

“十一五”国家科技支撑计划重点项目
课题“亚洲地震巨灾综合风险评估技术及应用研究”(2008BAC44B02)资助

近代亚洲 巨大灾害地震选编

傅征祥 金学申 邵辉成 蒋长胜 李宇彤 赵炜喆 编
王行舟 齐玉妍 孙丽娜 张 合 范 强

地震出版社

“十一五”国家科技支撑计划重点项目

课题“亚洲地震巨灾综合风险评估技术及应用研究”(2008BAC44B02)资助

近代亚洲 巨大灾害地震选编

傅征祥 金学申 邵辉成 蒋长胜 李宇彤 赵炜喆 编
王行舟 齐玉妍 孙丽娜 张合 范强

地震出版社

图书在版编目(CIP)数据

近代亚洲巨大灾害地震选编 / 傅征祥等编. —北京: 地震出版社, 2011.8

ISBN 978-7-5028-3519-4

I. ①近… II. ①傅… III. ①地震灾害—概况—亚洲—近代 IV. ①P316.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 151242 号

地震版 XM2358

近代亚洲巨大灾害地震选编

傅征祥 金学申 邵辉成 蒋长胜 李宇彤 赵伟喆
王行舟 齐玉妍 孙丽娜 张 合 范 强 编

责任编辑: 樊 钰

责任校对: 李 珧

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

网 址: <http://www.dzpress.com.cn>

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

版(印)次: 2011 年 8 月第一版 2011 年 8 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 602 千字

印张: 23.5

印数: 0001 ~ 1000

书号: ISBN 978-7-5028-3519-4/P(4564)

定价: 98.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

目 录

绪 言	(1)
第 1 章 2008 年 5 月 12 日中国四川汶川 8.0 级地震	(7)
第 2 章 2005 年 10 月 8 日巴基斯坦穆扎法拉巴德 7.6 级地震	(57)
第 3 章 2004 年 12 月 26 日印度尼西亚苏门答腊 9.0 级地震	(75)
第 4 章 2003 年 12 月 26 日伊朗巴姆 6.6 级地震	(90)
第 5 章 2001 年 1 月 26 日印度古吉拉特邦普杰 7.7 级地震	(103)
第 6 章 1999 年 8 月 17 日土耳其伊兹米特 7.6 级地震	(113)
第 7 章 1990 年 6 月 20 日伊朗鲁德巴尔 7.4 级地震	(129)
第 8 章 1988 年 12 月 7 日亚美尼亚斯皮塔克 6.9 级地震	(144)
第 9 章 1978 年 9 月 16 日伊朗塔巴斯 7.4 级地震	(161)
第 10 章 1976 年 7 月 28 日中国河北唐山 7.8 级地震	(174)
第 11 章 1970 年 1 月 5 日中国云南通海 7.8 级地震	(204)
第 12 章 1968 年 8 月 31 日伊朗巴亚兹 7.2 级地震	(229)
第 13 章 1962 年 9 月 1 日伊朗布因 7.1 级地震	(239)
第 14 章 1949 年 7 月 10 日塔吉克斯坦凯特 7.6 级地震	(253)
第 15 章 1948 年 10 月 5 日土库曼斯坦阿什哈巴德 7.2 级地震	(264)
第 16 章 1939 年 12 月 27 日土耳其埃尔津詹 7.7 级地震	(271)
第 17 章 1935 年 5 月 30 日巴基斯坦奎达 8.1 级地震	(278)
第 18 章 1934 年 1 月 15 日尼泊尔 8.0 级地震	(288)
第 19 章 1927 年 5 月 23 日中国甘肃古浪 8 级地震	(304)
第 20 章 1923 年 9 月 1 日日本关东 7.9 级地震	(317)
第 21 章 1920 年 12 月 16 日中国宁夏海原 $8\frac{1}{2}$ 级地震	(336)
第 22 章 1905 年 4 月 4 日印度坎格拉 7.8 级地震	(353)
第 23 章 防震减灾对策	(364)

绪 言

亚洲位于东半球的东北部,东濒太平洋,南临印度洋,北滨北冰洋,西靠大西洋的属海地中海和黑海。在世界各洲中亚洲所跨纬度最广,具有从赤道带到北极带几乎所有的气候带和自然带。西北部以乌拉尔山脉、乌拉尔河、里海、大高加索山脉、博斯普鲁斯海峡、达达尼尔海峡同欧洲分界;西南隔苏伊士运河、红海与非洲相邻;东南面隔海与大洋洲相望;东北隔宽仅 86km 的白令海峡与北美洲相对(中国地图出版社,2003;图 1)。

亚洲面积 4400 万 km^2 (包括附近岛屿),约占世界陆地总面积的 29.4%,是世界上最大的一个洲。亚洲大陆与欧洲大陆毗连,形成全球最大的陆块——亚欧大陆,总面积约 5071 万 km^2 ,其中亚洲大陆约占 4/5。亚洲共有 49 个国家和 1 个地区。在地理上习惯分为东亚、东南亚、南亚、西亚、中亚和北亚。

东亚包括中国、朝鲜、韩国、蒙古和日本 5 个国家。

东南亚包括越南、老挝、柬埔寨、缅甸、泰国、马来西亚、新加坡、印度尼西亚、菲律宾、文莱和东帝汶 11 个国家。

南亚包括斯里兰卡、马尔代夫、巴基斯坦、印度、孟加拉国、尼泊尔、不丹和锡金 8 个国家。

西亚也叫西南亚,包括阿富汗、伊朗、阿塞拜疆、亚美尼亚、格鲁吉亚、土耳其、塞浦路斯、叙利亚、黎巴嫩、巴勒斯坦、以色列、约旦、伊拉克、科威特、沙特阿拉伯、也门、阿曼、阿拉伯联合酋长国、卡塔尔和巴林 20 个国家。

中亚包括土库曼斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦和哈萨克斯坦 5 个国家。

北亚指俄罗斯的西伯利亚地区(中国地图出版社,2003)。

图 2 是全球人口密度分布图,色标表示颜色越深,人口密度越大。亚洲人口 36.6 亿,约占世界总人口的 61%,人口密度居世界第一。人口以中国最多,人口在 1 亿以上的还有印度、印度尼西亚、日本、孟加拉国和巴基斯坦。人口分布以中国东部、日本太平洋沿岸、印尼爪哇岛、印度恒河流域等地最为密集。

Engdahl 等(1998)对 1964~1995 年全球发生的约 10 万个具有良好的远震走时资料的地震事件,进行了重新定位。重新定位的全球地震活动分布图像($M_w \geq 5.2$)见图 3。图 3 中用红、绿和蓝色分别表示浅源、中源和深源地震的震中位置。图 3 表明,全球地震活动震中分布呈明显的不均匀性。亚洲是全球地震活动,特别是浅源地震最活跃的地区之一。在 1900~2008 年间,全球约发生 1600 次 7 级以上大地震(Engdahl et al., 2002; 互联网: NEIC, USGS, 2000~2008),其中在亚洲约发生 700 次,占全球的 43%。

由于亚洲文明历史悠久、人口密度大、破坏力大的浅源地震频繁发生,近代大多数国家属于发展中国家,抗御地震的能力偏低,导致地震灾害十分严重。在 1900~2008 年间,全球因地震死亡人数约为 200 万,其中亚洲约为 160 万,约占全球的 80%(楼宝棠, 1996; 邓



图1 亚洲政区图 (互联网: 地球之旅, 2006)

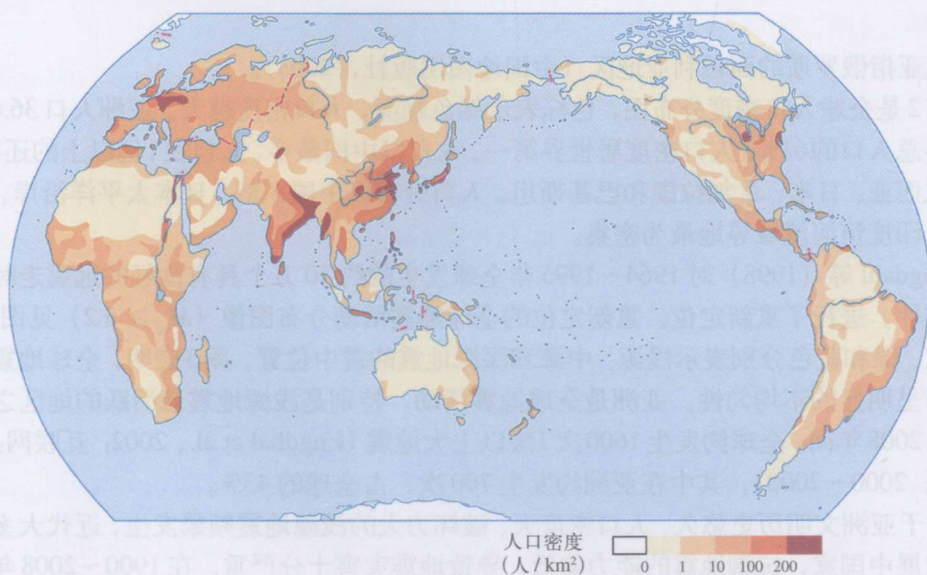


图2 世界人口密度分布图 (互联网: 地图教学网, 2006)

巴等编著, 国家地震局震害防御司编译, 1996; 美国地质调查所, [http:// NEIC/USGS/ Documents and Settings/Administrator/My Documents/Significant Earthquakes of the World for 1981 ~ 2008](http://NEIC/USGS/Documents and Settings/Administrator/My Documents/Significant Earthquakes of the World for 1981~2008)), 由此可见, 亚洲是全球地震生命损失最为严重的地区。

不只是在近代, 在历史上亚洲也是全球地震生命损失最严重的地区。图4是全球1500~2000年地震生命损失分布图 (Utsu, 2002), 圆圈是地震死亡人数等级划分, 大圆圈多分布在亚洲, 底图上不同颜色表示不同的人口密度。

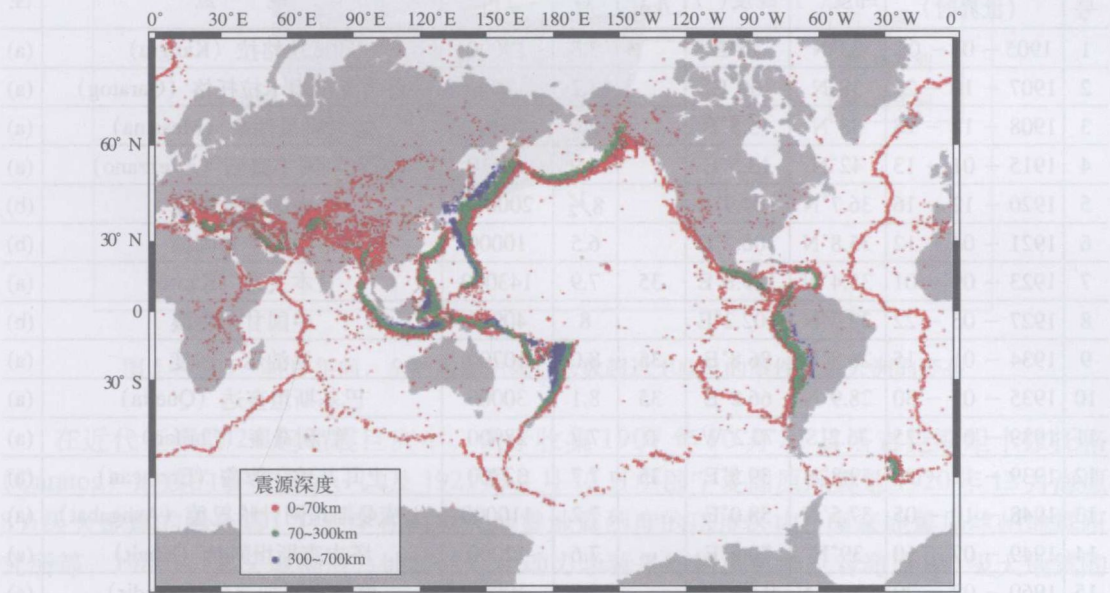


图3 全球地震活动分布 ($M_w \geq 5.2$) (Engdahl et al., 1998)

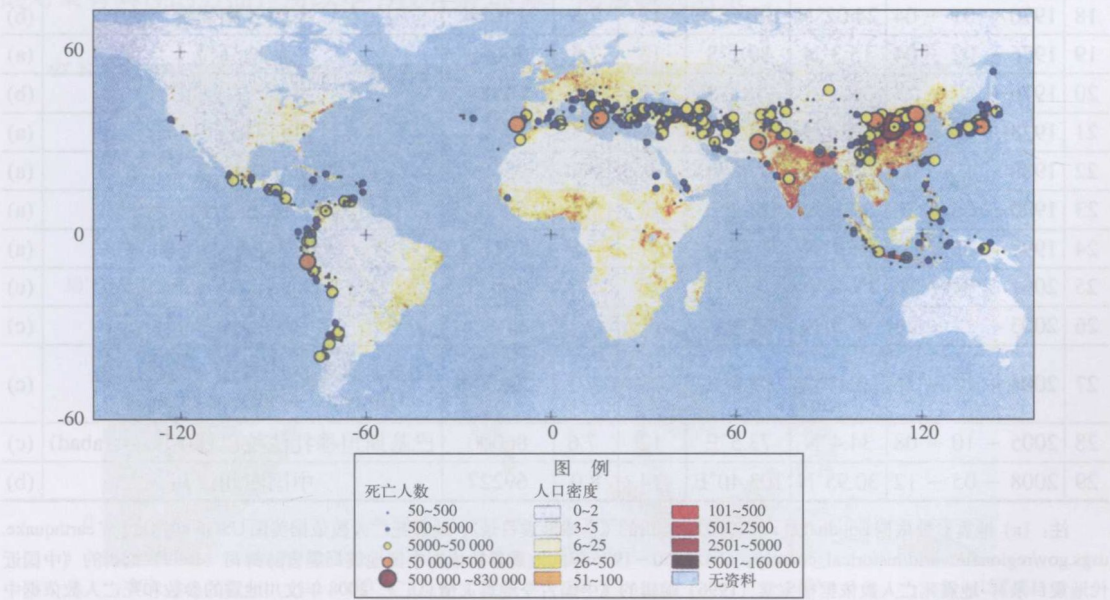


图4 全球1500~2000年间造成人员死亡的地震位置分布图 (Utsu, 2002)

表 1 给出 1900~2008 年间, 全球地震中死亡人数超过 10000 的事件共 29 起, 其中欧洲 2 起, 发生在意大利 (表中事件编号 3 和 4); 非洲 1 起, 发生在摩洛哥 (表中事件编号 15); 中美洲 1 起, 发生在危地马拉 (表中事件编号 19); 南美洲 1 起, 发生在智利 (表中事件编号 11); 其余 24 起发生在亚洲, 约占全球的 82.8% (图 5), 可见近代亚洲的地震灾害之严重。

表 1 1900~2008 年全球地震死亡人数≥ 10000 的地震事件

编号	年-月-日 (世界时)	纬度(°)	经度(°)	深度 /km	震级 <i>M</i>	死亡人数 /口	地 点	注
1	1905-04-04	33°N	76°E		7.8	19000	印度坎格拉 (Kangra)	(a)
2	1907-10-21	38°N	69°E		7.2	12000	塔吉克斯坦卡拉托格 (Qaratog)	(a)
3	1908-12-28	38°N	15.5°E		7.0	70000	意大利墨西拿 (Messina)	(a)
4	1915-01-13	42°N	13.5°E		6.9	32610	意大利阿韦察诺 (Avezzano)	(a)
5	1920-12-16	36.7°N	104.9°E		8½	200000	中国宁夏海原	(b)
6	1921-04-12	35.8°N	106.2°E		6.5	10000	中国宁夏固原	(b)
7	1923-09-01	35.4°N	139.8°E	35	7.9	143000	日本关东 (Kanto)	(a)
8	1927-05-22	37.7°N	102.2°E		8	40900	中国甘肃古浪	(b)
9	1934-01-15	26.8°N	86.8°E	35	8.0	10700	尼泊尔-印度	(a)
10	1935-05-30	28.9°N	66.2°E	35	8.1	30000	巴基斯坦奎达 (Quetta)	(a)
11	1939-01-25	36.2°S	72.2°W	0	7.7	28000	智利奇廉 (Chillan)	(a)
12	1939-12-26	39.8°N	39.5°E	35	7.7	32700	土耳其埃尔津詹 (Erzincan)	(a)
13	1948-10-05	37.5°N	58.0°E		7.2	110000	土库曼斯坦阿什哈巴德 (Ashgabat)	(a)
14	1949-07-10	39°N	70.5°E		7.6	12000	塔吉克斯坦凯特 (Khait)	(a)
15	1960-02-29	30.45°N	9.62°W		5.7	10000	摩洛哥阿加迪尔 (Agadir)	(a)
16	1962-09-01	35.6°N	49.8°E	27	7.1	12225	伊朗布因-扎拉 (Buyin-Zara)	(c)
17	1968-08-31	34.0°N	59.0°E	12	7.2	12000	伊朗巴亚兹 (Dasht-e-Bayaz)	(a)
18	1970-01-04	24.02°N	102.68°E	13	7.8	15621	中国云南通海	(b)
19	1976-02-04	15.3°N	89.1°S	13	7.5	20000	危地马拉	(a)
20	1976-07-27	39.4°N	118.0°E	22	7.8	242000	中国河北唐山	(b)
21	1978-09-16	33.2°N	57.4°E	3	7.4	15000	伊朗塔巴斯 (Tsbas)	(a)
22	1988-12-07	40.9°N	44.2°E	5	6.9	25000	亚美利亚斯皮塔克 (Spitak)	(a)
23	1990-06-20	37.0°N	49.2°E	18	7.4	50000	伊朗鲁德巴尔(Roodbar)	(a)
24	1999-08-17	40.7°N	29.9°E	17	7.6	17118	土耳其伊兹米特 (Izmit)	(a)
25	2001-01-26	23.41°N	70.23°E	16	7.6	20023	印度古吉拉特 (Gujarat Bhuj)	(c)
26	2003-12-26	29.3°N	58.4°E	10	6.6	31000	伊朗巴姆 (Bam)	(c)
27	2004-12-26	3.1°N	95.9°E	29	9.0	292000	印度尼西亚苏门答腊-安曼群岛 (Sumatra -Andaman Islands)	(c)
28	2005-10-08	34.4°N	73.5°E	12	7.6	86000	巴基斯坦穆扎法拉巴德(Muzafarabad)	(c)
29	2008-05-12	30.95°N	103.40°E	14	8.0	69227	中国四川汶川	(b)

注: (a) 地震参数依据 Engdhal et al. (2002) 编辑的《全球地震目录》; 地震死亡人数依据美国 USGS 网站 [http:// earthquake.usgs.gov/regional/world/historical_country](http://earthquake.usgs.gov/regional/world/historical_country); (b) 1920~1976 年的地震参数依据中国地震局震害防御司 (1999) 编辑的《中国近代地震目录》; 地震死亡人数依据楼宝棠 (1996) 编辑的《中国古今地震灾情总汇》。2008 年汶川地震的参数和死亡人数依据中国地震局监测预报司 (2009) 编著的《汶川 8.0 级地震科学研究报告》; (c) 地震参数依据美国 USGS 的 NEIC 编辑的全球地震目录; 地震死亡人数依据美国 USGS 网站 http:// earthquake.usgs.gov/regional/world/historical_country。

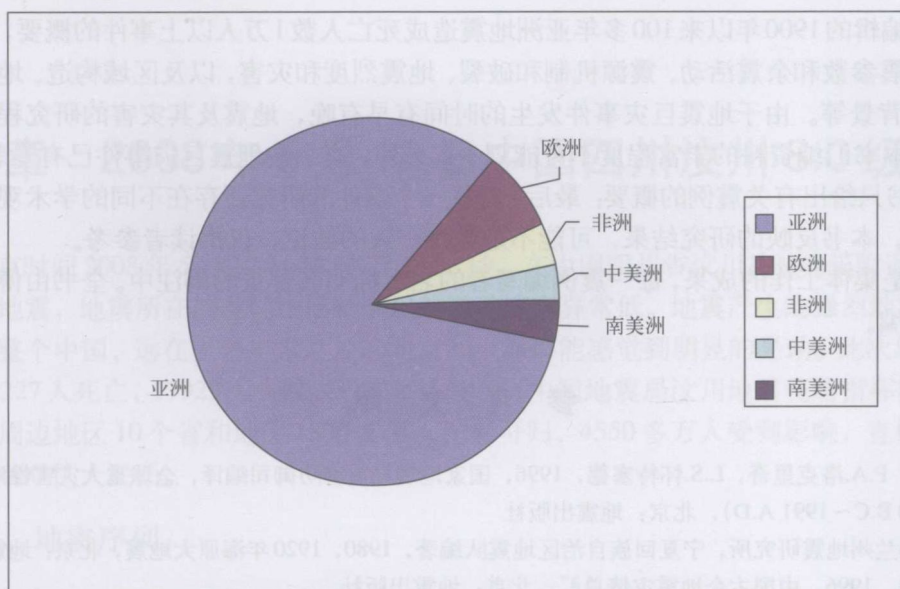


图5 1900~2008年间，全球地震中死亡人数超过10000的事件在各大洲的分布

在近代亚洲的24起地震巨灾中，由于收集1907年10月21日塔吉克斯坦卡拉托格(Qaratog)地震的资料不足，以及1921年4月12日中国宁夏固原地震是1920年12月海原8½级大地震的强余震，它发生在海原大地震地震烈度的IX度区内（国家地震局兰州地震研究所等，1980），其区域构造、地震活动和动力学背景等特征可参见对海原8½级大地震的描述，这两个震例没有独立成章。因此，本书编辑的近代亚洲灾难性地震震例共22个。图6是22个震例的地点分布，绝大多数事件发生在20°~40°N亚洲的地带上。由于防震减灾的对策有共性的方面，所以本书设有第23章“防震减灾对策”。

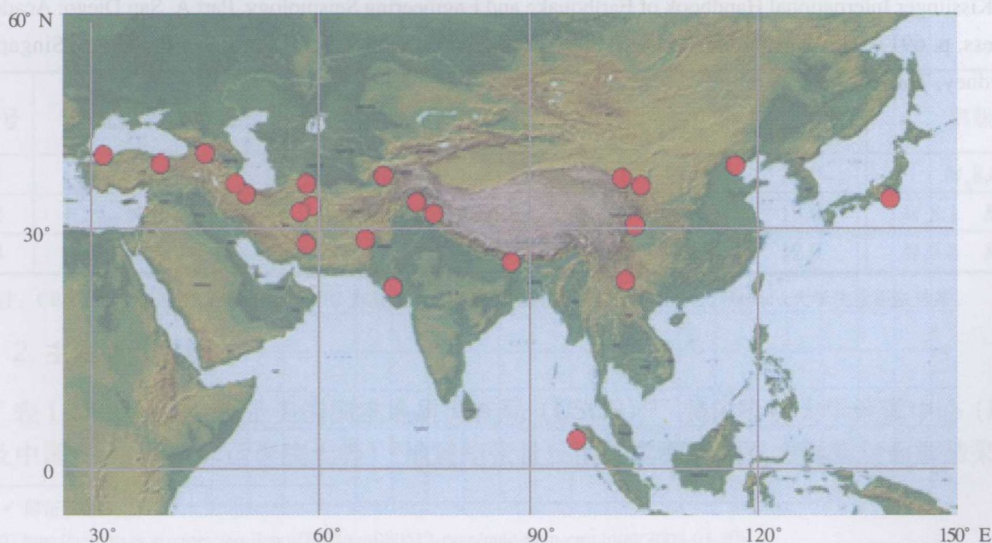


图6 近代亚洲灾难性地震震例（22个）的地点分布

本书编辑的1900年以来100多年亚洲地震造成死亡人数1万人以上事件的概要,内容主要包括主震参数和余震活动、震源机制和破裂、地震烈度和灾害,以及区域构造、地震活动和动力学背景等。由于地震巨灾事件发生的时间有早有晚,地震及其灾害的研究程度有差异,因而本书汇编资料的丰富程度不可能划一;另外,有一些地震巨灾事件已有专著出版,因此,本书只给出有关震例的概要;最后,对每一个事件的研究还存在不同的学术观点和派别,所以,本书反映的研究结果,可能不是最终一致的结论,仅供读者参考。

本书是集体工作的成果,每一震例编写者的名字标明在首页的脚注中。全书由傅征祥和金学申统编。

参 考 文 献

- 邓巴, P.K., P.A.洛克里奇, L.S.怀特塞德, 1996, 国家地震局震害防御司编译, 全球重大灾害性地震目录 (2150 B.C~1991 A.D), 北京: 地震出版社
- 国家地震局兰州地震研究所, 宁夏回族自治区地震队编著, 1980, 1920年海原大地震, 北京: 地震出版社
- 楼宝棠主编, 1996, 中国古今地震灾情总汇, 北京: 地震出版社
- 中国地图出版社编制, 2003, 世界地图集, 北京: 中国地图出版社
- 中国地震局监测预报司组织编著, 2009, 汶川8.0级地震科学研究报告, 北京: 地震出版社
- 中国地震局震害防御司编, 1999, 中国近代地震目录 (公元1912~1990年, $M_s \geq 4.7$), 北京: 中国科学技术出版社
- Engdahl, E.R., R.D.van der Hilst and R.P., Buland, 1998. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel-time and procedures for depth determination, Bull. Seism. Soc. Am., 88: 722~743
- Engdahl, E.R., and A.Villasenor, 2002, Global seismicity: 1900~1999, International handbook of earthquake and engineering seismology, edited by W.H.Lee, H.Kanamori, P. C.Jennings, C.Kisslinger, Part A, p.665~690. Color Plate 15, Academic Press. Amsterdam, Boston, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo
- Utsu T., 2002, A list of deadly earthquakes in the world: 1500~2000, edited by Lee, W. H., H.Kanamori, P. Jennings, C.Kisslinger, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A. San Diego: Academic Press, p. 691~717. Amsterdam, Boston, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo

第 1 章 2008 年 5 月 12 日中国四川汶川 8.0 级地震*

北京时间 2008 年 5 月 12 日 14 时 27 分 58 秒，在中国四川省汶川县映秀镇附近发生了 8.0 级巨大地震，地震所在的龙门山活动断层的活动速率异常低。地震产生的强烈地震波，震动了几乎整个中国，远在上千千米之外的北京和上海都能感觉到明显的晃动。此次地震造成了至少 69227 人死亡，17923 人失踪，373645 人受伤（中国地震局汶川地震现场指挥部，2009）；同时使周边地区 10 个省和地区 1500 多万人无家可归，4550 多万人受到影响，直接经济损失超过 10000 亿人民币。

一、地震序列

1. 主震参数（中国地震台网中心，2008）

发生时间：世界时 2008 年 5 月 12 日 06 时 27 分 58 秒，
地方时 2008 年 5 月 12 日 14 时 27 分 58 秒；
震中位置：30.95°N，103.40°E（图 1.1 中红色星号所示）；
震源深度：14km；
震级：8.0 M_S ；
地点：中国四川省汶川。

图 1.1 表明 2008 年 5 月汶川 8.0 级大地震发生在 NE 走向的龙门山断裂带（活动地块边界编号 4）南段。表 1.1 给出几个国家地震机构分别确定的 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级大地震的微观震源位置（初始破裂位置）、发震时刻和震级。

表 1.1 一些地震机构测定的汶川地震主震震源参数

序号	研究机构或个人	发震时刻 (时：分：秒)	微观震中		震源深度 /km	震级
			纬度 (°N)	经度 (°E)		
1	CENC	14:27:58.0	30.95	103.40	14.0	M_S 8.0
2	NEIC	14:28:1.57	31.97	103.19	19.0	M_S 8.1 M_w 7.9
3	HRV（矩心位置）	14:28:41.4	31.49	104.11	12.0	M_S 7.8 M_w 7.9

注：CENC 为中国地震台网中心；NEIC 为美国地质调查局地震信息中心；HRV 为 Harvard 大学快速矩张量解。

2. 主震震源机制

表 1.2 和图 1.2 分别是美国国家地质调查局 (USGS)^①、美国哈佛大学地震中心 (HRV)^② 以及中国 Chen 等（陈运泰院士等）^③地震矩张量反演的震源机制双力偶断层面解结果。节面

* 傅征祥编写。

① <http://neic.usgs.gov/neic/eq-depot/2008/eq-080512-ryan/neic-ryan-cmt.html>(2008-05-20).

② <http://neic.usgs.gov/neic/eq-depot/2008/eq-080512-ryan/neic-ryan-hrv.html>(2008-05-20).

③ <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai>,PDF (in Chinese)(2008-05-20).

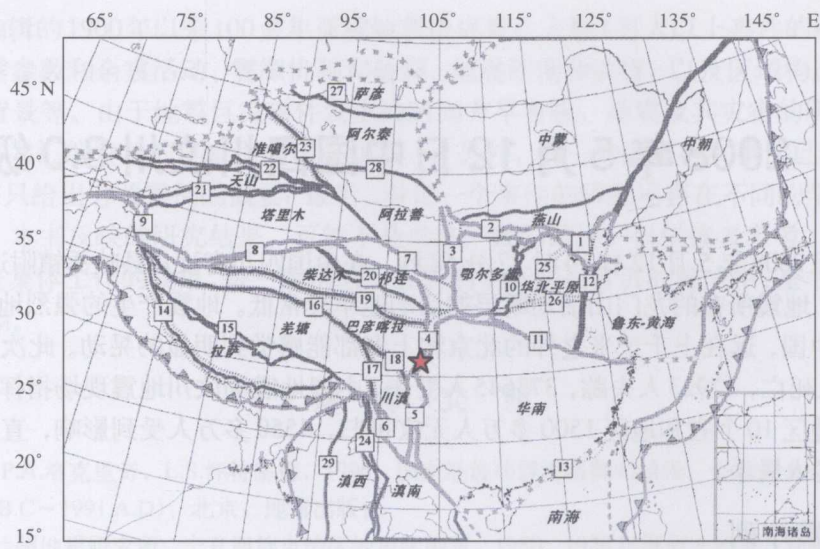


图 1.1 2008 年 5 月汶川 8.0 级地震震中位置 (红色星号)

底图是中国及其周边 II 级活动地块 (见图中斜体文字) 和地块边界分布图。方块内的数字表示活动块体的边界名称 (张培震等, 2003; 张国民等, 2005); 1—燕山渤海带; 2—阴山带; 3—贺兰山带; 4—岷山—龙门山带; 5—安宁河—小江带; 6—红河带; 7—海原—祁连带; 8—阿尔金带; 9—西昆仑带; 10—汾渭带; 11—秦岭—大别山带; 12—郯庐带; 13—东南沿海带; 14—喜马拉雅带; 15—喀喇昆仑—嘉黎带; 16—玛尼—玉树带; 17—三江带; 18—鲜水河带; 19—东昆仑带; 20—西秦岭—德令哈带; 21—南天山带; 22—北天山带; 23—富蕴带; 24—澜沧江带, 以及附有华北平原 II 级块体内的次级地块边界断裂; 25—河北平原带; 26—安阳—菏泽—临沂带; 27—蒙古博尔内带; 28—蒙古戈壁阿尔泰带; 29—缅甸实皆带

I 的走向 $229^{\circ} \sim 238^{\circ}$ 、倾角 $33^{\circ} \sim 59^{\circ}$ 、倾向 NW 和倾伏角 $123^{\circ} \sim 141^{\circ}$ 的断层面解, 基本上与龙门山断裂带活动断层的几何特征和运动方式 (图 1.2) 相符, 表明汶川 8.0 级大地震是一次发生在龙门山活动断裂带上, 带有少量右旋走滑分量的逆冲断层活动。

3. 主震震源破裂过程

利用数字地震波形资料可以研究强震震源破裂过程, 提供强震破裂尺度、断层错动方式以及断裂造成的位移分布等信息。这些信息不但能够给出地震发生造成严重破坏的区域及破坏方式, 也为震后快速判定灾害情况及救灾工作、判断断层活动特征及未来强余震发展趋势提供重要依据。

表 1.2 汶川地震主震断层面解

序号	研究机构 或 个人	M_w / $10^{2.1} \text{N} \cdot \text{m}$	断层面解											
			节面 I			节面 II			T 轴		P 轴		N 轴	
			Str ($^{\circ}$)	Dip ($^{\circ}$)	Rake ($^{\circ}$)	Str ($^{\circ}$)	Dip ($^{\circ}$)	Rake ($^{\circ}$)	Azim ($^{\circ}$)	Pl ($^{\circ}$)	Azim ($^{\circ}$)	Pl ($^{\circ}$)	Azim ($^{\circ}$)	Pl ($^{\circ}$)
1	USGS	0.75	238	59	128	2	47	45	202	57	110	1	36	31
2	HRV	0.94	229	33	141	352	70	63	227	57	103	20	2	25
3	Chen 等	4.4	229	43	123	7	55	63	222	67	116	7	23	22

注: Str 为断层走向; Dip 为断层倾角; Rake 为断层滑动角; Azim 为应力轴方位角; Pl 为应力轴倾角。

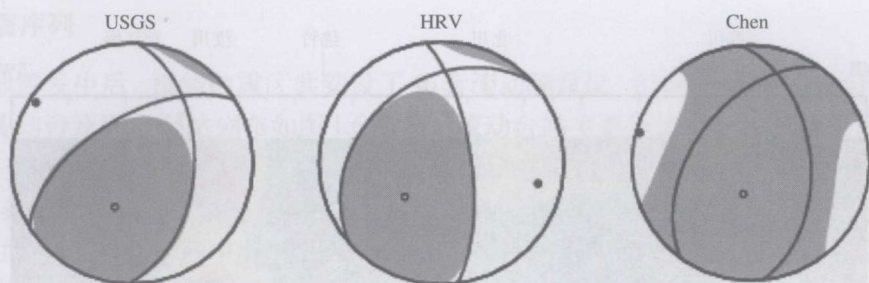


图 1.2 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震矩张量解

USGS (美国地质调查局)、HRV (哈佛大学) 和 Chen 等 (陈运泰等) 分别是表 2 中的研究机构或研究小组

赵翠萍等 (2009) 使用了包括 P 波和 SH 波的全球 39 个台站波形数据, 对破裂过程进行研究, 认为此次汶川地震破裂在时间上持续了 105s, 矩震级 7.8 级, 最大破裂位移为 8.2m。整个 105s 的破裂过程大致可分为三个阶段 (图 1.3): 前 12s 的初始破裂为第一阶段, 释放地震能量相对较小; 第 12~45s 为第二阶段, 这个阶段的破裂上升速度非常快, 释放了总能量的 60%; 45~105s 之间破裂的上升速度相对较慢, 但持续时间长, 释放了总能量的 37%。

图 1.4 和图 1.5 分别表示震源断裂面上的最终静态滑动量分布, 及其在地表的投影。自起始破裂点开始, 破裂沿映秀—北川断裂的西南端向北东方向单侧扩展, 沿断层总体破裂长度近 280km, 地表破裂近 230km。破裂沿龙门山断层产生了两个大滑动量区域, 揭示出破裂过程沿龙门山断层的分段特征: ①在起始破裂点 NE 方向 20~80km 的都江堰—绵竹段为第一个大滑动量区域, 此段深度 15km 以上为纯逆冲错动, 15km 以下表现出逆冲兼右旋走滑错动, 深部的最大破裂位移 8.2m, 地表最大位移达 6.55m; ②自绵竹附近开始, 破裂转变为向 NE 方向的右旋走滑错动, 此右旋走滑破裂沿北川扩展到了青川附近, 并在距起始破裂点 NE 方向 140~260km 段形成第二个大滑动量区域, 北川—青川段的断层错动主要发生在地表至深度 10km 之间, 地表最大位移达 6.44m。

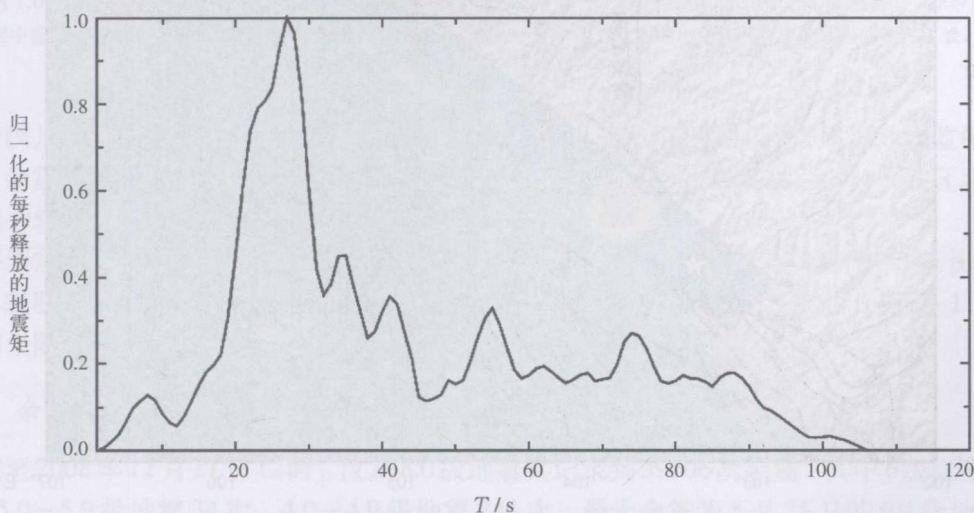


图 1.3 汶川主震震源时间函数 (赵翠萍等, 2009)

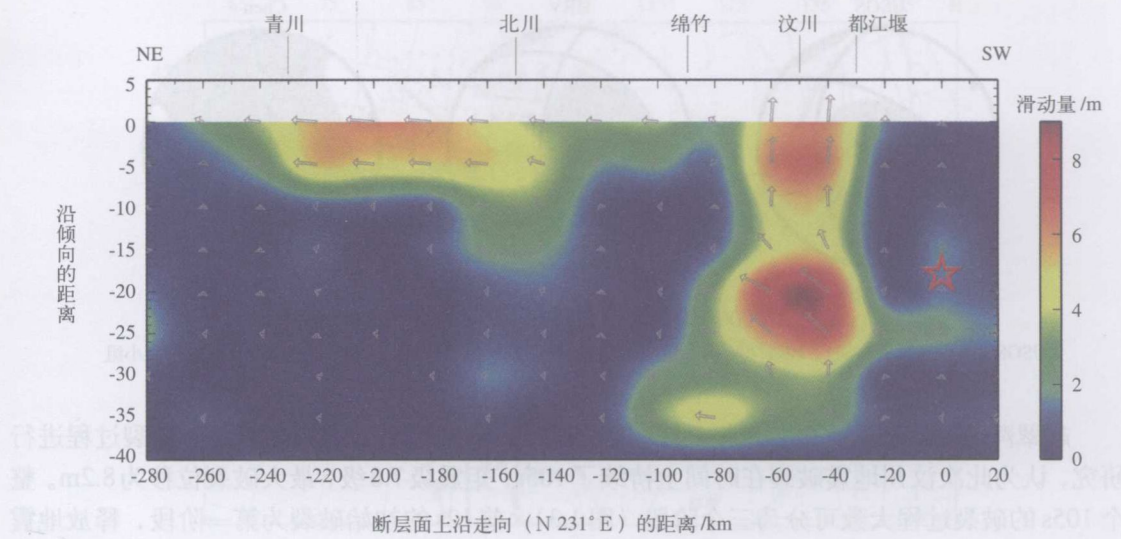


图 1.4 汶川地震断层面上最终静态滑动量和方向分布 (赵翠萍等, 2009)

图中红色五角星代表起始破裂点位置; 箭头代表断面上的滑动量及方向, 箭头长短与滑动量大小成正比, 最大滑动量为 8.2m

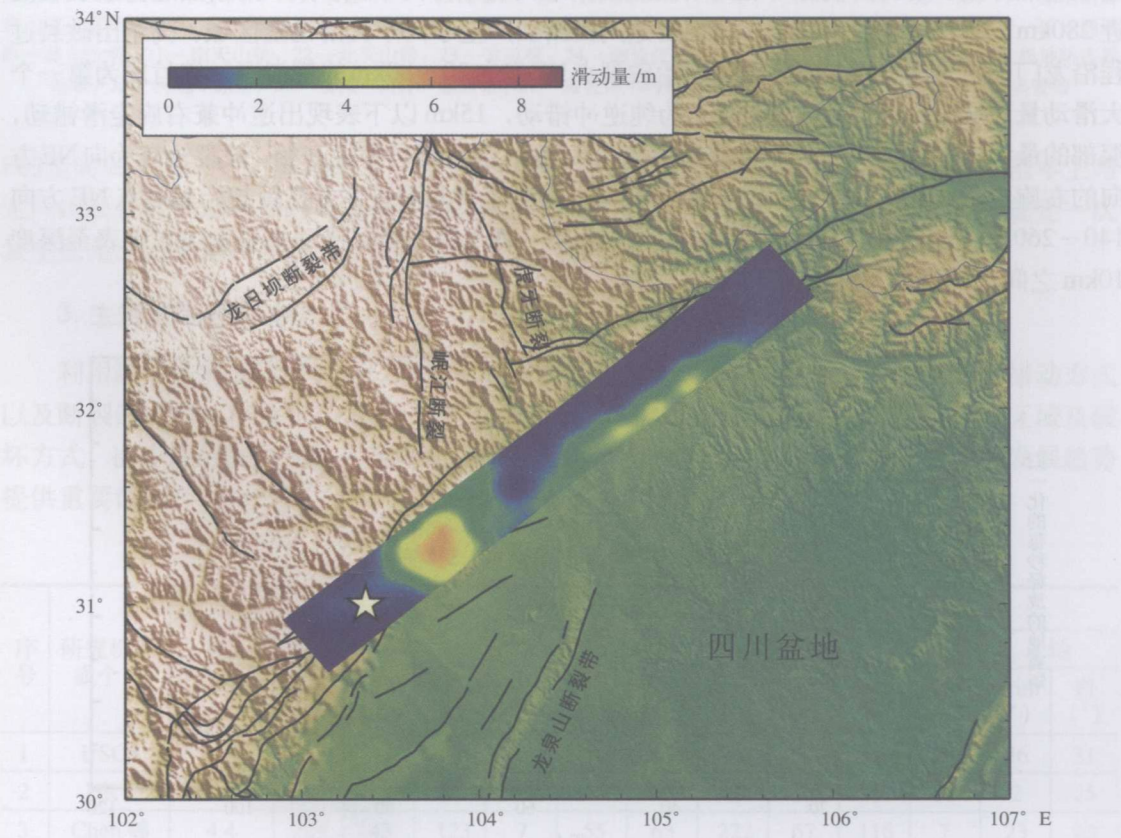


图 1.5 汶川地震断层面上破裂滑动在地表投影的分布 (赵翠萍等, 2009)

图中五角星代表起始破裂点位置, 蓝色矩形为断层模型在地表的投影

4. 余震序列

汶川地震发生后,围绕地震区共架设了46套流动测震仪、21套强震仪,开展现场加密观测工作。流动台及固定台站分布如图1.6所示。流动台站主要位于龙门山断裂带周边100 km以内,大多数距离在50 km以内,主要采用无线通讯、扩频微波等技术实现观测信号的实时传输,并与固定台站并网观测。观测数据实时传输到台网中心,供地震速报定位和分析研究使用。同时,四川地震台网中心可实时接收来自四川地震遥测区域台网、水库测震台网和流动测震台网共计120个测震台站数据(蒋长胜等,2009)。

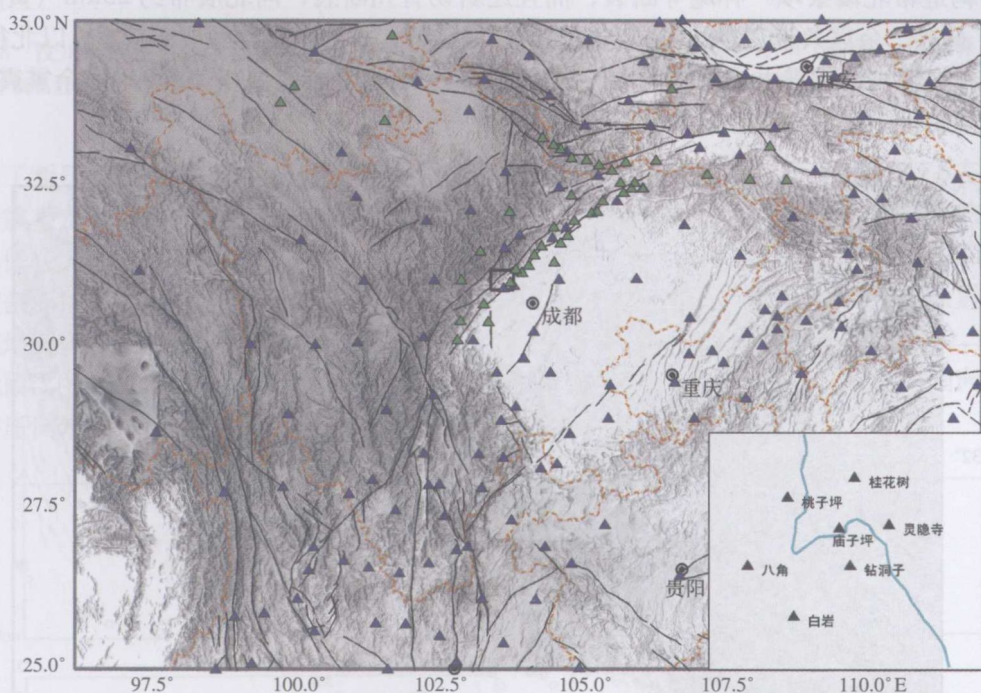


图1.6 四川及周边区域固定、流动地震台站和紫坪铺水库地震台网分布图(蒋长胜等,2009)

图中蓝色和绿色三角形分别表示固定台站和震后布设的流动台站;黑色方框给出紫坪铺水库地震台网所在区域;右下角子图给出水库台网台站分布情况

对汶川地震现场地震台网监测能力的理论评估表明,汶川余震区及其周边地震监测能力较好,余震区整体监测能力约为 $M_L 1.5 \sim 2.0$ 。而由于流动台网的密集布设,对余震区北段的监测能力较强,可达 $M_L 1.0$ 左右(蒋长胜等,2009)。

采用震级-序号图像、MAXC和GFT等方法进行震级完整性 M_c 定性分析(蒋长胜等,2009)表明,在2008年5月12~15日、5月15~26日、5月26~6月5日和6月5~11月12日的四个阶段中,平均 M_c 大小分别为 $M_L 3.7$ 、 $M_L 3.0$ 、 $M_L 2.0$ 和 $M_L 1.8$ 。

1) 余震空间分布

截至2008年12月11日12时,汶川8.0级地震共记录到39506次余震,其中6级以上余震8次,5.0~5.9级地震34次,4.0~4.9级地震243次,最大余震为5月25日的6.4级地震。

黄媛等(2008)参考了关于西部高原和东部盆地不同的速度模型,采用龙门山断裂带东

西两侧不同的分区速度模型（邓起东等，1994；赵珠等，1997），对四川地震台网记录到的2008年5月12日至7月8日的 $M \geq 2.0$ 以上余震，连同主震事件一起进行双差法重新定位计算。获得重新定位后的事件数2553个。

图1.7是黄媛等（2008）对余震重新定位后的震中分布。首先，主震的发震构造为龙门山中央断裂，重新定位后的余震震中分布集中，基本分布在断裂的上盘（图1.7的北川以南段）；其次，空间分布上，在平武南坝附近与龙门山推覆构造带北段的茶坝—林庵寺断裂交汇部位以南，余震主要分布在中央断裂西侧（图1.8的北川至平武段），平武以北余震不仅偏离龙门山推覆构造带北段茶坝—林庵寺断裂，而且还斜切青川断裂，向北展布约25km（黄媛等，2008）。此外，余震条带在空间上具有明显的分段特征，安县以南空间展布较宽，以北往NE方向逐渐变窄。余震震中分布的不均匀、分段特征，明显是本次汶川 $M_s 8.0$ 地震余震震中分布的主要特征。在都江堰以西的余震活动，出现一组NW向的分布。

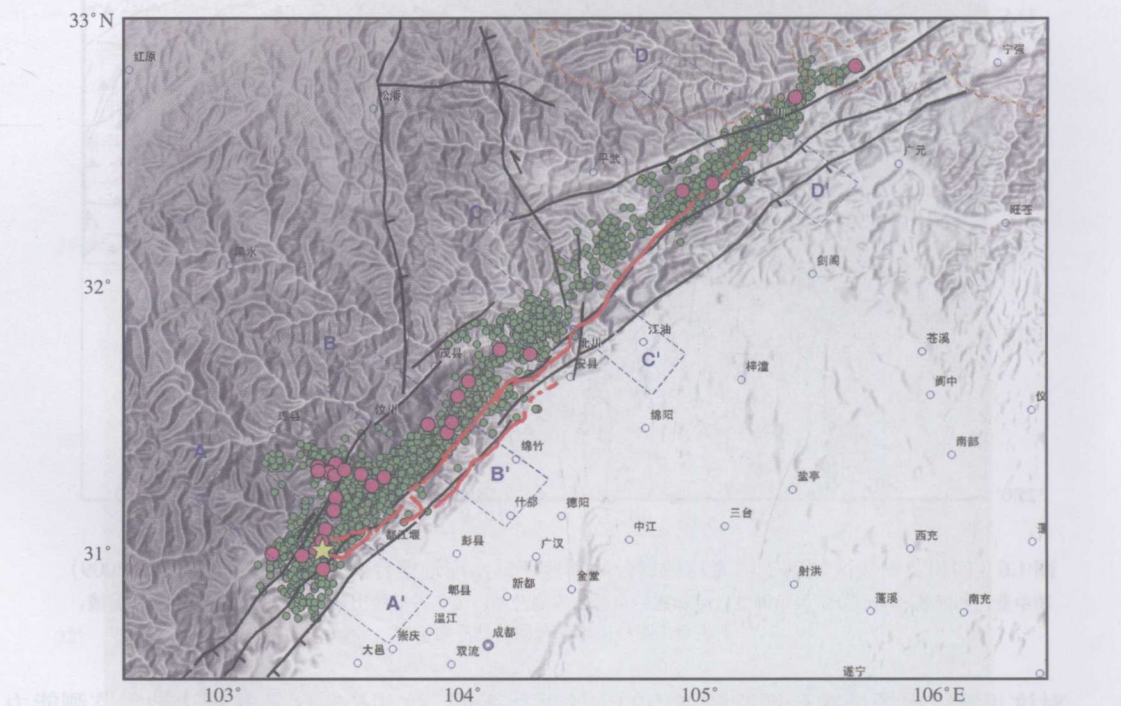


图1.7 利用双差法的汶川余震序列重新定位结果（黄媛等，2008）

图中黄色五角星为汶川主震震中；绿色实心圆为黄媛提供的2008年5月12日至7月8日重定位后的汶川余震序列震中；粉红色实心圆为此期间发生33例5级以上余震震中。图中红色曲线为根据徐锡伟等（2008）结果绘制的汶川主震地表破裂面示意图。

AA'、BB'、CC'和DD'是图1.8余震深度测定的四个剖面

震源深度作为地震的基本参数之一，可为地震孕育、发生的深部环境等提供重要的研究线索。为对深度有较好控制，黄媛等（2008）主要利用了流动台站的近台资料和对震源深度较为敏感的初至波Pb(Sb)和Pn(Sn)震相。黄媛等（2008）重定位后的结果显示，平均震源深度13.3km，近95%的地震事件分布在5~20km的上地壳范围内，优势分布非常明显（图1.8右图），另有3%的余震震源深度分布在20~30km。

余震在深度上的分布同样具有明显的分段特征。首先余震震中的展布由南向北逐渐变窄，

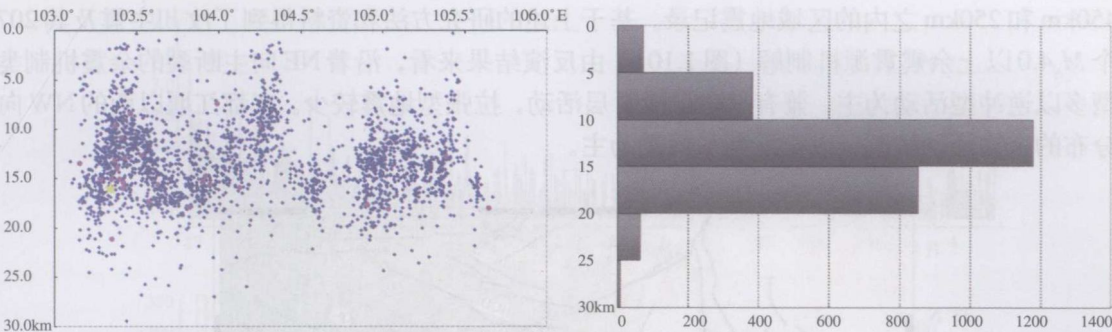


图 1.8 汶川余震序列重定位结果沿经度方向的震源深度剖面（左图）和统计分布（右图）（黄媛等，2008）
左图中黄色五角星和蓝色圆点分别对应汶川主震和 2008 年 5 月 12 日至 7 月 8 日发生的余震位置，其间发生的 33 例 5 级以上余震位置用紫色圆点标出

反映了断层倾角在逐渐变陡，余震区各段落在深度优势分布上也明显不同。在图 1.8 左图给出的余震重定位后沿经度方向在震源深度剖面上的投影可见，余震区自南向北各段落的深度分布起伏较大，中段在北川附近南北截断且突然变深。图 1.9 为黄媛等（2008）给出的四个震源深度剖面图，如图 1.7 中 AA'、BB'、CC' 和 DD' 所示。图 1.9 一方面验证了余震主要分布在地表破裂的西侧，即龙门山推覆断层的上盘（图 1.9 AA'、BB'、CC' 剖面），另一方面北段（图 1.9 DD' 剖面）的地表破裂两侧均有余震分布，也与主震破裂机制自南向北由逆冲挤压向水平走滑的变化不矛盾。

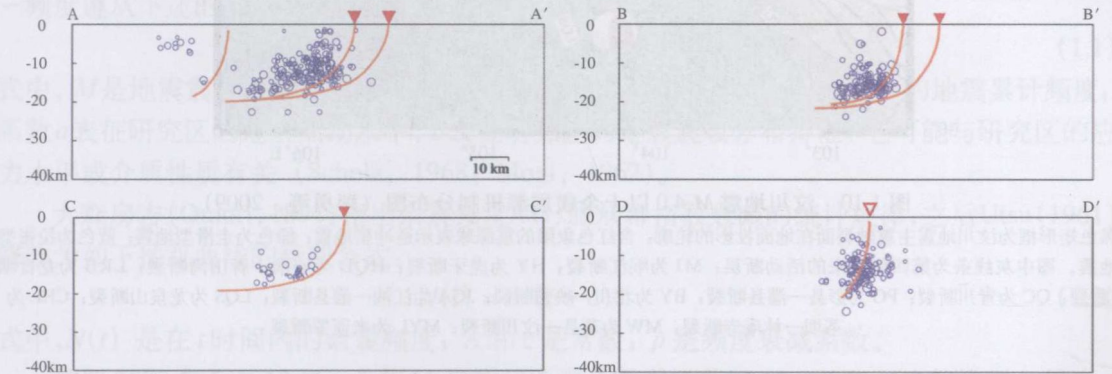


图 1.9 重新定位后的余震震源深度剖面图（黄媛等，2008）（剖面位置参见图 1.8）
剖面 AA'、BB' 和 CC' 中的实心三角形为震后地质调查给出的地表破裂位置；剖面 DD' 中的空心三角形为推断的地表破裂点；橙色曲线为推断的断层剖面

2) 余震震源机制

郑勇等（2009）在汶川余震震源机制解计算中，采用了区域波形资料矩张量反演的“裁剪－粘贴”（Cut and Paste, CAP）方法。该方法将宽频带数字地震记录分为体波部分（Pn1）和面波部分，分别计算它们的合成波形和真实记录的误差函数，搜索出最佳震源深度和震源机制解。研究中采用的地壳速度结构模型，结合了人工地震测深结果（宋鸿彪，1994）和全球地壳模型 Crust2.0 的结果，均衡考虑了川西地区和四川盆地边缘地壳速度结构的差异。矩张量反演使用了国家数字测震台网数据备份中心提供的部分国家台网和四川、陕西、甘肃等区域台网（60 余个台）宽频带地震波形资料，其中国家台网和区域台网资料震中距分别为