胡小刚,郝晓光.汶川大地震宽带地震仪短临异常及成因初探.地球物理学报,2008,51(6):1726~1734

Hu X G, Hao X G. The short-term anomalies detected by broadband seismographs before the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2008, 51(6):1726 ~ 1734

# 汶川大地震宽带地震仪短临异常及成因初探

#### 胡小刚,郝晓光\*

中国科学院测量与地球物理研究所,动力大地测量重点实验室,武汉 430077

**摘 要** 2008 年 5 月 12 日 8.1 级汶川大地震发生后,我们对国家测震台网的 40 台宽频带地震仪在 5 月 7 日~5 月 13 日的观测数据进行了分析.结果表明,汶川大地震前有明显的短临异常: 各台站在大地震发生前 1~3 天内不 同程度检测到了低频异常颤动,颤动振幅逐渐增大,一直持续到大地震发生,信号周期范围为 2~10 s. 重力仪和倾 斜仪也观测到了这类颤动信号. 汶川大地震前的异常颤动信号几乎遍布中国大陆,但在西部较弱,东南部较强,尤 其在华南地块靠近菲律宾板块的边界处颤动信号很强. 因此我们的初步推测是:异常颤动产生的可能原因是地震 爆发前华南地块可能开始了慢滑移,滑移时的摩擦产生低频颤动.

关键词 汶川大地震,异常颤动,宽带地震仪,重力仪,倾斜仪

文章编号 0001-5733 (2008) 06 1726 09 中图分类号 P315 收稿日期 2008-07-31 ,2008-10-07 收修定稿

## The short-term anomalies detected by broadband seismographs before the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China

HU Xiao-Gang, HAO Xiao-Guang

Key Laboratory of Dynamical Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract We investigated broadband seismographic waveform data in  $7 \sim 13$  May 2008 from 40 seismic stations of the National Digital Seismograph Network of China (NDSN) after the 12 May 2008 Wenchuan earthquake, showing that obvious precursor was widely detected throughout China. The premonitory phenomena is that tremor amplitudes in the period band of  $2 \sim 10$  s have increased steadily within  $1 \sim 3$  days before the main shock rupture. Anomaly tremors can also be detected by gravimeters and tiltmeters. Tremor signals are widely detected in mainland China, but they are very strong in Southeastern China and weak in Western China. The possible slow slip of South China block before the great Wenchuan earthquake may be the cause of tremors, which is related to some frictional processes of the slow slip.

Keywords The great Wenchuan of 12 May 2008, Anomaly tremors, Broadband seismographs, Gravimeter, Tiltmeter

1 引 言

#### 早在 1997 年,中国科学院测量与地球物理研究

所研究员郝晓光在南极进行科学考察时就注意到: 某些地震发生前两天左右,Lacoste ET 重力仪往往 会观测到一些异常扰动信号<sup>[1,2]</sup>.2008 年 5 月 12 日 里氏 8.0 级汶川大地震发生后,我们首先对"武汉大

基金项目 国家自然科学基金(40774011,40874014,40874036)和质检公益性行业科研专项基金"数字化地震前兆地壳形变观测方法标准研 究"(10-215)资助.

作者简介 胡小刚,男,副研究员,主要研究方向为地学信号处理与分析.

<sup>\*</sup> 通讯作者 郝晓光,研究员. E-mail:hxg@whigg.ac.cn

地测量国家野外科学观测研究站 '的 Lacoste ET 重 力仪(距离震中约 1050 km)的观测资料进行了分 析,结果表明地震发生两天前重力仪开始记录到明 显的异常扰动,其周期范围为 4~8 s<sup>[3]</sup>.为证实重力 仪观测到的异常扰动信号不是由于仪器本身的故障 和周边环境的影响,我们又收集和处理了全国数十 个台站的宽带地震仪资料,令人惊讶的是:这些台站 的宽带地震仪都在汶川大地震发生前记录到了类似 的异常扰动信号<sup>[4]</sup>.为进一步研究这一异常扰动现 象,我们对国家测震台网的 40 台宽频带地震仪在 5 月 7~13 日的观测数据进行了分析.分析结果表明 这些仪器在汶川大地震前 1~3 天内也都不同程度 地记录到了类似的异常扰动.本文对汶川大地震前 宽带地震仪观测到的异常扰动现象进行介绍,并对 引起这些现象的原因进行初步的探讨.

#### 2 汶川大地震前观测到的短临异常现象

2008 年 5 月 12 日 14:28 时,里氏 8.0 级强烈 地震似乎毫无前兆地袭击了四川省汶川县.然而,仔 细分析 5 月 7~13 日国家测震台网武汉台三分量宽 带数字地震仪的连续观测波形数据(图 1A),我们发 现地震仪检测到一种低频异常扰动现象 ——振幅持 续增大的颤动信号.具体表现为:地震发生前约三天 内,地震仪三个分量的观测波形曲线都逐渐变粗,一 直延续到地震发生(图 1B).我们了解到在这段时 间,武汉台宽带地震仪工作正常,记录数据质量良 好,当地气候风和日丽.而且武汉大地测量国家野外 科学观测研究站的 Lacoste ET 重力仪 (距离武汉台 约5 km) 也记录到了类似的异常扰动信号. 因此可 确定颤动信号的产生不是由于仪器本身的故障和周 边气候环境的影响.对地震仪原始波形数据进行时 频分析,发现颤动的信号周期范围为2~10 s.主要 集中在 4~8 s 周期范围内. 图 1C 表明在 4~8 s 周 期范围内,异常颤动显得更加清晰,颤动信号的振幅 从5月9日开始由小逐渐增大,一直延续到5月12 日大地震发生.颤动信号的外包络线呈现明显的喇 叭形状.

我们进一步处理了国家测震台网 48 个国家数 字地震台站宽带地震仪的观测数据. 国家测震台网 是一个覆盖中国大陆的地震监测台网,台站布局采 用均匀分布的原则,台站间距在 500 km 左右. 其中 40 个台站在地震发生前后有连续可靠的观测数据. 图 2 显示了 40 个台站的地理位置,表 1 给出了这些



图 1 武汉地震台的宽频带地震仪在 2008 年 5 月 6~13 日的连续观测记录 (A) 观测地震前的波形,发现曲线明显变粗.(B)将观测数据滤波 到 4~8 s 的频段,突出显示震前异常颤动信号.(C) 5 月 9~11 日 观测数据的傅里叶变换,表明震前异常颤动 信号主要集中在 4~8 s 的周期范围内.

Fig. 1 Seismic records of three-component broadband seismograph within 6 ~ 13 May 2008 from station WHN
(A) Close view of the waveform showing that recording curve became obviously thick before the main rupture.
(B) Record filtered on 4 to 8 s to highlight the tremors before the Wenchuan earthquake.
(C) FFT for observations in 9 ~ 11 May 2008 showing that tremors are enriched in the period band of 4 ~ 8 s.

台站的基本信息.40个台站中有30个台站分别采 用了国产超宽频带地震仪JCZ-1或甚宽频带地震仪 CTS-1,其观测数据采样频率为50Hz.其余10个台 站分别采用了瑞士产甚宽频带地震仪STS-1和宽 频带地震仪 STS-2,其观测数据采样频率为 40 Hz. 我们的分析结果表明,在汶川大地震前 24~75 小时 内,40 个台站的宽带地震仪都不同程度地记录到了 异常颤动信号,异常颤动的信号周期范围为 2~10 s, 且主要集中在 4~8 s 周期范围内.图 3 和图 4 显示 了 40 个地震台记录到的震前颤动信号.由于颤动活 动具有渐变起始的特征,很难使用标准地震定位程 序对其定位.除了重力仪、地震仪记录到了颤动信 号,我们发现倾斜仪也可清晰地记录到相同的颤动 信号.图 5 显示重力仪和倾斜仪的观测结果.以上观 测结果表明在汶川大地震主断裂发生前,宽带地震 仪、重力仪和倾斜仪都检测到了相同的低频扰动信 号.由于中国大陆目前运行的数字应变仪均采用分 钟采样,我们无法在应变仪观测资料中发现此类扰 动信号,这确实是一个遗憾.

我们的观测发现,虽然汶川大地震震前扰动信 号分布范围较广,但未表现出台站距离震中越近,颤 动信号越强的特征.例如,一些距离震中较远的东南 部台站(>1500 km),如温州、泉州和上海佘山,检 测到了很强的颤动信号,而且颤动开始时间也较早. 而某些距离震中较近的西部台站(<600 km),如昌 都、兰州,检测到的颤动却很弱且开始时间也较晚. 分析观测结果还表明震前扰动信号与台站相对震中 的方位角有较大的关系.震中东南部台站检测到的 颤动信号较强,而西部检测到的颤动信号却较弱.

为定量研究颤动信号强弱与台站方位角的关 系,我们将周期范围为4~8s的颤动信号在5月11 日的平均振幅与其在5月8日的平均振幅的比值定 义为颤动信号的强度.在计算颤动信号强度时,若在 这两天内的某一时段地震仪记录到了某些小地震信 号,则将该时段的振幅设置为零.表1中给出了40 个台站在汶川大地震前记录到的颤动信号的强度. 为了直观反映颤动信号强度与台站方位角的关系, 我们根据地震台相对于震中的方位角以及观测到的 颤动信号强度,绘制了颤动信号强度分布罗盘图.图 3显示震前颤动在龙门山断裂带以东很强,而在断 裂带以西却很弱.在震中的东南部,也即华南地块, 宽带地震仪记录到的颤动信号最强,信号强度均大 于 5. 在震中的东北部和南西部 ,宽带地震仪记录到 的震前颤动信号较强,信号强度范围在2~5之间. 而在震中的西部区域,震前颤动信号最弱,信号强度 均小于 2. 汶川大地震震前的颤动出现的范围虽然 很广,但是显著的颤动大多出现在距离震中较远的 中国大陆东南部,即华南地块区上.位于华南地块靠 近菲律宾板块的边缘处的台站记录到的颤动信号 最强.

表 1 40 个台站的基本信息和扰动信号强度

 Table 1
 Basic information and observed

tremor intensity of 40 seismic stations

台站名称	代码	仪器	震中距(km)	扰动强度
温州	WZH	CTS-1	1707.69	10.01
佘山	SSE	STS-2	1696.62	8.72
泉州	QZH	CTS-1	1637.88	8.44
深圳	SZN	CTS-1	1434.94	7.42
长沙〇	CNS	CTS-1	976.19	7.26
南昌	NNC	CTS-1	1223.61	7.26
南京	NJ2	CTS-1	1472.18	6.94
广州	GZH	JCZ-1	1320.98	6.83
合肥	HEF	CTS-1	1312.89	6.39
武汉	WHN	JCZ-1	1050.78	6.18
琼中	QZN	STS-2	1480.54	5.53
恩施	ENS	STS-2	591.51	4.81
贵阳	GYA	CTS-1	597.56	4.55
洛阳	L YN	CTS-1	938.82	4.02
红山	HNS	CTS-1	1263.65	3.85
成都	CD2	JCZ-1	38.88	3.76
沈阳	SN Y	JCZ-1	2165.49	3.56
西安	XAN	STS-2	622.05	3.43
长春	CN2	CTS-1	2403.49	3.07
北京	BJ T	STS-1	1531.14	2.82
昆明	KMI	STS-2	651.93	2.68
攀枝花	PZH	CTS-1	522.69	2.46
宾县	BNX	CTS-1	2644.02	2.38
银川	YCH	CTS-1	879.48	2.32
呼和浩特	HHC	JCZ-1	1320.91	2.28
牡丹江	MDJ	STS-2	2739.17	2.28
海拉尔	HL R	STS-1	2452.49	2.23
锡林浩特	XL T	CTS-1	1817.45	2.23
兰州	LZH	CTS-1	568.97	2.03
乌什	WUS	CTS-1	2437.55	1.95
腾冲	TNC	CTS-1	814.94	1.81
拉萨	L SA	STS-2	1179.79	1.72
高台	GTA	JCZ-1	990.44	1.69
黑河	HEH	JCZ-1	2925.38	1.66
乌鲁木齐	WMQ	STS-2	1980.03	1.64
安西	AXX	CTS-1	1258.94	1.55
昌都	CAD	CTS-1	558.51	1.54
格尔木	GOM	JCZ-1	990.74	1.48
那曲	NAQ	CTS-1	1060.85	1.45
花土沟	HTG	CTS-1	1383.59	1.41



Fig. 2 Map showing locations of 40 seismic stations of National Digital Seismograph Network of China

# 3 对汶川大地震前短临异常现象的初 步分析

究竟是什么因素导致汶川大地震前地震仪在数 千公里尺度范围几乎同时检测到了低频异常颤动? 这种异常与汶川大地震究竟有什么联系?这些问题 值得思考和研究.

从板块运动的角度分析,汶川大地震是印度板 块推挤欧亚板块的结果.印度板块由南西向北东方 向以大约40mm/a的速度俯冲挤压欧亚板块<sup>[5,6]</sup>, 不仅造成青藏高原的隆升,同时也挤压部分青藏高 原地壳物质以大约20mm/a的速度向东运动<sup>[5,6]</sup>. 东流的物质受到扬子地块的刚性阻挡,在扬子地块 边缘—四川西部产生了造山运动,形成了南起四川 泸定、北达陕西勉县、长近500km、宽约40~50km、 北东走向的龙门山脉,并使地质构造坚固的扬子地 块岩层发生褶皱,形成了四川盆地<sup>[7,8]</sup>.在地质构造 相对薄弱的龙门山脉形成了北东-南西走向的构造 带——龙门山逆冲推覆断裂带.汶川大地震的最根 本动力来源是青藏高原和华南地块之间的相对运动 在断裂带上产生的能量积累和释放<sup>[9]</sup>.

近年来许多研究<sup>[10~13]</sup>表明,在一些俯冲构造带,如北美的卡斯卡迪亚古陆俯冲带、菲律宾俯冲

带、南海(Nankai)俯冲带,沿板块边界经常可观测到 一些微弱的低频颤动现象,其周期范围大约 0.2~ 1 s,与活火山附近观察到长周期地震和颤动的周期 范围大致相同.因此这些颤动往往称为非火山成因 颤动(Non-volcanic tremor,NVT)<sup>[9,10]</sup>.NVT 常常 与板块的缓慢滑动同时出现,因而 NVT 产生的原 因之一可能与滑动时的摩擦过程有关<sup>[13~15]</sup>.这类伴 随颤动出现的慢滑移现象受到了地震学家的广泛关 注,因为位于板块界面的滑动事件增加了倾斜板块 闭锁处的应力,一个滑动事件很可能触发俯冲带上 的逆冲型大地震<sup>[11~16]</sup>.

汶川地震是典型的大陆板内地震.板内地震, 究其根本原因,也和板间地震一样是由板块间的相 对运动造成的.板内地震和板内变形及某些地带的 稳定滑动(慢滑移)有着来自板块边界驱动的共同的 构造运动原因<sup>[17]</sup>.由于汶川大地震是由于青藏高原 和华南地块之间的相对运动造成的,而显著的震前 颤动信号也出现在华南地块上.因此我们推测,汶川 大地震前在跨度为数千公里范围几乎同时记录到颤 动信号的可能原因是:地震爆发前3天华南地块可 能开始了慢滑移,滑移时的摩擦引发低频颤动,使得 华南地块上的宽带地震仪检测到了明显的颤动信 号.在华南地块靠近菲律宾板块的边缘处,由于摩擦 强度较大,因而产生的颤动较强.因此温州、泉州和

2





2









Fig. 5 Anomalies before the great Sichuan earthquake detected by (A) a Lacoste ET gravimeter (Wuhan, China) and (B), (C) by a nearby vertical-pendulum tiltmeter (Huangmei, China), which is about 1100 km east of the epicenter. Sampling frequency for both gravimeter and tiltmeter is 1 Hz.

51 卷



1732

#### 图 6 反映台站震前颤动信号强度分布的罗盘图.在图中, 原点是震中,虚线表明龙门山断裂带的方向,向量由各 台站相对于震中的方位角和观测到的颤动信号强度计算 得到.图中显示震前颤动信号在龙门山断裂带以西很弱, 而在断裂带以东——华南地块上却很强.各台站震前 颤动信号强度值可参见表 1.

Fig. 6 The compass graph in which origin is the epicenter, and the dash line indicates the direction of Longmenshan reverse fault, and vectors are determined by azimuths of 40 stations in mainland China and tremor intensity observed in these stations, showing that premonitory anomalies are weak to the west of Longmenshan fault, but strong to the east ,i.e. the South China block. The tremor intensity at each station is given at Table 1.

上海佘山等位于华南地块边缘的台站检测到了较强 的异常颤动信号.当然也存在另一种可能:汶川大地 震发生前,菲律宾板块俯冲挤压华南地块,也会在华 南地块引起颤动,并在其边缘引起很强的颤动.要证 实这些推测还需要分析研究更多的地震和 GPS 连 续观测数据.

汶川大地震发生前的异常颤动信号在中国大陆 西部地区表现最弱.我们认为这一现象与青藏高原 地壳的低速体(高温、低密度)特性有一定的关系.地 震波层析成像、重力反演的研究结果表明青藏高原 地壳的密度明显低于扬子地块<sup>[18,19]</sup>,地震体波的层 析反演研究还表明青藏高原地壳内部存在部分融熔 现象<sup>[20~23]</sup>,因此震前颤动信号在青藏高原传播会 受到削弱.另外,青藏高原上存在的众多的断裂带 也会阻碍颤动信号的传播.实际上,汶川地震发生 后,中国大陆东南部地区、中国台湾和日本等地都有 明显的震感,但西部地区震感却较弱.这也是由于源 自龙门山的地震波在向西传播时衰减较快的缘故.

回顾 2001 年 11 月 14 日 8.1 级昆仑山大地震:

在地震发生前约3天,新疆境内的5个地震台(距离 震中740~1400 km)的宽带地震仪也检测到了明显 的颤动信号,颤动的产生原因可能与昆仑山断裂带 在大震前发生稳定滑动有关<sup>[24]</sup>.昆仑山地震前的颤 动持续时间约为2天;我们的分析表明颤动信号的 周期范围为4~10 s.昆仑山地震前的颤动信号特征 与汶川大地震前的颤动信号特征非常类似,这似乎 可以相互印证两个大地震爆发前存在类似的扰动 机制.

### 4\_ 结 ] 语

我们介绍了汶川大地震发生前两三天宽带地震 仪普遍观测到的低频颤动现象,并对产生这一异常 现象的成因进行了初步的分析.我们还需广泛收集 和分析更多地震爆发前宽带地震仪、重力仪、倾斜仪 和应变仪的连续观测数据,对汶川大地震发生前异 常颤动现象的内在机理进行进一步的深入研究和定 量分析.下一步尤其需要分析地震爆发前 GPS 连续 观测数据,给出华南地块在地震爆发前是否存在慢 滑移的直接证据,从而分析慢滑移的速率、方向、力 源及边界条件.这将是我们今后的研究方向.

对中国大陆大地震(M. 7.0)统计结果表明, 大震前发生缓慢运动并有异常低频扰动记录的比例 很大,而且多数出现在震前7天之内<sup>[25]</sup>.值得思考 的是:2008 汶川大地震前与 2001 昆仑山大地震前 都检测到了颤动信号,而且信号特点非常相似.因此 震前颤动的观测与研究有可能对了解断层失稳过程 和实现断层大地震短临预报提供线索. 地震预测一 直是公认的世界性难题,人类在多大程度上能够预 测地震,取决于人类对地震发生的原因及物理条件 的认识,依赖于能否记录到可重复出现的震前各种 异常变化,也就是可用于预测地震的前兆信号,因 此,我们还需广泛收集和仔细分析更多地震事件发 生前多种地球物理连续观测数据,研究何种类型的 地震发生前会出现类似于汶川大地震的短临异常, 深入揭示这种类型短临异常的特点及其规律性,这 样才能在探索地震预报的征途上向前迈出坚实的 一步.

**致** 谢 感谢中国地震台网中心提供宽带地震仪观 测数据,武汉大地测量国家野外科学观测研究站提 供重力数据,中国地震局地震研究所胡国庆研究员 提供其新研制的宽频带倾斜仪观测数据.感谢中国 地震台网中心杨辉高工提供了有益的帮助.

#### 参考文献(References)

- [1] 郝晓光. L &R-ET 重力仪在南极中山站记录到"不明地学事件". 极地研究, 1997, 9(3):214~215
  Hao X G. An unidentified geophysical event recorded with L &R-ET gravitymeter at Zhongshan Station Antarctica. Chinese J. of Polar Science (in Chinese), 1997, 9(3): 214~215
- [2] 郝晓光,许厚泽,郝兴华等.重力高频扰动与地震,地壳形变与地震.2001,21(3):9~13
  Hao X G, Xu H Z, Hao X H, et al. High-frequency gravity disturbance before earthquakes. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 2001,21(3):9~13
- [3] 郝晓光,胡小刚,许厚泽等. 汶川大地震前的重力扰动. 大 地测量与地球动力学,2008,28(3):129~131
  Hao X G, Hu XG, Xu H Z, et al. Gravity disturbance before the Wenchuan Ms8.0 earthquake. Journal of Geodesy and Geodynamics (in Chinese), 2008, 28(3):129~131
- [4] 郝晓光,胡小刚.宽带地震仪资料证实汶川大地震"震前重力 扰动".地球物理学进展,2008,23(4):1332~1335
  Hao X G, Hu X G. Disturbance before the Wenchuan earthquake by broadband seismometer. *Progress in Geophysics* (in Chinese),2008,23(4):1332~1335
- [5] Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Position System measurements. Science, 2001,294(5542): 574 ~ 577
- [6] Zhang P Z, Shen Z, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data. *Geology*, 2004, **32**(9): 809~812
- [7] 许志琴,李化启,侯立玮等. 青藏高原东缘龙门山 锦屏造山带的崛起—大型拆离断层和挤出机制. 地质通报, 2007, 26 (10): 1262~1276
  Xu Z Q, Li H Q, Hou L W, et al. Uplift of the Longmer-Jinping orogenic belt along the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Larger scale detachment faulting and extrusion

mechanism. Geological Bulletin of China (in Chinese), 2007, 26(10): 1262 ~ 1276

- [8] Burchfiel B C, Royden L H, van der Hilst R D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. GSA today, 2008, 18(7): 4~11
- [9] 张培震,徐锡伟,闻学泽等.2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因.地球物理学报,2008,51
  (4):1066~1073
  Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of the LongmenShan active fault zone,

and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2008, 51(4): 1066 ~ 1073

 [10] Obara K. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. Science, 2002, 296 (5573): 1679 ~ 1681

- [11] Rogers G, Dragert H. Episodic Tremor and slip on the Cascadia Subduction Zone: The chatter of silent slip. *Science*, 2003, 300 (5627): 1942 ~ 1943
- Schwartz S Y, Rokosky J M. Slow slip events and seismic tremor at circum Pacific subduction zones. *Rev. Geophys.* 2007, 45, R G3004, doi:10.1029/2006R G000208
- [13] Shelly D R, Gregory C B, Satoshi I, et al. Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip. *Nature*, 2006, 442 (7099) : 188 ~ 191
- [14] Ide S, Shelly D R, Beroza G C. Mechanism of deep low frequency earthquakes: Further evidence that deep nonvolcanic tremor is generated by shear slip on the plate interface. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34, L03308, doi:10. 1029/2006 GL028890
- Shelly D R, Gregory C B, Satoshi I. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. *Nature*, 2007, 446 (7133): 305 ~ 307
- [16] Dragert H. Mediating plate convergence. Science, 2007, 315
   (5811):471~472
- [17] 王妙月. 板内地震成因与物理预报. 地球物理学报, 1994, 34(增刊 I):208~213
  Wang M Y. Cause and physical prediction of intraplate earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1994, 34 (Suppl. I): 208~213
- [18] 方 剑,许厚泽.中国及邻区岩石层密度三维结构.地球物 理学进展,1999,14(2):88~93
  Fang J, Xu H Z. Three dimensional distribution of lithospheric density beneath the China and its adjacent region. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 1999, 14(2): 88~93
- [19] 柯小平,王 勇,许厚泽等. 青藏高原地壳三维密度结构的 重力地震联合反演. 地球物理学进展, 2008(出版中)
   Ke X P, Wang Y, Xu H Z, et al. The three-dimensional crustal density structure of Tibetan plateau from joint inversion of gravity and seismic data. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008 (in press)
- [20] Rainer K, James N, Wenjin Z, et al. Evidence from earthquake data for partially molten crustal layer in Southern Tibet. Science, 1996, 274(5293): 1692 ~ 1693
- [21] Kind R, Yuan X, Saul J, et al. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: evidence for Eurasian plate subduction. Science, 2002, 298(5596): 1219 ~ 1221
- [22] 李海鸥,姜 枚,王有学等. 青藏高原地壳的低速层与部分 熔融. 物探与化探,2004,28(4):290~293
  Li H O, Jiang M, Wang Y X, et al. Low-velocity layers and partial melting in Qinghai-Tibet plateau. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 2004, 28(4):290~ 293
- [23] 薛光琦,王有学,宿和平.拉萨地体内低速异常成因的探讨--壳内局部熔融的地震层析证据.地球学报,2005,26
   (5):411~415
   Xue G Q, Wang Y X, Su H P. Interpretation of the low

velocity anomalies in the Lhasa terrain : tomographic evidence for partial melting in the crust. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese) , 2005, 26(5) :  $411 \sim 415$ 

 [24] 杨又陵,赵根模,高国英等. 2001年11月14日昆仑山口西 Ms 8.1 地震前的缓慢地震事件. 国际地震动态, 2003, 9:1~4 Yang YL, Zhao GM, Gao GY, et al. The slow earthquake event occurring before west to Kunlun Mountain Pass earthquake of  $M_s$  8.1 on November 14, 2001. Recent Developments in World Seismology (in Chinese), 2003, 9:1~4

[25] 赵根模,杨港生,陈化然. 寂静的前震与地震预测. 地震, 2001, 21(1): 69 ~ 76
Zhao G M, Yang G S, Chen H R. Quiescent foreshock and earthquake prediction. *Earthquake* (in Chinese), 2001, 21 (1): 69 ~ 76

(本文编辑 何 燕)

