

2021年9月16日四川泸县6.0级地震 科学考察报告

地震预测研究所
地球物理研究所
四川省地震局
地质研究所

工程力学研究所
台网中心
重庆市地震局
广东工业大学

指导单位：中国地震局科技与国际合作司

牵头单位：地震预测研究所、四川省地震局

二〇二一年十一月

科考指挥部

指 挥 长： 张晓东 江小林

副指挥长： 丁志峰 李 营

科考任务工作组

孕震构造环境研究工作组组长： 李永华

地震构造研究工作组组长： 孙浩越

震源参数精准测定工作组组长： 蒋长胜

序列特征与区域地震危险性研究工作组组长： 赵翠萍

震中及周边地区构造地球化学探测工作组组长： 陈 志

强地面运动场观测工作组组长： 马 强

震害现场调查与震害机理分析工作组组长： 孙柏涛

参与科考人员

陈 聪	陈 石	陈 志	陈洪富	陈明飞	陈相兆
陈正位	崔腾发	翟鸿宇	丁志峰	董彦芳	窦爱霞
高 咪	官 悦	郭祥云	何思源	何玉林	洪顺英
侯红语	胡朝忠	江宁波	江小林	蒋长胜	解全才
来贵娟	李 伟	李 营	李大虎	李红蕾	李继龙
李静超	李文巧	李雪浩	李永华	梁明剑	林均岐
刘峰立	刘金龙	刘雪华	刘玉法	刘兆飞	娄良琼
鲁人齐	罗 钧	马 超	马 强	孟国杰	祁玉萍
邵 乐	石 磊	苏淑娟	孙 稳	孙柏涛	孙汉荣
孙浩越	孙翔宇	太龄雪	汤 毅	陶冬旺	田文君
王 林	王 龙	王 洵	王书民	王未来	王现伟
王晓青	王宇欢	吴微微	熊仁伟	徐 锐	徐超文
杨 程	杨 耀	易桂喜	尹凤玲	尹欣欣	詹 艳
张 贝	张 兵	张 达	张 龙	张 威	张国霞
张克诚	张瑞青	张晓东	张彦博	张致伟	赵 航
赵 影	赵翠萍	郑晨禾	周连庆	周晓成	左可桢

摘 要

科学考察取得以下发现和认识：泸县 6.0 级地震的实际深度基本上处于 4km 左右，多数余震集中于 5km 浅范围内。主震位于重磁异常和高低速异常分界线以及大地电磁高、低阻边界带附近。震源体下方存在明显的低速异常分布，使得上覆地层更容易积累应变能，当达到介质强度极限时发生破裂，引发强震。地震发生在 NE 向华蓥山褶断带内部，发震构造与震中附近的华蓥山褶断带西支断裂及附近已知的地表断层几何结构不一致。主震震源机制为逆冲型，余震区存在多条断层同时活动，震前具有少量前震活动，余震频次低、强度弱，呈现为具有少量前震的孤立型地震序列特征。地球化学观测分析认为地震的发生与四川盆地内大型北西向断裂的构造活动无关，而可能与区域强构造挤压背景下局部应力的释放有关，且地震的发生促进了震中附近北西向浅层隐伏断裂带气体的释放。地震造成的大量房屋严重内伤，加重了灾后恢复重建的难度，提高了恢复重建的成本。建议在恢复重建中，要切实提高区域抗震设防水平和房屋建筑的抗震能力，提高学校、幼儿园、医院等重点目标建筑物设防标准，加强建筑物附属设施和非结构构件的抗震能力，有效减少震后因破坏和坠落造成的人员伤亡。

目 录

一、地震基本参数.....	1
二、孕震环境.....	2
三、发震构造.....	2
四、震源参数精准测定.....	3
五、InSAR 形变场.....	4
六、序列特征与区域地震危险性研究.....	4
七、地震地球化学观测.....	6
八、工程震害特征.....	7
致谢.....	8

2021年9月16日四川泸县6.0级地震

科学考察报告

2021年9月16日04时33分,四川泸州市泸县(29.20° N, 105.34° E)发生6.0级地震,震源深度10km。泸县总人口106.266万,面积 1532km^2 ,平均人口密度 693.64 人/ km^2 ;城区人口约12万,面积约 13.21km^2 ,人口密度约 9084 人/ km^2 。地震发生后,应急管理部、中国地震局高度重视,就做好此次地震抗震救灾工作作出重要指示。科技与国际合作司立即组织编制地震科学考察工作方案,启动四川泸县6.0级地震科学考察。科考工作组由预测所、四川局、地球所、地质所、工力所、台网中心、重庆市地震局、广东工业大学等单位的124名多学科专家组成,其中派出37名专家赴泸县地震科考现场。工作报告如下。

一、地震基本参数

中国地震台网速报给出的震源深度是由初动震相给出的地震破裂起始位置,通常用表示地震破裂能量最大位置的地震矩心深度来代表地震的实际深度。泸县6.0级地震发生后,预测所人工智能EarthX系统和罗钧博士分别给出的矩心深度为4.3km和4.8km,四川局易桂喜研究员给出的矩心深度为3.5km,地球所蒋长胜研究员给出的矩心深度为3.3km,日本产业技术综合研究所雷兴林教授给出的矩心深度为3.6km。因此,泸县6.0级地震的实际深度基本上处于4km左右。余震序列深度统计结果也表明,多数余震集中于5km

浅范围内。

二、孕震环境

基于泸县震区及周边地震台站观测数据，反演获取了震区不同深度、不同尺度的 P 波和 S 波速度结构，并开展了基于重力和航磁数据反演震区深部介质物性分布特征的工作。科考研究表明：（1）华蓥山断裂带呈现出密度梯级带和磁性过渡带特征，其两侧的密度结构和磁化强度分布明显不同，泸县 6.0 地震位于重磁异常分界线附近；（2）不同尺度的 P 波和 S 波速度反演结果均表明，泸县 6.0 级地震震区表现出北高南低的速度结构分布特征，主震位于高低速异常分界线附近；（3）高分辨的背景噪声成像结果进一步揭示，泸县 6.0 地震震源体下方存在明显的低速异常分布，使得上覆地层更容易积累应变能，当达到介质强度极限时发生破裂，引发强震。

三、发震构造

震区两侧北东向的螺观山-梯子崖背斜和古佛山背斜及相关断裂未在该次地震中活动，且晚第四纪活动性较弱，不是本次地震的发震构造。震区附近盆地内（喻家寺向斜区）无大规模断层，地表未发现明显的北西向断层。震源区附近的电阻率结构在 3 公里深度以上存在高阻和低阻变化的横向差异，而在约 3 公里深度以下电阻率结构趋于均匀，为成层性较好的低阻结构。震源区深部介质具有北西和南西低阻而北东和南东高阻的特征，这种空间上的电性差异可能能较好解释泸县地震震源机制解为北西-南东方向，而不是地表能看

到的北东向构造。震源区在垂向上处于上覆高阻体（HRB）和下部低阻层（HCL）的交汇处，在横向上则处于北西和南西侧的低阻介质与北东和南东侧高阻介质的电性差异带附近。震区古生界存在以泥页岩为代表的滑脱层系，以薄皮逆冲构造为主，形成断层相关褶皱并控制盆地内部的构造变形。震中位置的滑脱层之上发育多条 NE-SW 向的小型断层，但与震源机制解给出的 NW-SE 向浅源发震断层不匹配。震中区域的浅层盖层中尚未发现与震源机制和余震序列吻合的发震断层，表明了此次泸县地震的复杂性，为评估区域的潜在地震风险带来了很大的不确定性。

四、震源参数精准测定

根据震区流动密集地震台阵的野外观测数据分析研究表明：（1）主震和震区周边地震均为浅源地震，主震矩心深度仅为 3.3km，余震平均深度为 3.6km；（2）主震震源机制为逆冲型、矩震级 M_w 5.4，发震断层面为 SW 倾向；（3）余震区长轴约 6km、NW 方向，余震区存在多条断层同时活动，震后周边发生的多次 3 级以上地震不在余震区；（4）主震前震区周边存在多条明显线状几何特征、震源较浅的地震分布。

上述结果，对科考的“地震发震构造和构造变形机制”、“孕震环境和震源过程的认识”等问题，分别给出了主震发震构造及其几何特征的地震学依据，区分确认了余震区的真实范围、展示了震前震区周边多条浅部构造的地震活动，为地震危险性分析提供了科学约束。

五、InSAR 形变场

采用欧洲空间局 Sentinel-1A/B 卫星升降轨两个轨道数据获得了泸县 6.0 孔地震同震变形场，并利用矩形弹性位错模型反演得到震源机制解和滑动分布，结果显示（图 1）：同震变形区域长轴约 6km，短轴约 4km，最大变形值约 4cm，地震震源深度为 4.7km。

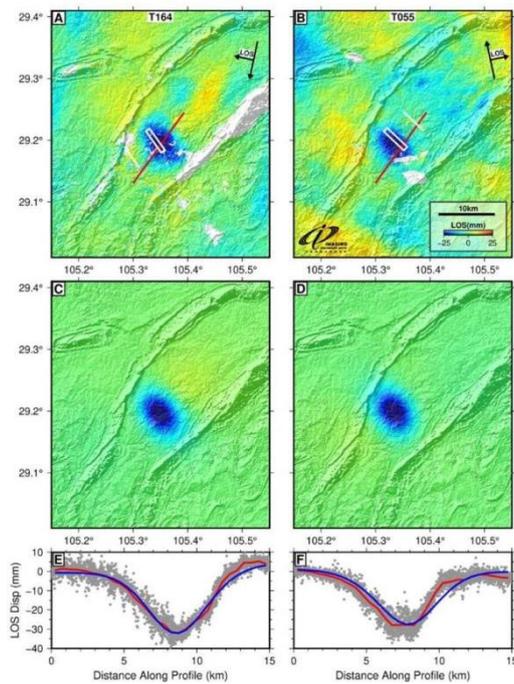


图 1 A-B 采用降轨 164 和升轨 055 数据生成的同震干涉图；C-D 采用弹性位错模型拟合的同震变形；E-F：沿图 A-B 中红色剖面线的变形。

六、序列特征与区域地震危险性研究

泸县 $M_s6.0$ 震源初始破裂深度 5.1 km，矩震级为 $M_w5.4$ ，矩心深度 3.5 km。泸县 $M_s6.0$ 地震发生在 NE 向华蓥山褶断带内部，震前具有少量前震活动，余震频次低、强度弱，最大余震（ $M_s2.8$ ）与主震震级差 3.2，呈现为具有少量前震的孤立型地震序列特征。重定位后，泸县 $M_s6.0$ 地震的余震序列由三条不同走向的地震条带组成，整体呈北西西向展布，长度约为 5 km，破裂规模较小，余震主要集中在序列的东端。

泸县 $M_s6.0$ 地震震源机制为逆冲型，根据余震优势分布及 InSAR 数据揭示的同震形变场，走向 NWW 的节面为泸县 $M_s6.0$ 地震的同震破裂面，即发震构造为 NWW 走向且倾角约为 45° ，是四川盆地沉积盖层内 NWW 向隐伏逆冲断层在近 NS 向水平主压应力挤压作用下所发生，与震中附近的华蓥山褶断带西支断裂及附近已知的地表断层几何结构不一致。

泸县 $M6.0$ 地震东北侧的 2021 年 9 月 25 日 $M3.0$ 和 9 月 27 日 $M3.0$ 余震，分别为近 NNE-SSW 走向的正断、逆冲事件。质心深度均为 $4 \sim 5\text{km}$ ，破裂发生在盆地沉积层中。区域应力场反演结果显示，泸县地区处于 NS 向的挤压应力环境中。最大主压应力轴(σ_1)为近 NS 向，倾角近水平；最小主压应力轴(σ_3)倾角近乎直立。与华南地块区域构造应力场 NW-SE 向主压应力方向差异显著，揭示本次 $M_s6.0$ 地震可能受局部应力场控制。

根据 InSAR 数据反演结果，泸县地震同震形变量约达 $4 \sim 5\text{cm}$ ，发震断层埋深 2.6km ，走向为 138.6° ，倾向 SW，矩震级为 $M_w5.4$ ，呈现隐伏逆冲双侧破裂特征。泸县地震对周边断层有约 0.1Kpa 的影响。

在华蓥山断裂带东西两支之间的泸县-荣昌地区，地震活动性参数 b 值时间序列明显升高的三个时间段与该区域的废水注入和水力压裂活动时间一致，反映了工业活动对该地区地震活动的影响。 b 值在空间分布上也存在明显差异性，反映了不同区域应力积累和介质性质的差异，其中泸县震源区

为显著低 b 值（小于 0.7）区，荣昌地区为相对高 b 值区（大于 1.0）。泸县 $M_s6.0$ 地震发生于高低速异常体的交界处，震源下方为显著的低波速比区。

七、地震地球化学观测

泸县地震震中及附近区域土壤气体 CH_4 、 H_2 和 Rn 浓度测量结果显示（图 2、3），华蓥山断裂带呈现明显土壤气体浓度高值聚集现象，泸县地震震中附近也存在较弱的土壤气体浓度高值集中现象，且隐约可见高值北西向聚集痕迹，华蓥山断裂带西支西侧也探测到北西向高值条带，其展布与四川盆地内北西向断裂基本吻合，但并未并穿越华蓥山断裂西支。综合分析认为，泸县地震震中附近可能存在北西向断裂带，但其规模较弱，应该不是四川盆地内北西向断裂的延续带。因此，华蓥山断裂可能仍是控制区域地震活动的主要构造，泸县地震的发生与四川盆地内大型北西向断裂的构造活动无关，而可能与区域强构造挤压背景下局部应力的释放有关，且地震的发生促进了震中附近北西向浅层隐伏断裂带气体的释放。

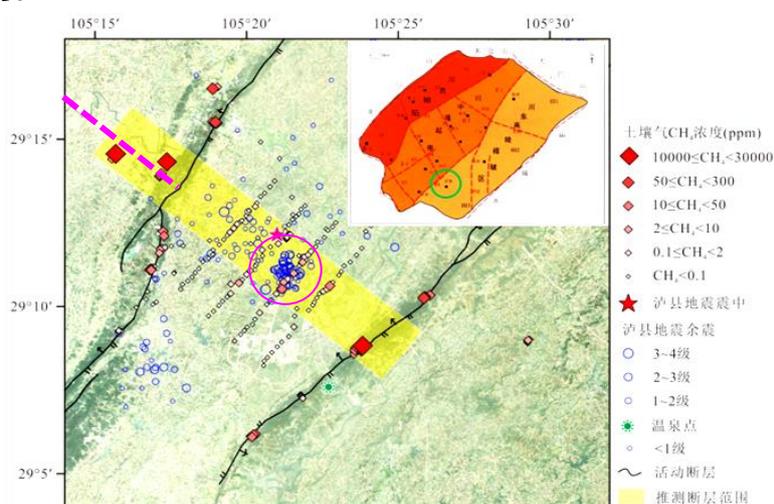


图 2 泸县地震震中及附近区域土壤气体 CH_4 浓度空间分布图

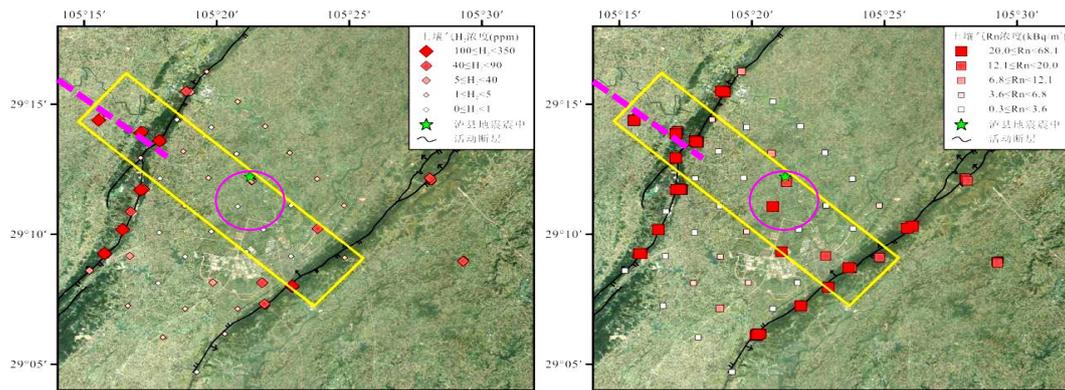


图3 泸县地震震中及附近区域土壤气体 H_2 (左图) 和 Rn (右图) 浓度空间分布图

八、工程震害特征

从2001年起，泸县地区为第四代区划图的VI度（6度）设防区。泸县县城核心区域大范围房屋建筑主要在1996-2010年建成，房屋建筑多为未设防或者设防措施不够，缺少必要的圈梁、构造柱，纵横墙体、女儿墙和出屋面楼梯间（气棚）等缺少拉结，且砂浆强度较低、楼（屋）板采用空心预制板。本次科考震害现场调查的工作重点之一是对泸县城区的房屋建筑进行震害调查，调查范围包括环保局、检察院、清溪社区居委会等办公楼，住建局、财政局等家属楼、泸县二中校舍等，玉蟾市场、天立观澜金月湾小区等商业建筑物和居民小区。

调查结果显示，泸县城区受本次地震影响而造成的震害相对较重，部分房屋严重受损，建筑物的外表虽然看不出较严重破坏，实际内部墙体等构件损坏严重（图4）。这与该地震震源浅、震中烈度达到VIII度（8度）、距离震中近（属近城市直下型地震）、房屋抗震设防烈度较低、抗震能力较弱、以及不利地形和场地等的影响有密切关系。



图4 泸县环保局办公楼受损照片（2021年9月27日拍）

泸县城區房屋虽然做到了“大震不倒不死人”，但地震造成的大量房屋严重内伤，加重了灾后恢复重建的难度，提高了恢复重建的成本。建议在恢复重建中，要切实提高区域抗震设防水平和房屋建筑的抗震能力，提高学校、幼儿园、医院等重点目标建筑物设防标准，加强建筑物附属设施和非结构构件的抗震能力，有效减少震后因破坏和坠落造成的人员伤亡。

致谢

泸州市各级人民政府和有关部门对此次地震科考工作给予了大力支持和积极配合，使地震科考研究在时间紧、任务重的情况下得以顺利开展。