

# 华北东部地幔热柱的特征与演化

牛树银<sup>1,2</sup> 孙爱群<sup>1</sup> 马宝军<sup>1</sup> 张建珍<sup>1</sup>  
毛景文<sup>3</sup> 李厚民<sup>3</sup> 王宝德<sup>1</sup> 陈 超<sup>1</sup>

(1. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100029;

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘要:**燕山运动以来,华北东部地区发生了翻天覆地之构造转变,构造体制从印支期末华北地块与扬子地块的拼贴-增生,转变为地幔热柱演化-区域伸展断陷。华北地幔热柱强烈上隆过程中,在岩石圈底部受阻并呈蘑菇状向外拆离流变,在使上部岩石圈发生热减薄-断陷的同时,向外拆离流变的地幔岩在盆地外围受到韧性剪切带的切割,导致深熔岩浆活动并带动围岩上隆,形成一系列次级隆起(幔枝构造)。地形地貌上亦从东部隆起的高原转变为一盆多山耦合格局——地幔热柱上部的热减薄断(拗)陷与外围的一系列幔枝构造的空间有机组合,即华北东部裂陷盆地西与太行造山带、北与燕山造山带、东与朝鲜半岛、南与大别造山带(即中心裂陷盆地与外围各幔枝构造)均为盆-山耦合关系。

**关键词:**幔壳运动;地幔热柱;幔枝构造;伸展构造;构造演化

**中图分类号:** P511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)04-0931-12

地壳运动是核幔活动在岩石圈中的综合表现形式,盆地、山脉等地形地貌单元则是地壳运动的直接产物(结果)。因此,盆-山耦合关系必然成为探讨大陆动力学的前沿课题,受到地质学家的广泛重视<sup>[1-3]</sup>。

中-新生代是华北东部地区构造体制发生重大转折的时期,发生了一系列重大地质-构造事件,最为突出的事件是从东部高原演化为一盆多山耦合的盆岭构造。大量研究资料表明东部高原可能从三叠纪晚期就已经开始隆起,大规模的抬升主要发生在侏罗纪。白垩纪以来开始减薄,并逐渐演化为盆岭构造,在构造运动、岩浆活动、变质作用、成矿作用、生物进化等方面均有明显的表现。

## 1 问题的提出

地球表面所形成的地质构造格局、地球物理场

异常、地球化学组分分布等无一不受到地球内部物质、能量交换过程的制约。如陆地、海洋的展布,高山、盆地的形成,山川、河流的走势,以及各种矿产资源的形成、灾害的发生、生物的进化与绝灭、地层层序“上老下新”的年龄结构等均受地球内部物质运动,或幔壳运动的控制,都是地球内、外动力地质作用的综合结果<sup>[4-11]</sup>。因此,深部地质研究是一个极具吸引力的前缘学科。

那么,是什么地球动力机制使华北东部发生如此之大的隆拗巨变呢?

马杏垣先生等<sup>[12]</sup>曾专题讨论中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造;张文佑先生<sup>[13]</sup>认为是中新生代断块区,陈国达先生<sup>[14]</sup>归纳为地洼区;牛树银等<sup>[15]</sup>曾从造山带与相邻盆地间物质四维空间物质调整角度讨论了盆-山耦合的地球动力学机制;徐杰等<sup>[16]</sup>在重点

收稿日期:2010-06-29;改回日期:2010-07-02

基金项目:国家自然科学基金(40872137)、我国典型金属矿科学基地研究(200911007)、河北省自然科学基金(D2007000751、D2008000534)项目资助。

作者简介:牛树银,男,1952年生,教授,主要从事构造地质学与构造成矿的教学与科研工作;E-mail:niusy@sjzue.edu.cn。

研究了太行山隆起与华北断陷的基础上,探讨了深部结构及盆山耦合的形成机制;刘和甫<sup>[17]</sup>在系统分述了伸展盆地-山岭体系、挤压盆地-山岭体系、走滑盆地-山岭体系后,重点论证了盆地分类及盆-山间耦合类型,进而探讨了其大陆动力学机制。

近年来,笔者曾撰文探讨华北断陷与外围山岭组合关系,认为是地幔热柱多级演化的产物,建立了地幔热柱-地幔亚热柱-幔枝构造体系<sup>[15,18,19]</sup>。最近广泛收集、研究了大量有关文献,包括东部海域文献<sup>[2,20,21]</sup>,大量资料表明,燕山运动以来,随着全球板块构造的裂解、滨太平洋构造域的俯冲挤压以及紧随而来的华北地幔热柱的形成与演化,使华北东部地区的构造演化,从早期的大规模隆起向总体的构造热减薄断陷发展。尽管期间也发生过几次伸展构造与挤压构

造的相互转换<sup>[10,22]</sup>,但是,构造演化的总体趋势是伸展构造,或者说区域挤压隆升与区域伸展断陷的算术值仍体现了大幅度的伸展断陷。直到新近纪,华北断陷、渤海湾和黄海地区才发生整体沉降,形成区域性大型断(拗)陷盆地。与其外围山岭包括北部燕山、南部大别、西部太行山、东部朝鲜半岛,一起构成华北东部地幔热柱活动导致形成的盆-岭体系。它们在地球动力学上表现为整体组合关系,并共同受着其深部地幔热柱的控制,华北东部盆岭地区也随之逐渐形成现今的构造格局(图1)。

## 2 华北东部地幔热柱的形成与演化

华北东部在较短的地质时间内,从东部巨大高原演变为差异升降明显的盆岭区,其幔壳运动表现、地

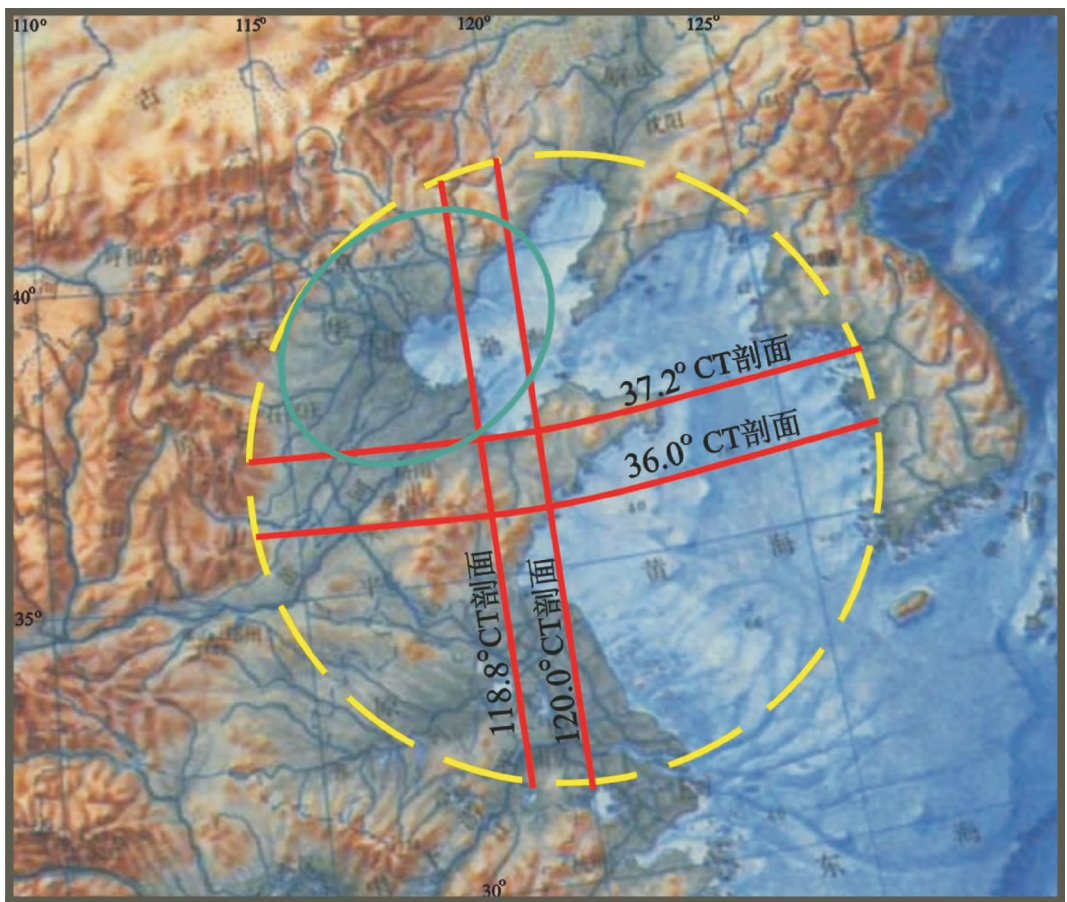


图1 华北东部地幔热柱展布范围及地震层析剖面位置

(注:黄色断线圆环:为华北东部地幔热柱范围;绿色椭圆:为原地幔亚热柱范围;地形底图据马杏垣先生,1989;红色剖面线据杨文采先生,2007)

Fig.1 The distribution of mantle plume in eastern North China and the position of seismic tomographic profile (notes: Yellow disconnected ring:limits of mantle plume in eastern North China; green ellipse: original mantle plume limits; base map of topography after Ma Xingyuan, 1989; Red profile line after Yang Wencai, 2007)

球物理特征和地幔热柱演化等都具有显著的典型性。

### 2.1 强烈的幔壳构造运动表象

中-新生代华北东部经历了燕山运动和喜马拉雅运动,在中国地势上最突出的表现形式是由东高西低变成了现今的西高东低。

任纪舜先生等<sup>[20]</sup>认为在晚侏罗世—白垩纪初亚洲东部存在一个“宏伟的中生代高原—山脉系统”,是西太平洋古陆与古亚洲大陆碰撞造成的。邓晋福等<sup>[21]</sup>根据中酸性火成岩的无负 Eu 异常特征、岩石化学成分计算、深源岩石温压计等方法推算,印支期中国东部诸陆块拼合形成统一大陆时,岩石圈厚度应该大于 150~200 km。认为华南广泛发育二云母花岗岩类,大别—苏鲁广泛发育碰撞型超高压变质岩类,兴蒙造山带、华北陆块北缘、吉黑造山带均发育二云母花岗岩类和某些地段已识别出蓝片岩类,均表明印支期广泛的陆—陆与陆块间的碰撞造山作用,类似于现今的青藏—喜马拉雅碰撞造山带,是陆壳与岩石圈汇聚的过程,也是造山岩石圈根与山根的形成过程。中国的中部为克拉通块体群,由被秦岭造山带焊接在一起的鄂尔多斯陆块和扬子大陆组成,显生宙以来一直呈现稳定的状态,具有克拉通岩石圈根和正常厚度的陆壳,并与东部造山带构成联合大陆。联合古陆的西侧和南侧为三叠纪特提斯洋区,北侧为蒙古—鄂霍茨克洋,东部则为伊泽奈崎洋。

张旗等<sup>[11]</sup>则根据中国东部埃达克岩的展布推断中国东部曾为高原(图 2),埃达克岩是具有特定地球化学特征的一套中酸性火山岩和侵入岩组合,其地球演化标志:SiO<sub>2</sub>≥56%,高铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>≥15%),MgO<3%(很少>6%),贫 K、Y 和 Yb(Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O>2、Y≤18×10<sup>-6</sup>、Yb≤1.9×10<sup>-6</sup>),Sr 含量高(>400×10<sup>-6</sup>),LREE 富集,无 Eu 异常,或有轻微的负 Eu 异常,<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr>0.705,ε Nd>0。类似于太古宙的高铝 TTG 岩套。中国东部类似埃达克岩的中酸性火山岩和侵入岩主要是晚侏罗—早白垩世的岩浆活动产物,包括京冀地区、燕辽、山东、辽东、辽西、北淮阳、南大别及长江中下游地区。以高钾钙碱性系列为主,少数落在橄榄玄粗岩系列和钙碱系列。主要岩石组合为安粗岩—粗面岩—粗面安山岩—流纹岩;侵入岩为闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩—花岗岩。与典型的埃达克岩相比较,中国东部埃达克岩更富 K<sub>2</sub>O(Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O=0.9~1.3),<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr>0.705,ε Nd<0,表明中国东部埃达克岩具陆相特征,推测是来自软流圈地幔玄

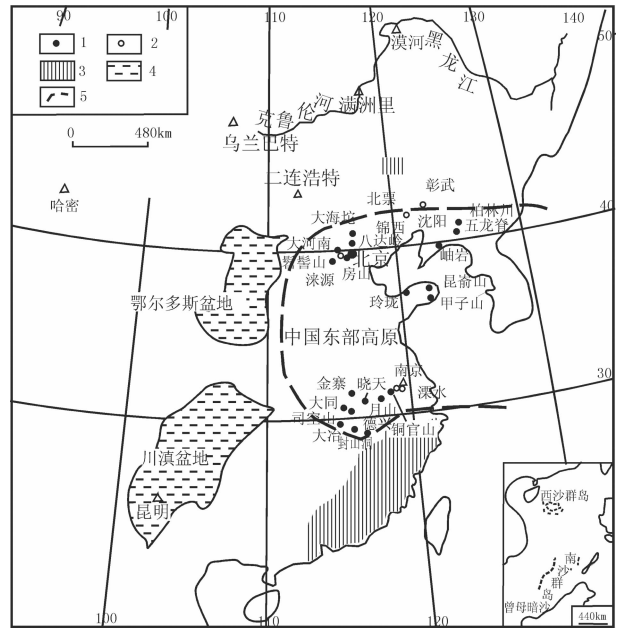


图 2 中生代早期中国东部高原范围示意图<sup>[11]</sup>(略修改)

- 1—埃达克岩(侵入岩);2—埃达克岩(火山岩);
- 3—非埃达克岩分布区;4—J<sub>3</sub>陆相盆地;5—高原范围

Fig.2 Limits of East China Plateau in early Mesozoic and related geological events  
1-Adakite (intrusive rock); 2-Adakite (volcanic rock); 3-Distribution area of non-adakite; 4-Continental basin in upper Jurassic; 5-Plateau limits

武岩底板垫托侵入到加厚的陆壳底部,导致下地壳基性岩部分熔融形成的,其源区深度至少大于 50 km,表明中国东部当时处于高原状态。

根据中国东部埃达克岩的分布及其他特征,可以确定中国东部高原的北界大体在张家口—彰武一带,可能包括整个朝鲜;南界在长江中下游之南,西界在鄂尔多斯盆地以东;东界尚不清楚。东部高原可能从三叠纪晚期开始隆起,大规模抬升约在晚侏罗世之前,而白垩纪之后开始减薄。

张旗<sup>[24]</sup>还以专题讨论了中国东部大规模岩浆活动与板块俯冲的关系,认为中国东部燕山期岩浆活动与太平洋板块俯冲没有关系:中国东部不属于环太平洋构造带,不是安第斯型活动陆缘,中生代玄武岩不具有岛弧玄武岩的特征,从中酸性岩浆岩得出岛弧的结论,从三叠纪开始的古太平洋板块扩张方向的演变也不支持板块向西俯冲的认识。认为中国东部燕山期大规模岩浆活动可能与超级地幔柱的活动有关,是一种新的大火成岩省类型。



很显然,不同地质学家研究的视角不同,研究的方法不同,所依据的资料也不同,但是,认为中生代华北东部曾存在着隆起的高原是一致的结论。如果有所不同的话,也仅仅区别于时代的稍早或稍晚,主要构造界线的稍近或稍远,这应该不影响总体构造格局的认识。

## 2.2 华北地幔热柱的形成背景

地幔热柱研究进展较快,尽管目前对地幔热柱的来源、性质、大小、上升速度及成因等方面尚存在着不同认识,但它是来自地球深部物质上升流是毫无争议的,也是符合客观规律的。

根据国内外学者对地幔热柱特征的研究<sup>[25-28]</sup>,对比华北东部盆岭区的地质演化及构造特征,可以确定华北东部盆岭区是一典型的地幔热柱,大量深部探测资料表明,华北东部盆岭区为一强烈隆升的幔隆,并呈半球形顶冠向外扩展。在地幔热柱顶部,轻质地幔物质以基性岩墙或玄武岩浆喷溢的形式上涌,并使上部地壳增温裂陷,形成由一系列铲状断裂控制的大型断陷盆地,接受了厚近万米的新生代堆积,华北平原岩石圈厚仅 60~80 km,渤海、黄海地区则薄于 60 km。

在华北地幔热柱的上部,正是由于地幔物质呈半球形向外围拆离扩展,加之地幔位势差的存在,使岩石圈深部物质可通过上地幔顶部壳幔过渡带、中地壳低速带(韧性流变拆离带)等向造山带之下拆离流变。而这些低速软层一旦被造山带持续活动的陡倾韧性剪切带所切割,加之韧性剪切带的减压释荷作用,便可导致原本具有一定熔融性质的低速软化物质转变为深熔岩浆源(房),沿陡倾韧性剪切带上侵,甚至通过浅部脆性断裂直达地表,形成火山喷发,以致形成沿造山带排列的点状或线状岩浆源地,表现为地幔热柱演化的第三级单元,即幔枝构造(mantle branch structures)。岩浆(尤其是上隆地幔岩的热熔作用引起的中酸性岩浆)的密度倒置也加快了造山带的隆升速度和幅度,地表常表现为以幔枝轴部构造岩浆带为中心的隆起构造,并进一步形成典型的幔枝构造(其中隆升较快的部位可发育成典型的变质核杂岩构造)。在华北地幔热柱外围展布的冀东、张宣、阜平、赞皇、小秦岭、大别、辽东、朝鲜半岛的平壤、釜华山等幔枝构造,就是华北地幔热柱构造外围的一系列三级幔枝构造。

岩石圈厚度从地幔热柱顶部向外也很快增厚到

80~120 km,尤其向西、向北增厚更快。在太行山区、燕山区岩石圈厚至 120~160 km,形成明显的幔坎或幔阶。在地质特征上,往往表现为非常明显的地壳厚度陡变带、重力梯级带、地震多发带、热泉分布带和重要的成矿带。

而鲁西—胶东地区则是在地幔热柱中心残留的陆块,就像喷泉上部托起的石球一样,地幔物质从中心向外围拆离,而中心的胶东—鲁西地块残留在地幔热柱的中心(这可能对该区金的成矿作用至关重要,将另文论及),其外围均为断陷盆地所环绕(图 3)。

此外,岩石圈中明显的速度分层也说明了上述特征。上地壳以沉积地层为主,在地幔热柱顶部为 10 km±,并且可分出中生代盖层、古生代盖层和(部分地区)结晶基底等 3 个速度层;中地壳主要为低速层,并具高、低速相间排列的特征,最低速仅为 5.8~6.0 km/s,其厚度在热柱顶部仅为 8~10 km,而向外围山区增厚到 12~20 km;下地壳则为一正速度梯度层,顶部速度为 6.2~6.4 km/s,低部速度为 7.3~7.6 km/s,也具有由地幔热柱顶部较薄,向外围逐渐变厚的趋势。此外,在壳幔分界面附近速度梯度明显增大,这个壳幔过渡层由地幔热柱区的 2 km 向外围加厚到 5~6 km;在速度上有一个从 7.3~7.6 km/s 至 8.0~8.1 km/s 的跳跃存在<sup>[29]</sup>。岩石圈的速度分布在地震层析(CT)剖面上有着清楚的表现,这均表明地幔热柱的强烈上隆。

地质学和地球物理学研究认为地幔软流圈并非全部为熔融状态,只有 5%~15%呈部分熔融状态。地震波可在熔浆中减速并被吸收。因此,将低速层解释为晶液混合物。金振民<sup>[30]</sup>通过实验得出,当熔融成分在 3%~5%时,熔融点主要位于矿物间的接触点上;当熔融 5%以上时,则矿物间的接触面亦呈面状熔融,故很容易产生塑性变形,表现出低速层特征,一旦有触发因素,例如韧性剪切带的切割,便可形成深熔岩浆,它可以是玄武质岩浆上侵的主要成因,也可以通过热熔作用,导致中基性—中酸性岩浆活动。它们是地幔热柱上涌的主动源。

## 2.3 华北地幔热柱地球物理特征

早在 1997 年,滕吉文等<sup>[31]</sup>根据渤海天然地震与地球物理场特征,就提出该区是正在兴起地幔柱的看法,也有一些地质学家认为华北东部发育的是岩石圈裂谷带,而不是地幔热柱体系。那么,华北东部发育的是地幔热柱体系,还是仅仅为岩石圈的裂谷

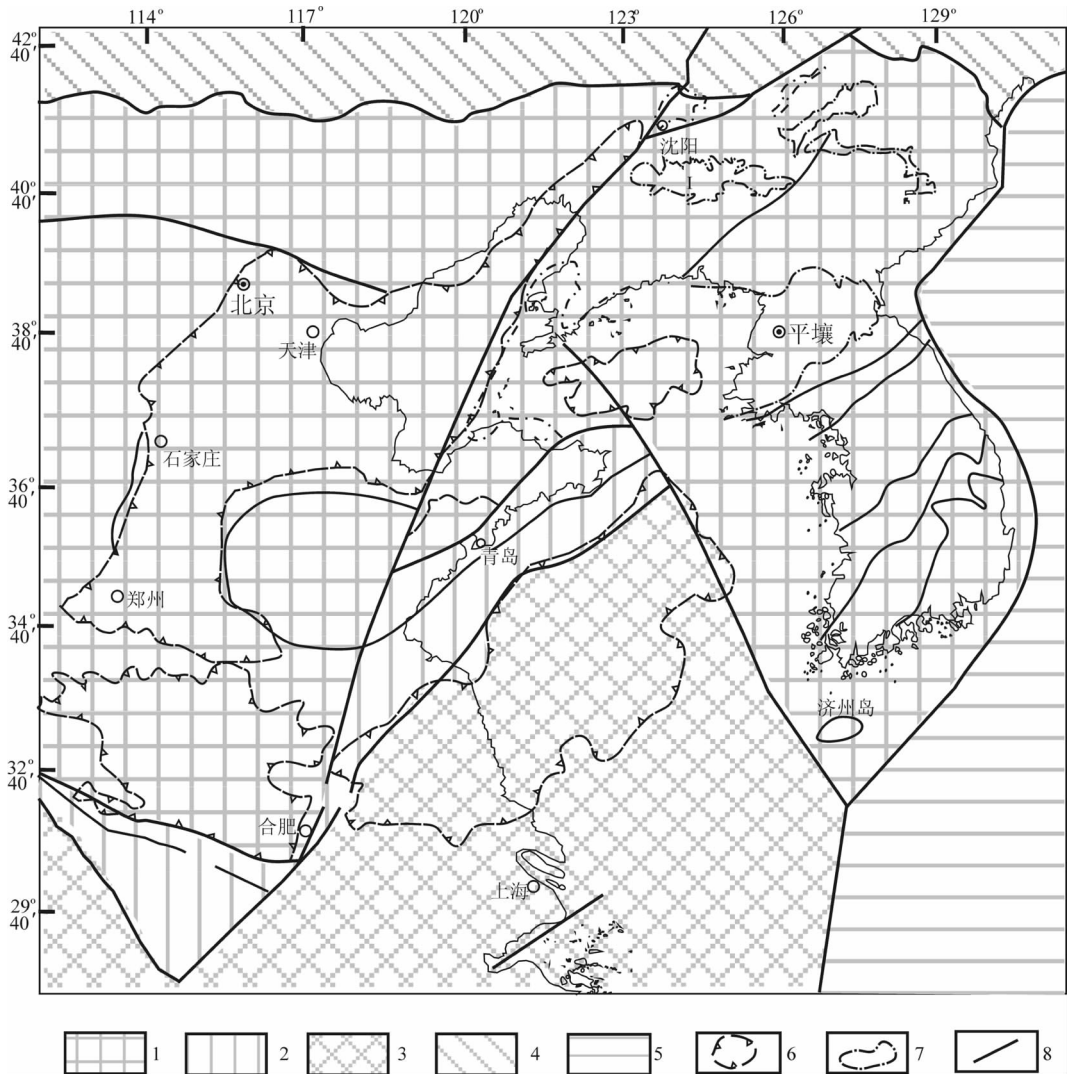


图 3 中国东部-朝鲜半岛主要构造分区图(马寅生等,2007<sup>[4]</sup>略修)

1—中朝克拉通;2—苏鲁-大别造山带;3—扬子克拉通;4—兴蒙-吉黑-图们江造山带;5—日本海及琉球岛屿;  
6—盆地;7—断(拗)陷边界;8—主要断裂带

Fig.3 Major tectonic divisions in east China-Korean peninsula (after Ma Yinsheng et al., 2007)

1-Sino-korea craton; 2- Sulu area and Dabie Mountain orogenic belt; 3- Yangtze craton; 4- Xing'an-Mongolia and Jilin-Heilongjiang - Tumenjiang River orogenic Belt; 5- Japan Sea and Ryukyu Islands; 6- Basin; 7- Fault depression boundary; 8- Main fault zone

带呢? 问题的焦点变成华北东部的下方是否存在蘑菇形的地幔热柱头部? 这个问题涉及岩石圈下方地幔地震波速的高分辨率成像, 以往的工作还未能给出令人信服的证据指明华北东部蘑菇形地幔热柱头部的存在。

近年来的研究, 积累了一系列新的有关资料, 李廷栋先生负责的“中国岩石圈三维结构”项目组织了一批高水平专家, 从多学科视角开展了深入研究, 出版了一批高水平成果<sup>[4-8]</sup>, 证明了岩石圈与软流圈之

间存在呈“层块结构”的过渡带, 在东亚至西太平洋地区 70~250 km 深度发育一巨型低速异常带, 揭示了中国东部岩石圈呈现明显的“上老下新”的年龄结构等一系列重大成果, 为大华北地幔热柱的认识和厘定奠定了基础。

邓晋福等<sup>[9]</sup>认为中国东部的重力异常特征, 是在总体 NNE 走向展布构造的背景上叠加了华北环状异常, 反映了华北地幔热柱的存在及其演化的影响。

莫霍面深度图与地壳厚度亦呈似环状的展

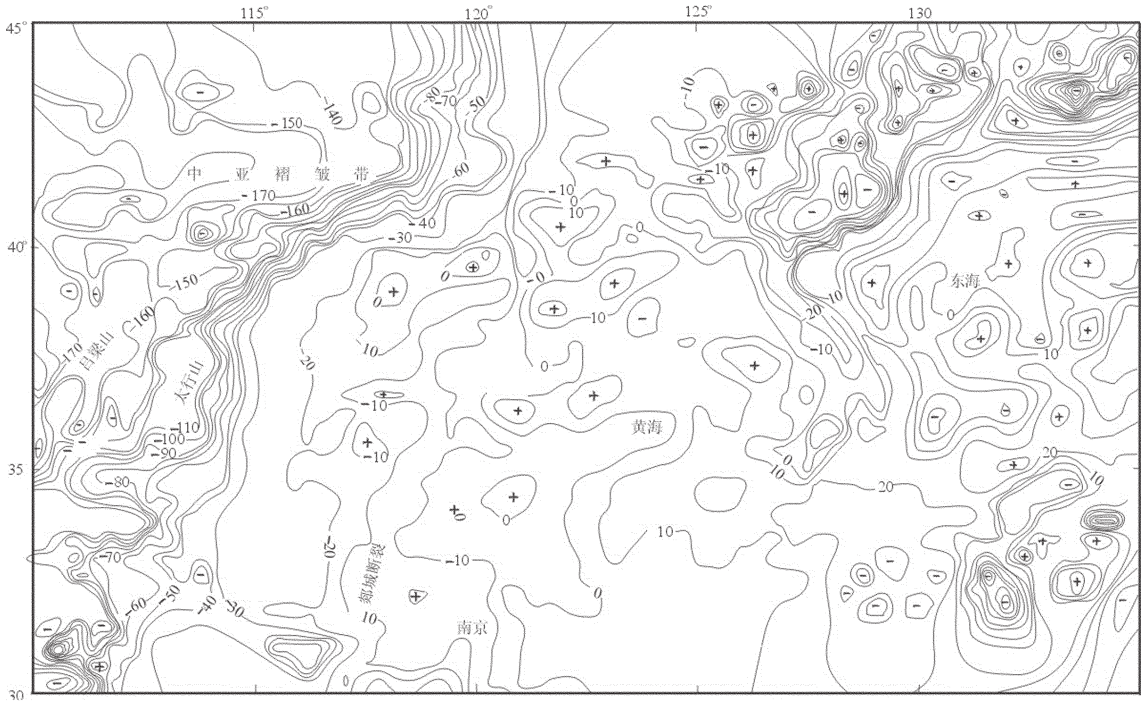


图4 中国东部—朝鲜半岛 GRACE 卫星布格重力异常图(转引马寅生等,2007<sup>[4]</sup>)

Fig.4 Bouguer gravity anomaly of GRACE satellite in east China-Korean peninsula (after Ma Yinsheng et al., 2007)

布<sup>[4]</sup>,华北东部似环状裂谷盆地与似环状展布的 GRACE 卫星弱正布格重力异常也有很好的对应关系(图4),西部鄂尔多斯克拉通地体单元的似环状构造和较大的负异常布格重力区,则对应莫霍面埋深较大。

航磁异常同样也明显表现出两个似环状构造,以太行山为界,与布格重力异常、莫霍面深度或地壳厚度、地貌构造单元总体是一致的。东部的华北裂谷盆地单元有比较详细的研究,似环状盆地内的磁性体异常总体也呈似环状分布,进一步反映了盆地内基底隆拗和次一级盆地隆拗的分布格局。由航磁异常进一步反演的浅部和深部断裂系统总体也反映了在整个中国东部 NNE 走向的构造背景下,研究区似环状构造的几何学图像,它与盆缘的似环状分布的正断层和走滑断层的图像基本符合,亦与周边山岭及其内部的太古宙—古元古代深变质的变质岩系呈现似环状展布一样,似环状断裂构造,盆—岭构造,在二维平面上必定呈现放射状的构造应力场,这样的几何学图像是难于用常见的具有一定方向的区域应力场来解释,而必定是垂直方向上隆升应力作

用的结果,类似于破火山口内部的似环状塌陷和外部的穹状隆起一样,因此,从三维空间讨论构造应力场的作用和演化过程是必须的。结合地表地貌—构造特征,布格重力异常、Moho 面深度、地壳厚度以及磁异常的三维图像表明:华北东部地区伸展构造系统的形成与演化,不仅需要考虑二维平面的伸展,还必须考虑深度维的地壳减薄。

还有地震层析方面的重要证据,杨文采先生等<sup>[24]</sup>通过上地幔地震 S 波速的高分辨率成像,清晰地揭示出华北东部下方的上地幔存在陡倾的破碎带,延伸深度超过 300 km(图 5,6),在两条南北向剖面 and 两条东西向剖面上,用粉红色曲折线勾画出了可能的上地幔热柱顶面边界。在两个方向的剖面上,不仅在 76 km 以上的岩石圈内部 S 波速降低而且波速扰动剧烈,而且在岩石圈下方波速扰动也很剧烈,反映出上地幔破裂及流体聚集的特征。波速扰动在形状上,呈上(岩石圈底)窄、下(300 km 深度)宽趋势,可能是地幔柱头直径变化的反映。并且认为上地幔地震 S 波速的高分辨率成像结果支持华北东部地区发育地幔热柱的观点,并对地幔热柱的鉴识提供



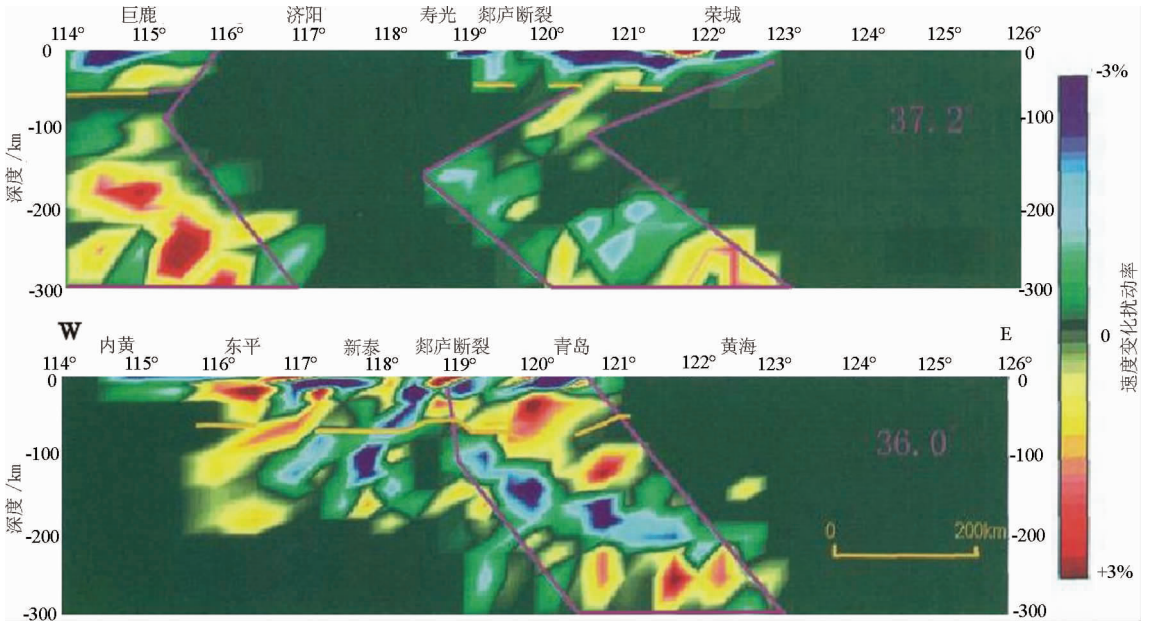


图 5 两条东西向主剖面高分辨率 S 波速成像结果(据杨文采等,2007<sup>[32]</sup>)(剖面位置见图 1)  
黄色水平线标记岩石圈底界,玫瑰红线指示上地幔破碎带位置

Fig.5 Seismic tomography images of high-resolution S-wave of two E-W principal sections  
(location of the sections shown in Fig. 1)

The yellow horizontal line indicates the bottom of the lithosphere, while the rose-colored lines indicate locations of the Upper Mantle shatter zones

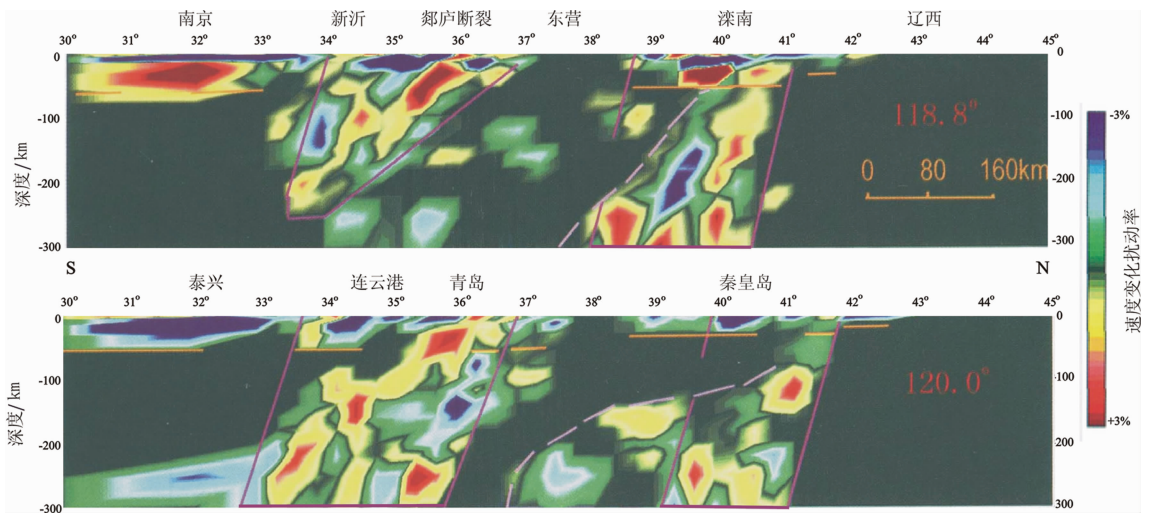


图 6 两条南北向主剖面高分辨率 S 波速成像结果(据杨文采等,2007<sup>[32]</sup>) (剖面位置见图 1)  
黄色水平线标记岩石圈底界,玫瑰红线指示上地幔破碎带位置,粉红曲线折线勾画可能的上地幔热羽柱顶面边界

The yellow horizontal line signifies the bottom of the lithosphere, the rose-colored lines indicate locations of the Upper Mantle shatter zones, and the pink curves stand for the top boundary of the possible Upper Mantle plume

了新的标识。

### 2.4 华北地幔热柱的地质演化

很显然,华北地幔热柱是华北东部中生代以来最大的区域构造事件,其构造形迹在不同时期有所不同。地幔热柱形成的早期,主要表现为区域性上隆(图7-A,B);随着地幔热柱的继续上隆,特别是在地幔热柱上涌的上方,上涌地幔强烈的热熔蚀作用,很快使下地壳局部熔融,形成局部的薄弱部位,并为地幔岩的继续上侵创造了条件。中下地壳则侧向拆离蠕变,地壳厚度减薄,上地壳侧向滑脱(图7-C);当地幔岩的上涌一旦熔透下地壳时,本来就具低速高导特征的中地壳则更容易被熔融。换句话说,当地幔岩熔透下地壳时,由于岩石圈物质密度远小于地幔岩,因此,会有部分地幔岩快速上侵,上侵形式有两种:一种以基性火山喷发的形式喷发至地表,形成大规模火山岩,并伴随有一系列火山断陷盆地。盆地中可形成火山岩与碎屑岩指状交互的建造类型,且其建造厚度巨大,侏罗纪广泛分布规模较大的断陷盆地建造均属于此种;另一种以基性岩浆的形式侵入到地壳浅部,且更多的情况是由于低密度地壳过滤器的作用<sup>[3]</sup>,地幔岩很容易以岩床的形式沿中地壳低速高导层侵入到中地壳之中,巨大的地幔侵入岩床就好像插入木板中烧红的铁块一样,在地幔岩降温的同时,就把本来就具低速高导性质的中地壳或上地壳下部烤熔,并发生局部同化混染作用,以至于形成幔壳混染岩浆或壳源岩浆,呈接力形式继续上侵,地表则发生裂陷下沉并接受沉积,形成一系列相间排列的地堑、地垒,成为典型的盆岭构造(图7-D)。

此外,由于地幔岩(或幔壳混染岩浆)沿薄弱带的顺层贯入及其加入楔作用,容易使薄弱带扩大,甚至很容易导致下地壳与中、上地壳失去连接,以拆沉地块的形式下沉。同时,导致上地壳发生进一步热减薄断陷。与此同时,由于地幔热柱呈蘑菇状顶冠向外围拆离滑脱,加之地幔物质的高温、高压、低粘度特征,使地幔物质不断沿中地壳低速带、不同层次原有拆离滑脱带等薄弱部位向外围大规模拆离流变。向外拆沉的地幔物质一旦被外围陡倾韧性剪切带所切割,或者由于地幔物质向外拆离过程中导致的液压致裂作用,使新生断裂与上部活动断裂连通,便可导致地幔物质减压释荷,使原本具有一定熔融性质的低速软化物质转变成成为深熔岩浆源。如果韧性剪切带直达地

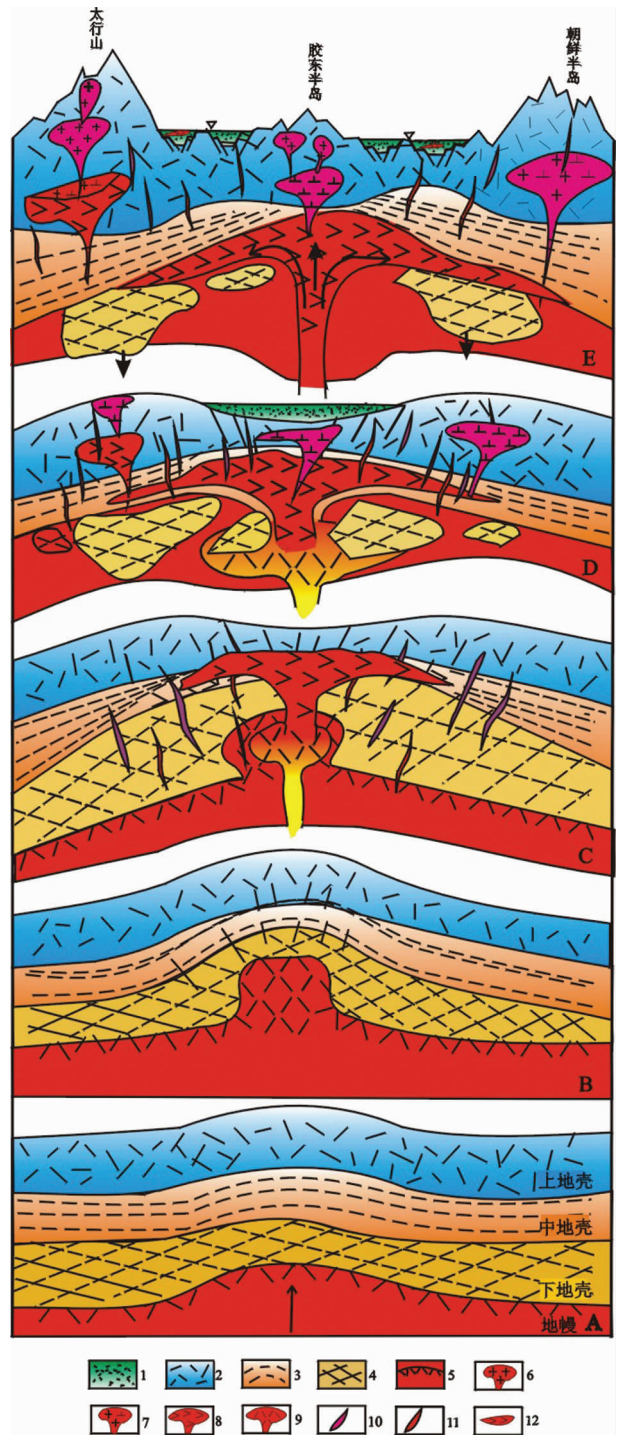


图7 华北东部地幔热柱演化模式

- 1—新生代沉积盆地;2—上地壳;3—中地壳;4—下地壳;5—地幔岩;
  - 6—酸性侵入岩;7—中酸性侵入岩;8—中基性侵入岩;9—基性侵入岩;
  - 10—酸性岩脉;11—基性岩脉;12—新生代玄武岩
- Fig.7 Evolution model of mantle plume in eastern North China  
 1- Cenozoic sedimentary basin; 2- Upper crust; 3- Middle crust;  
 4- Lower crust; 5- Mantle rock; 6- Acid intrusive rock; 7- Intermediate-  
 acid intrusive rocks; 8- Intermediate-basic intrusion; 9- Basic intrusive  
 rock; 10- Acidic dyke; 11- Basic dyke; 12- Cenozoic basalts



表且通畅性较好,则岩浆直接喷出地表形成火山爆发。火山活动旋回往往以基性、中基性岩浆喷发开始,以酸性或碱性岩浆活动为结束,总体表现出基性→中基性→中性→酸性(偏碱性)的完整岩浆演化序列。如果韧性剪切带连通性不佳,岩浆活动则以侵入形式为主(或者活动早阶段多为火山喷发,活动晚阶段以大规模岩浆侵入为主)。大规模的岩浆活动,特别是地幔岩侵入导致的大规模中酸性岩浆活动造成的负重力异常,使外围山系快速隆升,并逐渐形成一系列幔枝构造,与中心部位的热减薄断陷一起,逐渐形成典型的盆岭构造格局(图 7-E)。

### 3 地幔热柱形成机制探讨

研究表明,地球在自压收缩和重力分异的过程中,地核增压收缩,是正热源;地壳地幔是减压膨胀,是负热源。这是热能由地核向地幔地壳传输的基础。只要有激发因素,便可形成地幔热柱。Olson<sup>[34]</sup>对核幔边界附近 D"层稳定性进行的计算机模拟实验证明,如果核幔界面受到某种局部热扰动,地幔热柱就会以自激自励的方式发育起来,他们认为这种扰动很可能来自地核一侧的加热作用。

地幔热柱的上升速度也是个值得讨论的问题。早期研究认为地幔热柱一旦起动,其上升速度将是很快的<sup>[35]</sup>。Yuen 等<sup>[36]</sup>认为,由于地幔热柱体下部直径较细,只有快速上升才能满足其在较短的时间内形成大规模的溢流玄武岩。但近年来的某些研究也有不同认识,Christensen<sup>[37]</sup>的实验结果表明,即使地幔热柱与周围地幔的粘度差达到  $10^4$ ,地幔热柱的上升速度也是非常慢的。据他的研究,一个典型的地幔热柱从 D"层到达地表(或近地表)大约需要 100 Ma。Boss 等<sup>[38]</sup>、Olson 等<sup>[39]</sup>的研究结果也肯定了这样的时间尺度。他们认为,大规模的溢流玄武岩是地幔热柱经过长期积累和捕获周围地幔所形成的巨大球形顶冠减压熔融喷发的产物。Loper<sup>[40]</sup>认为,在打通通道之前,地幔热柱不可能快速上升,因为上升过程和喷发过程都会导致热量的大量散失,从而减少地幔热柱的活动能力。深度依赖柱管道温度、粘度、半径和浮力上升速度<sup>[41]</sup>。

现代研究所得出的地球物理资料,特别是地震层析成像资料是反映现今构造,还是现存构造。赵永贵等(1992)运用热力学原理对地幔块体进行了定量估算,认为在板块俯冲带附近,近百千米的下岩石圈

和数十千米宽的软流圈上涌体,当后期再无强烈构造变动改造时,其速度差异特征可残存 300~400 Ma,即便是受到后期构造的改造,也可根据其主要特征大致向前推断中生代的演化特征。这就好似新的地幔热柱从核-幔界面逐渐上升至地壳,或板块俯冲带深部下插俯冲冷块的下沉均需要一个相当长的地质过程一样,地幔热柱或地幔冷柱形状的改变同样也有一个逐渐演化的过程。包括地震层析在内的地球物理资料无疑是现代的反映,它可以肯定不能代表中生代的实况,但是,根据上述地幔热(冷)柱逐渐演化的认识,在尚没有新的办法找到时光隧道之前,根据现代地球物理资料特征适当的前推,仍然是“将今探古”的有效途径和唯有办法。

### 4 结论

华北东部地幔热柱的形成、演化与发展,不仅是中国东部中生代以来由东部高原转变为现代盆岭耦合格局的形成机制,而且是中国东部地区构造运动、岩浆活动、变质作用、成矿作用,抑或灾害地质、环境地质、生态地质等的主要诱因,也是中国东部包括黄海盆地、渤海盆地、华北盆地等油气资源形成、运移和储集的主要控制因素。

当然,华北东部地幔热柱的研究还是初步的,但它又是一个极其重要的研究命题。基于以上原因,很显然,应加大中国东部地幔热柱的研究,包括地质学、地球物理学、地球化学及其相关学科的深入探讨,指导新一轮地质找矿,促进资源、环境与人类的和谐发展,预测、预防并减少灾害的发生。

**致谢:**感谢《中国地质》的盛情邀稿和王学明副主编的热情鼓励,感谢审稿专家提出的宝贵意见。

值此李廷栋院士 80 华诞之际,特撰写此文谨表衷心祝贺,感谢先生多年来对我们的热情指导和鼓励,敬祝先生健康长寿、全家幸福。

### 参考文献(References):

- [1] 马寅生,崔盛芹,施炜,等. 中国东部-朝鲜半岛海陆构造格局及含油气盆地特征[M]. 北京:地质出版社,2007,298.  
Ma Yinsheng, Cui Shengqin, Shi Wei, et al. Tectonic Framework and Development of Petroleum Basins in East China-Korean Peninsula [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 298 (in Chinese).
- [2] 张训华,等. 中国海域构造地质学[M]. 北京:海洋出版社,2008: 404.

- Zhang Xunhua, et al. Tectonic Geology in China Seas[M]. Beijing: Ocean Press, 2008:404(in Chinese).
- [3] 邓晋福, 魏文博, 等. 中国华北地区岩石圈三维结构及演化[M]. 北京:地质出版社, 2007:287.
- Deng Jinfu, Wei Wenbo, et al. The Three-Dimensional Structure of Lithosphere and its Evolution in North China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007:287(in Chinese).
- [4] 李廷栋. 中国岩石圈三维结构专项研究主要进展和成果 [J]. 中国地质, 2006, 33(4):689-699.
- Li Tingdong. Main advances and achievements in the special-subject study of the 3D lithospheric structure of China [J]. Geology in China, 2006, 33(4):689-699(in Chinese with English abstract).
- [5] 李廷栋. 中国岩石圈构造单元[J]. 中国地质, 2006, 33(4):700-710.
- Li Tingdong. Lithospheric tectonic units of China [J]. Geology in China, 2006, 33(4):700-710(in Chinese with English abstract).
- [6] 肖庆辉, 邱瑞照, 伍光英, 等. 中国东部中生代软流层上涌造山作用[J]. 中国地质, 2006, 33(4):730-750.
- Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Wu Guangying, et al. Mesozoic asthenospheric upwelling orogeny in eastern China [J]. Geology in China, 2006, 33(4):730-750(in Chinese with English abstract).
- [7] 路凤香, 郑建平, 侯青叶. 中国东部壳-幔、岩石圈-软流圈之间的相互作用带:特征及转换时限[J]. 中国地质, 2006, 33(4):773-781.
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Hou Qingye. Zones of crust-mantle and lithosphere-asthenosphere interaction in eastern China: Characteristics and timing of transformation [J]. Geology in China, 2006, 33(4):773-781(in Chinese with English abstract).
- [8] 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 等. 中国及相邻区域岩石圈结构及动力学意义[J]. 中国地质, 2006, 33(4):793-803.
- Zhu Jiushou, Cai Xuelin, Cao Jiamin, et al. Lithospheric structure and geodynamics in China and its adjacent areas [J]. Geology in China, 2006, 33(4):793-803(in Chinese with English abstract).
- [9] 李思田. 大型油气系统形成的盆地动力学背景[J]. 地球科学, 2004, 29(5):505-512.
- Li Sitian. Basin geodynamics background of formation of huge petroleum systems[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2004, 29 (5):505-512 (in Chinese with English abstract).
- [10] 万天丰, 郝天珧. 黄海新生代构造及油气勘探前景[J]. 现代地质, 2009, 23(3):385-393.
- Wan Tianfeng, Hao Tianyao. Cenozoic tectonics of the yellow sea and its oil-gas exploration[J]. Geoscience, 2009, 23(3):385-393(in Chinese with English abstract).
- [11] 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原:埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 2001, 36(2):248-255.
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi, et al. An east china plateau in mid-late yanshanian period:implication from adakites [J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36 (2):248-255(in Chinese with English abstract).
- [12] 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 等. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造[J]. 地质学报, 1983, 57(1):22-32
- Ma Xingyuan, Liu Hefu, Wang Weixiang, et al. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in Eastern China [J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57 (1):22-32 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张文佑, 张抗, 赵永贵, 等. 华北断块区中、新生代地质构造特征及岩石圈动力学模式[J]. 地质学报, 1983, 57(1):33-42
- Zhang Wenyu, Zhang Kang, Zhao Yonggui, et al. The Mesozoic and Cenozoic geotectonic characteristics and dynamical model of the lithosphere in North China faultblock region [J]. Acta Geological Sinica, 1983, 57 (1):33-42 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陈国达, 杨心宜, 梁新权. 关于活化区动力学研究的几个问题[J]. 地质科学, 2002, (3):320-331.
- Chen Guoda, Yang Xinyi, Liang Xinquan. Some cruxes of dynamics study on activated region [J]. Scientia Geologica Sinica, 2002, (3):320-331(in Chinese with English abstract).
- [15] 牛树银, 孙爱群, 李红阳, 等. 河淮地幔亚热柱的演化及其对华北地区成矿的控制作用[J]. 地球学报, 1996, 17(4):413-423.
- Niu Shuyin, Sun Aiqun, Li Hongyang, et al. The formation of Hehuai sub-mantle plume and its controlling the mineralization in North China [J]. Acta Geological Sinica, 1996, 17 (4):413-423(in Chinese with English abstract).
- [16] 徐杰, 高战武, 孙建宝, 等. 区域伸展体制下盆-山构造耦合关系的探讨——以渤海盆地和太行山为例 [J]. 地质学报, 2001, 75 (2):165-174.
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Sun Jianbao, et al. A preliminary study of the coupling relationship between basin and mountain in extensional environments—A case study of the Bohai Bay Basin and Taihang Mountain [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75 (2):165-174 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘和甫. 盆地-山岭耦合体系与地球动力学 [J]. 地球科学, 2001, 26(6):581-602.
- Liu Hefu. Geodynamic scenario of coupled basin and mountain system [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2001, 26 (6):581-602 (in Chinese with English abstract).
- [18] 牛树银, 孙爱群, 邵振国, 等. 地幔热柱多级演化及其成矿作用 [M]. 北京:地震出版社, 2001:255.
- Niu Shuyin, Sun Aiqun, Shao Zhenguo, et al. The Multistage Evolution of Mantle Plume and its Mineralization [M]. Beijing: Seismological Press, 2001:225 (in Chinese with English abstract).
- [19] 牛树银, 孙爱群, 王宝德. 地幔热柱与资源环境[M]. 北京:地质



- 出版社, 2007:264.
- Niu Shuyin, Sun Aiqun, Wang Baode, et al. Mantle Plume and Natural Resources -Environment [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007:264 (in Chinese with English abstract).
- [20] 蔡乾忠. 等. 中国海域油气地质学[M]. 北京:海洋出版社, 2005:406.
- Cai Qianzhong, et al. Oli & Gas Geology in China Seas [M]. Beijing: Ocean Press, 2005:406 (in Chinese).
- [21] 邢集善, 杨巍然, 邢作云, 等. 中国东部深部构造特征及其与矿集区关系[J]. 地学前缘, 2007, 14(3):114-130.
- Xing Jishan, Yang Weiran, Xing Zuoyun, et al. Deep-seated structure characteristics of eastern China and its relation with metal mineralization-concentrated region [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3):114-130(in Chinese with English abstract).
- [22] 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 中国东部大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京:科学出版社, 1990.
- Ren Jishun, Chen Tingyu, Niu Baogui. The Tectonic Evolution and Mineralization of Continental Lithosphere in Eastern China [M]. Beijing: Science Press, 1990(in Chinese with English abstract).
- [23] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造 [M]. 北京:地震出版社, 1996.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, et al. Continental Roots-Plume Tectonics of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 (in Chinese with English abstract).
- [24] 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄: 与大火成岩省的关系 [J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 021-051.
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, et al. Yanshanian large scale magmatism and lithosphere thinning in Eastern China: Relation to large igneous province [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 021-051(in Chinese with English abstract).
- [25] Maruyama S. Plume tectonics [J]. J. Geol. Soc. Japan, 1994, 100 (1):24-49.
- [26] Fukno Y, Maruyama S, Inoue H. Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography [J]. J. Geol. Soc. Japan, 1994, 100(1): 4-23.
- [27] 邓晋福, 赵海玲, 吴宗絮, 等. 中国北方大陆下的地幔热柱与岩石圈运动[J]. 现代地质, 1992, 6(3):267-274.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Wu Zongxu, et al. A mantle plume beneath the north part of China continent and lithosphere motion [J]. Geoscience, 1992, 6 (3):267-274 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王登红. 地幔柱及其成矿作用[M]. 北京:地质出版社, 1998:160.
- Wang Denghong. Mantle Plume and Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998:160 (in Chinese with English abstract).
- [29] 孙武城, 祝治平, 张利, 等. 对华北地壳上地幔的探测与研究[C] //中国大陆深部构造的研究进展, 北京:地质出版社, 1988.
- Sun Wucheng, Zhu Zhiping, Zhang Li, et al. Detection and research to crust and upper mantle of North China [C]// Researching Advances of Continental Deep Structures in China. Beijing: Geological Publishing House, 1988(in Chinese).
- [30] 金振民. 上地幔动态部分熔融研究的重要发现[J]. 地球科学, 1995, 30(4):438.
- Jin Zhenmin. The key findings of study of the upper mantle dynamic partial melting [J]. Earth Science, 1995, 30 (4):438 (in Chinese).
- [31] 滕吉文, 张中杰, 张秉铭, 等. 渤海地球物理场与深部潜在地幔热柱的异常构造背景[J]. 地球物理学报, 1997, 40(4):468-480.
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Zhang Bingming, et al. Geophysical fields and background of exceptional structure for deep latent mantle plume in bohai sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(4):468-480(in Chinese with English abstract).
- [32] 杨文采, 张学民, 于常青. 华北东部上地幔破裂带[J]. 地质学报, 2007, 81(10):1305-1313.
- Yang Wencai, Zhang Xuemin, Yu Changqing. Upper mantle crack zones in the eastern part of North China[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(10):1305-1313(in Chinese with English abstract).
- [33] 赖绍聪. 岩浆作用的物理过程研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(2):153-158.
- Lai Shaocong. Process research on magmatism advance in earth sciences [J]. Advances in the Physics, 1999, 14 (2):153-158 (in Chinese with English abstract).
- [34] Olson P, Schubert G. Plume formation and lithosphere erosion: a comparison of laboratory and numerical experiments [J]. J. Geophys. Res., 1988, 93:15065-15084.
- [35] Deffeyes K S. Plume convection with an upper mantle temperature inversion [J]. Nature, 1972, 240:539-544.
- [36] Yuen D A, Peltier W R. Mantle plume and the thermal stability of D"layer[J]. GRL, 1980, 7:625-628.
- [37] Christensen U. Instability of a hot boundary layer and initiation of thermochemical plumes[J]. Am. Geophys., 1984, 2:311-320.
- [38] Boss A P, Sack I S. Formation and growth of deep mantle plume [J]. Geophys J R, Astron. Soc., 1985, 80:241-255.
- [39] Olson P, Schubert G, Anderson C. Plume formation in the D" layer and the roughness of the core-mantle boundary [J]. Nature, 1987, 327, 409-413.
- [40] Loper D E. Mantle plumes [J]. Tectonophysics, 1991, 187: 373-384.
- [41] Steinberger B, Antretter M. Conduit diameter and buoyant rising speed of mantle plumes: Implications for the motion of hot spots and shape of plume conduits [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2006, 7(11):1-25.

## Characteristics and evolution of the mantle plume in eastern North China

NIU Shu-yin<sup>1,2</sup>, SUN Ai-qun<sup>1</sup>, MA Bao-jun<sup>1</sup>, ZHANG Jian-zhen<sup>1</sup>,  
MAO Jing-wen<sup>3</sup>, LI Hou-min<sup>3</sup>, WANG Bao-de<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>

(1. *Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China*; 2. *China University of Geosciences, Beijing 100029, China*;  
3. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

**Abstract:** Since the Yanshanian movement, enormous tectonic transformation has taken place in eastern North China. The tectonic pattern transformed from the conjunction-enlargement between North China platform and Yangtze platform in the end of Indosinian movement to the evolution of mantle plume and regional extensional faulting. In the process of North China mantle plume uplifting, the plume was blocked by the bottom of the lithosphere and mushroomed outwards. With the thinning and faulting of the lithosphere, detached plastic mantle rocks were cut by the ductile shearing zone in the surrounding areas of the basin, which resulted in anatectic magmatism. The anatectic magmatism drove the uplifting of country rocks and formed a series of secondary uplifts (mantle branches). Then the landform in eastern North China transformed from high plateau into a coupling pattern of one basin with multiple mountains—a spatial pattern of heat thinning fault basin on the top of the mantle plume with a series of surrounding mantle branches. The faulting basin in eastern North China is coupled westward with Taihang orogenic belt, northward with Yanshan orogenic belt, eastward with Korean peninsula, and southward with Dabieshan orogenic belt (central fault basin with surrounding mantle branches).

**Key words:** mantle-crust movement; mantle plume; mantle branch; extension structure; tectonic evolution

---

**About the first author:** NIU Shu-yin, male, born in 1952, professor, mainly engages in the teaching and study of structural geology and structural metallogeny; E-mail: niusy@sjzue.edu.cn.