中国科学: 地球科学 2018 年 第 48 卷 第 7 期: 825 ~ 843
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 克拉通破坏与西太平洋板块俯冲专题

东亚大地幔楔与中国东部新生代板内玄武岩成因

徐义刚[1,2*], 李洪颜[1], 洪路兵[1], 马亮[1], 马强[1], 孙明道[1]

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640;
2. 中国科学院大学地球和行星科学学院, 北京 100049
* E-mail: yigangxu@gig.ac.cn

收稿日期: 2017-07-21; 收修改稿日期: 2017-12-19; 接受日期: 2018-03-15; 网络版发表日期: 2018-04-25
中国科学院战略性先导科技专项B项目(编号: XDB18000000)、国家自然科学基金项目(编号: 41688103)和国家海洋局国际合作专项项目(编号: GASI-GEOGE-02)资助

摘要 西太平洋板块俯冲、东亚大地幔楔及其在东亚大陆边缘演化中的作用逐渐被学术界重视. 文章对东亚大地幔楔的物质组成、化学不均一性以及中国东部新生代板内玄武岩的成因进行综述, 并尝试提出大地幔楔体系中板内岩浆的成因机制. 主要认识包括: (1) 中国东部新生代玄武岩大致可以解释为高硅和低硅端员熔体的混合物. 东北、华北和华南玄武岩共享一个低硅熔体端员, 它具有高全碱、$Fe_2O_3^T$和TiO_2, HIMU型微量元素特征, 其$^{206}Pb/^{204}Pb$较典型HIMU玄武岩偏低, Nd-Hf同位素具有(年轻的)太平洋洋壳特征, 源区为含碳酸盐的榴辉岩+橄榄岩地幔. 高硅玄武岩端员具有低全碱、$Fe_2O_3^T$和TiO_2, 其Pb-Nd-Hf同位素落入印度洋型地幔范围, 源区为石榴石辉石岩. 高硅玄武岩同位素组成表现出地区差异: 华北具有EM1型富集组分特征, 华南具有EM2型富集组分特点, 而东北兼有EM1和EM2两种富集组分. (2) 中国东部新生代玄武岩源区含有洋壳、水、沉积碳酸盐和岩石圈地幔组分, 说明东亚大地幔楔含有大量再循环物质. 根据其主要出现在大兴安岭-太行山重力梯度带以东地区, 并结合滞留板块的空间分布和地幔导电率特征, 推测这些再循环组分主要来源于滞留在地幔过渡带的太平洋板片, 而EM1或EM2组分来自浅部的岩石圈地幔. (3) 根据石榴石辉石岩和碳酸盐化榴辉岩/橄榄岩的固相线, 限定高硅玄武岩和低硅玄武岩的初始起源深度分别为<100km和~300km. 东亚大地幔楔具有垂向不均一的结构: 上部含有EM1或EM2地幔组分, 显示为印度洋地幔型同位素特征, 下部含有太平洋板块物质组分; 自下而上H_2O和CO_2含量逐渐降低. (4) 在地幔过渡带中滞留板片的脱碳和脱水作用及相关的熔融和交代作用是大地幔楔体系中板内岩浆成因的主要驱动力.

关键词 东亚大地幔楔, 西太平洋俯冲, 新生代板内玄武岩, 中国东部, 东亚

1 引言

全球地震层析成像显示, 西太平洋板块沿日本-伊豆-小笠原-马里亚纳海沟西向东亚大陆俯冲, 该俯冲板片并没有穿过地幔过渡带进入下地幔, 而是平躺在地幔过渡带中(图1a; Fukao等, 1992; Huang和Zhao, 2006; Li和Van der Hilst, 2010). Zhao等(2004)与Ohtani和Zhao(2009)将平躺的滞留大洋板片之上的上地幔称

中文引用格式: 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, doi: 10.1360/N072017-00240
英文引用格式: Xu Y G, Li H Y, Hong L B, Ma L, Ma Q, Sun M D. 2018. Generation of Cenozoic intraplate basalts in the big mantle wedge under eastern Asia. Science China Earth Sciences, 61: 869–886, https://doi.org/10.1007/s11430-017-9192-y

© 2018 《中国科学》杂志社

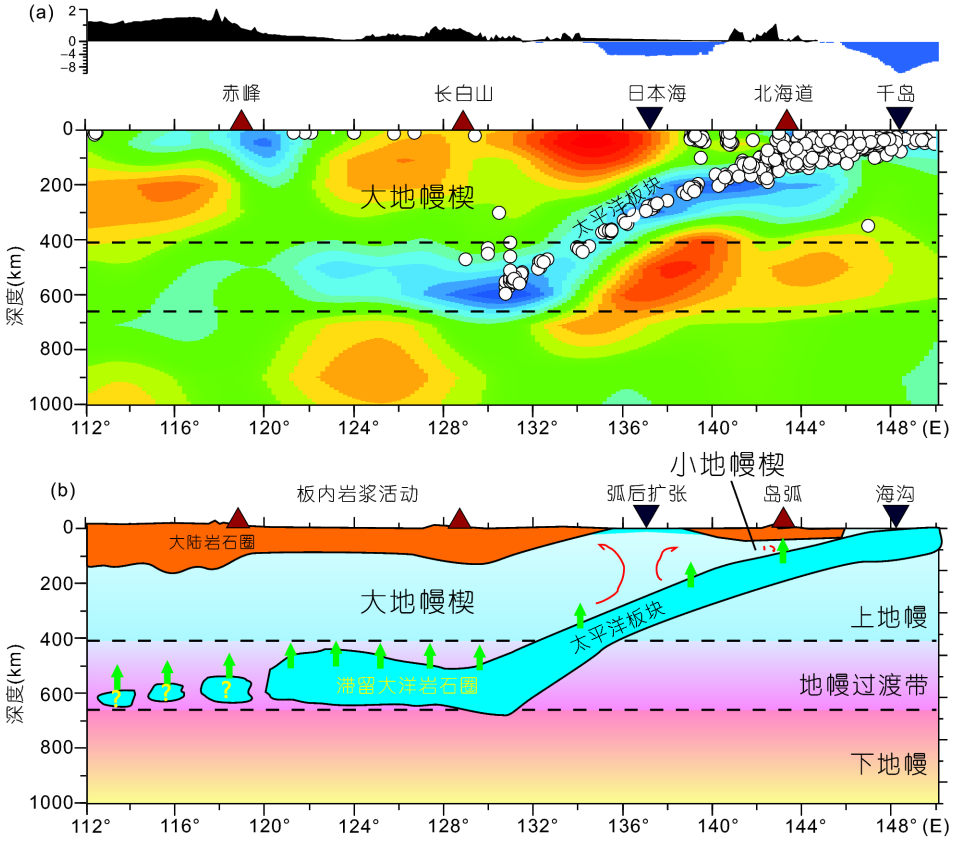

图 1　东亚大地幔楔的(a)地震层析图像和(b)构造模式卡通图

(a) 修改自Huang和Zhao(2006); (b) 参考自Zhao和Tian(2013)

为大地幔楔(Big Mantle Wedge, BMW). 大地幔楔系统与靠近海沟的小地幔楔(图1b; 即传统的沟-弧-盆体系, 指沿海沟俯冲的大洋板片及其上的楔形地幔, 其深-宽约为100km×200km)有很大的不同. 由于与海沟的距离达上千公里, 大地幔楔涉及的区域一般认为处于板内环境. 大地幔楔、平躺在地幔过渡带中的滞留俯冲板片和下地幔构成一个独特的“三明治”式的地幔结构(图1b).

现代板块构造理论涵盖了小地幔楔系统的整体运作和俯冲板片-地幔相互作用过程, 对小地幔楔系统中地震活动、岛弧岩浆、斑岩型铜金矿床的成因有经典的阐述. 但对西太平洋构造域这种独特的大地幔楔系统的形成机制及相关的壳幔相互作用尚缺乏系统的理论体系, 特别是东亚大地幔楔的形成时代和条件、物质组成和再循环机制、及其与滞留板片之间的相互作用机制等还知之甚少. 对上述问题的研讨, 不仅有助于加深东亚区域地质演化的认识, 对完善板块构造理论也有重要意义.

深部地球物理探测揭示的东亚大地幔楔结构只代表现今深部结构的影像. Liu X等(2017)根据古洋壳年龄数据和高精度P波层析成像模型, 限定现今观察到的平躺在地幔过渡带中板片是太平洋板块, 而不是伊萨纳基板块, 是不超过20Ma前形成的. 但这并不否定这种大地幔楔结构可能在更早的时代就存在了. 由于在地幔过渡带形成滞留板片需要海沟的后撤(Griffiths等, 1995), 因此确定西太平洋板块后撤的起始时间可以大致限定东亚大地幔楔的形成时代(马强和徐义刚, 2017). 对东亚大陆边缘晚中生代岩浆岩时空迁移规律的研究(Kiminami和Imaoka, 2013; 马强和徐义刚, 2017), 揭示西太平洋板块后撤的起始时间在早白垩世, 因此东亚大地幔楔可能在早白垩世就形成了. Li S G等(2017)根据中国东部<110Ma玄武岩具有轻的镁同位素组成得出了相似的结论. 从这个意义上说, 中国东部晚白垩世-新生代板内玄武岩的成因可与大地幔楔

系统的物质组成和动力学过程相联系起来.

中国东部广泛发育新生代玄武岩, 传统上被认为是西太平洋板块俯冲弧后扩张所致, 岩石学和地球化学上显示典型的板内岩浆的性质. 但为什么它产于大陆环境却显示与洋岛玄武岩相似的组成? 为什么它处在太平洋构造域却主体显示印度洋型地幔特征? 西太平洋板块俯冲作用是如何将再循环物质输送到大地幔楔中的? 再循环物质又是如何参与地幔交代作用和板内岩浆作用的? 由于地幔过渡带中平躺滞留板片的存在, 中国东部新生代幔源岩浆的源区不可能来自下地幔, 更可能来源于大地幔楔, 因此新生代玄武岩记录了有关大地幔楔物质组成和化学不均一性的重要信息. 近年来有关中国东部新生代玄武岩的研究对回答这些长期困惑学术界的问题提供了重要线索. Zhao等(2004)提出滞留板片脱水进入大地幔楔而引发了长白山火山活动. 之后这一模式被推广到东亚陆缘的新生代幔源岩浆作用(Niu, 2005; Ohtani和Zhao, 2009). 岩石地球化学和同位素示踪研究的确揭示出这一地区幔源岩浆的诸多特殊性. Liu等(2015a)和Chen等(2015)发现中国东部部分新生代玄武岩岩浆具有与岛弧岩浆一样的高水含量. 而且这一地区晚白垩世和新生代板内玄武岩源区广泛存在再循环洋壳组分(Zhang等, 2009; Xu, 2014; Li等, 2014; Li H Y等, 2017), 且具有比正常地幔轻的Mg同位素组成, 可能与太平洋板块俯冲导致的沉积碳酸盐岩(Yang等, 2012; Huang等, 2015; Liu S A等, 2016; Li S G等, 2017)再循环进入地幔有关. 西太平洋板块俯冲还被认为是华北克拉通破坏的主要动力学因素(朱日祥等, 2012). 这一系列的研究充分揭示了大地幔楔系统在板内玄武岩形成乃至在全球板块构造体系中的重要作用, 展示了广阔的前沿研究前景.

本文总结了近年来这一领域的研究新进展, 重点鉴别玄武岩源区中的再循环组分, 并约束其来源. 在此基础上提出大地幔楔系统中板内玄武岩成因新模型.

2　东亚大地幔楔的物质组成及相关的再循环过程

由于西太平洋俯冲板块滞留在地幔过渡带, 该板块俯冲作用将大量的沉积物、洋壳和岩石圈地幔带到了东亚上地幔. 全球俯冲带研究揭示每年通过板块俯冲进入地幔的沉积物达2.5km^3, 其中现今西北太平洋约占全球俯冲量的1/3左右(Stern和Scholl, 2010). 可以想象, 东亚大地幔楔中可能含有较多的再循环洋壳、沉积物、水、碳酸盐及它们的衍生物, 对东亚深地动力系统和地幔熔融/交代作用产生了重大影响. 近年来, 地球化学示踪研究在识别东亚大地幔楔的物质组成方面取得了重要进展.

2.1　东亚大地幔楔中的再循环洋壳组分

虽然太平洋板块俯冲作用对东亚大陆演化具有重要的影响已是地学界的共识, 但太平洋板块参与岩浆作用的物质证据直至近年来才被证实. 主要证据包括:

(1) 中国东部多个地区的新生代玄武岩具有与洋岛玄武岩(OIB)一致的微量元素组成(图2a), 如强不相容元素Rb、Ba、Th、U相对Nb-Ta的明显亏损, 全岩Pb和K负异常, 与OIB相似的Nb/U和Ce/Pb比值(Zhang等, 2009; Xu Y G等, 2012; Xu Z等, 2012). 这些特征与脱水后的洋壳玄武岩有关.

(2) 中国东部新生代玄武岩的Fe/Mn比值整体上高于洋中脊玄武岩(MORB)(图2b). 部分玄武岩(如双辽火山岩)的$Fe_2O_3^T$含量高达13.4~14.6%, 在相同的MgO含量时与典型HIMU玄武岩的$Fe_2O_3^T$含量(Chauvel等, 1992) 相当.

(3) 在Sr-Nd同位素图(图2c)上, 中国东部新生代玄武岩大多呈负相关关系, 反映了一个亏损地幔端员和两个富集端员(EM1或EM2)之间的混合. 富集端员组分可能来自软流圈、岩石圈地幔或者地壳混染作用(Zhou和Armstrong, 1982; Peng等, 1986; Zhi等, 1990; Xu等, 2005). 十分特别的是双辽地区两组玄武岩的Sr-Nd同位素呈正相关关系(图2d), 说明其同位素特征与大陆地壳无关. 双辽玄武岩的微量元素特征类似于OIB中的HIMU组分, 是再循环蚀变洋壳的特征(Hofmann和White, 1982; Chauvel等, 1992). 不过, 双辽玄武岩的$^{206}Pb/^{204}Pb$较低(18.13~18.39), 说明其源区中的再循环洋壳组分是年轻的(Thirlwall, 1997; Xu Y G等, 2012), 否则它会具有与典型HIMU玄武岩相似的高$^{206}Pb/^{204}Pb$比值. 根据全岩Nd同位素与Ba/Nb的关系判断双辽玄武岩高ε_{Nd}端员代表了年轻的HIMU组分, 因此双辽玄武岩Sr-Nd同位素组成是年轻HIMU组分与另外一种地幔组分之间的混合, 后者可能是亏损地

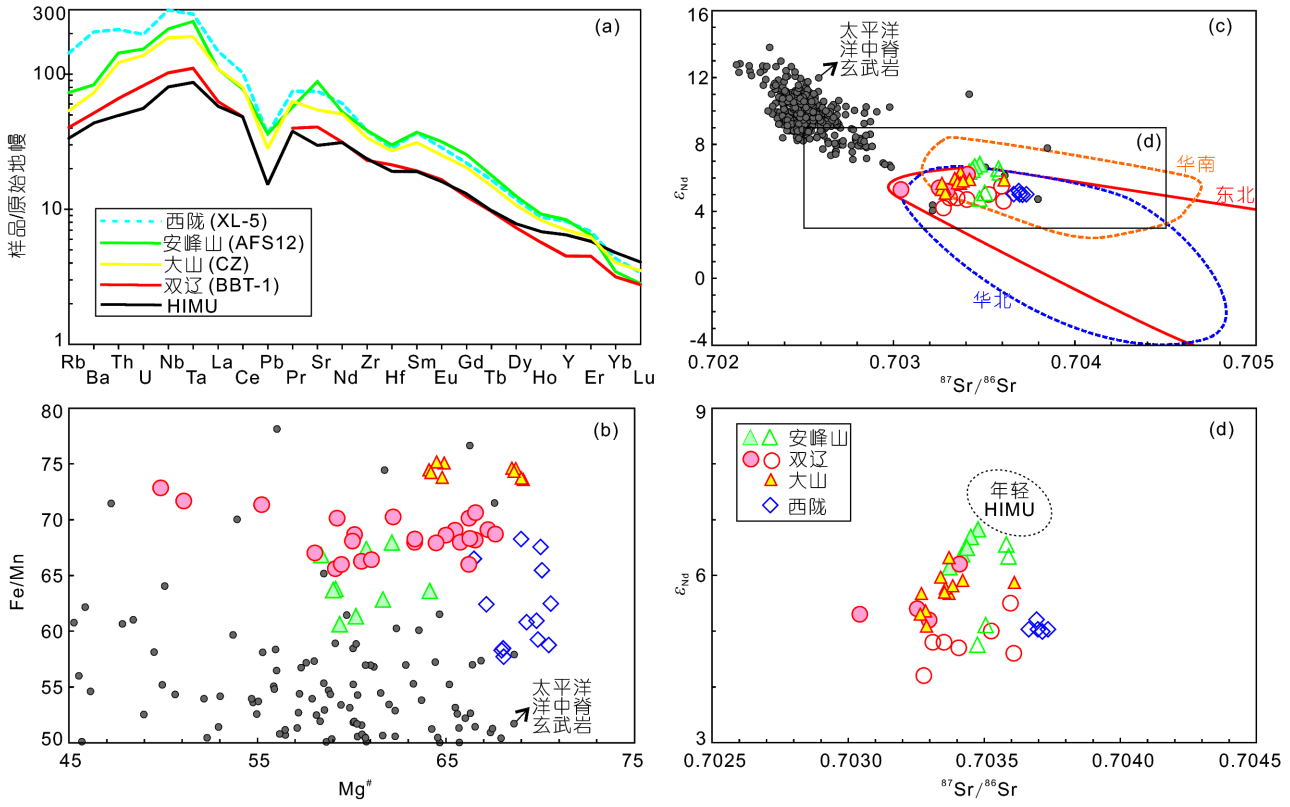

图 2　中国东部代表性玄武岩样品微量元素蛛网图(a)、全岩Fe/Mn对MgO相关图解(b)以及全岩Sr-Nd同位素相关图((c)和(d))
图中突出显示双辽(Xu Y G等, 2012)、山东无棣大山(Sakuyama等, 2013; Li等, 2016a; Zhang J B等, 2017)、浙江西陇(Liu S C等, 2016)和东海安峰山(Chen等, 2009)碧玄岩和霞石岩. Fe/Mn根据全岩主量元素计算, 太平洋洋中脊玄武岩参照PetDB(http://www.earthchem.org/petdb), HIMU玄武岩参照St. Helena玄武岩平均值(Willbold和Stracke, 2006)

幔与EM组分的混合(图2d), 也就是我们后文中提到的石榴石辉石岩组分. 类似的情况在大山和安峰山玄武岩中也观察到.

(4) 地幔橄榄岩的氧同位素组成十分均一(Mattey等, 1994), 蚀变洋壳的下部经高温热液蚀变而具有比地幔值低的$\delta^{18}O$, 而蚀变洋壳的上部的$\delta^{18}O$高于地幔值(Gregory和Taylor, 1981), 因此玄武岩中斑晶的氧同位素组成是鉴别玄武岩源区再循环洋壳组分的有效手段(Eiler, 2001). 山东-苏北-皖东北一带的新生代玄武岩中的橄榄石、单斜辉石和斜长石斑晶的$\delta^{18}O$值低于地幔值(Xu Z等, 2012), 暗示其源区存在经过变质脱水和高温水岩反应的俯冲洋壳. Liu J等(2017)报道了华北克拉通106~60Ma玄武岩中单斜辉石斑晶的$\delta^{18}O$, 发现均高于MORB中单斜辉石斑晶$\delta^{18}O$, 可能是再循环的蚀变洋壳上部的特征.

(5) 玄武岩中橄榄石斑晶的成分可以用于岩浆源区的判别(Sobolev等, 2005; Herzberg, 2011). 由于橄榄石的Ni分配系数远高于辉石的Ni分配系数, 因此从来自辉石岩和橄榄岩的熔体中结晶出的橄榄石的Ni含量显著不同. Sobolev等(2007)发现许多大火成岩省苦橄岩中橄榄石的Ni含量均比MORB 中的橄榄石高, 据此推测地幔柱源区普遍存在经再循环洋壳熔体与橄榄石反应形成的辉石岩. 与MORB橄榄石斑晶相比, 中国东部新生代玄武岩橄榄石斑晶具有高Ni和Fe/Mn, 低Ca和Mn特点(图3a), 暗示其源区主体为辉石岩. 橄榄石斑晶的熔融包裹体具有低CaO特征; 在CS-MS-A图上, 主体落在3.0GPa附近的L+Gt+Cpx-L+Gt+Cpx+Opx-L+Cpx+Gt+Qz范围内(图3c), 说明源区熔融的主要残留矿物为石榴石和单斜辉石(Hong等, 2013). 尽管如此, 一些熔融包裹体的成分落在3.0GPa的L+Ol+Cpx+Gt线上, 指示源区中可能仍残留少量橄榄石. 虽然无法准确限定这些辉石岩的来源, 但根据全岩同位素和微量元

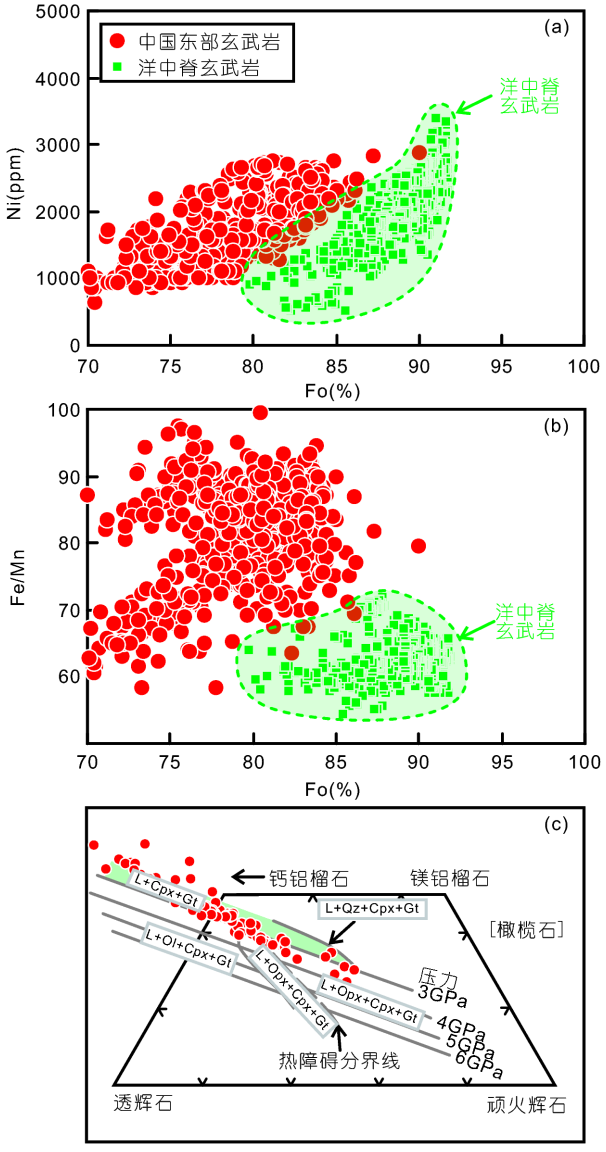

图 3　中国东部新生代玄武岩中橄榄石斑晶成分((a)和(b))以及橄榄石斑晶中的熔融包裹体的组成(c)

L, 熔体; Qz, 石英; Ol, 橄榄石; Cpx, 单斜辉石; Opx, 斜方辉石; Gt, 石榴石

素组成, 我们认为它们很可能是再循环洋壳熔体与橄榄岩反应形成的二阶段辉石岩.

2.2　东亚大地幔楔中的水含量

2.2.1　岩石圈地幔中的水含量

上地幔的水含量可以通过橄榄岩中名义上无水矿物直接测定. 夏群科等人通过对中国东部晚白垩世-新生代地幔橄榄岩包体水含量的研究, 初步揭示了中国东部岩石圈地幔水含量的时空分布(Xia等, 2010, 2013; Hao等, 2012, 2016a, 2016b; Li Y Q等, 2015). 图4a展示了中国东部不同地区橄榄岩包体的水含量, 表明岩石圈地幔的水含量是高度不均一的. 其中, 华北和东北岩石圈地幔的水含量极低, 分别为(34±34)和(47±32)ppm(1ppm=1mg L^{-1}), 低于典型克拉通((119±54)ppm)和非克拉通岩石圈地幔((78±45)ppm)的水含量. 东北北部(诺敏) 的岩石圈地幔几乎是干的(~0ppm); 而华南岩石圈地幔具有较高的水含量, 约为(90±45)ppm.

Xia等(2010)认为华北岩石圈地幔中的低水含量是克拉通岩石圈减薄过程中, 软流圈上涌烘烤岩石圈的结果; 据此, 他们进一步推测华北和东北现今岩石圈地幔残留古老的岩石圈地幔(Xia等, 2010; Hao等, 2016b). 然而, 橄榄岩包体的岩相学, 地球化学和Re-Os同位素组成研究表明华北克拉通东部地区主要是显生宙的岩石圈地幔, 仅西部地区(包括鹤壁) 仍保留着古老的岩石圈地幔(Xu等, 2008; Gao等, 2002; Wu等, 2003, 2006; Liu等, 2011; Hong等, 2012; Chu等, 2009). 另外, 被地幔柱烘烤的大洋岩石圈仍可以保留一定的水含量, 如Hawaii岩石圈地幔的水含量为50~90ppm (Peslier和Bizimis, 2015). 南非克拉通、法国中央高原长期遭受超级地幔柱的烘烤, 但其水含量依然高于华北-东北岩石圈地幔. 因此, 软流圈烘烤可能不是造成岩石圈地幔中低水含量的主要原因. 我们认为低水含量可能恰好表明华北克拉通东部的岩石圈地幔是新生的. 软流圈转变为岩石圈的过程常伴随有小程度部分熔融, 由于水是极不相容元素($D^{橄榄岩/熔体}$=0.005~0.009; Hirschmann等, 2009), 亏损软流圈地幔(H_2O=~120ppm; Salters和Stracke, 2004) 只需经历<3%部分熔融就可以形成干的岩石圈地幔(<20ppm H_2O). 岩石圈地幔贫水的特征还暗示地幔过渡带中滞留板片释放出的水尚未影响到浅部岩石圈.

2.2.2　软流圈地幔的水含量

软流圈地幔中的水含量可以通过它的熔融产物—玄武岩以及地球物理手段来限定. 对玄武岩中单斜辉石斑晶水含量的研究表明中国东部玄武岩的水含量变化很大, 部分玄武岩的含水量与岛弧玄武岩相当(图4b; Liu等, 2015a, 2015b; Chen等, 2015). 玄武岩的水含量与很多因素有关, 如源区物质组成、部分熔融程度等, 例如双辽玄武岩中, 低程度部分熔融形成的碧

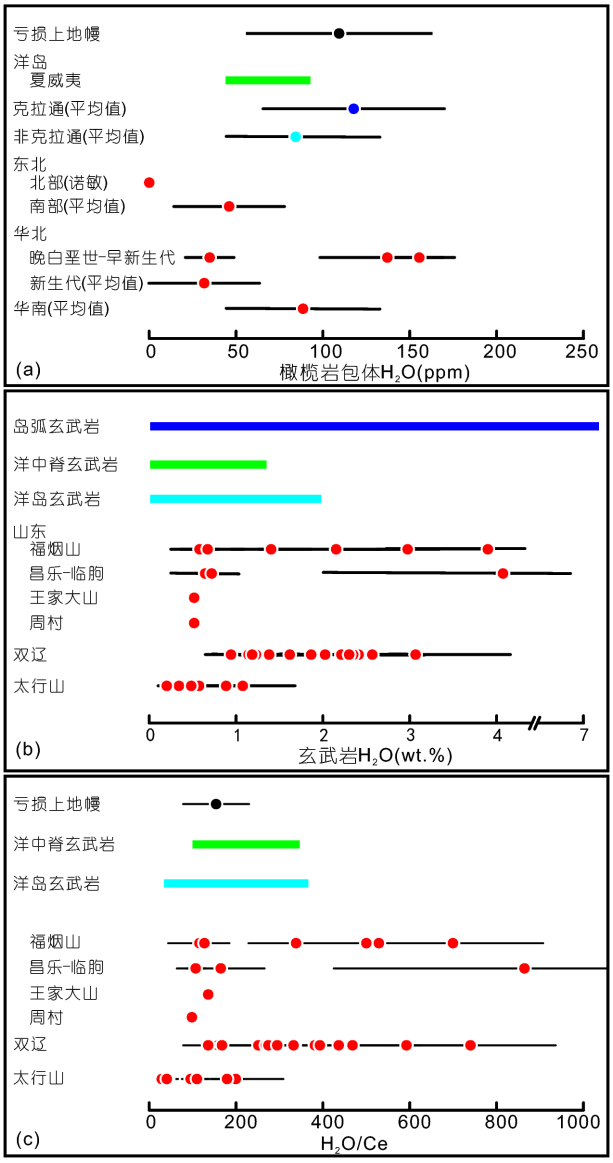

图 4　中国东部橄榄岩包体水含量(a)、玄武岩水含量(b)与H_2O/Ce比值(c)

橄榄岩包体水含量数据来源: 克拉通和非克拉通: Xia等(2010); Hawaii: Peslier和Bizimis(2015); 亏损上地幔: Salters和Stracke(2004); 东北: Hao等(2016b); 华北晚白垩世-早新生代: Li P等(2015); 华北新生代: Xia等(2010); 华南: Hao等(2016b); 岩浆水含量和H_2O/Ce比值数据来源: 亏损上地幔: Salters和Stracke(2004); 洋中脊玄武岩: Petdb数据库; 洋岛玄武岩、岛弧玄武岩: Georock数据库; 山东: Liu等(2015a), Xu(2014), 洪路兵等(未发表数据); 太行山: Liu等(2015b); 双辽: Chen等(2015)

玄岩水含量>3wt.%, 而更高程度部分熔融形成的拉斑玄武岩水含量只有~1wt.%(Chen等, 2015). 由于玄武岩的源区非常复杂, 估算部分熔融程度存在非常大的不确定性, 这在一定程度上阻碍了人们对玄武岩源区的水含量认知. H_2O与Ce的分配系数非常相似, 在部分熔融和岩浆结晶分离过程中二者不发生分馏, 因此岩浆H_2O/Ce比值与其源区比值相当. 利用玄武岩H_2O/Ce比值结合其他地球化学指标可以示踪源区物质组成, 并约束其水含量(Dixon等, 2002). 例如, 夏群科等人根据玄武岩的H_2O/Ce比值结合Ba/Th、Eu^*、Ce/Pb和O同位素组成, 认为再循环洋壳具有低的H_2O/Ce比值(H_2O/Ce<200). 借鉴这一研究结果, 根据成熟洋壳的组成(~6ppm Ce和2~3wt.% H_2O; Dixon等, 2002) 和俯冲过程中Ce的活动性(~50%; Kogiso等, 1997), 可以获得再循环洋壳中Ce含量(~3ppm) 和水含量(<~600ppm). 这说明来自玄武岩源区的再循环洋壳组分已经经历了强烈的脱水作用.

如图4c所示, 部分中国东部玄武岩的H_2O/Ce高达800(Liu等, 2015a; Chen等, 2015), 远高于MORB和OIB, 指示其源区中存在一个相对富水的组分. 该组分曾被认为是再循环沉积物(Chen等, 2015; Liu等, 2015a). 然而, 双辽玄武岩具有异常高的H_2O/Ce比值, 但其Sr-Nd同位素组成是东部新生代玄武岩中最亏损的(Xu Y G等, 2012), 因此玄武岩的高H_2O/Ce比值与再循环沉积物并不存在必然联系. 事实上, 在中国东部, 具有最高H_2O/Ce比值的玄武岩, 其Ba/Th比值约为~110, 而更高Ba/Th比值(即再循环沉积物比例更高)的玄武岩, 其H_2O/Ce比值逐渐降低(洪路兵等, 待发表), 说明再循环沉积物不是高H_2O/Ce比值的唯一原因. 对此有两个解释方案. (1) 高H_2O/Ce比值与未完全脱水的洋壳有关. 双辽碧玄岩具有弱的正Eu异常, 表明其源区可能含有堆晶辉长岩. 辉长岩位于洋壳的下部、俯冲板片的内部, 因此有可能脱水不完全(van Keken等, 2011). (2) H_2O/Ce和其他地球化学特征的形成过程可能是解耦的. 高H_2O/Ce比值是改造前的地幔转换带特征, 而其他地球化学特征则是被滞留板片改造的结果.

需要指出的是, 并不是所有新生代玄武岩都具有高的水含量, 部分玄武岩的含水量甚至跟 MORB相当(图4b). 我们对山东和赤峰新生代玄武岩橄榄石熔体包裹体水含量的测定, 没有发现水含量>1wt.%的玄武岩. 造成这种现象的原因, 可能是(1) 熔体包裹体发生了强烈的水扩散丢失; (2) 与研究样品的差异性有关.

上地幔水含量还可以通过深部导电率的测量来约

束. Karato(2011)总结了全球尺度的软流圈导电率数据, 发现在中国东部, 浅部软流圈(100~250km)的导电率低于全球平均值, 而深部软流圈(>250km)的导电率是全球最高的. 由于实验研究表明含水条件下橄榄岩的导电率较干体系高得多, 因此中国东部软流圈导电率的垂向变化可能与软流圈地幔的水分布不均一有关(Ichiki等, 2006; Karato, 2011). 例如, Ichiki等(2006)认为加入少量水(>500~1000ppm H/Si, 相当于>30~60ppm)就可以解释深部软流圈的高导电率. 需要指出的是, 这一估算结果仅考虑了水、而忽视了其他因素(如CO_2; Gaillard等, 2008)对地幔电导率的影响. 因此, 通过电导率估算上地幔的水含量仍存在较大的不确定性.

2.3　东亚大地幔楔中的再循环沉积碳酸盐或碳酸盐化地幔

俯冲洋壳携带的碳酸盐在大多数情况下会在地幔过渡带附近(300~700km)发生熔融并交代上地幔, 无法通过地幔过渡带而进入下地幔, 深部碳循环可能主要发生在上地幔(Thomson等, 2016). 因此, 碳酸盐很可能是联系滞留在地幔过渡带的太平洋板块与东亚大地幔楔不均一性的纽带. 越来越多的地球化学研究证实东亚大地幔楔中的确存在大量再循环碳酸盐.

(1) 山东大山强碱性玄武岩在原始地幔标准化图上具有K、Pb、Zr、Hf、Ti负异常, 与火成碳酸岩十分相似. 这些岩石低SiO_2、低Al_2O_3、高CaO, 与含碳酸盐橄榄岩低程度部分熔融的熔体相似. 为此, Zeng等(2010)提出它们起源于一个含碳酸盐的橄榄岩地幔源区. 之后Sakuyama等(2013)提出山东强碱性玄武岩起源于滞留的、含碳酸盐的太平洋板块的部分熔融. Li等(2016a)通过熔融包裹体研究确定了山东强碱性玄武岩的原始岩浆成分. 与实验岩石学成果对比后发现, 原始岩浆是由碳酸盐化橄榄岩和榴辉岩部分熔融而成.

(2) 李曙光研究组对东亚陆缘板内玄武岩和环太平洋部分岛弧玄武岩进行了广泛的Mg同位素调查(Li S G等, 2017), 发现中国东部晚白垩世和新生代玄武岩具有比正常地幔轻的Mg同位素组成, 从而圈定出北从黑龙江五大连池南到海南岛的巨大地幔低δ^{26}Mg异常区. 由于只有沉积碳酸盐岩有极低δ^{26}Mg, 而且在板块俯冲过程中, 沉积碳酸盐的Mg同位素组成没有大的变化, 因此他们认为异常区与太平洋板块俯冲导致的沉积碳酸盐岩再循环进入地幔有关(Yang等, 2012; Huang等, 2015). 但是沉积碳酸盐具有较高的Sr同位素组成($^{87}Sr/^{86}Sr$=0.706~0.730), 与中国东部新生代玄武岩较为亏损的Sr同位素组成($^{87}Sr/^{86}Sr$=0.703~0.705; Huang和Xiao, 2016)并不一致. 一个可能的解释是碳酸盐在板块俯冲过程中发生变质, 仅有少量的Sr被循环进入地幔(例如, 菱镁矿仅有1.84ppm Sr; Huang和Xiao, 2016), 所以对地幔源区的Sr同位素影响并不大. Li H Y等(2017)则认为, 碳酸盐可能来源于洋壳玄武岩中的碳酸盐脉. 在地幔熔融过程中, 碳酸质熔体与硅酸质熔体具有相似的微量元素分配系数(Zr-Hf-Ti除外; Dasgupta等, 2009), 碳酸盐脉(~100ppm; Kelley等, 2003)和洋壳玄武岩(~130ppm; Gale等, 2013)具有接近的Sr含量, 因此在榴辉岩中碳酸盐含量即使达到10%的情况下, 无论是碳酸盐与榴辉岩发生机械混合然后熔融, 还是源区发生选择性熔融, 碳酸盐优先熔融然后提取榴辉岩的Sr(受分配系数控制), 初始碳酸质熔体的Sr同位素都能符合山东大山霞石岩的特征(大山: 0.703~0.704; Zeng等, 2011; Li等, 2016a). 最近在山东新生代玄武岩橄榄岩包体中发现的碳酸盐包裹体具有较轻的Sr同位素组成(~0.703; Deng等, 2017), 与大山霞石岩的组成较为接近.

(3) Zn同位素分析对中国东部新生代玄武岩源区为碳酸盐化地幔的观点给予了支持. Liu S A等(2016)发现<110Ma玄武岩具有比正常地幔(δ^{66}Zn=(0.28±0.05)‰)重的Zn同位素组成(0.30~0.63‰). 考虑到岩浆分异过程中Zn的同位素分馏很小(0.1‰), 而沉积碳酸盐具有比地幔重的(~0.91‰), 因此高的δ^{66}Zn值暗示岩浆源区具有碳酸盐. 同时, 中国东部新生代玄武岩具有较高的Zn含量, 而只有菱镁矿或者白云岩等碳酸岩类具有相对较高的Zn含量, 因此, Zn同位素组成和含量限定玄武岩源区为含菱镁矿或者白云岩地幔岩, 与根据Mg同位素组成获得的结论相吻合, 也支持了地幔过渡带来源的推断.

2.4　H_2O和CO_2在东亚大地幔楔系统中的作用

如上所述, 东亚大地幔楔中含有大量的再循环物质, 包括洋壳、水和沉积碳酸盐. 这些再循环物质在大地幔楔系统中的壳幔相互作用过程中都发挥了作用. 那究竟是H_2O还是CO_2起了更大的作用呢? 这是一

个很难回答的问题，目前我们倾向于认为CO_2的作用更大一些, 主要基于以下考虑:

(1) 就中国东部而言, 并非所有玄武岩具有高的水含量, 而几乎所有的玄武岩显示较轻的Mg同位素和较重的Zn同位素组成，说明沉积碳酸盐在玄武岩源区更为普遍.

(2) 代表岩石圈地幔的橄榄岩包体中水含量极低(Xia等, 2013), 说明未受到水的交代作用. 而Deng等(2017) 在山东新生代玄武岩橄榄岩包体中发现了碳酸盐包裹体, 说明碳酸质熔/流体对上地幔的交代不仅限于软流圈地幔, 可能影响到了岩石圈地幔.

(3) 虽然中国东部上地幔的高导电率可能与含水橄榄石有关，但更可能是碳酸盐化橄榄岩所致. Gaillard等(2008)通过实验发现熔融碳酸盐的导电率是含水橄榄石的10^5倍，因此弥散于上地幔的少量CO_2就可以解释中国东部上地幔的高导电率. 上地幔各向异性的研究也质疑了高导电率上地幔是含水橄榄岩所致的观点. Jung和Karato(2001)认为水的存在强化了橄榄石的各向异性，但Yang(2012)发现橄榄石沿001、010、100向的导电率随温度的变化规律是一样的，而与水含量无关.

3 东亚大地幔楔的化学不均一性和二元混合模型

3.1 中国东部新生代玄武岩的二端员混合模型

Li H Y等(2016a, 2016b, 2017)对华北东部<23Ma的玄武岩进行了详细的全岩地球化学和橄榄石斑晶中熔融包裹体的研究. 由于玄武岩的地球化学组成与SiO_2含量密切相关，因此研究中重点区分了低硅(SiO_2<42%)、中硅和高硅(SiO_2>45%)玄武岩. 他们发现, 华北东部玄武岩由两个熔体端元混合而成, 其化学组成和再循环组分的特征与SiO_2含量密切相关(图5).

如图5所示，低硅玄武岩(SiO_2<42%) 具有高全碱、高CaO、FeO^T和TiO_2，高硅玄武岩(SiO_2>45%)具有低全碱、低CaO、FeO^T和TiO_2，而中硅玄武岩可看成是低硅和高硅玄武岩端员的混合(Li等, 2016a). 进一步的研究发现，华北高硅玄武岩(SiO_2>45%)还具有低微量元素含量, 低La/Yb、Sm/Yb和Ce/Pb但高Ba/Th比值，低$^{176}Hf/^{177}Hf$、$^{143}Nd/^{144}Nd$、$^{206}Pb/^{204}Pb$但高$^{87}Sr/^{86}Sr$比值特点，并显示EM1型微量元素和放射性成因同位素组成特征，且具有相对较高的$\delta^{11}B$值(–4.9~–1.4‰), Hf-Nd同位素落入印度洋型地幔范围. 华北低硅玄武岩(SiO_2<42%)具有HIMU(高U/Pb) 型微量元素特征，但其$^{206}Pb/^{204}Pb$较典型HIMU玄武岩偏低，其$\delta^{11}B$值(–6.9~–3.9‰)相对于高硅玄武岩较低, Hf-Nd同位素具有太平洋洋壳特征(图6). Sr-Nd-Hf-B同位素联合示踪显示高硅玄武岩源区含有古老(>1Ga)的沉积物和蚀变洋壳，低硅玄武岩源区含有再循环的太平洋洋壳组分，说明华北东部上地幔经历了多次富集事件(Li等, 2016b).

为了进一步验证这一模式在整个中国东部新生代玄武岩成因的适用性，我们系统考察了东北、华北和华南新生代玄武岩的数据. 从图7我们得到如下观察:

(1) 整个中国东部玄武岩的Si和Fe呈很好的负相关关系(图7a). 这可以用低硅和高硅二端元混合模型来解释. 除了东北高钾玄武岩以外，无论华北和东北，还是华南均共享一个相同的低硅组分，而高硅组分在三个区域的表现形式有所不同(图7b~f). 华北的高硅组分具有低$^{143}Nd/^{143}Nd$和低$^{206}Pb/^{204}Pb$比值，类似于EM1组分，而华南的高硅组分显示中等低$^{143}Nd/^{143}Nd$和高$^{206}Pb/^{204}Pb$比值，类似于EM2组分，这与Zou等(2000)的观察相一致. EM1和EM2两种组分在东北都有表现.

(2) 华北与东北玄武岩的高硅组分显示异常大的Ba/Th差异，可能与EM1和EM2组分的物质组成以及不同程度脱水俯冲板片组分的卷入有关.

(3) 东北高钾玄武岩显示了与Na质玄武岩不同的演化趋势，说明其成因的特殊性和复杂性. 本文不做过多的阐述.

3.2 高硅和低硅玄武岩的源区特征

高硅玄武岩斑晶相对于橄榄岩源区熔体结晶的橄榄石具有高Ni、低Mn和Ca的特点(图8)，符合石榴石辉石岩地幔源区特征(Herzberg, 2011); 而低硅玄武岩较高硅玄武岩的橄榄石斑晶具有较低的Ni但是较高的Mn, 高Fo条件下Ca含量低于高硅玄武岩，符合富辉石地幔源区(富辉石的橄榄岩地幔或者富橄榄石的辉石岩地幔)的特征. 高硅玄武岩橄榄石熔融包裹体具有相对较低的CaO和较高的SiO_2，符合二阶段反应成因石榴石辉石岩地幔源区特征(Sobolev等, 2007); 低硅玄武岩的橄榄石熔融包裹体具有相对低SiO_2、高CaO特

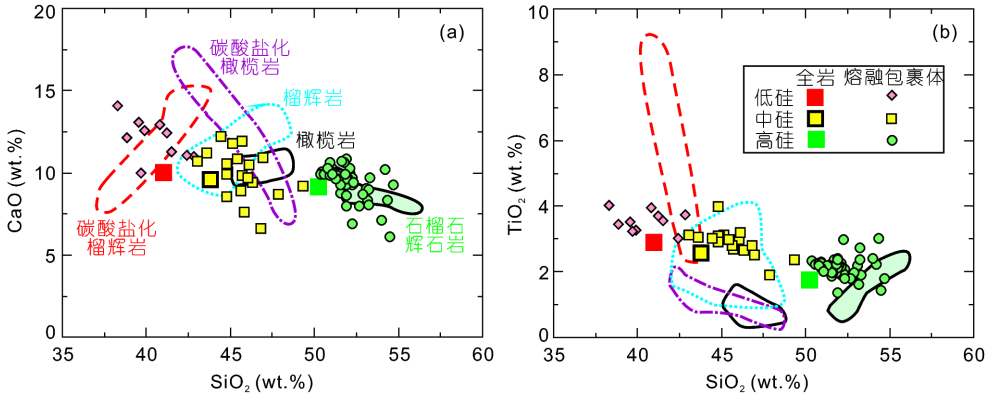

图 5　山东新生代玄武岩橄榄石熔融包裹体化学组成

实验岩石学数据: 石榴石辉石岩, 3.5GPa, Px-1(Sobolev等, 2007); 碳酸盐化榴辉岩, 3.0GPa, SLEC1+5.0wt% CO_2(Dasgupta等, 2006); 橄榄岩, 2.5~3.0GPa, HK-66和KLB-1(Hirose和Kushiro, 1993); 碳酸盐化橄榄岩, 3.0GPa, KLB-1+1.0% CO_2(Dasgupta等, 2007); 榴辉岩: 2.0~5.0GPa, KLB-1+MORB(Kogiso等, 1998), MIX1G(Hirschmann等, 2003), BECL(Kogiso和Hirschmann, 2006), 据Li等(2016a)

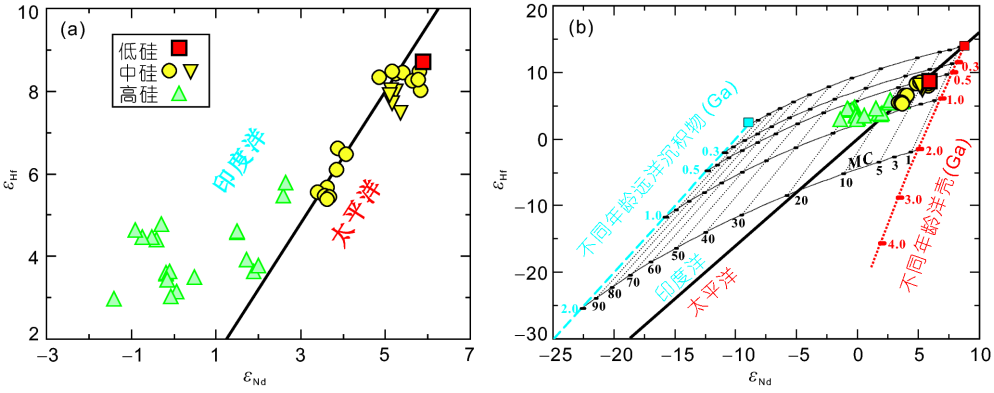

图 6　山东新生代玄武岩Hf-Nd同位素组成

混合曲线(MC)上的数字代表了沉积物的百分含量, 太平洋和印度洋型地幔Hf-Nd分界线参照Pearce等(1999). 数据据Zeng等(2011)和Li等(2016a)

点, 根据SiO_2与CaO关系判断其可能起源于一个碳酸盐化榴辉岩地幔, 但是其TiO_2较单纯的碳酸盐化榴辉岩地幔熔体要低, 较单纯的碳酸盐化橄榄岩较高(图5), 所以最可能起源于碳酸盐化的榴辉岩橄榄岩混合地幔. 因此, EM1型微量元素和同位素组成特征的高硅玄武岩来源于一个石榴石辉石岩地幔, 而HIMU型特征的低硅玄武岩来源于一个含碳酸盐的榴辉岩+橄榄岩地幔源区(图5). EM2型微量元素和同位素组成特征的高SiO_2玄武岩, 其主量元素和橄榄石成分与EM1型非常相似, 如全岩均具有高SiO_2、低CaO和$Fe_2O_3^T$(图7a); 橄榄石成分均显示低Ca和Mn、高Ni等特征(Liu等, 2015). 这些特征指示EM2型高SiO_2玄武岩的源岩应当与EM1型玄武岩相似, 均为石榴石辉石岩.

4　东亚大地幔楔中再循环组分的来源及其垂向不均一性

4.1　再循环组分的来源深度

大地幔楔中再循环组分的赋存位置是一个重要科学问题. 根据玄武岩的成分以及推断的源区组成可以大致限定这些再循环组分的来源深度.

(1) 实验岩石学揭示, 随着熔融压力的升高, 玄武岩中的Si含量降低, Fe含量升高(Jaques和Green, 1980). 由此我们可以大致推测中国东部高硅玄武岩来源深度比低硅玄武岩浅, 也就是说EM1和EM2组分来源浅部地幔, 而年轻HIMU组分来源于深部地幔.

(2) 图9展示了不同地幔岩的固相线. 由于中国东

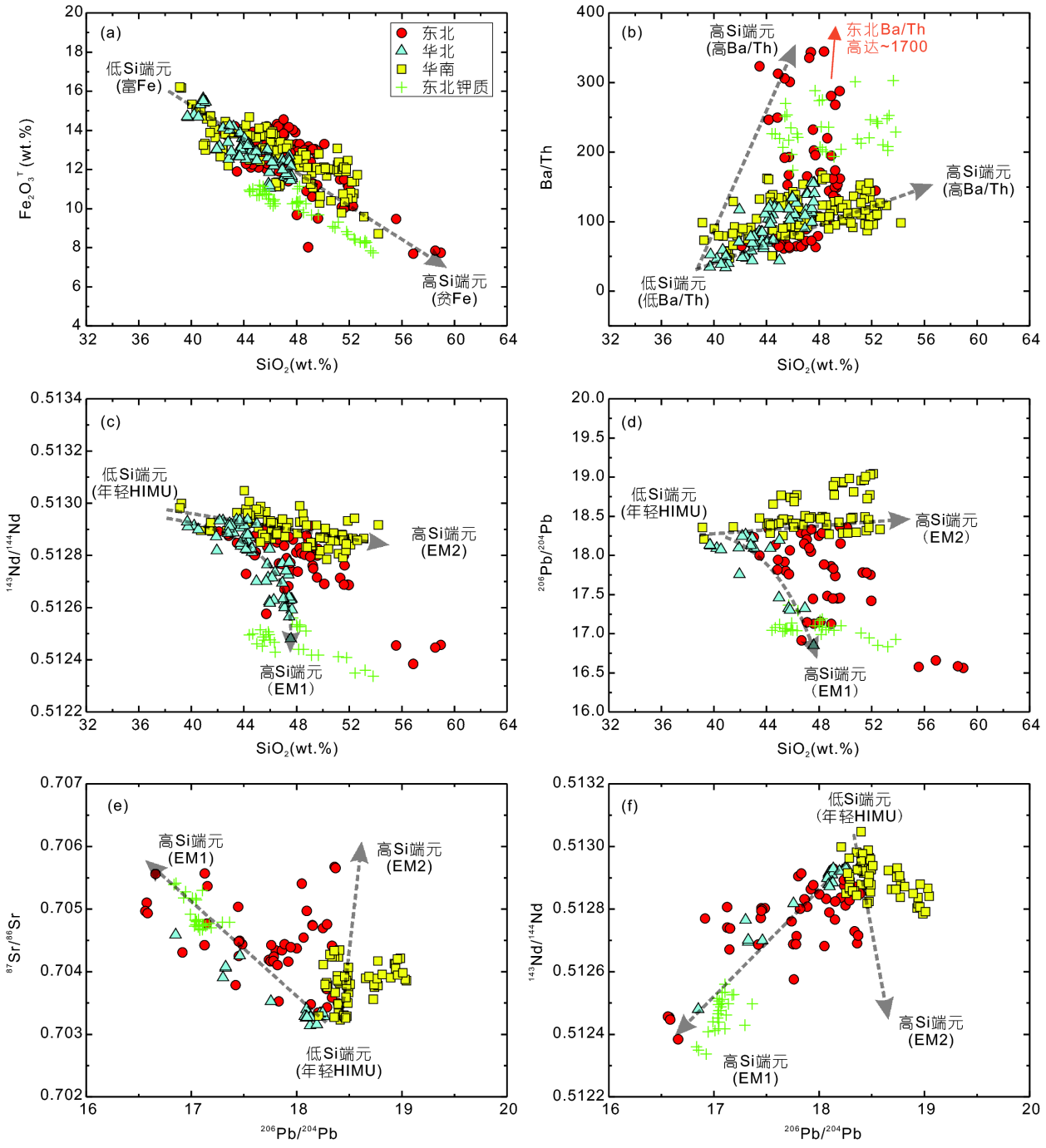

图 7　中国东部新生代玄武岩$Fe_2O_3^T$(a)、Ba/Th(b)、$^{143}Nd/^{144}Nd$(c)和$^{206}Pb/^{204}Pb$(d)与SiO_2以及$^{87}Sr/^{86}Sr$(e)和$^{143}Nd/^{144}Nd$(f)与$^{206}Pb/^{204}Pb$的关系图解

数据来源: 东北(Xu Y G等, 2012; 张辉煌等, 2006; 秦秀峰等, 2008; Kuang等, 2012); 华北(Qian等, 2015; Li S G等, 2017; Zeng等, 2010; 2011; Xu Z等, 2012; Sakuyama等, 2013); 华南(Huang等, 2013, 2015; Li等, 2015; Li S G等, 2017; Zeng等, 2017; Liu S C等, 2016; Yu等, 2015, 2017); 钾质(Liu J Q等, 2017; Wang等, 2017)

部新生代缺乏地幔柱活动的证据, 根据McKenzie等(2005)的研究, 其上地幔的潜能温度约为1350℃. 在这一条件下, 石榴石辉石岩发生熔融的深度为~70km; 而含碳酸盐的辉石岩+橄榄岩地幔发生初始熔融的深度

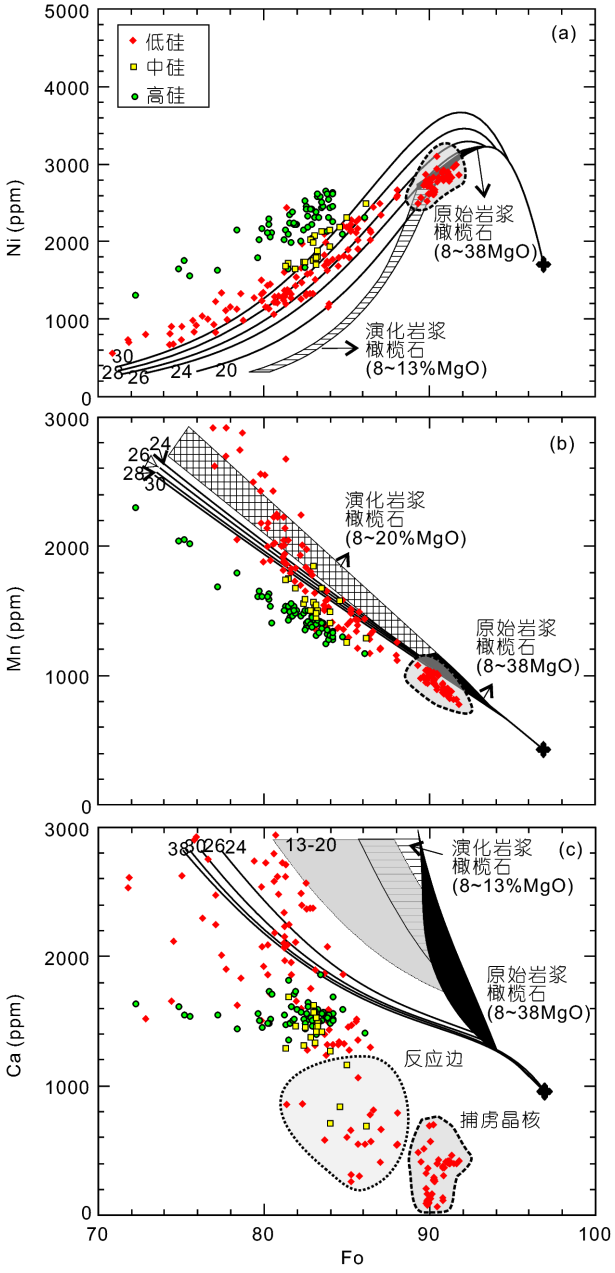

图 8　山东新生代玄武岩橄榄石化学组成

橄榄岩源区熔体结晶的橄榄石为Herzberg(2011)计算结果，据Li等(2016a)

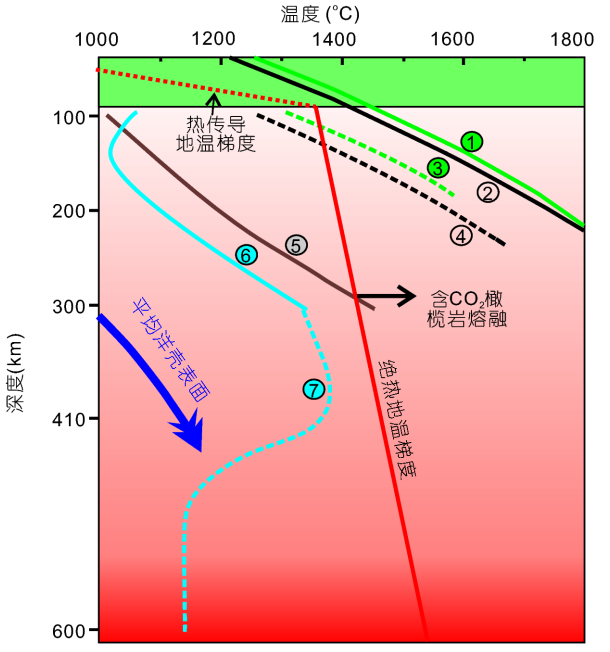

图 9　不同地幔组分的固相线

固相线: ① 橄榄岩(Hirschmann, 2000); ② 石榴石辉石岩(Kogiso等, 2003); ③ 碳酸盐化橄榄岩地幔形成硅酸质熔体; ④ 碳酸盐化辉石岩地幔形成硅酸质熔体(Dasgupta等, 2007); ⑤ 碳酸盐化橄榄岩地幔形成碳酸质熔体(Dasgupta等, 2006); ⑥ 碳酸盐化榴辉岩地幔形成碳酸质熔体(Dasgupta等, 2004); ⑦ 含碳酸盐榴辉岩化洋壳熔融形成碳酸质熔体(Thomson等, 2016)

约~300km(Dasgupta等, 2007). 需要指出的是, 图9中的模型是基于岩石学观察的简化模型，并没有考虑水对地幔物质熔融行为的影响. 如前所述，中国东部部分新生代玄武岩的源区是富水的，源区中水的存在可以使地幔物质在更深处熔融.

4.2　再循环组分的来源

虽然中国东部新生代板内玄武岩源区含有大量的再循环物质已有共识，但洋壳、水和沉积碳酸盐等再循环组分来源尚不清楚，也很难限定. 东亚地幔过渡带中俯冲板片的存在暗示新生代板内玄武岩的源区局限于上地幔，不可能来自于下地幔(Xu Y G等, 2012). 因此，很多学者将新生代板内玄武岩成因与滞留在地幔过渡带的俯冲太平洋板片联系起来(Zhao等, 2004; Ohtani和Zhao, 2009; Xu Y G等, 2012; Kuritani等, 2011; Sakuyama等, 2013; Li H Y等, 2016a, 2016b, 2017), 认为新生代板内玄武岩源区的再循环组分来自于滞留俯冲板片. 本文的分析进一步揭示有两类不同来源的再循环组分，分别被低硅玄武岩和高硅玄武岩所捕获, 应予以区别.

4.2.1　低硅玄武岩中的再循环组分(年轻洋壳、水和碳酸盐等)来源于滞留俯冲板片

主要的依据包括:

(1) 中国东部强碱性玄武岩(如山东大山、双辽玻璃山等)具有与年轻HIMU型玄武岩一致的微量元素和Sr-Nd同位素组成, 可能与再循环蚀变洋壳具有密切的成因联系(Xu Y G等, 2012). 另一方面, 这些玄武岩具有低的、类似于MORB的$^{206}Pb/^{204}Pb$, 而非HIMU型高Pb同位素组成, 说明再循环洋壳组分是年轻的(Thirlwall, 1997), 可能来自于转换带中滞留的俯冲太平洋洋壳(Xu Y G等, 2012). 山东强碱性低硅玄武岩的Hf-Nd同位素显示了太平洋洋壳属性(图5), 支持根据Pb同位素研究得出的结论.

(2) 中国东部新生代玄武岩源区的水含量具有明显的空间分布特征. 大兴安岭-太行山重力梯度带以东的玄武岩具有较高的含水量, 而位于重力梯度带及其以西地区的玄武岩源区的含水量很低, 甚至是干的(Xia等, 2017). 由于滞留在地幔过渡带的太平洋板片的西缘与重力梯度带的地理位置大致吻合(Huang和Zhao, 2006; Niu, 2005; Xu, 2007), 因此玄武岩源区水的空间变化特征暗示水的来源可能与滞留板片的脱水有关(Xia等, 2017).

(3) 重力梯度带以东的玄武岩具有较轻的Mg同位素组成, 而位于重力梯度带以西的柴河-阿尔山火山岩区的玄武岩的Mg同位素组成与正常地幔值一样. 如前所述, 低Mg同位素组成暗示中国东部新生代玄武岩源区普遍含有沉积碳酸盐(Yang等, 2012; Huang等, 2015). 参照限定水的来源时用的逻辑, 沉积碳酸盐组分可能只出现在大地幔楔中, 可能与滞留板片的脱碳有关(Li S G等, 2017).

(4) 中国东部自660~250km深度的上地幔导电率全球最高, 而该地区250km以浅的上地幔的导电率全球倒数第二低(Karato, 2011). 如果地幔导电率与水和CO_2含量有关(Karato, 2011; Gaillard等, 2008), 这说明东亚大地幔楔中H_2O+CO_2含量自下而上是逐渐降低的. 这种垂向分布特征与其地幔过渡带来源的推断是不矛盾的.

4.2.2 高硅玄武岩中的再循环组分来源于岩石圈地幔

高硅玄武岩中有两类不同的富集组分. 其中华北新生代玄武岩中的富集组分具有EM1特征, 华南玄武岩中的富集组分具有EM2特征, EM1和EM2在东北都有出现. 对这些富集组分目前没有统一的认识, 但考虑到华南和华北玄武岩显示区域上的差异, 本文倾向于认为富集组分继承了岩石圈地幔的特征.

4.3 东亚大地幔楔的垂向化学不均一性

如果上述推断是正确的话, 那么东亚大地幔楔可能存在垂向化学不均一性(图10). 浅部地幔含EM1或EM2地幔组分, 放射性成因同位素落入印度洋型地幔范围, 表现形式为零星分布的石榴石辉石岩, 可能来源于古老岩石圈地幔; 深部地幔含有更多的来自太平洋板块的物质贡献, 可能与滞留在地幔过渡带的太平洋板块的碳酸质熔体的改造有关. 这一认识与Huang等(2015)发现华南新生代低硅玄武岩具有更轻的Mg同位素的观察是一致的. 低程度部分熔融形成的熔体中易熔的碳酸盐组分更多, 因而具有较轻的Mg同位素组成, 而较高程度部分熔融形成的熔体中碳酸盐组分比例偏低, 稀释作用造成其具有相对较高的Mg同位素组成.

5 中国东部新生代板内玄武岩的大地幔楔成因机制

图10展示了东亚大地幔楔系统中板内玄武岩成因新模型. 在该模型中, 东亚大地幔楔存在垂向不均一性, 在地幔过渡带中滞留板片的脱碳和脱水作用及相关的熔融和交代作用是板内岩浆成因的主要驱动力. 这个模型可以解释前言中提及的长期困扰学术界的三个科学问题.

5.1 为什么中国东部新生代玄武岩产于大陆环境却显示与洋岛玄武岩相似的组成?

由于中国东部新生代板内玄武岩源区广泛存在再循环洋壳组分, 这个问题变得很好回答. 为洋岛玄武岩提出的洋壳再循环成因模式(Hofmann和White, 1982)同样适用于中国东部板内玄武岩的成因.

5.2 为什么中国东部新生代玄武岩处在太平洋构造域却主体显示印度洋型地幔特征?

如果东亚大地幔楔确实具有垂向不均一性, 那么这个问题也能得到回答. 中国东部新生代玄武岩的Hf-Nd同位素示踪表明, 太平洋构造域既有印度洋型地幔组分, 也有太平洋型地幔组分. 前者位于浅部地幔, 后

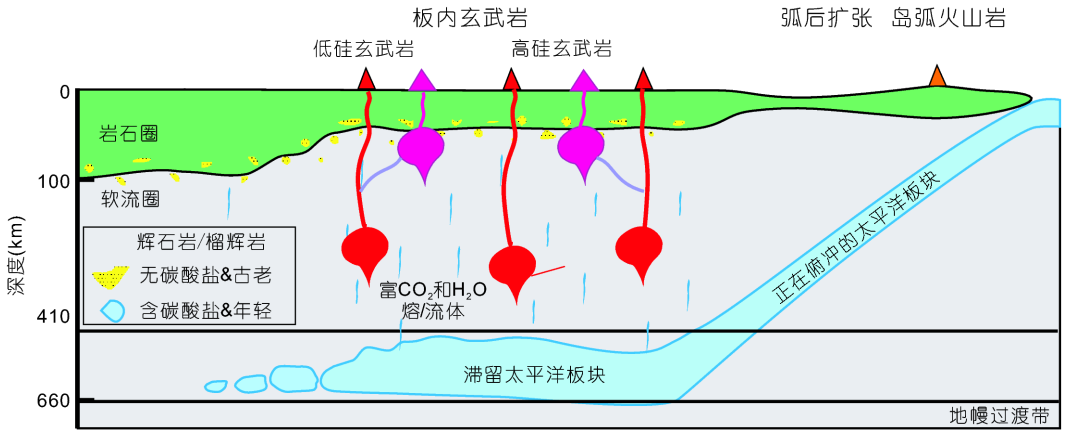

图 10　东亚大地幔楔物质组成与中国东部新生代玄武岩成因模型示意图

者位于深部地幔. 根据地幔熔融柱模型, 深部地幔发生小程度部分熔融, 因此低硅玄武岩可捕获更多的太平洋型地幔组分. 随着地幔上涌, 部分熔融过程既捕获深部的太平洋型地幔组分, 也捕获浅部的印度洋型地幔组分. 由于部分熔融随着地幔上涌而逐渐增大, 因此产生熔体中印度洋型地幔组分所占比重远大于太平洋型地幔组分, 所以高硅玄武岩更可能记录印度洋型地幔组分的特点. 以下两个因素可能导致了太平洋构造域广泛出现印度洋型地幔组分. (1) 由于华北克拉通破坏和岩石圈减薄, 中国东部岩石圈厚度一般小于80km, 所产生的岩浆大多是中等碱性程度的玄武岩, 而强碱性岩浆产出较少. (2) 浅部地幔具有印度洋型地幔组分, 可能与岩石圈减薄过程中大陆古老岩石圈地幔底部受对流软流圈的侵蚀有关(Xu等, 2005). 由于东亚大陆岩石圈源自原先位于南半球的冈瓦纳大陆(具有印度洋型地幔特征), 这就解释了为什么在太平洋构造域广泛出现印度洋型地幔特征这一问题.

5.3　地幔过渡带中的再循环组分是如何被传输至浅部成为玄武岩源区物质的?

Zhao等(2004)最早提出滞留板片脱水导致长白山火山喷发的模型, 其主要依据是地震层析图像中长白山火山下的上地幔存在一柱状低速体, 可追溯到地幔过渡带的深度. Ohtani和Zhao(2009)将此模型推广用于揭示整个东亚大陆边缘的板内玄武岩的成因. 不过该模型有如下不足: (1) 虽然中国东部部分玄武岩具有很高的含水量, 但也有很多玄武岩的含水量并不高, 甚至与亏损地幔的水含量相似(图4c); (2) 水参与地幔熔融产生的岩浆一般偏富Si, 而中国东部产有很多Si不饱和的玄武岩浆; (3) Kuritani等(2011)发现以长白山为中心, 火山岩的Ba/Th(该值越高说明源区的沉积物和水含量越高) 向四周逐渐降低, 以此来证明长白山的形成起因于滞留板块的脱水作用. 然而中国东部新生代火山的分布并不是以长白山为中心的. 换句话说, 如果长白山的喷发与板片脱水有关, 那么其他火山, 特别是那些具有低Ba/Th值的火山, 是否与脱水无关呢? (4) 地幔过渡带中洋壳的密度很高, 很难直接上升至浅部地幔. 滞留板片经脱水或脱碳释放挥发份进入上地幔, 这些挥发份具有很强的反应性, 如何从440km到达低硅玄武岩的起始熔融深度(即~300km)也不清楚. 所有这些均暗示俯冲板片的脱水可能在新生代玄武岩的成因方面有贡献, 但是否可以作为一个具有普适性的成因模型尚需更多的研究.

如前所述, 东亚大地幔楔还是一个巨大的碳库(Li S G等, 2017), 因此本文尝试强调碳在地幔熔融过程中的作用. 根据Thomson等(2016)的资料, 不管是冷的还是热的俯冲板片的地温梯度在地幔过渡带均会与碳酸盐化橄榄岩/榴辉岩的固相线相交, 即随着时间的推移俯冲板片逐渐被加热而发生熔融, 从而导致其脱水和脱碳进入熔体. Zhang Y F等(2017)最近的实验证明, 低Si富水熔体可以在地幔过渡带形成, 此外富水熔体出现可能反过来促进地幔过渡带物质的熔融. 因为碳酸质熔体具有较低密度, 所以会上升离开地幔过渡带进入上地幔. 同时这些熔体具有较强的反应性, 在上升过程中会与周边地幔岩发生反应, 交代上地幔, 形成碳酸盐化橄榄岩. 对于潜能温度为1350℃的正常地

幔(McKenzie等, 2005)而言, 含碳酸盐橄榄岩可以在~300km的深度发生熔融(Dasgupta等, 2007). 在~300km含碳酸盐橄榄岩的初始熔融产生的熔体是碳酸质(<10% SiO_2, ~40% CO_2). 最近在南海海山玄武岩中发现的碳酸盐熔体就是深部碳酸盐化橄榄岩熔融的产物(Zhang G L等, 2017). 一旦被循环进入地幔, 碳酸盐具有很强的促使地幔发生熔融的能力. 例如, Dasgupta等(2007)研究发现, 在3GPa条件下当温度升高至1325~1350℃, 含碳酸盐的橄榄岩熔融形成熔体的硅酸质(>25% SiO_2, <25% CO_2), 这一温度仍比"干"的橄榄岩的熔点要低~150℃(Dasgupta等, 2007). 处于部分熔融状态的地幔因其较小的密度成为地幔上涌的动力.

深部碳酸质熔体迁移至浅部地幔的障碍是地幔氧逸度. 虽然碳酸质熔体具有低粘度、低密度特点, 利于其迁移并交代地幔过渡带上部的上地幔, 但是实验证实250km以下的地幔处于还原状态, 甚至有游离态的Fe存在(Rohrbach和Schmidt, 2011). 在此情况下, 碳酸质熔体会被还原成金刚石赋存在深部地幔, 并不能到达~70km促使硅酸质熔体的形成(Kiseeva等, 2013). 但是, 该反应同时也会增加深部地幔的氧化状态(Kiseeva等, 2016; Thomson等, 2016). 例如, Kiseeva等(2018)对天然金刚石中的高压(200~660km)石榴石包裹体研究发现, 随着深度的增加, 石榴石的Fe^{3+}/Fe^{T}的比值从0.08增加到0.30; 其中, 来自地幔转换带中Fe^{3+}富集的石榴石与再循环洋壳密切相关. 这些Fe^{3+}富集的石榴石可能是碳酸盐熔体/流体与地幔橄榄岩反应的结果, 该矿物的出现指示经历俯冲改造后的地幔转换带将处于高氧化状态(Kiseeva等, 2018). 中国东部玄武岩源区存在大量再循环碳酸盐, 暗示上地幔底部已经处于高氧化状态. 虽然导致中国东部上地幔底部处于高氧化状态的机制仍不清楚, 但是, 根据Kiseeva等(2018)的研究成果, 我们推测地幔转换带中的太平洋滞留板片, 尤其是由其释放的碳酸盐熔体/流体, 可能是使中国东部上地幔底部处于高氧化状态的重要原因.

6 结论和展望

东亚大地幔楔的提出已经有十多年的历史了. 地球物理学家不仅描绘了清晰的地球深部物理形态, 也提供了新的研究机遇. 对中国东部新生代玄武岩的岩石学、地球化学和同位素示踪研究, 结合实验岩石学和深部地球物理探测资料, 使我们对东亚大地幔楔的物质组成、化学不均一性以及板内玄武岩的成因有了很多新的认识.

(1) 东亚大地幔楔含有大量再循环物质(洋壳、水和沉积碳酸盐), 主要来源于地幔过渡带的滞留板片, 也有部分来源于古老大陆岩石圈地幔.

(2) 中国东部新生代玄武岩是两个端员熔体的混合物: 高硅玄武岩具有EM1或EM2同位素组成特征, 显示印度洋型地幔特征, 源区为石榴石辉石岩; 低硅玄武岩具有HIMU型微量元素特征, 显示太平洋型地幔特征, 源区为含碳酸盐的榴辉岩+橄榄岩地幔.

(3) 东亚大地幔楔可能具有垂向不均一的结构: 上部同位素组成表现为印度洋型地幔特征, 下部含有太平洋板块物质组分.

(4) 在地幔过渡带中滞留板片的脱碳和脱水作用及相关的熔融和交代作用是大地幔楔体系中板内玄武岩成因的主要驱动力. 这一成因新机制可以解释为什么中国东部新生代玄武岩产于大陆环境却显示与洋岛玄武岩相似的组成? 为什么它处在太平洋构造域却主体显示印度洋型地幔特征?

尽管如此, 这一研究方向仍有很多问题期待解决. 例如, 滞留在地幔过渡带的俯冲洋壳下部和大洋岩石圈上部的蛇纹岩和沉积物可进一步脱水导致碳酸盐化榴辉岩相俯冲洋壳熔融, 产生的熔体渗透进入地幔过渡带上方的上地幔底部形成不同类型的交代地幔. 这种发生在大地幔楔底部的地幔交代作用与我们所熟知的小地幔楔系统中俯冲板片变质脱水、改造浅部地幔有很大的不同, 相关知识是经典板块构造理论所没有涵盖的. 有关滞留板块的脱水、脱碳机制, 及其引发地幔熔融的类型和机制, 产生的熔体与地幔过渡带上方地幔的交代作用是认识大地幔楔壳幔相互作用的关键, 可通过对中国东部晚白垩世-新生代幔源岩浆源区的地球化学研究和高温高压实验模拟来探讨. 业已证明东亚大地幔楔是一个巨大碳库, 查明深部碳循环对揭示地球系统的完整碳循环过程及对地球气候的影响有重要意义. 在大地幔楔形成过程中有多少沉积碳酸盐进入深部地幔, 又有多少CO_2通过火山作用返回地表, 与全球和区域环境和气候变化是否关联是今后值得关注的课题.

致谢 感谢朱日祥院士邀请撰写本文. 本文得益于2016年1月在广州召开的“西太平洋俯冲与东亚大陆地质演化”研讨会和CGU-2016/2017西太平洋板块专题富有启发性的讨论, 特别感谢与李曙光、金振民、张宝华等的讨论. 两位评审人的意见和建议对本文的修改和完善帮助很大.

参考文献

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

秦秀峰, 徐义刚, 张辉煌, 于宋月, 邱华宁. 2008. 大陆亚碱性火山岩的成因多样性: 以敦化-密山和东宁火山岩带为例. 岩石学报, 11: 2501–2514

张辉煌, 徐义刚, 葛文春, 马金龙. 2006. 吉林伊通-大屯地区晚中生代-新生代玄武岩的地球化学特征及其意义. 岩石学报, 22: 1579–1596

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

Chauvel C, Hofmann A W, Vidal P. 1992. HIMU-EM: The French Polynesian connection. Earth Planet Sci Lett, 110: 99–119

Chen H, Xia Q K, Ingrin J, Jia Z B, Feng M. 2015. Changing recycled oceanic components in the mantle source of the Shuangliao Cenozoic basalts, NE China: New constraints from water content. Tectonophysics, 650: 113–123

Chen L H, Zeng G, Jiang S Y, Hofmann A W, Xu X S, Pan M B. 2009. Sources of Anfengshan basalts: Subducted lower crust in the Sulu UHP belt, China. Earth Planet Sci Lett, 286: 426–435

Chu Z Y, Wu F Y, Walker R J, Rudnick R L, Pitcher L, Puchtel I S, Yang Y H, Wilde S A. 2009. Temporal evolution of the lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton. J Petrol, 50: 1857–1898

Dasgupta R, Hirschmann M M, Withers A C. 2004. Deep global cycling of carbon constrained by the solidus of anhydrous, carbonated eclogite under upper mantle conditions. Earth Planet Sci Lett, 227: 73–85

Dasgupta R, Hirschmann M M, Stalker K. 2006. Immiscible Transition from carbonate-rich to silicate-rich melts in the 3 GPa Melting Interval of Eclogite+CO_2 and genesis of silica-undersaturated ocean island lavas. J Petrol, 47: 647–671

Dasgupta R, Hirschmann M M, Smith N D. 2007. Partial melting experiments of peridotite+CO_2 at 3 GPa and genesis of alkalic ocean island basalts. J Petrol, 48: 2093–2124

Dasgupta R, Hirschmann M M, McDonough W F, Spiegelman M, Withers A C. 2009. Trace element partitioning between garnet lherzolite and carbonatite at 6.6 and 8.6 GPa with applications to the geochemistry of the mantle and of mantle-derived melts. Chem Geol, 262: 57–77

Deng L, Liu Y, Zong K, Zhu L, Xu R, Hu Z, Gao S. 2017. Trace element and Sr isotope records of multi-episode carbonatite metasomatism on the eastern margin of the North China Craton. Geochem Geophys Geosyst, 18: 220–237

Dixon J E, Leist L, Langmuir C, Schilling J G. 2002. Recycled dehydrated lithosphere observed in plume-influenced mid-ocean-ridge basalt. Nature, 420: 385–389

Eiler J M. 2001. Oxygen isotope variations of basaltic lavas and upper mantle rocks. Rev Mineral Geochem, 43: 319–364

Fukao Y, Obayashi M, Inoue H, Nenbai M. 1992. Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone. J Geophys Res, 97: 4809–4822

Gaillard F, Malki M, Iacono-Marziano G, Pichavant M, Scaillet B. 2008. Carbonatite melts and electrical conductivity in the asthenosphere. Science, 322: 1363–1365

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

Gale A, Dalton C A, Langmuir C H, Su Y J, Schilling J G. 2013. The mean composition of ocean ridge basalts. Geochem Geophys Geosyst, 14: 489–518

Gregory R T, Taylor Jr. H P. 1981. An oxygen isotope profile in a section of Cretaceous oceanic crust, Samail Ophiolite, Oman: Evidence for $\delta^{18}O$ buffering of the oceans by deep (>5 km) seawater-hydrothermal circulation at mid-ocean ridges. J Geophys Res, 86: 2737–2755

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

Hao Y T, Xia Q K, Liu S C, Feng M, Zhang Y P. 2012. Recognizing juvenile and relict lithospheric mantle beneath the North China Craton: Combined analysis of H_2O, major and trace elements and Sr-Nd isotope compositions of clinopyroxenes. Lithos, 149: 136–145

Hao Y T, Xia Q K, Tian Z Z, Liu J. 2016a. Mantle metasomatism did not modify the initial H_2O content in peridotite xenoliths from the Tianchang basalts of eastern China. Lithos, 260: 315–327

Hao Y T, Xia Q K, Jia Z B, Zhao Q C, Li P, Feng M, Liu S C. 2016b. Regional heterogeneity in the water content of the Cenozoic lithospheric mantle of Eastern China. J Geophys Res-Solid Earth, 121: 517–537

Herzberg C. 2011. Identification of source lithology in the Hawaiian and Canary Islands: Implications for origins. J Petrol, 52: 113–146

Hirose K, Kushiro I. 1993. Partial melting of dry peridotites at high pressures: Determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond. Earth Planet Sci Lett, 114: 477–489

Hirschmann M M. 2000. Mantle solidus: Experimental constraints and the effects of peridotite composition. Geochem Geophys Geosyst, 1: 1042–26

Hirschmann M M, Kogiso T, Baker M B, Stolper E M. 2003. Alkalic magmas generated by partial melting of garnet pyroxenite. Geology, 31: 481–484

Hirschmann M M, Tenner T, Aubaud C, Withers A C. 2009. Dehydration melting of nominally anhydrous mantle: The primacy of partitioning. Phys Earth Planet Inter, 176: 54–68

Hofmann A W, White W M. 1982. Mantle plumes from ancient oceanic crust. Earth Planet Sci Lett, 57: 421–436

Hong L B, Xu Y G, Ren Z Y, Kuang Y S, Zhang Y L, Li J, Wang F Y, Zhang H. 2012. Petrology, geochemistry and Re-Os isotopes of peridotite xenoliths from Yantai, Shandong Province: Evidence for Phanerozoic lithospheric mantle beneath eastern North China Craton. Lithos, 155: 256–271

Hong L B, Zhang Y H, Qian S P, Liu J Q, Ren Z Y, Xu Y G. 2013. Constraints from melt inclusions and their host olivines on the petrogenesis of Oligocene-Early Miocene Xindian basalts, Chifeng area, North China Craton. Contrib Mineral Petrol, 165: 305–326

Huang J, Li S G, Xiao Y, Ke S, Li W Y, Tian Y. 2015. Origin of low δ^{26}Mg Cenozoic basalts from South China Block and their geodynamic implications. Geochim Cosmochim Acta, 164: 298–317

Huang J, Xiao Y L. 2016. Mg-Sr isotopes of low-δ^{26}Mg basalts tracing recycled carbonate species: Implication for the initial melting depth of the carbonated mantle in Eastern China. Int Geol Rev, 58: 1350–1362

Huang J L, Zhao D P. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. J Geophys Res, 111: B09305

Huang X L, Niu Y L, Xu Y G, Ma J L, Qiu H N, Zhong J W. 2013. Geochronology and geochemistry of Cenozoic basalts from eastern Guangdong, SE China: Constraints on the lithosphere evolution beneath the northern margin of the South China Sea. Contrib Mineral Petrol, 165: 437–455

Ichiki M, Baba K, Obayashi M, Utada H. 2006. Water content and geotherm in the upper mantle above the stagnant slab: Interpretation of electrical conductivity and seismic P-wave velocity models. Phys Earth Planet Inter, 155: 1–15

Jaques A L, Green D H. 1980. Anhydrous melting of peridotite at 0–15 Kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts. Contr Mineral Petrol, 73: 287–310

Jung H, Karato S. 2001. Water-induced fabric transitions in olivine. Science, 293: 1460–1463

Karato S L. 2011. Water distribution across the mantle transition zone and its implications for global material circulation. Earth Planet Sci Lett, 301: 413–423

Kelley K A, Plank T, Ludden J, Staudigel H. 2003. Composition of altered oceanic crust at ODP Sites 801 and 1149. Geochem Geophys Geosyst, 4: 8910

Kiminami K, Imaoka T. 2013. Spatiotemporal variations of Jurassic-Cretaceous magmatism in eastern Asia (Tan-Lu Fault to SW Japan): Evidence for flat-slab subduction and slab rollback. Terra Nova, 25: 414–422

Kiseeva E S, Litasov K D, Yaxley G M, Ohtani E, Kamenetsky V S. 2013. Melting and phase relations of carbonated eclogite at 9–21 GPa and the petrogenesis of alkali-rich melts in the deep mantle. J Petrol, 54: 1555–1583

Kiseeva E S, Wood B J, Ghosh S, Stachel T. 2016. The pyroxenite-diamond connection. Geochem Persp Let, 2: 1–9

Kiseeva E S, Vasiukov D M, Wood B J, McCammon C, Stachel T, Bykov M, Bykova E, Chumakov A, Cerantola V, Harris J W, Dubrovinsky L. 2018. Oxidized iron in garnets from the mantle transition zone. Nat Geosci, 11: 144–147

Kogiso T, Tatsumi Y, Nakano S. 1997. Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: 1. Experiments and implications for the origin of ocean island basalts. Earth Planet Sci Lett, 148: 193–205

Kogiso T, Hirose K, Takahashi E. 1998. Melting experiments on homogeneous mixtures of peridotite and basalt: Application to the genesis of ocean island basalts. Earth Planet Sci Lett, 162: 45–61

Kogiso T, Hirschmann M M, Frost D J. 2003. High-pressure partial melting of garnet pyroxenite: Possible mafic lithologies in the source of ocean island basalts. Earth Planet Sci Lett, 216: 603–617

Kogiso T, Hirschmann M M. 2006. Partial melting experiments of bimineralic eclogite and the role of recycled mafic oceanic crust in the genesis of ocean island basalts. Earth Planet Sci Lett, 249: 188–199

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

Kuritani T, Ohtani E, Kimura J I. 2011. Intensive hydration of the mantle transition zone beneath China caused by ancient slab stagnation. Nat Geosci, 4: 713–716

Li C, Van der Hilst R D. 2010. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from traveltime tomography.

J Geophys Res, 115: B07308
Li H Y, Huang X L, Guo H. 2014. Geochemistry of Cenozoic basalts from the Bohai Bay Basin: Implications for a heterogeneous mantle source and lithospheric evolution beneath the eastern North China Craton. Lithos, 196-197: 54–66
Li H Y, Xu Y G, Ryan J G, Huang X L, Ren Z Y, Guo H, Ning Z G. 2016a. Olivine and melt inclusion chemical constraints on the source of intracontinental basalts from the eastern North China Craton: Discrimination of contributions from the subducted Pacific slab. Geochim Cosmochim Acta, 178: 1–19
Li H Y, Xu Y G, Ryan J G, Whattam S A. 2017. Evolution of the mantle beneath the eastern North China Craton during the Cenozoic: Linking geochemical and geophysical observations. J Geophys Res-Solid Earth, 122: 224–246
Li H Y, Zhou Z, Ryan J G, Wei G J, Xu Y G. 2016b. Boron isotopes reveal multiple metasomatic events in the mantle beneath the eastern North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 194: 77–90
Li S G, Yang W, Ke S, Meng X N, Tian H C, Xu L J, He Y S, Huang J, Wang X C, Xia Q K, Sun W D, Yang X Y, Ren Z Y, Wei H Q, Liu Y S, Meng F C, Yan J. 2017. Deep carbon cycles constrained by a large-scale mantle Mg isotope anomaly in eastern China. Nat Sci Rev, 4: 111–120
Li P, Xia Q K, Deloule E, Chen H, Gu X Y, Feng M. 2015. Temporal variation of H_2O content in the lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: Implications for the destruction of cratons. Gondwana Res, 28: 276–287
Li Y Q, Ma C Q, Robinson P T, Zhou Q, Liu M L. 2015. Recycling of oceanic crust from a stagnant slab in the mantle transition zone: Evidence from Cenozoic continental basalts in Zhejiang Province, SE China. Lithos, 230: 146–165
Liu J, Xia Q K, Deloule E, Chen H, Feng M. 2015a. Recycled oceanic crust and marine sediment in the source of alkali basalts in Shandong, eastern China: Evidence from magma water content and oxygen isotopes. J Geophys Res-Solid Earth, 120: 8281–8303
Liu J, Xia Q K, Deloule E, Ingrin J, Chen H, Feng M. 2015b. Water content and oxygen isotopic composition of alkali basalts from the Taihang Mountains, China: Recycled oceanic components in the mantle source. J Petrol, 56: 681–702
Liu J, Wang Z Z, Yu H R, Xia Q K, Deloule E, Feng M. 2017. Dynamic contribution of recycled components from the subducted Pacific slab: Oxygen isotopic composition of the basalts from 106 Ma to 60 Ma in North China Craton. J Geophys Res-Solid Earth, 122: 988–1006
Liu J, Rudnick R L, Walker R J, Gao S, Wu F Y, Piccoli P M, Yuan H L, Xu W L, Xu Y G. 2011. Mapping lithospheric boundaries using Os isotopes of mantle xenoliths: An example from the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 75: 3881–3902
Liu J Q, Chen L H, Wang X J, Zhong Y, Yu X, Zeng G, Erdmann S. 2017. The role of melt-rock interaction in the formation of Quaternary high-MgO potassic basalt from the Greater Khingan Range, northeast China. J Geophys Res-Solid Earth, 122: 262–280
Liu J Q, Ren Z Y, Nichols A R L, Song M S, Qian S P, Zhang Y, Zhao P P. 2015. Petrogenesis of Late Cenozoic basalts from North Hainan Island: Constraints from melt inclusions and their host olivines. Geochim Cosmochim Acta, 152: 89–121
Liu S A, Wang Z Z, Li S G, Huang J, Yang W. 2016. Zinc isotope evidence for a large-scale carbonated mantle beneath eastern China. Earth Planet Sci Lett, 444: 169–178
Liu S C, Xia Q K, Choi S H, Deloule E, Li P, Liu J. 2016. Continuous supply of recycled Pacific oceanic materials in the source of Cenozoic basalts in SE China: The Zhejiang case. Contrib Mineral Petrol, 171: 100
Liu X, Zhao D, Li S, Wei W. 2017. Age of the subducting Pacific slab beneath East Asia and its geodynamic implications. Earth Planet Sci Lett, 464: 166–174
Mattey D, Lowry D, MacPherson C. 1994. Oxygen isotope composition of mantle peridotite. Earth Planet Sci Lett, 128: 231–241
McKenzie D, Jackson J, Priestley K. 2005. Thermal structure of oceanic and continental lithosphere. Earth Planet Sci Lett, 233: 337–349
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
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
Pearce J A, Kempton P D, Nowell G M, Noble S R. 1999. Hf-Nd element and isotope perspective on the nature and provenance of mantle and subduction components in Western Pacific arc-basin systems. J Petrol, 40: 1579–1611
Peng Z C, Zartman R E, Futa K, Chen D G. 1986. Pb-, Sr- and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China. Chem Geol, 59: 3–33
Peslier A H, Bizimis M. 2015. Water in Hawaiian peridotite minerals: A case for a dry metasomatized oceanic mantle lithosphere. Geochem Geophys Geosyst, 16: 1211–1232
Qian S P, Ren Z Y, Zhang L, Hong L B, Liu J Q. 2015. Chemical and Pb isotope composition of olivine-hosted melt inclusions from the Hannuoba basalts, North China Craton: Implications for petrogenesis and mantle source. Chem Geol, 401: 111–125
Rohrbach A, Schmidt M W. 2011. Redox freezing and melting in the Earth's deep mantle resulting from carbon-iron redox coupling. Nature, 472: 209–212

Sakuyama T, Tian W, Kimura J I, Fukao Y, Hirahara Y, Takahashi T, Senda R, Chang Q, Miyazaki T, Obayashi M, Kawabata H, Tatsumi Y. 2013. Melting of dehydrated oceanic crust from the stagnant slab and of the hydrated mantle transition zone: Constraints from Cenozoic alkaline basalts in eastern China. Chem Geol, 359: 32–48

Salters V J M, Stracke A. 2004. Composition of the depleted mantle. Geochem Geophys Geosyst, 5: Q05B07

Sobolev A V, Hofmann A W, Sobolev S V, Nikogosian I K. 2005. An olivine-free mantle source of Hawaiian shield basalts. Nature, 434: 590–597

Sobolev A V, Hofmann A W, Kuzmin D V, Yaxley G M, Arndt N T, Chung S L, Danyushevsky L V, Elliott T, Frey F A, Garcia M O, Gurenko A A, Kamenetsky V S, Kerr A C, Krivolutskaya N A, Matvienkov V V, Nikogosian I K, Rocholl A, Sigurdsson I A, Sushchevskaya N M, Teklay M. 2007. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. Science, 316: 412–417

Stern R J, Scholl D W. 2010. Yin and yang of continental crust creation and destruction by plate tectonic processes. Int Geol Rev, 52: 1–31

Thirlwall M F. 1997. Pb isotopic and elemental evidence for OIB derivation from young HIMU mantle. Chem Geol, 139: 51–74

Thomson A R, Walter M J, Kohn S C, Brooker R A. 2016. Slab melting as a barrier to deep carbon subduction. Nature, 529: 76–79

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 X J, Chen L H, Hofmann A W, Mao F G, Liu J Q, Zhong Y, Xie L W, Yang Y H. 2017. Mantle transition zone-derived EM1 component beneath NE China: Geochemical evidence from Cenozoic potassic basalts. Earth Planet Sci Lett, 465: 16–28

Willbold M, Stracke A. 2006. Trace element composition of mantle end-members: Implications for recycling of oceanic and upper and lower continental crust. Geochem Geophys Geosyst, 7: Q04004

Wu F Y, Walker R J, Ren X W, Sun D Y, Zhou X H. 2003. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China. Chem Geol, 196: 107–129

Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, Yuan H L, Yang J H. 2006. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 70: 5013–5034

Xia Q K, Hao Y T, Li P, Deloule E, Coltorti M, Dallai L, Yang X Z, Feng M. 2010. Low water content of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the eastern part of the North China Craton. J Geophys Res, 115: B07207

Xia Q K, Hao Y T, Liu S C, Gu X Y, Feng M. 2013. Water contents of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the western part of the North China Craton: Peridotite xenolith constraints. Gondwana Res, 23: 108–118

Xia Q K, Liu J, Kovács I, Hao Y T, Li P, Yang X Z, Chen H, Sheng Y M. 2017. Water in the upper mantle and deep crust of eastern China: Concentration, distribution and implications. Natl Sci Rev, 90

Xu Y G. 2007. Diachronous lithospheric thinning of the North China Craton and formation of the Daxin'anling-Taihangshan gravity lineament. Lithos, 96: 281–298

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, Blusztajn J, Ma J L, Suzuki K, Liu J F, Hart S R. 2008. Late Archean to Early Proterozoic lithospheric mantle beneath the western North China craton: Sr-Nd-Os isotopes of peridotite xenoliths from Yangyuan and Fansi. Lithos, 102: 25–42

Xu Y G, Ma J L, Frey F A, Feigenson M D, Liu J F. 2005. Role of lithosphere-asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton. Chem Geol, 224: 247–271

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

Xu Z, Zhao Z F, Zheng Y F. 2012. Slab-mantle interaction for thinning of cratonic lithospheric mantle in North China: Geochemical evidence from Cenozoic continental basalts in central Shandong. Lithos, 146-147: 202–217

Yang 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

Yang X. 2012. Orientation-related electrical conductivity of hydrous olivine, clinopyroxene and plagioclase and implications for the structure of the lower continental crust and uppermost mantle. Earth Planet Sci Lett, 317-318: 241–250

Yu X, Chen L H, Zeng G. 2015. Growing magma chambers control the distribution of small-scale flood basalts. Sci Rep, 5: 16824

Yu X, Chen L H, Zeng G. 2017. Magmatic recharge buffers the isotopic compositions against crustal contamination in formation of continental flood basalts. Lithos, 284-285: 1–10

Zhang G L, Chen L H, Jackson M G, Hofmann A W. 2017. Evolution of carbonated melt to alkali basalt in the South China Sea. Nat Geosci, 10: 229–235

Zhang J B, Liu Y S, Ling W L, Gao S. 2017. Pressure-dependent compatibility of iron in garnet: Insights into the origin of ferropicritic melt. Geochim Cosmochim Acta, 197: 356–377

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 F, Wang C, Jin Z M, Zhu L. 2017. Partial melting of stagnant oceanic lithosphere in the mantle transition zone and its geophysical implications. Lithos, 292-293: 379–387

Zhao D P, Lei J S, Tang R Y. 2004. Origin of the Changbai intraplate volcanism in Northeast China: Evidence from seismic tomography. Chin Sci Bull, 49: 1401–1408

Zhao D, Tian Y. 2013. Changbai intraplate volcanism and deep earthquakes in East Asia: A possible link? Geophys J Int, 195: 706–724

Zeng G, Chen L H, Xu X S, Jiang S Y, Hofmann A W. 2010. Carbonated mantle sources for Cenozoic intra-plate alkaline basalts in Shandong, North China. Chem Geol, 273: 35–45

Zeng G, Chen L H, Hofmann A W, Jiang S Y, Xu X S. 2011. Crust recycling in the sources of two parallel volcanic chains in Shandong, North China. Earth Planet Sci Lett, 302: 359–368

Zeng G, Chen L H, Yu X, Liu J Q, Xu X S, Erdmann S. 2017. Magma-magma interaction in the mantle beneath eastern China. J Geophys Res-Solid Earth, 122: 2763–2779

Zhi X, Song Y, Frey F A, Feng J, Zhai M. 1990. Geochemistry of Hannuoba basalts, eastern China: Constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalt. Chem Geol, 88: 1–33

Zhou X H, Armstrong R L. 1982. Cenozoic volcanic rocks of eastern China—Secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition. Earth Planet Sci Lett, 58: 301–329

Zou H B, Zindler A, Xu X S, Qu Q. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: Mantle sources, regional variations, and tectonic significance. Chem Geol, 171: 33–47

(责任编委: 郑永飞)