

ENGINEERING DAMAGE  
IN JIUZHAIGOU M 7.0 EARTHQUAKE

# 四川九寨沟

## 7.0级地震之工程震害



戴君武 孙柏涛 李山有 熊立红 陶正如 马强 张令心 林均岐 主编

地震出版社

ENGINEERING DAMAGE  
IN JIUZHAIGOU M7.0 EARTHQUAKE

# 四川九寨沟

## 7.0级地震之工程震害

戴君武 孙柏涛 李山有 熊立红 主编  
陶正如 马 强 张令心 林均岐



地震出版社

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

四川九寨沟7.0级地震之工程震害 / 戴君武等主编.  
-- 北京: 地震出版社, 2018.5

ISBN 978-7-5028-4959-7

I. ①四… II. ①戴… III. ①大地震—工程地震—  
地震灾害—科学考察—九寨沟县 IV. ①P315.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第057298号

地震版 XM4121

### 四川九寨沟7.0级地震之工程震害

戴君武 孙柏涛 李山有 熊立红 陶正如 马 强 张令心 林均岐 主编

责任编辑: 赵月华

责任校对: 凌 樱

---

出版发行: 地震出版社

北京市海淀区民族大学南路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

<http://www.dzpress.com.cn>

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印有限公司

---

版(印)次: 2018年5月第一版 2018年5月第一次印刷

开本: 880×1230 1/16

字数: 922千字

印张: 35.25

书号: ISBN 978-7-5028-4959-7/P(5662)

定价: 198.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

## 编委会

---

**主 编** 戴君武 孙柏涛 李山有 熊立红 陶正如

马 强 张令心 林均岐

**参编人员** 马加路 周宝峰 杨永强 陈相兆 杨 程

钱 亮 刘桂花 刘金龙 刘永彬 朱柏洁

宋梓宁 柏 文 宁晓晴 祁少博 王金为

钟江荣 闫培雷 余世舟 黄 勇

2017年8月8日21时19分在四川省阿坝州九寨沟县（北纬33.2°、东经103.8°）发生7.0级地震，震源深度20 km。震中距九寨沟县39 km、松潘县66 km、舟曲县83 km、若尔盖县90 km、陇南市105 km、成都市285 km。四川德阳、达州、成都、绵阳等地有震感。西安、重庆、兰州、宝鸡、天水有震感。本次地震共造成29人死亡，并导致著名的九寨沟景区遭受严重破坏，造成巨大经济损失。

地震发生后，按中国地震局要求，中国地震局工程力学研究所组织科研人员对本次地震所造成的工程震害进行了翔实的科学考察，考察内容包括地震烈度调查与复核、房屋建筑震害、基础设施震害以及滑坡地质灾害等，对人员伤亡原因进行了分析。本书在上述科学考察的基础上完成，主要包括以下七个方面的内容：

（1）场地条件及震害影响。介绍了发震断裂带的地理分布，在震害最严重的漳扎镇，考察了局部场地条件、覆盖土层厚度及分布、地形地貌等情况，分析了断裂带分布和局部场地条件对建筑结构震害的影响。

（2）主震及余震强震动观测数据。给出了靠近震中位置的主震及强余震强震动加速度记录观测数据的初步分析结果。

（3）地震烈度复核。在应急期间形成的烈度分布图基础上，以漳扎镇为中心，沿三条不同方向线路对极震区及外围城镇和乡村的一百余个居民点的各类工程震害进行了调查，并基于这些调查点的破坏统计数据评定给出了修正后的地震烈度分布。

（4）房屋建筑震害。给出了极震区各调查点不同类型房屋的总体破坏情况，介绍了不同类型建筑结构破坏特点和典型建筑的破坏现象，整理给出了部分典型建筑结构的图纸资料，对房屋建筑非结构构件破坏和由此引起的功能丧失情况进行了系统总结。

（5）典型建筑结构与场地动力特性测试及强余震反应观测。介绍了一栋多层砌体结构和一栋高层框架剪力墙结构的动力特性与强余震反应测试结果，以及三个不同位置典型场地的动力特性脉动测试结果。

（6）基础设施震害。简要介绍了震区交通系统、供电系统、通信系统、供水系统的主要震害情况。

（7）人员伤亡情况。介绍了人员伤亡的分布、造成人员伤亡的原因，给出了典型调查

案例。

本书可为工程结构地震破坏机理、烈度评定方法、结构分析与设计方法、建筑抗震修复加固技术、城镇地震韧性评估与提升方法研究等提供基础数据和重要参考。

本书在成稿过程中以及前期的现场调查工作中得到了四川省地震局、阿坝州防震减灾局、九寨沟县防震减灾局以及当地政府和旅游管理部门的大力配合与支持，在此表示衷心感谢！

由于成书时间短，加之作者水平有限，文中定有描述或解释不当之处，请广大读者一定不吝指正赐教！

编者

2017年12月

<b>第1章 地震基本概况</b> .....	1
1.1 地震参数 .....	1
1.2 发震构造 .....	3
1.2.1 塔藏断裂带 .....	3
1.2.2 岷江断裂带 .....	4
1.2.3 虎牙断裂带 .....	5
1.2.4 雪山梁子断裂带 .....	5
1.3 强地震动 .....	7
1.3.1 主震数据处理 .....	7
1.3.2 余震数据处理 .....	14
1.3.3 仪器地震烈度 .....	15
1.4 地震烈度 .....	17
1.5 人员伤亡及经济损失 .....	18
1.5.1 死亡人员情况分析 .....	19
1.5.2 死亡原因特点分析 .....	20
1.6 灾后重建 .....	22
<b>第2章 地震灾区概况</b> .....	23
2.1 灾区自然地理环境 .....	23
2.2 地震灾区社会经济状况 .....	23
2.2.1 农业 .....	24
2.2.2 工业 .....	25
2.2.3 固定资产投资 .....	25
2.3 地震灾区建筑物基本情况 .....	26
<b>第3章 调查范围及工程结构概况</b> .....	29
3.1 调查区域概况 .....	29
3.1.1 调查点与震中位置关系 .....	29

3.1.2	调查房屋数量及比例 .....	29
3.1.3	房屋破坏比 .....	30
3.1.4	按使用功能分类的破坏比 .....	32
<b>3.2</b>	<b>房屋建筑概况</b> .....	36
3.2.1	公共建筑 .....	36
3.2.2	自建民居 .....	37
3.2.3	生命线工程 .....	38
<b>第4章</b>	<b>工程结构震害</b> .....	39
<b>4.1</b>	<b>调查区域概况</b> .....	39
4.1.1	框架结构房屋 .....	39
4.1.2	多层底框砌体结构房屋 .....	288
4.1.3	木构架房屋 .....	346
4.1.4	其他类型结构房屋 .....	390
4.1.5	思考与建议 .....	412
<b>4.2</b>	<b>生命线工程</b> .....	414
4.2.1	电力系统 .....	414
4.2.2	供水系统 .....	416
4.2.3	交通系统 .....	417
4.2.4	通信系统 .....	423
4.2.5	供气系统 .....	425
4.2.6	思考与建议 .....	426
<b>第5章</b>	<b>其他震害</b> .....	427
<b>5.1</b>	<b>地质灾害</b> .....	427
<b>5.2</b>	<b>小结</b> .....	435
<b>第6章</b>	<b>建筑结构强余震反应观测</b> .....	436
<b>6.1</b>	<b>引言</b> .....	436
<b>6.2</b>	<b>建筑结构地震反应余震流动观测</b> .....	436
6.2.1	台阵布设情况 .....	436
6.2.2	结构地震反应观测记录获得情况 .....	447
<b>6.3</b>	<b>小结</b> .....	485
<b>第7章</b>	<b>地震灾害特点分析与建议</b> .....	486
<b>7.1</b>	<b>震害偏轻原因分析</b> .....	486

7.1.1	震源深 .....	486
7.1.2	强震持时短频率高 .....	487
7.1.3	工程结构抗震设防烈度高 .....	488
7.1.4	建筑场地利于抗震 .....	489
7.1.5	灾区人口分布密度低 .....	489
<b>7.2</b>	<b>对应急工作的建议 .....</b>	<b>489</b>
7.2.1	震灾应急预评估 .....	489
7.2.2	工程震害地震应急调查 .....	490
7.2.3	大震强余震结构反应观测 .....	490
7.2.4	烈度评定方法改进研究 .....	492
7.2.5	针对地质灾害的应急救援技术装备 .....	492
<b>结语</b>	.....	<b>493</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>493</b>
<b>附录</b>	.....	<b>494</b>
附录A	九寨沟7.0级地震现场工作简报 .....	494
附录B	九寨沟7.0级地震发表内容 .....	524

# 第1章 地震基本概况

根据大量现场调查和观测数据,2017年8月8日九寨沟地震灾害可归纳为如下几个基本特点:

一是震级大、震源深。本次地震震级达到7.0级,但震源偏深,达到20 km。地震影响范围除四川省外,还包括甘肃省部分地区。但重灾区除景区人口集中外,其他区域村寨稀疏,总体人口密度较低,地震所造成的人员伤亡远低于云南丽江7.0级、青海玉树7.1级、四川芦山7.0级、云南鲁甸6.5级地震等。

二是工程抗震设防水平高。九寨沟县及附近区域设防烈度为Ⅷ度,震区房屋建筑抗震性能总体较好,特别是经过汶川地震恢复重建后的新建建筑达到了抗震设防要求,此次地震结构震害轻。四川省地震、住建等有关部门近年来加强了农村民居抗震设防管理和指导,从建筑设计、工匠培训、宣传教育等方面做了大量扎实工作,在这次地震中充分显现了成效。景区及城镇居民自建建筑物也多采用了与结构类型相匹配的抗震构造措施,加之乡村传统民居多采用木构架房屋,抗震性能较强,房屋倒塌和严重损毁的比例很低,有效减少了人员伤亡。

三是九寨沟景区损失大。地震对九寨沟诺日朗瀑布、火花海等旅游景观和旅游基础设施造成较严重破坏,对当地自然景观和生态环境造成较大影响,对四川全境旅游业造成重创。

四是地震地质灾害突出。震区属于高山峡谷区,地震引发的次生地质灾害较为严重,导致人员伤亡和部分道路交通中断,增加了救援和人员转移安置难度。

## 1.1 地震参数

据中国地震台网中心测定,四川九寨沟7.0级地震发生在北京时间2017年8月8日21时19分46秒,震中位于阿坝州九寨沟县(东经103.82°、北纬33.20°),震源深度20 km,面波震级 $M_s$ 7.0,矩震级 $M_w$ 约6.5,走滑型为主,震源机制解为:断层节面1走向326°/倾角62°/滑动角-15°;节面2走向64°/倾角77°/滑动角-151°。震中距离九寨沟县城35 km,距阿坝州210 km,距成都市290 km,距甘肃陇南市100 km。四川、甘肃、青海、宁夏、陕西多省震感明显,局部地区震感强烈。

据美国地质调查局(USGS)所给出的此次地震的基本参数为:发震时间为世界标准时(UTC)2017年8月8日13时19分49.540秒,震中位置为东经103.855°、北纬33.193°,震源深度9 km( $\pm 1.7$  km),1131台地震仪测定面波震级 $M_s$ 6.8(误差0.015),52台地震仪测定矩震级 $M_w$ 6.5(误差0.043)。这是一次欧亚板块内部浅层走滑破裂的结果,震源机制解为:断层节面1走向246°/倾角57°/滑动角-173°,节面2走向153°/倾角84°/滑动角-33°。

根据中国地震局地球物理研究所陈运泰院士研究小组对震源破裂过程的反演结果(图1-1),此次地震的破裂过程持续了15 s左右,包括两次破裂:第一次破裂发生于0~10 s,位于震中附近,最大滑动量为0.4~0.5 m,最大滑动速率约为0.1 m/s;第二次破裂发生于10~15 s左右,位于走向方向上距震中20~30 km处,最大滑动量为0.1~0.2 m,最大滑动速率约为0.1 m/s。



2017-08-08 13:49协调世界时 (2017-08-08 21:49北京时间)  
震中位置: 33.217°N, 103.843°E, 震源深度: 10 km,  
矩震级  $M_w$  6.5

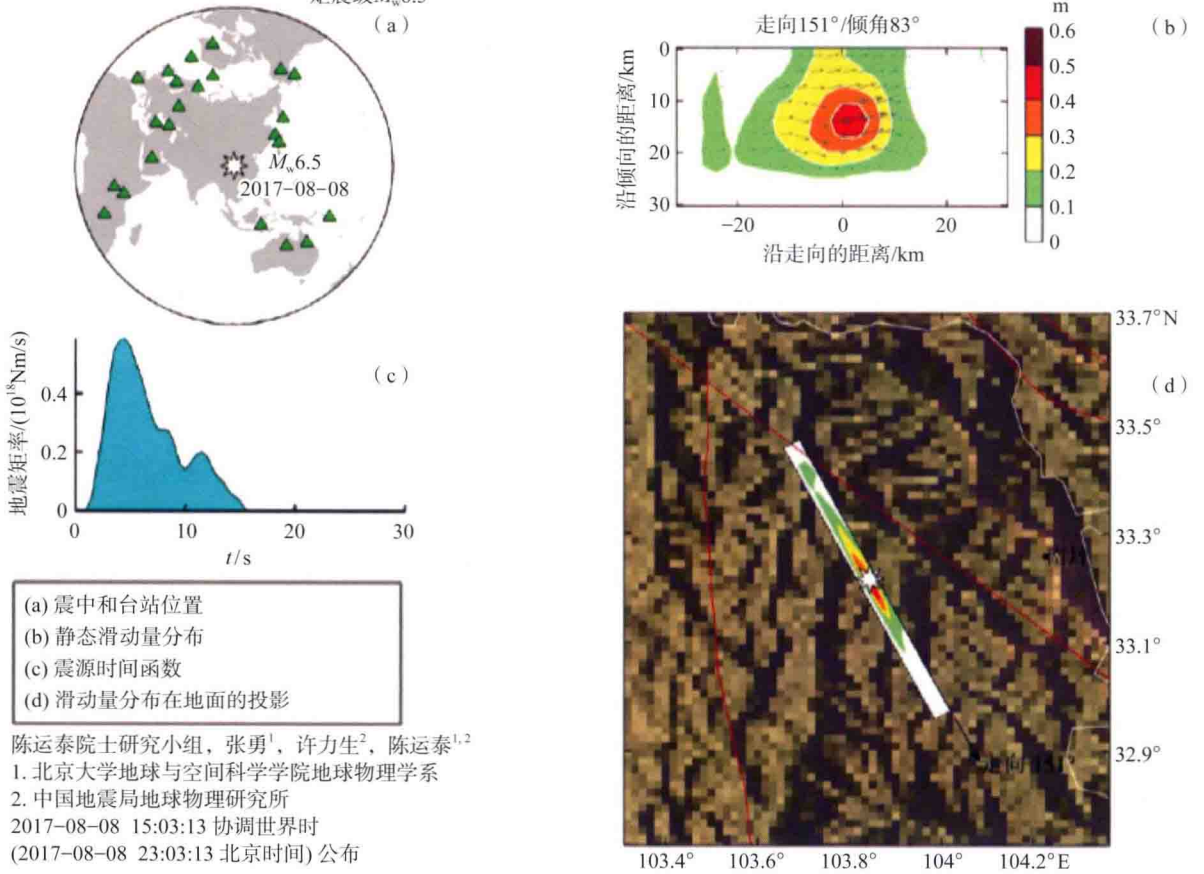


图 1-1 震源破裂过程反演结果

张旭等在快速响应的基础上, 重新筛选远场地震波形资料, 并收集覆盖震中区的 InSAR 资料, 对主震的震源破裂过程重新进行了反演分析。远场地震资料和近场 InSAR 资料联合反演结果 (图 1-2) 显示, 此次地震破裂持续时间约 15 s, 可以分为两次事件, 第一次事件持续时间不到 10 s, 但释放了大部分标量地震矩; 第二次事件持续 5 s 左右, 释放总标量地震矩约  $6.61 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$ , 相当于矩震级  $M_w$  6.5, 最大滑动约 1.0 m。此次地震的破裂区可分为两个主要的凹凸体: 一个较大, 距起始破裂点较近, 从起始破裂点北西较深的位置延展到起始破裂点南东较浅的位置, 可能破裂到了地表, 主要以走滑为主 (总体滑动角约为  $-14.0^\circ$ ); 另一个凹凸体较小, 距起始破裂点较远, 位于起始破裂点北西约 15 km 且 6 km 深处, 正滑分量非常明显 (总体滑动角约为  $-52.8^\circ$ )。认为此次地震起始于震源位置, 首先向北西和浅部破裂, 然后向深部和南东方向扩展, 最后终止于北西较远的凹凸体和南东较浅位置。

据中国地震台网中心测定, 截至 2017 年 8 月 18 日 9 时 00 分共记录到地震总数为 5020 次 (余震总数 5019 次)。其中 7.0 ~ 7.9 级地震 1 次, 6.0 ~ 6.9 级地震 0 次, 5.0 ~ 5.9 级地震 0 次, 4.0 ~ 4.9 级地震 3 次, 3.0 ~ 3.9 级地震 28 次。其中最大余震为 8 月 9 日 10 时 17 分四川阿坝州九寨沟县 4.8 级。

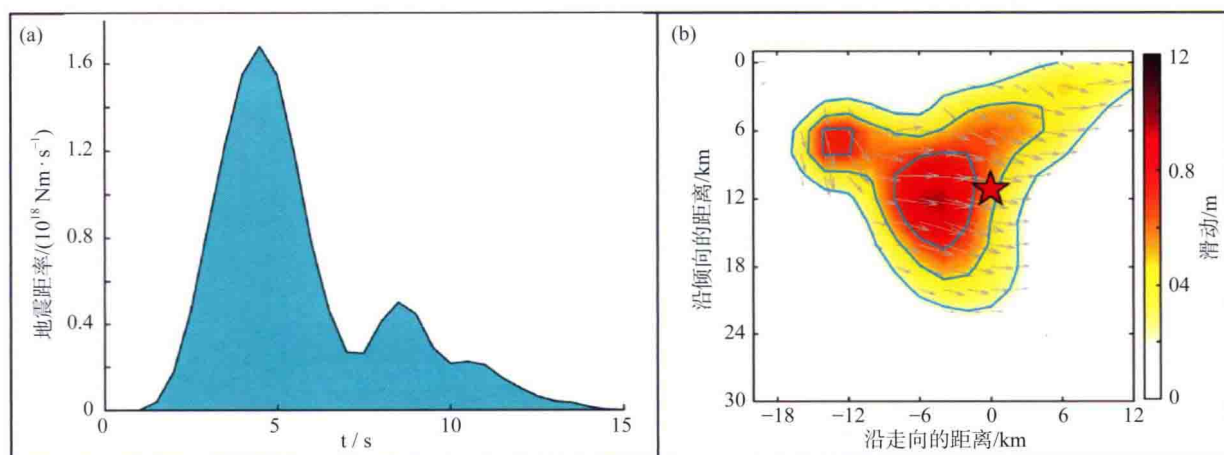


图 1-2 基于地震资料和 InSAR 资料的联合反演结果 (张旭等, 2017)

## 1.2 发震构造

图 1-3 可见, 九寨沟 7.0 级地震及其余震序列的震中均位于岷山地块 (也称岷山隆起、岷山断块), 属于青藏高原东北部向四川盆地过渡区域, 区域应力场、构造演化历史等复杂。区内有 NW 向塔藏断裂带, SN 向岷江断裂带、虎牙断裂带, EW 向雪山梁子断裂带等多个方向的断裂发育, 通过搜集、整理区域地震构造相关文献 (李建中, 1988; 易明初, 1995; 周荣军等, 2000; 黄仕华, 2000; 郭建强等, 2000; 曹俊等, 2001; 曹俊等, 2002; 唐文清等, 2004; 李月, 2008; 胡朝忠, 2011; 乔宝成, 2011; 张军龙等, 2012; 孟文等, 2013; 付国超等, 2017; 易桂喜等, 2017), 将主要活动断裂带特征列于表 1-1, 简述如下。

表 1-1 区域主要活动断裂带特征

断裂带名称	走向	倾向	倾角	活动性质
塔藏断裂带	W	SW	50°—90°	左旋走滑兼逆冲分量
岷江断裂带	近NS	NW	50°—80°	左旋走滑兼逆冲分量
虎牙断裂带	NNW	SW	50°	左旋走滑兼逆冲分量
雪山梁子断裂带	EW	N	60°—80°	逆冲

### 1.2.1 塔藏断裂带

塔藏断裂带作为巴颜喀拉块体的东北边缘断裂带, 为东昆仑断裂带东延的分支, 总体呈 NW 走向, 西起若尔盖盆地北缘—若尔盖县罗叉村北, 向东延伸至下黄寨村, 再向东南偏转依次经过东北村、塔藏、九寨沟沟口至马家磨, 向东直至沙尔里东南, 总体呈近反 S 型。沿断裂自西向东表现为以纯左旋走滑运动向以垂向运动占比例越来越大的转换。断裂带发育近 SN 向、NW 向及 NE 向的次级断裂。

以下黄寨、东北村为界, 根据断裂带走向的变化, 分为三段, 分别为罗叉段、塔藏段和马家磨段。马家磨段走向为 NWW, 自西向东, 始于漳扎镇、在九寨沟沟口与荷叶断裂相交, 而后继续向东南方向延伸。倾向 NE, 倾角 40°~65°, 全长近 60 km。

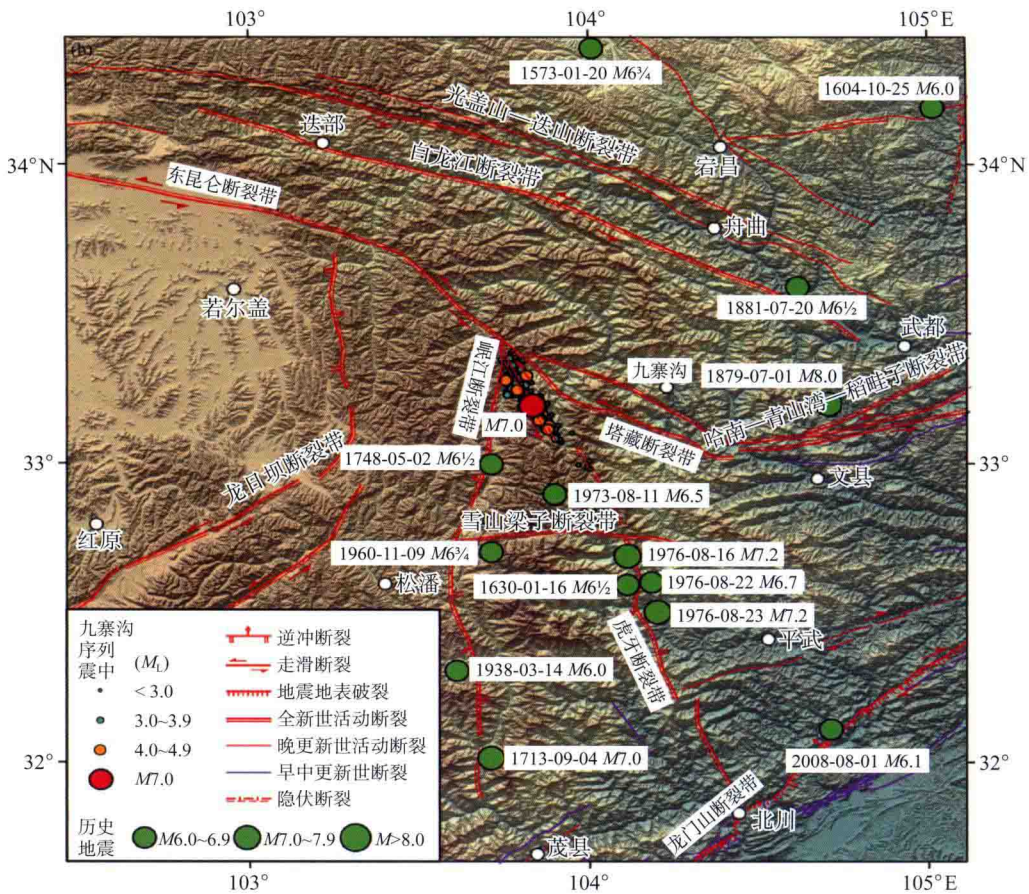


图 1-3 区域构造与历史地震震中分布<sup>[2]</sup>

九寨沟口西南方向约 10 km 的荷叶断裂形成于中印支期，是白马弧形构造带的边界断裂，被九寨沟断裂、干海子断裂横错明显，分为三段，断面与地层展布方位近一致，构造行迹模糊。北西段断裂在三叠纪地层中穿过，行迹不明显，断裂面倾向SW184°，倾角50°~70°，厚约5 m的断裂破碎带，带内压扭性角砾岩和碳化断层泥发育。断层角砾岩具滚动、压扁迹象，定向排列，其最大扁平面与断面几乎一致。两盘岩层压碎结构、碎粒化现象明显，尖棱挤压褶皱，拖拽褶曲和劈理裂隙发育。拖拽褶皱轴倾伏向NW50°，倾伏角60°，劈理裂隙走向NW44°，倾向SW76°。这些特征说明，北西段具有显著的压扭性特征及顺时针扭动；中段，表现为波状弯曲，总体呈NWW—SEE向；南东段走向NW50°，断裂面倾向SW220°，倾角50°，与地层产状几乎一致。总体表现为由南西向北东逆冲推覆。

### 1.2.2 岷江断裂带

广义上的岷江断裂带主要由东、西两条断裂组成，东侧为岷江断裂，西侧为牟尼沟—羊洞河断裂，两断裂带组成宽约20 km推覆构造带，构成了摩天岭地块和松潘—甘孜造山带的分界。岷江断裂是在岷江推覆构造带前缘的基础上发展起来的一条全新世活动断裂，航片解译及野外地质考察结果表明，岷江断裂带具有羽列组合的特点，由3条形迹连续的次级断裂呈相距1 km左右的右行羽列组成的近SN向、倾向NW、倾角不定、长约170 km的逆冲—走滑断裂，显示了由西向东的冲断作用，并具有一定的走滑运动性质。

岷江断裂带以川主寺、校场为界可分为三段，北段起于弓嘎岭以北，为塔藏断裂所截断，向南经弓嘎岭、卡卡沟、朶米寺、川盘至川主寺，主断层产状为 $N45^{\circ}E$ ，倾向NW，倾角 $40^{\circ}$ ，具逆冲断层的性质，历史上曾发生过1748年 $6\frac{1}{2}$ 级地震和1960年 $6\frac{3}{4}$ 级地震；中段北起于川主寺，向南延伸经松潘、安宏、镇江关、金瓶岩至太平木耳寨以南消失，显示断层挤压、逆冲的活动特征，有史料记载以来，断裂中段发生过数次5级以上中强地震，最大地震为松潘南1938年6级地震，表明断裂现今仍具有一定的活动性；南段北起校场，向南延伸经叠溪、马老顶、石大关至畜牧铺附近消失，历史上发生过多地震，最大地震为1713年叠溪7级地震和1933年叠溪 $7\frac{1}{2}$ 级地震，断裂具有长期的强震活动历史。晚第四纪以来，岷江断裂带的平均垂直滑动速率为 $0.37 \sim 0.53 \text{ mm/a}$ ，平均左旋滑动速率为 $1 \text{ mm/a}$ 。

### 1.2.3 虎牙断裂带

虎牙断裂带是岷山地块的东边界，与岷江断裂带走向近于平行，与EW向雪山梁子断裂带斜接。断裂南端始于平武县的银厂沟一带，向北经虎牙关、丰岩堡、火烧桥、小河至龙滴水，于龙滴水错切雪山断裂后沿NW向在三道片附近的褶皱断续出露。从一系列中强震沿断裂总体展布方向呈NW向条带状分布的特征来看，该断裂可能向北隐伏延伸。断裂地表出露长达60 km。断裂总体走向NNW，表现了一定的枢纽性、显压性特征。以小河为界大致分成南北两段，北段断裂走向由NNW转向SN，倾向E，倾角 $80^{\circ}$ 左右；南段走向由SN向SE向偏转，倾向SW，倾角由北往南自 $70^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。

晚第四纪以来，虎牙断裂的新活动十分强烈，在航卫片上表现出清晰的线性特征，沿断裂线可以见到边坡脊、断层陡坎、断错冲沟、洪积扇及河流阶地等断错地貌现象。根据1973年黄龙地震宏观震中位于虎牙断裂北西延长线上和1976年松潘地震余震沿这个方向往北迁移的事实判断，虎牙断裂晚第四纪以来表现为近EW向区域构造应力作用下的具有左旋走滑挤压特征的全新世活动断裂，具有明显的分段性，以走滑运动为主，很可能还在沿北西延长线的扩展。

### 1.2.4 雪山梁子断裂带

雪山梁子断裂带西端被岷江断裂带所截，与虎牙断裂带在黄龙东斜接，为九寨沟褶皱推覆构造岩片与雪宝顶褶皱推覆构造岩片的分界，是一个构造混杂岩带。断裂总体近EW走向呈帚状撒开，其西端被岷江断裂截接，断裂带内部构造复杂，发育有一系列的NE、近SN和NW向的次级断裂构造，均为逆冲断层，中更新世晚期以来已不活动。

在震后快速响应阶段，中国地震局地质研究所推测发震构造为塔藏断裂南侧分支和虎牙断裂北段，区域地震构造如图1-4。

通过震后科学考察，可以排除塔藏、岷江断裂作为发震构造的可能性。易桂喜等（2017）和季灵运等（2017）推测发震构造为位于塔藏断裂和岷江断裂间的一条NW—SE向无名断裂，野外地质考察将其命名为树正断裂，如图1-5。震源机制解揭示，树正断裂以左旋走滑为主，走向约 $152^{\circ}$ ，近SE，倾向SW，倾角约 $70^{\circ}$ ，该断裂属于东昆仑断裂带东端分支断层之一，无法完全排除是否为虎牙断裂向NW方向延伸的隐伏构造。徐锡伟等（2017）根据地震烈度等震线长轴优势方位、地震崩塌和滑坡集中带、重新定位余震密集条带和主震震源机制解等，判断九寨沟地震属陡倾角左旋走滑型地震，发震断层为NNW向虎牙断裂北段。

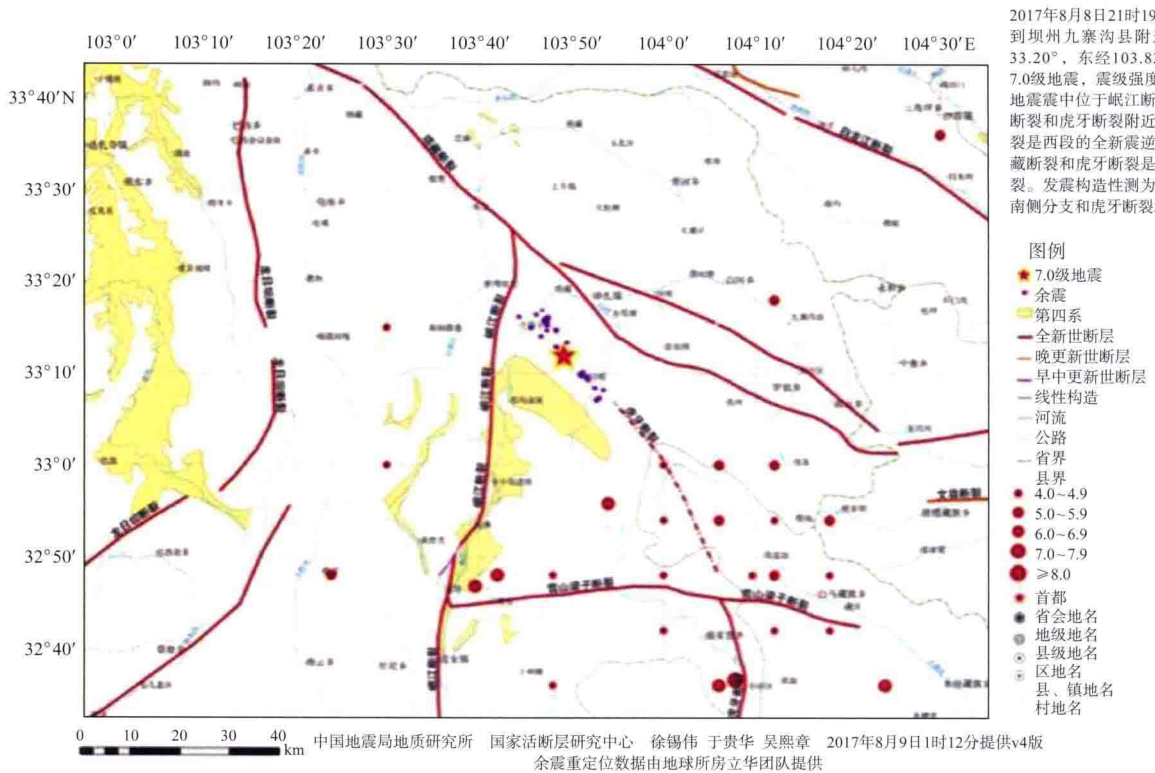


图 1-4 区域地震构造图

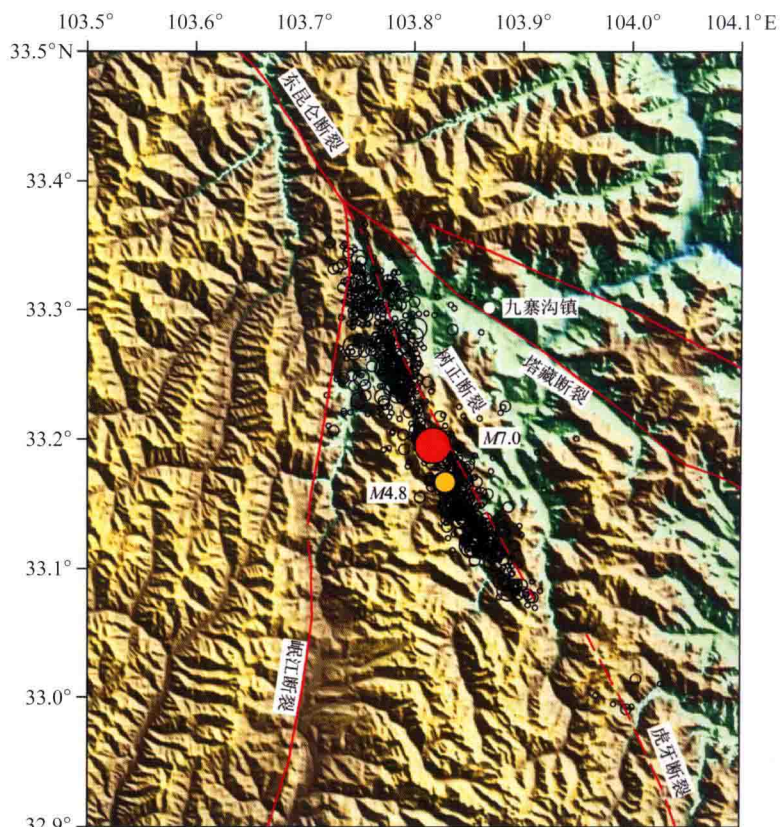


图 1-5 发震断层、主震及余震重新定位震中分布 (据易桂喜等, 2017)

## 1.3 强地震动

国家数字强震动观测台网67个自由场固定台获取九寨沟7.0级地震主震强震动观测记录共计67组(201条),台站场地类型全部为土层。

截至2017年9月7日,国家数字强震动观测台网自由场固定台和流动台共获取了36次余震强震动观测记录120组(360条)。余震记录中3~4级23次,4~5级12次,5级以上1次。

九寨沟地震主震及余震分布图(如图1-6所示),获取强震动记录固定台站及流动台站分布图如图1-7所示。本次地震获取记录的主余震地震目录及记录组数如表1-2所示。

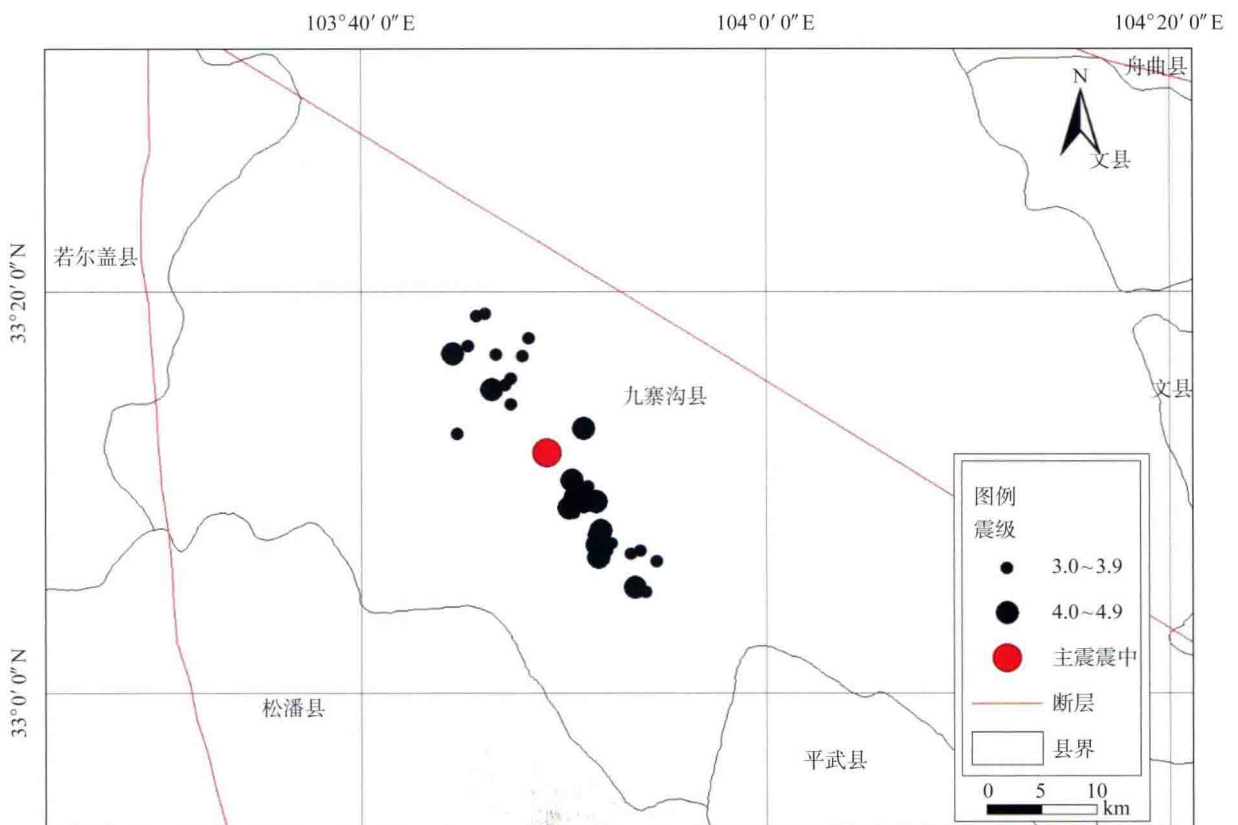


图 1-6 九寨沟地震主震及余震分布图

### 1.3.1 主震数据处理

67组主震强震动观测记录中,其中四川省22组,甘肃省14组,陕西省25组,宁夏回族自治区6组。其中九寨章扎台震中距最小,为11.4 km,获取到的记录加速度峰值超过1900 Gal,其记录较为特殊,可能为台站所处的特殊场地所致,记录尚未发布。九寨百河强震台震中距30.5 km,东西、南北、垂直向加速度峰值分别为-129.5、-185.0、-124.7 cm/s<sup>2</sup>,获取加速度记录台站及记录分析结果见表1-3、表1-4。地震峰值加速度分布图如图1-8所示,地震峰值速度分布图如图1-9所示,九寨百河强震台站强震记录图如图1-10所示,加速度反应谱图如图1-11所示,傅里叶幅值谱如图1-12所示。

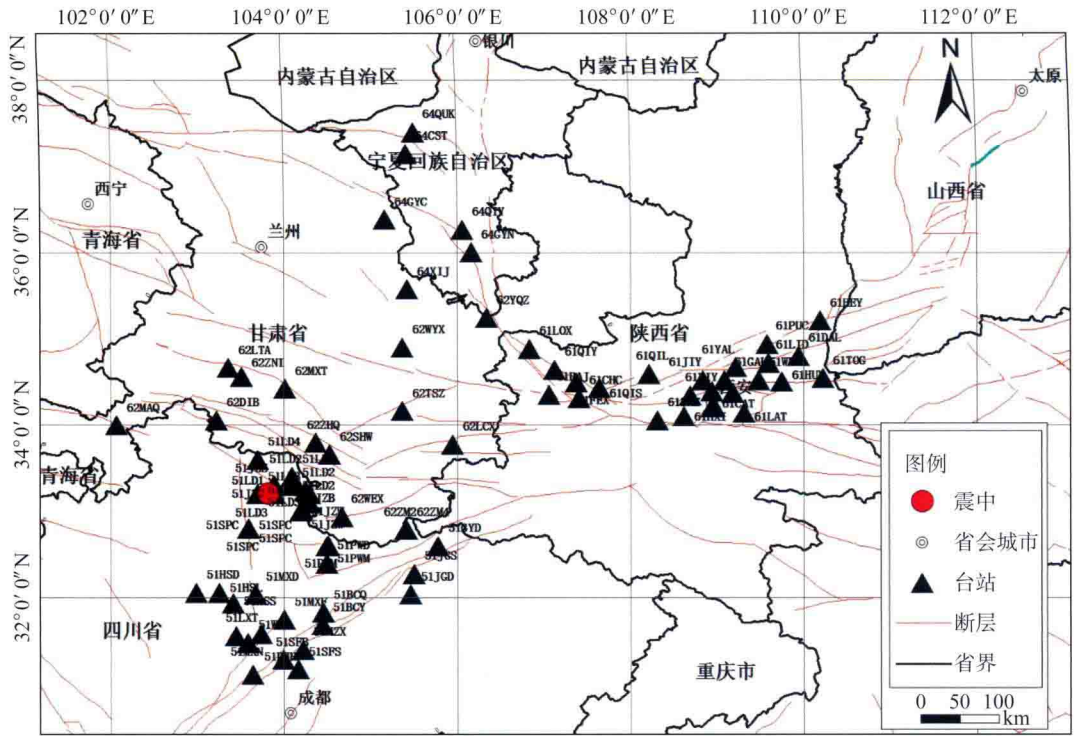
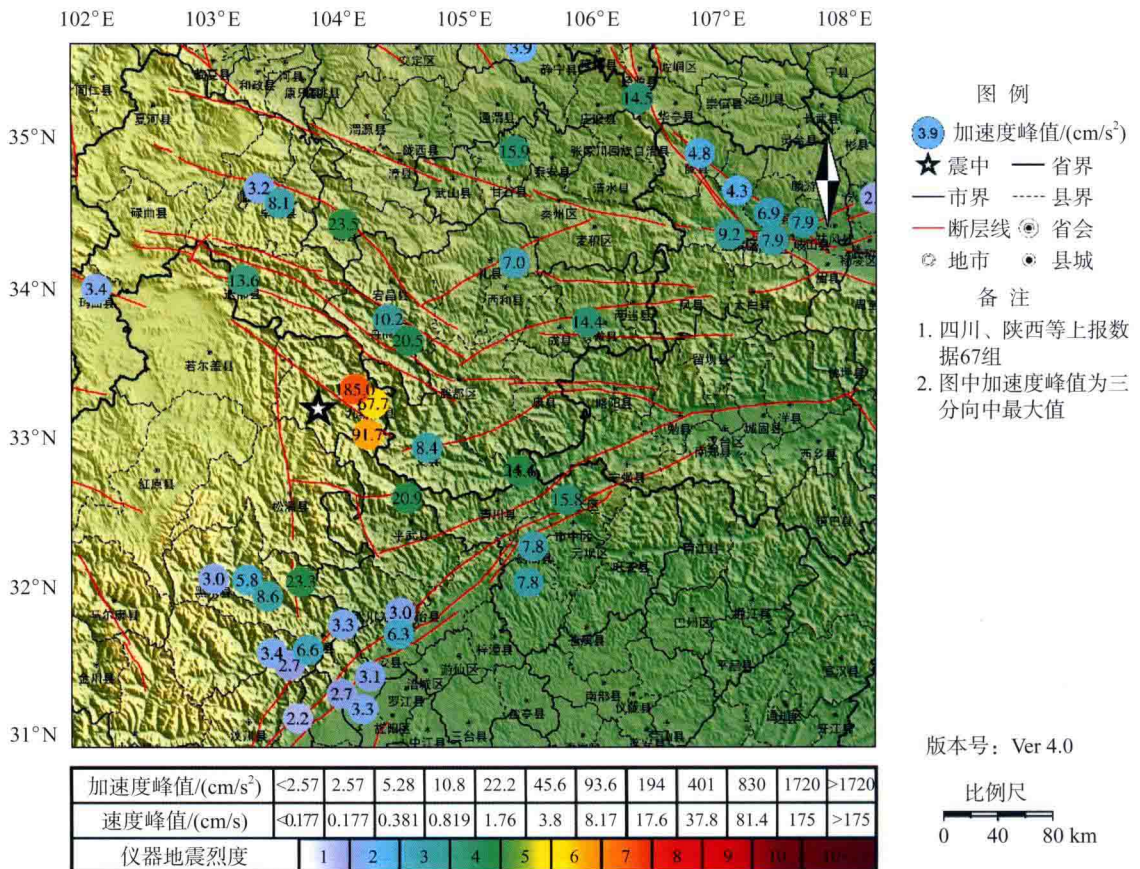


图 1-7 九寨沟地震获得记录固定台及流动台分布图



制图单位：中国地震局工程力学研究所 国家强震动台网中心 2017年8月9日14时

图 1-8 四川九寨沟7.0级地震峰值加速度分布图（单位：cm/s<sup>2</sup>）