

秦岭造山带的结构构造*

张国伟 孟庆任 赖绍聪

(西北大学地质系, 西安 710069)

摘要 综合研究厘定秦岭造山带有二类造山带基底, 主造山作用时期有 3 个板块沿 2 个缝合带斜向俯冲碰撞, 同期发育有深部背景的垂向加积增生构造. 秦岭造山带现今三维构造几何学模型呈现为一种“立交桥”式结构. 深部地球物理场为近南北向异常与状态, 而上部地壳则以近东西向构造为主导, 其间的中、下地壳呈水平流变状态. 上部地壳结构由主造山期构造所奠定, 包含先期残存构造, 并强烈迭加晚近陆内造山构造, 形成统一而又包容多期不同动力学体制与成因的多种构造组合模型.

关键词 碰撞构造 垂向加积增生 秦岭“立交桥”式三维结构

关于秦岭造山带构造研究, 迄今虽然仍有分歧与争议, 但多数人认为它主要是华北与扬子两个板块的碰撞造山带, 并强调其主导的自北而南的推覆和走滑构造^[1~9]. 新的研究发现并证明, 秦岭造山带现今的结构构造主要决定于: (1)它是不同时期不同构造体制多种类型造山作用的复合; (2)晚元古代~古生代主造山作用时期是由 3 个板块沿两个主缝合带俯冲碰撞而造山; (3)秦岭板块内的岩石圈垂向加积增生与中、下地壳流变作用显著控制影响着秦岭的造山作用与构造变形; (4)中生代陆内造山构造强烈而显著, 使之面目一新. 因此, 秦岭造山带的现今结构构造复杂多样, 独具特色. 区别于已有造山带几何学模型, 又非为单一样式所能简单概括.

1 秦岭造山带主要构造演化阶段

秦岭造山带地表地质最基本的事实是它主要由三大套构造岩石地层单位所构成, 反映着 3 个主要演化时期, 3 种不同构造体制下秦岭造山带基本的地壳的物质组成及其构造演化. 它们是: (1)二类不同的造山带基底岩系: ①晚太古代~早元古代变质结晶杂岩系基底, 现今呈分散残块夹持在秦岭带内, 尚难可靠恢复其早期构造体制与演化; ②早、中元古代火山-沉积浅变质岩系, 属过渡性基底. 出露广泛, 以伸展构造机制为特色, 原为裂谷和小洋盆兼杂并存环境产物, 有强烈广泛的 1~0.8 Ga 晋宁期构造活动. (2)晚元古代~中三叠世广泛发育的从裂谷型火山建造演化为两类古大陆边缘沉积和裂陷沉积、形成不同类型蛇绿岩与花岗岩, 以及它们的碰撞构造, 共同揭示了板块构造体制, 而众多大面积基底抬升剥露又反映了陆块

1994-07-13 收稿, 1994-12-26 收修改稿

*国家自然科学基金重大资助项目

板内底侵垂向增生机制^[7]; (3) 中生代陆内断陷和造山带前后陆盆地沉积及构造岩浆活动, 指示了强烈的陆内造山作用. 其中古生代的地质记录表明主造山期奠定了秦岭现今基本构造格局. 秦岭是在先期构造演化基础上从晚元古代到中生代早期作为古特提斯洋的北翼分支逐渐发展演化出两个有限洋盆, 分划出 3 个板块: 华北、扬子板块及其间的秦岭微板块, 并沿商丹和勉略两个主缝合带(图 1, 2) 俯冲消减, 后相继于晚海西 - 印支期最终陆 - 陆斜向穿时碰撞, 最后又经陆内造山和急剧隆升形成今日秦岭.

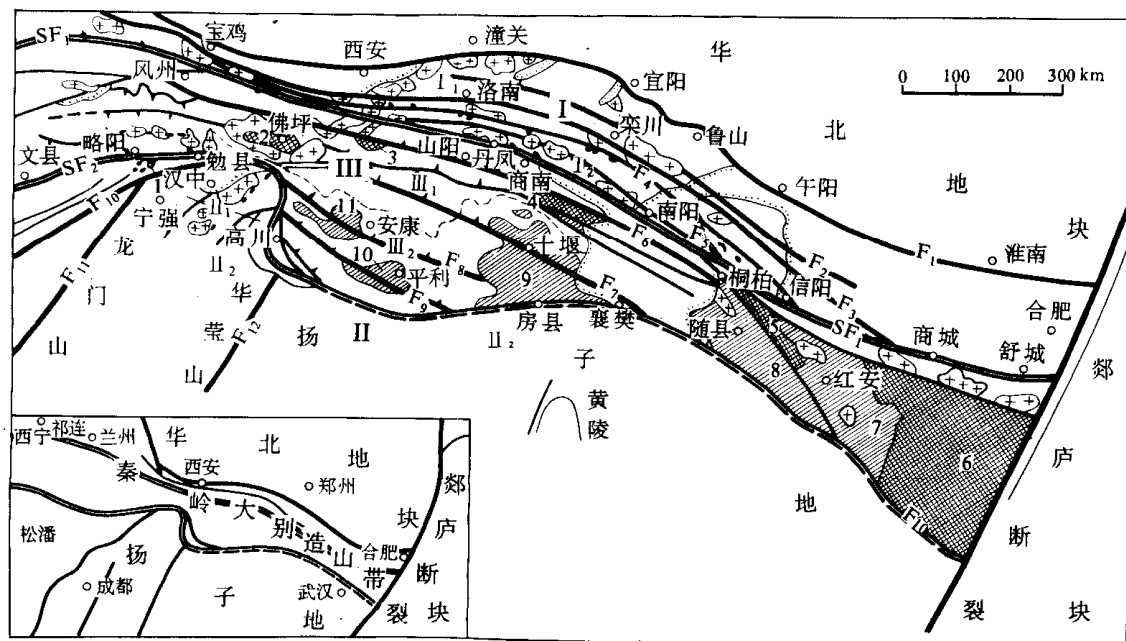


图 1 秦岭 - 大别造山带构造单元

I. 华北地块(原华北板块)南部: I₁——秦岭造山带后陆冲断褶皱带, I₂——北秦岭厚皮迭瓦逆冲构造带; II. 扬子地块(原扬子板块)北缘: II₁——秦岭造山带前陆冲断褶皱带, II₂——巴山 - 大别南缘巨型推覆前锋逆冲带; III. 秦岭地块(原秦岭微板块): III₁——南秦岭北部晚古生代裂陷带, III₂——南秦岭南缘晚古生代隆升带. 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——华莹山逆冲推覆带. 秦岭造山带结晶基底岩块: 1——鱼洞子, 2——佛坪, 3——小磨岭, 4——陡岭, 5——桐柏, 6——大别. 秦岭造山带过渡性基底岩块: 7——红安, 8——随县, 9——武当, 10——平利, 11——牛山 - 凤凰山. 十字符号表示花岗岩, 黑点(块)表示超镁铁质岩

2 秦岭主造山期 3 个板块与两个缝合带的厘定

2.1 商丹板块主缝合带(图 1 中 SF₁)

商丹带位于秦岭中部, 以宽约 8~10 km, 东西向千公里延伸. 研究证明它首先主要是秦岭主造山期板块的俯冲碰撞缝合带^[8], 理由是: (1) 商丹带内残存着晚元古代和古生代两类不同性质的蛇绿岩和火山岩, 其中晚元古代是小洋盆型, 如松树沟、黑河等 ((983±140)~(1 124±96) Ma, Sm-Nd)^[9,10], 古生代则多为岛弧型 (357~(402.6±35) Ma, (487±8) Ma, Sm-Nd, Rb-Sr)^[9,10]; (2) 商丹带内发育线形碰撞型花岗岩 (323~211 Ma, U-Pb, Rb-Sr)^[9,11], 而其北侧则成带分布两期俯冲型花岗岩 ((793±32)~659 Ma, 487~382 Ma, U-Pb, Rb-Sr)^[9,11], 并有自南而北的地

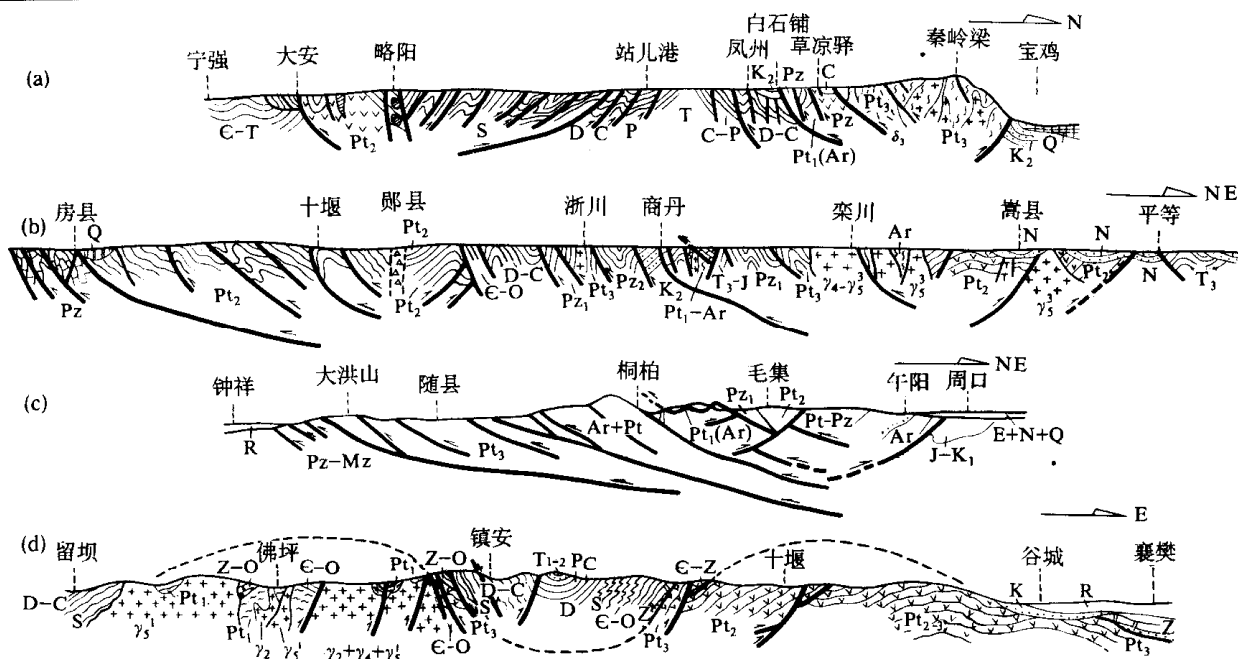


图 2 秦岭 - 大别造山带几条地质构造主剖面

(a) 宝鸡 - 宁强南北向剖面, (b) 洛阳 - 十堰南北向剖面, (c) 桐柏 - 随县南北向剖面, (d) 武当 - 留坝东西向剖面

球化学极性^[11], 显示向北俯冲碰撞效应; (3) 商丹带南缘断续分布弧前沉积, 目前确知最新岩层有二叠系. 新近在其北侧大理岩中发现含早三叠世生物化石^[12]; (4) 商丹带现今以不同时代不同性质不同构造层次的断层或韧性带 (211~126 Ma, U-Pb, Sm-Nd)^[8] 为骨架, 包溶混杂着上述诸多不同类型与来源的岩块, 形成为复杂多期复合的构造混杂带; (5) 商丹带是长期分割秦岭南北的分界线, 至少从震旦纪扬子型陡山沱与灯影组等在南秦岭广布而从不超越商丹一线, 和古生代南北秦岭遥相对应发育两类不同大陆边缘沉积等基本事实, 可以看出商丹带自晚元古代末起就一直是扬子与华北板块的界线, 后又成为秦岭与华北板块的接合带. 总之上述事实说明, 商丹一线曾有一个消失的有限洋, 商丹带就是其消亡的俯冲碰撞缝合线.

2.2 勉略板块缝合带 (图 1 中 SF₂)

它包括西部勉县 - 略阳蛇绿构造混杂岩带及其东西向的延伸. 是秦岭中仅次于商丹带的又一板块缝合带, 其主要特点是: (1) 它是从勉略向西经文县、玛曲、花石峡连接昆仑, 向东经巴山弧形带而直通大别南缘, 纵贯大别 - 秦岭 - 昆仑的巨型断裂构造带. 它原是一古特提斯板块缝合线, 因受燕山期阳平关 - 巴山弧 - 襄樊 - 广济巨大向南的推覆构造 (F₁₀) 的强烈逆冲掩盖, 致使其东段失去原貌, 仅勉略段保存缝合遗迹; (2) 勉略段以宽约 1~5 km 多条主干断裂为骨架, 由强烈剪切基质包容大量 An $\in$, Z $\in$, D-C 和众多超镁铁质等不同构造岩块形成, 形成自北向南的叠瓦逆冲推覆构造, 成为显著的构造混杂带; (3) 勉略蛇绿岩带岩石组合复杂, 主要包括超镁铁质岩、辉长岩类 (堆晶辉长岩)、海相火山岩、硅质岩、灰岩及基底变质岩块等, 多以构造岩块 (片) 形式产出, 构成显著蛇绿构造混杂带. 超基性岩出露较广, 多已蚀变为蛇纹岩类. 原岩主要是二辉橄榄岩或斜长橄榄岩. 其 REE 分配型式为亏损型 (La/Yb) = 0.4~1.20, (Ce/Yb)_N = 0.48~1.23, 具铕正异常, 类似 I 型蛇绿岩的超基性岩组合类型. 辉长岩类变形强烈, 具堆晶和辉长 - 辉绿结构, REE 有富集型与弱亏损型. 玄武岩有两类: 一是

REE 为亏损型, $(La/Yb) = 0.3 \sim 0.36$, $(Ce/Yb)_N = 0.33 \sim 0.42$, $(La/Sm) = 0.55 \sim 0.83$, $\epsilon_{Nd}(t) = \pm 6$, 微量元素(N型)MORB 标准化分布型式平坦, 除 Ba 和 Rb 外, 其它元素与(N型)MORB 标准值接近; 另一类是 REE 为富集型 $(La/Yb)_N = 1.84 \sim 4.70$, $(Ce/Yb) = 1.82 \sim 3.38$, $(La/Sm) = 2.79 \sim 4.75$, 微量元素(N型)MORB 标准化谱型为“三隆起”型, 此类具岛弧火山岩特征. 基性岩年龄为 $(241 \pm 4.4) \text{ Ma}$ (Sm-Nd), $(220.2 \pm 8.3) \text{ Ma}$ (Rb-Sr) (李曙光, 1994), 同时与之相匹配, 勉略带北侧有一列印支期俯冲型花岗岩带 $(219.9 \sim 205.7 \text{ Ma}$, U-Pb, 陈亚东 1994). 总之从构造、岩石组合和地球化学等综合特征表明该带是一印支期最终封闭, 具有岛弧火山岩、岛弧蛇绿岩和洋脊蛇绿岩残片等复杂构成的蛇绿构造混杂带; (4) 勉略到巴山弧形带内以缺失 O-S 岩层而发育 D-T 深水浊积岩、炭硅质岩等陆缘沉积岩系为独特特征, 而与其南北两侧缺失 D-C 岩层恰成鲜明对照, 显著不同. 联系上述众多蛇绿岩块和构造变形, 显然预示这里曾有一个泥盆纪打开的有限洋盆. 若向东追索, 下扬子区北缘古生代沉积向大别南缘出现深水相沉积及随县南侧古生代蛇绿岩的发现, 以及大别地块剧烈的向南逆冲推覆隆升. 综合分析推断沿勉略 - 巴山 - 大别南缘曾有一有限的扩张洋盆, 勉略带就是其消亡而后得以幸存的缝合遗迹.

2.3 华北地块南部的构成与结构(图 1 中 I)

商丹带至秦岭现今的北界(F_1)间的秦岭造山带基本组成部分, 以其大地构造属性, 基底与盖层组合、时代、亲缘关系等地质地球化学特征综合判定, 它们原属华北板块南部, 只是不同时期以不同方式卷入造山带中. 现以 F_3 分为两个次级构造单元: I_1 秦岭造山带后陆冲断褶皱带; I_2 北秦岭厚皮迭瓦逆冲带(图 1). 它们的主要特点是: (1) 具有华北型基底与盖层组合特征, 但是北秦岭带(I_2)直接较早加入造山带, 其变质变形岩浆活动强烈而复杂; (2) 中元古代以熊耳、洛南、宽坪、松树沟等火山 - 沉积岩群和超基性岩为代表, 具裂谷建造、陆缘沉积与小洋盆蛇绿岩特征, 反映了华北地块南缘早期的扩张裂解, 以致出现了小洋盆; (3) 晚元古代~古生代以丹凤、二郎坪、栾川等岩群为代表, 自南而北出现岛弧型蛇绿岩和岛弧火山岩, 弧后型蛇绿岩与火山岩以及裂隙碱性火山岩等, 反映了该带演化成为华北板块活动陆缘的特征; (4) 该带南缘保存有残余盆地沉积(C-P), 而中北部二叠系已有磨拉石堆积性质(洛南大荆). 自晚三叠世开始普遍发育断陷陆相沉积, 它们记录了秦岭晚海西 - 印支期从俯冲洋壳几近消亡至陆 - 陆全面碰撞的漫长复杂造山过程和中新生代陆内构造隆升成山的历程.

2.4 扬子地块北缘的造山带前陆冲断褶皱带(图 1 中 II)

扬子板块以具有晋宁期统一基底和晚元古代至显生宙盖层为特征. 秦岭勉略缝合带 - 巴山弧形带以南的汉南基底岩系和前陆盆地沉积及其冲断褶皱带(II), 应原属扬子板块北缘组成部分. 现今包括(1)扬子与秦岭板块印支期碰撞造山的前陆冲断褶皱带(II_1)和(2)燕山期巴山 - 大别南缘巨型推覆构造的前锋迭瓦逆冲带(II_2). 巴山弧形构造将另述于后.

2.5 秦岭微板块(图 1 中 III)

秦岭微板块是指介于商丹与勉略二缝合带间的南秦岭, 向东包括武当、随县、桐柏 - 大别山地带, 是秦岭带现今主要的组成部分, 原曾是一独立的岩石圈微板块(或地体), 晚古生代以来有别于其南北的扬子与华北板块, 而独具特色: (1) 它具有扬子型震旦系陡山沱组和灯影组统一的覆盖层. 研究证明它的基底是晋宁期复杂拼合体, 有来自华北型的小磨岭、陡岭、桐柏和大别等结晶地块, 也有如佛坪、鱼洞子等可能属扬子或其它异地而来的古老杂岩碎块, 现

今均呈分散构造岩块,由武当群及其与之相当的诸多早中元古代裂谷与小洋盆型火山岩系,经晋宁运动而使之拼合成扬子晋宁期基底;(2)秦岭板块上发育的震旦系及其与之连续的下古生界,从古生物与沉积岩层对比,表明它们主体属于扬子板块北缘的被动大陆边缘沉积体系,并以发育早古生代陆缘裂谷和碱性岩为特色,反映此时并无独立的秦岭板块,而仍属扬子板块;(3)已如前述勉略缝合带自泥盆纪开始从扬子板块北缘打开,逐步扩张出有限洋盆,分离出秦岭微板块,开始独自的发展演化,最后于印支期与南北板块相继碰撞,形成秦岭碰撞造山带。因此显然秦岭微板块是晚古生代从扬子板块上发展而独立出来的岩石圈小板块。新的古地磁资料也提供了这一信息^[13];(4)晚古生代至早中三叠世秦岭板块上广泛发育多种类型的不同沉积岩系,既有深水浊积岩系,又有浅水台地相和裂陷近源沉积,乃至残留盆地相堆积,反映了其从侧向伸展、垂向隆升裂陷到收缩、走滑等多样转换复合的复杂构造沉积环境与变迁。现今的南秦岭(III)可划分为 2 个次级构造单元:南秦岭北部晚古生代裂陷带(III₁)和南秦岭南部晚古生代隆升带(III₂);(5)秦岭板块内突出有众多古老基底抬升的穹形构造,控制着秦岭带的沉积古地理环境与构造变形,具有重要意义,将述于后;(6)南秦岭自晚三叠世开始与整个秦岭一致结束海相沉积,发育断陷陆相盆地,标志秦岭转入新的大地构造演化阶段。

3 秦岭造山带的现今构造几何学模型

3.1 平面结构特征

(1)秦岭造山带不同演化阶段有不同的边界,现今 F_1 和 F_{10} (图 1)为其南北边界。边界弯曲多变,尤其南界酷似喜马拉雅造山带南界形态。

(2)秦岭造山带西延撒开分 3 支分别与祁连、昆仑和松潘相连,向东则渐次收敛束为大别造山带,东为郯庐断裂所截。东去收敛出现 ① 东秦岭区的北秦岭 I_2 带被向南的巨型推覆和北淮阳反向逆冲逆掩而消亡,并相应形成北淮阳构造混杂带。② 巴山-大别山南缘的向南巨大推覆断层(F_{10})逆掩盖掉勉略缝合带的东延部分。③ 秦岭造山带地壳的东部高度收缩、消减、抬升、深部强烈流变和大别超高压根部带大面积以不同机理、方式多期次最终剥露。

(3)现今的秦岭造山带自东而西决非同一构造层次出露,而是包容了依次出露的 3 个层次:大别深部构造层次、东秦岭中深和中浅层次的交互出现,西秦岭则以中浅层次为主。它们综合反映了秦岭造山带的地壳剖面基本结构特征。

3.2 秦岭地表结构构造与地球化学示踪

地质、地球化学和地球物理综合研究证明,秦岭主体构造格架主要是主造山期 3 个板块沿两个缝合带的俯冲碰撞与陆块板内垂向增生构造及其两者的复合。现今构造特征是:(1)秦岭造山带南北分别以前陆和后陆向南向北的反向冲断褶带(I_1 , II_1),逆冲向扬子和华北地块,成秦岭南北两道镶边过渡构造,扇形向外;(2)北秦岭(I_2)在原华北板块南缘活动陆缘结构基础上,卷入基底与盖层形成强大的向南为主的迭瓦逆冲厚皮构造带。地球化学也证明它是壳幔交换最剧烈的物理化学拼合分异变动带^[11],也是秦岭最强烈复杂的变质变形流变构造岩浆带;(3)商丹和勉略二缝合带,总体表明扬子、秦岭板块依次向北俯冲,构成岩石圈尺度的向北单向叠置俯冲,但秦岭北部的华北地壳南缘却向南俯冲,形成秦岭反向俯冲叠置的构造总格局。二缝合带因后期推覆、走滑和块断构造的迭加改造现今构成复合型构造混杂带;(4)南秦岭,即原秦岭板块的构造既决定于它与南北板块的碰撞构造又受控于板内垂向加积

增生作用。① 由于它是夹持于两个相对较大的板块间的一个晚期形成的微板块,同时又具有拼合非统一的基底,所以在其与南北板块相继俯冲碰撞时,随着南北板块运动速率、方向及具体边界条件的不同,尤其与扬子板块内部不同构造块体,如川东、川中、川西等相互作用,便发生随地而异的极富变化的碰撞构造组合。最为突出的是以佛坪基底隆起构造为界,以东地区因其南缘邻接扬子川东活化软基底和盖层,使之得以产生多期次多层次大幅度向南的拆离滑脱推覆构造,形成巴山弧形构造带,而以西地区,则因直接碰撞川中-汉南古老硬化基底,使秦岭西部一反东部构造样式,形成自南向北长距离逆掩推覆构造,两者鲜明对照,同期反向运动,形成不同构造,是为秦岭构造一大特色。更应注意的是,两者之间恰对应佛坪东侧的横贯秦岭的晚海西-印支期 NNE 向构造花岗岩带,成为秦岭东西反向推覆构造交接变化的挤压剪切转换带,具重要构造意义。② 秦岭板块内另一瞩目现象是发育大面积众多基底隆起,形态各异,并强烈控制秦岭构造面貌。除东部已为地学界注意的大别超高压变质基底出露外,东秦岭中诸如武当、陡岭、小磨岭、佛坪、鱼洞子等古老基底剥露也十分引人注目(图1)。它们出露并非同一机制成因^[14],如武当更多具伸展机制下变质核杂岩性质的剥离构造特征^[15],穹形隆起,并受后期向南的逆冲推覆构造的改造。而陡岭群则更多显示其大型多级逆冲推覆构造的推出,其中最值得研究的是佛坪基底隆起穹隆构造(图3)。它即是一个以古老结晶杂岩(佛坪群 19~18 Ga, Sm-Nd, 张宗清(1994))为核心,缺失中、上元古界直接以韧性带被盖层(Z-D)所披盖的椭圆形穹隆构造,又是一个以大量花岗岩为主的深层岩浆活动中心,同时更显著的它还是一个变质热中心,从核部向外,不受岩层和时代控制,变质级别由高角闪岩相至低绿片岩相依次围绕穹隆成环带分布。显然,它不仅仅是板块侧向运动和伸展构造所派生,而更重要反映它是在深部背景下所发生的造山带岩石圈垂向加积增生作用,突出而重要的参与了秦岭大陆造山带的形成与演化,具有重要的岩石圈动力学意义。③ 由于武当和佛坪等大型基底抬升的同构造作用,南秦岭出现受它们控制的穹形背斜和盆状向斜呈 NNE 向相间分布,使之在东西构造基础上近于直交叠加成网格状构造样式,显示了秦岭大陆造山带复杂多样性; (5) 秦岭中生代陆内构造主要表现为主造山期后的逆冲推覆,左行平移和块断升降,以及相伴的塌陷盆地沉积与相继的变质变形,而更为突出的是中生代晚期 100 Ma 左右,秦岭造山带发生强烈的伸展作用和急剧隆升,高差大于 10 km, 同时伴随大规模花岗岩浆活动与成矿作用,反映发生了不亚于板块碰撞构造的强烈陆内造山作用,并随之产生一系列晚近时期塌陷断裂陆相盆地和北西与北东向 X 型横穿秦岭的剪切断裂。

3.3 深部地球物理场状态与结构

3.3.1 秦岭区重、磁、热等地球物理场特征 东秦岭区域重力场显示其恰位于太行至武陵山和青藏东侧的中国两个 NNE 向重力梯度带之间,内部则为一东西向、以平顶山为顶点向西开口的重力低带,而卫星重力显示秦岭区以 108° E 为界,东部与大别连为一体呈区域重力高,西部则为区域重力低,显示东西有差异。秦岭区域磁场具双层磁结构,浅层复杂局部异常叠加在深部区域低磁异常场上,明显区别于华北与扬子磁异常特征,但秦岭中有与华北、扬子相对应的 NE 向磁异常贯通^[16]。秦岭区居里面呈东西隆起状,为高热流区,平均达 109.275 mW/m, 地温梯度平均为 2.8 °C/100 m。新的古地磁资料反映秦岭带 3 个独立块体经分离、漂移,最后于中生代初聚合^[13]。此与秦岭地质事实较吻合,提供了新的重要信息。

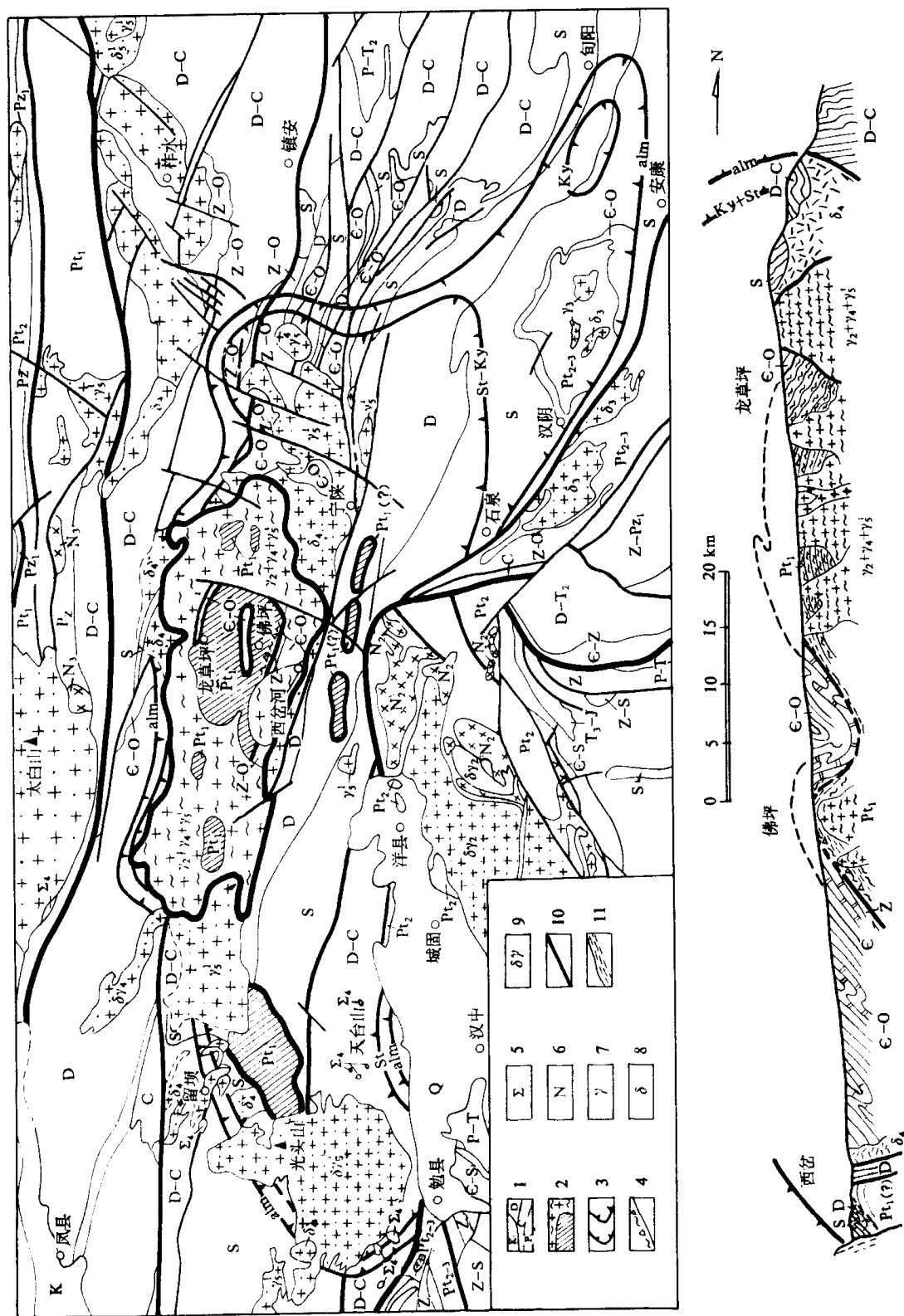


图 3 秦岭佛坪穹隆变质构造图 (据“陕西地质志”修改重新修编)

1—各时代地层及界线, 2—佛坪穹隆基底结晶杂岩, 3—变质带界线; alm: 石榴石带界线; St: 十字石带界线; Ky: 蓝晶石带界线; 4—刚玉片麻岩带, 5—超基性岩, 6—基性岩, 7—闪长岩, 8—花岗岩类, 9—花岗岩闪长岩类, 10—断层, 11—韧性剪切带

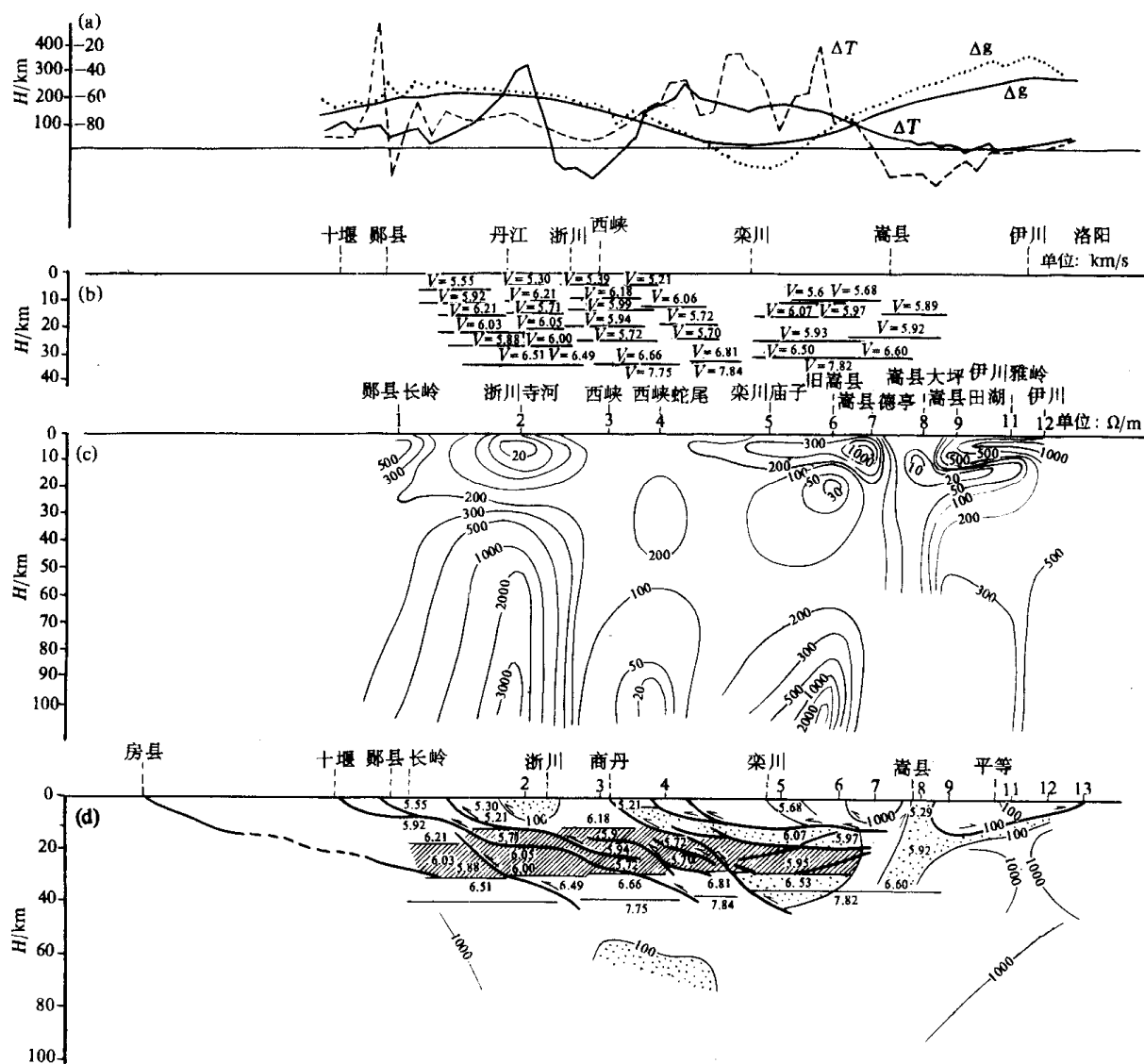


图4 秦岭QB-1地球物理剖面及地质解释图
(a)低速层, (b)低阻带, (c)等电阻率线, (d)地震波速

3.3.2 秦岭深部结构与状态 秦岭区现有地球物理测深主要集中于东部,是认识秦岭深部结构与状态的基本依据。

(1)地震(反射与折射)和大地电磁测深(据袁学诚,图4)反映秦岭岩石圈结构极不均一^[17]。东部地壳平均厚度小于35 km, Moho面呈平缓南倾斜坡,无山根,有异常地幔。相应于地表商丹带,剖面上呈铲状向北倾伏,成为地壳波速与电性结构的分界线,并是一少反射的地震透明区。上地壳反射界面多成连续波状和叠置状,显示上部薄皮构造特征。中、下地壳发育平缓反向反射界面交织,尤以商丹以北更显著。同时南北秦岭中地壳发育低速高导层。电性结构还显示秦岭北部浅层有南倾低阻层,深部却为南倾高阻体。北秦岭壳内有巨大低阻体,而南秦岭则有规律的呈向北倾伏。大地电磁和大地热流探测(据李立,金昕)共同反映,软流圈顶部起伏变化,北秦岭和巴山弧形南缘深达250 km,而南秦岭平均顶部起伏在110 km上下,对比

秦岭带 Moho 面平均深 40 km, 近水平状, 显然岩石圈地幔厚度差可达 150 km, 软流圈急剧抬升, 无疑具重要动力学意义。

(2) 秦岭区 CT 三维成像结果(据刘福田, 刘建华)表明秦岭岩石圈, 乃至更深部具显著横向不均一性, Moho 面起伏不平, 其顶面以 108° E 为界, 以东为正速度扰动区, 西部为负速度扰动区, 和卫星重力一致反映西部与东部不同地壳厚度大于 40 km, 有山根显示。CT 速度结构清楚反映中地壳特别发育低速“热区”, 最低为 5.74 km/s。软流圈顶面起伏大, 秦岭主体部分平均在 110 km 上下。CT 更为突出的反映出秦岭现今深部地幔和下地壳的动态调整变化趋势: ① 垂向上 CT 图象反映从上部显著以近东西向异常为主逐渐变为深部近南北向异常为主, 表明上下不一致的“立交桥”式的结构。② 一系列东西向 CT 剖面共同显示高低速度异常区呈平行相间的规律向东倾伏, 反映一种深部物质调整流变状态^[18]。

3.4 秦岭造山带现今结构的几何学模型

综合以上地表地质和深部结构与状态特征, 秦岭现今三维结构基本格架和特征概括如下。

(1) 秦岭造山带地壳与上地幔结构极不均一, 分层分块。纵向圈层清楚, 构成上、中、下多层岩石圈流变学分层结构, 发育多级构造物理界面, 横向分区块, 差异显著。软流圈顶部起伏变化大, 秦岭地块平均顶面在 110 km 上下, 而其两侧可深达 200 ~ 250 km。Moho 面平均在 40 km, 东部地壳薄, 最薄至 29 km, 无山根, 西部地壳逐渐加厚至 57 km, 有山根。

(2) 秦岭岩石圈浅层与深部结构状态不完全一致。中、下地壳和上地幔具动态最新调正变化的特征, 现今的 Moho 面可能是深部演化的最新产物, 并非主造山期古 Moho 状态, 东部 Moho 面展平抹去山根, 而西部正在调正之中, 残留山根。但现今中、上地壳, 虽受晚近构造强烈改造, 然而更多保存了古结构遗迹(东西向)。使秦岭造山带从上部到深部总体结构呈现出一种“立交桥”式宏观构造几何学模型, 即深部具有与中国现今大区域地球物理场一致的近南北向异常状态, 而上部则以近东西向结构构造更为显著突出, 其间的中下地壳处于近水平的流变变形过渡状态, 表明深部条件下地幔和中下地壳具更大塑性流变特征, 得以调正, 而上部地壳固态硬化滞后, 更多保留了古老构造遗迹。因此, 地幔的最新拆沉(delamination)调正^[19]和软流圈的抬升, 就成为秦岭中生代陆内造山的主要动力来源。

(3) 秦岭造山带地壳结构上、中、下三层清楚, 发育多种具动力学意义的构造界面。下地壳具流变性已有新的展平调正。中地壳则从发育地震反射界面、低速高导层和 CT 低速结构共同暗示它可能不但是主造山期, 而且也是现今秦岭岩石圈结构调正的主要流变过渡带, 所以中、下地壳作为秦岭岩石圈流变学分层的壳内流体软层^[19, 20], 是一重要动力学层, 对于秦岭上部构造具有重要意义。秦岭上部构造在深部构造背景上, 由主造山期构造所奠定, 形成地壳尺度的扇形侧向迭置与垂向加积的复合构造总格局, 构成一幅复杂独特, 统一而又包容多期不同动力学体制与成因的多种构造组合图象。

(4) 统一的秦岭 - 大别造山带, 正在滞后地跟随其深部地质最新演化过程, 发生东西的裂解, 成为大别、东秦岭、西秦岭 3 个构造块体, 并受南部扬子次级构造块体性质与相对运动和北部鄂尔多斯地块顺时针旋转运动等的相互作用, 以不同速度正在差异隆升之中。东秦岭晚白垩纪以来抬升幅度大于 10 km, 至今仍控制影响着中国大陆南北的气候、生态, 乃至人文地理。

参 考 文 献

- 1 李春昱, 刘仰文, 朱宝清等. 秦岭及祁连山构造发展史. 见: 国际交流地质学学术论文集(一). 北京: 地质出版社, 1978. 174~185
- 2 王鸿祯, 徐成彦, 周正国. 东秦岭古海域两侧大陆边缘区的构造发展. 地质学报, 1982, 56(3): 270~279
- 3 Mattauer M, Matte Ph, Malavieille, J *et al.* Tectonics of Qinling Belt: build-up and evolution of Eastern Asia. *Nature*, 1985, 317: 496~500
- 4 Hsu K J, Wang Q, Li J *et al.* Tectonic evolution of Qinling Mountains, China. *Eclogae Geol Helv*, 1987, 80: 735~752
- 5 张国伟. 秦岭造山带的形成与演化. 西安: 西北大学出版社, 1988
- 6 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆等. 东秦岭复合山链的形成——变形、演化及板块动力学. 北京: 中国环境科学出版社, 1988
- 7 Jamieson R A, Beaumont C. Orogeny and metamorphism: A model for deformation and pressure-temperature-time paths with Applications to the centre and Southern Appalachians. *Tectonics*, 1988, 7(3): 417~445
- 8 Zhang Guowei. The major sutural zone of the Qinling belt *Journal of southeast. Asian Earth Sciences*, 1989, 3(1—4): 63~76
- 9 张宗清, 刘敦一, 付国民等. 北秦岭变质地层秦岭、宽坪、陶湾群同位素年代研究. 北京: 地质出版社, 1994
- 10 李曙光, Hart S R, 郑双根等. 中国华北华南陆块碰撞时代的钐-钕同位素年龄证据. *中国科学, B 辑*, 1989, (3): 312~319
- 11 张本仁. 秦巴地区区域地球化学文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990
- 12 冯庆来, 杜运生, 张宗恒等. 河南桐柏地区三叠纪早期放射虫动物群及其地质意义. *地球科学*, 1994, 19(6): 787~794
- 13 刘育燕, 杨巍然, 森永速男等. 华北、秦岭及扬子陆块的若干古地磁研究结果. *地球科学*, 1993, 18(5): 628~642
- 14 Rickard M J. Basement-cover Relationships in orogenic belts. In: Rickard M J ed. *Basement Tectonics*, Kluwer: Academic Pub, 1992, 247~254
- 15 Davis G H. Shear zone model for the origin of metamorphic core complexes. *Geol*, 1986, 11: 342~347
- 16 周国藩, 陈超. 秦巴地区地壳深部构造特征初探. 见: 秦岭造山带学术讨论会论文选集. 西安: 西北大学出版社, 1990. 185~191
- 17 袁学诚. 秦岭造山带的深部构造与构造演化. 见: 秦岭造山带学术讨论会论文选集. 西安: 西北大学出版社, 1990. 174~184
- 18 Ranalli G, Murphy D. Rheological stratification of the lithosphere. *Tectonophysics*, 1987, 132: 281~295
- 19 Kay R W, Kay S M. Delamination and delemination magmatism. *Tectonophysics*, 1993, 219: 177~189
- 20 Quinlan G. Tectonic model for crustal seismic relectivity patterns in compressional orogens. *Geol*, 1993, 21: 663~666