

中生代华北岩石圈地幔高度化学不均一性与大陆岩石圈转型

周新华, 张宏福

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要: 对当前我国固体地球科学热点之一的中国东部中生代大陆岩石圈地幔巨厚减薄的机制及地球动力学背景研究中所涉及的主要问题进行了简要的回顾和综述. 基于华北地区系统的中生代深源岩类岩石地球化学研究, 着重论述了该区晚中生代岩石圈地幔的高度化学不均一性的表现及其成因分析, 进而强调了其可能的大地构造含义. 其中, 特别对华北南部晚中生代深源岩类地幔源区地球化学特征的空间规律变异给予了详尽的讨论, 指出扬子板片的深俯冲作用及其导致的流体熔体交代是其主要的成因机制. 建议以岩石圈地幔转型一词来描述中国东部大陆岩石圈地幔发生在中新世代的这一组成结构的剧烈变化, 并指出这一过程是由 2 次独立的事件所组成, 它们是中生代全球深部事件在中国东部不同形式的响应.

关键词: 岩石圈地幔; 地幔转型; 中新世代; 化学不均一性; 中国东部.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2006)01-0008-06

收稿日期: 2005-12-03

Highly Chemical Heterogeneity of Subcontinental Lithosphere Mantle beneath North China and Its Major Transformation

ZHOU Xin-hua, ZHANG Hong-fu

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

Abstract: This paper presents a review on the issues related to the mechanism and geodynamic regime of the Cenozoic-Mesozoic thinning of the subcontinental lithosphere beneath eastern China. The pattern and causes of highly chemical heterogeneity have been emphasized, and several tectonic implications have been postulated. It has been suggested that the major transformation of the subcontinental lithosphere beneath this region are composed of two separate events, which are regarded as a local response to the Mesozoic global event.

Key words: lithosphere mantle; mantle transformation; Cenozoic-Mesozoic; chemical heterogeneity; eastern China.

以华北为典型代表的中国东部中生代大陆岩石圈巨厚减薄不仅构成了显生宙中国岩石圈演化中的重大事件, 而且已经成为 20 世纪 80 年代至今我国固体地球科学研究领域中一个持久的研究热点. 目前国内外学术界对这一现象本身已并无分歧, 并且对其时空分布特征至少也有框架性的认识(范蔚茗和 Menzies, 1992; Menzies *et al.*, 1993; 邓晋福等, 1996; Griffin *et al.*, 1998; Menzies and Xu, 1998; 郑建平, 1999; Fan *et al.*, 2000, 2001, 2004;

Zheng *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2001a, 2001b, 2002, 2003; Zhang *et al.*, 2003, 2004; Deng *et al.*, 2004); 但由此引伸出一个主要的争议, 或者说尚未深入探讨的问题, 是这一大尺度地球动力学过程的机制和背景及其在中国东部显生宙大陆岩石圈地幔演化中的影响(郑建平, 1999; 路凤香等, 2000; Xu, 2001; 吴福元等, 2003; Zhou *et al.*, 2002; Wilde *et al.*, 2003; Gao *et al.*, 2004; 张宏福等, 2005b). 应该说, 这一争议不仅与中国大陆岩石圈

形成与演化这一中国地质学的基本问题密切相关,而且涉及到了当代固体地球科学的基础理论问题。有关减薄机制等方面的争议,我们最近已在另文专门有所论述(张宏福等,2005b),本文仅从中生代华北岩石圈地幔化学不均一性角度出发,来讨论岩石圈地幔转型问题。这是由于对中国东部岩石圈减薄现象的认识主要是通过华北古生代岩石圈地幔与新生代岩石圈地幔对比反演研究推演而得,并非是直接观测或正演研究的结果。因此,研究处于这两个地质时代之间的中生代岩石圈地幔的性状就成为揭示这一动力学过程机制与背景的关键所在,同时也构成了 20 世纪末以来我国地学相关领域的一个研究前沿。为进一步推动相关领域的研究,本文拟对这一领域研究现状和存在问题做一简要回顾和评述。

1 中生代华北岩石圈地幔化学不均一性研究

对于地质历史上大陆岩石圈地幔的研究历来主要是基于地幔岩石学和地幔地球化学研究,而相应地区的地球物理资料往往只能提供近期的边界条件制约。近年来国内不少学者在华北地区相继开展了以中生代深源岩类为主系统的岩石地球化学研究(Fan *et al.*, 2001, 2004; Guo *et al.*, 2001, 2003, 2004; Qiu *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002, 2003, 2004, 2005a; Zhang and Sun, 2002; Zhai *et al.*, 2003; Chen and Zhou, 2004, 2005; Chen *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2004; Gao *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2004; Ying *et al.*, 2004; 徐义刚, 2004; 郭锋等, 2005; 张宏福等, 2005b; 周新华等, 2005)。上述研究的工作地区涵盖了南自大别造山带、东自苏鲁超高压变质带、西至太行山地区以及华南北缘在内的广大华北克拉通及其周边地区。涉及的主要岩区及岩类有南北太行山地区的基性侵入杂岩,鲁中地区的中基性侵入杂岩、火山岩、火成碳酸岩、钾质煌斑岩和碱性岩等,鲁西南及胶东各类中基性和碱性侵入岩以及北淮阳、北大别地区的相似岩类。其中,特别是在鲁西南发现了华北内陆首例含地幔捕虏体的中生代玄武岩(Zhang *et al.*, 2002),对推动这一领域研究起了重要作用。相应的岩石地球化学以及不同岩类的时空分布特征研究表明,与新生代东部地幔源区的地球化学特征不同,它们大多具有岛弧

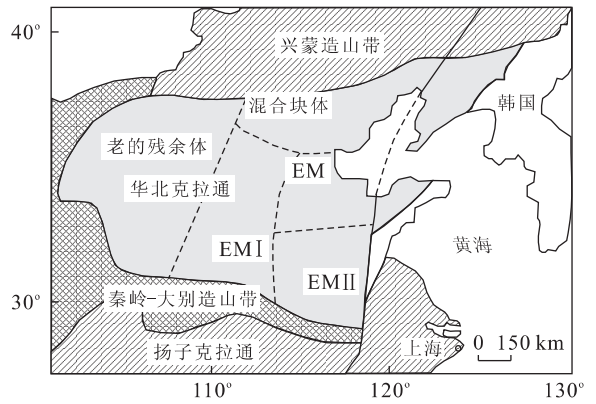


图 1 华北中生代岩石圈地幔高度化学不均一性(Zhang *et al.*, 2004)

Fig. 1 Highly chemical heterogeneity of subcontinental lithospheric mantle beneath North China

或活动大陆边缘型的微量元素特征;而其反演的源区地球化学特征则呈现了规律性的空间变异特点,即它们的源区特征完全受岩类侵位或喷发的大地构造位置和背景的控制;从而表明了中生代华北岩石圈地幔呈现了高度的化学不均一性(图 1)。总体来讲,以太行山区为代表的华北西部岩石圈地幔依然保持着古老克拉通下地幔的属性,即 I 型富集地幔特征;而华南北缘则存在较复杂的情况,在以不同程度富集特征背景下(如燕山地区),局部地区存在着亏损地幔特征。特别值得重视的是以鲁中、鲁西南和苏鲁—北大别为代表的华北东南部及南部,该区不同深源岩类的年代及岩性虽有差别,但其源区无一例外地显示了不同程度的 Sr 同位素及 Nd 同位素富集特征,我们可将此近似概括为以 II 型富集地幔为主的地球化学特性。显然,如此富集的晚中生代岩石圈地幔不可能由古生代岩石圈地幔直接演变而来,而且在这一地区的基性火山岩、基性侵入岩、基性脉岩、碱性岩及火成碳酸岩等岩类都呈现同一特征,从而表明它们的共同源区在此前已普遍经受导致富集特征的地幔交代作用。进一步的地球化学特征分析表明,这一高度富集 LILE 和 LREE,并具亏损及内部分馏的 HFSE 元素分配特征,以及富集的 Nd、Sr 同位素特征是不可能由简单流体交代而成。

2 华北大陆岩石圈地幔的转型

多学科的深入研究业已表明,中新世华北岩石圈发生的变化不仅仅是其厚度的减薄,而是从一

个冷、厚、高 P 波速、主量元素亏损、以方辉橄榄岩为主和同位素富集特征的古生代古老克拉通大陆型地幔,转变为薄、热、低 P 波速、主量元素富集、以二辉橄榄岩为主和同位素亏损的新生大洋型地幔。因此,岩石圈地幔的“巨厚减薄”,应理解为只是一种形象的提法。国内外众多学者对此动力学过程采用了不同的专业术语加以描述或表达(Menzies *et al.*, 1993; 邓晋福等, 1996; Griffin *et al.*, 1998; Menzies and Xu, 1998; 郑建平, 1999; Fan *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2001a), 以强调问题的不同侧面和各自的解释及观点。郑建平(1999)在其相关专著中,曾很形象地建议将此变化称为“岩石圈置换”(mantle replacement); 即“华北地块东部岩石圈中,新生代的巨厚减薄、地幔转型(克拉通地幔被大洋型地幔置换)”。很明显,这一建议强调了“置换”一词,但实质上,原作者是将它作为“地幔转型”的一种机制或方式提出来的。如果考虑到岩石圈组成结构特征的这一系统变化及其所反映的演化史和深部地球动力学机制及过程,以及国际上有关学者对地质历史时期 3 种不同类型大陆岩石圈地幔的总结(Menzies, 1990),那么,用岩石圈转型(lithosphere transformation)一词来描述这一深部动力学事件可能更为合适。这就是近年来我们一再建议将此种变化统称为“岩石圈转型”(major transformation)的原因(Zhou *et al.*, 2001a, 2001b, 2002; Zhang *et al.*, 2002, 2003; Zhou and Sun, 2003; 张宏福等, 2005b)。

由此可知,岩石圈地幔“转型”的提法可以为各种不同的理论模式和观点解释同一深部动力学事件提供广阔的空间。同时,“转型”这一提法也包含了由中生代岩石圈地幔向新生代大洋型地幔转变的第二次转型(Menzies and Xu, 1998; Zhang *et al.*, 2003)。即华北大陆岩石圈地幔转型是由先后的两次转型组合而完成的:首先由古生代典型的克拉通大陆岩石圈地幔转型为中生代“大陆过渡型”或“大陆交代型”岩石圈地幔,而后再由这一过渡型岩石圈地幔转型为新生代大洋型地幔。应该指出,这两次转型都存在着时空上的不均一性,无论在中生代还是在新生代,华北区域上都会有部分地区的岩石圈地幔依然残存着转型前的组成和相关特征。这是华北岩石圈地幔高度化学不均一性的一种表现。

如前所述可知,华北大陆岩石圈这一全面的两次转型是基于地球物理、地球化学和地质学众多的

观测事实及其推论,即由奥陶纪金伯利岩及其幔源捕虏体反演所得的古生代华北大陆岩石圈地幔特征,与由新生代幔源岩类(广布的玄武岩类及其幔源捕虏体)反演的新生代华北大陆岩石圈地幔特征的巨大差异及强烈对比所得。

无疑,一个符合逻辑的推论必然是这一变化应该发生在中生代时段内。因此,了解及确证中生代过渡型华北大陆岩石圈地幔的性质、特征及其成因,不仅是认识岩石圈地幔巨厚减薄的一个关键问题,更是打开认识整个显生宙中国东部大陆岩石圈地幔演化研究的一把关键钥匙。众多研究业已揭示,晚中生代,尤其是白垩纪是全球深部地幔的剧烈活动期,表现为超级地幔柱活动以及全球性的海底玄武岩喷发高峰,大规模缺氧事件等,同时也是许多大型火山岩省形成时段。它们又可与反映地核状态的全球超静磁场及长时段地磁正极向相联系。我们已有的工作至少已从深部年代学记录上表明了华北这一时段强烈的壳幔相互作用与这一全球事件在时间上是同步的(Zhou *et al.*, 2002; Zhou and Sun, 2003; Wilde *et al.*, 2003; 周新华等, 2005)。因此深入探讨这一全球事件对中国东部岩石圈在中新生代这一重大变异的可能影响及联系应是今后一个值得重视的研究方向。

3 高度化学不均一性的成因和可能的构造含义

华北地区中生代深源岩类岩石地球化学反演研究揭示了高度的化学不均一性。其中,最引人关注的是华北南部大范围 II 型富集地幔的存在。深入的岩石地球化学研究表明,大陆岩石圈地幔经受富集的交代作用最普遍的机制是经受俯冲板片析出流体的交代改造(Menzies and Hawkesworth, 1987)。而华北南部中生代岩石圈地幔的实例则是高度富集的岩石圈地幔,这一成因是无法用一般的流体交代机制解释的。近年来的深入研究表明,富硅、富钛及富碳酸盐的熔体交代作用在这一富集机制中起了重要作用(Zhang *et al.*, 2000, 2001, 2004, 2005a; Chen and Zhou, 2004, 2005; Guo *et al.*, 2004),并有可能对此给出合理的解释。进一步研究表明,在华北东南部及南部地区,这种地幔源区地球化学富集特征具有南北向的变化趋势,尤其是以 Sr 同位素富集增量最为明显(Zhang *et al.*, 2003, 2004; 张宏福等,

2005b;周新华等,2005)。动态部分熔融模式计算要求高度富集的源区地球化学特征,因此,单一的洋壳俯冲及通常的流体交代是无法满足上述要求的。再则,中生代深源岩类源区微量元素地球化学特征与扬子下地壳代表样品相似。据此,我们先后提出了扬子板片深俯冲导致下部地壳的部分熔融,产生熔体交代改造华北大陆岩石圈地幔的认识以及华北克拉通地幔自古生代以来经受了南北双向俯冲及交代改造影响的工作模式(Zhang *et al.*, 2002; Zhang and Sun, 2002; Zhang *et al.*, 2003;张宏福等,2005b)。这一模式能较好地解释目前所观测到的岩石地球化学特征,并与已知的基本地质事实相兼容。至于华北西部太行山地区中生代深源岩类所反演的岩石圈地幔 I 型富集源区特征,可以用该区可能保存了早中元古代裂谷及碰撞事件的深部记录(Zhao *et al.*, 2001, 2003),以及扬子板块深俯冲在三维空间上的不均一性来解释。宇宙成因核素 ^{10}Be 的相关研究已表明,大洋板片深俯冲作用产生岩浆活动的地球化学特征受到俯冲板片几何条件,如俯冲角度、俯冲过程及俯冲板片本身的物理参数,以及沉积物厚度和组成等因素制约(Morris, 1991)。我们认为,扬子板片深俯冲过程必然会在华北板片的不同区段,产生物理及几何条件上的不均一性;由此很自然会产生物理化学后效上的不均一性。当然这一现象还需要今后深入研究和探讨。

与华北南部形成鲜明对照的是,华北北缘深源岩类源区地球化学特征所呈现的明显不均一性,反映了古生代东北亚块体的拼合过程。这一过程显然与南部扬子板片深俯冲过程迥然不同。前者是碰撞型大陆深俯冲过程的产物,而后者则是典型的增生型造山过程的产物。这也是华北北缘中生代岩石圈地幔源区地球化学特征呈现多样性、复杂性和高度不均一性的本质原因。

综上所述,华北中生代岩石圈地幔的地球化学特征实质上是反映了自古生代以来,包括华北克拉通在内的东亚大地构造变动的演化历史。当然,有关这一交代改造机制的探讨尚需深入,其时间制约条件也尚待研究。尽管如此,已有研究所揭示的这一岩石圈地幔源区特有的地球化学模式是所有后续工作必须考虑的最基本的制约条件。

致谢:本研究受国家自然科学基金重点项目资助(No. 40334043),英基丰、陈立辉协助部分工作,特此致谢。

References

- Chen, B., Jahn, B. M., Arakawa, Y., et al., 2004. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang orogen, North China craton: Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148: 489–501.
- Chen, L. H., Zhou, X. H., 2004. Ultramafic xenoliths in Mesozoic diorite in West Shandong Province. *Sci. in China (Series D)*, 47(6): 489–499.
- Chen, L. H., Zhou, X. H., 2005. Subduction-related metasomatism in the thinning lithosphere: Evidence from a composite dunite-orthopyroxenite xenolith entrained in Mesozoic Laiwu high-Mg diorite, North China craton. *G³ (Geochemistry, Geophysics, Geosystems)*, 21(6): 938–957.
- Deng, J. F., Mo, X. X., Zhao, H. L., et al., 2004. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: “Continental roots-plume tectonics”. *Earth Science Review*, 65: 223–275.
- Deng, J. F., Zhao, H. L., Mo, X. X., et al., 1996. Continental roots-plume tectonics of China: Key to the continental dynamics. Geological Publishing House, Beijing, 110 (in Chinese).
- Fan, W. M., Guo, F., Wang, Y. J., et al., 2001. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China. *Physics and Chemistry of Earth (A)*, 26: 733–746.
- Fan, W. M., Guo, F., Wang, Y. J., et al., 2004. Late Mesozoic volcanism in the northern Huaiyang tectono-magmatic belt, central China: Partial melts from a lithospheric mantle with subducted continental crust relicts beneath the Dabie orogen? *Chemical Geology*, 209: 27–48.
- Fan, W. M., Menzies, M. A., 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotectonica et Metallogenia*, 16: 171–180 (in Chinese with English abstract).
- Fan, W. M., Zhang, H. F., Baker, J., et al., 2000. On and off the North China craton: Where is the Archaean keel? *Journal of Petrology*, 41: 933–950.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892–897.
- 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. F., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., *Mantle dynamics and plate interaction in East Asia*. *Am. Geophys. Union Monograph*, 27: 107–126.

- Guo, F., Fan, W., Wang, Y., et al., 2003. Geochemistry of Late Mesozoic mafic magmatism in west Shandong Province, eastern China: Characterizing the lost lithospheric mantle beneath the North China block. *Geochemical Journal*, 37: 66—77.
- Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J., 2001. Late Mesozoic mafic intrusive complexes in North China block: Constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle. *Physics and Chemistry of Earth (A)*, 26: 759—771.
- Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J., et al., 2004. Origin of Early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China: Implications for enrichment processes beneath continental collisional belt. *Lithos*, 78: 291—305.
- Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J., et al., 2005. Geochemistry of Late Mesozoic mafic rocks from Dabie-Sulu region, China: Constraints on the nature of lithospheric mantle beneath the orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 1265—1270 (in Chinese with English abstract).
- Lu, F. X., Zheng, J. P., Li, W. P., et al., 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in the eastern China: The “mushroom cloud” model. *Earth Science Frontiers*, 7(1): 97—107 (in Chinese with English abstract).
- Menzies, M. A., 1990. Continental mantle. Clarendon Press, Oxford, 551.
- 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. *Geological Society Special Publication*, 71—78.
- Menzies, M. A., Hawkesworth, C. J., 1987. Mantle metasomatism. Academic Press, 472.
- 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 Geodynamic Series*, 27, 155—165.
- Morris, J. D., 1991. Applications of cosmogenic ^{10}Be to problems in the earth sciences. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 313—350.
- Qiu, J. S., Xu, X. S., Lo, C. H., 2002. Potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong Province: ^{40}Ar - ^{39}Ar dating and source tracing. *Chinese Science Bulletin*, 47: 91—97.
- Wilde, S. A., Zhou, X. H., Nemchin, A. A., 2003. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. *Geology*, 31(9): 817—820.
- Wu, F. Y., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51—60 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26: 747—757.
- Xu, Y. G., 2004. Lithospheric thinning beneath North China: A temporal and spatial perspective. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 324—331 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., Huang, X. L., Ma, J. L., et al., 2004. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China craton: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147: 750—767.
- Yang, J. H., Chung, S. L., Zhai, M. G., et al., 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.
- Ying, J. F., Zhou, X. H., Zhang, H. F., 2004. Geochemical and isotopic investigation of the Laiwu-Zibo carbonates from western Shandong Province, China and implications for their petrogenesis and enriched mantle source. *Lithos*, 75: 413—426.
- Zhai, M. G., Zhu, R. X., Liu, J. M., et al., 2003. Time range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China block. *Science in China (Series D)*, 47: 151—159.
- Zhang, H. F., 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 237: 768—780.
- Zhang, H. F., Menzies, M. A., Zhou, X. H., et al., 2000. Textural and chemical zoning in garnets related to mantle metasomatism and deformation processes. *Chin. Sci. Bull.*, 45(2): 174—180.
- 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., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China craton: Evidence from major, trace element, and Sr-Nd-Pb iso-

- tope studies of Fangcheng basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 144: 241—253.
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China craton; Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 4373—4387.
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, M. F., et al., 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., et al., 2005a. 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., Zhou, X. H., Fan, W. M., et al., 2005b. Nature, composition, enrichment processes and its mechanism of the Mesozoic lithospheric mantle beneath southeastern North China craton. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 1271—1280 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2001. High-pressure granulites (retrograded eclogites) from the Hengshan complex, North China craton; Petrology and tectonic implications. *Journal of Petrology*, 42 (6): 1141—1170.
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., 2003. Major tectonic units of the North China craton and their paleoproterozoic assembly. *Science in China (Series D)*, 6(1): 23—38.
- Zheng, J. P., 1999. Mesozoic-Cenozoic mantle replacement and lithospheric thinning, East China. China University of Geosciences Press, Wuhan, 126 (in Chinese).
- Zheng, J. P., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block; Significance for lithosphere evolution. *Lithos*, 57: 43—66.
- Zhou, X. H., Sun, M., Zhang, H. F., et al., 2001a. Major transformation of subcontinental lithosphere mantle beneath North China; Inferred from geochemistry of Late Mesozoic magmatism in Shandong and Sulu regions. The 3rd two coasts-three region & world Chinese conference on geological sciences, Hongkong.
- Zhou, X. H., Sun, M., 2003. Major transformation of subcontinental lithosphere mantle beneath the Sino-Korean craton in Late Mesozoic; A possible global link. *Geochim. et Cosmochim. Acta (S1)*, 67(16): A584.
- Zhou, X. H., Sun, M., Zhang, H. F., 2001b. Geochemical and isotopic evidences for Mesozoic-Cenozoic transformation of subcontinental lithosphere mantle beneath North China. LPI Contribution No. 1088, NASA, Abstracts Volume of 11th Goldschmidt Conf., Homestead, USA, 3568.
- Zhou, X. H., Wilde, S. A., Sun, M., et al., 2002. Local response to global Mesozoic overturn; Inferred from SHRIMP zircon dating of lower crust xenoliths, North China craton. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 66 (15A): 878.
- Zhou, X. H., Yang, J. H., Zhang, L. C., 2003. Metallogenesis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China craton in Mesozoic. *Science in China (Series D)*, 46(Suppl.): 14—25.
- Zhou, X. H., Zhang, H. F., Ying, J. F., et al., 2005. Geochemical records of subsequent effects continental deep subduction; Discussion of mantle source variation of the Mesozoic lithospheric mantle of the North China craton. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 1255—1263 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等, 1996. 中国大陆根—柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 110.
- 范蔚茗, Menzies, M. A., 1992. 中国东部古老岩石圈下部的破坏和软流圈地幔的增生. *大地构造与成矿*, 16: 171—180.
- 郭锋, 范蔚茗, 王曰军, 等, 2005. 大别—苏鲁地区晚中生代铁镁质岩地球化学对造山带岩石圈地幔性质的约束. *岩石学报*, 21: 1265—1270.
- 路凤香, 郑建平, 李伍平, 等, 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式: “蘑菇云”模型. *地质前缘*, 7(1): 97—107.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等, 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. *地质前缘*, 10(3): 51—60.
- 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*, 3: 324—331.
- 张宏福, 周新华, 范蔚茗, 等, 2005b. 华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及其形成机理. *岩石学报*, 21: 1271—1280.
- 郑建平, 1999. 中国东部中生代地幔置换作用与岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社, 126.
- 周新华, 张宏福, 英基丰, 等, 2005. 大陆深俯冲后效作用的地球化学记录——华北中生代岩石圈地幔源区特征变异的讨论. *岩石学报*, 21: 1255—1263.