

新疆可可托海—四川简阳地学断面 岩石圈与软流圈结构

蔡学林¹ 曹家敏² 朱介寿²

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;
2. 成都理工大学信息工程学院, 四川 成都 610059)

提 要:运用现代构造解析理论和方法,对新疆可可托海—四川简阳人工地震测深剖面与天然地震面波层析成像进行构造解析基础上,综合地质学、深源岩石包体构造岩石学和地球化学以及其他地球物理学标志等多学科综合研究显示,高速块体或幔块构造的几何结构型式是控制该区岩石圈构造格局和岩石圈表层构造变形基本条件之一。本文建立起该地学断面地壳及岩石圈与软流圈速度结构模型和物质组成结构模型,划分出岩石圈 3 种几何结构模式:克拉通陆根状结构、造山带楔状结构和高原陆根状结构,以及岩石圈二类构造演化类型:克拉通型岩石圈和增厚型岩石圈。在系统论述断面地壳及岩石圈结构构造类型特征基础上,探讨了该断面软流圈结构特征,岩石圈与软流圈相互作用及其地幔动力学模式。

关 键 词:岩石圈;软流圈;地震测深;地震层析成像;构造解析;幔块构造;新疆可可托海;四川简阳
中图分类号:P544 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2008)03-0375-16

岩石圈与软流圈三维结构探测与研究是 21 世纪初地球科学前沿研究领域之一。新疆可可托海—四川简阳地学断面位于全球最长(约 14 000 km)的北冰洋—欧亚大陆—太平洋地学断面的中段部分,长约 2 450 km(图 1),该断面从 20 世纪 80 年代以来,先后进行过地质学、地球物理、岩石地球化学等多学科探测与综合研究^[1-10]。近期,在承担国家自然科学基金重点项目和国土资源部专项计划《中国岩石圈三维结构》时,又完成该断面 0~430 km 深的天然地震面波层析成像^[17-18]及其构造解析^[19-21]。根据人工地震测深剖面(图 2)和地震面波层析成像(图 3)的构造解析,结合构造地质学和深源包体岩石地球化学研究,编制出《新疆阿尔泰—四川简阳地学断面岩石圈与软流圈结构图》(1:250 万),从而建立起该断面地壳、岩石圈与软流圈结构模型,获得岩石圈与软流圈结构若干新认识,为进一步研究中国西部岩石

圈与软流圈三维结构提供构造框架和地幔动力学依据。

1 地学断面变形构造格局与地壳结构

1.1 变形构造格局

根据地质学、构造地质学、地球物理和地球化学的综合分析与研究,以地表克拉美里断裂带、阿齐克库都克断裂带、阿尔金断裂带和北川—九顶山断裂带为界,将该断面自西向东可划分为兴蒙地块、准噶尔地块、塔里木地块、青藏地块和上扬子地块等五大构造单元。通过实地地学断面中新生代变形构造格局系统研究,自西向东可划分为阿尔泰推覆构造^[10]、准噶尔宽缓褶皱构造、北天山推覆构造^[10]、吐哈宽缓褶皱构造、东天山推覆构造^[10]、敦煌宽缓褶皱构造、阿尔金走滑—推覆构造^[8-9,22]、柴北缘推覆构造^{①[12]}、东昆仑推覆构造^{①[12]}、龙门山推覆构造^[9,14,16,23]和川中宽

收稿日期:2008-03-14;改回日期:2008-03-26

基金项目:国家自然科学基金重点项目(49734150,40234047)、面上基金(40474032)和国土资源部专项计划项目(20001010206)联合资助。

作者简介:蔡学林,男,1935 年生,教授,长期从事构造地质、前寒武纪地质与深部地质教学与研究工作;E-mail:caixuelin1935@sohu.com。

①蔡学林,林茂炳,魏显贵,等.青海花石峡—甘肃阿克塞区带地质构造及有关专题研究报告[M].成都理工大学档案馆,1990:14-57.

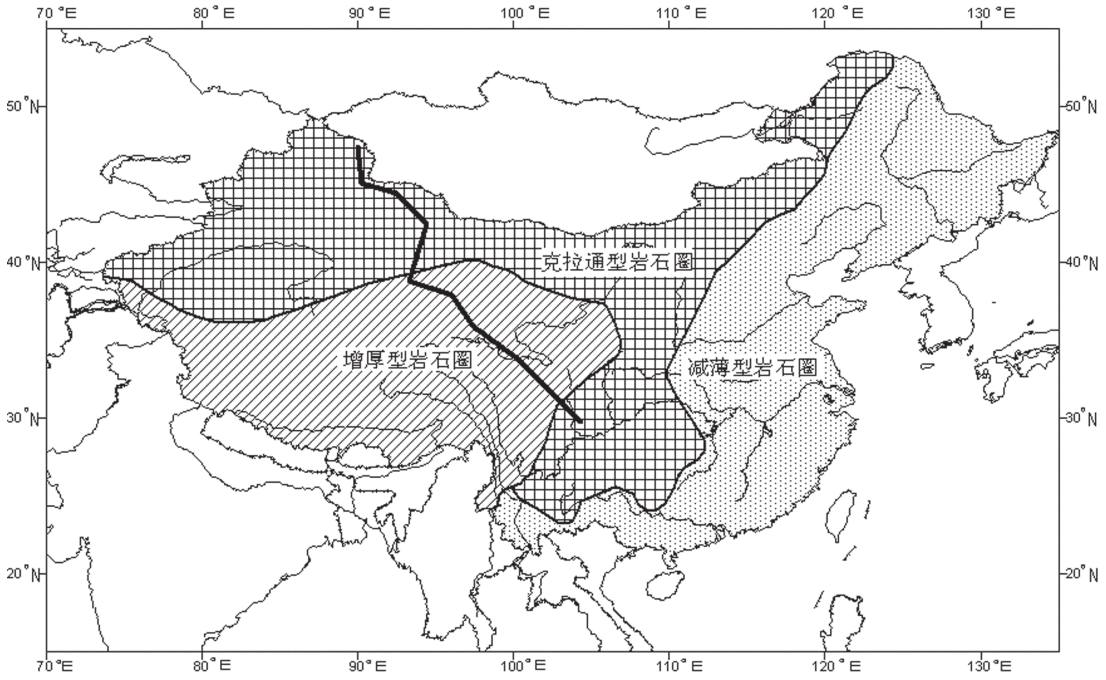


图 1 中国大陆岩石圈构造分区及地学断面位置图

Fig.1 Lithospheric tectonic divisions and location of the geoscience transect in continental China

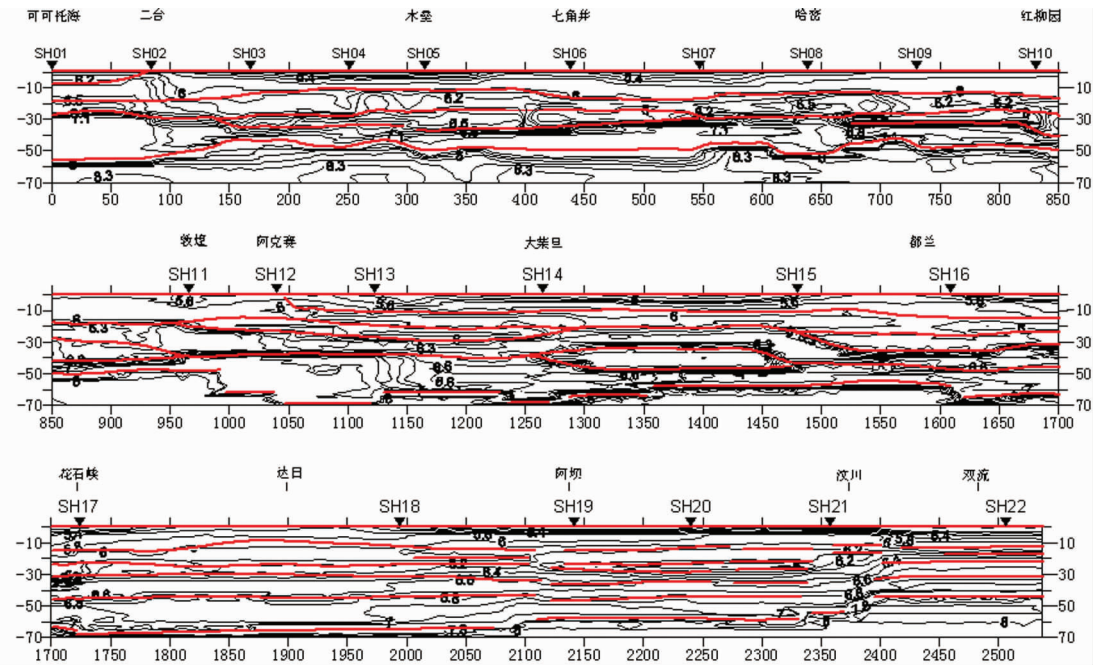


图 2 新疆可可托海—四川简阳地震测深速度结构剖面(据曹家敏等,2000)

Fig.2 Seismic sounding P-wave velocity structure profile from Kokoitoke of Xinjiang to Jianyang of Sichuan

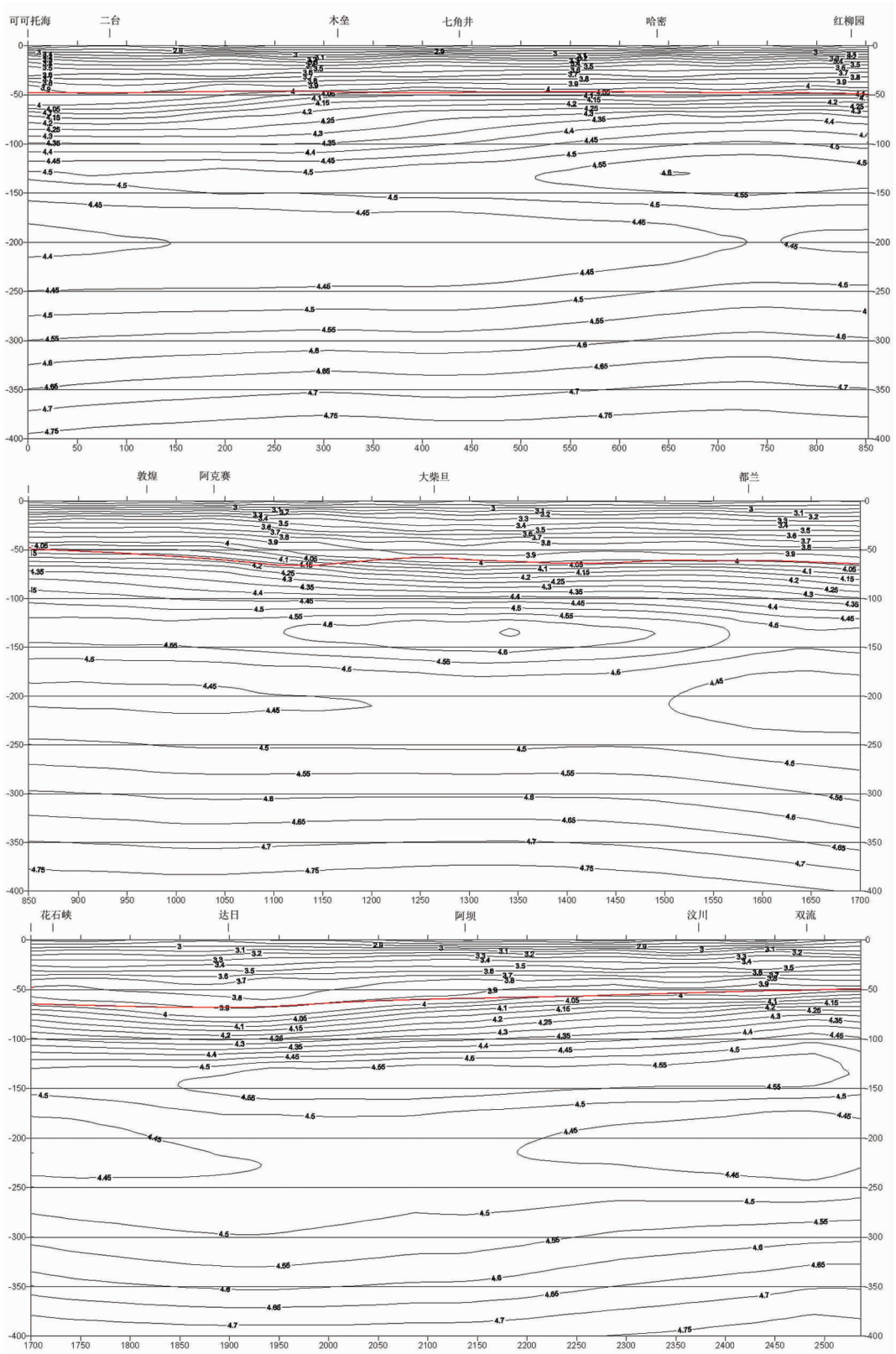


图 3 新疆可可托海—四川简阳面波层析成像 S 波速度结构断面
Fig.3 S-wave velocity structure profile of surface wave tomographic imaging from Koktokay of Xinjiang to Jianyang of Sichuan

缓褶皱构造(图4)。

1.2 地学断面地壳结构

1.2.1 地震测深剖面构造解析思路

运用比较构造学、地球层块构造和解析构造学的理论和方法^[24-26]对已完成的新疆可可托海—四川简阳地震测深剖面(图2)进行了系统分析,按25 km间距进行数据采集获得近1 000个数据,按三级构造单元编制成表1,结合地震面波层析成像的地质构造解析,编制出1:250万构造解析图(图4),这一成果为研究中国西部大陆岩石圈和软流圈细结构提供了重要依据。

1.2.2 地壳速度结构模型

以新疆可可托海—四川简阳地震测深剖面构造解析为依据,参考相邻地震测深剖面构造解析,按 V_p 速度值大小将该断面地壳划分为上、中、下地壳和上地幔顶部(表1),结合地质学和构造地质学的分析研究,初步建立起该断面10个三级构造单元地壳厚度与速度结构模型(图5)。以地壳厚度演变为基本依据,将该断面地壳划分为克拉通型地壳和增厚型地壳。克拉通型地壳在构造演化过程中,太古—元古宙已经形成大陆地壳,显生宙相对稳定发展的地壳称克拉通型地壳,如上扬子地块和塔里木盆地,地震测深显示:前者 V_p 速度平均值为6.24 km/s,地壳厚度平均值为49.00~53.40 km;后者 V_p 速度平均值为6.24~6.36 km/s,地壳厚度平均值为49.00~53.40 km/s(表1、图5)。增厚型地壳在构造演化过程中地壳是逐渐增厚的或者是地壳逐渐增厚到逐渐减薄再到逐渐增厚,青藏高原是中国大陆增厚型地壳的典型代表,该断面通过青藏高原北部、自西向东可划分为祁连山构造带,柴达木地块,东昆仑构造带和松潘—甘孜地块,地震测深显示,地壳 V_p 速度平均值为6.13~6.43 km/s,地壳厚度平均值为59.88~67.30 km,最厚可达69.5 km。据深源包体岩石地球化学研究^[27]中更新世以来青藏高原西北缘西昆仑构造带地壳快速增厚达11 km以上。从增厚型上、中、下地壳分别统计表明,地壳的增厚主要体现在上地壳与下地壳之间^[20](图5):前者厚度平均值为25~31 km;后者厚度平均值为13.88~30.20 km,而中地壳厚度平均值仅有10.90~19.92 km,增厚幅度很小(图5、表1)。

1.2.3 壳内低速层分布趋势

地震测深剖面(图2)及构造解析成果(图4)显

示,该断面通过的克拉通型地壳,包括上扬子地块和塔里木地块壳内低速层不发育或在地块边缘与造山带结合带发育壳内低速层^[21,28],在断面西端阿尔泰构造带亦不发育壳内低速层。该断面通过的青藏高原增厚型地壳内普遍发育壳内低速层^[21,28],青藏高原东缘中上地壳之间,发育的壳内低速层由东南向西北埋藏逐渐加深,在都江堰—汶川地区壳内低速层埋深在15~18 km,厚2~3 km,层速度为6.00~6.10 km/s,向西北到阿坝—花石峡一线加深到23~28 km,厚约5 km,层速度为5.80~5.90 km/s,向西北在柴达木地块中上地壳之间局部发育壳内低速层外,还在该地块中部中下地壳之间发育壳内低速层,其层速度为5.90~6.00 km/s,厚7~9 km,埋深为34~42 km,延伸约200 km。在青藏高原北缘上中地壳间的壳内低速层向西北延伸又逐渐变浅,在祁连山造山带南缘壳内低速层埋深为22~27 km,厚度为3~7 km,层速度为5.80~5.90 km/s,在阿克赛埋深较浅,为18 km左右(图2,4)。东天山地区在中下地壳之间发育壳内低速层,层速度为5.80~6.00 km/s,厚度3~7 km,延伸100~150 km。壳内低速层的发育为青藏增厚型地壳和碰撞造山带地壳的构造变形提供了重要的动力学边界条件之一。

1.2.4 岩石圈两套断裂系统

地震测深剖面的构造解析发现,岩石圈存在既有显著区别,又有密切联系的两套断裂系统:一是地壳表层发育的以脆性剪切带为主的浅部断裂系统,实测地质构造观察和研究,自西向东有额尔齐斯断裂带(F_1)、阿尔曼泰断裂带(F_2)、克拉美里断裂带(F_3)、准噶尔南缘断裂带(F_4)、北天山南缘断裂带(F_5)、康古尔塔格断裂带(F_6)、阿齐克库都克断裂带(F_7)、花牛山断裂带(F_8)、疏勒河断裂带(F_9)、三危山断裂带(F_{10})、阿尔金断裂带(F_{11})、宗务隆山—青海南山断裂带(F_{12})、大柴旦—德令哈断裂带(F_{13})、苏干湖—托素湖—乌兰断裂带(F_{14})、柴北缘断裂带(F_{15})、昆北断裂带(F_{16})、昆中断裂带(F_{17})、昆南—玛心断裂带(F_{18})、昌马河断裂带(F_{19})、玛多—阿坝断裂带(F_{20})、龙日坝断裂带(F_{21})、茂汶断裂带(F_{22})、北川—九顶山断裂带(F_{23})、映秀断裂带(F_{24})和彭灌断裂带(F_{25})(图4);另一是以切割莫霍界面或壳幔过渡带的韧性剪切带为主的深部断裂系统,称为壳幔韧性剪切带^[28]或岩石圈韧性剪切带^[29],根据地震测深速度结构系统分析和莫霍界面错断情况,该断面自北

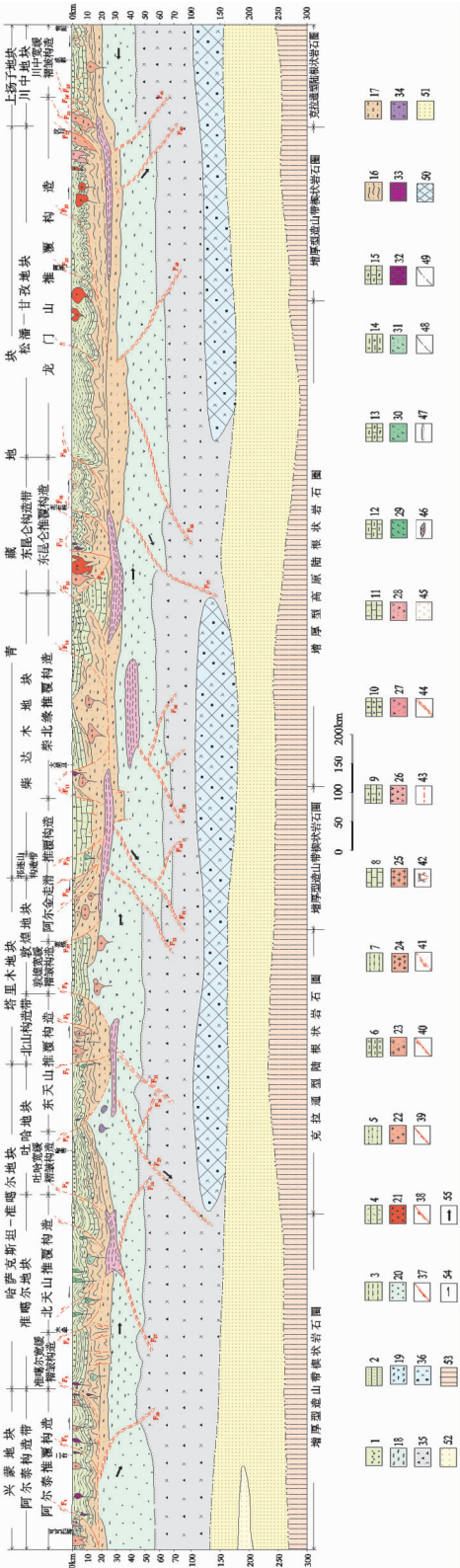


图 4 新疆可可托海—四川简阳断面岩石圈与软流圈结构略图

- 1—新生界沉积岩系;2—上三叠统至中侏罗统沉积岩系;3—上三叠统至白垩系沉积岩系;4—下侏罗统火山碎屑岩系;5—松潘—甘孜地区浅变质沉积岩系;6—海东地区三叠系火山岩系;
- 7—北疆上古生界中三叠统浅变质岩系;8—上古生界—中三叠统碎屑—碳酸盐岩系;9—松潘—甘孜上古生界碎屑—碳酸盐岩系;10—柴北缘上古生界火山沉积岩系;11—上物子和塔里木地区上新元古界—下古生界碎屑—碳酸盐岩系;12—松潘—甘孜地区上新元古界—下古生界浅变质火山—沉积岩系;14—祁连山上新元古界—下古生界浅变质火山—沉积岩系;15—北疆地区上新元古界—下古生界浅变质沉积岩系;16—中元古界至新元古界下部浅变质岩系;17—下元古界中浅变质岩系;18—太古宙花岗岩片麻岩系;19—中下地壳闪长质变质岩类;20—下地壳碱性麻粒岩类;21—印支—燕山期花岗岩类;22—华力西期花岗岩类;23—晋宁期花岗岩类;24—中条期花岗岩类;25—太古宙 TTG 岩套;26—印支—燕山期闪长岩类;27—华力西期闪长岩类;28—加里东期闪长岩类;29—华力西期基性岩类;30—加里东期基性岩类;31—元古宙基性岩类;32—加里东—华力西期超基性岩类;33—元古宙超基性岩类;34—太古宙超基性岩类;35—尖晶石—辉橄岩类;36—石榴石—辉橄岩类;37—伸展正断裂带;38—逆冲断裂带;
- 39—早期逆冲断裂带;40—早期正断裂带;41—古裂谷边界正断裂带;42—隐伏断裂带;43—滑脱断裂带;44—壳幔韧性剪切带;45—碰撞带混杂岩;46—壳内低速层;47—莫霍界面;48—岩石圈底界面;49—软流圈底界面;50—岩石圈中下部高速块体或幔块构造;51—软流圈;52—软流圈低速异常带;53—固结圈;54—地壳浅层块体相对运移方向;55—岩石圈块体相对流变方向

Fig.4 lithospheric and asthenospheric structures of the Koktokay of Xinjiang to Jianyang of Sichuan geoscientific transect

1—Cenozoic sedimentary series;2—Upper Triassic—Middle Jurassic sedimentary series;3—Upper Triassic—Cretaceous sedimentary series;4—Lower Jurassic volcanic—clastic series;5—Low-grade metamorphic—sedimentary series in the Songpan—Garzê area;6—Triassic volcanic series in the eastern Qinghai area;7—Upper Paleozoic—Middle Triassic low-grade metamorphic series in northern Xinjiang;8—Upper Paleozoic—Middle Triassic clastic—carbonate series;

9—Upper Paleozoic clastic—carbonate series in the Songpan—Garzê area;10—Upper Paleozoic volcanic—sedimentary series at the northern margin of Qaidam;11—Upper Neoproterozoic—Lower Paleozoic clastic—carbonate series in the Upper Yangtze and Tarim regions;12—Upper Neoproterozoic—Lower Paleozoic low-grade metamorphic—sedimentary series in the Songpan—Garzê area;13—Upper Neoproterozoic—Lower Paleozoic low-grade metamorphic volcanic—sedimentary series in the Kunlun area;14—Upper Neoproterozoic—Lower Paleozoic low-grade metamorphic volcanic—sedimentary series in the Qilian Mountains;15—Upper Neoproterozoic—Lower Paleozoic low-grade metamorphic series in northern Xinjiang;16—Middle Mesoproterozoic and the Middle Neoproterozoic low-grade metamorphic series;17—Lower Proterozoic medium- and low-grade metamorphic series;18—Archean granitic gneiss series;19—Dioritic metamorphic series in the Lower and lower crust;20—Basic granulites in the lower crust;21—Indosinian—Yanshanian granulitoids;22—Variscan granulitoids;23—Jinjingian granulitoids;24—Zhongtiaoan granulitoids;25—Archean TTG suite;

26—Indosinian—Yanshanian diorites;27—Variscan diorites;28—Caledonian diorites;29—Variscan basic rocks;30—Caledonian basic rocks;31—Proterozoic basic rocks;32—Caledonian—Variscan ultrabasic rocks;33—Proterozoic ultrabasic rocks;34—Archean ultrabasic rocks;35—Spinel lherzolite;36—Garnet lherzolite;37—Extensional normal fault zone;38—Thrust fault zone;39—Thrust fault zone in the early stage and extensional normal fault zone in the late stage;40—Extensional normal fault zone in the early stage and thrust fault zone in the late stage;41—Extensional normal fault zone in the paleoiff;42—Hidden fault zone;43—Décollement fault zone;44—Crust—mantle ductile shear zone;45—Mélange in the collision zone;46—Intracrustal low-velocity layer;47—Moho;48—Base of the lithosphere;49—Base of the asthenosphere;50—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere;

51—Asthenosphere;52—Lower-velocity anomaly zone in the asthenosphere;53—Stercosphere;54—Direction of relative movement of shallow-level crustal blocks;

55—Direction of relative flow movement of lithospheric blocks

表 1 新疆可可托海—四川简阳地质断面地壳结构
Table 1 Summary of the crustal structure of the Koktokay of Xinjiang to Jianyang of Sichuan geoscience transect

| 构造单元 | | 上地壳 V_p 速度 (km/s) | 上地壳 厚度 (km) | 中地壳 V_p 速度 (km/s) | 中地壳 厚度 (km) | 下地壳 V_p 速度 (km/s) | 下地壳 厚度 (km) | 地壳 厚度 (km) | 地壳 V_p 速度 (km/s) | 上地幔顶 部 P_n 速度 (km/s) |
|-----------|------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|------------------|--------------------------|------------------------------|
| 兴蒙 地块 | 阿尔泰构造 带 (9) | 5.92 | 11.50 | 6.44 | 18.37 | 6.93 | 22.92 | 52.79 | 6.53 | 8.02 |
| 准噶尔 地块 | 准东地块 (4) | 5.39 | 11.00 | 6.31 | 17.33 | 6.79 | 19.50 | 47.83 | 6.29 | 8.08 |
| | 吐哈地块 (18) | 5.59 | 14.02 | 6.19 | 19.29 | 7.01 | 15.98 | 49.29 | 6.28 | 7.99 |
| 塔里木 地块 | 北山构造 带 (5) | 5.79 | 15.70 | 6.16 | 21.10 | 6.84 | 12.20 | 49.00 | 6.22 | 8.06 |
| | 敦煌地块 (6) | 5.79 | 19.75 | 6.41 | 20.07 | 7.13 | 13.58 | 53.40 | 6.36 | 8.00 |
| 青藏地块 | 祁连山构造 带 (5) | 5.78 | 26.20 | 6.31 | 10.90 | 7.02 | 30.20 | 67.30 | 6.43 | 8.00 |
| | 柴达木地块 (18) | 5.66 | 26.08 | 6.24 | 19.92 | 6.90 | 13.88 | 59.88 | 6.13 | 8.03 |
| | 东昆仑构造 带 (9) | 5.63 | 31.00 | 6.51 | 15.11 | 6.94 | 20.83 | 66.94 | 6.23 | 8.20 |
| | 松潘-甘孜地 块 (22) | 5.69 | 25.00 | 6.44 | 15.34 | 6.89 | 22.39 | 62.73 | 6.30 | 8.08 |
| 上扬子 地块 | 川中地块 (5) | 5.56 | 18.80 | 6.49 | 10.50 | 6.82 | 15.30 | 44.60 | 6.24 | 8.00 |

注:括弧内数字代表参加地壳厚度和 V_p 速度平均数。

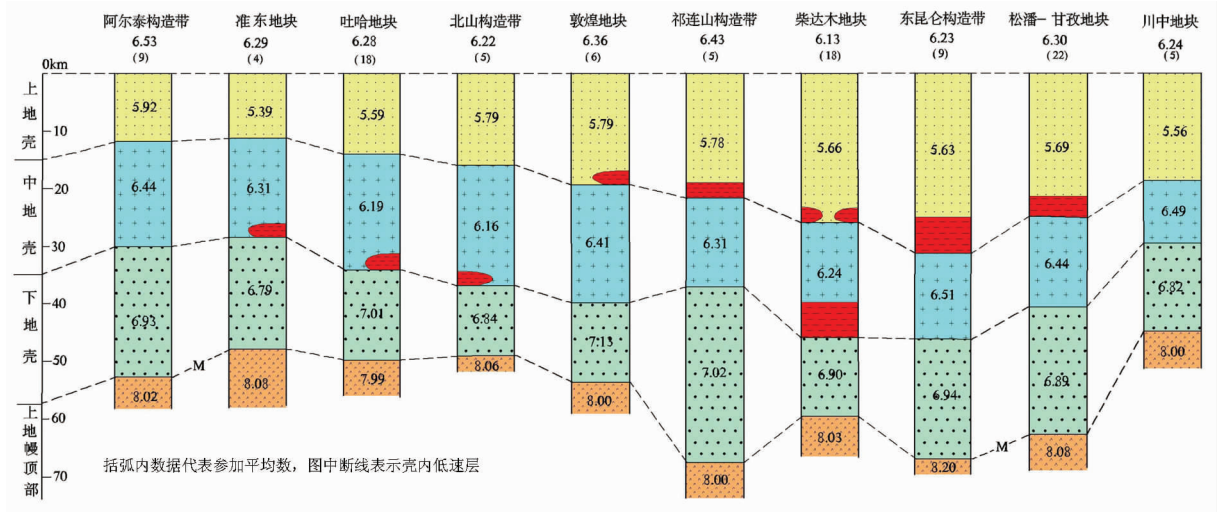


图 5 新疆可可托海—四川简阳地质断面地壳厚度与速度结构模型

Fig.5 Model of the crustal thickness and velocity structure of the Koktokay of Xinjiang to Jianyang of Sichuan geoscience transect

西向南东识别出以下壳幔韧性剪切带: 二台壳幔韧性剪切带 (F_{26})、木壘壳幔韧性剪切带 (F_{27})、三道岭壳幔韧性剪切带 (F_{28})、哈密壳幔韧性剪切带 (F_{29})、烟墩壳幔韧性剪切带 (F_{30})、星星峡壳幔韧性剪切带 (F_{31})、敦煌壳幔韧性剪切带 (F_{32})、阿克赛壳幔韧性剪

切带 (F_{33})、花海子壳幔韧性剪切带 (F_{34})、大柴旦壳幔韧性剪切带 (F_{35})、都兰壳幔韧性剪切带 (F_{36})、昆北缘壳幔韧性剪切带 (F_{37})、花石峡壳幔韧性剪切带 (F_{38})、久治壳幔韧性剪切带 (F_{39})、安县壳幔韧性剪切带 (F_{40})和绵阳壳幔韧性剪切带 (F_{41}) (图 4)。通常这些壳

幔韧性剪切带切割莫霍界面时, 两侧莫霍面埋深变化较大, 一般在 5~10 km 变化, 其中敦煌壳幔韧性剪切带两侧莫霍界面埋深相对变化最大, 达 13 km。壳幔韧性剪切带切割莫霍界面后, 向下多消失在岩石上地幔中, 部分达到岩石圈底部或软流圈顶部, 向上延伸多数消失在壳内低速层中, 仅少数与地表断裂带联通。多数壳幔韧性剪切带与相应地壳表层断裂带呈反向倾斜, 在岩石圈断面上形成若干楔状结

构或鳄鱼状结构(图 4)。从较多地震测深剖面构造解析, 本断面识别出的多数壳幔韧性剪切带在相邻地震测深剖面中多有显示, 如安县壳幔韧性剪切带和绵阳壳幔韧性剪切带向北东在四川黑水—台湾花莲断面中亦有显示^[28], 向西南在四川巴塘—资中地震测深剖面^[30]中的泸定深部亦存在向东倾斜的壳幔韧性剪切带(图 6), 根据龙门山造山带小震活动精确定位分析显示, 龙门山推覆构造带 30~40 km 深的下

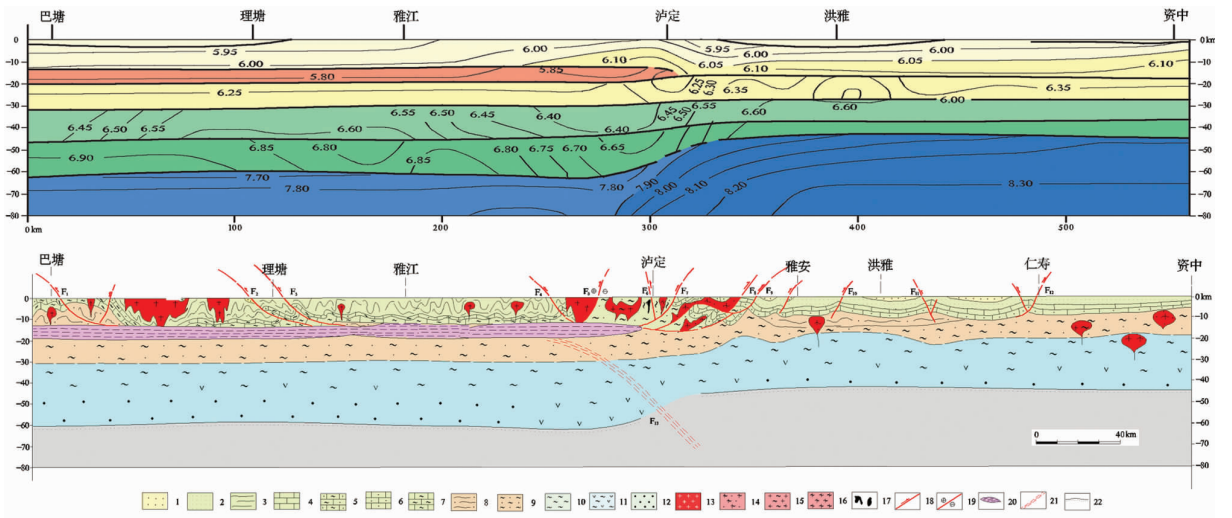


图 6 巴塘—资中断面地壳结构图(据参考文献[30]编制)

- 1—新生界碎屑沉积岩系; 2—上扬子区三叠系—白垩系碎屑沉积岩系; 3—甘孜地区三叠系浅变质碎屑沉积岩系; 4—上扬子区上古生界碳酸盐—沉积岩系; 5—甘孜区上古生界浅变质碳酸盐岩—碎屑沉积岩系; 6—上扬子区上新元古界—下古生界碎屑沉积岩系; 7—甘孜地区上新元古界—下古生界浅变质火山—碎屑沉积岩系; 8—中新元古界浅变质沉积岩系; 9—新太古界至元古界中深变质岩系; 10—中古太古宙深变质岩系; 11—中下地壳闪长质变质岩类; 12—下地壳碱性麻粒岩类; 13—燕山期花岗岩类; 14—晋宁期花岗岩类; 15—中条期花岗岩类; 16—太古宙 TTG 岩套; 17—晋宁期基性岩类; 18—逆冲断裂带; 19—走滑断裂带; 20—壳内低速层; 21—壳幔韧性剪切带; 22—莫霍界面; F₁—巴塘断裂带; F₂—濯桑断裂带; F₃—甘孜—理塘断裂带; F₄—折多山口断裂带; F₅—鲜水河断裂带; F₆—安宁河断裂带; F₇—冷碛断裂带; F₈—映秀断裂带; F₉—泗坪断裂带; F₁₀—蒲江断裂带; F₁₁—木城断裂带; F₁₂—仁寿断裂带; F₁₃—贡嘎山壳幔韧性剪切带

Fig.6 Crustal structure of the Batang-Zizhong transect (data from reference[30])

- 1—Cenozoic clastic sedimentary series; 2—Triassic-Cretaceous clastic sedimentary series in the Upper Yangtze region; 3—Triassic low-grade metamorphic-clastic sedimentary series in the Garzê area; 4—Upper Paleozoic carbonate sedimentary series in the Upper Yangtze region; 5—Upper Paleozoic low-grade metamorphic carbonate-clastic sedimentary series in the Garzê area; 6—Upper Neoproterozoic-Lower Paleozoic clastic sedimentary series in the Yangtze region; 7—Upper Neoproterozoic-Lower Paleozoic low-grade metamorphic volcanic-clastic sedimentary series in the Garzê area; 8—Meso- and Neoproterozoic low-grade metamorphic volcanic-sedimentary series; 9—Neoproterozoic-Lower Paleozoic medium- and high-grade metamorphic series; 10—Meso- and Paleoproterozoic high-grade metamorphic series; 11—Dioritic metamorphic series in the middle and lower crust; 12—Basic granulite in the lower crust; 13—Yanshanian granitoids; 14—Jinningian granitoids; 15—Zhongtiaoan granitoids; 16—Archean TTG suite; 17—Jinningian basic rocks; 18—Thrust fault zone; 19—Strike-slip fault zone; 20—Intracrustal low-velocity layer; 21—Crust-mantle ductile shear zone; 22—Moho; F₁—Batang thrust fault zone; F₂—Zhuosong thrust fault zone; F₃—Garzê-Litang thrust fault zone; F₄—Zheduo Mountain Pass thrust fault zone; F₅—Xianshui River thrust fault zone; F₆—Anning River thrust fault zone; F₇—Lenggi thrust fault zone; F₈—Yingxiu thrust fault zone; F₉—Siping thrust fault zone; F₁₀—Pujiang thrust fault zone; F₁₁—Mucheng thrust fault zone; F₁₂—Renshou thrust fault zone; F₁₃—Gonggashan crust-mantle ductile shear zone

地壳存在向南东倾斜的对冲断层^[7] (即本文所指的壳幔韧性剪切带)。因此,2008年5月12日14时28分汶川8.0级强烈地震可能与该区壳幔韧性剪切带向中上地壳扩展,能量聚集与释放破裂有关。

2 地学断面岩石圈结构模型

2.1 岩石圈速度结构模型

从新疆可可托海—四川简阳0~430 km深度天然地震面波层析成像 V_s 速度结构剖面上(图3),结合构造地质学、岩石地球化学特征以及其他地球物理学标志,可划分出岩石圈、软流圈和固结圈^[8]等三层圈结构(图4)。笔者使用地震岩石圈概念,在构造解析时,通常将 V_s 速度值4.45 km/s左右作为岩石圈的底界面或软流圈顶界面的标志^[9]。按10 km间距读出岩石圈底界面埋藏深度,即岩石圈厚度,共获得250组岩石圈厚度和 V_s 速度数据,编制出速度结构模型简表(表2),从图2和表2可知,岩石圈中下部 V_s 速度值普遍较高, V_s 速度值在4.51~4.61 km/s,断面岩石圈厚度较大,多在160~180 km,其中,柴达木地块岩石圈厚度高达186 km左右,阿尔泰构造带岩石圈厚度较小,可达150 km左右。笔者根据天然地震面波层析成像 V_s 速度结构建立起该断面岩石圈细结构模型(图4),为建立中国大陆岩石圈三维细结构提供了重要依据。

2.2 岩石圈物质结构模型

根据对中国西部岩石圈深源包体岩石学和地球化学等的初步研究^[8,27-28,32-45],结合地震测深资料的系统分析,建立起该地学断面和中国西部岩石圈不同构造单元物质结构模型(图7)。综合归纳自上而下可以划分为7层:1. 沉积浅变质褶皱—花岗岩层;2. 闪长质深变质岩层;3. 麻粒岩层(上部为长英质麻粒岩层,下部为基性麻粒岩层);4. 尖晶石二辉橄榄岩层(内有辉石岩、角闪石岩、纯橄榄岩等);5. 尖晶石石榴石二辉橄榄岩层;6. 石榴石二辉橄榄岩层;7. 局部熔融二辉橄榄岩层。该岩石圈物质结构模型中1至3层,属地壳物质结构,4至6层属岩石圈上地幔物质结构。尖晶石二辉橄榄岩层在整个断面各构造单元均存在,而尖晶石石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉橄榄岩层多在克拉通型岩石圈中发育。7层可能已进入软流圈层中。随着研究的深入,可能会有更多的深源包体被发现和研究,得到更准确的物质结构模型与岩石圈物质演化型式。新生代火山岩及深源岩石包体Sr、Nd、Pb同位素地球化学研究表明,青藏高原岩石圈上地幔多呈EM II型富集地幔特征^[33,35,41,46-49],显示有较多的地壳成分混杂。它们可能是印度板块向欧亚板块俯冲碰撞楔入岩石圈的增厚作用有关。

2.3 岩石圈高速块体与岩石圈结构型式

天然地震面波层析成像构造解析表明,断面及邻区岩石圈中下部存在 V_s 速度不均、形态各异、大

表2 新疆可可托海—四川简阳地学断面岩石圈与软流圈结构

Table 2 Lithospheric and asthenospheric structures of the Koktokay of Xinjiang to Jianyang of Sichuan geoscience transect

| 构造单元 | | 岩石圈 厚度(km) | 岩石圈中下部 V_s 速度(km/s) | 软流圈 V_s 速度(km/s) | 软流圈底界面 埋深(km) | 软流圈 厚度(km) |
|-------|-------------|---------------|--------------------------|-----------------------|------------------|---------------|
| 兴蒙地块 | 阿尔泰构造带(21) | 153.67 | 4.51 | 4.38 | 271.52 | 118.10 |
| 准噶尔地块 | 准东地块(11) | 161.45 | 4.52 | 4.41 | 266.91 | 105.45 |
| | 吐哈地块(44) | 168.80 | 4.56 | 4.43 | 257.86 | 89.09 |
| 塔里木地块 | 北山构造带(13) | 172.15 | 4.58 | 4.44 | 244.08 | 71.92 |
| | 敦煌地块(17) | 171.35 | 4.59 | 4.42 | 249.76 | 78.41 |
| 青藏地块 | 祁连山构造带(10) | 177.00 | 4.60 | 4.44 | 253.30 | 76.30 |
| | 柴达木地块(45) | 181.47 | 4.61 | 4.45 | 255.36 | 73.93 |
| | 东昆仑构造带(22) | 167.23 | 4.54 | 4.42 | 278.45 | 111.41 |
| | 松潘-甘孜地块(53) | 181.74 | 4.56 | 4.44 | 280.55 | 98.21 |
| 上扬子地块 | 川中地块(19) | 170.74 | 4.57 | 4.43 | 264.00 | 93.26 |

注:括弧内数字代表参加厚度和 V_s 速度的平均数。

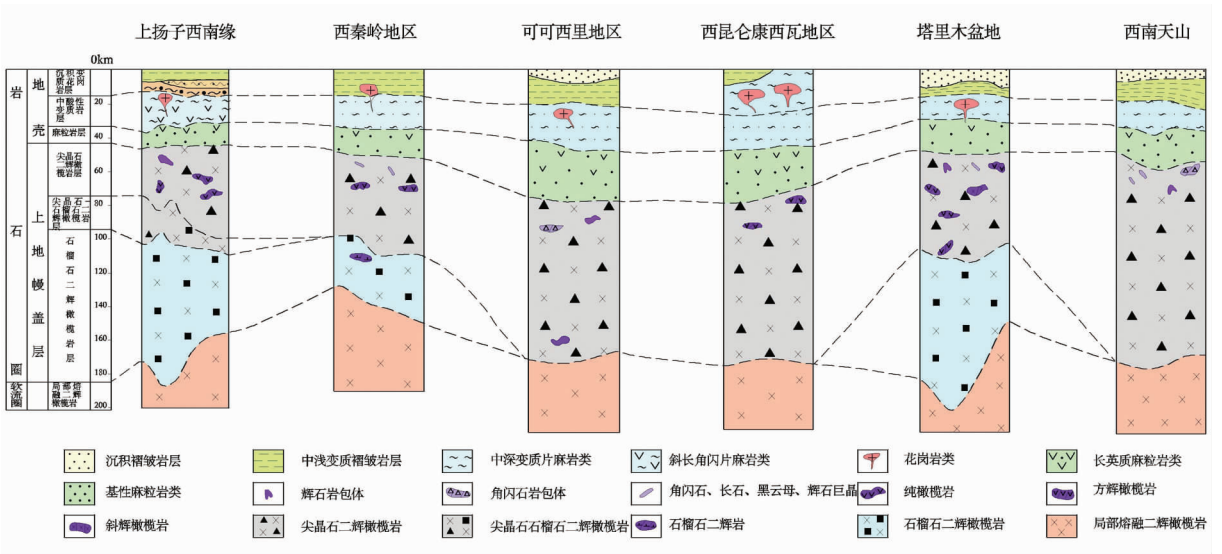


图 7 中国西部岩石圈物质结构模型(据参考文献[8,27-28,31-45]深源包体资料编制)

Fig.7 Model of the composition of the lithosphere in western China (data of deep-seated xenoliths from references [8,27-28,31-45])

小不等的高速块体,结合构造地质学等的研究,笔者将岩石圈中下部高速块体称为幔块构造^[19-20,28](图4)。高速块体或幔块构造不仅控制不同大地构造单元岩石圈规模、大小和形态,而且控制岩石圈构造演化和岩石圈表层构造变形,因此,将高速块体或幔块构造的几何形态特征作为划分断面岩石圈结构样式的主要依据之一。

从地球层块结构的研究思路出发,运用构造解析方法与比较构造学的理论与方法^[19-21,24-26],根据面波层析成像 V_s 速度结构研究,以岩石圈中下部高速块体几何结构为依据,将该断面岩石圈划分为3种结构模式:克拉通陆根状结构、高原陆根状结构和造山带楔状结构。研究表明,岩石圈厚度在构造演化过程中是逐渐变化的,依据岩石圈厚度的变化规律和 V_s 速度结构差异,以及岩石地球化学和岩石圈物质组成等标志,从岩石圈几何结构与构造演化两方面标志,将断面划分为二型3种结构模式:克拉通型陆根状结构岩石圈、增厚型造山带楔状结构岩石圈和增厚型高原陆根状结构岩石圈(图1、4)。

3 地学断面岩石圈构造特征

根据岩石圈几何结构样式、岩石圈构造演化和岩石圈壳幔韧性剪切带等标志,自西向东岩石圈构

造单元有:准东增厚型造山带楔状岩石圈、塔里木克拉通型陆根状岩石圈、阿尔金增厚型造山带楔状岩石圈、青藏增厚型高原陆根状岩石圈、龙门山增厚型造山带楔状岩石圈和上扬子克拉通型陆根状岩石圈(图4)。

3.1 准东增厚型造山带楔状岩石圈

哈密壳幔韧性剪切带以北属准东增厚型造山带楔状岩石圈,包括阿尔泰构造带、准东地块和哈密地块。该区中部地壳表层叠置的准噶尔中生代沉积盆地中发育宽缓褶皱构造,北部阿尔泰造山带发育向南逆冲的阿尔泰推覆构造,南部天山造山带发育向北逆冲的北天山推覆构造^[10]。地震测深显示,地壳 V_p 平均速度为6.29~6.53 km/s,地壳平均厚度为46.83~52.79 km,在东天山造山带发育壳内低速层,莫霍界面显示具有多薄层状结构壳幔过渡带^[50]。天然地震面波层析成像显示,岩石圈 V_s 平均速度为4.51~4.56 km/s,岩石圈厚度较大,为154~169 km,地块边缘应属增厚型岩石圈。阿尔泰造山带、北天山造山带与准噶尔沉积盆地结合部岩石圈中上部均存在楔状构造或鳄鱼构造,如阿尔泰造山带向北倾斜的额尔齐斯断裂带、阿尔曼泰断裂带和克拉美里断裂带向深部延伸消失在壳内低速层中,与向南倾斜的二台壳幔韧性剪切带,向北向上延伸到壳内低速

层之间所围限的岩块,在岩石圈断面上构成楔状构造(图 4),反映岩石圈具有挤压变形特征。

3.2 塔里木克拉通型陆根状岩石圈

哈密壳幔韧性剪切带与敦煌壳幔韧性剪切带之间属塔里木克拉通型陆根状岩石圈,包括北山构造带和敦煌地块,敦煌地块被中生代敦煌沉积盆地叠置。基底由太古宙至元古宙中深变质岩系构成,盖层褶皱平缓开阔,北缘发育向南逆冲的北山推覆构造^[15],东南侧发育阿尔金走滑-推覆构造^[8~9,21](图 4)。地震测深显示,地壳 V_p 速度平均值为 6.22~6.36 km/s,地壳厚度较大,厚度平均值为 49~53 km(表 1),壳内低速层不发育,仅在北缘北山构造带和敦煌盆地南缘发育壳内低速层,莫霍界面为一级间断面^[20]。地震面波层析成像显示,岩石圈中下部存在高速块体或幔块构造(图 3~4)。岩石圈高速块体 V_s 速度值较大,在 4.58~4.59 km/s,岩石圈厚度较大,平均值为 172 km,在塔里木地块中部岩石圈最厚可达 195 km,存在大陆根^[18,20]。

3.3 阿尔金增厚型造山带楔状岩石圈

阿尔金增厚型造山带楔状岩石圈。位于青藏高原北缘,介于敦煌壳幔韧性剪切带与大柴旦壳幔韧性剪切带之间。地震测深显示,该岩石圈地壳 V_p 速度平均值为 6.39 km/s,在中上地壳之间发育壳内低速层,地壳厚度明显加大,平均为 66.78 km(表 1),最厚可达 69.5 km。地震面波层析成像 V_s 速度结构表明,岩石圈中下部存在高速块体或幔块构造。岩石圈高速块体 V_s 速度平均值为 4.60 km/s,岩石圈明显增厚,平均达 177 km。地震测深显示,阿尔金造山带和祁连山造山带岩石圈中上部均存在较典型的楔状构造或鳄鱼构造^[8~9,51],大地电磁测深亦证实该区存在楔状构造^[52]。楔形体尖端指向青藏高原,这些特征表明,塔里木地块具有向青藏高原北缘岩石圈楔入的动力学态势,从而形成岩石圈表层的造山带以及莫霍界面落差高达 14 km 的增厚型地壳。

3.4 青藏增厚型高原陆根状岩石圈

大柴旦壳幔韧性剪切带与久治壳幔韧性剪切带之间属青藏增厚型高原陆根状岩石圈的一部分,包括柴达木地块、东昆仑构造带和松潘—甘孜地块北段。地震测深表明,该区地壳 V_p 速度平均值较低,为 6.13~6.30 km/s,其中柴达木地块 V_p 速度平均值最低,仅 6.13 km/s。地壳厚度较大,为 60~67 km/s(表 1)。柴达木地块中下地壳之间存在壳内低速层,

东昆仑构造带中上地壳之间存在壳内低速层(图 2、4)。地震面波层析成像显示,柴达木地块和松潘—甘孜地块岩石圈中下部存在规模较大的高速块体,高速块体内 V_s 速度值较高, V_s 速度平均值在 4.56~4.61 km/s,该岩石圈具有克拉通型岩石圈的特征。在东昆仑构造带岩石圈中下部不存在高速块体, V_s 速度平均值为 4.54 km/s,青藏高原北部岩石圈厚度明显增厚,为 167~182 km(表 2),具有大陆根特征或大陆根正在形成增厚过程中^[20,53](图 8)。

3.5 龙门山增厚型造山带楔状岩石圈

久治壳幔韧性剪切带以东,安县壳幔韧性剪切带以西属龙门山增厚型造山带楔状岩石圈。龙门山造山带岩石圈地壳浅层由不同时期形成的块体或构造带组成,北川—九顶山断裂带以西,地表以早中生代槽型浅变质沉积岩为主,局部发育古生代沉积变质岩系以及印支—燕山期穹状花岗岩带,以东发育元古宙中浅变质岩系及古生代和早中生代台型沉积岩系。地震测深表明,龙门山造山带地壳厚度大,达 54~60 km,地壳 V_p 速度平均值为 6.38 km/s^[3]。岩石圈地壳浅层发育逆冲推覆构造带,各推覆体构成叠瓦式构造^[23],在走滑—逆冲推覆构造带之下存在壳内低速低阻层,壳内低速层介于上地壳与中地壳之间,埋深在 20~25 km,厚度约 5 km,层速度为 6.00~6.10 km/s,壳内低速层是造山过程中最重要的动力学边界条件之一。龙门山造山带与川西前陆沉积盆地结合部岩石圈中上部存在楔状构造^[23],龙门山造山带地壳表层向北西倾斜的彭灌逆冲断裂带、映秀逆冲断裂带、北川—九顶山逆冲断裂带和茂汶断裂带向深部延伸消失在壳内低速层中,与向东南倾斜的安县壳幔韧性剪切带和绵阳壳幔韧性剪切带^[7,23],向北西向上延伸到壳内低速层之间所围限的空间构成楔形体,楔形体尖端指向龙门山造山带或青藏高原东缘,在岩石圈断面上,构成较典型的楔状构造^[21,23,54~56](图 4)。大量研究成果表明,楔状构造或鳄鱼构造是碰撞造山带岩石圈中上部最基本的结构样式^[21,57~60]。面波层析成像构造解析显示,该造山带岩石圈中下部存在高速块体,高速块体内 V_s 速度平均值为 4.56 km/s,岩石圈厚度较大,其平均值为 181 km(表 2)。龙门山造山带岩石圈作为青藏高原东缘岩石圈的一部分,岩石圈中下部具有克拉通型岩石圈特性。

3.6 上扬子克拉通型陆根状岩石圈

地质断面东端安县壳幔韧性剪切带以东属上扬

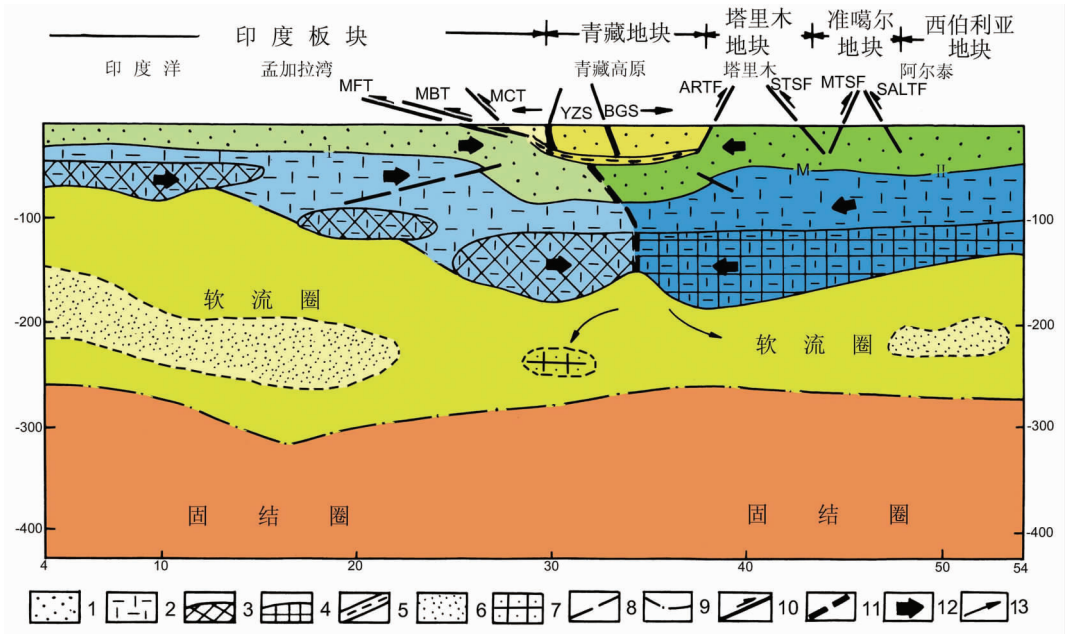


图 8 青藏高原及邻近地区岩石圈及软流圈结构与地幔动力学模式

(据天然地震层析成像东经 90° V_s 速度结构剖面[18,53]编)

- 1—岩石圈地壳; 2—岩石圈上地幔; 3—印度板块岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 4—欧亚板块岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 5—壳内低速层; 6—软流圈低速异常带; 7—软流圈高速块体; 8—岩石圈底界面; 9—软流圈底界面; 10—大型逆冲断裂带; 11—板块碰撞缝合带; 12—岩石圈板块及地块相对运动方向; 13—软流圈物质流变方向。MFT—主前缘逆冲断裂带; MBT—主边界逆冲断裂带; MCT—主中央逆冲断裂带; YZS—雅鲁藏布江缝合带; BGS—班公—怒江缝合带; ARTF—阿尔金走滑—逆冲断裂带; STSF—南天山逆冲断裂带; NTSF—北天山逆冲断裂带; SALTf—南阿尔泰断裂带

Fig.8 Lithospheric and asthenospheric structures and mantle dynamic model for the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas (drawn after the V_s velocity structure profile of seismic tomographic imaging at 90°N)

- 1-Lithospheric crust; 2-lithospheric upper mantle; 3-High-velocity blocks or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere beneath the Indian plate; 4-High-velocity blocks or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere beneath the Eurasian plate; 5-Intracrustal low-velocity layer; 6-Very low-speed zone in the asthenosphere; 7-High-velocity block in the asthenosphere; 8-Bottom boundary of the lithosphere; 9-Bottom boundary of the asthenosphere; 10- Large-scale thrust zone; 11-Plate collision suture zone; 12-Direction of relative movement of lithosphere plates and blocks; 13-Direction of material flow in the asthenosphere; MFT—Main frontal thrust; MBT—Main boundary thrust; MCT—Main central thrust; YZS—Yarlung Zangbo suture; BGS—Bangong—Nujiang suture; ARTF—Altyn Tagh strike-slip thrust; STSF—South Tianshan thrust fault; NTSF—North Tianshan thrust fault; SALTf—South Altay thrust fault

子克拉通型陆根状岩石圈。该区中西部叠置了四川沉积盆地,表层以中生界陆相碎屑沉积岩系为主,其下以古生界海相碎屑—碳酸盐沉积岩系为主,沉积层构成大型宽缓褶皱构造带。地震测深显示,地壳 V_p 速度平均值为 6.24 km/s,地壳厚度平均值为 44.60 km(表 1)。上扬子岩石圈厚度较大,川中地块岩石圈厚度平均值为 171 km(表 2),川东地块最厚达 180~195 km,热结构研究获得与地震岩石圈相似的热岩石圈厚度为 182~199 km^[60],上扬子地块存在大陆根。岩石圈中下部高速块体内 V_s 速度平均值为 4.57 km/s(表 2),高速块体与龙门山增厚型造山带楔状岩石圈中下部高速块体相连(图 4),由于岩石

圈中下部高速块体或幔块构造规模巨大,它控制地壳浅部的构造变形,故地壳浅层构造变形或其他地质作用相对较弱,仅在边缘构造变形较强,发育逆冲推覆构造带(图 4、6)。

4 地学断面软流圈细结构

软流圈是地震波速度相对较低的低速带(LVZ)^[61],它介于岩石圈与固结圈^[3]之间,软流圈内面波 V_s 速度值一般低上覆岩石圈底部的面波 V_s 速度值,亦低于下伏固结圈的面波 V_s 值(图 3、8)。通过该断面面波 V_s 速度结构分析表明,反映研究区普遍发育软流圈, V_s 速度值存在纵向和横向的不均

一性。

4.1 软流圈顶底界面划分标志

以新疆可可托海—四川简阳 0~430 km 深天然地震面波层析成像 V_s 速度剖面(图 3)构造解析为依据,结合大区域地震层析成像 V_s 速度剖面构造解析,通常将 V_s 速度值为 4.45 km/s 左右作为划分软流圈顶界面或岩石圈底界面的标志。一般将 V_s 速度值 4.50 km/s 左右作为划分软流圈底界面或固结圈顶界面的标志^[62](图 4)。

4.2 软流圈厚度变化趋势

面波层析成像显示,克拉通型地块软流圈厚度相对较小,如塔里木地块软流圈厚度仅有 72~78 km,上扬子地块软流圈厚度平均值为 93 km。造山带和高原软流圈厚度相对较大,如阿尔泰造山带软流圈厚度平均为 118 km,青藏高原北部东昆仑构造带软流圈平均厚度为 111 km,松潘—甘孜地块软流圈厚度平均值为 98 km,柴达木地块软流圈较薄,仅 74 km(表 2)。整体显示,断面通过区软流圈厚度较小,比中国东部软流圈厚度小约 150 km^[63]。

4.3 软流圈 V_s 速度结构特征

可可托海至简阳断面软流圈 V_s 速度值较大,从西向东软流圈 V_s 速度值变化较小:阿尔泰构造带软流圈 V_s 速度平均值为 4.38 km/s,准东地块 V_s 速度值为 4.41 km/s,吐哈地块 V_s 速度值为 4.43 km/s,北山构造带 V_s 速度值为 4.44 km/s。敦煌地块 V_s 速度值为 4.42 km/s,祁连山构造带为 V_s 速度值为 4.44 km/s,柴达木地块 V_s 速度值为 4.45 km/s,东昆仑构造带 V_s 速度值为 4.42 km/s,松潘—甘孜地块 V_s 速度值为 4.44 km/s,上扬子地块 V_s 速度值为 4.43 km/s(表 2)。断面西端存在软流圈内低速异常体, V_s 速度值小于 4.40 km/s,其规模很小。总之,该地学断面软流圈 V_s 速度值较大,属青藏软流圈高速区^[62]的一部分,加之软流圈厚度较小,该断面软流圈为一低热梯度区。由于青藏高原岩石圈中下部逐渐发生碰撞、岩石圈加厚、软流圈减薄(图 8),从而引起软流圈物质一部分向高原周边流变运移^[63],另一部分向上流变运移,与岩石圈混合^[62,64],形成具有 EM II 型富集地幔特性^[33,35,41,46~48]。

5 主要认识和结论

(1)从地球层块结构研究思路出发,运用构造解析与比较构造学理论和方法,将断面岩石圈结构划

分为二型 3 种结构样式:克拉通型陆根状岩石圈、增厚型造山带楔状岩石圈和增厚型高原陆根状岩石圈。0~430 km 深天然地震面波层析成像 V_s 速度剖面进行构造解析的基础上,结合构造地质与岩石地球化学研究,划分出岩石圈、软流圈和固结圈三层圈结构,建立起该断面岩石圈速度结构和物质结构模型。

(2)该断面地震测深和面波层析成像构造解析发现,岩石圈存在既有区别又有密切联系的两套断裂体系:一是地壳浅层发育的以脆性剪切带为主的浅部断裂体系;另一是以切割莫霍界面的壳幔韧性剪切带为主的深部断裂体系,并识别出 16 条切割莫霍界面的壳幔韧性剪切带。

(3)根据天然地震面波层析成像 V_s 速度结构特征,首次探讨了该断面软流圈细结构,总的趋势是软流圈厚度比较小,多在 70~120 km, V_s 速度值较大,多在 4.38~4.43 km/s,该断面软流圈现今地温梯度相对较低。

研究过程中得到李廷栋院士、袁学诚教授级高级工程师等的指导和帮助,张朝文教授、林茂炳教授、张云湘教授级高级工程师、吴向农教授级高级工程师、罗发祚教授级高级工程师、刘援朝副教授、魏显贵副教授等曾参加前期地质构造研究工作,在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] 袁学诚, Engorov AS, 等. 北冰洋—欧亚大陆—太平洋地学断面[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-32.
Yuan Xuecheng, Egorov A S, et al. The Geoscience Transect in the Arctic Ocean—Eurasia—Pacific Ocean [M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-32(in English).
- [2] 袁学诚, 左恩, 蔡学林, 等. 华南板块岩石圈构造与地球物理[C]//八十年代中国地球物理学进展. 北京: 学术书刊出版社, 1989: 243-249.
Yuan Xuecheng, Zuo Yu, Cai Xueling, et al. The structure of the lithosphere and the geophysics in the South China plate [C]// Geophysics in China in the Eighties. Beijing: Learning Publication Press, 1989: 243-249(in China with English abstract).
- [3] 曹家敏, 王有学. 阿尔泰—台湾剖面茂汶—邵阳段地壳结构[C]//阿尔泰—台湾地学断面论文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 82-86.
Cao Jiamin, Wang Youxue. Crustal velocity structure of Maowen—Shaoyang part of Altay—Taiwan profile [C]// Collected papers of geoscience transect in Altay—Taiwan. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 82-86(in Chinese with English abstrat).
- [4] 崔作舟, 陈纪平, 吴琴. 花石峡—邵阳深部地壳的结构和构造[M].

- 北京:地质出版社, 1996:1-168.
- Cui Zuozhou, Chen Jiping, Wu Qin. The Deep Crustal Structures in Huashixia-Shaoyang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:1-168(in Chinese with English abstract).
- [5] 徐新忠, 王有学, 蒋亚明, 等. 新疆可可托海—甘肃阿克赛人工爆破地震测深剖面的地壳速度结构研究及其大地构造单元的划分[C] // 阿尔泰—台湾断面论文集. 武汉:中国地质大学出版社, 1997:1-13.
- Xu Xinzhong, Wang Youxue, Jiang Yaming, et al. Studies on crustal velocity structure of koktokay (in Xinjiang)—Aksai (in Gansu) man-made explosion seismic sounding profile and division of geotectonic units [C]// Collected Papers of Geoscience Transect in Altay-Taiwan. Wuhan:China University of Geosciences Press, 1997:1-13(in Chinese with English abstract).
- [6] 杨森楠, 王家映, 张胜业, 等. 青、川地区大地电磁测深剖面及岩石圈构造特征[C] // 中国大陆构造论文集. 武汉:中国地质大学出版社, 1992:181-189.
- Yang Sennan, Wang Jiaying, Zhang Shengye, et al. The profile section of telluric electromagnitism and features of lithosphere structure in Qinghai and Sichuan regions [C]// Memoirs of the Continental Tectonics in China. Wuhan:China University of Geosciences Press, 1992:181-189(in Chinese with English abstract).
- [7] 朱艾澜, 徐锡伟, 周永胜, 等. 以精确定位小震活动分析龙门山推覆构造带现今构造变形样式 [C] // 中国地球物理 2006. 成都:四川科技出版社, 2006:608.
- Zhu Ailan, Xu Xiwei, Zhou Yongsheng, et al. Deformation characteristics of the Longmenshan thrust nappe belt from relocated microseismicity [C]//Annual of the Chinese Geophysical Society 2006. Chengdu: Press of Sichuan of Science and Technology, 2006: 608(in Chinese).
- [8] 蔡学林, 彭大钧, 刘援朝, 等. 塔里木盆地变形构造格局及其动力学模式—兼论楔入造山带推覆成盆作用 [J]. 成都理工学院学报, 1997, 24(2):29-39.
- Cai Xuelin, Peng Dajun, Liu Yuanchao, et al. Tectonic framework and dynamic model of Tarim basin: Implication for wedging orogenesis [J]. Journal of Chengdu Sciences of Technology Edition, 1997, 24(2):29-39(in Chinese with English abstract).
- [9] 蔡学林, 曹家敏, 刘援朝, 等. 青藏高原多向碰撞—楔入隆升地球动力学模式[J]. 地学前缘, 1999, 6(3):181-189.
- Cai Xuelin, Cao Jiamin, Liu Yuanchao, et al. Geodynamic models of multidirectional collision-wedging uplift of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3):181-189(in Chinese with English abstract).
- [10] 张朝文. 阿尔泰—阿尔金构造基本格局及其发展历史 [C]//阿尔泰—台湾地学断面文集. 武汉:中国地质大学出版社, 1997:21-31.
- Zhang Zhaowen. Basic tectonic framework and evolution of Altay-Altun region [C]//Collected Papers of Geoscience Transect in Altay-Taiwan. Wuhan:China University of Geosciences Press, 1997:21-31(in Chinese with English abstract).
- [11] 周友松. 青海当今山口—四川黑水岩石圈热结构[C]//阿尔泰—台湾地学断面文集. 武汉:中国地质大学出版社, 1997:71-81.
- Zhou Yousong. Thermal structure of Danjin mountain pass (in Qinghai)—Heishui(in Sichuan) lithosphere[C]//Collected Papers of Geoscience Transect in Altay-Taiwan. Wuhan:China University of Geosciences Press, 1997:71-81 (in Chinese with English abstract).
- [12] 林茂炳. 柴达木盆地南北推覆构造概论 [J]. 成都地质学院学报, 1993, 20(4):11-17.
- Lin Maobing. A general discussion on the nappe tectonics in the north and south parts of Caidamu basin, Qinghai Province [J]. Sciences of Chengdu Collage of Geology Edition, 1993, 20(4):11-17(in Chinese with English abstract).
- [13] 刘援朝, 钟应先. 阿克赛—台湾断面显微构造研究[J]. 成都理工学院学报, 1994, 21(1):35-43.
- Liu Yuanchao, Zhong Yingxian. Microstructural study of the geological great fraverse of Akese-Taiwan [J]. Journal of Chengdu Sciences of Technology Edition, 1994, 21 (1): 35-43 (in Chinese with English abstract).
- [14] 林茂炳, 吴山. 龙门山推覆构造变形特征[J]. 成都地质学院学报, 1991, 18(1):46-55.
- Lin Maobing, Wu Shan. Deformational features of nappe structures in the Longmenshan Mountains [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1991, 18(1):46-55(in Chinese with English abstract).
- [15] 吴德超, 何政伟, 孙传敏, 等. 论推覆构造阵列—以新疆北山鳞片叠覆构造为例[J]. 成都理工学院学报, 1997, 24(3):10-19.
- Wu Dechao, He Zhengwei, Sun Chuanmin, et al. Discussions on nappe structure array:As exemplified for the Beishan scaly imbricate structure in Xinjiang, China [J]. Journal of Chengdu Sciences of Technology Edition, 1997, 24(3):10-19(in Chinese with English abstract).
- [16] 罗志立, 李景明, 刘树根, 等. 中国板块构造和含油气盆地分析 [M]. 北京:石油工业出版社, 2005:257-434.
- Luo Zhili, Li Jingming, Liu shugen, et al. Plate tectonic and analysis of petroliferous basins in China [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2005:257-434(in Chinese).
- [17] 朱介寿, 曹家敏, 李显贵, 等. 中国及其邻近地球三维结构初始模型的建立[J]. 地球物理学报, 1997, 40(5):627-648.
- Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Li Xiangui, et al. The reconstruction of preliminary three-dimensional Earth's model and its implications in China and adjacent regions [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(5):627-648(in Chinese with English abstract).
- [18] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚西太平洋边缘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).
- [19] 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).
- [20] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 东亚西太平洋岩石圈三维结构及其地幔动力学[J]. *地学前缘*, 2007, 14(3):21-38.
Cai Xuelin, Zhu Jiashou, Cao Jiamin, et al. Three-dimensional tectonics of lithosphere and mantle dynamics East Asia West Pacific [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (3):21-38 (in Chinese with English abstract).
- [21] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国大陆及邻区岩石圈地壳三维结构与动力学型式[J]. *中国地质*, 2007, 34(4):543-557.
Cai Xuelin, Zhu Jiashou, Cao Jiamin, et al. 3D Structure and dynamic types of the lithospheric crust in continental China and its adjacent regions [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (4):543-557(in Chinese with English abstract).
- [22] 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 等. 阿尔金断裂带对青藏高原北部生长、隆升的制约[J]. *地学前缘*, 2006, 13(4):59-79.
Li Haibing, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. The constraint of the Altyn Tagh fault system to the growth and rise of the northern Tibetan plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(4):59-79(in Chinese with English abstract).
- [23] Cai Xuelin, Wei Xiangui, Liu Yuanchao, et al. On the wedging-in orogenesis [C]//*Progress in Geology of China(1993-1996)-Papers to 30th IGC*. Beijing:China Ocean Press, 1996:314-320.
- [24] 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京:地图出版社,1989:1-68.
Ma Xingyuan. Atlas of the Lithosphere Dynamics of China[M]. Beijing:Cartographic Press, 1989:1-68 (in Chinese with English abstract).
- [25] 马杏垣. 解析构造学[M]. 北京:地质出版社,2004:10-421.
Ma Xingyuan. Analytical Tectonics [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2004:10-42(in Chinese).
- [26] 付昭仁, 蔡学林. 变质岩区构造地质学 [M]. 北京:地质出版社, 1996:1-239.
Fu Zhaoren, Cai Xuelin. Structural Geology of Metamorphic Terrian [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1996:1-239(in Chinese).
- [27] 罗照华, 张文会, 邓晋福, 等. 西昆仑地区新生代火山岩中的深源包体[J]. *地学前缘*, 2000, 7(1):295-298.
Luo Zhaohua, Zhang Wenhui, Deng Jinfu, et al. Characteristic and geological significance of the deep-seated xenoliths in Cenozoic basalt in Kangxiwa, western Kunlun Mountains, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(1):295-298(in Chinese with English abstract).
- [28] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 四川黑水—台湾花莲断面岩石圈与软流圈结构[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2004, 31(5):441-451.
Cai Xuelin, Zhu Jiashou, Cao Jiamin, et al. Structures of lithosphere and asthenosphere in Heishi of Sichuan-Hualian of Taiwan profile [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2004, 31(5): 441-451(in Chinese with English abstract).
- [29] Downes H. Shear zone in the upper mantle—relation between geochemical enrichment and deformation in mantle peridotites[J]. *Geology*, 1990, 18:374-377.
- [30] 王椿镛, 吴建平, 楼海, 等. 川西藏东地区的地壳 P 波速度结构[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(增刊):181-189.
Wang Chunyong, Wu Jianping, Lou Hai, et al. The crustal P-wave velocity structure of the western Sichuan and eastern Tibet[J]. *Science in China:Series(D)*, 2003, 33 (supp.):181-189(in Chinese).
- [31] 毛桐恩, 刘新美, 赵明, 等. 地球内部层-圈耦合作用研究进展[J]. *科技导报*, 1999, 7:28-30.
Mao Tongen, Liu Xinmei, Zhao Ming, et al. Progress in the research of coupling action between the layer and sphere in the earth interior [J]. *Science and Technology Review*, 1999,6:28-30 (in Chinese).
- [32] 邓万明, 孙宏娟. 青藏北部板内火山岩的同位素地球化学与源区特征[J]. *地学前缘*, 1998, 5(4):307-317.
Deng Wanming, Sun Hongjuan. Isotopic geochemistry and source of intraplate volcanic rocks in north Tibet, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5(4):307-317(in China with English abstract).
- [33] 王建, 李建平, 王江海, 等. 滇西剑川—大理地区新生代钾玄岩系中深源包体的地质意义[J]. *矿物学报*, 2002, 22(2):113-125.
Wang Jian, Li Jianping, Wang Jianghai, et al. Geological implications for the mafic enclaves of deep derivation from Cenozoic shoshonitic rocks in Jianchuan-Dali area, western Yunnan [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2002, 22 (2):113-125(in Chinese with English abstract).
- [34] 蔡新平. 扬子地台西缘新生代富碱斑岩中的深源包体及其意义[J]. *地质科学*, 1992, 27(2):183-189.
Cai Xinpin. Discovery of deep-derived xenoliths in Cenozoic alkali-rich provinces along the margin of the Yangtze platform and its significance[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1992, (2):183-189(in Chinese with English abstract).
- [35] 刘显凡, 刘家铎, 阳正熙, 等. 富碱斑岩中超镁铁深源包体岩石的矿物学特征[J]. *矿物学报*, 2002, 22(3):289-295.
Liu Xianfan, Liu Jiaduo, Yang Zhengxi, et al. Mineralogical characteristics of deep-source ultramafic xenoliths in alkali-rich porphyry [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2002, 22 (3):289-295(in Chinese with English abstract).
- [36] 吕伯西, 钱祥贵. 滇西新生代碱性火山岩、富碱斑岩深源包体岩石学研究[J]. *云南地质*, 1999, 18(2):127-143.
Lü Boxi, Qian Xianggui. A petrographic study on the hypogenic enclave in Cenozoic alkalic volcanics and rich-alkali porphyry of west Yunnan [J]. *Geological Yunnan*, 1999,18 (2):127-143 (in Chinese with English abstract).
- [37] 喻学惠. 甘肃宕昌好梯碱性超基性岩:一种含上地幔包体和巨晶的钾质超镁铁煌斑岩[J]. *地质论评*, 1991, 37(2):144-153.
Yu Xuehui. The Haoti alkaline ultrabasic volcanic rocks from Tanchang, Gansu province: A potassic ultramafic containing the upper mantle-derived xenoliths and megacrysts [J]. *Geological Review*, 1991, 31(2):144-153(in Chinese with English abstract).

- [38] 喻学惠, 莫宣学, Flower M, 等. 甘肃西秦岭新生代钾霞微黄长岩火山作用及其构造含义[J]. 岩石学报, 2001, 17(3):366-377.
Yu Xuehui, Mo Xuanxue, Flower M, et al. Cenozoic kamafugite volcanism and tectonic meaning in west Qinling area, Gansu province [J]. Acta Petrologica Sinica, 17 (3):366-377 (in Chinese with English abstract).
- [39] 吴珍汉, 吴中海, 江万, 等. 中国大陆及邻区新生代构造—地貌演化过程与机理[M]. 北京:地质出版社, 2001:37-99.
Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Jiang Wan, et al. The Cenozoic Evolution and Mechanism of Tectonic -landforms of China Continent and Its Adjacent Areas [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2001:37-99(in Chinese with English abstract).
- [40] 吴才来, 杨经绥, 许志琴, 等. 可可西里辉石岩包体矿物化学及其地质意义[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(增刊):109-116.
Wu Cailai, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. Mineral chemistry and geological significane of the pyroxenite xenoliths in Kekexili [J]. Science in China(Series D), 2001, 31(supp.):109-116(in Chinese).
- [41] 伊海生, 林金辉, 等. 藏北高原新生代高钾钙碱性系列火山岩与壳—幔相互作用[M]. 北京:地质出版社, 2004:1-84.
Yi Haisheng, Lin Jinhui, et al. The Cenozoic High -K Calc -alkaline Volcanic Rock Series in the Northern Tibetan Plateau: Implications for Crust-mantle Interaction [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2004:1-84(in Chinese with English abstract).
- [42] 罗照华, 白志达, 赵志庆, 等. 塔里木盆地南北缘新生代火山岩成因及其地质意义[J]. 地学前缘 2003, 10(3):179-189.
Luo Zhaohua, Bai Zhida, Zhao Zhiqing, et al. Cenozoic magmatism in the south and north rims of Tarim basin: petrogenesis and tectonic implications [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3):179-189(in Chinese with English abstract).
- [43] 郑建平, 路凤香, O'Reilly ST, 等. 新疆托云地幔单斜辉石微量元素与西南天山岩石圈深部过程 [J]. 科学通报, 2001, 46(6):497-502.
Zheng Jianping, Lu Fengxiang, O'Reilly ST, et al. Trace-element of Tuoyun clinopyroxene:Implication for the deep processes of lithospheric mantle beneath the south west Tianshan, west China[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(6):497-502(in Chinese).
- [44] 韩宝福, 王学潮, 何国琦, 等. 西南天山早白垩世火山岩中发现地幔和下地壳捕虏体[J]. 科学通报, 1998, 43(23):2544-2547.
Han Baofu, Wang Xuechao, He Gaoqi, et al. Discovery of mantle and lower crust xenoliths from Early Cretaceous volcanic rocks of southwestern Tianshan, Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(23):2544-2547(in Chinese).
- [45] 李友枝, 赵磊, 何明跃, 等. 西昆仑克里阳地区钾镁煌斑岩岩石学特征及其意义[J]. 现代地质, 2000, 14(4):385-391.
Li Youzhi, Zhao lei, He Mingyue, et al. Petrology features and significance of lamproite in Keliyang, west Kunlun area [J]. Geoscience, 2000,14(4):385-391(in Chinese with English abstract).
- [46] 丁林, 张进江, 周勇, 等. 青藏高原岩石圈演化的记录:藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化学特征 [J]. 岩石学报, 1999, 15(3):408-421.
Ding Lin, Zhang Jinjiang, Zhou Yong, et al. Tectonic implication on the lithosphere evolution of the Tibet plateau:Petrology and geochemistry of sodic and ultrapotassic volcanism in northern Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(3):408-421(in Chinese with English abstract).
- [47] 邓万明, 黄萱, 钟大赟. 滇西新生代富碱斑岩的岩石特征与成因 [J]. 地质科学, 1998, 33(4):412-425.
Deng Wanming, Huang Xuan, Zhong Dalai. Petrological characteristics and genesis of Cenozoic alkali-rich porphyry in west Yunnan, China[J]. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33(4):412-425 (in Chinese with English abstract).
- [48] 樊祺诚, 隋建立, 刘若新. 五大莲池、天池和腾冲火山岩 Sr、Nd 同位素地球化学特征与岩浆演化 [J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3):233-238.
Fan Qicheng, Sui Jianli, Liu Ruoxin. Sr-Nd isotopic geochemistry and magmatic evolutions of Wudalianchi volcano, Tianchi volcano and Tengchong volcano[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2001, 20(3):233-238(in Chinese with English abstract).
- [49] 郭安林, 张国伟, 孙延贵, 等. 青藏高原东北缘多福屯第三纪钠质基性火山岩及构造启示 [J]. 地学前缘, 2007, 14(3):73-83.
Guo Anlin, Zhang Guowei, Sun Yangui, et al. Tertiary Duofuton Na-rich mafic volcanic rocks, on northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau and their tectonic implications [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3):73-83(in Chinese with English abstract).
- [50] 赵俊猛. 天山造山带岩石圈结构与动力学[M]. 北京:地震出版社, 2005:14-227.
Zhao Junmeng. Lithospheric Structure and Geodynamics of Tianshan Orogenic Belt [M]. Beijing:Seismological Press, 2005:14-227(in Chinese with English abstract).
- [51] 崔作舟, 李秋生, 吴朝东, 等. 格尔木—额济纳旗地学断面的地壳结构与深部构造 [J]. 地球物理学报, 1995, 38(期刊 II):15-28.
Cui Zuozhou, Li Qiusheng, Wu Chaodong, et al. The crustal and deep structures in Golmud-Ejinqi GGT [J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38(supp. II):15-28 (in Chinese with English abstract).
- [52] 袁学诚. 论中国大陆基底构造 [J]. 地球物理学报, 1995, 38(4):448-459.
Yuan Xuecheng. On continental basal structure of China [J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38 (4):448-459 (in Chinese with English abstract).
- [53] 朱杰寿, 蔡旭林, 曹际明, 等. 青藏高原高分辨率地震层析成像及其动力学意义 [J]. 地学前缘, 2000, 7(增刊):354-356(in English).
- [54] 蔡学林, 石绍清, 吴德超, 等. 武当山推覆构造的形成与演化[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1995:1-207.
Cai Xuelin, Shi Shaoqing, Wu Dechao, et al. Formation and Tectonic Evolution of the Wudangshan Nappe Structure [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1995:1-207(in Chinese with English abstract).
- [55] 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 等. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山

- 带的崛起[J]. 地学前缘, 1999, 6(3):139-151.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Jiang Mei, et al. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet plateau [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6 (3):139-151(in Chinese with English abstract).
- [57] 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 units of China [J]. Geology in China, 2006, 34(4):700-710(in Chinese with English abstract).
- [58] Poupinet G, Thouvenot F, Zolotov EE, et al. Teleseismic tomography across the middle Urals:Lithospheric trace of an ancient continental collision. Tectonophysics, 1997, 276:19-33.
- [59] Schmid S M, Pfifner N. Froitzheim, et al. Geophysical-geological transect and tectonic evolution of the Swiss -Italian Alps [J]. Tectonics, 1996, 15(5):1036-1064.
- [60] Teixell A. Crustal structure and orogenic material budget in the west oentral Pyreness[J]. Tectonics, 1998, 17(3):395-406.
- [60] 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 等. 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化[M]. 北京:地质出版社, 2005:30-296.
- Zhu Jieshou, Cai Xuelin, Cao Jiaming, et al. The Three - Dimensional Structure of Lithosphere and its Evolotion in South China and East China Sea [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 30-296 (in Chinese with English abstract).
- [61] 安德森 D L. 地球的理论[M]. 北京:地震出版社,1993:58-79.
- Anderson D L. Theory of the Earth [M]. Beijing:Seismological Press, 1993:58-79(in Chinese).
- [62] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国及邻近陆海地区软流圈三维结构及其与岩石圈的相互作用[J]. 中国地质, 2006, 33(4):804-815.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. 3D structure of the asthenosphere beneath China and adjacent land and sea areas and its interaction with the lithosphere[J]. Geology in China, 2006, 33(4): 804-815(in Chinese with English abstract).
- [63] 高锐, 刘宏兵, 谭捍东, 等. 青藏高原深部结构与碰撞动力学过程 [C]//青藏高原隆升与环境效应. 北京:科学出版社, 2004:57-116.
- Gao Rui, Liu Hongbing, Tan Handong, et al. The deep structures of the Qinghai-Tibet plateau and its dynamic processes of the collision [C]//Uplifting of Qinghai -Tibet plateau with its environmental effects. Beijing:Science Press, 2004:57-116(in Chinese).
- [64] 钟大赟, 等. 滇川西部古特提斯造山带 [M]. 北京: 科学出版社, 1998, 9-20, 171-217.
- Zhong Dalai, et al. Paleo-Tethys Orogenic Belt in the Western Yunnan and Sichuan[M]. Beijing:Science Press, 1998:9-20, 171-217(in Chinese).

Lithospheric and asthenospheric structures of the Koktokay of Xinjiang to Jianyang of Sichuan geoscience transect

CAI Xue-lin¹, CAO Jia-ming², ZHU Jie-shou²

(1. School of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. School of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: By using the theory and method of modern structural analysis, the paper analyses the explosion seismic sounding profiling and natural seismic surface wave tomographic imaging in the Koktokay of Xinjiang to Jianyang of Sichuan geoscience transect and integrates the results of research on geology, geochemistry, structural petrology of deep-seated xenoliths and geophysical signs. These studies indicate that the geometric structure pattern of high-speed blocks or mantle block tectonics is one of the basic conditions for controlling the lithospheric tectonic pattern and tectonic deformation of the lithospheric surface. The crustal, lithospheric and asthenospheric velocity structure models and material composition models are constructed in this geoscience transect. Based on a systematic study of the high-speed blocks in the lithosphere, three geometric structures of the lithosphere are distinguished: craton-root-shaped structure, orogen-wedge-shaped structure and plateau-root-shaped structure, and two tectonic evolution types of the lithospheres are recognized: cratonic lithosphere and thickened lithosphere. Based on the aforesaid systematic description, the paper discusses the structural types of the asthenosphere, interaction between the lithosphere and asthenosphere and mantle dynamic model of this geoscience transect.

Key words: lithosphere; asthenosphere; seismic sounding; seismic tomographic imaging; tectonic analysis; mantle block tectonics; Koktokay, Xinjiang; Jianyang, Sichuan

About the first author: CAI Xue-lin, male, born in 1935, professor, mainly engages in the study of structural geology and deep geology; E-mail: caixuelin1935@sohu.com.