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

冯亚洲^{1,2}, 杨进辉^{1,2,3*}, 孙金凤², 张吉衡²

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

3. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029

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

收稿日期: 2019-09-12; 收修改稿日期: 2019-12-12; 接受日期: 2019-12-13; 网络版发表日期: 2020-02-28

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

摘要 华北克拉通破坏与古太平洋板块俯冲密切相关是当今学界的重要共识, 但缺乏华北克拉通破坏峰期古太平洋板块俯冲的物质证据. 为解决这一问题, 本文对华北克拉通东北缘(辽东-吉南地区)中生代火山岩开展了详细的岩石学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素、全岩地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究. 研究发现, 辽东-吉南地区中生代火山岩主要为玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩和安山岩组合, 形成于早白垩世(129~124Ma), 均富集大离子亲石元素(Rb、Sr、Ba、Th等)和轻稀土元素、亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti等), 表明其来源于与俯冲相关的地幔源区. 这些岩石具有不均一的同位素组成, 其中, 碱性玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩具有富集的全岩 Sr-Nd-Hf、锆石 Hf 同位素组成和与地幔类似的锆石 O 同位素, 表明其母岩浆来源于同位素富集的岩石圈地幔的低程度部分熔融, 而钙碱性安山岩则具有相对亏损的同位素组成(锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 高达 +5.2)和高的锆石 O 同位素组成($\delta^{18}\text{O}=+8.1\sim+9.0\text{‰}$), 揭示它们来源于遭受俯冲流体/熔体交代的地幔源区, 交代介质来源于俯冲到深部的低温热液蚀变洋壳. 辽东-吉南地区早白垩世火山岩是由来源于富集地幔和交代地幔的两种不同性质的岩浆混合形成, 利用锆石 Hf-O 同位素组成有效识别出的低温热液蚀变洋壳组分, 为中生代古太平洋板块俯冲对华北克拉通破坏影响提供了确凿的物质记录和同位素证据.

关键词 华北克拉通, 早白垩世火山岩, 锆石 Hf-O 同位素, 古太平洋板块俯冲

1 引言

克拉通是岩石圈中稳定的构造单元, 因为其通常具有巨厚的低温、低密度、低含水量、难熔的岩石圈根, 而呈刚性板块漂浮于软流圈之上(Peslier等,

2010; Lee等, 2011). 华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一, 自古元古代克拉通化之后至中生代之前一直保持稳定, 但自中生代以来克拉通东部发生了破坏, 并伴随着大规模岩浆-构造活动(Fan等, 2000; Gao等, 2002; Yang等, 2003). 尽管华东北部广泛发育的中生

中文引用格式: 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, doi: 10.1360/SSTe-2019-0210

英文引用格式: Feng Y, Yang J, Sun J, Zhang J. 2020. Material records for Mesozoic destruction of the North China Craton by subduction of the Paleo-Pacific slab. Science China Earth Sciences, 63: 690–700, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9564-4>

代NE-NNE向伸展盆地和变质核杂岩(Zhu G等, 2012; Dong等, 2015)、侏罗纪-早白垩世强烈的岩浆活动及岩浆作用的时空分布特征(Wu等, 2005a, 2005b, 2019; 郑永飞等, 2018)和太平洋板块层析成像结果(Li和van der Hilst, 2010)等多学科资料揭示, 古太平洋板块俯冲是华北克拉通破坏的主要诱因。但是, 目前仍缺少华北克拉通破坏峰期古太平洋板块俯冲的直接物质证据。

洋壳在俯冲过程中必然会释放熔体/流体, 交代、改造上覆地幔, 同时交代作用导致地幔熔点降低、发生部分熔融, 形成幔源岩浆。因此, 对华北东部岩石圈地幔和幔源岩浆岩的研究有可能发现古太平洋板块俯冲的直接物质证据。近年来地幔包体及幔源岩浆研究表明, 以~121Ma为界, 基性岩的性质由古老的岛弧型玄武岩类型转变为新生的洋岛型玄武岩类型(郑永飞等, 2018), 岩石圈地幔性质发生了转变(Yang J H等, 2010; Dai等, 2016; Wu等, 2019), 且金属稳定同位素的研究发现华北东部中生代玄武岩在106Ma左右 $\delta^{26}\text{Mg}$ 明显变低(李曙光和汪洋, 2018), 其被解释为是洋壳俯冲、脱水或部分熔融形成的流体/熔体交代上覆地幔形成大地幔楔, 但这一物质记录明显晚于克拉通破坏时间(晚三叠世-早白垩世, 峰期在早白垩世)(Yang J H等, 2008, 2012a; Zhu R X等, 2012; Wu等, 2019)。由于岩浆演化过程的复杂性, 如同化混染、分离结晶和后期蚀变等过程对全岩成分的改变, 全岩地球化学特征和同位素组成很难有效示踪火山岩的岩浆源区。锆石是岩浆岩中常见的副矿物, 尤其Zr在 $(\text{K}+\text{Na})/\text{Al}<1$ 的岩浆岩中很容易达到饱和而结晶(Boehnke等, 2013), 且结晶后不受后期蚀变作用的影响(Valley等, 1994)。锆石的Hf-O同位素已广泛用来示踪岩浆源区和成岩过程(Yang等, 2007d; Zhu等, 2017), 且大洋岩石圈与海水的相互作用致使不同层位岩石具有差异的O同位素组成(Eiler, 2001), 锆石Hf-O同位素可有效示踪交代上覆地幔的俯冲洋壳物质属性。

本文以辽东-吉南地区广泛分布的中生代火山岩为研究对象, 在详细野外地质、岩石学和全岩地球化学研究基础上, 进行了系统的锆石U-Pb年龄和Hf-O同位素分析, 以揭示火山岩的岩浆源区、地幔交代过程和交代介质属性, 进而寻找古太平洋板块俯冲在中生代俯冲的直接物质记录。

2 地质背景和岩相学

华北克拉通位于中国东部, 北邻中亚造山带, 南部以秦岭-大别-苏鲁造山带为界与华南陆块相邻(图1a)。它由东部和西部陆块于~1.85Ga时发生碰撞拼贴而成(Zhao等, 2001; Zheng等, 2013)。辽东半岛位于华北克拉通东部(图1a), 其北部鞍山地区出露3.8~3.2Ga早太古代基底岩石(Liu等, 1992; Wu等, 2008)。古元古代辽河群沉积于~1.93Ga并经历了明显的变质作用, 被认为是华北克拉通东部地块克拉通化的标志(Xie等, 2011)。之后, 辽东半岛经历了中元古代-古生代漫长的稳定沉积过程, 直到中生代时期, 辽东半岛出现了大规模的岩浆活动和构造作用, 其中岩浆活动主要分为三期: (1) 三叠纪辉绿岩、闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩和少量的霞石正长岩(224~210Ma; Yang等, 2007a, 2007c, 2012a), 形成于华南陆块和华北克拉通俯冲碰撞后的后造山伸展时期; (2) 侏罗纪(180~156Ma)闪长岩、英云闪长岩、花岗岩和少量的基性岩脉(Jiang等, 2005; Wu等, 2005b), 是古太平洋板块俯冲的间接产物; (3) 早白垩世(131~110Ma)基性到酸性的火山岩和侵入岩, 来源于软流圈地幔、岩石圈地幔和下地壳, 虽然前人认为当时地幔中含有大量的水, 水来源于俯冲古太平洋板块, 但未识别出古太平洋板块俯冲的物质记录(吴福元等, 2005; Wu等, 2005a; Ma等, 2016; Pang等, 2015)。其中, 早白垩世岩浆作用分布最广, 与广泛发育的伸展盆地和变质核杂岩同期(Yang等, 2007b; Zhu G等, 2012), 标志着克拉通破坏的峰期时间(Wu等, 2005a; 郑永飞等, 2018)。同时, 辽东半岛广泛发育着火山岩, 大多为早白垩世和新生代(80~36Ma)(Wang等, 2007; Kuang等, 2012), 侏罗纪火山岩鲜有分布。本次报道的火山岩样品采集于辽东-吉南地区中生代伸展盆地不同层位中(图1b), 岩石类型主要包括玄武粗安岩、安山岩、粗安岩和粗面岩等。

粗面岩(18JF24、25)采集于新宾东部盆地的干沟组中, 斑晶为钠长石, 粒径1~2mm, 蚀变严重(图2a)。粗安岩(18JF44)采集于桓仁东部盆地的小岭组中, 斑晶为斜长石, 在显微镜下斜长石斑晶可分为两组: 一组粒径~1mm, 另一组粒径~3mm, 经历了碳酸盐化。在野外肉红色长英质火山集块被包裹在粗安岩中, 界面呈流动状(图2b、d)。粗面岩(18JF21)采集于新宾东部盆地中的果松组, 斑晶以长石(70%)和暗化角闪石、黑

图 1 华北克拉通构造简图(a)、研究区地质简图和采样点分布图(b)

(a) 据Yang J H等(2010)修改

图 2 辽东-吉南早白垩世火山岩野外和薄片显微照片

(a) 果松组粗面岩, 样品18JF24; (b) 小岭组粗安岩, 样品18JF44; (c) 果松组粗面岩, 样品18JF21; (d) 小岭组粗安岩, 样品18JF44

云母(30%)为主, 长石主要为钠长石(如图2c)。粗面岩(18JF10、11)采集于新宾周围盆地的侯家屯组中, 斑晶为钠长石, 粒径1~1.5mm, 蚀变严重。玄武粗安岩(18JF13、14)采集于新宾东部盆地中的果松组中, 斑

晶为正长石, 粒径10~30mm, 蚀变严重。

3 分析方法

全岩主微量元素、Sr-Nd-Hf同位素、锆石阴极发光图像(CL)、U-Pb定年和Hf-O同位素分析均在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完成(数据见网络版附表1~5, <http://earthcn.sci-china.com>)。全岩主量测试利用X射线荧光光谱(XRF)玻璃熔片分析法, 所用仪器为顺序式X射线荧光光谱仪(AXIOS Minerals), 准确度为0.1~1%。全岩微量元素采用混合酸溶样法, 利用Aglient 7500a型四级杆电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测试, 详细流程见柳小明(2004)。全岩Sr-Nd-Hf同位素利用Neptune型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)测定, 详细的同位素分离流程和所使用的测定、数据处理方法见文献(杨岳衡等, 2005, 2007a, 2007b; Yang Y H等, 2010)。本次微量元素和同位素测量过程中使用的标准物质包括RGM-2、BHVO-2、GSR-2、RGM-1, 微量元素分

析精度高于5%, 同位素误差均小于0.005%。

锆石U-Pb定年仪器为Cameca IMS-1280HR型二次离子质谱(SIMS), U-Th-Pb同位素比值用标准样品Plé-sovice校正, 以标准Qinghu样品(Li等, 2013)作为未知样, 检测测量流程的稳定性和精确度, 分析流程详见Li等(2009), 同位素比值及年龄误差均为 1σ , 采用ISOPLLOT软件进行数据处理和年龄计算(Ludwig, 2001)。锆石原位微区O同位素分析使用仪器为Cameca IMS-1280型二次离子探针(SIMS), 详细分析流程参见李献华等(2009)和Li等(2010)。锆石原位微区Hf同位素分析仪器为Neptune型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS), 分析方法和步骤参照Wu等(2006)。测试过程中使用Mud Tank和GJ-1双重外标来检测仪器漂移, 它们的同位素比值和溶液推荐值在误差范围内一致(Woodhead和Herget, 2005; Zeh等, 2007)(数据见网络版附表5)。

4 分析结果

4.1 锆石U-Pb年龄

果松组粗面岩(18JF21)和干沟组粗面岩(18JF24)

中的锆石呈短柱状, 粒径50~200 μm , 大部分锆石都具有震荡环带, Th/U比值为0.53~2.32, 属于典型的岩浆锆石。对这两个样品分别进行了20和22个锆石点分析, 每个分析点均落在谐和线上(图3), 计算所得U-Pb谐和年龄分别为 $(124\pm 1)\text{Ma}$ (MSWD=0.67, $n=20$)和 $(126\pm 1)\text{Ma}$ (MSWD=1.12, $n=22$), 在误差范围内与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄一致, 说明这两个组火山岩属于同一期岩浆作用。小岭组粗安岩(18JF44)和侯家屯组的粗面岩(18JF10)中的锆石呈长柱状, 粒径在50~200 μm , 具有清晰的震荡环带, Th/U比值为0.32~0.64, 属于典型的岩浆锆石。两个样品24和25个锆石分析结果表明, 它们的U-Pb谐和年龄分别为 $(129\pm 1)\text{Ma}$ (MSWD=0.88, $n=24$)和 $(129\pm 1)\text{Ma}$ (MSWD=1.3, $n=25$), 在误差范围内与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄一致, 为二期岩浆作用, 代表小岭组火山岩的结晶年龄(图3)。

4.2 全岩地球化学特征与Sr-Nd-Hf同位素组成

辽东-吉南地区早白垩世(129~124Ma)火山岩岩石类型主要包括玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩和安山岩, 分别为碱性或亚碱性系列岩石(图4a)。碱性系列玄武

图3 辽东-吉南早白垩世火山岩中锆石的CL图像和SIMS U-Pb年龄

图4 辽东-吉南早白垩世火山岩TAS(a)和 SiO_2 - K_2O (b)图解

黄色区域粗安岩数据引自裴福萍(2005), 属于玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩系列. (a) 据Le Maitre(2002); (b) 据Rickwood(1989)

粗安岩-粗安岩-粗面岩系列火山岩为一套中基性岩向酸性岩演化的岩石, 包含本次研究所采集的果松组玄武粗安岩、粗面岩样品和裴福萍(2005)发表的果松组粗安岩样品(TH9-2、TH8-25、TH8-36), 它们 SiO_2 和 MgO 等主量元素变化范围较大, 分别为51.5~66.2wt.%和0.14~3.16wt.%, 富碱, 全碱量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)为8.16~11.2wt.%, 在Harker图解上, SiO_2 和 MgO 、 P_2O_5 、 TiO_2 、 TFe_2O_3 具有良好的线性关系. 这些岩石富集轻稀土元素(LREEs), 相对亏损重稀土元素(HREEs), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{CN}}=15.8\sim25.4$, 具有正Eu异常或无异常(图5a). 在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图5b), 它们富集大离子亲石元素(LILEs), 如Rb、Ba、Th、U, 亏损高场强元素(HFSEs), 具有明显的Nb、Ta、Ti、P等负异常. 它们具有较高的初始Sr同位素组成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i=0.7067\sim0.7080$)和富集的且变化范围较大的全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-7.5~-4.5)和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (-8.4~-0.9)值, Nd和Hf的模式年龄较老, 分别为1292~1535Ma和1233~1706Ma(Blichert-

Toft和Albarède, 1997; Griffin等, 2000; Söderlund等, 2004)(图6, 附表3). 在Sr-Nd同位素相关图上(图6a), 落在华北克拉通东部古生代(中奥陶世)金伯利岩中地幔包体范围之内(Zhang和Yang, 2007; Zhang等, 2008; Yang等, 2009), 而明显区别于华北克拉通上地壳、下地壳(Jahn等, 1999). 它们的Nd和Hf同位素相对耦合, 位于地幔演化线上(图6c).

与玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩相比, 早白垩世安山岩具有中性的成分, 其 SiO_2 为52.9~55.5wt.%, 具有中等含量的 MgO (2.17~2.77wt.%)、 TFe_2O_3 (1.70~6.24wt.%)和 CaO (3.15~8.17wt.%), 高的 $\text{Mg}^\#$ 值(0.41~0.51)和低的全碱含量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=5.99\sim7.26\text{wt.}\%$)(图4a和4b). 它们富集LREEs, HREEs含量低, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{CN}}=13.3\sim16.3$, 无明显的Eu异常(图5a). 在原始地幔标准化蛛网图上(图5b), 这些安山岩富集LILEs, 亏损HFSEs, 具有明显的Nb、Ta、P等负异常. 它们虽然具有高的初始Sr同位素组成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i=0.7062\sim0.7088$), 但具有

图5 辽东-吉南地区早白垩世火山岩稀土元素球粒陨石标准化(a)和原始地幔标准化(b)微量元素蛛网图

球粒陨石和原始地幔的数据引自Sun和McDonough(1989)

相对亏损全岩Nd和Hf同位素组成($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = (-2.95 \sim -0.46)$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = (-3.10 \sim 3.74)$)和年轻的模式年龄(940~1373Ma)。在Sr-Nd同位素相对图上, 它们位于华

图6 辽东-吉南早白垩世火山岩全岩Sr-Nd-Hf同位素组成。新生代玄武岩中的地幔捕掳体数据引自Yang J H等(2010), 岩石圈地幔引自古生代金伯利岩中地幔包体(Zhang和Yang, 2007; Zhang等, 2008; Yang等, 2009), MORB和OIB数据引自Zindler和Hart(1986)

北古生代金伯利岩中地幔包体范围之上(图6a)。

4.3 锆石Hf-O同位素组成

本次研究共选取了4个火山岩样品中锆石进行原位Hf-O同位素分析, 分析结果见附表4和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $\delta^{18}\text{O}$ 图(图7)。为了进行对比, 图中展示了部分相关地质端元, 如低温蚀变洋壳(Eiler, 2001)、亏损地幔和华北古老岩石圈地幔、新生(三叠纪)岩石圈地幔和古老大陆地壳(Yang J H等, 2012a)。

碱性玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩系列中两件粗面岩样品43颗锆石Hf-O同位素分析结果显示, 它们具有均一的、负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-11.1 \sim -7.0$)和古老的锆石Hf模式年龄(1621~1881Ma), 与样品的全岩Nd和Hf模式年龄相同, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $+4.8 \sim +5.8\text{‰}$, 与地幔O同位素值相同(图7)。

亚碱性粗安-安山岩中粗安岩(18JF44)中锆石具有亏损的Hf同位素($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 1.07 \sim 5.21$)和年轻的Hf模式年龄(846~1110Ma), 它们具有高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值($+8.1 \sim +9.0\text{‰}$); 而另外一个亚碱性粗面岩样品(18JF10)中锆石具有富集的Hf同位素组成($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -3.64 \sim -1.04$)和较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值($+7.1 \sim +8.3\text{‰}$), 明显介于玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩和安山岩中锆石Hf-O同位素之间(图7)。

5 辽东-吉南地区早白垩世火山岩岩浆源区与岩石成因

辽东-吉南地区早白垩世火山岩虽然具有相似的

图7 辽东-吉南地区早白垩世火山岩中锆石Hf-O同位素组成

低温蚀变洋壳引自Eiler(2001), 古老大陆地壳和富集地幔引自郑建平(1999)、Eiler(2001)和Yang等(2008), 三叠纪新生岩石圈地幔引自Yang等(2012a)

喷发年龄(129~124Ma), 但分别属于碱性和亚碱性系列岩石, 且具有不同的地球化学特征、全岩Sr-Nd-Hf同位素组成和锆石Hf-O同位素组成, 表明它们来源于不同的岩浆源区或者经历了差异的岩石成因过程. 根据这些特征和同位素组成, 这些火山岩至少来源于两个不同性质的岩浆源区, 分别是玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩为代表岩石的同位素富集的源区($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i \geq 0.708$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) \leq -7.5$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) \leq -8.4$, 锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 为地幔值)和安山岩为代表岩石的Nd-Hf同位素亏损但Sr-O同位素富集的源区($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i \geq 0.709$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) \geq -0.5$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) \geq 3.7$, 锆石 $\delta^{18}\text{O} \geq +9\text{‰}$).

5.1 碱性玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩的源区及成因

碱性玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩系列岩石受到蚀变作用相对较弱, 其地球化学特征基本上代表了新鲜岩石的组成. 除了小岭组两块粗面岩样品(18JF10和18JF11)外, 果松组火山岩是一套典型的中基性向酸性岩演化的序列, 且具有相对均一的全岩Sr-Nd-Hf同位素组成(附表3)和锆石Hf-O同位素组成(附表4), 表明它们来源于同一源区. 这套岩石属于碱性系列岩石, 上升速度快, 单个样品中Hf-O同位素组成均一, 具有相同的全岩和锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 且未发现继承锆石, 表明这套岩石遭受地壳混染程度低. 这些样品具有较大范围的MgO、TiO₂、P₂O₅、TF₂O₃和SiO₂, 且在Harker图解上有明显的相关关系, 表明它们经历了分离结晶作用, 其成分不能代表原始母岩浆的组成. 我们选取这一组岩石中低SiO₂的样品(18JF13和18JF14)近似代表母岩浆成分, 用以讨论源区特征. 它们属于碱性岩系列岩石, 具有高的全碱含量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} > 8.1\text{wt.}\%$)和中等含量的MgO($\sim 3.16\text{wt.}\%$), 表明它们的母岩浆来源于地幔源区. 它们富集大离子亲石元素、亏损高场强元素(HFSEs), 具有明显的Nb、Ta、Ti、P等负异常, 揭示了源区经历了俯冲板块流体或熔体的交代作用(Kepzhinskas等, 1997). 但是, 这套岩石具有高的全岩初始Sr同位素组成($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7067 \sim 0.7080$)和负的全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-7.5 \sim -5.5$)和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($-8.4 \sim -3.4$)值, Nd和Hf模式年龄较老($> 1.2\text{Ga}$), 与华北东部古生代金伯利岩中地幔包体的全岩Sr-Nd同位素相同(郑建平, 1999), 表明它们来源于古老岩石圈地幔. 样品中锆石的O同位素与地幔值相同($\delta^{18}\text{O} = +4.8 \sim +5.8\text{‰}$), 根据地幔交代过程O同位素平衡计算结果, 地幔交代事件发生在母岩

浆形成之前, 且可能多期次交代(郑永飞等, 2018). 综合以上得出, 辽东-吉南地区早白垩世碱性玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩系列火山岩来源于古老富集的岩石圈地幔.

玄武粗安岩具有高Al₂O₃, 表明参与源区部分熔融的矿物主要为辉石(Foley, 1992). 它们属于钾玄岩系列岩石, K₂O含量高, 且中基性岩石具有低的Rb/Sr(0.03~0.06)和高的Ba/Rb(9.0~24), 表明其源区中富钾矿物为角闪石, 而不是金云母, 因为金云母参与熔融的熔体具有高Rb/Sr和低Ba/Rb的特征(Furman和Graham, 1999). 碱性玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩系列岩石明显富集轻稀土元素, 轻、重稀土元素分馏显著, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{CN}} = 15.8 \sim 25.4$, 表明其母岩浆来源于高压下低程度部分熔融作用. 结合华北克拉通古老岩石圈地幔主要岩石组成为方辉橄榄岩和纯橄岩的事实(Menzies等, 1993; Griffin等, 1998; 郑建平, 1999; Xu, 2001; Gao等, 2002), 我们认为玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩系列岩石来源于含角闪石、辉石的同位素富集的、难熔的岩石圈地幔高压下低程度部分熔融, 其中, 角闪石和辉石优先熔融. 形成角闪石、辉石的地幔交代作用发生在岩浆产生之前, 且岩浆形成后经历了不同程度辉石、角闪石、Fe-Ti氧化物和磷灰石的分离结晶作用.

5.2 亚碱性粗安岩-安山岩的源区及成因

亚碱性安山岩、粗安岩(18JF44和18JF45)具有低的SiO₂含量(52.9~55.5wt.%)和高的Mg[#](0.41~0.51)值, 指示它们为来源于地幔源区的岩浆. 但与地幔橄榄岩平衡的幔源岩浆相比, 它们的MgO、TF₂O₃和CaO相对低, 表明它们可能经历了分离结晶或地壳混染. 另外, 高的烧失量(LOI=6.49~9.77)和碳酸盐化现象(图2d)表明粗安岩和安山岩经历了强烈的后期蚀变作用, 可能导致碱含量降低而CaO含量升高. 它们富集LREEs, 亏损Nb、Ta、P、Ti等HFSEs, 总体上与岛弧安山岩地球化学特征相似(Gill, 1981), 指示它们可能来源于俯冲板块来源的熔体/流体交代形成的富辉石的岩石圈地幔(Yang J H等, 2012b; Zhu等, 2016; 郑永飞等, 2018).

复杂的岩浆演化和后期蚀变作用导致它们的全岩地球化学和同位素数据无法示踪真实的地幔源区性质, 也很难准确示踪交代物质的来源, 因此, 早期结晶矿物(如锆石)的同位素组成便成为我们示踪源区性质

的可靠手段。亚碱性粗安-安山岩的 $(\text{Na}+\text{K})/\text{Al}<1$, 实验岩石学结果(Gervasoni等, 2016)显示在非过碱质岩石中, Zr达到饱和时需要的Zr浓度低, 锆石通常结晶于岩浆演化早期, 且锆石抗后期蚀变能力强, 其Hf-O同位素可有效揭示火山岩的源区性质(Zhu等, 2017)。粗安岩中锆石具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(1.07~5.21)和高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(+8.1~+9.0‰), 代表了火山岩岩浆地幔源区的Hf-O同位素组成。

华北克拉通强烈破坏之前, 其岩石圈地幔是古老的、同位素富集的(郑建平, 1999), 明显与安山岩的同位素组成不同, 因此, 在安山岩岩浆形成过程中, 岩石圈地幔经历了强烈的地幔交代作用。安山岩中锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为+8.1~+9.0‰, 明显高于地幔值(+5.3±0.3)‰(Mattey等, 1994; Valley等, 1994)。大陆地壳岩石通常具有高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(可高达+30‰; Eiler, 2001), 但安山岩中锆石具有亏损Hf同位素特征, 华北克拉通作为古老大陆, 如果是大陆物质再循环交代岩石圈地幔, 形成的岩浆源区应该具有富集的Hf同位素组成和高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(Zhu等, 2017), 这显然与本文数据结果不符。前人对蛇绿岩或大洋洋壳的同位素研究表明, 大洋地壳形成过程中通常与海水进行水岩相互作用, 大洋上地壳(玄武岩和沉积物)由于低温蚀变作用而导致O同位素升高, 可高达+15~+25‰(Eiler, 2001), 而大洋下地壳(辉绿岩或辉长岩)的高温热液蚀变作用会降低 $\delta^{18}\text{O}$ 值(Gregory和Taylor, 1981), 并且洋壳通常具有类似于亏损地幔的Sr-Nd-Hf同位素组成(Zindler和Hart, 1986), 因此, 交代介质可能为低温热液蚀变的玄武岩和沉积物。然而, 深海沉积物中通常含大量锆石, 它的加入会导致地幔源区Nd-Hf同位素体系解耦, 但在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 相关图上(图6c)亚碱性粗面岩-安山岩未出现Nd-Hf同位素解耦现象。由此推断, 安山岩来源于受蚀变洋壳玄武岩熔体交代的岩石圈地幔(图7)。鉴于在地幔深度高温条件下, 交代熔体和岩石圈地幔相互作用, 达到O同位素平衡所需要的时间很短(Zhang J J等, 2009; Zheng和Fu, 1998; Zheng, 2012), 因此, 地幔交代应发生在岩浆产生前的1Ma之内或者同期。综上所述, 亚碱性粗安-安山岩来源于经历了俯冲低温热液蚀变玄武岩脱水或者发生部分熔融形成的熔体或流体交代的岩石圈地幔。小岭组另外两个粗面岩样品(18JF10和18JF11)具有过渡的全岩Sr-Nd-Hf同位素和锆石Hf-O同位素组成(图6和7), 可能是碱性玄武粗安岩和亚碱性安山岩两种不同

性质的母岩浆通过岩浆混合、分离结晶形成。

岩石学、全岩地球化学和Sr-Nd-Hf同位素、锆石Hf-O同位素研究表明, 辽东-吉南地区早白垩世火山岩是来源于古老富集岩石圈地幔和俯冲低温热液蚀变洋壳来源的熔体交代后的岩石圈地幔, 是两种不同性质的岩浆通过岩浆混合、分离结晶形成。

6 古太平洋板块俯冲对岩石圈地幔改造的物质记录

华北克拉通中生代期间发生了强烈的去克拉通化作用(Yang J H等, 2008, 2010; Wu等, 2019), 其岩石圈地幔的性质和厚度发生了转变(Menzies等, 1993; Griffin等, 1998; Xu, 2001; Zhang H F等, 2002, 2008; 郑永飞等, 2018), 并伴生强烈岩浆活动(吴福元等, 2005)、构造作用及变质核杂岩和拉分盆地的形成(Meng, 2003; Yang等, 2007b; Zhu等, 2010)。近年来的研究表明, 华北克拉通破坏主要发生在中生代(Yang J H等, 2008, 2010), 破坏的峰期时间为早白垩世(Zhu R X等, 2012; 郑永飞等, 2018; Wu等, 2019)。详细的构造解析和伸展盆地-变质核杂岩的展布规律(董树文等, 2007; Yang等, 2007b; Zhang Y Q等, 2010; Zhu等, 2010)、华北东部岩浆岩时空迁移特征(Wu等, 2019)、地球物理资料(朱日祥等, 2015)等的研究表明, 控制华北克拉通破坏的一级控制因素和动力学机制是古太平洋板块俯冲, 正是古太平洋板块俯冲诱发化学-热侵蚀(Menzies等, 1993; Xu, 2001)、熔体交代与地幔性质转变(Zhang H F等, 2002, 2008)和岩石圈拆沉作用(Gao等, 2004)导致克拉通失去稳定性。前人研究分别识别出来源于拆沉下地壳(Gao等, 2004, 2008; Yang D B等, 2012)、华南陆块(Zhang H F等, 2002; Xu等, 2004)和软流圈地幔(Zhang H F等, 2009)的熔体对岩石圈地幔改造物质记录, 但在华北东部最早发现有显著洋壳物质加入源区的岩浆岩是90Ma之后(Xu等, 2012; Xu, 2014), 李曙光和汪洋(2018)利用Mg同位素识别出洋壳物质参与成岩的玄武岩形成于106Ma, 均明显晚于克拉通破坏的峰期时间。因此, 从物质成分角度, 仍缺乏古太平洋板块俯冲与华北克拉通中生代破坏的直接物质证据。

本次研究结果显示, 辽东-吉南地区晚中生代火山岩主要形成于129~124Ma, 与克拉通破坏峰期时间相

同(Zhu R X等, 2012; Wu等, 2019). 全岩地球化学特征和Sr-Nd-Hf同位素、锆石Hf-O同位素研究表明, 这些火山岩分别来源于古老富集岩石圈地幔和俯冲低温热液蚀变洋壳物质交代的岩石圈地幔, 是两种不同性质的岩浆通过岩浆混合、分离结晶形成, 其中值得重视的是, 锆石Hf-O同位素有效识别出低温热液蚀变玄武岩参与了早白垩世火山岩的成岩作用. 前人研究表明, 华北自古生代以来发生了一系列重大构造事件——古亚洲洋的闭合和西伯利亚-华北两大克拉通的拼合、早三叠世华北-华南陆块拼合-碰撞造山和古太平洋板块的俯冲作用(Okay和Şengör, 1992; Zheng等, 2013), 但鉴于古亚洲洋闭合与华南-华北碰撞时间主要发生于古生代-早中生代, 明显老于辽东-吉南地区早白垩世火山岩. 再者, 来自于交代地幔源区的早白垩世安山岩中锆石具有高的O同位素组成, 在地幔深度的流体/熔体交代过程中交代介质与地幔O同位素平衡速率很快(Zhang J J等, 2009; Zheng, 2012), 交代介质只能来源于正在俯冲的古太平洋板块. Wu等(2019)和郑永飞等(2018)的研究均指出, 古太平洋板片的俯冲是导致华北克拉通破坏的一级地球动力学控制因素, 自早侏罗世开始, 古太平洋板片的俯冲、脱水改变上覆岩石圈地幔, 但破坏的峰期是早白垩世, 可能是由早白垩世板片回撤、岩石圈拆沉等作用引起的, 拆沉的低温热液蚀变洋壳在软流圈中被加热发生部分熔融, 形成的熔体交代岩石圈地幔, 同时形成本文发现的具有亏损Hf同位素和高 $\delta^{18}\text{O}$ 的岩浆岩. 如果这一推论合理, 本次研究工作识别出早白垩世期间对华北克拉通岩石圈地幔改造的古太平洋板块俯冲物质, 为古太平洋板块俯冲导致克拉通破坏这一推论提供了直接的物质证据.

致谢 感谢主编和两位匿名审稿专家提出的建设性意见, 感谢中国科学院地质与地球物理研究所MC-ICPMS实验室杨岳衡研究员、离子探针实验室李秋立研究员在锆石U-Pb年龄和Hf-O同位素分析过程中的帮助.

参考文献

- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81: 1449–1461
- 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
- 李献华, 李武显, 王选策, 李秋立, 刘宇, 唐国强. 2009. 幔源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用: 锆石原位Hf-O同位素制约. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 872–887
- 柳小明. 2004. 华北克拉通中生代壳幔交换作用的地球化学研究. 博士学位论文. 西安: 西北大学. 1–96
- 裴福萍. 2005. 吉南地区中生代火山岩的岩石学和地球化学特征. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学. 1–68
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. 高校地质学报, 11: 305–317
- 杨岳衡, 张宏福, 刘颖, 谢烈文, 祁昌实, 涂湘林. 2007a. 地质样品的一次阴离子色谱法Hf分离及其MC-ICP-MS分析. 岩石学报, 23: 227–232
- 杨岳衡, 张宏福, 吴福元, 谢烈文, 张艳斌. 2005. Neptune多接收等离子体质谱精确测定锆同位素组成. 质谱学报, 26: 215–221
- 杨岳衡, 张宏福, 谢烈文, 吴福元. 2007b. 多接收器电感耦合等离子体质谱精确测定钽同位素组成. 分析化学, 35: 71–74
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社. 126
- 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
- Blichert-Toft J, Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet Sci Lett*, 148: 243–258
- Boehnke P, Watson E B, Trail D, Harrison T M, Schmitt A K. 2013. Zircon saturation re-revisited. *Chem Geol*, 351: 324–334
- 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
- Dong S W, Zhang Y Q, Zhang F Q, Cui J J, Chen X H, Zhang S H, Huang S Q. 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
- Eiler J M. 2001. Oxygen isotope variations of basaltic lavas and upper mantle rocks. *Rev Mineral Geochem*, 43: 319–364
- Fan W M, Zhang H F, Baker J, Jarvis K E, Mason P R D, Menzies M A. 2000. On and off the North China Craton: Where is the Archaean Keel? *J Petrol*, 41: 933–950
- Foley S F. 1992. Vein-plus-wall-rock melting mechanisms in the lithosphere and the origin of potassic alkaline magmas. *Lithos*, 28: 435–453
- Furman T, Graham D. 1999. Erosion of lithospheric mantle beneath the

- East African Rift system: Geochemical evidence from the Kivu volcanic province. *Lithos*, 48: 237–262
- Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, McDonough W F, Liu Y S. 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth Planet Sci Lett*, 198: 307–322
- Gao S, Rudnick R L, Xu W L, Yuan H L, Liu Y S, Walker R J, Puchtel I S, Liu X, 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
- Gervasoni F, Klemme S, Rocha-Júnior E R V, Berndt J. 2016. Zircon saturation in silicate melts: A new and improved model for aluminous and alkaline melts. *Contrib Mineral Petrol*, 171: 21
- Gill J B. 1981. Bulk Chemical Composition of Orogenic Andesites. In: *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*, Minerals and Rocks. Berlin: Springer. 16: 97–167
- Gregory R T, Taylor Jr. H P. 1981. An oxygen isotope profile in a section of Cretaceous oceanic crust, Samail Ophiolite, Oman: Evidence for $\delta^{18}\text{O}$ buffering of the oceans by deep (>5 km) seawater-hydrothermal circulation at mid-ocean ridges. *J Geophys Res*, 86: 2737–2755
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, van Acherterbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim Cosmochim Acta*, 64: 133–147
- 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
- Jahn B, Wu F, Lo C H, Tsai C H. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chem Geol*, 157: 119–146
- Jiang Y H, Jiang S, Zhao K, Ni P, Ling H, Liu D. 2005. SHRIMP U-Pb zircon dating for lamprophyre from Liaodong Peninsula: Constraints on the initial time of Mesozoic lithosphere thinning beneath eastern China. *Chin Sci Bull*, 50: 2612–2620
- Kepezhinskas P, McDermott F, Defant M J, Hochstaedter A, Drummond M S, Hawkesworth C J, Koloskov A, Maury R C, Bellon H. 1997. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis. *Geochim Cosmochim Acta*, 61: 577–600
- 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
- Le Maitre R W. 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press. 236
- Lee C T A, Luffi P, Chin E J. 2011. Building and destroying continental Mantle. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 39: 59–90
- Li C, van der Hilst R D. 2010. Structure of the upper Mantle and transition zone beneath Southeast Asia from traveltimes tomography. *J Geophys Res*, 115: B07308
- Li X H, Liu Y, Li Q L, Guo C H, Chamberlain K R. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochem Geophys Geosyst*, 10: Q06011
- Li X H, Long W G, Li Q L, Liu Y, Zheng Y F, Yang Y H, Chamberlain K R, Wan D F, Guo C H, Wang X C, Tao H. 2010. Penglai zircon megacrysts: A potential new working reference material for microbeam determination of Hf-O isotopes and U-Pb age. *Geostand Geoanal Res*, 34: 117–134
- Li X H, Tang G Q, Gong B, Yang Y H, Hou K J, Hu Z C, Li Q L, Liu Y, Li W X. 2013. Qinghu zircon: A working reference for microbeam analysis of U-Pb age and Hf and O isotopes. *Chin Sci Bull*, 58: 4647–4654
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, Wu J S, Shen Q H. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20: 339
- Ludwig K R. 2001. *ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center, Spec Pub 4
- Ma Q, Xu Y G, Zheng J P, Griffin W L, Hong L B, Ma L. 2016. Coexisting Early Cretaceous high-Mg andesites and adakitic rocks in the North China Craton: The role of water in intraplate magmatism and cratonic destruction. *J Petrol*, 57: 1279–1308
- Mattey D, Lowry D, Macpherson C. 1994. Oxygen isotope composition of mantle peridotite. *Earth Planet Sci Lett*, 128: 231–241
- 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
- Okay A I, Celal Şengör A M. 1992. Evidence for intracontinental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China. *Geology*, 20: 411–414
- Pang C J, Wang X C, Xu Y G, Wen S N, Kuang Y S, Hong L B. 2015. Pyroxenite-derived Early Cretaceous lavas in the Liaodong Peninsula: Implication for metasomatism and thinning of the lithospheric mantle beneath North China Craton. *Lithos*, 227: 77–93

- Peslier A H, Woodland A B, Bell D R, Lazarov M. 2010. Olivine water contents in the continental lithosphere and the longevity of cratons. *Nature*, 467: 78–81
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22: 247–263
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, Isachsen C E. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth Planet Sci Lett*, 219: 311–324
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 42: 313–345
- Valley J W, Chiarenzelli J R, McLelland J M. 1994. Oxygen isotope geochemistry of zircon. *Earth Planet Sci Lett*, 126: 187–206
- Wang W, Xu W L, Wang D Y, Ji W Q, Yang D B, Pei F P. 2007. Caiyuanzi Paleogene basalts and deep-derived xenocrysts in Eastern Liaoning, China: Constraints on nature and deep process of the Cenozoic lithospheric mantle. *J Mineral Petrol*, 27: 63–70
- Woodhead J D, Hergt J M. 2005. A preliminary appraisal of seven natural zircon reference materials for *in situ* Hf isotope determination. *Geostand Geoanal Res*, 29: 183–195
- 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, 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
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H, Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem Geol*, 234: 105–126
- Wu F Y, Zhang Y B, Yang J H, Xie L W, Yang Y H. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton. *Precambrian Res*, 167: 339–362
- Xie L W, Yang J H, Wu F Y, Yang Y H, Wilde S A. 2011. PbSL dating of garnet and staurolite: Constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern Block, North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 42: 142–154
- 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. 2014. Recycled oceanic crust in the source of 90–40 Ma basalts in north and northeast China: Evidence, provenance and significance. *Geochim Cosmochim Acta*, 143: 49–67
- Xu Y G, Ma J L, Huang X L, Iizuka Y, Chung S L, Wang Y B, Wu X Y. 2004. Early Cretaceous gabbroic complex from Yinan, Shandong Province: Petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 93: 1025–1041
- Xu Y G, Zhang H H, Qiu H N, Ge W C, Wu F Y. 2012. Oceanic crust components in continental basalts from Shuangliao, Northeast China: Derived from the Mantle transition zone? *Chem Geol*, 328: 168–184
- 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 J H, O'Reilly S, Walker R J, Griffin W, 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, Chen F, Wilde S A, Wu F Y. 2007a. 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, Sun J F, Zhang J H, Wilde S A. 2012a. 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 J H, Sun J F, Zhang M, Wu F Y, Wilde S A. 2012b. 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, Wu F Y, Chung S L, Lo C H, Wilde S A, Davis G A. 2007b. 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, Belousova E, Griffin W L. 2008. Mesozoic decratonization of the North China block. *Geology*, 36: 467–470
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Liu X M. 2007c. 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, Xie L W, Yang Y H, Liu X M. 2007d. 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, 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 Y H, Wu F Y, Wilde S A, Liu X M, Zhang Y B, Xie L W, Yang J H. 2009. *In situ* perovskite Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Ordovician Mengyin kimberlites in the North China Craton. *Chem Geol*, 264: 24–42
- Yang Y H, Zhang H F, Chu Z Y, Xie L W, Wu F Y. 2010. Combined chemical separation of Lu, Hf, Rb, Sr, Sm and Nd from a single rock digest and precise and accurate isotope determinations of Lu-Hf, Rb-Sr and Sm-Nd isotope systems using Multi-Collector ICP-MS and TIMS. *Int J Mass Spectrom*, 290: 120–126
- Zeh A, Gerdes A, Klemd R, Barton J M. 2007. Achaean to Proterozoic crustal evolution in the central zone of the Limpopo Belt (South Africa-Botswana): Constraints from combined U-Pb and Lu-Hf isotope analyses of zircon. *J Petrol*, 48: 1605–1639
- 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, Yang Y H. 2007. Emplacement age and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the diamondiferous kimberlites from the eastern north China craton. *Acta Petrol Sin*, 23: 285–294
- Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric Mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 110: 305–326
- Zhang Y Q, Dong S W, Zhao Y, Zhang T. 2010. Jurassic tectonics of North China: A synthetic view. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 82: 310–326
- Zhao G, 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
- Zheng Y F. 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 328: 5–48
- Zheng Y F, Fu B. 1998. Estimation of oxygen diffusivity from anion porosity in minerals. *Geochem J*, 32: 71–89
- Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G. 2013. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Res*, 23: 1189–1206
- Zhu G, Jiang D Z, Zhang B L, Chen Y. 2012. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics. *Gondwana Res*, 22: 86–103
- Zhu G, Niu M L, Xie C L, Wang Y S. 2010. Sinistral to normal faulting along the Tan-Lu Fault Zone: Evidence for geodynamic switching of the East China continental margin. *J Geol*, 118: 277–293
- Zhu R X, Yang J H, Wu F Y. 2012. Timing of destruction of the north China craton. *Lithos*, 149: 51–60
- 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
- Zindler A, Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 14: 493–571

(责任编辑: 郑永飞)