

黄伟传,葛洪魁,杨 微等. 汶川地震断裂带东北端浅部结构的人工地震探测. 地球物理学报, 2009, 52(2): 547~552

Huang W C, Ge H K, Yang W, et al. Survey of the shallow structure on the northeast end of Wenchuan earthquake fault zone by artificial seismic. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(2): 547~552

# 汶川地震断裂带东北端浅部结构的人工地震探测

黄伟传,葛洪魁,杨 微,宋丽莉

中国地震局地球物理研究所,北京 100081

**摘 要** 结合汶川地震断裂带动态监测,利用快速响应探测系统,开展了断层带浅部结构人工地震探测. 针对地震断裂带动态监测条件下的复杂波场和低信噪比的情况,在  $f-k$  波场分离的基础上,分别利用了折射波共中心点成像、面波速度反演、反射波叠加成像方法,进行了浅层断层和构造成像处理,并对处理结果进行了综合解释,给出了断裂带浅部断层分布和速度特征. 为汶川地震龙门山断裂带东北端动态监测提供了基础结构信息,所发展的断裂带快速响应探测技术对于地震应急动态监测具有重要意义.

**关键词** 汶川地震,断裂带,人工地震,波场分离,浅层结构

文章编号 0001-5733(2009)02-0547-06

中图分类号 P315

收稿日期 2008-11-26,2008-12-29 收修定稿

## Survey of the shallow structure on the northeast end of Wenchuan earthquake fault zone by artificial seismic

HUANG Wei-Chuan, GE Hong-Kui, YANG Wei, SONG Li-Li

*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

**Abstract** Fault zone is sensitive to the post-seismic stress state. We can get the fault healing process by monitoring the fault zone seismic velocity temporal variation. In order to get the shallow structure at the northeast end of Wenchuan earthquake fault zone, we carried out a shallow structure survey by artificial seismic sources. The strong shallow reflector and complex structure produced a complicated wave field and low signal to noise ratio data. Based on separated surface, reflection and refraction waves by  $f-k$  transform, we imaged the subsurface structure by refraction common middle point imaging, surface wave velocity inversion, and reflection wave stack imaging. An integrated interpretation was done combing the three imagine data and the shallow faults and velocity distribution were given. This work is helpful to post-seismic emergency monitoring of earthquake fault zone.

**Keywords** Wenchuan earthquake, Fault zone, Artificial seismic, Separation of waves, Reflection wave, Shallow structure

## 1 引 言

汶川地震后,为监测地震断裂带应力变化趋势,在地震主断裂龙门山断裂带的东北端,四川省青川

和陕西宁强交界处,开展了近一个月的地震断裂带动态检测工作.作为这项工作的基础,进行了断裂带浅部结构探测,通过人工震源激发地震波,宽频带地震检波器接收,对地震资料进行成像处理.目标是适应地震震后快速响应需要,形成一套断裂带结构的

快速探测技术和方法,对地震断裂带浅部断层的空间形态和速度结构进行探测.地震断裂带应急探测设备便捷、断裂带结构复杂等特点,造成波场复杂、信噪比低、数据处理和成像难度大,是发展地震断裂带快速探测技术的主要难题.

## 2 数据资料采集

本次试验的位置在汶川地震主断层末梢的正上方,测线方向垂直于断层走向,测线近南北走向.地表非常平坦,为山间平地,测线位置高差不超过 0.5 m,浅层的低降速带厚度比较薄.使用的采集设备是 Summit II 型 24 位数字采集仪,60 Hz 高频检波器,94 道接收,道间距是 2.5 m,测线总长度是 232.5 m.

震源有电落锤和人工石头夯.人工石夯激发,实施长时间检测,多次覆盖数据采集技术,得到现场实时数据.采用固定检波点、移动炮点的观测办法采集数据,零偏移距,炮间距是 2.5 m,最高覆盖次数是 47 次.

## 3 波场特征与波场分离

从现场记录的实际资料分析来看,由于存在浅强反射面,地震波场非常复杂,主要包括浅层反射波、折射波和面波(图 1).各种波互相混叠在一起,互相干扰,给资料处理带来了很大的难度.处理方法是在波场分离的基础上,结合石油勘探和浅层地震勘探的方法,综合利用各种有效信息,分析地层的构造、断层和速度特征.

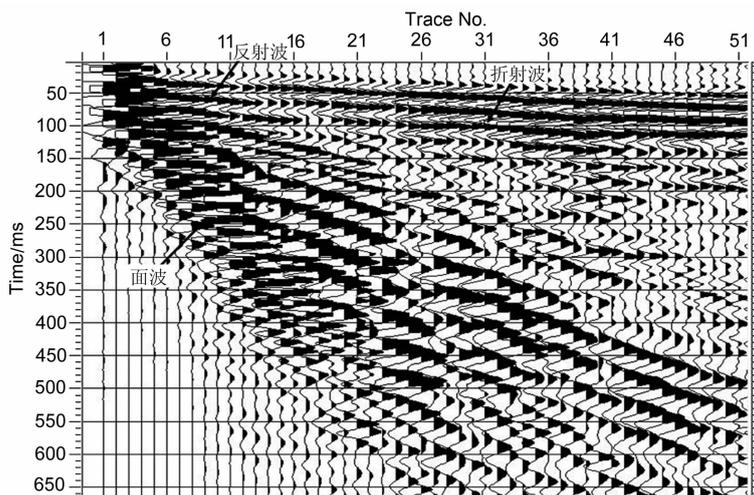


图 1 野外实际记录资料

Fig. 1 The real data recorded outdoor

波场分离方法是根据波在频率、速度和传播方向不同特性,通过计算将不同性质的波分离出来.现在主要的分离方法有: $\tau$ - $p$  变换法、 $f$ - $k$  变换法和 DRT 法等<sup>[1,2]</sup>.由于各种算法考虑波场不同特征进行分离,从本次观测记录的资料分析来看可通过波的传播方向和频率特征上进行分离,通过  $f$ - $k$  变换法来分离不同地震波.图 2 为  $f$ - $k$  分析图.可以看出不同波场存在明显的差别,能量较强的面波和折射波分别在图的下面和中间区域,反射波的能量比较弱,在它们之间的能量较低区域.通过对三个区域(折射波区、反射波区、面波区)中地震资料进行  $f$ - $k$  滤波,可以得到不同地震波的资料<sup>[3]</sup>.在图 2 右下角区域主要是面波,对它的处理可以得到面波数据(图 3a).对于图 2 中间区域,它的频率范围和速度较高,从分析结果看主要是折射波(图 3b).对于反

射波场,由于能量低很容易受到面波和噪声的影响,在处理中,主要通过带通滤波和噪声衰减,并手动剔除偏移距大的道集,提高反射波资料  $f$ - $k$  的信噪比(图 3c).通过  $f$ - $k$  分析和波场分离处理,根据不同波的传播规律和特征不同,可以分别得到面波、折射波、反射波的地震资料.

## 4 不同波资料的处理

### 4.1 折射波成像

折射波是由于波在遇到低速带下面的高速地层时,当入射角大于临界角度时发生全反射,并按高速层速度进行传播,折射波的时距曲线关系为线性,

$$T = \frac{2\sqrt{X_c^2 + H^2}}{V_1} + \frac{X - 2X_c}{V_2}, \quad (1)$$

$H$ 为地层深度, $X$ 为炮点到检波点的距离, $V_1$ 为上地层的速度, $V_2$ 为下地层的速度, $X_c$ 为折射波传播的盲区半径, $T$ 为折射波的走时。

共中心折射面元叠加技术,是根据同一接收点所接收的资料来自同一折射点,通过线性时差校正,消除了偏移距不同的影响<sup>[1,3]</sup>。同一接收点所接收的资料是来自同一折射点,就可以实现共折射面元叠加。如果对某层校正一个时间值,实质上就可以实现共折射面元叠加。这个方法是由前苏联地球物理学家们提出和应用,冯太林等在2001年对折射波地

震记录叠加成像方法也进行了详细的研究<sup>[4,5]</sup>。共中心折射面元叠加技术是以共中心点道集进行动校正,将共中心点道集的多道数据水平叠加,得到高质量的反映地下构造特征的地震剖面,减少人为因素对成像的影响。

共面元叠加的具体处理流程为:(1)  $f-k$  处理波场分离后得到主要折射波的地震资料;(2) 通过切除近偏移距反射和深部反射资料,得到折射波资料;(3) 线性动校正处理,抽道集和叠加,最后得到反映地下地层结构的剖面(图4)。

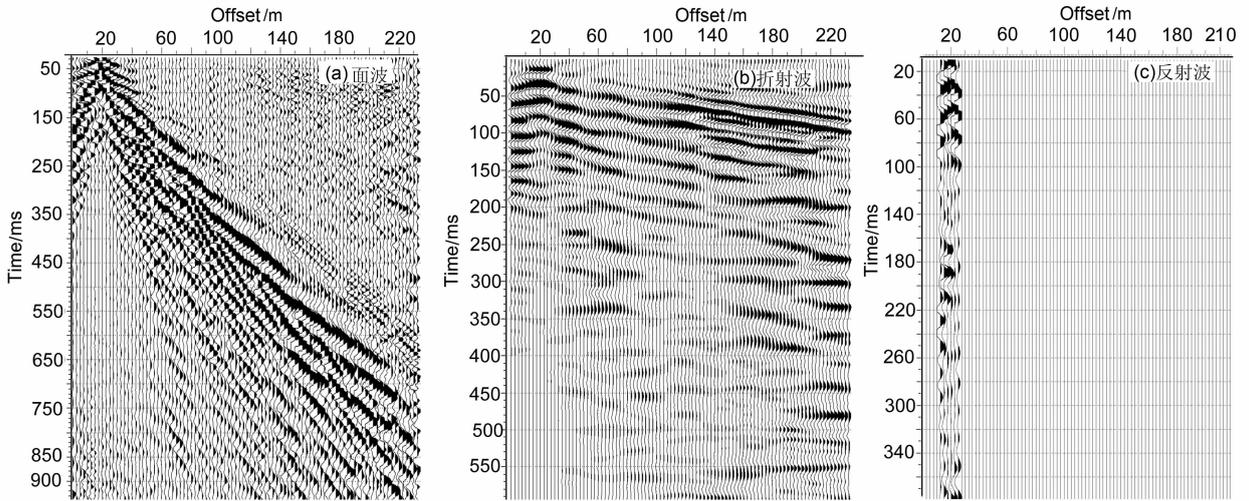


图3 波场分离的剖面图

Fig. 3 The different profiles (a)surface wave, (b)refraction wave, (c)reflection wave

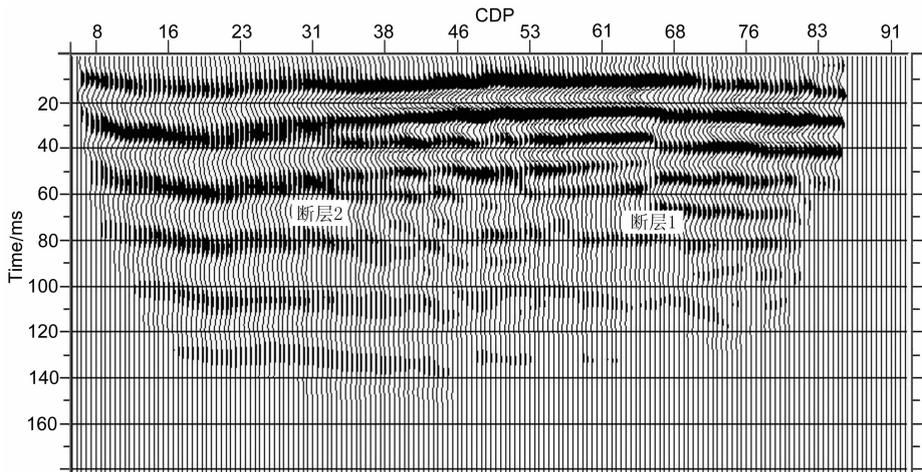


图4 折射波处理剖面

Fig. 4 The result profile of refraction wave

## 4.2 反射波成像

反射波成像是建立在褶积理论上,利用反射地震波的传播特征和共反射点水平叠加技术,对地震波进行成像研究<sup>[6]</sup>。反射地震已经广泛应用在石油

勘探开发中,从对构造研究到对地层的物性、含油气情况和储层含油气的变化情况的研究以及四维地震等<sup>[7]</sup>。本次试验由于野外条件的限制,在地震波震源和野外观测系统上与石油勘探存在一定的差别。石

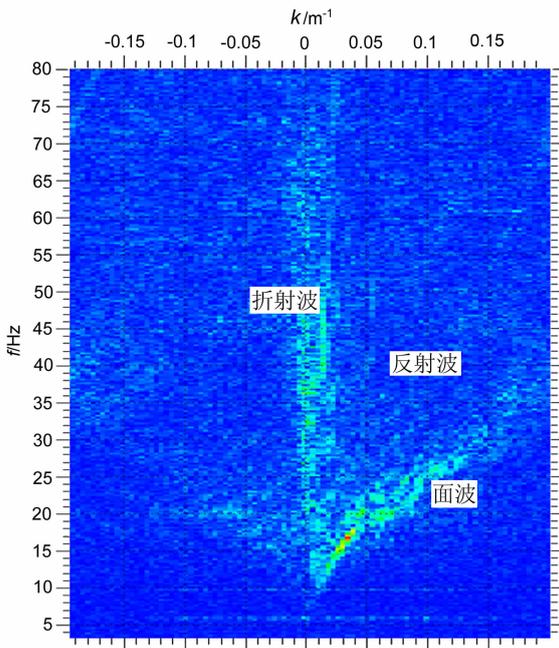


图 2 地震波场  $f-k$  分析图

Fig. 2 The map of seismic  $f-k$  transform

油勘探中,震源激发能量强,检波器组合接收,能够很好地压制噪声和面波,资料品质比较好.本次试验是在地表激发地震波,能量弱,面波影响非常严重,反射波完全淹没在面波和噪声中,资料信噪比低.

反射波资料的处理是在提高分辨率和高信噪比的基础上,根据反射波资料传播的时距关系是双曲线,并考虑目的层深度在 100 m 以内.在资料处理时,为了得到比较好的反射波剖面,主要是利用近偏移距和浅层的反射数据进行速度分析、动校正和叠加处理.反射波主要处理流程为:(1)废道、废炮的剔除;(2)振幅的恢复与反褶积;(3)初至波和折射波的切除;(4)随机噪声衰减和滤波;(5)速度分析;(6)动校正和水平叠加.通过处理得到高信噪比高分辨率的反射波叠加地震剖面(图 5).

### 4.3 面波反演地层速度

面波速度反演是利用瑞雷面波进行地下地层探测的一种方法.它是根据瑞雷面波的频散特性,其传播的相速度随频率的改变而改变,这种变化包含了

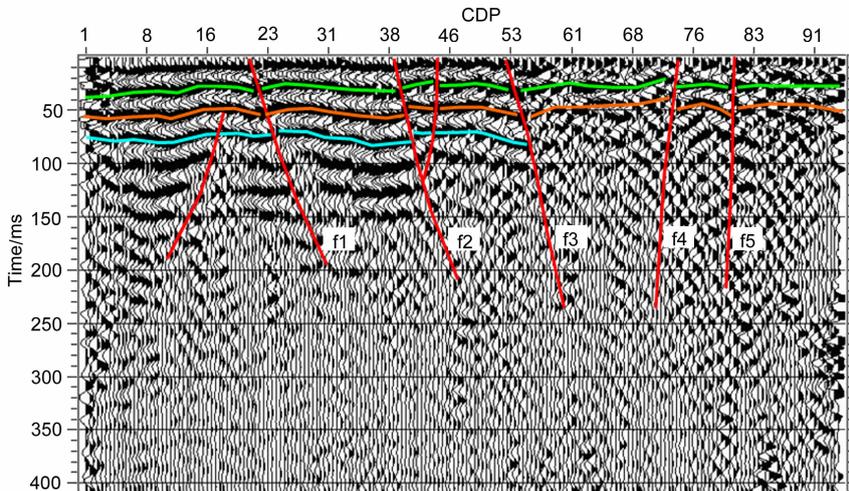


图 5 反射波成像剖面

Fig. 5 The imaging result of the reflection wave

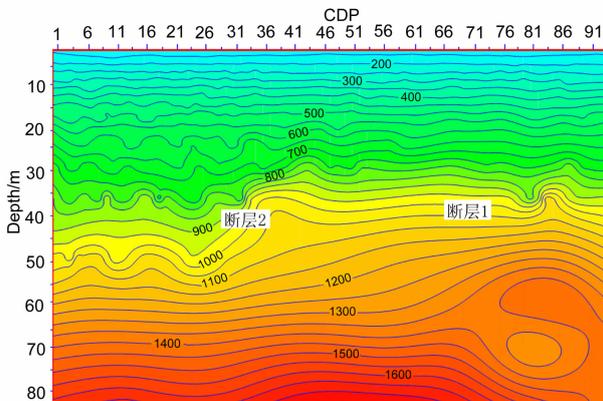


图 7 面波速度反演剖面

Fig. 7 Velocity profile by surface wave inversion

各个分层界面弹性差异的影响<sup>[8,9]</sup>.对于横向均匀的分层地层,瑞雷波的频散特征比较直观地反映了地表以下(大约在相当于半个波长的深度范围内)地层的弹性参数,特别是剪切波速度.基于层状介质中的面波理论,对面波法的频散曲线进行拟合计算出地层的面波速度及相应层深度,再通过计算得到反映地下结构特征的速度信息,这就是面波速度反演(图 6).

从实际资料的分析来看,面波资料的能量强,面波的识别和分离比较容易.对面波资料的处理主要包括:(1)  $f-k$  处理得到如图1所示的面波资料;(2)

面波频散曲线计算;(3)反演地层的速度;(4)通过上面的处理得到反映地层速度特征的剖面。

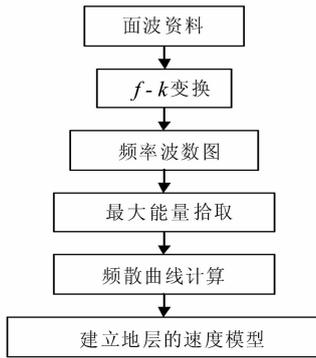


图 6 面波处理工作流程

Fig. 6 The flowchart of surface wave processing

## 5 剖面解释与效果对比

通过上面的处理,可以分别得到反映地层构造特征的折射波、反射波、面波剖面。利用它们对浅部构造进行研究,可以从不同方面研究浅部地层的结构和速度特征。从图 4、图 5、图 7 可以看出构造形态和剖面特征基本一致。图 4 折射波剖面信噪比较高,可看出汶川地震主断裂带的断层 1 和断层 2。图 5 反射波剖面能够更清楚地反映出断层的分布、地层结构的特征和断层的性质,剖面上断层 1 又分为 f4、f5 两条断层,断层 2 分为 f1、f2、f3 三条断层。图 7 面波成像剖面中深度 40 m 以上在断层 2 附近存在明显的速度突变,左边速度比较低,右边速度较高;在断层 1 附近也存在速度明显变化,反映了地层的速度特征。

从上面的三个剖面对比分析来看,由于波的传播特性不同,各剖面成像效果各有特点。折射波成像剖面信噪比较高,垂向分辨率较好,与反射波成像剖面相比横向分辨能力差,断层成像不清晰。反射波剖面能够更清楚地反映地层的形态特征,对断层的分辨能力强,断层信息更加丰富。但由于反射波的能量比较小,剖面的信噪比低,需要结合其他的信息进行综合分析。面波速度反演剖面能更清楚地展示出地层的速度分布特征,并能够显示出地层中断裂及速度的变化,但对地层的细小变化分辨较差。

## 6 认识与结论

(1) 通过在现场试验和观测数据处理,得到浅

部地层的构造和地层的速度信息,为汶川地震震后现场断裂带应急动态观测提供了基础数据资料,可用于对地震断裂带应力状态变化分析、震后愈合及余震趋势判定。

(2) 人工震源断裂带结构快速响应探测是震后应急观测手段,流动性大,设备机动灵活小型化,需要在现场进行处理分析。同时,由于断层破裂带构造复杂,存在强反射、散射现象,使得波场复杂、数据信噪比低,处理难度大。

(3) 综合采用折射、反射和面波信息进行成像是断裂带结构快速成像的有效方法。在  $f-k$  波场分离的基础上、通过利用以上三种资料的处理和剖面对比,相互印证和补充,得到了汶川地震断裂带东北端浅部断层构造形态和速度结构。

(4) 针对地震震后快速响应需要,还需要对现有观测系统、数据处理和成像方法进行更加深入的研究。

## 参考文献(References)

- [1] 王振东. 浅层地震勘探应用技术. 北京:地质出版社,1988. 32~132  
Wang Z D. Application of Shallow Seismic Exploration Techniques (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House,1988. 32~132
- [2] 张碧星,鲁来玉. 用频率-波数法分析瑞利波频散曲线. 工程地球物理学报,2005,2(4):245~255  
Zhang B X, Lu L Y. Investigation on the dispersion curves of Rayleigh wave by frequency-wavenumber analysis method. Chinese J. Engineering Geophys. (in Chinese), 2005, 2(4): 245~255
- [3] 单娜琳,程志平,刘云祯. 工程地震勘探. 北京:冶金工业出版社,2006. 48~144  
Shan N L, Cheng Z P, Liu Y Z. Engineering Seismic Exploration (in Chinese). Beijing: Metallurgy Industry Press, 2006. 48~144
- [4] 杨成林. 瑞雷波勘探. 北京:地质出版社,1993. 7~68  
Yang C L. Rayleigh Wave Exploration (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1993. 7~68
- [5] 冯太林,张学工,李衍达. 折射波地震记录叠加成像方法研究. 地球物理学报,2001,44(1):129~134  
Feng T L, Zhang X G, Li Y D. Research on methodology of stack imaging of refractive seismic recording. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2001, 44(1): 129~134
- [6] 牟永光,陈小宏,李国发等. 地震数据处理方法. 北京:石油工业出版社,2007. 101~142  
Mou Y G, Chen X H, Li G F, et al. Seismic Data Processing Methods (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2007. 101~142
- [7] 孙成禹. 地震波理论与方法. 东营:中国石油大学出版社,

- 2007, 200~211
- Sun C Y. Theory and Methods of Seismic Waves (in Chinese). Dongying: China University of Petroleum Press, 2007, 200~211
- [ 8 ] Florent Brenguier, Nikolai M Shapiro, Michel Campillo, et al. 3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlations. *Geophysical Research Letters*, 2007, **4**: L02305
- [ 9 ] Nikolai M Shapiro, Michel Campillo, Laurent Stehly, Michael H Ritzwoller. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 2005, **307**: 1615~1618
- [10] 刘保金, 姬继法, 徐朝繁等. 共偏移距地震反射波方法用于城市活断层探测. *地震地质*, 2006, **28**(3): 411~418
- Liu B J, Ji J F, Xu C F, et al. Application of common offset seismic reflection method to urban active fault survey. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2006, **28**(3): 411~418
- [11] 赵德亨, 田 钢, 王帮兵. 浅层地震折射波法综述. *世界地质*, 2005, **24**(2): 103~114
- Zhao D H, Tian G, Wang B B. An overview of shallow seismic refraction methods. *Global Geology* (in Chinese), 2005, **24**(2): 103~114
- [12] 徐 涛, 徐果明, 高尔根等. 复杂介质的折射波射线追踪. *石油地球物理勘探*, 2004, **39**(6): 690~693
- Xu T, Xu G M, Gao E G, et al. Ray tracing of refract wave in complex media. *Petroleum Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2004, **39**(6): 690~693
- [13] 张东宁, 袁松涌, 沈正康. 青藏高原现代地壳运动与活动断层关系的模拟实验. *地球物理学报*, 2007, **50**(1): 153~162
- Zhang D N, Yuan S Y, Shen Z K. Numerical simulation of the recent crust movement and the fault activities in Tibetan plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(1): 153~162
- [14] 赵爱华, 丁志峰, 孙为国等. 复杂介质地震定位中震源轨迹的计算. *地球物理学报*, 2008, **51**(4): 1188~1195
- Zhao A H, Ding Z F, Sun W G, et al. Calculation focal loci for earthquake location in complex media. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(4): 1188~1195

(本文编辑 何 燕)