大地幔楔与克拉通破坏型金矿

朱日祥^{1*}, 孙卫东^{2,3,4}

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. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237;
3. 中国科学院海洋研究所深海研究中心, 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071;
4. 中国科学院大学海洋学院, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: rxzhu@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2020-10-29; 收修改稿日期: 2021-01-25; 接受日期: 2021-01-29; 网络版发表日期: 2021-03-25

国家自然科学基金项目(批准号: 41688103)、科技部重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项项目(编号: 2016YFC0600408)、山东省泰山学者项目(编号: ts201712075)和海洋科学与技术试点国家实验室鳌山人才项目(编号: 2017ASTCP-OS07)资助

摘要 环太平洋俯冲带是全球著名的金矿成矿域, 其中华北克拉通和内华达是环太平洋俯冲带最重要的两个金成矿省, 其成因分别与华北克拉通和怀俄明克拉通的破坏有关, 成矿流体可能与俯冲板块在地幔过渡带的滞留相关。俯冲的大洋岩石圈地幔通常有数千米厚的蛇纹石化层, 在板块俯冲过程中, 蛇纹石在小于200km的深度内脱水转变为高压含水相——phase A, 将水带到大于300km的深处。当滞留在地幔过渡带的俯冲板片中含水高压相脱水, 会导致上覆大地幔楔的水化, 这是克拉通破坏型金矿形成的先决条件。俯冲板片脱水释放出的富硫流体萃取周围岩石中的金等亲硫元素, 形成富金流体。由于克拉通地温线低于二辉橄榄岩水饱和固相线, 流体在克拉通岩石圈地幔内向上运移到100km以浅后交代岩石圈地幔, 形成韭闪石等含水矿物, 在克拉通岩石圈地幔中形成富水、富金的弱化层。随着克拉通岩石圈的破坏, 该弱化层失稳, 释放含金流体, 并沿地壳浅部薄弱带迁移、聚集和沉淀, 形成爆发式金矿床。由此可见, 大地幔楔是形成克拉通地幔含矿弱化层, 进而导致金爆发式成矿的关键。俯冲板片析出的流体富含二价铁, 流体向上运移过程中, 二价铁在低压下发生水解, 释放出氢气; 地幔楔岩浆岩可以具有较高的氧逸度, 而成矿流体则是还原性的——即克拉通破坏型金矿往往属于还原性矿床。

关键词 大地幔楔, 蛇纹石, 韭闪石, 克拉通破坏, 爆发式金成矿, 氢气

1 引言

环太平洋成矿域已探明金储量超过15000t(Goldfarb等, 1998; 张伟波和叶锦华, 2017), 约占全球探明储量的10%, 被称为“金指环”。这些金矿多与板块俯冲相关。但是, 其时空分布极其不均匀。其中, 华北克拉通和内华达是环太平洋俯冲带最重要的两个金成矿省, 探

明储量达到11000t, 其金的超常富集分别与华北克拉通和怀俄明克拉通的破坏有关(朱日祥等, 2015)。为什么克拉通破坏会导致如此大规模的爆发式金成矿? 贫金的克拉通岩石圈地幔是如何富集金的? 为了认识这些科学问题, 本文从晚中生代古太平洋板块俯冲入手, 探讨大地幔楔与克拉通破坏型金矿爆发式成矿的关系。

中文引用格式: 朱日祥, 孙卫东. 2021. 大地幔楔与克拉通破坏型金矿. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1444–1456, doi: 10.1360/SSTe-2020-0305
英文引用格式: Zhu R, Sun W. 2021. The big mantle wedge and decratonic gold deposits. Science China Earth Sciences, 64(9): 1451–1462, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9733-1>

2 克拉通破坏型金矿

克拉通破坏型金矿是在克拉通破坏过程中爆发式形成的大规模金矿省, 成矿持续时间短、储量巨大, 分布在克拉通破坏区, 其成矿流体主要来自地幔(朱日祥等, 2015).

2.1 晚中生代华北金成矿省

华北克拉通东部陆块周缘形成多个晚中生代金矿集区(Deng等, 2015; Fan等, 2003; Mao等, 2002; Song等, 2015; Yang和Zhou, 2001), 在空间上主体呈现为两条近北北东向平行分布的金矿带. 东部金矿带包括胶东矿集区、辽东矿集区和吉南矿集区; 西部金矿带包括赤峰-朝阳矿集区、冀北-冀东矿集区、太行山矿集区和小秦岭矿集区. 胶东是其中最大的金矿集区, 其探明黄金储量超过5000t(Deng等, 2020; 宋明春等, 2018). 前人对胶东金矿的成因进行了大量的研究(Deng等, 2020; Hu等, 2020; Liu等, 2020b; Meng等, 2020; Zhai等, 2020; Zhang等, 2020a), 一些学者将其划归为造山型金矿(Goldfarb等, 2001; Qiu等, 2002; Zhou和Lü, 2000), 该成矿类型受控于绿片岩向角闪岩变质过程中黄铁矿向磁黄铁矿转变而产生的富硫流体(Sun等, 2013; Tomkins, 2010), 通常形成于挤压或扭压构造环境, 与区域断裂和剪切带有密切关系(Goldfarb等, 2001; Micklethwaite和Cox, 2004).

实际上, 胶东金矿成矿作用与北美地区典型的造山型金矿有很大的差异. 北美造山型金矿基底往往为绿片岩相变质岩, 变质年龄与成矿年龄相差<200Ma, 成矿时代跨越较大的范围, 基本上与造山运动相对应. 胶东金矿主要为太古代和元古代基底岩石, 变质程度也往往远高于绿片岩相, 大多经历了角闪岩相变质作用, 而Rb-Sr等时线(Yang和Zhou, 2001)、绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Li等, 2003, 2006)和热液独居石(Ma等, 2017; Yang等, 2018)等年龄均显示成矿时代集中在早白垩世很短的时间间隔内, 但此时中国东部并无造山运动, 取而代之的是华北克拉通整体处于强烈的伸展构造环境以及克拉通破坏(朱日祥等, 2012). 翟明国等(2004)认为这些金矿属于陆内成矿而非“造山型”成矿. 基于这些金矿形成时代与华北克拉通破坏峰期具有一致性、成矿物质/熔流体有大量幔源物质的参与等事实, 朱日祥等(2015)认为华北克拉通晚中生代爆发式金成矿为克拉

通破坏型金矿.

2.2 新生代内华达金成矿省

太平洋东岸的内华达地区是世界上第二大金成矿省, 探明金储量超过6000t(Muntean等, 2011), 主要包括Carlin、Cortez、Getchell和Jerritt四大矿集区, 以微细浸染型金矿床为主(Blamey等, 2017; Clark Maroun等, 2017; Groff, 2020; Hausen和Kerr, 1966; Hickey等, 2014; Holley等, 2019). 该类矿床具有品位低、规模大和不可见自然金的特点. 其最早于20世纪60年代初在北美克拉通西部盆岭省内华达地区的卡林镇被发现, 因而被称为“卡林型”金矿. 显然, 这种命名方法缺少科学内涵.

关于内华达“卡林型”金矿的成矿物质来源, 传统的认识是金来源于沉积地层的早期富集和后期热液活动的萃取(Emsbo等, 2003; Ilchik和Barton, 1997; Large等, 2011)或变质过程中释放的含金流体(Large等, 2011), 也有学者认为富金流体主要来自岩浆热液活动(Large等, 2016; Muntean等, 2011). 朱日祥等(2015)通过全球克拉通破坏对比研究发现, 内华达金成矿省主要产于始新世, 分为东、西金矿化带(图1), 其成矿时代分别集中在40和36Ma(Muntean等, 2011), 持续时间短, 具有爆发性成矿的特点, 与北美怀俄明克拉通大规模破坏的时间基本一致, 且成矿流体主要为幔源, 这充分说明内华达所谓“卡林型”金矿实质是克拉通破坏型金矿.

3 大地幔楔

大地幔楔(big mantle wedge, BMW)是指平躺在地幔过渡带的滞留大洋板块之上的楔状上地幔(Ohtani和Zhao, 2009; Zhao等, 2009; 赵大鹏等, 2004), 所涉及的区域可以距离海沟达上千公里, 属于传统上认为的板内构造环境(徐义刚等, 2018; 朱日祥和徐义刚, 2019). 关于大地幔楔的形成机制争议较大, 一种观点认为是俯冲板片的回转、海沟后撤、滞留在地幔过渡带板片的脱水所致(Zhu等, 2017); 另一种观点认为主要是由海沟后撤形成(Griffiths等, 1995; Kusky等, 2014); 还有的研究者认为是俯冲板片在地幔过渡带水平推进形成的(Chen和Faccenda, 2019). 根据大地幔楔的定义(Ohtani和Zhao, 2009; Zhao等, 2009; 赵大鹏等,

图1 内华达克拉通破坏型金矿分布
修改自Muntean等(2011)和朱日祥等(2015)

2004), 俯冲板块在地幔过渡带滞留是大地幔楔形成的关键。

俯冲板片主要由三部分组成: 大洋岩石圈地幔、玄武质洋壳和沉积物。在俯冲之初, 大洋岩石圈地幔温度低于周围软流圈地幔, 密度较后者高。玄武质洋壳在俯冲初期, 依次变质为绿片岩、蓝片岩、石榴角闪岩和榴辉岩。其中, 榴辉岩的密度大于周围地幔(图2)。俯冲沉积物的量往往很小, 而且易于熔融, 对俯冲板片的平均密度影响有限。因此, 如果不考虑俯冲板片中蛇纹石化的影响, 在上地幔俯冲板片整体密度大于周围地幔(Niu和O'Hara, 2003), 可以下沉到上地幔底部。由于下地幔橄榄岩发生相变, 林伍德石转变为密度更高的布里吉曼石。在完成相变之前, 俯冲板片密度小于下地幔密度, 可以在地幔过渡带滞留。此外, 俯冲洋壳中的高压石榴子石相——梅杰石在上地幔压力下不发生相变, 即使俯冲板片岩石圈地幔完成相变, 整个俯冲板片的密度仍小于下地幔(图2)(Hirose等, 1999; Ringwood, 1991)。因此, 俯冲板片在地幔过渡带会滞留一定时间。但是, 现今环太平洋俯冲带只有东亚和菲律宾海板块等地存在明显的大地幔楔, 暗示大地幔楔的形成还受到很多其他因素的控制。

与东亚大地幔楔形成鲜明对比的是现今东太平洋俯冲带普遍为低角度俯冲, 而且海沟在不断后撤, 似乎应该有利于大地幔楔的形成, 但是大地幔楔并不发育。究其原因, 我们认为年轻洋壳相对于老洋壳含水量低、温度高、密度小。年龄小于25Ma的洋壳在俯冲过程中容易发生部分熔融, 不易下沉到过渡带形成大地幔楔。

在西太平洋的马里亚纳地区, 俯冲板块较老, 俯冲角度较大。俯冲板片直接下插到720km以下, 梅杰石发生相变密度变大(图2), 导致俯冲板片几乎不能在过渡带滞留, 所以也不容易形成大地幔楔。汤加-科马德克俯冲带的奥斯邦海槽以南最年轻洋壳年龄为~83Ma, 俯冲角度超过70°, 没有形成大地幔楔。这似乎暗示俯冲洋壳年龄大约在25~80Ma最有可能形成大地幔楔。有意思的是, 奥斯邦海槽以北有过渡带滞留板片的迹象(Wei等, 2017)。由此可见, 除了俯冲板片的年龄和俯冲角度等因素外还有其他因素影响大地幔楔的形成, 而俯冲板片回转、海沟后撤是大地幔楔形成的重要动力过程。

地震层析研究观测到的现今的东亚大地幔楔是新生代太平洋板块北西向俯冲的产物(Li和Yuen, 2014;

图2 俯冲洋壳和地幔橄榄岩密度随深度变化曲线

修改自Hirose等(1999)。地幔橄榄岩在660km发生相变, 林伍德石转变为镁布里吉曼石, 密度迅速升高。俯冲洋壳的主要相变发生在720km, 高压相石榴子石——梅杰石, 转变为富铁布里吉曼石, 密度超过镁布里吉曼石。在660~720km, 俯冲板片的密度小于周围地幔, 因此俯冲板片可以滞留在上地幔的底部, 形成大地幔楔。

Schmid等, 2002; Sun等, 2020a, 2020b; Wang等, 2020)。晚中生代东亚是否存在大地幔楔以及其形成时代是地球科学关注和争议的焦点问题之一。近年来的研究表明, 早白垩世东亚也曾经有过大地幔楔的存在(Ma和Xu, 2021; 马强和徐义刚, 2017; 徐义刚等, 2018; 朱日祥等, 2012)。根据朱日祥等(2015)的估计, 在早白垩世的130~125Ma期间古西太平洋海沟后撤了约880km。由此推测130~125Ma期间, 古西太平洋板块可能已经通过俯冲板片回转与海沟后撤变成中高角度俯冲, 并最终在地幔过渡带产生滞留体(朱日祥和徐义刚, 2019), 在上覆地幔形成大地幔楔; 从岩浆岩时空分布看, 板片回转略早于在地幔过渡带滞留的时间(Ma和Xu, 2021)。

值得注意的是, 郑永飞等(2018)提出, 古太平洋板块在侏罗纪是低角度俯冲, 到白垩纪转为高角度俯冲, 结果引起克拉通破坏; 太平洋板块从新生代早期才开始俯冲到亚洲大陆之下, 到新生代晚期才形成现今的大地幔楔, 而在早白垩世可能并未形成大地幔楔。从岩浆岩分布、古太平洋洋脊俯冲等现象看, 早白垩世华北局部很可能曾经经历过短暂的低角度俯冲乃至平板俯冲(Ling等, 2013; Wu等, 2017; Zhang等, 2020b, 2020c)。虽然华北大规模岩浆活动发生在130~120Ma,

但是俯冲古太平洋板片角度变陡可能在145~140Ma就已经发生(郑永飞等, 2018), 结果就是华北地区岩浆岩在时空分布上出现的成分随年龄的变化(Ma和Xu, 2021)。

早白垩世华北克拉通地幔远比新生代岩石圈地幔富水, 一般将其解释为古太平洋板片在进入地幔过渡带之后才发生脱水作用(Liu和Xia, 2014; Xia等, 2013; 夏群科等, 2017)。但是, 郑永飞等(2018)并不认同这个地球化学解释, 认为是俯冲的古太平洋板片在克拉通岩石圈底部就发生了脱水作用, 因此华北克拉通岩石圈地幔在晚侏罗世-早白垩世就受到流体交代作用。如果从大约145Ma起, 古太平洋板片俯冲角度变大, 到130~120Ma变陡, 从而引起软流圈地幔侧向流动, 侵蚀受到流体交代的克拉通岩石圈地幔使其发生破坏, 那么克拉通地幔就可以相对富水了(郑永飞等, 2018)。

为了进一步探讨早白垩世东亚大陆下方是否存在大地幔楔, 我们来分析俯冲板片中水存在的两个端元: 蚀变洋壳和蛇纹石化的地幔橄榄岩。在地幔过渡带, 俯冲板片的脱水与蛇纹石化地幔橄榄岩有关(图3)。在理想状态下, 俯冲的蚀变洋壳第一次脱水主要发生在蓝片岩-角闪岩变质过程; 第二次则主要发生在角闪岩-榴辉岩的变质过程中。传统观点认为, 到榴辉岩相时, 俯冲洋壳脱水基本完成。但是, 高温高压实验显示, 此时仍有少量水赋存于多硅白云母等矿物中, 可以将水带入300km深度(Schmidt, 1996)。与蚀变洋壳不同, 蛇纹石在板块俯冲过程中可以转变为高压相, 将水带到地幔过渡带乃至上地幔底部(Lee和Chen, 2007)。地球物理观测揭示, 俯冲板片内有数千米厚的蛇纹石化岩石圈地幔, 可以把大量的水带入地幔深部(Li, 2020)。在俯冲过程中, 蛇纹石脱水转化为phase A等高压含水相。其中, 蛇纹石分解的上限是深度<200km、温度<750℃。因此, 在俯冲板片到达克拉通底部时, 蛇纹石的脱水完成, 而新形成的高压相phase A在此深度是稳定的, 其分解压力在300km以深。因此, 沿克拉通底部平俯冲过程中, 俯冲板片很少脱水(图3)。对于较热的俯冲板片, 蛇纹石会直接分解为橄榄石、斜方辉石和熔体, 水直接进入熔体相(Ghaderi等, 2015; 申婷婷等, 2016)。所以, 仅用低角度俯冲很难解释早白垩世华北克拉通岩石圈地幔普遍富水的现象, 这可能指示在该时期已经形成了大地幔楔。

从全球板块构造运动来看, 早白垩世大西洋、印

图3 不同蛇纹石稳定域图解

据Ghaderi等(2015)、申婷婷等(2016)和Angel等(2001)修改。红色线为利蛇纹石(Liz)和叶蛇纹石(Atg)的相变边界(Ghaderi等, 2015): 利蛇纹石(Liz)→叶蛇纹石(Atg)+氢氧镁石(Brc); 绿色虚线为无水条件下叶蛇纹石自身脱水线(Perrillat等, 2005); 浅蓝色线为叶蛇纹石最大稳定域边界(Hilairt等, 2006; Nestola等, 2010)。叶蛇纹石脱水发生三个反应: 叶蛇纹石(Atg)→滑石(Tlc)+橄榄石(Ol)+H₂O(压力一般小于2GPa); 叶蛇纹石(Atg)→橄榄石(Ol)+斜方辉石(En)+H₂O; 叶蛇纹石(Atg)→斜方辉石(En)+phase A+H₂O(压力一般大于5GPa)(Ulmer和Trommsdorff, 1995; 申婷婷等, 2016)。叶蛇纹石分解会形成phase A, 通过高温高压实验, 在MgO-SiO₂-H₂O条件下, phase A与镁橄榄石等反应会形成phase B等(灰色虚线)(Yamamoto和Akimoto, 1977)。温度压力持续升高也会产生phases D和E以及压力可以达到29GPa的superhydrous phase B, 而且在一定温度压力下会转变为含水矿物瓦兹利石(Wad)、林伍德石(Rw)以及其他高压矿物(深蓝色实线和虚线), 绿色阴影为phase A的稳定区域; 蓝色阴影为phase B及其他高压含水矿物稳定区域(Angel等, 2001)。灰色虚线为冷俯冲地温梯度和热俯冲地温梯度(Dixon等, 2017; Ghaderi等, 2015; Syracuse等, 2010; van Keken等, 2011), 蛇纹石层位于俯冲板片的中心, 通常属于冷俯冲。Superhydrous phase B指超富水的phase B

度洋加速扩张, 推动美洲大陆向西运动, 欧亚大陆向东运动, 古太平洋两侧处于俯冲板片回转、海沟后撤、弧后拉张的状态, 并且在北美大陆西缘下方也曾经形成类似于现今东亚的大地幔楔(图4)。根据地震层析成像和板块运动研究结果, 早白垩世末俯冲的发拉隆板块曾滞留在北美大陆之下地幔过渡带, 持续时间可达数十个百万年, 之后逐渐向下地幔沉降(Liu等, 2008)。由于大西洋和印度洋的打开, 北美大陆自~60Ma起向西漂移了约2000km, 导致俯冲板片回转、海沟后撤, 形成大地幔楔。但是由于约17Ma在内华达与卡斯柯德

之间发生的俯冲板片撕裂和随后的地幔柱活动(Liu和Stegman, 2012), 加之俯冲的发拉隆洋壳较为年轻, 俯冲角度小, 现今东太平洋的大地幔楔不如西太平洋明显。

4 克拉通破坏型金矿成因

4.1 金成矿流体的来源

由于金为中度不相容元素(Sun等, 2004), 在强烈亏损不相容元素的克拉通岩石圈地幔中, 其丰度应远低于原始地幔 $0.3 \times 10^{-9} \text{ g g}^{-1}$ 的丰度(McDonough和Sun,

1995). 所以, 通常克拉通岩石圈地幔中的金并不富集, 克拉通破坏型金矿的金主要来源于交代的岩石圈地幔(朱日祥等, 2015). 而交代的地幔流体则主要来源于滞留在地幔过渡带俯冲板片的变质脱水; 另一种观点则认为, 俯冲板片脱水主要发生在低角度俯冲阶段(郑永飞等, 2018), 在地幔过渡带里脱水不能到达浅部(图4). 我们初步分析认为, 在地幔过渡带, 俯冲板片析出的流体主要赋存在林伍德石等矿物中(Pearson等, 2014); 在地幔过渡带达到水饱和之后, 剩余的水就会进入大地幔楔. 由于通常大地幔楔矿物的含水量较低, 数十ppm ($1\text{ppm}=1\mu\text{g g}^{-1}$)的水可以赋存在“名义上无水矿物(nominally anhydrous minerals)”中(Green等, 2010), 剩

余的水就会向上运移, 并有可能到达地壳浅部.

在俯冲板块中, 蚀变洋壳最先脱水, 其中的黄铁矿相变释放的硫进入流体中; 由于升温慢, 未蚀变洋壳的变质深度增加, 导致进一步缺水; 在这种情况下黄铁矿变质产生的硫活动性较差. 当俯冲板块中的蛇纹石脱水时, 流体渗滤过程中, 早期释放出来的硫可以进入流体相, 形成富金流体. 硫与铂族元素、镍等亲硫元素形成硫化物, 留在地幔中; 而与铜金等亲硫元素形成溶于水的络合物, 从而将其从周围岩石中萃取到俯冲板片析出的流体中, 形成富金流体. 由于金的亲硫性远高于铜, 此类富金流体中的铜往往不能形成有经济价值的铜矿床(Sun等, 2013). 在含水矿物稳定区, 通

图4 东亚大地幔楔形成和富金流体富集模式图

(a) 在130Ma以前, 俯冲洋壳和蛇纹岩的脱水主要发生在200km以浅, 滞留在地幔过渡带的俯冲板片被逐渐加热, 高压含水相发生进一步变质脱水(详见图3). (b) 在125Ma之后, 俯冲板片在~660km以浅滞留并在该深度再次脱水. 其中, 黄铁矿(FeS_2)转变为磁黄铁矿(FeS)的过程中释放出富硫流体, 并萃取金等亲硫元素形成富金流体, 在岩石圈地幔100km以浅, 被非闪石所吸收, 形成富水富金弱化层, 对克拉通破坏和金爆发成矿具有重要的意义. 图中绿色箭头代表俯冲板片释放出的流体, 黑色箭头代表俯冲板片形态的改变, 浅蓝色区域代表俯冲板片从平俯冲到滞留的过渡形态

过地幔交代作用, 形成富水、富金弱化层. 韭闪石是岩石圈地幔中最主要含水矿物, 其稳定区间在100km以浅. 在其稳定区, 韭闪石可以在地幔橄榄岩中存储高达0.5%的水(图5)(Green等, 2010). 在克拉通破坏之前, 大地幔楔底部俯冲板片析出的富金流体大量被韭闪石等含水矿物吸收, 保存在岩石圈地幔中.

华北克拉通经历过多次板块俯冲的影响, 如古生代沿商丹缝合线的俯冲(Dong等, 2011; Meng和Zhang, 1999; Sun等, 2002b; 张国伟等, 1995); 早中生代沿秦岭-大别-苏鲁造山带的俯冲拼合(Li等, 1993, 1994; Sun等, 2002a, 2002c; Zheng等, 2013); 古生代沿中亚造山带的俯冲拼合(Jahn等, 2000; Ling等, 2013; Wu等, 2007; Xiao等, 2003)和侏罗纪以来的太平洋板块俯冲(Niu, 2005; Zhang等, 2020b; 朱日祥和徐义刚, 2019). 板块俯冲、碰撞对于成矿物质的富集具有极其重要的意义(陈华勇和吴超, 2020; Li等, 2020; Liu等, 2020a; Sun等, 2020b; Wang和Xiao, 2018; Zheng等, 2019). 这些俯冲可能均对华北克拉通岩石圈地幔中的富水、富金弱化层的形成有所贡献, 其中形成大地幔楔的俯冲板片的贡献最大.

地震学等研究表明, 在克拉通地幔中普遍存在一

个薄弱层(mid-lithospheric discontinuity, MLD) (Chen, 2017; Liu等, 2018; Xu, 2001), 可能是克拉通长期演化的产物, 同位素特征指示其形成时代往往很古老, 不一定与大地幔楔相关. 从现有与MLD相关的岩浆岩资料看, 尚无MLD富金的证据; 在华北克拉通破坏过程中, 这一层消失对应中国东部的玄武岩源区由富集转向亏损(Wu等, 2017; Yang等, 2012). 值得注意的是, MLD的深度正是韭闪石稳定的深度, 因此本文提出的富水、富金弱化层很可能与MLD重叠, 但现有资料还不足以确定两者是否相同.

4.2 岩石圈地幔中含水矿物与成矿

岩石圈地幔中含水矿物可以降低其机械强度, 而含水矿物集中分解则可以加剧克拉通岩石圈的破坏; 滞留在地幔过渡带的俯冲板片是形成克拉通岩石圈地幔富水层的先决条件, 也是克拉通破坏的关键. 闪石类矿物的稳定性受控于压力和温度(Xiong等, 2005), 其中韭闪石在深度超过100km或者温度超过1100℃时发生分解(Green等, 2010). 在克拉通岩石圈拉张的过程中, 软流圈上涌, 岩石圈被加热. 当含水层温度达到韭闪石分解温度以后, 含水层失稳. 由于软流圈的温

图5 地热梯度和二辉橄榄岩固相线(a)及二辉橄榄岩的储水能力(b)

图片修改自Green等(2010). 图中的水饱和二辉橄榄岩的固相线与大洋地热梯度线相交于90km处, 但是并不与克拉通地热梯度线相交, 因此加水并不能使克拉通岩石圈发生部分熔融. 板块俯冲释放的水少量储存在大地幔楔“名义上无水矿物”中, 大部分储存在岩石圈地幔的含水矿物中

度 $\geq 1350^{\circ}\text{C}$, 因此当克拉通破坏导致软流圈上升到100km以浅, 非闪石等含水矿物在高温下迅速分解, 流体爆发式释放, 促进克拉通破坏. 由于硫化物易溶于富水流体(Huang和Keppler, 2015), 因此非闪石等含水矿物的分解释放出的流体可以以氢硫酸根络合物的形式萃取金, 形成富金成矿流体, 最终沿地壳浅部薄弱带迁移、聚集, 导致爆发式金成矿(图6)(Sun等, 2007; 侯增谦等, 2015). 华北克拉通西部金矿带就是金元素沿克拉通内部构造薄弱带迁移、聚集的结果.

克拉通破坏型金矿与造山型金矿最大的区别在于成矿流体的来源深度不同: 前者的成矿流体来自地幔, 其成矿流体氢氧同位素落在岩浆水与大气降水之间, 并且很可能与岩浆作用有关, 而氢-氡同位素落在地幔与地壳之间靠近地幔, 支持其地幔来源(朱日祥等, 2015); 而造山型金矿的成矿流体则是来自地壳, 是绿片岩相角闪岩相区域变质过程中形成的(Sun等, 2013), 其成矿流体氢氧同位素落在变质流体区域, 属于变质流体成矿, 通常与岩浆作用无关(朱日祥等, 2015). 克拉通破坏型金矿往往含二氧化碳(Fan等, 2003; Hu等, 2013; Wang等, 2015; Wen等, 2015; Yang等, 2009), 华北克拉通破坏型金矿的碳同位素组成很稳定, 主要集中于 $-7\sim-3\%$, 落在岩浆岩中高温碳同位素范围内(朱日祥等, 2015), 与地幔碳同位素值一致

图6 克拉通破坏型金矿成因模式图

克拉通破坏过程中, 岩石圈地幔中含水矿物受热分解, 短时间内释放大量的富金流体, 加速克拉通破坏, 形成爆发式克拉通破坏型金矿

(Hoefs, 2009), 支持克拉通破坏型金矿的成矿流体源于地幔.

克拉通破坏型金矿成矿流体包裹体中常见甲烷(Deng等, 2020; Fan等, 2003), 显示其氧逸度很低(图7). 这是由于在高温高压下二价铁易溶于水, 而三价铁不溶于水, 因此俯冲板片脱水析出流体富集二价铁. 随着流体向上运移, 温度、压力降低, 流体中的二价铁会发生水解, 释放出氢气(Bali等, 2013), 因此成矿流

图7 重要氧逸度缓冲线对应的氧逸度(a)及克拉通破坏型金矿与主要矿床类型氧逸度对比图(b)

克拉通破坏型金矿的形成温度通常在 400°C 以下, 对应成矿流体的 $\log f\text{O}_2$ 在 -30 以下, 属于还原性矿床. 前人估计造山型金矿氧逸度跟钨矿接近(Thompson等, 1999). 考虑到其流体包裹体中甲烷的存在, 其成矿流体氧逸度范围也应该低于磁铁矿型/钛铁矿型花岗岩的氧逸度界线, 属于还原性矿床. 背景图据Liu等(2020a)、Sun等(2015)和Thompson等(1999)修改

体氧逸度低。值得注意的是, 氢气分子小, 很容易穿过矿物晶格而逸散, 当氢气遇到二氧化碳时会形成甲烷, 保存在流体包裹体中; 此外, 氢能是最干净的能源, 其特点是燃烧热值高, 燃烧的产物又是水; 氢占太阳总质量的84%、宇宙质量的75%、地壳质量的0.14%; 尽管氢易挥发, 但可以被黏土矿物层圈闭。早白垩世华北克拉通发育多期火山作用, 其蚀变形成的黏土应该是保存氢气的良好气闭层, 为了减少对石油、天然气和煤炭等化石能源的依赖, 从国家能源战略的角度考虑, 我国应该高度关注在自然界寻找氢能, 受太平洋板块俯冲影响的东亚大陆边缘可能是未来自然界氢能勘探的切入点和突破口。

5 总结

克拉通破坏型金矿爆发式成矿的两个关键因素, 其一是富金流体的聚集, 其二是富金流体的集中释放。本文综合分析高温高压实验和克拉通破坏研究结果, 认为华北和内华达克拉通破坏型金矿成矿物质均来源于滞留在地幔过渡带俯冲板片的脱水。由于大西洋、印度洋的持续扩张, 相应地太平洋板块不断缩小, 导致相关俯冲板片回转、海沟后撤, 曾于不同地质时期在东、西太平洋形成大地幔楔。滞留在地幔过渡带的俯冲板片脱水释放的富金流体被岩石圈地幔中韭闪石等含水矿物储存在100km以浅; 在克拉通破坏时, 上述矿物迅速分解, 导致成矿流体的集中释放, 这一过程导致金的爆发式成矿。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所范宏瑞研究员和三位审稿人提出的建议和认真修改的意见。

参考文献

- 陈华勇, 吴超. 2020. 俯冲带斑岩铜矿系统成矿机理与主要挑战. 中国科学: 地球科学, 50: 865–886
- 侯增谦, 郑远川, 耿元生. 2015. 克拉通边缘岩石圈金属再富集与金-钼-稀土元素成矿作用. 矿床地质, 34: 641–674
- 李曙光, 汪洋. 2018. 中国东部大地幔楔形成时代和华北克拉通岩石圈减薄新机制——深部再循环碳的地球动力学效应. 中国科学: 地球科学, 48: 809–824
- 马强, 徐义刚. 2017. 东亚中生代岩浆的时空变迁与大地幔楔的形成时间. 北京: 2017年中国地球科学联合学术年会
- 申婷婷, 张立飞, 陈晶. 2016. 俯冲带蛇纹岩的变质过程. 岩石学报, 32: 1206–1218

- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 李世勇. 2018. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议. 黄金科学技术, 26: 406–422
- 夏群科, 程徽, 刘佳. 2017. 山东铁铜沟橄辉岩的水含量: 华北克拉通早白垩世富水岩石圈分布. 地球科学, 42: 853–861
- 徐义刚, 李洪颜, 洪路兵, 马亮, 马强, 孙明道. 2018. 东亚大地幔楔与中国东部新生代板内玄武岩成因. 中国科学: 地球科学, 48: 825–843
- 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
- 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 1995. 秦岭造山带的结构构造. 中国科学B辑: 化学 生命科学 地学, 25: 994–1003
- 张伟波, 叶锦华. 2017. 环太平洋成矿域主要铜-金矿床地质特征、成矿作用及找矿潜力. 地质通报, 36: 1–15
- 赵大鹏, 雷建设, 唐荣余. 2004. 中国东北长白山火山的起源: 地震层析成像证据. 科学通报, 49: 1439–1446
- 郑永飞, 徐峥, 赵子福, 戴立群. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏. 中国科学: 地球科学, 48: 379–414
- 朱日祥, 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
- Angel R J, Frost D J, Ross N L, Hemley R. 2001. Stabilities and equations of state of dense hydrous magnesium silicates. *Phys Earth Planet Inter*, 127: 181–196
- Bali E, Audéat A, Keppler H. 2013. Water and hydrogen are immiscible in Earth's mantle. *Nature*, 495: 220–222
- Blamey N, Campbell A, Heizler M. 2017. The hydrothermal fluid evolution of vein sets at the pipeline gold mine, Nevada. *Minerals*, 7: 100
- Chen L. 2017. Layering of subcontinental lithospheric mantle. *Sci Bull*, 62: 1030–1034
- Chen L, Faccenda M. 2019. Subduction-induced upwelling of a hydrous transition zone: Implications for the Cenozoic magmatism in Northeast China. *J Geophys Res Solid Earth*, 124: 11489–11504
- Clark Maroun L R, Cline J S, Simon A, Anderson P, Muntean J. 2017. High-grade gold deposition and collapse breccia formation, Cortez hills Carlin-type gold deposit, Nevada, USA. *Econ Geol*, 112: 707–740
- Deng J, Wang C, Bagas L, Carranza E J M, Lu Y. 2015. Cretaceous–Cenozoic tectonic history of the Jiaojia Fault and gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: Constraints from zircon U–Pb, illite K–Ar, and apatite fission track thermochronometry. *Miner Depos*, 50: 987–1006

- Deng J, Yang L Q, Groves D I, Zhang L, Qiu K F, Wang Q F. 2020. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China. *Earth-Sci Rev*, 208: 103274
- Dixon J E, Bindeman I N, Kingsley R H, Simons K K, Le Roux P J, Hajewski T R, Swart P, Langmuir C H, Ryan J G, Walowski K J, Wada I, Wallace P J. 2017. Light stable isotopic compositions of enriched mantle sources: Resolving the dehydration paradox. *Geochem Geophys Geosyst*, 18: 3801–3839
- Dong Y, Zhang G, Neubauer F, Liu X, Genser J, Hauzenberger C. 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. *J Asian Earth Sci*, 41: 213–237
- Emsbo P, Hofstra A H, Lauha E A, Griffin G L, Hutchinson R W. 2003. Origin of high-grade gold ore, source of ore fluid components, and genesis of the meikle and neighboring Carlin-type deposits, Northern Carlin Trend, Nevada. *Econ Geol*, 98: 1069–1105
- 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
- Ghaderi N, Zhang H, Sun T. 2015. Relative stability and contrasting elastic properties of serpentine polymorphs from first-principles calculations. *J Geophys Res Solid Earth*, 120: 4831–4842
- Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geol Rev*, 18: 1–75
- Goldfarb R J, Phillips G N, Nokleberg W J. 1998. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim. *Ore Geol Rev*, 13: 185–218
- Green D H, Hibberson W O, Kovács I, Rosenthal A. 2010. Water and its influence on the lithosphere-asthenosphere boundary. *Nature*, 467: 448–451
- Griffiths R W, Hackney R I, van der Hilst R D. 1995. A laboratory investigation of effects of trench migration on the descent of subducted slabs. *Earth Planet Sci Lett*, 133: 1–17
- Groff J A. 2020. Genetic implications of regional vs. fracture-controlled fluid flow in Carlin-type gold deposits, Nevada. *Ore Geol Rev*, 117: 103282
- Hausen D M, Kerr P F. 1966. Fine gold occurrence at Carlin Nevada. *Econ Geol*, 61: 1468–1469
- Hickey K A, Barker S L L, Dipple G M, Arehart G B, Donelick R A. 2014. The brevity of hydrothermal fluid flow revealed by thermal halos around giant gold deposits: Implications for Carlin-type gold systems. *Econ Geol*, 109: 1461–1487
- Hilairt N, Daniel I, Reynard B. 2006. Equation of state of antigorite, stability field of serpentines, and seismicity in subduction zones. *Geophys Res Lett*, 33: L02302
- Hirose K, Fei Y, Ma Y, Mao H K. 1999. The fate of subducted basaltic crust in the Earth's lower mantle. *Nature*, 397: 53–56
- Hoefs J. 2009. Stable Isotope Geochemistry. Heidelberg: Springer. 285
- Holley E A, Lowe J A, Johnson C A, Pribil M J. 2019. Magmatic-hydrothermal gold mineralization at the lone tree mine, Battle Mountain District, Nevada. *Econ Geol*, 114: 811–856
- 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 R, Keppler H. 2015. Anhydrite stability and the effect of Ca on the behavior of sulfur in felsic magmas. *Am Miner*, 100: 257–266
- Ilchik R P, Barton M D. 1997. An amagmatic origin of Carlin-type gold deposits. *Econ Geol*, 92: 269–288
- Jahn B M, Wu F, Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 57: 123–132
- Kusky T M, Windley B F, Wang L, Wang Z, Li X, Zhu P. 2014. Flat slab subduction, trench suction, and craton destruction: Comparison of the North China, Wyoming, and Brazilian cratons. *Tectonophysics*, 630: 208–221
- Large R R, Bull S W, Maslennikov V V. 2011. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Econ Geol*, 106: 331–358
- Large S J E, Bakker E Y N, Weis P, Wälle M, Ressel M, Heinrich C A. 2016. Trace elements in fluid inclusions of sediment-hosted gold deposits indicate a magmatic-hydrothermal origin of the Carlin ore trend. *Geology*, 44: 1015–1018
- Lee C T A, Chen W P. 2007. Possible density segregation of subducted oceanic lithosphere along a weak serpentinite layer and implications for compositional stratification of the Earth's mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 255: 357–366
- Li C Y, Sun S J, Guo X, Zhu H L. 2020. Recent progresses in plate subduction and element recycling. *Solid Earth Sci*, 5: 1–7
- Li J W, Paulo V, 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 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, Yuen D A. 2014. Mid-mantle heterogeneities associated with Izanagi plate: Implications for regional mantle viscosity. *Earth*

- Planet Sci Lett*, 385: 137–144
- Li S, Wang S, Chen Y, Liu D, Qiu J, Zhou H, Zhang Z. 1994. Excess argon in phengite from eclogite: Evidence from dating of eclogite minerals by Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ methods. *Chem Geol*, 112: 343–350
- Li S, Xiao Y, Liou D, Chen Y, Ge N, Zhang Z, Sun S, Cong B, Zhang R, Hart S R, Wang S. 1993. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chem Geol*, 109: 89–111
- Li Z H. 2020. Flat subduction versus big mantle wedge: Contrasting modes for deep hydration and overriding craton modification. *J Geophys Res Solid Earth*, 125: e20018
- Ling M X, Liu Y L, Williams I S, Teng F Z, Yang X Y, Ding X, Wei G J, Xie L H, Deng W F, Sun W D. 2013. Formation of the world's largest REE deposit through protracted fluxing of carbonatite by subduction-derived fluids. *Sci Rep*, 3: 1776
- Liu H, Liao R, Zhang L, Li C, Sun W. 2020a. Plate subduction, oxygen fugacity, and mineralization. *J Ocean Limnol*, 38: 64–74
- Liu J, Zhao G, Xu G, Sha D, Xiao C, Fang X, Liu F, Guo Q, Yu H. 2020b. Structural control and genesis of gold deposits in the Liaodong Peninsula, northeastern North China Craton. *Ore Geol Rev*, 125: 103672
- Liu L, Morgan J P, Xu Y, Menzies M. 2018. Craton destruction 1: Cratonic keel delamination along a weak midlithospheric discontinuity layer. *J Geophys Res Solid Earth*, 123: 10040
- Liu L, Spasojevic S, Gurnis M. 2008. Reconstructing farallon plate subduction beneath North America back to the Late Cretaceous. *Science*, 322: 934–938
- Liu L, Stegman D R. 2012. Origin of Columbia River flood basalt controlled by propagating rupture of the Farallon slab. *Nature*, 482: 386–389
- Liu S, Xia Q. 2014. Water content in the early Cretaceous lithospheric mantle beneath the south-central Taihang Mountains: Implications for the destruction of the North China Craton. *Chin Sci Bull*, 59: 1362–1365
- Ma Q, Xu Y G. 2021. Magmatic perspective on subduction of Paleo-Pacific plate and initiation of big mantle wedge in East Asia. *Earth-Sci Rev*, 213: 103473
- Ma W D, Fan H R, Liu X, Pirajno F, Hu F F, Yang K F, Yang Y H, Xu W G, Jiang P. 2017. Geochronological framework of the Xiadian gold deposit in the Jiaodong province, China: Implications for the timing of gold mineralization. *Ore Geol Rev*, 86: 196–211
- Mao J, Goldfarb R J, Zhang Z, Xu W, Qiu Y, Deng J. 2002. Gold deposits in the Xiaolinling-Xiong'er shan region, Qinling Mountains, central China. *Miner Depos*, 37: 306–325
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth. *Chem Geol*, 120: 223–253
- Meng L Q, Mao G Z, Liu X T, An P R, Cao M P, Wang X J, He T L, Song L G, Dou Y X. 2020. Geochemical studies of the Nanxiaoyao gold deposit in central Yishu fault zone, Shandong province, Eastern China. *Solid Earth Sci*, 5: 69–80
- Meng Q R, Zhang G W. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. *Geology*, 27: 123–126
- Micklethwaite S, Cox S F. 2004. Fault-segment rupture, aftershock-zone fluid flow, and mineralization. *Geology*, 32: 813–816
- 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
- Nestola F, Angel R J, Zhao J, Garrido C J, Sánchez-Vizcaino V L, Capitani G, Mellini M. 2010. Antigorite equation of state and anomalous softening at 6 GPa: An *in situ* single-crystal X-ray diffraction study. *Contrib Mineral Petrol*, 160: 33–43
- Niu Y L. 2005. Generation and evolution of basaltic magmas: Some basic concepts and a new view on the origin of Mesozoic-Cenozoic basaltic volcanism in eastern China. *Geol J China Univ*, 11: 9–46
- Niu Y, O'Hara M J. 2003. Origin of ocean island basalts: A new perspective from petrology, geochemistry, and mineral physics considerations. *J Geophys Res*, 108: 2209
- Ohtani E, Zhao D P. 2009. The role of water in the deep upper mantle and transition zone: Dehydration of stagnant slabs and its effects on the big mantle wedge. *Rus Geol Geophys*, 50: 1073–1078
- Pearson D G, Brenker F E, Nestola F, McNeill J, Nasdala L, Hutchison M T, Matveev S, Mather K, Silversmit G, Schmitz S, Vekemans B, Vincze L. 2014. Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond. *Nature*, 507: 221–224
- Perrillat J P, Daniel I, Koga K T, Reynard B, Cardon H, Crichton W A. 2005. Kinetics of antigorite dehydration: A real-time X-ray diffraction study. *Earth Planet Sci Lett*, 236: 899–913
- Qiu Y M, Groves D I, McNaughton N J, Wang L G, Zhou T H. 2002. Nature, age, and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China. *Miner Depos*, 37: 283–305
- Ringwood A E. 1991. Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 55: 2083–2110
- Schmid C, Goes S, van der Lee S, Giardini D. 2002. Fate of the Cenozoic Farallon slab from a comparison of kinematic thermal modeling with tomographic images. *Earth Planet Sci Lett*, 204: 17–32
- Schmidt M W. 1996. Experimental constraints on recycling of potassium from subducted oceanic crust. *Science*, 272: 1927–1930

- Song M C, Li S Z, Santosh M, Zhao S, Yu S, Yi P H, Cui S X, Lv G X, Xu J X, Song Y X, Zhou M L. 2015. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton. *Ore Geol Rev*, 65: 612–625
- Sun W D, Arculus R J, Kamenetsky V S, Binns R A. 2004. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization. *Nature*, 431: 975–978
- 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, Huang R F, Li H, Hu Y B, Zhang C C, Sun S J, Zhang L P, Ding X, Li C Y, Zartman R E, Ling M X. 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas. *Ore Geol Rev*, 65: 97–131
- Sun W D, Li S G, Chen Y D, Li Y J. 2002a. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, Central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie Orogenic Belt. *J Geol*, 110: 457–468
- Sun W D, Li S G, Sun Y, Zhang G W, Li Q L. 2002b. Mid-Paleozoic collision in the north Qinling: Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and their tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 21: 69–76
- Sun W D, Li S G, 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 D, Williams I S, Li S G. 2002c. Carboniferous and Triassic eclogites in the western Dabie Mountains, east-central China: Evidence for protracted convergence of the North and South China Blocks. *J Metamorph Geol*, 20: 873–886
- Sun W D, Zhang L P, Li H, Liu X. 2020a. The synchronic Cenozoic subduction initiations in the west Pacific induced by the closure of the Neo-Tethys Ocean. *Sci Bull*, 65: 2068–2071
- Sun W D, Zhang L, Liao R, Sun S, Li C, Liu H. 2020b. Plate convergence in the Indo-Pacific region. *J Ocean Limnol*, 38: 1008–1017
- Syracuse E M, van Keken P E, Abers G A, Suetsugu D, Bina C, Inoue T, Wiens D, Jellinek M. 2010. The global range of subduction zone thermal models. *Phys Earth Planet Inter*, 183: 73–90
- Thompson J F H, Sillitoe R H, Baker T, Lang J R, Mortensen J K. 1999. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. *Miner Depos*, 34: 323–334
- Tomkins A G. 2010. Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: Implications for gold deposit genesis. *Geochim Cosmochim Acta*, 74: 3246–3259
- Ulmer P, Trommsdorff V. 1995. Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism. *Science*, 268: 858–861
- van Keken P E, Hacker B R, Syracuse E M, Abers G A. 2011. Subduction factory: 4. Depth-dependent flux of H_2O from subducting slabs worldwide. *J Geophys Res*, 116: B01401
- Wang Y, He Y, Lu G, Wen L. 2020. Seismic, thermal and compositional structures of the stagnant slab in the mantle transition zone beneath southeastern China. *Tectonophysics*, 775: 228208
- Wang Y Y, Xiao Y. 2018. Fluid-controlled element transport and mineralization in subduction zones. *Solid Earth Sci*, 3: 87–104
- Wang Z L, Yang L Q, Guo L N, Marsh E, Wang J P, Liu Y, 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
- Wei S S, Wiens D A, van Keken P E, Cai C. 2017. Slab temperature controls on the Tonga double seismic zone and slab mantle dehydration. *Sci Adv*, 3: e1601755
- 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
- Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, Wilde S A, Yang J H. 2007. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China. *J Asian Earth Sci*, 30: 542–556
- Wu K, Ling M X, Sun W D, Guo J, Zhang C C. 2017. Major transition of continental basalts in the Early Cretaceous: Implications for the destruction of the North China Craton. *Chem Geol*, 470: 93–106
- Xia Q K, Liu J, Liu S C, Kovács I, Feng M, Dang L. 2013. High water content in Mesozoic primitive basalts of the North China Craton and implications on the destruction of cratonic mantle lithosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 361: 85–97
- Xiao W, Windley B F, Hao J, Zhai M. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22: 1069
- Xiong X L, Adam J, Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chem Geol*, 218: 339–359
- 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
- Yamamoto K, Akimoto S. 1977. The system $\text{MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ at high pressures and temperatures—Stability field for hydroxyl-chondrodite, hydroxyl-clinohumite and $10\text{\AA}$ -phase. *Am J Sci*, 277: 288–312
- 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 K F, Jiang P, Fan H R, Zuo Y B, Yang Y H. 2018. Tectonic transition from a compressional to extensional metallogenic environment at ~ 120 Ma revealed in the Hushan gold deposit,

- Jiaodong, North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 160: 408–425
- Yang L, Deng J, Guo C, Zhang J, Jiang S, Gao B, Gong Q, Wang Q. 2009. Ore-Forming fluid characteristics of the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Gold Province, China. *Resour Geol*, 59: 181–193
- Yang W, Teng F Z, Zhang H F, Li S G. 2012. Magnesium isotopic systematics of continental basalts from the North China craton: Implications for tracing subducted carbonate in the mantle. *Chem Geol*, 328: 185–194
- Zhai M, Zhu X, Zhou Y, Zhao L, Zhou L. 2020. Continental crustal evolution and synchronous metallogeny through time in the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 194: 104169
- Zhang L, Weinberg R F, Yang L Q, Groves D I, Sai S X, Matchan E, Phillips D, Kohn B P, Miggins D P, Liu Y, Deng J. 2020a. Mesozoic orogenic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: A focused event at 120 ± 2 Ma during cooling of pregold granite intrusions. *Econ Geol*, 115: 415–441
- Zhang Z K, Ling M X, Lin W, Sun M, Sun W. 2020b. “Yanshanian Movement” induced by the westward subduction of the paleo-Pacific plate. *Solid Earth Sci*, 5: 103–114
- Zhang Z, Ling M, Zhang L, Sun S, Sun W. 2020c. High oxygen fugacity magma: Implication for the destruction of the North China Craton. *Acta Geochim*, 39: 161–171
- Zhao D, Tian Y, Lei J, Liu L, Zheng S. 2009. Seismic image and origin of the Changbai intraplate volcano in East Asia: Role of big mantle wedge above the stagnant Pacific slab. *Phys Earth Planet Inter*, 173: 197–206
- Zheng Y, Mao J, Chen Y, Sun W, Ni P, Yang X. 2019. Hydrothermal ore deposits in collisional orogens. *Sci Bull*, 64: 205–212
- Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G. 2013. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Res*, 23: 1189–1206
- Zhou T, Lü G. 2000. Tectonics, granitoids and mesozoic gold deposits in East Shandong, China. *Ore Geol Rev*, 16: 71–90
- Zhu R, Zhang H, Zhu G, Meng Q, Fan H, Yang J, Wu F, Zhang Z, Zheng T. 2017. Craton destruction and related resources. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 106: 2233–2257

(责任编辑: 郑永飞)