

华北克拉通破坏过程中下地壳的改造 ——捕虏体证据

英基丰, 张宏福, 汤艳杰

(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: 华北克拉通出露的前寒武纪麻粒岩地体和显生宙不同时期火山岩中的麻粒岩捕虏体是地质历史上不同时期下地壳的代表性样品, 对它们的对比研究为华北克拉通下地壳的演化提供了重要制约。本文在前人工作基础上, 主要从地体麻粒岩和不同时代火山岩中捕虏体麻粒岩的锆石年代学和 Hf 同位素组成特征角度, 指出在华北克拉通岩石圈破坏过程中, 不仅岩石圈地幔发生了减薄和改造, 岩石圈地幔之上的下地壳也发生了不同程度的减薄和改造, 这种改造存在区域上的差异, 包括改造的时间、改造的程度等。下地壳的改造方式主要以幔源岩浆的底侵为主, 古老地壳物质的重熔也是可能的一种方式。

关键词: 华北克拉通; 麻粒岩捕虏体; 下地壳; 改造

中图分类号: P588.34⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)05-0567-10

Phanerozoic modification of the lower crust beneath the North China Craton: constraints from granulite xenoliths

YING Ji-feng, ZHANG Hong-fu and TANG Yan-jie

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Granulite terrains exposed on the North China craton are the exhumed Precambrian lower crust, whereas the granulite-facies xenoliths entrained in volcanic rocks are representatives of the Phanerozoic lower crust. The comparative studies of granulite terrains and granulite xenoliths provide important constraints on the evolution of the lower crust beneath the North China Craton. Based on data available on the granulite terrains and granulite xenoliths, this paper discusses the modification of the lower crust beneath the North China Craton during the Phanerozoic mainly from the perspectives of zircon U-Pb ages and their Hf isotopic compositions. The lower crust was also significantly modified in company with the destruction of the mantle lithosphere since the Mesozoic, with the time and degree of modification varying from region to region. Magmatic underplating played the most important role in modifying the pre-existent ancient crust, while the remelting of the ancient crust was probably another way to modify the lower crust.

Key words: North China Craton; granulite-facies xenoliths; lower crust; modification

大陆约占地球总表面积的 40%, 从构造角度上看, 大陆是由克拉通和造山带组成的, 即克拉通通过不同时代的造山带焊接而形成大陆。克拉通是地球

上最稳定的构造单元, 保留有地球上最古老的岩石 (加拿大 Slave 克拉通上 4.03 Ga 的 Acasta 片麻岩) 和矿物 (澳大利亚西部 Yilgarn 克拉通 4.4 Ga 的碎屑

收稿日期: 2013-07-09; 修订日期: 2013-08-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向项目 (KZCX2-EW-QN106); 国家自然科学基金 (91214203)

作者简介: 英基丰 (1973-), 男, 研究员, 主要从事深源岩石成因和岩石圈演化方面研究, E-mail: jfyfing@mail.iggcas.ac.cn。

锆石)(Stern and Bleeker, 1998; Wilde *et al.*, 2001),可以说研究克拉通对于了解地球的起源及之后的分异、演化具有非常重要的意义。除此之外,地球上已发现的具有经济价值的含金刚石母岩——金伯利岩均无一例外产于克拉通内(Janse and Sheahan, 1995),因此,对克拉通的研究还具有重要的经济价值。正因为如此,克拉通的形成和演化研究一直是固体地球科学中的重要研究内容。

克拉通主要形成于早前寒武纪(>18 Ga),克拉通岩石圈是由上部古老的大陆地壳和下部的岩石圈地幔组成的。按照地球的分异理论,地球早期经核幔分异后形成地核和原始地幔,原始地幔后再经历较高级度的部分熔融,其中的玄武质熔体形成了大陆地壳,而残留部分则形成了岩石圈地幔。在原始地幔熔融过程中,因Fe具有相对Mg较低的熔融温度,因此优先进入到熔体,从而造成残留的岩石圈地幔富镁,而Mg的密度又比Fe小,所以岩石圈地幔比未经过大规模熔体抽离作用的软流圈具有更低的密度。因此在理论上古老的克拉通岩石圈可以在地质历史的长期演化过程中漂浮在软流圈之上,保持稳定。对全球多数太古代克拉通岩石圈的研究表明自其形成以来是稳定的,如南非Kaapvaal克拉通、非洲Tanzanian克拉通、俄罗斯Siberian克拉通等,无论是地球物理观测还是岩石圈地幔年龄、成分的直接测定均表明这些克拉通的巨厚岩石圈根一直稳定存在着(Boyd *et al.*, 1985; Pearson, 1999)。然而随着全球克拉通岩石圈研究资料的不断积累,人们发现克拉通岩石圈自形成以后并不都是一成不变的,它是可以被改造和破坏的(O'Reilly *et al.*, 2001),如北美Wyoming克拉通,特别是我国华北克拉通,而这其中尤以我国华北克拉通被改造、被破坏表现的最为显著,华北也因此成为中外科学家研究克拉通演化的最典型地区(Griffin *et al.*, 1992; Menzies *et al.*, 1993; Carlson *et al.*, 2005)。

1 华北克拉通的破坏

华北克拉通破坏这一科学问题的提出源于华北克拉通岩石圈减薄的研究。华北克拉通广泛保存的太古代陆壳表明其是一个太古代克拉通(Jahn *et al.*, 1987; Liu *et al.*, 1992, 2008)。华北克拉通在古生代发育含金刚石和地幔橄榄岩捕虏体的金伯利岩、橄榄岩捕虏体及金刚石矿物包裹体的研究表明

在古生代华北存在厚的(~ 200 km)冷的(~ 40 mW/m²)同位素组成相对富集的克拉通型岩石圈地幔(Fan and Menzies, 1992; Griffin *et al.*, 1992; Menzies *et al.*, 1993; 郑建平, 1999)。华北克拉通在新生代广泛发育有含地幔橄榄岩的玄武岩,对这些新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体的研究却发现,该时期华北岩石圈相对较薄(约80~100 km)较热(~ 65 mW/m²)同位素组成是亏损的,总体特征类似于大洋岩石圈地幔(Fan *et al.*, 2000; Xu, 2001)。最新的地球物理观测也进一步表明目前华北东部岩石圈是较薄的(Chen *et al.*, 2009)。正是基于古生代和新生代岩石圈厚度的巨大差异,人们提出了华北岩石圈在显生宙发生了减薄。然而随着研究的深入,人们发现新生代岩石圈并不是古生代岩石圈减薄后的残留,也就是说华北岩石圈从古生代到新生代的变化并不仅仅是厚度的变化,它的物质组成和热结构都发生了变化。比如古生代时岩石圈地幔以石榴石相方辉橄榄岩为主,说明其经历过高程度熔体的抽离,具有难熔的特征,而新生代橄榄岩捕虏体主要为尖晶石相二辉橄榄岩,反映其只经历过低程度的熔体抽离,具有饱满特征。在Sr-Nd同位素上,古生代岩石圈地幔具有富集特征,而新生代岩石圈地幔具有亏损特征。在岩石圈地幔的绝对年龄上,¹⁸O_s同位素揭示出的古生代岩石圈地幔是太古代,而新生代岩石圈地幔非常年轻,具有大洋地幔特点(鄂莫岚等, 1987; 郑建平, 1999; Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2008)。此外,中生代以来,华北大范围的岩浆活动也暗示其已经不再是一个稳定的克拉通,即华北克拉通已经被破坏。自华北岩石圈减薄和华北克拉通破坏这一科学命题提出以来已经取得了大量研究成果,并在国际著名期刊Lithos和Gondwana Research上发表了以华北岩石圈演化为主题的专辑(Chen *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013)。

2 华北克拉通下地壳

正如上文所言,华北克拉通岩石圈减薄和华北克拉通岩石圈破坏问题的提出最初都是基于不同时代岩石圈地幔的直接样品——地幔橄榄岩的对比研究,而且在过去十几年内在这方面取得了长足的进步,研究方法也从传统的全岩法扩展到了原位微区法,从传统的放射成因同位素,扩展到了非传统稳定

同位素的应用。我们都知道,地壳是岩石圈除去岩石圈地幔之外的重要组成部分,特别是下地壳,它是联系上部地壳和岩石圈地幔的纽带,是壳幔相互作用最重要的场所,因此认识华北下地壳在克拉通破坏过程中的演化对于全面认识克拉通破坏作用过程是必不可少的。另一方面,相对于地幔橄榄岩的镁铁质和超基性特征,下地壳要相对酸性,因此从地质过程的年代学角度,下地壳可能会记录有更多的岩石圈改造的年代学信息。

要研究下地壳的演化,就必须有直接来自下地壳的样品。麻粒岩是下地壳的主要组成岩石,依据产状下地壳麻粒岩可以分为两类:一类是分布于古老克拉通地表上的麻粒岩地体,其特点是分布广、数量多,这些麻粒岩是在早前寒武纪被掀翻上来的下地壳,并且经历了复杂的地质过程,因此其仅仅可以用来反映早前寒武时期的下地壳;另外一类就是火山喷发过程中捕获并携带至地表的麻粒岩捕虏体,这类岩石的特点是分布少,数量有限,但由于其是被火山岩快速带至地表,因此保留了火山岩喷发时该地区下地壳的特征,特别是当火山岩同时携带有地幔橄榄岩捕虏体时,还可以开展岩石圈古地温曲线、结构剖面等方面的研究。对于华北克拉通而言,广泛分布的地体麻粒岩为我们提供了丰富的早前寒武纪,或者说克拉通破坏以前的下地壳物质样本。而显生宙,特别是中、新生代火山岩中的麻粒岩类捕虏体则是华北岩石圈破坏过程中或破坏之后的下地壳物质的代表。

3 克拉通破坏之前下地壳

华北克拉通破坏之前最具代表性的下地壳是出露地表,并分布于多个地区的前寒武纪高级变质岩,包括高级变质的 TTG 质(英云闪长岩、奥长花岗岩和石英闪长岩)和花岗质片麻岩。其中冀北-内蒙一带的蔓菁沟-瓦窑口-马市口-下白窑剖面被认为是华北克拉通最具代表性的下地壳剖面(翟明国等, 1996)。在这方面我国前寒武地质学家对其岩石学、变质历史、构造演化等方面做过大量研究,因此本文在这方面不做过多介绍。从年代学上看,这些麻粒岩的锆石年代学研究表明地体麻粒岩原岩形成时代主要集中在 2.5~2.6 Ga (Zhao *et al.*, 2001, 2008; 刘富等, 2009; 耿元生等, 2010; Dong *et al.*, 2012)。

众所周知,华北克拉通在奥陶纪发育有以山东蒙阴、辽宁复县为代表的含金刚石金伯利岩,其中的地幔橄榄岩捕虏体、金刚石中矿物包裹体等的研究结果表明华北在奥陶纪时仍保留有大于 200 km 的克拉通型岩石圈地幔,即华北岩石圈尚未被破坏,因此,这些金伯利岩中的麻粒岩、角闪岩等捕虏体同样也代表了克拉通破坏之前的下地壳。除此之外,金伯利岩中的锆石捕虏晶也记录了地壳形成和演化的信息。前人的研究结果表明,来自下地壳的岩石捕虏体如石榴石麻粒岩、辉石角闪岩、变辉长岩等只出现在复县金伯利岩中,作为捕虏晶的锆石则在蒙阴和复县金伯利岩中普遍存在 (Zheng *et al.*, 2004a, 2009a)。对金伯利岩中麻粒岩捕虏体中锆石和捕虏晶锆石的年代学研究发现,两类产状的锆石具有一致且集中的年龄分布,即形成年龄集中在 2.5~2.7 Ga 间(图 1),锆石的 Hf 同位素模式年龄 T_{crust} 集中在 2.6~3.0 Ga。这一年龄与华北地体麻粒岩原岩的形成年龄一致,即华北克拉通在早古生代仍保留有太古代的下地壳。此外,前人对金伯利岩中地幔橄榄岩捕虏体的 Re-Os 同位素研究表明,该时期岩石圈地幔的年龄主要为太古代,如复县金伯利岩橄榄岩捕虏体的 Re 亏损模式年龄为 2.6~3.2 Ga (Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2008),蒙阴金伯利岩橄榄岩捕虏体的 Re 亏损模式年龄为 2.9~3.4 Ga (Zhang *et al.*, 2008)。也就是说华北克拉通至少在早古生代,下地壳与岩石圈地

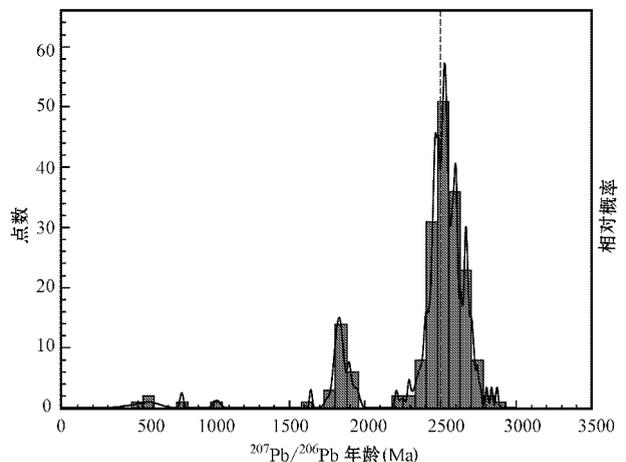


图 1 华北克拉通古生代金伯利中麻粒岩捕虏体的锆石和捕虏晶锆石 U-Pb 年龄(据 Zheng *et al.*, 2004a, 2009a)
Fig. 1 U-Pb ages of xenocrystic zircons and zircons in granulite xenoliths in Paleozoic kimberlites of the North China Craton (data after Zheng *et al.*, 2004a, 2009a)

幔具有一致的太古代年龄(图2),地壳与岩石圈地幔保持着稳定的耦合关系,而这种耦合关系是稳定克拉通岩石圈的最重要标志。

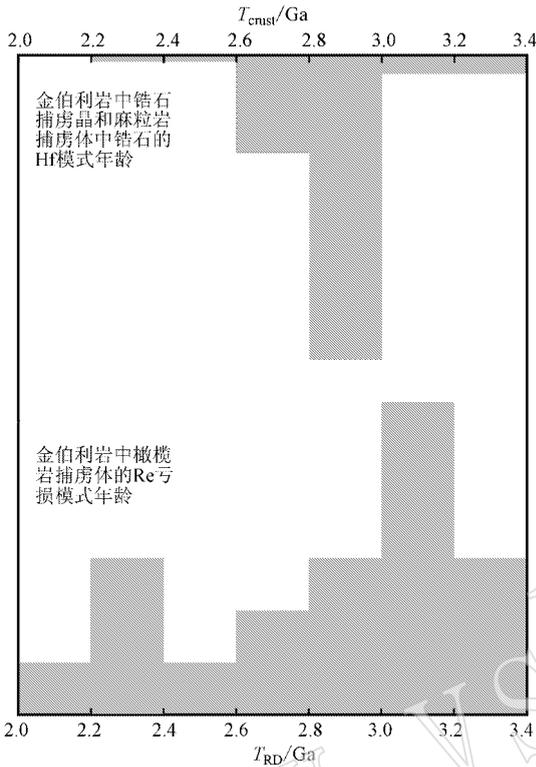


图2 华北克拉通古生代壳-幔年龄结构,地壳和地幔年龄分别用锆石的Hf同位素模式年龄和橄榄岩Re亏损模式年龄(数据来源:Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2004a, 2009a; Zhang *et al.*, 2008)

Fig. 2 Age structure of the crust and the mantle lithosphere during the Paleozoic. The Hf model age of zircons in granulite xenoliths and T_{RD} of the peridotite xenoliths were used to constrain the formation ages of the crust and the lithospheric mantle, respectively (data after Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2004a, 2009a; Zhang *et al.*, 2008)

4 克拉通破坏期间及之后的下地壳

华北克拉通破坏的准确时代尚未有定论,这主要是由于缺乏判别什么是克拉通破坏的统一鉴定标志,而不同标志间的时间又可能不一致,如华北大面积岩浆活动,岩浆源区从岩石圈地幔转为软流圈地幔,地势由高向低的转变,变质核杂岩及伴随的伸展盆地的发育等均被视为可能代表着华北克拉通破坏的时间(吴福元等, 2008)。尽管还不能明确华北克拉通破坏的具体时间点,但华北克拉通破坏发生在中生代和早新生代的观点已经被普遍接受。因此中

生代以及新生代岩浆活动所携带的麻粒岩捕虏体或下地壳来源的捕虏晶显然就是克拉通破坏期间和之后的下地壳代表。到目前为止,华北克拉通上已经发现的含有下地壳麻粒岩类捕虏体的中、新生代岩浆岩主要有以下地点,其中时代为中生代的有:河南信阳早中生代火山角砾岩、内蒙古赤峰地区闪长岩、山东莒南玄武质角砾岩、山东青岛玄武质岩脉(邵济安等, 2000, 2011; Zheng *et al.*, 2003, 2004b; Ying *et al.*, 2010; Zhang, 2012)时代为新生代的有:汉诺坝玄武岩、女山玄武岩(周新民等, 1992; 樊祺诚等, 1996; Huang *et al.*, 2004)(图3)。

4.1 中生代

河南信阳早侏罗纪火山角砾岩中麻粒岩捕虏体的矿物组合为石榴石+单斜辉石+斜长石+角闪石+钾长石+石英,其平衡温度为765~890℃,压力为1.25~1.59 GPa,对应的深度为52 km。除麻粒岩外,该区还有少量榴辉岩捕虏体,其平衡温度、压力分别为800℃和1.3~1.7 GPa,对应深度为43~56 km(Zheng *et al.*, 2003)。麻粒岩中锆石U-Pb年代学结果表明,麻粒岩均形成于太古代或古元古代,其中两个样品的上交点分别为3.67 Ga和3.65 Ga,下交点为1.98 Ga和1.71 Ga,另外一个样品的上交点年龄为2.04 Ga,下交点年龄为0.97 Ga。锆石Hf同位素模式年龄表明,该地区的下地壳是在4.0 Ga或更早从地幔中分异而成,并在~3.6 Ga时发生熔融(Zheng *et al.*, 2004b)。

内蒙古赤峰地区的中生代闪长岩中包含有麻粒岩捕虏体。寄主闪长岩的年龄为218~223 Ma,麻粒岩的主要类型为二辉石麻粒岩和单斜辉石麻粒岩。麻粒岩捕虏体的平衡温度为850~900℃,压力为0.6~1.0 GPa,对应深度31 km。麻粒岩中锆石普遍具有谐和的U-Pb年龄,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为236~251 Ma。这些麻粒岩被认为是早中生代幔源岩浆底侵到壳幔过渡带的产物(邵济安等, 2000, 2011, 2012)。

山东莒南晚白垩纪玄武质脉岩(67 Ma)中的麻粒岩捕虏体以二辉石麻粒岩为主,同时还含有少量石榴石相麻粒岩捕虏体。麻粒岩的平衡温度和压力分别为806~920℃和0.86~1.12 GPa,对应的深度约35 km(Ying *et al.*, 2010)。这与临近地区地震反射观测到的Moho面约为33 km的结论是一致的(Yang and Wang, 2002)。二辉石麻粒岩中锆石U-Pb年代学研究显示,锆石的核部的上交点年龄在2.3

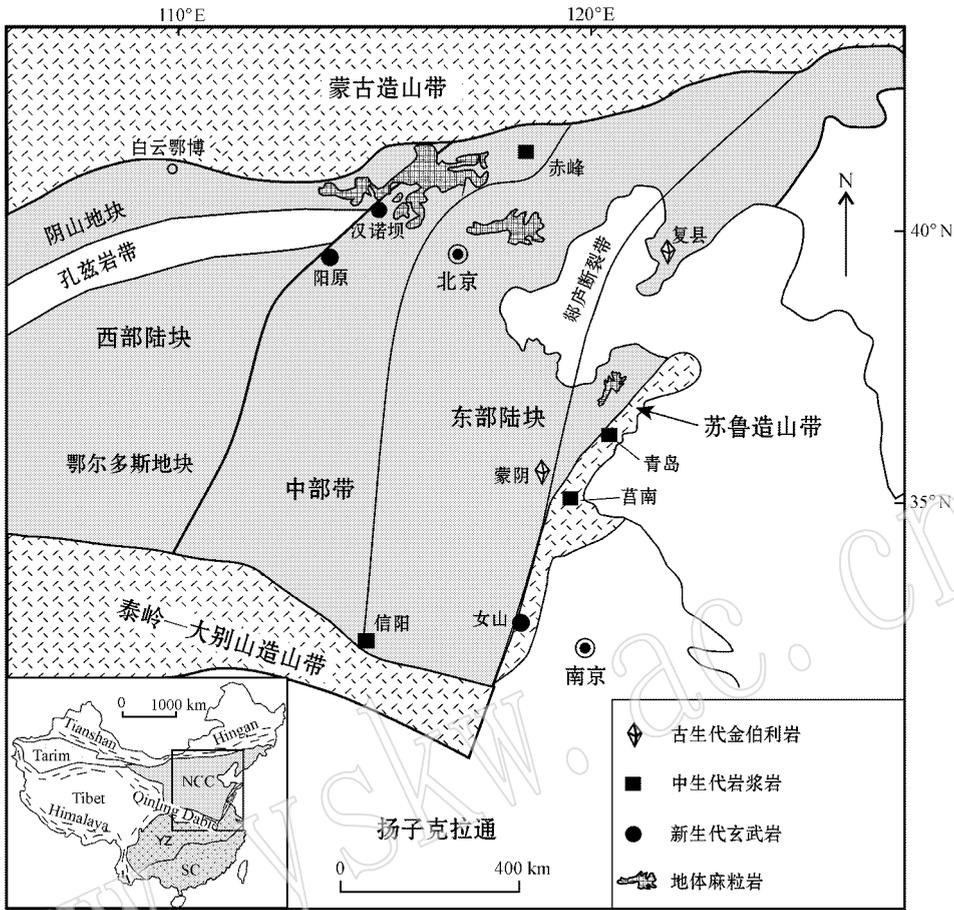


图 3 华北克拉通显生宙含麻粒岩捕虏体岩浆岩位置

Fig. 3 Localities of granulite-bearing volcanic and intrusive rocks in the North China Craton

~2.4 Ga, 而边部锆石的上交点年龄约为 1.9 Ga。锆石具有较宽的 Hf 同位素组成。其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 在 -17.4~8.4 之间, 暗示其成因的复杂。但无论是从锆石的年代学还是锆石 Hf 同位素组成上, 该地区没有可观察到的岩浆底侵作用, 这与地球物理观测所得出的临近地区存在岩浆底侵作用的结论不同 (Yang and Wang, 2002)。

山东青岛晚白垩纪基性脉岩 (86 Ma) 中含有富辉石麻粒岩和富长石麻粒岩捕虏体。平衡温度和压力大致为 860~890°C 和 0.99~1.17 Ga, 对应的深度大致为 33~36 km。这与地震层析成像和宽频数字地震技术所获得的临近地区的 Moho 面埋深为 32~36 km 的结论是一致的 (Chen *et al.*, 2006; 李志伟等, 2006)。Zhang (2012) 对这些麻粒岩中的锆石进行了细致的年代学研究, 结果发现锆石具有三组不同的年龄, 部分老锆石具有 2.4~2.5 Ga 的上交点年龄, 另有锆石具有 2.0 Ga 的谐和年龄, 其它锆

石显示谐和或近于谐和年龄, 加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 120 Ma 和 91 Ma。在锆石 Hf 同位素方面, 具有 2.4~2.5 Ga 上交点年龄的锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -10~10, 2.5 Ga 被认为是该地区非常重要的陆壳生长时期。年龄为 2.0 Ga 的锆石, 其 Hf 同位素落在下地壳的演化线上, 因此是早期陆壳受到热事件改造, 完全重结晶而成。具有中生代谐和年龄的锆石其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 远高于太古代锆石封闭演化到中生代时的组成, 也高于太古代平均下地壳演化至中生代时的组成, 暗示了幔源物质对下地壳的贡献。

4.2 新生代

汉诺坝新生代玄武岩中含有种类丰富、数量众多的麻粒岩捕虏体, 是迄今我国麻粒岩捕虏体研究最深入的地区。自从上世纪 90 年代首次发现高温麻粒岩以来 (樊祺诚等, 1996), 不同学者对该区的麻粒岩捕虏体开展了大量研究。汉诺坝麻粒岩捕虏体总体上可以分为镁铁质麻粒岩和长英质麻粒岩,

而目前的研究主要集中在镁铁质麻粒岩。樊祺诚 (1998) 最早对镁铁质麻粒岩进行了锆石定年, 获得了三组谐和锆石年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 140、124 和 120 Ma, 这些年龄被解释为早白垩纪幔源岩浆底侵并发生麻粒岩相变质作用。Wilde 等 (2003) 对汉诺坝麻粒岩捕虏体锆石的 SHRIMP 定年结果显示, 锆石年龄集中在 80~180 Ma, 并认为这些年龄直接对应了冈瓦纳大陆裂解所导致的大陆岩石圈的减薄。Liu 等 (2004) 对汉诺坝不同类型麻粒岩捕虏体进行了锆石 LA-ICP-MS 定年, 其中长英质麻粒岩中锆石上交点年龄为 1.75~1.89 Ga, 下交点年龄为 105~122 Ma。中性成分麻粒岩中锆石的上交点年龄为 2.5 Ga, 下交点年龄为 88 Ma。镁铁质麻粒岩中锆石普遍具有核边结构, 其中边部年龄集中在

160~140 Ma 和 140~80 Ma, 其中 160~140 Ma 被解释为底侵的岩浆形成年龄, 而 140~80 Ma 被解释为麻粒岩相变质作用发生的时间。Zheng 等 (2009b) 也对汉诺坝麻粒岩捕虏体中的锆石开展了年代学和 Hf 同位素研究, 结果表明, 绝大多数锆石显示老第三纪 (44.5~47.3 Ma) 年龄, 同时, 这些锆石都具有正的 ϵ_{Hf} 值, 因此提出在老第三纪存在一期重要的幔源岩浆底侵作用。通过对汉诺坝地区橄榄岩、辉石岩以及麻粒岩捕虏体的系统研究, 人们发现该地区在中生代以来受到强烈的岩浆底侵作用, 岩浆底侵作用导致了该地区没有截然的壳幔边界, 即岩石学意义的壳幔边界与地震学上的 Moho 面之间存在一个厚约 10 余公里的壳幔过渡带 (图 4)。

安徽女山的麻粒岩均为二辉石麻粒岩, 麻粒岩

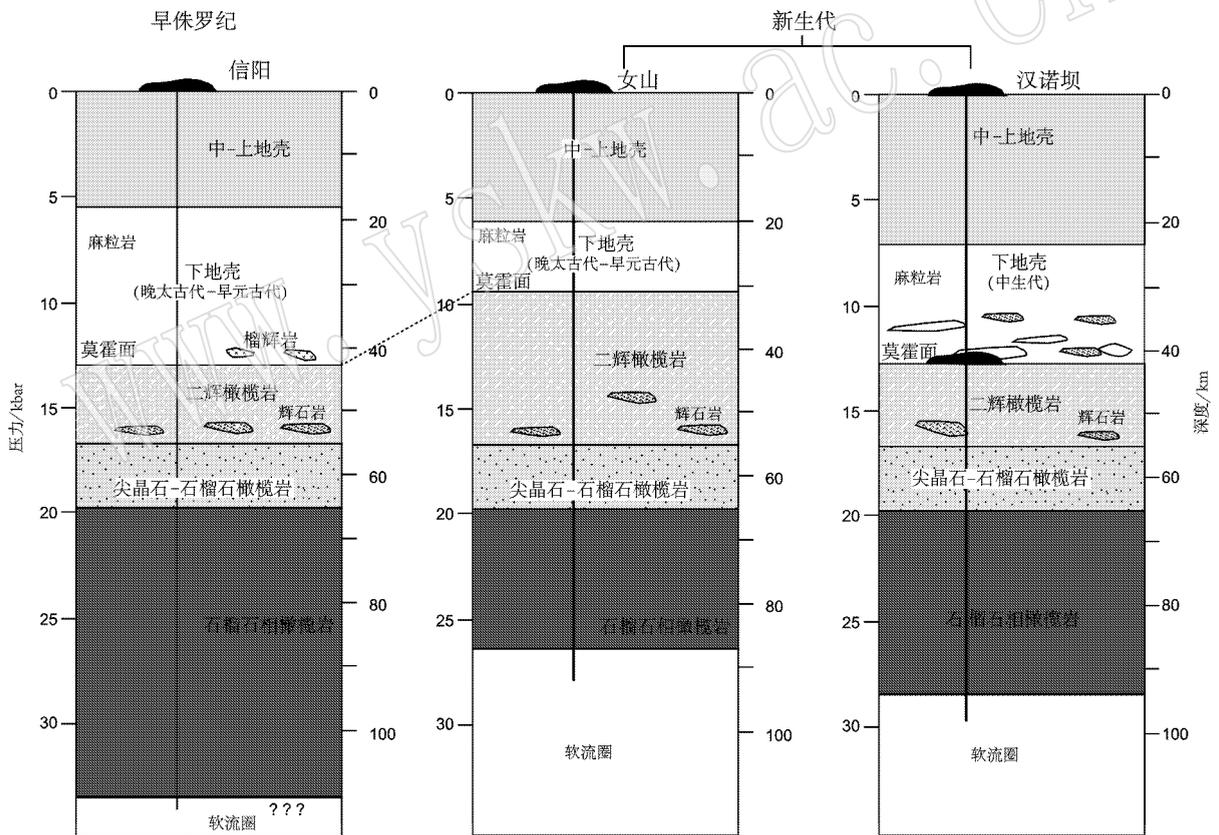


图 4 华北克拉通不同时代、不同地区壳幔结构示意图(数据来源:Chen *et al.*, 2001; Zheng *et al.*, 2003; Huang *et al.*, 2004)

Fig. 4 Schematic diagram of the crust-mantle structure of the North China Craton (data after Chen *et al.*, 2001; Zheng *et al.*, 2003; Huang *et al.*, 2004)

的平衡温度和压力分别为 830~869°C 和 0.6~0.95 GPa, 对应的深度约为 31 km (Huang *et al.*, 2004), 这与地震测深剖面所得到的 31 km 深的莫霍面是一

致的(张四维等, 1988)。Huang 等 (2004) 对女山麻粒岩捕虏体开展了详细的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究。女山麻粒岩中的锆石普遍具有核边结构,

记录了非常复杂的岩浆和变质事件过程。其中一个样品中的锆石显示其原岩形成于约 2.5 Ga,同时记录了 1.92~1.97 Ga 的麻粒岩相变质作用时间。另有一个样品中锆石普遍具有振荡环带,其中的自形锆石具有谐和年龄,加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 140 Ma,暗示在早白垩纪该区存在岩浆底侵作用,然而该期岩浆底侵作用远远弱于汉诺坝地区,因此,女山地区的岩石圈结构中没有发现类似于汉诺坝地区的壳幔过渡带(图 4)。

5 显生宙华北克拉通下地壳的改造

华北克拉通地体麻粒岩所反映的前寒武纪下地壳以及显生宙以来不同时期岩浆岩中携带的下地壳麻粒岩捕虏体的对比研究有助于我们了解华北下地壳的演化。华北地体麻粒岩中锆石的年代学研究表明其原岩形成时间主要集中在 2.5~2.6 Ga,并在 1.8~1.9 Ga 受到麻粒岩相变质改造作用。古生代金伯利中麻粒岩捕虏体的锆石以及锆石捕虏晶同样具有 2.5~2.6 Ga 的形成年龄和 1.8~1.9 Ga 变质年龄特征,这就表明在早古生代华北仍然具有太古代的下地壳,即克拉通的壳幔结构仍保持完整。中、新生代以来各种岩浆岩中的麻粒岩捕虏体尽管显示了不同的形成年龄,但其中锆石具有太古代的形成年龄是一个普遍特征,如河南信阳麻粒岩具有 >3.6 Ga 的形成年龄,这也是华北克拉通迄今发现最为古老的地下壳岩石,莒南、青岛等地的麻粒岩具有 2.4~2.5 Ga 的形成年龄,汉诺坝、女山等地同样具有形成时代为 2.5 Ga 的麻粒岩捕虏体。这表明,尽管华北克拉通岩石圈在显生宙发生大规模破坏,但太古代下地壳仍普遍保留,这一点与岩石圈地幔的改造不同,我们知道华北克拉通东部岩石圈地幔,在新生代除在少数地区仍保留有太古代岩石圈地幔外,如河南鹤壁地区(Zheng *et al.*, 2001),绝大多数地区的太古代岩石圈地幔已经被新生的岩石圈地幔所取代。下地壳与岩石圈地幔的这种差异性改造也可能暗示了岩石圈破坏是一种自下而上的深部过程,即下地壳所受到的影响程度小于岩石圈地幔。

尽管在中、新生代华北克拉通仍普遍保留有太古代下地壳,但不同地区麻粒岩捕虏体中锆石的年轻年龄又明确表明了显生宙华北下地壳受到了改造,而且不同地区改造的时代和程度有显著差异。我们所说的改造,一方面包括壳内物质的改造,如古

老下地壳的部分重熔,深部地幔只提供了热源,而没有物质贡献,另一方面是幔源物质底侵而形成新的下地壳,这一过程中地幔既提供了热源也有物质贡献。华北南缘信阳地区的下地壳在侏罗纪仍为太古代,暗示了该地区至少到侏罗纪其古老的下地壳仍保持不变。汉诺坝地区无疑是华北克拉通下地壳遭受改造最为强烈的地区,大量原岩形成年龄为早白垩纪的麻粒岩的出现,以及锆石 Hf 同位素特征均表明了该时期强烈的幔源岩浆底侵作用,并导致早期的壳幔结构受到破坏。尽管汉诺坝地区幔源岩浆底侵作用的事实毋庸置疑,但近些年来研究也发现,部分基性麻粒岩可能并不是岩浆底侵作用形成的,而是太古代古老地壳部分熔融后的残留(Jiang and Guo, 2010)。女山地区具有原岩年龄为 140 Ma 的麻粒岩捕虏体,然而由于缺乏锆石 Hf 同位素制约,仍很难判断,这些新形成的下地壳到底是太古代下地壳重熔而成,还是幔源岩浆底侵而成,或是两者的混合,但可以确定的是该地区下地壳的改造程度远不及华北北缘的汉诺坝地区。青岛地区麻粒岩所显示的 120 Ma 和 90 Ma 新形成的下地壳以及 Hf 同位素特征则暗示了该时期的岩浆底侵作用,该时期的岩浆底侵作用与该期华北大面积的岩浆活动时间也是一致的。赤峰地区三叠纪闪长岩中的麻粒岩捕虏体的原岩年龄为晚二叠和早三叠,代表了该时期新形成的下地壳,尽管缺乏锆石的 Hf 同位素制约,但麻粒岩全岩的 Sr-Nd 同位素特征表明有幔源物质的贡献,而且该时期的岩浆底侵与北部兴蒙造山带的演化密切联系。

不同时期、不同地区火山岩所携带的麻粒岩捕虏体的平衡压力可以反映出该时期、该地区的下地壳埋深的最小估计,尽管下地壳在空间上可能存在不均一性,但对比不同地区、不同时代火山岩中的麻粒岩仍可以对下地壳在垂向上的演化提供一定的制约。例如,信阳麻粒岩的平衡压力计算表明侏罗纪时期的下地壳埋深至少为 43~56 km,山东莒南和青岛麻粒岩捕虏体的平衡压力则暗示在中生代最晚期,该地区下地壳的埋深为 33~36 km,及至新生代,女山麻粒岩所反映的该时期下地壳埋深为 30 km。这样的对比发现,华北下地壳从侏罗纪时的 50 余公里减薄到了新生代时期的 30 km。理论上,岩浆底侵作用往往会导致下地壳的生长和加厚,但华北不同地区尽管存在普遍的岩浆底侵作用,但其下地壳却大规模减薄,这很可能与中、新生代华北岩石圈一直处于伸展拉伸的构造背景有关。

References

- Boyd F R, Gurney J J and Richardson S H. 1985. Evidence for a 150~200 km thick Archean lithosphere from diamond inclusion thermobarometry[J]. *Nature*, 315(6 018): 387~389.
- Carlson R W, Pearson D G and James D E. 2005. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle[J]. *Reviews of Geophysics*, 43(RG1001): doi:10.1029/2004RG000156.
- Chen L, Cheng C and Wei Z G. 2009. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(1~2): 171~183.
- Chen L, Zhang H F and Menzies M A. 2012. Understanding the formation, reactivation and destruction of cratons-Preface[J]. *Lithos*, 149: 1~3.
- Chen L, Zheng T Y and Xu W W. 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration[J]. *Journal of Geophysical Research*, 111(B09312): doi:10.1029/2005JB003974.
- Chen S H, O'Reilly S Y, Zhou X H, *et al.* 2001. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean craton, China: evidence from xenoliths[J]. *Lithos*, 56: 267~301.
- Dong X, Xu Z, Liu Z, *et al.* 2012. Zircon U-Pb geochronology of Archean high-grade metamorphic rocks from Xi Ulanbulang area, central Inner Mongolia[J]. *Science China Earth Sciences*, 55(2): 204~212.
- E Molan and Zhao Dasheng. 1987. Cenozoic Basalts and Deep-Seated Xenoliths in Eastern China[M]. Beijing: Science Press, 1~490(in Chinese).
- Fan Qicheng and Liu Ruoxin. 1996. The discovery of high temperature granulite xenoliths in Hannuoba basalts[J]. *Chinese Science Bulletin*, 41(3): 235~238(in Chinese).
- Fan Qicheng, Liu Ruoxin, Li Huimin, *et al.* 1988. Zircon geochronology and REE characteristics of granulite xenoliths from Hannuoba[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(2): 133~137(in Chinese).
- Fan W and Menzies M. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China[J]. *Geotectonica Metallogenia*, 16: 171~180.
- Fan W M, Zhang H F, Baker J, *et al.* 2000. On and off the North China craton: where is the Archean keel?[J]. *Journal of Petrology*, 41(7): 933~950.
- Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, *et al.* 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 198(3~4): 307~322.
- Geng Yuansheng, Shen Qihan and Ren Liudong. 2010. Late Neoproterozoic to early Paleoproterozoic magmatic events and tectonothermal systems in the North China craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 1945~1966(in Chinese with English abstract).
- 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]. *International Symposium on Cenozoic volcanic rocks and deep-seated xenoliths of China and its environs*, Beijing: 65~66.
- Huang X L, Xu Y G and Liu D Y. 2004. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nushan, east China: Implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korean craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(1): 127~149.
- Jahn B M, Auvray B, Cornichet J, *et al.* 1987. 3.5 Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China-field occurrence, petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 34(3~4): 311~346.
- Janse A J A and Sheahan P A. 1995. Catalogue of world wide diamond and kimberlite occurrences: a selective and annotative approach[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 53(1~3): 73~111.
- Jiang N and Guo J H. 2010. Hannuoba intermediate-mafic granulite xenoliths revisited: Assessment of a Mesozoic underplating model[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 293(3~4): 277~288.
- Li Zhiwei, Xu Yi, Hao Tianyao, *et al.* 2006. Seismic tomography and velocity structure in the crust and upper mantle around Bohai Sea area[J]. *Chinese Journal of Geophysics* 49(3): 797~804(in Chinese).
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, *et al.* 1992. Remnants of \geq 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. *Geology*, 20(4): 339~342.
- Liu D, Wilde S A, Wan Y, *et al.* 2008. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 308(3): 200~231.
- Liu Fu, Guo Jinghui, Lu Xiaoping, *et al.* 2009. The Nd-Hf evidences for 2.5 Ga crustal growth event of the North China Craton: a case study of the Huai'an gneiss terrain[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(17): 2517~2526(in Chinese).
- Liu Y S, Gao S, Yuan H L, *et al.* 2004. U-Pb zircon ages and Nd, Sr, Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China craton: insights on evolution of lower continental crust[J]. *Chemical Geology*, 211: 87~109.
- Menzies M A, Fan W M and Zhang M, 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-

- Korean craton, China [A]. Prichard H M, Alabaster T, Harris N BW, *et al.* *Magmatic Processes and Plate Tectonics* [C]. London: Geological Society Special Publication, 71: 71~81.
- O'Reilly S Y, Griffin W L, Poudjorn Djomani Y H, *et al.* 2001. Are lithospheres forever? Tracking changes in sub-continental lithospheric mantle through time [J]. *GSA Today*, 11(4): 4~10.
- Pearson D G. 1999. The age of continental roots [J]. *Lithos*, 48(1~4): 171~194.
- Shao Ji'an, Han Qingjun and Li Huimin. 2000. The discovery of early Mesozoic granulite xenoliths in the North China Craton [J]. *Science in China (D)*, 30: 148~153 (in Chinese).
- Shao Ji'an and Wei Chunjing. 2011. The petrogenesis and tectonic significance of early mesozoic granulite xenoliths from the eastern Inner Mongolia [J]. *Science in China (D)*, 41: 1080~1088 (in Chinese).
- Shao Ji'an, Zhang Zhou, She Hongquan, *et al.* 2012. The discovery of Phanerozoic granulite in Chifeng area of the North China craton and its implication [J]. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 188~198 (in Chinese with English abstract).
- Stern R A and Bleeker W. 1998. Age of the World's Oldest Rocks Refined Using Canada's SHRIMP: The Acasta Gneiss Complex, Northwest Territories, Canada [J]. *Geoscience Canada*, 25(1): 27~31.
- Wilde S A, Valley J W, Peck W H, *et al.* 2001. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago [J]. *Nature*, 409: 175~178.
- Wilde S A, Zhou X H, Nemchin A A, *et al.* 2003. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: a consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia [J]. *Geology*, 31(9): 817~820.
- 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.
- Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, *et al.* 2006. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(19): 5013~5034.
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Gao Shan, *et al.* 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145~1174 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism [J]. *Physics and Chemistry of Earth*, 26: 747~757.
- Yang W C and Wang J Y. 2002. Geophysical evidence for magmatic underplating in the Sulu area, East China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 173~179.
- Ying J F, Zhang H F and Tang Y J. 2010. Lower crustal xenoliths from Junan, Shandong province and their bearing on the nature of the lower crust beneath the North China Craton [J]. *Lithos*, 119(3~4): 363~376.
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Yan Yuehua, *et al.* 1996. An oblique cross section of Archean continental crust in Shanxi-Hebei-Inner Mongolia area, North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(2): 222~238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Chen L, Santosh M, *et al.* 2013. Construction and destruction of cratons: Preface [J]. *Gondwana Research*, 25(1): 1~3.
- Zhang H F, Goldstein S, Zhou X H, *et al.* 2008. Evolution of subcontinental 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(3): 271~293.
- Zhang H F. 2012. Destruction of ancient lower crust through magma underplating beneath Jiaodong Peninsula, North China Craton: U-Pb and Hf isotopic evidence from granulite xenoliths [J]. *Gondwana Research*, 21(1): 281~292.
- Zhang Siwei, Zhang Suoxi and Kang Rongyu. 1988. Interpretation of the fuliji-fengxian DSS profile in Xiayangzi region [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 31(6): 637~648 (in Chinese).
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, *et al.* 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 107: 45~73.
- Zhao G C, Wilde S A, Sun M, *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Huai'an Complex: Constraints on Late Archean to Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Trans-North China Orogen [J]. *American Journal of Science*, 308(3): 270~303.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2004a. U-Pb and Hf-isotope analysis of zircons in mafic xenoliths from Fuxian kimberlites: evolution of the lower crust beneath the North China craton [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(1): 79~103.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2004b. 3.6 Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China craton [J]. *Geology*, 32(3): 229~232.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2009a. Neoproterozoic (2.7-2.8 Ga) accretion beneath the North China Craton: U-Pb age, trace elements and Hf isotopes of zircons in diamondiferous kimberlites [J]. *Lithos*, 112(3~4): 188~202.
- Zheng J P, Griffin W L, Qi L, *et al.* 2009b. Age and composition of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalts reflect Paleogene underplating beneath the North China Craton [J]. *Chemical Geology*, 264(1~4): 266~280.
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, *et al.* 2001. Relic refractory mantle beneath the eastern North China block: significance for

lithosphere evolution[J]. *Lithos*, 57:43~66.

Zheng J P, Sun M, Lu F X, *et al.* 2003. Mesozoic lower crustal xenoliths and their significance in lithospheric evolution beneath the Sino-Korean crator[J]. *Tectonophysics*, 361(1~2):37~60.

Zheng Jianping. 1999. Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning, East China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~126(in Chinese).

Zhou Xinmin, Yu Jinhai and Xu Xisheng. 1992. The discovery of granulite xenoliths in Nushan Cenozoic basalt and its implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 37(13):1198~1201(in Chinese).

附中文参考文献

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, 1~490.

樊祺诚, 刘若新. 1996. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体[J]. *科学通报*, 41(3):235~238.

樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 等. 1998. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土地球化学[J]. *科学通报*, 43(2):133~137.

耿元生, 沈其韩, 任留东. 2010. 华北克拉通晚太古代末-古元古代初的岩浆事件及构造热体制[J]. *岩石学报*, 26(7):1945~1966.

李志伟, 胥 颐, 郝天珧, 等. 2006. 环渤海地区的地震层析成像与地壳上地幔结构[J]. *地球物理学报*, 49(3):797~804.

刘 富, 郭敬辉, 路孝平, 等. 2009. 华北克拉通 2.5 Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩地体为例[J]. *科学通报*, 54(17):2517~2526.

邵济安, 韩庆军, 李惠民. 2000. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现[J]. *中国科学(D)*, 30:148~153.

邵济安, 魏春景. 2011. 内蒙古东部早中生代麻粒岩捕虏体的岩石学及其构造意义[J]. *中国科学(D)*, 41:1080~1088.

邵济安, 张 舟, 余宏全, 等. 2012. 华北克拉通北缘赤峰地区显生宙麻粒岩的发现及其意义[J]. *地学前缘*, 19(3):188~198.

吴福元, 徐义刚, 高 山, 等. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. *岩石学报*, 24(6):1145~1174.

翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 等. 1996. 太古宙克拉通型下地壳剖面: 华北怀安-丰镇-尚义的麻粒岩-角闪岩系[J]. *岩石学报*, 12(2):222~238.

张四维, 张锁喜, 康荣余. 1988. 下扬子地区符离集-奉贤地震测深资料解释[J]. *地球物理学报*, 31(6):637~648.

郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~126.

周新民, 于津海, 徐夕生. 1992. 女山玄武岩中麻粒岩捕虏体的发现与意义[J]. *科学通报*, 37(13):1198~1201.