

# 《四川地震》 第6届编辑委员会

主 编：雷建成

副主编：杜 方 易桂喜 周荣军

编 委：（按姓氏笔画排序）

马胜利 车 时 王 彬 王兰民 王庆良 王志鹏 王绪本  
王翠芳 龙 锋 刘 杰 孙 玮 孙柏涛 朱 航 乔 森  
何 强 何玉林 李 勇 李永强 杨永林 杨兴国 苏金蓉  
吴微微 吴建春 张茂军 张建国 张致伟 陈维锋 周 玮  
金 星 官致君 赵 永 胡 斌 徐 锐 郭 勇 郭红梅  
姚运生 顾林生 龚 宇 黄丁发 黄剑涛 韩 进 彭长虹  
廖 华 熊 峰 戴仕贵

四川地震 二〇二三年 第一期 总第一八六期

# 四川地震

Sichuan Dizhen EARTHQUAKE RESEARCH IN SICHUAN



四川地震 Sichuan Dizhen  
(季刊, 1977年创刊)  
2023年第1期 (总第186期) 2023年3月

EARTHQUAKE RESEARCH IN SICHUAN  
(Quarterly, Started in 1977)  
No.1, (Series No.186) March 2023

主管单位：四川省地震局  
主办单位：四川省地震局  
编辑出版：《四川地震》编辑部  
主 编：雷建成  
发行订购：《四川地震》编辑部  
地 址：四川省成都市人民南路三段29号  
邮政编码：610041 电话号码：028-65270607  
国外发行：中国国际图书贸易集团有限公司  
北京海淀区车公庄西路35号 100048  
国外发行代号：QR733  
排版印刷：成都蜀通印务有限责任公司

Supervisor: Sichuan Earthquake Agency  
Sponsor: Sichuan Earthquake Agency  
Editor: 《Earthquake Research in Sichuan》 Edit Office  
Editor-in-chief: LEI Jiancheng  
Distributor: Edit Office of ERS  
Address: No.29, 3rd Section of South Renmin Road,  
Sichuan Chengdu 610041, China  
Distributor Abroad: China International Publishing  
Group Ltd.Co.  
Printer: Chengdu Shutong Printing Ltd. Co.

公开发行 中国标准连续出版物号：ISSN 1001-8115  
CN 51-1163/P

国内定价：10.00元/册



2023年3月  
第1期

四川省地震局 主管主办

《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊  
《中国学术期刊综合评价数据库》源期刊  
《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

《中国期刊全文数据库》收录期刊  
《中文科技期刊数据库》入编期刊  
《万方数据数字化期刊群》入编期刊

2023 年第 1 期

# 四川地震

(季刊)

总第 186 期

## 目 次

2013 年四川芦山  $M_s7.0$  地震仪器烈度与调查烈度对比分析

..... 杜 方,李 俊,江 鹏,朱永莉,李萍萍,苏金蓉,梁明剑,吴 江(1)

巴颜喀拉块体内部 NW 向主要断裂研究新进展

..... 梁明剑,周文英,董 云,廖 程,左 洪,陈 翰,赵国华(12)

龙门山前山断裂中段古地震研究 ..... 官云彬,徐 琳,陈永东,秦宇龙,庞仁俊,刘大明,李 海(18)

基于跨断层水平形变资料的鲜水河断裂现今活动分析 ..... 唐 伟,苏 琴,李菲菲,彭丽媛,竹任国(26)

利用重复地震探究重庆荣昌地区地壳介质波速变化 ..... 汪 建,李光科,杨亚运,张 巡(32)

河北怀来台氦气集气装置改进及实验数据分析 ..... 王锐锋,张 帆,只 楠,程德庆,姜佳宁(37)

2022 年 4 月 6 日四川兴文  $M_s5.1$  地震震害特征及成因分析 ..... 代友林,杨璐遥,刘 洋,梁远玲(42)

.....  
2020 年第 4 期《鲜水河断裂磨西段新发现地震地表破裂带初步研究》更正申明 ..... (25)

主 编 雷建成

责任编辑 周文英

编 辑 魏娅玲 梁明剑

期刊基本参数:CN 51 - 1163/P \* 1977 \* q \* A4 \* 48 \* zh \* P \* ¥10.00 \* 1000 \* 7 \* 2023 - 03

电子信箱:scdz@scdzj.gov.cn(备用邮箱:scdzbjb@163.com)



# EARTHQUAKE RESEARCH IN SICHUAN

(Quarterly, Started in 1977)

No. 1 2023 Series 186

## CONTENTS

Comparison and Analysis of Instrument Intensity and Investigation Intensity of the $M_s$ 7.0 Lushan Earthquake in 2013 ..... DU Fang, LI Jun, JIANG Peng, ZHU Yongli, LI Pingping, SU Jinrong, LIANG Mingjian, WU Jiang(1)	
New Progress of Research on NW-trending Active Faults within the Bayan Har Block ..... LIANG Minjiang, ZHOU Wenying, DONG Yun, LIAO Cheng, ZUO Hong, CHEN Han, ZHAO Guohua(12)	
Research on Paleoearthquakes along the Middle Section of the Front-Range Fault of Longmenshan, China ..... GUAN Yunbin, XU Lin, CHEN Yongdong, QIN Yulong, PANG Renjun, LIU Daming, LI Hai(18)	
Analysis of the Current Activity on the Xianshuihe Fault from Cross-fault Horizontal Deformation Data ..... TANG Wei, SU Qin, LI Feifei, PENG Liyuan, ZHU Renguo(26)	
Exploring Velocity Variation of Crustal Media in Rongchang Area of Chongqing Municipality by Using Repeated Earthquakes ..... WANG Jian, LI Guangke, YANG Yayun, ZHANG Xun(32)	
Improvement of Helium Gas Collecting Device and Experimental Data Analysis at Huailai Seismic Station ..... WANG Ruifeng, ZHANG Fan, ZHI Nan, CHENG Deqing, JIANG Jianing(37)	
Analysis of Damage Characteristics of the Xingwen $M_s$ 5.1 Earthquake in Sichuan Province on 6 April, 2022 ..... DAI Youlin, YANG Luyao, LIU Yang, LIANG Yuanling(42)	
~~~~~	
Correction Statement of “Preliminary Study on Newly Discovered Seismic Surface Rupture Zone in Moxi Section of Xianshuihe Fault”, Issue 4, 2020 .....	(25)

*Managing Editor for this issue : WEI Yaling, LIANG Mingjian*

*Translator for English Abstract : WU Jiang*

*E – mail : scdz@scdzj.gov.cn, scdzjb@163.com*

# 2013年四川芦山 $M_s7.0$ 地震 仪器烈度与调查烈度对比分析

杜方<sup>1</sup>,李俊<sup>1,2</sup>,江鹏<sup>1</sup>,朱永莉<sup>1</sup>,李萍萍<sup>1</sup>,苏金蓉<sup>1</sup>,梁明剑<sup>1</sup>,吴江<sup>1</sup>

(1.四川省地震局,四川成都 610041;2.浙江省地震局,浙江杭州 310000)

**摘要:**基于2013年四川芦山 $M_s7.0$ 地震宏观调查点、调查烈度和强震仪记录数据,采用四川省地震局强震动监测技术组计算得到的各台仪器烈度值,绘制了芦山 $M_s7.0$ 地震宏观调查点与调查烈度等震线和仪器烈度等值线分布图,分析了芦山 $M_s7.0$ 地震的仪器烈度与调查烈度的对应关系。结果表明:仪器烈度与调查烈度有较好的对应关系,仪器烈度Ⅵ度点在调查烈度Ⅵ度以上区域总体占比为88.24%,仪器烈度Ⅶ度点在调查烈度Ⅶ度以上区域内总体占比为81.82%;仪器烈度的等值线高值范围可较好展示出地震灾害的程度;仪器烈度区的空间分布特征可表征芦山 $M_s7.0$ 的发震断裂的控制作用,仪器烈度的等值线区总体呈现沿龙门山断裂带方向相对于垂直方向衰减慢;仪器烈度的等值线区发震断裂上盘影响范围相对发震断裂下盘影响范围大;仪器烈度分布与调查烈度分布既有对应关系又存在差异,这在震后短时间内灾区的震灾信息尚不清楚的情况下,能够快速对可能的震害涉及范围、人员伤亡分布、经济损失和生命线工程等损失作出预估,仪器烈度分布可以为应急救援决策、救灾方案制定和救灾力量部署等工作提供重要依据。

**关键词:**芦山 $M_s7.0$ 地震;调查烈度;仪器烈度;强震动;地震灾害

**中图分类号:** P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8115(2023)01-0001-011

**DOI:** 10.13716/j.cnki.1001-8115.2023.01.001

2013年4月20日8时2分,四川省雅安市芦山县发生 $M_s7.0$ 地震(刘杰等,2013)。在龙门山断裂带上,2008年发生四川汶川 $M_s8.0$ 地震,时隔5年后再发生2013年芦山 $M_s7.0$ 地震。研究显示,芦山 $M_s7.0$ 与汶川 $M_s8.0$ 地震有发震构造上的联系,但两次地震是相对独立的地震事件(杜方等,2013)。中国地震台网测定芦山 $M_s7.0$ 地震的震源深度为13 km,震中距离芦山县城16.8 km,距离雅安市区约35.5 km,距成都市约111 km。经震后现场调查确定:芦山 $M_s7.0$ 地震宏观震中( $30^{\circ}17'N, 103^{\circ}02'E$ )位于芦山县太平镇、宝盛乡至芦阳镇向阳村一带,极震区烈度为Ⅸ度,调查烈度等震线形状呈椭圆形,长轴走向为NE-SW向,地震烈度Ⅵ度及其以上区域总面积为18 682 km<sup>2</sup><sup>①</sup>,地震影响范围东北自成都市大邑县的新场镇李家山村,西南至凉山彝族自治州甘洛县的两河乡,西北自甘孜藏族自治州泸定县的岚安乡,东南至眉山市丹棱县的杨场镇。

地震现场调查得到的烈度通常称之为宏观地震烈度,长期以来在地震工程、抗震防灾等领域发挥作用(孙柏涛等,2019),为区分地震现场的调查宏观地震烈度与强震动记录计算的仪器烈度,将考察获取的宏观地震烈度称为调查烈度。芦山 $M_s7.0$ 地震发生后,中国地震局立即启动Ⅰ级应急响应,组织开展了地震现场的烈度调查评定与灾害调查工作。按照《地震现场工作第三部分:调查规范》(GB/T 18208.3—2011),通过抽样、专项调查核实取得了丰富的实地野外资料,绘制出芦山 $M_s7.0$ 地震调查烈度分布图,较好呈现了芦山 $M_s7.0$ 地震造成的灾害损失和影响范围,中国地震局(2013)公布了芦山 $M_s7.0$ 地震的调查烈度图。

芦山 $M_s7.0$ 地震发生前,中国地震局实施了“中国数字强震动观测台网”建设项目,在中国大陆陆续建设固定数字强震台,为利用地震动加速度记录计算仪器烈度打下了基础。通过强震台网计算各台仪器烈度和

收稿日期:2022-10-19;修回日期:2022-12-30

基金项目:四川省紧急地震信息服务创新团队(201801)、地震科技星火计划项目(XH211103)、西藏拉萨地球物理国家野外科学观测站研究课题(NORSLS21-04)和地震动力学国家重点实验室开放基金课题(LED2020B02)共同资助。

作者简介:杜方(1959-),女,山西寿阳人,研究员,主要从事大地形变测量与地震预测方面的研究工作。E-mail:1289991429@qq.com。

通讯作者:李俊(1982-),男,浙江磐安人,高级工程师,主要从事地震监测和地震预测方面的工作。E-mail:4915218@qq.com。

<sup>①</sup>资料来源:中国地震局四川芦山 $M_s7.0$ 地震现场联合应急队,2013年4月28日,《2013年4月20日四川芦山 $M_s7.0$ 地震灾害损失评估报告》。

绘制仪器烈度等值线图,可望成为地震灾害影响程度和范围快速评估的有效途径和新手段。强震动仪器技术成熟,采样率能满足仪器烈度的计算要求,可为震后灾情快速评估、应急救援决策等提供重要科学依据。国内外有多种计算地震仪器烈度的算法,如日本气象厅采用有效峰值加速度(EPA)计算仪器烈度(Wong *et al.*, 1979);美国地质调查局的ShakeMap系统综合利用PGA和PGV确定仪器烈度(Wald *et al.*, 1999;李俊等, 2010);中国地震局工程力学研究所综合利用强震动的三要素和不同频率点的反应谱值,通过隶属度矩阵进行两级评定来确定仪器烈度(袁一凡, 1998);借鉴日本气象厅测定仪器烈度的思路,金星等(2013)采用“有效”峰值加速度(EPA)计算仪器烈度,并提出了仪器烈度的标准;王玉石等(2008)和Wang等(2013)利用强震动谱烈度与地震烈度的相关性来计算强震动记录对应的仪器烈度。

中国地震局于2015年3月1日颁布实施了《仪器地震烈度计算暂行规程》(中国地震局, 2015),形成了可遵循的中国的强震动记录计算仪器烈度的行业规范,该规程是暂行规程,需要在应用中积累资料进行完善。在“十五”期间,四川省地震局建成了由216个固定数字强震台和1个自贡地形影响台阵(8个台站)组成的四川数字强震台网,获得了较好的芦山 $M_s7.0$ 地震强震动记录。随着数字强震台网的建成运行,强震系统能通过强震动数据计算仪器烈度和快速绘制仪器烈度分布图。四川省地震局强震动监测技术组利用获取的芦山 $M_s7.0$ 地震的数字强震动记录资料,采用数字强震动记录计算出各台点仪器烈度。本文通过开展仪器烈度分布图与调查烈度图对比分析,研究调查烈度与仪器烈度的特征、契合和差异,深入探讨两者之间的差异因素,有利于不断提高仪器烈度与调查烈度的契合度,更好地发挥仪器烈度在地震应急工作中的快速、准确和有效科学评估地震灾害和影响范围的作用。

## 1 强震台网分布

强震台网能有效地获取地震影响区内的强震动记录。2010年12月改造完成后的四川地区强震台的供电故障和设备故障大幅下降,通信方式由原来的拨号传输改为3G无线网络传输,传输速率大幅提高,观测质量较之前有显著提升,四川省内主干断裂带及重点监视防御区的台网密度达到约1台/1 000 km<sup>2</sup>,强震监测能力得到了大幅度的增强。芦山 $M_s7.0$ 地震发生时,四川强震台网共有216个固定强震台(含12个停测的强震台,图1),其中195个强震台的强震仪工作正常,震中距200 km范围内有39个台站,100 km范围内有22个台站,且强震动监测站点分布合理。芦山 $M_s7.0$ 地震的发生造成了较长时间的通讯中断,宝兴县界内的4个强震台由于通信设备损毁导致信号中断;强震系统在处理强震数据时,由于强震仪器技术缺陷问题,还造成了52个强震台的主震数据丢失。

## 2 构造背景与历史地震

芦山 $M_s7.0$ 地震发生在巴颜喀拉地块东缘区域。巴颜喀拉地块是青藏断块区内的Ⅱ级断块,巴颜喀拉地块东缘区域是活动构造分布较集中的区域,地震活动强烈。主要的活动断裂有龙门山断裂带、岷江断裂、虎牙断裂等(唐荣昌等, 1993;邓起东等, 1994;周荣军等, 2006)。龙门山断裂带是巴颜喀拉地块与华南地块的接触带,与处于巴颜喀拉地块内的岷江断裂、虎牙断裂等活动断裂共同组成了巴颜喀拉地块东缘区域的裂构造环境。龙门山断裂带南起泸定、天全,向东北延伸经宝兴、都江堰、江油、青川等地进入陕西省勉县一带,全长约500 km,宽40~50 km,主要由4条逆冲断裂组成,自西北往东南分别为后山断裂、中央断裂、前山断裂和龙门山山前隐伏断裂。这4条主要断裂总体走向 $N45^\circ E$ ,倾向西北,倾角 $50^\circ \sim 70^\circ$ 。龙门山断裂带南段主要由耿达—陇东断裂、盐井—五龙断裂和大川—双石断裂组成,均具有晚更新世以来的强烈活动(李传友等, 2004;陈国光等, 2007)。据史料记载(孙成民等, 2010a, 2010b),龙门山断裂带的历史地震有1657年4月21日四川汶川 $M6^{3/4}$ 、1327年四川天全 $M7^{1/2}—7^{3/4}$ 、1958年2月8日四川茂汶—北川一带 $M_s6.2$ 和1970年四川大邑 $M_s6.2$ 地震。其中1327年四川天全 $M7^{1/2}—7^{3/4}$ 地震是否是龙门山断裂的破裂事件尚存争议。2008年5月12日发生汶川 $M_s8.0$ 地震和余震(见图2中蓝色标注地震),且其 $M_s > 6.0$ 余震沿龙门山断裂向北东展布,延伸至青川北东。2013年4月20日发生芦山 $M_s7.0$ 地震(见图2中红色标注地震)。



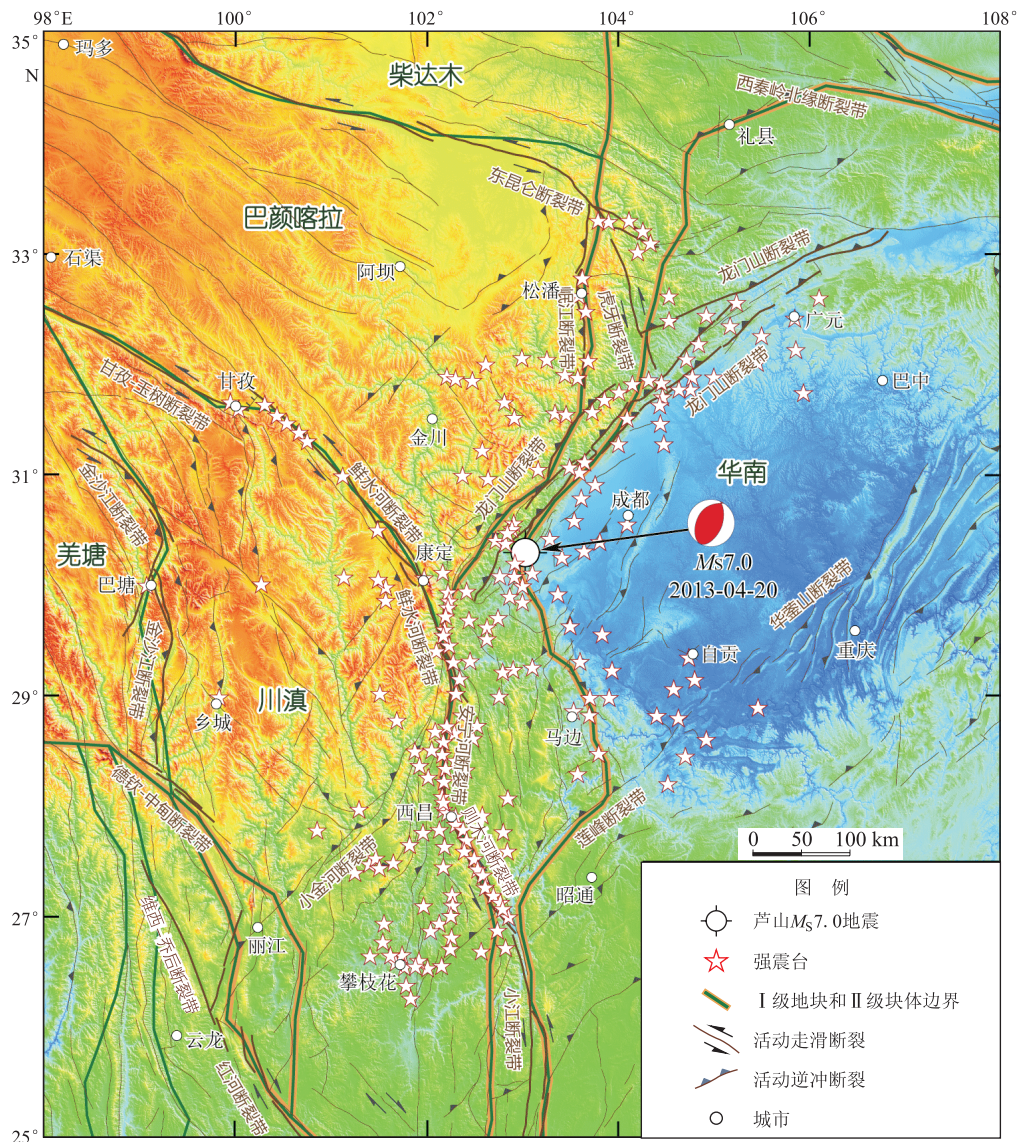


图1 四川地区强震台站的分布

关于1879年8月1日武都南 $M8$ 地震的发震机理,刘白云等(2012)认为青藏块体原来由西向东的推挤作用,在受到SN向构造带阻挡后,这种推挤作用沿SN向构造带转换为以剪切作用为主的结果。在这一剪切力的作用下,在秦岭与南北构造带交会的武都南地区形成应力集中区,最终孕育此次 $M8$ 大地震。

在岷江断裂和虎牙断裂发生过一系列 $M6.0 \sim 6.9$ 地震和1976年松潘、平武间两次 $M7.2$ 地震(孙成民等,2010)。岷江断裂北段发生1748年5月2日松潘漳腊北 $M6\frac{1}{2}$ 和1960年11月9日松潘漳腊 $M6\frac{3}{4}$ 地震,岷江断裂南段发生1713年9月4日茂县叠溪 $M7$ 和1933年8月25日叠溪 $M7\frac{1}{2}$ 地震。虎牙断裂发生1976年8月16、23日松潘—平武间两次 $M7.2$ 地震。

### 3 调查烈度与仪器烈度对比分析

#### 3.1 地震的调查烈度

芦山 $M_s7.0$ 地震发生后,中国地震局在现场成立地震现场联合应急队,由中国地震局机关及12个直属单位和19个省级地震局等共31个单位353名人员组成。地震现场联合应急队会同中国地震局组织的增援专家,累计出队(组)调查270多组次,行程5万多千米,对天全、宝兴、芦山等30多个县(市)420多个居



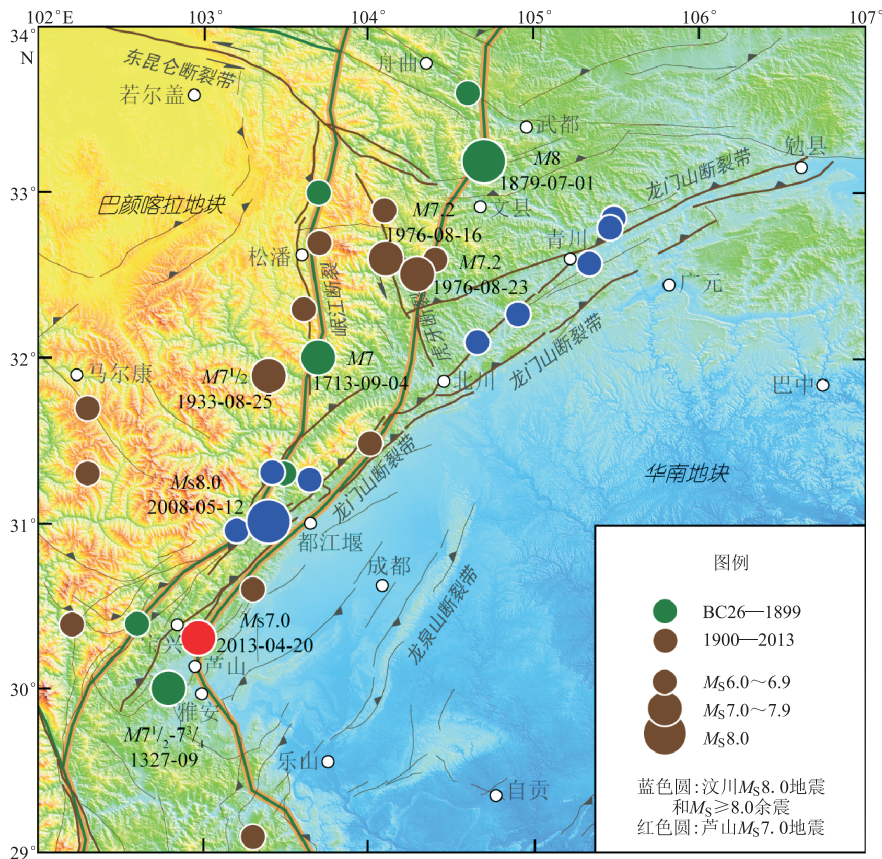


图2 龙门山区域  $M_s \geq 6.0$  历史地震分布

民点(街区)、260多个抽样调查点进行房屋、生命线工程、企业和其它行业的破坏调查,对雅安、芦山、名山、天全4个城市街区(小区)房屋破坏情况进行调查。灾害评估采用大范围随机抽样方法对房屋破坏程度进行调查,抽样点基本均匀地分布在灾区范围内(图3),调查范围超过30 000 km<sup>2</sup>。芦山  $M_s 7.0$  地震的余震序列平面空间分布显示与调查烈度分布吻合,地震的最大烈度为IX度,等震线长轴呈北东—南西走向分布,VI度区及以上总面积为18 682 km<sup>2</sup>(中国地震局,2013)。

IX度区东北自芦山县太平镇、宝盛乡以北,西南至芦山镇向阳村,长半轴为11.5 km,短半轴为5.5 km,面积208 km<sup>2</sup>。房屋破坏最严重的宝盛乡为极震区,IX度区简易房绝大部分完全倒塌或毁坏;80%以上的砖木结构房屋毁坏或严重破坏,18%的中等破坏;64%以上的砖混结构房屋严重破坏或毁坏,完全倒塌不多见;约25%的框架结构建筑严重破坏,约47%的中等破坏,26%的轻微破坏或基本完好。IX度区地裂缝带少见,有一疑似地表断层出露区,芦山  $M_s 7.0$  地震现场工作队判断为盲断层;区内滑坡较发育;少见砂土液化和喷砂冒水现象。芦山  $M_s 7.0$  地震的死亡人员集中在IX度区内。

VIII度区东北自芦山县宝盛乡漆树坪村,西南至天全县兴业乡,西北自宝兴县灵关镇,东南至名山城区,长半轴为29 km,短半轴为17.5 km,面积为1 418 km<sup>2</sup>。VIII度区框架结构无中等以上破坏,仅有少部分轻微破坏。毁坏和严重破坏的砖混结构约占39%,55%的砖木结构被破坏。

VII度区东北自芦山县大川镇,西南至荥经县严道镇岗山村,西北自天全县紫石乡,东南至洪雅县汉王乡,长半轴为56 km,短半轴为33 km,面积4 029 km<sup>2</sup>。VII度区土木结构房屋普遍发生裂缝,但以轻微破坏为主,个别房屋受到严重破坏或局部倒塌,人员死亡很少。砖木房屋也有轻微破坏,表现为墙体、窗角、门框裂缝,砖砌围墙有部分倒塌。砖混结构楼房有个别受到轻微破坏,主要是槽型板之间裂缝。

VI度区东北自大邑县新场镇李家山村,西南至甘洛县两河乡,西北自泸定县岚安乡,东至丹棱县杨场镇,长半轴为95 km,短半轴为64 km,面积13 027 km<sup>2</sup>。VI度区框架房屋无破坏现象;砖混房屋一般是老旧房屋,严重毁坏的占6%,中等破坏的占13%;5%的砖木结构被毁坏,38%的被破坏。



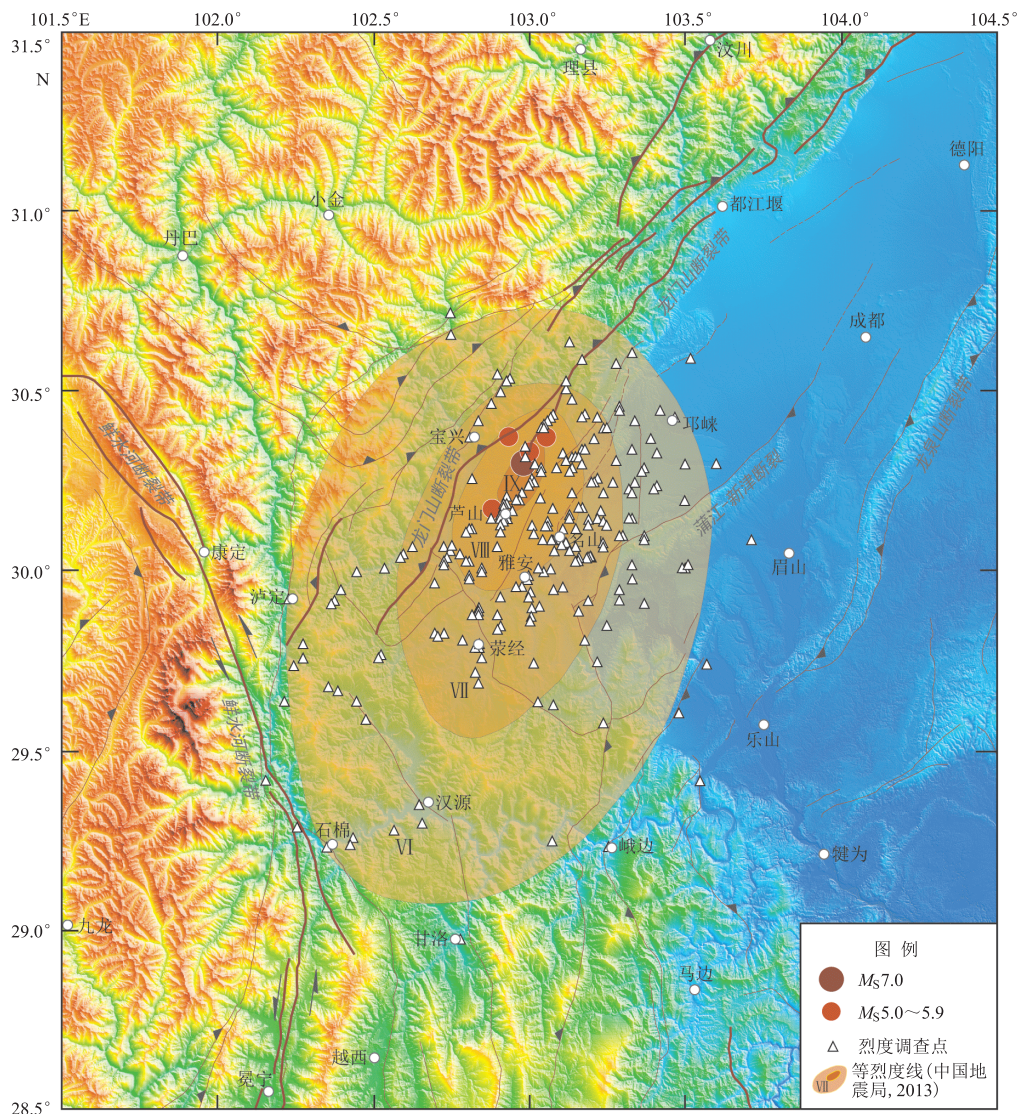


图3 芦山  $M_s7.0$  地震序列中  $M_s \geq 5.0$  余震与烈度调查点分布<sup>①</sup>

位于VI度区之外的仁寿县、小金县等部分县(市)也因地震波的强烈波及而造成个别居民点有少量破坏,或因滚石崩塌或惊吓避震不当造成少量人员伤亡。

### 3.2 强震动记录

芦山  $M_s7.0$  地震发生后,系统计算获得 81 个强震仪器烈度值,为仪器烈度等值线勾绘奠定良好基础。四川省地震局强震动监测技术组从 2013 年 4 月 20 日 8 时至 5 月 6 日 18 时止,共获取了 7 447 条固定台主震及余震的强震记录和 1 517 条由流动台获取余震的强震记录。宝兴台获取了芦山  $M_s7.0$  地震最大校正加速度记录数据:东西向 1 005.3 gal、南北向 823.6 gal、垂直向 478.1 gal,温瑞智等(2013a,2013b)给出了宝兴地办台校正后的芦山  $M_s7.0$  地震加速度记录波形;四川省地震局强震动监测技术组计算最大校正加速度记录(宝兴地办台)数据:东西向 1 024.8 gal、南北向 839.4 gal、垂直向 487.3 gal(表 1)。在芦山  $M_s7.0$  地震的震中距 50 km 范围内,中国数字强震动观测网络有 9 台仪器被触发并获得加速度记录,其中四川省雅安专业台震中距 35.5 km。四川省地震局强震动监测技术组采用《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020)仪器烈度计算方法于 2013 年计算雅安专业台最大校正加速度记录数据:东西向 534.6 gal、南北向 406.3 gal、垂直向 200.0 gal(表 1)。2020 年再次计算 2013 年芦山  $M_s7.0$  地震雅安专业台校正加速度记录数据为:东西向 524.5 gal、南北向 398.6 gal、垂直向 196.2 gal。雅安台校正后的芦山  $M_s7.0$  地震加速度记录波形见图 4。

<sup>①</sup>资料来源:中国地震局四川芦山 $M_s7.0$ 地震现场联合应急队,2013年4月28日,《2013年4月20日四川芦山 $M_s7.0$ 地震灾害损失评估报告》

## 3.3 计算仪器烈度

地震烈度是衡量地震大小和影响程度的重要参数,随着地震观测技术的持续发展及地震观测仪器数量的不断增加,使得根据强震动观测仪器获取的地震动记录快速定量地计算仪器烈度成为可能。仪器烈度的

表1 四川地区81个强震台记录的芦山 $M_s7.0$ 地震的最大加速度及其计算烈度

序号	台站名称	台站代码	仪器型号	经度/(°E)	纬度/(°N)	最大加速度/gal			震中距/km	计算烈度
						EW	SN	UD		
1	宝兴地办	51BXD	Mr02	102.81	30.37	1024.8	839.4	487.3	19.3	8.8
2	宝兴民治	51BXM	Mr02	102.89	30.47	594.6	322.4	394.8	21.5	8.2
3	宝兴盐井	51BXY	Mr02	102.91	30.53	437.5	304.4	249.1	27.0	7.4
4	名山科技	51YAM	Mr02	103.11	30.07	408.5	356.6	107.1	27.6	8.0
5	邛崃油榨	51QLY	Mr02	103.27	30.41	113.4	321.6	274.5	28.2	7.6
6	宝兴明礼	51BXM	Mr02	102.71	30.38	394.7	203.7	134.6	29.0	8.0
7	芦山飞仙	51LSF	Mr02	102.90	30.02	394.9	363.9	272.6	32.6	7.8
8	雅安专业	51YAD	Mr02	103.01	29.98	534.6	406.3	200.0	35.5	7.8
9	蒲江大兴	51PJD	Mr02	103.42	30.24	156.6	187.9	105.5	40.8	7.0
10	荣经石龙	51YAL	Mr02	102.85	29.87	165.3	258.5	109.3	50.4	7.4
11	蒲江五星	51PJW	Mr02	103.65	30.30	72.0	141.8	35.4	62.7	6.4
12	天全两路	51TQL	Mr02	102.39	29.93	280.1	286.2	153.3	72.2	6.8
13	小金达维	51XJW	Etna	102.64	30.96	54.2	34.9	38.2	81.4	5.2
14	康定姑咱	51KDZ	Etna	102.18	30.12	24.0	27.6	20.1	81.7	4.4
15	汉源清溪	51HYQ	Mr02	102.62	29.58	78.7	50.1	29.3	88.1	5.4
16	汉源宜东	51HYY	Mr02	102.45	29.65	187.0	155.1	58.1	89.8	6.4
17	泸定甘谷	51LDG	Etna	102.22	29.82	100.0	88.4	42.2	91.7	6.0
18	泸定冷碛	51LDL	Etna	102.23	29.79	140.5	199.3	73.9	93.5	7.0
19	都江紫平	51DJZ	Mr02	103.59	31.02	80.7	76.7	31.8	98.2	5.8
20	小金地办	51XJD	Etna	102.36	31.00	36.9	33.5	27.4	98.6	4.4
21	郫县走石	51PXZ	Mr02	103.76	30.91	13.1	12.5	9.8	99.2	4.0
22	泸定加郡	51LDJ	Etna	102.21	29.69	72.0	96.9	58.2	102.4	6.2
23	康定专业	51KDT	Etna	101.96	30.05	67.6	111.3	72.0	103.6	6.0
24	成都中和	51CDZ	Mr02	104.09	30.56	68.4	41.6	21.8	108.6	5.4
25	乐山凌云	51LSL	Etna	103.82	29.53	8.5	9.0	3.1	115.9	2.9
26	汉源乌斯	51HYW	Mr02	102.90	29.22	60.0	46.8	38.7	120.2	5.0
27	康定呷巴	51KDG	Etna	101.57	29.96	21.0	25.8	12.8	142.2	4.2
28	什邡八角	51SFB	Etna	104.00	31.28	63.2	70.5	16.4	144.8	5.4
29	道孚八美	51DFB	Etna	101.48	30.48	35.9	36.5	10.9	146.7	4.2
30	康定新都	51KDX	Etna	101.50	30.04	17.2	19.4	11.8	147.4	4.0
31	甘洛气象	51GLQ	Mr02	102.77	28.97	19.4	20.7	9.8	150.0	3.8
32	沐川利店	51MCL	Etna	103.72	28.95	4.8	3.4	2.3	165.0	2.5
33	冕宁拖乌	51MNV	Mr02	102.28	28.81	38.2	50.1	20.5	180.2	5.6
34	黑水色尔	51HSS	Etna	103.42	31.94	31.1	31.5	10.2	187.1	4.0
35	安县塔水	51AXT	Mr02	104.42	31.46	21.8	19.8	5.5	187.5	4.4
36	道孚专业	51DFT	Etna	101.13	30.98	4.4	4.8	3.8	194.6	2.5
37	冕宁曹古	51MNC	Mr02	102.24	28.64	25.8	41.1	15.6	198.3	4.8
38	北川地办	51BCD	Etna	104.43	31.64	14.2	6.0	15.7	202.0	3.8
39	冕宁惠安	51MNA	Mr02	102.17	28.61	16.5	21.1	9.7	204.4	4.6
40	冕宁地办	51MNJ	Mr02	102.18	28.55	19.1	16.6	12.8	210.3	3.8
41	冕宁专业	51MNT	Mr02	102.16	28.55	50.8	40.7	12.3	211.3	5.2
42	冕宁回龙	51MNH	Mr02	102.07	28.46	33.8	23.9	10.5	223.8	4.4
43	江油含增	51AXY	Mr02	104.61	31.77	27.3	25.4	7.8	224.1	4.2
44	喜德冕山	51XDM	Mr02	102.31	28.36	24.8	21.5	18.8	226.2	4.4
45	雷波地办	51LBD	Mr02	103.57	28.26	14.8	29.4	14.8	233.2	4.2
46	江油专业	51JYW	Mr02	104.75	31.78	40.5	30.2	9.0	233.8	4.6
47	冕宁泸姑	51MNL	Mr02	102.19	28.29	52.8	49.5	25.0	236.7	5.6
48	江油武都	51JYC	Mr02	104.78	31.88	31.5	64.3	12.9	244.2	4.8
49	冕宁漫水	51MNM	Mr02	102.17	28.20	23.1	29.8	13.2	246.7	4.8
50	冕宁泽远	51MNZ	Mr02	102.07	28.20	34.3	19.7	9.2	249.8	4.4
51	松潘安宏	51SPA	Etna	103.64	32.51	6.8	4.9	3.0	252.7	2.7



续表1

序号	台站名称	台站代码	仪器型号	经度/(°E)	纬度/(°N)	最大加速度/gal			震中距/km	计算烈度
						EW	SN	UD		
52	昭觉气象	51ZJQ	Mr02	102.84	28.01	10.0	8.4	4.3	254.6	3.5
53	西昌礼州	51XCL	Mr02	102.18	28.05	12.9	16.5	11.2	262.8	4.2
54	江油重华	51JYH	Mr02	104.98	31.96	21.5	28.1	6.5	263.9	4.4
55	西昌小庙	51XCX	Mr02	102.22	27.90	5.9	5.3	3.5	277.3	2.7
56	西昌川兴	51XCC	Mr02	102.32	27.86	18.7	23.6	11.1	279.3	4.8
57	西昌海南	51XCN	Mr02	102.29	27.81	13.8	16.3	6.4	285.6	3.8
58	布拖地办	51BTD	Mr02	102.81	27.71	7.5	5.9	3.6	288.4	2.7
59	西昌佑君	51XCY	Mr02	102.16	27.74	24.0	20.4	8.6	296.3	4.8
60	普格五道	51PGW	Mr02	102.41	27.64	6.7	2.9	4.6	301.6	2.5
61	剑阁中学	51JGD	Etna	105.47	32.04	18.8	27.5	4.8	304.4	4.0
62	青川桥楼	51QCQ	Mr02	104.93	32.49	9.9	10.4	5.8	304.6	3.2
63	盐源金河	51YYJ	Mr02	101.96	27.72	9.3	12.4	9.1	304.6	3.8
64	布拖拖觉	51BTT	Mr02	102.84	27.54	7.1	6.8	3.3	307.0	3.0
65	西昌黄水	51XCH	Mr02	102.20	27.59	8.9	14.8	10.8	311.4	3.8
66	普格荞窝	51PGQ	Mr02	102.48	27.48	5.7	6.0	2.6	317.3	2.5
67	苍溪气象	51CXQ	Mr02	105.93	31.74	12.8	8.8	4.2	321.9	3.6
68	剑阁下寺	51JGS	Etna	105.51	32.28	20.3	22.9	6.8	324.8	4.4
69	普格地办	51PGD	Mr02	102.54	27.38	3.9	5.1	3.1	328.1	2.5
70	青川地办	51QCD	Mr02	105.24	32.58	9.5	10.1	4.7	331.0	3.0
71	德昌农科	51DCN	Mr02	102.18	27.40	10.4	10.4	7.9	331.9	3.6
72	盐源卫城	51YYW	Mr02	101.65	27.45	9.4	7.1	6.9	343.5	2.9
73	宁南松新	51NNS	Mr02	102.61	27.22	3.4	4.1	3.0	345.0	2.3
74	盐源民中	51YYZ	Mr02	101.51	27.42	5.3	5.0	2.1	351.2	2.7
75	盐源梅雨	51YYM	Mr02	101.40	27.45	7.4	5.0	3.9	353.4	2.9
76	盐源泸姑	51YYL	Mr02	100.86	27.73	2.7	1.9	0.9	354.1	2.3
77	广元中区	51GYQ	Mr02	105.83	32.44	9.2	9.5	2.2	359.2	2.8
78	宁南档案	51NNT	Mr02	102.76	27.07	3.4	5.0	3.1	360.3	2.5
79	广元东溪	51GYD	Etna	106.25	32.06	12.0	15.3	7.8	365.6	3.6
80	会理云甸	51HLY	Mr02	102.26	27.05	4.2	4.0	2.6	368.3	2.3
81	广元曾家	51GYZ	Mr02	106.11	32.62	11.8	18.2	4.7	391.5	3.6

注: 1、Mr02—瑞士SYSCOM公司生产的MR2002型数字强震动记录(地震加速度计); 2、Etna—美国Kinemetrics公司生产的ETNA数字强震动记录器(地震加速度计); 3、时间服务系统采用GPS时间系统。记录的采样率200 sps; 记录方式采用阈值触发方式, 事前时间与事后时间均设置为20 s。

计算是地震烈度速报的基础, 可为灾情快速判断、地震应急救援决策和行动、工程抢险修复决策等提供科学依据。为了规范仪器烈度计算流程和方法, 并与现行《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020)中的地震烈度保持一定的衔接和继承, 制订《仪器地震烈度计算暂行规程》。

四川省地震局强震动监测技术组(赖敏等, 2014)利用芦山 $M_s7.0$ 地震监测到的数字强震动记录资料, 获取了数字强震台网81个台的强震动观测记录(表1), 且为了与实地野外调查的调查烈度概念区分, 使用袁一凡(1998)计算方法获得的结果定义为仪器烈度。仪器烈度计算的主要思路是: 取峰值加速度值( $A$ )、卓越周期( $f_p$ )和持时( $T_d$ )地震动参数组成一个评定域; 四个周期点(0.125、0.2、0.5、1s)反应谱组成另一个评定域; 综合两个评定结果得到判定结果模糊向量; 最后以隶属度为权重因子并以加权平均结果作为最后的仪器烈度判定结果(李山有等, 2002)。本研究使用的烈度计算方法基本上是沿用袁一凡(1998)的方法, 仅修改了上述方法中的反应谱特征的权重分布。依据四川区域的卓越周期不完全符合原方法中的反应谱周期点的权重分布, 四川省地震局强震动监测技术组在实际计算时, 反应谱周期取最大的4个周期。数字强震台所获得的当地仪器烈度值与考察烈度值的差别均未超过 $\pm 1$ 度, 故认为芦山 $M_s7.0$ 地震的仪器烈度结果比较可信(赖敏等, 2014)。

中国地震局地球物理研究所收集到四川、云南、甘肃和陕西4个省的84组三分量芦山 $M_s7.0$ 主震的252条加速度记录, 筛选出了峰值加速度 $\geq 10$  gal的63个强震台的峰值加速度(峰值加速度选取2个水平方向的最大值), 强震台数据见表1中 $\geq 10$  gal。陈鲲等(2013)运用考虑场地效应的震动图快速生成方法, 综合考虑了芦山 $M_s7.0$ 地震震中地区地质构造背景、震源机制解及中国西部地区地震动参数衰减特征等,



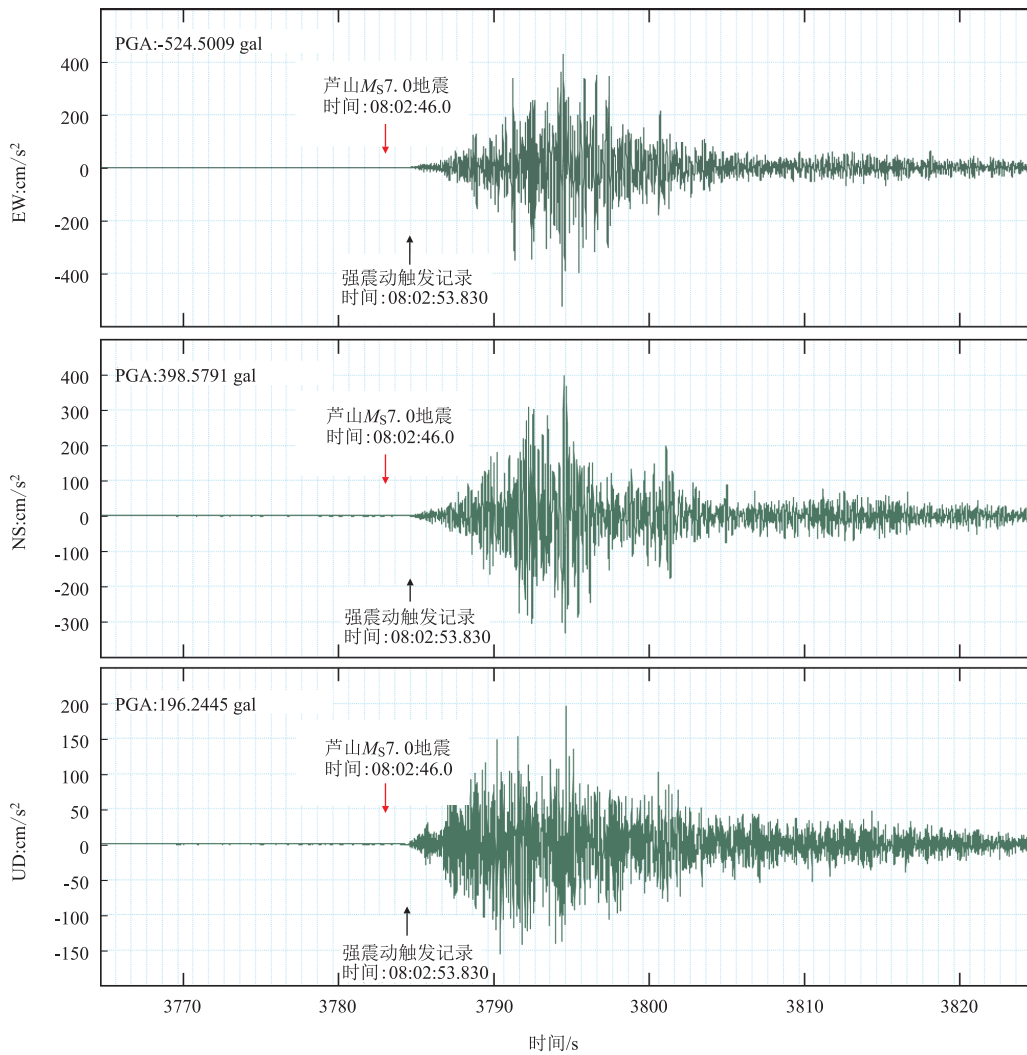


图4 雅安专业台校正后的芦山  $M_s7.0$  地震加速度记录波形

估计了 2013 年 4 月 20 日芦山  $M_s7.0$  地震加速度分布图;并利用地震后获得的强震记录计算了强震台站观测值与借助经验性衰减关系估计值之间的系统偏差,修正了峰值加速度分布图。本研究基于四川省地震局强震动监测技术组计算的数字强震台网仪器烈度值(见表 1),利用 Surfer 软件进行强震仪器记录计算的仪器烈度数据网格化(Surfer 软件具有强大的数据插值功能,当强震台采集的数据不是等间距的时候,采用 Surfer 软件克里格网格化处理),绘制芦山  $M_s7.0$  地震的数字强震仪记录并计算仪器烈度等值线平面图(图 5)。

仪器烈度的等值线范围形态可较好展示出地震发震构造对烈度的影响。从图 5 可见,仪器烈度的等值线总体呈现沿龙门山断裂带方向相对于垂直龙门山断裂带方向衰减慢的特征,仪器烈度 IV 度区在沿龙门山断裂的 SW 方向长度可达 204 ~ 266 km,沿龙门山断裂的 NE 方向长度为 158 ~ 332 km,显示强震动记录获取的仪器烈度沿龙门山断裂带区域延伸,尤其是沿 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震的龙门山断裂带破裂段的影响大;仪器烈度的等值线区发震断裂上盘的灾害影响范围相对发震断裂下盘的灾害影响范围大,仪器烈度 IV 度区在垂直于龙门山断裂带的 SE 方向(华南地块)长度为 82 ~ 98 km, NW 方向(巴颜喀拉块体)长度为 83 ~ 120 km,可见芦山  $M_s7.0$  地震向 SE 纯逆冲的影响,龙门山断裂的 NW 侧(上盘)方向衰减慢,影响范围大,相反龙门山断裂的 SE 侧(下盘)衰减快,影响范围小。

### 3.4 芦山 $M_s7.0$ 地震仪器烈度与调查烈度对比分析

调查烈度抽样调查点多,抽样点基本均匀地分布在灾区范围内(见图 3),绘制的调查烈度等震线很好地反映了地震的影响范围。从仪器烈度点在调查烈度区的占比角度分析:仪器烈度 VI 度点有 17 个点,其中有 15 个点位于调查烈度 VI 度以上区域,总体占比达到 88.24%;仪器烈度 VII 度点有 11 个点,其中有 9 个点位

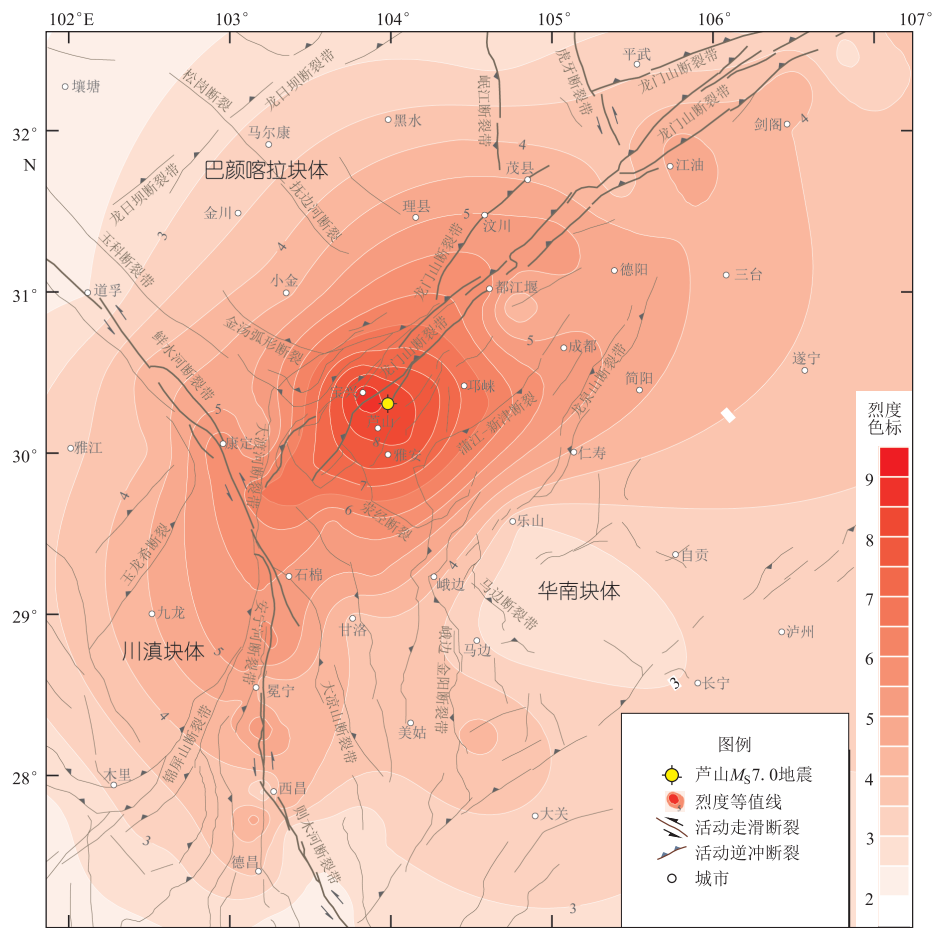


图5 芦山  $M_s7.0$  地震数字强震记录计算仪器烈度等值线

于调查烈度Ⅶ度以上区域,总体占比达到 81.82%。从调查烈度和仪器烈度的等值线所围的面积角度分析,调查烈度Ⅸ度区 100% 包含在仪器烈度的Ⅷ度等值区内,要注意到强震动记录中距离震中最近的强震台为宝兴县防震减灾局强震台(编号 51BXD),震中距 19.3 km,计算最大仪器烈度值为 8.8 度(表 1),没有更近的强震台勾绘仪器烈度的Ⅸ度区;调查烈度Ⅷ度区 70.30% 包含在仪器烈度Ⅷ度区内,同时,仪器烈度Ⅷ度等值区的 69.69% 包含在调查烈度Ⅷ度区内。由此可见,仪器烈度区与调查烈度区吻合较好。

#### 4 讨论与认识

(1) 仪器烈度的等值线形态可较好展示出地震灾害的范围。根据《仪器地震烈度计算暂行规程》计算得到的芦山  $M_s7.0$  地震的仪器烈度与调查烈度有较好的对应关系,仪器烈度Ⅵ度点有 17 个点,其中有 15 个点位于调查烈度Ⅵ度以上区域,总体占比达到 88.24%;仪器烈度Ⅶ度点有 11 个点,其中有 9 个点位于调查烈度Ⅶ度以上区域,总体占比达到 81.82%。故通过计算得到的地震仪器烈度或依此勾绘出仪器烈度的等值线图可以在一定程度上客观反映地震实际造成的震害情况,这在震后短时间内灾区的震灾信息尚不清楚的情况下,能够快速对可能的震害涉及范围、人员伤亡分布、经济损失和生命线工程等损失作出预估(即快速研判灾区的震害情况),为应急救援决策、救灾方案制定和救灾力量部署等工作提供重要依据。

(2) 芦山  $M_s7.0$  地震的仪器烈度的等值线范围形态可较好展示出地震发震构造对烈度的影响。仪器烈度的等值线总体呈现沿龙门山断裂带方向较垂直龙门山断裂带方向衰减慢,仪器烈度Ⅳ度区域在 SW 方向延伸 204 ~ 266 km, NE 方向延伸 158 ~ 332 km,显示强震动记录获取的仪器烈度沿龙门山断裂带衰减慢,即影响区域大,尤其是沿 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震的龙门山断裂带破裂段的影响大;仪器烈度的等值线区发震断裂上盘(巴颜喀拉块体)的灾害影响范围相对发震断裂下盘(华南块体)的灾害影响范围大,显示明显发震

断裂的上盘效应;由此可见,芦山  $M_s7.0$  地震为 NE 走向的龙门山断裂南段一次盲逆断层型地震(徐锡伟等, 2013),断裂倾向 NW,芦山  $M_s7.0$  地震为向 SE 纯逆冲破裂事件,龙门山断裂的 NW 方向(巴颜喀拉块体)衰减慢,影响范围大,相反龙门山断裂的 SE 向(华南块体)衰减快,影响范围小。仪器烈度区的空间分布特征与芦山  $M_s7.0$  的发震断裂的控制作用相吻合。

(3) 仪器烈度区域勾绘范围大且呈现受区域构造影响明显的特征。由于地震波受传播路径、场地条件、活动构造等因素的影响,仪器烈度值常显示有一定的离散性,而芦山  $M_s7.0$  地震的仪器烈度沿主要活动构造展布呈现仪器烈度偏高的现象,例如沿鲜水河断裂带和安宁河—则木河断裂带均有明显仪器烈度偏高的现象。调查烈度区是依据野外调查只勾绘出 VI 度以上区域,而仪器烈度区是依赖于强震台分布和可靠记录获取的,二者既有差异也具有较好对应关系。由此可见,在一定区域内台站仪器烈度等值区是可作为较可靠的震害标识,反映地震区域的整体震害水平。

(4) 仪器烈度分布与调查烈度分布既有对应关系又存在差异。对比芦山  $M_s7.0$  地震的仪器烈度分布图和调查烈度分布图可知,虽然仪器烈度与调查烈度分布具有一定的对应关系,但由于受多种因素的影响,两者是不可能完全一致的。需要注意的是:调查烈度表示地震的实地调查地震的影响和破坏程度(即地震对地表及工程建筑物影响的强弱程度),是一种综合的宏观指标,它既有地学的科学属性,又有其社会属性;仪器烈度则直接由分布于震中一定区域范围内的强震记录计算得到的,具有获取信息更简捷特点,也可以反映地震对地表的影响和破坏程度。虽然仪器烈度与调查烈度概念不同,不能简单混淆和相互替代,但都能为评估灾害影响范围发挥作用。

## 参考文献

- 陈国光,计凤桔,周荣军,等. 2007. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质, 29(3):657-673.
- 陈鲲,俞言祥,高孟潭,等. 2013. 利用强震记录校正的芦山 7.0 级地震峰值加速度震动图[J]. 地震地质, 35(3):627-633.
- 邓起东,陈社发,赵小麟,等. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 16(4):389-403.
- 杜方,龙锋,阮祥,等. 2013. 四川芦山 7.0 级地震及其与汶川 8.0 级地震的关系[J]. 地球物理学报, 56(5):1772-1783.
- 金星,张红才,李军,等. 2013. 地震仪器烈度标准初步研究[J]. 地球物理学进展, 28(5):2336-2351.
- 赖敏,朱建钢,朱永莉. 2014. 芦山地震数字强震动观测记录及其初步分析[J]. 四川地震, (2):6-11.
- 李传友,宋方敏,冉勇康. 2004. 龙门山断裂带北段晚第四纪活动性讨论[J]. 地震地质, 26(2):248-258.
- 李俊,苏枫,米宏亮,等. 2010. ShakeMap 及其在地震动快速预估中的应用[J]. 中国地震, 26(1):103-111.
- 李山有,金星,陈先,等. 2002. 地震动强度与地震烈度速报研究[J]. 地震工程与工程振动, 22(6):1-7.
- 刘白云,袁道阳,张波,等. 2012. 1879 年武都南 8 级大地震断层面参数和滑动性质的厘定[J]. 地震地质, 34(3):415-424.
- 刘杰,易桂喜,张致伟,等. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山  $M7.0$  地震介绍[J]. 地球物理学报, 56(4):1404-1407.
- 孙柏涛,闫佳琦,李山有. 2019. 宏观地震烈度发展与其用途的演变[J]. 地震工程与工程振动, 39(2):1-8.
- 孙成民,王力,解伟,等. 2010a. 四川地震全记录(上卷)[M]. 成都:四川人民出版社.
- 孙成民,王力,解伟,等. 2010b. 四川地震全记录(下卷)[M]. 成都:四川人民出版社.
- 唐荣昌,韩渭宾. 1993. 四川活动断裂与地震[M]. 北京:地震出版社.
- 王玉石,周正华,王伟. 2008. 基于假设检验的地震动强度(烈度)速报方法[J]. 地震工程与工程振动, 28(5):49-54.
- 温瑞智,任叶飞,黄旭涛,等. 2013a. 芦山 7.0 级地震强震动记录及其震害相关性[J]. 地震工程与工程振动, 33(4):1-14.
- 温瑞智,任叶飞,齐文浩,等. 2013b. 2013 年 4 月 20 日芦山地震最大加速度记录分析[J]. 西南交通大学学报, 48(5):783-791.
- 徐锡伟,闻学泽,韩竹军,等. 2013. 四川芦山 7.0 级强震:一次典型的盲逆断层型地震[J]. 科学通报, 58(20):1887-1893.
- 袁一凡. 1998. 由地震动三要素确定地震动强度(烈度)的研究[R]. 哈尔滨:国家地震局工程力学研究所.
- 中国地震局. 2013. 中国地震局发布四川省芦山“4.20”7.0 级强烈地震烈度图(EB/OL). (2013-04-25)[2022-12-30] <http://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/fzjzyw/5195229/index.html>.
- 中国地震局. 2015. 仪器地震烈度计算暂行规程[S]. 北京:中国地震局.
- 周荣军,李勇, Alexander L Densmore, 等. 2006. 青藏高原东缘活动构造[J]. 矿物岩石, 26(2):40-51.
- Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, et al. 1999. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified mercalli intensity in California [J]. Earthquake Spectra, 15(3):557-564.
- Wang Y S, Li X J, Zhou Z H. 2013. A new instrumental measure of epicentral shaking intensity in western China [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 11(4):913-924.

Wong H L, Trifunac M D. 1979. A note on an instrumental comparison of the modified mercalli (MMI) and the Japanese Meteorological Agency (JMA) Intensity Scales, based on computed peak accelerations [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 7(1): 75-83.

## Comparison and Analysis of Instrument Intensity and Investigation Intensity of the $M_s7.0$ Lushan Earthquake in 2013

DU Fang<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, JIANG Peng<sup>1</sup>, ZHU Yongli<sup>1</sup>, LI Pingping<sup>1</sup>, SU Jinrong<sup>1</sup>, LIANG Mingjian<sup>1</sup>, WU Jiang<sup>1</sup>

(1. Sichuan Earthquake Agency, Sichuan Chengdu 610041, China; 2. Zhejiang Earthquake Agency, Zhejiang Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Based on the recorded data obtained from macro survey points, survey intensity and strong motion instrument observation of the  $M_s7.0$  Lushan earthquake in 2013, the instrument intensity values at each strong motion station were calculated by the strong motion monitoring technical team of Sichuan Earthquake Agency. The macro survey points were plotted on the isoseismal distribution map of the published survey intensity. The isoseismal distribution map of the instrument intensity was derived from the strong motion records and further calculated. We compared and analyzed the relationship between the instrument intensity and the survey intensity of the  $M_s7.0$  Lushan earthquake. The results show that: The instrument intensity and the survey intensity shows a good correspondence. The instrument intensity points of VI degrees are included in the area with the survey intensity of VI degrees, and the overall proportion reaches 88.24%. The instrument intensity points of VII degrees are included in the area above the survey intensity of VII degrees, and the overall proportion reaches 81.82%. The regional scope and extent of the serious disasters caused by the earthquake can be well delineated by the contour range of the instrument intensity. The spatial distribution characteristics of the instrument intensity area are consistent with the control role of the seismogenic fault of the  $M_s7.0$  Lushan earthquake. The attenuation of the intensity along the Longmenshan fault zone is slower than that in the vertical direction. The phenomenon is generally shown by the isoline area of the instrument intensity. The influence range of the hangingwall of the seismogenic fault is larger than that of the footwall, which is reflected by the isoline area of the instrument intensity. The control effect of the  $M_s7.0$  Lushan seismogenic fault is also reflected in the spatial distribution map of the investigated intensity area. There are both correspondence and difference between instrument intensity distribution and survey intensity distribution. Considering that the earthquake disaster information in the disaster area might not be clear in a short time after the earthquake, the earthquake disaster situation in the disaster area can be quickly studied and judged after the earthquake. The possible earthquake disaster coverage, distribution of casualties, economic losses, lifeline engineering and other losses can be effectively estimated by local instrument intensity. The important basis of instrument intensity distribution is urgently and rapidly provided for emergency rescue decision-making, disaster relief plan formulation, disaster relief force deployment, and so on.

**Keywords:** the  $M_s7.0$  Lushan earthquake; investigation intensity; instrument intensity; strong motion; earthquake disaster



# 巴颜喀拉块体内部 NW 向主要断裂研究新进展

梁明剑<sup>1</sup>, 周文英<sup>1</sup>, 董云<sup>2</sup>, 廖程<sup>1</sup>, 左洪<sup>1</sup>, 陈翰<sup>1</sup>, 赵国华<sup>2</sup>

(1. 四川省地震局, 四川 成都 610041; 2. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610052)

**摘要:**巴颜喀拉块体内部发育着一些大型的NW向走滑断裂:阿万仓断裂、玛多—甘德断裂、甘德南缘断裂、达日断裂、五道梁—长沙贡玛断裂、松岗断裂等。最新的研究表明,这些走滑断裂均具有晚第四纪活动性,并具有孕育和发生强震的构造条件。这些块体内的活动断裂可能扮演着分配和传递巴颜喀拉块体构造变形的角色,甚至在整個青藏高原东缘运动学机制中起着重要的作用。

**关键词:**巴颜喀拉块体;活动断裂;晚第四纪活动性;构造变形

**中图分类号:** P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8115(2023)01-0012-06

**DOI:** 10.13716/j.cnki.1001-8115.2023.01.002

青藏高原的强烈隆升是新生代以来发生的重大地质事件,高原隆升的原因及其导致的地貌、气候等环境变化一直是备受国内外地球科学家关注的核心问题,尤其青藏高原内部的构造变形作用和机理是国际大陆动力学理论研究的核心和热点(袁道阳等,2001;张克信等,2013;葛肖虹等,2014)。巴颜喀拉块体是青藏高原新生代以来侧向挤出具有代表性的活动块体之一(Tapponnier *et al.*, 1982; 张培震等,2003; Burchfiel *et al.*, 2008; 闻学泽,2018),目前关于块体活动断裂的研究主要集中在玉树—甘孜—鲜水河断裂带、东昆仑断裂带和龙门山断裂带等边界断裂带上,而且衍生了众多块体东缘的构造变形和演化模式(Royden *et al.*, 1997; Meng *et al.*, 2006; 张培震等,2009; 刘静等,2009; Hubbard *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2010; Fu *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2015),积累了大量卓有成效的研究成果。关于巴颜喀拉块体东缘的运动学和构造变形机制也得到了比较一致的认识,如块体的南、北边界分别以东昆仑断裂、玉树—甘孜—鲜水河断裂等大型的左旋走滑断裂为变形特征,其向东运动受到扬子—华南地块的阻挡,水平运动分量被龙门山构造带吸收,转换成龙门山构造带的垂直隆起,并控制了近些年巴颜喀拉块体东缘一系列破坏性大地震的发生。然而,巴颜喀拉块体变形是主要集中于边界断裂带上,内部相对稳定,表现为“刚性”变形特征?还是块体内部也存在明显的构造活动,显示为连续变形的特征? 2021年5月22日青海玛多 $M_s7.4$ 地震和2022年8月31日四川马尔康 $M_s6.0$ 震群均发生在巴颜喀拉块体内部,块体内部的断裂活动性也引起了大家的关注。因此,本文叙述近些年来巴颜喀拉块体内部活动断裂,尤其是NW向活动断裂研究取得的最新进展,为上述科学问题深入研究提供基础资料和思路启发。

## 1 地震构造环境

中国大陆内部主要划分为6个I级活动块体,而青藏高原活动地块可分为一系列II级活动块体(张培震等,2003),巴颜喀拉块体是其中之一。巴颜喀拉块体东边界为龙门山断裂带,北边界为东昆仑断裂带,南边界为甘孜—玉树断裂和鲜水河断裂带,这些断裂带均为全新世活动断裂,具有孕育和发生强震、大地震的构造条件。除了边界断裂外,巴颜喀拉块体内部还发育一系列NE向与NW向的大型断裂,其中NE向的龙日坝断裂将巴颜喀拉块体分割为阿坝次级块体(西部)和龙门山次级块体(东部)(图1; Shen *et al.*, 2005; Ren *et al.*, 2013; 陈长云等,2013),被认为是巴颜喀拉地块南东向运移过程中由于受到华南地块的强烈阻挡而形成

收稿日期:2022-08-31;修回日期:2022-10-20

基金项目:四川省自然科学基金项目(2022NSFC0211)、西藏拉萨地球物理国家野外科学观测站研究课题(NORSLS21-04)和地震动力学国家重点实验室开放基金课题(LED2020B02)共同资助。

作者简介:梁明剑(1979-),男,广西北海人,高级工程师,主要从事活动构造方面的研究, E-mail: 23800794@qq.com.

成的龙门山构造带的后展式推覆构造系统,承载着青藏高原东缘新生代晚期至今地壳变形的作用(徐锡伟等,2008)。在阿坝次级块体内,发育着一系列NW向的大型走滑断裂(图1),在早期已获得的研究中,阿万仓断裂为全新世活动的左旋走滑断裂,晚第四纪平均滑动速率为3 mm/a,构成了东昆仑断裂东段活动速率分配的重要分支断裂(李陈侠等,2016);甘德南缘断裂也是全新世活动的左旋走滑断裂,熊仁伟等(2010)获得其甘德段全新世水平滑动速率约3 mm/a,晚更新世水平滑动速率约8 mm/a。而其它断裂,如玛多—甘德断裂、达日断裂、五道梁—长沙贡玛断裂在早期的研究比较薄弱,直到近些年来才获得这些断裂活动性的最新进展。

巴颜喀拉块体强震、大地震的活动主要沿着边界活动断裂带分布,然而块体内部的NW向走滑断裂也具有孕育强震的构造条件,如1947年3月17日青海达日7 $\frac{3}{4}$ 级地震发生在达日断裂上,2021年5月22日青海玛多7.4级地震发生在玛多—甘德断裂西段,2022年四川马尔康6.0级震群发生在松岗断裂附近。这些强震的发生也引起了大家对巴颜喀拉块体内部大型走滑断裂活动性的关注。

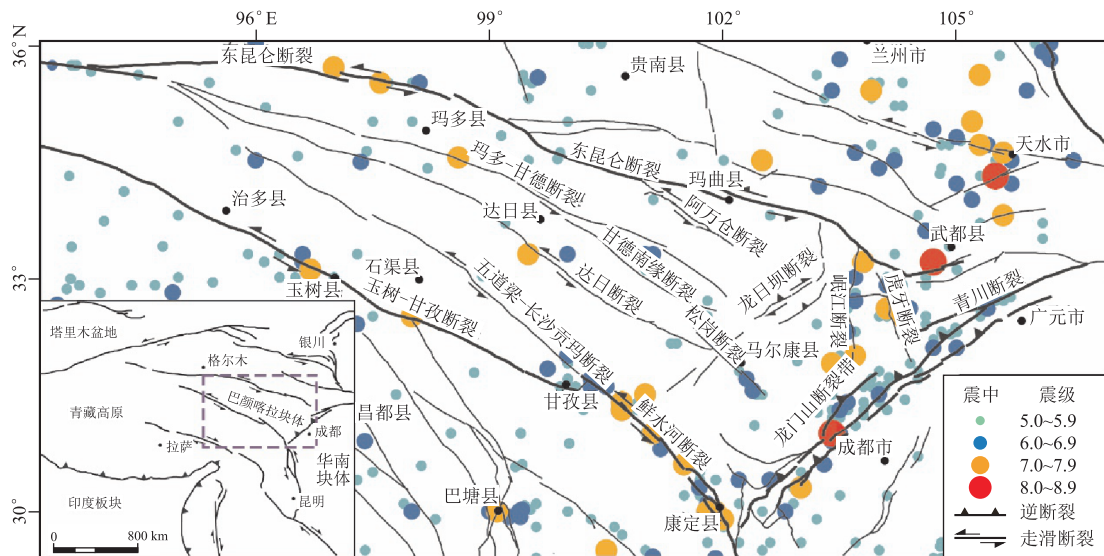


图1 巴颜喀拉块体中东部主要活动断裂及强震分布图(修改自 Liang, 2022)

## 2 活动断裂研究新进展

### 2.1 玛多—甘德断裂

玛多—甘德断裂位于巴颜喀拉块体中北部,断裂中东段的线性地貌在甘德县南至年保玉则山北侧一线尤为清晰,断错一系列冲沟与地貌面,具有明显晚第四纪活动性;断裂东段与中东段以年保玉则岩体为阶区呈右阶羽列,东段控制着四川阿坝第四纪盆地的边界,地表局部仍保存着清晰的地震地表破裂带,具有全新世活动性。甘德县南可见一系列冲沟被断裂左旋位错约16~20 m,于冲沟切割的冲积扇取年代样品 GDC14-01、GDC14-04,测试结果分别为  $3850 \pm 30$  aBP、 $3830 \pm 30$  aBP (图2),由此估算玛多—甘德断裂的水平滑动速率约为  $4.5 \pm 0.6$  mm/a。而在四川阿坝盆地,玛多—甘德断裂东段发现地震地表破裂带,而且地表破裂带的自由面比较新鲜(图3),推测该破裂带的相关地震应该是近几百年来发生的事件。

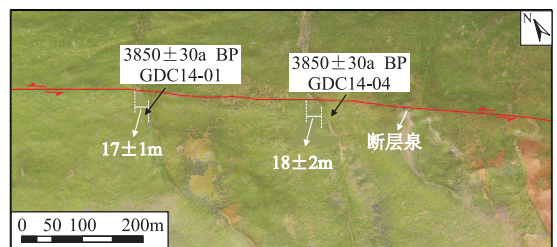


图2 玛多—甘德断裂沿线冲沟位错及取样位置

### 2.2 达日断裂

达日断裂位于阿坝次级块体的中部,为全新世活动断裂,断裂中段仍保留有长约70 km的1947年达日7 $\frac{3}{4}$ 级地震的地表破裂带,水平同震位错约2~4 m(图4;梁明剑等,2020)。达日断裂晚第四纪的滑动速率



研究程度很低,之前仅张裕明等(1996)给出的达日断裂中南段的水平滑动速率高达 14.2 mm/a,但是作为巴颜喀拉块体北边界主断裂带的东昆仑断裂带西段的左旋走滑速率也仅有 12~15 mm/a(徐锡伟等,2002),因此这一速率值得商榷。笔者的最新研究获得达日断裂晚第四纪以来的水平平均滑动速率约为  $3.0 \pm 0.6$  mm/a。达日断裂南段从青海达日县莫坝乡、班玛县一线,延伸至四川壤塘县南木达一带。但是,断裂南段活动性相对较弱,线性地貌发育一般,南木达附近主要表现为高台地存在断续的断层槽谷地貌和河谷北侧发育的断层三角面(图 5)。

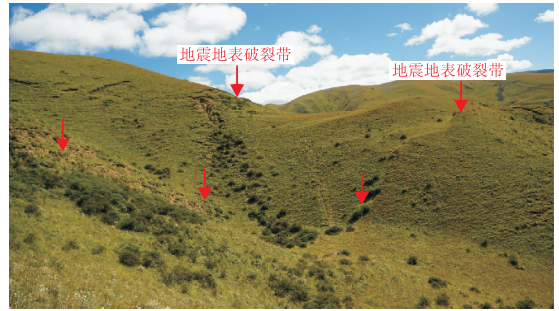
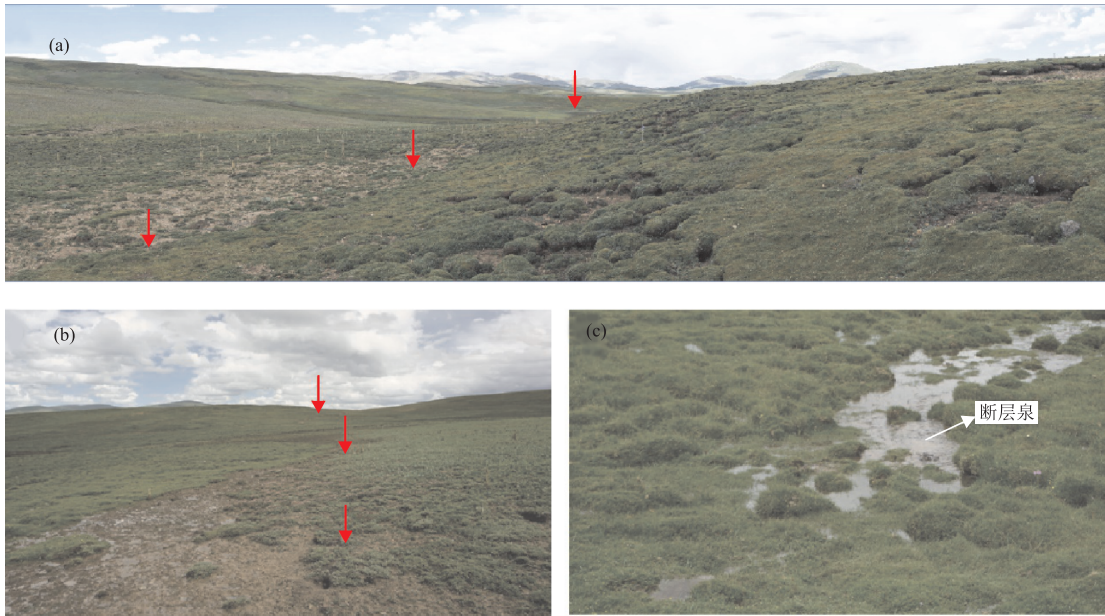


图 3 阿坝县阿坝盆地玛多—甘德断裂东段的地震地表破裂带(镜向 SE)



a. 地表破裂带沿着高台上的断层槽谷北侧延伸,镜向 W; b. 地震陡坎,高 20~30 cm,镜向 SE; c. 地震陡坎下发育的断层泉,镜向 N。

图 4 达日县莫坝乡隆根一带地震地表破裂带

### 2.3 五道梁—长沙贡玛断裂

五道梁—长沙贡玛断裂位于巴颜喀拉块体南部,甘孜—玉树断裂北侧,也是块体内部一条大型走滑断裂。在早期论述中,认为该断裂仅西段局部为全新世活动(张裕明等,1996),其它段落并未见晚第四纪活动的报道。最新的研究发现五道梁—长沙贡玛断裂中段控制着四川石渠北部的长沙贡玛新生代盆地,断裂沿着盆地的北边界展布,发育于三叠系变质砂岩、板岩与古近系红色砂砾岩之间(图 6a)。断裂还切过山前洪积扇,断错一系列水系与冲洪积扇,形成线性断层陡坎、挤压脊、断塞塘、断错泉等构造地貌(图 6b)。初步获得的断裂中段的水平滑动速率为  $2.40 \pm 0.2$  mm/a(梁明剑等,2022)。断裂往南东延伸,新活动形迹逐渐不明显,可能与断裂南东段活动强度相对减弱有关。

### 2.4 松岗断裂

松岗断裂展布于马尔康县城南侧,走向呈 NW 向,向南东以梦笔山为阶区与抚边河断裂呈右阶羽列。前人的认识中,松岗断裂经历过多期活动,主要活动时代是第四纪早中期(徐锡伟等,2016),而南段晚更新世有过活动(孙东等,2010)。最新研究发现,松岗断裂以松岗镇南东木足沟(梭磨河支流)至脚木足乡一线的断裂线性地貌尤为明显,在松岗镇断裂断错了台地,形成鞍状地貌(图 7a、7b);脚木足乡白莎村附近的Ⅲ级台地上,百姓开挖屋基揭露断层剖面,断错了台地上的湖相沉积(图 7c),均表明松岗断裂晚第四纪存在新活动。



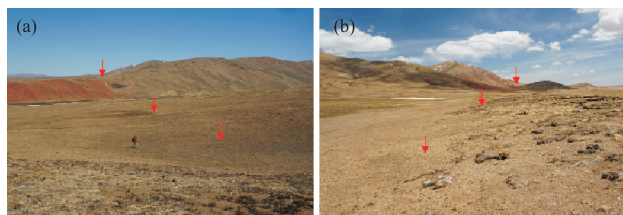


a. 南木达河谷北侧断层三角面, 镜向E; b. 河流Ⅲ级阶地上的断层槽谷地貌, 镜向SE; c. 高台上的断层垭口地貌, 镜向NW。

图5 壤塘县南木达一带达日断裂构造地貌

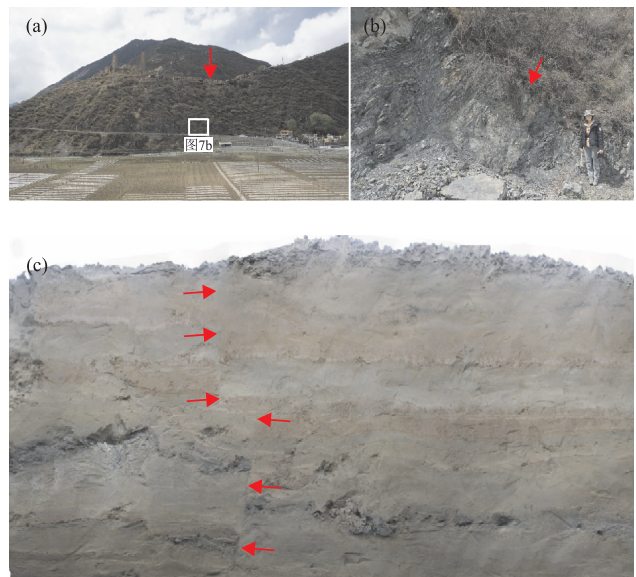
### 3 结论和展望

目前青藏高原的构造变形模式主要有2种主流的观点:①大陆逃逸模式(“刚性块体”),构造变形主要集中在板块的边界断裂上,边界断裂带表现出高活动速率,而块体内部变形微小(Tappmmoer *et al*, 1982; Armijo *et al*, 1989; Avouac *et al*, 1993);②连续变形模式,大陆变形被视为准连续的,受控于中下地壳塑性流变运动,青藏高原的侧向挤出并非刚性块体滑移的结果,而是由于地壳物质从高原内部的向东流动和蠕散(England *et al*, 1997; Flesch *et al*, 2001)。然而,这两个模型的成立并非是无条件的, Thatcher (2007)认为这两种模型之间的变形存在一个渐变的过程,块体碰撞导致块体内部断裂逐渐增多,分裂出更多的次级块体,随着次级块体和断裂的增多,块体和断裂的变形逐渐趋于一致,块体变形也转变为连续变形模式(图8)。



a. 断裂发育于三叠系变质砂岩与古近系红色砂砾岩之间, 镜向NW; b. 断裂在山前Ⅱ级洪积扇上形成反向断层陡坎, 镜向SE。

图6 石渠县北五道梁—长沙贡玛断裂断错地貌



a. 断裂在Ⅲ级台地上形成鞍状地貌, 镜向NW; b. 松岗断裂发育三叠系变质砂岩内, 镜向NW; c. 白沙村开挖屋基揭露的松岗断裂剖面, 镜向SE。

图7 马尔康松岗镇松岗断裂构造地貌及断层剖面



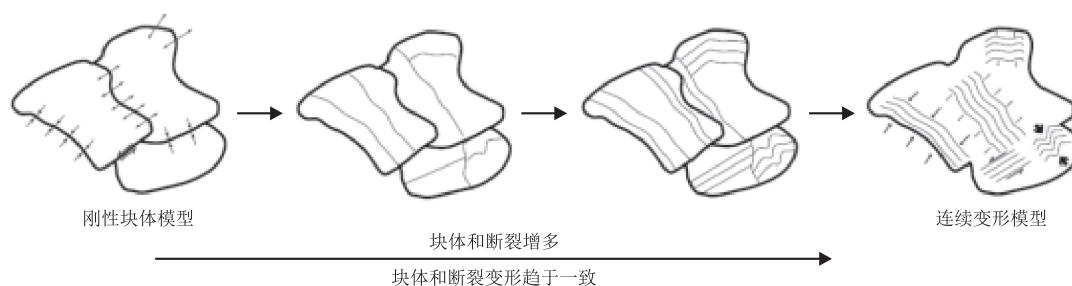


图8 大陆变形的动力学模式(Thatcher, 2007)

巴颜喀拉块体内部的阿万仓断裂、玛多—甘德断裂、甘德南缘断裂、达日断裂和五道梁—长沙贡玛断裂等大型NW向走滑断裂均具有晚第四纪活动性,它们可能扮演着分配和传递巴颜喀拉块体构造变形的角色,甚至在整个青藏高原东缘运动学机制中起着重要的作用;然而,仍需要更多的证据去证明这些NW向的大型走滑断裂是否将巴颜喀拉块体分解成更多次级的活动块体。目前,巴颜喀拉块体内部构造变形仍存在一些亟待解决的问题。(1)块体内部大型走滑断裂的几何图像和活动性仍未完全查明,笔者的野外地震地质调查发现,这些断裂不同段落之间存在着明显的活动性差异。(2)虽然已经得到这些走滑断裂一些段落的地震序列,也初步获得了它们的大震破裂特征,但仍有些段落未获得其古地震序列,因此潜在强震危险源未完全查明。(3)已得到的块体内部走滑断裂的滑动速率比边界小得多,但仍需要更多断裂段的滑动速率参数,来认识块体内部构造变形的传递特征。上述问题的回答,有助于大家认识巴颜喀拉块体内部,乃至青藏高原东缘地区构造变形的运动学和动力学机制,以及东缘地区的大地震活动规律。

## 参考文献

- 陈长云,任金卫,孟国杰,等. 2013. 巴颜喀拉块体东部活动块体的划分、形变特征及构造意义[J]. 地球物理学报, 56(12): 4125-4141.
- 葛肖虹,刘俊来,任收麦,等. 2014. 青藏高原隆升对中国构造-地貌形成、气候环境变迁与古人类迁徙的影响[J]. 中国地质, 41(3): 698-714.
- 李陈侠,袁道阳,杨虎,等. 2016. 东昆仑断裂带东段分支断裂—阿万仓断裂晚第四纪构造活动特征[J]. 地震地质, 38(1): 44-64.
- 梁明剑,黄飞鹏,孙凯,等. 2022. 巴颜喀拉块体内部五道梁—长沙贡玛断裂中段全新世活动及最新古地震证据[J]. 地球科学, 47(3): 766-778.
- 梁明剑,杨耀,杜方,等. 2020. 青海达日断裂中段晚第四纪活动性与1947年 $M_{7.4}$ 地震地表破裂带再研究[J]. 地震地质, 42(3): 703-714.
- 刘静,曾令森,丁林,等. 2009. 青藏高原东南缘构造地貌、活动构造和下地壳流动假说[J]. 地质科学, 44(4): 1227-1255.
- 孙东,王道永,吴德超,等. 2010. 马尔康巴拉水电站近场区主要断裂活动性及对工程的影响[J]. 工程地质学报, 18(6): 940-949.
- 闻学泽. 2018. 巴颜喀拉块体东边界千年破裂历史与2008年汶川、2013年芦山和2017年九寨沟地震[J]. 地震学报, 40(3): 255-267.
- 熊仁伟,任金卫,张军龙,等. 2010. 玛多—甘德断裂甘德段晚第四纪活动特征[J]. 地震, 30(4): 65-73.
- 徐锡伟,陈文彬,于贵华,等. 2002. 2001年11月14日昆仑山库赛湖地震( $M_s 8.1$ )地表破裂带的基本特征[J]. 地震地质, 24(1): 1-13.
- 徐锡伟,韩竹军,杨晓平,等. 2016. 中国及邻近地区地震构造图[M]. 北京:地震出版社.
- 徐锡伟,闻学泽,陈桂华,等. 2008. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义[J]. 中国科学(D辑:地球科学), (5): 529-542.
- 袁道阳,张培震. 2001. 青藏高原新生代构造和第四纪研究的进展及问题讨论[J]. 西北地震学报, (2): 96-102.
- 张克信,王国灿,洪汉烈,等. 2013. 青藏高原新生代隆升研究现状[J]. 地质通报, 32(1): 1-18.
- 张培震,邓起东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑:地球科学), (增刊): 12-20.
- 张培震,闻学泽,徐锡伟,等. 2009. 2008年汶川8.0级特大地震孕育和发生的多单元组合模式[J]. 科学通报, 54(7): 944-953.
- 张裕明,李闽峰,孟勇琦,等. 1996. 巴颜喀拉山地区断层活动性研究及其地震地质意义[A]//国家地震局地质研究所编. 活动断裂研究理论与应用(5). 北京:地震出版社:154-171.

- Armijo R, Tapponnier P, Han T. 1989. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 94(B3), 2787–2838.
- Avouac J P, Tapponnier P. 1993. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 20(10), 895–898.
- Burchfiel B C, Royden L H, van der Hilst R D, *et al.* 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China [J]. *GSA Today*, 18(7):4–11.
- England P, Molnar P. 1997. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 130(3), 551–582.
- Flesch L M, Haines A J, Holt W E. 2001. Dynamics of the India-Eurasia collision zone [J]. *Journal of Geophysical Research*, 106(B8), 16435.
- Fu B H, Shi P L, Guo H D, *et al.* 2011. Surface deformation related to the 2008 Wenchuan earthquake, and mountain building of the Longmen Shan, eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40:805–824.
- Hubbard J, Shaw J H. 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan Plateau, and the 2008 Wenchuan ( $M_w 7.9$ ) earthquake [J]. *Nature*, 458:197–197.
- Liang M J, Wu W W, Yang Y, *et al.* 2022. Late Quaternary fault activity and deformation mechanism in the eastern Tibetan Plateau (Dari fault, Bayan Har Block) [J/OL]. (2022-10-08) [2022-10-18]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040618222003093>.
- Meng Q R, Hu J M, Erchie W, *et al.* 2006. Late Cenozoic denudation by large-magnitude landslides in the eastern edge of Tibetan Plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(1–2):252–267.
- Ren J J, Xu X W, Yeats R S, *et al.* 2013. Latest Quaternary paleoseismology and slip rates of the Longriba fault zone, eastern Tibet: Implications for fault behavior and strain partitioning [J]. *Tectonics*, 32(2):216–238.
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, *et al.* 1997. Surface deformation and lower crustal flow in Eastern Tibet [J]. *Science*, 276:788–790.
- Shen Z K, Lu J N, Wang M, *et al.* 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau [J]. *J Geophys Res*, 110:1–17.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, *et al.* 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 10(12):611.
- Thatcher W. 2007. Microplate model for the present-day deformation of Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 112, B01401.
- Xu X, Keller G R, Gao R, *et al.* 2015. Uplift of the Longmen Shan area in the eastern Tibetan Plateau: an integrated geophysical and geodynamic analysis [J]. *International Geology Review*, 58(1):1–18.
- Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, *et al.* 2010. Oblique, high-angle, listric-reverse faulting and associated development of strain: The Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China [J]. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 38:353–382.

## New Progress of Research on NW-trending Active Faults within the Bayan Har Block

LIANG Minjiang<sup>1</sup>, ZHOU Wenyong<sup>1</sup>, DONG Yun<sup>2</sup>, LIAO Cheng<sup>1</sup>, ZUO Hong<sup>1</sup>, CHEN Han<sup>1</sup>, ZHAO Guohua<sup>2</sup>

(1. Sichuan Earthquake Agency, Sichuan Chengdu 610041, China;

2. Nuclear Industry Southwest Survey&Design Institute Co., Ltd., Sichuan Chengdu 610025, China)

**Abstract:** Some NW-trending strike-slip faults have been developed within the Bayan Har block, such as the Awancang fault, the Maduo-Gande fault, southern margin of the Gande fault, the Dari fault, the Wudaoliang-Changshagongma fault, and the Songgang fault. The latest research suggests that these strike-slip faults show a late Quaternary activity and have tectonic conditions for producing strong earthquakes. Therefore, the active faults might play a role in distributing and accommodating the tectonic deformation of the Bayan Har block, and even play an important role in the kinematic mechanism of the eastern margin of the Tibetan Plateau.

**Keywords:** the Bayan Har block; active faults; late Quaternary activity; structural deformation

# 龙门山前山断裂中段古地震研究

官云彬<sup>1,2</sup>, 徐琳<sup>2</sup>, 陈永东<sup>2,3</sup>, 秦宇龙<sup>4</sup>, 庞仁俊<sup>2</sup>, 刘大明<sup>1,2</sup>, 李海<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 四川省地质矿产勘查开发局川西北地质队, 四川 绵阳 621000;  
3. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 4. 四川省地质调查院, 四川 成都 610084)

**摘要:**“5·12”汶川地震形成了3条地表同震破裂带,前人以此为线索在龙门山中央断裂中段、前山断裂中段以及小鱼洞断裂开展了系列古地震探槽研究,在古地震识别、年代控制、活动特征和大地震原地复发周期等方面取得了较好成果,但前山断裂中段中北部的探槽因古地震遗迹破坏较严重或未保存而效果不太理想,为补充前山断裂中段的古地震探槽研究基础数据,笔者在该断裂中部的汉旺镇群新村、北部的雎水镇月儿门村一带的Ⅱ级河流阶地上开挖了2条探槽,并进行了古地震研究工作。结果显示:(1)“5·12”汶川地震导致的地表垂向位移量在汉旺镇群新村白溪河南西岸为1.4~1.5 m,在雎水镇月儿门村雎水河东岸约0.53~0.6 m;(2)汉旺镇群新村探槽揭示了包括“5·12”汶川地震在内的至少2次大地震事件,且2次事件的垂向位移量相当,而雎水镇月儿门村探槽仅揭示了“5·12”汶川地震事件;(3)根据AMS<sup>14</sup>C年龄测定结果,汉旺镇群新村探槽记录的前一次古地震事件应发生在2003±38 cal BP之前,与前人在擂鼓、映秀、小鱼洞、白鹿等地探槽记录的前一次古地震为同一事件,结合前人在地貌、古地震探槽方面的研究及历史记录,笔者认为这次古地震事件可能发生于3100 a BP左右。

**关键词:**龙门山;灌县—江油断裂;古地震;探槽

**中图分类号:** P316.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8115(2023)01-0018-08

**DOI:** 10.13716/j.cnki.1001-8115.2023.01.003

2008年5月12日14时28分,在四川省阿坝州汶川县映秀镇发生了8.0级巨大地震,徐锡伟等(2008)认为其发生于龙门山构造带中央断裂从15~20 km深处的滑脱面上翘的断坡或断坡变陡的转折部位,破裂自断层面上扩展,使在10 km深处合并的中央断裂、前山断裂以及它们之间的小鱼洞断裂形成了3条同震地表破裂带。其中北川—映秀地表破裂带沿中央断裂展布,长约240 km,整体为一条兼有右旋走滑分量和逆冲运动分量的破裂带,其中南西段以逆冲为主,北东段以右行走滑为主;汉旺—白鹿地表破裂带沿前山断裂展布,长约72 km,是一条逆冲为主、右行走滑为辅的逆断层型破裂带;小鱼洞地表破裂带长约6 km,是一条带擦断层性质的破裂带,其逆冲与左行走滑分量相当(徐锡伟等,2008;李勇等,2009)。

这次地震引发了学者们对龙门山断裂带大地震活动特征的研究热情,而古地震探槽研究则是最直接揭示活动断层晚第四纪大地震活动规律的重要途径(冉勇康等,2018)。汶川地震前,对龙门山地区古地震及其活动特征、复发周期的研究较少,且多以地貌学研究为主,仅有少量古地震探槽研究(李勇等,2006b;周荣军等,2006;Densmore *et al.*,2007)。汶川地震后,众多学者以这次地震形成的同震地表破裂带为线索,在中央断裂中段和北段、前山断裂中段、小鱼洞断裂,以及未见明显地表形变带的前山断裂北段和南段、后山断裂北段的多个地点开展了古地震探槽研究,对古地震的发生时间、强度、活动特征、复发周期、大地震活动的分段差异性特征及相互关系、断层的活动性等进行了探讨,取得了丰富的成果(冉勇康等,2008,2018;Ran *et al.*,2010,2013,2014;陈立春等,2008,2009,2013;史翔,2009;郑文俊等,2008;Wang *et al.*,2015;Sun *et al.*,2015)。其中较为可靠的古地震事件主要集中在中央断裂的中段和北段、前山断裂的中段和南段以及小鱼洞断裂。对于前山断裂中段,前人在断裂南端的白鹿镇中心学校、中部的九龙和汉旺等地开展过古地震探槽研究,其中仅白鹿镇中心学校处的2条探槽揭露古地震事件较清楚,而九龙、汉旺探槽均开挖于Ⅰ级阶地之上,古地震遗迹破坏较严重或未保存,且没有相应的年龄控制。基于此,我们沿前山断裂中段,在汉旺镇群新村的白

收稿日期:2022-08-18;修回日期:2022-11-04

基金项目:绵阳市活断层普查项目资助(MYZC招(2020)71号)

作者简介:官云彬(1988-),男,四川内江人,在读硕士研究生,工程师,主要从事第四纪地质、矿产地质调查研究。E-mail:815469749@qq.com.

通讯作者:徐琳(1986-),男,四川绵阳人,高级工程师,主要从事基础地质调查研究。E-mail:664998491@qq.com.



溪河南西岸的Ⅱ级阶地、睢水镇月儿门村睢水河东岸的Ⅱ级阶地上的地表破裂带开挖了2条探槽,为前山断裂中段的古地震探槽研究补充基础数据,并为进一步了解龙门山构造带的活动特征、揭示大地震复发规律、讨论区域地震危险性等提供基础资料。

## 1 龙门山前山断裂构造背景

龙门山地区位于青藏高原东缘与四川盆地的过渡地带,自晋宁期和澄江期形成统一基底以来,经历了一系列复杂的地质构造演化历史。志留纪中晚期到晚二叠世的裂陷活动(峨眉地裂运动)使龙门山地区产生了一系列北东向的断裂,形成了后期龙门山构造带主干断裂的雏形;晚三叠世以来,受印支期中国大陆主体拼合和喜马拉雅期印—亚碰撞两大地质事件影响,龙门山地区经历了强烈的褶皱隆升和冲断隆升作用,形成了至今仍在活动的大规模、多级次的叠加式冲断推覆构造带,其具有前展式发育特征,并在其南东侧形成了川西前陆盆地(龙学明,1991;罗志立等,1992,1998;刘树根,1993;刘和甫等,1994;刘树根等,1995;李勇等,1995;郭正吾等,1996;Yong *et al.*,2003;李智武等,2008)。

龙门山推覆构造带位于巴颜喀拉块体与华南块体的构造结合部位(图1),长约500 km,宽30~50 km,南西起于泸定、天全,向北东方向经宝兴、都江堰、江油、广元,止于陕西勉县一带,由4条逆冲断裂叠瓦状组合而成,整体走向北东(约45°)、倾向北西、倾角50°~75°,自北西往南东方向分别为龙门山后山断裂、中央断裂、前山断裂和山前隐伏断裂(图1),整体表现为右旋走滑兼逆冲的运动性质(唐荣昌等,1991;邓起东等,1994;杨晓平等,1999;李勇等,2006a,2008;陈国光等,2007;徐锡伟等,2008)。

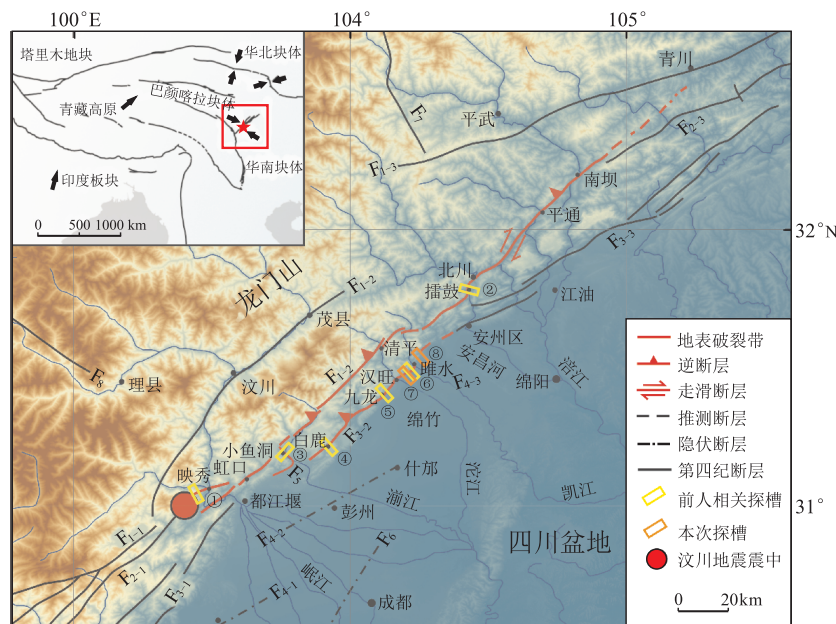


图1 龙门山构造带断裂展布与相关探槽位置(据 Ran *et al.*,2010;徐锡伟等,2008 修改)

龙门山前山断裂走向35°~45°,倾向北西,倾角约50°~70°,由北段的江油—广元断裂、中段的灌县—江油断裂以及南段的双石—大川断裂等斜列而成(徐锡伟等,2008)。其中北段晚第四纪活动迹象不明显,最晚活动时间可能在第四纪早期或前第四纪(李传友等,2004;陈立春等,2008);而前人(杨晓平等,1999;马保起等,2005;李勇等,2006b;周荣军等,2006;Ran *et al.*,2010;陈立春等,2013;Wang *et al.*,2015;冉勇康等,2018)在中、南段开展了系列地质地貌调查、古地震探槽研究等工作,表明中南段在晚第四纪具有强烈的活动性。

## 2 前人的古地震探槽研究综述

如前所述,众多学者在汶川地震后对龙门山断裂带开展了大量的古地震探槽研究,冉勇康等(2018)总结了汶川地震发生以来的古地震探槽研究成果,认为龙门山断裂带大地震活动具有明显的分段性,其中中央断裂中段、前山断裂中段以及小鱼洞断裂是全新世以来最为活跃的段落,且具有大地震原地复发的特征,中央断裂北段揭露的破裂事件相对独立且不遵循准周期规律,前山断裂南段古地震频度较高但强度较中段弱,后山断裂北段(青川断裂)揭露的构造变形可能是被动响应中央断裂北段右旋作用的结果。所以,这里主要介绍汶川地震后前山断裂中段以及与其晚第四纪大地震活动可能相关的中央断裂中段和小鱼洞断裂的古地震探槽研究现状,主要相关探槽位置见图1。

前人在龙门山前山断裂中段的白鹿、九龙以及汉旺一带开展过古地震探槽研究工作(冉勇康等,2008,2018;Ran *et al.*,2010;陈立春等,2009)。前山断裂中段南端的白鹿中心学校附近开挖了2条探槽,均垂直白鹿河Ⅱ级阶地之上的复式断层陡坎开挖,其中南侧探槽效果较好,该探槽处复式陡坎高约5 m(含弯曲隆起量),其中老陡坎高约1.7 m,汶川地震同震垂直位移量在学校两教学楼间约为1.7~2.0 m,据此可认为白鹿中心学校附近探槽记录了包括“5·12”汶川地震在内的3次位移相当的大地震事件,并根据探槽后方的破裂面与地层的交切关系、地层间的叠覆关系等特征以及地层年龄测定结果认为,3次大地震事件均发生于7.7 ka BP以后,其中“5·12”汶川地震之前的一次大地震发生于 $1.8 \pm 0.2$  ka BP之前;学校北侧的探槽同样揭示了包括“5·12”汶川地震在内的3次大地震事件,并认为3次事件都发生在约6 730~6 500 cal BP以来,其中倒数第二次事件发生的时间应早于1 170~960 cal BP(冉勇康等,2008,2018;Ran *et al.*,2010)。

在前山断裂中段中部的九龙和汉旺镇群新村附近共开挖了2条探槽,均位于河边的Ⅰ级阶地上,古地震遗迹破坏较严重或未保存,效果不太理想。其中九龙处探槽仅能识别出“5·12”汶川地震事件,该地震在探槽处形成的同震断层陡坎高约2 m;汉旺镇探槽位于白溪河北岸,“5·12”汶川地震同震断层陡坎高约0.9 m,根据探槽揭露地层上下形变特征差异以及地层间的接触关系认为,该探槽记录了包括“5·12”汶川地震在内的2次地震事件,但关于前一次地震事件的时间未见公开的测年数据和相关研究(冉勇康等,2008;陈立春等,2009;Ran *et al.*,2010)。

另外,前人在中央断裂中段的擂鼓镇、映秀镇以及小鱼洞断裂的罗元村附近开展了古地震探槽研究,其中擂鼓镇和映秀镇的古地震探槽研究显示:距今约6 000年以来,中央断裂中段共发生了包括“5·12”汶川地震在内的3次位移量相近的大地震事件,前2次大地震发生时间分别为5 920~5 730 cal BP和3 300~2 300 cal BP,并认为其具有约3 000 a的大地震原地复发准周期;小鱼洞探槽揭示了包括“5·12”汶川地震在内的2次位移相当的大地震事件,前一次古地震发生时间约为3 300~2 300 cal BP(冉勇康等,2018;Ran *et al.*,2010,2013)。

Ran等(2010)、冉勇康等(2018)将上述探槽研究成果,特别是古地震发生时间成果进行了综合分析,认为上述探槽揭示的“5·12”汶川地震之前的2次(部分探槽为1次)古地震事件应该是记录于不同地点的2次同一事件,这2次事件应具有与“5·12”汶川地震相似的垂直位移量,且均造成了中央断裂中段和前山断裂中段的同时破裂,其中小鱼洞断裂在倒数第二次地震时也同时破裂(目前没有证据表明小鱼洞断裂在倒数第三次地震时同时破裂),并认为上述断裂具有3 000 a左右的大地震原地复发准周期。

## 3 本次探槽古地震研究

### 3.1 汉旺镇群新村探槽

“5·12”汶川地震形成的汉旺—白鹿地表破裂带沿前

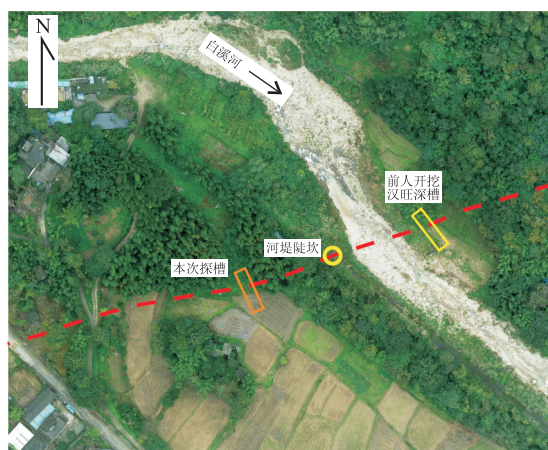
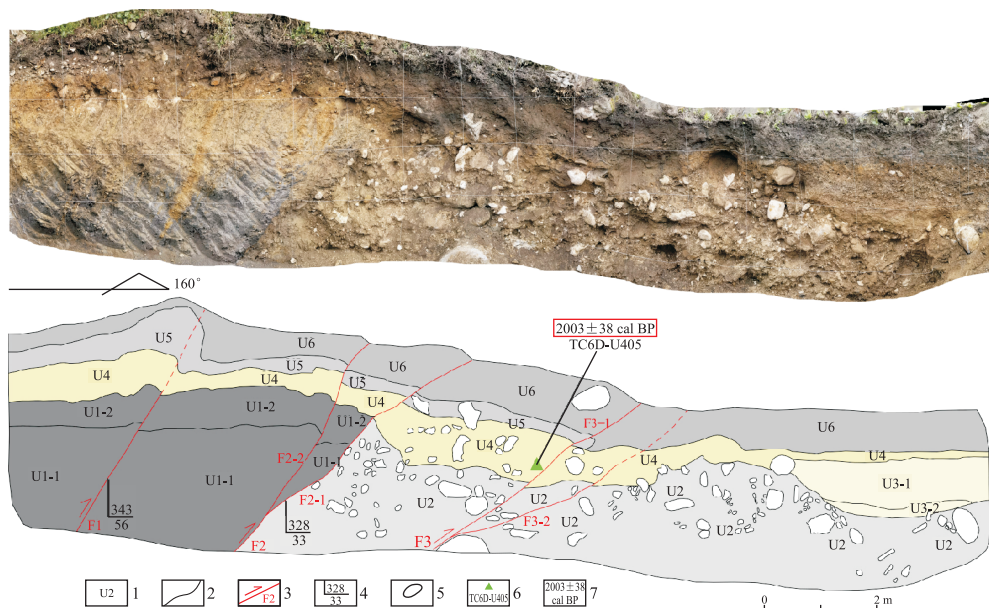


图2 汉旺镇群新村一带前山断裂通过处的地形地貌及探槽位置(红色虚线为地表破裂带)



山断裂中段呈北东向展布,在遥感影像上表现为较明显的线性影像特征,于汉旺群新村一带切割白溪河(图2),在两侧阶地上形成北东向的同震断层陡坎,前人震后在河流北东侧 I 级阶地上测得的断层陡坎高约为 0.9 m,南西岸河堤上测得的断层陡坎高约 1.5 m(冉勇康等,2008;陈立春等,2009)。笔者在前人研究的基础上,沿地表破裂带遗迹进行了实地追索和走访调查,发现上述白溪河南西岸河堤上的陡坎依然存在,并顺走向追索,在其南西约 40 m 处附近的 II 级阶地上也发现有疑似断层陡坎展布,后经走访调查证实为“5·12”汶川地震时形成的断层陡坎,其现状高 1.0 ~ 1.3 m,呈多级台阶状,走向约 75°,其北侧的竹林也表现出明显的醉汉林特征,于是我们在此处垂直陡坎布置了一条探槽(图2),以期揭露古地震事件及其特征。

探槽揭露地层见图3:U1为基岩,分2个亚层,U1-1为深灰色含碳质粉砂质泥岩,U1-2为强风化层,呈黄灰色。U2为砂质砾石层,砾石砾径一般为10~40 cm,个别大于1 m,次圆状为主,具一定分选性和成层性,为II级阶地下部砾石层,主破裂面上盘缺失。U3成层性较好,分2个亚层,U3-1为黄灰色含砾砂土,U3-2为黄灰色细-粉砂。U4为黄灰色含砾粘土,可作为标志层,砾石成分主要为灰岩,呈次圆状,分布不均匀。U5为褐灰色含粘土砾石层,砾石呈次棱角状-次圆状,砾径2~18 cm。U6为表层耕植土,夹有植物根系。



1: 地层单元编号; 2: 地层界线; 3: 逆断层及编号; 4: 产状; 5: 砾石; 6:  $^{14}\text{C}$  样品采集位置及编号; 7:  $^{14}\text{C}$  测年校正年龄

图3 汉旺镇群新村探槽东壁素描图

该探槽记录了包括“5·12”汶川地震事件在内的至少2次地震事件,证据及特征如下:

(1) 探槽剖面主要揭露了3组断层,分别编号F1、F2、F3,其中F2和F3又存在分支断层面,分别编号F2-1和F2-2、F3-1和F3-2(图3)。其中F1逆冲错断了基岩层U1,并且其上覆的U4、U5、U6受挤压发生了弯曲隆起变形,说明它是“5·12”汶川地震的结果;F2和F3均逆冲断错至地表,说明“5·12”汶川地震时均有活动或形成于这次地震,以U4为标志层可测量出其F2上盘与F3下盘间的高差约为1.4 m,这不仅与探槽处现存约1.3 m的“5·12”汶川地震同震断层陡坎的高度相符,也与前人震后在探槽北东侧附近得到的0.9~1.5 m的同震断层陡坎高度相吻合,说明U4沉积以来仅经历了“5·12”汶川地震一次地震位错事件,而其1.4 m的高差即代表了这次地震在探槽处的垂直位移量。

(2) 主断层F2不仅逆冲错断了地表松散堆积层(U4、U5、U6),还将基岩层U1沿F2-1推覆到U2之上,其上部强风化层U1-2顶面高出槽底约2.8 m,而下盘又未见基岩出露,说明基岩沿主断面F2的累计垂直位移量应大于2.8 m,结合U4标志层1.4 m的垂直位错量,表明沿F2至少发生了包含“5·12”汶川地震在内的2次大地震位错事件。而“5·12”汶川地震之前的一次大地震事件应发生在标志层U4堆积之前,笔者在U4地层中采集到了碳屑样品(TC6D-U4-5)并送样进行了AMS $^{14}\text{C}$ 年龄测定,获得了利用OxCal v4.2软件进行树轮校正(采用北半球陆地IntCal 13放射性碳校正曲线)后的日历年龄为 $2003 \pm 38$  cal BP,表明该次

地震应发生在  $2\ 003 \pm 38$  cal BP 之前。

### 3.2 睢水镇月儿门村探槽

“5·12”汶川地震形成的地表破裂带在睢水镇月儿门村附近顺睢水河近南北向展布,往北到河流拐弯处转向北东,遥感影像线性影像特征较明显。根据野外验证追索和现场走访调查,该地表破裂带部分从睢水河东岸的Ⅱ级阶地通过,并在原本平整的庄稼地里形成了一条走向约  $345^\circ$  (图 4b)、高  $0.5 \sim 0.6$  m 的断层陡坎(图 4a、图 4c),该探槽即垂直断层陡坎开挖于Ⅱ级阶地之上的庄稼地里(图 4b)。

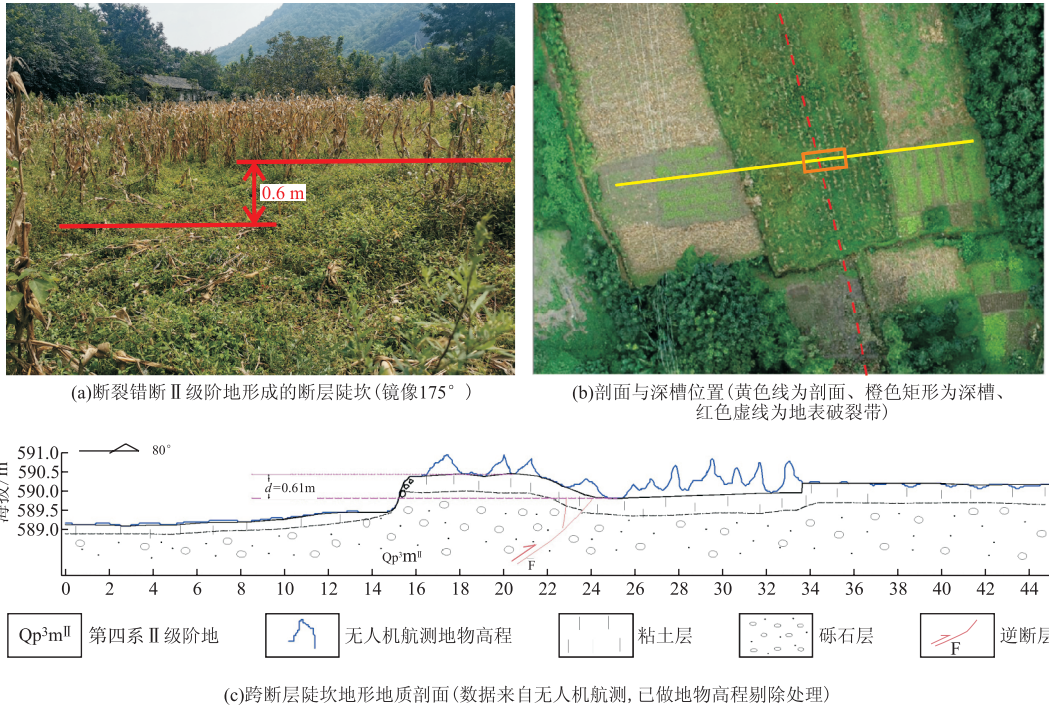


图 4 安州区睢水镇月儿门村一带前山断裂通过处的地形地貌及探槽位置

探槽揭露的地层(图 5)如下:U1 位于Ⅱ级阶地顶部,分 2 个亚层,U1-1 为深灰色耕植土,U1-2 为褐灰色含砂粘土。U2 位于Ⅱ级阶地上部,分 3 个亚层,U2-1 为浅黄灰色-褐灰色含粘土细砂;U2-2 为中-粗砂;U2-3 为含砾粗砂。U3 为Ⅱ级阶地下部砾石层,为浅黄灰色含砂砾石层,砾石大小差异大,以粗砾、巨砾为主。该探槽仅揭露了“5·12”汶川地震一次地震事件:(1)探槽揭露了一组断层(包含 3 条次级断层面),其直接错断至地表,使上述地层均发生了不同程度的逆冲位错和弯曲变形,表明了其代表的地震事件距今很近,只可能是“5·12”汶川地震形成的断层面。(2)以 U1-2 为标志层,测得其底界在 F1 断层两盘的垂直位移量为  $0.53$  m(不含断层带内的局部挤压隆起或抬升量),与地表调查得到的  $0.5 \sim 0.6$  m 高的同震断层陡坎相吻合,也说明了这是“5·12”汶川地震一次地震事件形成的。

## 4 讨论

本次汉旺镇群新村探槽记录的“5·12”汶川地震之前的一次古地震应该发生在  $2\ 003 \pm 38$  cal BP 之前,这个时间与白鹿镇中心学校处探槽中得出的倒数第二次大地震发生时间( $1.8 \pm 0.2$  ka BP 之前)一致(Ran *et al*, 2010),也与中央断裂中段的映秀镇、擂鼓镇以及小鱼洞断裂罗元村处探槽中得到的倒数第二次大地震发生时间( $3\ 300 \sim 2\ 300$  cal BP)相吻合(Ran *et al*, 2010, 2013),表明它们应属于发生在龙门山断裂带中段的一次地震事件。而范念念等(2010)根据《今本竹书纪年》记载的“商帝乙三年六月,周地震”,和《吕氏春秋》卷六《制乐篇》记载的“周文王立,国八年,岁六月,文王寝疾五日而地动,东西南北,不出国郊,群臣皆恐”,认为其描述的是发生于公元前 1099 年的同一次大地震,并认为这次地震发生在龙门山一带,其导致了岷江的改道,进而引起了三星堆文明消亡与金沙文明兴起。上述历史记录的时间点与古地震探槽研究



得到的倒数第二次大地震的发生时间相吻合,说明可能是同一事件,即“5·12”汶川地震之前的一次大地震可能发生于3 100 a BP左右。而根据本次汉旺镇群新村探槽中基岩沿主断面大于2.8 m的累计垂直位移量是“5·12”汶川地震在探槽处1.4 m垂直位移量的至少2倍,说明前一次古地震应具有与“5·12”汶川地震相当甚至更大的垂直位移量,结合前人的古地震探槽研究成果(冉永康等,2008,2018;陈立春等,2009;Ran *et al*,2010),认为2次地震垂直位移量相当的结论是比较合理的。

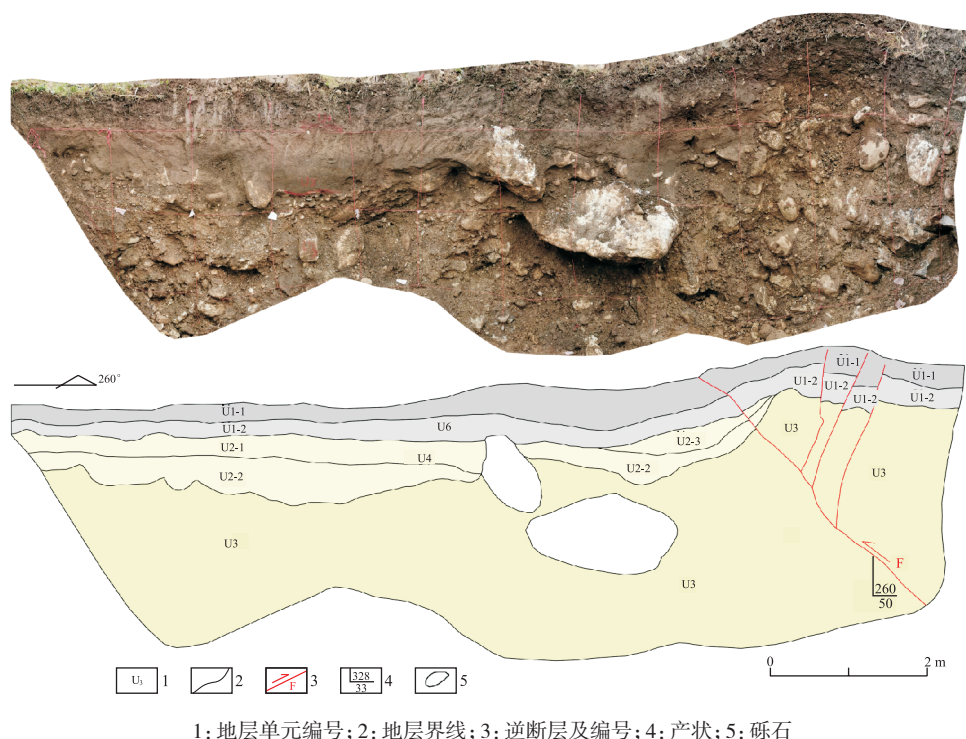


图5 安州区睢水镇月儿门村探槽南壁素描图

## 5 结论

(1) 根据本次地质地貌调查及古地震探槽研究,“5·12”汶川地震形成的地表垂向位移量在汉旺镇群新村白溪河南西岸Ⅱ级阶地上约为1.4~1.5 m,在睢水镇月儿门村睢水河东岸Ⅱ级阶地上为0.53~0.6 m。

(2) 本次在前山断裂中段开挖了2条探槽,其中汉旺镇群新村探槽揭示了包括“5·12”汶川地震在内的至少2次大地震事件,且2次地震事件的垂向位移量相当,而睢水镇月儿门村探槽仅揭示了“5·12”汶川地震事件。

(3) 根据AMS<sup>14</sup>C年龄测定结果,汉旺镇群新村探槽记录的前一次古地震事件应该发生在2 003 ± 38 cal BP之前,与前人在擂鼓、映秀、小鱼洞、白鹿等地探槽记录的前一次古地震为同一事件,结合前人在地质地貌、古地震探槽方面的研究及历史记录,笔者认为这次古地震事件可能发生于3 100 a BP左右。

## 参考文献

- 陈国光,计凤桔,周荣军,等. 2007. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质, 29(3):657-673.
- 陈立春,陈杰,刘进峰,等. 2008. 龙门山前山断裂北段晚第四纪活动性研究[J]. 地震地质, 30(3):710-722.
- 陈立春,冉永康,陈杰,等. 2009. 龙门山前山断裂大地震原地重复发生的地质地貌证据[J]. 第四纪研究, 29(3):472-483.
- 陈立春,冉永康,王虎,等. 2013. 芦山地震与龙门山断裂带南段活动性[J]. 科学通报, 58(20):1925-1932.
- 邓起东,陈社发,赵小麟. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 16(4):389-403.
- 范念念,吴保生,刘乐. 2010. 地震导致河流改道与古蜀文明的变迁[J]. 山地学报, 28(4):453-462.
- 郭正吾,邓康龄,韩永辉. 1996. 四川盆地形成与演化[M]. 北京:地质出版社.
- 李勇,曾允孚,伊海生. 1995. 龙门山前陆盆地沉积及构造演化[M]. 成都:成都科技大学出版社.



- 李勇,周荣军, Densmore A L, 等. 2006a. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志[J]. 第四纪研究, 26(1): 40-51.
- 李勇,周荣军,董顺利, 等. 2008. 汶川地震的地表破裂与逆冲-走滑作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4):404-413.
- 李勇,周荣军,孙爱珍, 等. 2006b. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应[M]. 地质出版社.
- 李勇,黄润秋,周荣军, 等. 2009. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂[J]. 工程地质学报, 17(1):3-18.
- 李智武,刘树根,陈洪德, 等. 2008. 龙门山冲断带分段-分带性构造格局及其差异变形特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4):440-454.
- 刘和甫,梁慧社,蔡立国, 等. 1994. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地质学报, 68(2):101-118.
- 刘树根. 1993. 龙门山冲断带与川西前陆盆地的形成演化[M]. 成都:成都科技大学出版社.
- 刘树根,罗志立,戴苏兰, 等. 1995. 龙门山:冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降[J]. 地质学报, 69(3):205-214.
- 龙学明. 1991. 龙门山中北段地史发展的若干问题[J]. 成都地质学院学报, 18(1):8-16.
- 罗志立,金以钟,朱夔玉, 等. 1988. 试论上扬子地台的峨眉地裂运动[J]. 地质论评, 34(1):11-24.
- 罗志立,龙学明. 1992. 龙门山造山带崛起和川西前陆盆地沉降[J]. 四川地质学报, 12(1):1-17.
- 马保起,苏刚,侯治华, 等. 2005. 利用岷江阶地的变形估算龙门山断裂带中段晚第四纪滑动速率[J]. 地震地质, 27(2):234-242.
- 冉勇康,陈立春,陈桂华, 等. 2008. 汶川 $M_s 8.0$ 地震发震断裂大地震原地重复现象初析[J]. 地震地质, 30(3):630-643.
- 冉勇康,王虎,陈立春, 等. 2018. 龙门山断裂带晚第四纪的大地震活动:来自古地震研究的资料[J]. 地球物理学报, 61(5): 1938-1948.
- 史翔. 2009. 龙门山中央断裂带北川-邓家地区构造变形样式及古地震研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所.
- 唐荣昌,文德华,黄祖智, 等. 1991. 松潘-龙门山地区主要活动断裂带第四纪活动特征[J]. 中国地震, 7(3):66-73.
- 徐锡伟,闻学泽,叶建青, 等. 2008. 汶川 $M_s 8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 30(3):597-629.
- 杨晓平,蒋溥,宋方敏, 等. 1999. 龙门山断裂带南段错断晚更新世以来地层的证据[J]. 地震地质, 21(4):341-345.
- 郑文俊,李传友,王伟涛, 等. 2008. 汶川8.0级地震陡坎(北川以北段)探槽的记录特征[J]. 地震地质, 30(3):697-709.
- 周荣军,李勇, Alexander L Densmore, 等. 2006. 青藏高原东缘活动构造[J]. 矿物岩石, 26(2):40-51.
- Densmore A L, Ellis M A, Li Y, *et al.* 2007. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 26, TC4005.
- Sun H Y, He H L, Ikeda Y, *et al.* 2015. Holocene paleoearthquake history on the Qingchuan fault in the northeastern segment of the Longmenshan Thrust Zone and its implications [J]. *Tectonophysics*, 660 :92-106.
- Ran Y K, Chen L, Chen J, *et al.* 2010. Paleoseismic evidence and repeat time of large earthquakes at three sites along the Longmenshan fault zone [J]. *Tectonophysics*, 491 :141-153.
- Ran Y K, Chen W S, Xu X W, *et al.* 2013. Paleoseismic events and recurrence interval along the Beichuan-Yingxiu fault of Longmenshan fault zone, Yingxiu, Sichuan, China [J]. *Tectonophysics*, 584 :81-90.
- Ran Y K, Chen W S, Xu X W, *et al.* 2014. Late Quaternary paleoseismic behavior and rupture segmentation of the Yingxiu - Beichuan fault along the Longmen Shan fault zone, China [J]. *Tectonics*, 33(11):2218-2232.
- Wang H, Chen L C, Ran Y K, *et al.* 2015. Paleoseismic investigation of the seismic gap between the seismogenic structures of the 2008 Wenchuan and 2013 Lushan earthquakes along the Longmen Shan fault zone at the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Lithosphere*, 7(1):14-20.
- Yong L, Allen P A, Densmore A L, *et al.* 2003. Evolution of the Longmen Shan Foreland Basin (Western Sichuan, China) during the Late Triassic Indosinian Orogeny [J]. *Basin Research*, 15(1):117-138.

## Research on Paleearthquakes along the Middle Section of the Front-Range Fault of Longmenshan, China

GUAN Yunbin<sup>1,2</sup>, XU Lin<sup>2</sup>, CHEN Yongdong<sup>2,3</sup>, QIN Yulong<sup>4</sup>, PANG Renjun<sup>2</sup>, LIU Daming<sup>1,2</sup>, LI Hai<sup>2</sup>

(1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China; 2. Northwest Sichuan Geological Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Sichuan Mianyang 621000, China; 3. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China; 4. Sichuan Geological Survey, Sichuan Chengdu 610084, China)

**Abstract:** The “5·12” Wenchuan Earthquake produced three coseismic surface rupture zone. Previous researchers

carried out a series of paleoseismic trough trenching along the middle section of the Central fault, the middle section of the Front-range fault and the Xiaoyudong fault. These results showed good results in paleoearthquake identification, paleoearthquake era, characteristics of paleoseismicity and recurrence intervals of large earthquakes. However, the trenches along the north-central of the middle section of the Front-range fault is not ideal because the paleoearthquake evidence was damaged or not preserved. In order to supplement the basic data of the palaeoseismic trench research in the middle section of the Front-range fault, we excavated two trenches at the class II river terrace near Qunxin Village of Hanwang Town and Yueermen Village of Jushui Town along this fault. The main results are as follows: (1) The vertical displacement caused by the “5·12” Wenchuan Earthquake is about 1.4~1.5 m on the south west bank of Baixi River in Qunxin Village of Hanwang Town, and about 0.53~0.6 m on the east bank of Jushui River in Yueermen Village of Jushui Town; (2) The trench in Qunxin Village of Hanwang Town revealed at least two major earthquakes including the 2008 Wenchuan Earthquake. The vertical displacements of the two events were similar, whereas the trench in Yueermen Village of Jushui Town revealed only the “5·12” Wenchuan Earthquake. (3) According to the results of AMS<sup>14</sup>C dating, the previous paleoearthquake recorded in the trench in Qunxin Village of Hanwang Town occurred before  $2\,003 \pm 38$  cal BP, which is consistent with the previous paleoearthquake recorded in Leigu, Yingxiu, Xiaoyudong and Bailu, etc. Based on the previous studies on geomorphology, paleoseismic trench and historical records, we suggest that the paleoearthquake might be occurred around 3 100 a BP.

**Key words:** the Longmenshan; the Guanxian-Jiangyou fault; paleoearthquake; trench

## 2020年第4期《鲜水河断裂磨西段新发现地震地表破裂带初步研究》更正申明

马超,刘玉法,张威,周亚东

(四川省地震局,四川 成都 610041)

图1中的1986年康定南地震震中修改为1786年康定南地震震中。修订后的图1如下:

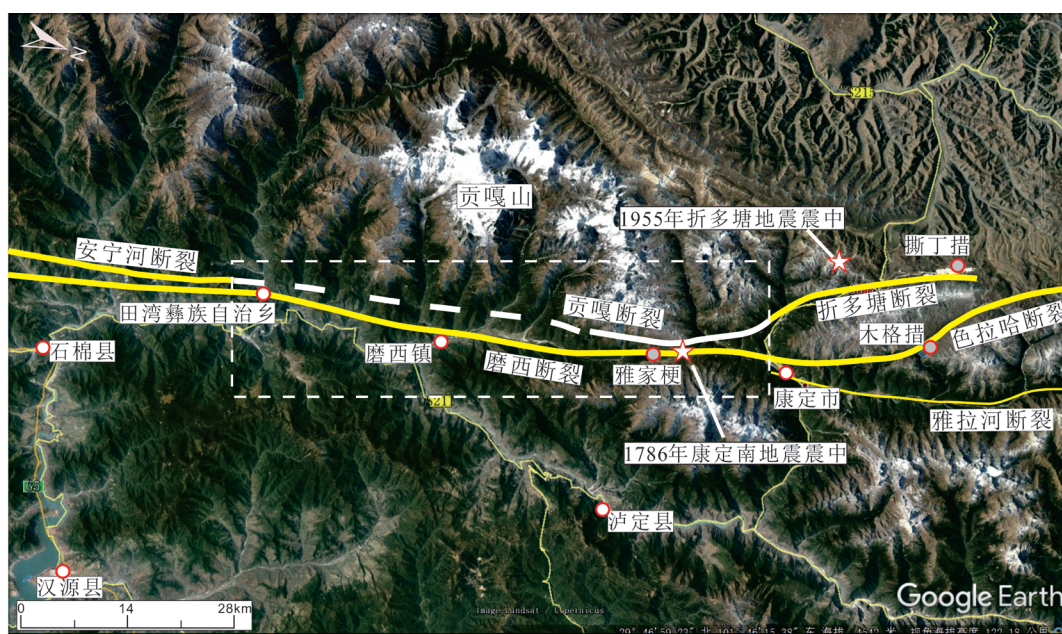


图1 新发现的地表破裂带(卫星影像来源于 Google Earth)

# 基于跨断层水平形变资料的鲜水河断裂现今活动分析

唐伟, 苏琴, 李菲菲, 彭丽媛, 竹任国  
(四川省地震局地壳形变观测中心, 四川雅安 625000)

**摘要:**利用2000—2018年鲜水河断裂基线、蠕变资料,将场地缩放到统一尺度,分析不同资料反映的断裂活动特征,探讨断层活动与周边地震活动的关系。结果显示:①跨断层近场水平形变资料表明鲜水河断裂活动具有明显分段性,按照断层活动速率大致分为北西段、中段和南东段,与地质上分段方式有一定差异;②跨断层近场水平形变资料能不同程度显示出偏离正常背景的活动变化,捕捉到附近中强地震前兆信息和震后调整变化,为地震危险性判定提供重要参考;③基线和蠕变反映的断层活动存在差异,基线活动明显高于蠕变,基线走滑速率为0.30~2.05 mm/a,张压速率为0.47~1.21 mm/a,蠕变走滑速率为0.14~0.62 mm/a,张压速率为0.12~0.29 mm/a;④蠕变和基线均显示研究区内的鲜水河断裂以左旋走滑活动为主,北西段和中段活动强于南东段,基线资料显示2017年芦山 $M_s7.0$ 地震后张压活动总体加强。

**关键词:**蠕变;基线;鲜水河断裂;断层活动特征

**中图分类号:** P315.725 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8115(2023)01-0026-06

**DOI:** 10.13716/j.cnki.1001-8115.2023.01.004

鲜水河断裂是我国西部巨型反“S”形构造组成部分,大致呈 $N40^\circ \sim 60^\circ W$ 方向展布于甘孜东谷—炉霍—道孚—康定一线,断面大多倾向为NE向,倾角较陡,向南东在得妥至石棉间与南北向的安宁河断裂带重接,断裂带延长超过350千米,规模宏大,构造单一,是一条受古老基底断裂控制的大断裂带<sup>①</sup>(潘懋等,1994)。前人研究结果显示,活动地块边界带因差异运动最利于应力高度积累而孕育强震,而 $M_s7.0$ 以上强震主要发生在鲜水河—小江等大型活动断裂带上(李杰等,2010;张培震等,2013)。1725年以来,鲜水河断裂记录到9次 $M_s6.9$ 及以上地震,其附近也相继发生了2008年四川汶川 $M_s8.0$ 、2010年青海玉树 $M_s7.1$ 、2017年四川九寨沟 $M_s7.0$ 等地震,鲜水河断裂现今活动研究对地震趋势研判和震情监视跟踪具有十分重要的意义。当前许多专家学者围绕鲜水河断裂开展了众多研究,采用数值模拟、主成分分析、有限元模型等方法,从地质构造、大地测量、断层力学、地震活动性、断层活动特征等多方面进行了分析和探讨(潘懋等,1994;刘冠中等,2013;李腊月等,2016;李玉江等,2017;李铁明等,2019)。断层形变观测结果能直接反映断层活动水平和受力状态(李杰等,2010),本文依据鲜水河断裂最新的多种跨断层资料及附近地震活动,对比分析不同近场水平形变资料反映的断层现今活动特征,探讨断层活动与强震活动的关系,为鲜水河断裂地震危险性判定提供参考。

## 1 资料基本情况

四川省地震局地壳形变观测中心于20世纪70~80年代在鲜水河断裂带布设跨断层监测场地,开展系统的短水准、短基线测量工作,跨断层监测工作持续至今,积累了丰富的跨断层形变监测资料。本文选取2000年以来鲜水河断裂11个蠕变和基线场地(图1)的观测资料,因基线测量在2018年后由基线尺观测改为全站仪测距,为方便同一观测手段数据对比,资料选取截止到2018年,时间跨度19年(表1)。

## 2 数据处理流程和方法

### 2.1 数据预处理

剔除受场地变化、人为干扰影响以及同震阶跃数据,用最小二乘法滤除数据的偶然误差。

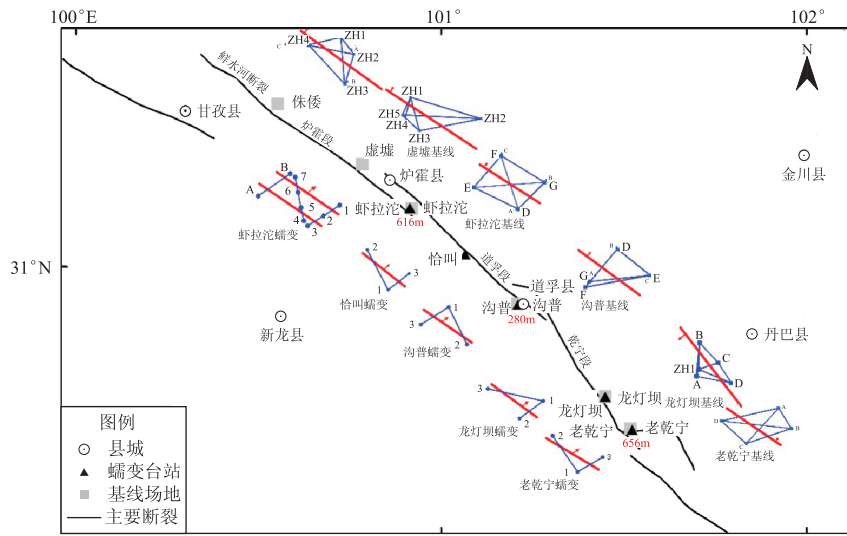
收稿日期:2022-06-14;修回日期:2022-06-30

基金项目:四川省地震局地震科技专项(LY2116)资助。

作者简介:唐伟(1986-),男,四川射洪人,工程师,主要从事地震监测与分析工作。E-mail:scshtw@163.com。

<sup>①</sup>四川省地震局地震测量队,川西大地形变测量网点布设图集(1985年)。





断层线左侧为蠕变场地示意图,右侧为基线场地示意图,中间红色距离为蠕变-基线场地距离。

图1 鲜水河跨断层水平形变监测场地分布

表1 鲜水河断裂近场水平形变监测场地信息

场地名称	观测手段	所跨断层	断层走向	断层倾向、倾角	断层方位角/°	斜交边		直角边		资料选取时段/年
						长度/m	交角/°	长度/m	交角/°	
侏倭	基线	炉霍段	N45°W	NE ∠ 75° ~ 80°	315	288	40	168	129	2000—2018
虚墟	基线	炉霍段	N40°W	NE ∠ 80°	305	240	63	216	149	2000—2018
虾拉沓	基线	炉霍段	N50°W	NE ∠ 70°	310	216	141	144	89	2000—2018
沟普	基线	道孚段	N48°W	NE ∠ 60° ~ 80°	312	120	45	96	99	2000—2018
龙灯坝	基线	乾宁段	N30°W	NE ∠ 80°	315	72	310	48	260	2000—2018
老乾宁	基线	乾宁段	N35° ~ 45°W	NE ∠ 65°	320	85	168	48	192	2000—2018
虾拉沓	蠕变	炉霍段	N50°W	SE ∠ 70°	330	65	150	31	90	2000—2018
恰叫	蠕变	道孚段	N45° ~ 70°W	SE ∠ 60° ~ 85°	330	35	145	22	90	2000—2018
沟普	蠕变	道孚段	N50°W	NE ∠ 60°	330	33	146	20	88	2000—2018
龙灯坝	蠕变	乾宁段	N36°W	SW ∠ 38°	330	30	28	20	90	2000—2018
老乾宁	蠕变	乾宁段	N30°W	NE ∠ 75°	330	28	147	19	90	2000—2018

### 2.2 确定场地缩放比例系数,将场地归算到统一标准

跨断层场地布设受地理环境等多种因素影响,不同区域的场地大小有较大差别。为提高不同场地资料对比分析的科学性和客观性,约定基线场地长边(短边)标准长度为200 m,蠕变测线长边标准长度为35 m,短边标准长度为22 m,以标准长度除以实际长边(短边)长度确定场地缩放系数,对场地整体缩放。

### 2.3 断层活动参数计算

近场水平形变场地测线相对较短,可将断层上下两盘相对运动近似看成刚体间的相对运动,分解成水平滑动、水平张压及垂直方向的相对运动,本文以2000年数据为参考基准计算断层活动参数,详细计算公式参见薄万举等(1998)的研究。

### 2.4 年活动速率计算

以年为窗长计算断层活动速率可以有效消除周期变化,利用式(1)计算出每条测线年变化值:

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{ji} (j = 1, 2, 3, 4 \dots k, i = 1, 2, 3, \dots n) \quad (1)$$

式中,  $D_{ji}$  为第  $j$  年第  $i$  个累积变化值,  $n$  为每年测期数,  $k$  为年时间序列总数。

利用式(2)计算每条测线的年变化速率平均值( $\Delta \bar{V}$ ):

$$\Delta \bar{V} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} (D_{ji} - D_j) \quad (2)$$

式中,  $D_j$  为第  $j$  年测线年变化值,  $n$  为年时间序列总数。

### 3 数据处理结果及分析

#### 3.1 基线反映的鲜水河断裂近场活动特征

基线断层活动参数时序曲线显示(图 2),鲜水河断裂以左旋走滑活动为主,张压活动较弱,呈北西强南东弱的特点。张压活动在 2013 年前后存在明显差异,2013 年之前活动较弱,曲线展布在零值线附近,2013 年之后断层活动总体增强。

各基线场地年均活动速率显示(表 3),鲜水河断裂活动以道孚县城分界,以北的虾拉沱、沟普走滑活动速率较高,平均速率为 1.67 mm/a;以南的龙灯坝、老乾宁断层活动速率较低,表现为长期的“闭锁”状态,平均速率为 0.23 mm/a。

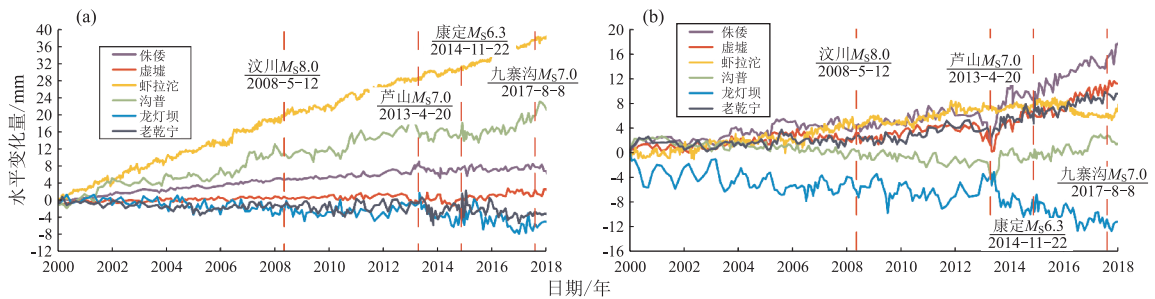


图 2 2000—2018 年基线走滑活动参数(a)和张压活动参数(b)

断层走滑活动(图 2a)显示,虾拉沱的走滑量(约 38 mm)最大,沟普(约 24 mm)次之,2013 年以后龙灯坝、老乾宁等多个场地水平走滑活动有所加速;断层张压活动(图 2b)显示,侏倭活动量最显著,达到 19 mm,年速率为 0.99 mm/a,其它场地张压活动不明显。

#### 3.2 蠕变反映的鲜水河断裂近场活动特征

蠕变反映的断层活动背景特征与基线反映的断层活动背景特征相似,但活动强弱有较大差异,总体表现为左旋走滑活动,张压活动不明显,且具有明显的分段特征(图 3)。走滑活动方面,北西段虾拉沱、沟普活动明显高于南东段。其中,沟普走滑活动在 2008 年以后明显加速,并持续到 2018 年;张压活动方面,北西段虾拉沱、恰叫、沟普显示断层以拉张活动为主,而南东段老乾宁、龙灯坝则显示出挤压活动特征,2004 年后活动总体有所加强,恰叫在 2013 年后明显加速。

蠕变场地断层活动速率(表 3)显示,鲜水河断裂活动以道孚县城分界,以北的虾拉沱和沟普走滑活动速率较高,分别为 0.40 mm/a 和 0.59 mm/a;

以南的龙灯坝和老乾宁断层活动速率均低于 0.1 mm/a,断层活动相对闭锁。恰叫走滑活动较为特殊,虽然地处虾拉沱和沟普之间,但滑动速率仅为 0.05 mm/a,此场地可能跨越的是地震地裂缝(李铁明等,2019)。

表 3 2000—2018 年近场水平形变资料反映的断层年均活动速率

测项	场地	走滑速率 (mm·a <sup>-1</sup> )	张压速率 (mm·a <sup>-1</sup> )	测项	场地	走滑速率 (mm·a <sup>-1</sup> )	张压速率 (mm·a <sup>-1</sup> )
基线	侏倭	0.30	0.99	蠕变	虾拉沱	0.40	0.11
	虚墟	0.13	0.57		恰叫	0.05	0.19
	虾拉沱	2.05	0.33		沟普	0.59	0.03
	沟普	1.29	0.05		龙灯坝	0.03	0.25
	龙灯坝	0.29	0.39		老乾宁	0.09	0.12
	老乾宁	0.17	0.45				

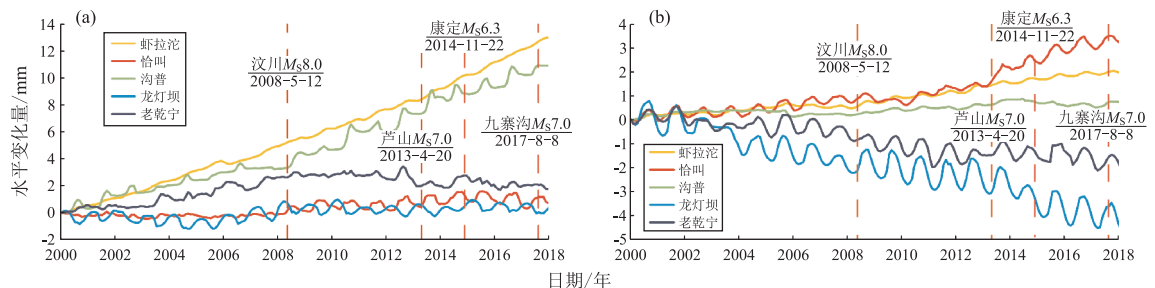


图 3 2000—2018 年蠕变走滑活动参数(a)和张压活动参数(b)

### 3.3 相近场地不同测项资料对比分析

虾拉沓、沟普、老乾宁蠕变和基线场地布设距离最大为 656 m(图 1),龙灯坝蠕变和基线同场地,可能属于同一条断层系,本文对相近场地不同资料进行了对比,探讨相近场地不同资料反映的断层活动异同。

#### 3.3.1 鲜水河断裂中北段断层协同性

北西段监测场地显示,此段附近场地断层活动特性较为一致。虾拉沓和沟普场地资料表明(图 4),鲜水河断裂北西段活动背景基本一致,均显示附近断层左旋滑动,曲线表现为递增变化,张压活动较弱。南东段断层活动在 2013 年前微弱,2013 年后总体加强。2013 年前,南东段龙灯坝、老乾宁场地蠕变和基线的走滑和张压活动不明显,累计活动量在 2 mm 左右;2013 年以后,附近断层活动有所增强,应力在该时段断层整体呈现“释放”特性。

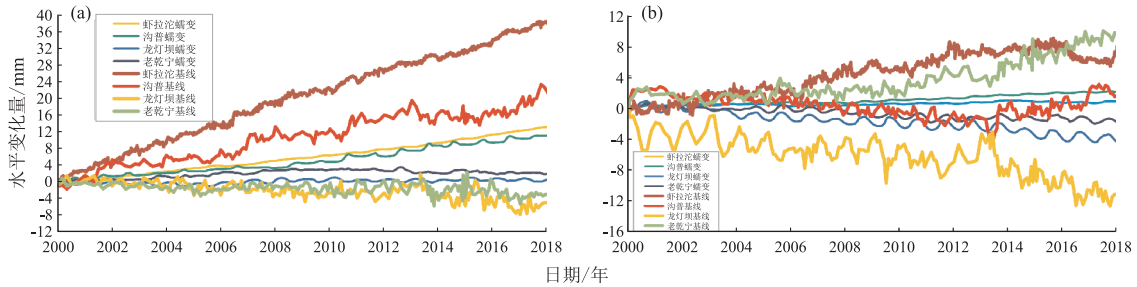


图 4 2000—2018 年相近跨断层场地显示的断层走滑活动参数(a)和张压活动参数(b)

#### 3.3.2 鲜水河断裂中北段断层差异性

不同观测手段显示断层的活动量级不同,基线显示的断层活动更加明显,活动速率高于蠕变(图 4),这可能与观测手段不同以及测边布设长度有关。位于鲜水河断裂北西段的炉霍、沟普和位于南东段的乾宁断层活动差异明显(图 4)。炉霍和沟普段表现为显著的左旋走滑特征,张压活动微弱,而乾宁段(老乾宁、龙灯坝)活动总体不明显,基线资料呈现较强扰动。龙灯坝附近断层表现弱右滑兼挤压活动。老乾宁段在 2013 年以前活动较弱,2013 年后,基线活动增强,基线与蠕变资料存在矛盾,基线显示拉张活动,蠕变显示弱挤压,活动微弱。

#### 3.4 近场水平形变资料与周边中强地震活动

强震是在区域构造作用下,应力在变形非连续地段不断积累达到极限状态突发失稳破裂的结果,活动地块边界由于差异运动强烈而构造变形非连续性最强,最利于积累应力孕育地震(张培震等,2013)。跨断层形变监测能真实地反映所跨断层的受力状态和活动水平(李杰等,2010),本文结合鲜水河及附近区域中强地震(表 4),研究断层活动特征与周边中强地震的关系。

表 4 地震目录

发震日期	纬度/°N	经度/°E	震级( $M_s$ )	发震地点	震中距监测场地最近距离/km
2008-05-12	30.95	103.40	8.0	四川汶川	190
2013-04-20	30.30	103.00	7.0	四川芦山	150
2014-11-22	30.30	101.70	6.3	四川康定	35
2017-08-08	33.20	103.82	7.0	四川九寨沟	355

##### 3.4.1 基线场地观测资料显示的断层近场活动变化与周边地震

汶川  $M_s$ 8.0 地震前,沟普走滑活动打破 2002 年以来几乎闭锁的状态,2007 年左旋走滑活动加速,随后再次出现闭锁-减速,减速过程中发生此次地震;老乾宁的走滑活动在 2005 年以前表现为右旋活动,2005 年活动趋势转折并反向加速,2007 年趋势转平;侏倭张性活动在 2003—2005 年出现加速,2005 年以后断层活动转为闭锁,虚墟与侏倭张性活动较为一致,量级稍小。

芦山  $M_s$ 7.0 地震前,多个基线场地观测资料出现一致性前兆变化,具有明显的丛集性,这是重要的前兆异常特征,其中,龙灯坝走滑活动在 2012 年出现巨幅加速,活动速率由 2000—2011 年的 0.27 mm/a 迅速变化到 1.04 mm/a,侏倭、虚墟、沟普和老乾宁 4 个场地张压活动出现集体反向加速。

康定  $M_s$ 6.3 地震前,北西段跨断层资料显示,芦山  $M_s$ 7.0 地震后继性调整活动继续维持,南东段老乾宁和龙灯坝于 2014 年由右旋加速转变为左旋加速,该变化可能是芦山地震的震后调整及康定地震临震



前兆异常叠加表现;张压方面,北西段继续维持张性活动,南东段老乾宁和龙灯坝同步出现逆向的压性加速变化。

九寨沟  $M_s7.0$  地震前,沟普、龙灯坝和老乾宁的走滑和张压性活动均出现明显加速变化,其中龙灯坝和老乾宁曲线变化和芦山  $M_s7.0$  地震后的活动状态较为一致,虾拉沱张性活动在 2016 年明显减速进入停滞状态,长期活动趋势改变。

#### 3.4.2 蠕变场地观测资料显示的断层近场活动变化与周边地震

汶川  $M_s8.0$  地震前,2003—2006 年鲜水河断裂中段断层长期蠕滑活动被打破。主要表现为:老乾宁和龙灯坝左旋活动增强且处于挤压状态,而沟普场地附近断层近场活动则呈停滞状态,反映了孕震阶段断层的活动特征。芦山  $M_s7.0$  地震前,沟普走滑活动多次出现“加速-停滞”异常;老乾宁走滑活动在 2011 年改变原有活动趋势,出现逆向走滑,2012 年年变形态发生较大改变,下半年曲线短期大幅下降,并持续到地震发生前;张压方面,恰叫张性活动 2011 年开始有所增强,老乾宁挤压活动在 2011 年趋于停滞,发生趋势转折。康定  $M_s6.3$  地震前,老乾宁左滑活动从 2014 年开始明显加速,活动量级较 2013 年有大幅增强;张压性活动方面,恰叫拉张活动在 2013 年后有所增强。九寨沟  $M_s7.0$  地震前,蠕变反映的异常相对较少,主要表现为老乾宁左旋走滑趋势转平,沟普拉张活动在康定地震后出现逆向变化。

## 4 讨论和结论

本文利用鲜水河断裂近场水平形变的基线和蠕变观测资料,结合附近中强地震震例,研究鲜水河断裂现今活动特征和时空变化特征,探讨断层活动与周边强震发生关系,总体结论如下。

### 4.1 鲜水河断裂现今活动特征

2000—2018 年蠕变和基线观测资料均显示鲜水河断裂以左旋走滑为主,具有明显的分段性,按断层滑动速率大致可分为北西段、中段和南东段,北西段侏倭—虚墟平均滑动速率为  $0.22 \text{ mm/a}$ ,中段虾拉沱—沟普平均滑动速率为  $1.67 \text{ mm/a}$ ,南东段龙灯坝—老乾宁平均滑动速率为  $0.23 \text{ mm/a}$ ,总体表现出中段活动强、两端活动弱的特点。断层的北西段和中段活动相似性较好,活动量上有所差异,表现为左旋走滑和张性活动,虾拉沱、恰叫和沟普滑动显著,芦山  $M_s7.0$  地震后,张性活动进一步加强;南东段断层活动较为微弱,闭锁程度相对较高,芦山  $M_s7.0$  和康定  $M_s6.3$  地震后,断层活动均有所加强,应力有所释放。

蠕变和基线观测资料反映的断层活动分段性与地质上的分段有所差异,地质上以乾宁附近的惠远寺为界,将鲜水河断裂分为北西段和南东段(潘懋等,1994)。鲜水河断裂地质分段反映的是大时间尺度总体构造背景,而基线与蠕变观测资料反映的是在近 30~40 年观测期内断层的近场活动情况,且该时段又正好处于 1973 年炉霍  $M_s7.6$  地震和 1981 年道孚  $M_s6.9$  地震后断层的调整活动期间,较好刻画震后断层的差异性调整活动特征。

### 4.2 跨断层近场监测能够捕捉到强震前兆异常

鲜水河周边强震震例回溯分析显示,近场形变监测手段不同程度观测到断层活动偏离正常背景的前兆异常现象,出现加速-减速-停滞或运动趋势改变等异常变化,尤其是在芦山  $M_s7.0$  地震前,鲜水河断裂多个监测场地同时出现一致性变化,呈现群体性特征分布(苏琴等,2014)。区域构造应力逐渐积累,为地震发生危险性研判、地震趋势和地震的短期预测提供了重要参考信息。总体来看,基线观测资料显示的地震前兆信息更为丰富,出现前兆异常的场地和测边相比蠕变更多,但蠕变反映的地震中长期趋势异常更加明显,并能连续获取断层活动高频信息,数据的时间分辨率也更高。

### 4.3 基线和蠕变资料反映的断层活动存在差异

不同测点间距的断层错动速率不统一,随着点距的增加,平行于断层的走滑位移速率逐渐增大(刘冠中等,2013),本文通过将场地缩放到统一尺度进行比较,使得结果更加客观和准确。2000—2018 年鲜水河断裂基线走滑速率为  $0.17 \sim 2.05 \text{ mm/a}$ ,张压速率为  $0.05 \sim 0.99 \text{ mm/a}$ ;蠕变走滑速率为  $0.14 \sim 0.62 \text{ mm/a}$ ,张压速率为  $0.12 \sim 0.29 \text{ mm/a}$ ,2 种资料反映的断层活动速率差异较大,基线活动明显高于蠕变。龙灯坝和老乾宁基线和蠕变 2 种资料反映的断层活动存在矛盾,其中老乾宁的基线和蠕变显示依附附近断层的张压活

动相反,龙灯坝走滑活动也存在差异。从老乾宁相近场地不同观测资料表现的断层活动差异来看,推测可能与乾宁拉分盆地内复杂的地质构造背景有关,虽然蠕变、基线场地间隔距离只有几百米,但可能跨越了不同的分支断层,这需要后续开展更多研究。

## 参考文献

- 薄万举,谢觉民,郭良迁. 1998. 八宝山断裂带形变分析与探讨[J]. 地震, 18(1):63-68.
- 李杰,刘文义,楼关寿,等. 2010. 跨断层形变观测显示的断裂活动特征分析研究[J]. 中国地震, 26(1):46-59.
- 李腊月,季灵运,李玉江,等. 2016. 基于跨断层测量的鲜水河断裂带现今活动特征及其与强震关系研究[J]. 地震学报, 38(5):739-750.
- 李铁明,祝意青,杨永林,等. 2019. 综合利用多种地壳形变观测资料计算鲜水河断裂带现今滑动速率[J]. 地球物理学报, 62(4):1323-1335.
- 李玉江,陈连旺,刘少峰,等. 2017. 鲜水河断裂带北西段跨断层基线变化机理探讨[J]. 地球物理学报, 60(2):554-563.
- 刘冠中,马瑾,张鸿旭,等. 2013. 二十年来蠕变和短基线观测反映的鲜水河断裂带活动特征[J]. 地球物理学报, 56(3):878-891.
- 潘懋,梁海华,蔡永恩,等. 1994. 中国川西地区鲜水河断裂和则木河断裂几何学、运动学特征及地震活动性对比研究[J]. 中国地震, 10(1):28-37.
- 苏琴,杨永林,郑兵,等. 2014. 4·20芦山7.0级地震预测思路及过程回顾[J]. 地震地质, 36(4):1077-1093.
- 张培震,邓起东,张竹琪,等. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学:地球科学, 43(10):1607-1620.

# Analysis of the Current Activity on the Xianshuihe Fault from Cross-fault Horizontal Deformational Data

TANG Wei, SU Qin, LI Feifei, PENG Liyuan, ZHU Renguo

(Sichuan Earthquake Agency Crustal Deformation Observation Center, Sichuan Ya'an 625000, China)

**Abstract:** We used the baseline and creep data across the Xianshuihe fault from 2000 to 2018 and considered the site at an unified scale to reveal characteristics of fault activity based on different data. Moreover, we further discussed the relationship between the surrounding seismicity and fault activity. The results showed that: ①The near-field horizontal deformational data across the fault indicated that the Xianshuihe fault activity shows an obvious segmentation. We suggest that the fault can be roughly divided into north-west section, middle section, and south-east section according to the fault activity rate, which was different from the geological segmentation mode. ②The near-field horizontal deformational data across the fault can show active changes deviated from the normal background to varied degrees. This can capture precursor information of nearby medium and strong earthquakes and changes of post-earthquake adjustment, which provides important implications for determination of seismic risks. ③Some differences in the fault activity were observed by the baseline and creep measurement. The baseline activity is significantly higher than the creep. Specifically, the baseline slip rate and tensile rate are 0.30~2.05 mm/a and 0.47~1.21 mm/a, whereas the creep slip rate and tensile rate are 0.14~0.62 mm/a and 0.12~0.29 mm/a. ④Both creep and baseline measurement data showed that the Xianshuihe fault in the study area was dominated by a left-lateral slip. In addition, the activity on the north-west section and middle section was stronger than that on the south-east section. Baseline data show that tensile pressure activity has generally strengthened after the Lushan earthquake.

**Keywords:** creep meter measurement; baseline measurement; the Xianshuihe fault; characteristics of fault activity



# 利用重复地震探究重庆荣昌地区地壳介质波速变化

汪建,李光科,杨亚运,张巡  
(重庆市地震局,重庆 401147)

**摘要:**选取2010年1月至2022年4月重庆地震台网记录的荣昌地区92次 $M_L \geq 2.5$ 地震观测资料,采用射线追踪方法,对荣昌地区重复地震震源位置做归一化处理,分别计算4个方位上所选台站记录的地震P波走时差,结果显示:研究区域NE、SE和SW方位台站记录的地震P波走时差负异常持续时间较长(其绝对值较大),表明地壳介质波速有明显升高现象。

**关键词:**重复地震;射线追踪;P波走时差;地壳介质变化;荣昌地区

**中图分类号:** P315.07 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8115(2023)01-0032-05

**DOI:** 10.13716/j.cnki.1001-8115.2023.01.005

重复地震概念于20世纪60年代被提出,目前尚无统一定义(李宇彤等,2011)。Nadeau等(1995)将发生在同一断层位置,震级与复发间隔相近,震源机制与波形高度相似的一组地震称为重复地震。Schaff等(2004)将重复地震定义为被至少一个台站记录到,且波形相关系数不小于0.8的地震对事件。由于重复地震的传播路径基本一致,常被用于监测地下介质的波速变化。近年来诸多国内外地震学者利用该方法研究区域地壳介质波速变化,如:Poupinet等(1984)利用天然重复地震的波形相似性这一特点,测量地壳介质速度随时间的变化;Li等(2007)利用美国圣安德列斯断层帕克菲尔德段的重复微震资料,发现在2004年帕克菲尔德6级地震前后,介质速度发生了2.5%的变化;Hotovec-Ellis等(2014)利用美国圣海伦斯火山附近的重复地震研究介质波速随时间的变化关系,发现季节变化是影响波速相对变化的主要因素;周龙泉等(2007)利用重复地震研究2003年云南大姚 $M_s 6.2$ 及 $M_s 6.1$ 地震、叶秀薇等(2008)研究2004年广东阳江 $M_s 4.9$ 地震、宋春燕等(2012)研究2009年柯坪 $M_s 5.4$ 地震和2010年乌恰 $M_s 5.2$ 地震、汪建等(2018)研究2013年重庆巫山 $M_L 3.7$ 地震,均发现地震前介质速度有明显升高现象;汪建等(2021a)利用3个流动台的重复地震资料,采用尾波干涉技术研究2017年重庆武隆 $M_s 5.0$ 地震后震源区地下介质波速变化,发现S波尾波部分记录到介质波速发生了1.3%的变化,比记录到的S波波速变化放大近10倍;汪建等(2021b)利用重复地震资料,发现在2017年重庆武隆 $M_s 5.0$ 地震前4年内,3个台站均记录到P波走时差的负异常变化,共连续出现18次负值,持续时间长达340天,从地震孕育发展至破裂失稳( $M_s 5.0$ 地震发生),经历了较长时间。

由于工业活动(天然气开采,注水压裂)等原因,荣昌地区成为地震多发地区之一,研究人员通过统计学方法认为该区域地震活动与注水关系密切(黄世源等,2007;朱丽霞等,2007;王小龙等,2011)。2010年以来,荣昌区共发生4级以上地震4次,发震震级有逐渐增大的趋势。该区域地下介质的性质和应力状态尚不可知,工业活动是否会使地下介质发生变化,本文通过研究地震波经过地下介质随时间的变化,有助于了解荣昌地区近10年来地下介质物理性质和应力状态的变化,为地震预测预报提供一定的参考依据。

## 1 构造背景及资料选取

### 1.1 区域地质构造背景

选定重庆市荣昌区与四川省内江市隆昌县交界地区( $29^{\circ}18' \sim 29^{\circ}30' N, 105^{\circ}18' \sim 105^{\circ}36' E$ )作为研究区域,研究区附近主要断裂有华蓥山基底断裂、螺观山隐伏断层、广顺横断层、曹子冲断层、燕子岩断层、双

收稿日期:2022-07-18;修回日期:2022-11-04

基金项目:中国地震局监测、预报、科研三结合项目(3JH-2021040)和重庆市地震局科研项目(2022007)联合资助。

作者简介:汪建(1987-),男,本科,工程师,主要从事重复地震等研究。E-mail:373271967@qq.com.

河场断层、月琴坝断层、薄刀岭断层和黄泥垭断层(图 1a),表 1 给出荣昌地区各断裂的性质。华蓥山基底断裂是四川盆地东缘规模最大的断裂带,北起四川万源,穿过重庆合川、荣昌一线,再入川经宜宾等地至云南昭通地区。华蓥山基底断裂是喜马拉雅运动期最活跃的断裂,以逆冲右行走滑水平运动为力学特征,其东南侧形成了特殊的“梳状”、“帚状”盖层褶皱形态和褶、断力学组合关系,是重庆地域乃至全国突出的构造景观(丁仁杰等,2004)。

表 1 荣昌地区断裂性质(李翠平等,2022)

断层名称	长度/km	走向/°	倾向	倾角/°	力学性质
华蓥山基底断裂	600	50	SE	75	逆冲右行走滑
螺观山隐伏断层	14	225	NW	不详	逆冲
广顺横断层	29	315	不详	不详	正断右行走滑
曹子冲断层	不详	60	不详	80	挤压逆冲
燕子岩断层	10	60	SE	75	逆冲
双河场断层	12	40~50	SE	30~40	逆冲
月琴坝断层	19	225	NW	25~67	逆冲
薄刀岭断层	18	240	NW	55	逆冲
黄泥垭断层	24	220	NW	36~54	逆冲

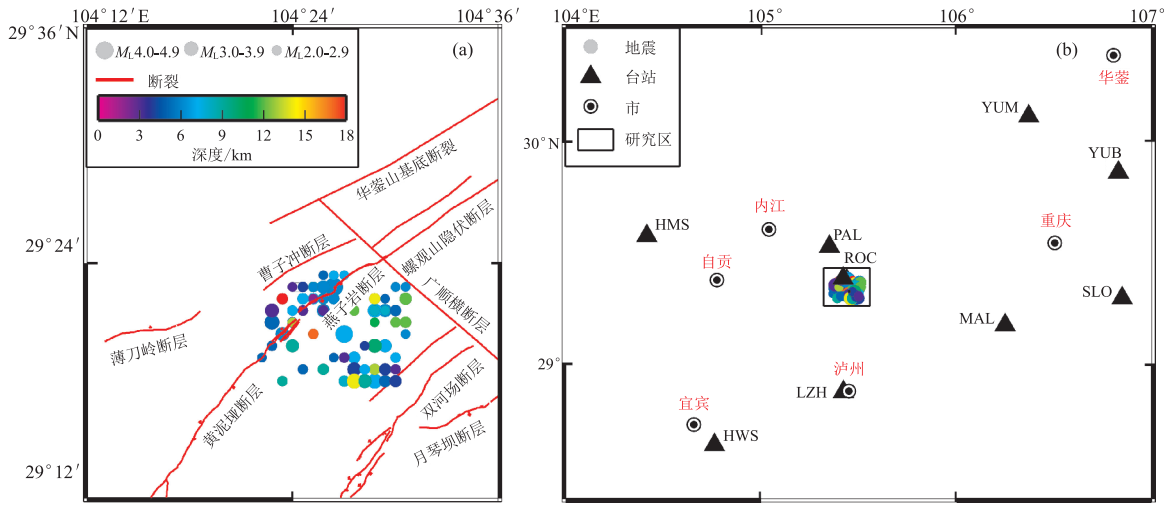


图 1 研究区地震震中、断裂(a)和台站(b)分布

### 1.2 资料和模型选取

选取 2010 年 1 月至 2022 年 4 月重庆数字地震台网记录的 92 次  $M_L \geq 2.5$  地震观测资料,最大地震为 2010 年 9 月 10 日重庆荣昌  $M_L 4.9$  地震。图 1b 给出研究区地震台站的分布,周边台站能够较好包围荣昌地区,震相拾取和地震定位精度较高(汪建等,2020),地震序列呈团状分布,震中主要集中在广顺横断层与曹子冲断层、双河场断层相交的区域内,深度的优势分布为 4~8 km(图 1a),是射线追踪方法较为理想的研究对象。利用射线追踪方法和表 2 给出的速度模型对整个地震序列进行走时差计算,可以得到荣昌地区地壳介质波速随时间的变化。

表 2 荣昌地区速度结构模型(王小龙等,2013)

地壳层数	层厚度 /km	P波速度 /(km/s)	地壳层数	层厚度 /km	P波速度 /(km/s)	地壳层数	层厚度 /km	P波速度 /(km/s)
1	2	5.41	5	10	6.16	9	18	6.56
2	4	5.74	6	12	6.17	10	20	6.67
3	6	5.75	7	14	6.27			
4	8	5.86	8	16	6.47			

## 2 地壳介质波速变化

### 2.1 研究方法

射线追踪法是一种快速三维射线追踪近似算法,其原理是:用射线方程解释扰动初始射线路径,按分段形式使走时沿射线路径最短。对于某一重复地震序列,选择第 1 个重复地震作为参考地震,计算后续地震相对于参考地震的 P 波走时差,可以反映地震波速度的变化,进而得到区域地壳介质应力状态的变化,因不同时期的地震被同一个地震台站记录到,其走时存在一定差异,走时差  $\delta t_i$  表示为:

$$\delta t = \Delta t - \Delta t_1 - \Delta t_2 + \varepsilon \tag{1}$$

式(1)中,  $\delta t$ 表示由地震震中和台站之间射线路径上介质变化引起的走时差,  $\Delta t$ 表示 2 个重复地震在同一台

站的观测走时差,  $\Delta t_1$  表示由重复地震位置差异导致射线路径不同引起的走时差,  $\Delta t_2$  表示由于走时读取误差引起的走时差,  $\varepsilon$  表示现有地震定位条件下的定位误差(周龙泉等, 2007; 叶秀薇等, 2008)。

### 2.2 计算结果分析

给定地震序列中心(29° 21' N, 105° 27' E), 震源深度 8 km, 序列半径 8 km, 计算走时差。选取位于四个象限且台站到地震序列中心的距离大于 5 倍序列半径的 4 个台站, 这几个台站分别为合川云门(YUM)、花马寺(HMS)、汉王山(HWS)和江津麻柳(MAL)台, 4 个台站到地震序列中心的距离分别为 122、142、105 和 80 km。利用射线追踪法对不同地震位置归一化处理, 得到 4 个台站的 P 波记录走时差变化曲线(图 2), 从而研究不同方位上的地壳介质变化情况。

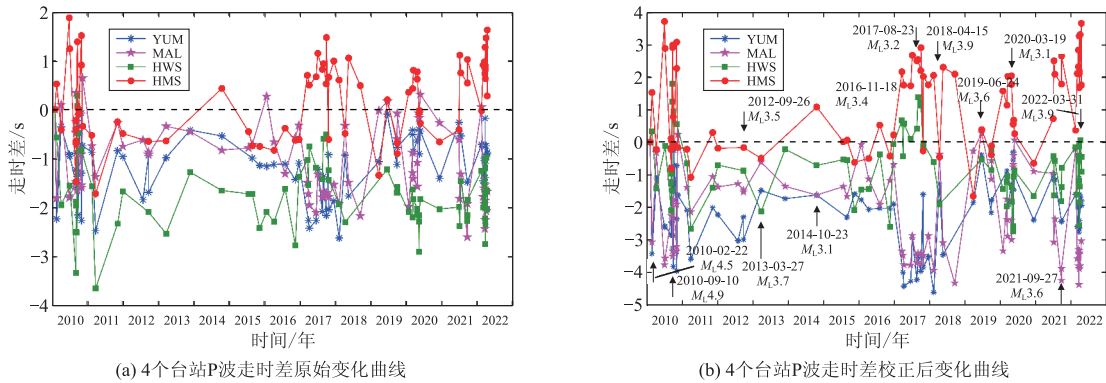


图 2 台站 P 波走时差变化曲线

图 2a 给出 4 个台站的 P 波走时差原始变化曲线。本研究规定 P 波走时差出现连续 2 次及以上负值时为负异常, 称负值阶段为负异常时段, 则意味着该时段台站地下介质波速有明显升高现象。为了消除地震位置的影响, 设定 2010 年 2 月 3 日四川隆昌  $M_L$  2.6 地震为参考地震, 采用射线追踪法对不同震源位置进行归一化处理, 获得 4 个台站不同方位的 P 波走时差校正后变化曲线(见图 2b)。由图 2b 可知 4 个台站在不同方位上的 P 波走时差表现不同, HMS 台在大多数时间内 P 波走时差在零值以上, 负异常持续时间不长, 负值的绝对值较小, 属于正常水平, YUM、HWS 和 MAL 台 P 波走时差在大多数时间内在零值以下, 负异常持续时间长, 负值的绝对值较大。

从图 2b 可以看出, YUM 台(位于研究区域的 NE 向)的 P 波走时差在整个研究时段内全为负值(连续出现 78 次负值), 负值现象持续时间约为 4 441 天, 最大走时差约为 -4.6 s, 截至目前尚未恢复正常水平。YUM 台的 P 波走时差曲线出现两次较大的波谷: 第 1 个波谷的时段为 2010 年 2 月 22 日至 2012 年 9 月 29 日, 该时段出现 24 次负值, 持续时间约为 950 天, 发生了 2 次  $M_L > 4.0$  地震, 最大走时差约为 -3.8 s; 第 2 个波谷时段为 2017 年 4 月 2 日至 2018 年 5 月 21 日, 该时段出现 13 次负值, 持续时间约为 316 天, 发生了 2 次  $M_L > 3.0$  地震, 最大走时差约为 -4.6 s。因 YUM 台的地震射线方向与华蓥山基底断裂的走向相近, P 波走时差负值持续时间长且负值的绝对值较大, 故地下地壳介质波速有明显升高现象, 应力处于长期累积的过程, 表明 NE 向应力状态一直处于较高水平。

从图 2b 可以看出, HMS 台(位于研究区域的 NW 向)的 P 波走时差出现 4 个负异常时段: 第 1 个负异常时段为 2010 年 11 月 16 日至 2011 年 3 月 30 日, 该时段出现 3 次负值, 持续时间约为 134 天, 最大走时差约为 -1.1 s; 第 2 个负异常时段为 2012 年 1 月 6 日至 2013 年 3 月 27 日, 该时段出现 3 次负值, 持续时间约为 446 天, 最大走时差约为 -0.5 s, 此期间发生了 2012 年 9 月 26 日四川隆昌  $M_L$  3.5 地震; 第 3 个负异常时段为 2015 年 11 月 17 日至 2016 年 4 月 12 日, 该时段出现 2 次负值, 持续时间约为 85 天, 最大走时差约为 -0.6 s; 第 4 个负异常时段为 2019 年 10 月 2 日至 2019 年 10 月 5 日, 该时段出现 2 次负值, 持续时间约为 3 天, 最大走时差约为 -0.4 s。HMS 台 P 波走时差负异常最大持续时间 446 天, 最大负值为 -1.1 s, 在大多数时间内 P 波走时差在零值以上, 属于正常水平, 故表明 NW 向应力状态处于较低水平。

从图 2b 可以看出, HWS 台(位于研究区域的 SW 向)的 P 波走时差出现 3 个负异常时段: 第 1 个负异常时段为 2010 年 4 月 9 日至 2010 年 9 月 18 日, 该时段出现 7 次负值, 持续时间约为 163 天, 最大走时差



约  $-2.1$  s, 此期间发生了 2 次  $M_L > 4.0$  地震; 第 2 个负异常时段为 2011 年 2 月 20 日至 2016 年 12 月 25 日, 该时段出现 16 次负值, 持续时间约为 2 135 天, 最大走时差约为  $-2.7$  s, 此期间发生了 4 次  $M_L > 3.0$  地震; 第 3 个负异常时段为 2017 年 10 月 27 日至 2022 年 4 月 1 日, 该时段出现 35 次负值, 持续时间约为 1 617 天, 最大走时差约为  $-2.8$  s, 此期间发生了 5 次  $M_L > 3.0$  地震。HWS 台的地震射线方向与华蓥山基底断裂的走向相近, P 波走时差负值持续时间较长, 地下地壳介质波速有明显升高现象, 故表明 SW 向应力状态处于较高水平。

从图 2b 可以看出, MAL 台(位于研究区域的 SE 向)的 P 波走时差出现 4 个负异常时段: 第 1 个负异常时段为 2010 年 2 月 22 日至 2010 年 11 月 5 日, 该时段出现 16 次负值, 持续时间约为 256 天, 有较大的波谷, 最大走时差约为  $-3.8$  s; 第 2 个负异常时段为 2011 年 2 月 20 日至 2019 年 3 月 30 日, 该时段出现 33 次负值, 持续时间约为 2 135 天, 有较大的波谷, 最大走时差约为  $-4.3$  s, 此期间发生了 6 次  $M_L > 3.0$  地震; 第 3 个负异常时段为 2019 年 10 月 2 日至 2020 年 5 月 19 日, 该时段出现 11 次负值, 持续时间约为 230 天, 最大走时差约  $-3.3$  s; 第 4 个负异常时段为 2020 年 12 月 14 日至 2022 年 4 月 20 日, 该时段出现 19 次负值, 持续时间约为 492 天, 有较大的波谷, 最大走时差约为  $-4.4$  s, 此期间发生了 2 次  $M_L > 3.0$  地震, 截至目前尚未恢复正常水平。MAL 台的地震射线穿过华蓥山基底断裂“梳状”、“帚状”的部分小断裂, P 波走时差持续时间较长且负值的绝对值较大, 表明 SE 向应力状态处于较高水平。

由上述可知, YUM、HWS 和 MAL 台的 P 波走时差在大多数时间位于零值以下, 负异常持续时间长, 负值的绝对值较大, 表明研究区 NE, SW 和 SE 向应力状态处于较高水平。为了验证这一结果的可靠性, 本研究在不同方位分别选取了 2 个台站, 再次计算 P 波走时差并进行分析。图 3a 给出 NE 方位上 YUM 和 YUB 台的 P 波走时差变化曲线, YUB 台的 P 波走时差变化趋势与 YUM 台的一致(整个研究时段为负异常时段), 最大走时差约  $-5.5$  s, 两个台站 P 波走时差长期处于负异常可能与断裂挤压运动有关。图 3b 给出 SE 方位 MAL 和 SLO 台的 P 波走时差变化曲线, SLO 台的 P 波走时差变化趋势与 MAL 台的一致, 存在 3 个较大的波谷, 最大走时差约  $-5.3$  s。故在研究区域的 NE 和 SE 方位台站的 P 波走时差变化趋势较为一致, 说明利用射线追踪方法计算 P 波走时差结果较为可靠。

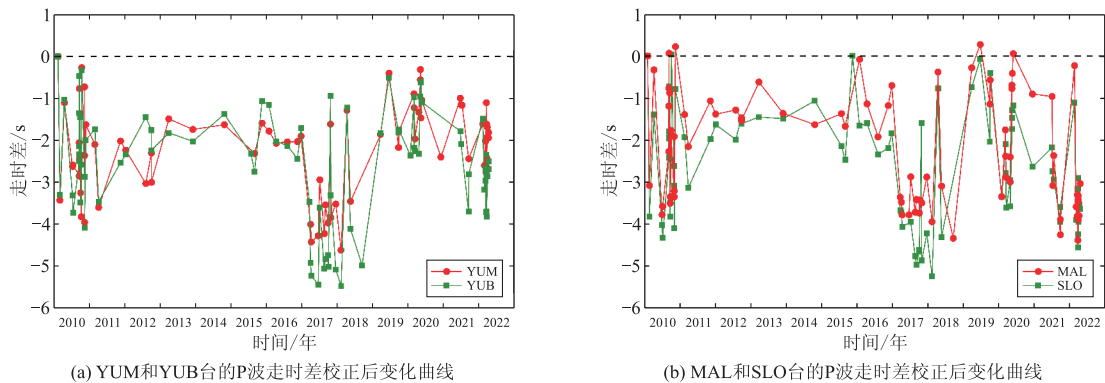


图 3 同方位台站的 P 波走时差校正后变化曲线

施行觉等(1995)利用大庆油田榆树林地区的砂岩, 通过实验发现当岩石的含水饱和度大于某值时, 纵波波速随含水量增加可增加 30% 左右, 由于 ROC 和 PAL 台台基岩石属性均为砂岩, 说明荣昌地区地下岩石以砂岩为主, 根据实验结果可知注水井流体渗透使岩石孔隙含水饱和度增加, 介质波速可能升高, 此外由于注水井流体压力扩散或者断层的挤压运动, 导致地下裂隙变得更加紧密, 介质波速也可能升高, 意味着局部应力状态可能发生较大变化。

### 3 结论与讨论

选取荣昌地区 92 次  $M_L \geq 2.5$  地震观测资料, 为了消除地震位置的影响, 采用射线追踪方法对荣昌地区重复地震位置做归一化处理, 计算了 4 个方向上所选台站记录的 P 波走时差变化, 位于 NW 向的 HMS 台记录到的 P 波走时差负异常时间较短且负值的绝对值较小, 应力状态处于较低水平; 位于 NE、SE 和 SW 向

上的 YUM、MAL 和 HWS 台记录到的 P 波走时差负异常持续时间较长且负值的绝对值较大,地壳介质波速度有明显升高现象,地下介质变化显著的方向与附近断裂相关性较好,介质波速的升高,可能还与研究区岩石孔隙含水饱和度、注水井流体压力扩散或者断层的挤压运动有关,表明局部应力状态可能发生了变化。

**致谢:**感谢中国地震台网中心周龙泉博士提供走时差计算程序。

## 参考文献

- 丁仁杰,李克昌. 2004. 重庆地震研究[M]. 北京:地震出版社.
- 黄世源,魏红梅,朱丽霞. 2007. 2006年荣昌地震活动与注水关系[J]. 高原地震, 19(2):8-11.
- 李翠平,唐茂云,郭卫英,等. 2022. 荣昌及周边三维速度结构初步研究[J]. 地震地质, 44(1):205-219.
- 李宇彤,蒋长胜. 2011. 波形相关意义“重复地震”研究综述[J]. 中国地震, 27(4):335-347.
- 叶秀薇,闻则刚,刘锦,等. 2008. 利用重复地震研究广东阳江地区地壳介质变化[J]. 地震, 28(4):103-111.
- 施行觉,徐果明,靳平,等. 1995. 岩石的含水饱和度对纵、横波速及衰减影响的实验研究[J]. 地球物理学报, 38:281-287.
- 宋春燕,李志海. 2012. 利用重复地震研究新疆阿合奇—伽师—乌恰地区地壳介质变化[J]. 内陆地震, 26(1):62-66.
- 汪建,王同军,杨亚运,等. 2018. 利用重复地震观测重庆巫山地区地壳介质变化[J]. 地震地磁观测与研究, 39(6):16-22.
- 汪建,张巡,杨亚运,等. 2020. 重庆地区重复地震识别及在数字地震台网定位评价中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 41(2):37-43.
- 汪建,向涯,杨亚运,等. 2021a. 尾波干涉技术在2017年重庆武隆 $M_s 5.0$ 地震后震源区地壳介质变化的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 42(3):64-73.
- 汪建,杨亚运,马伟. 2021b. 利用重复地震观测重庆武隆地区地壳介质变化[J]. 地震科学进展, 51(11):498-504.
- 王小龙,马胜利,雷兴林,等. 2011. 重庆荣昌地区注水诱发地震加密观测[J]. 地震地质, 33(1):151-156.
- 王小龙,马胜利,郭志,等. 2013. 利用地震背景噪声成像技术反演三峡库区及邻近地区地壳剪切波速度结构[J]. 地球物理学报, 56(12):4113-4124.
- 周龙泉,刘桂萍,马宏生,等. 2007. 利用重复地震观测地壳介质变化[J]. 地震, 27(3):1-9.
- 朱丽霞,黄世源,魏红梅. 2007. 荣昌地区注水地震研究[J]. 大地测量与地球动力学, 27(6):86-90.
- Hotovec -Ellis A J, Gombert J, Vidale J E, et al. 2014. A continuous record of inter-eruption velocity change at Mount St Helens from coda-wave interferometry [J]. Journal of Geophysical Research, 119(3):2199-2214.
- Li Y, Chen P, Cochran E S, et al. 2007. Seismic velocity variations on the San Andreas fault caused by the 2004  $M_6$  Parkfield Earthquake and their implications [J]. Earth Planets and Space, 59(1):21.
- Nadeau R M, Foxall W, McEvilly T V. 1995. Clustering and periodic recurrence of microearthquakes on the San Andreas fault at Parkfield, California [J]. Science, 267(5197):503-507.
- Poupinet G, Ellsworth W L, Frechet J. 1984. Monitoring Velocity Variations in the Crust Using Earthquake Doublets: An Application to the Calaveras Fault, California [J]. Journal of Geophysical Research, 89(B7):5719-5731.
- Schaff D P, Richards P G. 2004. Repeating seismic events in China [J]. Science, 303(5661):1176-1178.

## Exploring Velocity Variation of Crustal Media in Rongchang Area of Chongqing Municipality by Using Repeated Earthquakes

WANG Jian, LI Guangke, YANG Yayun, ZHANG Xun

(Chongqing Earthquake Agency, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** We selected the data of 92 earthquakes with  $M_L \geq 2.5$  between January 2010 and April 2022 recorded by Chongqing Digital Seismic Network in Rongchang area. We normalized the position of repeated earthquakes in Rongchang area by using the ray tracing method, and calculated the change of P-wave travel-time difference recorded by the selected stations in four directions. The results show that the negative anomaly of P-wave travel-time difference recorded by the stations in NE, SE and SW directions in the study area lasts a long time (with a large absolute maximum value is large), which shows that the wave velocity of crustal medium increases obviously.

**Keywords:** repeated earthquakes; ray tracing; P-wave travel-time difference; variation of crustal medium; Rongchang area

# 河北怀来台氦气集气装置改进及实验数据分析

王锐锋<sup>1,2</sup>, 张帆<sup>1,2</sup>, 只楠<sup>1,2</sup>, 程德庆<sup>1,2</sup>, 姜佳宁<sup>1,2</sup>

(1. 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站, 河北 邢台 054000;

2. 河北张家口地震监测中心站, 河北 张家口 075000)

**摘要:** 怀4井氦气观测采用悬浮于水面之上的塑料集气漏斗获取逸出气体, 受水位影响较大, 造成新旧气体易混合。为全面研究地下流体氦气浓度动态变化过程, 2021年7月3日对氦气集气装置进行改进, 通过对改造前后观测数据进行对比分析, 结果显示: 观测值由改造前的0.011 9%~0.037 7%升高至改造后的0.041 7%~0.081 1%, 且观测数据变化动态较之前更加稳定, 抗干扰能力明显提高; 改造后的氦气观测值的3倍 $\sigma$ 值逐月减少, 超差百分比显著下降。这说明怀来台氦气集气装置改进较为成功, 氦气观测数据质量得到了显著提高, 观测数据日变化更加规则, 动态特征更加明显, 可以及时有效地反映怀4井氦气浓度变化。

**关键词:** 测氦仪; 集气装置; 对比分析; 怀来台

**中图分类号:** P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8115(2023)01-0037-05

**DOI:** 10.13716/j.cnki.1001-8115.2023.01.006

地球上的氦是重放射性元素(U、Th、AcU)衰变的产物, 在地应力场的作用下, 由于氦具有极大的渗透性和扩散性, 它们可以很快地通过地壳岩石的裂隙渗透扩散到含水层并溶解入地下水中, 以及通过地壳岩石裂隙渗透到断层, 直接扩散到地表。氦既是惰性气体又是稀有气体, 在扩散和迁移过程中不参与大气中的化学反应, 所以氦异常多为地壳深部应力作用的结果(孔令昌, 1996; 耿杰等, 1998, 1999; 魏汝庆, 1999)。因此, 在自流井和静水位井中均可检测到氦气含量。在临近地震发生阶段, 氦气在水中的溶解度较小, 但地壳浅部的地下流体中氦气浓度会发生明显变化。只要地下流体观测井周围存在孕震应力场作用挤压岩石, 使岩石裂隙中富集的氦气析出, 使用测氦仪即可监测到氦气的变化(孔令昌等, 2007)。因此, 氦气观测在地震监测预报分析中具有一定作用。

河北怀来后郝窑地震台怀4井配备WGK-1型测氦仪进行氦气监测, 观测数据稳定性和可靠性均达到地下流体学科要求, 多年来积累了丰富的观测资料, 采取集气漏斗悬浮与主井口集气进行观测, 由于氦气观测依靠气体渗透原理, 不需要抽气, 因此在集气装置的选择上也有所不同。但是该集气方式受水位影响较大, 由于2014—2019年该井周边限制地热资源的过度开发, 使得观测井水位上升, 井管空腔(井口到水面的空间)减小, 则静空间容积变小形成压缩状态, 逸出的气体加速流入氦仪传感器, 出现吸入与鼓出效应, 影响了怀4井氦气观测值的准确性。因此, 怀来台工作人员在2021年7月3日对集气装置进行了改进, 试图解决井水位变化对测氦仪传感器的影响, 以提高观测数据质量, 为识别地震前兆异常提供准确的数据保障。

## 1 怀4井概况

### 1.1 水文地质条件

怀来后郝窑地震台怀4井热水出露于蓟县系雾迷山组燧石白云岩中, 沿NWW和NNW向二组断裂带裂隙溢出, 热水沿NW和NE向断裂带的交会处, 自片麻岩和张家口组熔结凝灰岩溢出基岩, 并赋存于新生界松散层中。怀4井构造上位于祁吕系东翼广灵—狼山大断裂带的北侧, 在祁吕系歪头山—万家窑断裂带、新华夏系杨家山断裂带及北西向的施庄大断裂带的交会处(图1), 裂隙发育, 岩石破碎, 热水沿构造破

收稿日期: 2022-03-14; 修回日期: 2022-04-27

基金项目: 中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202201048)项目资助。

作者简介: 王锐锋(1979-), 男, 汉族, 河北张家口人, 工程师, 主要从事地震监测工作。E-mail: 407779699@qq.com.

通讯作者: 张帆(1991-), 男, 汉族, 河北张家口人, 工程师, 主要从事地震监测工作。E-mail: 619843566@qq.com.



碎带涌出(李泓泉等,2020;张帆等,2021a)。怀4井成井于1972年,地面高程为487.00 m,井深为500.34 m,观测水层是顶板埋深为278.50 m的太古界片麻岩破碎带热水层,该井为高温热水自流井,水化学类型为 $SO_4-Na$ 型(张凤秋等,2005;宁海雯等,2018),矿化度为0.962 g/L,首都圈“奥运”保障项目数字化改造后,怀4井成为集水氦、水汞、气体、数字水位、数字气氦、数字气汞等观测为一体的多测项观测井。该井水汞测项在1989年山西大同—阳高  $M_s6.1$ 、1998年河北张北  $M_s6.2$ 、2014年河北涿鹿  $M_s4.3$  等地震前均有短临异常出现。怀4井水汞异常特征地震异常的形态主要表现单点突跳,在山西大同—阳高  $M_s6.1$ 、河北张北  $M_s6.2$  地震前出现多次高值变化,为背景值的几倍到几十倍,且以中短期异常为主,异常图像清晰,易于识别(唐杰等,2021),因此怀4井构造位置处于构造断裂带敏感位置,水化学测项能够及时反映地壳内部应力应变状态等信息。

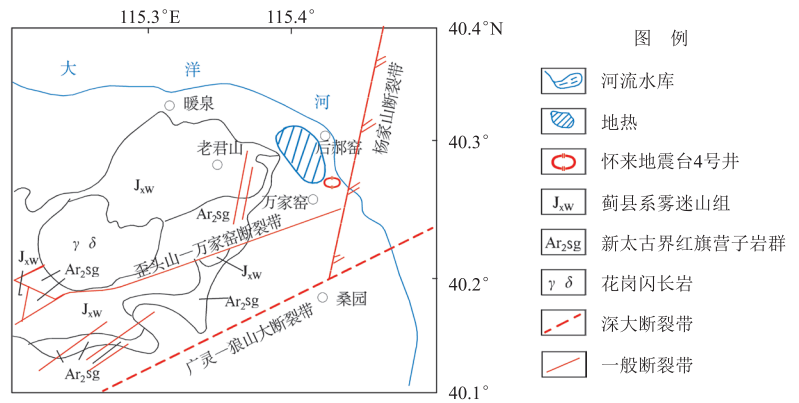


图1 怀4井附近地质构造背景(王志敏等,2022)

### 1.2 怀4井观测系统

多年来,怀来后郝窑周边地热资源过度开发致使怀4井动态水位逐年下降,2007年趋于断流,为了使怀4井流体观测得以继续,不得不进行工程改造,在主井房外建1个直径4.0 m的钢筋混凝土结构深井,井深10.0 m,在观测井与主井之间开挖10.0 m通道(任佳等,2002;张常慧等,2011),在主井管开孔,用不锈钢管接热水至观测井脱气桶进行数字化气氦、气汞观测(见图2),水位观测管改造后仍在自流状态下进行流体观测,实现了与30多年观测资料的无缝衔接(张帆等,2021b)。

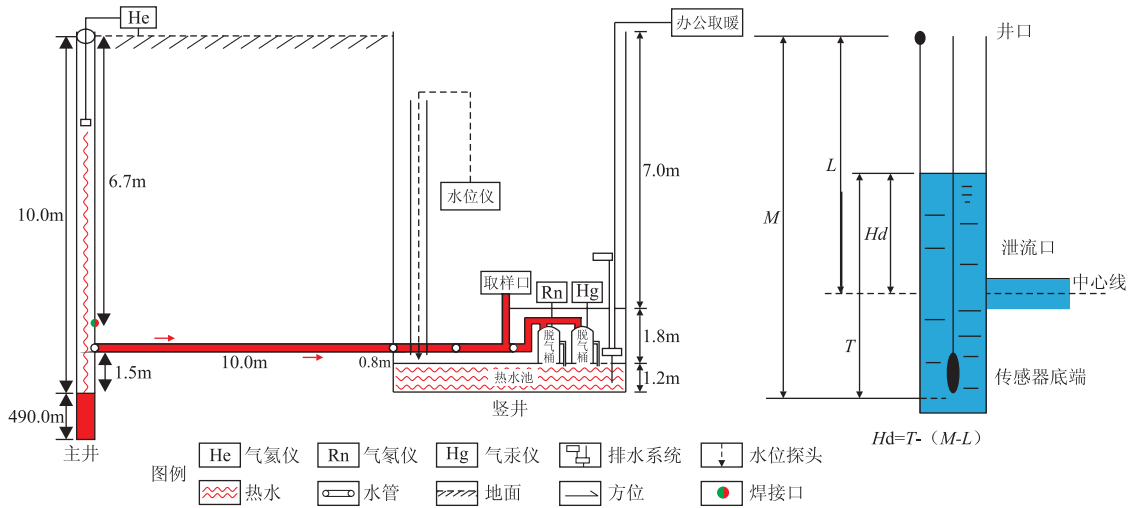


图2 怀4井水化学观测系统示意图

### 1.3 观测仪器概况

WGK-1测氦仪采用氦气对石英的高渗透性原理,由交直流供电系统、高压供电系统、传感器、超高真空获得系统、数据采集与传输系统组成(见图3)。该仪器将地下水中的逸出气和部分溶解气经集气装置集气后,通过气路进入仪器的传感器,测氦仪性能参数包括仪器检出限、测试精度、测试范围和稳定性等,技术指标和参数标准见表1。

## 2 氦气观测资料存在的问题

### 2.1 集气装置影响

怀4井之前采用悬浮式集气漏斗进行集气,由于周边冬季抽水原因,井水位会发生改变,且随着水位的

表1 WGK-1型测氦仪仪器性能指标

仪器型号	检出限 /%	测试精度 /%	测试范围 /%	稳定性 /% <sup>①</sup>	采样率 /次/分	工作环境	
						温度 /℃	湿度 /%
WGK-1型测氦仪	$1.5 \times 10^{-5}$	$\leq 5$	$(1 \sim 1500) \times 10^{-5}$	$\leq 15$	1	0~50	<80

①半年内仪器偏离。

变化,井口到水面的空间亦随之改变,从而造成悬浮的集气漏斗与水位液面之间的“空体积”变大,导致集气装置旧气体越来越多,应力作用释放的异常气体被原正常变化气体稀释,进入测氦仪传感器的新鲜气体比例下降,图4为2019—2020年氦气观测调整点值曲线图,从图中看出受集气装置影响,新旧气体混合造成测值较小,数据变化范围基本在0.007%~0.030%。

### 2.2 抽水干扰

由于华电2井距离怀4井只有200m左右,华电2井抽水及周边温泉酒店营业用水,影响氦气观测质量,同时也影响氦气观测正常动态变化,曲线表现为每日相对固定时间内出现为“脉冲式突跳”,变化幅度为0.025%,冬季2021年1月受周边抽水造成曲线干扰较大(图5)。

## 3 集气装置的改进

在气体地球化学的数字化连续观测中,气体收集是观测技术系统的关键环节。稳定有效地获取气体决定了观测数据的稳定性和可靠性,集气腔中新旧气体的交换速率决定了观测数据能否如实快速地反映地壳岩石中的氦气变化(宋晓冰等,2018)。不同气体在水中的溶解度不同,一般惰性气体溶解度相对较低,而氦气是溶解度最低的气体。怀4井最高水温88.1℃,2019年由于地热资源受当地政府保护,2019和2020年冬季怀4井水位明显上升,逸出气多,溶解气较少,采用悬浮于水面之上的塑料集气漏斗获取逸出气体,引出一根气管到测氦仪传感器。该集气方式存在的主要问题为:新旧气体的交换速率减缓,造成测值较低,同时抗干扰能力较弱,无法快速地反映怀4井氦气浓度的变化。

为了解决集气装置的影响,减小氦气观测过程中的干扰因素,结合氦气观测原理,2021年7月3日将怀

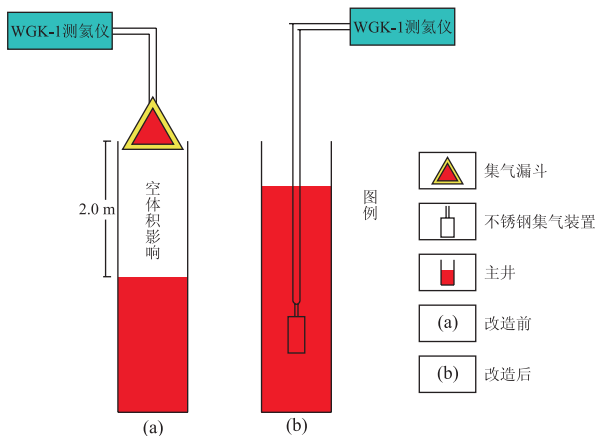


图6 怀4井氦气集气装置改造前(a)、后(b)示意图

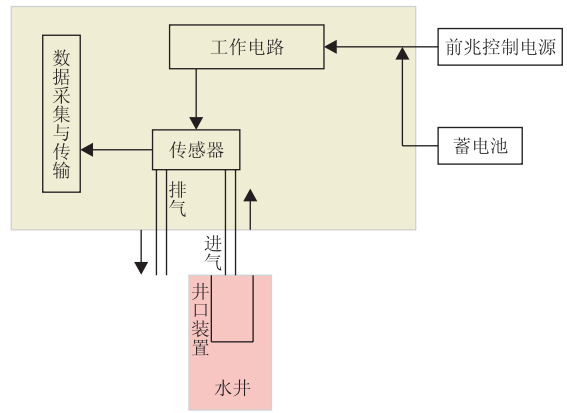


图3 测氦仪结构及安装连接示意图

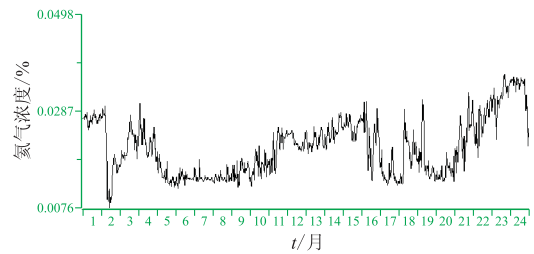


图4 2019~2020年怀4井氦气观测日值

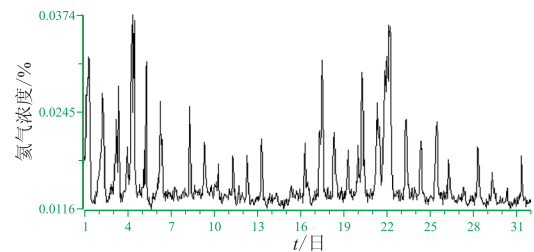


图5 怀4井氦气观测受抽水影响曲线

来后郝窑地震台怀4井氦气集气装置进行了改造,改造思路:将原悬浮于水面2.0m处的塑料集气漏斗改为直径120mm,高200mm圆柱形不锈钢(耐高温、耐腐蚀)作为集气装置,一端用不锈钢板氩弧焊焊接密封并在中间开直径为10.0mm的小孔作为导气管,导气管与11.0m长的天然气管用卡箍相连接,直接放置于水面下10.0m处(图6),为防止集气装置掉落,集气装置两侧用钢丝与井口固定。由于投放深度较深,要求导气管具有较好的抗拉性和抗压性(朱石军等,2012)。氦气为惰性气体,且不溶于水,能够直接反应地下岩石挤压变化,并且,近两年怀4井周边热水资源受当地保护,限制利用,水位上涨较明显,逸出

气多,溶解气较少,采用悬浮于水面之上的塑料集气漏斗获取逸出气体,引出一根气管到测氦仪传感器。该集气方式存在的主要问题为:新旧气体的交换速率减缓,造成测值较低,同时抗干扰能力较弱,无法快速地反映怀4井氦气浓度的变化。

气较多,能够满足将新型集气装置放置于水中的条件。改造后的集气装置不仅消除了新旧气体混合的影响,同时排除水位变化的干扰。

### 4 改进前后对比

#### 4.1 曲线对比

为了更好地分析集气装置改造前后效果,从原始曲线及运行质量两个角度进行对比分析。本研究选取2021年3月1—30日(改进前时间段)和8月1—30日(改进后时间段)数据进行对比,通过图7可以看出,改进之后的氦气观测数据曲线相对比较光滑,动态变化特征明显,稳定性增强,具有很规则的日变化特征。将集气装置放置于热水井10.0 m处,不仅避免了“空体积”的影响,还解决了新旧气体易混合的干扰,使观测值由改造之前的0.011 9%~0.037 7%(见图7a)升高至改造后的0.041 7%~0.081 1%,而且观测数据变化动态较之前更加稳定(图7b),抗干扰能力明显提高。由于怀4井水温较高,逸出气体较多,说明集气装置改进之后能够更加准确地反映地下流体氦气的浓度变化。

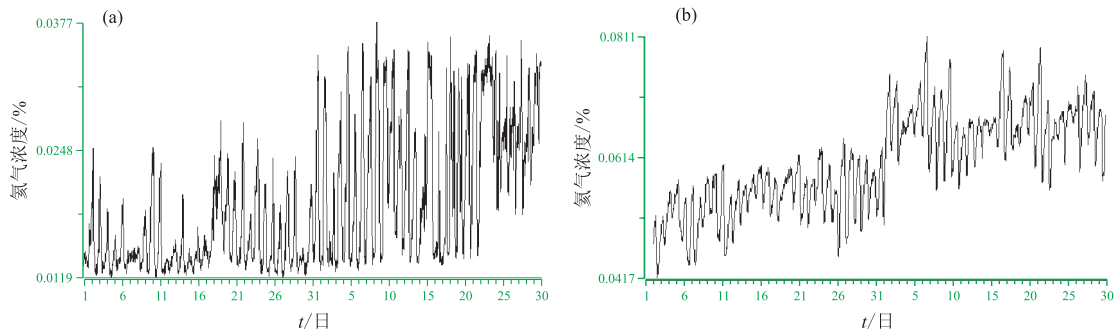


图7 集气装置改进前(a)、后(b)记录数据曲线

#### 4.2 运行质量对比

完整率统计:仪器完整率是观测资料的重要保证,由于仪器原因测氦仪传感器的高压模块高压放电造成错误数据,缺数处理,导致2021年10月、12月数据造成完整率降低(见表2)。

内在质量计算:选取2021年1月1日12月31日(改进集气装置前后)测氦仪氦气测值,以月整点值数据为依据,计算整点值一阶差分序列的标准差( $\sigma$ ),以每月超过3倍 $\sigma$ 值的个数计算每月超差百分比,从而分析观测质量。由表2可以看出,自7月份进行集气装置改进以来,改进集气装置观测后超过3倍均方差次数从7月开始减少,超差百分比也显著下降,说明进行集气装置改进后氦气观测内在质量有所提升。

表2 2021年集气装置改进前(1月1日—7月3日)、后(7月4日—12月)运行质量对比

月份	一阶差分 标准差	三倍均 方差	超差 个数	超差百 分比/%	连续 率/%	完整 率/%	备注
1	0.002 5	0.075 0	9	1.21	100	100	
2	0.014 4	0.043 2	11	1.64	100	100	
3	0.021 6	0.064 8	10	1.34	100	99.97	气氦仪传感器的高压模块高压放电造成错误,缺数处理。
4	0.015 7	0.047 1	13	1.81	100	100	
5	0.031 1	0.093 3	6	0.81	100	100	
6	0.008 0	0.024 0	10	1.39	100	100	
7	0.000 7	0.002 1	8	1.08	100	100	7月3日进行集气装置改进
8	0.001 1	0.003 3	5	0.67	100	100	
9	0.001 4	0.004 2	0	0	100	100	
10	0.001 8	0.005 4	5	0.67	100	99.99	气氦仪传感器的高压模块高压放电造成错误数据,缺数处理。
11	0.002 2	0.006 6	3	0.42	100	100	
12	0.002 5	0.007 5	6	0.81	100	99.59	气氦仪传感器的高压模块高压放电造成错误数据,缺数处理。

### 5 结论与认识

通过对怀来台氦气集气装置改进对比分析,得出几点结论与认识:(1)近两年怀4井周边热水资源受当地保护,限制地下水抽取利用,水位上涨较明显,逸出气较多,能够满足将集气装置放置于水中的条件,并



且集气装置放入水中以后,使观测值由改造前的0.011 9%~0.037 7%升高至改造后的0.041 7%~0.081 1%,而且观测数据变化动态较之前更加稳定,抗干扰能力明显提高。由于怀4井水温较高,逸出气体较多,说明集气装置改进之后能够更加准确地反映地下流体氦气的浓度变化,以便于收集逸出气体,可以及时有效地反映怀4井氦气浓度变化。(2)从改造的效果分析,解决了新旧气体易混合的问题,怀4井氦气观测资料内在质量得到了显著的提高,通过观测曲线及运行质量分析,观测曲线光滑,动态特征明显,稳定性增强,具有很规则的日变化。(3)在集气装置选择方面由于WGK-1型测氦仪是根据氦的特殊物理化学特性,采用氦气对石英的高渗透性原理,因此在集气环节中,对于高温热水井可直接观测逸出气体。该集气装置不仅成本较低,制作也方便,而且避免了“脱气”干扰。

## 参考文献

- 耿杰,任桂香,王忠民,等. 1999. 山东地区水化学短临跟踪标志体系的研究[J]. 地震研究, 22(2):144-152.
- 耿杰,张昭栋. 1998. 1983年菏泽5.9级地震前地下流体异常分布特征及其有关问题讨论[J]. 华北地震科学, 16(2):15-22.
- 孔令昌. 1996. 地下水中气体动态变化与地震的关系[J]. 华北地震科学, 14(1):64-71.
- 孔令昌,王桂清,王志敏,等. 2007. 观测井中氦含量异常与地震关系的研究[J]. 地震地磁观测与研究, 28(6):32-36.
- 李泓泉,张树胜,谢明忠,等. 2020. 张家口地区的构造体系及其对地下热水的控制作用[J]. 中国煤炭地质, 32(5):74-82.
- 宁海雯,李峰,郑毅,等. 2018. 怀4井氦气浓度异常与地震对应特征[J]. 地震地磁观测与研究, 39(2):154-159.
- 任佳,温超,池海江,等. 2002. 怀来4井数字化改造概况[J]. 华北地震科学, 20(3):56-59.
- 宋晓冰,张凤秋,王锐锋,等. 2018. 河北省怀4井氦气观测集气装置改造[J]. 地震地磁观测与研究, 39(2):160-164.
- 唐杰,张素欣,张子广,等. 2021. 怀4井水汞短临预测指标研究[J]. 山西地震, (3):13-17.
- 王志敏,张帆,宋晓煜,等. 2022. 河北怀来地震台不同型号气氦仪干扰因素及质量评价[J]. 四川地震, (4):22-26.
- 魏汝庆. 1999. 聊古一井氦异常与地震的关系[J]. 西北地震学报, 21(4):428-429.
- 张常慧,李海孝,张彦青,等. 2011. 面临断流的高温热水井的技术改造及其观测效果[J]. 地震地质, 33(3):653-659.
- 张凤秋,任佳,李海孝,等. 2005. 怀4井地下流体异常与地震的关系[J]. 地震地质, 27(1):123-130.
- 张帆,杨竹转,王江. 2021a. 怀4井新旧自动测氦仪比测分析[J]. 地震地磁观测与研究, 42(3):225-231.
- 张帆,宋晓煜,陈其峰,等. 2021b. 怀4井气体取样对水位观测干扰的解决措施[J]. 地震地磁观测与研究, 42(5):158-165.
- 朱石军,孔令昌,乔永军,等. 2012. 延庆台气氦集气装置的改进[J]. 华北地震科学, 30(2):64-67.

# Improvement of Helium Gas Collecting Device and Experimental Data Analysis at Huailai Seismic Station

WANG Ruifeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Fan<sup>1,2</sup>, ZHI Nan<sup>1,2</sup>, CHENG Deqing<sup>1,2</sup>, JIANG Jianing<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Hongshan National Observatory on Thick Sediments and Seismic Hazards, Hebei Xingtai 054000, China;

2. Zhangjiakou Earthquake Monitoring Center Station, Hebei Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** The helium in Well No. 4 was observed by using a plastic collecting funnel suspended above the water surface to obtain the escaping gas, which was greatly affected by the water level and resulted in the easy mixing of new and old gases. In order to comprehensively study the dynamic change process of underground fluid helium concentration, we improved the helium collecting device on July 3, 2021, and compared analysis of experimental data before and after the modification. The results showed that the observed values at 0.011 9%~0.037 7% before modification increased to 0.041 7%~0.081 1% after modification. The dynamic changes of the observed data were more stable than prior data when the anti-interference ability was improved significantly. Through equipment transformation, three times  $\sigma$  of helium observation decreased month by month, whereas the percentage of out-of-tolerance decreased significantly. This indicates that the improvement of the helium collecting device in Huailai Station is successful, which reflects on the following aspects such as significant improvement in the quality of helium observation data, regularity in the daily variation of observation data, and reliability in the dynamic characteristics. This can timely and effectively reflect the change of helium concentration in Huai No. 4 well.

**Keywords:** helium instrument; improvement of gas collecting device; comparison and analysis; Huailai Seismic Station

# 2022年4月6日四川兴文 $M_S$ 5.1 地震震害特征 及成因分析

代友林, 杨璐遥, 刘洋, 梁远玲  
(四川省地震局, 四川成都 610041)

**摘要:**针对四川兴文  $M_S$  5.1 地震, 地震现场工作队采用抽样调查、单项调查、现场核实等方法对震中区房屋及其他工程进行了实地勘察, 获取了此次地震的烈度分布及大量调查资料, 本文在此基础上对本次地震震害特征及其成因进行了总结梳理, 最后从地震灾害风险排查、房屋建筑抗震设防、地震科学基础研究等方面对震区防震减灾工作提出建议, 为震后恢复重建和当地抗震设防能力提升提供参考依据。

**关键词:**兴文  $M_S$  5.1 地震; 震害特征; 致灾因素

中图分类号: P315.94 文献标识码: A 文章编号: 1001-8115(2023)01-0042-06

DOI: 10.13716/j.cnki.1001-8115.2023.01.007

据中国地震台网正式测定, 2022年4月6日7时50分, 四川省宜宾市兴文县仙峰苗族乡(28.22°N, 105.03°E)发生  $M_S$  5.1 地震, 震源深度为10 km。截至2022年4月8日8时共记录到余震42次。此外, 2022年4月7日5时54分在兴文县大坝苗族乡发生的  $M_L$  4.1 地震造成了一定程度震害叠加。由四川地震台龙锋给出的震源机制解显示四川兴文  $M_S$  5.1 地震的发震断层为近NW向的正断型断层, 节面I走向为305°, 倾角为59°, 滑动角为-84°, 节面II走向为113°, 倾角为32°, 滑动角为-100°。本次地震未造成人员伤亡(新华网, 2022)。地震发生后, 地震现场工作队开展了地震灾区现场应急工作, 其中地震灾害烈度评定工作历时3天, 共计抽样调查61个灾害点, 取得了此次地震震害相关的基础数据资料。以此次地震现场调查取得的相关资料为基础, 详细描述兴文  $M_S$  5.1 地震的烈度分布情况, 并对各类震害特征及成因进行分析, 以期以后地震烈度评定和应急处置积累经验, 为当地防震减灾工作提供参考。

## 1 地震烈度分布

地震现场工作队依据《地震现场工作第3部分: 调查规范》(GB/T 18208.3—2011)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2011)和《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020)(国家市场监督管理总局等, 2020), 对兴文县6个乡镇、长宁县1个乡镇, 共计7个乡镇, 61个调查点展开了实地调查。参考震区断裂构造、余震分布、震源机制、仪器烈度分布图、无人机遥感影像等科技支撑成果, 结合强震动观测记录, 确定了本次地震的烈度分布, 地震烈度结果参见图1。

此次地震的最高烈度为VI度, 等震线长轴呈北西走向, 长轴30 km, 短轴14 km, 此次地震共涉及四川省宜宾市兴文县、长宁县2个县。VI度区面积约379 km<sup>2</sup>, 主要涉及兴文县仙峰苗族乡、石海镇、夔王山镇、九丝城镇、大坝苗族乡、周家镇6个乡镇和长宁县梅硐镇, 共计7个乡镇。此外, 位于VI度区之外的部分地区也受到波及, 个别老旧房屋出现破坏受损现象。

## 2 房屋结构类型和破坏等级划分

### 2.1 房屋结构类型

本次地震造成四川省兴文县和长宁县7个乡镇(街道)房屋不同程度受损。根据政府有关部门资料及

收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-05-30

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1509405)资助。

作者简介: 代友林(1993-), 男, 四川都江堰人, 助理工程师, 主要从事地震应急工作。E-mail: 948222920@qq.com.

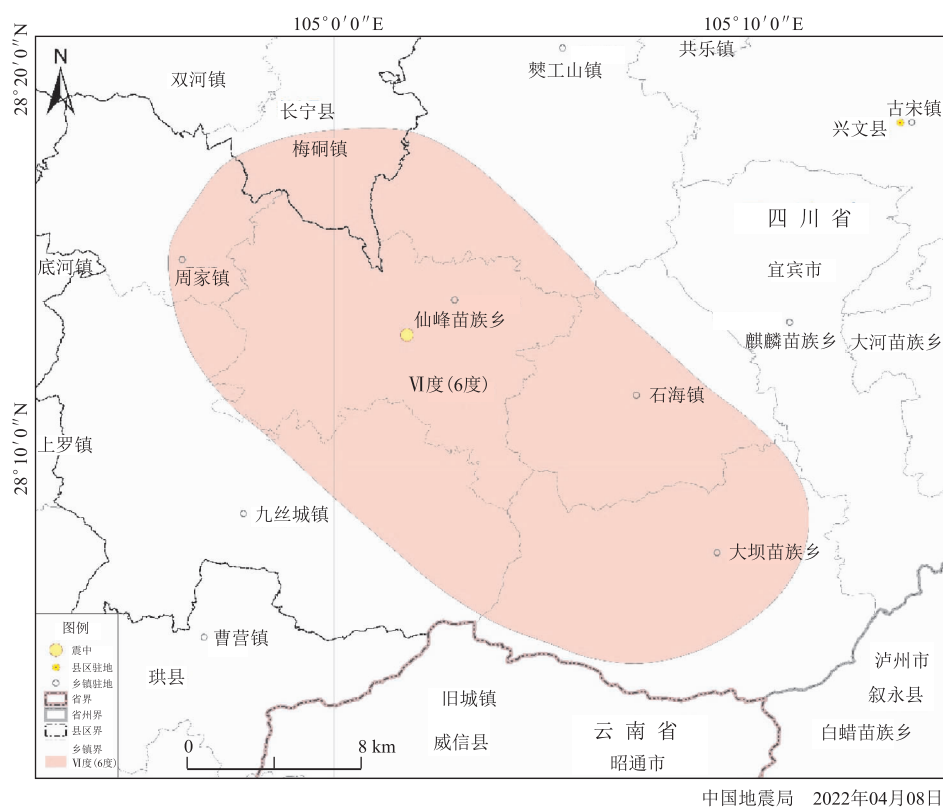


图1 四川兴文 $M_s5.1$ 地震烈度图(四川省地震局,2022)

现场调查结果,灾区范围内房屋结构主要包括框架结构、砖混结构和砖木结构3种类型,其中砖混结构为主要建筑结构类型。

(1) 框架结构房屋主要由钢筋混凝土梁柱承重,钢筋混凝土浇筑楼板或屋顶,抗震性能好。灾区内该类房屋主要为公用房屋,如政府、学校、医院等,对应《中国地震烈度表》中房屋类别为D类。

(2) 砖混结构房屋主要由砖墙承重,预制板或钢筋混凝土浇注楼板及屋顶。灾区内多数砖混结构房屋采用预制板楼板,无圈梁和构造柱,墙体以18墙为主,整体抗震性能一般,对应《中国地震烈度表》中房屋类别为B类。

(3) 灾区砖木结构房屋以红砖或水泥空心砖为墙体材料,墙体多数为18墙,少数为12墙,木屋架上铺设瓦片后搁置在墙体上,木屋架与墙体连接的可靠性弱,且大多数为老旧房屋,抗震性能较差。该类房屋对应《中国地震烈度表》中房屋类别为A1类。

## 2.2 房屋破坏等级划分

依据《地震现场工作第四部分:灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—2011)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等,2011)中房屋破坏等级划分标准,确定灾区房屋破坏等级划分。砖混结构、框架结构为非简易房屋,划分为五个破坏等级:基本完好(含完好)、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、毁坏;对于简易房屋,将毁坏、严重破坏合并为毁坏,将中等破坏、轻微破坏合并为破坏,保留基本完好,划分为三个破坏等级:基本完好(含完好)、破坏、毁坏。

## 3 震害特征及成因分析

本次地震震害特征主要表现为部分房屋建筑和工程结构不同程度的破坏,以及部分地区引发的次生地质灾害。根据现场调查资料,区内抽样调查点中框架结构和砖混结构房屋震害主要表现为轻微破坏,砖木结构房屋震害情况主要为破坏。在VI度区内,基本完好的框架结构房屋占比90.94%,中等破坏的占比0.20%,轻微破坏的占比8.86%;基本完好的砖混结构房屋占比69%,严重破坏的占比0.07%,中等破坏的



占比 0.79% ,轻微破坏的占比 30.14% ;基本完好的砖木结构房屋占比 76.67% ,毁坏的占比 0.58% ,破坏的占比 22.75% 。

### 3.1 房屋震害特征

本次地震中房屋的震害特征主要表现为少数房屋遭受中等破坏和部分房屋轻微破坏。框架结构房屋的抗震能力较好,多为公用和新建商品住宅,主要位于城镇地区;震害特点为绝大多数基本完好,结构完整(图2);个别房屋轻微破坏,抹灰层脱落,墙面有细微裂缝;个别房屋出现墙柱、墙梁结合部位开裂(图3)。砖混结构房屋的抗震能力弱于框架结构房屋,且灾区内该类房屋多数无设防措施,尤其是农村地区砖混房屋基本不设防;震害特征表现为少数砖混结构房屋轻微破坏,其墙面出现明显裂缝(图4);大多数基本完好,有抹灰层脱落现象但结构完整(图5),个别砖混结构房屋出现墙体贯穿裂缝,破坏严重的情况(图6、图7)。灾区内砖木房屋抗震性能较差,以红砖或水泥空心砖砌筑的承重墙体,抗拉、剪、切的能力弱;震害特征表现为少数砖木结构房屋中等破坏,非承重墙体贯穿裂缝(图8),多数基本完好。除此以外,本次地震相较于周边历史地震Ⅵ度区,如2018年兴文  $M_s5.7$  地震,本次地震呈现出个别抽样点房屋破坏较重的情况(图3、图6、图7),主要集中在本次地震震中附近。4月7日于兴文县大坝苗族乡发生的  $M_L4.1$  地震,使得个别老旧砖木房屋因震害叠加造成倒塌(图9)。



图2 夔王山镇教场村框架结构房屋基本完好



图3 仙峰苗族乡框架结构房屋梁柱结合部位裂缝



图4 仙峰苗族乡兴底路附近砖混房屋裂缝



图5 大坝苗族乡红旗村砖混结构房屋基本完好



图6 仙峰苗族乡仙峰村砖混房屋贯穿裂缝



图7 仙峰苗族乡仙峰村砖混房屋贯穿裂缝





图8 梅垌镇中坪村砖木结构房屋墙体贯穿裂缝



图9 仙峰苗族乡老旧砖木结构房屋因震害叠加坍塌

### 3.2 次生地质灾害

本次地震造成一定的次生地质灾害,个别地方道路边坡垮塌(图10)、孤石崩塌(图11)和山体滑坡(图12,图13),造成了山区乡道受损,道路中断。



图10 梅垌镇龙尾村乡道边坡垮塌



图11 梅垌镇中坪村3组乡道因巨石崩塌受损



图12 仙峰苗族乡群鱼社区村山体滑坡



图13 仙峰苗族乡群鱼社区村山体滑坡

### 3.3 工程结构震害特征

本次地震对工程结构造成较为严重的破坏。交通设施方面,主要表现为部分山区乡村道路边坡垮塌和路基沉降,个别道路受崩塌的滚石撞击造成路面破坏(图11)。水利设施方面,表现为个别村庄储存生活用水的水窖和储存生产用水的蓄水池受到轻微破坏(图14,图15),出现渗水现象;个别水库在建渠系工程部分受损。电力设施方面,震时有短暂跳闸现象。

### 3.4 震害原因分析

上诉震害特征是多种因素共同作用的结果。结合当地地质地貌特点和现场调查资料,对产生房屋震害和次生地质灾害和工程震害的原因做出如下分析。

房屋震害主要是由房屋抗震设防能力、建造环境、震害叠加效应和人文地理因素共同作用产生的。(1)根据现场调查资料,灾区内砖混结构房屋多数无构造柱子、圈梁等设防措施,且墙体以18墙为主,抗震性能不足,这也是个别砖混房屋出现中等破坏的主要原因;另外,灾区内砖木结构房屋屋盖与墙体的连接性差,抗



图 14 九丝城镇迎春村水窖裂缝渗水



图 15 仙峰苗族乡高山好村蓄水池裂缝渗水

拉剪能力弱,且大多年久失修,抗震性能较差,这使得砖木结构房屋受损较重。而规范设计建造的框架结构房屋,抗震性能好,能有效地减少和抵御地震波的冲击,受损较轻。(2)现场调查资料显示部分破坏相对较重的房屋存在地基偏软或建于半坡、陡坎和边坡的情况。建造在偏软地基上的房屋,本身长期就存在缓慢沉降,抗震性能有所下降,地震后房屋的受损情况更重;建造在半坡、陡坎和边坡等地形的房屋会因地震动加速度的放大作用而受损加重。(3)本次地震余震多达42次,且4月7日于兴文县大坝苗族乡又发生了 $M_L4.1$ 地震,房屋等工程设施多次受到地震冲击,造成了震害叠加,使得个别抗震性能弱的房屋震害加重(图5)。(4)区域内民居楼顶普遍蓄水以调节室内温度,这使得房屋整体上部分偏重,竖向荷载增加,且水具有流动性,在地震作用下,使得房屋荷载分布更加不均匀,从而使得房屋震害加重。

次生地质灾害和工程震害主要是由地理环境和抗震设防能力决定的。区域内多山地,喀斯特地貌显著,如有以喀斯特岩溶地貌、溶洞为主要特色的兴文石海园区等。长年的流水侵蚀作用下,山区多有裸露的岩石,部分孤立的岩石极易受到外力作用而滚落(图9),造成其他损害,如道路受损等。陡峭、坡面土体附着力低的山体更容易在地震力作用下形成滑坡(图12、图13)。此外,居民修建的蓄水池、水窖等水利设施未采取相关设防措施,地震力作用下容易造成受损,使得蓄水能力下降。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

2022年兴文 $M_S5.1$ 地震的最高烈度为Ⅵ度,对当地房屋建筑造成了一定破坏。该地震主要对农村早期修建的未设防砖混结构房屋和老旧砖木结构房屋破坏较重。这些房屋有的存在施工工艺粗糙、建筑年久失修、材料整体性差等方面的问题(肖本夫等,2017),有的因建造环境引发的地基失稳和地震动加速度的放大作用使得房屋受损较重。此外,地震也对电力、水利、道路等基础设施造成不同程度损坏。本次地震未造成人员伤亡,一方面是由于本次地震震级相对较低,最高烈度为Ⅵ度,无房屋直接倒塌的情况;另一方面是因为2018年兴文 $M_S5.7$ 地震灾后恢复重建工作的完工以及脱贫攻坚工作的圆满完成,当地房屋抗震设防能力有了较大提升。本次地震造成了一定的次生地质灾害,出现了多处崩塌和滑坡以及部分道路边坡垮塌和路基沉降,造成了山区乡道受损,道路中断。次日在兴文大坝苗族乡又发生的 $M_L4.1$ 地震造成了震害叠加,使得次生地质灾害加剧。

### 4.2 建议

(1)加强地震灾害风险隐患排查。加快推进地震灾害风险调查和重点隐患排查工程,建立地震灾害风险调查常态化工作机制,完善地震灾害风险基础数据库和地震灾害风险动态评估机制。加强对地震重点监视防御区内的交通、铁路、水利、电力、通信等基础设施和学校、医院、福利机构等人员密集场所的经营管理单位,以及可能发生次生灾害的核电、矿山、危险物品等生产经营单位的动态调查,全面查明各类设施及其附属构件的基本情况,梳理出大震巨灾风险源和危险源清单,精准识别地震灾害风险隐患(杨璐遥等,2022)。

(2)进一步强化抗震设防。推进实施房屋设施加固工程,对抗震能力不足的城乡住宅、学校、医院和电力、通信、交通等重要设施进行评估和抗震加固改造,督促落实重大工程、各类开发区、工业园区房屋建筑和



城市基础设施、一般工程、学校医院等人员密集场所的抗震设防要求,加强减隔震等抗震新技术应用,全面提升房屋设施抗震防灾能力。加强重大工程地震安全性评价监督管理,推进工业用地“标准地”等地震安全性评价的区域评估工作,建立完善房屋设施抗震设防信息动态管理机制,积极消除可能引起次生灾害的风险隐患。

(3)深化地震科学基础研究。加大财政投入力度,在地震重点监视防御区开展活动断层探测、深部构造探测等工作。加强对川南地区盆地地震活动研究,深入进行巴颜喀拉块体、周边工业活动、震区构造背景等地震触发的多因素分析,加强地震机理的科学研判。同时,地震灾情信息和应急救助服务作为抗震救灾工作的基础,其服务内容和方式会直接影响抗震救灾工作的效率(肖本夫等,2020),需进一步加快建设地震灾情上报、震情研判等信息技术系统,完善技术支撑体系。

**致谢:**感谢四川兴文 $M_s5.1$ 地震现场工作队全体工作人员的辛勤工作,宜宾市、兴文县、长宁县各级人民政府和有关部门对此次地震现场工作给予了大力支持和积极配合。

## 参考文献

- 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 2020. 中国地震烈度表:GB/T 17742—2020[S]. 北京:中国标准出版社.
- 四川省地震局. 2022. 四川省地震局发布兴文5.1级地震烈度图[EB/OL]. (2022-04-08)[2022-04-15]. [http://www.scdzj.gov.cn/xwzx/fzjzyw/202204/t20220408\\_52005.html](http://www.scdzj.gov.cn/xwzx/fzjzyw/202204/t20220408_52005.html).
- 肖本夫,毛利,罗安元,等. 2017. 四川筠连 $M_s4.9$ 地震震害特征及致灾因素分析[J]. 地震工程学报, 39(增刊):202-208.
- 肖本夫,申源,陈维锋,等. 2020. 基于MINA框架的应急救助与地震灾情管理平台设计与实现[J]. 震灾防御技术, 15(4): 836-845.
- 新华网. 2022. 四川宜宾兴文县5.1级地震紧急转移群众1045人 无人员伤亡报告[EB/OL]. (2022-04-06)[2022-04-15]. [http://www.news.cn/local/2022-04/06/c\\_1128536977.htm](http://www.news.cn/local/2022-04/06/c_1128536977.htm).
- 杨璐遥,代友林,毛利,等. 2022. 2021年9月16日四川泸县6.0级地震震害特征分析[J]. 四川地震, (1):15-19.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 2011. 地震现场工作第3部分:调查规范:GB/T 18208.3—2011[S]. 北京:中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 2011. 地震现场工作第4部分:灾害直接损失评估:GB/T 18208.4—2011[S]. 北京:中国标准出版社.

# Analysis of the Damage Characteristics of the Xingwen $M_s5.1$ Earthquake in Sichuan Province on 6 April, 2022

DAI Youlin, YANG Luyao, LIU Yang, LIANG Yuanling  
(Sichuan Earthquake Agency, Sichuan Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The seismic investigation team used sampling survey, individual survey, on-site verification and other methods to conduct field survey of houses and other projects in the epicenter area associated with the magnitude of  $M_s5.1$  occurred in Xingwen County, Sichuan Province. We obtained the intensity distribution of the earthquake and a large amount of survey data. This paper summarizes the damage characteristics and causes of the earthquake. We present some suggestions on the following aspects such as earthquake disaster risk investigation, seismic fortification of buildings, and basic research on earthquake science for earthquake prevention and disaster reduction in the earthquake area, which provides a reference for the restoration and reconstruction in the earthquake area and the improvement of local seismic fortification capabilities.

**Keywords:** the Xingwen  $M_s5.1$  earthquake; characteristics of earthquake damage; damage-causing factors



四川省地震局  
SICHUAN EARTHQUAKE AGENCY

# 《四川地震》 重特大地震专栏约稿函

2023年是四川炉霍一道孚7.3级地震100周年、四川叠溪7.5级地震90周年、四川炉霍7.6级地震50周年、四川芦山7.0级地震10周年，为及时报道相关研究成果，《四川地震》拟在2023年9月组织刊发重特大地震专栏，现征集相关论文。诚邀各位专家学者来稿。投稿标题前请注明：重特大地震专栏，来稿将进入快速审稿流程，择优录用。

## 征稿范围和内容（包括但不限于）：

1. 区域运动学、动力学特征及孕震环境研究；
2. 地震活动性研究；
3. 监测预报预警技术研究；
4. 震例回溯与总结；
5. 地震次生灾害研究；
6. 活动断裂研究；
7. 地震风险普查与评估；
8. 防震减灾救灾对策研究。

## 投稿方式及联系人：

联系人：周文英  
专栏投稿邮箱：[scdzbjb@163.com](mailto:scdzbjb@163.com)  
专栏截稿日期：2023年6月30日  
联系电话：028-65270607  
QQ交流群：547903716

《四川地震》编辑部  
2023年1月17日