第 35 卷 第 3 期
2013 年 9 月

地 震 工 程 学 报
CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL

Vol. 35 No. 3
Sept., 2013

研究综述

岷县漳县 6.6 级地震震害特征及其启示①

王兰民[1,2,3]，吴志坚[1,2,3]

(1. 中国地震局黄土地震工程重点实验室，甘肃 兰州 730000；
2. 中国地震局兰州地震研究所，甘肃 兰州 730000；3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心，甘肃 兰州 730000)

摘要：通过对 2013 年 7 月 22 日甘肃岷县漳县 6.6 级地震的发震构造、房屋和生命线工程震害、次生地质灾害的现场科学考察，系统介绍了本次地震发震构造、宏观地震烈度分布特征、不同烈度区房屋震害特点及破坏机制，并对地震中突出的黄土滑坡震害开展了深入的分析，进而总结归纳了此次地震中的断层效应、山体放大作用和边坡效应等震害特征。在此基础上提出了针对灾区灾后重建和今后我国的抗震设防工作的几点启示。

关键词：岷县漳县 6.6 级地震；震害特征；黄土滑坡；抗震设防

中图分类号：P315.941 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－0844(2013)03－0401－12

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2013.03.0401

Earthquake Damage Characteristics of the Minxian－Zhangxian M_S6.6 Earthquake and Its Lessons

WANG Lan-min[1,2,3], WU Zhi-jian[1,2,3]

(1. *Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of CEA, Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*; 2. *Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*;
2. *Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*)

Abstract: According to scientific investigation of the seismogenic structure, housing and the lifeline engineering damages and the secondary geological disasters induced by the Minxian－Zhangxian M_S6.6 earthquake on July 22, 2013, that the characteristics of seismogenic structure and seismic intensity distribution, damage characteristics and failure mechanism of houses in different intensity zones are introduced. Moreover, a thorough analysis of typical loess landslides are carried out, the damage characteristics of fault effects, amplification effects of mountain and slope effects are summarized as well. Based on the in-depth investigation of seismogenic structure, site conditions of the quake-hit areas, different houses damages and secondary geological disasters, some lessons have been proposed for reconstruction of the quake and seismic fortification in the future.

Key words: Minxian－Zhangxian M_S6.6 earthquake; earthquake damage characteristic; loess landslide; seismic fortification

① **收稿日期**：2013-09-06；**中国地震局兰州地震研究所论著编号**：LC2013052
基金项目：中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2012IESLZ01)；国家自然科学基金(40902094，50978239)
作者简介：王兰民(1960－)，男(汉族)，研究员，博士生导师，主要从事黄土动力学和岩土工程防灾减灾领域研究. E－mail：wanglm@gssb.gov.cn

0 引言

2013 年 7 月 22 日 07 时 45 分，在甘肃省岷县、漳县交界处（北纬 34.5°，东经 104.2°）发生了 M_S6.6 强烈地震，宏观震中位于岷县梅川镇一带，震中区烈度为Ⅷ度。此次地震是自 1954 年山丹 7.2 级地震以来甘肃省境内发生的震级最大的一次地震。截止 2013 年 8 月 23 日 15 时共发生余震 1260 次，其中 M_L3.0～3.9 地震 22 次，M_L4.0～4.9 地震 5 次，M_S5.0～5.9 地震 1 次。最大余震为 7 月 22 日 9 时 12 分发生的 M_S5.6 地震。此次地震受灾范围涉及甘肃省 13 个县。灾区外围部分县市也受到地震波影响，造成个别居民点有少量破坏。地震共造成 95 人死亡，2414 人受伤，78530 户、314120 人失去住所，直接经济损失达 175.88 亿人民币。其中，岷县、漳县等地区受灾最为严重，村镇民用房屋和水利、交通、电力等公共设施和生命线工程破坏严重。本文对这次地震的发震构造、房屋和生命线工程震害、烈度分布特征、各烈度区房屋震害特点及破坏机制进行总结介绍，并重点对黄土滑坡震害特征进行分析讨论，以期用得到的灾后重建和今后的抗震设防工作有益的启示。

1 发震断裂概况

震中位于南北地震带北端的甘东南地区。该区是中强震多发区，历史和现今中强地震时有发生，特别是近十年以来在该地区发生了多次 5 级以上地震。该地区也是中国地震局确定的重点监视防御区之一。

该地区地震构造复杂，在两条区域性断裂东昆仑断裂和西秦岭断裂中间，发育有迭部－白龙江断裂带、光盖山－迭山断裂带、临潭－宕昌断裂带、两当－江洛断裂、康县－略阳断裂带、文县－康县－略阳断裂、礼县－罗家堡断裂等多条规模较大的第四纪断裂，共同组成了该地区复杂的“V”字型构造体系。该地区受青藏高原构造作用的影响，新构造运动和地震活动强烈。

此次地震发震断裂为临潭－宕昌断裂。该断裂由多条规模不等、相互平行或斜列的次级断裂组合而成，断裂带影响宽度范围在 5～10 km，在岷县东南断裂归并为一体，延至宕昌以南。断裂的总体性质是以向北逆冲为主，略具左旋走滑分量，断裂呈 NWW－NW 向展布，倾向 NE，倾角 50°～70°。近几年的研究认为各断裂段活动性差异较为显著，且每段内也呈现出断裂活动的不均匀性：西段（合作断裂段）北支活动性较弱，为早更新世或前第四纪活动断裂，南支活动不均匀，最西端活动性较差为早中更新世活动，东端为晚更新世活动；中段（临潭断裂段）相对较活动，北支可能为全新世早期活动，其活动性在整个断裂带中最强，南支为早中更新世－晚更新世早期活动；东段（岷县－宕昌断裂段）的主支断裂活动性较差，断裂段主要部分活动为前第四纪，仅有少量地段呈现出早更新世有过活动，其北缘的两条次级断裂中最北边的一条可能第四纪晚期（全新世）有复活动的迹象，沿洮河的一条最新活动时间应为早中更新世，而其最南端的斜接断裂活动时间与主干断裂一致，为第四纪早期或前第四纪。

本次地震正是发生在该断裂北缘的其中一条次级断裂向东延伸的位置（图 1）。以往发生的 2003 年岷县 M_S5.2 地震和 2004 年岷县－卓尼 5.0 级地震等也说明该次级断裂有新活动的特征。

2 地震烈度分布

本次地震范围相比同类震级地震，农村民房破坏严重，地震地质灾害明显，影响范围较大。甘肃强震动台网共有 63 个台站成功获取了此次地震记录，其中记录到烈度值达到Ⅷ度的有 1 个台站，烈度值达Ⅶ度的 1 个台站，Ⅵ度的 6 个台站。获取记录最近的强震台为岷县台，距震中 18 km，记录到的水平向加速度峰值为 172.5 gal。

依据《地震现场工作：调查规范》（GB/T 18208.3－2011）、《中国地震烈度表》（GB/T 17742－2008）[1-2]，通过对 126 个乡镇、418 个抽样调查点的震害调查、强震动观测记录分析、遥感震害解译等，编制成此次地震烈度分布图（图 2）。

此次地震极震区烈度为Ⅷ度，Ⅵ度区及以上总面积为 16 432 km^2，等震线长轴呈 NW 走向分布。共造成甘肃省 13 个县受灾，包括定西市岷县、漳县、临洮县、渭源县、陇西县，甘南州临潭县、卓尼县、迭部县、舟曲县，陇南市宕昌县、礼县，临夏州康乐县和天水市武山县。此外，位于Ⅵ度区之外的部分县市也受到地震波及，造成个别居民点有少量破坏。此次地震相比同类震级地震，其Ⅵ度区内面积要大，原因主要与灾区较厚的黄土层覆盖、震前数十天的持续降雨、大面积分布的黄土滑坡和崩塌等次生地质灾害等叠加作用加重了震害有关。

Ⅷ度区西北自岷县中寨镇，东南至岷县禾驮乡东南，长轴为 40 km，短轴为 21 km，面积 706 km^2。Ⅶ度区西北自卓尼县洮砚乡，东南至宕昌县木耳乡，

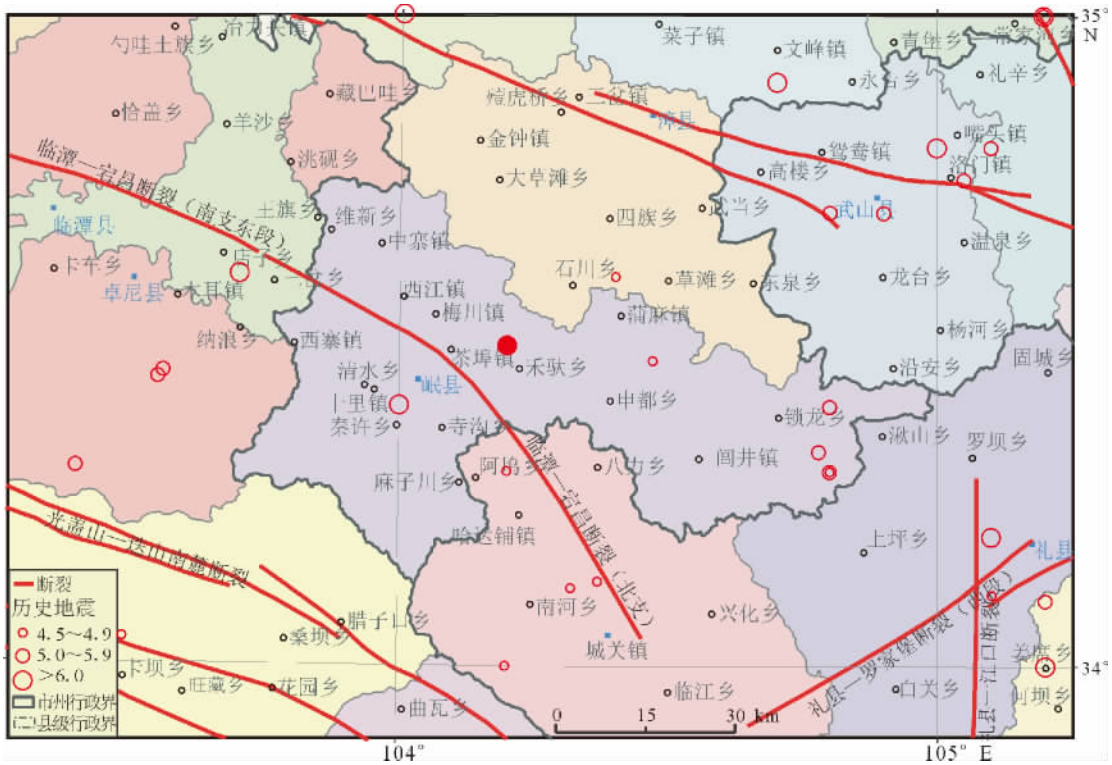

图 1　临潭—宕昌断裂各段活动特征及其与地震的关系(为本次地震)

Fig. 1　Activity characteristics of each segment of the Lintan—Tanchang Fault and its relationship with earthquakes(the red five-point star marks place where the quake occurred)

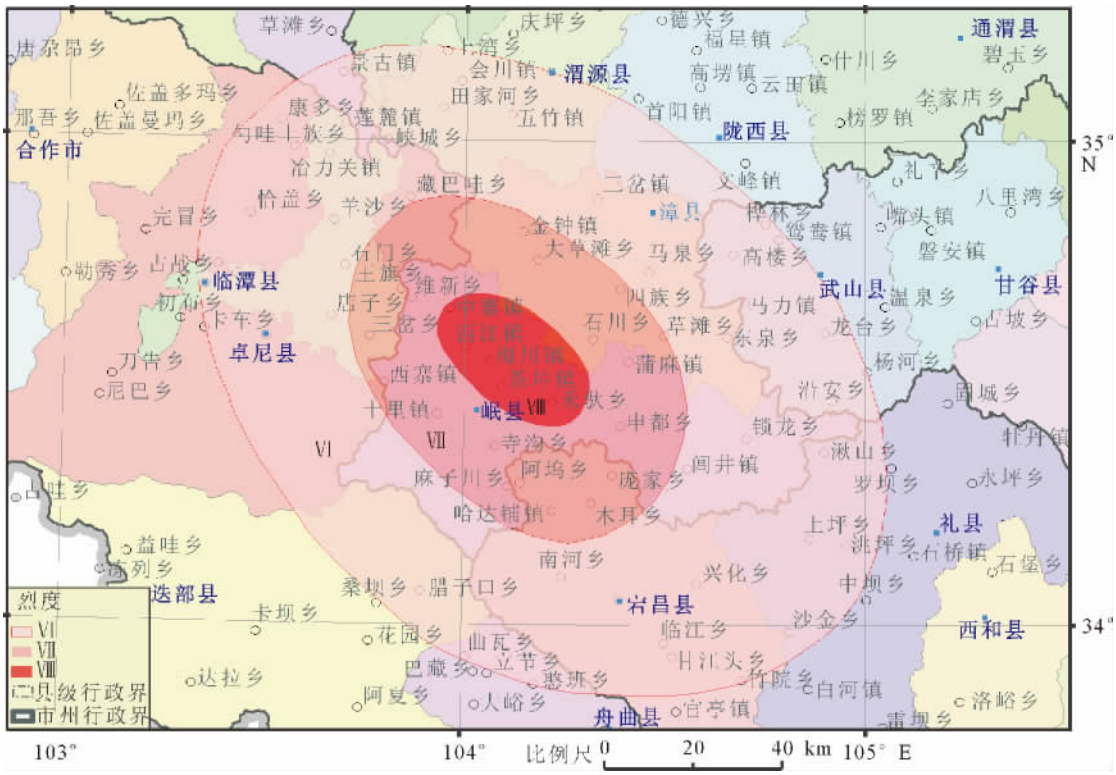

图 2　岷县漳县 M_S6.6 地震烈度分布图

Fig. 2　Intensity distribution of the Minxian—Zhangxian M_S 6.6 earthquake

东北自漳县金钟镇，西南至岷县麻子川乡，长轴为 87 km，短轴为 59 km，面积 3 640 km^2。Ⅵ度区西北自卓尼县康多乡，东南至礼县沙金乡，东北自陇西县菜子镇，西南至迭部县洛大乡，长轴为 161 km，短轴 127 km，面积 12 086 km^2。

3 不同烈度区房屋破坏

灾区房屋结构类型主要有土木、砖木、砖混和框架结构等四种类型。框架结构房屋主要是县级政府、机关办公楼、学校和卫生院等公用建筑。其他建筑基本为土木、砖木和砖混三种结构。其中农居中土木和砖木结构房屋所占比例接近 90%，以农民自建房为主，多分布在乡镇。砖混结构房屋在灾区农居中不到 10%，并且基本按照当地基本设防烈度抗震设防，经过正规的设计和施工。本次地震不同烈度区内不同结构房屋破坏特点明显。经过正规设计和施工的房屋，尤其是甘肃省近五年建成的抗震安全农居，均经受了地震冲击，无一倒塌或严重破坏。

3.1 Ⅷ度区房屋破坏

本次地震极震区为Ⅷ度区。区内土木结构房屋基本为严重破坏或倒塌；砖木结构房屋破坏为中等至严重破坏，基本无倒塌；砖混结构房屋为轻微、中等破坏；框架结构房屋基本完好，极个别房屋有轻微裂缝。土木结构房屋墙体主要为夯土或土坯墙体，或仅前墙为砖墙、或前墙砖墙加四角砖构造柱结构；房屋承重有墙体承重、混合承重（墙体和四角砖柱承重）、木架承重三类；屋盖为木屋盖或夯土屋盖，极少数为混凝土屋盖，屋盖结构为双坡水、单坡水或平屋盖。极震区内该类结构房屋基本为严重破坏或完全倒塌，位于山腰和山顶的土木结构墙体承重房屋普遍倒塌（图 3）；木架承重的土木结构房屋大多能保持结构不倒，但是墙体基本倒塌（图 4）。

极震区内砖木结构房屋较少，在农居中所占比例约 10%。该类型房屋为四周墙体为实心或空心砖，屋盖为木屋盖，基本上为双坡水结构。该类型房屋在调查中未发现倒塌现象，但是墙体裂缝普遍发育，少数房屋墙体出现贯穿性和 X 型裂缝，破坏严重（图 5）。

极震区农居中砖混结构房屋较少，所占比例不足 5%。该类房屋多在门、窗周边出现轻微裂缝，而采用上下圈梁和构造柱的等抗震措施的砖混房屋，更是破坏轻微，经受了地震考验。少量砖混房屋建在较厚的黄土覆盖层上，由于地基处理不均匀，在房屋底部出现由于基础沉降引起的横向裂缝（图 6）。

图 3 永星村土坯墙体承重土木房屋完全倒塌

Fig. 3 The entire collapse of adobe house with adobe earing walls at Yongxin village

图 4 永星村木架承重土木房屋土坯山墙倒塌

Fig. 4 The adobe gable wall collaps in adobe house with wooden frame constructure at Yongxin village

图 5 永星村砖木结构房屋墙体倒塌

Fig. 5 The brick wall collapse in wood and brick house at Yongxin village

3.2 Ⅶ度区及Ⅵ度区房屋破坏

Ⅶ度区内，土木结构房屋基本为中等到严重破坏，少量倒塌；砖木结构房屋破坏大多为轻微破坏，少量严重破坏；砖混结构房屋大多完好，少量墙体出现轻微裂缝；框架结构房屋基本无破坏。Ⅵ区内，土

图 6　茶固小学砖混房屋墙体贯通裂缝

Fig. 6　Perforative crack on the brick-and-concrete house at Chagu primary school

木结构房屋墙体均出现裂缝，基本为轻微至中等破坏，少量严重破坏；砖木结构房屋少数墙体出现裂缝，大多完好；砖混和框架结构房屋基本完好。

3.3　不同类型房屋破坏机制

（1）土木结构墙体承重和混合承重房屋

墙体承重房屋和混合承重房屋的土坯墙和夯土墙虽然有足够的承载能力，但是抗拉强度低，容易出现脆性破坏。在地震力的往复作用下，在墙体交接处、梁和檩下先是裂缝，然后裂缝处破坏并跌落，进而加大裂缝，最后裂缝贯穿，墙体失去整体性，局部失去约束，使得局部倒塌变得容易[3]。西北地区墙体承重房屋和混合承重房屋的木屋盖普遍质量不太好，选用的木料质量差，而且没有必要的连接措施，硬山搁檩的出山长度有限，或者梁和檩下没有设置垫板等来分散应力。这些房屋在地震作用下木屋盖构件之间发生位错，造成构件折断，檩、梁抽出墙或者屋顶开洞等破坏。

土坯和土夯墙质量差也是比较常见的问题。制作土坯的土粘粒含量较低，粗粒成份较高，就会使其粘结性降低，在地震作用下土坯受剪破坏，容易失去承重能力而导致结构垮塌。对于夯土墙，夯筑时所用模板的不规则极易致使墙体中间缝隙过大，加之每层夯土的厚度很难保证适度合理，这些问题对夯土墙的质量产生影响。另外，极震区震前连续十余天降雨，并且震前晚间遭遇强降雨，由于土木结构房屋普遍防水不好，土坯或夯土墙体遇雨水强度降低，在地震作用下更易倒塌。

（2）土木结构墙体木架承重房屋

历次地震表明木架承重房屋通常表现出较好的耐震能力，可以通过木材的弹性变形将地震力转变成弹性势能而自身不至于破坏。即便地震作用超出弹性极限发生塑性变形时，一定直径的木柱、木梁也不易会发生脆性破坏，木纤维仍然保持着较强的连接。同时，梁、柱、檩、枋、柁之间以木榫、斗拱和扒钉等比较牢固的形式连接，体系具有的良好的整体连接性，也是木构架抗震的关键。木构架体系在地震作用中在榫头等木构件结合点因为受力较为集中，如果这些地方的强度不够就会发生破坏，使结合处发生几何变形。此次地震中，屋盖比较多见的震害是屋檐、屋脊砖或瓦闪落，甚至屋顶局部梭瓦，由于土墙容易发生脆性破坏，抗剪、抗拉强度很低，是木架承重土木结构房屋破坏的最主要的原因。本次地震中，一般在地震烈度高于Ⅵ度的地区，土墙体即在墙体交接处的墙包柱位置产生裂缝；而地震烈度高于Ⅷ度时，土墙基本严重破坏或是倒塌。

（3）砖木结构房屋

影响砖木结构房屋墙体震害的主要因素是墙体抗剪强度。墙体破坏的主要部位为墙体的应力集中部位和结构薄弱部位，多为墙体转角部位、纵横墙体交接部位、门窗四角部位、梁檩下墙体部位和山墙突出部位等。墙体震害现象主要表现为交叉裂缝、斜裂缝、水平裂缝和不同程度的墙体间竖向开裂、倾斜和倒塌。其原因可归结为：墙体平面布局不合理；房屋开间、进深过大；场地条件差或地基与基础处理不当；砂浆强度标号不够；墙体砌筑方法技术不科学；门窗间墙体过窄；应力集中部位抗震措施不够等。震区传统的房屋建造理念中大多忽略屋顶的抗地震破坏能力，造成了屋顶瓦片的稳定性差，梁、檩、椽、墙体之间连接加固措施不够。因此，此次地震中常见房屋墙体基本完好或轻微破坏的情况下，屋顶系统却出现不同程度的震害，如梭瓦、掉瓦、屋顶局部坍塌等。

（4）砖混结构房屋

砖混结构房屋在此次地震中少量出现底部呈现横向贯穿裂缝的严重破坏，如茶固小学等。其破坏原因是，由于地基为黄土覆盖场地，黄土基础处理密实度不够，并且不够均匀，在极震区较强的竖向地震力和水泥预制板或现浇屋顶惯性力共同作用下，对建筑物基础产生很强的竖向高频振动荷载，并在建筑物产生了很强的竖向拉应力，当基础地基处理不够密实或软硬横向不均匀时极易造成的沉降差异，从而在基础底部形成横向裂缝。

4　生命线工程震害

此次地震造成定西市、甘南州、陇南市等市县交

通、通讯、电力和水利等设施不同程度的毁损。

交通系统：地震在Ⅷ、Ⅶ度区造成大量路面裂缝和坍塌及边坡崩塌阻塞道路等震害，极震区内桥梁出现裂缝和基础沉降现象。梅川镇永光村一处石拱桥拱顶出现贯穿裂缝，宽达 10 cm，桥面裂缝发育，长达 10 m，成为危桥（图 7），另一处桥梁位于国道 G212 茶固村长约 30 m，桥侧面出现轻微裂缝，拱底贯穿裂缝长约十余米，宽约 2～5 mm。中坝乡玉峡村一 50 m 长桥梁桥墩基础下沉（图 8）。县道 X90 公路 13 km 处发生长约 150 m、宽 15 m 的边坡滑塌，导致 2 户居、约 2 亩果园毁坏，道路改道。

图 7 梅川镇永光村石拱桥结构破坏

Fig. 7 Structure damage of a stone arch bridgeat at Yongguang village, Meichuan town

图 8 中坝乡玉峡村桥墩基础下沉

Fig. 8 Pile foundation Settlement of a bridge in Yuxia village, Zhongba township

水利、电力设施：地震造成岷县县城水网不同程度的损坏，部分供水管破裂。岷县古城水电站附近山体滑坡及护坡破坏。柏桦村河堤出现长约 3 m、高约 0.5 m 的坍塌。2 座变电站变压器基座损坏，部分电杆倾倒，电缆损坏。

5 黄土滑坡地震灾害

岷县、漳县地处青藏高原边缘，是甘南高原向黄土高原、陇南山地的过渡地带，地质构造复杂、山岭起伏、河流纵横，表层大多为较厚的黄土覆盖。极震区（Ⅷ度）及其周边（Ⅶ度）区发现的地震地质灾害包括黄土滑坡、崩塌、震陷等，灾害呈现成片、密集分布特点，在宏观地理分布上具有一定线性特征。

5.1 滑坡区域分布

本次地震触发滑坡多为黄土崩塌，偶有一些中型的深层滑坡与泥流状滑坡，其中三处中型滑坡造成了严重的灾害。根据野外多条线路调查成果，框定了滑坡密集区分布图（图 9）。该区域主要分布在“茶固滩—马家沟—文斗—车路—永光—永兴—拉路”一线，为一个条带状区域，最大宽度约为 8 km，长度约为 30 km。这一区域内的滑坡特点为：滑坡密集发育，常常连片堵塞公路；最大规模为中型滑坡，永光村灾难性滑坡就在这一条带内；滑坡密集分布区的条带长轴走向与地震发震构造走向一致；极震区黄土广泛分布，土质疏松，该滑坡密集分布区及其周边区域的黄土滑坡和崩塌在后期余震与降雨的作用下有进一步发展的可能。

5.2 典型滑坡灾害

震区滑坡类型各种各样，多以小型黄土崖崩（崩塌、崩落、崩滑）为主，包括深层滑坡、泥流状滑坡等类型较为少见的滑坡。造成最严重人员伤亡的为永光村的一处泥流状滑坡和维新乡堡子村黄土层内滑坡，前者掩埋农居 8 户，造成了 12 人遇难；后者掩埋农居 12 户，造成 2 人死亡。

（1）永光村泥流滑坡

永光村泥流状滑坡在平面上近似呈现 L 型，大致 SN 走向。该滑坡为土层内部滑移，土类为 Q3 马兰黄土，粉质含量不均，表层覆盖层较厚，土体含水量较高，达 24.53%。该泥流状滑坡体在滑坡后缘滑移起始位置至前缘终止部位的范围内，呈现连续分布，由土体形态上能够看出该滑坡在滑移时具有相当的流动特性。滑坡后缘宽约 100 m，高度 30 m 左右；滑坡体前缘在冲沟出口位置的宽度约为 13 m，最大滑移距离约为 1 km。滑坡整体落差约为 253 m，平均坡度 18°，土方量约为 40 万立方米（图 10）。

该滑坡体失稳之后，冲破原有前端凹形地势，滑移进入与之交角约 30°的大型冲沟，顺沟向下游滑冲，止于永光村和永星村分叉路口北侧的拱桥前。该泥流状滑坡在进入冲沟的位置可明显看到滑体受阻形成的土堆，并且有部分泥流回溯入该冲沟上游，最大距离约为 20 m。泥流回溯与泥流及冲沟上游

底部的落差有关。回溯泥流规模不大，表明泥流运移速度较快，这与现场考察过程中由当地居民处了解的情况相一致。

根据现场考察结果，可以认定永光村侧泥流状滑坡是降雨与地震耦合作用下的产物。据村民介绍，岷县 6.6 级地震前夕当地连续几天遭受中雨，并

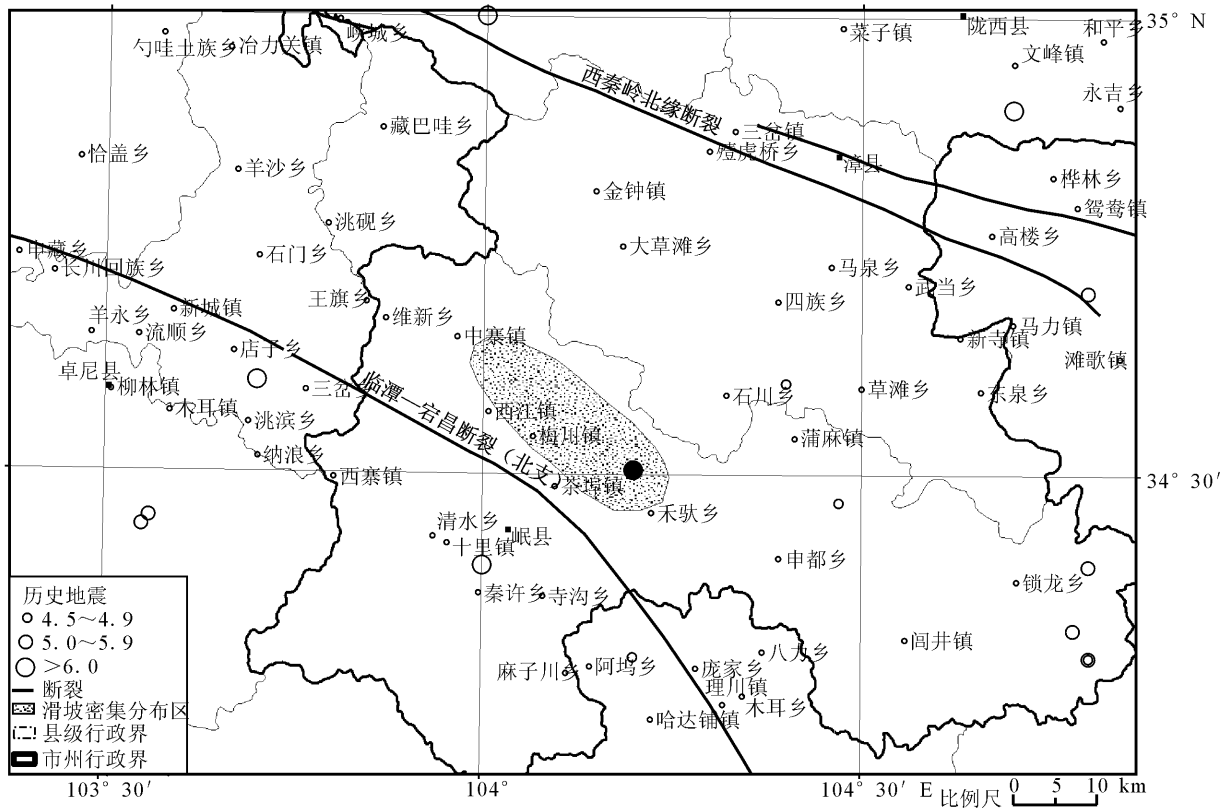

图 9　滑坡密集分布区（红圈内）

Fig. 9　The dense distribution zone of Landslides (inside the red circle)

图 10　永光村泥流状滑坡

Fig. 10　The mudflow landslide at Yongguang village, its distant view(a) and front edge(b)

在地震前一天晚上遭遇暴雨。另外该滑坡后缘原址有山泉出露，山泉的发育可能是诱发该侧滑移的不可忽视的因素。在该滑坡高速滑动过程中，村民观察到了滑坡体上出现数十米高似蘑菇状水柱向上喷射。

我们在该滑坡体内采取了表层和 5 m 深处的土样，在中国地震局黄土地震工程重点实验室的 WF－12440 型动三轴扭剪试验系统上开展了动三轴液化试验。试样制备规格为 Φ50 mm×100 mm，试验过程分饱和、固结和循环剪切三个步骤进行。

其中饱和方法采用低反压饱和法；固结时采用等压固结，轴向固结压力 σ_1 根据滑坡体厚度计算得到的地层压力施加；循环剪切时施加的动应力为频率 1 Hz 的正弦波，其幅值按照地震峰值加速度进行换算；试样的固结和振动液化均在不排水条件下进行；试样的液化破坏标准选用应变标准，即动应变 $\varepsilon_d=3\%$。对滑坡土体的物性指标测试结果表明：该滑坡土体为 Q_3 黄土，初始孔隙比为 1.007，震前长时间降雨使滑坡土体的含水率高达 24.53%，处于近饱和状态，具备了液化的前提条件。动三轴液化试验结果表明，在模拟地震烈度为Ⅷ度的地震力作用下，滑坡土体在 3 个周期内就发生了动应力明显衰减、动残余应变持续增大和孔隙水压力明显上升的液化破坏现象，由此可判断永光村滑坡发生时，在强大地震力作用下土体内部发生液化，引起土体快速滑移。

（2）维新乡堡子村滑坡

堡子村滑坡位于岷县维新乡，在乡政府所在地东面约 2 km 处。该滑坡于此次主震之后约 30 分钟滑动。堡子村滑坡距洮河约 1 km，属于黄土层内滑坡。该滑坡后缘近乎直立，倾角约 70°，最高点至坡脚高差约 200 m，滑移距离不足 100 m。滑坡后缘能够明显观察到的滑移后壁面长约 150 m，高约 80 m，滑坡体土层厚度近 30 m，初步估算滑坡体总土方量约 70～100 万立方米（图 11）。

（a）滑坡全貌

（b）滑坡滑移面的后缘横向裂缝

图 11 维新乡堡子村滑坡

Fig. 11 Full view (a) and transverse crock on the sliding surface of landslide at Buzi village, Weixin tonwship

相较永光村滑坡，堡子村滑坡的滑移面倾角更高，滑移距离更短。同时滑坡体内部含水量很低，与永光村滑坡体含水量高于塑限接近液限不同，其低于塑限。值得关注的一点是，从目前坡体形态来看，该滑坡很可能尚未达到可靠的平衡态，该滑坡滑移面上的出现横向裂缝，为上覆土体滑移拉裂所致，滑移趋向使之向右侧立壁偏转，说明滑坡有进一步发展的可能。若考虑接下来灾区的降雨或者再次强余震地震发生的可能，应对该滑坡周边及下部的居住点安全给予充分重视。

堡子村滑坡具有如下特点：此滑坡为主震导致坡体失稳，后余震诱发滑动发生；为黄土层内滑坡；此次滑坡体的滑移动能很可能还未完全释放。

6 地震震害特征

通过现场科学考察，发现此次地震震害中存在断层效应、山体放大作用和边坡效应等现象，这些现象放大和加重了此次地震的破坏作用。

6.1 断层效应

本次地震的发震断裂为临潭－宕昌断裂。中国地震局地球物理研究所 CAP 方法的矩张量反演结果表明，本次地震为略带走滑分量的逆冲型地震。其中节面 I 走向 134°，倾角 62°，滑动角 60°；节面 II 走向 5°，倾角 40°，滑动角 133°，矩心深度 8 km，震级 M_w6.23。震害分布在垂直于东西向临潭－宕昌断裂的方向衰减较快，而平行于其走向的方向上衰减相对较慢，这与该断裂的展布特征是一致的。震害较为严重的极灾区分布于东西向临潭－宕昌断裂的以北，且向北和向西衰减速度明显比向南和向东衰减速速度慢，可以看出发震断层两侧震害存在明显差别，上盘（北盘）震害明显较大，而下盘（南盘）震害稍轻，断层上盘效应明显。从烈度区的分布范围看，沿断层带震害明显加重，地震动向西边的衰减要比东边慢，尤其是Ⅷ度区。

6.2 山体放大效应

在山区地貌条件下，震害的差异远大于平原区，这也是造成震区灾害波及范围较大的一个主要原因。地形高差和局部地貌条件（高山山梁及孤突山

梁）对地震动的放大效应明显，直接影响到地震灾害程度的分布[4]。灾区许多居民点依山而建，是造成震害严重的重要原因。破坏严重的永星、永光、拉路、上马家沟等村镇的相对严重的震害与当地的场地条件有明显的对应关系。

图 12 为上马家沟村和杏林村在卫星影像图中的位置，可以看出上马家沟村位于山体的上部，海拔高度 2 512 m，杏林村位于同一山体的沟底，海拔高度 2 303 m，两村高差为 209 m。图 13(a)、(b)分别为上马家村和杏林村相同建筑时期、相同结构土木房屋的破坏。图 14 为永星村和漩窝里村在卫星影像图中的位置，前村位于山体的上部，海拔高度 2 708 m，后村位于同一山体的沟底，海拔高度 2 380 m，两村高差为 328 m。图 15(a)、(b)分别为漩窝里村和永星村相同建筑时期、相同结构土木房屋的破坏。从两处山顶和山沟相同结构的土木农居破坏程度可以看出，地震对房屋的影响呈现明显的沿山体自下向上的震害加重的趋势。山顶的土木结构农居破坏严重甚至倒塌，山沟的农居有裂缝而无倒塌，其上下的烈度差异达 Ⅰ～Ⅱ 度，表现出较明显的山体放大效应。不同场地条件对地震的响应差别很大，地基土的种类、覆盖层厚度、地下水的埋深对震害均有较大程度的影响。建设场地选择不当和地基处理不善是造成房屋破坏的一个重要原因。许多房屋位于地震时发生滑坡、崩塌等部位，或者位于软弱土、条状突出的山咀、河岸和边坡边缘等场地上，加之地基处理失当或未作处理，容易产生地基失效，房屋震害通常很重。

图 12　上马家沟村和杏林村在卫星影像图中的位置

Fig. 12　The positions of Shangmajiagou village and Xinlin village in satellite image

(a) 上马家沟村　　(b) 杏林村

图 13　同样土木结构房屋在上马家沟和杏林村不同的破坏程度

Fig. 13　Different house damage on some adobe struction house in Shangmajiagou village (a) and Xinlin village(b)

图 14 永星村和漩窝里村在卫星影像图中的位置

Fig. 14 The positions of Yongxing and Xuanwoli village in the Satellite image

(a) 永星村

(b) 漩窝里村

图 15 同类土木结构房屋在永星村和漩窝里村的不同破坏程度

Fig. 15 Different house damage on some adobe struction houses in Yongxing village(a) and Xuanwoli village(b)

图 16 永星村三社地形

Fig. 16 The topography of the third group Yongxing village

6.3 边坡效应

图 16 所示为永星村三社所处的位置。该社地处一突出山梁的前缘顶部，四周为深约 30 m 的深沟。该突出山体前缘边坡崩塌严重，沿边坡周边横向裂缝发育，宽达 10～15 cm。该社位于山体前缘的土木房屋基本倒塌（图 17(a)），而在顶部中间和里侧的相同类型的房屋则相对倒塌较少，大部分为墙体严重破坏和贯穿性裂缝（图 17(b)）。从该山体前缘和中后部位置相同结构房屋破坏的迥异现象可以发现，此现象为由于边坡效应导致的房屋震害加重现象。

7 震害启示

此次地震灾区山大沟深，黄土覆盖层较厚，次生地震地质灾害在Ⅷ度区广泛发育。由于灾区经济严重欠发达，农居中土木结构房屋所占比率高达 70%

(a) 永星村三社位于山体前缘的房屋基本倒塌

(b) 永星村三社位于山体后部的房屋墙体倒塌

图 17　永星村三社位于山体前缘的房屋基本倒塌和位于山体后部的房屋墙体倒塌

Fig. 17　The house collapse at the front edge of mountain ridge (a) compares with the house at back of mountain ridge which only wall damaged(b)

以上，致使在Ⅷ度区内大量倒塌和普遍严重破坏，加之黄土滑坡、崩塌导致的房屋掩埋，是造成此次地震严重人员伤亡的最主要原因。根据对此次地震的发震构造、灾区场地条件、不同结构房屋破坏和次生地震地质灾害的深入调查分析，针对灾区灾后重建和今后我国的抗震设防，岷县漳县 6.6 级地震有如下启示。

（1）结合当地实际情况和经济社会可持续发展要求科学编制灾后重建规划。

此次地震灾后恢复重建规划要立足灾区的自然环境特点和经济发展状况，充分考虑此次地震灾害特征和成灾机制，充分吸纳地震、国土、气象、环保、建设等部门专家意见，依据省、市和灾区各县国民经济和社会发展规划，既要保证当地经济发展和居民生活水平高于震前，又要保证灾区经济社会可持续发展，科学、合理、经济地进行编制。

（2）准确探测活动断层位置和排查次生地质灾害危险区域，合理避让，科学判定异地重建和原址重建。

此次震中即位于临潭—宕昌断裂北缘的其中一条次级断裂向东延伸的位置。在灾后恢复重建工作中首先要准确探测该断裂在主要灾区的位置，编制 1:50000 大比例尺的活断层分布图和地震动参数区划图，并在重建规划中依据该图统一、科学进行部署，在重建选址中严格、合理避让活动断层。

此次地震地质灾害主要包括滑坡、崩塌、震陷等灾害，呈现成片、密集分布特点，在宏观地理分布上具有一定线性特征。国土、地震等部门要仔细排查次生地震灾害隐患地点，绘制滑坡、崩塌、泥石流、洪水等次生灾害的区划图，在重建选址中做到合理避让，科学判定异地重建和原址重建。另外，对此次地震中虽然未发生次生地质灾害但是存在灾害风险隐患地区的村落，要组织力量认真开展评估。对高风险地区要尽可能安排搬迁重建，实在不能搬迁的要建立滑坡、洪水和泥石流等地质灾害监测和预警系统和机制。

（3）推出符合当地实际的抗震结构农居类型，政府部门加强指导、监管。

灾区土木结构房屋分布很广，农居中土木和砖木结构房屋所占比例极高，接近 90%。极震区Ⅷ度区内土木结构房屋基本上是严重破坏或完全倒塌。发生在西北地区的历次地震和此次地震均证明，土木结构房屋在 VI 区即会发生中等程度破坏，其抗震性能差，且防雨、水能力弱。针对土木结构房屋的这一特点，并考虑此次地震灾区降雨较多，2012 年此次地震极震区即发生严重的冰雹暴洪灾害，在灾后恢复重建中不宜再建设土木结构农居，而应建设砖混或砖木结构房屋。即使在地震中破坏不是很严重的土木结构房屋也不建议修复。建设和地震部门应联合推出经济适用的抗震农居类型图集，对农民自建房屋给予技术指导。政府部门在重建中特别要加强对乡镇、农村的抗震指导，尤其对自建房屋加强监督和指导，注重结构选型和场地选址。加大宣传和引导，对农民按照推荐的抗震农居类型建设的给予适当经济扶持。

（4）充分考虑灾区场地条件特点，科学指导重建农居的选址和地基处理。

重视山体放大作用和边坡效应对农居选址的影响。由于灾区山大沟深，地质条件差，可供农民建房的地区极其有限，地处 VII 区的岷县、漳县、宕昌、临

潭等县农居多建设在山体中上或山顶位置。此次极震区内普遍存在山体放大作用和边坡效应，因此在重建农居选址中要尽量避免在山顶或山腰等孤突地形、高陡边坡前、后缘等位置。

为居民自建房屋提供地基处理技术指导。极震区场地震陷多见，多处砖混结构的房屋因为基础处理不当，房屋排水不畅，发生场地黄土湿陷和震陷，导致基础破坏。在灾后恢复重建中要充分考虑灾区场地和震害特点，国土、地震和建设部门要为重建农居选址和基础处理提供科学意见和建议，并加强监管。

(5) 加大防震减灾知识宣传力度，全面推动我省地震安全农居示范点建设。

在宣传上要做到灾害防御宣传和教育进村入户，在大中小学校定期开展防震减灾知识教育，实现在灾区乃至我省每村全覆盖，使当地基层政府部门和居民灾害防御意识整体上有较大提高，并且切实掌握地震逃生、有效规避各种次生地质灾害风险的知识。全面推动地震安全农居示范点建设。鉴于符合抗震构造措施的砖混结构农居在 2008 年汶川地震和本次地震中表现良好，倒塌的主要是土木结构的老旧房屋，因此应进一步加大地震多发区农村危旧房屋改造力度，全面推动地震安全农居示范点的建设，使农村居民住房具备基本的抗震能力。另外，需要进一步加强对农村工匠抗震设防知识和技术的培训，引导群众自建房时采用经审查发布的村镇农宅抗震图集，增强其抗震防灾意识，避免人员及财产的损失。

参考文献(References)

[1] GB /T17742 — 1999，中国地震烈度表[S]. 北京：中国标准出版社，1999.
GB /T17742 — 1999，Seismic Intensity Scale of China[S]. Beijing：China Criteria Press，1999.(in Chinese)

[2] GB /T18208. 3— 2000，地震现场工作第 3 部分：调查规范[S]. 北京：中国标准出版社，2001.
GB /T18208. 3— 2000，Earthquake Field Works -Part 3：Investigation Specification [S]. Beijing：China Criteria Press，2001.(in Chinese)

[3] 石玉成，王兰民，林学文，等. 黄土生土建筑震害预测研究[J]. 西北地震学报，2004，26(3)：206-211.
SHI Yu-cheng，WANG Lan-min，LIN Xue-wen，et al. Prediction on Earthquake Damage of Raw Soil Buildings in Loess Area[J]. Northwestern Seismological Journal，2011，26 (3)：206-211.(in Chinese)

[4] 孙崇绍，闵祥仪，周民都. 陇南山区局部地形对地震动强度的影响[J]. 西北地震学报，2011，33(4)：331-335.
SUN Chong-shao，MIN Xiang-yi，ZHOU Min-du. Influence of Local Topography on Ground Motion in Mountain Region of Southern Gansu Province [J]. Northwestern Seismological Journal，2011，33(4)：331-335.(in Chinese)