

# 中国东部中生代软流层上涌造山作用

肖庆辉<sup>1</sup> 邱瑞照<sup>2</sup> 伍光英<sup>3</sup> 邢作云<sup>4</sup> 张 昱<sup>5</sup> 童劲松<sup>6</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;  
3. 宜昌地质矿产研究所, 湖北 宜昌 443003; 4. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074;  
5. 中国地质大学, 北京 100083; 6. 安徽省地质调查研究院, 安徽 合肥 230001)

**摘要:**中国东部中生代造山带不同于陆缘俯冲作用和陆间大陆碰撞造山带, 也不是陆缘和陆间碰撞造山带发展演化的某一个特定阶段的产物。它是一种由深部软流层上涌造山作用形成的一个新类型的造山带, 又称东亚型造山作用。它的造山作用过程是: (1) 早中生代 (230~180 Ma) 的前和初始造山幕, 深部软流层物质上涌和底侵作用导致冷、强的大陆岩石圈地幔线状破裂与局部拆沉; (2) 中、晚侏罗世 (180~140 Ma) 主造山幕, 软流层大规模上涌并沿着岩石圈底部壳-幔边界横向侵入和伸展, 使垂向差异运动转变为水平挤压作用, 结果地壳表层发生大规模的褶皱构造变形和推覆构造, 使陆壳加厚形成山根, 岩石圈根发生部分拆沉; (3) 白垩纪 (140~65 Ma) 的晚期造山幕, 加厚的陆壳山根与岩石圈根的大规模拆沉, 岩石圈进入全新的从挤压向伸展转变和巨大减薄阶段, 软流层大规模上涌成山。

**关键词:**造山作用; 岩石圈; 软流层上涌; 中国东部

**中图分类号:** P542<sup>+</sup>.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2006)04-0730-21

自 20 世纪 20 年代“燕山运动”创名以来<sup>[1]</sup>, 国内外学者一直把中国东部中生代造山带看作一次独特的或非典型的造山运动, 如有人称之为“燕山台褶带”<sup>[2]</sup>、地台活化区<sup>[3]</sup>或断块构造<sup>[4]</sup>。板块构造面世以来, 不少人认为, 中国东部大兴安岭、燕山和太行山等中生代造山带是陆缘俯冲或陆间碰撞造山带<sup>[5-7]</sup>, 也有人认为它们是陆缘或陆间造山带发展演化的某一个特定阶段的产物<sup>[8]</sup>。近年来笔者从岩石圈-软流层深部地质过程来审视中国东部造山带形成与演化问题发现, 中国东部大兴安岭、燕山、太行山等山脉不同于陆缘俯冲或陆间碰撞造山带, 也不是陆缘或陆间造山带发展演化的某一个特定阶段产物, 它们是一种源自深部软流层上涌的垂直向上的动力作用过程形成的造山事件。这一源自深部软流层上涌的作用恰恰反映了中国东部中生代造山作用的独特之处。笔者把这种软流层上涌形成造山带的作用命名为软流层上涌造山作用, 因它在东亚发育最为典型, 建议将这种造山作用称为东亚型造山作用。

## 1 软流层上涌造山作用的地质证据

软流层上涌造山与陆缘和陆间造山作用明显不同, 其地质证据如下:

### 1.1 现存的岩石圈年代结构为非耦合性

岩石圈地幔时代老新并存以新为主, 但地壳却是老的, 地壳构造与岩石圈地幔之间似无成因联系。

根据地球演化理论, 地壳是由地幔易熔组分的移出而形成的, 其难熔残留物则形成岩石圈地幔, 因此地壳和岩石圈地幔的年代应该是一致的。但中国东部造山带地区现存岩石圈地幔在整体上主要表现为新生特点<sup>[9]</sup>, 而且不同年龄的地幔与深度不存在相关性, 早期古老的岩石圈地幔多数已被新生岩石圈地幔所取代, 但岩石圈地幔内部存在一些较老(元古代)的地幔碎块或夹层。如华北地块的龙岗地区, 其地壳形成于太古宙, 但其橄榄岩包体未显示任何太古宙的痕迹。兴蒙-吉黑地区地壳以元古宙为主, 可地幔多是显生宙

收稿日期: 2006-03-31; 改回日期: 2006-05-29

基金项目: 国土资源部科技计划专项(20001010202, 200010103)和中国地质调查局重大基础研究项目(200113900018)共同资助。

作者简介: 肖庆辉, 男, 1939 年生, 博士生导师, 研究员, 现从事花岗岩大地构造学与中国岩石圈三维结构研究;

E-mail: qhxiao@infomail.mlr.gov.cn; Qing Hui xiao@126.com。

的,表现为新生性质。兴蒙—吉黑的汪清地区,岩石圈地幔的年代与年龄小于 200 Ma 的大洋岩石圈地幔年代一致,小于其上覆地壳的年代,表现出明显的壳幔解耦现象。

上述特点表明,中生代以前形成的克拉通型岩石圈地幔已发生移离或拆沉,然后被中新生代的岩石圈地幔所取代。

## 1.2 发现了许多中生代软流层上涌底侵形成的镁铁质-超镁铁质岩石

中国东部陆块在印支期拼合形成统一的中国东部大陆以后不久,就发生了软流层上涌造山作用,使统一的中国东部大陆发生破裂,开始了东部岩石圈破裂形成一系列陆块与盆地的新的地质演化阶段。它们就是中国东部中生代的初始造山幕的开始。

一方面软流层上涌的减压熔融及其形成的玄武岩以及它们带来的热和动力使岩石圈地幔发生变形,甚至使其熔融形成玄武岩,另一方面软流层上涌的垂直动力作用,使岩石圈地幔及地壳发生初始破裂,这些热的软流层减压熔融物质与岩石圈地幔熔融物质沿岩石圈地幔破裂带上升至岩石圈下地壳底部,使下地壳加热并发生部分熔融作用,进而发生壳幔相互作用有关的岩浆活动。这些来自上地幔熔融产生的玄武岩岩浆添加到下地壳,或者以岩墙群方式侵入中上部地壳,或者以壳幔混熔岩浆对上地壳的添加。如在内蒙古与河北省交界的喀喇沁旗地区早中生代闪长岩中陆续发现早中生代原岩主要为玄武岩类的基性麻粒岩捕虏体(锆石 U-Pb 年龄为 251 Ma,单矿物紫苏辉石 K-Ar 年龄为 229 Ma,分别代表捕虏体麻粒岩相变质作用与冷却年龄),以及镁铁质-超镁铁质堆晶岩捕虏体(其同位素年龄为 237~220 Ma)。早中生代黑云母石英闪长岩全岩的 K-Ar 年龄为 219 Ma,它是下地壳古老基底的斜长角闪岩在软流层上涌及其带来的热而发生较高程度(40%~90%)部分熔融的产物<sup>[10-11]</sup>。上述事实清楚表明,早中生代存在软流层上涌诱发的底侵作用。正是这些底侵的玄武质岩浆带来的巨大热量促成下地壳发生部分熔融。与此同时在下地壳形成由软流圈减压熔融或岩石圈地幔部分熔融形成的岩浆房,它们在稳定的构造环境下形成堆积岩。这些麻粒岩、堆晶岩和闪长岩在高温、高压的实验室条件下进行波速测定表明,它们当时形成于相当壳幔过渡带环境。这些事实表明,早中生代华北岩石圈局部地区已发生初始破裂,开始了软流层物质上涌及其诱发的底侵作用。

除上述地点外,近年来在中国东部从大兴安岭到华北克拉通都发现了一系列早中生代镁铁质-超镁铁质侵入岩、堆晶岩、麻粒岩以及碱性或碱性超基性岩<sup>[12-16]</sup>。镁铁质-超镁铁质岩石包括甘珠尔庙的纯橄岩、辉长岩(U-Pb 年龄 240 Ma)、海苏坝的次闪石化辉石岩(Rb-Sr 年龄 201 Ma)、林西二八地辉长岩(Rb-Sr 年龄 228 Ma),它们均侵位于二叠纪地层中。从大兴安岭林西县到喀喇沁旗地区,发现了一系列以捕虏体赋存在闪长岩(K-Ar 年龄 237~214 Ma)中堆晶岩,

它们大者达 0.6 km<sup>2</sup>,具有典型层状火成岩的结构特征。在喀喇沁旗地区的大营子闪长岩中还发现了基性(SiO<sub>2</sub> 含量 42%~52%)麻粒岩捕虏体,它们的原岩可能是堆晶岩,以含有紫苏辉石、金云母和高镁低铁区别于华北克拉通结晶基底变质岩系,二辉石温度计计算的温度为 850~950℃,形成深度<35 km。此外,在华北克拉通地区还发现了早中生代的碱性岩或偏碱性的超基性岩,在内蒙古包头、四子王旗、凉城、天镇和察哈尔右旗还有一系列霓辉正长岩、正长岩分布。它们都是来源于地幔,形成在下地壳的一套深成岩-变质岩组合。

这套深源岩石同位素年龄集中在 240~202 Ma。这批年龄显示了华北地区早中生代的一次重要热事件,它们是早中生代软流层上涌底侵作用的产物,标志了中生代一个新的构造-岩浆活动的开始,是中国东部软流圈上涌造山演化过程中构造-岩浆活动的开始。从这些岩石的 Sr-Nd 同位素特征看,它们绝大部分来自富集地幔。有些层状岩体在下地壳底部的岩浆房中经历了堆晶过程,如河北矾山的层状辉石岩;山东甲子山辉石正长岩中的辉石岩、辉长岩包体。紧随其后有 177~198 Ma 玄武岩类的火山活动。

上述中生代的碱性-超基性岩体、堆晶岩、麻粒岩是热的软流层物质上涌使岩石圈地幔发生熔融形成的岩浆沿岩石圈破裂带上升底侵的产物。这次底侵作用代表了中国东部构造格局转换过程中深部作用的重要地质记录,也是中国东部新的地质演化阶段的开始。它也表明,中国东部陆块在印支期拼合形成统一的中国东部大陆以后,其深部并不平静,开始了深部软流层物质自下而上改造中国东部大陆岩石圈演化过程。

## 1.3 中生代火山-深成岩浆源区主要与软流层上涌作用关系密切<sup>①</sup>

(1)中国东部火山-深成岩在一系列特征上,既不同于经典的代表洋壳向陆壳俯冲形成的安第斯型大陆边缘弧与岛弧火成岩类,亦不同于经典的代表陆陆碰撞形成的火成岩类,也不同于经典的代表大陆裂谷环境下形成的碱性火成岩类,其形成机制很难用上述中的任何一个模式统一解释。如中国东部大陆中生代普遍缺乏经典的俯冲型特有的英云闪长岩和奥长花岗岩组合,缺少经典的代表陆陆碰撞花岗岩类最明显特点的与弧火山岩成对的白云母花岗岩带,而具有其独特特征的玄武粗安质、粗安质火山岩和相应的辉长二长岩、二长岩火成岩组合。按照国际火成岩分类基本上都属粗面玄武岩、玄武粗安岩、粗安岩、粗面英安岩的高硅流纹岩系列,以及与钙碱性系列之间的过渡类型的火山岩,即略富碱和高钾的钙碱性系列火成岩。这一组合与岛弧和活动陆缘的钙碱性安山岩完全不同。

地球化学特征上与安第斯弧和美国西部大陆边缘弧也不同,普遍具富碱、高钾特点,锆和钼含量较高; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  较低、 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  较高。

① 肖庆辉.中国花岗岩重大地质问题研究报告,2004.

(2)多数岩浆岩来源于地幔,其中大多被认为与软流层上涌作用有关,如大兴安岭中南段中生代火山-深成岩的活动高潮发生在早白垩世(150~120 Ma),出露面积占该区75%。其中晚中生代中酸性火山岩是一套钾质粗面质岩石,基性火山岩属于所谓板内碱性玄武岩和少量大陆拉斑玄武岩,稀土配分曲线无铕异常( $\delta\text{Eu}$  0.61~1.39,多数接近1),说明火山岩是壳幔混源型岩浆。 $\text{Sr}$ 、 $\text{Nd}$ 同位素比值与微量元素比值如( $\text{Ba}/\text{Nb}$ )之间具有良好的线性关系,排除了由洋壳俯冲作用引起火山岩 $\text{Nb}$ 、 $\text{Ta}$ 亏损的可能性。又如大兴安岭中东段地区绝大部分火山岩的微量元素比值(大离子亲石元素/高场强元素)接近于正常洋中脊玄武岩(N-MORB),明显不同于岛弧火山岩或富集型洋中脊玄武岩(E-MORB),既暗示其成因与俯冲作用无关,也说明其源区不是富集型的。大兴安岭中生代火山岩和花岗岩的 $\text{Sr}$ - $\text{Nd}$ 同位素组成稳定, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于-1.33~+4,绝大多数集中在+1~+2,初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值多数集中在0.705左右,变化范围大,表明岩浆中地幔物质参与明显。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值的相关关系显示 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值低,多数0.704~0.706,而 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值多数很高,-2~+6,表明岩浆中地幔物质的参与非常明显,它可能表明该区地幔与软流层上涌有关,不存在古俯冲带物质或再循环地壳物质的混染<sup>[17-21]</sup>(图1)。

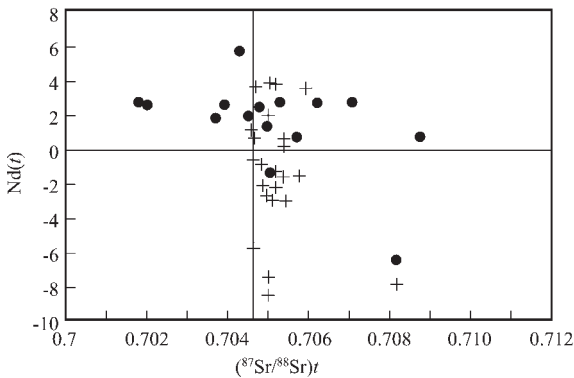


图1 大兴安岭火山-深成岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系图<sup>[18]</sup>  
Fig.1 Initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios vs.  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  of the Mesozoic volcanic-plutonic rocks from the Da Hinggan Mountains

在燕山地区,大部分中生代火成岩的源区性质也主要与软流层上涌有关,不存在古俯冲带物质,幔源玄武质岩浆来源于对流地幔(或软流层)的二辉橄橄岩,不是古老的岩石圈地幔的方辉橄橄岩的局部熔融。如白垩纪早期的上庄辉长岩 $\text{Nb}/\text{U}=34\sim 37.85$ ;薛家石梁角闪辉长岩 $\text{Nb}/\text{U}=43.65$ ;棋盘岩辉长岩 $\text{Nb}/\text{U}=40.13$ ,根据Hofman(1997) $\text{Nb}/\text{U}$ 比值30为原始地幔,40~60为原始地幔经部分熔融的产物作为玄武质

岩石幔源示踪剂的判别指标,燕山地区这些基性岩可能是原始地幔经部分熔融的产物<sup>②</sup>(图2)。

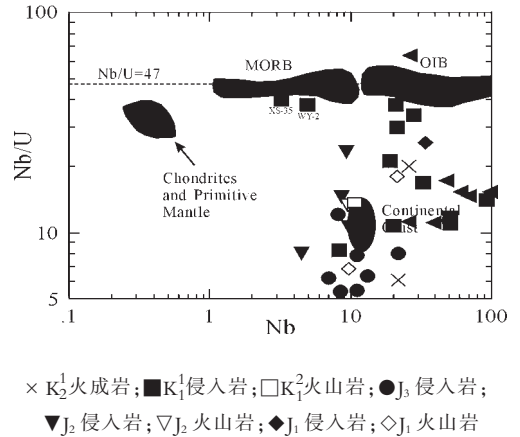


图2 燕山地区中生代火成岩 $\text{Nb}-\text{Nb}/\text{U}$ 图  
Fig.2  $\text{Nb}-\text{Nb}/\text{U}$  diagram of Mesozoic igneous rocks in the Yanshan area

另外 $\text{Pb}$ 同位素和 $\text{Nd}-\text{Sr}$ 同位素联合约束也表明,燕山造山带中生代幔源玄武质岩浆来源于对流地幔(或软流层)。对华北地区燕山期岩浆活动所需热通量供给的数值模拟表明,要产生燕山期如此大量的岩浆活动需要大量的底侵玄武岩岩浆和热通量的注入,而中生代时的岩石圈地幔是冷的,它的热量不足以使下地壳发生部分熔融,只有大规模软流层上涌带来的热才能诱发现存所观察到的燕山期强烈的岩浆活动<sup>①</sup>。特别需要提出的是,中国东部一些侏罗纪-早白垩世的火山岩是由早期造山幕底侵的玄武岩受软流层上涌部分熔融形成的。例如中侏罗世京西髫髻山组及辽西兰旗组以安山岩为主,由中性向偏碱性(粗安岩、粗面岩)、中酸性(英安岩)演化,属钙碱性至高钾钙碱性系列。晚侏罗世东岭台组主要为一套中酸性熔岩和熔结凝灰岩,以酸性流纹岩为主,属高钾钙碱性系列,上面火山岩中段许多还具有类似埃达克岩的地球化学性质<sup>②</sup>。

1.4 构造变形不是陆缘或陆间水平挤压作用产物,而是软流层上涌的垂向作用力转变为水平挤压作用形成的

中国东部中生代造山带构造变形一个显著的特征是地表变形不强烈,推覆构造不十分发育,而且,逆冲推覆构造具多方向、多时代和零散分布的特点,并具有地台基底乃至整个地壳卷入的厚皮构造性质<sup>[8,22]</sup>(图3)。在变形过程中具有整个岩石圈作为应力主导层(stress guide)构造特征,而且应力作用涉及的层次深达地壳和岩石圈地幔,而不是像经典的造山带那样在浅部,特别是壳幔过渡带和岩石圈地幔都受软流

② 邓晋福,等.燕山造山带花岗岩与大陆地壳改造和生长.见:肖庆辉.中国花岗岩重大地质问题研究报告,2004.

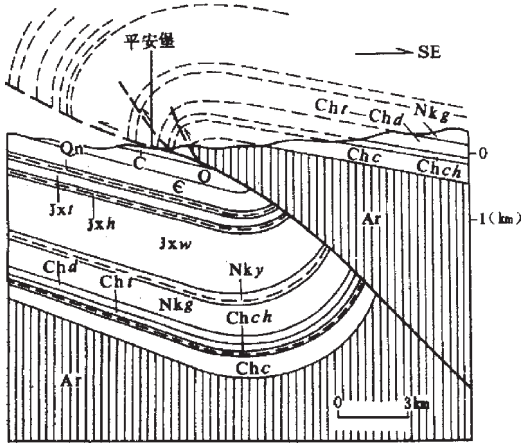


图 3 兴隆逆冲推覆构造平安堡—东南剖剖面<sup>[24]</sup>

C—石炭系;O—奥陶系;ε—寒武系;Qn—青白口系;jxt—铁岭组;  
 Jxh—洪水庄组;jxw—雾迷小组;Nky—杨庄组;Nkg—高于庄组;  
 Chd—大红山谷组;Chr—团山子组;Chch—串岭沟组;Chc—常州沟组;  
 Ar—太古界

Fig.3 Cross section of the Xianglong thrust nappe tectonics from Ping'anbao to Dongnangou.

C—Carboniferous; O—Ordovician; ε—Cambrian; Qn—Qingbaikou System; Jxt—Hongshuizhuang Formation; Jxw—Wumishan Formation; Nky—Yangzhuang Formation; Nkg—Gaoyuzhuang Formaiton; Chd—Dahongshangu Formation; Chr—Tuanshanzi Formation; Chch—Chuanlinggou Formation; Chc—Changzhou Formation; Ar—Archean

圈上涌垂直力的破坏已发生肢解和变形。因此,这些特点与陆缘造山带或陆间碰撞造山带的水平挤压的构造性质明显不同。此外,它们以脆性断裂变形为主,韧性变形在整个造山带中呈点式局限于变质核杂岩附近。褶皱作用较弱,以箱状褶皱为主<sup>[24]</sup>(图 4),它们主要是基底中存在的古构造界面在造山作用期间发生垂直差异运动并引起盖层构造变形形成的。所以,从区域范围看,中生代不同时期构造的形态和性质说明它们不是陆缘水平挤压的产物,而可能是由软流层上涌诱发的断陷和断块垂直作用控制的。

## 2 软流层上涌造山作用的深部构造证据

### 2.1 宏观地震层析图像证据

中国东部地下 60~70 km 深部就开始出现地幔低速层,由浅向深,地幔低速层不但连续而且向深部 100 km 变宽,在深部 150 km 以下几乎连成一片<sup>①</sup>(图 5~8)。从 Liu Mian 等<sup>[24]</sup>朱介寿等<sup>[25]</sup>、蔡学林等<sup>[26]</sup>作的横穿中国与中东部岩石圈的一系列地震层析剖面看,中国东部岩石圈与软流层的界面深度比西部浅,呈现“东浅西深”特征(图 9~11),中国东部岩石圈比西部薄很多,一些地方,如渤海、河淮区在深 60~80 km 范围内就有一些低速层存在(图 5~8)。此外,软流层厚度从西向东加厚,从 150 km 到 300 km。总之中国东部软流层具有整体抬升的特征,且其整体形态呈现非常复杂层状,不

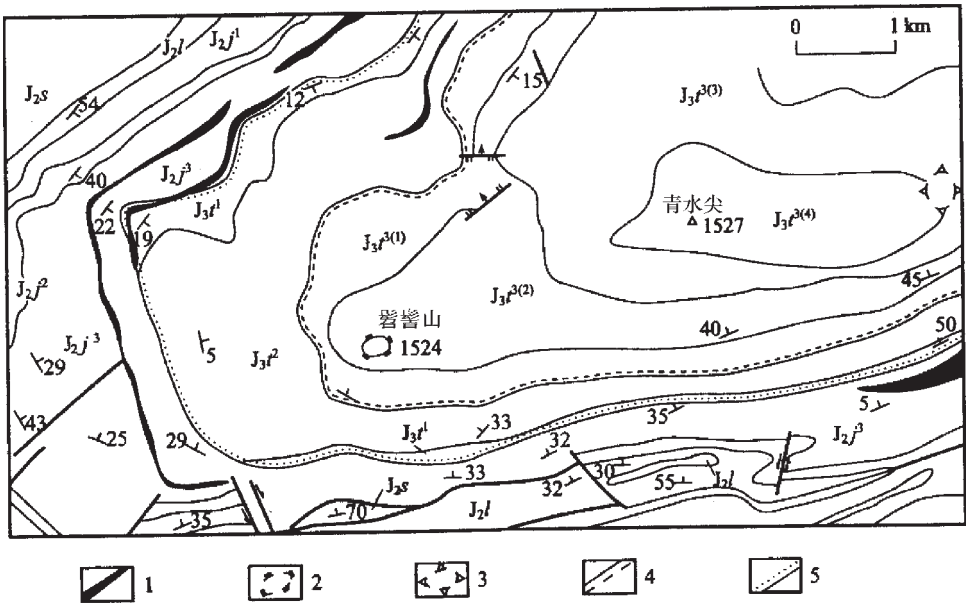


图 4 京西燕山地区箱状褶皱构造地质简图<sup>[24]</sup>

1—闪长玢岩;2—推测穹状火山机构;3—实测锥状火山机构;4—火山喷发不整合界线;5—角度不整合界线;J<sub>2s</sub>—上花园组;  
 J<sub>2j</sub>—龙门组;J<sub>2j</sub>—九龙山组;J<sub>2t</sub>—碧髻山组

Fig.4 Geological sketch map showing the Tiaojishan box syncline in the Yanshan area<sup>[24]</sup>

1—Diorite porphyrite; 2—Inferred volcanic dome edifice; 3—Measured volcanic cone edifice; 4—Unconformity of volcanic eruption; 5—Unconformity. J<sub>2s</sub>—Middle Jurassic Shanghuayuan Formation; J<sub>2j</sub>—Middle Jurassic Longmen Formation; J<sub>2j</sub>—Middle Jurassic Jiulongshan Formation; J<sub>2t</sub>—Late Jurassic Tiaoji Formation

① 邓晋福,等.燕山造山带花岗岩与大陆地壳改造和生长.见:肖庆辉.中国花岗岩重大地质问题研究报告,2004.



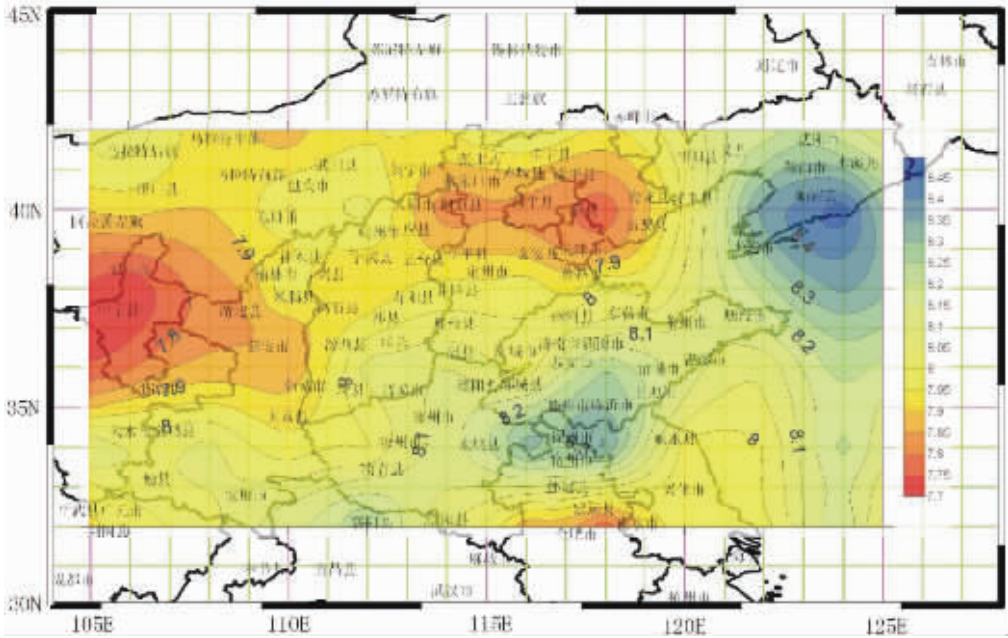


图 5 华北地区 70 km 深处  $V_p$  平面等值线图<sup>①</sup>

Fig.5  $V_p$  plan contour map of the North China region at 70 km depth

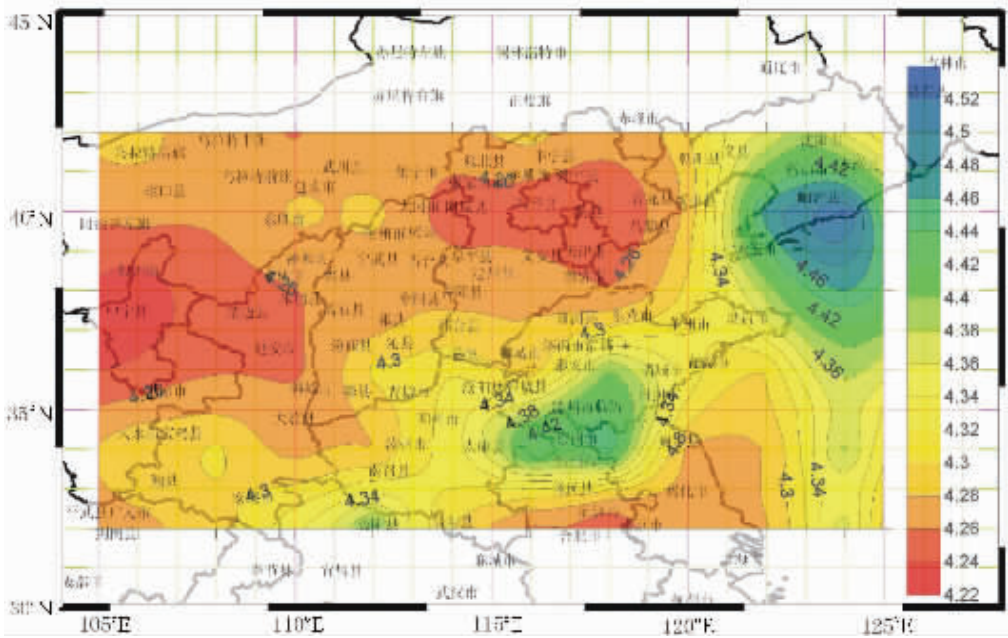


图 6 华北地区 70 km 深处  $V_s$  平面等值线图<sup>①</sup>

Fig.6  $V_s$  plan contour map of the North China region at 70 km depth

① 邓晋福,等.燕山造山带花岗岩与大陆地壳改造和生长.见:肖庆辉.中国花岗岩重大地质问题研究报告,2004.

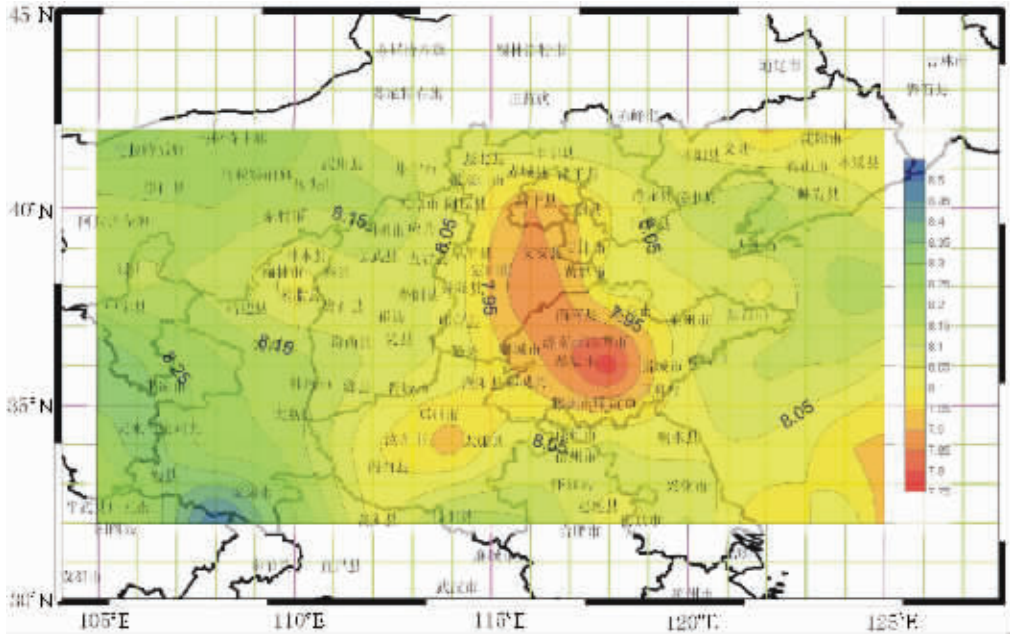


图 7 华北地区 100 km 深处  $V_p$  平面等值线图<sup>①</sup>

Fig.7  $V_p$  plan contour map of the North China region at 100 km depth

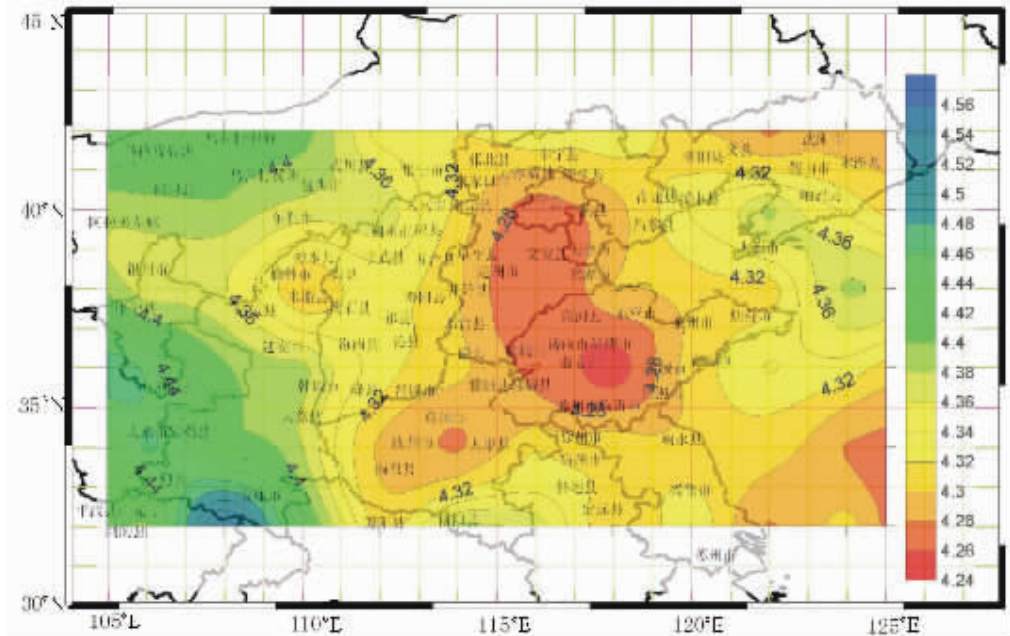


图 8 华北地区 100 km 深处  $V_s$  平面等值线图<sup>②</sup>

Fig.8  $V_s$  plan contour map of the North China region at 100 km depth

①肖庆辉.中国花岗岩重大地质问题研究报告,2004.

②邓晋福,魏文博,于炳松,等.中国华北地区岩石圈三维结构研究.见:李延栋院士主持的国土资源部“十五”中国岩石圈三维结构专项计划序列成果(之三),2006.

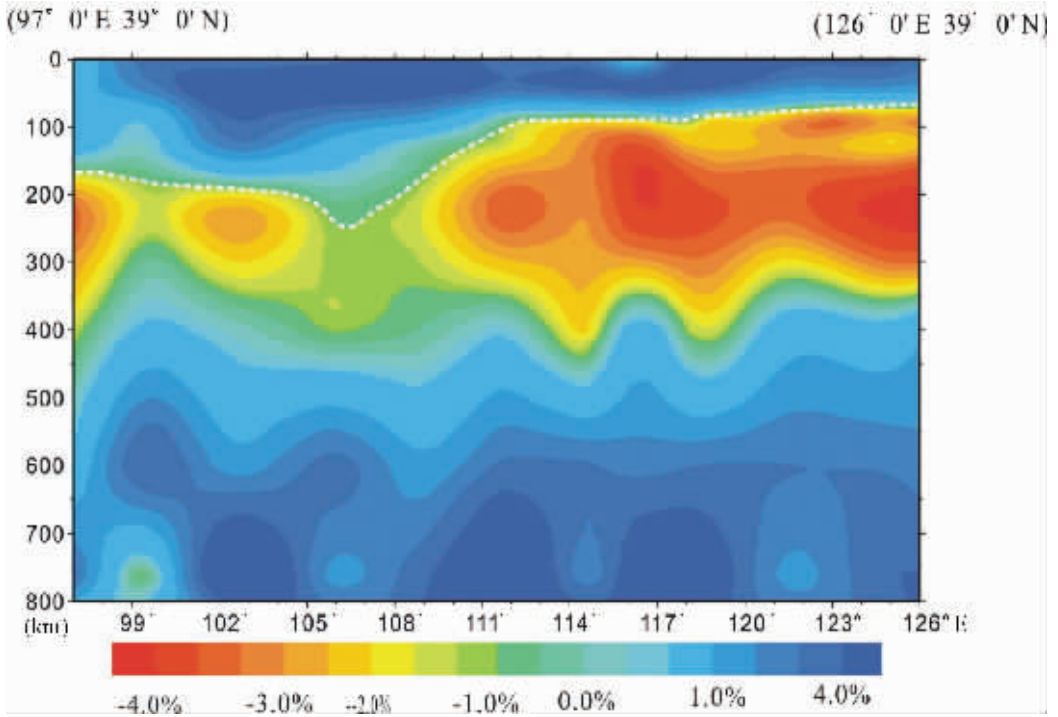


图9 横穿中国东西部地震层析剖面图像<sup>[24]</sup>

Fig.9 Seismic tomographic section across eastern and western China<sup>[24]</sup>

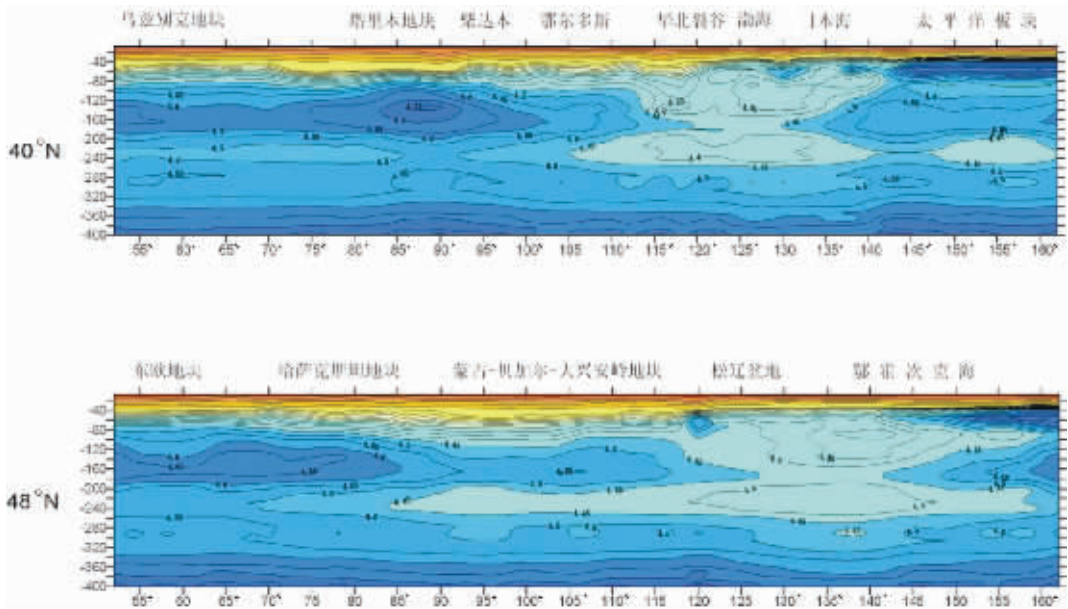


图10 横穿中国华北(40°N)和东北的(48°N)  $V_s$  速度剖面图<sup>[25]</sup>

Fig.10  $V_s$  velocity section across North China (40°N) and Northeast China (48°N)<sup>[25]</sup>



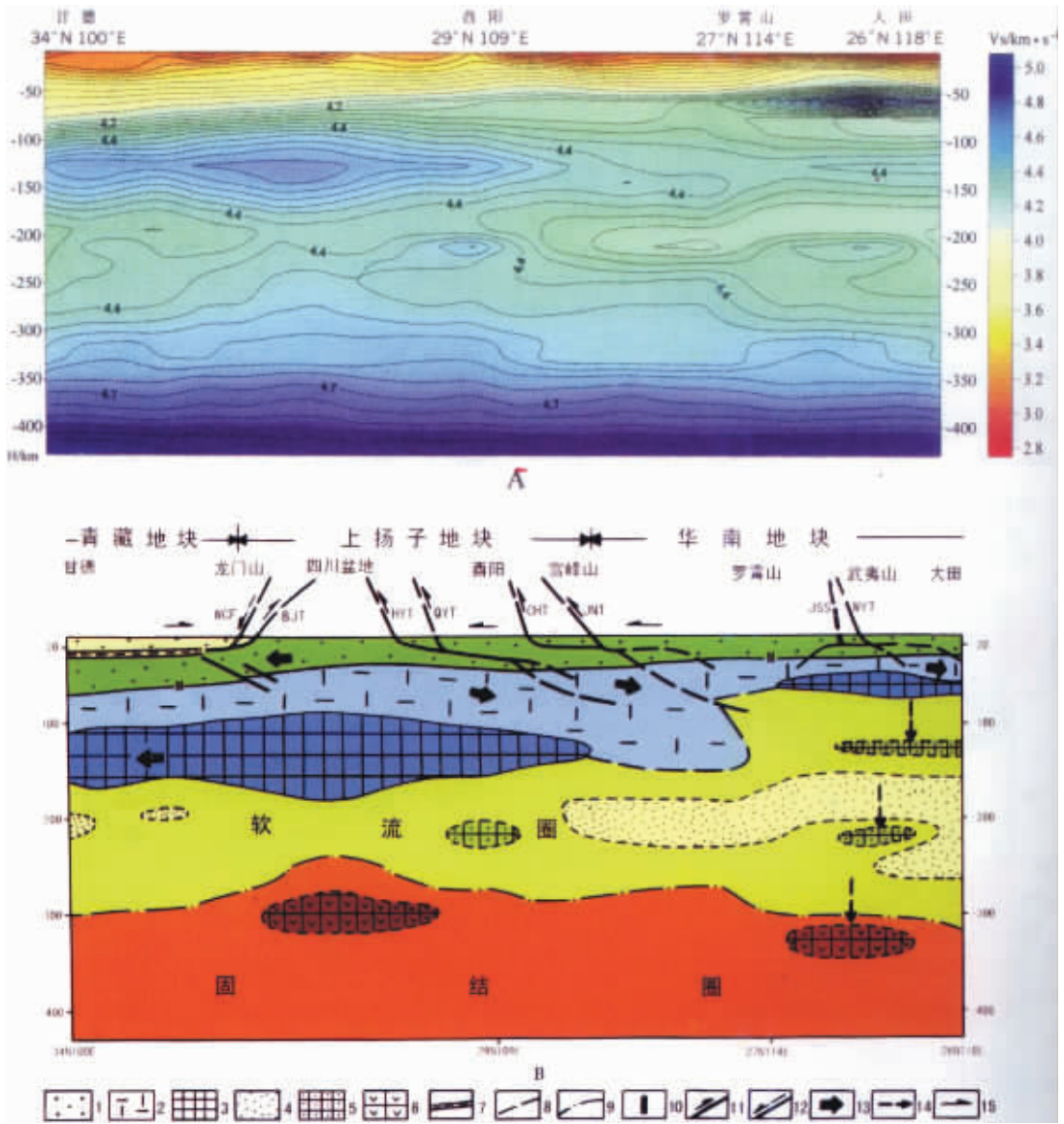


图 11 华南雪峰山—武夷山岩石圈及软流层结构<sup>[20]</sup>

A—华南地区天然地震面波层析成像  $V_s$  速度结构剖面(起点位置 34°N,100°E—终点位置 16°N,118°E);B—地质解析剖面;1—岩石圈地壳;2—岩石圈上地幔;3—青藏地块、上扬子地块及华南地块岩石圈中下部高速块体;4—软流层内部极低速带;5—软流层内部高速块体;6—固结圈内部高速块体;7—壳内低速层;8—岩石圈底界面;9—软流层底界面;10—古板块俯冲碰撞缝合带;11—大型逆冲断裂带;12—早期逆冲断裂带,晚期伸展正断裂带;13—板块及块体相对运移方向;14—岩石圈、软流层高速块体相对下沉方向;15—地壳表层岩块相对运移方向;M—莫霍界面;WCF—汶川早期逆冲断裂带,晚期伸展正断裂带;BJT—北川—九顶山逆冲断裂带;HYT—华蓥山逆冲断裂带;QYT—七曜山逆冲断裂带;CHT—慈利—花埂逆冲断裂带;JNT—江南逆冲断裂带(或淑浦—黔阳逆冲断裂带);JSS—江山—绍兴古板块俯冲碰撞缝合带;WYT—武夷山逆冲断裂带

Fig.11 Lithosphere and asthenosphere structures of the Xuefeng Mountains–Wuyi Mountains

A—Seismic surface-wave tomographic  $V_s$  velocity structure section in the South China region (the location of the starting point: 34°N and 100°E; the location of the terminal point: 16°N and 118°E); B—Geological analysis section. 1—Lithospheric crust; 2—Upper lithospheric mantle; 3—Middle and lower lithospheric high-velocity blocks under the Qinghai-Tibet block, Upper Yangtze block and South China block; 4—Asthenospheric very low-velocity zone; 5—Asthenospheric high-velocity block; 6—Stereospheric high-velocity block; 7—Crustal low-velocity layer; 8—Lower lithospheric boundary; 9—Lower asthenospheric boundary; 10—Paleoplate subduction-collision suture zone; 11—Large-scale thrust fault; 12—Thrust fault zone in the early stage and extensional normal fault zone in the late stage; 13—Direction of relative movement of plates and blocks; 14—Direction of relative movement of lithospheric and asthenospheric high-velocity blocks; 15—Direction of relative movement of supracrustal blocks. M—Moho; WCF—Wenchuan thrust fault zone in the early stage and extensional normal fault zone in the late stage; BJT—Beichuan-Jiudingshan thrust fault zone; YT—Huayingshan thrust fault zone; QYT—Qiyaoshan thrust fault zone; CHT—Cili-Huangeng thrust fault zone; JNT—Jiangnan thrust fault zone (or Xupu-Qianyang thrust fault zone); JSS—Jiangshan-Shaoxing paleoplate subduction-collision suture zone; WYT—Wuyishan thrust fault zone



呈现地幔“柱”构造特征<sup>[24]</sup>(图 9)。在岩石圈与软流层厚度转换地段软流层与岩石圈之间界面形态非常复杂,它与岩石圈之间没有明显界面,而是表现出两者相互交接、侵吞的过渡性质<sup>[25,26]</sup>(图 10~11)。

2.2 华北地区高分辨率地震层析图像证据

袁学诚等<sup>[27]</sup>、路凤香等<sup>[28]</sup>从秦岭及其毗连华北地区的地震层析、爆破地震及反射地震资料出发,将秦岭及华北地区岩石圈划分为 3 层。上岩石圈即地壳,厚 32~34 km,中岩石

圈层面近于水平,厚 25~40 km,是热地幔物质沿垂向通道上升到莫氏面后侧向流动形成的,类似蘑菇云。下岩石圈,高速低速层陡倾并置(图 12)。这些构造现象表明下岩石圈地幔常常具复杂非典型层状结构。

从华北地区高分辨率(0.5°×0.5°)地震层析图像看<sup>[29]</sup>,岩石圈和软流层二者之间界面非常复杂,一般不是典型的水平层状结构,在一些地方它们之间无明显上下分层关系。它们的界面是由低速体与高速体相互穿插,并形成陡接触的特有格局

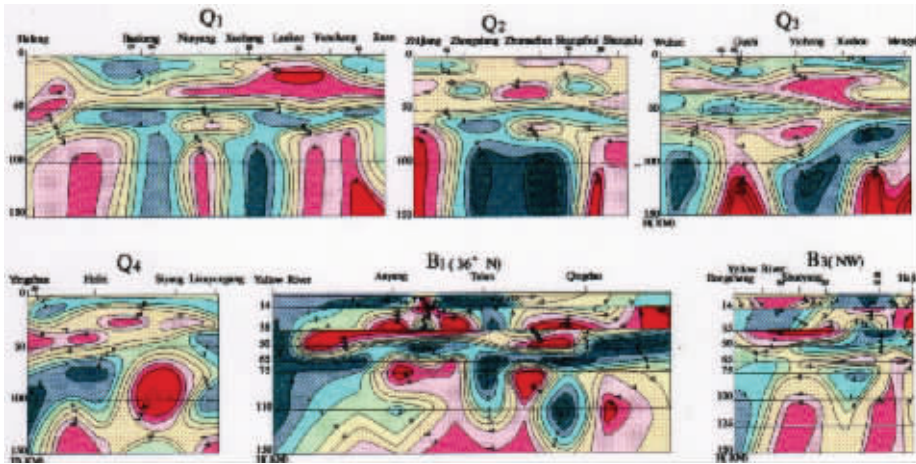


图 12 秦岭及华北地区的地震层析剖面图<sup>[27]</sup>  
等值线上数字为扰动值,粗线为上、中、下岩石圈分界线

Fig.12 Seismic tomographic section across the Qinling Mountains and North China<sup>[27]</sup>

The figures on the contours are perturbation values; the thick lines denote the boundaries of the upper, middle and lower lithosphere

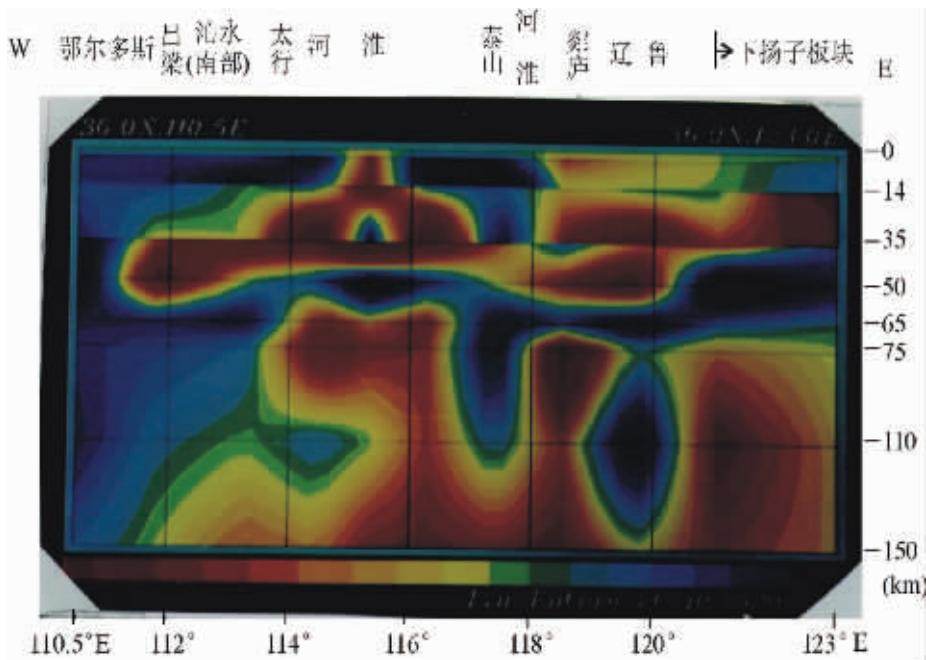


图 13 华北地区沿 36°N 东西向地震层析图像<sup>[29]</sup>

Fig.13 E-W-directed seismic tomographic image along 36°N in North China<sup>[29]</sup>

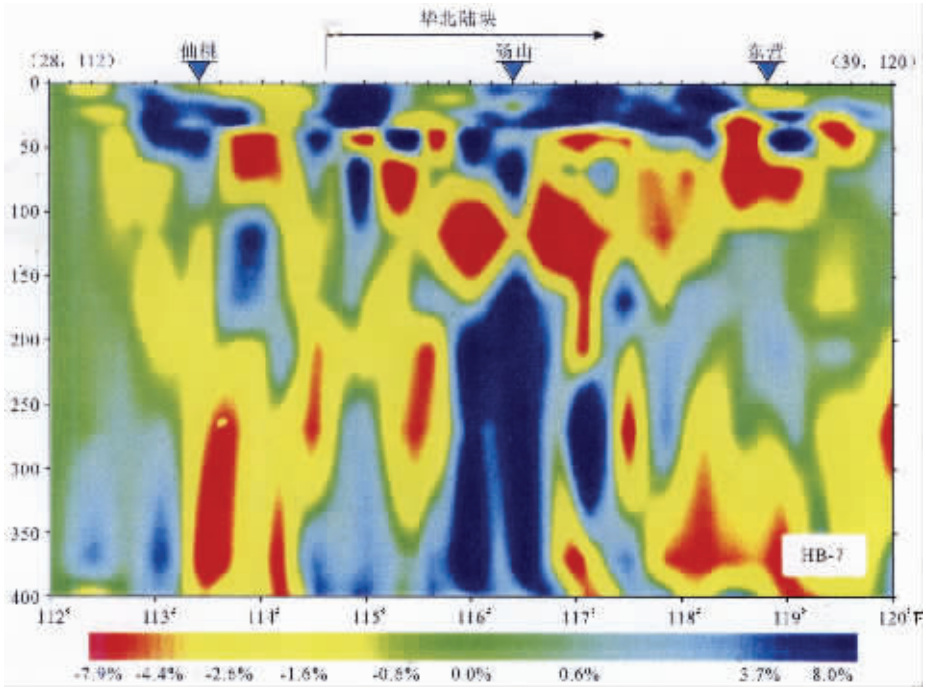


图 14 仙桃—东营地震层析剖面图●

Fig.14 Seismic tomographic section from Xiantao to Dongying

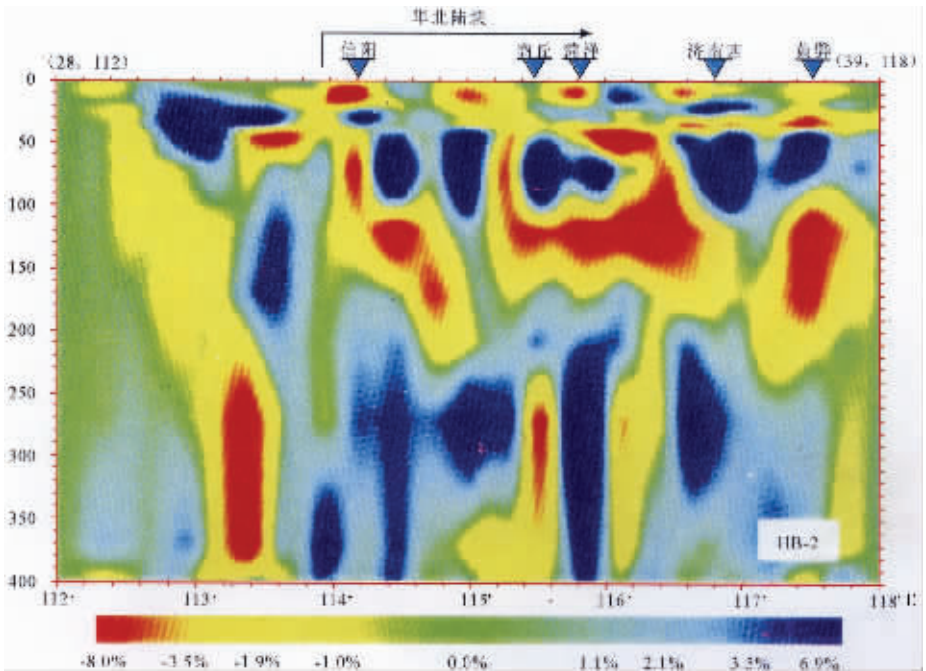


图 15 信阳—黄骅地震层析剖面图●

Fig.15 Seismic tomographic section from Xinyang to Huanghua

① 徐佩芬. 大别苏鲁碰撞造山带地震层析成像及其对超高压变质岩形成与折返的启示, 1998.

(图 13~15),或者由软流层上涌中心向周围岩石圈的内部伸入许多不规则低速体,使岩石圈地幔发生肢解(图 13)。看来岩石圈和软流层二者之间可能存在一个非常复杂转换构造带,故把它称为岩石圈-软流层转换构造带(interchange zone),简称岩流转换带。在这个转换带内,由于岩石圈和软流圈之间发生互冲(interdingitation)和岩石圈沉陷俯冲作用(Sag-Subduction),造成岩石圈和软流层软硬碎块互相穿插,彼此犬牙交错,块体之间边界呈弧形或形成参差不齐的锯齿状。这些构造现象表明,岩石圈和软流层都具有构造活动的特征。

但是,典型的软流层在深 100~150 km 范围内却是联通的,其间存留着一些无“根”的岩石圈地幔(高速)体(图 5~8)。这样,从宏观来看,这些典型的软流层上方伸出不少或零散分布一些大小不等的低速上涌体,路凤香称之为软流体以示与软流层的差别。笔者把它称为软流层上涌运移通道,简称软流层通道。它们是深部的软流层热物质上涌运移穿插侵入于冷的岩石圈地幔中的通道,它把大量对流地幔物质输入岩石圈,具有较强的热、构造活动性,对造山带的形成与发展起到重要作用。这些软流层通道在深 100~150 km 范围内却与典型的软流层联通,它们之间无明显界面。故认为岩石圈地幔深度范围内出现的这些低速体可能是深部的软流层热物质呈“管道通道”上涌穿插侵入于冷的下岩石圈地幔中,把高速岩石圈地幔层大规模肢解并使其呈典型的残留体状存留(图 5~8)。这样在典型的岩石圈地幔深度范围即下岩石圈深度范围内,新的岩石圈地幔与古老的岩石圈地幔的残留体相间排列,它们之间形成陡接触的格局并有过渡状态,在一些地方新的软流层中还具有被拆沉下来的古老岩石圈地幔残留体。软流层上涌的这些特点说明它具有强烈的动力学构造活动特点,而不是以往认为是一个被动层。

### 2.3 地震波速特征

在软流层上涌上部,地震波速常具有异常岩石圈地幔速度特征,在一些典型的岩石圈地幔深度范围内,其低速层速度相当低,为 7.0~7.7 km/s。通常情况,正常的岩石圈地幔上部,相当于镁铁质、超镁铁质的麻粒岩、辉石岩类岩石,地震波速度应为 8.0~8.2 km/s,其上面的地壳速度也偏低,但其大地热流值则普遍较高,为 1.7~2.0 HFU,是大面积的地热异常区。表明软流层上涌区受中、新生代壳—幔相互作用强烈改造的岩石圈地幔,至今仍具有较强的热、构造活动性。总之,软流层上涌区为典型的“热”块、“软”块,其上地幔流变性较强,突出呈现“构造岩石圈”的特色。

### 2.4 不同大地构造单元的岩石圈深部呈现不同的构造景观

造山带深部突出呈现出“构造岩石圈”的特色。如燕山造山带地区深部构造具有以下特点:

(1) 在 50~75 km 深度,有来自南东方向河淮软流层上涌中心顶部的一低速层。其厚 20 km 左右,它将本区岩石圈地幔横向截断,使莫霍面以下的岩石圈地幔顶部仅剩余 10 km 厚左右,甚至使它几乎与下地壳联通,岩石圈似发生大规模拆沉(图 16)。(2) P 波速度表明,燕山地区岩石圈地幔速度甚高,仅次于鄂尔多斯,达 8.2~9.2 km/s,而位于 60 km 深度低速层波速却相当低,6.6~7.6 km/s,说明其已发生了减压熔融或部分熔融。(3) 燕山地区中生代构造岩浆活动十分强烈,尤其是中深幔源的中酸性岩浆活动非常强烈,形成典型的燕山构造-岩浆带。而且构造岩浆活动剧烈的地区,其深部对应着 60 km 深的较厚的软流层上涌低速体。该低速层向西南方即向五台—恒山地区延伸时明显减薄。与此相应,五台—恒山地区的燕山期幔源中酸性岩浆活动相对于燕山地区亦明显减弱;再往西至晋北区块中部,该低速层消失,地表

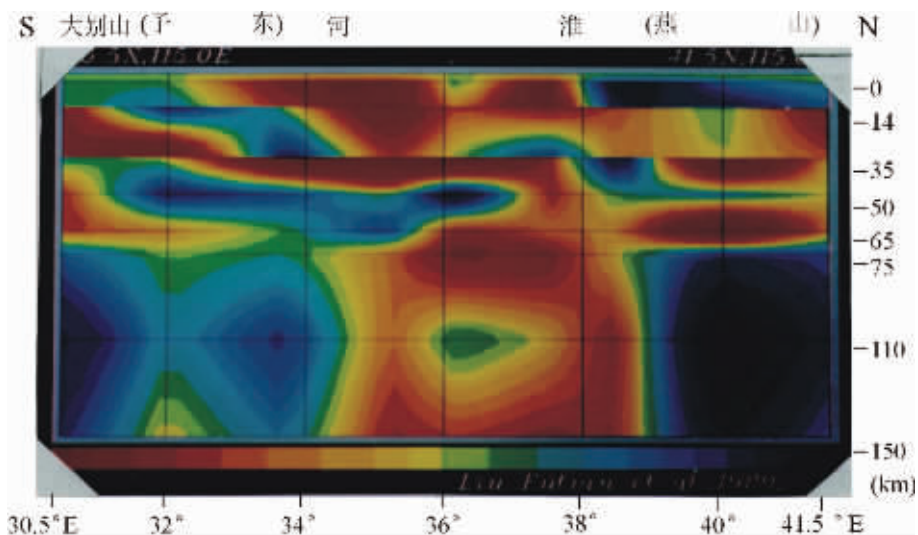


图 16 沿 115°E 南北向地震层析剖面,表示燕山造山带地区深部构造<sup>[29]</sup>

Fig.16 N-S-directed seismic tomographic section along 115°E, showing the deep structure in the Yanshan orogenic belt<sup>[29]</sup>



基本无岩浆活动(图 16)。

再如大兴安岭造山带地区深部构造十分特殊,其构造岩浆活动强烈地区的深部对应着软流层上涌区及其诱发形成的壳内低速层<sup>[9]</sup>。电性及地震波速结构显示深度 40~70 km 的上地幔内存在宽 90 km 的低阻区,电阻率<400 Ω·m,它可能代表了该区的一个软流层上涌体。在其上面的中、上地壳中还存在两个低速层,其下方不存在山根。在林西一带,中地壳下部有宽约 20 km 透镜状低速层,波速只有 6.3 km/s,与大地电磁测深发现的高层层吻合,反映中地壳发育了水平伸展与流变(a)。下地壳厚约 5 km,底部有壳-幔过渡带,与软流物质上涌形成基性岩浆底侵作用和水平剪切作用有关,底部 Vp 速度 7.0~8.0 km/s,比经典的地壳波速 5.8~6.5 km/s

高,比经典的上地幔波速 8.0~8.3 km/s 低很多(图 17)。

除上述特征以外,软流层上涌形成的造山带在区域大地构造位置、造山带构造格局、构造变形与变质作用、岩浆活动与沉积作用、造山带构造演化等方面都与陆缘和陆间造山带明显不同<sup>[9]</sup>。软流层上涌造山带形成于大陆岩石圈板块内部;造山带内部构造单元展布不平行于造山带走向,即不具有线状构造格局;构造变形具有基底乃至整个地壳卷入的厚皮构造性质;同造山区域变质作用微弱;同造山岩浆活动、沉积作用和构造变形均无极性演化趋势。其中这类造山带一个非常独特的特点是主造山作用前期缺乏巨厚的地槽型沉积,这是因为造山带地壳的缩短和加厚是通过中下部岩石圈层物质的塑性流动和岩浆活动导致岩石圈内部物质向上、下

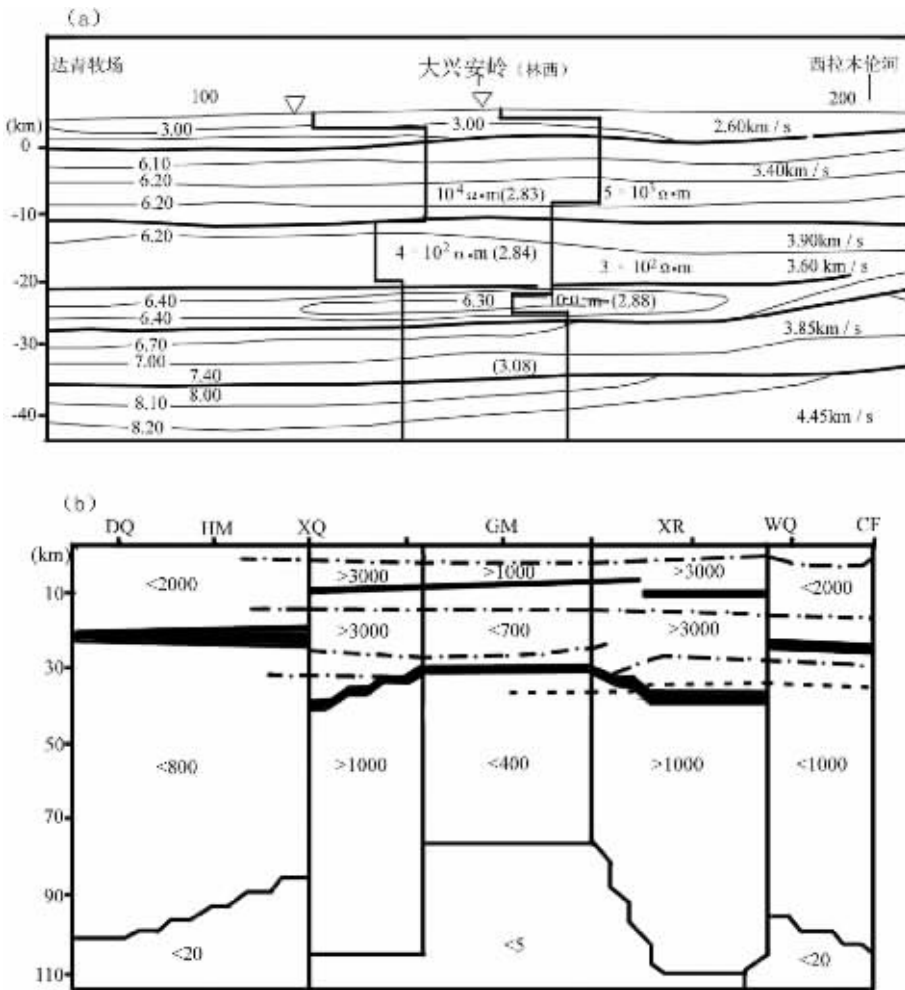


图 17 大兴安岭深部构造图<sup>[30]</sup>

- (a)—穿过大兴安岭的地质断面(截取国家地震局的东沟—东乌珠穆沁旗地质断面,1992);
- (b)—电性及地震波速结构图,图中数字为特征电阻率,单位为  $\Omega \cdot m$ ,黑色区表示低阻层,特征电阻率为  $<10 \Omega \cdot m$ ;DQ—东乌珠穆沁旗;HM—贺根山;XQ—西乌珠穆沁旗,GM—大兴安岭;XR—西拉木伦河;WQ—翁牛特旗;CF—赤峰

Fig.17 Deep structure of the Da Hinggan Mountains<sup>[30]</sup>

- (a)—Geoscience transect across the Da Hinggan Mountains (Donggou—East Ujimqin Qi geoscience transect of the State Seismological Bureau, 1992);
- (b)—Electric and seismic wave velocity structure; in the diagram the figures are characteristic electric resistivity (unit:  $\Omega \cdot m$ ), the black field denotes the low-resistivity layer and the characteristic resistivity is  $<10 \Omega \cdot m$ ; DQ—East Ujimqin Qi; HM—Hegen Mountains; XQ—West Ujimqin Qi; GM— Da Hinggan Mountains; XR—Xar Moron River; WQ—Ongniud Qi; CF—Chifeng

两个方向加厚实现的。因此,它们对上部地壳自始至终产生向上的挤压作用,使得中国东部造山带从来就没有发生大型凹陷,自始至终处于隆升过程中,因而缺乏巨厚的地槽型沉积。

### 3 中国东部软流层上涌造山作用模式

中国东部软流层上涌造山作用是全球重要构造-热事件之一。从全球角度看,二叠纪亚洲洋封闭以后形成了Pangea大陆,但其寿命不长,三叠纪便开始解体。这一解体构造事件开始了全球深部软流层发生重大调整和海陆分布格局重大变革和全球板块构造重组。这一变化与地球内部能量和全球深部对流地幔格局发生重大变化有关。它首先在Pangea的东缘发生裂开,形成向东开启的三角形特提斯洋海湾。这时在Pangea大陆深部对流地幔发生上涌,但在中国和亚洲东部大陆深部发生对流地幔下沉,这一向下对流拉力导致中国和亚洲东部整个大陆深部自始至终处于挤压构造背景下。其结果导致软流层上涌,开始了中国东部软流层上涌造山作用,其造山演化过程大致可分为以下3个阶段:

#### 3.1 中生代(以230~180 Ma为主)的前和初始造山幕(图18),为岩石圈线状裂解阶段

在中国和亚洲东部整个大陆深部自始至终处于挤压构造背景下,加上再受Pangea泛大陆东部边缘裂解影响,中国东部大陆受到Pangea大陆西北和西南方向裂解成特提斯洋的侧向挤压,结果深部软流层物质发生上涌,导致大陆岩石圈发生线状破裂,印支期才拼合在一起的中国东部岩石圈还未来得及焊接加固就开始受到肢解。软流层物质上涌的热能和向上动力,一方面使岩石圈地幔发生熔融与破裂,形成玄武岩岩浆并上侵,另一方面由于其减压熔融也形成玄武岩浆。这两种不同成因的玄武岩浆底侵于下地壳及其壳幔边

界,软流圈物质带来的热把下地壳直接突然升温,发生部分熔融和塑性化,也使岩石圈上地幔岩石塑性化变形而发生进一步破裂下沉,导致整个岩石圈发生线状破裂和玄武质岩浆沿线状破裂底侵于地壳不同部位,这样来自软流层或岩石圈地幔熔融产生的玄武质岩浆不断添加到岩石圈下地壳,或者以岩墙群方式进入中上部地壳,也包括在下地壳形成的壳幔混熔岩浆对上地壳的添加和破坏,并发生了以下重大构造事件。

(1) 岩石圈上部地壳大面积上升和局部拉张盆地环境的形成。软流层上涌造山的最大特点是软流层物质垂直上涌和向两侧的伸展作用自始至终控制着造山带的演化。前和初始造山带期间,软流圈上涌对岩石圈起着一种顶托的作用和向两侧的拉伸剪切。因此,尽管整个中国东部当时处于挤压构造背景下,但软流圈上涌中心部位地区却会大面积隆升,并在局部地方形成扩张环境,再如中亚—蒙古造山带东亚地段,在二叠纪末—三叠纪时地表大面积隆升、剥蚀,局部地区形成了早中生代(224~208 Ma)的变质核杂岩,暗示着这些地区早中生代时存在软流层物质上涌<sup>[2]</sup>。

(2) 软流层物质上涌诱发形成的玄武岩浆底侵于下地壳底部,在中国东部形成广泛分布的中生代早期镁铁-超镁铁岩<sup>[2]</sup>。如近年来从大兴安岭到华北和华南都发现了一系列年代学数据主要是213~190 Ma早中生代镁铁质-超镁铁质侵入岩、堆晶岩、麻粒岩以及碱性基性岩或碱性超基性岩,经研究它们是早中生代软流层上涌诱发的底侵作用的产物,标志了中生代一个新的构造-岩浆活动的起始,也是中国东部软流层上涌造山演化过程中不可忽略的一个重要阶段与记录。

(3) 在上地壳产生了早期的主要挠曲伸展盆地,但与此同时也形成了一些早期的地堑盆地或裂谷盆地<sup>[2]</sup>。这些早期

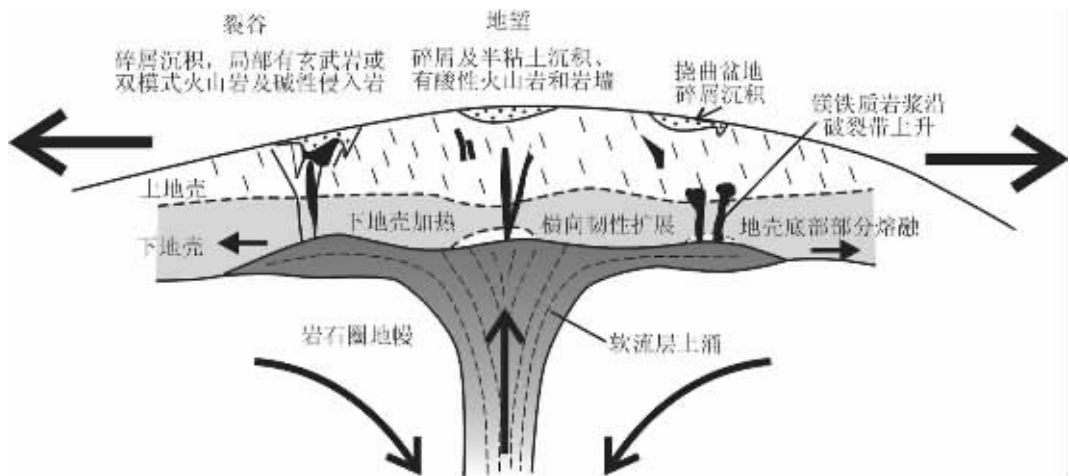


图18 前和初始造山幕岩石圈形成模式

Fig.18 Model for the formation of the lithosphere in the pre-and early-orogenic phases

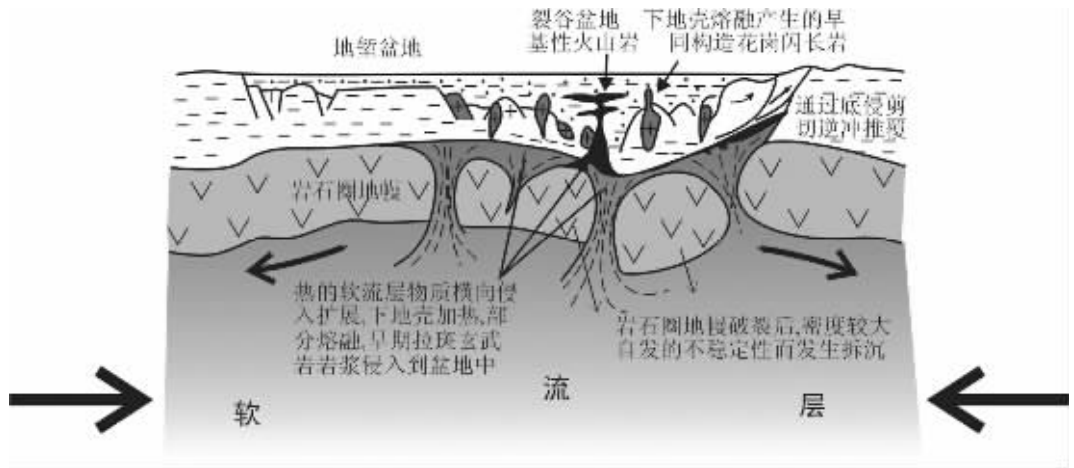


图 19 主造山幕岩石圈形成模式

Fig.19 Model for the formation of the lithosphere in the main orogenic phase

裂谷盆地是主动裂谷盆地,是软流层上涌导致形成的。其特征是基性火山活动发生在沉积作用之前,如在华北早侏罗世南大岭组底部是以玄武岩为主的火山岩组合的裂谷火山-沉积岩系。

(4) 软流层上涌导致地幔源区部分熔融形成以玄武岩为主的火山作用,例如早侏罗世南大岭组玄武岩岩浆的喷溢,揭开了燕山造山期的序幕。玄武岩岩浆显示了陆内软流层地幔物质上涌造山的特色,表现在这些火山沉积岩岩层远离基底断裂厚度明显变薄。

(5) 形成了印支期向南的逆冲构造 (>188 Ma, 或>199 Ma),如 Davis 等<sup>[24]</sup>在河北承德地区发现了早于 180 Ma 向南的平泉—古北口逆冲断层,认为冀北和辽西的大部分地区都经历了这次强烈的向南的逆冲和褶曲变形,这些逆冲推覆构造导致陆壳初步加厚。

3.2 侏罗世(以 205~140 Ma 为主)主造山幕,是软流层大规模上涌及岩石圈发生缩短和形成加厚陆壳山根的阶段(图 19)

侏罗纪时,西伯利亚陆块开始发生与欧亚大陆的拼合过程。在此过程中,蒙古鄂霍次克洋向北和向南俯冲碰撞。此时中国东部大陆的北部受蒙古鄂霍次克洋俯冲碰撞挤压<sup>[24]</sup>,而南部和西部则受特提斯洋闭合的推挤作用,东部则受伊泽奈奇板块挤压影响,其深部软流层在南、北、东、西四面受挤压作用下,进一步发生大规模上涌,使中国东部早先已受肢解过的岩石圈由裂解进入到发生大规模层间变形缩短形成山根与部分岩石圈拆沉新阶段。在此阶段发生了如下重大构造事件:

(1) 软流层物质沿肢解过的岩石圈底面进一步上涌,并在岩石圈地幔底部与壳-幔边界强行横向侵入和伸展。结果

一方面发生大规模的加热作用及部分熔融作用,引起岩石圈地幔和中下地壳弱化和蠕变,一方面形成层间剪切作用,并导致形成韧性剪切流动和蠕动,进而发生背离软流层中心的逆冲推覆构造。结果在软流层中心或盆地边缘形成盆地边缘的逆冲推覆构造和地壳加厚形成山脉的现象<sup>[24]</sup>。这一有序化过程使圈层之间热软弱层和岩流层夹层不断成了岩石圈中占主导的最活跃的圈层之间的活动构造。在主造山幕演化的中晚期,当软流层物质冷却停止向两侧伸展时,应力方向发生了逆向转化,这时,在水平挤压力作用下,这些软弱层发生向软流圈上涌中心或热中心流动或蠕动挤压缩短,结果在软流层上涌中心及其附近造成地壳加厚和同造山抬升,热穹隆式变质核心杂岩就是这种塑性流动的产物之一。此外,在强烈的挤压下,还导致远离山根或热能中心的较冷的陆壳向山根热中心移动,甚至会发生俯冲,发生岩石圈沉陷俯冲作用或岩石圈和软流层之间的互冲作用,使陆壳进一步缩短、加厚和隆升,这种俯冲作用笔者称为沉降俯冲或互冲作用。与此同时,向山根或热中心运移或俯冲的陆壳岩石在热中心变得不稳定,发生脱水 and 去长石化,形成高密度的榴辉岩。在榴辉岩化过程中,由于去硅、钾、铝等组分结果,会在榴辉岩形成过程中同时形成了正长质或富钾花岗岩浆。

总之,软流层上涌的垂向差异运动及其伴生的水平剪切挤压作用使壳幔圈层间形成了热软弱层和岩流层夹层,并伴生水平剪切挤压作用,其结果地壳发生褶皱变形和推覆构造,如燕山地区中侏罗世末发生了一次重要的明显的挤压褶皱变形,致使中、上侏罗统之间为角度不整合接触。

(2) 软流层上涌及其诱发的底侵作用对下地壳加热导致形成同造山期和一部分造山期后幔源高钾钙碱性花岗岩浆活动与大规模火山作用,它们对中、上地壳的侵位、添加,



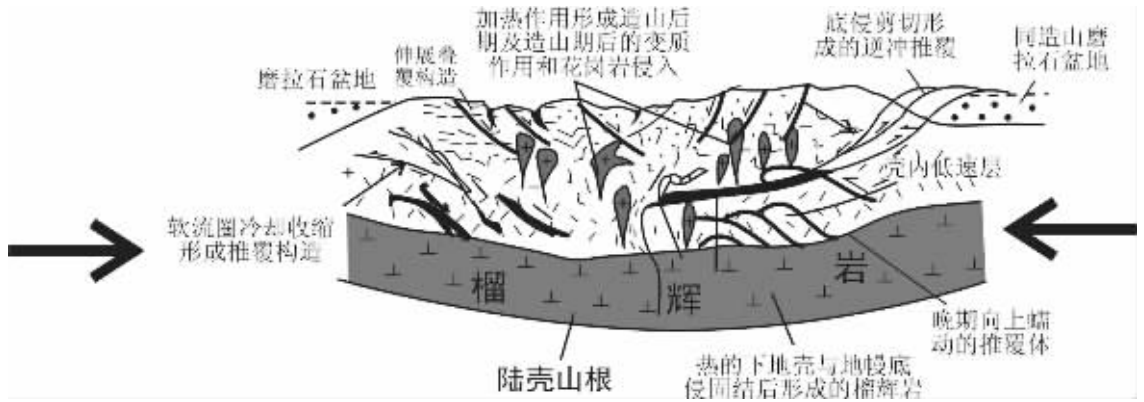


图 20 陆壳不断加厚形成巨大高密度的榴辉岩山根模式

Fig.20 Model for the formation of the huge high-density eclogite root due to continued thickening of continental crust

使陆壳增厚和成熟度提高。这期花岗岩属 I 型花岗岩类,为典型的高钾钙碱性系列。在强烈的水平挤压体制下,它们定位于地壳浅部。如在兴蒙—吉黑地区,形成了张广才岭地区、延边地区以中生代为主,主体年龄为 220~160 Ma 花岗岩<sup>①</sup>。在燕山地区形成了云蒙山花岗质片麻岩(142~143 Ma),沙坨子和五道河花岗质眼球状片麻岩(151±2 Ma, 141±2 Ma)、石城辉长—闪长质片麻岩(159±2 Ma),长园闪长质片麻岩。这些岩体变质程度已达角闪岩相,是在中地壳深度形成的。其中闪长质片麻岩侵入体的锆石不含继承组分,显然是从地幔中分出的新生(Juvenile)物质<sup>②</sup>。

(3) 软流层上涌诱发的底侵作用还会造成下地壳强反射和高、低速相间的薄互层壳—幔过渡(带)层和 Moho 面平坦的现象,反映了软流层物质上涌、侵入、地壳增温、张裂等塑、脆性变形改造形成新生地壳构造。软流层上涌加热作用还会引起中、上地壳加热而弱化,导致形成中、上地壳低速层。中国东部大陆中、上地壳中存在多个低速层就是软流层物质上涌作用诱发的产物。早—中侏罗世辉绿岩岩墙群、玄武岩及安粗岩系列火山岩也是中、上部地壳岩浆活动表现。

(4) 主造山幕晚期深部软流层继续进一步上涌横向侵入和伸展到不断加厚陆壳山根与未加厚的岩石圈根的下地壳,常形成跨越式接触。这时加厚陆壳山根底部和岩石圈地幔边界进一步发生大规模加热而弱化,形成更厚的热的弱化的流变层,其流变学条件更有利于收缩构造变形和陆壳加厚。在这种收缩构造环境下,陆壳山根进一步加厚到 50~60 km,此时软流层继续进一步上涌,大规模加热作用引起早期底侵物质形成以汉诺坝玄武岩中麻粒岩相斜长辉石岩和榴

辉岩相岩石为代表的 140~120 Ma 变质的麻粒岩,这样陆壳不断加厚形成了巨大高密度的榴辉岩山根,为早白垩世岩石圈根发生全面拆沉准备了条件(图 20)。

**3.3 早白垩世(以 140~96 Ma 为主)的晚期造山幕(图 21),** 岩石圈发生大规模面型拆沉和减薄,软流层上涌使古老岩石圈地幔发生进一步肢解和变形,并由亏损地幔转化成富集地幔以及形成新陆壳与岩石圈地幔的阶段

此时蒙古鄂霍次克洋盆开始关闭,西伯利亚大陆开始完成与欧亚大陆拼合过程,太平洋板块形成并向西俯冲,而南部特提斯洋进一步闭合。中国东部大陆深部在南、北、东三面挤压受力作用下,特别是在太平洋板块俯冲作用下,深部软流层继续发生上涌底侵。此时晚侏罗世主造山幕形成的加厚高密度榴辉岩山根堆积也已达到某一临界体积。在它的下沉拉力共同作用下,岩石圈发生破裂拆沉和巨大减薄。在此过程中,在岩石圈底部,深部软流层取代原先岩石圈根的位置,并导致软流层地幔发生减压熔融形成玄武岩岩浆并大规模底侵在壳—幔边界,一方面肢解古老岩石圈地幔,形成了岩石圈—软流层界面深度范围内的或下岩石圈范围内的地幔低速体与高速体相间排列,并形成间接接触的格局的特有的深部构造景观,另一方面也使下地壳和早先难熔地壳发生部分熔融形成正长质和碱性花岗岩浆。由于岩石圈大规模的拆沉,被拆沉的古生代以前的古老的岩石圈(包括部分下地壳和全部岩石圈地幔)沉入到软流圈,软流圈的高温又导致其发生部分熔融并与软流层混合导致最终岩浆具有 EM1 的特征。由于地壳重循环进入地幔,改变了地幔的成分,使造山带地区由显生宙以前的亏损地幔转变为中生代的富集地幔。随

① 邓晋福,等. 燕山造山带花岗岩与大陆地壳改造和生长.见:肖庆辉.中国花岗岩重大地质问题研究报告,2004.

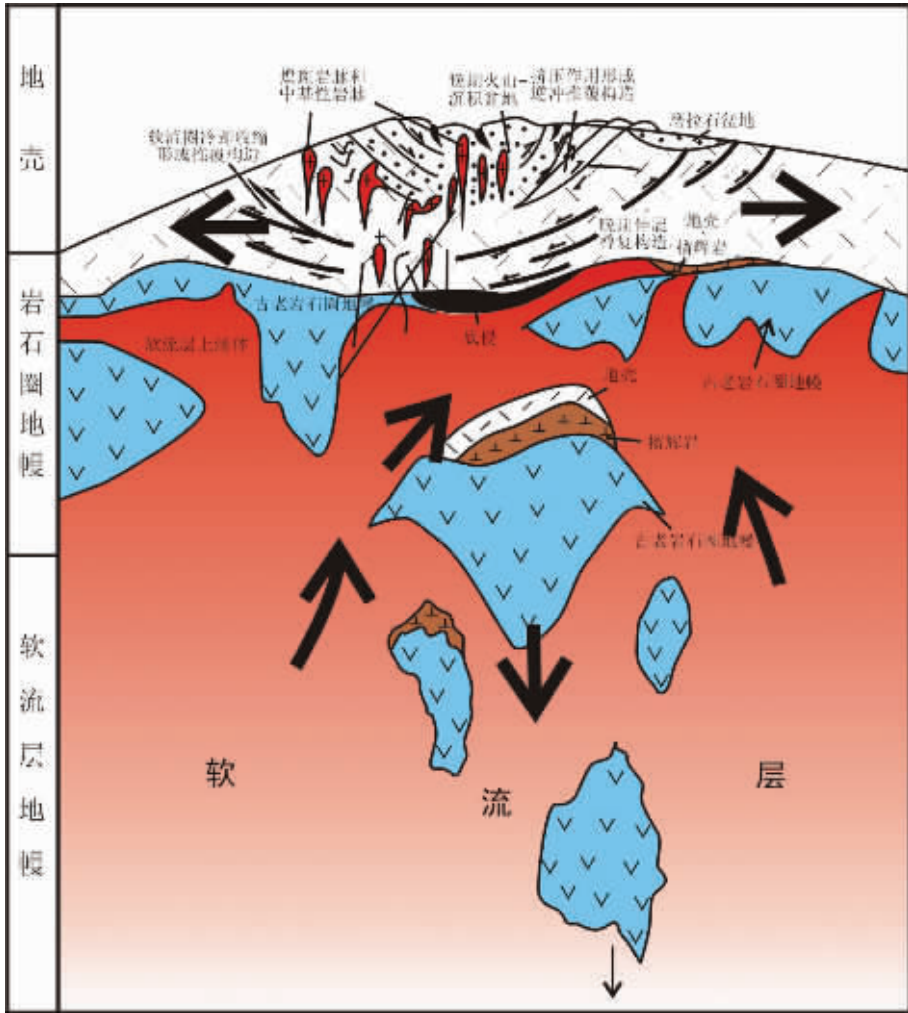


图 21 晚期造山幕岩石圈发生大规模面型拆沉和减薄

Fig.21 Large-scale areal delamination and thinning of the lithosphere in the late orogenic phase

着挤压作用停止,岩石圈发生均衡调整,进入全面隆升阶段。此时岩石圈演化过程从挤压造山(orgeyny)向伸展和巨大减薄的伸展造山的转变阶段<sup>[30]</sup>,形成了不同方向的伸展构造。

在此阶段发生了如下重大构造事件:

(1) 大面积面型火山岩喷发。发育了大量的以下地壳重熔成为主的火山岩(不排除有少量幔源物质参加)和玄武质岩浆面型底侵<sup>[34]</sup>。火山岩广布全区,呈面型展体,如东北、华北、胶东和华南都大面积出现早白垩世火山岩,年龄在 120~130 Ma,只有少数近于或大于 140~160 Ma。它们大多属高钾钙碱性序列,其中许多还具有类似埃达克岩的地球化学性质,例如早白垩世辽西义县组由基性向中性、酸性及偏碱性演化,以安山岩或流纹岩为主,属高钾钙碱性序列<sup>[35-36]</sup>。另一特征是出现高压粗面岩(和安粗岩),无负 Eu 异常、但高 Sr/Y,暗示岩浆来源于加厚陆壳的底部。如燕山造山带形成高压粗面岩和

正长岩类,张家口组酸性流纹质火山岩粗面质岩石<sup>[6,12]</sup>。

这一时期玄武质岩浆面型底侵也很发育,暗示岩石圈大面积拆沉,如在张家口汉诺坝新生代玄武岩中发现的 120~140 Ma 麻粒岩相和榴辉岩相辉石岩包体(呈堆晶结构)<sup>[37]</sup>,进一步支持这一时期有一个加厚的陆壳和玄武岩浆底侵作用。另外部分地区有双峰式火山活动,如在燕山造山带北京南口地区岩墙群岩石成分具有“双峰式”分布的特征<sup>[38]</sup>。

总之,高密度岩石圈的下沉拉力导致榴辉岩下地壳和地幔岩石圈面型拆沉,软流层上涌,导致面型岩浆活动。以后软流层开始冷却,逐渐转变为造山岩石圈。

(2) 晚造山花岗岩极为发育。它们往往构成一些花岗岩带的主体,如在兴蒙—吉黑地区,辽东半岛,大兴安岭的花岗岩体 80%都是在 120~130 Ma 形成。在太行山—燕山造山带,花岗质岩浆活动主要发生在 154~124 Ma<sup>[39]</sup> 或 140~120

Ma, 在古老的华北陆块上形成了特征的地质景观, 被称为大陆活化现象<sup>①</sup>。

这一时期另一个重要特征是出现碱性正长岩(含碱性角闪石), 局部地段出现发育晶洞构造的碱长花岗岩。这与传统概念不同, 一般认为造山带的碱性正长岩类和晶洞碱长花岗岩类只出现于后造山期, 而不是晚造山幕, 这一重要特征暗示  $K_1$  不是后造山阶段, 而仍处于晚造山阶段<sup>②</sup>。

(3) 广泛发育了区域性后造山镁铁质—超镁铁质岩及中基性岩脉。如煌斑岩、辉绿岩、闪长质岩、细粒花岗岩、细晶岩、伟晶岩、正长斑岩、玄武质、埃达克质、花岗闪长质—花岗质和富硅花岗质等岩脉组合<sup>③</sup>。如鲁西济南、邹平和莱芜地区的辉长岩和二辉闪长岩 (115 Ma), 角闪闪长岩 (160~130 Ma)。此外, 在太行山北段发育煌斑岩岩墙群 (120 Ma), 北京南口—古崖居地区发育了橄榄粗玄岩—高钾流纹岩双峰式岩墙群 (124~129 Ma) 等等。

该组岩脉的化学成分有较大的变化, 可能与其源区成分、部分熔融程度和熔浆分离深度(源区岩石变质程度)的差异有关。不过, 地质证据和同位素年代学均表明, 尽管切割关系复杂, 它们是大致同时形成于后造山。如北京南口至延庆古崖居一带出露的岩墙群 K-Ar 法同位素年龄测定为 120~114 Ma, 岩石成分具有“双峰式”分布的特征<sup>③</sup>。岩脉主元素和微量元素表明它们可能是不同的原生岩浆固结的产物, 是软流圈/岩石圈系统不同圈层的源区岩石部分熔融形成的。大多数岩脉是源区岩石不同程度部分熔融形成的原生岩浆固结的产物<sup>③</sup>。它们的形成与造山晚期封存在深部的基性岩浆房和软流层顶部的部分熔融作用有关, 也与岩石圈去根拆沉作用触发软流层上涌作用有关, 是岩石圈去根拆沉作用和区域性大规模抬升体制下岩浆活动的产物, 是区域岩石圈拆沉作用的标志<sup>④</sup>。

根据上述结果, 以燕山、太行山等为代表的造山作用是燕山期大量对流地幔物质与热注入华北克拉通自下而上改造华北克拉通过程, 这一重要过程形成了造山型岩石圈。它与以鄂尔多斯黄土高原为主体的克拉通型岩石圈不同, 其重大特征是造山过程中形成强烈的以花岗质为主的岩浆侵入活动, 使原来的 TTG 陆壳组分熔融上侵, 形成以花岗质为主的新的陆壳(陆壳平均波速  $V_p=6.2\sim 6.3\text{km/s}$ ,  $\text{SiO}_2=67\%\sim 70\%$ ), 相对于鄂尔多斯克拉通型 TTG 陆壳(平均波速  $V_p=6.3\text{km/s}$ ,  $\text{SiO}_2=67\%$ ), 陆壳成分被“酸性化”, 它们是从地幔中分出的新生物质(辉长岩和闪长质)与太古宙—古元古代陆壳再熔融产生的再生花岗质岩浆混合的产物, 也就是说, 侏罗—白垩纪形成的新陆壳既有从地幔中分出的新生陆壳的贡献, 也有原有古老陆壳再熔融产生的再生陆壳的贡献。岩石圈地幔由方辉橄榄岩和二辉橄榄岩

构成, 其亏损程度弱于克拉通型岩石圈的大陆根<sup>⑤</sup>。

(4) 地壳快速隆升和地壳表层产生了大规模伸展构造, 变质核杂岩、底辟热隆构造都发生在这一时期。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

中国东部中生代经历了典型造山带演化过程: 从隆升—裂隙—挤压到抬升成山的造山全过程, 但与传统的造山作用有所不同, 它的形成与板块的俯冲或碰撞没有直接因果关系, 而是深部软流层上涌引发的岩石圈与软流层之间以及壳幔之间的层圈拆离, 底侵作用, 以及岩石圈变形缩短、伸展和岩浆活动的结果。

软流层上涌造山作用重大特征是垂向差异隆升及其伴随的水平构造作用贯穿于整个造山过程, 它是软流层上涌的垂向作用造成的, 故笔者把这种造山作用叫软流层上涌造山作用。它与经典造山过程受水平构造挤压造山不同, 也与板块的碰撞造山作用不同。它是垂向构造作用和差异隆升贯穿整个造山过程为特征的。而且每一个造山带造山过程均从软流层上涌引发的岩石圈破裂和隆升开始, 经过岩石圈深部缩短变形、地壳加厚, 到加厚地壳山根的拆沉和其引发的伸展、抬升、剥蚀三大阶段, 但不同地区它的造山事件过程不同, 从而形成各造山带之间性质上的重大差异。

### 4.2 讨论

(1) 中国东部中生代大陆动力学的实质是什么?

20 世纪 90 年代中期, 当板块构造研究重心从大洋转向大陆碰到难题以后, 美国科学家及时提出大陆动力学概念, 并指出对流地幔(软流圈)对大陆的输出是大陆动力学的核心, 也是大陆动力学研究基本目标。大陆岩石圈形成演化受对流地幔控制<sup>⑥</sup>。近年来国内外都有不少学者在大陆动力学研究中注意到软流层的作用, 如 Meye hoff<sup>[40]</sup> 提出 Surge Tectonics, Martin<sup>[41]</sup> 认为西南非洲纳来比亚 Damara 造山带是软流层上涌形成的板内造山带, 邓晋福<sup>[6]</sup>等提出大陆根—柱构造概念, 认为它是解决中国东部大陆动力学的钥匙, 邵济安<sup>[42]</sup>等提出了“构造热侵蚀”模型, 认为华北盆山体系是软流物质上涌形成的。但是, 要指出的是, 迄今为止对中国东部中生代大陆形成的研究很少思考对流地幔输入对大陆形成演化的影响。笔者认为, 中国东部中生代大陆动力学的实质是, 中国东部陆块在印支期拼合形成统一的中国东部大陆以后不久, 就发生了软流层上涌造山作用, 开始了深部软流层物质自下而上改造中国东部大陆岩石圈形成一系列陆块与盆地的新的地质演化过程, 要认识中国东部大陆岩石圈形成演化和盆山体系形成, 就需要研究对流地幔上涌对大陆的输出过程和影响,

① 罗照华. 后造山煌斑岩, 2006.

② 邱瑞照博士出站报告, 2006.

③ 李晓波, 肖庆辉等译校, 美国大陆动力学研究的国家计划, 中国地质矿产信息研究院, 1993, 1~73.



即要从深部软流层上涌与岩石圈和软流层间相互作用去解读中国东部岩石圈形成演化的独特性<sup>[3-4]</sup>。

#### (2) 地球物理资料能否反映和研究中生代构造?

现在不少人一再强调地球物理资料,特别是地震层析成像反映的是现今构造,而不是现存构造。近年来国外不少学者已利用地震层析成像反映中生代构造,如 Grand<sup>[45]</sup>根据地震层析成像识别出加勒比海下面存在 190 Ma 以前的法拉隆板块残片。Van der Voo 等<sup>[42,46]</sup>根据层析成像识别出西伯利亚 2 000~2 800 km 深处的高密度体就是 200 Ma 前亚洲洋俯冲板片残余。邓晋福等<sup>[4]</sup>对中国东部岩石圈结构研究认为,鄂尔多斯岩石圈结构可以代表新太古代—古元古代时期的一个参照,燕辽—太行山地区虽受喜山期构造改造,但由于没有喜山期玄武岩浆活动,其岩石圈—软流层结构仍可代表燕山期形成的。但华北平原是喜山期岩浆构造事件的产物,它是经过燕山期改造后又受到喜山期的重大改造,所以其岩石圈结构代表喜山期形成的。上述的论述表明,现存地球物理场结果是可以反映中生代岩石圈结构和演化的。赵永贵等<sup>[47]</sup>运用热力学原理进行了定量估算,在俯冲的情况下,近百千米的下岩石圈和数十千米宽的软流量上涌体,当后期再无强烈构造变动时,其速度差异特征可残存 300~400 Ma。

**感谢:** 本文是在李廷栋院士指导下完成的,成文过程中曾得到袁学诚、邓晋福、邵济安、张长厚、路风香同志指点,在此深表感谢。

#### 参考文献(References):

- [1] 翁文灏. 中国东部中生代以来之地壳运动及火成活动 [J]. 中国地质学会志, 1927, 6(1): 9~36.  
Wong W H. Crustal movement and igneous activities in eastern China Since Mesozoic time [J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1927, 6(1): 9~36 (in Chinese).
- [2] 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 中国大地构造及其演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1980. 31.  
Ren Jishun. Jiang Chunfa, Zhang Zhengkun, et al. Geotectonic Evolution of China [M]. Beijing: Science Press, 1980, 31 (in Chinese).
- [3] 陈国达. 地台活化及其找矿意义 [M]. 北京: 地质出版社, 1960. 1~408.  
Chen Guoda. Theory of Activation of Platforms and its Significance in Ore Searching [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1960. 1~408 (in Chinese).
- [4] 张文佑. 断块构造导论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1984. 210~212.  
Zhang Wenyu. An Introduction to Fault-Block [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984. 210~212 (in Chinese).
- [5] 宋鸿林. 燕山式板内造山带基本特征与动力学探讨 [J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 309~316.  
Song Honglin. Characteristics of Yanshan type intraplate orogenic belts and a discussion on its dynamics [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6 (4): 309~316 (in Chinese with English abstract).
- [6] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根—柱构造——大陆动力学的钥匙 [M]. 北京: 地质出版社, 1996. 32~39.

- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, et al. Continental Roots—Plume Tectonics of China—Key to the Continental Dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 32~39 (in Chinese with English summary).
- [7] 葛肖虹. 华北板内造山带的形成史 [J]. 地质论评, 1989, 35(3): 254~261.  
Ge Xiaohong. The history of formation of intraplate orogenic belts in the North China Paleoplate [J]. Geological Review, 1989, 35(3): 254~261 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张长厚. 初论板内造山带 [J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 295~308.  
Zhang Changhou. A primary discussion on the intraplate orogenic belt [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6 (4): 295~308 (in Chinese with English abstract).
- [9] 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质 [J]. 高校地质学报, 2000, 6(3): 379~388.  
Wu Fuyuan, Sun Deyou, Zhang Guangliang, et al. Deep Geodynamics of Yanshan Movement [J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(3): 379~388 (in Chinese with English abstract).
- [10] 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 等. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩捕虏体的发现 [J]. 科学通报, 1999, 44(5): 478~485.  
Shao Ji'an, Han Qingjun, Zhang Lüqiao, et al. Cumulate complex xenoliths in the Early Mesozoic in eastern Inner Mongolia [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(14): 1272~1279.
- [11] 邵济安, 韩庆军, 李惠民. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现 [J]. 中国科学, 2000, 30(增刊): 148~153.  
SHao Ji'an, Han Qingjun, LI Huimin. Discovery of the Early Mesozoic granulite xenoliths in North China Craton [J]. Science in China (Series D), 2000, 43(Supp.): 245~252.
- [12] 邵济安, 牟保磊, 张履桥. 华北东部中生代构造格局转换过程中的深部作用与浅部响应 [J]. 地质论评, 2000, 46(1): 32~40.  
Shao Ji'an, Mu Baolei, Zhang Lüqiao. Deep geological process and its shallow response during Mesozoic transfer of tectonic frameworks in eastern North China [J]. Geological Review, 2000, 46(6): 32~40 (in Chinese with English abstract).
- [13] 鲍亦冈, 白志民, 葛世炜, 等. 北京燕山期火山地质及火山岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1995. 103~151.  
Bao Yigang, Bai Zhimin, Ge Shiwei, et al. Volcanic Geology and Volcanic Rocks of Yenshan Period in Beijing [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. 146~151 (in Chinese).
- [14] 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等. 燕山—阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义 [J]. 中国科学 (D 辑), 2000, 30(4): 383~387.  
Yan Guohan, Mu Baolei, Xu Baoliang, et al. Triassic alkaline intrusives in the YanLiao—Yanshan area: their chronoogy, Sr, Nd and Pb isotopic characteristics and their implication [J]. Science in China (Series D), 1999, 42(6): 582~587.
- [15] 韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民. 河北平泉光头山碱性花岗岩体的时代、Nd—Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义 [J]. 岩石学报, 2004, 20(6): 1375~1388.  
Han Baofu, Kagami H, LI Huimin. Age and Nd—Sr isotopic

- geochemistry of the Guangtoushan alkaline granite, Hebei Province, China: implications for early Mesozoic crust-mantle interaction in North China Block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004,20(6):1375~1388(in Chinese with English abstract).
- [16] 牟保磊, 阎国翰. 燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及意义[J]. *地质学报*, 1992,66(2):189~121.  
Mu Baolei, Yan Guohan. Geochemical features of Triassic alkaline and subalkaline igneous complexes in the Yan-Liao area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1992, 5 (4): 339~365 (in Chinese with English abstract).
- [17] 葛文春, 林强, 孙德友, 等. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征:壳幔相互作用的证据[J]. *岩石学报*, 1999, 15(3):396~407.  
Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Deyou, et al. Geochemical characteristics of the Mesozoic basalts in Da Hinggan Ling: Evidence of mantle-crust interaction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999,15(3):397~407(in Chinese with English abstract).
- [18] 邵济安, 刘福田, 陈辉, 等. 大兴安岭-燕山晚中生代岩浆作用与俯冲作用关系[J]. *地质学报*, 2001,75(1):56~63.  
Shao Ji'an, Liu Futian, Cheng Hui, et al. Relationship between Mesozoic magmatism and subduction in Da Hinggan-Yanshan area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001,75 (1):56~63 (in Chinese with English abstract)
- [19] 吕志成, 郝立波, 段国正, 等. 内蒙古满洲里-额尔古纳地区中生代火山岩地球化学研究[J]. *矿物学报*, 2000,20(4):406~414.  
Lü Zhicheng, Hao Libo, Duan Guozheng, et al. Geochemical research on Mesozoic volcanic rocks in the Manzhouli-E'erguna region [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2000,20(4):406~414(in Chinese with English abstract).
- [20] 吕志成, 段国正, 郝立波, 等. 内蒙古满洲里-额尔古纳地区岩浆作用及其大地构造意义[J]. *矿物岩石*, 2001,21(1):77~85.  
Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Hao Libo, et al. Magmatism and its tectonic significance in the Manzhouli-E'erguna region [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2001, 21 (1):77~85 (in Chinese with English abstract).
- [21] 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福. 中国花岗岩与大陆生长方式初步研究 [J]. *中国地质*, 2005,32(3):343~352.  
Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, et al. Granitoids and Continental crustal growth model in China [J]. *Geology in China*, 2005, 32(3): 343~352(in Chinese with English abstract).
- [22] 张长厚, 宋鸿林. 燕山板内造山带中生代逆冲推覆构造及其与前陆褶冲带的对比研究[J]. *地球科学*, 1997,22(1):33~36.  
Zhang Changhou, Song Honglin. Mesozoic thrust tectonics in Yanshan intraplate orogen and the differences between them and those of foreland fold and thrust belt[J]. *Earth Science*, 1997, 22(1): 33~36(in Chinese with English abstract).
- [23] 邵济安, 孟庆任, 魏海泉, 等. 燕山地区晚侏罗世火山-沉积盆地形成环境与构造背景的讨论[J]. *地质通报*, 2003,22(10):751~761.  
Shao Ji'an, Meng Qingren, Wei Haiquan, et al. Discussion on properties and tectonic environment of Late Jurassic volcanic ~ sedimentary basins in northwest Hebei Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(10): 751~761(in Chinese with English abstract).
- [24] Liu Mian, Cui Xiaojun, Liu Futian. Cenozoic rifting and Volcanism in eastern China: A mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? [J]. *Tectonics*, 2004,23(9):P29~42.
- [25] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像[J]. *地球物理学报*. 2002,45(5):646~664.  
Zhu Jieshou, Cao Jiamin Cai Xuelin, et al. High resolution surface wave tomography in East Asia and west Pacific marginal Seas [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(5): 646~664(in Chinese with English abstract).
- [26] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 东亚西太平洋巨型裂谷体系岩石圈与软流圈结构及动力学[J]. *中国地质*, 2002,29(3):234~245.  
Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin et al. Structure and dynamics of lithosphere and asthenosphere in the gigantic East Asian-West Pacific rift System [J]. *Geology in China*, 2002, 29 (3):234~245(in Chinese with English abstract).
- [27] 袁学诚. 秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云构造模型 [J]. *中国科学*, 1996,26(3):209~215.  
Yuan Xuecheng. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26 (3): 209~215(in Chinese).
- [28] 路凤香, 郑建平, 李伍平, 等. 中国东部地幔演化的主要样式:“蘑菇云”模式[J]. *地学前缘*, 2000,7(1):97~117.  
Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Li Wuping, et al. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in the eastern China: the “mushroom cloud” model [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000,7(1): 97~117(in Chinese with English abstract).
- [29] 邢集善, 刘建华, 赵晋泉. 华北板内深部构造 [J]. *山西地震*, 2002,(4):1~14.  
Xing Jishan, Liu Jianhua, Zhao Jinqun. Intraplate deep structure in North China [J]. *Shanxi Earthquakes*, 2002,(4): 1~14(in Chinese).
- [30] 邵济安, 张履桥, 肖庆辉, 等. 中生代大兴安岭的隆起——一种可能的陆内造山机制[J]. *岩石学报*, 2005 21(3):1~6.  
Shao Jian, Zhang Lǐqiao, Xiao Qinghui, et al. Rising of Da Hinggan Mts in Mesozoic: A possible mechanism of intercontinental orogeny [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21 (3): 1~6(in Chinese with English abstract).
- [31] Davis G A, Zheng Yadong, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and liaoning Provinces, northern China [J]. *Geological Society of America, Memoir*, 2001,194:171~197.
- [32] Richards M A. Prospecting for Jurassic slabs [J]. *Nature*, 1999, 397 (21).
- [33] 郑亚东, 戴维斯, 王琮, 等. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J]. *地质学报*, 2000,74(4):289~302.  
Zheng Yadong, Davis A G, Wang Cong, et al. Major Mesozoic tectonic events in the Yanshan Belt and the plate tectonic setting [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74 (4): 289~302 (in Chinese with English abstract).

- [34] 张昱, 赵焕力, 李仰春, 等. 大兴安岭北段根河地区早白垩世火山杂岩特征及成因探讨[J]. 中国地质, 2005,32(3):405~410.  
Zhang Yu, Zhao Huanli, Li Yangchun, et al. Characteristics of Early Cretaceous volcanic complexes in the Genhe area in the northern segment of the Da Hinggan Mountains: with a discussion of their genesis [J]. *Geology in China*, 2005,32 (3):405~410 (in Chinese with English abstract).
- [35] 彭艳东, 张立东, 张长捷, 等. 辽西北票—义县地区义县旋回火山岩的岩石化学特征[J]. 中国地质, 2004,31(4):356~364.  
Pend Yandong, Zhang Lidong, Zhang Changjie, et al. Petrochemistry of volcanic rocks of the Yixian volcanic cycle in the Beipiao—Yixian area, western Liaoning [J]. *Geology in China*, 2004,31(4):356~364 (in Chinese with English abstract).
- [36] 张宏, 柳小明, 陈文, 等. 辽西北票—义县地区义县组顶部层位的年龄及其意义[J]. 中国地质, 2005,32(4):596~603.  
Zhang Hong, Liu Xiaoming, Chen Wen, et al. The age of the top of the Yixian Formation in the Beipiao—Yixian area, western Liaoning, and its importance[J]. *Geology in China*, 2005,32 (4): 596~603 (in Chinese with English abstract).
- [37] 樊祺诚, 刘若新. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体[J]. 科学通报, 1996,41(3):235~238.  
Fan Qicheng, Liu Ruoxin. The High temperature granulite xenoliths from basalts in Hannuoba [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(3):325~328.
- [38] 邵济安, 李献华, 张履桥, 等. 南口—古崖居中生代双峰式岩墙群形成机制的元素地球化学制约[J]. 地球化学, 2001,30(6):517~524.  
Shao Ji'an, Li Xianhua, Zhang Lüqiao, et al. Geochemical condition for genetic mechanism of the Mesozoic bimodal dike swarms in Nankou—Guyaju [J]. *Geochimica*, 2001, 30 (6): 517~524 (in Chinese with English abstract).
- [39] 罗照华, 邓晋福, 韩秀卿. 太行山造山带岩浆活动及其造山过程反演[M]. 北京:地质出版社, 1999.  
Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Han Xiuqing. *Magmatic Activity in the Taihangshan Orogenic Belt and Inversion of Its Mountain-building Process* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999 (in Chinese).
- [40] Meyerhoff A A, et al. Surge Tectonics: A New Hypothesis of Global Geodynamics [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [41] Martin H. Alternative geodynamic models for the Damara Orogeny: critical discussion [A]. In: Martin, Eder (eds) *Intracontinental Fold Belts*, 1983,913~945.
- [42] 邵济安, 张长厚, 张履桥, 等. 关于华北盆山体动力学模式的思考[J]. 自然科学进展, 2003,13(2):218~224.  
Shao Ji'an, Zhang Changhou, Zhang Lüqiao, et al. Suggestion of a dynamic model of North China basin—range system [J]. *Progress in Natural Science*, 2003,13(4):311~320.
- [43] 肖庆辉, 邢作云, 张昱, 等. 当代花岗岩研究的几个重要前沿[J]. 地质前缘, 2003,10(3):221~229.  
Xiao Qinghui, Xing Zuoyun, Zhang Yu, et al. The major frontiers of the recent studies of granite [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10 (3): 221~229 (in Chinese with English abstract).
- [44] 肖庆辉, 李晓波, 刘树臣, 等. 当代地质科学前沿[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1993. 526.  
Xiao Qinghui, Li Xiaobo, Liu Shuchen, et al. *Frontiers of Geology Sciences in 1990's* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993. 526.
- [45] Grand S P J. Mantle shear structure beneath the Americas and surrounding oceans[J]. *Geophys. Res.*, 1994, 99: 11591~11622.
- [46] Van der Voo R, Spakman W, Bijwaard H. Mesozoic subducted slabs under Siberia[J]. *Nature*, 1999, 397(21):246~249.
- [47] 孙继源, 邢集善, 叶志光, 等. 华北地区板内构造及深部过程初探[J]. 地质科技情报, 1992,11(1):4~19.  
Sun Jiyuan, Xing Jishan, Ye Zhiguang, et al. Intraplate structure and deep process in the North China region[J]. *Information of Geological Science and Technology*, 1992, 11 (1): 4~19 (in Chinese).



## Mesozoic asthenospheric upwelling orogeny in eastern China

XIAO Qing-hui<sup>1</sup>, QIU Ruizhao<sup>2</sup>, WU Guang-ying<sup>3</sup>, XING Zuo-yun<sup>4</sup>  
ZHANG Yu<sup>5</sup>, TONG Jin-song<sup>5</sup>

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;*

3. *Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang 443003, Hubei, China;*

4. *China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;*

5. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;* 6. *Anhui Geological Survey, Hefei 230001, Anhui, China)*

**Abstract:** Mesozoic orogens in eastern China are different from continental-margin subductional and continent-continent collisional orogens and are not the product in a particular stage of development and evolution of continental-margin and continent-continent collisional orogens either. They are a new type of orogen resulting from orogeny due to asthenospheric upwelling at depth and may be distinguished from plate-margin and continent-continent collisional orogens by their tectonic setting, tectonic framework, tectonic deformation and metamorphism, magmatism and sedimentation and tectonic evolution. We consider that such orogeny caused by asthenospheric upwelling is another orogenic mechanism that is as important as continent-continent collisional and plate-margin subductional orogenies. Therefore the process of formation of orogens by asthenospheric upwelling is termed by us asthenospheric upwelling orogeny or East Asia-type orogeny. Viewing the Da Hinggan orogen, Yanshan orogen and other orogens in eastern China from the lithospheric-asthenospheric deep process, we think that the formation of these orogens is an orogenic event caused by vertically upward dynamic processes originating by asthenospheric upwelling at depth as well as a new orogenic mechanism. The evidence is as follows: (1) the lithosphere-asthenosphere does not show a typical horizontal layered structure but asthenospheric material commonly occurs as mushroom-shaped upwelling plumes penetrating and intruding into the lithospheric mantle, thus causing the older lithospheric mantle to be extensively dismembered and delaminated and forming a steep contact pattern with the relics of the older mantle; (2) the chronological structure of the lithosphere has the nature of uncoupling, i.e.: the mantle is younger, while the crust is older; (3) mafic-ultramafic rocks generated by underplating and ascending of Mesozoic asthenospheric material along lithospheric fractures are found; (4) magmatism of Mesozoic volcanic-plutonic rocks is different from that of classic subduction-type and continent-continent collision-type magmatic rocks but is related to upwelling of the asthenosphere; and (5) the process of asthenospheric upwelling orogeny has the unique character of evolution from the deep level to shallow level. Asthenospheric upwelling orogeny in eastern China is a global important tectonothermal event and its orogenic process is as follows: (1) before and in the initial orogenic phase in the Early Mesozoic (230–180 Ma), upwelling and underplating of asthenospheric material at depth resulted in linear fracturing and local delamination of the cold and strong continental lithosphere; (2) in the main orogenic phase in the Mid-Late Jurassic (180–140 Ma), due to large-scale upwelling of asthenospheric material and its lateral intrusion and extension along the crust-mantle boundary at the base of the lithosphere, vertical differential movement was transformed into horizontal compression, and thus extensive fold and nappe structures occurred at the crustal surface, causing the continental crust to be thickened into the crustal root and the lithospheric root to be delaminated; and (3) in the late orogenic phase in the Cretaceous (140–80 Ma), with thickening of the continental crustal root and extensive delamination of the lithospheric root, the lithosphere entered a completely new stage of transition from compression to extension and substantial thinning and the asthenosphere upwelled to form mountains.

**Key words:** eastern in China; lithosphere; asthenosphere upwelling

---

**About the first author:** XIAO Qing-hui, male, born in 1939, director of doctors and senior researcher, engages in studies of granite tectonics and 3D lithospheric structure of China; E-mail: qhxiao@infomail.mlr.gov.cn.