

太行山重力梯度带的形成与华北岩石圈减薄的时空差异性有关

徐义刚

中国科学院同位素年代学和地球化学重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

摘要: 通过对比华北太行山重力梯度带两侧新生代玄武岩及其中幔源包体的成分, 发现: (1) 华北东、西部新生代玄武岩具有相反的演化趋势, 说明新生代以来西部岩石圈逐渐减薄, 而东部岩石圈逐渐加厚; (2) 西部岩石圈地幔组成相对复杂, 年龄多为晚太古代—元古代; 而东部岩石圈地幔组成相对单一, 年龄多为现代值, 少数为元古代; (3) 西部壳幔过渡带较厚而东部较薄, 反映两地不同的岩浆底侵作用程度。华北岩石圈组成的空间不均一性可能与岩石圈减薄过程的时空差异有关。岩相古地理分析说明太行山重力梯度带的雏形形成于早白垩世, 与华北中生代岩浆活动的高峰相吻合。由于岩浆作用与岩石圈减薄作用密切相关, 因此认为华北岩石圈减薄的时空不均一性是形成太行山重力梯度带的重要机制。

关键词: 重力梯度带; 岩石圈减薄; 华北克拉通。

中图分类号: P588.14

文章编号: 1000-2383(2006)01-0014-09

收稿日期: 2005-10-08

Formation of the Taihangshan Gravity Lineament by the Diachronous Lithospheric Thinning of the North China Craton

XU Yi-gang

Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: The comparison of Cenozoic basalts and their mantle xenoliths from both sides of the Taihangshan gravity lineament reveals that: (1) Cenozoic basalts from western and eastern North China display opposite temporal trends, suggesting lithospheric thinning in western North China during the Cenozoic and lithospheric thickening in eastern North China; (2) The lithospheric mantle in the west is mostly Late-Archean to Proterozoic in age, whereas that in the east has a modern age with minor Proterozoic age; (3) The crust-mantle transition in the west is considerably thicker than in the east, probably due to different extents of magmatic underplating. The spatial heterogeneity of the lithospheric mantle beneath North China may have resulted from the diachronous thinning processes. Paleogeographic data suggest the first occurrence of the Taihangshan gravity lineament was initially formed during the Early Cretaceous, which is coeval with the peak of Mesozoic magmatism in this region. Given the fact that Mesozoic magmatism was closely related to the lithospheric thinning, it is proposed that the diachronous lithospheric thinning is the main mechanism by which the Taihangshan gravity lineament was formed.

Key words: gravity lineament; lithospheric thinning; North China craton.

0 引言

大兴安岭—太行山重力梯度是华北克拉通最显著的地质特征之一。该带东、西两侧在地貌、地壳厚

度、岩石圈厚度、大地热流值均存在明显的差异(图 1a)。例如, 东部地块的岩石圈较薄(<80 km), 地温梯度高, 地表热流值高; 西部岩石圈厚度大(100~150 km), 地温梯度低, 地表热流值低。前者

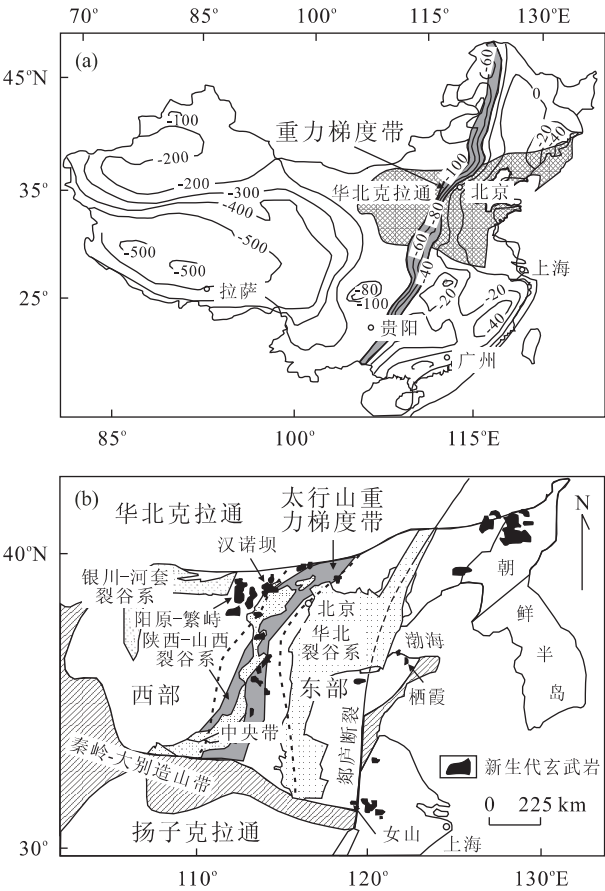


图 1 (a)中国大陆布格重力异常图和(b)华北克拉通构造简图和新生代裂谷系分布

Fig. 1 (a) Bouguer gravity map of China showing Daxing'anling-Taihangshan gravity lineament; (b) Simplified map showing distribution of Cenozoic rifting systems and tectonic division in the North China craton

图 a 据 Ma(1989)修改,阴影部分显示了重力梯度带的位置;图 b 据 Xu(2002)修改,2 条虚线分别代表了 Zhao *et al.* (2001)划分的华北克拉通中央带的西界和东界

中—新生代岩浆作用较为发育,且主要受北北东向的郯庐断裂和中—新生代断陷盆地控制(Ren *et al.*, 2002).而西部岩浆活动相对较少,拉张盆地主要形成于新生代.这些差异使得太行山重力梯度带成为划分华北克拉通东西部的主要地质界线(Ye *et al.*, 1987; Ma, 1989).此外,另有 2 个现象值得重视:(1) Zhao *et al.* (2001)把华北克拉通划分为 3 块:东部地块、西部地块和中部带(图 1b),“中央带”的形成与西部地块和东部地块在元古代时的碰撞拼合有关.太行山重力梯度带刚好落在中部带这一岩石圈薄弱带内.(2)全球地震层析揭示在中国东部大陆下的地幔过渡带内有一水平分布的高速体,可能

代表了俯冲太平洋板块(Fukao *et al.*, 1992; Zhao, 2004).有意思的是,最新的高分辨率地震层析结果显示在地幔过渡带内俯冲太平洋板块的前缘位置大致与太行山相对应(Pei *et al.*, 2004).迄今为止,在太行山重力梯度带以西地区还没有发现地震波高速体.

虽然前人早就意识到南北重力梯度带的重要地质意义,但对该带是如何和何时形成的一直缺乏深入的研究.考虑到重力梯度带两侧深部岩石圈性质的差异(Griffin *et al.*, 1998; Menzies and Xu, 1998; Xu *et al.*, 2004a),这些问题的答案可能在于对这一地区深部地质过程的理解.研究表明华北克拉通东部下岩石圈由古生代时 200 km 厚的亏损型地幔转变为新生代时 80 km 厚的饱满型地幔(Fan and Menzies, 1992; Menzies *et al.*, 1993; 邓晋福等,1994; Griffin *et al.*, 1998; Menzies and Xu, 1998; 吴福元和孙德有,1999; 郑建平,1999; Fan *et al.*, 2000; Xu, 2001).华北岩石圈减薄作用对浅部地质演化也有极其深远的影响.本文的目的是在对比重力梯度带两侧岩石圈性质、壳幔结构以及岩相古地理资料的基础上,将重力梯度带的形成与华北岩石圈减薄作用的时空差异性(徐义刚,2004; Xu *et al.*, 2004a)联系起来,并结合地质和地球物理资料,限定重力梯度带的形成时代,尝试提出其形成模式.需要指出的是,本文的结论是初步的,尚需在后续工作中不断加以论证.

1 华北克拉通岩石圈减薄作用的时空差异性

1.1 华北克拉通岩石圈伸展的时空差异性

大陆裂谷系和拉张性盆地在华北克拉通东部有广泛的分布,具体表现为一系列 NNE 向、平行于大陆边缘的断裂和张性断陷.它们大多形成于白垩纪和新生代早期(Ren *et al.*, 2002),至新生代晚期进入热沉降期和衰退期.例如, Hu *et al.* (2001)通过热模拟发现渤海盆地的热流值自中新世的 75~90 mW/m²逐渐减低至现在的 55~65 mW/m².中生代盆地主要集中在重力梯度带以东地区.在重力梯度带以西地区,地壳伸展程度相对较小,只有 2 个第三系盆地,即银川—河套地堑和山西地堑(图 1b).由此可见,华北东部岩石圈的伸展早于西部,而且西部盆地的展布方向与东部不同,反映 2 个

地区的岩石圈伸展可能受不同的构造域控制(Ye *et al.*, 1987). 东部的拉张与太平洋板块俯冲引起的弧后扩张有关,而后者则与印度—欧亚碰撞引起的引力传递有关(Ye *et al.*, 1987; Liu *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2004a).

1.2 重力梯度带两侧新生代基性岩浆性质的对比

考虑到大陆岩浆演化与岩石圈厚度的变化密切相关(徐义刚,1999a; DePaolo and Delay, 2000),对重力梯度带东、西两侧新生代玄武岩的演化趋势进行了初步对比. 在西部(山西地堑),渐新世岩浆活动以含幔源包体的碱性玄武岩为特征,而到了中新世—第四纪碱性玄武岩和拉斑玄武岩共生(徐义刚, 2004; Xu *et al.*, 2004a). 实验岩石学揭示碱性玄武岩的形成深度大于拉斑玄武岩(Falloon *et al.*, 1988; Kushiro 2001),而 Sr-Nd 同位素和微量元素特征暗示这些岩浆主要来自于软流圈地幔,因此玄武岩的这一演化趋势可以解释为华北西部岩石圈不断减薄的结果. 与此相反,华北东部老第三纪多为拉斑和弱碱质玄武岩,不含包体;而新第三纪和第四纪玄武岩岩性变成以碱性和强碱性为主,这暗示该地区新生代以来

岩石圈逐渐加厚(徐义刚,1999b; Xu, 2001).

华北东西部岩石圈不同的演化历史预测西部岩石圈地幔为古老地幔残余,而东部则是古老地幔和新增生地幔的混合(徐义刚,2004; Xu *et al.*, 2004a). 这一预测可以通过研究碱性玄武岩中携带的超基性岩包体这些岩石圈地幔的直接样品来检验.

1.3 重力梯度带两侧华北岩石圈地幔和壳幔过渡带性质的差异

1.3.1 橄榄岩包体 图 2a 总结了华北新生代火山岩中 106 个橄榄岩包体样品的 Nd 同位素数据. 尽管华北东、西部的包体以亏损地幔特征为主,但仍然在某些方面显示出不同. 例如,除少数例外,华北东部样品的 ϵ_{Nd} 主要在 0~12 之间,与大洋玄武岩的 ϵ_{Nd} 范围大致相同(图 2a). 而华北西部样品的 ϵ_{Nd} 变化范围大($\epsilon_{Nd} = -16 \sim +26$),其中 ϵ_{Nd} 值最低的样品来自于河北阳原和山西繁峙,具有 EM I 型的同位素特征,与南非克拉通部分样品的同位素组成(Richardson *et al.*, 1984)十分相似,暗示古老的岩石圈地幔在华北西部的存在. 值得一提的是,这种 EM I 型同位素组成在重力梯度带东侧的地幔包体

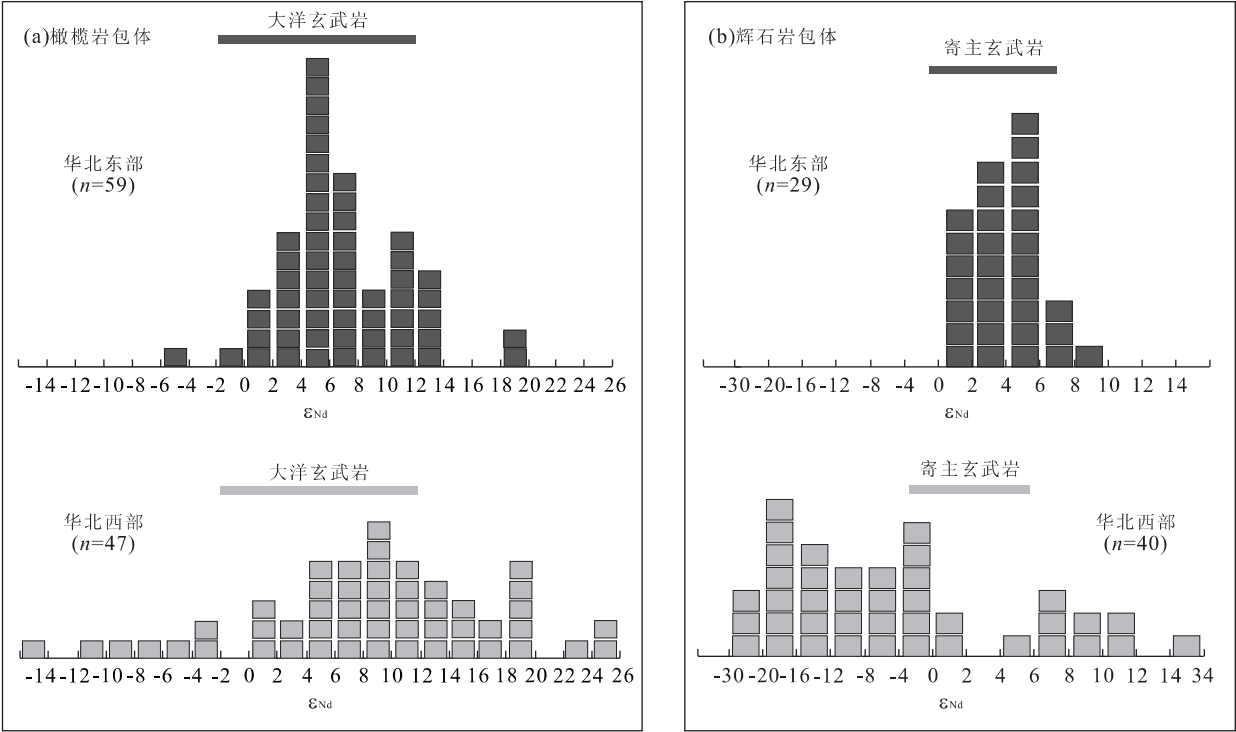


图 2 华北东部和西部新生代玄武岩中包体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值柱状图

Fig. 2 Histogram of ϵ_{Nd} of basalt-borne xenoliths from the western and eastern North China craton

数据来源: Song and Frey (1989); Tatsumoto *et al.* (1992); Fan *et al.* (2000); Xu *et al.* (1998); Xu (2002); Xu and Bodinier (2004); Rudnick *et al.* (2004); Xu *et al.* (2003); 刘讲峰和徐义刚(待刊). 大洋玄武岩的 ϵ_{Nd} 范围据 Hofmann (2003)

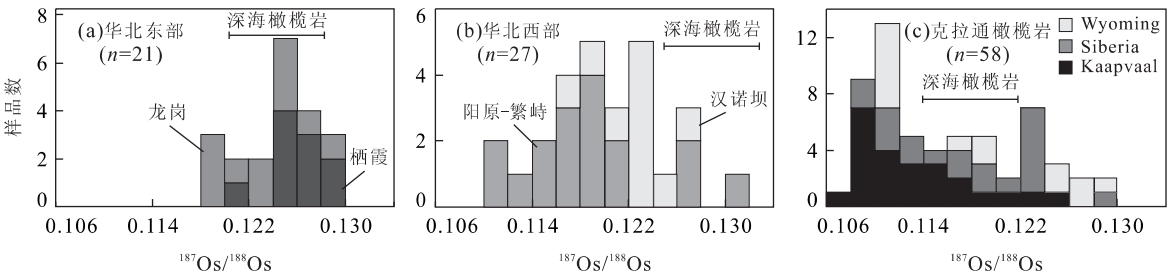


图 3 华北新生代玄武岩及典型克拉通幔源包体的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 柱状图

Fig. 3 Comparison of ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os of basalt-borne xenoliths from (a) western and (b) eastern North China craton with (c) those of typical cratonic peridotites
数据来源:华北据 Gao *et al.* (2002); Wu *et al.* (2003); Xu *et al.* (unpublished). 典型克拉通据 Pearson *et al.* (1995a, 1995b); Carlson *et al.* (2004). 深海橄榄岩据 Snow and Reisberg (1995)

中至今未有发现.

Re-Os 同位素分析也显示重力梯度带两侧岩石圈地幔可能形成于不同时代. 例如, Gao *et al.* (2002) 的 Re-Os 同位素研究表明位于华北西部的汉诺坝橄榄岩包体的年龄为元古代, 而位于华北东部的栖霞橄榄岩包体具有现代年龄值. 如果将所研究样品的 Os 同位素比值直接与典型克拉通样品进行对比 (图 3), 可以发现, 东部橄榄岩样品的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 范围较窄 (0.118~0.128), 而且多数样品的 Os 同位素组成与深海橄榄岩的范围 (Snow and Reisberg, 1995) 相重叠 (图 3a). 相反, 西部橄榄岩样品的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 范围相对较宽 (0.110~0.130), 而且更趋向于低 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 值一端, 其中有半数以上的样品的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os < 0.12 (图 3b). 如此低的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 只有在产于南非 Kaapvaal、西伯利亚和北美的怀俄明等太古代克拉通的橄榄岩包体有发现 (图 3c), 说明华北西部应有晚太古代岩石圈地幔的存在. 有少于 1/4 的西部样品的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 值与深海橄榄岩相似. 由此可见, 华北西部的岩石圈地幔的 Os 同位素组成较为复杂. 不过汉诺坝位于中央带的内部, 该带岩石圈在元古代时因华北东、西块体的碰撞而加厚 (Zhao *et al.*, 2001). 加厚岩石圈的随后垮塌导致软流圈上涌和岩石圈地幔形成, 这可以解释汉诺坝橄榄岩中观察到的中元古代模式年龄 (Gao *et al.*, 2002). ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os < 0.116 的样品主要来自位于中央带以西的阳原和繁峙, 显然这一地区的岩石圈地幔并未受中元古代时中央带下岩石圈活化的影响.

总体而言, 华北西部岩石圈地幔形成年龄较老, 部分受到了中元古时岩石圈活化的影响. 与此相反, 华北东部岩石圈地幔形成时代相对较新, 但局部存

在古老地幔的可能性还是存在的 (Zhi *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2003).

1.3.2 辉石岩包体 重力梯度带两侧辉石岩同位素成分也有明显的差异. 东侧辉石岩包体的 ϵ_{Nd} 值变化于 0~8 之间, 多数介于 1.5~5 之间, 与新生代寄主玄武岩的成分重叠, 暗示两者之间的成因联系. 这些辉石岩多数富集 LREE, 如果形成时代很老, 低 Sm/Nd 比值会转换为负 ϵ_{Nd} 值, 与总体上亏损同位素组成不符. 这说明重力梯度带东侧辉石岩的形成时代较为年轻, 与该区岩石圈地幔主体上为新增生地幔的背景相一致 (Xu *et al.*, 2004a). 重力梯度西侧辉石岩包体显示了极其不均一的同位素组成, ϵ_{Nd} 值变化于 -27~+34 之间, 其中 70% 以上的样品具有负 ϵ_{Nd} 值. 即使 ϵ_{Nd} 为正值的样品, 其 ϵ_{Nd} 值多数 > 6, 高于东侧辉石岩包体的 ϵ_{Nd} 变化范围, 最高达 +34. 西侧辉石岩包体的不均一同位素组成远远超出了寄主玄武岩的成分范围, 说明多数西侧辉石岩的形成与新生代岩浆事件无关. 究竟这种极端富集和亏损的同位素组成是古老地幔富集和亏损事件的表征, 还是辉石岩母岩浆源区的特征或是壳—幔相互作用的结果尚需要做出判断. 如果这些辉石岩形成时代较老, 能保存到新生代说明该区岩石圈的形成时代也较老而且较稳定. 如果这些辉石岩形成时代较新, 那么其同位素特征很可能直接继承了源区—富集岩石圈地幔的特征. 像阳原辉石岩样品显示了 EM I 型同位素特征 (刘讲峰和徐义刚, 待刊), 而 EM I 型同位素的形成需要较长的演化历史 (Zindler and Hart, 1986), 这同样说明该区岩石圈可能具有较老的形成时代.

1.3.3 壳幔过渡带 位于华北东部的女山和西部的汉诺坝是华北克拉通内部仅有的 2 个含有石榴石

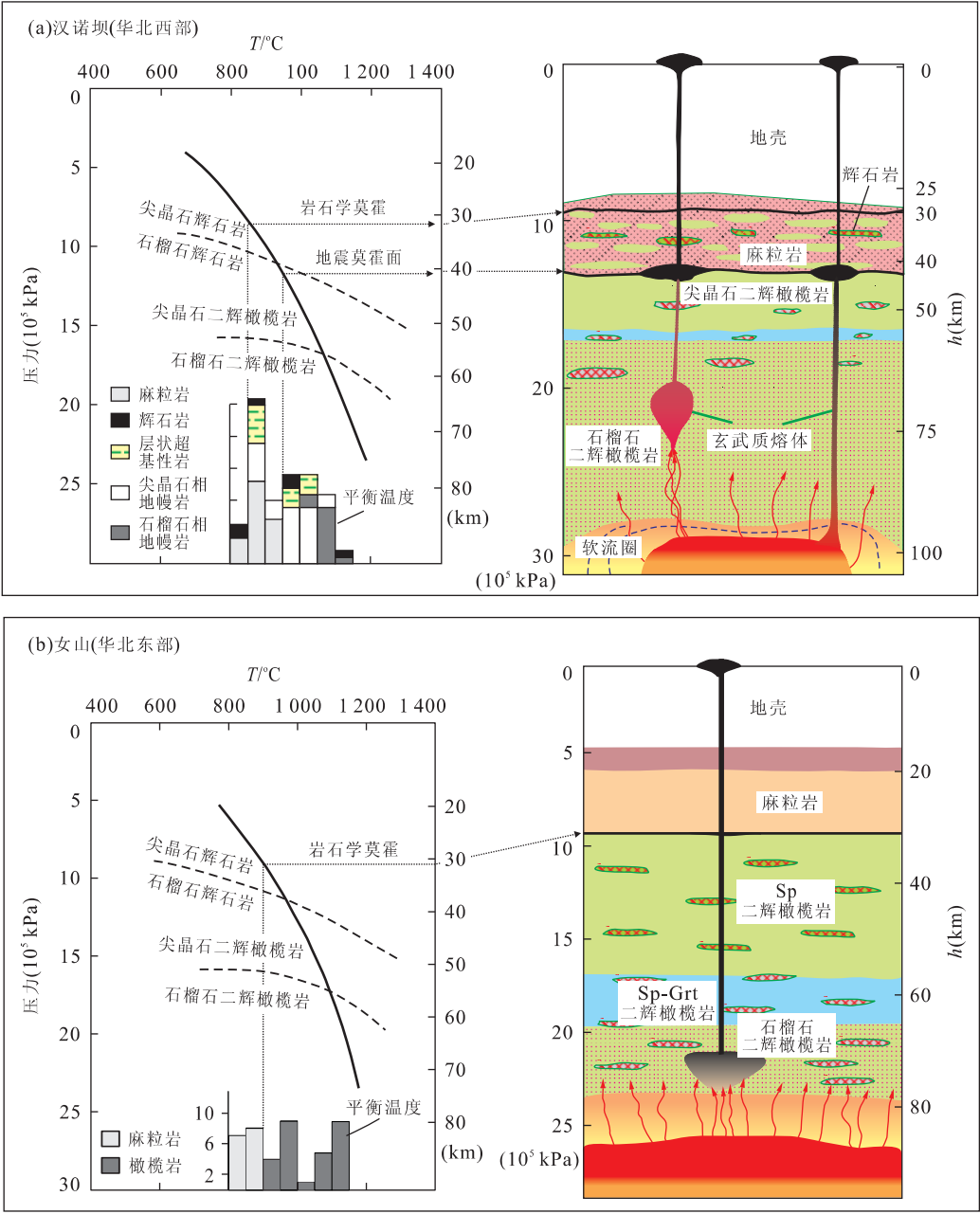


图 4 华北东、西部岩石圈热梯度和壳幔过渡带性质对比

Fig. 4 Comparison of xenolith-derived geotherm and crust-mantle transition at (a) Hannuoba (western North China craton) and (b) Nüshan (eastern North China craton)

数据来源: Xu *et al.* (1998); Chen *et al.* (2001); Liu *et al.* (2001); Huang *et al.* (2004)

相辉石岩和麻粒岩包体的产地(图 1b). 这样宝贵的岩石样品提供了有关岩石圈热状态和壳幔过渡带的重要信息. 由图 4 可知, 汉诺坝地区的下地壳有一 3~5 km 的高速层, 可能由辉石岩和橄榄岩组成 (Chen *et al.* , 2001), 岩石学莫霍面的深度为 32 km, 远远小于地震莫霍面 (42 km). 暗示该地区有一 10 km 厚的壳幔过渡带. 相反, 在女山地区, 岩

石学莫霍面和地震莫霍面相吻合, 暗示该地区壳幔过渡带不明显. 造成华北东、西部壳幔过渡带的差异的原因在于两地中生代岩浆底侵程度的差异 (Huang *et al.* , 2004). 汉诺坝地区的岩浆底侵作用较为强烈, 虽然辉石岩和麻粒岩的成因复杂 (Liu *et al.* , 2001; Xu, 2002; Zhou *et al.* , 2002), 但年代学研究表明岩浆底侵作用的时间为晚中生代 (Fan

et al., 1998),与华北广泛存在的岩石圈减薄作用在时间上吻合(Griffin *et al.*, 1998; Xu, 2001). 相反,年代学研究表明女山地区的麻粒岩的年龄为元古代,说明该地区下地壳由古老克拉通基底组成,岩浆底侵作用不明显. 两地岩浆底侵作用程度的差异与两地拉张程度相对应.

1.4 华北岩石圈减薄的时空差异性

由以上讨论可知,华北东、西部岩石圈有不同的演化历史. 华北东部岩石圈减薄作用主要发生在晚中生代,而新生代以来岩石圈逐渐加厚,可能与拉张衰退期上地幔热散失有关(Menzies and Xu, 1998; Xu, 2001). 华北西部岩石圈减薄作用主要发生在新生代. 因此,华北岩石圈减薄在时空上是不均一的,可能与东西两侧不一致的地壳拉张历史有关. 东部的拉张早于西部,前者与太平洋板块的俯冲有关,而后者则与印度—欧亚碰撞有关(Ye *et al.*, 1987).

2 讨论

2.1 太行山重力梯度带的形成时代

岩相古地理资料显示,早白垩世时华北克拉通的中部为华北高地,而西侧是鄂尔多斯盆地(图 5a). 到早白垩晚期,该区的岩相古地理特征发生了显著的变化,华北克拉通东部的大部分地区被华北盆地所占据,该盆地的西侧为古太行山脉,再往西,原来的鄂尔多斯盆地倒转变成陕—晋高地(图 5b). 值得一提的是,早白垩世末华北西高东低的地形格局与现今的地貌特征十分相似. 古太行山与现今重力梯度带的位置重叠,这些均充分说明重力梯度带的雏形形成于早白垩世. 更为重要的是,早

白垩世同时也是华北中生代岩浆活动的高峰(Yang *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2004b; Wu *et al.*, 2005),代表了华北岩石圈减薄作用的一个重要时期(Griffin *et al.*, 1998; Xu, 2001). 因此岩相古地理资料和岩浆活动的年龄数据暗示太行山重力梯度带的形成与华北岩石圈减薄作用有关.

2.2 太行山重力梯度带的形成模式

华北岩石圈减薄作用具有穿时的特点. 重力梯度带东侧岩石圈减薄早于西部,这可能与东西两侧不一致的地壳拉张历史有关,反映了太平洋俯冲与印度—欧亚碰撞两大构造域之间相互作用的结果. 东部的岩石圈由 200 km 减薄到 80~100 km,减薄作用发生于晚中生代. 大规模的岩石圈减薄(导致厚度>100 km 古老克拉通根的丢失)和软流圈上涌导致了地壳伸展和沉降,形成地势平缓的华北平原. 相反,西部岩石圈减薄发生于新生代(Xu *et al.*, 2004a),减薄量也较小. 因此在早白垩世时华北东、西部岩石圈在厚度和热状态上存在巨大的差异,这可能是重力参数在短距离内发生巨大变化的原因所在,而东、西两地块之间的过渡带就是重力梯度带.

还有一个需要回答的问题是为什么重力梯度带出现在现在的位置,而不是其他地方. 我们认为这可能与以下 2 点有关:(1)在地幔过渡带的太平洋俯冲板片的前峰对应的地表位置未超过大兴安岭—太行山重力梯度带(Pei *et al.*, 2004),因此重力梯度带东侧岩石圈的减薄可能与太平洋板块俯冲引起的地幔对流的加强有关. 地幔对流体系的西界可能受控于俯冲板片的前峰位置,因此俯冲板片上部岩石圈受地幔对流的影响要大于俯冲板片以西地区. 如前所述,西侧岩石圈减薄与新生代印度—欧亚碰撞引

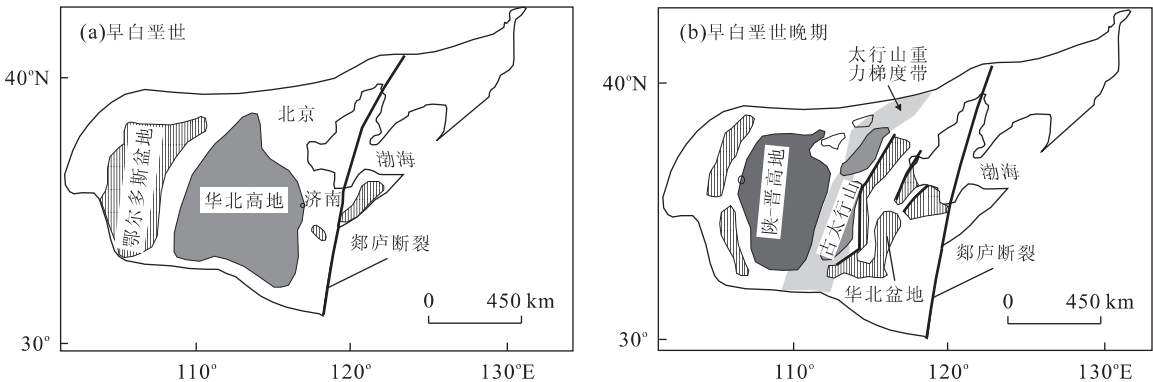


图 5 华北克拉通早白垩世岩相古地理(据 Wang(1985)修改)
Fig. 5 Paleogeography during Early Cretaceous in North China craton

起的应力传递和再分配有关(Ye *et al.*, 1987; Liu *et al.*, 2004). (2)重力梯度带的形成位置也可能受控于华北克拉通“中央带”. 形成于东西部板块相互碰撞的中央带以及郯庐断裂是华北克拉通内部的岩石圈薄弱带, 这些薄弱带是地幔流最集中的地方(Tommasi and Vauchez, 2001). 这可能是华北盆地为郯庐断裂和太行山所夹的原因.

重力梯度带的形成位置也可能是上述 2 个因素综合作用的结果, 但目前还难以对 2 种模式的相对贡献做出判断. 如果第一种因素起主导作用, 也就是重力梯度带的位置与俯冲板片的前锋相对应, 考虑到在地幔过渡带的俯冲板片到达目前的位置有一过程, 那么可以想象重力梯度带可能有一自东向西漂移的过程, 从这个意义上说, 重力梯度带具有短暂(transient)和过渡的性质. 当然, 这个猜测尚需通过详细的岩相古地理和岩浆作用研究来加以验证.

3 主要结论

(1)太行山重力梯度带是华北克拉通最显著地质特征之一. 该带东、西两侧在地貌、大地热流值、地壳厚度、岩石圈厚度均存在明显的差异. 该带落在华北克拉通中央带内, 而且在地幔过渡带内呈水平分布的俯冲太平洋板块的前缘位置大致与太行山相对应. 这一系列从深部到浅部地质特征的耦合, 暗示重力梯度带的形成与深部过程有关.

(2)华北东、西部新生代玄武岩具有相反的演化趋势, 说明新生代以来西部岩石圈逐渐减薄, 而东部岩石圈逐渐加厚. 因此, 华北岩石圈减薄过程在时空上是不均一的, 可能与东西两侧不一致的地壳拉张有关.

(3)幔源包体的同位素组成表明重力梯度带两侧岩石圈具有不同的成分. 西部岩石圈地幔年龄较老(晚太古代—元古代), 而东部岩石圈的年龄较新(主要为现代年龄, 少量为元古代), 这不仅证实了根据玄武岩岩浆演化所作出的预测, 而且说明重力梯度带可能不仅仅是一条物理带, 同时也是一条成分隔带.

(4)岩相古地理资料暗示太行山重力梯度带形成于早白垩世, 这与华北地区中生代岩浆活动的高峰相吻合, 暗示其形成与华北岩石圈减薄作用在时间上的一致性. 华北岩石圈减薄过程的时空差异性 是重力梯度带形成的主要机制. 早白垩世时华北东

西两侧岩石圈在厚度和热状态上的差异可能是重力参数在短距离内发生巨大变化的原因所在.

(5)重力梯度带所处的位置不是随机的, 而是受控于华北克拉通内部古老岩石圈薄弱带和太平洋俯冲板片前锋位置的综合作用.

References

- Carlson, R. W., Irving, A. J., Schulze, D. J., et al., 2004. Timing of Precambrian melt depletion and Phanerozoic refertilization events in the lithospheric mantle of the Wyoming craton and adjacent central plains orogen. *Lithos*, 77: 453—472.
- 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 xenolith. *Lithos*, 56: 267—301.
- Deng, J. F., Mo, X. X., Zhao, H. L., et al., 1994. Lithosphere root and de-rooting and activation of eastern China continent. *Geoscience*, 8: 349—356 (in Chinese with English abstract).
- DePaolo, D. J., Daley, E. E., 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension. *Chem. Geol.*, 169: 157—185.
- Falloon, T. J., Green, D. H., Harton, C. J., et al., 1988. Anhydrous partial melting of a fertile and depleted peridotite from 2 to 30 kb and application to basalt petrogenesis. *J. Petrol.*, 29: 1257—1282.
- Fan, Q. C., Liu, R. X., Li, H. M., et al., 1998. Zircon chronology and REE geochemistry of granulite xenoliths at Hannuoba. *Chinese Sci. Bull.*, 43: 1510—1515.
- Fan, W. M., Menzies, M. A., 1992. Destruction of aged lower lithosphere accretion of asthenospheric mantle beneath eastern China. *Geotectonica et 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 Archaean keel? *J. Petrol.*, 41: 933—950.
- Fukao, Y., Obayashi, M., Inoue, H., et al., 1992. Subducting slab stagnant in the mantle transition zone. *J. Geophys. Res.*, 97: 4809—4822.
- 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. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 198: 307—322.
- Griffin, W. L., Zhang, A. D., O'Reilly, S. Y., et al., 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the

- Sino-Korean craton. In: Flower, M., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., *Mantle dynamics and plate interactions in east Asia. Am. Geophys. Union Geodyn. Ser.*, 27:107—126.
- Hofmann, A. W., 2003. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: Isotopes and trace elements. In: Holland, H. D., Turekin, K. K., eds., *Treatise of geochemistry*, 2. Elsevier-Pergamon, Oxford, 61—101.
- Hu, S. B., O'Sullivan, P. B., Raza, A., et al., 2001. Thermal history and tectonic subsidence of the Bohai basin, northern China: A Cenozoic rifted and local pull-apart basin. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 126:221—235.
- Huang, X. L., Xu, Y. G., Liu, D. Y., 2004. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nushan, eastern China: Implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korean craton. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68:127—149.
- Kushiro, I., 2001. Partial melting experiments on peridotite and origin of mid-ocean ridge basalt. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 29:71—107.
- Liu, J. F., Xu, Y. G., 2005. Mineral chemistry and geochemistry of the two suites of pyroxenite xenoliths in Cenozoic basalts from Yangyuan. *Geotectonica et Metallogenia* (in press) (in Chinese with English abstract).
- Liu, M., Cui, X., Liu, F., 2004. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: A mantle dynamic link to the Indo-Asian collision. *Tectonophysics*, 393:29—42.
- Liu, Y. S., Gao, S., Jin, S. Y., et al., 2001. Geochemistry of lower crustal xenoliths from Neogene Hannuoba basalt, North China craton: Implication for petrogenesis and lower crustal composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65:2589—2604.
- Ma, X. Y., 1989. Lithospheric dynamics map of China and adjacent seas (1 : 4 000 000) and explanatory notes. Geological Publishing House, Beijing.
- 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: Pridmore, H. M., Alabaster, T., Harris, N. B. W., et al., eds., *Magmatic processes and plate tectonics. Geol. Soc. Spel. Pub.*, 76:71—78.
- Menzies, M. A., Xu, Y. G., 1998. Geodynamics of the North China craton. In: Flower, M., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. Am. Geophys. Union Geodyn. Ser.*, 27:155—165.
- Pearson, D. G., Carlson, R. W., Shirey, S. B., et al., 1995a. Stabilization of Archean lithospheric mantle: A Re-Os isotope study of peridotite xenoliths from the Kaapvaal craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 134:341—357.
- Pearson, D. G., Shirey, S. B., Carlson, R. W., et al., 1995b. Re-Os, Sm-Nd and Rb-Sr isotope evidence for thick Archean lithospheric mantle beneath the Siberian craton modified by multistage metasomatism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59:959—978.
- Pei, S., Chen, Y. J., Zhao, D., et al., 2004. Tomographic structure of East Asia: Data and results. AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Ren, J., Tamaki, K., Li, S., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344:175—205.
- Richardson, S. H., Gurney, J. J., Erlank, A. J., et al., 1984. Origin of diamonds in old enriched mantle. *Nature*, 310:198—202.
- Rudnick, R. L., Gao, S., Ling, W. L., et al., 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton. *Lithos*, 77:609—637.
- Snow, J. E., Reisberg, L., 1995. Os isotopic systematics of altered abyssal peridotites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 135:411—421.
- Song, Y., Frey, F. A., 1989. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalt from Hannuoba, eastern China: Implications for subcontinental mantle heterogeneity. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53:97—113.
- Tatsumoto, M., Basu, A. R., Huang, W. K., et al., 1992. Sr, Nd and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of eastern China: Enriched components EM I and EM II in subcontinental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 113:107—128.
- Tommasi, A., Vauchez, A., 2001. Continental rifting parallel to ancient collisional belts: An effect of the mechanical anisotropy of the lithospheric mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 185:199—210.
- Wang, H., 1985. Atlas of the Paleogeography of China. Cartographic Publishing House, Beijing, 143.
- 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. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233:103—119.
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China. *J. Changchun Univ. Sci. Tec.*, 29:213—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, *Chem. Geol.*, 196; 107—129.
- Xu, Y. G., Bodinier, J. L., 2004. Contrasting enrichments in high and low temperature xenoliths from Nushan, eastern China: Results of a single metasomatic event during lithospheric accretion? *J. Petrol.*, 45; 321—341.
- Xu, X. S., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 1998. The nature of the Cenozoic lithosphere at Hushan, central eastern China. In: Flower, M., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. AGU Geodynamics Series*, 27; 167—196.
- Xu, Y. G., 1999a. Thermo-mechanic and chemical erosion of the lithosphere and lithospheric thinning. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 18; 1—5 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., 1999b. Continental basaltic magmatism in extensional setting: Nature and dynamic processes. In: Zheng, Y. F., ed., *Advances in chemical geodynamics*. Science Press, Beijing, 119—167 (in Chinese).
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath eastern China: Evidence, timing and mechanism. *Phys. Chem. Earth*, (A) 26; 747—757.
- Xu, Y. G., 2002. Evidence for crustal components in the mantle and constraints on crustal recycling mechanisms: Pyroxenite xenoliths from Hannuoba, North China. *Chem. Geol.*, 182; 301—322.
- Xu, Y. G., 2004. Lithospheric thinning beneath North China: A temporal and spatial perspective. *Geological Journal of China Universities*, 10; 324—331 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., Chung, S. L., Ma, J., et al., 2004a. Contrasting Cenozoic lithospheric evolution and architecture in western and eastern Sino-Korean craton: Constraints from geochemistry of basalts and mantle xenoliths. *J. Geol.*, 112; 593—605.
- Xu, Y. G., Huang, X. L., Ma, J. L., et al., 2004b. Crustal-mantle interaction during the thermo-tectonic reactivation of the North China craton: SHRIMP zircon U-Pb age, petrology and geochemistry of Mesozoic plutons in western Shandong. *Contrib. Minera. Petrol.*, 147; 750—767.
- Xu, Y. G., Menzies, M. A., Thirlwall, M. F., et al., 2003. “Reactive” harzburgites from Huainan, NE China: Products of lithosphere-asthenosphere interaction during lithospheric thinning? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67; 487—505.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., 2003. Geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China craton: An association with lithospheric thinning. *Ore Geol. Rev.*, 23; 125—152.
- Ye, H., Zhang, B., Mao, F., 1987. The Cenozoic tectonic evolution of the Great North China: Two types of rifting and crustal necking in the Great North China and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 133; 217—227.
- Zhao, D. P., 2004. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: Insight into deep earth dynamics. *Phys. Earth Planet. Int.*, 146; 3—34.
- 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. *Precam. Res.*, 107; 45—73.
- Zheng, J. P., 1999. Mesozoic-Cenozoic mantle replacement and lithospheric thinning beneath the eastern China. China University of Geosciences Press, Wuhan, 126 (in Chinese).
- Zhi, X. C., Peng, Z., Chen, D., et al., 2001. The longevity of the subcontinental lithospheric mantle beneath Jiangsu-Anhui region. *Science in China*, 44; 1110—1118.
- Zhou, X. H., Sun, M., Zhang, G. H., et al., 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton. *Lithos*, 62; 111—124.
- Zindler, A., Hart, S. R., 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14; 493—571.

附中文参考文献

- 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. *现代地质*, 8; 349—356.
- 刘锋铨, 徐义刚, 2005. 河北阳原新生代玄武岩中两类辉石岩包体的矿物学和地球化学特征. *大地构造与成矿学* (待刊).
- 吴福元, 孙德有, 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. *长春科技大学学报*, 29; 313—318.
- 徐义刚, 1999a. 岩石圈的热—机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄. *矿物岩石地球化学通讯*, 18; 1—5.
- 徐义刚, 1999b. 拉张环境中的大陆玄武岩浆作用: 性质及动力学过程. 见: 郑永飞, *化学地球动力学进展*. 北京: 科学出版社, 119—167.
- 徐义刚, 2004. 华北岩石圈减薄的时空不均一特征. *高校地质学报*, 10; 324—331.
- 郑建平, 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社, 126.