

华南显生宙时期岩石圈地幔的性质与形成时代

刘传周

(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)

摘要:火山岩携带的橄榄岩捕虏体是研究深部岩石圈地幔成分特征与热结构状态的最直接样品。湖北大洪山早奥陶世钾镁煌斑岩携带的石榴二辉橄榄岩具有富集的地球化学特征,指示当时的岩石圈厚度可达110 km。华南内陆地区宁远和道县早侏罗世玄武岩所携带的地幔包体具有饱满的成分特征,代表遭受了较低程度部分熔融的地幔残留。宁远地幔包体的全岩 Re-Os 同位素特征显示该地区中生代大陆岩石圈地幔为从软流圈新增生而形成的新生地幔。这表明内陆地区古生代存在的富集地幔被完全拆沉,并被新生地幔所取代;中生代内陆地区的岩石圈拆沉作用可能与该地区自225 Ma以来大规模的岩石圈伸展作用有关。华南新生代地幔包体主要分布在沿海地区。通过地幔包体矿物成分估算获得的温度与压力资料揭示新生代沿海地区岩石圈厚度约为80~90 km,并具有热的地温梯度。无论是全岩还是硫化物的 Re-Os 同位素特征都表明沿海地区在新生代仍残留有古元古代岩石圈地幔,表明新生代沿海地区的拉张作用仅导致了岩石圈地幔的部分拆沉和减薄。

关键词:华南 大陆岩石圈地幔 地幔包体 Re-Os 同位素

中图分类号:P542.5;P597

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2013)05-0637-15

Nature and formation age of the Phanerozoic sub-continental lithospheric mantle in South China

LIU Chuan-Zhou

(State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100029, China)

Abstract: Mantle xenoliths entrained in volcanic rocks are direct samples that could provide important information on both compositions and thermal state of the sub-continental lithospheric mantle (SCLM). Garnet lherzolites trapped by lamproites that were emplaced during the Early Ordovician at Dahongshan of Hubei Province display abundant characteristics of both trace elements and isotopes. Their p - t estimates indicate that the SCLM has a thickness of ~110 km. Mantle xenoliths trapped by the Early Jurassic basalts in the hinterland of South China (Ningyuan and Daoxian) have fertile compositions, representing the mantle residues that were subjected to low degrees of partial melting. The whole-rock Re-Os isotopes of Ningyuan mantle xenoliths support the existence of juvenile mantle in these areas during the Mesozoic, which resulted from the accretion of the asthenosphere. Therefore, the enriched mantle that had probably existed beneath Ningyuan during the Paleozoic was completely delaminated and replaced by juvenile mantle. The mantle delamination was geodynamically related to the large-scale lithospheric extension, which occurred since ~225 Ma. The Cenozoic basalts widely distributed along the coastal areas of South China contain abundant mantle xenoliths. p - t estimates based on mineral composition reveal that the lithospheric mantle has a thickness of 80~90 km, with a hot geothermal gradient.

收稿日期:2013-06-05; 修订日期:2013-08-10

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-109);国家自然科学基金面上项目(41222037 A1273045)

作者简介:刘传周(1981-),男,副研究员,研究方向:岩石地球化学,E-mail:chliu@mail.igcas.ac.cn

Both whole-rock and sulfide Re-Os isotopes support the existence of ancient mantle residues of Paleoproterozoic ages beneath the coastal areas of South China during the Cenozoic. Therefore, the Cenozoic lithospheric extension in this area only triggered partial removal of the ancient lithospheric mantle.

Key words: South China; Sub-continental lithospheric mantle (SCLM); mantle xenoliths; Re-Os isotopes

岩石圈地幔是指原始地幔发生熔体迁出形成地壳后的残留。地幔在发生部分熔融时,铁具有相对于镁较低的熔融温度而优先熔出进入到玄武质岩浆中,残留的橄榄岩由于相对富镁从而变轻。部分熔融程度越高,壳幔分异程度越大,所形成的岩石圈地幔密度越小。克拉通岩石圈,特别是古老岩石圈地幔具有较低的密度,因而能够长久漂浮在地球的表面,而它本身巨大的岩石圈厚度(约200 km)和较低的热流不易被俯冲破坏,使其能够较少受到其它地质作用的影响而保持长期的稳定性(Jordan, 1988)。正是由于这些原因,使得克拉通被认为是地球上最稳定的构造单元。然而,国内外越来越多的研究显示,克拉通并不能够保持永恒的稳定,克拉通地幔也可以发生减薄并引发克拉通遭受破坏而失去稳定性,其中我国华北克拉通东部地区已经被国内外学者公认为克拉通破坏的典型代表(Carlson *et al.*, 2005)。对不同时代岩浆岩携带的地幔包体的大量研究表明,华北克拉通东部岩石圈地幔的性质发生了根本性的改变,即早期古老的巨厚富集岩石圈地幔在古生代以后被薄的亏损型软流圈或大洋型地幔所取代(Fan and Menzies, 1992; Griffin *et al.*, 1992, 1998; Menzies *et al.*, 1993; Menzies and Xu, 1998; Zheng *et al.*, 1998; Xu, 2001; Chu *et al.*, 2009)。另一方面,自中生代以来,华北克拉通东部广泛发育有大规模的岩浆活动,并伴随有金属矿床的形成,地壳也发生明显的构造变形,形成众多的盆地。这些证据都无疑表明华北克拉通,至少在其东部,克拉通地幔发生了显著的减薄,克拉通也不再保持稳定。尽管目前对于华北克拉通地幔的减薄机制还存在一定的争论(Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; Zheng *et al.*, 1998; Gao *et al.*, 2002; Xu, 2001; Zhang *et al.*, 2002, 2007; Wu *et al.*, 2003; 邓晋福等, 1994; 吴福元等, 1999),但是大多数学者都强调了太平洋板片的俯冲是岩石圈地幔减薄中的主导因素(Wu *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2007)。

实际上,整个中国东部地区自中生代以来的构造演化同样也受控于古太平洋板块的俯冲作用

(Sun *et al.*, 2007)。那么,由此引出的一个问题是,太平洋板块的俯冲对华南的大陆岩石圈地幔有着怎样的影响,或者说,华南的大陆岩石圈地幔是否也经历了与华北克拉通相似的岩石圈减薄过程?与华北克拉通相比,研究华南岩石圈是否经历减薄过程这一问题面临更大的难度,因为华南地区缺乏制约不同时期岩石圈厚度的地质资料。整个华南地区古生代和中生代幔源岩浆活动不发育,并且很少携带有地幔包体。目前,古生代地幔包体只在湖北大洪山的煌斑岩中有过报道,而中生代的地幔包体只出现于华南内陆的湖南道县、宁远以及广西的平南等少数地区。相对而言,华南的新生代火山岩分布范围非常广泛,并且普遍都携带有地幔包体,但新生代火山岩主要集中于东南沿海地区,在内部腹地分布非常有限。尽管如此,这些不同时代的橄榄岩包体仍为我们研究华南地区岩石圈地幔随时代的演化提供了最直接的研究对象。笔者对宁远中生代地幔包体以及浙江新昌和福建明溪等地区的新生代包体开展了全岩Re-Os同位素研究,试图制约不同时期大陆岩石圈地幔的形成时代,从而揭示自中生代以来华南岩石圈地幔发生的减薄过程。

1 区域地质概况

华南由扬子陆块和华夏陆块沿新元古代江南造山带拼合而成(图1),二者在前寒武纪基底的形成和演化上总体具有不一致性(郑永飞和张少兵, 2007)。一般认为,扬子陆块的基底岩石主要有出露于湖北省宜昌附近的崆岭杂岩,包括2.9~2.95 Ga的TTG质片麻岩和混合岩、1.9~2.0 Ga的变沉积岩(其中含大量的太古宙碎屑锆石)以及少量呈透镜状产出的角闪岩和镁铁质麻粒岩(Gao *et al.*, 1999; Qiu *et al.*, 2000)。而华夏陆块的古老基底主要为浙西南的八都杂岩、浙北诸暨陈蔡杂岩和闽西北天井坪斜长角闪岩,年龄为1.8~2.0 Ga左右(甘晓春等, 1995; 李曙光等, 1996; 李献华等, 1998)。这些古老岩石的出露表明,扬子陆块和华夏陆块可能存在太古宙至古元古代的地壳基底。

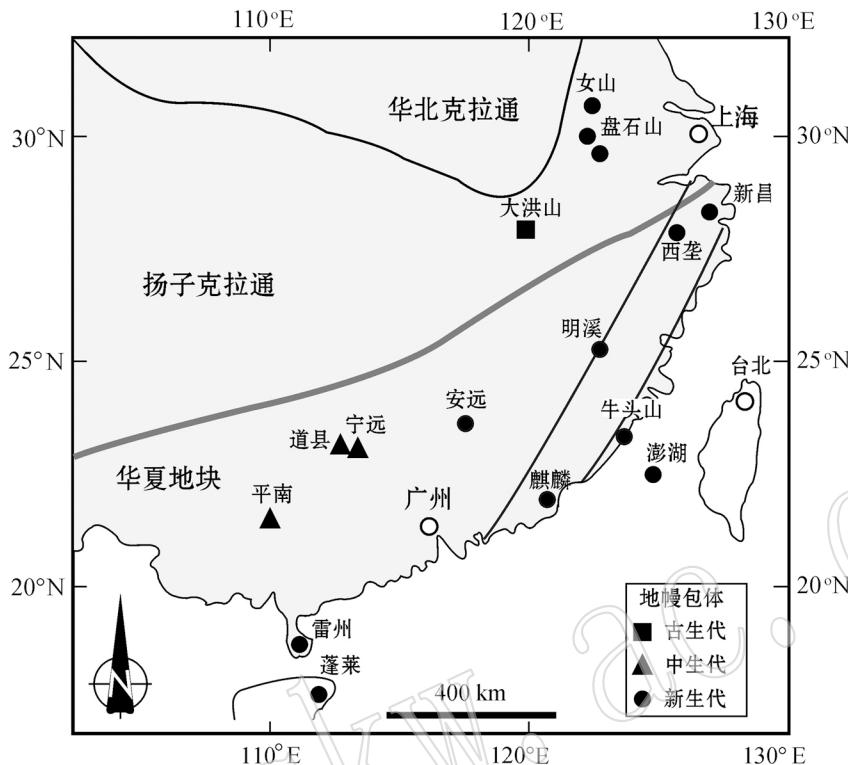


图 1 华南地质简图及不同时代地幔包体的分布地点

Fig. 1 Sketch geological map of South China and locations of mantle xenoliths of different ages

华南自新元古代早期拼合形成以后, 在 830~750 Ma 期间由于遭受 Rodinia 地幔柱的影响而发生裂解, 并伴随有玄武岩、苦橄岩和科马提岩的喷发 (Wang *et al.*, 2007, 2009)。自 700 Ma 开始, 一直到早侏罗世晚期 (190 Ma), 在长达 5 亿多年的时间里, 华南一直远离板块俯冲带, 为滨海-浅海-斜坡沉积环境, 没有切穿岩石圈的大断裂, 没有大规模的火山活动, 没有强烈的幔源岩浆活动 (舒良树, 2012)。在中生代时期, 华南地区构造动力体制经历了从特提斯构造域向滨太平洋构造域的转换, 由此产生了强烈的陆内造山作用和岩浆活动, 形成了复杂构造组合的晚中生代陆内造山带和火成岩省 (Zhou *et al.*, 2006)。自中生代末以来, 华南地块的东南缘处于拉张构造环境, 形成面积不大但分布广泛的新生代火山岩。

2 华南显生宙时期岩石圈地幔的性质与形成时代

2.1 古生代

整个古生代时期, 华南地区的幔源岩浆活动非

常不发育, 地幔包体的出露地点也非常少, 使得我们对于华南古生代岩石圈地幔性质的了解极为有限。目前, 只有在扬子地块的北缘湖北大洪山地区古生代钾镁煌斑岩中发现有少量的石榴二辉橄榄岩包体 (刘永顺等, 1991)。对大洪山钾镁煌斑岩中钙钛矿进行 U-Pb 定年获得的年龄约为 480 Ma (李秋立, 未发表资料), 表明其侵位于早古生代。刘观亮等 (1993) 报道大洪山钾镁煌斑岩具有富集的 Sr-Nd 同位素组成, ϵ_{Nd} 值为 $-3 \sim -12$, 表明其来源于富集的大陆岩石圈地幔。大洪山石榴二辉橄榄岩的全岩与单斜辉石均具有富集的稀土元素配分型式和富集的 Sr-Nd 同位素组成, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 ϵ_{Nd} 分别为 0.707 844~0.706 614 和 $-4.33 \sim -5.7$ (Zhang *et al.*, 2001)。温压估算结果表明石榴二辉橄榄岩的平衡温度为 $1042 \sim 1155^\circ\text{C}$, 压力为 $3.4 \sim 3.6 \text{ GPa}$, 对应的深度为 $110 \sim 120 \text{ km}$ (刘永顺和赵崇贺, 1991; Zhang *et al.*, 2001)。这些结果暗示扬子地块在早古生代时期存在有厚度大于 110 km 的富集地幔。同时期侵位于贵州镇远地区的钾镁煌斑岩同样具有富集的 Sr-Nd 同位素特征 (方维萱等, 2002), 进一步支持扬子地块早古生代存在富集的大陆岩石

圈地幔的认识。

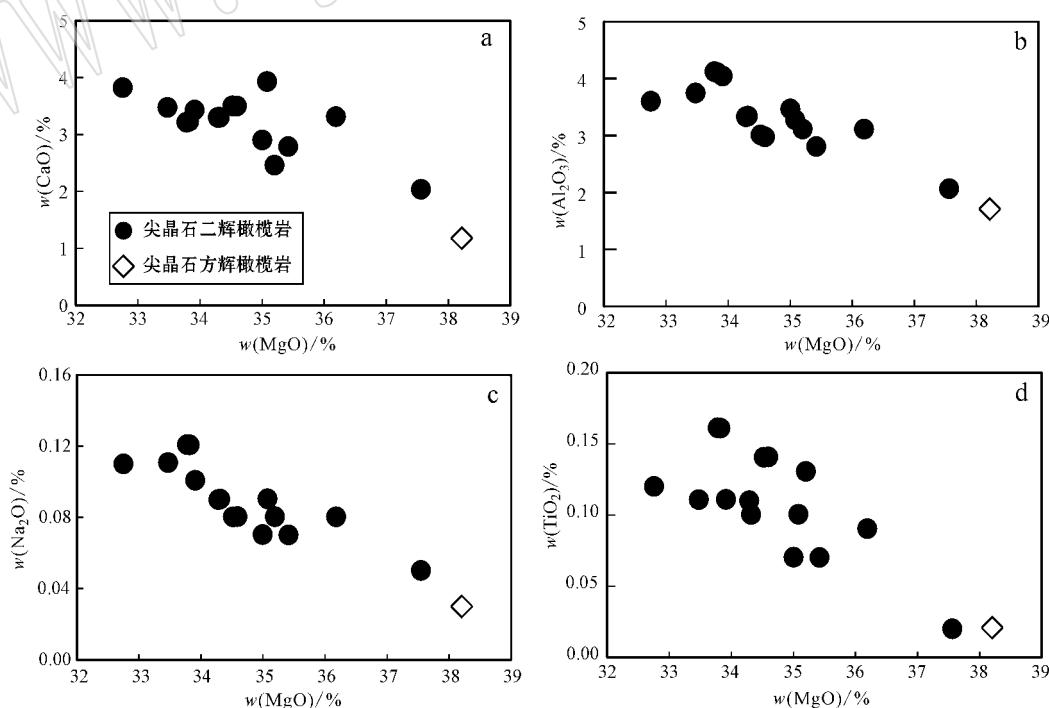
2.2 中生代

华南晚中生代以来发育有 EW 向和 NNE 向两条火山岩带。早期 EW 向火山岩带以玄武岩为主, 形成于早侏罗世(180~170 Ma), 主要分布在内陆地区呈近东西向展布, 从西至东分别为湘南地区的宁远-道县-新田、湘东南的宜章、赣南的龙南-寻坞以及闽西南的永定地区(谢昕等, 2005; 徐夕生和谢昕, 2005)。晚期 NNE 向火山带形成于白垩纪(130~90 Ma), 主要分布在浙江-福建沿海地区, 以流纹岩为主, 中、基性岩很少。华南中生代地幔包体出露地点较少, 目前只在湘南地区(宁远和道县)和广西平南县双田地区的中生代玄武岩中有所报道(王方正等, 1997; 孔华等, 2000, 2001; 陈必河等, 2004)。宁远和道县碱性玄武岩的喷发时代仍存在一定的争议。赵振华等(1998)对道县虎子岩的玻基辉橄榄岩进行 Ar-Ar 定年, 获得的坪年龄为 204 Ma。Li 等(2004)对道县和宁远的碱性玄武岩进行了 Ar-Ar 定年, 获得的坪年龄分别为 149~154 Ma 和 174~176 Ma。宁远和道县中生代玄武岩只携带有尖晶石相橄榄岩包体, 其中二辉橄榄岩占绝大多数, 迄今为止尚未有石榴石相橄榄岩包体的报道(王方正等,

1997; 陈必河等, 2004; 夏群科等, 2010; Zheng *et al.*, 2004)。

已发表的数据表明, 宁远和道县中生代地幔包体具有非常饱满的成分(王方正等, 1997; 陈必河等, 2004; 夏群科等, 2010; Zheng *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2012a)。比如, Liu 等(2012a)报道宁远地幔包体具有较低的全岩 MgO 含量和较高的 Al₂O₃ 含量(图 2), 分别为 32.72%~38.01% 和 1.72%~4.09%。橄榄石的 Fo 值为 88.3~90.8, 尖晶石的 Cr# 为 0.07~0.24(图 3)。同时, 无论是斜方辉石还是单斜辉石都具有较高的 Al₂O₃ 含量。此外, 宁远地幔包体的单斜辉石不同程度地亏损轻稀土元素和大离子亲石元素等不相容元素(图 4)。尖晶石的主要元素成分和单斜辉石成分表明宁远地幔包体遭受了较低程度部分熔融作用(图 5)。宁远地幔包体的地球化学特征显著区别于古老的克拉通地幔, 而与新生地幔的特点非常类似(Zheng *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2012a)。

陈必河等(2004)对宁远二辉橄榄岩样品不同的矿物进行 Sm-Nd 同位素定年, 获得了 27 亿年左右的内部等时线年龄, 但该等时线的可靠性存在疑问。Re-Os 同位素是公认的对大陆岩石圈地幔定年的



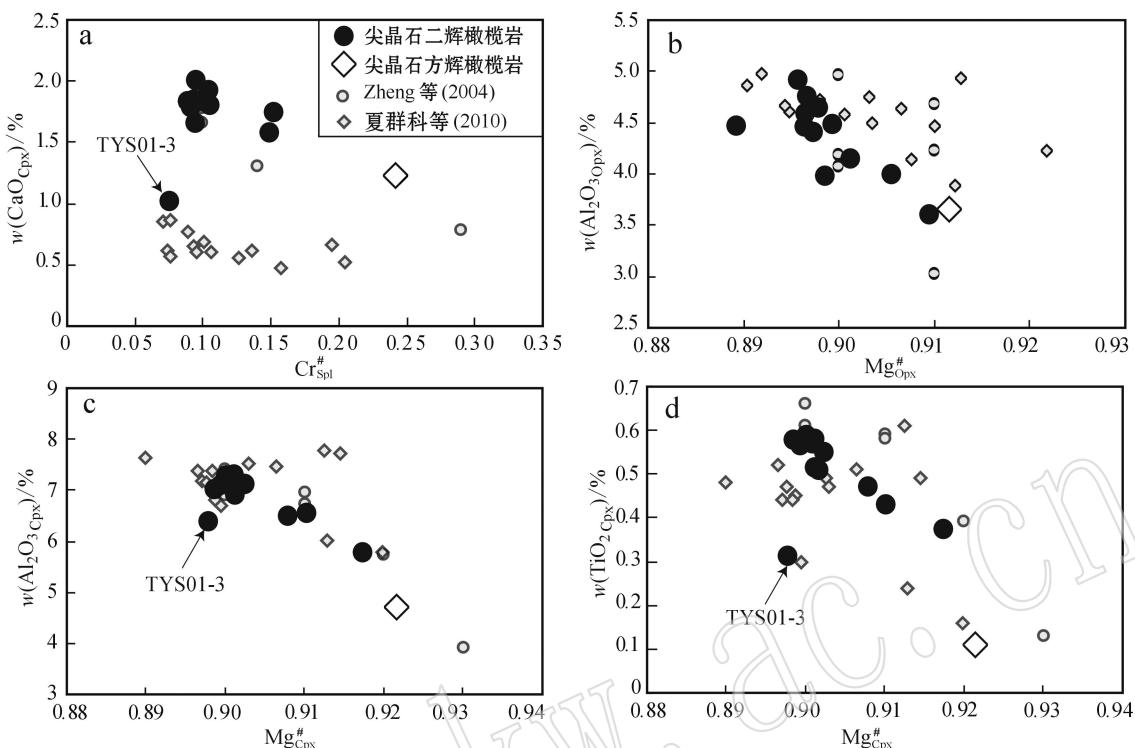


图3 宁远太阳山中生代地幔包体的矿物主量元素相关图(引自 Liu 等, 2012a)

Fig. 3 Mineral major elements of the Mesozoic Taiyangshan mantle xenoliths from Ningyuan (after Liu *et al.*, 2012a)

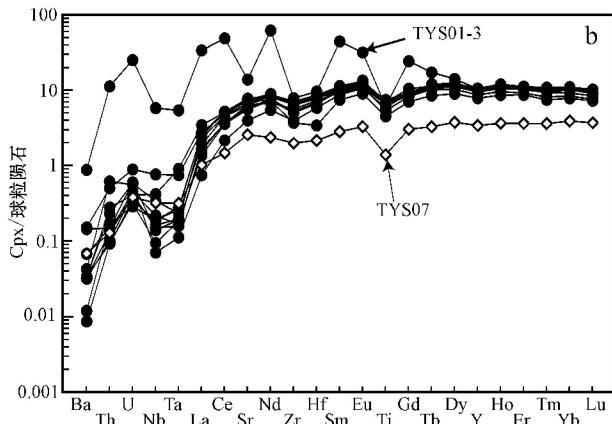
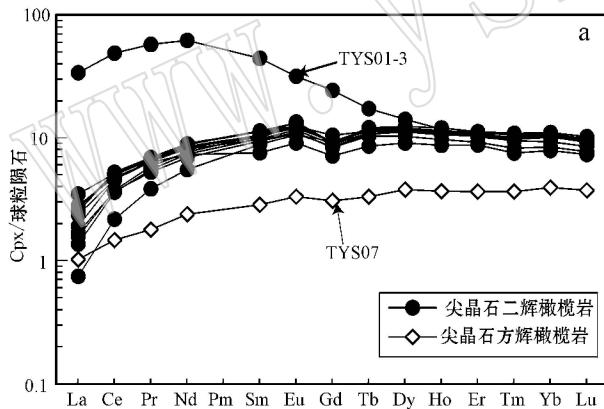


图4 宁远太阳山中生代地幔包体的单斜辉石的REE(a)和微量元素(b)配分图(引自 Liu 等, 2012a)

Fig. 4 REE (a) and trace elements (b) of clinopyroxene in the Mesozoic Taiyangshan mantle xenoliths from Ningyuan (after Liu *et al.*, 2012a)

最可靠方法 (Shirey and Walker, 1998; Pearson, 1999; Rudnick and Walker, 2009)。对宁远地幔包体进行的全岩 Re-Os 同位素测定结果表明, 二辉橄榄岩具有较高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值, 变化范围为 0.121 16~0.129 29 (Zhang *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2012a), 对应的 Re 亏损年龄 (T_{RD}) 为 0.25~1.26 Ga。而唯一的方辉橄榄岩具有较低的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值 (0.116 53) 和约为 18 亿年的 T_{RD} 年

龄。宁远地幔包体的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 与 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 呈现弱正相关关系 (图 6a), 而与全岩 Al_2O_3 含量呈较好的正相关关系 (图 6b)。橄榄岩中 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 与 Al_2O_3 之间线性相关关系被认为是大陆岩石圈地幔发生部分熔融的结果 (Reisberg and Lorand, 1995), 从而可以用来限定大陆岩石圈地幔的形成时代。宁远地幔包体的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ - Al_2O_3 相关性似乎可以解释为岩石圈地幔在 18~22 亿年之间遭受了熔体

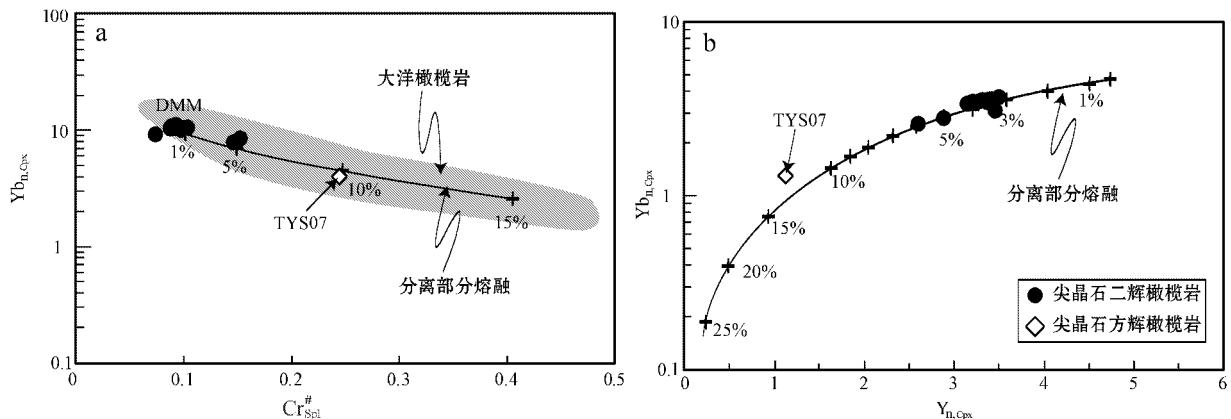


图 5 宁远太阳山中生代地幔包体单斜辉石 Yb 含量-尖晶石 Cr[#](a) 和单斜辉石 Yb-Y 含量(b) 相关图
(引自 Liu 等, 2012a)

Fig. 5 Yb content of clinopyroxene versus Spinel Cr[#](a) and Yb versus Y content of clinopyroxene in the Mesozoic Taiyangshan mantle xenoliths from Ningyuan (after Liu et al., 2012a)

(a) 单斜辉石的 Yb 含量为球粒陨石标准化值, DMM 为亏损地幔; (b) 单斜辉石 Yb 和 Y 含量均为原始地幔标准化值

(a) chondrite-normalized Yb content of clinopyroxenes, DMM : depleted MORB mantle; (b) primitive mantle-normalized Yb and Y content of clinopyroxenes

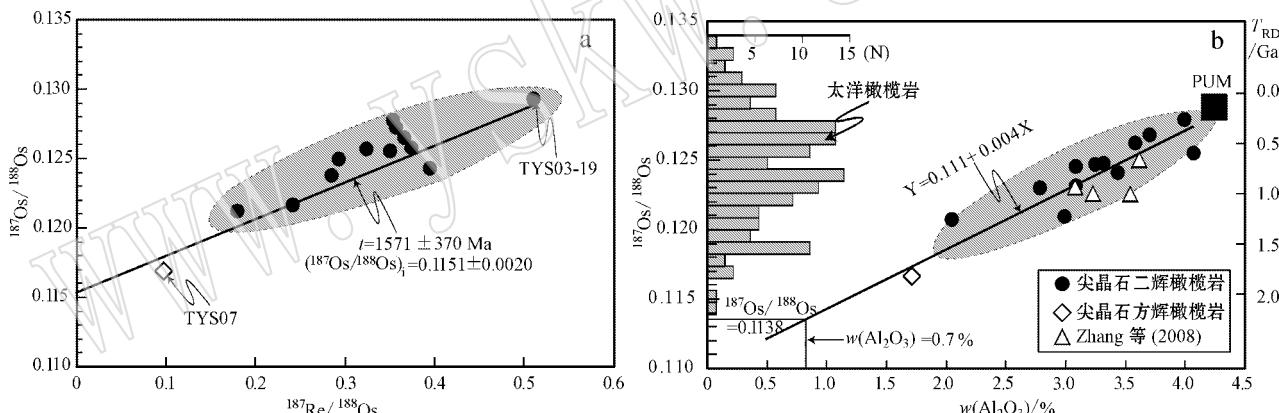


图 6 宁远太阳山中生代地幔包体全岩 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os - ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os(a) 和 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os - 全岩 Al₂O₃ 含量(b) 相关图
(引自 Liu 等, 2012a)

Fig. 6 Whole-rock ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os versus ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os (a) and bulk Al₂O₃ content (b) of the Mesozoic Taiyangshan mantle xenoliths from Ningyuan (after Liu et al., 2012a)

抽取事件所致,从而说明该地区的岩石圈地幔可能形成于古元古代。然而,考虑到宁远地幔包体是以饱满的二辉橄榄岩为主,所有样品的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 值均落入现代大洋橄榄岩的范围之内 (Snow and Reisberg, 1995; Brandon et al., 2000; Harvey et al., 2006; Liu et al., 2008),并且绝大多数样品的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 值与现代大洋橄榄岩的主体峰值一致。同时,已有的研究表明宁远地幔包体具有亏损的 Nd 同位素,变化范围为 +11 ~ +113.5 (Zhang et al., 2008)。因此,我们认为宁远包体代表了软流圈地幔

新增生的年轻岩石圈地幔,而非古老的元古宙地幔 (Liu et al., 2012a)。

2.3 新生代

华南新生代火山岩主要形成于中新世至更新世 (20~2 Ma),以面积较小的玄武岩浆喷发为主,受大陆边缘断裂构造的控制,呈 NNE 向广泛分布在东南沿海地区 (徐夕生和谢昕, 2005)。新生代火山岩普遍携带有地幔橄榄岩包体,著名的产地包括安徽女山、江苏六合 (塔山、方山和盘石山)、浙江新昌、西垄和龙游,福建明溪和牛头山,广东麒麟和雷州徐

闻, 海南蓬莱以及台湾的澎湖列岛。自上世纪 80 年代以来, 我国学者对华南新生代地幔包体进行了大量的研究工作 (Fan and Hooper, 1989; Qi et al., 1995; Xu X S et al., 1996, 1998, 2000, 2008; Xu Y G et al., 2002; Wang et al., 2003; Ho et al., 2006; Yu J H et al., 2006; Yu Y et al., 2011; Liu et al., 2012b; 孙伟汉和赖志敏, 1980; 曹荣龙和朱寿华, 1983; 池际尚, 1987; 鄂莫岚和赵大升, 1987; 王人镜等, 1987a, 1987b; 黄婉康等, 1992; 林传勇等, 1994; 徐九华等, 1999; 徐夕生和周新民, 1995; 徐夕生等, 2000; 徐义刚等, 2001, 2002) 主要集中在揭示华南东部沿海地区上地幔的成分和热结构状态 (金振民等, 1993; 林传勇等, 1995, 1999; 徐义刚等, 1995; Xu X S et al., 1996; Xu Y G et al., 1999; Yu J H et al., 2003; Huang and Xu, 2010)。华南新生代地幔包体普遍具有较高的平衡温度, 暗示该地区具有较热的地温梯度 (张儒瑗和从柏林, 1985; 金振民等, 1993; 林传勇等, 1995, 1999; 徐义刚等, 1995; Xu X S et al., 1996; Xu Y G et al., 1999; Yu J H et al., 2003; Huang and Xu, 2010)。同时, Huang 和 Xu (2010) 重新总结了所有发表的温压资料, 提出华南东部沿海地区存在两类不同性质的地温曲线。第 1 类地温曲线以明溪地区为代表, 从石榴石橄榄岩到尖晶石相橄榄岩再到下地壳麻粒岩的温度变化比较平滑。而第 2 类地温曲线以浙江新昌地区为代表, 主要特征是在 60 km 处, 上部和下部的地温梯度有所偏转, 60 km 以浅的岩石圈表现为典型的传导式地温梯度, 而其

下部则与软流圈地幔的对流式传导类似。此外, 根据推测的地温曲线, 推测华南沿海地区的岩石圈地幔厚度约为 80 km (Huang and Xu, 2010)。这与地球物理观测的结果是相吻合的 (姚伯初等, 2006; An and Shi, 2006; Li et al., 2006)。

我国学者自上世纪 90 年代来就对华南多个地点的新生代地幔包体开展了详细的全岩及硫化物的 Re-Os 同位素研究 (支霞臣等, 1996, 2001, 2007; 孙卫东等, 1997; 刘志超等, 2010; Wang et al., 2003; Xu X S et al., 2008; Liu et al., 2012b)。支霞臣等 (2001) 对苏皖地区新生代包体进行了全岩 Re-Os 同位素测定, 获得了早中元古代 (~19 亿年) 的模式年龄, 并认为代表了残存在该地区的古老岩石圈地幔。Reisberg 等 (2005) 对苏皖盆地的盘石山、方山和练山的新生代地幔包体进行全岩 Re-Os 同位素研究, 获得了良好的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ -Yb 代用等时线, 对应的模式年龄为 18 亿年, 并解释为古元古代的大陆岩石圈地幔残留。我们对浙江新昌的尖晶石相和石榴石相橄榄岩包体进行了全岩 Re-Os 同位素研究, 发现尖晶石相方辉橄榄岩具有较低的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值 (图 7) 和 1.1 ~ 1.4 Ga 模式年龄 (Liu et al., 2012b)。此外, 我们对明溪地幔包体全岩 Re-Os 同位素的研究显示, 尖晶石方辉橄榄岩也同样具有 18 亿年左右的古老模式年龄 (图 8)。Wang 等 (2003) 对台湾澎湖地区橄榄岩包体中的硫化物进行了激光原位 Re-Os 同位素分析, 获得主体为中元古代的模式年龄, 同时也有少量的古元古代年龄。Xu 等 (2008) 对扬子地块 (苏皖盆地的盘石山、方山和练山) 和华

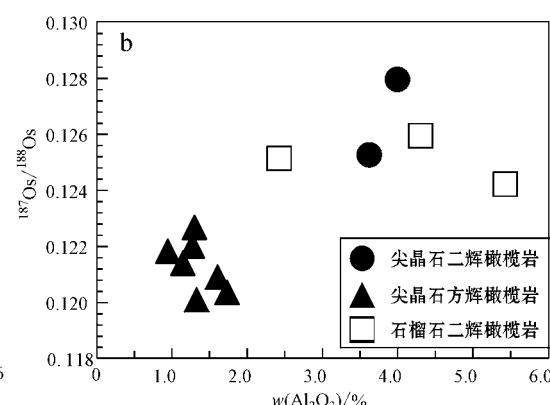
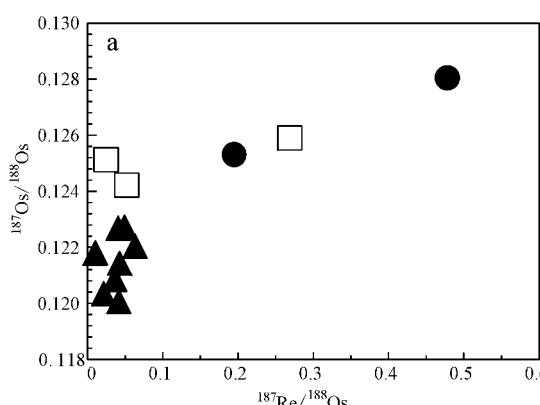


图 7 新昌新生代地幔包体全岩 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ - $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ (a) 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ -全岩 Al_2O_3 含量(b) 相关图
(引自 Liu 等, 2012b)

Fig. 7 Whole-rock $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ versus $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ (a) and bulk Al_2O_3 content(b) of the Cenozoic mantle xenoliths from Xinchang (after Liu et al., 2012b)

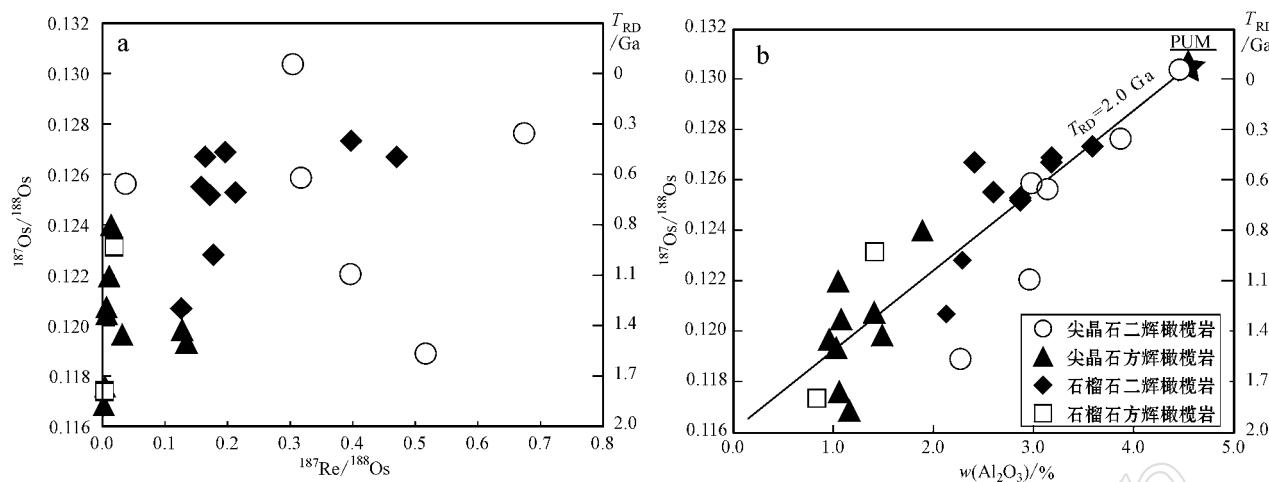


图 8 明溪新生代地幔包体全岩 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ – $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ (a) 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ –全岩 Al_2O_3 含量(b) 相关图

Fig. 8 Whole-rock $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ versus $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ (a) and bulk Al_2O_3 content(b) of the Cenozoic mantle xenoliths from Mingxi

夏地块(江西安远、福建明溪、牛头山和广东麒麟)多个地点的新生代地幔包体进行了大量的硫化物 Re-Os 测定,发现不同地点包体中的硫化物都存在 2~2.2 Ga 和 1.2~1.4 Ga 两个年龄峰(图 9)。综合全岩和硫化物 Re-Os 数据,可以看出华南沿海地区在新生代时期仍残留有古元古代的大陆岩石圈地幔。

3 华南中新生代岩石圈地幔减薄作用

华南古生代钾镁煌斑岩及基所携带的少量橄榄岩包体的岩石地球化学特征表明扬子地块在早古生代时期仍然存在有富集的大陆岩石圈地幔(刘观亮等,1993;方维萱等,2002),同时岩石圈的厚度应该超过 110 km(刘永顺等,1991;Zhang et al., 2001)。尽管在华夏地块迄今为止尚无幔源岩浆及深源包体的报道,但考虑到华夏陆块也同样存在 20 亿年甚至更古老的基底(郑永飞和张少兵,2007;李献华等,2012),根据壳幔分异理论,华夏陆块在地质历史时期同样也应该存在有古老的大陆岩石圈地幔。因此,我们推测整个华南陆块下方在早古生代时期可能都残留有一定厚度的富集的古老地幔,这是我们讨论整个华南岩石圈地幔后期演化的前提。

岩石地球化学数据表明湘南地区宁远和道县中生代碱性玄武岩所携带的地幔包体具有相对饱满的成分,只经历了非常低程度的部分熔融作用(Zheng et

al., 2004; Liu et al., 2012a; 夏群科等, 2010),宁远地幔包体的全岩 Os 同位素组成均落入软流圈的范围之内。除了个别样品外,绝大多数样品具有相对较高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值(Zhang et al., 2008; Liu et al., 2012a)。此外,宁远地幔包体中单斜辉石具有亏损的 Sr-Nd 同位素组成(Zhang et al., 2008; 陈必河等, 2004)。因此,我们认为这些中生代地幔包体来源于由软流圈新增生而形成的新生岩石圈地幔,湘南地区中生代并没有古老地幔的残留(Liu et al., 2012a)。这与中生代包体具有较高的平衡温度是相吻合(Zheng et al., 2004; Liu et al., 2012a)。无论是宁远还是道县玄武岩都只携带有尖晶石相橄榄岩,而没有石榴石相橄榄岩,这一事实可能暗示中生代湘南地区的岩石圈地幔厚度应该小于 80 km。因此,早先存在于湘南地区的厚的富集大陆岩石圈地幔至中生代时可能已经完全拆沉,并被亏损的新生岩石圈地幔所取代。发生在华南内陆的地幔拆沉作用的动力学机制可能与该地区自早中生代以来岩石圈发生的大规模伸展拉张有关(范蔚茗等, 2003)。华南内陆在中生代时期广泛发育的断陷盆地、变质核杂岩、碱性玄武岩、A 型花岗岩和正长岩都被认为是岩石圈伸展的产物(Gilder et al., 1991; Faure, 1996; Li et al., 2003, 2004; Li and Li, 2007; Jiang et al., 2009; 舒良树等, 1998; 王岳军等, 2004; 朱金初等, 2008)。道县中生代火山岩所携带的辉长岩和辉石岩包体主、微量元素和同位素

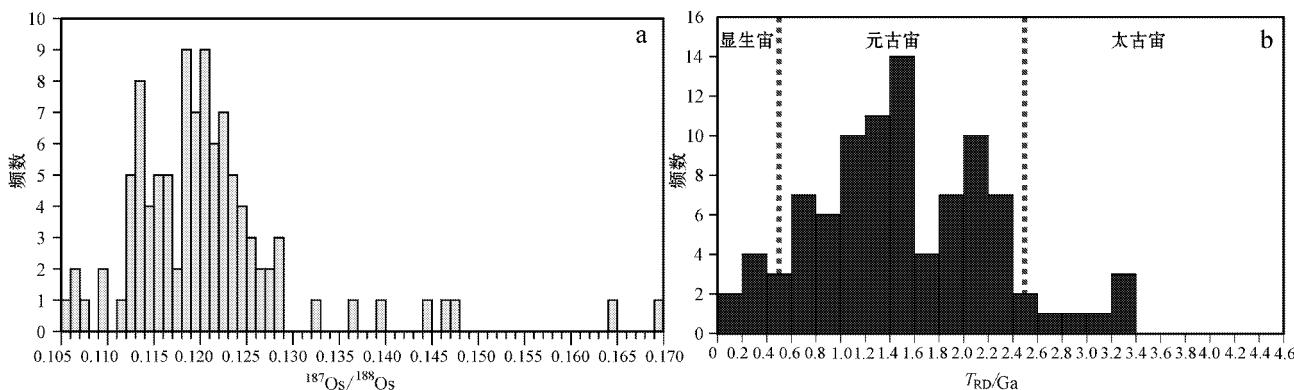


图9 华夏陆块新生代地幔包体中硫化物的Os同位素(a)和Re亏损年龄(b)频率图[数据来源于Wang等(2003)和Xu等(2008),Re亏损年龄为重新计算相对于原始上地幔(PUM)的结果]

Fig. 9 Frequency histograms of Os isotopes (a) and T_{RD} model ages (b) of sulfides in mantle xenoliths from the Cathaysia Block (data sources from Wang *et al.*, 2003 and Xu *et al.*, 2008, the T_{RD} model ages have been recalculated relative to primitive upper mantle)

特征表明它们是由软流圈来源的玄武质岩浆通过堆晶而形成的(郭锋和范蔚茗, 1997; 范蔚茗等, 2003; Dai *et al.*, 2008)。无论是Sm-Nd矿物内部等时线年龄(郭锋和范蔚茗, 1997)还是锆石U-Pb年龄(范蔚茗等, 2003; Dai *et al.*, 2008)都表明辉长岩和辉石岩形成于早中生代(约225 Ma)。这说明华南内陆地区在早中生代发生了大规模的岩石圈伸展, 并引发了软流圈的强烈上涌。岩石圈伸展拉张导致先存在于该地区的古老岩石圈地幔发生拆沉作用, 而软流圈地幔的上涌则形成了新生的岩石圈地幔。

早侏罗世以来, 受太平洋板块西向俯冲的影响, 整个中国东部转变为活动大陆边缘的构造体制(Sun *et al.*, 2007)。俯冲的大洋板块释放出大量的流体进入上覆岩石圈地幔, 导致其黏滞度降低, 弱化的岩石圈地幔在软流圈对流的影响下发生拆沉和减薄作用。大量的研究表明, 华北克拉通东部地区岩石圈地幔发生了显著的减薄, 古老的克拉通型地幔被年轻的大洋型地幔所取代。新生代橄榄岩包体的Os同位素组成与大洋橄榄岩非常类似, 这说明华北东部地区的新生代岩石圈地幔由软流圈新增生而成, 几乎没有古老的地幔残留。自白垩纪以来, 太平洋俯冲板片向东大幅后撤, 中国东南部已经由火山弧构造环境转换为板内裂谷环境, 普遍处于拉张环境, 发育大规模晚白垩世—古近纪陆相断陷盆地, 如河源盆地、三水盆地和连平盆地(Zhou *et al.*, 2006)。裂谷的拉张作用引发软流圈在东南沿海地区发生上涌, 一方面形成广泛分布的玄武质火山岩,

另一方面可能导致受俯冲作用弱化的大陆岩石圈地幔发生拆沉, 使得其地温梯度升高。地幔包体的温压资料表明东南沿海地区在新生代时期具有热的地温梯度, 这可能反映了软流圈的上涌对残留岩石圈地幔的加热作用。同时, 地幔包体和地球物理证据都限定东南沿海地区新生代时期的岩石圈厚度约为80 km, 而古生代地幔包体显示当时的岩石圈厚度至少大于110 km(刘永顺和赵崇贺, 1991; Zhang *et al.*, 2001)。因此, 东南沿海地区的岩石圈地幔同样发生了一定程度的减薄作用。然而, 橄榄岩包体的全岩和硫化物Re-Os同位素都支持华南的沿海地区在新生代时期仍有元古宙地幔的残留。这明显有别于华北克拉通东部地区新生代时期以新生地幔为主, 几乎没有古老地幔残留(Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003; Chu *et al.*, 2009)。导致这一差异的原因可能与华南和华北经历了不同地质演化历史有关。与华南陆块相比, 华北克拉通除了受到太平洋俯冲的影响之外, 还遭受了其它板块(扬子和古亚洲洋)俯冲作用。多期的洋壳俯冲使得华北克拉通岩石圈地幔遭受了更为强烈的改造和弱化作用, 使得其刚性强度大大降低, 从而更有利地幔的拆沉。另外, 华北克拉通东部地区发育有切穿岩石圈的郯庐断裂, 这也有利于软流圈的上涌从而加剧该地区克拉通地幔的整体拆沉。

东南沿海在地幔减薄的同时, 可能还伴随着软流圈增生到古老地幔的下方形成新生岩石圈地幔。明溪地区新生代火山岩携带有非常饱满的石榴二辉橄榄岩, 被认为代表了由软流圈地幔转变而成的新

生岩石圈地幔(Xu et al., 2000),而华南新生代地幔包体中部分硫化物具有较高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值和年轻的Os同位素年龄,也可能反映了古老地幔中有新生物质(Xu et al., 2008)加入。但是,我们对明溪少有的石榴方辉橄榄岩进行全岩Re-Os同位素分析的结果表明,石榴方辉橄榄岩与尖晶石方辉橄榄岩非常相似的Os同位素和古老年龄。这反映至少部分石榴石相的岩石圈地幔同样为古老地幔的残留,而非新增生的地幔,从而说明残留地幔的厚度可能比之前想象的要厚,但这一推论还需要有其它证据的支持。

4 结论

已有的资料显示华南陆块在古生代时期可能仍存在富集的大陆岩石圈地幔,其深度至少可以达到110 km。宁远中生代地幔包体的岩石地球化学成分支持湘南地区早先富集的地幔完全被新生的亏损地幔所取代。地幔拆沉作用可能与内陆地区自晚三叠世以来岩石圈发生大规模的伸展有关。新生代地幔包体表明沿海地区在该时期的岩石圈的厚度为80~90 km,并且有热的地温梯度。多个地点的全岩与硫化物Re-Os同位素表明新生代时期沿海地区仍残留有古元古代地幔。因此,新生代时期沿海地区的大规模拉张作用只导致了古老地幔的部分拆沉。

致谢 本文承蒙夏群科教授的邀请,华南地幔包体的研究得益于吴福元研究员的长期指导与合作,丘志力教授提供了部分明溪橄榄岩包体样品,在此一并表示感谢。

References

- An M J and Shi Y L. 2006. Lithospheric thickness of the Chinese continent[J]. Tectonophysics, 159: 257~266.
- Brandon A D, Snow J E, Walker R J, et al. 2000. 190Pt-186Os and ^{187}Re - ^{187}Os systematics of abyssal peridotites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 177(3~4): 319~335.
- Cao Ronglong and Zhu Shouhua. 1983. Correlation of mantle xenolith occurrences with Earth's internal zoning and tectonic in eastern China[J]. Acta Geophysica Sinica, 26(2): 158~167(in Chinese with English abstract).
- Carlson R W, Pearson D G and James D E. 2005. Physical, chemical and chronological characteristics of continental mantle[J]. Reviews of Geophysics, DOI: 10.1029/2004RG000156.
- Chen Bihua, Jia Baohua, Liu Yaorong, et al. 2004. Sm-Nd isochron age of spinel lherzolite xenoliths from Mesozoic volcanic rocks in the South Hunan and its geological significance[J]. Geological Review, 50(2): 180~183(in Chinese with English abstract).
- Chi Jishang. 1987. Study of the Cenozoic Basalts and Upper Mantle in Eastern China[M]. China University of Geosciences Press, 1~277(in Chinese).
- Chu Z Y, Wu F Y, Walker R J, et al. 2009. Temporal evolution of the lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton[J]. Journal of Petrology, 50: 1857~1898.
- Dai B Z, Jiang S Y, Jiang Y H, et al. 2008. Geochronology, geochemistry and Hf-Sr-Nd isotopic compositions of Huizyan mafic xenoliths, southern Hunan Province, South China: Petrogenesis and implications for lower crust evolution[J]. Lithos, 102: 65~87.
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailong, et al. 1994. Lithospheric root/de-rooting and activation of the East China Continent[J]. Geoscience, 8(3): 349~356(in Chinese with English abstract).
- Fan Q C and Hopper P R. 1989. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleogeotherm[J]. Journal of Petrology, 30: 1117~1158.
- Fan W M and Menzies M A. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China[J]. Tectonophysics, 216: 171~180.
- Fan Weiming, Wang Yuejun, Guo Feng, et al. 2003. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi Provinces and the lithospheric extension[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 159~168(in Chinese with English abstract).
- Fang Weixuan, Hu Ruizhong, Su Wencho, et al. 2002. On emplacement ages of lamproites in Zhenyuan County, Guizhou Province, China[J]. Chinese Science Bulletin, 47(4): 307~312(in Chinese with English abstract).
- Faure M. 1996. Extensional tectonics within a subduction-type orogen: The case study of the Wugongshan dome (Jiangxi Province, southeastern China)[J]. Tectonophysics, 263: 77~106.
- Gan Xiaochun, Li Huimin, Sun Dazhong, et al. 1995. A geochronological study on Early Proterozoic granitic rocks, southwestern Zhejiang[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 14(1): 1~8(in Chinese with English abstract).
- Gao S, Ling W L, Qiu YM, et al. 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrane of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63: 2071~2088.
- Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. 2002. Re-Os evidence for re-

- placement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 198: 307~322.
- Gilder S A , Keller G R , Luo M , et al . 1991. Timing and spatial distribution of rifting in China[A]. Gangi A F. World Rift Systems [C]. Tectonophysics , 197 : 225~243.
- Griffin W L , O'Reilly S Y and Ryan C G. 1992. Composition and thermal structure of the lithosphere beneath South Africa , Siberia and China : Proton microprobe studies[A]. Abstract of the International Symposium on Cenozoic Volcanic Rocks and Deep-seated Xenoliths of China and its Environ[C]. Beijing , 65~66.
- Griffin W L , Zhang A D , O'Reilly S Y , et al . 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton[A]. Flower M F J , Chung S L , Lo C H , et al . Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia[C]. American Geophysical Union , Washington , D.C. , Geodynamic Series , 27 : 107~126.
- Guo Feng , Fan Weiming , Lin Ge , et al . 1997. Geochronology and petrogenesis of gabbroic xenoliths from Daoxian , Southern Hunan Province , China[J]. Chinese Science Bulletin , 42 (15): 1 661~1 664(in Chinese with English abstract).
- Harvey J , Gannoun A , Burton K W , et al . 2006. Ancient melt extraction from the oceanic upper mantle revealed by Re-Os isotopes in abyssal peridotites from the mid-Atlantic ridge[J]. Earth and Planetary Science Letters , 244 (3~4): 606~621.
- Ho K S , Chen J C and Chung S H. 2006. Composite mantle xenoliths in basaltic pyroclastic rocks from Tungchihsu , Penghu Islands , Taiwan Strait : evidence for a metasomatized lithospheric mantle beneath SE China[J]. Coll. and Res. , 19 : 49~76.
- Huang Wankang , Wang Junwen , Basu A R , et al . 1992. A study of REE and Pb , Sr , Nd isotopes in garnet-lherzolite xenoliths from Mingxi , Fujian Province[J]. Geochemistry , 2 : 101 ~ 113(in Chinese with English abstract).
- Huang X L and Xu Y G. 2010. Thermal state and structure of the lithosphere beneath eastern China : a synthesis on basalt-borne xenolith[J]. Journal of Earth Sciences , 21 : 711~730.
- Jiang Y H , Jiang S Y , Dai B Z , et al . 2009. Middle to late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Human province , southeast China : Implications for a continental arc to rifting[J]. Lithos , 107 : 185~204.
- Jin Zhenmin , Green II H W , Borch R S , et al . 1993. Mantle xenoliths and geothermal indicator of modern back-arc basin of East China [J]. Science in China (B), 23 (4): 410~416(in Chinese with English abstract).
- Jordan J. 1988. Structure and formation of the continental tectosphere [J]. Journal of Petrology , Special Volume (1): 11~37.
- Kong Hua , Huang Dezhi and Jin Zhenmin. 2000. Geochemical characteristics of alkaline basalts in Pingnan County , Guangxi[J]. Tectonics and Metallogenesis , 24 (4): 342~349(in Chinese with English abstract).
- Kong Hua , Ma Fang , Jin Zhenmin , et al . 2001. Olivine microstructures from mantle-derived xenoliths in Pingnan County , Guangxi [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences , 26 (1): 7~12(in Chinese with English abstract).
- Li S L , Mooney W D and Fan J C. 2006. Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data[J]. Tectonophysics , 420 : 239~252.
- Li Shuguang , Chen Yizhi , Ge Ningjie , et al . 1996. Isotopic ages of metavolcanic rocks and megacryst mylonite in the Badu Group in Southwestern Zhejiang Province and their implications for tectonics [J]. Acta Petrologica Sinica , 12 (1): 79 ~ 87(in Chinese with English abstract).
- Li X H , Chen Z G , Liu D Y , et al . 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province (SE China) : age , origin and tectonic significance[J]. International Geology Review , 45 : 898~921.
- Li X H , et al . 2004. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan-eastern Guangxi : $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating , geochemistry , Sr-Nd isotopes and implications for the tectonic evolution of SE China[A]. Malpas J , Fletcher C J N , Ali J R , et al . Aspects of the Tectonic Evolution of China[C]. The Geological Society of London , Special Publication , 193~215.
- Li Xianhua , Li Wuxian and He Bin. 2012. Building of the South China Block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent : Observations , interpretations and tests[J]. Bulletin of Mineralogy , Petrology and Geochemistry , 31 (6): 543 ~ 559(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua , Wang Yixian , Zhao Zhenhua , et al . 1998. SHRIMP U-Pb zircon geochronology for amphibolite from the Precambrian basement in SW Zhejiang and NW Fujian Provinces[J]. Geochemistry , 27 (4): 327~334(in Chinese with English abstract).
- Li Z X and Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China : A flat-slab subduction model[J]. Geology , 35 : 179 ~ 182.
- Lin Chuanyong , Shi Lanbin , Chen Xiaode , et al . 1995. Rheological features of garnet lherzolite xenoliths from Xinchang , Zhejiang Province , China and their geological implications[J]. Acta Petrological Sinica , 11 (1): 55~64(in Chinese with English abstract).
- Lin Chuanyong , Shi Lanbin , Chen Xiaode , et al . 1999. Thermal structure and rheology of the upper mantle beneath Mingxi , Fujian Province[J]. Geological Review , 45 (4): 352~360(in Chinese with English abstract).
- Lin Chuanyong , Xu Yigang , Shi Lanbin , et al . 1994. K- and Na-rich glasses in mantle xenoliths : Evidence for fluids in upper mantle [J]. Chinese Science Bulletin , 39 (9): 820~823(in Chinese).

- Liu C Z , Liu Z C , Wu F Y , et al . 2012a. Mesozoic accretion of juvenile sub-continental lithospheric mantle beneath South China and its implications : Geochemical and Re-Os isotopic results from Ningyuan mantle xenoliths [J]. *Lithos* , 291 : 186~198.
- Liu C Z , Snow J E , Hellebrand E , et al . 2008. Ancient , highly heterogeneous mantle beneath Gakkel ridge , Arctic Ocean [J]. *Nature* , 452 : 311~316.
- Liu C Z , Wu F Y , Sun J , et al . 2012b. The Xinchang peridotite xenoliths reveal mantle replacement in southeastern China [J]. *Lithos* , 150 : 171~187.
- Liu Guanliang , Wang Xiongwu and Lü Xuesen. 1993. The Dahongshan lamproites [M]. Beijing : Geological Publishing House , 1~186 (in Chinese).
- Liu Yongshun and Zhao Chonghe. 1991. Discovery of fresh garnet lherzolite xenolith in Pengjiabang kimberlite pipe in Dahongshan area , Hubei Province [J]. *Geological Science and Technology Information* , 10 (S) : 109~116 (in Chinese).
- Liu Zhichao , Wu Fuyuan , Chu Zhuyin , et al . 2010. Isotopic compositions of the peridotitic xenoliths from the Nushan area , Anhui Province : Constraints on the age of subcontinental lithospheric mantle beneath the East China [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 26 (4) : 1217~1240 (in Chinese with English abstract).
- Menzies M A , Fan W M and Zhang M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobe and the loss of >120 km of Archean lithosphere , Sino-Korean craton , China [A]. In *Magmatic Processes and Plate Tectonics* [A]. Prichard H M , Alabaster T , Harris N B W , et al . Geological Society Special Publication [C] , 76 : 71~81.
- Menzies M A and Xu Y G. 1998. Geodynamics of the North China Craton [A]. Flower M F J , Chung S L , Lo C H , et al . Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia [C]. Washington D C : American Geophysical Union , Geodynamic Series , 27 : 155~165.
- Pearson D G. 1999. The age of continental root [J]. *Lithos* , 48 (1 ~ 4) : 171~194.
- Qi Q , Taylor L A and Zhou X M. 1995. Petrology and geochemistry of mantle peridotite xenoliths from SE China [J]. *Journal of Petrology* , 36 : 55~79.
- Qiu Y M , Gao S , McNaughton N J , et al . 2000. First evidence of ≥ 3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of South China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics [J]. *Geology* , 28 : 11~14.
- Reisberg L and Lorand J P. 1995. Longevity of Sub-continental mantle lithosphere from osmium isotope systematics in orogenic peridotite massifs [J]. *Nature* , 376 : 159~162.
- Reisberg L , Zhi X C , Lorand J P , et al . 2005. Re-Os and S systematics of spinel peridotite xenoliths from east central China : evidence for contrasting effects of melt percolation [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 239 : 286~308.
- Rudnick R L and Walker R J. 2009. Interpreting ages from Re-Os isotopes in peridotites [J]. *Lithos* , 112S : 1083~1095.
- Shirey S B and Walker R J. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry [J]. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences* , 26 : 423~500.
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. *Geological Bulletin of China* , 31 (7) : 1035~1053 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu , Sun Yan , Wang Dezi , et al . 1998. The Mesozoic extensional tectonics in Wugongshan , South China [J]. *Science in China (D)* , 28 (5) : 431~438 (in Chinese).
- Snow J E and Dick H J B. 1995. Pervasive magnesium loss by marine weathering of peridotite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 59 (20) : 4219~4235.
- Sun W D , Ding X and Hu Y H , et al . 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 262 : 533~542.
- Sun Weidong , Peng Zicheng , Zhi Xiachen , et al . 1997. Determination of Os isotopes of Pangshishan mantle xenoliths by N-TIMS [J]. *Chinese Science Bulletin* , 42 (21) : 2310~2313 (in Chinese).
- Sun Weihan and Lai Zhimin. 1980. Petrochemical characteristics of Cenozoic volcanic rocks in Fujian Province and its relationship to tectonics [J]. *Geochemistry* , 2 : 134~147 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fangzheng , Li Hongli , Zhu Qinwen , et al . 1997. Assemblages of anatexic xenoliths from volcanic and the petrology model of lithosphere in South Hunan Province [J]. *Geological Science and Technology Information* , 16 (3) : 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Wang K L , O'Reilly S Y , Griffin W L , et al . 2003. Proterozoic mantle lithosphere beneath the extended margin of the South China block : In situ Re-Os evidence [J]. *Geology* , 31 : 709~712.
- Wang Renjing and Yang Shurong. 1987a. On the evolution and mineral chemistry of olivine , pyroxene , plagioclase in Cenozoic basalts from the Shengxian-Xinchang basin in Zhejiang Province [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 2 (1) : 27~39 (in Chinese with English abstract).
- Wang Renjing and Yang Shurong. 1987b. Research on Cenozoic basalts and inclusions in Shengxian-Xinchang Counties , Zhejiang Province [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences* , 12 (3) : 241~248 (in Chinese with English abstract).
- Wang X C , Li X H , Li W X , et al . 2007. Ca. 825 Ma komatiitic basalts in South China : First evidence for >1500 °C mantle melts by a Rodonian mantle plume [J]. *Geology* , 35 : 1103~1106.
- Wang X C , Li X H , Li W X , et al . 2009. Variable involvements of mantle plumes in the genesis of mid-Neoproterozoic basaltic rocks

- in South China: A review [J]. *Gondwana Research*, 15: 381~395.
- Wang Yuejun, Liao Chaolin, Peng Touping, et al. 2004. Early Mesozoic OIB-type alkaline basalt in central Jiangxi Province and its tectonic implications [J]. *Geochemistry*, 33(2): 109~117 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233: 103~119.
- Wu Fuyuan and Sun Deyou. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29: 313~318 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Walker R J, Ren X W, et al. 2003. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China [J]. *Chemical Geology*, 196: 107~129.
- Xia Quanke, Xing Lingbo, Feng Min, et al. 2010. Water content and elemental geochemistry of peridotite xenoliths hosted by Early Jurassic basalt in Ningyuan, Hunan Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(2): 113~124 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xin, Xu Xisheng, Zou Haibo, et al. 2005. Early-middle Jurassic basaltic rocks: The beginning of later Mesozoic intensive magmatism in SE China [J]. *Science in China (D)*, 35(7): 587~605 (in Chinese).
- Xu Juhua, Chu Xuelei, Xie Yuling, et al. 1999. A study of sulfide inclusions of the mantle xenoliths from Xinchang, Zhejiang, China [J]. *Geological Review*, 45(6): 640~645 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, Cai Yuanfeng and Zhou Xinmin. 2000. Studies of the Cenozoic lithospheric mantle beneath Southeast China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 36(6): 773~779 (in Chinese with English abstract).
- Xu X S, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. 2008. Re-Os isotopes of sulfides in mantle xenoliths from eastern China: Progressive modification of lithospheric mantle [J]. *Lithos*, 102: 43~64.
- Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. 2000. Genesis of young lithospheric mantle in southeastern China: an LAM-ICPMS trace element Study [J]. *Journal of Petrology*, 41: 111~148.
- Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. 1998. The nature of the Cenozoic lithosphere at Nushan, eastern China [A]. Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia [C]. *Geodynamics series. American Geophysical Union*, Washington, D.C., 167~196.
- Xu X S, O'Reilly S Y, Zhou X H, et al. 1996. A xenolith-derived geotherm and the crust-mantle boundary at Qilin, southeastern China [J]. *Lithos*, 38: 41~62.
- Xu Xisheng and Xie Xin. 2005. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction, SE China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 318~334 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng and Zhou Xinmin. 1995. The xenoliths from Qilin Cenozoic basaltic pipe, Guangdong [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(4): 441~448 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath eastern China: evidence, timing and mechanism [J]. *Physic and Chemistry of the Earth (A)*, 26: 747~757.
- Xu Yigang, Huang Xiaolong, Yan Wen, et al. 2002. Constraints on the Cenozoic tectonic evolution of northern South China Sea (I): mantle-derived xenoliths [J]. *Geochemistry*, 31(3): 230~242 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang, Lin Chuanyong, Shi Lanbin, et al. 1995. Geothermal curve of upper mantle beneath eastern China and its implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 25(8): 874~881 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y G, Lin C Y and Shi L B. 1999. The geotherm of the lithosphere beneath Qilin, SE China: a re-appraisal and implications for P-T estimation of Fe-rich pyroxenite [J]. *Lithos*, 47: 181~193.
- Xu Y G, Sun M, Yan W, et al. 2002. Xenolith evidence for polybaric melting and stratification of the upper mantle beneath South China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20: 937~954.
- Xu Yigang, Yan Wen, Sun Min, et al. 2001. Polybaric parital melting in the continental mantle: Evidence from mantle xenoliths from Qilin, Guangdong Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(11): 943~947 (in Chinese with English abstract).
- Yao Bochu, Wan Ling and Wu Nengyou. 2006. Cenozoic Tectonic Evolution and the 3-D Structure of Lithosphere of the South China Sea [M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1~233 (in Chinese with English abstract).
- Yu J H, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. 2003. The thermal state and composition of the lithospheric mantle beneath the Leizhou Peninsula, South China [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 122: 165~189.
- Yu J H, O'Reilly S Y, Zhang M, et al. 2006. Roles of melting and metasomatism in the formation of the lithospheric mantle beneath the Leizhou peninsula, South China [J]. *Journal of Petrology*, 47: 355~383.
- Yu Y, Xu X S, Griffin W L, et al. 2011. H₂O contents and their modification in the Cenozoic subcontinental lithospheric mantle beneath the Cathaysia block, SE China [J]. *Lithos*, 126: 182~197.
- Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, et al. 2008. Evolution of sub-continental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*,

155:271~293.

Zhang H F , Nakamura E , Sun M , et al . 2007. Transformation of sub-continental lithospheric mantle through peridotite-melt reaction : evidence from a highly fertile mantle xenolith from the North China Craton [J]. International Geological Review , 49 : 658~679.

Zhang H F , Sun M , Lu F X , et al . 2001. Geochemical significance of a garnet lherzolite from the Dahongshan kimberlite , Yangtze Craton , southern China [J]. Geochemical Journal , 35 : 315~331.

Zhang H F , Sun M , Zhou X H , et al . 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton : evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology , 144 : 241~253.

Zhang Ruyuan and Cong Bolin. 1985. The geotherm and constituent of uppermost mantle derived from xenoliths in southeastern China [J]. Acta Petrologica Sinica , 1 (4): 34~49(in Chinese with English abstract).

Zhao Zhenhua , Bao Zhiwei and Zhang Boyou. 1998. Geochemical characteristics of the Mesozoic basalts in South Hunan Province [J]. Science in China (D), 28 (S): 7~14(in Chinese with English abstract).

Zheng J P , O'Reilly S Y and Griffin W L . 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong Peninsula , Sino-Korean Craton , Eastern China [J]. International Geological Review , 40 : 471~499.

Zheng J P , O'Reilly S Y , Griffin W L , et al . 2004. Nature and evolution of Mesozoic-Cenozoic lithospheric mantle beneath the Cathaysia block , SE China [J]. Lithos , 74 : 41~65.

Zheng Yongfei and Zhang Shaobing. 2007. Formation and evolution of the Precambrian continental crust in South China [J]. Chinese Science Bulletin , 52 (1): 1~10(in Chinese with English abstract).

Zhi Xiachen , Peng Zicheng , Chen Daogong , et al . 2001. The longevity of the subcontinental lithospheric mantle beneath the Suwang area : Os model ages of mantle xenoliths [J]. Science in China (D), 31 (6): 464~470(in Chinese with English abstract).

Zhi Xiachen , Reisberg L and Xu Xisheng. 2007. Re-Os geochemistry of mantle peridotite xenoliths from Nushar [J]. Journal of University of Science and Technology of China , 37 (8): 945~952(in Chinese with English abstract).

Zhi Xiachen , Zheng Yongfei , Du Andao , et al . 1996. $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ ratios of the Cenozoic basalts and mantle xenoliths from Suwang Basir [J]. Chinese Science Bulletin , 41 (3): 245~247(in Chinese).

Zhou X M , Sun T , Shen W Z , et al . 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China : A response to tectonic evolution [J]. Episodes , 29 (1): 26~33.

Zhu Jinchu , Chen Jun , Wang Rucheng , et al . 2008. Early Yanshanian NE trending Sn/W-bearing A-type granites in the western-middle

part of the Nanling Mts region [J]. Geological Journal of China Universities , 14 (4): 474~484(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹荣龙 , 朱寿华 . 1983. 中国东部地幔岩包体的产出及其与地球内部构造的关系 [J]. 地球物理学报 , 26 (2): 158~167.
- 陈必河 , 贾宝华 , 刘耀荣 , 等 . 2004. 湘南中生代火山岩中尖晶石二辉橄榄岩包体 Sm-Nd 等时线年龄及地质意义 [J]. 地质论评 , 50 (2): 180~183.
- 池际尚 . 1987. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究 [M]. 中国地质大学出版社 , 1~277.
- 邓晋福 , 莫宣学 , 赵海玲 , 等 . 1994. 中国东部岩石圈根 / 去根作用与大陆活化 [J]. 现代地质 , 8 : 349~356.
- 鄂莫岚 , 赵大升 . 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体 [M]. 北京 : 科学出版社 , 269~467.
- 范蔚茗 , 王岳军 , 郭 锋 , 等 . 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展 [J]. 地学前缘 , 10 (3): 159~168.
- 方维萱 , 胡瑞忠 , 苏文超 , 等 . 2002. 贵州镇远地区钾镁煌斑岩类的侵位时代 [J]. 科学通报 , 47 (4): 307~312.
- 甘晓春 , 李惠民 , 孙大中 , 等 . 1995. 浙西南早元古代花岗质岩石的年代 [J]. 岩石矿物学杂志 , 14 (1): 1~8.
- 郭 锋 , 范蔚茗 , 林 航 , 等 . 1997. 湘南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨 [J]. 科学通报 , 42 (15): 1 661~1 664.
- 黄婉康 , 王俊文 , Basu A R , 等 . 福建明溪石榴石二辉橄榄岩包体的 REE 及 Pb , Sr , Nd 同位素研究 [J]. 地球化学 , 2 : 101~113.
- 金振民 , Green II H W , Borch R S , 等 . 1993. 幕源包体和中国东部现代弧后地热标志 [J]. 中国科学 (B 编), 23 (4): 410~416.
- 孔 华 , 黄德志 , 金振民 . 2000. 广西平南玄武岩的地球化学特征 [J]. 大地构造与成矿 , 24 (4): 342~349.
- 孔 华 , 马 芳 , 金振民 , 等 . 2001. 平南幔源包体中橄榄石的显微构造研究及其意义 [J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 26 (1): 7~12.
- 李曙光 , 陈移之 , 葛宁洁 , 等 . 1996. 浙西南八都群变火山岩系及变晶麻棱岩的同位素年龄及其构造意义 [J]. 岩石学报 , 12 (1): 79~87.
- 李献华 , 王一先 , 赵振华 , 等 . 1998. 闽浙古元古代斜长角闪岩的离子探针锆石 U-Pb 年代学 [J]. 地球化学 , 27 (4): 327~334.
- 李献华 , 李武显 , 何 斌 . 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合 - 裂解 : 观察、解释与检验 [J]. 矿物岩石地球化学通报 , 31 (6): 543~559.
- 林传勇 , 史兰斌 , 陈孝德 , 等 . 1995. 浙江新昌石榴石二辉橄榄岩包体的流变特征及其地质意义 [J]. 岩石学报 , 11 (1): 55~64.
- 林传勇 , 史兰斌 , 陈孝德 , 等 . 1999. 福建明溪上地幔热结构及流变特征 [J]. 地质论评 , 45 (4): 352~360.
- 林传勇 , 徐义刚 , 史兰斌 , 等 . 1994. 幔源包体中富 K , Na 玻璃体 :

- 上地幔流体的证据[J]. 科学通报, 39(9):820~823.
- 刘观亮, 汪雄武, 吕学森. 1993. 大洪山钾镁煌斑岩[M]. 北京: 地质出版社, pp. 1~186.
- 刘永顺, 赵崇贺. 1991. 湖北大洪山地区彭家岩管中首次发现新鲜的石榴石二辉橄榄岩包体[J]. 地质科技情报, 10(增刊):109~116.
- 刘志超, 吴福元, 储著银, 等. 2010. 安徽女山地幔橄榄岩捕虏体的同位素组成: 中国东部新生代岩石圈地幔时代制约[J]. 岩石学报, 26(4):1217~1240.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7):1035~1053.
- 舒良树, 孙 岩, 王德滋, 等. 1998. 华南武功山中生代伸展构造[J]. 中国科学(D), 28(5):431~438.
- 孙伟汉, 赖志敏. 1980. 福建省新生代火山岩岩石化学特征及与构造地质关系的讨论[J]. 地球化学, 2:134~147.
- 孙卫东, 彭子成, 支霞臣, 等. 1997. N-TIMS 法测定盘石山橄榄岩包体的 Os 同位素组成[J]. 科学通报, 42(21):2310~2313.
- 王方正, 李红丽, 朱勤文, 等. 1997. 湘南火山岩深源包体组合及岩石圈岩石学模型[J]. 地质科技情报, 16(3):1~7.
- 王人镜, 杨淑荣. 1987a. 浙江嵊县-新昌新生代玄武岩中橄榄石、辉石、斜长石矿物化学及演化的研究[J]. 岩石学报, 2(1):27~39.
- 王人镜, 杨淑荣. 1987b. 浙江嵊县-新昌新生代玄武岩及包体的研究[J]. 地球科学, 12(3):241~248.
- 王岳军, 廖超林, 彭头平, 等. 2004. 赣中地区早中生代 OIB 型碱性玄武岩的厘定及构造意义[J]. 地球化学, 33(2):109~117.
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 29:313~318.
- 夏群科, 邢凌波, 冯 敏, 等. 2010. 湖南宁远早侏罗世玄武岩中橄榄岩包体的含水性和元素地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 29(2):113~124.
- 谢 昕, 徐夕生, 邹海波, 等. 2005. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J₂ 早期玄武岩[J]. 中国科学(D), 35(7):587~605.
- 徐九华, 储雪蕾, 谢玉玲, 等. 1999. 浙江新昌地幔岩捕虏体中的硫化物包裹体初步研究[J]. 地质论评, 45(6):640~645.
- 徐夕生, 蔡元峰, 周新民. 2000. 中国东南部新生代岩石圈地幔研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 36(6):773~779.
- 徐夕生, 谢 昕. 2005. 中国东南部晚中生代-新生代玄武岩与壳幔作用[J]. 高校地质学报, 11(3):318~334.
- 徐夕生, 周新民. 1995. 广东麒麟新生代玄武质角砾岩筒中岩石包体的研究[J]. 岩石学报, 11(4):441~448.
- 徐义刚, 黄小龙, 颜 文, 等. 2002. 南海北缘新生代构造演化的深部制约(I): 带源包体[J]. 地球化学, 31(3):230~242.
- 徐义刚, 林传勇, 史兰斌, 等. 1995. 中国东部上地幔地温线及其地热意义[J]. 科学通报, 25(8):874~881.
- 徐义刚, 颜 文, 孙 敏, 等. 2001. 大陆地幔变压熔融机制: 广东麒麟带源包体提供的证据[J]. 科学通报, 46(11):943~947.
- 姚伯初, 万 玲, 吴能友. 2006. 中国南海海域岩石三维结构及演化[M]. 北京: 地质出版社, 1~233.
- 张儒瑗, 从柏林. 1985. 中国东南部从捕虏体推导的地温和上地幔组成[J]. 岩石学报, 1(4):34~49.
- 赵振华, 包志伟, 张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. 中国科学(D), 28(增刊):7~14.
- 郑永飞, 张少兵. 2007. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化[J]. 科学通报, 52(1):1~10.
- 支霞臣, Reisberg L, 徐夕生. 2007. 安徽女山幔源橄榄岩捕虏体 Re-Os 同位素地球化学[J]. 中国科学技术大学学报, 37(8):945~952.
- 支霞臣, 彭子成, 陈道公, 等. 2001. 苏皖地区大陆岩石圈地幔的长时性——地幔橄榄岩捕虏体的锇同位素模式年龄[J]. 中国科学(D辑), 31(6):464~470.
- 支霞臣, 郑永飞, 杜安道, 等. 1996. 苏皖地区新生代玄武岩和幔源橄榄岩包体的 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 比值[J]. 科学通报, 41(3):245~247.
- 朱金初, 陈 骏, 王汝成, 等. 2008. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带[J]. 高校地质学报, 14(4):474~484.