

赵国泽, 陈小斌, 肖骑彬等. 汶川 $M_s 8.0$ 级地震成因三“层次”分析——基于深部电性结构. 地球物理学报, 2009, 52(2): 553~563
Zhao G Z, Chen X B, Xiao Q B, et al. Generation mechanism of Wenchuan strong earthquake of $M_s 8.0$ inferred from EM measurements in three levers. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(2): 553~563

汶川 $M_s 8.0$ 级地震成因三“层次”分析 ——基于深部电性结构

赵国泽¹, 陈小斌¹, 肖骑彬¹, 王立凤¹, 汤吉¹, 詹艳¹,
王继军¹, 张继红², H. Utada³, M. Uyeshima³

1 中国地震局地质研究所, 北京 100029

2 山东省地震局, 济南 250014

3 Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Japan

摘 要 2008年5月12日汶川 $M_s 8.0$ 级地震的发生不是局部地区孤立的构造事件, 研究汶川地震的孕震机制, 应该把局部分分析和区域分析相结合, 关注地壳上地幔直至地幔过渡带的深部结构. 基于近年来在东北、华北和汶川地震附近地区进行的深部结构电磁探测结果, 结合地震学等其他资料, 从太平洋板块的俯冲、印度板块的碰撞和松潘甘孜地块的推挤三个“层次”探讨分析汶川特大地震的成因. 太平洋板块向亚洲大陆的俯冲作用, 导致中国大陆东部地幔过渡带深度较普遍地存在着停滞的板片, 它对汶川地震的影响不可忽视. 印度板块与青藏高原的碰撞, 使组成高原的各地块发生向北和向东的运动, 各地块向东的运动作用于南北地震带中南段, 影响到该区域的地震活动. 松潘甘孜地块向四川地块的推挤, 使松潘甘孜地块运动方向和龙门山断裂带形成“丁”字形结构, 龙门山断裂带显示为较陡直的电性边界, 加剧了汶川地震前的应力积累, 可能是汶川地震发生的最直接的诱因.

关键词 汶川地震, 电性结构, 地幔过渡带, 地震成因, 龙门山断裂带

文章编号 0001-5733(2009)02-0553-11

中图分类号 P631.541

收稿日期 2009-02-02, 2009-02-11 收修定稿

Generation mechanism of Wenchuan strong earthquake of $M_s 8.0$ inferred from EM measurements in three levers

ZHAO Guo-Ze¹, CHEN Xiao-Bin¹, XIAO Qi-Bin¹, WANG Li-Feng¹, TANG Ji¹,
ZHAN Yan¹, WANG Ji-Jun¹, ZHANG Ji-Hong², H. Utada³, M. Uyeshima³

1 Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China

3 Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Japan

Abstract Wenchuan earthquakes occurred on May 12, 2008 is not an independent tectonic event confined in a local regions. It is reasonable to study the deep structure of the crust, upper mantle and mantle transition zone combining between the local and regional observation data for understanding the preparation and development of Wenchuan earthquakes. The analysis on Wenchuan earthquake generation in this paper is on basis of electromagnetic measurement data obtained recent years with considering the other data e. g., seismic data, which are relative to three level of tectonic movements, Pacific plate subduction and penetration, collision of India

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40534023)和国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418402)资助.

作者简介 赵国泽, 男, 1946年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事地球电磁法研究. E-mail: zhaogz@ies.ac.cn

plate with Tibet plateau and pressure of Songpan-Garzê block upon Sichuan block. The stagnant slabs formed by Pacific plate subduction exist generally in the mantle transition zones under eastern China continent of North-South seismic belts, which can not be ignored when the generation of Wenchuan earthquakes are investigated. Both northward and eastward movements of different blocks in the Tibet caused by collision of India plate appear. Their eastward movements act on the eastern margin of Tibet i. e., mid- and south- sections of North-South seismic belt and affect the shocks occurred there including Wenchuan earthquakes. The south-east-east direction along which Songpan-Garzê block moves is approximately normal to Longmenshan faults and formed a T-geometry structure by both of them. The Longmenshan faults are represented by a large steep electric boundary in the resistivity profile. This kind of pattern of deep structure is prone to accumulate the stress before Wenchuan earthquakes and is a direct factor for generation of the earthquakes.

Keywords Wenchuan earthquake, Electric structure, Mantle transition zone, Earthquake generation, Longmenshan faults

1 引言

2008年5月12日四川省汶川发生 $M_s8.0$ 级地震.汶川地震后短短半年多的时间内,研究者对地震引起的破裂过程和变形以及古地震的重复性等进行有成效的研究^[1~4].Huang^[5]用RTL(震中距-时间-破裂长度)方法定量研究表明,在汶川地震及其周围地区震前2006~2007年期间经历了相对长时间的地震平静期.Huang等^[6~8]从不同的角度分析了震前电阻率的变化.张永仙等^[9,10]对地震平静期和大地震发生的相关性进行了研究.张永仙^[9]利用地震活动性迁移现象,对西南地区大地震与华北地区大地震的呼应关系进行了研究.邓起东等^[11,12]对汶川地震的发生和预报问题等进行了思考或反思.但是,关于汶川地震发生的成因,特别是基于地球深部结构的成因研究^[13]还不多.

汶川地震发生在龙门山断裂带中部,龙门山断裂带位于南北地震构造带的中段.南北地震构造带长约2000多公里,把中国大陆分成构造样式和地震活动性有明显差异的东西两部分.南北地震带的南半部与青藏高原东边缘带位置一致.南北地震带以东约2000多公里外是与其几乎平行展布的太平洋板块、菲律宾板块向亚洲大陆俯冲的位置(图1).

自有历史记载以来,沿着南北地震带,每发生8级或以上的地震,存在100年左右的时间间隔^[14].沿南北地震带不同位置的地震活动性也有差异,北段和南段都曾分别发生过多次7级甚至8级以上地震,但龙门山断裂带所在的中段地区的地震活动明

显弱于南、北两段^[12].在汶川8级地震之前沿龙门山断裂带尚未发生过如此强烈的地震^[15],并有约7年时间的4级以上地震平静期¹⁾.但是,位于青藏高原东边缘带的其他一些断裂带如鲜水断裂带、安宁河—则木河断裂带等则地震频繁.此外,位于太平洋俯冲带的日本的东海岸附近,在经过了2008年1月到5月至少连续100多天的地震平静期之后,自5月8日开始,6月14日和7月19日相继发生了7级以上地震,它们的发生与5月12日汶川地震的关系不应被忽略.

本文将基于近年来用电磁方法探测得到的地壳上地幔及地幔过渡带的电性结构,结合其他深部资料,从太平洋板块俯冲、印度板块向青藏高原的碰撞以及松潘甘孜地块对龙门山断裂带的推挤3个“层次”分析汶川地震的成因.

2 太平洋板块俯冲

2.1 停滞的板片

中国大陆位于欧亚大陆的东南部,东侧太平洋板块、菲律宾板块沿北西方向俯冲到亚洲大陆以下,南侧和西南侧印度板块向北碰撞青藏高原地块,北侧为相对稳定的西伯利亚地块^[16](图1).中国大陆的构造格架和地震活动性与来自这三方面的作用有关,但依据它们与汶川地震之间关系的密切程度,我们把东侧的太平洋板块的俯冲作用作为第一“层次”

1) 张永仙. 个人交流. 2008

进行分析,而把印度板块的作用作为第二“层次”进行分析。

20 世纪 90 年代,利用地震成像技术发现^[17,18],太平洋板块向西北方向俯冲到亚洲大陆下方,在地幔过渡带深度(410~660 km)出现异常高速带,并

沿近水平方向展布,人们把形似“舌”状的结构称为停滞的板片(stagnant slab)。此后,关于停滞板片的几何形态、岩石组成、运动学和动力学等研究受到广泛关注^[18]。图 2 是自太平洋到中国东北的地震层析成像剖面。

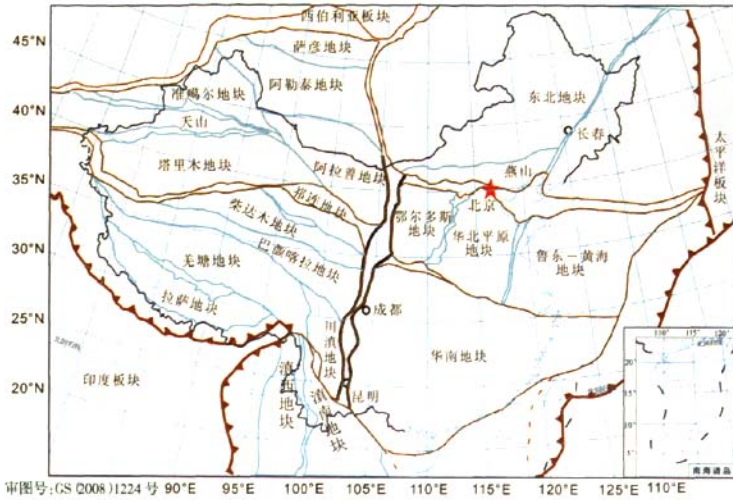


图 1 中国大陆以及汶川地震区域构造背景(基于张培震²⁾,有修改)
图中粗线圆表示汶川地震震中位置,银川—兰州—成都—昆明一线为南北地震带,
图中右部锯齿状线表示太平洋板块俯冲带。

Fig. 1 Tectonic background of China continent and the surrounding
Thick circle-Wenchuan earthquake epicenter

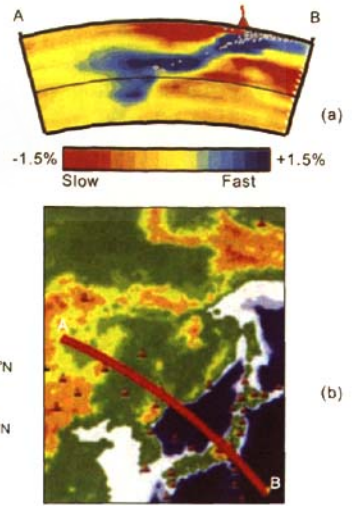


图 2 自太平洋到中国东北的地震层析成像剖面
(a)沿剖面的速度结构(转引自^[21]);
(b)A-B 表示剖面位置。

Fig. 2 Seismic image profile from Pacific ocean to NE China^[21]

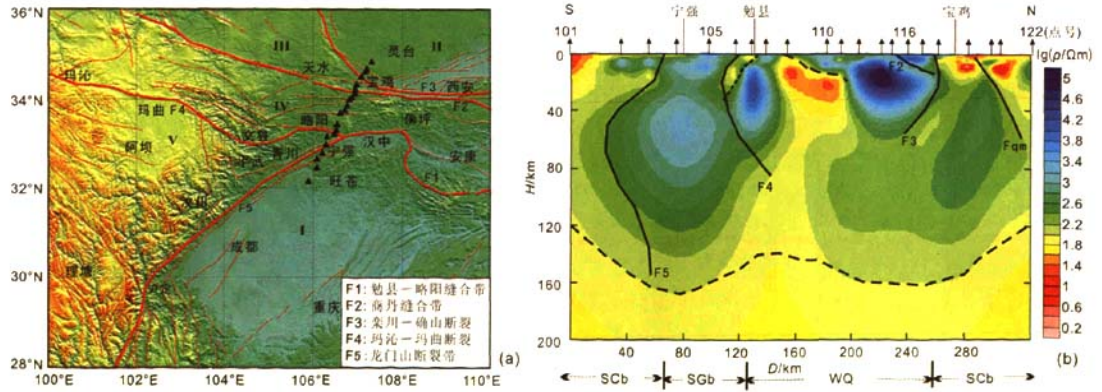


图 5 四川广元—甘肃灵台大地电磁剖面位置(a)和电性结构(b)
(a) 实心三角形表示 MT 测点, I 扬子地块(含四川地块 SC^b), II 鄂尔多斯地块(EDb), III、IV 西秦岭(WQ), V 松潘甘孜地块(SGb);
(b) 电阻率结构,顶部箭头是 MT 测点,电阻率等值线中蓝色为高阻(标尺为电阻率的对数),其他符号见正文。

Fig. 5 MT profile from Guangyuan in Sichuan province to Lingtai in Gansu province
and the resistivity structure along the profile

2) 张培震. 个人交流. 2003

约在 84 Ma 前,沿南千岛群岛—伊豆—小笠原一线,太平洋板块开始向北西方向以一定的倾角向亚洲大陆俯冲^[18~20]。当俯冲带到达地幔过渡带深度(410~660 km)时,由于下地幔的阻挡作用,俯冲板块偏离原运动方向,变成向北西向的近水平运动,形成舌状的停滞板片,总体表现为高速异常。

结合全球其他地区的研究认为^[19,22~24],地幔过渡带的上下界面即 410 km 和 660 km 界面是上地幔的一级界面。此外,在一些地区还发现,在 220 km 和 520 km 深度也存在地震波速度界面。岩石学研究表明,410 km 对应橄榄石转换为 Wadsleyite 石(或称 β 相或改造的尖晶石)的相变,520 km 对应 β 相林伍德石(或称为 γ 相或硅尖晶石)的相变,在 660 km 深度林伍德石遭受破坏,变成钙钛矿或镁方铁石。220 km 界面则被认为是岩石结构复杂程度发生变化的界面,220 km 以上的地层结构比 220 km 以下复杂,具有各向异性特点。同时发现,410 km 和 660 km 界面都可能沿着横向起伏变化,并非完全平坦。

2.2 地幔过渡带及其附近的电性结构

为了从电性角度研究太平洋板块俯冲到中国大陆下方的上地幔和过渡带的结构,我们在东北地区和华北地区分别选择了一些测点,利用网式大地电磁技术(Network-MT)进行观测。其中,电场分量的观测利用长途电话线或通信电缆(一般长十几到几十公里),用电极把电话线或通信电缆两端与大地连接,磁场分量测量利用三分量磁通门磁力仪。所有分量的测量数据传输到 Network-MT 采集器记录和存储。电磁场每个分量的测量时间一般都在 3 个月以上,各电、磁场分量记录过程中用 GPS 同步^[25~27]。

利用类似于大地电磁(MT)方法的数据处理技术,对观测的电、磁场分量数据进行处理,可得到周期范围最长为几十秒到几十万秒的视电阻率和相位等数据。利用地磁台等记录的更长时间的磁场数据,可以计算更长周期范围的(几十万秒到百万秒)、等价于大地电磁阻抗的地磁测深阻抗(GDS 阻抗或 GDS 转换函数),进而计算视电阻率和相位^[28]。对每个测点的视电阻率和相位进行反演,可得到随深度变化的地下电性结构。图 3 作为例子分别给出位于华北地块的叶柏寿(YBS)、东北地块的三岔河(SCH)和它们之间边界带的四平(SP)测点的电导率随深度变化的电性结构图。

由图 3 可见,地幔过渡带的上下界面 410 km 和 660 km 在三个测点都有显示,两个界面之间的过渡带是电导率随深度总体上增大最快的深度段,

但三个测点之间又有差别。叶柏寿测点从 410 km 开始电导率随深度增加几乎单调增大,到 660 km 以下电导率较稳定。四平和三岔河测点在 410 km 以下,电导率随深度增加首先减小,而后又增大,在 660 km 以下变得比较稳定。

此外,四平和三岔河测点的过渡带的上半部都出现了电导率的极小值,其中四平测点极小值深度偏下接近 520 km,而三岔河测点偏上接近 410 km。三个测点过渡带的下半部,或者显示为电导率的持续增大(如叶柏寿和四平测点),或者出现电导率的极大值(如三岔河测点)。Tajima 认为^[29],过渡带内约 560 km 深度岩石强度最大,出现地震波速的极大值,但是电性结构在这个深度没有显示低电导率,它们之间的成因关系需进一步研究。

在紧靠 410 km 深度以上的深度,四平和三岔河测点出现相对高的电导率,与这个深度范围的地震横波速度较小的现象一致,并解释为这是由于消减的太平洋板块携带浅部的水(或存在含水矿物)引起的^[21,23]。220 km 界面以上到地表附近的电导率随深度的变化比 220 km 以下要复杂,特别是在位于边界带的四平测点,电性层位较多,电导率随深度变化也较剧烈,支持 220 km 深度以上的结构更复杂的观点^[22]。

三个测点的电性结构还表明,位于东北地块和华北地块之间边界带的测点(SP)的电性结构,比位于两个地块的测点(YBS 和 SCH)的电性结构复杂,电导率随深度变化较剧烈,电性层位多,660 km 以下出现的电导率的极大值是三个测点中最大的(大于 10 S/m)。因此,电磁探测既揭示了电性地幔过渡带的存在,也揭示了电性结构的横向不均匀性。

2.3 消减板块动力学作用

地震层析成像等研究揭示,有的地区消减板块在到达地幔过渡带深度时,板块运动偏向沿着近水平方向,比如西北太平洋板块俯冲带。而有的地区消减板块穿过 660 km 界面,沉入到下地幔,比如在中美洲地区的消减板块等。有的地区消减板块沉入到下地幔,但在穿过 660 km 界面时,形态发生畸变,如在爱琴海地区。尽管如此,一般认为,高密度的、冷的海洋地壳在板块消减过程中起到关键作用,而板块消减是驱动地幔对流的重要力源^[24]。

下地幔的岩石黏滞度明显大于 660 km 以上的黏滞度^[30],阻碍了板块向更深部的俯冲,而出现偏向水平方向运动。但在某些地区,消减板块能够沉入到下地幔。针对这种现象,通过对地幔岩石的成分、

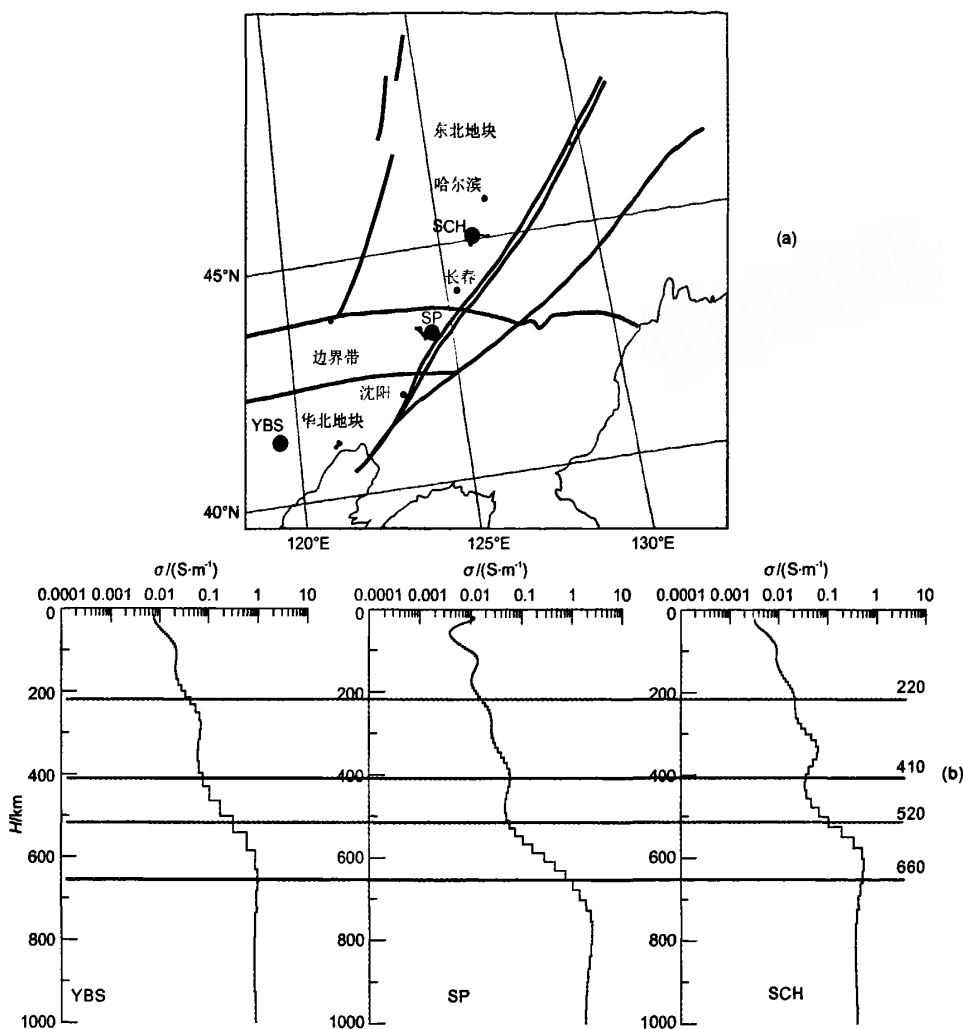


图3 测点及电导率随深度变化曲线

(a) 图示叶柏寿(YBS)、四平(SP)和三岔河(SCH)3个测点(图中大实心圆)的位置;(b)三个测点电导率随深度变化曲线,每个测点的横坐标为电导率(单位: S/m),纵坐标为深度(单位: km),220、410、520和660分别指示相应的深度(km).构造背景基于文献[16].

Fig. 3 Conductivity-depth curves for three sites, YBS, SP and SCH

密度和黏滞度等综合研究认为,偏向水平方向为主和沉入到下地幔为主的两种运动方式可能是共存的,之所以出现两种不同的运动方式,可能与板块所处的地区构造背景和板块的消减历史有关^[17].

关于地幔对流是上地幔和下地幔的分层对流还是整个地幔的大尺度对流,至今仍然是研究的热点.综合各方面的研究认为,由于地幔结构的不均匀性是多尺度的,因此导致地幔内部的对流也是多尺度的,可以从千米尺度到千公里尺度^[21,31,32].

中国大陆位于太平洋板块的西侧,上地幔以及地幔过渡带与太平洋板块、菲律宾板块的俯冲有直接的关系. Huang 等^[33]对穿过中国大陆的多条东

西向剖面(沿纬度 $43^\circ, 39^\circ, 30^\circ, 25^\circ$ 等)进行了地震层析成像研究,并给出了自 $41^\circ \sim 27^\circ$ 间以 2° 为间隔的深度达到 $1200 km$ 的地震波速度成像剖面,结果表明,几乎所有的板片都在过渡带深度出现了停滞现象(即出现舌状结构),但不同剖面板块俯冲的倾角有所差别,在 $660 km$ 深度停滞板片的前缘,与近北北东向穿过中大陆并把大陆分隔成东、西两部分的地形边界带对应,同时也与大兴安岭—太行山—西四川盆地的巨型重力梯渡带对应. 最近,裴顺平³⁾给出的自日本海沟到南北地震构造带的沿 41° 纬度

3) 裴顺平. 个人交流. 2008

的地震层析成像表明,太平洋板块俯冲带和过渡带的高地震波速度异常,向西穿过鄂尔多斯地块,一直延续到南北地震构造带。

此外,对中国大陆及边缘海的深部结构研究表明,尽管在小于 400 km 深度组成中国大陆各地块之间的结构有较大差别,但在 400 km 以下它们之间的横向变化明显减小,说明不同地块的地幔过渡带结构具有关联性^[34,35]。面波成像研究表明,南北地震带对所有周期的资料都显示为是分隔大陆东、西两部分的低速边界^[36]。刘光鼎^[37]更以“跷跷板”形象地描述中国大陆构造的动力学演化,指出“跷跷板”以鄂尔多斯—四川为轴,其东、西两侧自古生代以来都显示了不同的构造运动过程。

在华北和东北地区,由南北地震带向东到太平洋俯冲带发育有一系列的北北东或北东向的中新生代以来的盆地,它们被相对稳定的地块或造山带分隔。自西向东它们分别是银川盆地、山西断陷盆地(华北)和海拉尔盆地(东北)、华北平原盆地(华北)和松辽盆地(东北)以及日本海盆地等,它们的生成都经受了较明显的南东东向或南东向拉张作用^[38,16],尽管相对于华北和东北地区,由于受差异构造环境的影响使这些盆地生成的时代并不完全对应。这一现象可能说明,地幔过渡带以上的上地幔范围的对流作用(非整个地幔的对流,对流环平面沿南

南东东或南东向)对华北和东北及其以东地区的地质构造样式的产生具有不可忽略的作用。在华南地区,由于青藏高原地块较快速的向东运动成分,以及华南地块的相对稳定性和阻挡作用,使青藏高原地块东边缘具有明显的向南的运动分量,因而使南北地震带的中南段剪切走滑作用更明显。南北地震带在很大程度上也影响或控制着中国大陆的地震活动性,例如,1990~2007 年期间大于 7 级的地震,在西部整体上相对均匀分布,而在东部则主要集中在南北地震带和海域以东^[36]。

总之,在中国大陆东部地幔过渡带深度范围停滞板片的存在,把中国大陆和东侧的太平洋板块的俯冲作用紧密相联。要分析汶川特大地震的成因,显然应该考虑太平洋板块向亚洲大陆俯冲作用的影响。

3 印度板块的碰撞

大约在 45~50Ma 前后,印度板块和欧亚板块开始碰撞^[39],此后具有不同地质发育历史的微大陆(包括喜马拉雅、拉萨、羌塘、松潘甘孜、柴达木地块和高原东边界带的川滇地块等)拼合形成青藏高原(图 4)。高原内部块体之间的边界断裂带表现为走滑特点,而在高原东边缘呈向东的挤出运动^[14]。

自 20 世纪 70~80 年代以来,在青藏高原及其

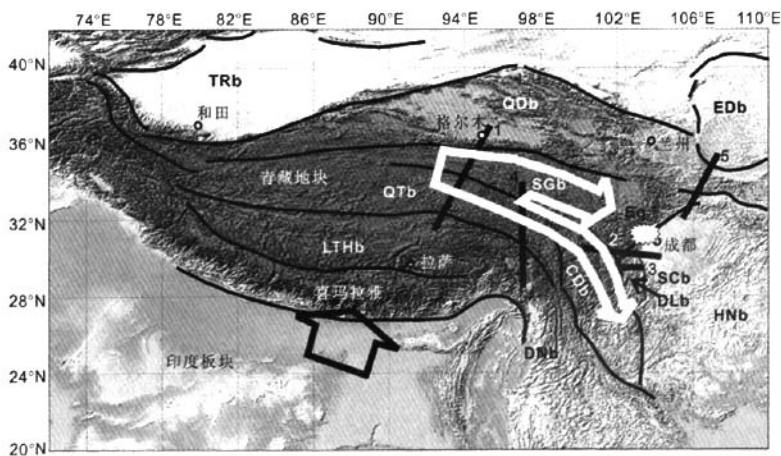


图 4 青藏高原区地块和 MT 剖面位置

LTHb-拉萨地块,DTb-羌塘地块,SGb 松潘甘孜地块,QDb-柴达木地块,TRb-塔里木地块,DNb-滇南地块,CDb-川滇地块,SCb-四川地块,DLb-大凉山地块,HNb-华南地块,EDb-鄂尔多斯地块。粗黑直线表示 MT 剖面:1 安多—格尔木,2 巴塘—贡觉,3 石棉—乐山,

4 下察隅—清水河,5 广元—灵台。空心圆表示城市。宽箭头分别表示印度板块向北北东的运动和松潘甘孜及羌塘地块地壳

“管流层”向南或南南东的运动,Eq 的爆炸形图案表示汶川地震位置。

Fig. 4 The location of the blocks in Tibet plateau and MT profiles and movement directions of India plate and the ‘channel flow’

边缘区实施了一定的地震学和电磁学探测研究,发现青藏高原中心部位地壳厚度约 70 km,东侧、东北侧等边缘带迅速减薄,地壳内部存在相对软弱的低速/低阻层^[40~42]。

最近的地震层析成像研究表明,印度板块以低角度俯冲到青藏高原下方 200~300 km,消减带的北边界达到羌塘地块,水平移动距离约 500~700 km^[33]。近年的 GPS 测量证明,组成青藏高原各地块的运动方向,在南部为北北东方向,向北部逐渐转为向北东或近似向东的方向,运动速率由喜马拉雅地块的 35~42 mm/a,逐步减小到祁连地块的 7~14 mm/a^[43],而川滇地块正经历着顺时针旋转运动。这些研究成果使人确信,青藏高原遭受到印度板块的碰撞作用,内部各地块经历着向北、向东的变形运动。

下面我们将重点依据电磁探测资料,对于地球内部物质运动或流动的依据予以简单介绍。在青藏高原南边缘带及附近地区开展的 INDEPTH 国际合作探测计划中,发现在 15~20 km 深度存在低阻层,厚度达十几公里以上,电阻率为几欧姆米。低阻层深度范围与地震反射探测得到的地震波能量强烈衰减的亮点对应^[44,45]。通过对地面淡色花岗岩样品的实验,结合分析低阻层所处的温度和压力环境,推测这里存在岩石的部分熔融,或许也存在少量含盐流体(自由流体),低阻层的黏滞度较低,易于流动。

在邻近汶川地震地区,沿几条剖面开展了电磁探测,剖面分别穿过松潘甘孜地块、羌塘地块和川滇地块等。沿这些剖面的结果显示了可相互对比的地壳电性结构。例如,安多—格尔木剖面南端起自拉萨地块,向北经过羌塘地块和松潘甘孜地块,终止于柴达木地块(图 4 中的剖面 1)。沿剖面的电性结构显示,在羌塘地块和松潘甘孜地块约 10 多公里深度以下存在异常低电阻率带,低阻带的中心位于羌塘地块的北部。而柴达木地块地壳内不存在异常低阻层,整个地壳显示为高电阻率。研究认为,地壳内的低阻层可能源自深部物质的上涌,并存在沿着羌塘地块和松潘甘孜地块走向方向即南东东方向的运动^[46]。

另一条剖面西端起自川滇地块西边界以西的巴塘,向东穿过川滇地块、松潘甘孜地块南部,东端止于四川地块的资中(图 4 中的剖面 2)^[47]。电性结构剖面显示,在川滇地块约 10 km 以下存在异常低电阻率层,厚度近 20 km,并有自西向东下延的趋势,深度逐渐加大,这可能是由于受到四川地块的阻挡,使川滇地块的壳内低阻层向松潘甘孜和四川地块下方倾覆的结果。松潘甘孜南部地壳显示为高阻带和

低阻带交混的复杂结构,四川地块的地壳上部为低阻层,可能与沉积层对应,中下地壳不存在异常低阻层。

最近探测研究的石棉—乐山剖面,西端起自川滇地块东部,向东穿过大凉山地块,东端止于四川地块的乐山附近(图 4 中的剖面 3)^[42]。地壳电性结构显示,在川滇地块和大凉山地块约 10~15 km 以下存在异常低阻层,深度沿横向有一定起伏,厚度有所变化,最薄处约 10 km,最厚处达 20 多公里。四川地块的地壳整体上显示为高电阻率。大凉山地块和四川地块之间的边界带近直立,与峨边断裂带对应。地壳电性剖面显示,川滇地块和大凉山地块内的壳内异常低阻层切穿了鲜水河—安宁河断裂带,相互贯通。由于地壳内低阻层的拆离作用,使大凉山地块上地壳的高阻层向东逆冲,而低阻层本身受到四川地块的阻挡,厚度变大,并向东向下倾覆。同时,感应矢量显示地壳内的低阻层也向剖面南侧运动和聚集。此外,另一条南北向剖面(图 4 中的剖面 4,南起拉萨地块体的下察隅,穿过羌塘地块,北端终于松潘甘孜地块的清水河)也发现中下地壳内普遍存在高导层,推测是部分熔融和流体^[48]。

结合分析上述剖面区的地形、岩石学和地热等资料说明,地壳内的异常低阻层可能是含有少量流体的部分熔融体,具有较低的黏滞度,易于流动和变形,属于较典型的“管流层”^[38]。

总之,由于印度板块向北的碰撞作用,使青藏高原各地块出现向北、向东的运动,包括地壳内低阻层(管流层)在内的地壳被向东挤出,作用于青藏高原东边缘带即南北地震带中南段,从而构成了汶川地震发生的第二个“层次”的成因。

图 4 给出羌塘地块和松潘甘孜地块地壳内管流层运动方向示意图,其中两个地块之间的边界断裂带(玉树—鲜水河断裂带)起到分割作用,北侧的运动方向与龙门山断裂带近似垂直,从正面作用于四川地块西北边界,形成“丁”字形结构,在发生破裂之前非常稳定,地壳位移和变形很小(<1 mm/a),地震应力易于积累并高度集中,当应力超过岩石破坏强度时,发生汶川地震。

而在玉树—鲜水河断裂带南侧,羌塘地块的壳内管流层顺着地块走向朝东南方向运动,以斜交形式作用并切穿安宁河断裂带,然后顺着大凉山地块走向(近南北向)向南流动,地壳变形明显,GPS 测量的位移矢量达 6~10 mm/a,历史记录的中强地震比龙山断裂带频繁得多。该地区的易于变形和流

动也加剧了在龙门山地区的应力积累,促进了汶川大地震的发生。

4 松潘甘孜地块对四川地块的推挤

汶川地震发生在松潘甘孜地块和四川地块之间的龙门山断裂带中段,对于龙门山断裂带和震源区的深部结构研究,自然受到关注。汶川地震前,我们在龙门山断裂带北端附近进行了大地电磁探测研究,尽管剖面没有穿过极震区,也没有与龙门山断裂带走向正交,但该剖面的电性结构仍然能够给我们一些启示。

大地电磁剖面位置见图 5 和图 4 中剖面 5,剖面沿北北东向展布,南起四川地块的广元,向北穿过西秦岭,终于鄂尔多斯地块西南隅的灵台。沿剖面电性结构可以分成 4 段,自南向北分别为四川地块(SCb)、松潘甘孜地块的东北隅(SGb)、西秦岭造山带(WQ)和鄂尔多斯地块(EDb),分别被龙门山断裂(F5)、玛沁—襄樊—广济断裂(F4-F1)和栾川—确山断裂(F3)分割。著名的商旦断裂(F2)在深部与栾川—确山断裂交汇,在鄂尔多斯地块内发育有次一级的岐山—马召断裂(Fqm)。

四川地块(SCb)电阻率相对较低,在靠近剖面的南端,表层受沉积盖层影响显示有局部低阻体,靠近龙门山断裂带的上地壳为厚 10 km 多的高阻层。松潘甘孜地块的东北隅(SGb)电阻率相对较大,厚度也大,但在约 20 km 深度附近发育有相对低阻层,有把上地壳的高阻与下地壳上地幔顶部的高阻层分割的趋势。西秦岭造山带(WQ)内部结构复杂,横向大体分成三个亚段,其中南、北两个亚段地壳范围显示为高阻。中亚段为低阻,中地壳存在厚近 20 km 的低阻体,并显示该低阻体与深部相对低阻带连通,初步推测在四川地块和鄂尔多斯地块相互挤压过程中,该低阻体是由于破碎带或者是深部流体的上升引起的。鄂尔多斯地块的上地壳显示为低阻带,下地壳和上地幔顶部为相对高阻。推测剖面范围的岩石圈厚约 120 km。对剖面的细结构将另文分析。

与龙门山断裂带所对应的是本剖面规模最大的电性边界,延伸深度达上百公里,总体上较陡直,属岩石圈断裂。同时显示浅部向南倾、深部向北倾、中部(下地壳和地幔顶部)向四川地块凸出的趋势。由于剖面方向和龙门山断裂带之间交角较小,难以准确确定松潘甘孜地块与四川地块之间是否存在逆冲

构造形态。但是,中部相对高阻体向四川地块的凸出使松潘甘孜地块像钉子一样“钉”在了四川地块边界,支持龙门山断裂带附近 GPS 测量的水平位移矢量很小,而在龙门山断裂带两端以外地区位移矢量较大的现象。该断层的近直立现象还可能说明,两个地块之间的推挤和龙门山断裂带的走滑性质,以及汶川地震发震断层可能以走滑为主的特点⁴⁾。

5 讨论和结论

(1) 基于电磁探测结果,结合地震学等其他资料的分析表明:

①太平洋板块向亚洲大陆的俯冲运动,在地幔过渡带深度偏离原俯冲方向,形成近水平的“舌”状的停滞板片,并较普遍地存在于中国大陆东部,停滞板片前缘大体与南北地震带对应。地幔结构的这种形态,影响到南北地震带和中国大陆东部的地震活动性。

②印度板块对青藏高原的碰撞,使组成高原的各地块发生向北和向东的运动,而各地块向东的运动又作用于青藏高原东边缘带(即南北地震带中南段),影响到南北地震带中南段的地震活动性和汶川地震的发生。

③松潘甘孜地块向东偏南的运动方向,与松潘甘孜地块和四川地块之间的边界即龙门山断裂带走向形成近垂直的“丁”字形结构,龙门山断裂带为近陡直的延伸深度较大的电性边界。四川地块对松潘甘孜地块的有力阻挡,加剧了汶川地震前的应力积累,但位移和变形较弱。

(2) 三个“层次”(或三个方面)的成因通过不同的介质影响到汶川地震区的地震活动,但它们之间也是有关联的。太平洋板块俯冲作用主要是通过南北地震带和俯冲带之间广大区域的至少深至地幔过渡带的整个上地幔,影响南北地震带和中国东部的地震活动,属于第一“层次”,它影响的区域范围和深度范围最大。印度板块碰撞作用主要是通过青藏高原及其内部各微板块的岩石圈或也包括更深部的介质的向东运动分量,影响青藏高原东边缘带(即南北地震带的南半部)的地震活动,属于第二“层次”,对汶川地震的影响更直接些。松潘甘孜地块的推挤作用主要是它的地壳或也包括岩石圈,与相对稳定的

4) 张培震, 个人交流, 2009

四川地块之间发生正面挤压,使在它们之间的边界带—龙门山断裂带在经历了相对长时间的地震平静期的应力积累,而当应力超过岩石破裂强度后则发生特大地震,这是汶川地震最直接的原因。

(3) 汶川地震发生深度为 14 km 或 19 km^[3],与它周围几条剖面电性结构的壳内低阻层顶面深度大体相当^[41,45~47],说明较软弱的低阻层可能缓解应力的积累,但低阻层和上层较坚硬的高阻层之间的转换带(脆韧转换带)可能是发生地震的危险部位。通过地震横波分裂研究表明,汶川地震的主震使龙门山断裂带南部的应力得以释放,而向其东北段集中^[49]。龙门山断裂带东北端附近的 MT 剖面(图 4 的剖面 5)的电性结构(图 5)显示,松潘甘孜地块的中部深度(下地壳和地幔顶部)的高阻体向四川地块的凸出,有可能增加这里地震的危险性。

(4) 以汶川地震为例,从不同“层次”或不同方面分析它发生的机制,有利于从本质上认识汶川地震的诱因,有利于预测更大区域(例如可包括南北地震带、华北地区和沿海等)未来地震活动的可能趋势,并有可能避免从统计学角度仅以地震“空区”或“平静区”推测地震活动趋势的不足。

(5) 汶川特大地震的发生过程是复杂的,需要有更多的资料进行更全面的综合分析,本文的研究仅是初步的。

致谢 对于审稿人以及王家映教授和黄清华教授对初稿提出的有益建议表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 陈运泰,许力生,张勇等. 2008 年 5 月 12 汶川特大地震震源特性分析报告. <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>. 2008
Chen Y T, Xu L S, Zhang Y, et al. Report on the great Wenchuan earthquake source of May 12, 2008 (in Chinese). <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>, 2008
- [2] 冉勇康,陈立春,陈桂华等. 汶川 $M_s 8.0$ 地震发震断裂大地震原地重复现象初析. 地震地质, 2008, 30(3): 630~643
Ran Y K, Chen L C, Chen G H, et al. Primary analysis of in situ recurrence of large earthquake along seismogenic fault of the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, 30(3): 630~643
- [3] 徐锡伟,闻学泽,叶建青等. 汶川 $M_s 8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 2008, 30(3): 597~629
Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, 30(3): 597~629
- [4] 张培震. 中国地震灾害与防震减灾. 地震地质, 2008, 30(3): 577~583
Zhang P Z. Earthquake disaster and its reduction in China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, 30(3): 577~583
- [5] Huang Q H. Seismicity changes prior to the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake in Sichuan, China. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35, L23308, doi:10.1029/2008GL036270
- [6] Huang Q. Geophysical measurements associated with the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake in Sichuan, China, *Eos Trans. AGU*, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract, 2008, S52A-02 (INVITED)
- [7] Qian F, Zgao B, Zhao G, et al. Geo-electric observations before 2008 Sichuan Earthquake. Extended Abstract 19th EM Workshop Beijing, China, October 23~29, 2008, S3_E01, http://10.3.14.147/Abstracts_Vol_1.pdf
- [8] Gao S, Tang J, Du X, et al. The change characteristics of electromagnetic field from before to after Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake. Extended Abstract 19th EM Workshop Beijing, China, October 23~29, 2008, S3_E02, http://10.3.14.147/Abstracts_Vol_1.pdf
- [9] 张永仙,王慧敏,王林瑛等. 华北、东北片区 2009 年度地震趋势预测研究. 见:中国地震台网中心,中国地震趋势预测研究. 北京:地震出版社,2008. 326~366
Zhang Y X, Wang H M, Wang L Y, et al. Investigation of earthquake development tendency of North China and Northeast China for 2009. In: China Network Center of Earthquake Stations, Investigation of Earthquake Development Tendency of China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2008. 326~366
- [10] 刘杰,周龙泉,付虹等. 2009 年度西南构造片区地震趋势研究. 见:中国地震台网中心,中国地震趋势预测研究. 北京:地震出版社,2008. 421~453
Liu J, Zhou L Q, Fu H, et al. Investigation of earthquake development tendency of South West China for 2009. In: China Network Center of Earthquake Stations, Investigation of Earthquake Development Tendency of China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2008. 421~453
- [11] 邓起东. 关于四川汶川 8.0 级地震的思考. 地震地质, 2008, 30(4): 811~827
Deng Q D. Some thoughts on the $M_s 8.0$ Wenchuan Sichuan earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, 30(4): 811~827
- [12] 中国地震台网中心. 中国地震趋势预测研究. 北京:地震出版社,2008
China Network Center of Earthquake Stations. Investigation of Earthquake Development Tendency of China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2008
- [13] Zhao G. Three conditions in generating strong Wenchuan earthquake $M_s 8.0$ inferred from MT data. Short Abstract 19th Workshop Beijing, China, October 23~29, 2008, S3_S08, http://10.3.14.147/Abstracts_Vol_1.pdf
- [14] 汪一鹏. 青藏高原活动构造基本特征. 见:马宗晋等编. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学. 北京:地震出版社,2001. 251~262
Wang Y P. Principal features of the active tectonics in

- Qinghai-Tibet plateau. In: Ma Z J, et al, ed. Study on the Recent Deformation and Dynamics of the Lithosphere of Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). Beijing: Seismology Press, 2001. 251~262
- [15] 闻学泽, 易桂喜. 川滇地区地震活动统计单元的新划分. 地震研究, 2003, 26(增刊): 1~9
- Wen X Z, Yi G X. Re-zoning of statistic units of seismicity in Sichuan-Yunnan region. *J Seismological Research* (in Chinese), 2003, 26(Suppl.): 1~9
- [16] 马杏垣. 中国岩石圈动力学图集. 北京: 中国地图出版社, 1989
- Ma X Y. Lithospheric Dynamics Atlas of China (in Chinese). Beijing: China Cartographic Publishing House, 1989
- [17] van der Hilst R D, Engdahl R, Sparkman W, Nolet G. Tomographic imaging of subducted lithosphere below northwest Pacific island arc. *Nature*, 1991, 353: 37~43
- [18] Fukao Y, Obayashi M, Inoue H, Nenbai M. Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 4809~4822
- [19] Tajima F, Katayama I, Nakagawa T. Variable seismic structure near the 660 km discontinuity associated with stagnant slabs and geochemical implications. *Phys. Earth Planet. In.*, 2008, doi:10.1016/j.pepi.2008.09.013
- [20] Yamada A, Zhao D. Mapping the 660 km discontinuity under Japan island using mantle reflected waves. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 47~56
- [21] Ichiki M, Baba K, Obayashi M, Utada Hisashi. Water content and geotherm in the upper mantle above the stagnant slab; Interpretation of electrical conductivity and seismic P-wave velocity models. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 155: 1~15
- [22] Frost D J. The upper mantle and transition zone. *Elements, Mineralogical Society of America*, 2008, 4(3): 171~176, DOI: 10.2113/GSELEMENTS.4.3.171
- [23] Tonegawa T, Hirahara K, Shibutani T, et al. Water flow to the mantle transition zone inferred from a receiver function image of the Pacific slab. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 274: 346~354
- [24] Bass J D, Parise J B. Deep earth and recent developments in mineral physics. *Elements*, 2008, 4: 157~163
- [25] Uyeshima M. Application of Network-MT method to the study of electrical conductivity structure in the central and eastern part of Hokkaido [D Sc thesis]. Tokyo: Univ. Tokyo, 1990
- [26] 赵国泽, 汤吉, 梁竞阁等. 用大地电磁网法在长春等地探测上地幔电导率结构. 地震地质, 2001, 23(2): 143~152
- Zhao G Z, Tang J, Liang J G, et al. Measurement of Network-MT in two areas of NE China for study of upper mantle conductivity structure of the back-arc region. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2001, 23(2): 143~152
- [27] 陈小斌, 赵国泽, 汤吉等. 网式大地电磁阻抗张量及其影响因素分析. 地球物理学报, 2008, 51(1): 273~279
- Chen X B, Zhao G Z, Tang J, et al. Impedance tensor of Network-MT and the influencing factors. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2008, 51(1): 273~279
- [28] Schults A, Larsen J C. On the electrical conductivity of the mid-mantle: Calculation of equivalent scalar magnetotelluric response functions. *Geophys J Roy astr Soc*, 1987, 88: 733~761
- [29] Tajima F. Seismological Study of the Upper Mantle Transition Zone Using Broadband Waveform Modeling. The Berkeley Seismological Laboratory, 202 McCone Hall, UC Berkeley, Berkeley CA 94720, 1999
- [30] Jarvis G T, Lowman J P. Sinking slabs below fossil subduction zones. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2005, 152: 103~115
- [31] Garnero E J, Kennett B, Loper D E. Studies of the Earth's deep interior-eighth symposium. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2005, 153: 1~2
- [32] van der Hilst R D. Changing views on Earth's deep mantle. *Science*, 2004, 306: 817~818
- [33] Huang J, Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J Geophys Res.*, 2006, 111, B09305, doi:10.1029/2005JB004066
- [34] 朱介寿. 欧亚大陆及边缘海岩石圈的结构特性. 地学前缘, 2007, 14(3): 1~20
- Zhu J S. The structural characteristics of lithosphere in the continent of Eurasia and its marginal seas. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2007, 14(3): 1~20
- [35] 蔡学林, 严忠琼, 朱介寿等. 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. 中国地质, 2002, 29(3): 235~245
- Cai X L, Yan Z Q, Zhu J S, et al. Structure and dynamics of lithosphere and asthenosphere in the gigantic East Asian-West Pacific rift system. *Geology in China* (in Chinese), 2002, 29(3): 235~245
- [36] 易桂喜, 姚华健, 朱介寿等. 中国大陆及邻区 Rayleigh 面波相速度分布特征. 地球物理学报, 2008, 51(2): 402~411
- Yi G X, Yao H J, Zhu J S, et al. Rayleigh-wave phase velocity distribution in China continent and its adjacent region. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2008, 51(2): 402~411
- [37] 刘光鼎. 中国大陆构造格架的动力学演化. 地学前缘, 2007, 14(3): 39~46
- Liu G D. Geodynamical evolution and tectonic framework of China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2007, 14(3): 39~46
- [38] 徐锡伟, 于贵华, 马文涛等. 中国大陆中轴构造带地壳最新构造变动样式及其动力学内涵. 地学前缘, 2003, 10(增刊): 160~167
- Xu X W, Yu G H, Ma W T, et al. Model of latest crustal motion of the central tectonic zone on the mainland of China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2003, 10(Suppl.): 160~167
- [39] 马宗晋等. 青藏高原三维变形运动随时间的变化. 见: 马宗晋, 王一鹏, 张燕平主编. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学. 北

- 京:地震出版社,2001. 88~105
- Ma Z J, et al. Variation of 3-D deformation of Qinghai-Tibet plateau. In: Ma Z J, et al, eds. Study on the Recent Deformation and Dynamics of the Lithosphere of Qinghai-Tibet Plateau(in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2001. 88~105
- [40] Wang C Y, Han W B, Wu J P, et al. Crustal structure beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications. *J Geophys Res*, 2007, **112** (B7), B07307, doi:10.1029/2005JB003873
- [41] 赵国泽, 汤吉, 詹艳等. 青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系的研究. 中国科学(D), 2004, **34**(10): 908~918
- Zhao G Z, Tang J, Zhan Y, et al. Relation between electricity structure of the crust and deformation of crustal blocks on the northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau. *Science in China* (D), 2005, **48**(10):1613~1626
- [42] 赵国泽, 陈小斌, 王立凤等. 青藏高原东边缘地壳“管流”层的电磁探测证据. 科学通报, 2008, **53**(3):345~350
- Zhao G Z, Chen X B, Wang L F, et al. Evidence of crustal ‘channel flow’ in eastern margin of Tibet plateau from MT measurements. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **52**(12):1887~1893
- [43] 张培震, 王琪. 中国大陆现今地壳运动和构造变形. 见:马宗晋, 王一鹏, 张燕平, 主编. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学. 北京:地震出版社, 2001, 21~35
- Zhang P Z, Wang Q. Contemporary crustal movement and tectonic deformation of China continent. In: Ma Zongjin, et al, eds. Study on the Recent Deformation and Dynamics of the Lithosphere of Qinghai - Tibet Plateau (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2001. 11~35
- [44] Li S, Unsworth M, Booker J R, et al. Partial melt or aqueous fluid in the mid-crust of Southern Tibet? Constraints from INDEPTH magnetotelluric data. *Geophys J. Int.*, 2003, **153**:289~304
- [45] Wei W, Unsworth M J, Jones A G, et al. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. *Science*, 2001, **292**:716~718
- [46] Unsworth M, Wei W, Jones A G, et al. Crustal and upper mantle structure of northern Tibet imaged with magnetotelluric data. *J Geophys Res*, 2004, **109**, B02403, doi:10.1029/2002JB002305
- [47] 孙洁, 晋光文, 白登海等. 青藏高原东缘地壳、上地幔电性结构探测及其构造意义. 中国科学(D): 地球科学, 2003, **33** (增刊): 173~180
- Sun J, Jin G W, Bai D H, et al. Sounding of electrical structure of the crust and upper mantle along the eastern border of Qinghai-Tibet Plateau and its tectonic significance. *Science in China* (D) (in Chinese), 2003, **33**(Suppl.):173~180
- [48] 马晓冰, 孔祥儒, 刘宏兵等. 青藏高原东北部地区地壳电性结构特征. 地球物理学报, 2005, **48**(3):689~697
- Ma X B, Kong X R, Liu H B, et al. The electrical structure of northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese). 2005, **48**(3):689~697
- [49] 丁志峰, 武岩, 王辉等. 2008年汶川地震震源区横波分裂的变化特征. 中国科学(D), 2008, **38**(12):1600~1604
- Ding Z F, Wu Y, Wang H, et al. Characteristic shear-wave splitting in foci of Wenchuan earthquake, 2008. *Science in China* (D) (in Chinese), 2008, **38**(12):1600~1604

(本文编辑 汪海英)