

秦岭造山带岩石圈电性结构及其地球动力学意义

程顺有¹ 张国伟¹ 李立²

¹ 西北大学大陆动力学教育部重点实验室;西北大学地质学系,西安 710069

² 国土资源部物化探研究所,廊坊 065000

摘要 秦岭造山带三维电性结构特征的详细研究结果,结合其他多种地球物理和地质资料分析发现,自中生代以来,尤其是晚近时期华北和扬子两地块向秦岭造山带持续陆内俯冲过程中,由于南秦岭岩石圈向北挤入作用,秦岭造山带的后陆冲断褶皱带和北秦岭厚皮叠瓦逆冲带,现今处于岩石圈叠置加厚与拆沉作用的初期;与之相反,南秦岭正在经历拆沉-底侵的物质再循环作用,佛坪一带可能发育新的地幔柱;此外,在造山带北、南深部边界与内部不同岩石圈块体之间还伴随强烈的不同性质的走滑作用和物质侧向传输。最后探讨了秦岭造山带构造拆沉与巨厚岩石圈并存以及走滑构造作用等的地球动力学意义。

关键词 三维电性结构 低阻层 地球动力学 岩石圈 水平流变边界层

文章编号 0001-5733(2003)03-0390-08 中图分类号 P541 收稿日期 2002-09-12, 2003-02-20收修定稿

LITHOSPHERIC ELECTRICAL STRUCTURE OF THE QINLING OROGEN AND ITS GEODYNAMIC IMPLICATION

CHENG SHUNYOU¹ ZHANG GUOWEI¹ LI LI²

¹ The Key Laboratory of Continental Dynamics, Ministry of Education; Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

² Institute of Geophysical and chemical exploration, Ministry of National land and resources, Langfang 065000, China

Abstract Studying in detail three-dimensional lithospheric electrical structure features in the Qinling orogenic belt, and combining with other geophysical and geological data analysis, we find that since Mesozoic-Cenozoic eras, particularly late-geological time, as a result of continuous intracontinental subduction beneath the Qinling orogen by the North China block (NCB) southward and the Yangtze block (YZB) northward, present Hinterland fault-bounded fold zone (HLZ) and North Qinling thick-skinned imbricated thrust zone (NQZ) has a superimposed and thickened lithosphere and is in initial delamination period owing to the lithosphere of the South Qinling zone (SQZ) wedging into within that of the NQZ. In contrast, the SQZ is undergoing delamination and underplating to cause mass-energy recycling between crust and mantle, and around the Foping region a new plume is probably developing. In addition, the lithospheres within the Qinling orogen and its southern and northern boundaries also accompany different properties of intensive lithospheric strike-slip faulting to result in mass lateral transfer. Finally, we discuss geodynamic implication of the coexistence of the thickened lithosphere and a large-scale tectonic delamination as well as strike slipping.

Key words Three-dimensional electrical structure, Low resistivity layer, Geodynamics, Lithosphere, Lateral rheological boundary layer.

基金项目 国家自然科学基金重点项目(49732080,40234041)和国家自然科学基金项目(49572151)。

作者简介 程顺有,男,1953年生,毕业于西北大学地质学系,博士、副教授,主要从事地球物理与地球动力学等方面的研究。

E-mail: shunyouc@nwu.edu.cn

1 区域构造背景

秦岭造山带主要由三大套构造岩石地层单位所构成. 它是在晚太古代 - 早元古代变质结晶杂岩系基础上, 中元古代以发育裂谷与小洋盆并存为标志, 晚元古代至中生代早期作为原特提斯和古特提斯洋的北侧分支, 先后发展演化出商丹和勉略两个有限

洋盆, 从而分划出 3 个板块(碰撞缝合后称为地块, 下同)(图 1), 即华北板块、扬子板块及位于其间的秦岭微板块, 并分别沿商丹和勉略两个主缝合带由南向北俯冲消减, 相继于晚海西 - 印支期陆 - 陆斜向穿时碰撞、缝合与造山. 中生代又复合叠加了强烈的逆冲推覆、隆升与塌陷和平移走滑等一系列陆内造山作用, 最终形成现今的复合造山带^[1-4].

由于秦岭造山带的特殊大地构造位置和独特的

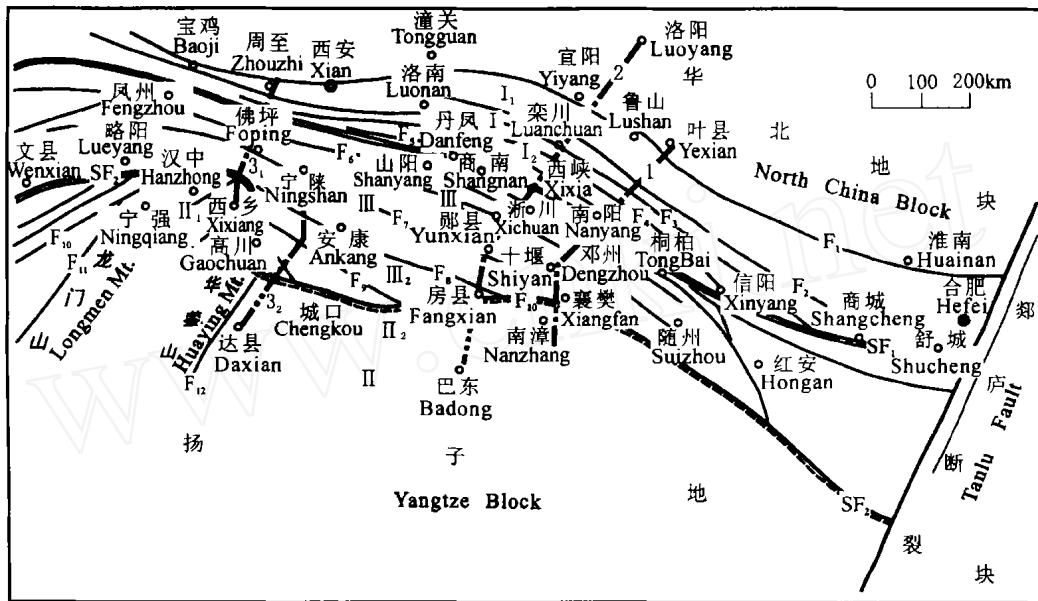


图 1 秦岭造山带主要构造单元及大地电磁测深剖面位置(据文献[1]修改)

华北地块(原华北板块)南部: 1 秦岭造山带后陆冲断褶皱带, 2 北秦岭厚皮叠瓦逆冲带; 扬子地块(原扬子板块北缘): 1 秦岭造山带前陆冲断褶皱带, 2 巴山—大别南缘巨型推覆前锋逆冲带; 秦岭地块(原秦岭微板块): 1 南秦岭北部晚古生代裂陷带, 2 南秦岭南部晚古生代隆升带, SF₁ 商丹缝合带, SF₂ 勉略缝合带; 主要断层: F₁ 秦岭北界逆冲断层, F₂ 石门—马超营逆冲断层, F₃ 洛南—栾川逆冲推覆断层, F₄ 皇台—瓦穴子推覆带, F₅ 商县—夏馆逆冲断层, F₆ 山阳—凤镇逆冲推覆断层, F₇ 十堰断层, F₈ 石泉—安康逆冲断层, F₉ 红椿坝—平利断层, F₁₀ 阳平关—巴山弧—大别南缘逆冲推覆带, F₁₁ 龙门山逆冲推覆带, F₁₂ 华蓥山逆冲推覆带. 1. 河南叶县—湖北南漳 MTS 剖面; 2. 河南洛阳—湖北巴东 MTS 剖面; 3. 陕西周至—四川达县 MTS 剖面; 3₁ 陕西周至—陕西西乡 MTS 剖面; 3₂ 陕西宁陕—四川达县 MTS 剖面.

Fig. 1 Sketch of tectonic units and locations of MTS profiles in the Qinling orogen (modified from paper [1])

构造演化, 受到了中外地球科学家的广泛关注. 近几年, 沿陕西周至—四川达县剖面完成了岩石圈大地电磁测深 (MTS) 和大地热流探测, 并搜集前人完成的有关资料, 获得了秦岭造山带丰富的岩石圈三维结构信息. 本文以地质资料作为先验约束条件, 对秦岭造山带的岩石圈电性结构进行了综合分析, 探讨秦岭造山带的地球动力学意义.

2 秦岭造山带岩石圈电性结构

2.1 剖面结构

2.1.1 河南叶县—湖北南漳大地电磁测深剖面

根据岩石圈电性纵、横向变化, 李立等^[5]将该剖面概括为 4 个电性单元(图 2). 秦岭造山带现今是在华北地块以陡倾角(沿 F₁)和扬子地块以缓倾角长距离(沿 F₁₀)从北、南两个方向分别向秦岭造山带之下俯冲背景下, 后陆冲断褶皱带(以下简称为后陆)及北秦岭厚皮叠瓦逆冲带(以下简称为北秦岭)北部以高阻厚岩石圈, 南秦岭以低阻薄岩石圈为特征, 整体呈不对称扇状抬起的巨大构造单元.

详细对比分析该剖面电性结构发现, 秦岭造山带内不同构造单元的岩石圈, 在以下几方面具有独特特征, 蕴涵着深层次的地球动力学意义.

首先, 后陆(1)及北秦岭(2)北部的高阻厚

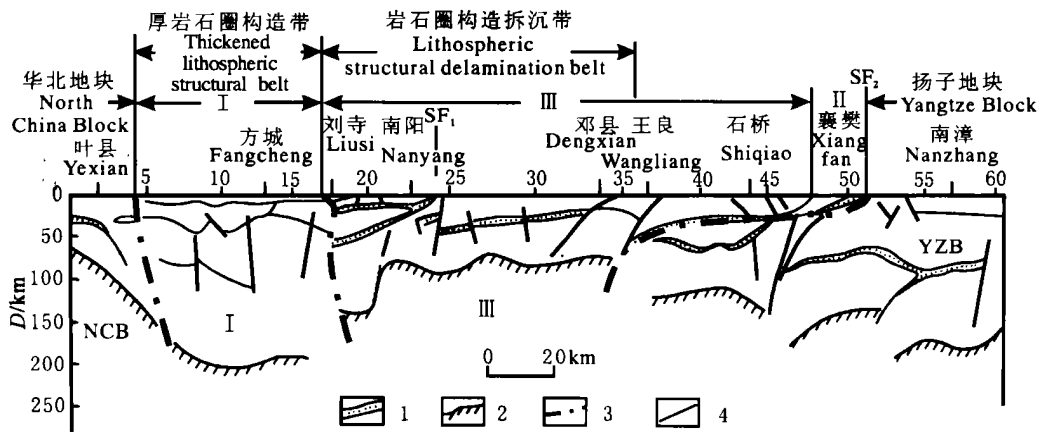


图2 河南叶县—湖北南漳大地电磁测深剖面(据文献[5]修改)

1. 低阻层, 2. 岩石圈底界, 3. 构造单元边界, 4. 推测断裂.

Fig. 2 The profile of MTS from Yexian in Henan Province to Nanzhang in Hubei Province (modified from paper [5])

岩石圈 (>200km), 其内部电性界面向北收敛、向南撒开, 清楚显示了南秦岭向北挤入北秦岭及后陆带, 导致叠置加厚的构造特征. 该单元与南秦岭的岩石圈电性分界, 深部位于刘寺一线(F_4), 相对于地面界线——商丹缝合带(以下简称为商丹带) (SF_1) 北移了约 32km^[5] 就是重要证据.

其次, 刘寺(F_4) 与襄樊(F_{10}) 之间的秦岭地块, 现今称为南秦岭, 总体上以低阻薄岩石圈(厚度 70~80km)、壳内及壳下发育低阻层为显著特征. 这些连续的低阻薄层是上部块体向南多层次逆冲推覆的构造运动界面, 其中从王良深部到襄樊地表的主构造底基推覆界面之下, 有扬子地块蛇纹石化橄榄岩岩层, 而不是秦岭地块的榴辉岩^[5]. 由此推断, 该构造活动界面可能代表了勉略缝合带(简称勉略带)的遗迹, 扬子地块沿 F_{10} 向北插入秦岭造山带之下的水平距离 >50km.

最后, 后陆和北秦岭、南秦岭北部(1)的岩石圈内近直立的断裂反映了中生代以来块体之间平行造山带走向的强烈走滑作用. 例如刘寺附近的皇台—瓦穴子断裂, 不仅导致两侧岩石圈底界相差 60~70km, 截断了商丹带的北延, 而且在剖面上呈明显的北凸弧形, 一方面显示了南、北岩石圈之间的走滑作用和南秦岭向北挤入的趋势; 另一方面表明, 由于这种走滑作用, 破坏了南秦岭向北秦岭岩石圈挤入的清晰界线.

2.1.2 河南洛阳—湖北巴东大地电磁测深剖面^{[6], [1]}

该剖面的总体电性特征与叶县—南漳剖面类

似. 在造山带内部, 除后陆及北秦岭的岩石圈底界深度 >200km 和商丹带及南秦岭北部的软流圈顶界深度为 70~80km 外, 值得注意的是, 在房县—十堰之间, 从地表下 15km 直至 60~70km, 出现电阻率为 1000 m、向北陡倾斜的高阻体, 笔者推断该高阻体的北缘可能代表了被后期推覆构造所掩埋的勉略带遗迹, 投影于地表的十堰附近. 此外, 浙川、郧县和十堰等断裂都显示走滑构造性质.

2.1.3 周至—达县大地电磁测深剖面

陕西周至—四川达县大地电磁测深地电断面分为两段(图 1 中的 3_1 和 3_2), 虽然其深部电性结构与叶县—南漳剖面基本相似^[5], 但详细对比发现存在明显的差异. 其中周至—西乡大地电磁测深地电断面^[7] (图 3), 在 3~9 号点(长角坝附近)之间, 岩石圈内电性界面表现为显著的向北收敛、向南撒开特征, 地表商丹带至深部界面模糊, 南秦岭南部的薄岩石圈呈突出的北凸弧形向北挤入, 使得后陆和北秦岭及南秦岭北部 3 个不同地壳块体成为一个整体, 岩石圈厚度达 125km, 为南秦岭南部岩石圈厚度的 2 倍以上, 更为清晰地显示了叠置加厚结果. 9 号点附近的镇安分支断裂(而不是商丹带)构成了南北不同电性结构的岩石圈分界. 9~13 号点之间对应南秦岭南部, 其岩石圈厚度约为 60km 左右, 与叶县—南漳剖面的商丹带和南秦岭北部相似. 13~18 号点, 除浅部中—上元古界三花石群表

1) 王家映, 张胜业, 杨森楠. 青海大柴旦—四川大足, 四川綦江—湖北十堰大地电磁测深成果报告. 1990.

现为高阻层外,岩石圈厚 80 ~ 100km,属于扬子地
块北缘岩石圈.

两侧向秦岭强烈挤入,构造应力造成岩石圈应变物
质分别向东与向西侧向挤出消散(走滑作用)和垂向
挤出与抬升,成为四川盆地北部中生代沉积的主
要物源区之一,也是导致主造山时期的前陆冲断褶
带和晚燕山期由北向南的推覆构造被强烈改造甚至
消失的主要原因.

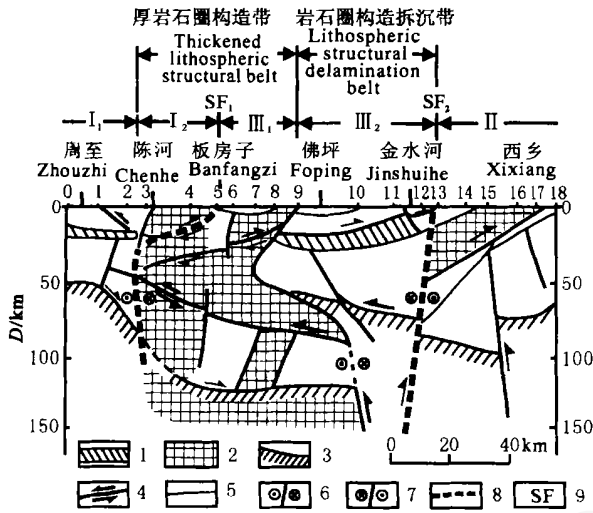


图3 陕西周至—陕西西乡大地电磁测深剖面(据文献
[7]再解释)
1 低阻层, 2 高阻体, 3 岩石圈底界, 4 推断层, 5 电性界线,
6 左行走滑断层, 7 右行走滑断层, 8 岩石圈电性单元界线,
9 古缝合带.

Fig. 3 The profile of MTS from Zhouzhi to Xixiang in Shaanxi
Province (modified from paper [7])

虽然 13 号点附近洋县断裂的两侧深部岩石圈
电性结构比较接近,但考虑到南秦岭后造山期的拆
沉和走滑等构造作用的复合叠加,笔者认为洋县断
裂可能反映了已被强烈改造的原勉略带位置,亦是
扬子地块北部挤入秦岭造山带之下最北缘的前锋
界线. 由于扬子地块北缘和鄂尔多斯地块分别从南北

陕西南陕—四川达县大地电磁测深地电断面^[7]
(图4),在 19~35 号点之间,电性低阻层由北向南抬
升,分别被安康断裂、红椿坝断裂、城口—房县巴山
弧断裂以及前陆冲断褶带等深断裂所切,总体上反
映了由北向南长距离多级大规模逆冲叠瓦构造格
局.由此推断,勉略带岩石圈分界位于地面 22 号点
的深部,从 22 号点深部至 35 号点接近地表的电性
低阻层代表了南秦岭巨型主推覆构造界面,若不考
虑扬子地块北缘岩石圈本身的缩短和物质消失,秦
岭地块向扬子地块北缘推覆水平距离至少 100km.

尤为特殊的是,36~42 号点之间出现顶面埋深
大于 30km 与 150km 深度内未测到岩石圈底界的高
阻体,显然是向北挤入秦岭造山带的扬子地块硬化
岩石圈基底的反映,与深层磁性体分布^[8]吻合,其北
界反映了活动的秦岭造山带与稳定的扬子地块之
间的深部岩石圈边界.该高阻体之上的地壳对应于前
陆冲断褶带.高阻体内部不同深度的水平低阻薄层
推断是扬子地块北缘岩石圈在原构造界面基础上,
层间拆离而即将发生构造拆沉的电性表现.42~48
号点间,170km 深处出现软流圈,壳内低阻层向南变
浅,对应于前陆带的前锋变形带.因此,秦岭造山带
由北向南的大规模推覆作用明显波及到达县以北的

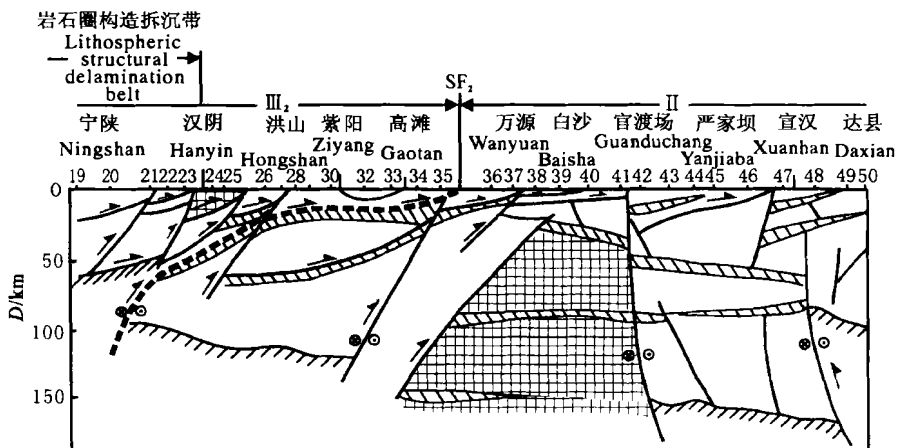


图4 陕西南陕—四川达县大地电磁测深剖面(据文献[7]再解释)
图例与比例尺同图3.

Fig. 4 The profile of MTS from Ningshan in Shaanxi Province to Daxian in Sichuan Province
(modified from paper [7])

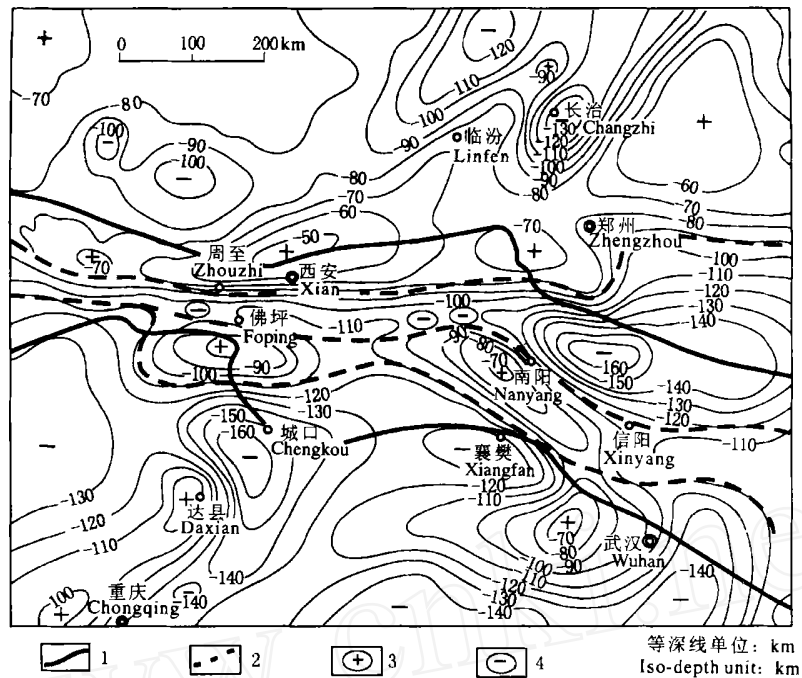


图5 秦岭造山带及其邻区上地幔低阻层深度图(据文献[9]修改)

1. 秦岭造山带地表边界, 2. 秦岭造山带深部岩石圈边界, 3. 上地幔低阻层隆起区, 4. 上地幔低阻层凹陷区.

Fig. 5 Iso-depth map of low resistivity layers in the upper mantle in the Qinling orogen and the adjacent regions(modified from paper [9])

49 号点附近,距巴山弧形断裂水平距离 120km 以上.

在图 3 和图 4 中,分别沿 9、13、35、42 和 48 号等点深部岩石圈厚度与电性差异的陡倾界线,明显反映了岩石圈块体间的强烈走滑作用.

2.2 平面结构

上地幔低阻层深度图^[9](图 5)揭示,在大区域近南北走向背景下,华北地块为相对隆起区,岩石圈厚度一般为 60~80km. 扬子地块北部,除重庆—达县、江汉盆地表现为上地幔低阻层隆起外,总体显示为上地幔低阻层凹陷区,埋深 120km 以上. 处于上述二者之间的秦岭造山带,位于上地幔低阻层的过渡带上,清楚地显示近东西走向、由东向西收缩、断续出现的南北两带. 北带,相当于后陆和北秦岭北部(西部还包括南秦岭北部),以上地幔低阻层凹陷(厚岩石圈)为特征;南带,与商丹带和南秦岭北部(西部为南秦岭南部)相当,以显著的上地幔低阻层隆起(薄岩石圈)为标志,尤其是佛坪南侧和西峡—南阳东西向隆起带,上地幔低阻层仅 60~90km. 这种东西延展、南北分带的电性结构与地震层析成像速度结构^[10,11]吻合.

秦岭造山带内及其南北边缘的上地幔低阻层平

面等深线的梯度带还反映了不同厚度、不同性质岩石圈耦合/非耦合的三条显著近东西向平移走滑边界,即秦岭造山带的深部岩石圈南北边界和位于其间、分割厚岩石圈与薄岩石圈的瓦穴子断裂—镇安分支断裂.

前述剖面和平面的岩石圈电性结构还表明,北大巴山(南秦岭南部)的岩石圈上部(地壳内)向南的大规模薄皮推覆构造的形成与扬子地块北缘“冷”而厚的高阻岩石圈向秦岭造山带沿襄樊—城口一线的强大强烈陆内俯冲作用直接相关.

3 地球动力学意义探讨

如前所述,秦岭造山带内不同构造单元岩石圈电性结构、流变学分层结构(另文详述)表现出东西延展、南北分带等强烈的非均匀性质,为中国东部统一岩石圈“去根”^[12,13]所无法解释,暗示在中国东部大区域地幔动力学背景下,有其独特的造山带动力学驱动机制(图 6).

后陆和北秦岭现今有很厚的岩石圈,地形也是造山带的主峰区域,成为长江流域与黄河流域的分水岭. 地质研究表明,仅太白山地区第三纪以来,主

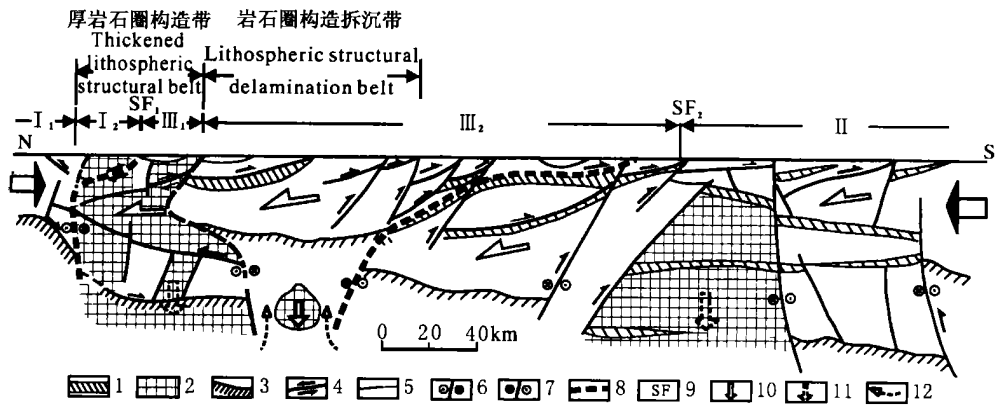


图 6 秦岭造山带西部初步动力学模型
构造单元划分同图 1,图例同图 3,其余参见正文.

Fig. 6 An initial geodynamic model for western Qinling orogen (tectonic elements same as Fig. 1)

峰明显由南向北迁移,形成北陡南缓的山系. MTS 揭示,北秦岭和后陆在总体显示高阻厚岩石圈背景上,发育向北收敛、向南撒开的电性不连续界面. 陆壳反射地震^[14~16]不仅显示南秦岭中、下地壳向北呈鳄鱼式插入北秦岭和后陆的下地壳,形成以 Moho 界面为底面的地壳叠置、展平的下地壳、新生的 Moho 界面和深部保存古莫霍界面. 如果 230~180Ma 间多次拆沉作用^[13]已使秦岭造山带完全去根的话,那么,上述结果表明,后陆和北秦岭(西部包括南秦岭北部),中生代以来地形强烈隆升与岩石圈加厚,主要与中生代以来,尤其是 180Ma 之后,陆内变形有成因联系.

一方面,华北地块岩石圈向南沿 F_1 作陡倾角俯冲,扬子地块向北沿 F_{10} 向秦岭地块(现今的南秦岭)、南秦岭又沿商丹带向北秦岭之下作缓倾角长距离俯冲,导致南秦岭地壳/岩石圈向北挤入北秦岭和后陆内部. 该双向俯冲作用导致了岩石圈上部逐渐由南向北的剧烈翘升、深部叠置加厚形成厚岩石圈根.

另一方面,高温高压岩石圈电性测定发现北秦岭新、老莫霍界面之间(33~38km)存在榴辉岩^[5],并未完全沉入地幔而消失,厚岩石圈内发育水平低阻薄层和近水平的新莫霍层等共同说明,加厚岩石圈的下地壳正在发生深变质作用和相变,导致密度反转,重力失稳,从而触发构造初始脱耦,处于拆沉作用的初始发动期.

因此,陆内俯冲成为后陆和北秦岭岩石圈加厚和晚近时期强烈隆升的主要驱动力源,构造拆沉作用不是隆升的主要因素.

对于印支期最终完成拼合的秦岭造山带主体组

成单元商丹带—襄樊(F_{10})之间的南秦岭,在主造山时期,华北和扬子二板块的强烈挤压汇聚作用,使南秦岭与北秦岭一起经历了地壳与岩石圈加厚过程,致使原岩石圈物质组成、结构和温压条件发生重大改变. 如果说在后造山阶段(230~180Ma 之间),岩石圈进行新的调整,尤其是下地壳镁铁质-超镁铁质麻粒岩相变为榴辉岩,大规模拆沉^[13]作用已结束的话,那么,现今南秦岭地震莫霍界面近水平(32~34km),山根已荡然无存,代之以热地温薄岩石圈,其下地壳和上地幔顶部发育含榴辉岩的橄榄岩类及其部分熔融体^[5]等事实充分说明,自 180Ma 之后,南秦岭的伸展隆升可能代表了下伏地幔柱或者已经部分除去了具有传导性质的上地幔以及正在经历扩展的大陆区域. 南秦岭处于下地壳非稳定状态^[17],经历着拆沉作用. 南阳—邓县之间、佛坪等地,除上地壳上部为脆性外,几乎整个岩石圈表现为韧性,反映了拆沉作用的峰值地段,同时伴随着底侵作用^[18]. 该区域现今正在进行强烈的壳-幔物质、能量的交换作用(壳-幔再循环),其地壳底部会出现莫霍层(壳-幔混合层),壳内存在局部熔融体.

如果佛坪穹隆的中心式递进变质作用^[19]代表了古的上升地幔柱,现今以佛坪为中心的东西一线具高阻特征的二长花岗岩下延深度有限^[8],其下深部有热的低阻介质,岩石圈厚度相对其北侧大幅度减薄,可能代表了新的地幔柱正在生成,而镇安分支断裂则是深部地幔及软流圈热介质上侵进入地壳的重要通道.

研究导致物质侧向传输,具有地壳规模、甚至岩石圈规模的平行造山带的走滑断裂是很重要的^[20]. 由于扬子地块和鄂尔多斯两大稳定地块(岩石圈相

对较厚)的对挤作用,对秦岭造山带产生近南北向的强大挤压应力.以佛坪为界,整个秦岭造山带东、西部分别向东与向西挤出、逃逸,平面上显示向东与向西撒开展布.在东部,它的南、北部岩石圈边界分别发生右行和左行走滑构造作用;而西部,其南、北部岩石圈边界分别发生左行和右行走滑构造作用.因此,佛坪地区成为秦岭造山带内东西段不同构造变形样式的构造转换节点.

综合大地电磁测深(MTS)、反射地震、地震层析成像(ST)与地热^[21],结合地面地质表明,秦岭前中生代长期受冈瓦纳、劳亚与古特提斯众多古板块的地幔动力学控制,从扩张到俯冲碰撞缝合,最终形成东西向主造山期构造.中生代以来,在太平洋、印度和欧亚 3 大板块的复合地幔动力学的特殊背景下,东部主要受太平洋地幔动力学体系的影响,在深部向大区域南北向调整的同时,扬子地块和华北地块分别从南北两侧向秦岭造山带之下做类似于阿尔卑斯、特提斯喜马拉雅和拉萨地块等双向陆内俯冲和拆沉作用,形成了以区域性南北向构造为主导与东西向构造复合叠加的“立交桥”式三维结构^[1,3,4].在造山带自身动力学子系统的控制下,后陆和北秦岭,现今主要显示岩石圈构造叠置加厚,同时处于初始拆沉作用诱发期.商丹带及南秦岭正在经历新的拆沉-底侵再循环过程,尤其佛坪一带可能存在新地幔柱的作用.平面上,在大区域构造背景下,具有不同边界条件的岩石圈块体间相互作用,特别是不同时期不同性质平行造山带的走滑作用,导致了秦岭一大别造山带不同地段的构造侧向变化和物质侧向传输,这正是秦岭造山带与其他造山带相比特殊之处.

4 存在问题

中比利牛斯西部的反射地震剖面在 15~20s 之间追踪到了于晚白垩世—中新世伊比利亚 (Iberian) 板块俯冲到 90km 深度的地壳根^[22].加拿大西北部的 Wopmay 造山带,40~110km 亦追踪到了前寒武纪岩石圈的构造拆沉和壳下叠瓦图像.对于具有复杂地幔动力学影响的秦岭一大别造山带,获得可靠的拆沉和岩石圈的深部图像和空间分布的关键有赖于高分辨率地震层析和高精度长记录反射地震观测与数字模拟以及卫星重力中区域剩余地形和剩余大地水准面的提取^[23].此外,秦岭造山带的陆内俯冲变形、岩石圈加厚与流变学分层等在岩石圈拆沉与底

侵过程中的相互制约机制,造山带内岩石圈南、北边界的走滑作用期次、性质、位移距离等构造作用之间的时空演化关系以及它们与南北向区域动力学体系的耦合/非耦合程度等都将是今后需要深入研究的重大地球动力学问题.

参考文献

- [1] 张国伟,孟庆任,赖绍聪.秦岭造山带结构构造.中国科学(B辑),1995,25(9):994~1003
ZHANG Guowei, MENG Qingren, LAI Shaocong. Tectonics and structure of Qinling orogenic belt. *Science in China (Series B) (in Chinese)*, 1995, 25(9):994~1003
- [2] 张国伟,张宗清,董云鹏.秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义.岩石学报,1995,11(2):101~114
ZHANG Guowei, ZHANG Zongqing, DONG Yunpeng. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling orogen: Implications for the tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 1995, 11(2):101~114
- [3] ZHANG Guowei, MENG Qingren, YU Zaiping, et al. Orogenesis and dynamics of the Qinling orogen. *Science in China (Series D)*, 1996, 39(3):225~234
- [4] 张国伟,郭安林,刘福田等.秦岭造山带三维结构及其动力学分析.中国科学(D辑),1996,26(增刊):1~6
ZHANG Guowei, GUO Anling, LIU Futian, et al. Three-dimensional architecture and dynamic analysis of the Qinling orogenic belt. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(Suppl.):1~6
- [5] 李立,杨辟元,段波等.东秦岭岩石圈的地电模型.地球物理学报,1998,41(2):189~195
LI Li, YANG Piyan, DUAN Bo, et al. Lithospheric geoelectrical model of East Qinling. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese)*, 1998, 41(2):189~195
- [6] 蒋洪堪,战双庆,王宏勋.十堰至洛阳大地电磁测深观测结果.物探与化探,1990,14(4):285~291
JIANG Hongkan, ZHAN Shuangqing, WANG Hongxun. Survey results of MTS from Shiyan in Hubei Province to Luoyang in Henan Province. *Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese)*, 1990, 14(4):285~291
- [7] 李立,金国元,刘玉华等.秦岭造山带东、西部岩石圈电性结构对比.中国学术期刊文摘(科技快报),1998,4(7):840~844
LI Li, JIN Guoyuan, LIU Yuhua, et al. The contrast of Lithospheric electrical structure between east and west Qinling orogen. *The Abstracts of Chinese Learned Periodical (Bulletin of Science and Technology)*, 1998, 4(7):840~844
- [8] 管志宁,安玉林,陈国新.秦巴地区地壳磁性结构研究.见:秦岭造山带学术讨论会论文选集(1990).西安:西北大学出版社,1991.192~199
GUAN Zhining, AN Yulin, CHEN Guoxin. A study on crustal magnetic structure in Qin-Ba area. In: A selection of papers presented at the conference on the Qinling orogenic belt. Xi'an: Northwest University Press, 1991.192~199

- [9] LI Li, Jin Guoyuan, Yang Piyuan, et al. Geoelectrical structure of the crust and upper mantle in the Qinling and adjacent regions. *Continental dynamics*, 1999, **4**(1):70~77
- [10] 刘建华,刘福田,孙若昧等. 秦岭—大别造山带及其南北缘地震层析成像. *地球物理学报*,1995,**38**(1):46~54
LIU Jianhua, LIU Futian, SUN Ruomei, et al. Seismic tomography beneath the Qinling—Dabie orogenic belt and both the northern and southern fringes. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1995, **38**(1):46~54
- [11] 袁学诚. 秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云构造模型. *中国科学(D 辑)*,1996,**26**(3):209~215
YUAN Xuecheng. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom clouds model. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 1996, **26**(3):209~215
- [12] 高山,骆庭川,张本仁等. 中国东部地壳的结构与组成. *中国科学(D 辑)*,1999,**29**(3):204~213
GAO Shan, LUO Tingchuan, ZHANG Benren, et al. Structure and composition of the continental crust in east China. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 1999, **29**(3):204~213
- [13] 高山,张本仁,金振民. 秦岭—大别造山带下地壳拆沉作用. *中国科学(D 辑)*,1999,**29**(6):532~541
GAO Shan, ZHANG Benren, JIN Zhenmin. Lower crustal delamination in the Qinling—Dabie orogenic belt. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 1999, **29**(6):532~541
- [14] 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
YUAN Xuecheng, XU Mingcai, TANG Wenbang, et al. Eastern Qinling seismic reflection profiling. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1994, **37**(6):749~758
- [15] 袁学诚,任纪瞬,徐明才等. 东秦岭邓县—南漳反射地震剖面及其构造意义. *中国地质*,2002,**29**(1):14~19
YUAN Xuecheng, REN Jishun, XU Mingcai, et al. Reflection seismic profile from Dengxian to Nanzhang, eastern Qinling, and its tectonic implication. *Geology in China*, 2002, **29**(1):14~19
- [16] 徐明才,高景华,刘建勋. 东秦岭深地震剖面上莫霍基本特征的研究. *地质与勘探*,2000,**36**(1):40~43
XU Mingcai, GAO Jinghua, LIU Jianxun. Research of Moho basic features on eastern Qinling deep seismic profile. *Geology and Prospecting* (in Chinese), 2000, **36**(1):40~43
- [17] Jull M, Kelemen P B. On the conditions for lower crustal convective instability. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(B4):6423~6446
- [18] 金振民,高山. 底侵作用(underplating)及其壳-幔演化动力学意义. *地质科技情报*,1996,**15**(2):1~7
JIN Zhenmin, GAO Shan. Underplating and its dynamic significances for the evolution of crustal-mantle boundary (in Chinese). *Geological Science and Technology Information*, 1996, **15**(2):1~7
- [19] 陕西省地质矿产局. 陕西省区域地质志. 北京:地质出版社, 1989. 1~698
Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province. Regional geology of Shaanxi Province (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989. 1~698
- [20] Hetzel R, Godny J. A crustal-scale, orogen-parallel strike-slip fault in the Middle Urals: age, magnitude of displacement, and geodynamic significance. *Int. J. Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 2002, **91**:231~245
- [21] 金昕,任光辉,曾建华等. 东秦岭造山带岩石圈热结构及断面模型. *中国科学(D 辑)*,1996,**26**(增刊):13~22
JIN Xin, REN Guanghui, ZENG Jianhua, et al. Thermal structure of lithosphere and transect model in eastern Qinling orogenic belt. *Science in China (Series D)* (in Chinese). 1996, **26**(Suppl.):13~22
- [22] Antonio Teixell. Crustal structure and orogenic material budget in the west central Pyrenees. *Tectonics*, 1998, **17**(3):395~406
- [23] Mikhail K K, Schwintzer P, Tikhotsky S A. A global isostatic gravity model of the Earth. *Geophys. J. Int.*, 1999, **136**:519~536