钻”系列勘探工程(钻探深度达4006.17 m), 在2600 m深度发现厚度达20 m以上、平均品位3.5 g/t的厚大金矿体; 在小秦岭金矿集区东闯矿区标高为1470和836 m发现厚度达0.9~1.2 m、平均品位为6~8 g/t的金矿体(冯建之等, 2009). 上述发现说明胶东和小秦岭金矿集区的深部潜力巨大.

东金矿带的辽东金矿集区和西金矿带的太行山中段金矿集区分别与胶东和小秦岭金矿集区有十分相似的地质背景, 但目前发现的金储量相对较少, 特别是缺乏大型和超大型金矿床. 原因何在? 首先分析辽东金矿集区. 通过对比前寒武纪地质历史、构造变形、岩浆活动、成矿控矿条件以及矿床地质, 发现辽东与胶东金矿集区具有许多相似之处: (1) 具有晚太古代片麻岩-绿岩带基底和古元古代变质火山-沉积岩系; (2) 地壳/岩石圈在早白垩世经历了强烈伸展构造变形; (3) 早白垩世发生了大规模岩浆活动; (4) 金矿床主要为石英脉型、蚀变岩型和角砾岩型; (5) 成矿流体主要来自幔源岩浆以及幔源岩浆与地壳相互作用产生的成矿流体; (6) 大型/超大型金矿紧邻大型断裂产出, 如胶东金矿集区三山岛超大型金矿靠近郯庐断裂, 辽东金矿集区五龙金矿靠近鸭绿江断裂. 根据上述分析, 我们认为辽东地区具有发现大型/超大型金矿的潜力, 特别是位于鸭绿江断裂带西侧的五龙金矿及其周缘地域应是克拉通破坏型金矿床形成的最有利区域.

西金矿带的太行山中段或阜平-恒山地区位于鄂尔多斯-许昌-迁怀三个微陆块交集的“三联点”上, 岩石圈厚度仅70 km(Li S R和Santosh, 2014). 这一区域具有以下构造-岩浆演化和矿床特点: (1) 发育与成矿事件同期的钙碱性I型中酸性花岗岩和多种类型中基

性岩脉群(Li Q等, 2015); (2) 主要成岩成矿事件与华北克拉通破坏峰期同时或准同时(Li S R等, 2014); (3) 已发现石湖、义兴寨等大型金矿和数十个矿点(Dong等, 2013; Li S R等, 2014; Sun等, 2014; Wang等, 2014), 显示成矿物质在该区具有大规模集中的可能性; (4) 对义兴寨、石湖等金矿深部资源的预测获得钻探工程的验证. 据此我们认为阜平-恒山地区也是发现克拉通破坏型金矿床的重要远景区.

致谢 在成文过程中, 作者与张宏福、陈凌、杨进辉、吴福元、郑天愉、赵大鹏、牛耀龄和黄金莉等进行了广泛讨论, 感谢他们对本文提出的建议和意见. 感谢郑永飞教授、陈衍景教授、孙卫东研究员和另外两位审稿人的详细审稿意见, 这些意见使得本文得到很大改进.

参考文献

蔡亚春, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎峰, 蓝廷广, 于虎, 柳玉明. 2011. 胶东胡八庄金矿成矿流体、稳定同位素及成矿时代研究. 岩石学报, 27: 1341–1351

陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社. 1–234

陈衍景, 郭光军, 李欣. 1998. 华北克拉通花岗绿岩地体中中生代金矿床的成矿地球动力学背景. 中国科学D辑: 地球科学, 28: 35–40

冯建之, 岳铮生, 肖荣阁. 2009. 小秦岭深部金矿成矿规律与成矿预测. 北京: 地质出版社. 1–268

侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 凌洪飞. 2006. 胶东蓬莱金成矿区的S-Pb同位素地球化学和Rb-Sr同位素年代学研究. 岩石学报, 22: 2525–2533

李厚民, 毛景文, 沈远超, 刘铁兵, 张连昌. 2003. 胶东北东季金矿钾长石和石英的Ar-Ar年龄及其意义. 矿床地质, 22: 72–77

路英川, 葛良胜, 申维, 王治华, 郭晓东, 王梁, 周传芳. 2012. 山西省义兴寨金矿流体包裹体特征及其地质意义. 矿床地质, 31: 83–93

苗来成, 范蔚茗, 翟明国, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2003. 金厂沟梁-二道沟金矿田内花岗岩类侵入体锆石的离子探针U-Pb年代及意义. 岩石学报, 19: 71–80

倪智勇, 李诺, 管申进, 张辉, 薛良伟. 2008. 河南小秦岭金矿田大湖金-钼矿床流体包裹体特征及矿床成因. 岩石学报, 24: 2058–2068

齐金忠, 袁士松, 李莉, 范永香, 刘伟, 高秋斌, 孙彬, 郭俊华, 李志宏, 2003. 甘肃省文县阳山金矿床地质地球化学研究. 矿床地质, 22: 24–31

孙晓猛, 王书琴, 王英德, 杜继宇, 许强伟. 2010. 郯庐断裂带北段构造特征及构造演化序列. 岩石学报, 26: 165–176

王荣湖, 金成洙, 李景春. 2008. 排山楼金矿床^{40}Ar-^{39}Ar年龄及其地质意义. 东北大学学报(自然科学版), 29: 1482–1485

王帅军, 王夫运, 张建狮, 嘉世旭, 张成科, 赵金仁, 刘宝峰. 2014. 华北克拉通岩石圈二维P波速度结构特征——文登-阿拉善左旗深地震测深剖面结果. 中国科学: 地球科学, 44: 2697–2708

王帅军, 张先康, 方盛明, 张成科, 王夫运, 赵金仁, 张建狮, 刘宝峰, 潘素珍, 黄灿. 2008. 渤海湾西北缘及其邻近地区地壳结构与改造特征. 地球物理学报, 51: 1451–1458

魏俊浩, 刘丛强, 赵永鑫, 李志德. 2001. 辽宁五龙金矿主成矿阶段成矿持续时限. 地质论评, 47: 433–437

吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 张国伟. 2014. 克拉通岩石圈减薄与破坏. 中国科学: 地球科学, 44: 2358–2372

杨富全, 毛景文, 王义天, 李蒙文, 叶会寿, 叶锦华. 2005. 新疆西南天山萨瓦亚尔顿金矿床地质特征及成矿作用. 矿床地质, 24: 206–227

杨进辉, 周新华, 陈立辉. 2000. 胶东地区破碎带蚀变岩型金矿时代的测定及其地质意义. 岩石学报, 16: 454–458

姚军明, 赵太平, 李晶, 孙亚莉, 原振雷, 陈伟, 韩军. 2009. 河南祁雨沟金成矿系统辉钼矿Re-Os年龄和锆石U-Pb年龄及Hf同位素地球化学. 岩石学报, 25: 374–384

叶荣, 赵伦山, 沈镛立. 1999. 山西义兴寨金矿床地球化学研究. 现代地质, 13: 415–418

张长厚, 吴淦国, 徐德斌, 王根厚, 孙卫华. 2004. 燕山板内造山带中段中生代构造格局与构造演化. 地质通报, 23: 864–875

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

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, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学: 地球科学, 41: 583–592

朱日祥, 郑天愉. 2009. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系. 科学通报, 54: 1950–1961

Beck S L, Zandt G. 2002. The nature of orogenic crust in the Central Andes. J Geophys Res, 107, doi: 10.1029/2000JB000124

Bierlein F P, Crowe D E. 2000. Phanerozoic orogenic lode gold deposits. Rev Econ Geol, 13: 103–139

Bird P. 2003. An updated digital model of plate boundaries. Geochem Geophys Geosyst, 4: 1027, doi: 10.1029/2001GC000252

Botcharnikov R E, Linnen R L, Wilke M, Holtz F, Jugo P J, Berndt J. 2011. High gold concentrations in sulphide-bearing magma under oxidizing conditions. Nat Geosci, 4: 112–115

Cai Y C, Fan H R, Santosh M, Liu X, Hu F F, Yang K F, Lan T G, Yang Y H, Liu Y S. 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, doi: 10.1029/2004RG000156

Charles N, Gumiaux C, Augier R, Chen Y, Faure M, Lin W, Zhu R X. 2012. Metamorphic core complex dynamic and structural development: Field evidence from the Liaodong Peninsula (China, East Asian). Tectonophys, 560: 22–50

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

Dong G C, Santosh M, Li S R, Shen J F, Mo X X, Scott S, Qu K, Wang X. 2013. Mesozoic magmatism and metallogenesis associated with the destruction of the North China Craton: Evidence from U-Pb geochronology and stable isotope geochemistry of the Mujicun porphyry Cu-Mo Deposit. Ore Geol Rev, 53: 434–445

Drew L J, Berger B R, Kurbanov N K. 1996. Geology and structural evolution of the Muruntau gold deposit, Kyzylkum desert, Uzbekistan. Ore Geol Rev, 11: 175–196

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, Xie Y H, Zhao R, Wang Y L. 2000. Dual origins of Xiaoqinling gold-bearing quartz veins: Fluid inclusion evidences. Chin Sci Bul, 45: 1424–1430

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

Funiciello F, Faccenna C, Giardini D, Morra G, Regenauer-Lieb K. 2003. Dynamics of retreating slabs: 2. Insights from three-dimensional laboratory experiments. J Geophys Res, 108(B4): 2207, doi: 10.1029/2001JB000896

Goldfarb R, Groves D I, Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. Ore Geol Rev, 18: 1–75

Goldfarb R, Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique? Geosci Front, 5: 139–153

Groves D I, Bierlein F P. 2007. Geodynamic settings of mineral deposit systems. J Geol Soc, 164: 19–30

Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G, Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore Geol Rev, 13: 7–27

Hagemann S, Cassidy K F. 2000. Archean orogenic lode gold deposits. Rev Econ Geol, 13: 9–68

Hieronymus C F, Shomali Z H, Pedersen L B A. 2007. Dynamical model for generating sharp seismic velocity contrasts underneath continents: Application to the Sorgenfrei-Tornquist Zone. Earth Planet Sci Lett, 262: 77–91

Hoefs J. 2009. Stable Isotope Geochemistry. Berlin: Springer-Verlag. 1–286

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 F F, Fan H R, Yang J H, Wan Y S, Liu D Y, Zhai M G, Jin C W. 2004. Mineralizing age of the Rushan lode gold deposit in the Jiaodong Peninsula: SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircon. Chin Sci Bull, 49: 1629–1636

Huang J, Zhao D. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. J Geophys Res, 111: B09305, doi: 10.1029/2005JB004066

Ionov D A, Hoefs J, Wedepohl K H, Wiechert U. 1992. Concentration and isotopic composition of sulfur in ultramafic xenoliths from Central Asia. Earth Planet Sci Lett, 111: 269–286

Jiang N, Xu J, Song M. 1999. Fluid inclusion characteristics of mesothermal gold deposits in the Xiaoqinling district, Shaanxi and Henan provinces, People's Republic of China. Miner Depos, 34: 150–162

Lee C-T A, Yin Q, Rudnick R L, Jacobsen S B. 2001. Preservation of ancient and fertile lithospheric mantle beneath the southwestern United States. Nature, 411: 69–73

Li C Y, Wang F Y, Hao X L, Ding X, Zhang H, Ling M X, Zhou J B, Li Y L, Fan W M, Sun W D. 2012. Formation of the world's largest molybdenum metallogenic belt: A plate-tectonic perspective on the Qinling molybdenum deposits. Int Geol Rev, 54: 1093–1112

Li C, van der Hilst R D, Engdahl E R, Burdick S. 2008. A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle. Geochem Geophys Geosyst, 9: Q05018, doi: 10.1029/2007GC001806

Li J W, Bi S J, Selby D, Chen L, Vasconcelos P, Thiede D, Zhou M F, Li Z K, Qiu H N. 2012a. Giant Mesozoic gold provinces related to the destruction of the North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 349–350: 26–37

Li J W, Li Z K, Zhou M F, Chen L, Bi S J, Deng X D, Qiu H N, Cohen B, Selby D, Zhao X F. 2012b. The early Cretaceous Yangzhaiyu lode gold

deposit, North China Craton: A link between craton reactivation and gold veining. Econ Geol, 107: 43–79

Li J W, Vasconcelos P M, Zhang J, Zhou M F, Zhang X J, Yang F H. 2003. $^{40}Ar/^{39}Ar$ 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 L, Santosh M, Li S R. 2015. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting. Ore Geol Rev, 65: 589–611

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, 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

Li Q, Santosh M, Li S R. 2013. Stable isotopes and noble gases in the Xishimen gold deposit, central North China Craton: Metallogeny associated with lithospheric thinning and crust-mantle interaction. Int Geol Rev, 55: 1728–1743

Li S R, Santosh M, Zhang H F, Luo J Y, Zhang J Q, Li C L, Song J Y, Zhang X B. 2014. Metallogeny in response to lithospheric thinning and craton destruction: Geochemistry and U-Pb zircon chronology of the Yixingzhai gold deposit, central North China Craton. Ore Geol Rev, 56: 457–471

Li S R, Santosh M, Zhang H F, Shen J F, Dong G C, Wang J Z, Zhang J Q. 2013. Inhomogeneous lithospheric thinning in the central North China Craton: Zircon U-Pb and S-He-Ar isotopic record from magmatism and metallogeny in the Taihang Mountains. Gondwana Res, 23: 141–160

Li S R, Santosh M. 2014. Metallogeny and craton destruction: records from the North China Craton. Ore Geol Rev, 56: 376–414

Li X, Kwak T A P, Brown R W. 1998. Wallrock alteration in the Bendigo gold ore field, Victoria, Australia: Uses in exploration. Ore Geol Rev, 13: 381–406

Liu J, Davis G, Lin Z, Wu F. 2005. The Liaonan metamorphic core complex, southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. Tectonophysics, 407: 65–80

Ma L, Jiang S Y, Hou M L, Dai B Z, Jiang Y H, Yang T, Zhao K D, Pu W, Zhu Z Y, Xu B. 2013. Geochemistry of Early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: Implication for lithospheric evolution of the eastern North China Craton. Gondwana Res, 25: 859–872

Machetel P. 2003. Global thermal and dynamical perturbations due to Cretaceous mantle avalanche. C R Geosci, 335: 91–97

Mao J W, Goldfarb R J, Zhang Z W, Xu W Y, Qiu Y, Deng J. 2002. Gold deposits in the Xiaoqinling-Xiong'ershan region, Qinling Mountains, central China. Miner Depos, 37: 306–325

Mao J W, Pirajno F, Xiang J F, Gao J J, Ye H S, Li Y F, Guo B J. 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qingling-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic setting. Ore Geol Rev, 43: 264–293

Mao J W, Wang Y T, Li H M, Pirajno F, Zhang C Q, Wang R T. 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

Mills S E, Tomkins A G, Weinberg R F, Fan H R. 2015. Anomalously silver-rich vein-hosted mineralisation in disseminated-style gold deposits, Jiaodong gold district, China. Ore Geol Rev, 68: 127–141

Mooney W D, Braile L W. 1989. The seismic structure of the continental crust and upper mantle of North America. In: Bally A W, Palmer A R, eds. The Geology of North America-An Overview. Geol Soc Am, 39–52

Müller R D, Sdrolias D, Gaina C, Roest W R. 2008b. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. Geochem Geophys Geosyst, 9: Q04006, doi: 10.1029/2007GC001743

Müller R D, Sdrolias D, Gaina C, Steinberger C, Heine B. 2008a. Long-term sea-level fluctuations driven by ocean basin dynamics. Science, 319: 1357–1362

Muntean J L, Cline J S, Simon A C, Longo A A. 2011. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits. Nat Geosci, 4: 122–127

Niu Y L. 2005. Generation and evolution of basaltic magmas: Some basic concepts and a hypothesis for the origin of the Mesozoic-Cenozoic volcanism in eastern China. Geol J China Univ, 11: 9–46

Niu Y L. 2014. Geological understanding of plate tectonics: Basic concepts, illustrations, examples and new perspectives. Global Tectonics and Metallogeny, 10: 23–46

Partington G A, Williams P J. 2000. Proterozoic lode gold and (iron)-copper-gold deposits: A comparison of Australian and global examples. Rev Econ Geol, 13: 69–101

Phillips G N, Powell R. 2010. Formation of gold deposits: A metamorphic devolatilisation model. J Metamorph Geol, 28: 689–718

Pollack H N. 1986. Cratonization and thermal evolution of the mantle. Earth Planet Sci Lett, 80: 175–182

Robert F, Poulsen K H, Cassidy K F, Hodgson C J. 2005. Gold metallogeny of the Superior and Yilgarn cratons. Bull Soc Econom Geol, One Hundredth Anniversary 1905–2005: 1001–1033

Seton M, Müller R D, Zahirovic S, Gaina C, Torsvik T, Shephard G, Talsma A, Gurnis M, Turner M, Maus S, Chandler M. 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma. Earth Sci Rev, 113: 212–270

Sun W D, Ding X, Hu Y H, Li X H. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. Earth Planet Sci Lett, 262: 533–542

Sun W D, Li S, Yang X Y, Ling M X, Ding X, Duan L A, Zhan M Z, Zhang H, Fan W M. 2013. Large-scale gold mineralization in eastern China induced by an Early Cretaceous clockwise change in Pacific plate motions. Int Geol Rev, 55: 311–321

Sun W Y, Li S R, Santosh M, Wang X, Zhang L J. 2014. Isotope geochemistry and geochronology of the Qiubudong silver deposit, central North China Craton: Implications for ore genesis and lithospheric dynamics. Ore Geol Rev, 57: 229–242

Tan J, Wei J H, Audétat A, Pettke T. 2012. Source of metals in the Guocheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, North China Craton: Link to early Cretaceous mafic magmatism originating from Paleoproterozoic metasomatized lithospheric mantle. Ore Geol Rev, 48: 70–87

Tang K F, Li J W, Selby D, Zhou M F, Bi S J, Deng X D. 2013. Geology, mineralization, and geochronology of the Qianhe gold deposit, Xiong'ershan area, southern North China Craton. Miner Depos, 48: 729–747

Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, Su B X. 2013. Widespread refertilization of cratonic and circum-cratonic lithospheric mantle. Earth Sci Rev, 118: 45–68

van der Hilst R D. 1995. Complex morphology of subducted lithosphere in the mantle beneath the Tonga trench. Nature, 374: 154–157

Wang T, Zheng Y, Zhang J, Zeng L, Donskaya T, Guo L, Li J. 2011. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes. Tectonics, 30: TC6007, doi: 10.1029/2011TC002896

Wang X, Li S R, Santosh M, Gan H N, Sun W Y. 2014. Source characteristics and fluid evolution of the Beiyingxigou Pb-Zn-Ag deposit, central North China Craton: An integrated stable isotope investigation. Ore Geol Rev, 56: 528–540

Wang Z L, Yang L Q, Guo L N, Marsh E, Wang J P, Liu Y, Chao Zhang C, Li R H, Zhang L, Zheng X L, Zhao R X. 2015. Fluid immiscibility and gold deposition in the Xincheng deposit, Jiaodong Peninsula, China: A fluid inclusion study. Ore Geol Rev, 65: 701–717

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

Xu J W, Zhu G, Tong W X, Cui K, Liu Q. 1987. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northern of the Pacific Ocean. Tectonophysics, 134: 273–310

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, Zhou X H. 2000. The Rb-Sr isochron of ore and pyrite sub-samples from Linglong gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China and their geological significance. Chin Sci Bull, 45: 2272–2276

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 L Q, Deng J, Goldfarb R J, Zhang J, Gao B F, Wang Z L. 2014. $^{40}Ar/^{39}Ar$ 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

Zandt G, Myers S, Wallace T. 1995. Crust and mantle structure across the Basin and Range-Colorado Plateau boundary at 37°N latitude and implications for Cenozoic extensional mechanism. J Geophys Res, 100: 10529–10548

Zeng Q D, Liu J M, Qin K Z, 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, Liu T B, Shen Y C. 2001. The Tanlu fault zone and gold ore metallogenesis in eastern China. Int Geol Rev, 43: 176–190

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 J, Chen Y J, Pirajno F, Deng J, Chen H Y, Wang C M. 2013. Geology, C-H-O-S-Pb isotope systematics and geochronology of the Yindongpo gold deposit, Tongbai Mountains, central China: Implication for ore genesis. Ore Geol Rev, 53: 343–356

Zhang X H, Liu Q, Ma Y J, Wang H. 2005. Geology, fluid inclusions, isotope geochemistry, and geochronology of the Paishanlou shear zone-hosted gold deposit, North China Craton. Ore Geol Rev, 26: 325–348

Zhang X O, Cawood P A, Wilde S A, et al. 2003. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China. Miner Depos, 38: 141–153

Zhao G C, Sun M, Wilde S A, Li S Z. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. Precambrian Res, 136: 177–202

Zheng T Y, Zhao L, Xu W W, Zhu R X. 2008b. Insight into modification of North China Craton from seismological study in the Shandong Province. Geophys Res Lett, 35: L22305, doi: 10.1029/2008GL035661

Zheng T Y, Zhao L, Zhu R X. 2008a. Insight into the geodynamics of cratonic reactivation from seismic analysis of the crust-mantle boundary. Geophys Res Lett, 35: L08303, doi: 10.1029/2008GL033439

Zheng T Y, Zhao L, Zhu R X. 2009. New evidence from seismic imaging for subduction during assembly of the North China Craton. Geology, 37: 395–398

Zhu R X, Yang J H, Wu F Y. 2012, Timing of destruction of the North China Craton. Lithos, 149: 51–60