DOI：10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2019. 25. 06. 095
文章编号：1006-6616（2019）06-1116-13

青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究现状

白永健[1,2]，倪化勇[1]，葛　华[1]
（1. 中国地质调查局成都地质调查中心，四川 成都 610081；
2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，四川 成都 610059）

摘　要：青藏高原东南缘不同性质、不同类型、不同特点活动断裂发育且较为活跃，自 2008 年汶川地震发生以来，相继发生了玉树地震、庐山地震、鲁甸地震等。地震引发、触发、诱发产生了大量地质灾害，造成了惨重的生命财产损失。通过收集与分析相关资料，对青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究进展与取得成果进行了归纳总结，从活动断裂地质灾害主要控制因素，地质灾害发育特征、空间分布规律、演化模式、形成机制，不同性质断裂控制效应、断裂两盘差异效应、地震动参数效应、地形地貌效应等地质环境效应和地质灾害力学效应等方面进行了综述。在此基础上，对活动断裂地质灾害效应研究中存在的如不同类型活动断裂和不同震级地震与地震地质灾害相关性、以及地震地质灾害监测与风险评估等问题或重点研究方向进行了探讨，其研究结果为地震地质灾害致灾机理、风险评估、防灾减灾等研究提供参考。

关键词：青藏高原东南缘；活动断裂；地质灾害效应；内外地质动力

中图分类号：P553；P694　**文献标识码：**A　**开放科学（资源服务）标识码（OSID）：**

ADVANCES IN RESEARCH ON THE GEOHAZARD EFFECT OF ACTIVE FAULTS ON THE SOUTHEASTERN MARGIN OF THE TIBETAN PLATEAU

BAI Yongjian[1,2], NI Huayong[1], GE Hua[1]
(1. *Chengdu Center of China Geological Survey*, *Chengdu* 610081, *Sichuan*, *China*;
2. *Station Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-Environment Protection*, *Chengdu* 610059, *Sichuan*, *China*)

Abstract: Active faults of different properties, types and characteristics, developing on the southeastern margin of the Tibetan Plateau, are relatively active. Since the Wenchuan earthquake in 2008, there have occurred several earthquakes, including the Yushu earthquake, Lushan earthquake, Ludian earthquake and other earthquakes, which induced a large number of geological disasters and leaded to catastrophic

基金项目：国家重点研发计划（2018YFC1505406）；国家自然科学基金（41702374）；中国地质调查局项目（DD20190640）；支撑川藏科技攻坚战项目（20190505）

作者简介：白永健（1982-），男，在读博士，高级工程师，研究方向为岩土体稳定性及地质灾害防治。E-mail：byj209@ 126. com

收稿日期：2019-06-15；**修回日期：**2019-08-29；　**责任编辑：**范二平

引用格式：白永健，倪化勇，葛华. 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，2019，25（6）：1116-1128 DOI：10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2019. 25. 06. 095

BAI Yongjian, NI Huayong, GE Hua. Advances in research on the geohazard effect of active faults on the southeastern margin of the Tibetan Plateau［J］. Journal of Geomechanics, 2019, 25（6）: 1116-1128 DOI: 10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2019. 25. 06. 095

losses of life and property. Based on data collection and analysis, advances in the earthquake geohazard on the southeastern margin of the Tibetan Plateau are summarized. Geohazard effect of active faults including the main control factors of geological disaster, spatial distribution regularity, evolution pattern and formation mechanism, the geological environment effect such as active faults with different properties, the difference between two plates, ground motion parameters and topography, and mechanical effects of geological hazards are analyzed. Then the main problems or key research directions in the study of the geological disaster effect of active faults, such as the correlation between the active faults with different properties, the earthquake with magnitude and geological disasters, and the seismic geological disaster monitoring and risk assessment, are put forward. The results can provide strong support for the study of the mechanism, risk assessment, disaster prevention and reduction of seismic geological disasters.

Key words: southeastern margin of the Tibetan Plateau; active fault; geohazard effect; inner and outer geological dynamics

0　引言

活动断裂是晚更新世 10~20 Ma 以来一直在活动，未来可能再次重新活动的各类断裂[1-3]。活动断裂不论其出露于地表或者隐伏于地下，都是现代地壳的差异活动带构成的不稳定区，是产生各种不良地质现象的主要控制因素[4-5]。活动断裂突发性错动不仅导致地表破裂形成地裂缝、地表破裂带和直接错断地表建（构）筑物等，强地面震动还可诱发崩塌、滑坡、碎屑流、砂土液化等次生地质灾害[6-8]。青藏高原东南缘受持续强烈的隆升作用，发育大量不同性质、不同方向、不同规模的活动断裂，活动断裂产生和诱发了不同类型的地震地质灾害。2008 至 2017 年研究区内先后发生了汶川地震、玉树地震、彝良地震、庐山地震、岷县漳县地震、鲁甸地震、九寨沟地震，造成了惨重的生命财产损失[1,9-10]。

青藏高原在向东挤出过程中，形成了显著的地形地貌、地质构造分异带，区域内活动断裂异常活跃，且伴随着大量的地质灾害发生，因此，活动断裂与地质灾害相关性研究是现代构造地质学和工程地质学研究的热点问题。彭建斌等[11]在研究青藏高原隆升的地质灾害效应时，发现青藏高原的强烈隆升为地质灾害发生提供了有利的地形地貌、地质构造和气候环境条件，加之强烈的构造变形，造成研究区内地质灾害高易发[9]。吴珍汉等[12]研究青藏铁路沿线断裂活动地质灾害效应后，认为不同性质、类型和特点的活动断裂不仅孕育和诱发地震地质灾害，还诱发不均匀冻胀、构造裂缝、移动冰丘等地质灾害，严重影响铁路工程的安全。张永双等[3-4]通过对青藏高原东缘典型地质灾害案例研究，提出活动断裂影响地形地貌和岩体结构，断裂强烈活动不仅导致大量地质灾害发生，同时，断裂缓慢蠕滑作用也影响区域内斜坡应力场的变化和稳定性，断裂活动是地质灾害产生的源头。黄润秋等[7]通过研究汶川地震触发的数以万计崩滑流等地质灾害的断层效应时，发现地质灾害的发育分布具有明显的上下盘效应、距离效应、转折段集中效应和方向效应。成玉祥等[13]对天水地区断裂活动调查和测试后，总结了断裂活动性与地质灾害发育程度之间的密切关系。综上所述，活动断裂地质灾害效应研究已成为地质灾害研究领域的新趋势。文章在大量研究成果基础上，通过资料收集，对活动断裂地质灾害效应研究进展与取得的成果进行归纳总结，对在活动断裂地质灾害效应方面研究需进一步考虑的问题和建议进行讨论和分析，其研究结果为地震地质灾害致灾机理、风险评估、防灾减灾等研究提供参考。

1　活动断裂概述

青藏高原在向东挤出过程中，高原东南缘形成了显著的地形地貌、地质构造分异带，成为强烈构造活动区，称之为南北构造带[9]。地壳东向运动过程中不均匀的部位形成了不同性质和不同规模的活动断裂带，主要包括龙日坝、龙门山、岷江、甘孜-玉树、理塘、鲜水河、安宁河、则木

河、大凉山、小江、昭通-鲁甸、丽江-小金河、玉龙雪山北麓、曲江、红河、金沙江、龙陵-澜沧、南汀河、班公湖-怒江、雅鲁藏布江等断裂带，这些断裂带也是主要的边界断裂，控制着区内新构造活动的发展和演化[14]。活动断裂对地震的发生和分布具有显著的控制作用，近年来在这些活动断裂带上已经发生了多次地震，造成了惨重的生命财产损失（表1）。如：龙门山断裂带2008年发生汶川地震，甘孜-玉树断裂带2010年发生青海玉树地震，昭通-鲁甸断裂带2012年发生彝良地震、2014年发生鲁甸地震，龙门山断裂带南西段2013年发生芦山地震，临潭-宕昌断裂2013年发生岷县漳县地震，塔藏、虎牙、岷江三条断裂交汇处2017年发生九寨沟地震（表2）。

表1 青藏高原东缘近十年地震及人员伤亡

Table 1 Earthquakes and loss of life on the eastern margin of the Tibetan Plateau in recent ten years

序号	地震	发震时间	震级/*M*s	受灾死亡/人	受灾失踪/人	受灾/人	地质灾害/处	来源
1	汶川地震	2008.5.12	8.0	69197	618209	374176 213.33万	56000 33（堰塞湖）	张培震等[15] Dai et al[16]
2	玉树地震	2010.4.04	7.0	2698	270	11486	2000	吴中海等[17]
3	彝良地震	2012.9.07	5.7、5.9	80	0	74.4万	448	吴中海等[17]
4	庐山地震	2013.4.27	7.0	196	121	152万	2981	裴向军等[18]
5	岷县漳县地震	2013.7.22	6.6	91	5	12.3万	634	殷志强等[19]
6	鲁甸地震	2014.8.03	6.5	617	2112	108.84万	1700	殷志强等[20]
7	九寨沟地震	2017.8.08	7.0	25	6	17.6万	238	徐锡伟等[14]

表2 青藏高原东南缘主要发震活动断裂特征

Table 2 Characteristics of main active faults on the southeastern margin of the Tibetan Plateau

序号	断裂名称	深度类型	滑动性质	活动时代	近代代表性地震	水平速率/(mm/a)	垂直速率/(mm/a)
1	龙门山断裂	岩石圈	逆冲右旋走滑	全新世	2008年M_S8.0汶川地震， 2013年M_S7.1芦山地震	2.0~3.0	1.0±
2	鲜水河断裂带	地壳	左旋走滑	全新世	1973年M_S7.6炉霍地震	2.0±0.2~13±5	<2.0~3.2±0.7
3	安宁河断裂带	岩石圈	左旋走滑	晚更新—全新世	1732年M_S7.0西昌地震	0.5~8.5	1.0~2.3
4	则木河断裂带	地壳	左旋走滑	全新世	1850年M_S7.5西昌普格地震	4.90~7.90	
5	小江断裂带	地壳	左旋走滑	全新世	1970年M_S7.7通海地震	3.37±3.20~3.29±2.73	0.9±~1.0
6	班公湖-怒江断裂带	岩石圈	逆冲走滑	晚更新—全新世	2011年M_S7.2缅甸地震		
7	金沙江-红河断裂带	地壳	逆冲走滑	晚更新—全新世	1989年M_S6.7巴塘地震	6~7	2~3
8	昭通—鲁甸断裂带	地壳	右旋走滑	全新世	2012M_S5.7、5.9彝良地震， 2014年M_S6.5鲁甸地震		
9	岷江断裂	岩石圈	逆冲左旋走滑	全新世	$M_S\geqslant$6.0地震6次， $M_S\geqslant$7.0地震3次	≤0.2	0.37~0.53
10	虎牙断裂	岩石圈	逆冲左旋走滑	全新世	2017年M_S7.0九寨沟地震	1.4~2.55	0.3~0.5

2 现状与进展

活动断裂地质灾害效应主要受地形地貌、地层岩性、新构造运动、发震断裂性质等因素控制[21-22]。地质灾害发育特征主要包括地质灾害类型、发育方向、运移特征、形成机制和空间分布规律等。地质环境孕灾效应主要包括不同性质断裂控制效应、断裂两盘差异效应、地震动参数效应、地形地貌效应。地质灾害力学效应主要表现为活动断裂控制岩体结构及破裂机制，控制岩体应力应变机制。

2.1 灾害发育特征效应

（1）地质灾害类型。许多学者认为活动断裂诱发地震灾害属于地质灾害的范畴，应从地震地质灾害的成因机制、成灾方式和承载体对地震地质灾害效应进行分析。首先将地震引起的地质灾害划分为地震构造力的直接破坏，包括地表直接破坏、岩体破坏、土体破坏和水体破坏；再将其分为直接破坏和间接破坏效应；最后根据成因将其分为构造破坏、振动破坏和诱发效应[23-24]。直接破坏主要表现为地震作用下的山体剥皮松动、

地表破裂、地面塌陷、砂土液化和斜坡失稳等；间接破坏主要表现为诱发如泥石流、堰塞湖、地震涌浪、诱发水库地震等次生地质灾害[25-28]。一些学者将地震地质灾害划分为地震灾害、地震触发地质灾害、地震诱发地质灾害。地震灾害主要包括地表出现陡坎，地表破裂、鼓包，山体崩滑、砂土液化等地表变形现象。地震触发地质灾害主要包括山体滑坡、山体滑塌、岩块崩塌与砂土液化。地震诱发地质灾害隐患主要包括潜在滑坡、危岩体与崩塌隐患及泥石流等灾害隐患[29]。部分学者从灾害性质分析认为断错、地裂缝等属于地质灾害；地震、砂土液化等属于地震灾害；滑坡和岩崩既属于地质灾害，又属于地震灾害。同时，也有学者对比研究芦山地震和鲁甸地震诱发的滑坡，发现大多数 M_S 7.0 级以下强度的地震触发的滑坡具有浅表层滑动和山剥皮松动等现象，而极端暴雨诱发的滑坡主要表现为深层滑动[30-31]。也有学者认为强地震波直接导致强地面运动破坏建构筑物，地表破裂带直接撕裂建构筑物，强地面振动和地表破裂错动导致崩塌、滑坡等地质灾害摧毁或掩埋建构筑物[32-33]。强地震后往往伴随链式地质灾害发生，即地震形成大量的松散崩滑堆积体，降雨作用下崩滑堆积体演变为碎屑流、泥石流、滑坡、崩塌等灾害[4]。

（2）地质灾害发育方向。其主要受地形条件和地震波在垂直断层方向传播等因素控制。地震发生时，震源区的介质发生急速破裂和运动构成一个波源，在连续介质中向地球内部及地表传播形成地震波[7,34-35]。而发震断层方向性对地震波的传播具有控制作用，垂直断层方向的地震波在地面运动最强，将坡体在这个方向上震裂、松动、抛出，形成“抛射型”大型滑坡、崩塌等地质灾害，他们运动方向大多与发震断层的走向垂直或大角度斜角[36-37]。

（3）地质灾害运移形成机制。当活动断裂从软弱岩质斜坡中部通过时，在断裂和降雨等条件耦合作用下从断裂处启动形成推移式滑坡[38-40]。地震地质灾害中高位震裂型滑坡最为发育，其运移模式可概括为近活动断裂两侧高位震裂斜坡体在地震波强地面运动“抛射”作用下高速启动，在重力作用下加速飞越，受地形控制作用下俯冲着陆碰撞、解体，远程碎屑状流动，最终堆积停滞等[41-43]。许多学者对地震地质灾害形成机制运用不同理论进行了归纳总结：①运用地质力学理论将地震滑坡形成机制划分为震裂型、抛射型、剥皮型、溃滑型、溃崩型 5 个大类 14 个小类[44-46]。许强等[45]揭示了汶川地震诱发的大型崩滑灾害具有震裂溃屈、临空抛射和碎屑流化等动力学运动特征。冯文凯等[46]认为强震斜坡变形破坏模式主要表现为旋转拉裂、旋转剪滑、鼓胀拉裂和滑移拉裂 4 种形式。②运用地质力学与空气动力学理论，孙萍等[47]认为地震初始启动过程可划分为初始、地震抛掷、撞击崩裂、高速滑流 4 个阶段；在高速流滑中，伴随发生高速气垫、碎屑流、铲刮等 3 种效应。石菊松等[48]认为地震诱发的滑坡，表现为高速远程、碎屑化和明显的气爆与气浪效应等特点。③运用地质学、灾害学、工程地质学等多学科理论，地震地质灾害形成是由内外动力耦合作用产生的，包括活动断裂和风化作用的耦合、岩土体结构与变形模式的耦合、地震力与地形地貌的耦合和地震力与地下水的耦合。断裂活动控制斜坡结构的演化，断裂带内岩体破碎程度高、岩土力学性质差，致使大型滑坡发育[49-50]。④运用试验、数值模拟等方法，已有学者通过对地震条件下斜坡动力响应的现场监测、大型振动台模拟试验以及大量三维动力数值模拟等综合手段，系统地研究了地震条件下斜坡动力响应规律，认为强震条件下大型滑坡失稳破坏最基本的破坏模式表现为拉裂-顺走向滑移型、拉裂-顺倾向滑移型、拉裂-水平滑移型、拉裂-散体滑移型、拉裂-剪断滑移型等[30,42]。

2.2　空间分布规律效应

地质灾害的空间分布主要受地形地貌、地层岩性和人类工程活动等因素的影响，还与发震断裂密切相关。发震断裂的活动性质、地震动峰值加速度、震区地形坡度和高差、距断裂带和水系的距离等因素直接影响地震地质灾害的空间分布[51]。

（1）地震地质灾害沿活动断裂呈带状分布。在区域上地震地质灾害主要沿发震断裂带呈“带”状分布，且断层两侧地质灾害数量随与断层距离的加大而迅速减少[52-53]。汶川地震后距断层 1~2 km范围内是地质灾害高发育区，距断层上盘 7~11 km 范围和下盘 0~5 km 范围为地质灾害中等发育区[7]。郭婷婷等[54-55]研究汶川地震后地质灾害，发现发震断裂两侧地表产生两条相互平行相距 15~

20 km 地表破裂带，沿破裂带产生了大量的滑坡。玉树地震后，彭亮等[34]根据现场调查结合遥感解译，发现地质灾害沿巴塘河谷至结古镇一带密集发育，呈带状分布，且规模大，且距离发震断裂越远，地质灾害发育越少。张永双等[4]认为在断裂转折、交叉、突出山体等部位地质灾害密集发育，如安宁河断裂与南河断裂交汇处、安宁河断裂与则木河断裂交汇处、则木河断裂与小江断裂交汇处等。

（2）地震地质灾害沿河流、大型线路工程呈线状分布。研究认为地质灾害分布不仅受发震断层控制，也与河流和大型线路工程，如铁路、公路、管道等人类工程活动等密切相关。汶川地震受灾区内地质灾害在岷江、沱江、嘉陵江、大渡河、雅砻江等河岸斜坡坡度 20°~50°和高程 1500~2000 m 以下的河谷密集发育，堵塞或挤压河道，灾区内多条铁路、21 条高速公路、16 条国省干线公路地质灾害密集发育[32-33]。

（3）地质灾害呈区块状密集分布，断裂的转折和错列部位在断层作用下，会发生更深的剪断和破裂现象，地震时产生应力集中，地质灾害发育密度大，且受地形坡度控制也较为显著。断裂的转折和错列部位是断层的局部“锁固段”，它们在地震过程中，由于断层整体的错动而被进一步的剪断、破裂，从而释放出更多的能量，产生更为强烈的震动，形成次级“震源”和地质灾害的集中发育区[36,56-57]。郭晓花在研究鲁甸地震地质灾害后发现，灾区内地质灾害并未沿断层呈线性展布、而是呈面状分布[58]。杜宇本等[59]研究发现地形坡度由缓变陡的过渡转折部位、单薄的山脊部位、孤立山头或多面临空的山体部位，地质灾害密集分布。

2.3 灾害地质条件效应

（1）活动断裂性质及两盘效应。研究发现逆冲型断裂地震相对于走滑型断裂和正断层型地震其破坏力更大，逆断层控制构造裂缝带的宽度与断距比值远远大于走滑断层，压扭性的走滑断层控制的构造裂缝带的宽度与断距比值又远大于张扭性走滑断层[60]。周庆等研究认为逆冲型断层地震上、下盘同震地表变形和震动有较强的不对称性，上盘比下盘更强烈[53,61]。而张文峰[62]研究走滑断层引起的地质灾害的分布规律时，发现断层两盘差别不大。汶川地震发震断裂性质属于逆冲兼右旋走滑断层，Kiani 研究发现在地质灾害分布上具有明显上下盘效应，断层上盘较下盘地质灾害分布密度大、延伸距离远，且地质灾害的规模也较下盘大[63]。玉树地震发震断裂性质属于左旋走滑断层，薛东剑等[64]研究发现地震断裂两侧地质灾害发育分布存在一定的差异，断层两侧500 m 范围为地质灾害最强发育区，两盘灾害分布密度相同；500~1000 m 范围为强发育区，断裂北盘影响范围远大于南盘，且灾害点的分布密度大，约 2.8 倍；距离大于 1000 m 后，南盘地质灾害明显不发育，而北盘分布密度较大。鲁甸地震发震断裂属于逆断层，徐锡伟等[14]研究认为断层下盘变形量和次生破裂较少，仅局部可见次级小型逆断层或挤压隆起；逆断层上盘近断层区域发育大量裂缝。

（2）地震动参数效应。①与发震断裂距离关系，殷志强等[65]研究发现距发震断层越近，地震波对地表斜坡的作用越强，就越容易诱发产生地质灾害，且规模较大；而距发震断裂越远地质灾害规模相对较小，这种规律反映了震中距、烈度与地质灾害在数量、规模等方面有直接关系。许冲等[66]研究汶川地震地质灾害与发震断裂距离发现，发震断裂上盘 8 km（特别是 1~2 km）范围是地震地质灾害的高发育区，断层上盘 8~18 km 和下盘 0~5 km 为中等发育区。②与地震烈度关系，地质灾害的分布与地震烈度呈正相关关系。李秀珍等[67]研究总结汶川地震地质灾害主要集中发育在 IX 度及其以上烈度区内，其中 XI 度区与 X 度区地质灾害发育密度变化较小。郭小花等[58]研究玉树地震地质灾害分布规律发现，地质灾害主要集中于 VII 度以上烈度区，越靠近高烈度区地质灾害数量越多。其中 IX 度烈度区地质灾害发育密度最高；VII 和 VIII 度烈度区地质灾害发育次之，灾害破坏程度也较低。③与地震动峰值加速度关系[59]，刘学增等[68]通过研究地质灾害与动峰值加速度关系，发现在大于某个峰值加速度阈值时，地质灾害发育密度明显增多。

（3）地形地貌效应。断裂既然控制陡坡形成，同时也为动力放大、地形放大效应提供了基础，其本质是应力与地形的耦合作用[37,69]。①斜坡坡度，斜坡坡度对地质灾害具有明显控制作用，李忠生等研究认为 斜坡存在着一个坡度范围值容易引发地质灾害，如昭通地震引发的滑坡多发生在

坡度为 35°~45°的斜坡上，炉霍地震引发的滑坡多发生在坡度为 30°~50°的斜坡上，云南丽江地震引发的滑坡多发生在坡度为 25°~45°斜坡上[35,70]。戴俊生和 Parsons 等[71-72]认为大部分地质灾害集中发育在坡度 30°~50°的斜坡上，且多发育在地形坡度由缓变陡的转折坡肩带。②斜坡高程，石崇等[73]研究发现斜坡的高程放大效应是由于斜坡自由面的反射作用形成的，岩体参数和斜坡倾角是影响斜坡高程放大效应的主要因素。③斜坡形状，王栋和罗永红等[34,74-75]研究发现局部突出地形和地形坡度由缓变陡的过渡转折坡肩带、孤立山头、单薄的山脊部位、或多面临空的山体，都是地质灾害高易发区。

2.4　灾害力学机制效应

（1）控制岩体结构及破裂机制，岩石经历多次构造运动破坏，岩体中的片理和裂隙发育，加之后期遭受强烈风化和剥蚀，岩体强度降低，导致滑坡、崩塌等不良物理地质现象普遍[34]。发震断裂的两盘地震动强度不同造成两侧一定区域内震害也存在显著差异，如正断层上盘是运动盘，上盘岩石的破坏程度较下盘强烈，裂隙发育；而上、下盘岩层中存在的牵引褶皱可能产生层间剪切滑动，使断层泥具有剪薄、拖曳和涂抹等结构形态变化，导致地质灾害高易发[34]。Ashtiani 等[76]研究发现逆断层内整体上距断裂越近，构造裂缝越高；距断裂越远，裂缝发育逐渐减少，在断裂两侧存在一个裂缝发育骤降的临界距离，在临界范围内地质灾害高易发。方华等[33]研究认为在断层形成过程中，距主断层两侧一定范围发育派生或伴生的次级构造，形成节理密集发育带，其岩体在物理力学特性上与正常围岩有显著差异。Cai 和 Ng 等[4,77-78]在青藏高原东缘研究中发现，断裂的蠕滑作用对滑坡和泥石流的控制作用明显。白永健和戴俊生等[13,79]研究发现岩石经历多次构造运动破坏后，在地壳浅层中广泛发育断层和节理，这类结构面破坏岩体结构的完整性，控制岩体的物理力学特性。

（2）控制岩体应力应变机制。谢富仁等[4,80]研究认为从区域上来讲大型断裂控制了区域构造应力场的分布；从小范围来讲在褶皱和断裂构造附近，应力场多发生异常变化，形成与区域应力场不一致的局部应力场，导致坡体结构遭受严重破坏，而产生的地质灾害规模更大、破坏性更强。佟彦明等[81]采用大型物理模拟试验研究叠瓦状逆断层的变形和应力分布规律时，发现断裂带深部变形量大于浅表层；水平向变形量随挤压端距离的增大而减小，且多伴有跳跃性增大。王恩营等[82]研究认为岩石在张应力作用下，超过其抗张强度形成张性破裂；在压应力作用下则形成剪性破裂。

3　展望与建议

尽管活动断裂地质灾害效应研究已经取得了大量的成果，但还远远不能满足为减灾防灾的需求提供有力的支撑。由于断裂引发地震，地震诱发地质灾害的孕灾环境、致灾机理、成灾模式的复杂性，许多理论、技术、方法仍处于资料积累、调查探索阶段[83-84]。因此，在断裂控制地震地质灾害的发生机制、风险评估和防灾减灾方法等方面有待深入的研究。地震地质灾害是地表岩土体在内外地质动力物理作用的必然结果。在地表岩土体演化过程中，何种地表岩土体在地震作用下会产生地质灾害，即地震地质灾害的地质力学机制是什么？断裂是如何与地表岩土体发生作用而引起地表岩土体变形失稳，即地震地质灾害的内外动力耦合作用机理是什么？有的地震产生了大量的灾害，而有的没有产生地质灾害，即怎样对地震地质灾害进行风险评估？如何针对不同性质断裂、不同发震断裂地质力学机制、不同内外地质动力耦合作用以及不同程度地震地质灾害进行防灾减灾？2008 年汶川地震后，许多学者对以上问题进行了全面调查、深入分析、物理和数值模拟试验、以及理论等方面的研究和探索[85-86]，但至今未完全掌握活动断裂的地质灾害效应，未系统地揭示地震地质灾害的成灾机理，未全面的深入的对地震地质灾害的风险进行研究。本文根据已有研究成果进行归纳总结，提出了针对活动断层地质灾害效应，地震地质灾害的主要问题与重点研究方向。

3.1　活动断裂与地震地质灾害研究

近年来青藏高原东南缘新构造运动活跃地震频发，同时也是研究活动断层和潜在的地震地质灾害的主要区域，应系统地加强青藏高原东南缘区域构造地质条件研究、梳理断裂构造地质特征和力学特性、监测活动断裂运动特征、剖析发震

断裂引发地震的机制。

建立青藏高原东南缘地震地质灾害管理系统：当前研究区地震地质灾害调查结果相差较大，多数研究的基础数据并不全面和统一。应进一步完善青藏高原东南缘地质灾害数据，以建立一个更加完整科学的青藏高原东南缘地震地质灾害数据库，以此为基础开展更客观的地震地质灾害区域分布规律、评价、探索活动断层控制地质灾害效应等研究。

3.2 不同类型活动断裂与地质灾害关系研究

（1）活动断裂与地质灾害关系研究

目前活动断裂与地质灾害关系多从地质灾害区域发育特征进行归纳总结，如：地质灾害类型、规模、空间分布规律；地质灾害与断裂空间关系、地质灾害与地震动力学参数关系等。很少系统地对比研究不同类型的断裂如正断裂、逆断裂、走滑断裂、逆冲断裂等对地质灾害形成的控制效应研究。活动断裂对地质灾害发育特征影响方面的研究也较少，且大多停留在地质灾害分布与活动断裂断块的距离关系、地质条件关系方面进行简单统计分析，并没有对活动断裂直接或间接导致地质灾害产生内外地质力学关系进行研究。

（2）活动断裂控制地震地质灾害地质力学机制研究

目前对地震地质灾害形成机制以单因素或多因素研究为主，系统性地从地质灾害内外地质动力耦合作用下研究地质力学机制较少。单因素或多因素简单组合研究典型地质灾害发育特征或形成机理易于掌握。但是多因素内外地质动力耦合作用下地质灾害形成地质力学机制复杂，理论分析、试验手段、模拟方法要求较高不易掌握。总体上，地震地质灾害地质力学机制研究的重点是根据内在地质构造、断裂活动特性、引发地震力学机制，和外在斜坡地形地貌、地质特征以及降雨与斜坡的作用模式，在多因素耦合作用下建立地质模型，并进行地震地质力学机制研究。但这方面的研究目前还较少。

（3）活动断裂控制地震地质灾害形成机理研究

目前对地震地质灾害形成机理主要根据地质灾害发育特征、运动特征等进行研究。很少系统地从断裂特征、力学特性，引发地震形成地质力学机制、地震动力参数等内动力角度进行地质灾害形成机理和对比研究。

（4）不同类型活动断裂与地质灾害之间的关系研究

分析不同类型断裂的地质力学特性，及引发地震产生地质灾害发育特征、空间分布规律。对比分析不同类型断裂与地质灾害之间的关系、归纳总结规律。

（5）不同类型断裂引发地质灾害地质力学机制及模拟验证分析

通过对不同类型活动断裂引发地质灾害运移模式进行归纳总结，并分析活动断裂地质力学性质和发震机制；分析典型地质灾害体的地形地貌、地层岩性与工程地质岩组特征、斜坡岩体结构、水文地质结构特征。研究不同类型活动断裂与地质灾害之间的地质力学关系，建立地质力学模型并提出理论分析；通过物理模拟和数值模拟进行反演分析验证。

3.3 不同震级地震与地质灾害关系研究

不同震级地震引发地质灾害地质力学机制及模拟验证分析：通过分析不同震级的地震，进行地表破裂、运动、能量进行多要素监测；对比分析不同震级地震引发地质灾害的发育特征、空间分布规律、运移模式；对地震引发的典型地质灾害进行地形地貌、岩性与工程地质岩组特征、斜坡岩体结构及水文地质结构特征等调查；研究不同震级地震与地质灾害之间的地质力学关系，建立地质力学模型并提出理论分析；通过物理模拟和数值模拟进行反演分析验证。

3.4 地震地质灾害监测与风险评估研究

（1）地震地质灾害动态监测及风险评估研究

目前该项工作还主要从事的是地质灾害静态监测和风险评估等。应加强活动断裂变形运动数据监测、对断裂两盘附近的地形地貌、地层岩性、岩土体结构进行系统监测和测绘。此外，地质灾害受灾体也可能随时间变化，如新农村建设后在新的地点建成新的城镇，这样地震地质灾害致灾后果就明显不同，因此，地质灾害风险是动态变化的，相应的地质灾害风险评估也应当有效地反映受灾风险随时间变化的特性。地震地质灾害的动态风险评估是促使地质灾害风险评估在防灾减灾中应用的关键问题[87]。

（2）地震地质灾害动态风险评估方法研究

研究考虑断裂地质力学特性、地震物理力学

特性、时间效应的地质灾害发生概率评估方法，研究不同类型断裂、不同震级地震在不同的工程地质条件下，所产生地质灾害威胁范围、破坏程度、地质灾害产生后果（人员伤亡、财产损失、社会及环境的影响）等多种属性评价模型，复杂条件下地震地质灾害动态风险评估方法，探索适合中国国情的地震地质灾害风险承受准则。

4　结论

青藏高原东南缘不同类型活动断裂发育且运动较为活跃，地震频发，不仅造成巨大经济损失，而且导致重大人员伤亡。活动断裂引发地震地质灾害产生的地质力学机制、地震地质灾害产生的动力来源与成灾机理是核心科学问题；不同类型活动断裂、不同震级地震引发地质灾害发育特征、空间分布规律、形成地质力学机理、震后运移演化模式等问题，是断裂控制地质灾害效应研究的关键技术问题。围绕上述科学与技术问题需要开展现场地质调查、数据库建设、理论分析、物理或数值模拟反演分析，震后地质灾害运移演化趋势、实时监测预警、动态时空风险评估等系统的研究。同时，需要构造地质、工程地质、灾害地质、岩土力学等多学科交叉综合研究，从而系统地揭示活动断裂引发地质灾害的地质力学机制、形成机理及演化规律。

参考文献/References

[1] 吴中海，张岳桥，胡道功. 新构造、活动构造与地震地质[J]. 地质通报，2014，33（4）：391-402.
WU Zhonghai，ZHANG Yueqiao，HU Daogong. Neotectonics，active tectonics and earthquake geology [J]. Geological Bulletin of China，2014，33（4）：391-402.（in Chinese with English abstract）

[2] 邓起东，闻学泽. 活动构造研究：历史、进展与建议 [J]. 地震地质，2008，30（1）：1-30.
DENG Qidong，WEN Xueze. A review on the research of active tectonics-history，progress and suggestions [J]. Seismology and Geology，2008，30（1）：1-30.（in Chinese with English abstract）

[3] 张永双，任三绍，郭长宝，等. 活动断裂带工程地质研究[J]. 地质学报，2019，93（4）：763-775.
ZHANG Yongshuang，REN Sanshao，GUO Changbao，et al. Research on engineering geology related with active fault zone [J]. Acta Geologica Sinica，2019，93（4）：763-775.（in Chinese with English abstract）

[4] 张永双，郭长宝，姚鑫，等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究 [J]. 地球学报，2016，37（3）：277-286.
ZHANG Yongshuang，GUO Changbao，YAO Xin，et al. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Acta Geoscientia Sinica，2016，37（3）：277-286.（in Chinese with English abstract）

[5] 郭长宝，杜宇本，张永双，等. 川西鲜水河断裂带地质灾害发育特征与典型滑坡形成机理 [J]. 地质通报，2015，34（1）：121-134.
GUO Changbao，DU Yuben，ZHANG Yongshuang，et al. Geohazard effects of the Xianshuihe fault and characteristics of typical landslides in western Sichuan [J]. Geological Bulletin of China，2015，34（1）：121-134.（in Chinese with English abstract）

[6] 彭建兵，马润勇，范文，等. 汶川大震的科学思考 [J]. 地球科学与环境学报，2009，31（1）：1-29.
PENG Jianbing，MA Runyong，FAN Wen，et al. Science contemplation for Wenchuan Earthquake of 12 May，2008 [J]. Journal of Earch Sciences and Environment，2009，31（1）：1-29.（in Chinese with English abstract）

[7] 黄润秋，李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析 [J]. 工程地质学报，2009，17（1）：19-28.
HUANG Runqiu，LI Weile. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology，2009，17（1）：19-28.（in Chinese with English abstract）

[8] 吴珍汉，张作辰. 汶川 8 级地震地质灾害的类型及实例[J]. 地质学报，2008，82（12）：1747-1757.
WU Zhenhan，ZHANG Zuochen. Types of seismic and geological hazards caused by theM_S 8.0 Wenchuan earthquake [J]. Acta Geologica Sinica，2008，82（12）：1747-1757.（in Chinese with English abstract）

[9] 杨志华，郭长宝，姚鑫，等. 考虑地震后效应的青藏高原东缘地质灾害易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报，2017，28（4）：103-112.
YANG Zhihua，GUO Changbao，YAO Xin，et al. Geohazard susceptibility assessment considering the long-term seismic effect in the eastern margin of Tibetan Plateau [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control，2017，28（4）：103-112.（in Chinese with English abstract）

[10] 王东坡，何思明，葛胜锦，等. “9·07” 彝良地震诱发次生山地灾害调查及减灾建议 [J]. 山地学报，2013，31（1）：101-107.
WANG Dongpo，HE Siming，GE Shengjin，et al. Mountain hazards induced by the earthquake of Sep 07，2012 in Yiliang and the suggestions of disaster reduction [J]. Journal of Mountain Science，2013，31（1）：101-107.（in Chinese with English abstract）

[11] 彭建兵. 中国活动构造与环境灾害研究中的若干重大问题[J]. 工程地质学报，2006，14（1）：5-12.
PENG Jianbing. Some important problems to be addressed in reseach of active tectonics and environmental disasters in China

[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14 (1): 5-12. (in Chinese with English abstract)

[12] 吴珍汉, 叶培盛, 吴中海, 等. 青藏铁路沿线断裂活动的灾害效应 [J]. 现代地质, 2003, 17 (1): 1-7.
WU Zhenghan, YE Peisheng, WU Zhonghai, et al. Hazard effects of active faulting along the golmud-lhasa railway across the Tibetan Plateau [J]. Geoscience, 2013, 17 (1): 1-7. (in Chinese with English abstract)

[13] 成玉祥, 张骏, 杜东菊. 天水地区断裂活动性与地质灾害的相关性研究 [J]. 工程地质学报, 2007, 15 (1): 33-37.
CHENG Yuxiang, ZHANG Jun, DU Dongju. On the relationship between fault activity and geological hazard in Tianshui area, Gansu province [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15 (1): 33-37. (in Chinese with English abstract)

[14] 徐锡伟, 陈桂华, 王启欣, 等. 九寨沟地震发震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论 [J]. 地球物理学报, 2017, 60 (10): 4018-4026.
XU Xiwei, CHEN Guihua, WANG Qixin, et al. Discussion on seismogenic structure of Jiuzhaigou earthquake and its implication for current strain state in the southeastern Qinghai-tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60 (10): 4018-4026. (in Chinese with English abstract)

[15] 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 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, 2013, 43 (10): 1607-1620.
ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Zhuqi, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China [J]. Scientia Sinica Terrae, 2013, 43 (10): 1607-1620. (in Chinese with English abstract)

[16] DAI F C, XU C, YAO X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 M_S 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. Journal of Asian earth Sciences, 2011, 40 (4): 883-895.

[17] 吴中海, 周春景, 冯卉, 等. 青海玉树地区活动断裂与地震 [J]. 地质通报, 2014, 33 (4): 419-469.
WU Zhonghai, ZHOU Chunjing, FENG Hui, et al. Active faults and earthquake around Yushu in eastern Tibetan Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33 (4): 419-469. (in Chinese with English abstract)

[18] 裴向军, 黄润秋. "4·20" 芦山地震地质灾害特征分析 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2013, 40 (3): 257-263.
PEI Xiangjun, HUANG Runqiu. Analysis of characteristics of geological hazards by "4·20" Lushan earthquake in Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40 (3): 257-263. (in Chinese with English abstract)

[19] 殷志强, 徐永强, 陈红旗, 等. 2013 年甘肃岷县-漳县 M_S6.6 级地震地质灾害展布特征及主控因素研究 [J]. 第四纪研究, 2015, 35 (1): 88-99.
YIN Zhiqiang, XU Yongqiang, CHEN Hongqi, et al. Study on the distribution characteristics of geohazards and the causative tectonic of the Minxian-Zhangxian M_S6.6 earthquake on 22 July, 2013, Gansu, China [J]. Quaternary Sciences, 2015, 35 (1): 88-99. (in Chinese with English abstract)

[20] 殷志强, 徐永强, 陈红旗, 等. 2014 年云南鲁甸地震触发地质灾害发育分布规律及与景谷、盈江地震对比研究 [J]. 地质学报, 2016, 90 (6): 1086-1097.
YIN Zhiqiang, XU Yongqiang, CHEN Hongqi, et al. The development and distribution characteristics of geohazards induced by August 3, 2014 Ludian earthquake and comparison with Jinggu and Yingjiang Earthquakes [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90 (6): 1086-1097. (in Chinese with English abstract)

[21] 李金臣, 潘华, 张志中. 青海玉树 7.1 级地震构造背景 [J]. 国际地震动态, 2010, (5): 1-5.
LI Jinchen, PAN Hua, ZHANG Zhizhong. The seismotectonic setting of Yushu M7.1 earthquake in Qinghai Province [J]. Recent developments in World Seismology, 2010, (5): 1-5. (in Chinese with English abstract)

[22] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析 [J]. 工程地质学报, 2009, 17 (1): 29-38.
YIN Yueping. Features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 17 (1): 29-38. (in Chinese with English abstract)

[23] 许冲. 环境地球科学之滑坡地震地质学 [J]. 工程地质学报, 2018, 26 (1): 207-222.
XU Chong. Landslide seismology geology: a sub-discipline of environ-mental earth sciences [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26 (1): 207-222. (in Chinese with English abstract)

[24] 钱海涛, 张力方, 修立伟, 等. 中国地震地质灾害的主要类型与分布特征 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41 (1): 119-127.
QIAN Haitao, ZHANG Lifang, XIU Liwei, et al. Types and distribution characteristics of earthquake induced geological disasters in China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41 (1): 119-127. (in Chinese with English abstract)

[25] KEEFER D K, LARSEN M C. Assessing landslide hazards [J]. Science, 2007, 316 (5828): 1136-1138.

[26] 王思敬, 黄鼎成. 中国工程地质世纪成就 [M]. 北京: 地质出版社, 2004.
WANG Sijing, HUANG Dingcheng. China engineering geology century achievement [M]. Beijing: Sciences Press, 2004. (in Chinese)

[27] 刘玉海, 陈志新, 倪万魁. 地震工程地质学 [M]. 北京: 地震出版社, 1998.
LIU Yuhai, CHEN Zhixin, NI Wankui. Seismic engineering geology [M]. Beijing: Seismological Press, 1998. (in Chinese)

[28] 蒋溥, 戴丽思. 工程地震学概论 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.
JIANG Fu, DAILisi. Introduction to engineering geology [M].

Beijing: Seismological Press, 1993. (in Chinese)

[29] 张铎，吴中海，李家存，等. 国内外地震滑坡研究综述 [J]. 地质力学学报，2013，19 (3)：225-241.
ZHANG Duo, WU Zhonghai, LI Jiacun, et al. An overview on earthquake-induced landslide research [J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19 (3): 225-241. (in Chinese with English abstract)

[30] 李为乐，伍霁，吕宝雄. 地震滑坡研究回顾与展望 [J]. 灾害学，2011，26 (3)：103-108.
LI Weile, WU Ji, LÜ Baoxiong. Research on landslide triggered by earthquake: review and prospect [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26 (3): 103-108. (in Chinese with English abstract)

[31] 方华，裴来政，向灵芝. 汶川地震高速远程滑坡速度研究 [J]. 防灾减灾工程学报，2011，31 (2)：212-217.
FANG Hua, PEI Laizheng, XIANG Lingzhi. Study on kinematic velocity of high-speed and long-range landslides induced by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31 (2): 212-217. (in Chinese with English abstract)

[32] 董树文，张岳桥，龙长兴，等. 四川汶川 M_S8.0 地震地表破裂构造初步调查与发震背景分析 [J]. 地球学报，2008，29 (3)：392-396.
DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, LONG Changxing, et al. Surface rupture investigation of the WenchuanM_S 8.0 earthquake of May 12th, 2008, West Sichuan, and analysis of its occurrence setting [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29 (3): 392-396. (in Chinese with English abstract)

[33] 何宏林，孙昭民，王世元，等. 汶川 M_S8.0 地震地表破裂带 [J]. 地震地质，2008，30 (2)：359-362.
HE Honglin, SUN Zhaomin, WANG Shiyuan, et al. Rupture of theM_S 8.0 Wenchuan Earthquake [J]. Seismology and Geology, 2008, 30 (2): 359-362. (in Chinese with English abstract)

[34] 彭亮，马兴华，金家琼，等. “4·14” 玉树地震断裂带对震后地质灾害影响作用分析 [J]. 自然灾害学报，2014，23 (5)：78-83.
PENG Liang, MA Xinghua, JIN Jiaqiong, et al. Analysis of influence of “4.14” Yushu earthquake fault zone on post-earthquake geological disasters [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23 (5): 78-83. (in Chinese with English abstract)

[35] 梁京涛，唐川，王军. 青川县重点区域地震诱发地质灾害遥感调查与分析 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版)，2012，39 (5)：530-534.
LIANG Jingtao, TANG Chuan, WANG Jun. Exploration-and analysis-remote sensing of geological hazards induced by earthquakes in typical areas of Qingchuan, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2012, 39 (5): 530-534. (in Chinese with English abstract)

[36] 许强，李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究 [J]. 工程地质学报，2010，18 (6)：818-826.
XU Qiang, LI Weile. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18 (6): 818-826. (in Chinese with English abstract)

[37] ASHFORD S A, SITAR N. Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87 (3): 692-700.

[38] 辛鹏，吴树仁，石菊松，等. 黄土高原渭河宝鸡段北岸大型深层滑坡动力学机制研究 [J]. 地质学报，2014，88 (7)：1341-1352.
XIN Peng, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Research on kinematics and dynamic mechanism of large-scale deep-seated landslide on the North Bank of Baoji stream segment of Weihe river in loess plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88 (7): 1341-1352. (in Chinese with English abstract)

[39] 殷跃平，王文沛，张楠，等. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究：以四川茂县新磨滑坡为例 [J]. 中国地质，2017，44 (5)：827-841.
YIN Yueping, WANG Wenpei, ZHANG Nan, et al. Long runout geological disaster initiated by the ridge-top rockslide in a strong earthquake area: a case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province [J]. Geology in China, 2017, 44 (5): 827-841. (in Chinese with English abstract)

[40] 胡卸文，顾成壮，牛彦博，等. 芦山地震触发大岩崩滑坡-碎屑流特征与运动过程 [J]. 西南交通大学学报，2013，48 (4)：590-598.
HU Xiewen, GU Chengzhuang, NIU Yanbo, et al. Debris flow characteristics and movement process of Dayanbeng landslide in Tianquan county triggered by “4·20” Lushan earthquake [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48 (4): 590-598. (in Chinese with English abstract)

[41] 王运生，徐鸿彪，罗永红，等. 地震高位滑坡形成条件及抛射运动程式研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2009，28 (11)：2360-2368.
WANG Yunsheng, XU Hongbiao, LUO Yonghong, et al. Study of formation conditions and toss motion program of high landslides induced by earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (11): 2360-2368. (in Chinese with English abstract)

[42] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式 [J]. 岩石力学与工程学报，2009，28 (6)：1239-1249.
HUANG Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (6): 1239-1249. (in Chinese with English abstract)

[43] 梁庆国，韩文峰，李雪峰. 极震区岩体地震动力破坏若干问题探讨 [J]. 岩土力学，2009，30 (S1)：37-40.
LIANG Qingguo, HAN Wenfeng, LI Xuefeng. Discussion on seismic failure of rock mass in meizoseismal areas [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (S1): 37-40. (in Chinese with

English abstract)

[44] 梁庆国, 韩文峰. 强震区岩体地震动力破坏特征 [J]. 西北地震学报, 2009, 31 (1): 15-20.
LIANG Qingguo, HAN Wenfeng. Characteristics of rock mass failure under seismic loads at strong earthquake areas [J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31 (1): 15-20. (in Chinese with English abstract)

[45] 许强, 黄润秋. 5.12 汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探 [J]. 工程地质学报, 2008, 16 (6): 721-729.
XU Qiang, HUANG Runqiu. Kinetics charateristics of large landlides triggered by May 12th Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16 (6): 721-729. (in Chinese with English abstract)

[46] 冯文凯, 许强, 黄润秋. 斜坡震裂变形力学机制初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (S1): 3124-3130.
FENG Wenkai, XU Qiang, HUANG Runqiu. Preliminary study on mechanical mechanism of slope earthquake-induced deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S1): 3124-3130. (in Chinese with English abstract)

[47] 孙萍, 殷跃平, 陈立伟. 汶川地震区东河口滑坡破坏机制 FLAC 模拟分析 [J]. 水文地质工程地质, 2011, 38 (5): 87-91.
SUN Ping, YIN Yueping, CHEN Liwei. Numerical analysis of the failure mechanism of the Donghekou rockslide in the Wenchuan earthquake region with FLAC [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38 (5): 87-91. (in Chinese with English abstract)

[48] 石菊松, 石玲, 吴树仁, 等. 滑坡风险评估实践中的难点与对策 [J]. 地质通报, 2009, 28 (8): 1020-1030.
SHI Jusong, SHI Ling, WU Shuren, et al. Difficulties and countermeasures in the practice of landslide risk assessment [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28 (8): 1020-1030. (in Chinese with English abstract)

[49] 方华, 崔鹏. 汶川地震大型高速远程滑坡力学机理及控制因子分析 [J]. 灾害学, 2010, 25 (S1): 120-126, 130.
FANG Hua, CUI Peng. Study on mechanical mechanism and controlling factors of high-speed distant landslides induced by the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25 (S1): 120-126, 130. (in Chinese with English abstract)

[50] 郭长宝, 孟庆伟, 张永双, 等. 断裂构造对斜坡应力场影响的数值模拟及成灾机理研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32 (5): 592-599.
GUO Changbao, MENG Qingwei, ZHANG Yongshuang, et al. Numerical simulation of fault structure influence on stress field of slope body and study on disaster-causing mechanism [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32 (5): 592-599. (in Chinese with English abstract)

[51] MCCALPIN J P. Paleoseismology [M]. New York: Academic Press, 2009.

[52] FACCIOLI E, ANASTASOPOULOS I, GAZETAS G, et al. Fault rupture-foundation interaction: selected case histories [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6 (4): 557-583.

[53] 陈晓利, 李传友, 王明明, 等. 断裂带两侧地震诱发滑坡空间分布差异性的主要影响因素研究——以北川地区的地震滑坡分布为例 [J]. 地球物理学报, 2011, 54 (3): 737-746.
CHEN Xiaoli, LI Chuanyou, WANG Mingming, et al. The main factors causing the seismic landslide distribution difference on two sides of the faults—a case study of landslide distribution in Beichuan [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54 (3): 737-746. (in Chinese with English abstract)

[54] 郭婷婷, 徐锡伟, 于贵华, 等. 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, 2017, 32 (5): 1893-1900.
GUO Tingting, XU Xiwei, YU Guihua, et al. Research history and current situation of active faults and their avoidance zone width [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32 (5): 1893-1900. (in Chinese with English abstract)

[55] 许冲, 徐锡伟. 走滑断裂型地震诱发的滑坡在断裂两盘的空间分布差异 [J]. 地质通报, 2012, 31 (4): 532-2540.
XU Chong, XU Xiwei. Spatial distribution difference of landslides triggered by slipping-fault type earthquake on two sides of the fault [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31 (4): 532-2540. (in Chinese with English abstract)

[56] 巨能攀, 侯伟龙, 赵建军, 等. 安县雎水河流域地质灾害发育、分布及影响因素 [J]. 山地学报, 2010, 28 (6): 732-740.
JU Nengpan, HOU Weilong, ZHAO Jianjun, et al. Geohazards of Jushui River in the Wenchuan earthquak Area [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28 (6): 732-740. (in Chinese with English abstract)

[57] 蔡国军, 黄润秋, 严明, 等. 反倾向边坡开挖变形破裂响应的物理模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (4): 811-817.
CAI Guojun, HUANG Runqi, YAN Ming, et al. Physical simulation study on deformation and failure response of an anti-inclined slope during excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (4): 811-817. (in Chinese with English abstract)

[58] 郭小花, 李小林, 赵振, 等. 青海 4·14 玉树地震地质作用对地质环境影响分析 [J]. 工程地质学报, 2011, 19 (5): 685-696.
GUO Xiaohua, LI Xiaolin, ZHAO Zhen, et al. Effects of 4·14 Yushu earthquake in Qinghai on geological environment [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (5): 685-696. (in Chinese with English abstract)

[59] 杜宇本, 袁传保, 王彦东, 等. 成兰铁路主要地质灾害与地质选线 [J]. 铁道工程学报, 2012, (8): 11-15.
DU Yuben, YUAN Chuanbao, WANG Yandong, et al. Major geological hazard and geological alignment of Chengdu-Lanzhou Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012,

(8)：11-15. (in Chinese with English abstract)

[60] WESNOUSKY S G. Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures：issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98 (4)：1609-1632.

[61] 周庆，吴果. 鲁甸 6.5 级地震崩滑地质灾害分布与成因探讨 [J]. 地震地质，2015，37 (1)：269-278.
ZHOU Qing, WU Guo. Seismic landslides and seismogenic structure of the 2014 Ludian M_s 6.5 Earthquake [J]. Seismology and Geology, 2015, 37 (1)：269-278. (in Chinese with English abstract)

[62] 张文峰. 地质滑坡灾害的山层断层效应分析与研究 [J]. 科技通报，2016，32 (5)：21-24.
ZHANG Wenfeng. Analysis and research on effect of mountain fault in geological landslide disaster [J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32 (5)：21-24. (in Chinese with English abstract)

[63] KIANI M, AKHLAGHI T, GHALANDARZADEH A. Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51：108-119.

[64] 薛东剑，何政伟，张雪峰，等. “5.12” 地震次生地质灾害分析：以青川、平武县为例 [J]. 自然灾害学报，2011，20 (5)：162-168.
XUE Dongjian, HE Zhengwe, ZHANG Xuefeng, et al. Analysis of secondary geohazard after " 5.12" earthquake：a case study of Qingchuan and Pingwu counties [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20 (5)：162-168. (in Chinese with English abstract)

[65] 殷志强，陈红旗，褚宏亮，等. 2008 年以来中国 5 次典型地震事件诱发地质灾害主控因素分析 [J]. 地学前缘，2013，20 (6)：289-302.
YIN Zhiqiang, CHEN Hongqi, ZHU Hongliang, et al. Analysis on the key controlling factors of geo-hazards triggered by five typical earthquake events in China since 2008 [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20 (6)：289-302. (in Chinese with English abstract)

[66] 许冲，戴福初，肖建章. “5.12” 汶川地震诱发滑坡特征参数统计分析 [J]. 自然灾害学报，2011，20 (4)：147-153.
XU Chong, DAI Fuchu, XIAO Jianzhang. Statistical analysis of characteristic parameters of landslides triggered by May 12, 2008 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20 (4)：147-153. (in Chinese with English abstract)

[67] 李秀珍，孔纪名，崔云，等. 汶川地震滑坡与地震参数及地质地貌因素之间的相关关系 [J]. 工程地质学报，2010，18 (1)：8-14.
LI Xiuzhen, KONG Jiming, CUI Yun, et al. Statistical relations between landslides induced by Wenchuan earthquake and earthquake parameters, geological as well as geomorphological factors [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18 (1)：8-14. (in Chinese with English abstract)

[68] 刘学增，滨田政则. 活断层破坏在土体中传播的试验研究 [J]. 岩土工程学报，2004，26 (3)：425-427.
LIU Xuezeng, BINGTIAN Zhengze. Experiments on rupture propagation of active faults in soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26 (3)：425-427. (in Chinese with English abstract)

[69] PENG W F, WANG C L, CHEN S T, et al. Incorporating the effects of topographic amplification and sliding areas in the modeling of earthquake-induced landslide hazards, using the cumulative displacement method [J]. Computers & Geosciences, 2009, 35 (5)：946-966.

[70] 李忠生. 国内外地震滑坡灾害研究综述 [J]. 灾害学，2003，18 (4)：64-70.
LI Zhongsheng. The state of the art of the research on seismic landslide hazard at home and abroad [J]. Journal of Catastrophology, 2003, 18 (4)：64-70. (in Chinese with English abstract)

[71] 戴俊生，张继标，冯建伟，等. 高邮凹陷真武断裂带西部低级序断层发育规律预测 [J]. 地质力学学报，2012，18 (1)：11-21.
DAI Junsheng, ZHANG Jibiao, FENG Jianwei, et al. Development law and prediction of the lower-order faults in the west of Zhenwu fault zone in Gaoyou sag [J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18 (1)：11-21. (in Chinese with English abstract)

[72] PARSONS T, CHEN J, KIRBY E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin [J]. Nature, 2008, 454 (7203)：509-510.

[73] 石崇，周家文，任强，等. 单面边坡高程放大效应的射线理论解 [J]. 河海大学学报 (自然科学版)，2008，36 (2)：238-241.
SHI Chong, ZHOU Jiawen, REN Qiang, et al. Ray theory solution of the elevation amplification effect on a single-free-face slope [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36 (2)：238-241. (in Chinese with English abstract)

[74] 王栋，张广泽，蒋良文，等. 川藏铁路成康段活动断裂工程效应及地质选线 [J]. 铁道工程学报，2015，32 (10)：6-11.
WANG Dong, ZHANG Guangze, JIANG Liangwen, et al. Engineering effect of active fault and geological alignment of Chengdu to Kangding in Sichuan-Tibet Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32 (10)：6-11. (in Chinese with English abstract)

[75] 罗永红，王运生，王福海，等. 青川县桅杆梁斜坡地震动响应监测研究 [J]. 工程地质学报，2010，18 (1)：27-34.
LUO Yonghong, WANG Yunsheng, WANG Fuhai, et al. Monitoring of slope seismic response during aftershocks of Wenchuan earthquake in Qingchuan county [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18 (1)：27-34. (in Chinese with English abstract)

[76] ASHTIANI M, GHALANDARZADEH A, TOWHATA I. Centrifuge modeling of shallow embedded foundations subjected

to reverse fault rupture [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53 (3): 505-519.

[77] CAI Q P, NG C W W. Analytical approach for estimating ground deformation profile induced by normal faulting in undrained clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50 (4): 413-422.

[78] NG C W W, CAI Q P, HU P. Centrifuge and numerical modeling of normal fault-rupture propagation in clay with and without a preexisting fracture [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138 (12): 1492-1502.

[79] 白永健, 铁永波, 倪化勇, 等. 鲜水河流域地质灾害时空分布规律及孕灾环境研究 [J]. 灾害学, 2014, 29 (4): 69-75.
BAI Yongjian, TIE Yongbo, NI Huayong, et al. Temporal-spatial distribution and environment pregnant of Geohazards in Xianshui River of Sichuan, China [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29 (4): 69-75. (in Chinese with English abstract)

[80] 谢富仁, 张红艳, 崔效锋, 等. 中国大陆现代构造应力场与强震活动 [J]. 国际地震动态, 2011, (1): 4-12.
XIE Furen, ZHANG Hongyan, CUI Xiaofeng, et al. The modern tectonic stress field and strong earthquakes in China [J]. Recent Developments in World Seismology, 2011, (1): 4-12. (in Chinese with English abstract)

[81] 佟彦明. 胶莱盆地莱阳期古构造应力场分析及模拟 [J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26 (1): 6-9.
TONG Yanming. The paleotectonic stress field at Laiyang Stage in Jiaolai Basin and the simulation [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26 (1): 6-9. (in Chinese with English abstract)

[82] 王恩营. 正断层力学性质的构造应力分析 [J]. 河南理工大学学报, 2007, 26 (3): 264-266.
WANG Enying. Tectonic stress analysis of normal faults mechanic characteristic [J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2007, 26 (3): 264-266. (in Chinese with English abstract)

[83] 高杨, 李滨, 冯振, 等. 全球气候变化与地质灾害响应分析 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (1): 65-77.
GAO Yang, LI Bin, FENG Zhen, et al. Global climate change and geological disaster response analysis [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (1): 65-77. (in Chinese with English abstract)

[84] 杨秀元, 姚亚辉. 2014 年鲁甸 M_S6.5 地震后地质灾害发育分布特征 [J]. 地震工程学报, 2018, 40 (5): 1078-1083.
YANG Xiuyuan, YAO Yahui. Development and distribution characteristics of geological hazards after the 2014 Ludian M_S6.5 Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40 (5): 1078-1083. (in Chinese with English abstract)

[85] 李天华, 袁永博. 地震重灾区诱发次生地质灾害风险评价研究 [J]. 地震工程学报, 2018, 40 (1): 111-115.
LI Tianhua, YUAN Yongbo. Risk assessment of secondary geological disasters induced in an earthquake-stricken area [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40 (1): 111-115. (in Chinese with English abstract)

[86] 杨志华, 兰恒星, 张永双, 等. 强震区震后地质灾害长期活动性研究综述 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (5): 743-753.
YANG Zhihua, LAN Hengxing, ZHANG Yongshuang, et al. Research review on long-term activity of post-earthquake geohazard in strong seismic-disturbed regions [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (5): 743-753. (in Chinese with English abstract)

[87] 王天河, 汤明高, 李云杰, 等. 区域地质灾害危险性评价研究: 以宣汉地区为例 [J]. 水利水电技术, 2018, 49 (11): 157-164.
WANG Tianhe, TANG Minggao, LI Yunjie, et al. Study on risk assessment of regional geohazard: a case study of Xuanhan region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (11): 157-164. (in Chinese with English abstract)