

地质构造对强震震害分布影响讨论

——以汶川Ms8.0地震和尼泊尔Ms8.1地震为例

刘 亢^{1,2}, 李亦纲¹, 李红光¹, 南燕云¹

¹中国地震应急搜救中心, 北京

²河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河

收稿日期: 2022年11月2日; 录用日期: 2022年12月13日; 发布日期: 2022年12月23日

摘 要

开展地质构造与强震震害的关系研究对于灾情研判和救援力量部署具有重要的指导意义。2008年汶川Ms8.0地震与2015年尼泊尔Ms8.1地震是近年来发生在中国内部及邻区的两次强烈地震, 然而这两次强震产生的震害特征存在明显的差异: 汶川地震烈度VII度以上区域面积约为尼泊尔地震的7.5倍, 死亡人口为其7.6倍; 汶川地震地表破裂长度近300 km, 而尼泊尔地震地表破裂长度为0 km; 汶川地震滑坡数量与面积显著大于尼泊尔地震, 总面积相差16.3倍。汶川震害分布主要受映秀-北川断裂控制, 呈线状展布, 龙门山断裂带的分带性与分段性影响了震害的空间分布; 尼泊尔震害分布受地形地貌影响较大, 基本沿高喜马拉雅与低喜马拉雅交界区域展布, 呈矩形状。产生这种巨大差异的原因可能与发震断层的倾角相关: 高倾角断层易于将能量传导至地表, 而低倾角尤其是近水平的断层, 能量基本消耗在破裂面上, 产生的地表破坏明显减弱。

关键词

汶川地震, 尼泊尔地震, 震害, 烈度, 滑坡, 地质构造

Discussion on the Influence of Geological Structure on the Distribution of Strong Earthquake Damage

—Taking Wenchuan Ms8.0 Earthquake and Nepal Ms8.1 Earthquake as Examples

Kang Liu^{1,2}, Yigang Li¹, Hongguang Li¹, Yanyun Nan¹

¹National Earthquake Response Support Service, Beijing

²Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe Hebei

Abstract

The research results of the control effect of geological structure on earthquake damage have important guiding significance for the overall disaster judgment and the deployment of rescue forces. 2008 Wenchuan Ms8.0 earthquake and 2015 Nepal Ms8.1 earthquake are two strong earthquakes that occurred in China and its adjacent areas in recent years. However, there are obvious differences in the seismic damage characteristics caused by the two strong earthquakes. The area of Wenchuan earthquake with intensity above VII is about 7.5 times that of Nepal earthquake, and the death population is 7.6 times that of Nepal earthquake. The surface rupture length of Wenchuan earthquake is nearly 300 km, while that of Nepal earthquake is 0. The number and area of landslides in Wenchuan earthquake are significantly larger than that in Nepal earthquake, with a total area difference of 16.3 times. The distribution of Wenchuan earthquake damage is mainly controlled by Yingxiu-Beichuan fault, which is linear. The zoning and segmentation of Longmenshan fault zone affect the spatial distribution of earthquake damage. The distribution of earthquake damage in Nepal is greatly affected by topography and geomorphology, which is basically distributed along the junction of high Himalayas and low Himalayas in a rectangular shape. The reason for this great difference may be closely related to the dip angle of the seismogenic fault. High dip faults are easy to transmit energy to the surface, while low dip faults, especially near horizontal faults, basically consume energy on the fracture surface, and the surface damage is significantly weakened.

Keywords

Wenchuan Earthquake, Nepal Earthquake, Earthquake Damage, Earthquake Intensity, Landslide, Geological Structure

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

世纪以来全球地震灾害频发, 其中最为突出的是 2008 年汶川 Ms8.0 地震和 2015 年尼泊尔 Ms8.1 地震, 均造成了重大的人员伤亡和财产损失, 其灾情引起了国际社会的广泛关注。一次次的地震巨灾应急救援实际告诉我们, 如何科学研判灾情对于合理部署救援力量、最大限度的抢救人民生命具有重要意义。

2008 年 5 月 12 日的汶川 Ms8.0 地震, 震源深度 14 km, 死亡 69227 人, 最高烈度 XI 度, 是中国发生的破坏性最为严重的地震之一; 2015 年 4 月 25 日的尼泊尔 Ms8.1 地震, 震源深度 20 km, 死亡 9084 人, 最高烈度 IX 度(图 1)。同样, 2010 年 2 月 27 日在智利发生的 Mw8.8 地震, 震源深度 33 km, 震中地表投影位于智利比奥大区, 距离智利第二大城市康塞普西翁 91 km, 然而地震仅造成 795 人死亡。这三次 8 级以上强烈地震均属于潜源地震, 震中投影位于人口相对密集区, 然而造成的震害损失相差悬殊, 主要原因是由于发震构造存在巨大差异, 从而对强震震害分布产生重要影响。

地震发生后一段时间为黑箱期[1], 外界信息非常少, 如果忽视强震发生的构造背景而开展快速研判, 有可能会造成一些误判。在地震快速评估工作中不仅需要重视震区建筑物抗震性能特征, 还应该重视地质构造特征。基于地质构造的震害分布特征研究是地震宏观灾情空间分布研判的基础, 从而为抗震救灾

指挥提供支撑。因此紧密结合区域构造特征,对震害分布和灾害救援指挥决策具有重要意义。

前人对于地震灾害特征开展了大量研究工作,尤其是近年来愈加重视地震现场调查工作。过去两年发生了数次破坏性地震,学者们开展了大量现场调查工作,针对震害分布特征、机理开展了深入研究。2021年云南漾濞 Ms6.4 地震位于青藏高原东南缘,区域地质构造环境复杂,导致地震的发生与表现受多种因素共同控制[2]。2022年门源 Ms6.9 地震造成的破坏形式以雁列式组合的张裂隙、张剪裂隙、挤压鼓包、断层陡坎等为主[3],沿区域内长约 22 km 的托来山-冷龙岭断裂带附近,道路形成多处裂缝与挤压鼓包,桥梁整体倾斜移位,房屋不同程度破坏[4]。

本文针对地质构造与强震震害分布特征关系问题,通过对比汶川地震与尼泊尔地震震害分布的差异性,探讨地质构造对震害分布的影响作用,进而为灾情研判、应急救援对策分析提供技术支撑。

2. 构造背景

2.1. 汶川地震构造背景

龙门山推覆构造带由 4 条断层组成,主要表现为逆冲叠瓦状形式。自西向东依次为汶川-茂汶断裂、映秀-北川断、灌县-江油断裂和广元-大邑断裂。对于龙门山推覆构造带东西分带的划分,综合不同学者认识[5] [6] [7] [8],本文将龙门山褶皱冲断带划分为 5 个构造带:松潘甘孜褶皱带(汶川-茂县断裂以西)、后山推覆变形带(汶川-茂县断裂与北川-映秀断裂之间)、前山推覆变形带(北川-映秀断裂与灌县-江油断裂之间)、前陆扩展变形带(灌县-江油断裂与广元-大邑断裂之间)和前陆坳陷带(广元-大邑断裂以东)(图 2(a))。

龙门山推覆构造带沿南北方向可以分为 3 段:北段的分界线为北川-安县一线[9] [10] [11] [12] [13],南段分界线基本位于绵阳、都江堰地区,具体为卧龙-怀远一线[10] [13],中段的典型特征是出露了彭灌杂岩体,以及前缘发育飞来峰[7] [8]。

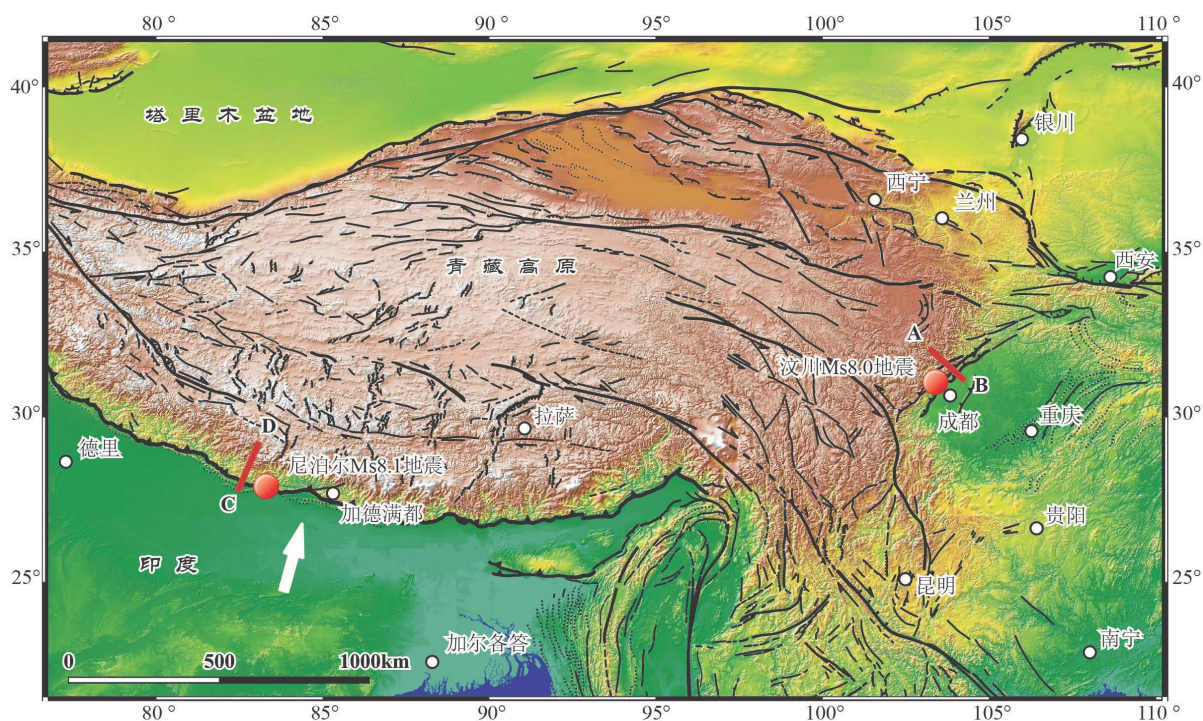
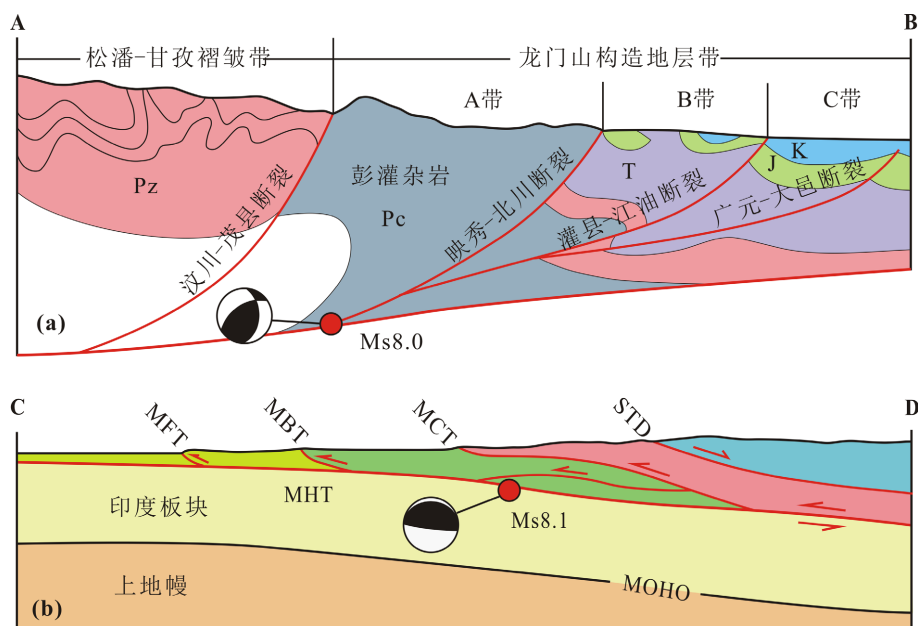


Figure 1. Tectonic background map of Tibet Plateau

图 1. 青藏高原构造背景图



(a) 为龙门山推覆构造带剖面图(图 1 中 AB 位置) (修改自[16]); A 带: 龙门山后山推覆变形带, B 带: 龙门山前山推覆变形带, C 带: 前陆扩展变形带; (b) 为尼泊尔地区大陆俯冲带地质构造剖面图(图 1 中 CD 位置) (修改自[17])

Figure 2. Geological structure profile
图 2. 地质构造剖面图

2.2. 尼泊尔地震构造背景

尼泊尔为南亚内陆山国, 位于喜马拉雅山南麓, 北邻中国, 其余三面与印度接壤。地势北高南低, 境内大部分属丘陵地带, 海拔 1000 m 以上的土地占总面积近一半。东、西、北三面多高山, 北部为喜马拉雅地区, 海拔高度在 4877~8844 m 之间; 中部河谷区, 多小山, 中部山区占尼泊尔国土面积的 68%, 主要由的马哈布哈拉山系和相对较矮的丘日山系组成; 南部是冲积平原, 分布着森林和草原, 其中特莱低地占尼泊尔领土面积的 17%。

青藏高原南缘发育多条活动断裂, 依次为喜马拉雅主前缘逆冲断裂(MFT)、主边界逆冲断裂(MBT)、主中央逆冲断裂(MCT)、主喜马拉雅推覆构造(MHT)和西藏南部拆离断裂系(STD)。尼泊尔 Ms8.1 地震发生在主喜马拉雅逆冲断裂(MHT)之上(图 2(b))。主喜马拉雅逆冲断裂为多层结构, 由北往南逐渐加深[14], 在主喜马拉雅逆冲断裂长期的挤压运动中, 上地壳发生了明显的缩短[15]。

3. 烈度分布特征

3.1. 汶川地震烈度特征

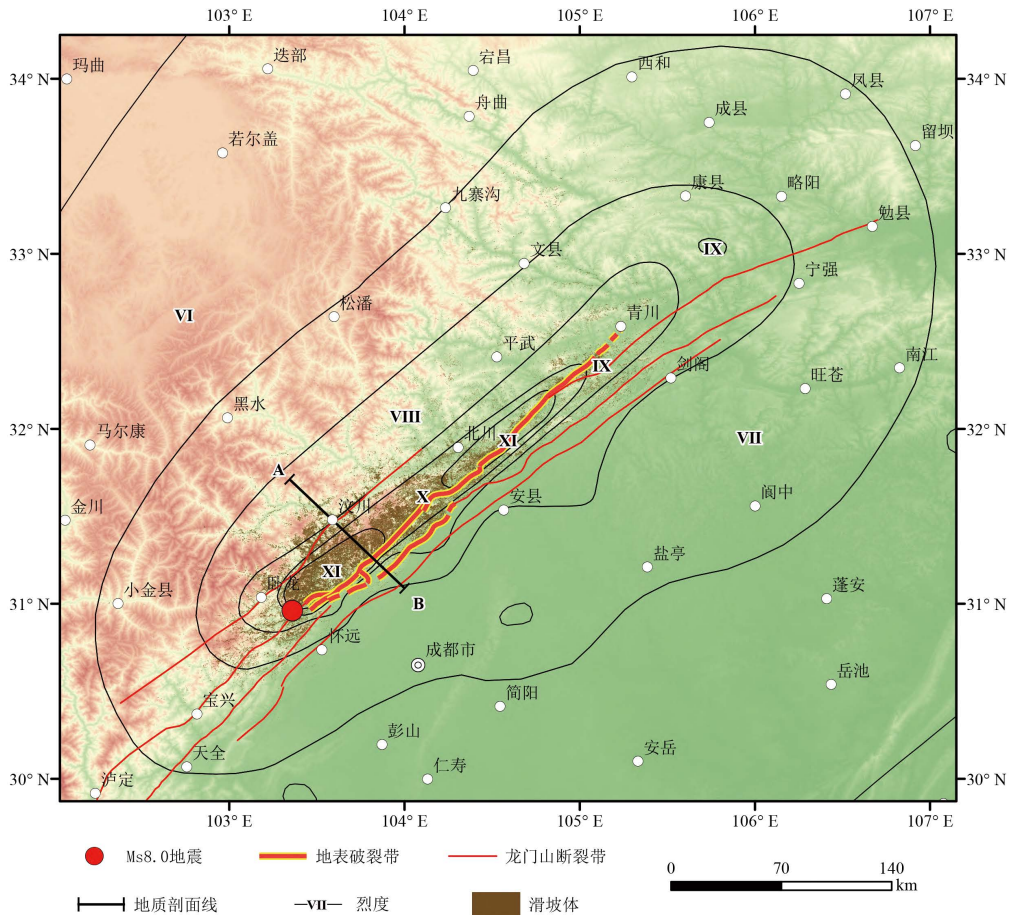
汶川地震发生后, 中国地震局第一时间组织开展现场调查, 调查面积达 500,000 km², 调查点 4150 个, 编绘了汶川 8.0 级地震烈度分布图[18], 即图 3 中烈度圈范围。

XI 度区面积约 2419 km², 存在映秀和北川两个极震区; XI 度区内的一般民用建筑物几无完者(图 4(a)-(c)); X 度区面积约 3144 km², 呈 NE 向展布; IX 度区面积约 7738 km², 呈 NE 向狭长展布; IX 度区呈现明显的带状结构, 与地表破裂带比较一致; VIII 度区面积约 27,786 km², 呈 NE 向不规则椭圆形展布, SE 方向受地形影响不规则衰减; VII 度区面积约 84,449 km², 与 VIII 度区形态基本一致; VI 度区面积约 314,906 km², 呈 NE 向不均匀椭圆形展布[18]。



Figure 3. Distribution map of Wenchuan earthquake damage (intensity circle information data [18])

图3. 汶川地震震害分布图(烈度圈信息据[18])



3.2. 尼泊尔地震烈度特征

尼泊尔地震发生后,中国地震局工作队赴尼泊尔开展了震害调查工作,针对房屋建筑、生命线工程以及滑坡等震害开展调查,修订了“尼泊尔 8.1 级地震烈度分布图” [19]。

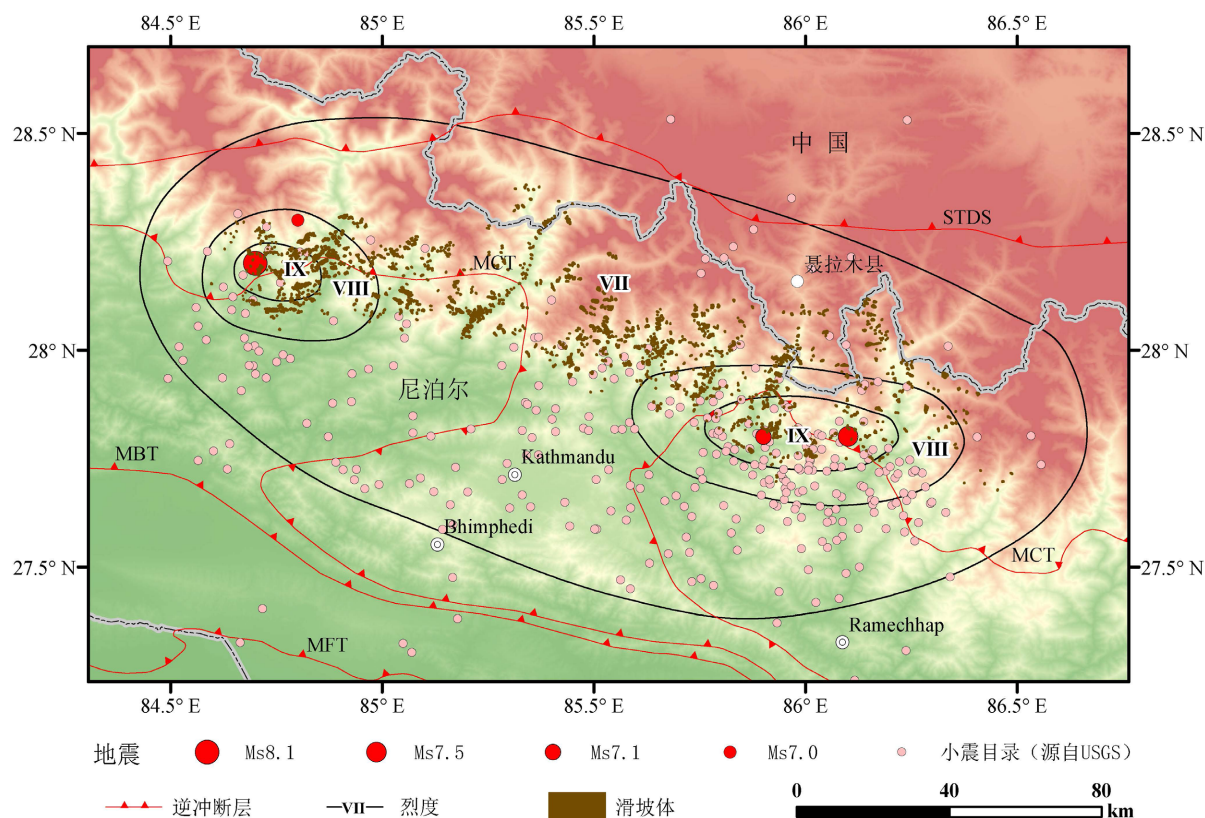


Figure 5. Distribution map of Nepal earthquake damage (intensity circle information data [19])

图 5. 尼泊尔地震震害分布图(烈度圈信息据[19])

尼泊尔地区建筑结构类型主要为片石结构、砖木结构、砖混结构和自建钢筋混凝土框架结构等 4 种形式。

在 8.1 级与 7.5 级地震仪器震中附近出现两个宏观震中(图 5)。烈度圈长轴走向北西西。VII 度区以上面积约 168,290 km², 主要涉及热索瓦、辛都巴尔乔克、廓尔喀以及我国聂拉木、吉隆等 16 个县。IX 度区面积约 900 km²。片石结构大部分倒塌(图 4(d)); 砖混结构部分倒塌, 多数墙体剪裂; 框架结构个别倒塌, 少数框架柱开裂, 多数填充墙体开裂(图 4(e))。VIII 度区面积约 2330 km²。片石结构多数倒毁, 少数局部墙体倒塌、酥裂; 砖混结构少数倒塌, 大部分墙体开裂、位错; 个别框架结构的柱剪切破坏, 少数填充墙局部倒塌, 部分开裂(图 4(f))。VII 度区面积约 165,060 km²。少数片石结构房屋倒塌或者存在房屋局部倒塌, 部分墙体开裂; 个别砖混结构墙体贯通裂缝, 少数墙体开裂明显; 少数框架结构填充墙开裂、抹灰层脱落。

4. 滑坡分布特征

4.1. 汶川地震滑坡

汶川地震发生在龙门山推覆构造带之上, 触发了数以万计的地质灾害, 这些地震滑坡危害极大, 导

致约 2 万人死亡[20]。

许冲等[21]根据地震前后高分影的解译结果与野外验证工作,研究表明,汶川地震触发了超过 197,000 处滑坡,覆盖面积约 1160 km²,这是目前最详细完整的汶川地震滑坡编录成果。本文采用滑坡数据源自许冲提供的滑坡编录成果。

滑坡体主要集中在龙门山后山推覆变形带(A带)中段,龙门山前山推覆变形带(B带)中段区也存在滑坡集中分布。在松潘-甘孜褶皱带的东南边界滑坡发育相对较多,远离边界地区,滑坡逐渐消失。整个前陆扩展变形区(C带)未发育滑坡。滑坡密度最高值分布在漩口镇、虹口乡和红白镇辖区。滑坡的高密度区域与彭灌杂岩体基本吻合。

滑坡的空间分布受断裂影响非常明显。滑坡沿中央断裂密集分布,随着与断裂距离的增大而急剧减少,沿着后山断裂与前山断裂滑坡的密集程度减弱,中央断裂附近的滑坡发育最为密集。断裂上盘的滑坡数量显著多于下盘。

4.2. 尼泊尔地震滑坡

通过对比尼泊尔震前震后不同时段的高清遥感影像,解译出尼泊尔地震形成的滑坡。图 5 中棕色区域为解译出地震滑坡数据,总共 2072 处。学者们在尼泊尔地震后开展了大量研究[22] [23] [24] [25] [26],依据不同判定标准解译出的滑坡数量存在一定差异,但是滑坡总体特征基本一致。

沿阿尼科公路与沙拉公路,选择热索瓦县与新都巴尔乔克县数十个典型滑坡地点开展野外调查,验证遥感解译的可靠性,也发现存在一些早期滑坡体在此次地震中重新活动。

尼泊尔地震滑坡密集成带,与地形、地貌、烈度以及余震展布基本一致,沿烈度圈长轴方向展布,发育在高喜马拉雅与低喜马拉雅过渡区域(图 5)。滑坡体沿烈度圈长轴方向展布,在 2 个极震区分布最为密集,而震中连线以南区域地势快速降低,坡度减小,不利于滑坡产生,因此滑坡分布明显减少。

5. 讨论

5.1. 地质构造对震害分布的影响作用

1) 汶川地震震害分布受映秀-北川断裂控制。

汶川地震震害分布受龙门山推覆构造带横向分带特征的影响比较明显。地表破裂带主要沿着后山推覆变形带的东边界断裂(映秀-北川断裂)展布,在前山推覆变形带的东边界(灌县-江油断裂)也出现一段地表破裂。滑坡体主要分布在后山推覆变形带内,前山推覆变形带上滑坡分布较多。总体来说,震害主要集中在后山推覆变形带之上,前山推覆变形带上震害分布次之,松潘-甘孜褶皱带与前陆扩展变形区上震害较轻。

汶川地震震害分布与龙门山推覆构造带纵向分段特征具有一致性。震害分布整体上也存在分段特征:龙门山断裂带的中段发育 2 条地表破裂带,分别位于映秀-北川断裂与灌县-江油断裂之上;北段发育 1 条地表破裂带,而南段无地表破裂。同样,滑坡分布也具有明显的分段特征:滑坡体主要分布在中段区域,北段相对较少,主要沿地表破裂两侧分布,南段仅在分界线处发育,往西南方向逐渐消失。总体来说,震害分布与龙门山推覆构造带的南北分段特征一致,主要分布在中段区域,北段次之,南段震害最轻。

2) 尼泊尔地震震害分布受地形地貌影响较大。

震源机制解揭示发震断层产状比较平缓,图 5 中余震数据为 USGS 提供,由于发震断层为低倾角,断层面的地表投影面积较大,小震总体分布沿断裂带展布,基本位于 VII 度区域内,近似矩形展布(图 5),与烈度圈相近,推测断层破裂面积约为 100 × 200 km²。地震滑坡密集成带,与地形地貌、地震烈度、余

震分布特征一致, Ms8.1 与 Ms7.5 地震震中连线位于高喜马拉雅与低喜马拉雅交界区域, 连线以北区域地势落差较大, 悬崖峭壁随处可见, 均已在野外调查中验证。

5.2. 两次强震震害差异特征

1) 两次强震的烈度范围相差较大。

汶川地震VII度以上区域面积约 125,536 km², 长轴约 566 km, 短轴约 267 km, 表现为 NE 向的不规则椭圆形状。尼泊尔地震烈度VII度以上区域面积约 16,829 km², 长轴约 224 km, 短轴约 105 km。

汶川地震VII度以上灾区面积明显大于尼泊尔地震, 是其 7.5 倍。汶川地震极震区为XI度, 而尼泊尔地震极震区仅为IX度, 汶川地震极震区的破坏程度明显强于尼泊尔地震。同样, 汶川地震死亡人数也是尼泊尔地震的 7.6 倍。

2) 地表破裂特征截然不同。

地表破裂带一般在极震区出现, 是地震震害的重要特征之一。汶川地震的地表破裂带主要沿映秀 - 北川断裂、灌县 - 江油断裂展布。映秀 - 北川断裂上的地表破裂长度约 220 km, 南部以逆冲运动为主, 北部以走滑运动为主; 灌县 - 江油断裂的地表破裂长度达 70 km, 表现为纯逆冲运动的破裂特征[27]。这两条地表破裂带之间还存在一条 8 km 长的小鱼洞破裂带, NW 向, 逆冲兼左旋走滑性质[28]。

低倾角的主喜马拉雅逆冲断裂(MHT)被认为尼泊尔地震的发震断层。但是, 遥感影像解译结合现场调查, 均未发现尼泊尔 Ms8.1 地震形成地震地表破裂带[29]。

3) 地震滑坡分布差异显著。

汶川地震中, 滑坡沿中央断裂密集分布, 随着与断裂距离的增大而急剧减少, 沿着后山断裂与前山断裂滑坡的密集程度减弱, 中央断裂附近的滑坡发育最为密集。断裂上盘的滑坡数量显著多于下盘。

与汶川推覆构造带上地震滑坡分布特征不同, 喜马拉雅俯冲带中发震断层为低倾角, 难以产生地表破裂。地震滑坡分布明显受深部近水平的断层破裂面控制, 全部分布在断层上盘, 呈相对较宽的矩形区域展布[26]。

这两次地震诱发滑坡数量、面积存在显著差异。汶川地震解译出 197,000 处滑坡, 覆盖面积约 1163 km², 尼泊尔地震解译出 2072 处滑坡, 覆盖面积约 67 km², 二者面积相差 16.3 倍。

5.3. 震害差异成因讨论

映秀 - 北川断裂与地表破裂带走向 NE35°, 倾向 NW, 近地表倾角达 75° (徐锡伟等, 2008)。余震资料揭示龙门山断裂带在地壳上部为高倾角, 往下逐渐变缓, 呈“犁形”或“铲形” [16], 在地壳深部 15~20 km 处并入地壳中部滑脱层[28]。汶川地震断层科学钻探成果[30] [31]发现在地下 500~1500 m 度处的断层面倾角一般为 65°。震源机制反演认为汶川地震破裂面的倾角由地表向深部变缓, 在起始破裂位置断层倾角减缓到 30°~40° [32] [33]。

Wang 和 Fialko [34]利用地表测量数据反演了尼泊尔地震发震断层的几何形态和同震滑动分布, 认为发震断层为一条倾向北、倾角 7°的逆冲断层。单新建等[35]基于 InSAR 和 GPS 观测数据联合反演获得尼泊尔地震的同震形变场主要集中在 150 km × 100 km 的范围内, 断层面倾角在浅部约为 7°, 倾角随着深度增加而逐渐变大, 在 20 km 深度时接近 12°。刘刚等[36]利用 GPS 数据和地震波联合反演揭示显示尼泊尔地震发生在喜马拉雅主滑脱断层上, 倾角 11°。

由此看来, 两次地震发震断层的倾角相差较大, 汶川地震表现为逆冲带有走滑分量, 发震断层在震源深度倾角为 30°~40°, 往上逐渐增大, 在地表破裂带出倾角高达 75°, 局部地区近直立。而尼泊尔地震发生在 MHT 之上, 该断层近水平, 不同学者计算震源深处的断层倾角为 7°~12°。高倾角断层易于将能量

传导至地表，而低倾角尤其是近水平的断层，能量易于消耗在破裂面，传导至地表后衰减很大。最明显的例子就是汶川地震地表破裂带长度近 300 km，而尼泊尔地震地表竟然未出现破裂带。

6. 结论

本文通过对比汶川地震与尼泊尔地震震害分布的差异性，获得了有关地质构造与强震震害分布关系的一些认识：

1) 两次强震震害差异悬殊，在受灾面积与地表破裂长度方面均相差较大。地质构造对震害分布的影响非常明显。汶川地震震害分布主要受映秀-北川断裂控制，呈线状展布，龙门山断裂带的分带性与分段性影响了震害的空间分布；尼泊尔地震震害分布受地形地貌影响较大，震害基本沿喜马拉雅与低喜马拉雅交界区域展布，呈矩形状。

2) 汶川地震由震源深度至地表，发震断裂倾角由 40°增大到 75°，局部地区近直立。而尼泊尔地震发震断层为近水平的 MHT，不同学者计算震源深处倾角为 7°~12°。高角度断层易于能量传导至地表，而低角度尤其是近水平的断层，能量多消耗在破裂面。两次地震发震断层的倾角相差较大，可能影响震害差异的主要原因之一。

致 谢

感谢应急管理部国家自然灾害防治研究院许冲研究员提供汶川地震滑坡数据。

基金项目

国家重点研发计划(2021YFC3002104)；河北省地震动力学重点实验室开放基金项目(FZ212101)。

参考文献

- [1] 聂高众, 安基文, 邓砚. 地震应急灾情服务进展[J]. 地震地质, 2012, 34(4): 782-791.
- [2] 熊伟, 黄小龙, 吴中海, 等. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 $M_s6.4$ 地震震害特征及成因[J]. 地质通报, 2022, 41(8): 1462-1472.
- [3] 薛善余, 谢虹, 袁道阳, 等. 2022 门源 $M_s6.9$ 地震地表破裂带震害特征调查[J]. 地震工程学报, 2022, 44(2): 458-467.
- [4] 李鑫, 李智敏, 盖海龙, 等. 青海门源 $M_s6.9$ 地震极震区震害调查与防灾建议[J]. 震灾防御技术, 2022, 17(1): 84-94.
- [5] 林茂炳, 吴山. 龙门山推覆构造变形特征[J]. 成都地质学院学报, 1991, 18(1): 46-55.
- [6] 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地质学报, 1994, 68(2): 101-118.
- [7] 李勇, 孙爱珍. 龙门山造山带构造地层学研究[J]. 地层学杂志, 2000, 24(3): 201-205.
- [8] 金文正, 汤良杰, 杨克明, 等. 川西龙门山褶皱冲断带分带性变形特征[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1073-1080.
- [9] 贾东, 陈竹新, 贾承造, 等. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 402-410.
- [10] 李书兵, 叶军, 陈昭国. 川西坳陷碎屑岩大中型气田形成条件[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 41-45.
- [11] 李传友, 宋方敏, 冉勇康. 龙门山断裂带北段晚第四纪活动性讨论[J]. 地震地质, 2004, 26(2): 248-257.
- [12] 杨晓平, 冯希杰, 戈天勇, 等. 龙门山断裂带北段第四纪活动的地质地貌证据[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 644-657.
- [13] 李智武, 刘树根, 陈洪德, 等. 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), 2008, 35(4): 440-454.
- [14] Zhao, W.J., Nelson, K.D., Che, J., Quo, J., Lu, D., Wu, C. and Liu, X. (1993) Deep Seismic Reflection Evidence for

- Continental Underthrusting Beneath Southern Tibet. *Nature*, **366**, 557-559. <https://doi.org/10.1038/366557a0>
- [15] 赵文津. 尼泊尔大地震发生的构造背景及发展趋势[J]. 科学通报, 2015, 60(21): 1953-1957.
- [16] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1066-1073.
- [17] Avouac, J.-P. (2003) Mountain Building, Erosion and the Seismic Cycle in the Nepal Himalaya. *Advances in Geophysics*, **46**, 1-80. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(03\)46001-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(03)46001-9)
- [18] 中国地震局. 汶川 8.0 级地震烈度分布图[EB/OL]. <https://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/sxgz/5279998/index.html>, 2008-09-01.
- [19] Sun, B.T. and Yan, P.L. (2015) Damage Characteristics and Seismic Capacity of Buildings during Nepal M_s 8.1 Earthquake. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **14**, 571-578. <https://doi.org/10.1007/s11803-015-0046-x>
- [20] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444.
- [21] 许冲, 徐锡伟, 吴熙彦, 等. 2008 年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 25-44.
- [22] Tiwari, B., Ajmera, B. and Dhital, S. (2017) Characteristics of Moderate-to Large-Scale Landslides Triggered by the M_w 7.8 2015 Gorkha Earthquake and Its Aftershocks. *Landslides*, **14**, 1297-1318. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0789-0>
- [23] Sharma, K., Saraf, A.K., Das, J., et al. (2018) Mapping and Change Detection Study of Nepal-2015 Earthquake Induced Landslides. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **46**, 605-615. <https://doi.org/10.1007/s12524-017-0720-8>
- [24] 许冲, 田颖颖, 沈玲玲, 等. 2015 年尼泊尔廓尔喀 M_w 7.8 地震滑坡数据库[J]. 地震地质, 2018, 40(5): 1115-1128.
- [25] 刘亢, 孙柏涛, 李亦纲, 等. 2015 年尼泊尔 M_s 8.1 地震震害分布与地质构造关系研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(5): 59-65.
- [26] 刘亢, 李海兵, 李亦纲, 等. 基于尼泊尔 M_w 7.8 地震的喜马拉雅俯冲带滑坡分布规律研究[J]. 地质学报, 2019, 93(10): 2666-2677.
- [27] 李海兵, 付小方, Van Der Woerd, J., 等. 汶川地震(M_s 8.0)地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用[J]. 地质学报, 2008, 82(12): 1623-1643.
- [28] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 594-629.
- [29] 杨晓平, 吴果, 陈立春, 等. 青藏高原南缘 2015 年尼泊尔 M_w 7.8 地震发震构造[J]. 地球物理学报, 2016, 59(7): 2528-2538.
- [30] 李海兵, 许志琴, 王焕, 等. 汶川地震主滑移带(PSZ): 映秀-北川断裂带内的斜切逆冲断裂. 中国地质, 2013, 40(1): 121-139.
- [31] Li, H.B., Wang, H., Xu, Z.Q., et al. (2013) Characteristics of the Fault-Related Rocks, Fault Zones and the Principal Slip Zone in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1). *Tectonophysics*, **584**, 23-42. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.021>
- [32] 张勇, 许力生, 陈运泰. 2008 年汶川大地震震源机制的时空变化[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 379-389.
- [33] 刘超, 张勇, 许力生, 等. 一种矩张量反演新方法及其对 2008 年汶川 M_s 8.0 地震序列的应用[J]. 地质学报, 2008, 30(4): 329-339.
- [34] Wang, K. and Fialko, Y. (2015) Slip Model of the 2015 M_w 7.8 Gorkha (Nepal) Earthquake from Inversions of ALOS-2 and GPS Data. *Geophysical Research Letters*, **42**, 7452-7458. <https://doi.org/10.1002/2015GL065201>
- [35] 单新建, 张国宏, 汪驰升, 等. 基于 InSAR 和 GPS 观测数据的尼泊尔地震发震断层特征参数联合反演研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4266-4276.
- [36] 刘刚, 王琪, 乔学军, 等. 用连续 GPS 与远震体波联合反演 2015 年尼泊尔中部 M_s 8.1 地震破裂过程[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4287-4297.