引用格式：杨镇，钟宁，张献兵，等，2025. 活动断层的避让距离与影响范围：以理塘断裂为例[J]. 地质力学学报，31（1）：124−138. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023085

Citation: YANG Z，ZHONG N，ZHANG X B，et al.，2025. Avoidance distance and influence range of active faults: A case study of Litang fault[J]. Journal of Geomechanics，31（1）：124−138. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023085

活动断层的避让距离与影响范围——以理塘断裂为例

杨　镇[1,2]，钟　宁[1,3]，张献兵[1,2]，于　皓[1,2]，郭长宝[1,3]，李海兵[4]

YANG Zhen[1,2]，ZHONG Ning[1,3]，ZHANG Xianbing[1,2]，YU Hao[1,2]，GUO Changbao[1,3]，LI Haibing[4]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083；
3. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心，北京 100081；
4. 中国地质科学院地质研究所，北京 100037

1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *School of Earth Sciences and Resources*, *China University of Geosciences*, *Beijing* 100083, *China*;
3. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability*, *China Geological Survey*, *Beijing* 100081, *China*;
4. *Institute of Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*

Avoidance distance and influence range of active faults: A case study of Litang fault

Abstract: ［**Objective**］Active faults can not only trigger strong earthquakes, but also cause engineering breaks, creep deformation, and geological disasters, which seriously threaten the planning, construction, and safe operation of major projects. ［**Methods**］In this study, based on the statistics of coseismic surface ruptures, the avoidance distances of faults with different properties and the ranges of extremely strong, strong, less strong, and moderately affected areas of active fault zones are established. Remote sensing, a geological survey, dislocation landforms, and shallow seismic exploration were used to analyze, the avoidance distance and affected area of the Litang fault on the Qinghai-Tibet Plateau. ［**Conclusion**］This study concludes that the hanging wall and footwall avoidance distances of normal faults are not less than 30 m and 15 m, respectively; the hanging wall and footwall avoidance distances of thrust faults are not less than 45 m and 15 m, respectively; the avoidance distance of strike-slip faults is not less than 30 m. The Litang fault is mainly characterized by strike-slip with normal fault components, and its hanging-wall avoidance distance is 30 m and its footwall avoidance distance is 15 m. The extremely strong, strongly, less strong, and moderately affected areas of the Litang fault zones are 154 m, 154-500 m, 500-1000 m, and 1000-3000 m, respectively. ［**Significance**］The research provides basic data for the planning and construction of major projects and the spatial control of the national land.

Keywords: active faults; avoidance distances; influence range; Litang fault; Qinghai-Tibet Plateau

摘　要：活动断层除引发强震外，还会引起工程错断、蠕滑变形和诱发地质灾害，严重威胁重大工程规划建设和安全运营。在同震地表破裂资料统计的基础上，建立了不同性质活动断层的避让距离，讨论了影响不同出露区断层避让距离的因素，以及活动断层带极强、强、中强和中等影响区范围。研究结果认为正断层上盘的避让距离不小于 30 m，下盘不小于 15 m；逆断层上盘避让距离不小于 45 m，下盘不小于 15 m；走滑断层避让距离不小于 30 m。同时，基于遥感解译、野外调查、断层剖面和浅层地震勘探等资

基金项目：国家自然科学基金项目（42177184）；中国地质调查局地质调查项目（DD20221816）；中国博士后基金项目（2019M650788）
This research is financially supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42177184); Project of China Geological Survey (Grant No. DD20221816) and Chinese Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2019M650788).

第一作者：杨镇（1996—），男，在读硕士，研究方向为活动构造。Email：yangzhenii@163.com
通信作者：钟宁（1986—），男，博士，副研究员，从事活动构造与古地震、灾变沉积学研究。Email: zdn2018@126.com

收稿日期：2023−05−29；**修回日期：**2024−11−05；**录用日期：**2024−11−12；**网络出版日期：**2024−12−13；**责任编辑：**范二平

料，分析了青藏高原理塘断裂带理塘段（理塘断裂）的避让距离与影响范围。研究结果显示：理塘断裂为全新世活动断层，运动性质以走滑运动为主兼有正断分量，其上盘避让距离为 30 m，下盘避让距离为 15 m。理塘断裂的极强、中强、强和中等活动影响区分别为 154 m、154～500 m、500～1000 m 和 1000～3000 m，研究结果可为区域重大工程规划建设和国土空间管控提供基础资料。

关键词：活动断层；避让距离；影响范围；理塘断裂；青藏高原

中图分类号：P542　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−6616(2025)01−0124−15

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023085

0　引言

青藏高原东南缘是国家重大工程规划建设的重点地区，包括川藏交通廊道、南水北调西线工程、清洁能源基地以及滇藏铁路等(刘凤山等，2014)。这些重大工程在施工建设与长期运营上面临着许多重大科学与工程技术问题，其中地质安全风险问题最为严峻(李滨等，2022；彭建兵等，2022)。通常，活动断裂带地质安全风险作为首先要考虑的风险之一，因其除引发强震外，还可以引起工程错断(陈永明等，2004)、蠕滑变形(张永双等，2016)和诱发地质灾害(蔡丽雯等，2022)。活动断层引发地震从而造成地震灾害的 2 个主要因素是断层附近岩石弹性应变能释放产生的强烈地面运动(地震波)和沿活动断层的地表同震错动或破裂(徐锡伟等，2018；He et al.，2022)。其中，第 1 个因素是指地震发生过程中，地震震中区域通常会形成较为强烈的地面震动波，使其周围的建筑物遭受破坏，即建筑物的抗震问题。加强建筑物抗震设计等工程手段，此种破坏是可以避免的。第 2 个因素即地表破裂是指在发震过程中，因活动断层错动贯通至地表，导致其上建筑物被破坏。以目前的抗断手段与工程技术是无法避免的，只能进行合理的避让(王拓，2020)。

目前，关于活动断层避让距离与影响范围存在以下 2 个方面的问题：①针对同一条断层的避让距离存在不同认识。2008 年 5 月 12 日发生在龙门山断裂带的汶川 M_S 8.0 地震，形成了多条同震地表破裂带，总体走向 NE40°—70°，长约 275 km，宽约 15 km，发震断层为映秀−北川断裂和安县−灌县断裂(李海兵等，2008)。不同学者认为活动断层的避让距离在 10～30m 不等(周庆等，2008；吴景发，2009；于贵华等，2009；赵纪生等，2009；张永双等，2010；郭婷婷，2013)。②同一地震产生的地表破裂带中，不同地段的破裂带宽度不一，那么其避让距离是选择极小值还是选择极大值？就单条破裂带而言，一般宽度十几米至几十米。公元 1411 年当雄南 M_S 8.0 地震地表破裂带最大宽度达 2 km(吴章明等，1990)；公元 1515 年永胜 M_S 8.0 地震，单断层地表破裂带宽度仅为 2～3m，而地表破裂带宽度达 30～40 m(徐锡伟等，2002)；1927 年古浪 M_S 8.0 地震，单断层地表破裂仅为 7～20 m，而地表破裂带宽度达 500 m(徐锡伟等，2002)。2001 年昆仑山 M_S 8.1 地震，玉珠峰南侧破裂带宽度多为 3～10 m，昆仑山口附近破裂带宽度为 7～25 m，玉西峰南侧破裂带宽度为 20～70 m，单条破裂带平面上呈“之”字型发育，宽度达 100 m(王赞军等，2002)；部分地段破裂带由多条破裂组成，如库赛湖以东的破裂带由 6 条近平行的破裂组成，总宽度约为 600m；破裂带影响宽度最大的地段位于红水河口以东，共发育 5 条破裂，主破裂达 5.5～6 km(王赞军等，2002)。在 2021 年青海玛多 M_S 7.4 地震中，鼓包和裂缝组成的同震破裂带多数宽约数米，多条破裂组成的同震地表破裂带宽约数十米，最宽处达 40～60 m(陈桂华等，2022)。He et al.(2022)通过统计 20 个同震滑坡沿活动断层的分布特点提出，重要建筑物距离活动断层应不少于 3 km 或 5 km。臧万军(2017)统计发现，随着距震中距离的增加，隧道受到震害的严重程度迅速下降，发生严重以上震害的隧道集中在距震中 10 km 范围内，约 60% 发生于 20 km 范围内，中等震害集中于距震中 160 km 以内。因此，如何避让活动断层、确定活动断层避让距离以及划定活动断层影响区是急需开展的研究课题。

文章在同震地表破裂资料统计分析的基础上，通过建立不同性质断层的避让距离，分析活动断层和基岩断层避让距离需要考虑的因素，进而提出活动断层的影响范围；最后结合遥感解译、地质调查、断层剖面和浅层地震勘探等资料，研究了理塘断裂带理塘段(理塘断裂)的避让距离与影响范围，

以期为区域重大工程规划设计和国土空间管控提供基础资料。

1 活动断层避让距离

震后地震断层野外考察、地震破裂机制研究与实验结果表明：在大多数情况下，地震是沿地壳中已有的活动断层破裂成核、滑动扩展和终止的产物，在某些特殊情况下则是地壳岩石受力沿应变集中带破裂成核、滑动扩展形成新生断层的结果（徐锡伟等，2002）。历史和现今地震研究表明，约80%～90%的强震（M≥6.5）发生在活动断层上，因此提出一个合理的活动断层避让距离，是减轻或防止地震灾害最有效的方法（徐锡伟等，2002；郭婷婷等，2017）。《活动断层避让》（征求意见稿；2019）把活动断层避让距离定义为：建（构）筑物与活动断层破裂带边界之间应分隔开的最小安全间隔。即在探明活动断层分布的基础上，科学合理地确定构筑物的避让距离，使之避免遭受活动断层同震地表破裂、错动或蠕滑滑动的直接毁坏。活动断层有不同的运动性质（正断性质、走滑性质和逆冲性质），不同性质的断层具有不同的破坏方式。对于长线工程场地而言，要在工程设计中确保穿越或近距离平行于活动断层的设施不被断层地表位错破坏或将位错造成的损失减到最小（冉勇康和陈立春，2004）。

1.1 正断层

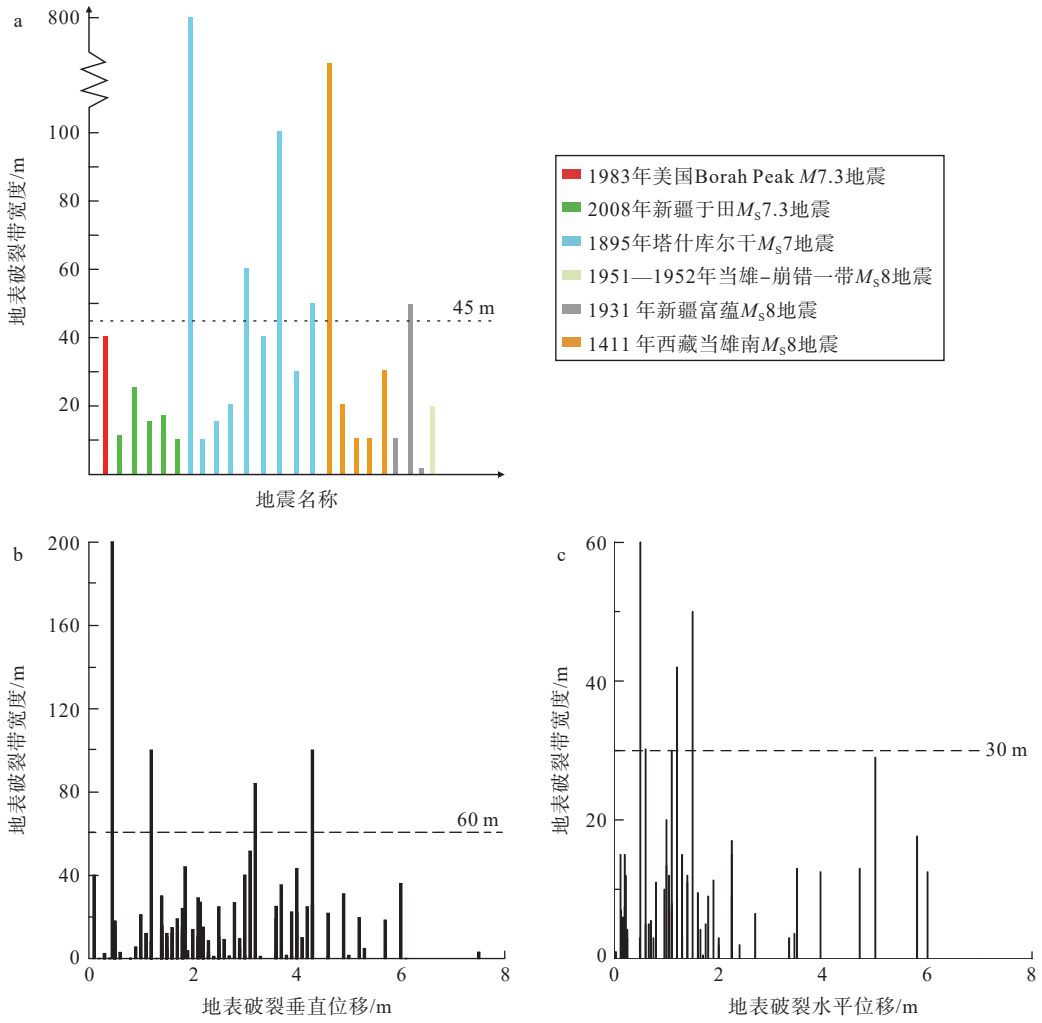
正断层是在地壳伸展环境下，上盘块体相对于下盘块体向下移动的断层，常常由多条产状相同的次级正断层阶梯状组合而成（徐锡伟等，2002；Twiss and Moores, 2007）。因此，正断层型地震地表破裂带包括主断层地表破裂及其上盘次级正断层的地表破裂。徐锡伟等（2002）对美国西部盆地山脉省Borah Peak地震（M 7.3）的发震断层（洛斯特河正断层）进行了研究，发现此次地震地表破裂带宽度合计达40 m，表明正断层的避让距离应不小于40m（徐锡伟，2006）。通过高分辨率卫星影像解译、野外地质地貌填图与差分GPS资料，李文巧等（2011）认为1895年塔什库尔干M_S 7.0地震地表破裂带以正走滑为主，地表破裂带一般宽为30～60 m，最大可达825 m。1515年永胜M_S 8.0地震中，在洪水塘南、龙潭东和柄官东北分别产生了30 m、30 m和30～40 m的地表破裂带（徐锡伟等，2002）。谭锡斌等（2015）通过三维激光扫描技术对新疆于田2008年M_S 7.3地震破裂带进行研究，得出地表破裂带宽度大多集中在10～25 m（图1a）。由于正断层上盘变形量比下盘变形量大，地震地表破裂和地面同震错动对地面构筑物的破坏等均出现明显的上盘效应，即上盘严重灾害带宽度是下盘的2～3倍（徐锡伟和陈桂华，2018）。鉴于正断层近地表倾角一般为50°～60°（徐锡伟等，2016），建议上盘最小避让距离为从断层变形带边界向外至少30 m，下盘不小于15 m。

1.2 逆断层

逆断层是在挤压环境下，滑动面上盘块体相对抬升的一种断层，由一组产状相同的次级逆断层叠瓦状组合而成，在下盘还会发育多种次生构造，使倾滑逆断层的同震地表破裂带形态复杂化（邓起东，1984；徐锡伟等，2002；Twiss and Moores, 2007）。如1927年古浪M_S 8.0地震，单条断层产生的地表破裂带宽度为7～20 m。1932年昌马M_S 7.6地震，单条断层产生的地表破裂带宽度为2～60 m，多数小于15 m（徐锡伟等，2002）。汶川地震的发震断层龙门山断裂带是一条典型的逆冲推覆断裂带，是研究逆断层同震地表错动和对建筑物毁坏的典型区域，也是研究较多的一条断层。从已有调查结果中（徐锡伟等，2008a，2016；陈桂华等，2008；郑文俊等，2008；周庆等，2008；李传友等，2008；李传友和魏占玉，2009；赵纪生等，2009；于贵华等，2009；张永双等，2010；郭婷婷，2013）选取较为典型的100处地表破裂进行统计分析可以看出（图1b），地表破裂多数小于50 m，表明逆断层避让总距离不小于50 m，且逆断层还表现出明显的上盘效应（何仲太等，2012）。此外，European Committee for Standardization Eurocode 8（2003）规定，逆断层上盘避让断层迹线（30+2H）m，下盘避让断层迹线30m（H为土层至基岩厚度；Bouckovalas, 2006；张建毅等，2012）。考虑到逆断层的地表倾角比较缓，一般在30°左右，且上盘严重灾害带宽度是下盘的2～3倍（徐锡伟等，2016；徐锡伟和陈桂华，2018）。因此建议逆断层上盘避让距离不小于45 m，下盘不小于15 m。

1.3 走滑断层

走滑断层指以走向滑动运动为特征的近于竖直的断层，包括右旋走滑断层、左旋走滑断层和带有少量倾滑分量的斜滑断层（徐锡伟等，2002；Twiss and Moores, 2007）。通过对2001年昆仑山库塞湖M_S 8.1地震（徐锡伟等，2002），2013年玉树M_S 7.3地震（孙鑫喆等，2012）和2021年青海玛多M_S 7.4地震



a—正断层避让距离统计分布图；b—逆断层地震破裂垂直位移与地表破裂带宽度的关系；c—走滑断层地震破裂水平位移与地表破裂带宽度的关系

图 1　不同运动性质断层位移与地表破裂带宽度的关系

Fig. 1　The relationships between the displacements of faults with different kinematic properties and the widths of the surface ruptures

(a) The statistical distribution of the avoidance distance of normal faults; (b) The relationship between the vertical displacement of the seismic rupture and the surface rupture width for reverse faults; (c) The relationship between the horizontal displacement of the seismic rupture and the width of the surface rupture zone for strike-slip faults

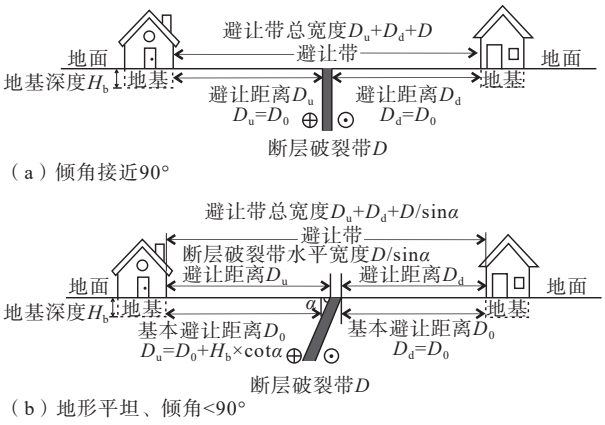
(盖海龙等, 2021; 陈桂华等, 2022)统计发现, 地震造成的地表破裂带宽度最大约 60 m, 多数小于 30 m(图 1c)。此外, European Committee for Standardization Eurocode8 (2003)规定, 走滑断层两盘皆避让断层迹线 30 m(张建毅等, 2012)。大量的震例研究表明, 走滑断层的同震地表破裂及其引起的构筑物毁坏带主要沿其地表迹线对称分布, 宽度统计平均值为 30 m(徐锡伟和陈桂华, 2018)。考虑到走滑断层的倾角较大, 且多数近直立(Twiss and Moores, 2007), 因此建议走滑断层避让距离不小于 30 m。

针对走滑断层类型, 需要综合考虑断层破碎带宽度(主断层和次级断层引起破碎带之和)、断层倾角大小、断层陡坎高度和地基深度等参数来确定建(构)筑物避让全新世活动断层距离(图 2)。当建(构)筑物位于走滑断层下盘时, 避让距离按公式(1)计算; 建(构)筑物位于走滑断层上盘时, 避让距离应按公式(2)计算:

$$D_{\mathrm{d}} = D_0 \tag{1}$$

$$D_{\mathrm{u}} = \begin{cases} D_0 \left(\text{倾角}\alpha \cong 90°\right) \\ D_0 + H_{\mathrm{b}} \times \cot\alpha \left(\text{地形平坦，倾角}\alpha < 90°\right) \end{cases} \tag{2}$$

式中: D_0—避让距离基本值(无断层陡坎发育、断层倾角接近 90°时的避让距离), m; 全新世走滑断层避让距离基本值为 15 m; D_{u}—建(构)筑物在断层



（a）倾角接近90°

（b）地形平坦、倾角<90°

图2 走滑断层上、下盘避让距离及计算方法示意图（《活动断层避让》征求意见稿，2019）

Fig. 2 Schematic diagram avoidance distances and calculation methods for the hanging wall and footwall of a strike-slip fault (“ Setback distance for active fault ”, 2019)

(a) The inclination angle is close to 90°; (b) The terrain is flat ,with an inclination of less than 90°

上盘的避让距离，m; D_d—建（构）筑物在断层下盘的避让距离，m; H_b—建（构）筑物的地基深度，m; α—断层倾角，(°)。

2 活动断裂带的影响范围

中等强度的地震可引发数百至数万个地质灾害（Xu et al., 2014）。例如，1920年海原M_S 8.5地震，造成约22万人死亡，约10万人直接死于地震诱发的滑坡（袁丽侠，2005; Zhuang et al., 2018）。2008年汶川M_S 8.0地震共造成69197人死亡，18341人失踪，其中1/3的死亡和失踪人员与地震诱发的滑坡有关（Wang et al., 2009; Tang and Van Westen, 2018）。此外，中强地震的震源通常与线性孕震构造有关，地震诱发的滑坡通常沿孕震构造呈线性分布（许冲，2015）。因此，活动断层缓冲带的确定离不开同震滑坡分布的研究（He et al., 2022）。同震滑坡发生峰值与距发震断层距离统计图显示（图3），17组同震滑坡峰值位于距发震断层5 km以内，其中距发震断层3 km以内有14个滑坡峰值，这与徐锡伟等（2016）提出的活动断层避让距离≤3 km是一致的。李为乐（2019）通过对1920年海原M_S 8.5地震、2008年汶川M_S 8.0地震、2013年芦山M_S 7.0地震、2014年鲁甸M_S 6.5地震、2017年九寨沟M_S 7.0地震、2017年西藏米林M_S 6.9地震、2018年日本北海道M_W 6.6地震和印度尼西亚帕卢M_W 7.5地震8次强震发震断层对同震地质灾害空间分布分析发现，地震地质灾害具有带状分布，且不同震级发震断层的影响宽度不一样；提出震级≥M_W 7.5的地震发震断层影响范围可达0～10 km，震级≥M_W 6.5的地震发震断层影响范围一般为0～5 km，震级<M_W 6.5的地震发震断层影响范围一般为0～2 km。因此，根据同震滑坡最多的地区与距断层的距离统计表明（图3），断层一侧的半缓冲带应至少为3 km或5 km。

1995年，日本发生M_S 7.2阪神地震，绝大多数

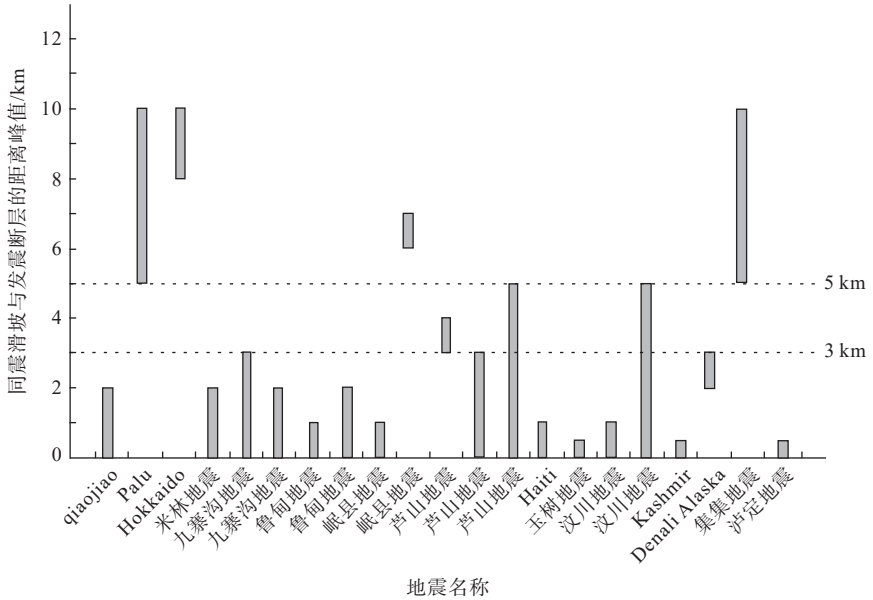


图3 同震滑坡发生峰值与距发震断层距离统计图（据He et al.，2022修改）

Fig. 3 The relationship between the distance of a seismic landslide and the inducing fault (modified after He et al., 2022)

震亡人数和木质房屋倒塌率在 1/3 以上的地方，都发生在距断层 2～3 km 宽度内（翠川三郎，1995；郭婷婷，2013）。1999 年土耳其西部发生 M_S 7.4 地震，跨越地表破裂带的建筑物基本全部倒塌，沿着约 200 km 的地震地表破裂带范围内，人口伤亡率、房屋破坏和倒塌率基本相同；但是在地表破裂带垂直方向上，远离 100～200 m 后，建筑物破坏和倒塌率迅速下降（郭婷婷，2013）。1999 年，中国台湾发生集集 M_S 7.6 地震，根据台湾强震台网记录到的资料，在发震断层附近的最大峰值加速度达 1g（相当于 IX 度以上地震烈度），在距断层约 3 km 的台站记录到的峰值加速度只有 0.3g（相当于 VII 度略强的地震烈度；徐锡伟，2006）。2008 年，汶川发生 M_S 8.0 地震，导致跨越地震断层（主、次地震断层）的建（构）筑物均倒塌或严重破坏，地震地表断层带约 20m 范围内的地表发生严重变形，地面建筑物全部倒塌，且随距离断层变远，建筑物的破坏程度减轻（郭婷婷，2013）。汶川地震应急考察也发现，在距离发震断层 100 m 范围内的建筑严重破坏，距离发震断层 100～220 m 内的建筑物中等损坏，距离发震断层 220～1500 m 内建筑轻微损坏（图 4）。



图 4　小鱼洞房屋破坏程度与距离活动断层关系

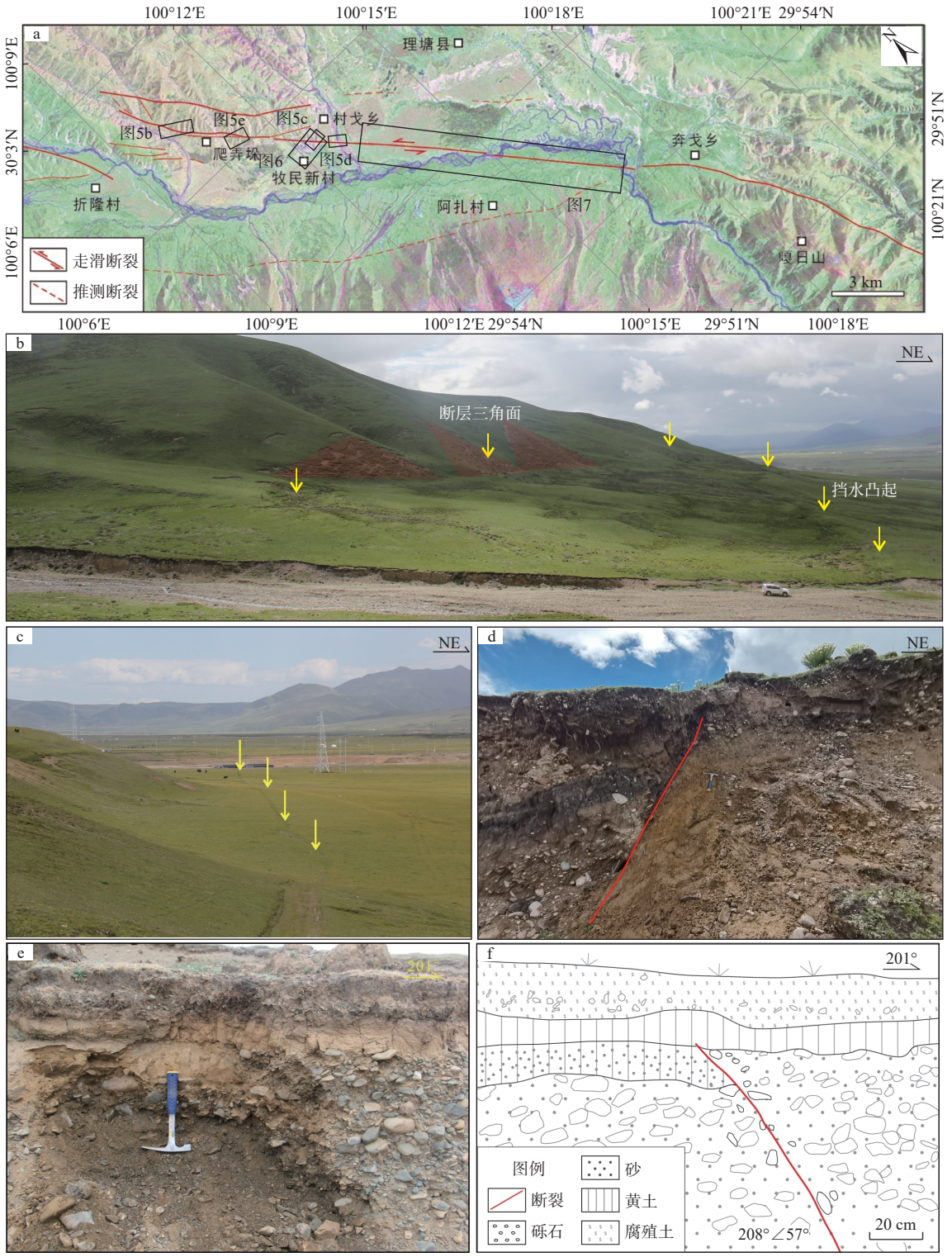
Fig. 4　Degree of damage to buildings in Xiaoyudong in relation to the distance from the active fault

《岩土工程勘察规范》（GB 50021—2001）指出，对于强烈的全新活动断层，设防烈度Ⅸ度时宜避开断层带约 3000 m，设防烈度Ⅷ度时宜避开断层带 500～1000 m，且宜选择断层下盘；对于中等全新活动断层，宜避开断层带 500～1000 m，并宜选择断层下盘；对稍弱全新活动断层，宜避开断层带，建筑物不得横跨断层带。《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）规定乙类建（构）筑物（地震时使用功能不能中断或需尽快恢复的建筑）在抗震设防烈度为Ⅸ度时，距发震断层的最小避让距离为 500 m，Ⅷ度时避让距离不小于 300 m。根据现今地震地表破裂带宽度（<500 m）、建筑抗震设计和工程勘察规范及相关资料总结，初步认为活动断层带的极强、中强、强和中等活动影响区分别为<200 m、200～500 m、500～1000 m 和 1000～3000 m，分别对应于大于Ⅸ、Ⅸ、Ⅷ和Ⅶ烈度区范围。在极强影响区应避让活动断层，在强影响区、中强影响区及中等影响区应加强抗震设防等级。

3　理塘断裂避让距离与影响范围

3.1　理塘断裂第四纪晚期活动性

理塘断裂带是川滇块体内部的一条活动断裂带，与鲜水河断裂带近乎平行，在区域上起到调节青藏高原东南缘向东挤出的作用（唐荣昌和韩渭宾，1993；Wang and Burchfiel, 2000；Zhang et al., 2015；Chevalier et al., 2016；李海兵等，2021）。理塘断裂是理塘断裂带理塘段的一条分支断层，北西起于爬弄垛以北，向南东横穿理塘盆地及无量河，消失于奔戈乡嘎日山前一带，全长约 22 km，整体走向 138°左右，以左旋走滑运动为主兼有正断分量（图 5a）。在村戈乡东北爬弄垛山前，断层错断冲洪积扇、河流



a—理塘断裂几何展布；b—爬弄垛山前断层三角面及挡水凸起；c—牧民新村地表破裂；d—爬弄垛山前断层剖面；e—村戈乡查卡村野外断层剖面；f—村戈乡查卡村断层剖面图

图 5 理塘断裂几何展布及第四纪晚期活动性

Fig. 5 Geometric distribution of the Litang fault and late Quaternary seismic activity

(a) Geometric distribution of the Litang fault zone; (b) Fault triangles and water-retaining bulges in the piedmont of Panongduo; (c) Muminxincun surface rupture; (d) Fault section in front of Panongduo Mountain; (e) Fault section of Chaka villiage, Cunge; (f) Fault section of Chaka villiage, Cunge

阶地，形成断层陡坎、断层三角面、水系同步扭转、断塞塘等地貌现象（图 5b；张献兵等，2024）。在北西端，断层消失于三叠纪基岩中，表现为多条次级分支断层。理塘盆地至今还可见 1948 年理塘 M $7^1/_4$ 地震的地表破裂（图 5c）。在爬弄垛山前出露一断层剖面（图 5d），揭示理塘断裂具有一定的正断分量（张献兵等，2024）。在村戈大桥旁出露一厚约 70 cm 断层剖面，剖面显示砾石具有明显定向性，产状为 208°∠57°（图 5e、5f）。徐锡伟等（2005）在金厂沟附近通过 2 处观测点测得理塘断裂的水平滑动速率分别为 3.8±0.8 mm/a 和 4.1±0.1 mm/a；赵国华（2014）通过对无量河阶地、垃圾场西的研究，得到 2 处的水平滑动速率分别为 5.1±1.0 mm/a 和 5.5±1.0 mm/a。古地震研究显示（徐锡伟等，2005；赵国华，2014；周春景等，2015；张克旗等，2020；高帅坡，2021；张献兵等，2024），理塘断裂可能至少发生 7 次强震事件，分别为：E1（10680～10250 a BP）、E2（9483～9191 a BP）、E3（5358～4750 a BP）、E4（3418～3307 a BP）、E5（2030～1930 a BP）、E6（1380～483 a BP）和 E7（AD 1729 或 1948），其复发间隔分别为 1128 a、4283 a、1692 a、1382 a、1271 a 和 798 a。全新世以来古地震数据显示，理塘断裂在 5000～9000 a BP 之间可能存在约 4000 a 的强震平静期，5000 a BP 之后理塘断裂进入新一轮地震丛集，且强震复发间隔逐渐变小，表现为加速趋势，应关注理塘断裂的强震危险性（高帅坡，2021；张献兵等，2024）。

在跨理塘断裂的牧民新村布设 3 条间隔为 50 m 的微动地球物理勘探测线，每条测线在地表破裂两侧以 10 m 间隔布设勘探点，同时在外围以 50 m 间隔布设多个勘探点，共 48 个勘探点（图 6a），利用建模软件 Voxler，获得了理塘断裂 60 m 以浅的横波速率剖面（图 6b）和三维模型（图 6c）。在微动数据反演得到的横波速度模型中，根据《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）中对土的类型划分标准，将牧民新村附近的横波剖面划分为 3 个区间：横波速度小于 250 m/s 的细圆砾土和粗圆砾土层；横波速度介于 250～500 m/s 之间的中等稍密的粉质黏土、细砂和粗砂层；横波速度介于 500～800 m/s 之间的密实的粉质黏土、细砂和粗砂层（图 6b）。理塘断裂横波速度剖面图中，多处有明显的速度变化异常，解译出一条断层 F_1（∠226°/84°），断层位置与野外观察到的地表破裂位置可以很好的吻合，位于水平距离 280 m 处。另外，根据横波速度异常信息，分别在水平距离 475 m 和 175 m 处，解译 2 条断层 F_2（∠210°/80°）和 F3（∠215°/79°）。由于 F_2 和 F_3 在地表断错地貌不明显，暂定为解译断层。在图 6b 中，反演的横波速度信息比较杂乱，特别是在 180～350 m 这一区间范围，表明该深度第四纪地层较为破碎，应为断层带破碎带范围，经测量宽度约 308 m。

3.2　理塘断裂避让距离与影响范围

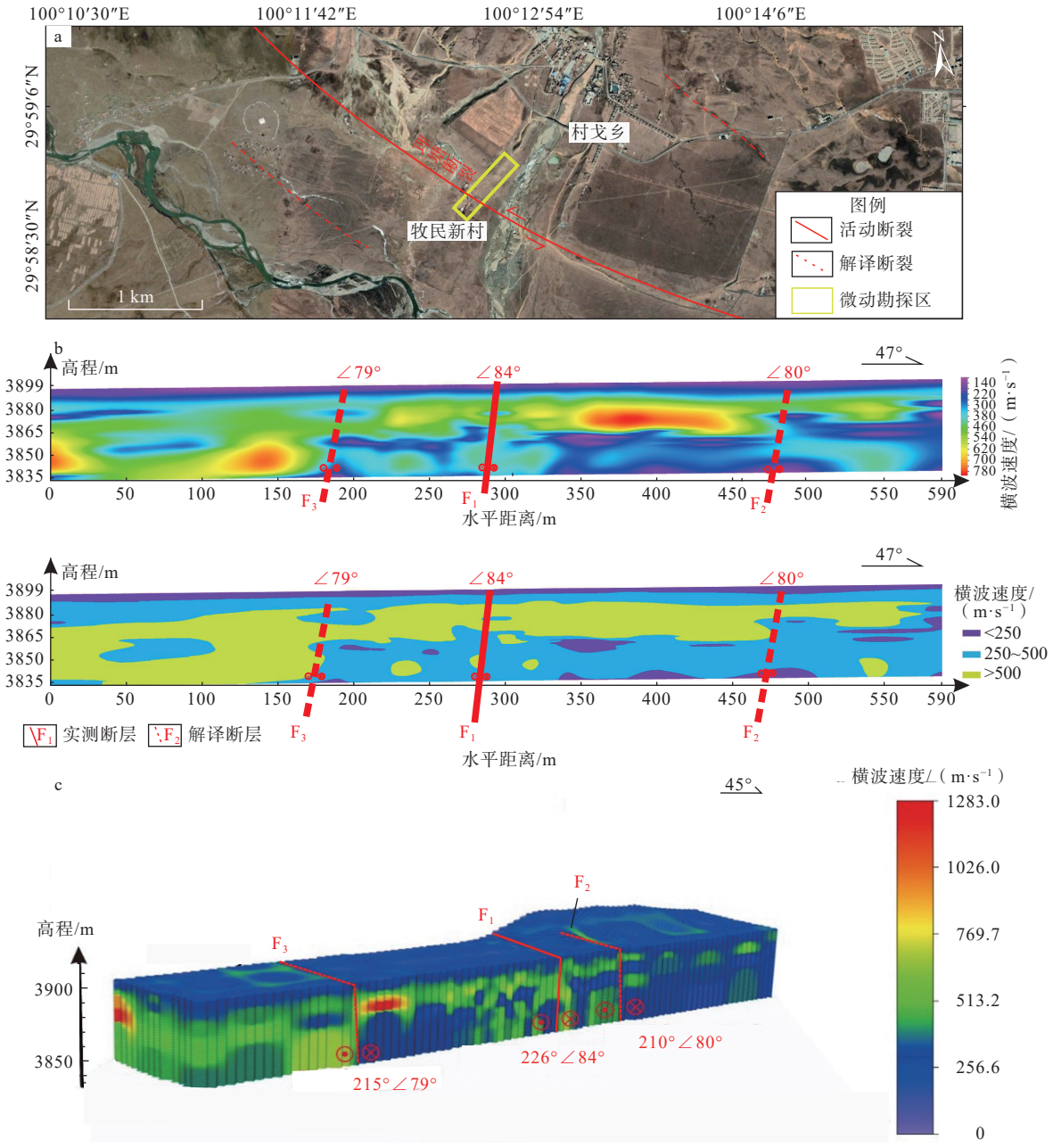
考虑到理塘断裂以走滑运动为主兼有正断分量，根据不同性质活动断层避让距离，该断层的避让距离为上盘避让 30m，下盘避让 15m。兰恒星等（2021）根据断层影响宽度与断层活动速率，提出断层带影响宽度的普适性评估模型，避让距离为在断层影响宽度之外需要避让的安全距离：

$$z = 10^{\left(-0.03(\lg y)^2+0.48\lg y+1.87\right)} \quad (3)$$

式中：z 为断层影响宽度，m；y 为断层的活动速率，mm/a。理塘断裂带水平滑动速率为 4.0±1.0 mm/a（徐锡伟等，2005），基于公式（3），得到断层带单侧极强影响范围为 123～155 m。这与根据理塘断裂的微动勘探数据得到的理塘断裂带理塘段断层带宽度约为 308 m 基本吻合。考虑到理塘断裂的断层倾角近直立（≥80°），单侧断层带宽度应为 154 m。因此，理塘断裂带的极强、中强、强和中等活动影响区分别为 154 m、154～500 m、500～1000 m 和 1000～3000 m（图 7）。

4　讨论

活动断层的避让距离一方面与地震地表破裂带宽度有关，另一方面还与断层性质、断层倾角有关，特别是主断层和次级断层的宽度。这是因为，目前得到的活动断裂避让距离多数都是基于历史或现代地震产生地表破裂带宽度（构造意义明确的主破裂）统计得到的。例如，正断层上盘的避让距离不小于 30 m，下盘不小于 15 m；逆断层上盘避让距离不小于 45 m，下盘不小于 15 m；走滑断层避让距离不小于 30 m。值得注意的是，强震除了可以在地表产生明显的由一系列张裂隙、张剪裂隙、剪切裂隙、挤压鼓包、挤压脊和裂陷等雁列状组合而成的地表破裂带外（潘家伟等，2021），还可能产生地表裂缝、砂土液化带和带状塌陷等多种类型裂缝（刘小利等，2022）。2021 年青海玛多 M_W7.4 地震产生的地表破裂表现为多支近平行或斜交的复杂几何形态，部分段落还呈弧形、团状等形态，多段破裂



a—理塘断裂微动勘探区；b—理塘断裂微动勘探横波速度剖面解释图；c—理塘断裂地下三维解释图

图 6 理塘断裂牧民新村微动勘探剖面解译与地下三维解释图

Fig. 6 Exploration profile and interpretation of microdynamics in Muminxincun

(a) Litang fault micro-dynamics exploration area; (b) Interpretation of a shear wave velocity profile for fretting exploration of the Litang fault; (c) Three-dimensional sub-surcace interpretation of the Litang fault

宽度接近甚至超过 3 km(刘小利等, 2022)。为此，还需要对强震同震地表破裂带的完整观测和全面分析，为活动断层工程避让带宽度及其边界的准确限定提供基础数据(徐锡伟等, 2008b)。此外，活动断层的避让距离还与断层倾角有关。例如，地形平坦条件下，一般建(构)筑物避让全新世走滑断层距离估算中，当地基深度≤3 m、且断层倾角分别为15°～29°、30°～44°、45°～59°、60°～74°、75°～90°时，其上/下盘避让距离分别应不小于 26/15 m、20/15 m、18/15 m、17/15 m、16/15 m(《活动断层避让》征求意见稿, 2019)。对于出露区第四纪活动断层的避让距离，特别是剖面上与走滑断层水平运动相伴生的花状构造样式，一定要考虑主断层和次级断层的宽度。陡倾角走滑断层由不连续的次级剪切断层

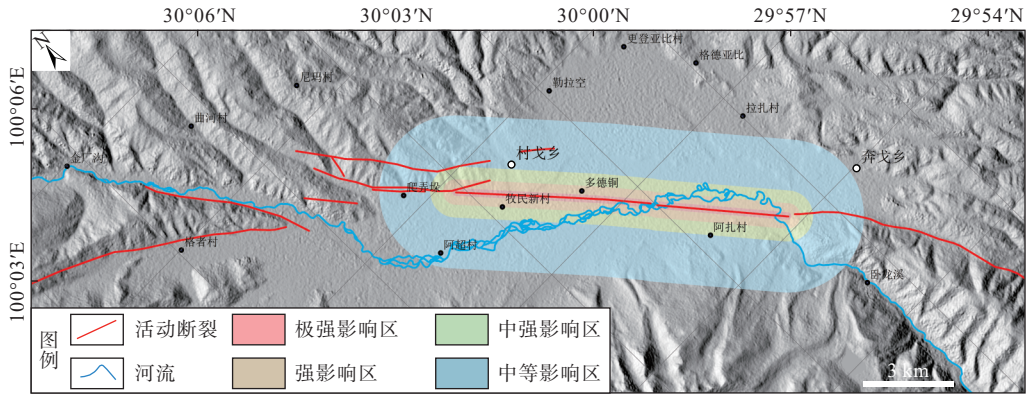


图 7　理塘断裂极强、强、中强和中等影响区

Fig. 7　Zones of an extremely strong, strong, less strong, and medium impact of the Litang fault

斜列而成，在走滑作用相关的拉张或挤压过程中易形成拉分盆地或端部出现阶区等，当阶区宽度在数十米宽度时，可把阶区整体作为变形带进行避让（徐锡伟和陈桂华，2018）。

基岩断层的避让距离主要由断层带宽度来决定，包括断裂岩的宽度和破碎带的宽度。断裂岩是指断层活动的产物，是断层带的物质组成，其结构特征记录了断层活动演化的历史（吴琼等，2021）。破碎带是指由断层或裂隙密集带所造成的岩石强烈破碎的地段。但需要注意基岩裂隙或风化裂隙与断层破碎带的识别和鉴别，以免导致基岩断层避让距离过大。王焕等（2013）结合汶川地震断裂带科学钻探一号孔（WFSD-1）岩芯研究，将龙门山断裂带映秀–北川断裂虹口八角庙地区的断裂岩分为碎裂岩带、黑色断层泥和角砾岩带、灰色断层角砾岩带、深灰色断层角砾岩带以及黑色断层泥和角砾岩带 5 种，断裂岩合计宽度达 240 m。吴琼等（2021）以鲜水河断裂带乾宁段地表出露的断裂岩为研究对象，通过野外地质调查、室内光学显微镜、扫描电镜、粒度统计、粉末 X 射线衍射分析（XRD）和薄片 X 射线荧光光谱分析（XRF）等多种研究方法，对鲜水河断裂带的岩石特征、结构构造、物性、矿物成分及化学元素分布开展了详细的分析，并探讨了相关变形行为和滑移机制，得到断裂岩整体宽约为 14.3 m。此外，龚正等（2023）对丽江–小金河断裂盐源段断裂带宽度统计发现，其中九洛沟、道沟坪子和沈子河剖面的核部宽度仅为 0.2～0.5 m、8.5 m 和 6.95 m，但其破碎带宽度为 1.2～4.5 m、22 m 和>29 m，而干沟–新沟破碎带宽度>29 m。所以，丽江–小金河断裂盐源段断裂带宽度（核部与破碎带之和）应该在 30～36 m 之间。考虑到龙门山断裂带映秀–北川段、鲜水河断裂带乾宁段和丽江–小金河断裂盐源段的基岩断裂破裂带宽度均大于 15 m。因此，基岩断层的避让距离应该大于 15 m。综上所述，活动断层避让距离，除与地震地表破裂带宽度有关，还与断层类型、倾角和断层破碎带宽度有关，特别是主断层和次级断层的宽度以及基岩断层岩和破裂带的宽度。

活动断层作为破坏性地震的主要危险源，其存在意味着潜在的且难以预测的地震、地表变形及相关次生灾害及危害性（吴中海，2019，2022）。上文已经论述了不同性质活动断层的避让距离和活动断层的影响范围，但对于基岩山区、高山峡谷区或者无法到达区域的活动断层，如何确定其避让距离？加强活断层鉴定和活动性研究是开展活断层避让的前提。然而，对于青藏高原东南缘基岩山区活断层鉴定研究目前还比较薄弱。一方面基岩山区多为高海拔地区，交通条件差，难以到达；另一方面冰川侵蚀强烈导致已有断层形迹被破坏，且第四纪沉积物少，缺少定年材料。例如，鲜水河断裂带新发现的木格措南断裂是一条发育于鲜水河断裂带色拉哈断裂和折多塘断裂之间的折多山花岗岩体内的长约 24 km 的全新世活动断层，该断层空间上可分成北、中、南 3 段，呈（正滑）左旋右阶雁行状排列（潘家伟等，2020），目前关于木格措南断裂的活动速率和古地震研究还未见报道。此外，青藏高原东南缘的深切峡谷区植被较发育，断层形迹不清晰；同时崩滑流等地质灾害频发（白永健等，2019），导致断层形迹被破坏，阻碍活断层鉴定（钟宁，2017）。青藏高原东部的岷江上游叠溪地区也曾发生 1713 年 M_S 7.0 和 1933 年 M_S 7.5 2 次大震，造成重大人员伤亡和财产损失（钟宁，2017；Ren et al.，2018）。

然而，岷江上游多为高山峡谷地貌，且缺少第四纪沉积，岷江断裂的中南段穿过叠溪地区，至今仍缺少断层活动的证据（李勇等，2006；任俊杰等，2017；李佳妮等，2021）。这就需要利用高精度遥感影像、无人机航空雷达等技术，查明活动断层几何展布；同时结合跨断层高精度连续的GNSS（全球卫星导航系统）和InSAR（合成孔径雷达干涉测量）等数据，确定断层的活动性（全新世断层和晚更新世断层）；再结合构造类比的方法，确定活动断层的避让距离。活动断层对工程影响的表现形式主要是“抗断问题”和“抗震问题”，活动断层的避让距离主要是通过避开活动断层来解决构物的“抗断问题”，活动断层的影响范围主要是解决距离活动断层一定范围的重要、必须的构筑物的“抗震问题”，有效减轻建（构）筑物受地震灾害风险的影响（徐锡伟等，2018）。川西−藏东交通廊道穿越理塘断裂，理塘段是铁路工程类型最全（包括桥梁、隧道、路基）、路基最长、桥梁最多的区段，活动断层的“抗断问题”与“抗震问题”极为突出。因此，急需加强理塘断裂带的活动性和强震复发规律研究，分析活动断层在工程寿命期内的危险性。①加强不同性质活动断层避让距离与影响范围研究，合理规避活动断层风险。②开展活动断层避让距离与影响范围的数值模拟研究，分析多条分支断层的影响范围，以及不同构造组合样式的断层避让问题。③加强基岩山区和深切河谷区活断层鉴定新方法和新技术研究。④加强活动断层高精度GNSS和InSAR形变观测，以及地震监测。活动断层避让距离和影响范围，除受活动断层性质及强度外，还与其断层通过不同组成的物体或者地层岩性，以及工程地质条件有关，急需开展进一步研究工作。

5 结论

（1）基于同震地表破裂统计资料分析，正断层上盘的避让距离不小于30 m，下盘不小于15 m；逆断层上盘避让距离不小于45 m，下盘不小于15 m；走滑断层避让距离不小30 m。活动断层带的极强、中强、强和中等活动影响区分别为<200 m、200～500 m、500～1000 m和1000～3000 m，分别对应于烈度区大于Ⅸ、烈度区Ⅸ、烈度区Ⅷ和烈度区Ⅶ范围。

（2）理塘断裂为全新世活动断层，运动性质以走滑运动为主兼有正断分量，其上盘避让距离为30 m，下盘避让为15 m。理塘断裂的极强、中强、强和中等活动影响区分别为154 m、154～500 m、500～1000 m和1000～3000 m。

致谢：微动地球物理测量和物探解译由首都师范大学李家存副教授完成，在此表示感谢。

References

BAI Y J, NI H Y, GE H, 2019. Advances in research on the geohazard effect of active faults on the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 25(6): 1116-1128. (in Chinese with English abstract)

BOUCKOVALAS G. 2006. ETC-12: geothchnical evaluation and application of the seismic eurocode EC8[J]. National Technical University, Greece, 2006: 55-64.

CAI L W, HUANG Y, HE J, et al., 2022. Earthquake damage and enlightenment from traffic system in 2022 Qinghai Menyuan M_S6.9 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 42(4): 8-16. (in Chinese with English abstract)

CHEN G H, XU X W, ZHENG R Z, et al., 2008. Quantitative analysis of the co-seismic surface rupture of the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China along the Beichuan-Yingxiu fault[J]. Seismology and Geology, 30(3): 723-738. (in Chinese with English abstract)

CHEN G H, LI Z W, XU X W, et al., 2022. Co-seismic surface deformation and late Quaternary accumulated displacement along the seismogenic fault of the 2021 Madoi *M*7.4 earthquake and their implications for regional tectonics[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(8): 2984-3005. (in Chinese with English abstract)

CHEN Y M, WANG L M, DAI W, et al., 2004. The frozen soils and devastating characteristics of west Kunlun Mountains pass M_S8.1 earthquake area in 2001[J]. Earthquake Research in China, 20(2): 161-169. (in Chinese with English abstract)

CHEVALIER M L, LELOUP P H, REPLUMAZ A, et al., 2016. Tectonic-geomorphology of the Litang fault system, SE Tibetan Plateau, and implication for regional seismic hazard[J]. Tectonophysics, 682: 278-292.

European Committee for Standardization Eurocode8: Design of Structures for Earthquake Resistance, 2003.

GAI H L, YAO S H, YANG L P, et al., 2021. Characteristics and causes of coseismic surface rupture triggered by the “5.22” M_S 7.4 Earthquake in Maduo, Qinghai, and their significance[J]. Journal of Geomechanics, 27(6): 899-912. (in Chinese with English abstract)

GAO S P, 2021. Late Quaternary paleoseismology and faulting behavior of the internal and western boundary faults of Northwest Sichuan Subblock[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)

GONG Z, LI H B, TANG F T, et al., 2023. Fault zone scale, fault zone structure and historical activity of the Yanyuan segment of the Lijiang-Xiaojinhe fault[J]. Acta Geologica Sinica, 97(7): 2111-2125. (in Chinese with English abstract)

GUO T T, 2013. A study on Wenchuan earthquake disasters and the safety distance from active faults[D]. Beijing: Institute of Geology, China

Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)

GUO T T, XU X W, YU G H, et al., 2017. Research history and current situation of active faults and their avoidance zone width[J]. Progress in Geophysics, 32(5): 1893-1900. (in Chinese with English abstract)

HE X L, XU C, XU X W, et al., 2022. Advances on the avoidance zone and buffer zone of active faults[J]. Natural Hazards Research, 2(2): 62-74

HE Z T, MA B Q, LI Y S, et al., 2012. Width and hanging Wall effect of surface rupture caused by Wenchuan earthquake[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 48(6): 886-894. (in Chinese with English abstract)

LAN H X, ZHANG N, LI L P, et al., 2021. Risk analysis of major engineering geological hazards for Sichuan-Tibet Railway in the phase of feasibility study[J]. Journal of Engineering Geology, 29(2): 326-341. (in Chinese with English abstract)

LI B, YIN Y P, TAN C X, et al., 2022. Geo-safety challenges against the site selection of engineering projects in the eastern Himalayan syntaxis area[J]. Journal of Geomechanics, 28(6): 907-918. (in Chinese with English abstract)

LI C Y, YE J Q, XIE F R, et al., 2008. Characteristics of the surface rupture zone of the M_S8.0 Wenchuan earthquake, China along the segment north to Beichuan[J]. Seismology and Geology, 30(3): 683-696. (in Chinese with English abstract)

LI C Y, WEI Z Y, 2009. Representative patterns of coseismic deformation along surface rupture north to Beichuan city of 2008 Wenchuan M_S8.0 earthquake[J]. Quaternary Sciences, 29(3): 416-425. (in Chinese with English abstract)

LI H B, WANG Z X, FU X F, et al., 2008. The surface rupture zone distribution of the Wenchuan earthquake (M_S8.0) happened on May 12th, 2008[J]. Geology in China, 35(5): 803-813. (in Chinese with English abstract)

LI H B, PAN J W, SUN Z M, et al., 2021. Continental tectonic deformation and seismic activity: a case study from the Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 95(1): 194-213. (in Chinese with English abstract)

LI J N, HAN Z J, LUO J H, et al., 2021. Characteristics and implications of seismic activity around Minshan active block in eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Seismology and Geology, 43(6): 1459-1484. (in Chinese with English abstract)

LI W L, 2019. Distribution pattern and post-earthquake effect of coseismic landslides of strong earthquakes[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)

LI W Q, CHEN J, YUAN Z D, et al., 2011. Coseismic surface ruptures of multi segments and seismogenic fault of the tashkorgan earthquake in Pamir, 1895[J]. Seismology and Geology, 33(2): 260-276. (in Chinese with English abstract)

LIU F S, WU Z H, ZHANG Y Q, et al., 2014. New progress and prospects of neotectonics and active tectonics synthetical study on eastern edge Qinghai-Xizang plateau[J]. Geological Bulletin of China, 33(4): 403-418. (in Chinese with English abstract)

LIU X L, XIA T, LIU J, et al., 2022. Distributed characteristics of the surface deformations associated with the 2021 M_W7.4 Madoi earthquake, Qinghai, China[J]. Seismology and Geology, 44(2): 461-483. (in Chinese with English abstract)

PAN J W, BAI M K, LI C, et al., 2021. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2021-05-22 Maduo (Qinghai) M_S7.4 earthquake[J]. Acta Geologica Sinica, 95(6): 1655-1670. (in Chinese with English abstract)

PAN J W, LI H B, CHEVALIER M L, et al., 2020. A newly discovered active fault on the Selaha-Kangding segment along the SE Xianshuihe fault: the South Mugecuo fault[J]. Acta Geologica Sinica, 94(11): 3178-3188. (in Chinese with English abstract)

PENG J B, XU N X, ZHANG Y S, et al., 2022. The framework system for geosafety research[J]. Journal of Engineering Geology, 30(6): 1798-1810. (in Chinese with English abstract)

RAN Y K, CHEN L C, 2004. Active tectonic research for seismic safety evaluation of long-line engineering sites in China[J]. Seismology and Geology, 26(4): 733-741. (in Chinese with English abstract)

REN J J, XU X W, ZHANG S M, et al., 2017. Tectonic transformation at the eastern termination of the Eastern Kunlun fault zone and seismogenic mechanism of the 8 August 2017 Jiuzhaigou M_S7.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(10): 4027-4045. (in Chinese with English abstract)

REN J J, XU X W, ZHANG S M, et al., 2018. Surface rupture of the 1933 M7.5 Diexi earthquake in eastern Tibet: implications for seismogenic tectonics[J]. Geophysical Journal International, 212(3): 1627-1644.

SUN X Z, XU X W, CHEN L C, et al., 2012. Surface rupture features of the 2010 Yushu earthquake and its tectonic implication[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(1): 155-170. (in Chinese with English abstract)

TAN X B, XU X W, YU G H, et al., 2015. The application of 3D laser scanning technology in surface rupture survey of the normal fault: an example of the 2008 M_S7.3 Yutian earthquake[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 10(3): 491-500. (in Chinese with English abstract)

TANG C, VAN WESTEN C J, 2018. Atlas of Wenchuan-Earthquake geohazards: analysis of co-seismic and post-seismic geohazards in the area affected by the 2008 Wenchuan Earthquake[M]. Beijing: Science Press.

TANG R C, HAN W B, 1993. Active faults and earthquakes in Sichuan[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

TWISS R J, MOORES E M, 2007. Structural geology[M]. 2nd ed. New York: W. H. Freeman: 61-90.

WANG E, BURCHFIEL B C, 2000. Late Cenozoic to Holocene deformation in southwestern Sichuan and adjacent Yunnan, China, and its role in formation of the southeastern part of the Tibetan Plateau[J]. GSA Bulletin, 112(3): 412-423.

WANG F W, CHENG Q G, HIGHLAND L, et al., 2009. Preliminary investigation of some large landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan Province, China[J]. Landslides, 6(1): 47-54.

WANG H, LI H B, SI J L, et al., 2013. The relationship between the internal structure of the Wenchuan earthquake fault zone and the uplift of the Longmenshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(6): 2048-2060. (in Chinese with English abstract)

WANG T, 2020. Research on setback distance of strip-foundation under surface rupture in strong earthquakes[D]. Sanhe: Institute of Disaster Prevention. (in Chinese with English abstract)

WANG Z J, DANG G M, ZHANG R B, et al., 2002. Styles and characteristics of the surface rupture of the west Kunlun Mountains earthquake with

M_S8.1[J]. Platean Earthquake Research, 14(1): 17-25. (in Chinese with English abstract)

WU J F, 2009. Study on setback distance from surface rupture for Post-Wenchuan earthquake reconstruction[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)

WU Q, LI H B, CHEVALIER M L, et al., 2021. Rock characteristics, internal structure and physical-chemical properties of Qianning segment in Xianshuihe fault zone[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(10): 3204-3224. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, 2019. The definition and classification of active faults: history, current status and progress[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(5): 661-697. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, 2022. Active faults and engineering applications I: definition and classification[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 44(6): 922-947. (in Chinese with English abstract)

WU Z M, SHEN T J M, CAO Z Q, et al., 1990. The surface ruptures of Danxung (Tibet) earthquake(M=8) in 1411[J]. Seismology and Geology, 12(2): 98-108. (in Chinese with English abstract)

Xu C, Xu X W, Yao X, et al., 2014. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis[J]. Landslides, 11(3): 441-461.

XU C, 2015. Utilizing coseismic landslides to analyze the source and rupturing process of the 2014 Ludian earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 23(4): 755-759. (in Chinese with English abstract)

XU X W, YU G H, MA W T, et al., 2002. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault[J]. Seismology and Geology, 24(4): 470-483. (in Chinese with English abstract)

XU X W, WEN X Z, YU G H, et al., 2005. Average slip rate, earthquake rupturing segmentation and recurrence behavior on the Litang fault zone, western Sichuan province, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 48(8): 1183-1196. (in Chinese with English abstract)

XU X W, 2006. Active faults, associated earthquake disaster distribution and policy for disaster reduction[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 1(1): 7-14. (in Chinese with English abstract)

XU X W, YU G H, MA W T, et al., 2008a. Rupture behavior and deformation localization of the Kunlunshan earthquake (M_W7.8) and their tectonic implications[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(10): 1361-1374. (in Chinese with English abstract)

XU X W, WEN X Z, YE J Q, et al., 2008b. The M_S8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure[J]. Seismology and Geology, 30(3): 597-629. (in Chinese with English abstract)

XU X W, GUO T T, LIU S Z, et al., 2016. Discussion on issues associated with setback distance from active fault[J]. Seismology and Geology, 38(3): 477-502. (in Chinese with English abstract)

XU X W, CHEN G H, 2018. Discussion and suggestions on active fault avoidance[J]. City and Disaster Reduction(1): 8-13. (in Chinese)

YU G H, XU X W, CHEN G H, et al., 2009. Relationship between the localization of earthquake surface ruptures and building damages associated with the Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(12): 3027-3041. (in Chinese with English abstract)

YUAN L X, 2005. The mechanism of loess landslide caused by earthquake in Haiyuan of Ningxia[D]. Xian: Northwest University. (in Chinese with English abstract)

ZANG W J, 2017. Damage to highway tunnels caused by the Wenchuan earthquake[J]. Modern Tunnelling Technology, 54(2): 17-25. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J Y, BO J S, YUAN Y F, et al., 2012. Review of research on active fault and its setback[J]. Journal of Natural Disasters, 21(2): 9-18. (in Chinese with English abstract)

ZHANG K Q, WU Z H, ZHOU C J, et al., 2020. Paleoearthquake events and inhomogeneous activity characteristics in the Benge-Cunge section of the Litang fault zone in the western Sichuan province[J]. Acta Geologica Sinica, 94(4): 1295-1303. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X B, YANG Z, ZHONG N, et al., 2024. Late Quaternary activity and paleoearthquake recurrence characteristics of the Litang fault in western Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 98(7): 2084-2100. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, SUN P, SHI J S, et al., 2010. Investigation of rupture influenced zones and their corresponding safe distances for reconstrution after 5.12 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 18(3): 312-319. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, GUO C B, YAO X, et al., 2016. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(3): 277-286. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y Z, REPLUMAZ A, WANG G C, et al., 2015. Timing and rate of exhumation along the Litang fault system, implication for fault reorganization in Southeast Tibet[J]. Tectonics, 34(6): 1219-1243.

ZHAO G H, 2014. Study on fault activity and tectonic geomorphology of Litang Fault within the Sichuan-Yunnan Blocks[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)

ZHAO J S, WU J F, SHI L J, et al., 2009. Setback distance determination in reconstruction along the trace of surface rupture caused by M_S8.0 Wenchuan earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 29(6): 96-101. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, LI C Y, WANG W T, et al., 2008. Trench logs of earthquake scarp of the M_S8.0 Wenchuan earthquake in the segment north of Beichuan[J]. Seismology and Geology, 30(3): 697-709. (in Chinese with English abstract)

ZHONG N, 2017. Earthquake and provenance analysis of the lacustrine sediments in the upper reaches of the Min River during the Late Pleistocene[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)

ZHOU C J, WU Z H, ZHANG K Q, et al., 2015. New chronological constraint on the co-seismic surface rupture segments associated with the Litang Fault[J]. Seismology and Geology, 37(2): 455-467. (in Chinese with English abstract)

ZHOU Q, XU X W, YU G H, et al., 2008. Investigation on widths of surface rupture zones of the M8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan province, China[J]. Seismology and Geology, 30(3): 778-788. (in Chinese with English abstract)

ZHOU Q, XU X W, YU G H, et al., 2008. Investigation on widths of surface

rupture zones of the *M*8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan province, China[J]. Seismology and Geology, 30(3): 778-788. (in Chinese with English abstract)

ZHUANG J Q, PENG J B, XU C, et al., 2018. Distribution and characteristics of loess landslides triggered by the 1920 Haiyuan Earthquake, Northwest of China[J]. Geomorphology, 314: 1-12.

附中文参考文献

白永健，倪化勇，葛华，2019. 青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究现状[J]. 地质力学学报，25(6)：1116-1128.

蔡丽雯，黄勇，何静，等，2022. 2022 年青海门源 6.9 级地震交通系统震害与启示[J]. 地震工程与工程振动，42(4)：8-16.

陈桂华，徐锡伟，郑荣章，等，2008. 2008 年汶川 M_S8.0 地震地表破裂变形定量分析：北川-映秀断裂地表破裂带[J]. 地震地质，30(3)：723-738.

陈桂华，李忠武，徐锡伟，等，2022. 2021 年青海玛多 *M*7.4 地震发震断裂的典型同震地表变形与晚第四纪断错累积及其区域构造意义[J]. 地球物理学报，65(8)：2984-3005.

陈永明，王兰民，代炜，等，2004. 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震区的冻土及地震破坏特征[J]. 中国地震，20(2)：161-169.

翠川三郎. 1995. 连锁灾害的发生机制与实态追踪[C]. 科学朝日，紧急增刊：15-18.

邓起东，1984. 断层性状、盆地类型及其形成机制[J]. 地震科学研究(3)：56-64.

盖海龙，姚生海，杨丽萍，等，2021. 青海玛多“5·22”M_S 7.4 级地震的同震地表破裂特征、成因及意义[J]. 地质力学学报，27(6)：899-912.

高帅坡，2021. 川西北次级块体内部及其西边界断裂的晚第四纪活动习性[D]. 北京：中国地震局地质研究所.

龚正，李海兵，唐方头，等，2023. 丽江-小金河断裂盐源段断裂带规模、断裂带结构及其历史活动性[J]. 地质学报，97(7)：2111-2125.

郭婷婷，2013. 汶川地震震害与活动断层“避让带”宽度的分析研究[D]. 北京：中国地震局地质研究所.

郭婷婷，徐锡伟，于贵华，等，2017. 活动断层及其“避让带”宽度的研究历史与现状[J]. 地球物理学进展，32(5)：1893-1900.

何仲太，马保起，李玉森，等，2012. 汶川地震地表破裂带宽度与断层上盘效应[J]. 北京大学学报(自然科学版)，48(6)：886-894.

兰恒星，张宁，李郎平，等，2021. 川藏铁路可研阶段重大工程地质风险分析[J]. 工程地质学报，29(2)：326-341.

李滨，殷跃平，谭成轩，等，2022. 喜马拉雅东构造结工程选址面临的地质安全挑战[J]. 地质力学学报，28(6)：907-918.

李传友，叶建青，谢富仁，等，2008. 汶川 M_S8.0 地震地表破裂带北川以北段的基本特征[J]. 地震地质，30(3)：683-696.

李传友，魏占玉，2009. 2008 年汶川 M_S8.0 地震北川以北段地表破裂变形的主要样式[J]. 第四纪研究，29(3)：416-425.

李海兵，王宗秀，付小方，等，2008. 2008 年 5 月 12 日汶川地震(M_S8.0)地表破裂带的分布特征[J]. 中国地质，35(5)：803-813.

李海兵，潘家伟，孙知明，等，2021. 大陆构造变形与地震活动：以青藏高原为例[J]. 地质学报，95(1)：194-213.

李佳妮，韩竹军，罗佳宏，等，2021. 青藏高原东缘岷山活动地块周缘的地震活动特征与启示[J]. 地震地质，43(6)：1459-1484.

李为乐，2019. 典型强震同震地质灾害分布规律及后效应研究[D]. 成都：成都理工大学.

李文巧，陈杰，袁兆德，等，2011. 帕米尔高原 1895 年塔什库尔干地震地表多段同震破裂与发震构造[J]. 地震地质，33(2)：260-276.

李勇，李永昭，张毅，等，2006. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应[M]. 北京：地质出版社.

刘凤山，吴中海，张岳桥，等，2014. 青藏高原东缘新构造与活动构造研究新进展及展望[J]. 地质通报，33(4)：403-418.

刘小利，夏涛，刘静，等，2022. 2021 年青海玛多 M_W7.4 地震分布式同震地表裂缝特征[J]. 地震地质，44(2)：461-483.

潘家伟，白明坤，李超，等，2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 M_S7.4 地震地表破裂带及发震构造[J]. 地质学报，95(6)：1655-1670.

潘家伟，李海兵，CHEVALIER M L，等，2020. 鲜水河断裂带色拉哈—康定段新发现的活动断层：木格措南断裂[J]. 地质学报，94(11)：3178-3188.

彭建兵，徐能雄，张永双，等，2022. 论地质安全研究的框架体系[J]. 工程地质学报，30(6)：1798-1810.

冉勇康，陈立春，2004. 中国长线工程场地地震安全性评价工作中的活动构造问题[J]. 地震地质，26(4)：733-741.

任俊杰，徐锡伟，张世民，等，2017. 东昆仑断裂带东端的构造转换与 2017 年九寨沟 M_S7.0 地震孕震机制[J]. 地球物理学报，60(10)：4027-4045.

孙鑫喆，徐锡伟，陈立春，等，2012. 2010 年玉树地震地表破裂带典型破裂样式及其构造意义[J]. 地球物理学报，55(1)：155-170.

谭锡斌，徐锡伟，于贵华，等，2015. 三维激光扫描技术在正断层型地表破裂调查中的应用：以 2008M_S7.3 于田地震为例[J]. 震灾防御技术，10(3)：491-500.

唐荣昌，韩渭宾，1993. 四川活动断裂与地震[M]. 北京：地震出版社.

王焕，李海兵，司家亮，等，2013. 汶川地震断裂带结构特征与龙门山隆升的关系[J]. 岩石学报，29(6)：2048-2060.

王拓，2020. 强震地表破裂下条形基础避让距离研究[D]. 三河：防灾科技学院.

王赞军，党光明，张瑞斌，等，2002. 昆仑山口西 8.1 级地震地表破裂的类型与性质[J]. 高原地震，14(1)：17-25.

吴景发，2009. 汶川地震灾后重建断层避让距离研究[D]. 哈尔滨：中国地震局工程力学研究所.

吴琼，李海兵，CHEVALIER M L，等，2021. 鲜水河断裂带乾宁段岩石特征与内部结构及其物理-化学性质[J]. 岩石学报，37(10)：3204-3224.

吴中海，2019. 活断层的定义与分类：历史、现状和进展[J]. 地球学报，40(5)：661-697.

吴中海，2022. 活断层与工程应用 I：定义与分类[J]. 地球科学与环境学报，44(6)：922-947.

吴章明，申屠炯明，曹忠权，等，1990. 1411 年西藏当雄南 8 级地震地表破裂[J]. 地震地质，12(2)：98-108.

许冲，2015. 利用同震滑坡分析 2014 年鲁甸地震震源性质与破裂过程[J]. 工程地质学报，23(04)：755-759.

徐锡伟，于贵华，马文涛，等，2002. 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定的依据与方法[J]. 地震地质，24(4)：470-483.

徐锡伟，闻学泽，于贵华，等，2005. 川西理塘断裂带平均滑动速率、

地震破裂分段与复发特征[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (6): 540-551.

徐锡伟, 2006. 活动断层、地震灾害与减灾对策问题[J]. 震灾防御技术, 1(1): 7-14.

徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 等, 2008a. 昆仑山地震(M_W7.8)破裂行为、变形局部化特征及其构造内涵讨论[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (7): 785-796.

徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等, 2008b. 汶川 M_S8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 30(3): 597-629.

徐锡伟, 郭婷婷, 刘少卓, 等, 2016. 活动断层避让相关问题的讨论[J]. 地震地质, 38(3): 477-502.

徐锡伟, 陈桂华, 2018. 活动断层避让问题探讨与建议[J]. 城市与减灾(1): 8-13.

于贵华, 徐锡伟, 陈桂华, 等, 2009. 汶川 8.0 级地震地表变形局部化样式与建筑物破坏特征关系初步研究[J]. 地球物理学报, 52(12): 3027-3041.

袁丽侠, 2005. 宁夏海原地震诱发黄土滑坡的形成机制研究: 以西吉地区地震诱发黄土滑坡为例[D]. 西安: 西北大学.

臧万军, 2017. 汶川地震公路隧道震害规律研究[J]. 现代隧道技术, 54(2): 17-25.

张建毅, 薄景山, 袁一凡, 等, 2012. 活动断层及其避让距离研究综述[J]. 自然灾害学报, 21(2): 9-18.

张克旗, 吴中海, 周春景, 等, 2020. 川西理塘断裂带奔戈-村戈段古地震事件及其非均匀性活动特征[J]. 地质学报, 94(4): 1295-1303.

张献兵, 杨镇, 钟宁, 等, 2024. 川西理塘断裂晚第四纪活动性及古地震复发特征[J]. 地质学报, 98(7): 2084-2100.

张永双, 孙萍, 石菊松, 等, 2010. 汶川地震地表破裂影响带调查与建筑场地避让宽度探讨[J]. 工程地质学报, 18(3): 312-319.

张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等, 2016. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报, 37(3): 277-286.

赵国华, 2014. 川滇块体内理塘断裂活动性及其构造地貌研究[D]. 成都: 成都理工大学.

赵纪生, 吴景发, 师黎静, 等, 2009. 汶川地震地表破裂周围建筑物重建的避让距离[J]. 地震工程与工程振动, 29(6): 96-101.

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.

中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010. 建筑抗震设计规范(GB50011—2010). 北京: 中国建筑工业出版社.

中国地震局地壳应力研究所, 2019.《活动断层避让》(征求意见稿)[R]. 北京: 中国地震局地壳应力研究所.

钟宁, 2017. 岷江上游晚更新世湖相沉积的古地震及物源分析[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.

周春景, 吴中海, 张克旗, 等, 2015. 川西理塘活动断裂最新同震地表破裂形成时代与震级的重新厘定[J]. 地震地质, 37(2): 455-467.

周庆, 徐锡伟, 于贵华, 等, 2008. 汶川 8.0 级地震地表破裂带宽度调查[J]. 地震地质, 30(3): 778-788.