

秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云构造模型*

袁学诚

(地质矿产部中国地质勘查技术院, 北京 100812)

摘要 从秦岭及与其毗连华北地区的地震层析、爆破地震及反射地震资料统一分析出发, 将秦岭岩石圈划分为 3 层. 上岩石圈即地壳, 厚 32 ~ 34 km, 中岩石圈层面近于水平, 厚约 25 ~ 40 km, 下岩石圈岩层陡倾, 高速低速层并置. 推测下岩石圈这种结构是由张裂形成的. 热地幔物质沿垂向通道上升到莫氏面后侧向流动形成中岩石圈. 类似蘑菇云. 现今的秦岭造山带地壳构造与上地幔盖层间似无成因上的联系, 这是印支~燕山期, 扬子地壳向华北地壳楔入而成的陆内造山带. 造山期后又受到岩石圈东西方向拉张对它的改造.

关键词 秦岭 华北 岩石圈 陆内造山带 地震层析 爆破地震测深 反射地震剖面

由于天然地震观测到的上地幔盖层速度随震中距变化微小, 所以在一个时期内, 认为上地幔盖层是比较均匀的. 1986 ~ 1987 年, 我们在测制台湾-黑水的地学断面中, 发现上地幔盖层的电阻率不均匀. 我们并称上地幔盖层中坚硬的高阻块体为地幔肾, 或地幔块体, 而将其中的相对柔软, 富于流变性质的区域称为地幔软体^[1]. 在这期间, 国外也发现上地幔盖层的不均匀性. 如欧洲 EGT 剖面的 FENNOLOGRA 发现上地幔盖层内高速低速近于水平状相互成层^[2]. Spakman 利用 *P* 波沿 EGT 反演进行的地震层析^[3], 显示出岩石圈的不均匀性.

在本文中我们综合分析了在秦岭及其毗邻的华北地区的地震层析及爆破地震资料后, 提出在构造活动地区岩石圈可细分为 3 层. 上岩石圈为地壳, 中岩石圈为层面接近于水平的上地幔地幔盖层的上部, 下岩石圈是层面陡倾的上地幔地幔盖层的下部, 下岩石圈的低速陡倾岩块是更富流变性的地层, 它将热从下岩石圈的底部带到顶部, 然后向侧向流动. 颇像原子弹爆炸产生的蘑菇云, 因而, 我们将这种形式的岩石圈称为蘑菇云模型. 并将这种构造模型用于探讨秦岭造山带的一些动力学问题.

1 下岩石圈构造

赵永贵等穿过东秦岭, 大别山做了 4 条高质量的地震层析剖面, 并做了很好的地质解释^[4], 邢集善, 刘福田在华北地区做了 6 条高质量地震层析剖面(未发表). 其分布位置见图 1.

我们首先将 10 条剖面归化为同一比例尺, 见图 2. 其中, 纵横比例尺之比为 3. 每一条剖

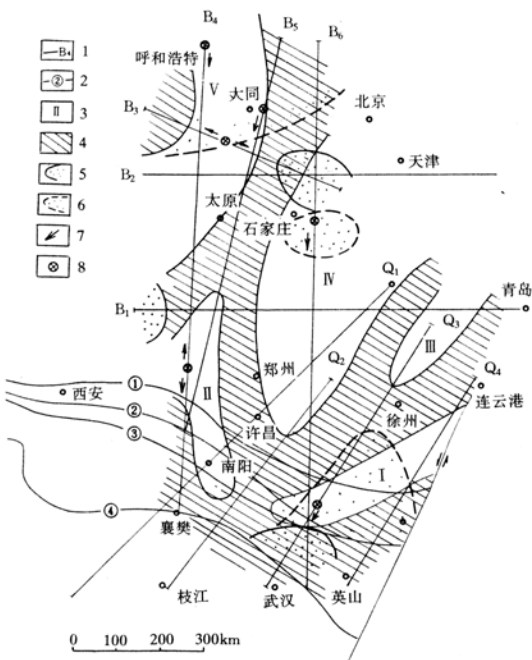


图 1 下岩石圈速度构造图

1——层析剖面位置, 2——秦岭造山带主要断层: ① 卢氏断裂, ② 柴川断裂, ③ 商丹断裂和④ 青峰断裂, 3——低速带及编号, 4——高速带, 5——缺失中岩石圈上部低速层地区, 6——缺失中岩石圈下部高速层地区, 7——热地幔流在中岩石圈内可能流动方向, 8——中、下岩石圈低速层相连处

面上都可以看到, 在剖面的上半部区域内速度等值线水平状占优势, 而在剖面的下半部区域, 则以陡倾界面占优势. 这个分界面的深度在华北的东部较浅, 小于 60 km, 沿太行山深度大于 70 km 形成凹陷. 南延至郑州, 分界面凹陷向东扩展, 在桐柏山及其南北, 大于 80 km.

在研究区内, 下岩石圈内可以划分出 5 个低速带(其中有两个带伸入秦岭造山带): (1) I 号低速带. 从信阳, 经固始、淮南、蚌埠到淮阳和泗阳. 在固始处, 低速层深 100 多公里, 并且下延超过 150 km, 到泗阳抬升到 50 ~ 60 km, 并且在其下出现高速层. (2) II 号低速带. 从南阳, 经洛阳到长治. 低速带顶部深度在南阳约为 70 km, 从洛阳~长治, 加深到约 120 km, 低速带的西部未圈定; (3) III 号低速带. 从枣庄到潍坊, 向东北方向延伸. 低速层深约 80 km, 下沿超过 150 km; (4) IV 号低速带. 其西界为石家庄、郑州, 南达许昌, 东界商丘、济南, 包括渤海在内的地区, 除在 B2 线上保定到天津深度在 65 ~ 100 km 的范围内有一局部高速体外, 是一个规模最为宏大的低速带; (5) V 号低速带. 在

平面上形成弧形, 其东界为大同、太原, 西界则为呼和浩特.

初步对比可以看出, IV 号低速带基本上与华北裂谷一致. V 号低速带位于汾渭裂谷之西, 范围比汾渭裂谷大, 地表汾渭裂谷的北端转向北京怀柔, 但 V 号低速带转向张北熔岩台地. II 号低速带的南部达到南阳盆地. 其他低速带的地质意义尚待进一步研究.

2 中岩石圈结构

大部分中岩石圈由两个近于水平的层构成. 上部速度较低, 下部速度较高. 只有 3 处没有上部低速度: (1) 河北定州~河北保定; (2) 湖北麻城~湖北武汉; (3) 山西侯马~陕西韩城.

定州~保定处在 B₆ 剖面上, 出现一块高速体, 向北倾, 厚度约 20 km, 长约 150 km. 侯马~韩城在 B₁ 剖面上显示为整个中岩石圈为高速体, 并与下岩石圈连成一片. 在 B₆ 剖面上显示出它是邢台至武汉中岩石圈下部高速层的上隆部分.

缺失中岩石圈下部高速层的地域有: (1) 河北辛集~南宫; (2) 安徽宿州~阜阳~合肥以南; (3) 山西朔州~河北怀来一线以北.

辛集~南宫在 B₆ 剖面上显示为定州~保定高速体与邢台~武汉高速层之间的一个低速

通道,它连贯石家庄~濮阳间的下岩石圈低速层与石家庄~麻城之间中岩石圈上部低速层。

宿州以南地区在 Q_4 剖面上表现为整个中岩石圈呈现为低速带,而在 Q_3 剖面上则是在中岩石圈中低速层反常地位于高速层之下,并且它与固始下岩石圈的低速带连成一起,似呈低速带上涌后向四周漫溢的形态。

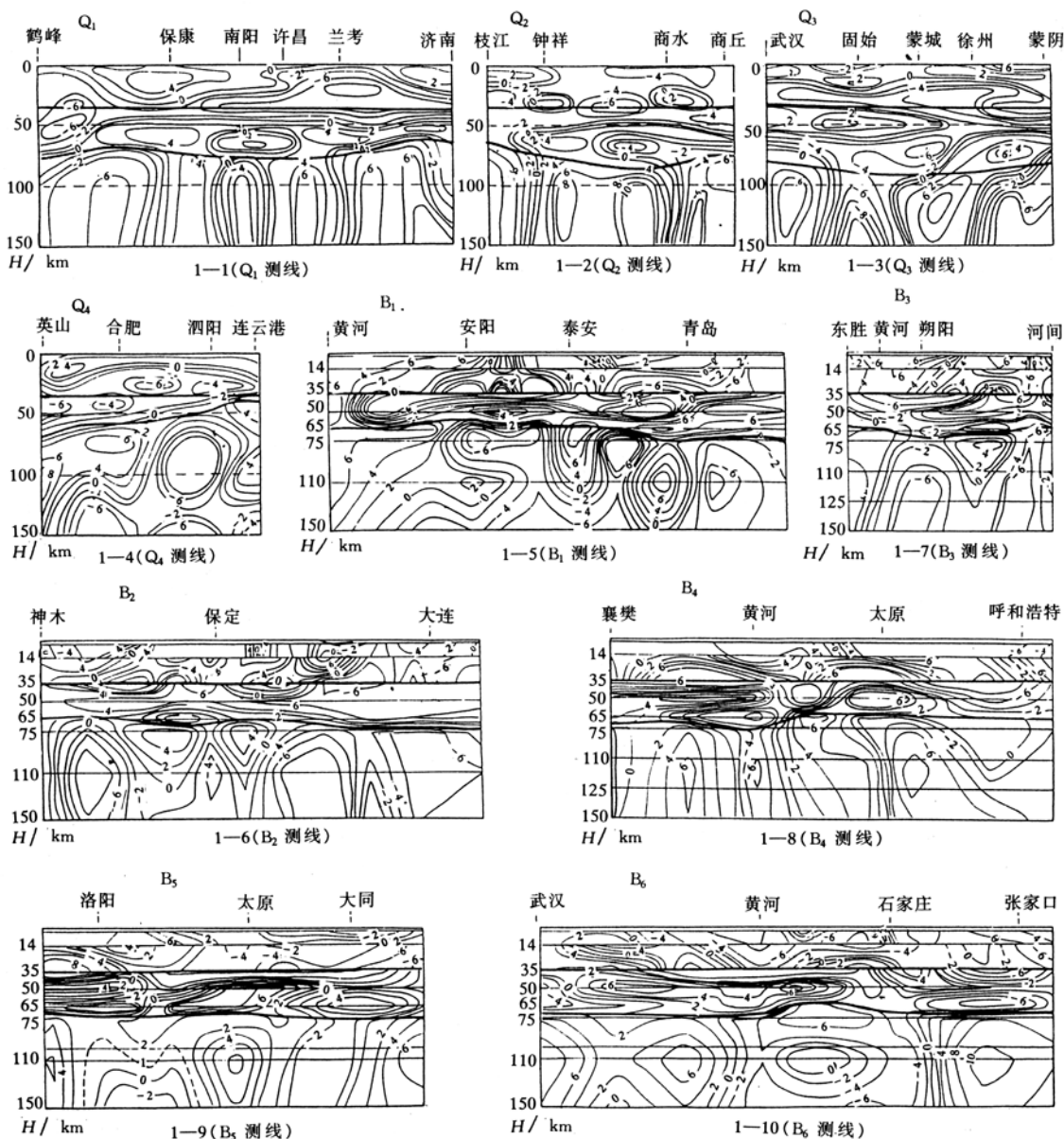


图2 地震层析剖面图

等值线上数字为扰动值,粗线示上、中、下岩石圈分界线

在朔州~怀来一线之北的地区,整个中地壳在 B_3 , B_4 和 B_5 剖面上都呈现出低速,并且在 B_4 和 B_5 剖面上它们都与下伏下岩石圈低速带相连.

在图 1 中用符号 $\otimes$ 表示中岩石圈与下岩石圈低速层相连的地点,并将中岩石圈中低速层的可能流向用箭头标出.

3 地壳速度结构¹⁾

研究区内地壳分为上、中、下 3 层. 上地壳速度值为 $5.02 \sim 6.15$ km/s, 中地壳速度值为 $5.92 \sim 6.50$ km/s, 下地壳速度值为 $6.48 \sim 6.93$ km/s. 图 3 显示上、中、下地壳的厚度变化,同时还展示莫氏面深度.

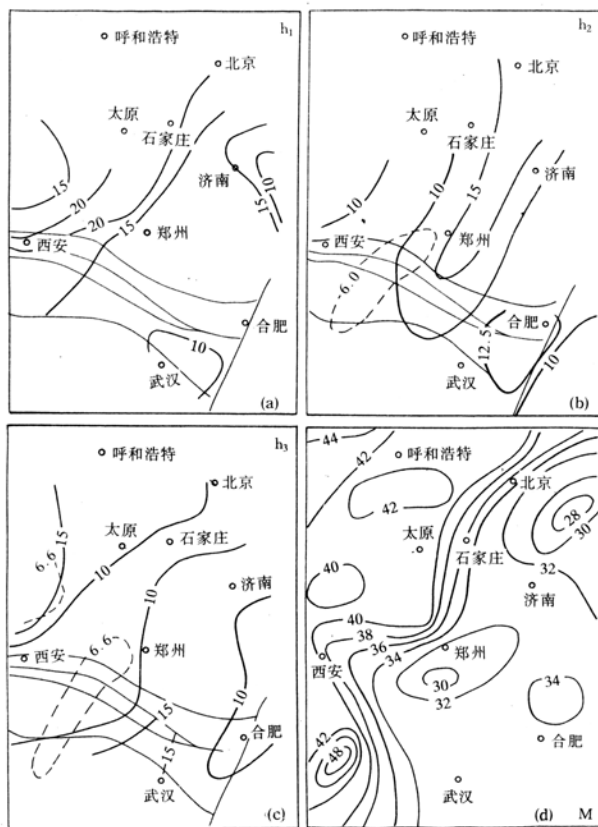


图 3 上、中、下地壳厚度 (a), (b), (c) 及莫氏面深度图 (d)
实线示等厚度线, 曲线上数字为厚度值, 单位为 km. 虚线示速度
线, 单位为 km/s

大别地区加厚到大于 12.5 km. 中地壳速度在南阳以西的东秦岭地区出现极小, 速度值尚不到 6.0 km/s, 用虚线勾出.

下地壳厚度出现深浅相间与中地壳厚度呈相反关系. 在徐州以东小于 10 km, 徐州至郑

以太行山为界, 莫氏面深度急剧变化. 在太行山以东, 莫氏面平坦, 一般深 30 ~ 32 km. 有两个局部隆起, 分别位于渤海西部和河南许昌, 深度为 28 km 和 30 km. 秦岭~大别地区没有见到有莫氏面的局部隆升或凹陷, 它和其南北毗邻的扬子和华北一样, 均为 32 ~ 34 km. 在太行山以西地区, 莫氏面降低到另一深度, 约为 40 ~ 42 km.

上地壳厚度与莫氏面深度形态最相呼应. 太行山的地理位置与 $h_1 = 20$ km 的等深线基本符合. 太行山与汾渭裂谷之间上地壳最厚达 20 多公里. 整个华北平原, 以及东秦岭, 均为 10 ~ 15 km. 在大别山地区, 上地壳厚度小于 10 km.

中地壳的厚度在石家庄、襄樊和济南之间小于 10 km, 北部大体上与华北裂谷范围一致. 南部包括南阳盆地在内一直延伸到襄樊, 在大

1) 我们用爆破地震得到的结果来阐述秦岭及其毗邻地区的地表速度结构, 这些爆破地震工作主要由国家地震局、中国科学院地球物理研究所及地质矿产部地质勘查技术院完成. 这里所用地壳分层数据来自朱介寿为《中国地球物理图集》(即将出版) 撰稿时统一处理结果

州间大于 10 km, 郑州与太原间又小于 10 km 及至太原以西又加厚到 10 km 以上, 同样在南阳以西的东秦岭地区出现低速带, 速度小于 6.6 km/s.

4 活动构造区岩石圈的蘑菇云构造

秦岭造山带及其毗连的华北地区是中生代以来的构造活动区. 它的岩石圈受到中生代构造变形的改造, 并且这种改造对于不同深度的层位不同, 改造后的岩石圈可以分为上、中、下 3 个大层.

地壳为上岩石圈, 它的底界面为莫氏面、厚度均匀、水平成层. 它的下岩石圈由陡倾岩块组成. 其中的低速层, 我们同意赵永贵的解释, 是一些上升的热的地幔物质^[6]. 其中高速层可能是残留的未经变质变形的或轻微变质变形的上地幔. 上升热地幔流到达莫氏面深度处后, 向四方漫溢形成水平层状中岩石圈. 就像蘑菇云从地表升起, 到高空后向四周漫溢. 中岩石圈的上部速度较低的层很可能是地幔物质在流动中熔蚀了更多的原来下地壳成分, 而其下部速度较高的层很可能近似原始地幔成分.

对形成蘑菇云岩石圈模型的过程做初步解释, 初始阶段当古老板块受到强大的外力作用时, 岩石圈内发生韧性剪切带. 韧性剪切带不仅可以发生在地壳内, 也可以发生在上地幔内. 其后, 若板块受到拉张, 板块便破裂. 脆性上地壳发生裂谷和盆岭构造, 而上地幔则沿韧性剪切带拉开, 其中近垂直韧性剪切带便拉开成为深部地幔物质上涌通道.

组成上地幔的橄榄岩便沿这些通道流动. 地幔橄榄岩的流动主要是蠕变, 蠕变主要决定于温度. 当炙热的橄榄岩及其他地幔物质上升到中岩石圈后, 它便熔蚀部分下地壳及上地幔顶部岩石, 且沿水平方向继续流动. 温度下降后, 岩石冷却, 成为水平层状上地幔.

Revernaugh 和 Jordan^[5] 曾用 SCS 波混响在上地幔中识别出 4 个反射面, 他们称之为 H 面 (Hales 面, 深 60 km)、G 面 (Gutenberg 面, 深 60 km)、L 面 (Leyman 面, 深 210 ~ 300 km) 和 X 面 (在俯冲带的反射面). 其中 G 面主要在大洋中, 并认为是大洋上地幔盖层与上地幔低速层之间的界面. 其中的 H 面可能即是我们这里所确定的中、下岩石圈之间的界面.

陈立华等^[6] 利用近震体波对华北地壳上地幔速度结构进行了研究, 发现在燕山沉降带、太行山隆起带和山西地堑等地, 在地幔顶部约 60 ~ 80 km, 速度约为 4.20 ~ 4.10 km/s. 秦岭地区的上地幔低速层埋深约 55 ~ 75 km, 速度约 4.20 ~ 4.00 km/s^[7].

这个深度为 60 ~ 80 km 的上地幔低速层一直被认为是华北地区软流圈的顶界面. 但从本文所示深度来判断, 它们应该是下岩石圈低速层的顶部, 不应该是软流圈.

5 秦岭造山带动力学问题

尽管对秦岭地区的构造演化存在分歧, 但对其总的历程似乎已经有了共识.

许多证据表明, 在晋宁期, 华北陆块和扬子陆块已经拼合在一起或已相当接近. 晚元古代至早古生代时, 又沿秦岭拉开成洋盆. 晚古生代时或稍晚, 洋盆闭合. 印支 ~ 燕山期, 秦岭发生强烈变形, 褶皱隆起. 因而, 秦岭造山带常被看作是一个从元古代一直到新生代都在造山的古老造山带. 但是使人迷惑的是, 秦岭地区陆块的碰撞挤合与秦岭的褶皱隆起似乎并不同时发生.

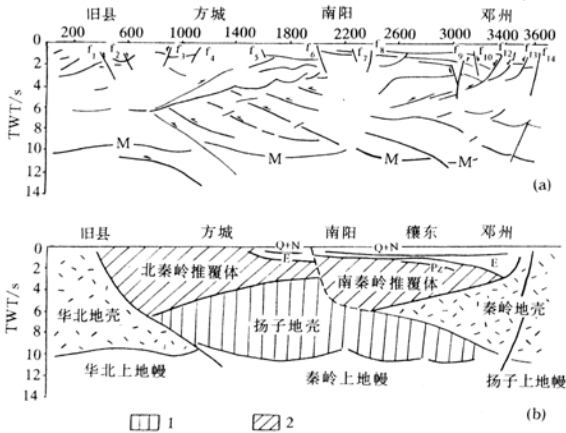


图 4 秦岭造山带主要反射面(a)及地壳构造略图(b)
M 代表莫氏界面, $f_1, f_2, \dots, f_{14}$ 为推断断层; 地表数字为反射地震剖面桩号。Q——第四纪, N——第三纪, E——老第三纪

世末, 以褶皱变形为主; 第 2 期出现在早白垩世, 以逆冲造山为特征。两期造山作用都发生在大陆内部, 因此, 秦岭是一个陆内造山带, 而不是陆缘造山带^[9]。

从深部构造的角度, 可以这样来解释: 岩石圈各层圈的动力活动可以是不一致的。中、下岩石圈的碰撞拼合, 意味着“造陆”运动的完成。只有地壳发生强烈的碰撞和拼合, 才发生造山运动。造山运动是在空间上和时间上都是范围有限的岩石结构的强烈变形^[11]。回到造山带的经典定义, 现今秦岭造山带应是三叠世到早白垩世的印支~燕山造山带。

经南阳盆地穿越秦岭造山带的反射地震, 显示出这个陆内造山带的形成是扬子地块以鳄鱼式构造插入到华北陆块的中地壳, 形成华北地区的下地壳向扬子作 A 形俯冲, 而其上地壳向扬子仰冲的地壳叠置模型(图 4)^[12]。

有的地质学家认为, 秦岭造山带的形成是由于地幔的上隆。但从当今的速度结构来看, 找不到支持的证据。半波长约 25 ~ 45 km 的莫霍面褶皱(图 4), 显示出整个地壳像漂浮在上地幔上似的, 沿着莫霍界面拆离发生强烈的南北向挤压, 但见不到与造山带走向一致的幔内低速异常带。

秦岭造山期后最重要的构造运动当推中国东部岩石圈的东西向拉张, 正如我们在上面所讲到的, 由于拉张, 下岩石圈张裂, 最强烈的地区是京、津、唐、渤为中心的华北裂谷。在我们的研究区域内, 宽可达 300 km, 往南到许昌已经尖灭, 但在同一走向上的南阳盆地, 显然是由于同一动力学作用而陷落。环绕华北裂谷下岩石圈张裂为中心, 还产生一些较小的张裂。如图 2 上所示 I ~ V 低速带, 中地壳厚度的分布与下岩石圈的张裂图象能很好地对应, 下地壳可能由于它的快速塑性调整和其上、下地层不协调。

秦岭造山带山根消失是另一个引人注目的动力学问题。拆沉是一个诱人的假设, 但在秦岭地区目前还找不到地球物理的直接证据。从层析图象来看, 如果有山根, 极可能是被中岩石圈所代表的地幔流所吞蚀, 但没能“掉渣”。

孙勇等提出, 尽管在秦岭造山带存在早古生代蛇绿岩杂岩, 不乏加里东期构造变形、岩浆活动和变质作用的证据, 但迄今未见具有造山运动意义的不整合和磨拉石。尽管有各种证据支持秦岭是在印支运动中崛起的, 但至今不能证实曾经存在的中生代洋盆。秦岭地区是“碰撞不造山”(加里东期), “造山不碰撞”(印支期)^[8]。任纪舜等用多旋回造山来解释。他们认为秦岭地区洋盆消失, 陆-陆碰撞后, 相邻陆块在动力学上并未合而为一。经过大陆壳的消减和走滑造山运动, 相邻陆块才最终焊为一体, 形成了新的克拉通^[9]。吴正文认为, 在北秦岭不存在加里东造山运动。秦岭的造山运动第 1 期发生在中三叠

参 考 文 献

- 1 袁学诚, 左 愚, 朱介寿等. 南华板块岩石圈构造与地球物理. 见: 八十年代中国地球物理学进展——纪念傅承义教授八十寿辰. 北京: 学术书刊出版社, 1989. 243~249
- 2 Guggisberg B, Berthelsen A. A two dimensional velocity model for the lithosphere beneath the Baltic Shield and its possible tectonic significance. *Terra Cognita* 1987, 7: 631
- 3 Blundell D, Freeman R. A continent revealed: The European Geotraverse. Cambridge University Press, 1992. 64
- 4 赵永贵, 王思敬, 刘建华等. 大别山造山带的地壳和下岩石圈构造特征. 大陆岩石圈构造与资源. 北京: 海洋出版社, 1992. 161~170
- 5 Revenaugh J, Jordan T H. Mantle layering from ScS reverberation 3 upper mantle. *J Geophys Res*, 1991, 96(19): 789~810
- 6 陈立华, 宋仲和. 华北地区地壳上地幔 P 波速度结构. *地球物理学报*, 1990, 33(5): 540~546
- 7 陈国英, 宋仲和, 安昌强等. 华北地区三维地壳上地幔结构. *地球物理学报*, 1990, 34(2): 172~181
- 8 孙 勇, 于在平. 夭折了的东秦岭加里东运动. 见: 秦岭造山带学术讨论会论文选集. 西安: 西北大学出版社, 1991. 167~173
- 9 任纪舜, 张正坤, 牛宝贵等. 论秦岭造山带——中朝与扬子陆块的拼合过程. 见: 秦岭造山带学术讨论会论文选集. 西安: 西北大学出版社, 1991. 99~110
- 10 吴正文, 柴育成, 黄万夫等. 秦岭造山带的推覆构造格局. 见: 秦岭造山带学术讨论会论文选集. 西安: 西北大学出版社, 1991. 111~120
- 11 丹尼斯. 国际构造地质词典. 北京: 地质出版社, 1983. 167
- 12 袁学诚, 徐明才, 唐文榜等. 东秦岭陆壳反射地震剖面. *地球物理学报*, 1994, 37(6): 749~758