

华北东部岩石圈减薄中的下地壳过程:岩浆底侵、置换与拆沉作用*

翟明国^{1,2} 樊祺诚³ 张宏福^{1,4} 隋建立¹

ZHAI MingGuo^{1,2}, FAN QiCheng³, ZHANG HongFu^{1,4} and SUI JianLi¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

3. 中国地震局地质研究所, 北京 100029

4. 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2. Key Laboratory of Mineral Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3. Institute of Geology, Chinese Seismological Bureau of China, Beijing 100029

4. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Beijing 100029

2005-09-12 收稿, 2005-10-27 改回

Zhai MG, Fan QC, Zhang HF and Sui JL. 2005. Lower crust processes during the lithosphere thinning in eastern China: magma underplating, replacement and delamination. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 1509–1526

Abstract Our recent study shows that the lower crust was thinned together with lithosphere mantle in eastern North China Block (NCB) at Mesozoic. This paper reveals that lower crust process is a key point to understand tectonic mechanism of lithosphere thinning. The geochemical data from volcanic rocks and their xenoliths possibly support that a delamination of lower crust and lithosphere mantle occurred in northern and/or southern margins of the NCB only, linking to a post-collisional orogenic process. However, the delamination difficultly happens in the whole of eastern NCB and result in a loss of 80 ~ 120 km thickness of lithosphere. The lower crust xenoliths in Mesozoic and Cenozoic basalts within the NCB have two kinds. One is granulite-facies metamorphosed gabbros/two-pyroxenites and eclogite-facies metamorphosed garnet pyroxenites, which formed at 140 ~ 120 Ma. Another kind is Precambrian granulites that were strongly overprinted by Mesozoic metamorphism. A large-scale lower crust replacement took place at Mesozoic beneath the NCB. In other words, the recent lower crust of the NCB is not Precambrian one. Most of the present lower crust is composed of Mesozoic meta-gabbros and pyroxenites. Otherwise, a lot of late Jurassic granites in the NCB are similar to adakite in geochemistry, which possibly derived from partial melting of lowermost crust and survived a remnant of eclogite or garnet-amphibolite. A hot upwelling mantle is necessary for replacement of lower crust and partial melting of lowermost crust. Although a certain surviving eclogites could sink into mantle, it is unimaginable there was a thick enough eclogite layer that can drag 80 ~ 120 km thick lithosphere together to founder into asthenosphere beneath the NCB. On the contrary, magma underplating perhaps is one of choosers. Forming of the present lower crust through underplating and its replacement to the old one are closely related to lithosphere mantle thinning. And the both of lower crust thinning/replacement and lithosphere mantle thinning are controlled by a same dynamic mechanism, and are cause and effect by each other.

Key words Lower crust, Lithospheric thinning, North China

摘要 最近研究表明, 华北中生代岩石圈减薄不仅是岩石圈地幔减薄, 而且下地壳也发生了一定程度的减薄和置换。本文强调下地壳过程, 如岩浆底侵、置换和拆沉作用是理解岩石圈减薄机制的关键因素之一。火山岩及其捕虏体的信息似乎支持在华北东部南、北缘存在局部造山带型的下地壳与岩石圈的拆沉作用。但是华北东部整体上的减薄机制难以用造山带的拆沉模式来解释。华北东部克拉通内部的火山岩中的下地壳捕虏体有两类, 一类是经历了麻粒岩相变质的底侵辉长岩和辉石岩以及榴辉岩相变质的石榴辉石岩, 形成时代约在 140 ~ 120 Ma; 另一类是经过了中生代变质叠加的前寒武纪麻粒岩。中

* 本文受国家自然科学基金重点项目(4023450)和中国科学院创新项目(KZCX1-07)资助

第一作者简介: 翟明国, 男, 1947 年出生, 研究员, 岩石学专业, E-mail: mgzhai@mail.igcas.ac.cn

生代华北东部曾发生过大规模的岩浆底侵作用,现今的下地壳很可能已大部分不是前寒武纪的下地壳,它们由中生代变质的辉长岩、镁铁质岩石以及经历了很强烈改造的前寒武纪下地壳麻粒岩组成。此外,在华北东部普遍存在着化学成分类似于“埃达克岩”的中生代高铝花岗岩类岩石,它们的形成与岩浆底侵作用和镁铁质下地壳的部分熔融有关,其熔融残留应是榴辉岩或石榴角闪岩。尽管如此,要通过下地壳部分熔融形成一个厚的密度很大的榴辉岩层,由它的重力不均衡来带动 80~120 公里厚的岩石圈地幔一起拆沉进入软流圈的机制很难发生在华北克拉通内部。岩浆底侵和置换作用是下地壳过程非常重要的形式,与岩石圈的减薄具有密切联系,其具体机制尚不完善。

关键词 下地壳;岩石圈减薄;华北

中图法分类号 P542

1 引言

虽然还存在争议,但是有不少数据支持华北克拉通的岩石圈地幔在中生代曾发生过大规模的减薄(Fan and Menzies, 1992; Menzies *et al.*, 1993; Meyer *et al.*, 1994; Harris *et al.*, 1994; Fan *et al.*, 2000; 2001; 邓晋福等, 1996; 郑建平, 1999; 路凤香等, 2000; Zhang *et al.*, 2002, 2003, 2004)。作者等最近的研究(翟明国等, 2001, 2003, 2004; 邵济安等, 2000; Zhang *et al.*, 2002, 2003; 樊祺诚等, 2005)提出这样的认识:(1)岩石圈减薄是华北东部中生代构造体制转折的最重要的深部表现形式。这与浅部的燕山构造带的形成以及中国近北东-北北东走向的盆岭格局取代东西走向构造格局是耦合的,因此中生代构造体制的转折是深部圈层间相互作用的直接结果;(2)岩石圈减薄不仅是岩石圈地幔减薄,而且地壳也发生了相当规模的减薄。地幔与下地壳在中生代构造转折的时限内有大规模的置换作用和突发式的特点。强烈和大面积的火山作用和岩浆作用在中生代的阶段性爆发、成分的演变以及源区的变化和深源包体的记载,是研究岩石圈减薄过程的重要指示。大量的壳熔花岗岩和壳幔混合的花岗岩是由岩石圈减薄引起的强烈的壳幔相互作用的结果,形成了中生代岩浆-流体-成矿系统,引发了爆发式大规模成矿;(3)造山带的下地壳与岩石圈的拆沉作用在华北陆块南、北缘似乎有显示,并主要发生在碰撞后伸展阶段。但是华北克拉通整体上的减薄难以用造山带的拆沉模式来解释。

因此,本文强调下地壳过程是理解岩石圈减薄机制的关键因素之一。新的下地壳的生成和对古老下地壳的置换对于岩石圈的减薄具有重大意义,它们参与岩石圈地幔交代和置换起着重要作用,其中镁铁质岩浆底垫起到重要作用,虽然具体的机制还不完善,人们对下地壳的作用也知之甚少(Rudnick and Fountain, 1995)。在讨论之前,有必要对以下几个问题予以简单的界定。

1.1 中生代岩石圈减薄的范围

中生代岩石圈地幔减薄是基于古生代时期华北陆块仍存在着稳定的前寒武纪地幔,它被新的大洋型地幔所代替(Fan *et al.*, 2000),并在厚度上减薄了 80~120km,而这一结论来源于古生代金伯利岩和新生代火山岩的研究。含金刚

石的金伯利岩的出现在华北克拉通内,表明该区古生代时存在一个冷的厚达 200 公里的岩石圈,而且金刚石中固态矿物包体的研究表明古生代该区岩石圈地幔为典型的大陆克拉通型岩石圈地幔(Menzies *et al.*, 1993; Meyer *et al.*, 1994; Harris *et al.*, 1994)。但是也有人认为整个中国的东部岩石圈在中生代都有减薄(吴福元等, 2003; Niu, 2005)。其主要根据是在华南陆块内,也有大量的中生代花岗岩出现,在扬子克拉通的范围内有金伯利岩出露,以及推测造成华北岩石圈减薄的主要构造控制是太平洋板块的俯冲,因此影响范围应包括华南地区。但是从目前大量的火山岩、岩浆岩以及地球化学和地球物理的研究来看,华北与华南存在较大的差别,华南中生代岩石圈减薄的证据还显不足。Liu *et al.* (2001)的地球物理层析成像结果显示,一个可能的地幔隆起区的中心在东经 110~120 度和北纬 34~44 度,以及 120 度以东的渤海附近。最近 Liang *et al.* (2004)的研究也在中国华北地区用地震波反演的图像中所勾画的一个深部的热的穹隆(图 1)。我们认为现代的结构在一定程度上记录了早期的状态,这与华北中生代花岗岩-火山岩的活动区域一致,推测与华北克拉通东部的岩石圈减薄的范围相吻合。

1.2 岩石圈减薄的时限

翁文灏(Wong W H, 1927)最先提出“燕山运动”的概念,在燕山地区识别出近 E-W 走向展布的中、晚侏罗世髫髻山组火山岩和土城子组红层,被 NE 走向展布的张家口组火山岩不整合覆盖。这一不整合被认为是该区燕山主造山幕的标志。牛宝贵等(2003)根据张家口组火山岩中锆石的 SHRIMP 年龄,提出 136 Ma 代表华北中生代构造转折点的年龄。对于岩石圈减薄的时代有从侏罗纪(如许文良等, 2004),以及从约 140~120Ma(如樊祺诚等, 1998, 2005)开始的不同意见,但多数研究认为最主要的峰期在 130~110Ma 之间。但在空间上岩石圈减薄的起始时限存在明显差异(Zhang *et al.*, 2003, 2005)。

翟明国等(2004)提出华北中生代构造体制转折是与岩石圈大规模减薄耦合的,是地球圈层间由深部到表层的强烈的物质能量交换和重组。它虽然与印支期的碰撞造山有联系,但并不是印支期后造山伸展和拆沉作用的直接结果。同时也很难用单一的构造事件如太平洋板块的俯冲形成的造山带来解释,应是动力学机制完全不同的另一个构造体制。

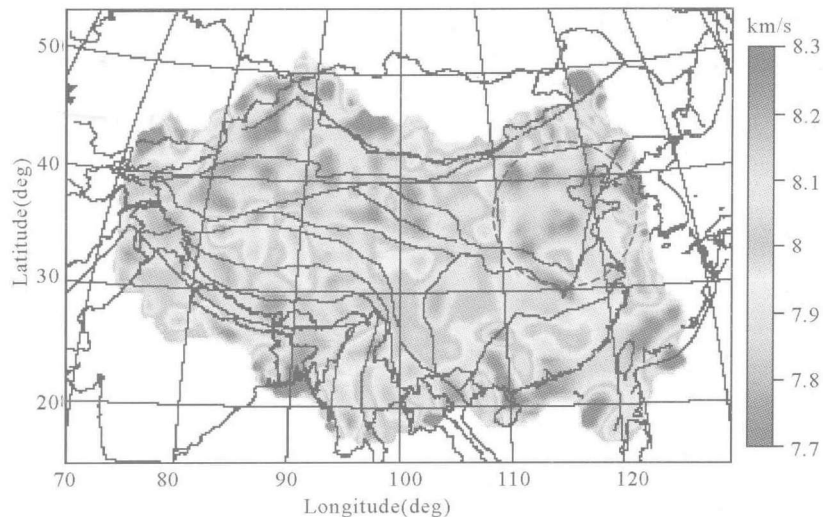
图1 中国的地震反演图解(Liang CT *et al.* 2004)

Fig.1 Results for Pn velocity from an inversion that does not include the Pn anisotropic terms.

因此构造转折用单一的区域的地层或褶皱变形、火山活动不能涵盖,时限也不能用一个地层的年龄来界定。最近大量研究从不同角度限定了中生代构造体制转折和岩石圈减薄的时限(何丽娟等,2001; Zhang and Sun, 2002; Zhang *et al.*, 2003, 2005; 张晓辉等,2002; 刘建明等,2003; 刘伟等,2003; Meng, 2003; 李忠等,2003; Yang *et al.* 2004; 樊祺诚等,2005)。重点对包括华北陆块南北缘、燕山、胶东等典型地区的构造分析确定了由挤压构造到伸展构造的峰期;东部沉积盆地热史恢复结果判明华北东部中、新生代岩石圈厚度的变化和热体制的变更转换的时代;盆地分析揭示了中生代—新生代时期华北东部盆地由挤压挠曲型到伸展断陷型的转变期;通过火山岩喷发、与伸展构造有关的花岗岩类的形成,克拉通内部和边缘的金矿爆发成矿期,以及通过火山岩中的下地壳包体研究等限定了岩石圈减薄和壳幔置换的峰期。以上研究结论基本一致,即华北东部构造体制转折的峰期时限起于 160 ~ 140Ma, 结束于 110 ~ 100Ma, 峰值是 120Ma。

以上研究揭示的中生代火山活动大致可以分为四个阶段(Zhang *et al.*, 2002, 2003, 2004, 2005; 刘建明等, 2003; 刘红涛等, 2003; 许文良等, 2004; 陈斌等, 2005): (1) 210 ~ 180Ma, 可能是与印支期造山相联系的火山活动, 规模小; 有相应的少量花岗岩或中性侵入岩; (2) 160 ~ 150Ma, 火山岩具有碱性岩性质。有大量的壳熔花岗岩出现。 (3) 140 ~ 110Ma, 火山岩和岩浆岩具有双峰式的特点; 某些侵入岩类具有壳幔混熔的特征; (4) 95 ~ 75Ma, 含有地幔包体的碱性玄武岩类。以上的 2 和 3 两个阶段与华北中生代构造转折和岩石圈减薄有关, 第四个阶段似乎表明大规模的岩石圈减薄已经停止, 单一的玄武岩类来自软流圈。因此, 华北东部岩石圈减薄是一个长期的连续过程, 在南、北缘出现的与碰撞后垮塌相关的局部减薄可能发生在约 180Ma 之前。但从

华北克拉通演化的地质历史角度看, 仍具有突发性减薄的特征。

1.3 岩石圈地幔的改造与破坏

前已叙及, 华北克拉通曾存在太古宙和古元古宙地幔。近期从新生代火山岩中的地幔/下地壳包体的直接定年和地表前寒武纪岩石两方面的研究进一步证实了华北的确存在过 27 ~ 25 亿年太古宙和 20 ~ 18 亿年古元古宙地幔, 并且现在还部分保存着。中生代地幔的交代和置换虽然强烈, 但很可能是均匀的或蘑菇云式的(郑建平, 1999; 路凤香等, 2000)。

对于地幔捕虏体的 Re-Os 和 Lu-Hf 的同位素研究成果已陆续发表(高山等, 2003, 2004; 支霞臣和秦协, 2004; 郑建平等, 2004; 吴福元等, 2003)。Re-Os 体系的特性可以有效地示踪地幔部分熔融事件以及岩石圈地幔的生长年龄。复县的金伯利岩中的地幔捕虏体获得 25 亿年和 28 亿年的 T_{RD} 年龄, 而汉诺坝的地幔包体获得的等时线年龄是 1940 ± 180 Ma, 成分表明 Re-Os 系统处于封闭状态, 未受到干扰。栖霞的样品则显示与现代对流地幔相同的 Os 同位素组成, 但仍有较老的地幔成分显示。玄武岩中的麻粒岩捕虏体已被证实是下地壳包体(张国辉等, 1998; 樊祺诚等, 1998; 翟明国和樊祺诚, 2002; 郑建平等, 2004)。主要的锆石年龄集中在 220 ~ 240Ma, 同时有约 25 亿年和 18.4 亿年的年龄, 以及 28 ~ 30 亿年的年龄显示。Hf 达 +18.37 和 Hf 模式年龄为 25 ~ 26 亿年。以上研究表明华北大陆在 25 ~ 28 亿年是主要的生长期, 25 ~ 26 亿年的地幔在汉诺坝地区在 19 亿年左右被古元古宙的新生地幔部分置换。深源捕虏体的研究与地表的前寒武纪地质研究确定的重大构造事件是一致的(Zhai and Liu, 2003, 2004; 翟明国, 2004)。再后经历的灾变式地幔改造和破坏则主要发生在中生代 160 ~ 110Ma 时期。

中生代玄武岩的地球化学特征暗示中生代时期华北东部壳下岩石圈地幔既不同于古生代的克拉通型岩石圈地幔亦不同于新生代大洋型岩石圈地幔 (Zhang *et al.*, 2002)。中生代时期华北岩石圈地幔至少经历过两次大的变动: 从古生代主量元素亏损同位素中等程度富集以方辉橄榄岩为主变为主量和同位素皆强烈富集, 且 HFSE 强烈亏损的以橄榄岩 + 辉石岩, 再于中生代晚期转变为主量元素饱满同位素亏损的以二辉橄榄岩为主的岩石圈地幔 (Zhang *et al.*, 2004)。早侏罗 ~ 晚白垩大量且持续的中基-中酸性岩浆活动表明华北北缘岩石圈减薄作用的开始和结束时间较华北南缘的早, 因为华北南缘大量的中基性火山活动仅出现于白垩纪, 而且具软流圈同位素特征的玄武岩出现在第三纪 (Zhang *et al.*, 2003)。华北中生代岩石圈地幔存在高度化学不均一性 (Zhang *et al.*, 2004), 鲁中地区以弱富集地幔为主体; 太行山地区为 EM1 型地幔 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.7050 \sim 0.7066$; $\epsilon_{\text{Nd}(t)} = -17 \sim -10$); 鲁南和胶东地区则为类似 EM2 型地幔 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 可达 0.7114); 华北北缘中生代岩石圈地幔相对复杂, 既有富集型又有亏损型, 显示“混合”特征。华北中生代时期岩石圈地幔随时间的演化特征也很明显, 即随时间演化越来越富集 (Zhang *et al.*, 2005)。同位素地球化学特征显示华北中生代岩石圈曾受到过富硅熔体不同程度地改造, 鲁西南-胶东地区受影响程度高, 而鲁中和太行山地区受影响程度低。地幔表现出不均一性, 其南、北缘都显示出古生代造山带俯冲的岩石圈板片对地幔成分改造的贡献 (Zhang *et al.*, 2003), 华北克拉通内部如太行山地区的地幔受到岩浆底侵与壳幔作用的影响, 并与前寒武纪的地幔有继承性 (Zhai, 2003)。

Zhang (2005) 对方城玄武岩中的具有明显环带结构的橄榄石捕虏晶的研究表明它们是地幔橄榄岩的解体矿物, 环带结构的辉石捕虏晶是地幔辉石岩的解体矿物, 它们可能记录了壳幔相互作用以及熔体在岩石圈中运移的直接证据。玄武岩中的地幔复合捕虏体的中心是纯橄岩、边部为辉石岩, 它们的矿物相变有来自于陆壳物质的熔体加入, 这是华北南缘古生代富镁橄榄岩转变为晚白垩纪富铁橄榄岩和辉石岩的原因, 可能对中生代岩石圈地幔的改造具有普遍意义。

2 下地壳置换与减薄的依据

华北克拉通的下地壳和其它典型的克拉通有所差别, 中生代岩石圈大规模减薄及其强烈的地幔改造和壳幔作用, 致使岩石圈地幔和下地壳大部或全部被改造和置换, 成为无古老“底”的克拉通 (翟明国, 樊祺诚, 2002; Kusky *et al.*, 2005)。置换作用尚没有一个明确可以对应的英文名词。本文提出的下地壳置换作用 (replacement), 主要是指在隆升地幔的影响下, 岩浆和流体对下地壳的破坏 (disruption)、交代 (metasomatism) 和改造 (reform), 导致原有下地壳的成分和结构发生了部分甚至全部改变和替代。

下地壳的麻粒岩捕虏体已经陆续从华北克拉通不同地区的中、新生代玄武岩中发现, 同时, 晋冀蒙交界地区的早前寒武纪麻粒岩和下地壳剖面的研究也取得进展, 它们与汉诺坝玄武岩是近邻, 玄武岩的围岩就是前寒武纪麻粒岩地体, 这为详细对比和研究提供了极好的天然实验室。此外, 具有中生代与埃达克岩类似化学成分的高铝花岗岩和火山岩的研究也为理解在华北东部的下地壳过程及其在岩石圈减薄中的作用提供了依据。

2.1 华北克拉通的前寒武纪下地壳

传统上地壳被视为双层结构 (上部的花岗岩层和下部的玄武岩层) 或上、中、下三层地壳结构。下地壳 (20 ~ 25 km 以下) 是由麻粒岩相岩石组成的, 成分包括了辉长岩以及大量的包括奥长花岗岩在内的石英闪长质岩石 (Bohlen and Mezger, 1989)。钱祥麟等 (1985)、赵宗溥等 (1993) 和沈其韩等 (1993) 提出华北克拉通北缘的麻粒岩是不均匀抬升过程中掀翻的下地壳。已经有一批作者从地球物理和地球化学角度讨论了华北下地壳的结构 (马杏垣, 1989; Ma *et al.*, 1991; Gao *et al.*, 1998a, 1998b)。大多数意见认为华北克拉通的下地壳成分可能是镁铁质的, 而不是更为演化的偏中性的成分 (Kern *et al.*, 1995)。

由于在 1992 年以前华北克拉通所确定的麻粒岩大多数是中压麻粒岩, 没有发现代表最下部地壳的基性高压麻粒岩地体, 因此一直未能建立较为完整的下地壳剖面。我国最早的基性高压麻粒岩地体发现于华北克拉通北缘西段的冀北蔓菁沟 (翟明国等, 1992; 郭敬辉等, 1993), 后来发现它们可以陆续延伸到承德、建平、甚至胶东的莱西 (李江海等, 1998; 刘文军等, 1998), 在恒山白马石还发现了退变的榴辉岩 (翟明国等, 1995)。基性高压麻粒岩和退变榴辉岩以具有石榴石的冠状后生合晶结构为岩相学标志, 其矿物组合为中压麻粒岩相, 而后又受到角闪岩相退变质。高压基性麻粒岩在晋冀内蒙交界地区的怀安-丰镇-尚义一带与其它早前寒武纪变质岩构成变质程度递减、由高压基性麻粒岩、中-低压麻粒岩到角闪岩相的连续出露的变质岩系。它们的古变质压力分别由 ~1.4 GPa (50 km) 变化到 0.5 GPa (15 km); 它们的岩石组成有从变辉长岩、中酸性正片麻岩到表壳岩的变化。它们的矿物组成由耐火的不含水的组合变为富含云母和角闪石的组合; 地球化学性质也表现出从贫 Si 和 Al、轻度亏损生热元素到具富集连续变化; 流体包裹体在轻度亏损生热元素的麻粒岩中均为 CO₂ 流体, 而在麻粒岩相的表壳岩和角闪岩系中, H₂O 流体逐渐增加。中国典型的掀翻到地表的下地壳剖面在晋冀内蒙交界地区, 由怀安的蔓菁沟经瓦窑口、米市口、小坝子、到尚义的黄土窑, 与其它克拉通剖面有很好的可比性 (翟明国等, 1996; Zhai *et al.*, 2001), 同时和国外典型的克拉通下地壳相比更为完整, 有高压基性麻粒岩代表的最下部地壳层 (Percival, 1988; Percival, *et al.*, 1992; Fountain, 1990; Rudnick and Fountain, 1995)。

2.2 古、中、新生代火山岩中的下地壳捕虏体

火山岩中的下地壳捕虏体的研究已有一批资料陆续发表, 它们主要是汉诺坝、女山新生代玄武岩、信阳中生代玄武岩以及复县古生代的金伯利岩中的麻粒岩捕虏体(周新民等, 1992; 樊祺诚和刘若新, 1996; 樊祺诚等, 1998; 张国辉等, 1998; 陈绍海等, 1998; 黄小龙等, 2001; Zheng *et al.*, 2003, 2004; Yu *et al.*, 2003; Huang *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2004; 郑建平, 2005), 信阳个别的捕虏体(Zheng *et al.*, 2003)和汉诺坝的石榴辉石岩捕虏体(樊祺诚 2001)被认为是榴辉岩相的岩石, 而麻粒岩捕虏体以镁铁质麻粒岩为主, 也有少量的英云闪长质的中酸性麻粒岩。许文良等(2004)和 Xu *et al.* (2002)报道在徐淮地区的中生代侵入岩中有榴辉岩捕虏体, 并根据同位素年龄和岩石学研究认定是华北克拉通的前寒武纪岩石在华北和扬子两个陆块的碰撞中经受了高压-超高压变质, 因此与火山岩中的下地壳捕虏体具有不同的地质意义。

捕虏体麻粒岩的岩石学及地球化学

下地壳麻粒岩捕虏体以镁铁质麻粒岩为主, 也有少量的英云闪长质的中酸性麻粒岩。岩石多具有明显的条带状构造, 包括变形条带和矿物分带。镁铁质麻粒岩含有石榴子石的二辉麻粒岩和不含石榴子石的二辉麻粒岩。镁铁质麻粒岩的矿物组成及其百分含量变化很大, 主要岩石类型以二辉麻粒岩为主, 还有单斜辉石麻粒岩和紫苏辉石麻粒岩, 以及少量的含斜长石石榴辉石麻粒岩。汉诺坝的捕虏体二辉麻粒岩由单斜辉石(Cpx) + 紫苏辉石(Opx) + 斜长石(Plg)组成。岩石具变晶结构, 三连点发育。斜长石多聚集成条带。但局部仍可见到交杂的辉长结构, 说明其原岩为辉长岩。紫苏辉石麻粒岩中不含或少含单斜辉石, 并且含少量的石英。斜方斜辉石与前寒武纪高压麻粒岩相比更富 MgO 和贫 FeO。同样, 单斜辉石也较富 MgO 和贫 FeO, 且 Al_2O_3 , Al^{IV} 和 Na_2O 也较高。石榴石以铁铝石榴石为主, 不同于岩浆底侵到上地幔顶部的具有榴辉岩相变质特征的石榴辉石岩捕虏体(石榴石的 Pyr_{73-83})(樊祺诚等, 2001)。捕虏体麻粒岩的全岩主量和微量元素含量与前寒武纪高压麻粒岩没有明显的差别, 都有 REE 略富集的特点, 只是 SiO_2 略低(47% ~ 49%)。捕虏体麻粒岩的石榴石不具冠状后生合晶, 有的样品表现出淬火结构, 显然不是多期变质的结果而是随熔浆喷出的印记, 与前寒武纪高压麻粒岩石榴石的冠状降压退变结构不同(翟明国等, 1992; 郭敬辉等, 1993; Zhai *et al.*, 2001)。矿物温度计计算的变质温度是 900 ~ 1000°C, 比前寒武纪高压麻粒岩高 100 ~ 150°C, 属高温麻粒岩, 压力约 1.0 ~ 1.3 GPa, 与前寒武纪高压麻粒岩相似, 大约相当于 33 ~ 45 km 的深度。Zhai *et al.* (2001) 和黄小龙等(2001)对汉诺坝的捕虏体镁铁质麻粒岩和附近的蔓菁沟、西望山的前寒武纪镁铁质麻粒岩进行了详细的地球化学的分析和对比, 发现二者存在明显的差异(图 2)。蔓菁沟、西望山的前寒武纪基

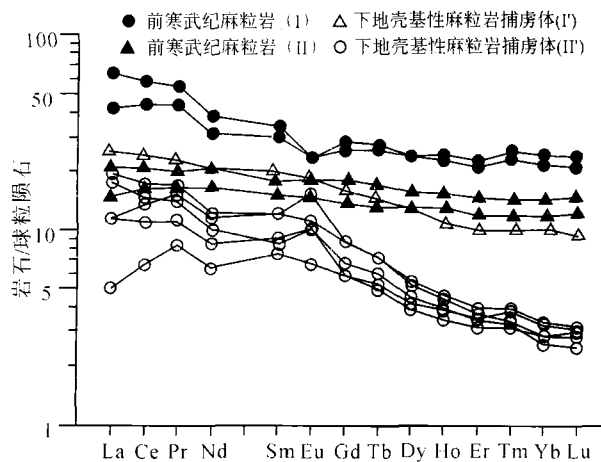


图2 下地壳基性麻粒岩捕虏体与前寒武纪基性麻粒岩的 REE 球粒陨石标准化配分图

Fig. 2 Chondrite-normalized REE plots of Precambrian and basic granulite xenoliths

性麻粒岩的稀土配分模式大致两类, 一类是轻稀土略富集的(I), 一类是轻重稀土没有明显分异的(II'), 大致相当于太古宙常见的 TH1 和 TH2 型基性岩石(Condie, 1976; 1981)。捕虏体麻粒岩也可以分为两类, 一类是经过强烈改造的前寒武纪麻粒岩(I'), 与蔓菁沟、西望山的前寒武纪基性麻粒岩中轻稀土富集型的特征基本相似, 表现出耐熔元素的继承型; 另一类是新生的变质的辉长岩(II'), 它们与前寒武纪富集和亏损轻稀土的基性麻粒岩都不同, 后者占多数。储雪蕾等(2001)对汉诺坝的变质的辉长岩进行了铂族元素(PGE)的分析, 证实麻粒岩与寄主的玄武岩 PGE 分布特征相似(图 3), 特别是它们的 Pd/Os (5.0 ~ 5.1) 和 Pd/Ru (2.8 ~ 3.0) 比值与玄武岩(5.0 ~ 5.4; 2.0 ~ 2.1)十分接近, 远高于地幔橄榄岩的比值(0.3 ~ 0.6; 0.4 ~ 0.5), 支持这些基性麻粒岩的形成与岩浆的底侵作用有关。对这些捕虏体系统的 Sr、Nd 和 Pb 同位素的研究表明(张国辉等, 1998; 陈绍海等, 1998), 它们是在较近期(中生代以来)形成的。低的 Rb/Sr 比值与高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 的解耦表明捕虏体的形成经历了复杂的历史和较强的混合作用, 是混合作用的产物, 混合端元组成及混合作用机制都较复杂。

捕虏体麻粒岩的年代学

年代学研究的结果与岩石学和地球化学一致。汉诺坝不同捕虏体麻粒岩的锆石 U-Pb 同位素稀释法年龄测定的结果是 140.2 ± 0.5 Ma, 120.9 ± 0.6 Ma 和 124.2 ± 0.5 Ma 之间(樊祺诚等, 1998)。该年龄被解释为在侏罗纪晚期, 华北幔源岩浆底侵作用开始, 开始发生壳幔混合与麻粒岩相变质作用, 而大规模的底侵事件发生于白垩纪早期, 辉长质岩浆直接侵位于下地壳形成不同的堆晶岩, 并经麻粒岩相变质, 形成麻粒岩下地壳。如果考虑到同位素的复杂混合特征, 其形成过程可能更为复杂, 包括了原有的基性下地壳的重熔、改造和混合。最近郑建平(2005)利用激光剥蚀技

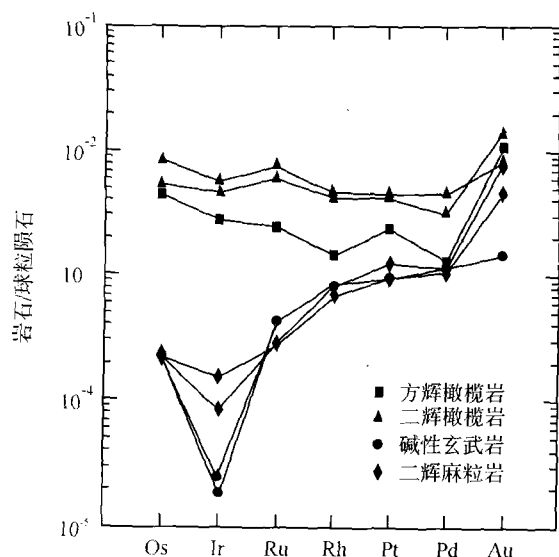


图3 汉诺坝地幔橄榄岩、基性麻粒岩与玄武岩的 PGE 球粒陨石标准化配分图(据储雪蕾等,2001)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE plots of basalt, mantle peridotite and granulite xenolith from Hannuoba (after Chu *et al.*, 2001)

术系统分析了汉诺坝、复县和信阳的下地壳捕虏体麻粒岩的锆石 U-Pb 年龄。结果表明,不同成分的麻粒岩都记录了 2700 ~ 2500 Ma 和 1900 ~ 1800 Ma 的年代学记录,与华北克拉通前寒武纪变质岩所记录的两度最重大的地质事件一致 (Zhai and Liu, 2004; Zhac *et al.*, 2004)。同时还记录有更古老的年龄信息以及中生代岩浆活动与改造的信息。结合 Hf 同位素研究,说明了下地壳麻粒岩捕虏体的锆石记录了多期的下地壳再造和岩浆过程,反映了华北克拉通的构造演化历史和中生代改造的历史。而汉诺坝的晚中生代镁铁质麻粒岩相岩石最发育,是研究这一时期底侵作用和壳-幔交换作用最理想的地区 (翟明国、樊祺诚, 2001; Wilde *et al.*, 2003; 樊祺诚等, 2005; 郑建平, 2005)。

2.3 石榴辉石岩捕虏体与壳-幔过渡带

笔者等 (Zhai *et al.*, 2001; 翟明国和樊祺诚, 2001; 樊祺诚等, 2005) 提出中生代以来的下地壳分为三层: 上部下地壳主要由长英质麻粒岩, 下部下地壳主要由辉长质麻粒岩相堆晶岩 (斜长二辉岩为主) 组成; 壳幔过渡带主要由镁铁质-超镁铁质榴辉岩相石榴辉石岩、辉石岩和尖晶石二辉橄榄岩等组成。经历了漫长地质历史演化的前寒武纪基性麻粒岩已无法代表现今下地壳, 但它们仍记录了早期下地壳信息。

壳幔边界岩石

现今壳幔边界岩石主要由岩浆底侵成因的镁铁质麻粒岩相、榴辉岩相岩石和火成辉石岩、橄榄岩组成。底侵成因的麻粒岩相、榴辉岩相岩石具典型层状堆晶结构。麻粒岩相岩石为含斜长石矿物组合: $Pl + Cpx \pm Opx \pm Qtz \pm Gt$, 岩石类

型以斜长二辉岩为主 (>80%), 少量含石榴石的斜长石榴辉石岩, 以及苏长质、长英质麻粒岩相岩石; 榴辉岩相岩石为不含斜长石矿物组合 ($Gt + Cpx \pm Opx$), 最常见岩石类型为石榴石 + 单斜辉石组合的石榴辉石岩。

汉诺坝玄武岩中的石榴辉石岩, 同种矿物石榴石或单斜辉石在粒度上逐渐过渡, 大多数矿物晶面为弯曲的接触面, 并有受应力影响导致的颗粒压扁拉长和定向排列现象。石榴石粒径变化最大 (1 mm ~ 8 mm), 已完全蚀变, 个别石榴石包裹有细粒浑圆状单斜辉石。单斜辉石新鲜, 黑色或褐黑色, 区别于橄榄岩中翠绿色铬透辉石。其层状堆晶构造和粒状变晶结构特点也明显区别于汉诺坝从同源玄武质岩浆高压结晶、具火成结构的包括石榴辉石岩在内的辉石岩类, 代表了特定的由幔源岩浆底侵于上地幔顶部形成的堆晶岩。根据其产状和成因矿物学特征, 无疑是侵位于上地幔。与其一道产出的下地壳麻粒岩相斜长二辉岩的 T-P 条件为 > 900°C 和 1.0 ~ 1.2 GPa, 相当于 33 ~ 40 km 深度 (樊祺诚等, 2001), 而岩浆底侵作用主要发生于壳-幔边界几公里的厚度, 推测榴辉岩相堆晶石榴辉石岩的形成深度在 40 km ~ 45 km 之间 ($P \approx 1.3 \text{ GPa} \sim 1.5 \text{ GPa}$), 相当于上地幔尖晶石二辉橄榄岩形成深度的上限, 估计的石榴辉石岩的平衡条件, 在 1.3 GPa ~ 1.5 GPa 压力条件下, 其形成温度均在 1000°C 以上 (1065 ~ 1080°C), 经历了榴辉岩相变质作用 (樊祺诚等, 2005)。

壳-幔过渡带的下地壳岩石的地球化学

汉诺坝及邻区壳幔边界岩石类型、矿物组成及主量元素分析表明 (樊祺诚等, 2005): 岩石以镁铁矿物为主 ($opx + cpx > 50$), 岩石化学成分上 SiO_2 含量在 45 ~ 55%, $Mg^\#$ 均超过 60 (分别变化于 64 ~ 81 和 63 ~ 90)。大部分榴辉岩相石榴辉石岩捕虏体和辉石岩类捕虏体的 $Mg^\#$ (80 ~ 90) 已接近上地幔超镁铁质岩石 ($Mg^\# \sim 90$), 显示了壳幔过渡带的特征。

石榴辉石岩和辉石岩捕虏体代表的壳幔过渡带岩石的 REE 和不相容元素模式取决于两种辉石 (斜方辉石和单斜辉石) 和石榴石的相对含量。榴辉岩相石榴辉石岩具有相似的略呈 U 型 REE 模式, 兼有单斜辉石富 LREE 和石榴石富 HREE 的特征。二辉岩显示与石榴辉石岩相反的略具倒 U 型 REE 模式。和上地幔捕虏体相比, 尖晶石二辉橄榄岩的 REE 最低, LREE 亏损和中重稀土相当于球粒陨石的 1 ~ 2 倍, 为平坦型 REE 模式 (图 4)。捕虏体下地壳麻粒岩、壳幔过渡带 (榴辉岩相石榴辉石岩、辉石岩类)、上地幔 (尖晶石橄榄岩) 样品的 Sr、Nd 同位素组成呈极好的负相关线状排列。地幔橄榄岩具亏损地幔 (DMM) 特征。榴辉岩相石榴辉石岩和部分辉石岩同样具有亏损地幔 (DMM) 特征, 表明它们都是从地幔岩浆直接形成, 未发生壳幔相互作用。下地壳麻粒岩类具有较高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和较低的 ϵ_{Nd} 明显不同于地幔橄榄岩和玄武岩, 显示向 EMI 富集地幔过渡特征, 指示发生了壳幔混合作用。

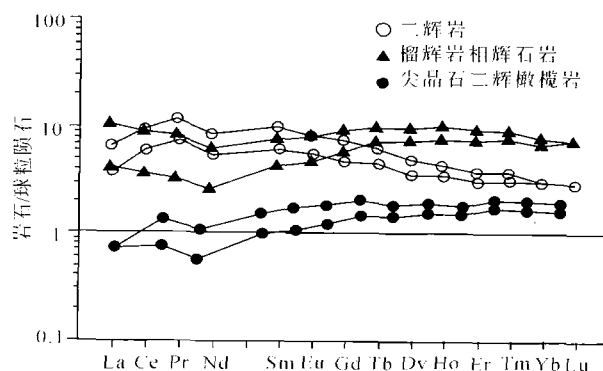


图4 汉诺坝壳幔过渡带岩石的REE球粒陨石标准化配分图(据樊祺诚等, 2005)

Fig.4 Crust-mantle transitional zone and upper mantle REE

2.4 高锶花岗岩

高锶花岗岩的分布和地球化学特征

华北东部许多燕山期的花岗岩类岩石具有与埃达克岩相似的地球化学特征, 如分布在河北、山西、北京、山东和辽宁的许多花岗质侵入岩(图5), 包括闪长岩-石英闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-花岗岩(张旗等, 2001a; 刘洪涛等, 2002a)。对其命名有较大分歧, 地球化学成分与埃达克岩也有差别, 为了便于论述, 我们这里称之为高锶花岗岩, 并认为(翟明国, 2004)它们来源于镁铁质(下地壳)的部分熔融而不是长英质中地壳或下地壳上部的部分熔融。

这些花岗岩类岩石具有高 SiO_2 和 Al_2O_3 含量, 高 La/Yb 和 Sr/Y 比值(图6), LREE 富集, 亏损 HREE、Y 和 HFSE(李伍平等, 2001; 王焰和张旗, 2001; 王强等, 2001; 刘洪涛等, 2002a; 李承东等, 2004)。与典型的埃达克岩相比(Defant and Drummond, 1990), 埃达克质花岗岩更富钾, 其 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值略大于 1, 少数小于 1, 属于高钾钙碱性系列。此外它们的相容元素 Mg、Cr 和 Ni 含量较低, HREE 部分(Ho-Lu)通常显示较为平坦的分布, 通常有弱的负 Eu 异常, 表明残留物中可能有角闪石(+/-斜长石)存在, 或有斜长石分离结晶作用的影响。

值得注意的是, 华北东部许多 Au、Mo、Cu 等成矿作用与高锶花岗岩类密切相关。如与金矿关系密切胶东的郭家岭花岗闪长岩、与小秦岭的文峪、华山、娘娘山花岗岩均具有类似埃达克质岩的地球化学特征。

中生代东部“高原”及下地壳大规模熔融

埃达克质成分岩石的形成需要很高的温度(850 ~ 1150℃)和压力(1.0 ~ 4.0 GPa), 还需要水的参加, 而上述条件也有利于在地幔和基性岩中富集的 Cu、Au、Mo、Ag 等元素的萃取。在板块消减带, 埃达克岩形成在 70 ~ 90 km 深度, 恰恰位于角闪岩相与榴辉岩相转变界面的附近, 可能与角闪石消失时释放出大量的水, 从而降低 MORB 熔融的固相线温度, 有利于形成埃达克质岩浆有关。在加厚的下地壳底部, 埃达克质岩浆的形成可能也与高温高压下角闪岩相向榴辉

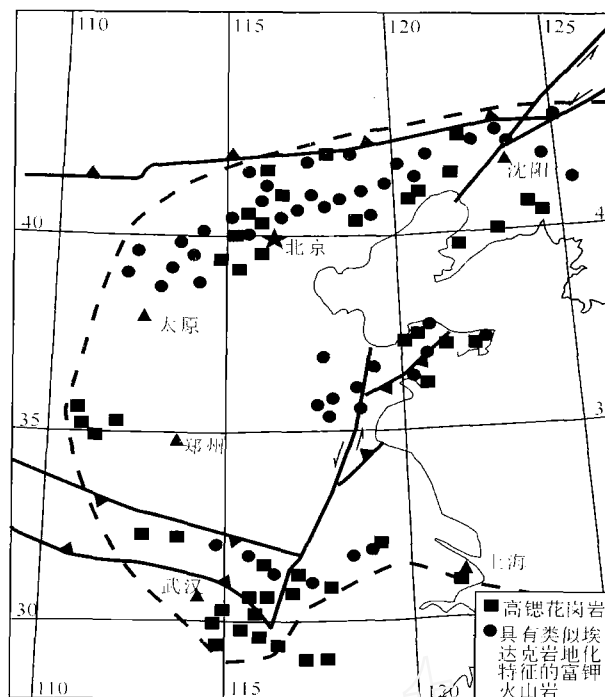


图5 具有与埃达克岩类似的地球化学特征的花岗岩类和火山岩分布图(据张旗等, 2001C)

Fig. 5 Distribution of high-Sr granitoid and volcanic rocks in the eastern NCC

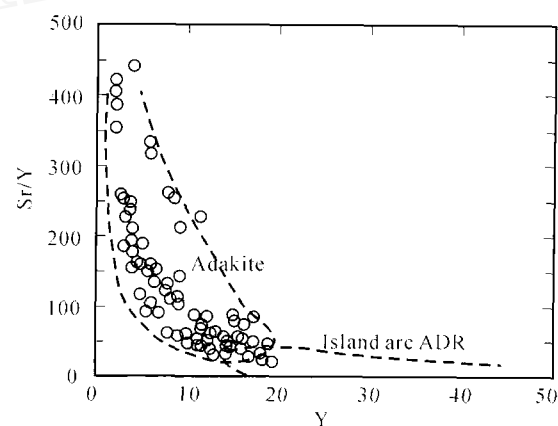


图6 华北东部部分埃达克质花岗岩的 Sr/Y 图

Fig. 6 Sr/Y - Y diagram of adakite-like granitoid rocks

岩相转变时角闪石的脱水作用有关。相比其它花岗岩类, 埃达克质岩有利于成矿的关键因素就是角闪石的脱水作用。角闪石分解产生的大量流体, 有利于金属元素的萃取和迁移。此外, 埃达克质岩浆的快速上升也有利于将 Au、Cu 等成矿熔体携带到地壳浅部聚集成矿。高锶花岗岩有与埃达克岩类似的微量元素特征, 其熔融条件应大致相似, 原岩应以镁铁质岩为主。

根据中国东部的情况, 具有类似于埃达克岩特征的中酸性高锶侵入岩不大可能与板块俯冲有关, 应当是板内环境的。

推测主要源于加厚的陆壳底部下地壳基性麻粒岩的部分熔融(张旗等, 2003)或者下地壳拆沉-熔融和地幔混染过程(肖龙等, 2004), 并可依此解释钾质偏高。因为岩浆源区的深度大, 应来自岩石圈地幔的玄武质岩浆底侵到具克拉通性质的陆壳(>50km)底部导致古老的下地壳基性岩部分熔融形成的, 因此张旗等(2001b, c)推测在中国东部中生代时存在一个高原, 其形成是因为自晚三叠纪开始岩石圈地幔熔融产生的玄武岩底侵加厚到地壳之下, 同时该加厚层发生麻粒岩相变质、镁铁质堆晶岩、基性超基性及碱性杂岩侵入(肖龙等, 2004)。熔融出高锆花岗岩类, 熔融残留应该是榴辉岩或石榴角闪岩。

刘红涛等(2003)将华北克拉通北缘的中生代花岗岩类划分为钙碱性和高钾钙碱性花岗岩、强过铝质淡色花岗岩、高锆花岗岩、碱质 A 型花岗岩和碱性花岗岩五个类型。强过铝质淡色花岗岩起源于泥砂质变沉积岩在地壳加厚和隆升过程中的减压脱水熔融; 高锆花岗岩起源于强烈加厚陆壳的下部或壳幔过渡带的中酸性或基性岩石脱水部分熔融; 碱质 A 型花岗岩和碱性花岗岩均为岩石圈伸展背景下的岩浆作用产物, 但后者明确指示区域岩石圈已处于板内裂谷状态。在区域地质演化总体框架下, 中生代各类型花岗岩类岩浆活动的时间序列, 明确反映出区域地球动力学背景从碰撞后到非造山的演化过程。花岗岩类岩浆活动的演化过程指示, 华北克拉通北缘地区中生代重大构造转折应始于 160~150Ma 之间, 以出现大量的高锆花岗岩和少量过铝质淡色花岗岩为特征; 140~110Ma 期间以高锆花岗岩侵位事件的减少和碱质 A 型花岗岩大量出现为特征。在大约 110Ma 左右, 区域地壳基本减薄到正常厚度(35~40km), 此时以出现碱性花岗岩为特征。

2.5 中生代火山岩

中生代火山岩活动随时间的演化

华北中生代火山活动随时间的演化很明显, 尤其是在华北北缘和南缘地区。在华北北缘早期(侏罗纪和早白垩纪)火山岩主要为玄武安山岩、安山岩、粗安岩为主, 分布广泛且厚度大。在局部地区出现高镁安山岩(Zhang *et al.*, 2003)。其物质来源主要为岩石圈地幔, 并混有大量的地壳物质。晚期(105 Ma 左右)在辽西碱锅和内蒙赤峰地区出现软流圈源玄武岩(Zhang *et al.*, 2003)。而在华北南缘出现以青山组火山岩为代表的岩石圈地幔源的中基性火山活动主要为 120Ma 左右, 出现以王氏群为代表的软流圈源玄武岩约为 80Ma。这说明华北北缘岩石圈减薄的启动和结束时间皆比华北南缘要早。

在华北南缘, 尤其是鲁西南地区中生代火山岩的锆同位素随时间的演化越来越富集, 到 120Ma 火山岩的锆同位素比值最高(Zhang *et al.*, 2004 图 5), 和该区碱性岩的锆同位素随时间的演化趋势一致(图 7; Zhang *et al.*, 2004)。从约 160Ma 火山岩的弱锆同位素富集, 到 120Ma 火山岩的锆同位素比值最高。新生代时期, 第三纪玄武岩的锆同位素弱富集到晚第三纪-第四纪玄武岩的锆同位素亏损特征, 暗示新生代玄武岩的形成源区逐渐变深、岩石圈地温梯度逐步降低、岩石圈地幔逐步增厚的过程。

高镁安山岩与埃达克岩

对比了微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素特征之后, 一些研究者(张旗等, 2001; 李伍平等, 2001; 李晓勇等, 2004; 肖龙等, 2004)提出华北东部, 如辽西、鲁西或胶东等出露的中生代火山岩有一部分属于埃达克质的岩石, 但它们的常量元素含量

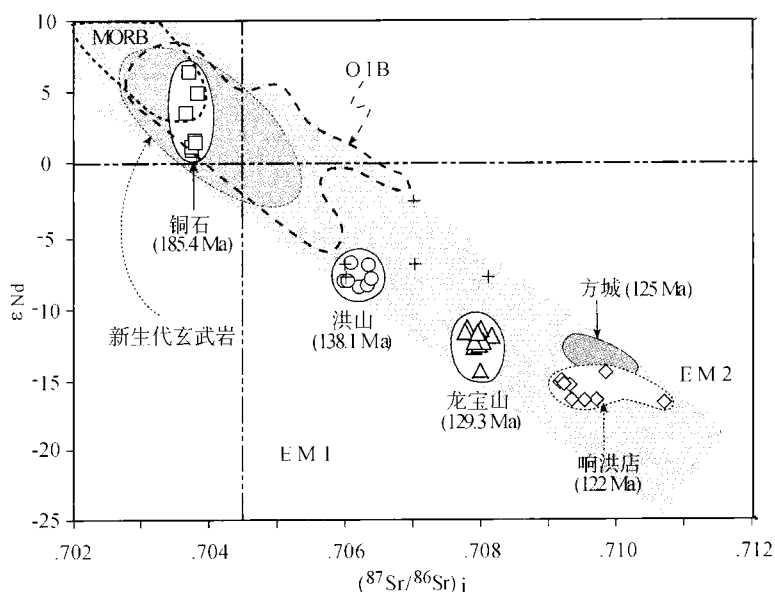


图 7 中生代碱性岩浆作用的 $\epsilon_{\text{Nd}} - \epsilon_{\text{Sr}}$ 图解(据 Zhang *et al.*, 2004)

Fig. 7 $\epsilon_{\text{Nd}} - \epsilon_{\text{Sr}}$ diagram of Mesozoic alkaline of Magma (from Zhang *et al.*, 2004)

上有明显的钾质偏高而与典型的埃达克岩有别,有些成分更类似与 shoshonite。因此这些岩石的成因与俯冲洋壳有关的埃达克岩不同,推测大约在晚三叠纪时,有岩石圈部分熔融产生的辉长质岩浆的底侵作用,加厚到下地壳之下,同时软流圈小比例熔体的加入使得被加厚的下地壳更富钾和大离子亲石元素 (McKenzie, 1989)。随着加厚下地壳的变质与熔融,产生富钾或低镁的类似埃达克的火山岩,或随着拆沉-熔融的熔体受到地幔橄榄岩的混染而产生富镁的类似埃达克质火山岩。

Zhang *et al.* (2003) 报道的高镁安山岩出露在阜新的乌拉哈达,其 $Mg\# \approx 67$,并具有 EM1 地幔的 Sr-Nd-Pb 同位素特征,其 K-Ar 年龄为 142Ma。推测的火山源区是由先前俯冲板片的改造后的 EM1 型岩石圈地幔。典型的埃达克质火山岩在华北东部是很少的。一个例子是北缘辽宁省境内北票一带兴隆沟组火山岩 (Gao *et al.*, 2004)。兴隆沟组由高镁安山岩、埃达克岩和英安岩以及互层的流纹岩组成。它们总体的地球化学特征是高 Na_2O ($\leq 5.7\text{wt}\%$ 和 Sr (500 ~ 1,618ppm), 亏损 HREEs 元素, Yb < 1.8ppm, Y $\leq 18\text{ppm}$, 高的 Sr/Y (36 ~ 135) 和 LaN/Yb_N (17 ~ 19) 比值。埃达克岩的 $Na_2O/K_2O > 2.0$, 英安岩的 $Mg^* = 53 \sim 65$ 。兴隆沟组下段的流纹岩和上段的隐晶质熔岩的锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MSU-Pb 年龄在 159 ~ 144Ma, 因此确定的形成时代是在晚侏罗纪, 与 Zhang *et al.* (2003) 报道的高镁安山岩可能属同一套岩系但层位更老。鉴于流纹岩中的锆石有 2500Ma 的残留年龄, 以及联系到华南北缘信阳火山岩中的榴辉岩和徐淮地区的闪长-二长花岗斑岩中的石榴石单斜辉石岩捕虏体, 这些捕虏体具有与苏鲁-大别山榴辉岩相似的变质年龄和残留的约 2500Ma 和 1900Ma 的残留年龄, 因此高山等 (Gao *et al.*, 2004) 认为有一种可能, 华北古老克拉通的下地壳在鄂霍茨克洋俯冲消减受的影响形成了加厚的地壳, 部分熔融喷发出高镁安山岩以及高 Na_2O/K_2O 具埃达克岩成分的英安岩和流纹岩, 导致下地壳形成榴辉岩, 并经过下沉 (foundered) 的过程进入地幔的循环。

3 岩石圈减薄中的下地壳过程

3.1 下地壳的置换作用

从以上的研究结果可以得知:

(1) 在华北克拉通内的早前寒武纪变质岩区, 被构造抬升到地壳的下地壳仅代表了前寒武纪的下地壳组成, 而由新生代玄武岩携带的基性捕虏体麻粒岩则代表了现存的下地壳的下部。

(2) 两类下地壳麻粒岩在矿物组成、变质历史、同位素特征和年龄上存在重大差别, 而现存的下地壳下部主要形成的时代是在中生代 140 ~ 120Ma 之间。但是也有的麻粒岩记载了约 18 亿年、25 亿年甚至更古老的年代学记录。可以明确的是, 前寒武纪的下地壳是在中生代特别是在 140 ~ 120Ma

之间被底侵的辉长岩置换的。

(3) 虽然目前中新生代火山岩中发现的下地壳捕虏体有限, 但仍可说明, 华北克拉通最下部地壳的一些已被中生代下地壳置换, 它们不仅发生在克拉通边部, 而且发生在克拉通内部。这种置换可能是不均匀的, 置换的下地壳主要是下部下地壳。

(4) 具有类似与埃达克岩成分的高锆花岗岩侵入体普遍分布于华北克拉通东部, 它们的形成年龄在 160 ~ 150Ma, 而在 140 ~ 110Ma 大量到高峰, 在 110Ma 之后大量减少, 代之以钙碱性和碱性花岗岩, 虽然对东部是否存在高原有不同意见, 但花岗岩的变化仍能指示地壳的厚度曾有过较大的减薄。埃达克和高镁安山岩只出露于华北克拉通的北缘, 很难指示整个华北克拉通的东部都有下地壳拆沉方式的影响而导致岩石圈的减薄。

3.2 岩石波速与现今的下地壳结构

根据华北东部的地壳-上地幔地震剖面 (孙武城等, 1985; 刘昌铨等, 1991; 祝治平等, 1997; Kern *et al.*, 1996; Gao *et al.*, 1998; 陈绍海等, 1998), 以及对华北前寒武纪地体麻粒岩和下地壳的岩石实验波速研究 (张友南、孙君秀, 1998; Zhai *et al.*, 2001; 樊祺诚等, 2002), 能对现今华北的下地壳结构有一个大致的推断, 并可以和岩石学地球化学的研究结果相互验证。早前寒武纪地体中酸性麻粒岩和基性麻粒岩的 V_p 变化在 6.57 ~ 7.0km/s。下地壳捕虏体基性麻粒岩样品的 V_p 在 7.17 ~ 7.29km/s。榴辉岩相的石榴辉石岩的 V_p 在 7.31 ~ 7.78km/s, 处于基性麻粒岩与壳-幔过渡带或榴辉岩 (6.8 ~ 8.1km/s) 之间 (Rudnick and Fountain, 1995; Holbrook *et al.*, 1992)。由此推断早前寒武纪地体麻粒岩 (下地壳剖面) 所代表的下地壳是由 V_p 在 6.57 ~ 7.0km/s 的高压基性麻粒岩到中酸性麻粒岩构成的, 而现今下地壳捕虏体代表的是 V_p 在 7.07 ~ 8.0km/s 的基性-超镁铁质麻粒岩, 具有从下地壳-壳幔过渡带的结构特征。在北京-怀来-丰镇地震剖面和浑源-汉诺坝地震剖面来看, 一个平直的速度界面 P 波速大致在 6.9 ~ 7.0km/s, 深度大约 41 ~ 42km。然而 Bohlen (1987) 曾设想地球普遍存在一个镁铁质层状下地壳, 它们的波速应在 7.0 ~ 7.5km/s 之间。可是在华北的地震剖面中来看, 6.5 ~ 6.9km/s 是一个稳定和较厚的层, 深度为 32 ~ 41km 左右。它们在成分上是中酸性麻粒岩为主 (可以夹由基性麻粒岩层), 但是不显示一个稳定的镁铁质麻粒岩最下部地壳层存在。相反, 由 7.0 ~ 8.0km/s 的层却普遍存在, 而且厚度也有一定幅度的起伏变化。这与岩石学和地球化学所揭示的一致, 即在华北现存的下地壳可以分为三层: 上部下地壳 (25 ~ 33km): 主要由中酸性麻粒岩组成; 下部下地壳 (33 ~ 40km): 主要由基性麻粒岩与中酸性麻粒岩互层组成; 壳幔过渡带 (40 ~ 45km): 主要由榴辉岩相石榴辉石岩、辉石岩和尖晶石二辉橄榄岩等组成。而下部下地壳和壳幔过渡带构成了一个由中生代形成的镁铁质麻粒

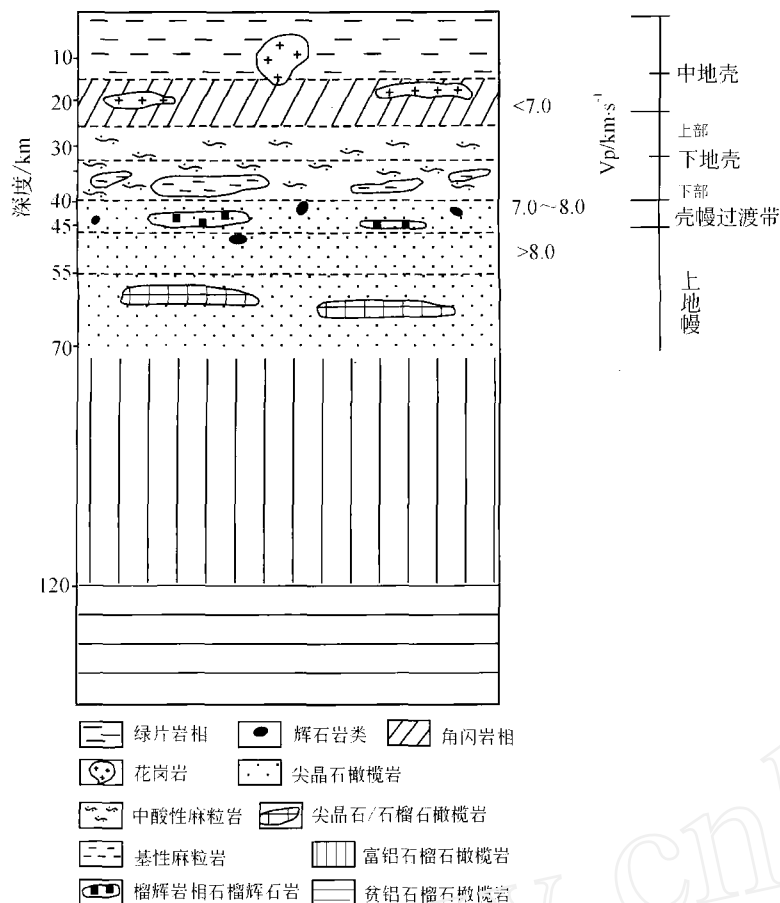


图8 汉诺坝地区壳-幔组成与结构图(据樊祺诚等 2005 改编)

Fig.8 is a sketch diagram for composition and structure of crust-mantle in the Hannuooba area. (changed from Fan *et al.*, 2005)

岩-榴辉岩相(石榴)辉石岩-橄辉岩组成的岩层,就是P波速7.0~8.0km/s的层,之下是上地幔。上部下地壳则主要是早前寒武纪的中酸性麻粒岩夹由基性麻粒岩的古老下地壳。图8是诺坝地区壳-幔组成与结构图。因此,41~42km表现出来的速度界面,不代表壳-幔分界的莫霍面,而是依然保存的古老的下地壳(现今上部下地壳)与现今存在的镁铁质下部下地壳-壳幔过渡带之间的界面。壳幔过渡带可能代表了岩石学莫霍面,它不是一个截然的界面,而是由基性-超基性岩浆底侵作用形成的过渡带(Fountain *et al.*, 1981;樊祺诚等,2002)。

3.3 岩浆底侵是下地壳置换和减薄的主要原因

汉诺坝玄武岩捕虏体的研究表明(樊祺诚等,1998;樊祺诚等,2001;翟明国、樊祺诚 2002;樊祺诚等,2005),现今壳幔边界岩石主要由岩浆底侵成因的镁铁质麻粒岩相、榴辉岩相岩石和火成辉石岩、橄辉岩组成,它们具有典型的麻粒岩相、榴辉岩相岩石所具有的层状堆晶结构。麻粒岩相岩石为含斜长石矿物组合:Pl + Cpx ± Opx ± Qtz(石英) ± Gt,岩石类型以斜长二辉岩为主(>80%),少量含石榴石的斜长石榴辉石岩,以及苏长质、长英质麻粒岩相岩石;榴辉岩相岩石

为不含斜长石矿物组合(Gt + Cpx ± Opx),最常见岩石类型为石榴石+单斜辉石组成的石榴辉石岩。岩浆底侵成因的麻粒岩相、榴辉岩相岩石与火成辉石岩类的最大区别是,前者具典型层状堆晶结构,后者为火成结构。

由捕虏体所代表的现今壳幔边界岩石及早期下地壳岩石的矿物成分变化可以看出,从上部下地壳到下部下地壳、→壳幔过渡带→上地幔,充分展示了矿物成分的时空演化规律。斜长石只出现于下地壳岩石中,早期下地壳的斜长石成分变化于拉长石~中长石(An₅₉~44)。现今下地壳的斜长石成分变化于培长石~中长石(An₇₇~40),显示岩浆底侵成因堆晶岩的斜长石更宽的成分变化。在上述层位中单斜辉石的MgO呈规律性逐渐升高,相反FeO逐渐降低,相应的辉石种属变化:普通辉石?次透辉石?透辉石(为主,Cr₂O₃<0.5%)?铬透辉石(Cr₂O₃>0.5%)。岩浆底侵成因麻粒岩相堆晶岩的单斜辉石TiO₂最高(0.7~1.0%),区别于其它岩石的单斜辉石(一般TiO₂<0.5%)。麻粒岩相辉石岩和黑色辉石岩的斜方辉石为紫苏辉石(En₆₂₋₈₀)或古铜辉石(En₈₆),地幔橄辉岩的斜方辉石为顽火辉石(En₈₈₋₉₀)。前寒武纪地体麻粒岩中石榴子石的镁铝榴石含量最低(Pyr₂₀),麻粒岩相斜长石榴辉石岩和黑色石榴辉石岩捕虏体中石榴子

石的镁铝榴石含量中等(Pyr_{33-59}), 榴辉岩相石榴石岩捕虏体中石榴子石的镁铝榴石含量最高($\text{Pyr} > 70$)。少量金红石出现于麻粒岩相斜长辉石岩中, 这与上述该类岩石中富 TiO_2 单斜辉石一致表明, 岩浆底侵成因的现今下地壳 TiO_2 含量相对较高。少量尖晶石出现于黑色尖晶石二辉岩和橄榄岩中, 分别为铝尖晶石和铬尖晶石。纵观矿物成分变化特点是: 从早期下地壳→现今下地壳→壳幔过渡带→上地幔, 斜长石、辉石和石榴子石中的 CaO 、 MgO 、 Cr_2O_3 含量增加, 导致岩石成分由长英质→镁铁质→超镁铁质变化。岩石矿物结构和成分, 以及前面描述的温压条件, 都指示了深部过程是由幔源的岩浆底侵于上地幔的顶部, 形成基性和镁铁质堆晶岩, 并对原有的基性下部地壳烘烤, 导致部分熔融和高 Sr 花岗岩的形成, 并与底侵的岩浆有物质成分交换和混合。底侵的基性岩浆岩和镁铁质岩浆岩分别发生了麻粒岩相和榴辉岩相变质作用, 其变质程度的差别主要取决于化学成分和流体。华北的地震剖面也为底侵成因的下地壳-壳幔过渡带的存在提供了依据。

4 讨论: 岩石圈减薄的机制: 拆沉作用与岩浆底侵作用

华北中生代岩石圈减薄的机制至今没有得到明确的结论。主要的假定模式有: 拆沉作用(如 Gao *et al.*, 1998b, 2004)、根柱构造(邓晋福等, 1996; 2004)和地幔热侵蚀(Xu, 2001)等。

4.1 拆沉作用和底侵作用的概念

在此, 我们先对拆沉(delamination)和底侵作用(underplating)的概念作一个讨论。Rudnick and Fountain (1995)曾在前人的基础上, 对这两个名词重复了定义。Underplating: intrusion of magmas near the base of the crust; Delamination: a process by which dense segment of the lower crust (and lithospheric mantle) sink into the convecting asthenosphere as a result of their negative buoyancy。从中文直译来看, 两个词的定义都没有涉及构造机制。底侵作用是强调岩浆侵入到地壳的底部, 这样的岩浆只能来自地壳之下的地幔, 成分只能是基性-超基性。拆沉强调的是下地壳及/或包括岩石圈地幔中的密度大的岩片由于负的浮力下沉并进入对流的软流圈中。下地壳中只有榴辉岩的密度可以比岩石圈地幔和软流圈地幔大, 可能引起拆沉。人们对下地壳在大陆构造中的作用知之甚少, Rudnick and Fountain (1995)推测在陆-陆碰撞造山带中由于地壳之间的流变和成分的差别足以引起拆沉, 是强调了下地壳对壳-幔作用的贡献, 同时也表明似乎拆沉仍需要外力的驱动。Kay and Kay (1993)提出引起岩石圈密度倒转而大于软流圈, 需要热、物质成分和相的转变。他们研究南 Puna 高原岩浆作用的例子, 证明与消减带有关的镁铁质岩片熔融出中性岩浆而残留榴辉岩, 并

以此解释拆沉作用的发生。这与 Gao *et al.* (2004) 提出华北北缘的兴隆沟由于有埃达克岩, 因此应残留有榴辉岩引起岩石圈的岩片下沉到软流圈之下的意见是一致的。除熔融残留的榴辉岩外, 大多数榴辉岩以地体形式出现在碰撞造山带, 榴辉岩通常不是孤立的, 而是下插岩片的不同岩石共同经历了高压-超高压变质, 因此花岗岩或大多数沉积岩经历了榴辉岩相的变质后, 其密度仍大大低于岩石圈地幔或软流圈地幔, 高压-超高压岩片整体性的拆沉没有可能。此外, 上述意见都没有证实在稳定的大陆地壳下, 存在一个榴辉岩的最下部壳层。而榴辉岩的出现应是在特殊的构造背景下, 造成地壳加厚的结果, 换言之, 生成榴辉岩以及可能因此引起拆沉作用应发生在造山带环境。

4.2 华北中生代构造转折是陆内构造体制

盆地分析和岩浆活动表明, 在华北东部不存在侏罗-白垩纪的岛弧组合, 也不存在岩浆-火山分带, 因此从 180Ma 以来华北有古太平洋俯冲记录(Isozaki, 1997)的观点还需更多的资料证实。地球物理资料显示(Zhao and Zheng, 2005), NNE 向的中生代盆岭构造在上-中部地壳表现明显, 而在中下地壳则以 EW-SN 的构造样式为主, 到地幔深度, 表现为蘑菇状不均匀结构。燕山带与华北其它中生代构造带都为上-中地壳层面的构造带, 不显示典型造山带的深部构造样式。

燕山带的构造变形是复杂的。印支造山之后, 从中侏罗世到中白垩世, 曾有多次从挤压-伸展的记录, 但是自 140 ~ 110Ma 期间, 华北总体上处于伸展构造环境下。形成近 NEE 向的山盆交替与残留的近 EW 向的南、北缘山系叠加的棋盘式格局。对于髫髻山组火山岩-土城子组红层与张家口组火山岩的不整合, 有可能是受到西伯利亚陆块与中蒙联合陆块碰撞的影响, 但也有的学者(邵济安等, 2000; 邵济安和张履桥, 2002)提出燕山地区的盆地从印支期后始终处于伸展环境下, 其间的推覆构造是沉积不同时期的构造调整。虽有争议, 但是燕山带不具传统的造山带特征, 在近年来已被越来越多的学者关注。

通过对冈底斯地块的研究, 丁林和来庆洲(2003)提出, 华北西部的高喜马拉雅及特提斯喜马拉雅地区(亚洲大陆南缘)在中生代曾经类似于南美大陆西缘的安第斯山脉。新特提斯至少在晚侏罗世已开始俯冲, ~140Ma 有地壳缩短和快速隆升的记录。在华北的北部, 通过沉积构造分析和年代学研究已经推测西伯利亚与华北-蒙古联合陆块的碰撞发生在中侏罗晚期(170 ~ 150 Ma)(Meng, 2003)。古太平洋包括 Kula (Inazaki) 板块对亚洲板块的俯冲是一个常用的模式(Hilde *et al.*, 1977; Charvet *et al.*, 1985; 胡受奚等, 1994; 赵越, 1994)。任纪舜等(1997, 1999)提出中生代的古太平洋实际上是特提斯的直接延续部分, 而西太平洋古陆是一个有限的大陆。古太平洋的封闭发生在侏罗纪并在侏罗世晚期(145 ± 5 Ma)并导致西太平洋古陆消耗殆尽。虽然这些推论未得到共识, 但是在侏罗纪的中-末期, 在华北陆块的

北、西碰撞的同时,其西部的古太平洋至少是一个限定边界,对华北陆块起着某种程度的制约作用,使当时的华北陆块受到周边各陆块的共同挤压夹击是有可能的。

由上推测华北东部的中生代构造体制转折是一个具有典型意义的陆内构造运动(翟明国等,2004; Yang *et al.*, 2004),与印支期末的古中国大陆的拼合没有直接因果关系,应综合考虑周边块体的共同作用。它是中国大陆块(华南-华北-蒙古)在侏罗纪中-晚期,与西(南)部的特提斯洋闭合、北部的西伯利亚与中国陆块的碰撞,以及东(南)部的古太平洋(?)或特提斯洋闭合共同作用下,在周围挤压后应力松弛,引发并在晚侏罗纪-早白垩纪达到高潮的深部地幔大规模隆起和地壳大规模伸展。

4.3 底侵作用与拆沉作用的讨论

(1) 华北克拉通北缘中段产出五类中生代花岗岩,从早到晚包括钙碱性和高钾钙碱性花岗岩、强过铝质淡色花岗岩、高锆花岗岩、碱质 A 型花岗岩和碱性花岗岩。南缘包括胶东,发育了从碰撞后钙碱系列壳源花岗岩质岩石和非造山的早白垩纪高 K 钙碱系列花岗岩。克拉通内部的岩浆岩如鲁西-太行山发育时段相对集中在早白垩世,而更早的时段则不发育,岩性主要是中型到碱性的侵入岩。由此可见不同地段中生代岩浆岩空间变化主要表现在克拉通边缘(南缘和北缘)与内部。换言之,不显示与(古)西太平洋俯冲带有关的分带性。在时间上,华北东部的中-新生代可大致分为三个大的演化阶段:在晚三叠世末-侏罗纪,以造山期后壳源岩浆的侵入为主,主要分布在克拉通边缘,受前中生代地质构造格局的影响较大,基本不显示幔源物质的明显加入;早白垩世:幔源+壳源+壳幔混合岩浆(显示深部物质-能量上涌和壳幔相互作用的特征),侵入岩和火山岩均发育,既有大岩基又有大量小岩体和次火山岩体,在克拉通边缘和内部均很发育,与岩石圈快速减薄、下地壳基底大规模置换密切耦合,主要受地幔深部因素的制约。晚白垩世末-第三纪:单一的大陆玄武岩来自带有软流圈特征的亏损地幔源区。

(2) 在克拉通边缘可以看到造山作用过程中下地壳拆沉对地幔成分的影响。Gao *et al.* (2004) 的拆沉模式主要是由华北北缘辽宁省境内的兴隆沟埃达克岩的研究提出的。Zhang *et al.* (2002, 2004) 对通过对华北南缘中生代含地幔岩捕虏体玄武岩、橄辉粗玄岩和基性火山岩的系统研究发现该套火山岩具有非常类似的地球化学特征,不同于大陆裂谷型火山岩,而具有岛弧火山岩的某些地球化学性质。因此,该套火山岩来源于受到过俯冲陆壳物质来源的熔体改造过的岩石圈地幔。所以华北南缘,特别是在鲁西南和胶南地区中生代岩石圈地幔受到过扬子陆壳俯冲-碰撞作用的影响。该陆壳熔体-地幔橄辉岩的相互作用是导致中生代火山岩具有岛弧型地球化学特征的主要原因(Zhang, 2005)。造山带的垮塌作用可能是诱发晚中生代岩浆活动的原因之一。

(3) 然而在华北克拉通的内部,拆沉作用的影响是难于

识别的。例如太行山(包括鲁西)中生代岩浆岩普遍具有高 Sr-Ba、高 La/Yb 和 Sr/Y 比、Eu 异常不明显和高钾钙碱性等地球化学特征。中酸性岩石的上述特征可能是来自富集地幔熔融形成的基性岩浆的混合而引起(Chen *et al.*, 2003, 2004; Chen and Zhai, 2003),因为富集地幔起源的基性岩浆具有更高的 Sr-Ba、LREE、Sr/Y 比值。而且,我们还发现,与基性岩熔融实验产生的熔体相比,太行山中酸性岩在同等 SiO₂ 条件下具有高得多的 Mg#,这也暗示幔源基性岩浆的混合在太行山岩浆岩的成因过程中是非常重要的。太行山基性岩表现出典型的 EM1 型富集地幔特征,和大别山与胶东不同。如果考虑大别山与胶东受到大别-苏鲁超高压带的俯冲碰撞有关:扬子大陆(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.708 ~ 0.718; Chen and Jahn, 1998)俯冲到地幔深度并交代地幔物质,使得本来就已经富集的岩石圈地幔更加富集,特别是 Sr 同位素;而远离该俯冲带的太行山(和燕山)地区则没有受到影响。不仅在大别山,实际上包括太行山在内的整个华北中生代基性岩均具有类似的富集同位素特征。这表明华北岩石圈地幔的富集可能与更大区域、时间上更久远的早-中元古代富集/交代事件有关(蔡剑辉等, 2002; Ren *et al.*, 2005)。

(4) 中、新生代玄武岩中下地壳捕虏体的研究以及地震剖面和岩石波速的研究,对现今下地壳提出三层结构,具有较厚的壳-幔过渡层,以及在中生代,古老下地壳的下部层位被底侵的岩浆交代和取代。在大致相当的时段内,大量高锆花岗岩从古老的基性下地壳熔出与大规模的岩浆底侵事件,都需要一个热的上涌的地幔。而古老的下部下地壳的部分熔融,是下地壳减薄的方式之一,残留物可能是榴辉岩和石榴角闪岩。它们可能会有一些因为密度大而下沉到岩石圈地幔甚至软流圈地幔,并影响地幔的成分变化。但其规模有限,不可能形成一个巨大的榴辉岩层,并拖带岩石圈地幔一起下沉到软流圈,致使华北东部的岩石圈减薄 80 ~ 120km。岩浆底侵无疑是非常重要的形式,新的下地壳的生成和对古老下地壳的置换与岩石圈的减薄具有重要联系。因此,下地壳过程是岩石圈减薄的重要参与者,进一步对华北东部中生代下地壳过程的探讨对全面了解岩石圈的减薄过程及其机理具有重要意义。

致谢 作者向未署名的本项目的成员致以诚挚的感谢,并对在不同会议和场合与作者进行讨论的国内外同行予以感谢。

References

- Bohlen S R. 1987. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. *J. Geol.*, 95: 617 ~ 632
- Bohlen S R, Mezger K. 1989. Origin of granulite terranes and the formation of the lowermost continental crust. *Science*, 244: 326 ~ 329
- Cai J H, Yan G, Mu B L, Xu B L, Shao H X, Xu R H. 2002. U-Pb

- and Sm-Nd isotopic ages and an alkaline syenite complex body in Liangtun-Kuangdonggou, Gai County, Liaoning Province, China and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 349–354 (Chinese with English abstract)
- Charvet J, Faure M, Caridroit M, Guidi A. 1985. Some tectonic and tectonic aspects of SW Japan: an Alpine-type orogen in an island-arc position. In: Nasu N, Kobayashi K, Uyeda S, Kushiro I. and Kagami H. (eds.). *Formation and Active Ocean Margins*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 791–817
- Chen B, Zhai M G, Shao J. 2003. Petrogenesis and significance of the Mesozoic North Taihang complex: Major and trace element evidence. *Science in China (D)*, 46: 941–953
- Chen B, Tian W, Zhai M G, Arikawa Y. 2005. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang Mountains and other places of the North China craton, with implications for petrogenesis and geodynamic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 13–24 (Chinese with English abstract)
- Chen S H, Zhang G H, Zhou X H. 1998. Petrological characteristics of granulite xenoliths in Hannuoba basalt, *Acta Petrologica Sinica*, 14: 366–380 (in Chinese with English abstract)
- Chen B, Zhai M G. 2003. Geochemistry of late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, north China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle. *Geol. Mag.*, 140: 87–93
- Chen B, Jahn B M, Arikawa Y, Zhai M G. 2004. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton: elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 489–501
- Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284: 101–133
- Chu X L, Sun M, Zhou M F. 2001. The Plutonium-group element geochemistry in chemical geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 112–122 (in Chinese with English abstract)
- Condie K C. 1976. Trace-element geochemistry of Archean greenstone belt. *Earth Sci. Rev.*, 12: 393–417
- Condie K C. 1981. *Archean Greenstone Belt*. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York, pp. 10–120
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere. *Nature*, 347: 662–665
- Deng J F, Mo X X, Zhao Z C, Wu Z X, Luo Z X, Su S G. 2004. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: “continental root-plume tectonics”. *Earth Sci. Rev.*, 65: 223–275
- Deng J F, Zhao H L, Mo X X. 1996. Continental Root-Mantle Tectonics in China: A Key to Continental Dynamics. Beijing, Geological Publishing House, pp. 1–97
- Ding L and Lai Q. 2003. New geological evidence of crustal thickening in the Gangdese block prior to the Indo-Asian collision. *Chinese Science Bulletin*, 48(15): 1604–1610
- Fan Q C, Zhang H F, Sui J L, Zhai M G, Sun Q, Li N. 2005. Magma underplating and Hannuoba present crust-mantle transitional zone composition: xenolith petrological and geochemical evidences. *Science in China (D)*, 35: 1–4
- Fan W M, Guo F, Wang Y J, Lin G, Zhang M. 2001. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 26: 733–746
- Fan W M, Menzies M A. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotectonica et Metallogenia*, 16: 171–179
- Fan W M, Zhang H F, Baker J, Jarvis K E, Mason P R D. 2000. Menzies M A, On and off the North China craton: where is the Archean keel? *J. Petrol.*, 41: 933–950
- Fan Q C, Liu R X, Li H M, Li N, Sui J L, Lin Z R. 1998. Zircon chronology and REE geochemistry of granulite xenolith at Hannuoba, *Chinese Science Bulletin*, 43, 18, 1510–1515 (in Chinese with English abstract)
- Fan Q C, Liu R X. 1996. The high-temperature granulite xenolith of basalt at Hannuoba, *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 41(3): 235–238
- Fan Q C, Sui J L, Liu R X, Zhou X M. 2001. Eclogite facies garnet-pyroxenite xenolith in Hannuoba area: New evidence of magma underplating, *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 17(1): 1–6
- Fan Q C, Sui J L, Zhang H F, Zhai M G, Xie H S. 2002. Experimental study on the P wave velocity in rocks from lower crust and crust-mantle transitional zone beneath the Hannuoba, *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 12(12): 925–929
- Fountain D M, Salisbury M H. 1981. Exposed cross-sections through the continental crust: implications for crustal structure, petrology and evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 56: 263
- Fountain D M, Percival J, Salisbury M H. 1990. Exposed cross-sections of the continental crust-synopsis. In: Salisbury, M. H and Fountain DM (eds.), *Exposed cross-section of the continental crust*, 653–662
- Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, McDonogh W F, Liu Y S. 2003. Removal lithospheric mantle in the North China Craton: Re_2Os isotopic evidence for coupled crust-mantle growth. *Earth Science Frontiers*, 10: 61–67 (Chinese with English abstract)
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, Zhang H F, Han Y W, Zhao Z D, Hu Y K. 1998b. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62(11): 1959–1975
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu S Y, Xu W L, Li W L, Ayers J, Wang W C, Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892–897
- Gao S, Zhang B R, Jin Z M, Kern H, Luo T C, Zhao Z D. 1998a. How mafic is the lower continental crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* 161, 101–117
- Guo F, Fan W M, Wang Y J, Lin G. 2003. Geochemistry of late Mesozoic mafic magmatism in west Shandong Province, eastern China: Characterizing the lost lithosphere mantle beneath the North China Block. *Geochemical Journal*, 37: 66–71
- Guo F, Fan W M, Wang Y J, Lin G. 2001. Late Mesozoic mafic intrusive complexes in North China Block: Constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 26: 759–771
- Guo J H, Zhai M G, Li Y C, Yan Y H. 1993. The early Precambrian Manjinggou melange zone of high-pressure granulite facies in Huai'an: its geological characteristics, petrology and isotopic chronology. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 329–341 (in Chinese with English abstract)
- Harris J W, Duncan D J, Zhang F. 1994. The physical characteristics and syngenetic inclusion geochemistry of diamonds from Pipe 50, Liaoning province, People's Republic of China. In: Meyer H O A.

- and Leonardos O H (ed) Proc 5th Int Kimb Conf Diamonds: characterisation, genesis and exploration. 106–115
- He L J, Hu S B, Wang J Y. 2001. Characteristics of thermal texture in eastern China continent. *Advances of Nature Sciences*, 11(9): 966–969
- Hilde T W C, Uyed S and Kroenke. 1977. Evolution of the western Pacific and its margin. *Tectonophysics*, 38: 146–165
- Holbrook W S, Mooney W D, Christensen N I. 1992. The seismic velocity structure of the deep continental crust. In: Fountain D M *et al* (eds.). *Continental lower crust*. Amsterdam-London-New York-Tokyo, Elsevier, 1–43
- Hu S X, Zhao Y Y, Hu Z H. 1994. Evolution and development of tectonics and magmatism at the active continental margin of the east China (E 106°) during Mesozoic and Cenozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 10(4): 370–381 (in Chinese with English abstract)
- Huang X L, Xu Y G, Chu X L, Zhang H X, Liu C Q. 2001. Geochemical comparative study of some granulite terranes and granulite xenoliths from North China Craton. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 318–328 (in Chinese)
- Huang X L, Yu Y G, Liu D Y. 2004. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths for Nushan, eastern China: implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korea craton. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68: 127–149
- Isozaki Y. 1997. Jurassic accretion tectonics of Japan. *The Island Arc*, 6: 25–51
- Kay R W, Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219: 177–189
- Kern H, Gao S and Liu Q S. 1996. Seismic properties and densities of middle and lower crustal rocks exposed along the North China geoscience transect. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 139: 439–455
- Kusky T M, Zhai M G, Windley B F. Tectonic evolution of the North China Block: from orogen to craton to orogen. *Spe. Pub. Geol. Soc. Lon.*, (in press)
- Li C D, Zhang Q, Miao L C, Meng X F. 1994. Mesozoic high-Sr, low-Y and low-Sr, Low-Y types granitoids in the northern Hebei province: Geochemistry and petrogenesis and its relation to mineralization of gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 10(4): 370–381 (in Chinese with English)
- Li J H, Zhai M G, Li Y G. 1998. Discovery of Archean high-pressure granulites in Luanping-Ceengde area, northern Hebei and its geotectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 34–41 (in Chinese with English abstract)
- Li W P, Li X H, Lu F X. 2001. Genesis and geological significance for the middle Jurassic high Sr and low Y type volcanic rocks in Fuxin area of west Liaoning, northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 523–532 (in Chinese with English abstract)
- Li X Y, Fan W M, Guo F, Wang Y J. 2004. Genesis of Donglanguo Formation potassic volcanics in Xishan, Beijing: implication for geodynamic mechanism. *Geochimica*, 33: 353–360 (in Chinese with English abstract)
- Li Z, Liu S F, Zhang J F, Wang Q C. 2003. Typical basin-fill sequences and basin migration in Yanshan, China. *Science in China (D)*, 33: 931–940
- Liang C T, X D, Song J L, Huang. 2004. Tomographic inversion of Pn travel-times in China. *J. Geophys. Res.*, 109, B11304, doi:10.1029/2003JB002789
- Liu C Q, Jia S X, Du G H. 1991. Seismological refraction shooting of Xiangshui in Jiangsu-Mandula Inner Mongolia. *Seismological Geology*, 12: 193–197
- Liu H T, Sun S H, Liu J M, Zhai M G. 2002a. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of North China craton: geochemistry and source region. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 257–274, (in Chinese with English abstract)
- Liu H T, Zhai M G, Liu J M, Sun S H. 2002b. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: evolution from post-collisional to anorogenic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 433–449 (in Chinese with English abstract)
- Liu J M, Zhang H F, Sun J G, Ye J. 2003. Geochemical research on C-O and Sr-Nd isotopes of mantle-derived rocks from Shandong Province, China. *Science in China (D)*, 33: 921–930
- Liu W, Yang J H, Li C F. 2003. Thermochronology of three major faults in Chifeng area, Inner Mongolia of China. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 717–728 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y K, Chang X. 2001. 3-D tomographic images and deep ore-control in northern margin of the North China plate. *Resource Geology*, 51: 401–406
- Liu Y S, Gao S, Yuan H L, Zhou L, Liu X M, Wang X C, Wang L S. 2004. U-Pb zircon ages and Nd, Sr and Pb isotopic of lower crustal xenoliths from North China: insights on evolution of the lower continental crust. *Chem. Geol.*, 211: 87–109
- Liu W J, Zhai M G, Li Y G. 1998. Metamorphism of the high-pressure basic granulites in Laixi, eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica* 14: 449–459 (in Chinese with English abstract)
- Lu F X, Zheng J P, Li W P, Chen M H, Chen Z H. 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in the eastern China: the "Mushroom Cloud" model. *Earth Science Frontiers*, 7: 97–117 (in Chinese)
- Ma X Y. 1989. Geological observation for southern and northern parts along the geological profile of Xiangshui, Jiangsu-Mandula, Inner Mongolia. *Journal of Earth Science*, 14: 1–6
- Ma X, Liu C G, Liu G D. 1991. Global Geoscience Transect 2: Xiangshui to Mandal, North China. *Am. Geophys. Union, Int. Lithosphere Program Pub.*, 188
- McKenzie D. 1989. Some remarks on the movement of small melt fractions in the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 95: 53–72
- Meng Q R. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China–Mongolia tract? *Tectonophysics* 369: 155–174
- Menzies M A, Fan W M, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M, *et al.* Eds, *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. Geological Society Special Publication, 76: 71–81
- Meyer H O A, Zhang A, Milledge H J *et al.* 1994. Diamonds and inclusions in diamonds from Chinese kimberlites. In: Meyer H O A. and Leonardos O H (ed) Proc 5th Int Kimb Conf 1. Diamonds: characterisation, genesis and exploration. 98–105
- Niu B G, He Z J, Song B, Ren J S. 2003. SHRIMP dating on volcanics of Zhangjiakou group and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 22: 140–141 (in Chinese with English abstract)
- 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 Universities*, 11, 9–46 (in Chinese with English abstract)
- Percival J A. 1988. A field guide to the Kapuskasing uplift, a cross-section through the Archean Superior province. In: M. H. Sallibury and D. M. Fountain (Eds.), *Exposed Cross-Sections of the Continental Crust*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp227–286
- Percival J A, Fountain D M, Salibury M H. 1992. Exposed crustal cross-sections as windows of the lower crust. In: D. M. Fountain, R. Arculus, R. W. Kay (eds.), *Continental Lower Crust*, Elsevier Sci., New York, 317–319
- Qian X L, Cui W Y, Wang S Q. 1985. Evolution of the Inner Mongolia-eastern Hebei Archean granulite belt in the North China craton. The records of geological research. Beijing: Beijing University Press, 20–29 (in Chinese)
- Ren J S, WANG Z X, CHEN B W *et al.* 1999. Tectonics of China from a global scale—a brief introduction to the tectonic map of China and adjacent areas. Beijing: Geological Press. 32–33 (in Chinese)
- Ren J S, Niu B G, Zheng J. 1997. Tectonic frame and geodynamic evolution of eastern China. *Geological Research*, (29–30): 43–55 (in Chinese with English abstract)
- Ren K X, Yan G H, Cai J H *et al.* 2005. Geochemical and Sr-Nd isotopic study of alkaline syenites in Liangtun-Kuangdonggou, Liaoning Province, China: evidence for enriched mantle before 1.86 Ga and implications. *Chinese J. Geochem.*, (in press)
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Rev. Geophys.*, 33: 267–309
- Shao J A, MOU B L, ZHANG L Q. 2000. Deep geological process and its shallow response during Mesozoic transfer of tectonic frameworks in eastern North China. *Geological Review*, 46(1): 32–39
- Shao J A, Zhang L Q. 2002. Dyke swarms in northern North China. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 312–318 (in Chinese with English abstract)
- Shen Q H, Xu H F, Zhang Z Q, Gao J F, Wu J S and Ji C L. 1992. Precambrian granulites in China. Beijing: Geological Publishing House, 116–120 (in Chinese)
- Sun W C, Li S L, Yang Y C. 1985. Preliminary research on the crust structure beneath the eastern North China. *Seismological Geology*, 7(3): 1–5 (in Chinese).
- Wang Y, Zhang Q. 2001. Composition, geochemistry and significance of Badaling granite. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 543–550 (in Chinese with English abstract)
- Wu F Y, Ge W C, Sun D Y, Guo C L. 2003. Discussion of lithospheric thinning in east China. *Earth Science Frontiers*, 10: 51–60 (in Chinese with English abstract)
- Xiao L, Rapp R P, Xu J F. 2004. The role of deep processes controls on variation of compositions of adakitic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 219–228 (in Chinese with English abstract)
- Xu W L, Wang D Y, Liu X C *et al.* 2002. Discovery of eclogite inclusion and its significance in early Jurassic intrusive complex in Xuzhou-northern Anhui, eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 47: 1212–1216
- Xu W L, Wang J H, Wang D Y, Pei F P, Gao S. 2004. Processes and mechanism of Mesozoic lithospheric thinning in eastern North China craton: evidence from Mesozoic igneous rocks and deepseated xenoliths. *Earth Science Frontiers*, 11: 309–318 (in Chinese with English abstract)
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korea craton in China: evidence, timing and mechanism. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26: 741–757
- Yang J H, Chung S L, Zhai M G, Zhou X H. 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73: 145–160
- Yu J H, Xu X S, O'Reilly S Y, Zhou X M. 2003. Granulite xenoliths from Cenozoic basalt in SE China provide geochemical fingerprints to distinguish lower crust beneath from the North China tectonic block. *Lithos*, 67: 77–102
- Zhai M G, FAN Q C. 2002. Lower crust replacement: anorogenic mantle-crust reaction. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 1–9 (in Chinese with English abstract)
- Zhai M G, YANG J H, LIU W J. 2001. Jiaodong large-scale gold deposit cluster and large-scale metallogenesis. *Science in China (D)*, 31(7): 545–552
- Zhai M G, Liu J M, Zhang H F, Liu W, Zhu R X. 2004. Time-range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern north china block. *Science in China (Series D)*, 34(2): 151–160
- Zhai M G. 2004. 2.1–1.7 Ga geological event group and its geotectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 1343–1354 (in Chinese with English abstract)
- Zhai M G. 2004. Ardekitic and related granitoid rocks from partial melting of continental crust. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 193–195 (in Chinese with English abstract)
- Zhai M G, Liu, W J. 2004. Archean-Paleoproterozoic tectonic evolution in North China craton. *J. Asian Geos.*, 24: 547–561
- Zhai M G, Liu, W J. 2003. Paleoproterozoic tectonic history of the North China craton: a review. *Precambrian Research*, 122: 183–199
- Zhai M G, Meng Q R, Liu J M, Zhang H F, Liu W, Zhu R X. 2004. Main geological characteristics and geotectonic discussion for Mesozoic tectonic inversion in eastern North China. *Earth Science Frontiers*, 11: 285–298 (in Chinese with English abstract)
- Zhai M G, Guo J H, Li J H, Yan Y H, Li Y G, Zhang W H. 1995. The discovery of Archean retrograde eclogites in the North China craton. *Chinese Science Bulletin*, 40(17): 1590–1594
- Zhai M G, Guo J H, Yan Y H, Li Y G. 1996. An oblique cross-section of Archean continental in Shanxi-Hebei-Inner Mongolia juncture area, North China craton. *Acta Petrologica Sinica*, 12(2): 222–238 (in Chinese with English abstract)
- Zhai M G, Guo J H, Yan Y H, Li Y G, Zhang W H. 1992. Discovery and preliminary study of Archean high-pressure basic granulites in North China. *Science in China (B)*, 12: 1325–1330 (in Chinese)
- Zhai M G, Guo J H, Liu W J. 2001. An oblique cross-section of Precambrian lower crust in the North China craton. *Physic. Chem. Earth (A)*, 26: 781–792
- Zhang G H, Zhou X H, Sun M, Chen S H, Feng J L. 1998. Sr-Nb-Pb isotopic characteristics of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalt, Hebei and geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 15: 190–197 (in Chinese with English abstract)
- Zhang H F, Min S, Zhou X H, Ying J F. 2005. Geochemical constraints on the origin of Mesozoic alkaline intrusive complexes from the North China Craton and tectonic implications. *Lithos*, 81: 297–317
- Zhang H F, Sun M, Zhou M F, Fan W M, Zhou X H, Zhai M G. 2004.

- Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. *Geological Magazine*, 141: 55–62
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Fan W M, Zhai M G, Yin J F. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: evidence from major, trace element, and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144: 241–253
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Zhou M F, Fan W M, Zheng J P. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67(22): 4373–4387
- Zhang H F, Sun M. 2002. Geochemistry of Mesozoic basalts and mafic dikes in southeastern North China craton, and tectonic implication. *International Geology Review*, 44: 370–382
- Zhang H F. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: a case of Sino-Korean craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 237: 768–780
- Zhang Q, Wang Y, Liu HT, Wang Y L, Li Z T. 2003. On the space-time distribution and geodynamic environments of adakites in China. *Earth Science Frontier*, 10: 385–400 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang J H, Wang Y L. 2001a. Characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 236–244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Wang Y L. 2001b. Preliminary study on the components and the lower crust in east China Plateau during Yanshanian period: constraints on Sr and Nb isotopic compositions of adakite-like rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 505–513 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qian Q, Wang E Q, Wang Y, Zhao T P, Hao J, Guo G J. 2001c. An East China plateau in middle-late Yanshanian period: implication from adakites. *Chinese J. Geol.*, 36: 248–255
- Zhang X H, Li T S, Wang H, Pu Z P. 2002. $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ thermal chronology of two ductile shear zones from Yiwulshan, West Liaoning region: Age constraints on the Mesozoic tectonic events, *Chinese Science Bulletin*, 12: 951–956
- Zhang Y N, Sun J X. 1998. Rock wave velocity types in the crust of North China and its geological implications. *Seismology and Geology*, 20(1): 73–81 (in Chinese)
- Zhao L, Zheng T Y. 2005. Using shear wave splitting measurement to investigate the upper mantle anisotropy beneath the North China Craton: Distinct variation from east to west. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L1039, doi:10.1029/2005GL022585
- Zhao Y, YANG Z Y, MA X H. 1994. Geotectonic transition from Paleosasia system and Paleotethyan system to Paleopacific active continental margin in eastern Asia. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 105–129 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Z P. 1993. Precambrian crustal evolution of the Sino-Korean Paraplatform. Beijing: Science Press, 389–390 (in Chinese)
- Zheng J P. 1999. Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning Beneath the East China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 110–112 (in Chinese with English abstract)
- Zheng J P, Griffin WL, O'Reilly SY, Lu FX. 2004. U-Pb and Hf-isotopic analyses of zircon in mafic xenolith the North China Craton. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 79–103
- Zheng J P, Lu F X, Yu C H, Tang H Y. 2004. Study of Hf and U-Pb dating and trace elements for zircon of granulite xenoliths in Hannuoba basalts: record of early crust evolution in North China. *Chinese Science Bulletin*, 49: 375–383
- Zheng J P, Sun M, Lu F X, Person, N J. 2003. Mesozoic lower crustal xenoliths and their significance in lithospheric evolution beneath the Sino-Korea. *Tectonophysics*, 361: 37–60
- Zheng J P. 2005. The U-Pb dating ages and Hf isotopic compositions of zircon from various granulitic xenoliths: the formation and reworking of the lower crust beneath the North China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24: 7–16 (in Chinese with English abstract)
- Zhi X C, Qin X. 2004. Re-Os isotope geochemistry of mantle-derived peridotite xenoliths from eastern China: constraints on the age and thinning of lithosphere mantle. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 989–998 (in Chinese with English abstract)
- Zhou X M, Yu J H, Xu X S. 1992. Discovery of granulite xenolith in Nushan basalt and its geological significance, *Chinese Science Bulletin*, 37: 1198–1201 (in Chinese)
- Zhu Z P, Zhang X K, Zhang J S, Zhang C K, Zhao J R, Gai Y J. 1997. Crust-mantle structure and velocity structure of Beijing-Huailai-Fengzhen profile. *Acta Seismologica Sinica*, 19: 499–505

附中文参考文献:

- 蔡剑辉, 阎国桢, 牟保磊, 许保良, 邵宏翔, 许荣华. 2002. 辽宁盖县梁屯-矿洞沟碱性正长杂岩体的 U-Pb 和 Sm-Nd 年龄及其意义. *岩石学报*, 18: 349–354
- 陈斌, 田伟, 翟明国, 荒川洋二. 2005. 太行山和华北其它地区中生代岩浆作用得锆石年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义. *岩石学报*, 21: 13–24
- 陈绍海, 张国辉, 周新华. 1998. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类的岩石学特征. *岩石学报*, 14: 366–380
- 储雪蕾, 孙敏, 周美夫. 2001. 化学地球动力学中的铂族元素地球化学. *岩石学报*, 17: 112–122
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学. 1996. 中国大陆根-柱构造: 大陆动力学的钥匙. 北京, 地质出版社, 1–97
- 丁林, 来庆洲. 2003. 冈底斯地壳碰撞前增厚及隆升的地质证据: 岛弧拼贴对青藏高原隆升及扩张历史的制约. *科学通报*, 48(8): 836–842
- 樊祺诚, 隋建立, 张宏福, 翟明国, 谢鸿森. 2002. 汉诺坝地区下地壳与壳-幔过渡带岩石波速实验研究. *自然科学进展*, 12(10): 1094–1097
- 樊祺诚, 刘若新. 1996. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体. *科学通报*, 41: 235–238
- 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 李霓, 隋建立, 林卓然. 1998. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土地球化学. *科学通报*, 43: 133–137
- 樊祺诚, 隋建立, 刘若新, 周新民. 2001. 汉诺坝榴辉岩相石榴辉石岩-岩浆底侵作用新证据. *岩石学报*, 17(1): 1–6
- 樊祺诚, 张宏福, 隋建立, 翟明国, 孙谦, 李霓. 2005. 岩浆底侵作用与汉诺坝现今壳-幔边界组成. *中国科学(D)*, 35: 1–14

- 高山, Rudnick RL, Carlson RW, McDonogh WF, 刘勇胜. 2003. 华北克拉通岩石圈地幔置换作用和壳幔生长耦合的 Re-Os 同位素证据. 地学前缘, 10: 61-67
- 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 李永刚, 阎月华, 张雯华. 1993. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学和同位素年代学. 岩石学报, 9: 1-13
- 何丽娟, 胡圣标, 汪集旻. 2001. 中国东部大陆地区岩石圈热结构特征. 自然科学进展, 11(9): 966-969
- 胡受冕, 赵乙英, 胡志宏等. 1994. 中国东部中-新生代活动大陆边缘构造-岩浆作用演化和发展. 岩石学报, 10(4): 370-381
- 黄小龙, 徐义刚, 储雪蕾, 张鸿祥, 刘丛强. 2001. 华北地台部分麻粒岩地体及包体的地球化学特征对比. 矿物岩石学杂志, 20: 318-328
- 李承东, 张旗, 苗来成, 孟宪峰. 2004. 冀北中生代高 Sr 低 Y 型和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其成矿作用的关系. 岩石学报, 20: 269-284
- 李江海, 翟明国, 李永刚等. 1998. 冀北滦平-承德一带晚太古代高压麻粒岩的发现及其构造地质意义. 岩石学报, 14(1): 34-41
- 李伍平, 李献华, 路凤香. 2001. 辽西中侏罗世高 Sr 低 Y 型火山岩的成因及其地质意义. 岩石学报, 17: 523-532
- 李晓勇, 范蔚茗, 郭峰, 王岳军. 2004. 北京西山东狼沟组钾质火山岩成因及其动力学机制. 地球化学, 33: 353-360
- 李忠, 刘少峰, 张金芳, 王清晨. 2003. 燕山典型盆地充填序列及迁移特征: 对中生代构造转折的响应. 中国科学(D 辑), 33: 931-940
- 刘昌铨, 嘉世旭, 杜官恒等. 1991. 江苏响水-内蒙满都拉地学断面地震折射测深结果. 地震地质, 12: 193-197
- 刘红涛, 孙世华, 刘建明, 翟明国. 2002a. 华北克拉通北缘中生代高 Sr 花岗岩类: 地球化学与源区性质. 岩石学报, 18(3): 257-274
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 2002b. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山. 岩石学报, 18: 433-449
- 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 叶杰. 2003. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和铈-钕同位素地球化学研究. 中国科学(D 辑), 33: 921-930
- 刘伟, 杨进辉, 李潮峰. 2003. 内蒙赤峰地区若干主干断裂带的构造热年代学. 岩石学报, 19(4): 717-728
- 刘文军, 翟明国, 李永刚. 1998. 胶东莱西地区高压基性麻粒岩的变质作用. 岩石学报, 14: 449-459
- 路凤香, 郑建平, 李伍平, 陈美华, 成中海. 2000. 中国东部地幔演化的主要样式: “蘑菇云”模型. 地学前缘, 7: 97-117
- 马杏垣. 1989. 江苏响水至内蒙满都拉地学断面南北两段的地质观察. 地球科学, 14: 1-6
- 牛宝贵, 和政军, 朱彪, 任纪舜. 2003. 张家口组火山岩 SHRIMP 定年及其地质意义. 地质通报, 22: 140-141
- 钱祥麟, 崔文元, 王时麒. 1985. 内蒙冀东太古界麻粒岩相带的演化. 地质论文集. 北京: 北京大学出版社, 20-29
- 任纪舜, 牛宝贵, 和政军. 1997. 中国东部的构造格局和动力演化. 地学研究, 29-30: 43-55
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚等. 1999. 从全球看中国大地构造-中国及邻区大地构造图简要说明. 北京: 地质出版社, 32-33
- 邵济安, 牟保磊, 张履桥. 2000. 华北东部中生代构造格局转换过程中的深部作用及浅部响应. 地质论评, 46(1): 32-39
- 邵济安, 张履桥. 2002. 华北北部中生代岩墙群. 岩石学报, 18: 312-318
- 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 高吉凤, 伍家善, 吉成林. 1992. 中国前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 221-223
- 孙武城, 李松林, 杨玉春. 1985. 华北东部地区地壳结构的初步研究. 地震地质, 7(3): 1-5
- 王焰, 张旗. 2001. 八达岭花岗岩的组成、地球化学特征及其意义. 岩石学报, 19: 543-550
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄的几个问题. 地学前缘, 10: 51-60
- 肖龙, Rapp RP, 许继峰. 2004. 深部过程对埃达克质岩石的制约. 岩石学报, 20: 219-228
- 许文良, 王冬艳, 王静海, 林景任, 刘晓春. 2002. 徐淮地区早侏罗世侵入杂岩中榴辉岩类包体的发现及其地质意义. 科学通报, 47: 1212-1216
- 许文良, 王静海, 王冬艳, 裴福萍, 高山. 2004. 华北克拉通东部中生代岩石圈减薄的过程与机制: 中生代火成岩和深源捕虏体证据. 地学前缘, 11: 309-318
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明. 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. 地学前缘, 11: 285-298
- 翟明国, 刘建明, 张宏福, 林伟, 朱日祥. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学(D), 33: 913-920
- 翟明国. 2004. 埃达克岩及其下地壳重熔的花岗岩类. 岩石学报, 20: 193-195
- 翟明国, 樊祺诚. 2002. 华北克拉通下地壳置换: 非造山过程的壳幔交换. 岩石学报, 18(1): 1-9
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 李永刚, 李江海, 张雯华. 1996. 太古宙克拉通型下地壳剖面: 华北怀安-丰镇-尚义-角闪岩系. 岩石学报, 12: 222-238
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 李永刚, 张雯华. 1995. 华北太古宙克拉通发现退变榴辉岩. 科学通报, 40: 1590-1594
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 李永刚, 张雯华. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及其初步研究. 中国科学(B), 12: 1325-1330
- 翟明国. 2004. 华北克拉通 21-17 亿年地质事件群的分解和构造意义探讨. 岩石学报, 20: 1343-1354
- 翟明国, 杨进辉, 刘文军. 2001. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用. 中国科学(D), 31: 545-552
- 张国辉, 周新华, 孙敏, 陈绍海, 冯家麟. 1998. 河北省汉诺坝玄武岩中的麻粒岩和辉石岩包体的 Sr, Nb, Pb 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 15: 190-197
- 张旗, 钱青, 王二七, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 2001c. 燕山中晚期的“中国东部高原”: 埃达克岩的启示. 地质科学, 36: 248-255
- 张旗, 王焰, 刘红涛, 王元龙, 李之彤. 2003. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景. 附: 国内关于埃达克岩的争论. 地学前缘, 10: 385-400
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001a. 中国东部中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报, 17: 236-244

- 张旗, 王焰, 王元龙. 2001b. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约. 岩石学报, 17: 505 - 513
- 张晓晖, 李铁胜, 王辉, 蒲志平. 2002. 内蒙古赤峰娄子店-大城子韧性剪切带的 $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ 年龄及其构造意义. 科学通报, 12: 951 - 956
- 张友南, 孙君秀. 1998. 华北地壳岩石的波速类型及其地质意义. 地震地质, 20: 73 - 81
- 赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, 29: 105 - 119
- 赵宗溥等著. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化, 北京, 科学出版社, 389 - 39
- 郑建平. 2005. 捕虏体麻粒岩锆石 U-Pb 年龄和铅同位素: 华北地块下地壳的形成与再造. 岩石矿物地球化学通报, 24: 7 - 16
- 郑建平, 路凤香, 余淳梅, 汤华云. 2004. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体锆石 Hf 同位素、U-Pb 定年和微量元素研究: 华北下地壳早期演化的记录. 科学通报, 49: 375 - 383
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用和中新生代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社, 110 - 112
- 支霞臣, 秦协. 2004. 中国东部地幔橄榄岩捕虏体的 Re-Os 同位素地球化学: 岩石圈地幔的形成年龄和减薄作用制约. 岩石学报, 20: 989 - 998
- 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及其地质意义. 科学通报, 37: 1198 - 1201
- 祝治平, 张先康, 张建狮, 张成科, 赵金仁, 盖玉杰. 1997. 北京-怀来-丰镇剖面地壳上地幔构造与速度结构图. 地震学报, 19: 499 - 505

www.cnki.net