

文章编号: 1006-6616 (2017) 05-0743-11

强震区震后地质灾害长期活动性研究综述

杨志华¹, 兰恒星², 张永双³, 郭长宝¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 地震通过改变地表岩体的物理力学性质而使得震区滑坡、泥石流等地质灾害显著增强的现象在震后持续相当长的一段时间。在研究分析国内外学者对地震地质灾害研究成果的基础上, 系统总结了目前在地震诱发地质灾害的发育分布规律及其演化趋势方面的研究方法及成果, 探讨了研究中存在的问题及薄弱环节, 并对未来的研究方向及趋势进行了展望。研究认为目前国内外对地震地质灾害长期活动性的研究还没有形成体系, 尚缺乏有效的研究方法与技术, 并且研究成果存在较大差异性。地震扰动区地质灾害长期活动性研究可为震后地质灾害的长期防灾减灾和风险管控提供科学支持, 也能对地震地质灾害相关问题的进一步深入研究提供参考。

关键词: 地震; 地质灾害; 长期活动性; 活跃周期; 综述

中图分类号: P694

文献标识码: A

0 引言

进入 21 世纪以来, 中国灾难性地震事件频发, 例如 2001 年昆仑山 $M_s 8.1$ 级地震^[1], 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级地震^[2]、2010 年玉树 $M_s 7.1$ 级地震^[3~4], 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 级地震^[5]、2014 年鲁甸 $M_s 6.5$ 级地震。地震往往引起大范围内的地质灾害, 地震触发的地质灾害具有群发性、规模大和破坏性强等特点, 例如汶川地震在较短时间内触发了几万处地质灾害^[6~8], 造成了巨大的生命财产损失。地震地质灾害已经引起国内外学者的广泛关注^[9~13], 成为地质灾害领域内的研究热点。

地震发生时由地震活动自身的破坏作用引起的地质灾害称为同震地质灾害, 地震前后一段时间内发生的地质灾害分别称为震前地质灾害和震后地质灾害, 震前地质灾害没有受到地震作用的影响, 而震后地质灾害受到震后效应的长时期影响。同震地质灾害的种类比较多, 主要有崩塌、滑坡、塌陷、地裂缝、砂土液化等。同震地质灾害的破坏作用主要表现为: 危害人的生命安全,

造成人员伤亡; 毁坏房屋、道路、隧道等工程设施, 造成财产损失; 破坏耕地等, 造成资源损失和环境破坏。同震地质灾害是地震灾害的重要组成部分, 它增强了地震灾害的破坏效应, 加剧了地震灾害的损失程度^[14]。

地震改变了地表岩体的物理力学性质, 引起山体松动和破碎, 为滑坡、泥石流等地质灾害提供了丰富物源。由于地震效应的影响, 震前、同震和震后地质灾害表现出不同的特征, 如地质灾害数量、强度、性质、分布特征的变化。通常情况下, 震后地质灾害显著增强的现象要延续相当长的一段时间, 直到随着地震灾区生态和地质环境的逐渐恢复, 才会显著降低并恢复到震前水平, 这种地震对震后地质灾害产生的长期影响被概括为地质灾害的地震后效应^[15~16]。

震后地质灾害的长期活动性对地震灾区的生命财产安全和重大工程建设、运营具有重大影响^[17]。例如: 汶川映秀红椿沟泥石流在汶川震后几年来多次暴发, 威胁国道 G213 和都汶高速公路的安全运营, 2014 年 7 月 17 日的茂县山体滑坡掩埋公路并造成 10 多人伤亡。震后高发地质灾害对

收稿日期: 2017-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41502313); 中国地质调查项目 (DD20160271)。

作者简介: 杨志华 (1982-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事地质灾害研究。E-mail: yangzh99@163.com

地质灾害防治工程造成了巨大破坏,降低了其防灾功效。例如:北川陈家坝青林沟坝体被泥石流冲毁,汶川牛圈沟泥石流下游拦挡坝已接近淤满。另外,1850年西昌 M_s 7.5级地震^[18],2005年巴基斯坦 Kashmir M_s 7.6级地震^[19],1923年日本关东 M_s 7.9级地震^[20],1999年台湾集集 M_s 7.6级地震^[21]的地震效应都使得震后地质灾害强度显著高于震前水平,造成了大量人员伤亡和财产损失。这些典型震后地质灾害实例反映了震后地质灾害形成条件复杂,防灾难度大,并且具有长期性的特征。

地震引起的岩体松动^[22]、地表破裂^[23, 24]、植被破坏^[25]、地形地貌、松散堆积物变化^[26~27]和地壳形变^[28]等地震效应都影响着震后地质灾害的长期活动性。研究者在关注同震地质灾害的同时,也对震后地质灾害的长期活动性产生了浓厚兴趣。目前,同震地质灾害研究较为丰富^[29~32],但震后地质灾害的长期活动性研究相对不足。

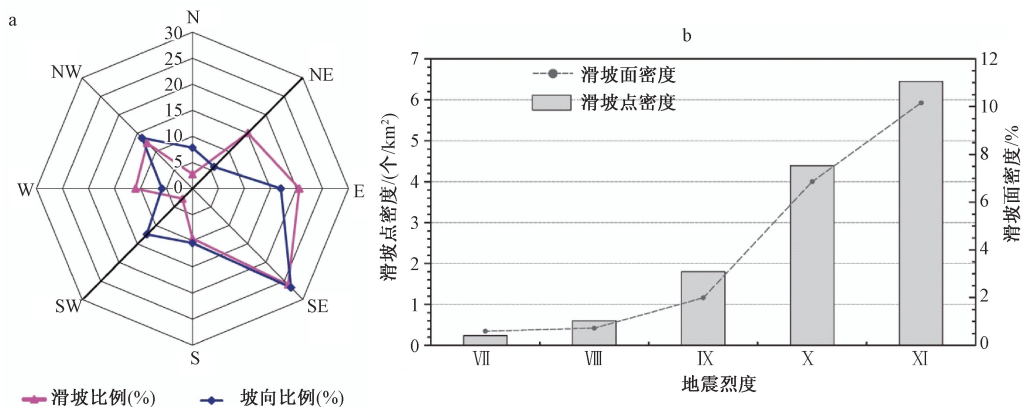
综上,跟踪研究地震地质灾害的长期活动性及发展趋势已经成为地质灾害领域的研究热点和难点。但是,由于历史强震典型案例和代表性的局限性,以及地震地质灾害数据编录的缺乏和不完整性,目前国内外对震后地质灾害的长期活动性研究还更多停留在案例积累的基础上^[15],至今没有实际而理想的趋势预测模型和研究方法^[33]。

本文首先简要回顾了同震、地震前后地质灾害发育分布特征,然后重点对震后地质灾害长期活动性的国内外研究现状进行了总结。

1 同震及地震前后地质灾害发育分布差异性

1.1 同震地质灾害发育分布特征

同震地质灾害研究主要包括同震地质灾害空间分布特征及其与地形(见图1a)震中、烈度、峰值地面加速度(PGA)、断层(见图1b)、地表破裂、地质(岩性)等环境因素之间的相关关系^[6~8, 34, 35],国内外学者已经做了大量的研究工作。研究认为地震效应对地质灾害发育分布特征具有重大影响,主要有以下几个重要结论:(1)地震地质灾害分布与震中距之间存在负相关关系;(2)地震地质灾害分布与坡度之间具有显著的正相关关系;(3)地震地质灾害分布与地震烈度、地震动之间呈现正相关关系,地质灾害多分布在高烈度区和强地震动区;(4)地震触发地质灾害数量整体上是随震级呈数量级递增的;(5)地震地质灾害分布与地层岩性关系密切,主要发育在软硬相间的顺向岸坡以及斜向—顺向岸坡结构内。虽然不同地震的研究结果有所不同,但是上述基本趋势是一致的。



a—坡向^[6]; b—地震烈度^[7]

图1 汶川地震滑坡与环境因子的关系

Fig. 1 Relationship between Wenchuan earthquake-induced landslides and environmental factors

1.2 地震前后地质灾害发育分布差异

地震导致地质灾害发生的环境背景发生了变化,因此地震前后地质灾害发育分布具有显著差异性,主要表现在地质灾害发生频率、强度、性

质、降雨阈值和空间分布等特征上^[36~42]。黄润秋^[15]认为汶川震区的地质灾害性质从震前以崩塌、滑坡灾害为主,转为了震后以泥石流灾害为主,震后泥石流灾害规模巨大,且具有集中群发性。

相对于震前降雨诱发地质灾害, 地震诱发地质灾害呈现更高的空间集聚性, 例如汶川地震诱发地质灾害呈现沿发震断裂(北川—映秀断裂)集中分布的趋势^[6-7, 43]。

与震前相比, 地震效应使得震后地质灾害发生的地形、地质条件和降雨阈值等因素呈现降低趋势。台湾学者^[21, 44-45]研究了 1999 年台湾集集地震对地震前后滑坡、泥石流的影响, 表明震后启动泥石流的最大小时降雨强度和临界累计降雨量约是震前的 1/3 (见图 2), 震前降雨型滑坡主要发生在 20°~30°斜坡, 而震后降雨型滑坡主要发生在 40°~50°斜坡。汶川地震后, 一些学者对震后地质灾害降雨阈值进行了研究^[46-48], 发现震后地质灾害降雨阈值显著降低。与震前相比, 北川震后泥石流的累计降雨量阈值和小时降雨强度临界值分别减少了 15~22% 和 25~32%^[49], 震后绵远河流域小岗剑沟泥石流临界雨量大幅度下降, 2010 年和 2011 年暴发泥石流的临界雨量分别约为地震前的 21% 和 23%^[50]。总结这些研究结果发现, 对于不同地震的不同区域, 其震后地质灾害降雨阈值的变化规律具有较大差异, 但其降低趋势是一致的。

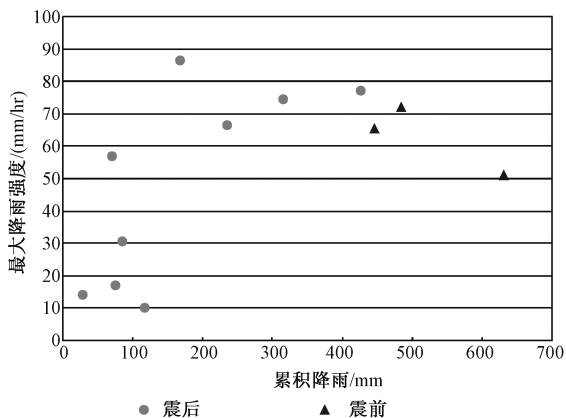


图 2 台湾集集地震扰动区触发泥石流的小时降雨量和累积降雨量^[44]

Fig. 2 Plot of the maximum hourly percipitation versus the maximum accumulated precipitation for debris flow events in the Chi-chi earthquake-disturbed areas

2 震后地质灾害的长期活动性

地震效应对斜坡稳定性的影响是长期的, 特别是后续降雨使滑坡、泥石流等地质灾害连绵不断^[33]。目前, 震后地质灾害的长期活动性和发展趋势的相关研究还不十分丰富, 国内外主要研究

结果具体见下文。

2.1 国外地震地质灾害的长期活动性

(1) 1923 年日本关东 $M_s7.9$ 级地震

1923 年日本横滨和东京一带发生了 $M_s7.9$ 大地震, 称为关东大地震, 造成了关东地区大范围的崩塌、滑坡等地质灾害。Koi 等^[51]研究了日本关东地震滑坡对流域沉积物的影响, 研究表明日本关东地震仍然影响着 80 年后的地质灾害活动性。Nakamura^[20]研究了关东大地震前后 1896~1980 年的地震滑坡及后续降雨型滑坡的趋势和规律 (见图 3), 认为震后滑坡活动可以分为 4 个阶段: 产生阶段、不稳定阶段、恢复阶段和稳定阶段, 总共持续约 40~50 年。震后几年为产生阶段, 滑坡数量迅速增加; 不稳定阶段对应于滑坡的强活动期, 持续时间约为 15 年; 恢复阶段的滑坡数量明显下降, 持续时间约为 24 年; 然后经历约 10 年的稳定阶段, 滑坡活动逐渐恢复到震前水平。

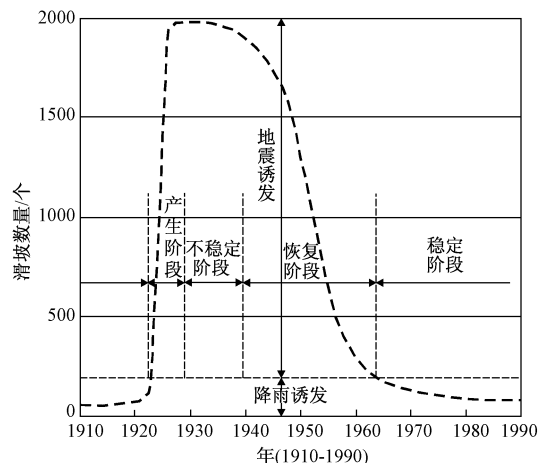


图 3 日本关东地震后滑坡强度变化规律^[15, 20]

Fig. 3 The change rule of landslide intensity from 1896 to 1990 after Kanto earthquake in Japan

(2) 2005 年巴基斯坦 Kashmir $M_s7.6$ 级地震

Khattak^[19]研究了 Kashmir 地震后两年 (2005—2007) 的地震滑坡变化规律, 其中 9% 的区域呈现出滑坡面积增长趋势。然而, Khan^[52]研究认为 Kashmir 地震后 5 年 (2005~2010) 来, 10% 的区域呈现出滑坡面积增长趋势。Saba^[53]对比研究了 Kashmir 地震前后 5 年的滑坡时空分布变化规律, 认为 Kashmir 地震对震后 2 年内的滑坡发育分布具有较大影响。

2.2 国内汶川地震地质灾害的长期活动性

相较于震前, 汶川震后地质灾害频率和规模都显著增加, 对地震灾区的财产生命安全和重大

工程建设、运营具有重大影响并导致了严重损失(见图4)。研究者们对汶川震后地质灾害的长期活

动性进行了一些研究工作,获得了一些研究结果和初步认识。



图4 汶川震后几年来的典型地质灾害及防治工程破坏实例

Fig. 4 Typical cases of destruction scenes of geo-hazard control engineering after the Wenchuan earthquake

2.2.1 滑坡的长期活动性

国内学者黄润秋研究了汶川地震前后(2000—2011)灾难性滑坡变化规律(见图5中实线)^[15~16],结果表明:震后灾难性滑坡数量连续3年呈逐年上升趋势,震后暴雨年滑坡数量约为震前暴雨年滑坡数量的2倍,震后非暴雨年滑坡数量约为震前非暴雨年滑坡数量的4~5倍。参考台湾集集地震后地质灾害的演化特点推导了汶川地震后地质灾害的演化趋势(见图5中虚线),认为汶川地震灾区的震后地质灾害活动将呈现周期性衰减特征,每4~5年为一个周期,峰值地质灾害强度将逐渐衰减,直至恢复到震前水平。崔鹏等^[54~55]研究认为在汶川震后近5年内还会发生大量的滑坡和崩塌,随着时间的推移,不稳定斜坡数量逐渐减少,滑坡和崩塌活动将呈现逐渐减弱的趋势,估计持续约10年。唐川^[33]的研究结果与崔鹏相近,认为汶川强震区至少在近10年内,滑坡活动趋势是强烈的。

2.2.2 泥石流的长期活动性

地震触发的崩塌、滑坡等堆积体能够为泥石流活动提供丰富的松散固体物质,并且地震造成

大量坡体失稳和岩体破坏,使这些泥石流沟将在今后较长一段时间内处于活跃期,泥石流暴发规模和频率将显著增加。汶川震区山高坡陡,泥石流具有物源分布相对位置高、暴发隐蔽性强、运移速度快、距离远、破坏性大等特点^[26]。相对于震前,震后泥石流出现物源量激增、震前衰退停歇期的泥石流重新复活、启动雨量雨强降低、暴发频率增大以及群发性等特点^[46]。

对于整个汶川震区而言,黄润秋^[15~16]根据地震灾区泥石流的固体物源量来分析高强度地质灾害的持续时间,采用了两种方法:(1)基于地质灾害点平均体积的泥石流固体物源量分析;(2)基于地质灾害点平均厚度的泥石流固体物源量分析。研究表明震后灾区地质灾害高发期将持续约20~25年。崔鹏等^[54~56]研究认为汶川震后泥石流演变趋势为:活动强度由急剧增强的突变转为逐步减弱,期间活跃期与平静期交替出现,泥石流活动将在震后5年内进入极度活跃期,随后逐渐衰减,第1个泥石流活跃期可能会持续约15年左右,泥石流活跃期共持续时间约20~30年。陈晓清等^[57]的研究结果与崔鹏相似,推测震后泥石流活



图 5 汶川震区 2000 年以来灾难性滑坡发展趋势^[15-16]

Fig. 5 Variation of geohazard number with time in the Wenchuan earthquake-disturbed area since 2000

动将可能持续约 20 年, 并且建议地震极重灾区不宜在震后 3 年内实施大量的泥石流防治工程, 而应在 3~5 年后再实施泥石流防治工程最为合理。谢洪等^[58]研究了 2008 年汶川地震的后发型地震泥石流特征, 认为龙门山及邻近的邛崃山等山区因汶川地震的影响, 泥石流已进入强烈活动期, 其强烈活动时间可能持续 10~30 年。

从汶川震区的局部区域来看, (1) 北川干溪沟泥石流的长期发展趋势为: ①可供形成山地灾害的松散固体物质来源总量呈下降趋势, 泥石流总量下降; ②活跃期—平静期交替、活跃期逐渐缩短、平静期逐渐延长; ③泥石流活动类型在震后一段时间内为输移控制型, 然后为输移控制型向松散固体物质控制型过渡, 最后发展成为松散固体物质控制型; ④汶川地震后第一个活跃期为 10~15 年^[59]。(2) 北川西侧山坡泥石流: 震后北川西侧山坡泥石流高发期是 5~10 年, 之后地质条件将逐渐趋于稳定, 泥石流活动逐渐减弱^[33, 49]。(3) 绵竹清平走马岭泥石流: Zhang 等^[26]采用多时相遥感解译等方法研究分析了绵竹清平走马岭泥石流沟的长时期物源变化趋势, 推测走马岭沟的高位泥石流灾害将要持续 15 年的高发期, 之后逐渐恢复到震前水平。(4) 岷江上游: 在震后 5~10 年的时期内, 岷江上游还将激发大量的泥石流^[60]。

2.3 国内其它地震地质灾害的长期活动性

(1) 1999 年台湾集集 $M_s7.6$ 级地震

台湾学者^[21, 44~45]对 1999 年台湾集集地震后的滑坡活动规律进行了较为深入的研究, 分析了 1996~2008 年期间发生的台风降雨事件与滑坡活动强度变化规律 (见图 6), 发现震后滑坡活动强度呈上升趋势。在 2000~2004 年期间, 滑坡活动极为活跃, 具有较高的滑坡强度; 2004 年之后, 滑坡活动强度呈现逐年降低趋势; 2008 年之后, 滑坡强度明显减小, 但是仍然没有恢复到震前水平。其他研究结果表明: ①震后 6 年内, 地震对降雨滑坡发育分布仍然有着持续影响^[61]; ②震后约 3 年, 地震对降雨滑坡的影响衰减约 50%, 震后约 10 年, 衰减到约 10%^[62]; ③统计结果表明, 地震对震后降雨滑坡的影响呈现幂率衰减模式^[63]; ④震后泥石流发生具有较低的水文和地形阈值, 触发泥石流的平均和最小降雨量都降低了^[64]。

(2) 1850 年西昌 $M_s7.5$ 级地震

Wei 等^[18]研究分析了四川省邛海流域的长时期滑坡灾害, 认为当前邛海流域的大量滑坡为 1850 年西昌地震所触发, 在震后降雨影响下仍有较大的复活可能性, 推断震后滑坡活动性至少持续了 160 年。

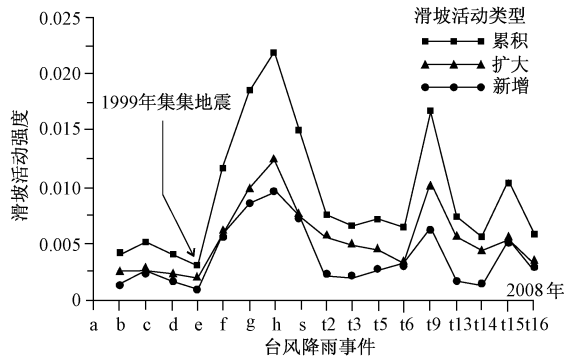


图6 台湾集集地震前后的降雨诱发滑坡强度变化规律^[21, 44~45]

Fig. 6 Change rule of landslide intensity induced by rainfalls before and after the Chi-Chi earthquake in Taiwan, China

3 分析与讨论

强震区震后地质灾害的长期活动性是由多种地震效应引起的,例如岩体松动、地表破裂、植被破坏、地形地貌变化、松散堆积物增加、地壳应力场变化和地壳形变等,这些都可以改变地表岩体的物理力学性质,从而改变震后地质灾害的发育分布特征。这些地震效应对地质灾害的影响周期是不一致的,其中地壳形变具有较长的影响周期。王庆良等^[65]根据中国5个典型地震的震后垂直形变资料,利用将岩石圈和软流圈均一化的单层标准线性固体粘弹性位错模型,对各震区地球介质的震后有效松弛时间进行了最小二乘反演(见表1),可见震后地壳形变周期可达20年以上。目前关于地震地质灾害长期活动性的相关研究中还没有涉及地球介质的震后松弛效应,这方面的研究值得关注。

表1 中国典型地震震后有效松弛时间^[65]

Table 1 Post-seismic effective relaxation cycles of typical earthquakes in China

地震名称	震级 (M_s)	发震时间	测段名称	资料年限	有效松弛时间/年	最大形变量/mm	同震形变/mm
唐山	7.8	1976.7.28	山津 26-22	1976—1992	21.6	127.1	206
邢台	7.2	1966.3.22	冯巨 7-11	1966—1976	11.1	131.6	273
通海	7.8	1970.1.5	高大 1-4	1970—1981	5.5	32.8	未测
炉霍	7.6	1973.2.6	虚墟 B-C	1973—1981	4.9	6.5	未测
共和	7.0	1900.4.26	倒花 15-18	1990—1995	4.0	25.5	43

通过分析国内外震后地质灾害实例及其引起的严重损失,认为震后地质灾害的长期活动性对

地质灾害危险性具有重大影响,且是一个长期的过程,不考虑地质灾害的长期活动性的震后地质灾害危险性评价是不全面的和被低估了的。

震后地质灾害之所以频发,重要原因之一就是地质灾害发生所需要的临界雨量值降低,在汶川地震和台湾集集地震后,许多学者都对地质灾害的临界雨量值进行了研究,主要包括计算地震前后及多年的诱发地质灾害最大小时降雨强度和临界累计降雨量并进行对比研究,对比分析地震前后降雨型滑坡发生的地形地貌条件,例如震后降雨型地质灾害发生坡度增加。

当前的研究工作主要关注震后地质灾害强度的变化,是一个线性指标。由于地质灾害样本的时间尺度较短且缺乏连续性,很少关注震后地质灾害的空间分布特征,然而在地震效应的影响下,震后地质灾害的空间分布也是变化的,也是表征震后地质灾害长期活动性的重要指标。例如地震参数(震中距、烈度、地面峰值加速度)对震后地质灾害空间分布的影响是随着时间推移而逐渐减弱的,地质灾害空间分布特征将逐渐恢复到震前模式。

地质灾害影响因素较多,地质灾害发生频率难以准确获得,不足以准确反映震后地质灾害发展趋势。然而,从地质灾害的时空分布变化规律、强度—频率分布变化规律、影响因素变化规律等入手,在统计规律方面研究分析震后地质灾害的长期活动性及发展趋势,获得量化或半量化研究结果,加深对地震地质灾害的长期活动性的科学认识,为地震扰动区震后地质灾害的长期防灾减灾和风险管控提供科学支持,是地震地质灾害长期活动性研究的一个重要方向。

4 结论

地震地质灾害的长期活动性是地质灾害领域的研究难点,由于历史强震典型案例和代表性的局限性,以及地震地质灾害数据编录的缺乏和不完整性,目前国内外对地震地质灾害长期活动性的研究还没有形成完整体系。

目前,震后地质灾害长期活动性的研究现状可以概括为:(1)不同学者的研究结果之间存在较大差异,缺乏统一性;(2)不同区域的震后地质灾害活动期存在较大差异,主要是与震级大小、

地质环境的差异有关; (3) 不同灾种的震后活动期存在较大差异, 滑坡的最长活跃期约为 20 年, 泥石流的最长活跃期约为 30 年; (4) 局部区域的研究结果小于整个区域; (5) 震后泥石流冲出物质量高于预期, 泥石流物源的增量部分预计不足。

当前, 震后地质灾害的长期活动性研究的技术方法主要有: (1) 统计地质灾害暴发频率的变化规律; (2) 统计地质灾害降雨阈值的变化规律; (3) 总结松散堆积体物源量的变化规律; (4) 预测滑坡面积、泥石流冲出物质量的发展趋势; (5) 结合地质灾害实地调查, 与前人研究案例进行对比分析。

从地质灾害的统计规律方面入手, 尤其是震后地质灾害发育分布的演化规律, 研究分析震后地质灾害的长期活动性及发展趋势, 获得定量化或半定量化研究结果, 结合固体地球领域的研究成果 (如震后地壳形变), 加深对地震地质灾害的长期活动性的科学认识, 是地震地质灾害长期活动性研究的一个重要方向。

参 考 文 献

- [1] 党光明, 王赞军. 青海昆仑山口西 $M_s 8.1$ 级地震地表破裂带特征与主要震害—对青藏高原区域稳定性评价的制约 [J]. 地质通报, 2002, 21 (2): 105~108.
DANG Guangming, WANG Zanjun. Characteristics of the surface rupture zone and main seismic hazards caused by the $M_s 8.1$ earthquake west of the Kunlun pass, China—Constraints on the regional stability of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21 (2): 105~108. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等. 四川 5.12 地震次生地质灾害的基本特征初析 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (2): 109~116.
ZHANG Yongshuang, LEI Weizhi, SHI Jusong, et al. General characteristics of 5.12 earthquake-induced geohazards in Sichuan [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (2): 109~116. (in Chinese with English abstract)
- [3] 姚鑫, 张永双, 杨农, 等. 玉树地震地表变形 InSAR 观测及初步分析 [J]. 地质力学学报, 2010, 16 (2): 129~136.
YAO Xin, ZHANG Yongshuang, YANG Nong, et al. D-InSAR observation of earth surface deformation in the $M_s 7.1$ Yushu earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 2010, 16 (2): 129~136. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张永双, 马寅生, 胡道功, 等. 玉树地震地表破裂调查与灾后重建避让选址研究 [J]. 地质学报, 2010, 84 (5): 593~605.
ZHANG Yongshuang, MA Yinsheng, HU Daogong, et al. Investigation and research on the surface rupture of the Yushu earthquake and reconstruction site selection [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84 (5): 593~605. (in Chinese with English abstract)
- [5] 崔鹏, 陈晓清, 张建强, 等. “4·20” 芦山 7.0 级地震次生山地灾害活动特征与趋势 [J]. 山地学报, 2013, 31 (3): 257~265.
CUI Peng, CHEN Xiaoqing, ZHANG Jianqiang, et al. Activities and tendency of mountain hazards induced by the $M_s 7.0$ Lushan Earthquake, April 20, 2013 [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31 (3): 257~265. (in Chinese with English abstract)
- [6] Qi S W, Xu Q, Lan H X, et al. Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008. 5.12 Wenchuan Earthquake, China [J]. Engineering Geology, 2010, 116 (1~2): 95~108.
- [7] 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.
- [8] 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.
XU Chong, XU Xiwei, WU Xiyan, et al. Detailed catalog of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake and statistical analyses of their spatial distribution [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21 (1): 25~44. (in Chinese with English abstract)
- [9] Wei F Q, Chernomorets S, Aristov K, et al. A seismically triggered landslide in the niujuanvalley near the epicenter of the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Earth Science, 2010, 21 (6): 901~909.
- [10] Lan H X, Li L P, Zhang Y S, et al. Risk assessment of debris flow in Yushu seismic area in China: a perspective for the reconstruction [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013, 13 (11): 2957~2968.
- [11] 兰恒星, 周成虎, 高星, 等. 四川雅安芦山地震灾区次生地质灾害评估及对策建议 [J]. 地理科学进展, 2013, 32 (4): 499~504.
LAN Hengxing, ZHOU Chenghu, GAO Xing, et al. Secondary geological hazard assessment and hazard mitigation countermeasures in Lushan, Ya'an Earthquake, Sichuan Province [J]. Progress in Geography, 2013, 32 (4): 499~504. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈宁生, 黄蓉, 李欢, 等. 汶川 5·12 地震次生泥石流沟应急判识方法与指标 [J]. 山地学报, 2009, 27 (1): 108~114.
CHEN Ningsheng, HUANG Rong, LI Huan, et al. Emergency judge method and index of debris-flow sites triggered by 5·12 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27 (1): 108~114. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈宁生, 刘丽红, 邓明枫, 等. “4·20” 芦山地震后的四川

- 地质灾害形势预测与防治对策 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2013, 40 (4): 371~378.
- CHEN Ningsheng, LIU Lihong, DONG Mingfeng, et al. Tendency prediction and prevention strategy of geohazards triggered by Lushan M_s 7 earthquake, Sichuan, Province, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2013, 40 (4): 371~378. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘凤民, 张立海, 刘海青, 等. 中国地震次生地质灾害危险性评价 [J]. 地质力学学报, 2006, 12 (2): 127~131.
- LIU Fengmin, ZHANG Lihai, LIU Haiqing, et al. Danger assessment of earthquake-induced geological disasters in China [J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12 (2): 127~131. (in Chinese with English abstract)
- [15] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析 [J]. 工程地质学报, 2011, 19 (2): 145~151.
- HUANG Runqiu. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (2): 145~151. (in Chinese with English abstract)
- [16] Huang R Q, Li W L. Post-earthquake landsliding and long-term impacts in the Wenchuan earthquake area, China [J]. Engineering Geology, 2014, 182: 111~120.
- [17] 苏鹏程, 韦方强, 冯汉中, 等. “8.13”四川清平群发性泥石流灾害成因及其影响 [J]. 山地学报, 2011, 29 (3): 337~347.
- SU Pengcheng, WEI Fangqiang, FENG Hanzhong, et al. Causes and effects of group-occurring debris flow disasters in Qingping town, Mianyan river upstream, Sichuan [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29 (3): 337~347. (in Chinese with English abstract)
- [18] Wei X L, Chen N S, Cheng Q G, et al. Long-term activity of earthquake-induced landslides: A case study from Qionghai Lake Basin, Southwest of China [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11 (3): 607~624.
- [19] Ghazanfar A K, Owen L A, Kamp U, et al. Evolution of earthquake-triggered landslides in the Kashmir Himalaya, northern Pakistan [J]. Geomorphology, 2010, 115 (1~2): 102~108.
- [20] Nakamura H, Tsuchiya S, Inoue K, et al. Sabo against Earthquakes [C]. Kokon Shoin, Tokyo, Japan, 2000, 190~220.
- [21] Lin CW, Liu SH, Chang WS, et al. The impact of the Chi-Chi earthquake on the subsequent rain fall induced landslides in the epicentral area of central Taiwan [A]. Proceeding of International Conference in Commemoration of 10th Anniversary of the Chi-Chi Earthquake [C]. 2009, 336~338.
- [22] 王伟. 地震动的山体地形效应 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.
- WANG Wei. Effect of hill topography on ground motion [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011. (in Chinese)
- [23] 陈桂华, 徐锡伟, 郑荣章, 等. 2008年汶川 M_s 8.0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, 2008, 30 (3): 723~738.
- CHEN Guihua, XU Xiwei, Zheng Rongzhang, et al. Quantitative analysis of the co-seismic surface rupture of the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China along the Beichuan-Yingxiu fault [J]. Seismology and Geology, 2008, 30 (3): 723~738. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈桂华, 徐锡伟, 于贵华, 等. 2008年汶川 M_s 8.0地震多断裂破裂的近地表同震滑移及滑移分解 [J]. 地球物理学报, 2009, 52 (5): 1384~1391.
- CHEN Guihua, XU Xiwei, YU Guihua, et al. Co-seismic slip and slip partitioning of multi-faults during the M_s 8.0 2008 Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (5): 1384~1391. (in Chinese with English abstract)
- [25] Jiao Q J, Zhang B, Liu L Y, et al. Assessment of spatio-temporal variations in vegetation recovery after the Wenchuan earthquake using Landsat data [J]. Natural Hazards, 2014, 70 (2): 1309~1326.
- [26] Zhang Y S, Cheng Y L, Yin Y P, et al. High-position debris flow: a long-term active geohazard after the Wenchuan earthquake [J]. Engineering Geology, 2014, 180: 45~54.
- [27] 倪化勇, 郑万模, 唐业旗, 等. 汶川震区文家沟泥石流成灾机理与特征 [J]. 工程地质学报, 2011, 19 (2): 262~270.
- NI Huayong, ZHENG Wanmo, TANG Yeqi, et al. Mechanism and characteristics of Wenjia-gully debris flow in epicenter area of Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (2): 262~270. (in Chinese with English abstract)
- [28] Jónsson S, Segall P, Pedersen R, et al. Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients [J]. Nature, 2003, 424 (6945): 179~183.
- [29] Wasowski J, Keefer D K, Lee C T. Toward the next generation of research on earthquake-induced landslides: Current issues and future challenges [J]. Engineering Geology, 2011, 122 (1~2): 1~8.
- [30] Keefer D K, Larsen M C. Assessing landslide hazards [J]. Science, 2007, 316 (5828): 1136~1138.
- [31] 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, 2009, 17 (1): 29~38. (in Chinese with English abstract)
- [32] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发滑坡方向效应研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2010, 42 (S1): 7~14.
- XU Qiang, LI Weile. Study on the direction effects of landslides triggered by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42 (S1): 7~14. (in Chinese with English abstract)
- [33] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测 [J]. 山地学报, 2010, 28 (3): 341~349.

- TANG Chuan. Activity tendency prediction of rainfall induced landslides and debris flows in the Wenchuan earthquake areas [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28 (3): 341 ~ 349. (in Chinese with English abstract)
- [34] 许冲,戴福初,徐锡伟. 汶川地震滑坡灾害研究综述 [J]. *地质评论*, 2011, 56 (6): 860 ~ 874.
- XU Chong, DAI Fuchu, XU Xiwei. Wenchuan earthquake-induced landslides: an overview [J]. *Geological Review*, 2011, 56 (6): 860 ~ 874. (in Chinese with English abstract)
- [35] 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)
- [36] 许冲,戴福初,陈剑,等. 汶川 M_s 8.0 地震重灾区次生地质灾害遥感精细解译 [J]. *遥感学报*, 2009, 13 (4): 754 ~ 762.
- XU Chong, DAI Fuchu, CHEN Jian, et al. Identification and analysis of secondary geological hazards triggered by a magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13 (4): 754 ~ 762. (in Chinese with English abstract)
- [37] 吴树仁,王涛,石玲,等. 2008 汶川大地震极端滑坡事件初步研究 [J]. *工程地质学报*, 2008, 18 (2): 145 ~ 159.
- WU Shuren, WANG Tao, SHI Ling, et al. Study on catastrophic landslides triggered by 2008 great Wenchuan earthquake, Sichuan, China [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 18 (2): 145 ~ 159. (in Chinese with English abstract)
- [38] Chen X L, Zhou Q, Ran H, et al. Earthquake-triggered landslides in southwest China [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12 (2): 351 ~ 363.
- [39] 张永双,成余粮,姚鑫,等. 四川汶川地震-滑坡-泥石流灾害链形成演化过程 [J]. *地质通报*, 2013, 32 (12): 1900 ~ 1910. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Yongshuang, CHENG Yuliang, YAO Xin, et al. The evolution process of Wenchuan earthquake-landslide-debris flow geohazard chain [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32 (12): 1900 ~ 1910. (in Chinese with English abstract)
- [40] 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.
- YIN Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16 (4): 433 ~ 444. (in Chinese with English abstract)
- [41] 殷跃平,张永双,吴树仁,等. 汶川地震工程地质与地质灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- YIN Yueping, ZHANG Yongshuang, WU Shuren, et al. *Engineering Geology and Geological Hazards in Wenchuan Earthquake* [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [42] Xu C, Xu X W, Yao X, et al. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan M_w 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis [J]. *Landslides*, 2014, 11 (3): 441 ~ 461.
- [43] 黄润秋,李为乐. “5·12” 汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27 (12): 2585 ~ 2592.
- HUANG Runqiu, LI Weile. Research on development and distribution rules of Geohazards induced by Wenchuan Earthquake on 12th May, 2008 [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27 (12): 2585 ~ 2592. (in Chinese with English abstract)
- [44] Lin C W, Shieh C L, Yuan B D, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. *Engineering Geology*, 2004, 71 (1/2): 49 ~ 61.
- [45] Lin C W, Liu S H, Lee S Y, et al. Impacts of the Chi-Chi earthquake on subsequent rainfall-induced landslides in central Taiwan [J]. *Engineering Geology*, 2006, 86 (2/3): 87 ~ 101.
- [46] 张瑛,成余粮,李长顺,等. 汶川地震灾区地震前后地质灾害发育对比研究 [J]. *工程地质学报*, 2011, 19 (S): 179 ~ 185.
- ZHANG Ying, CHENG Yuling, LI Changshun, et al. Comparatives study on geological disasters before and after Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19 (S): 179 ~ 185. (in Chinese with English abstract)
- [47] Zhou W, Tang C. Rainfall thresholds for debris flow initiation in the Wenchuan earthquake-stricken area, southwestern China [J]. *Landslides*, 2014, 11 (5): 877 ~ 887.
- [48] Yu B, Wu Y F, Chu S M. Preliminary study of the effect of earthquakes on the rainfall threshold of debris flows [J]. *Engineering Geology*, 2014, 182: 130 ~ 135.
- [49] Tang C, Zhu J, Li W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan Earthquake [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68 (2): 187 ~ 194.
- [50] 陈源井,余斌,朱渊,等. 地震后泥石流临界雨量变化特征—以汶川地震区小岗剑沟为例 [J]. *山地学报*, 2013, 31 (3): 356 ~ 361.
- CHEN Yuanjing, YU Bin, ZHU Yuan, et al. Characteristics of critical rainfall of debris flow after earthquake—a case study of the Xiaogangjian gully [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31 (3): 356 ~ 361. (in Chinese with English abstract)
- [51] Koi T, Hotta N, Ishigaki I, et al. Prolonged impact of earthquake-induced landslides on sediment yield in a mountain watershed: The Tanzawa region, Japan [J]. *Geomorphology*, 2008, 101 (4): 692 ~ 702.
- [52] Khan S F, Kamp U, Owen L A. Documenting five years of landsliding after the 2005 Kashmir earthquake, using repeat photography [J]. *Geomorphology*, 2013, 197: 45 ~ 55.
- [53] Saba S B, Van Der Meijde M, Van Der Werff H. Spatiotemporal landslide detection for the 2005 Kashmir

- earthquake region [J]. *Geomorphology*, 2010, 124 (1/2): 17~25.
- [54] 崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. 5.12汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施 [J]. *山地学报*, 2008, 26 (3): 280~282.
CUI Peng, WEI Fangqiang, HE Siming, et al. Mountain disasters induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan and the disasters mitigation [J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26 (3): 280~282. (in Chinese with English abstract)
- [55] 崔鹏, 韦方强, 陈晓清, 等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策 [J]. *中国科学院院刊*, 2008, 23 (4): 317~323.
CUI Peng, WEI Fangqiang, CHEN Xiaoqing, et al. Geohazards in Wenchuan earthquake area and countermeasures for disaster reduction [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2008, 23 (4): 317~323. (in Chinese with English abstract)
- [56] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震震后泥石流活动特征与防治对策 [J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2010, 42 (5): 10~19.
CUI Peng, ZHUANG Jianqi, CHEN Xingchang, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the earthquake [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42 (5): 10~19. (in Chinese with English abstract)
- [57] 陈晓清, 崔鹏, 赵万玉. 汶川地震区泥石流灾害工程防治时机的研究 [J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2009, 41 (3): 125~130.
CHEN Xiaoqing, CUI Peng, ZHAO Wanyu. Optimal timing for the control of debris flow in Wenchuan earthquake area [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41 (3): 125~130. (in Chinese with English abstract)
- [58] 谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008年汶川地震重灾区的泥石流 [J]. *山地学报*, 2009, 27 (4): 501~509.
XIE Hong, ZHONG Dunlun, JIAO Zhen, et al. Debris flow in Wenchuan Quake-hit area in 2008 [J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27 (4): 501~509. (in Chinese with English abstract)
- [59] 陈晓清, 崔鹏, 李泳, 等. 汶川地震后北川干溪沟山地灾害及长期发展趋势初步分析 [J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2010, 42 (S1): 22~32.
CHEN Xiaoqing, CUI Peng, LI Yong, et al. Mountain hazard induced by Wenchuan earthquake and its long-term development trends of Ganxi gully, Beichuan [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42 (S1): 22~23. (in Chinese with English abstract)
- [60] 游勇, 柳金峰. 汶川8级地震对岷江上游泥石流灾害防治的影响 [J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2009, 41 (S1): 16~22.
YOU Yong, LIU Jinfeng. The influence on debris flow prevention in the upriver of Minjiang after Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41 (S1): 16~22. (in Chinese with English abstract)
- [61] Chang K T, Chiang S H, Hsu M L. Modeling typhoon- and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression [J]. *Geomorphology*, 2007, 89 (3/4): 335~347.
- [62] Shou K J, Hong C Y, Wu C C, et al. Spatial and temporal analysis of landslides in Central Taiwan after 1999 Chi-Chi earthquake [J]. *Engineering Geology*, 2011, 123 (1/2): 122~128.
- [63] Liu S H, Lin C W, Tseng C M. A statistical model for the impact of the 1999 Chi-Chi earthquake on the subsequent rainfall-induced landslides [J]. *Engineering Geology*, 2013, 156: 11~19.
- [64] Liu C N, Huang H F, Dong J J. Impacts of September 21, 1999 Chi-Chi earthquake on the characteristics of gully-type debris flows in central Taiwan [J]. *Natural Hazards*, 2008, 47 (3): 349~368.
- [65] 王庆良, 张希, 王文萍, 等. 中国典型强震震后形变有效松弛时间研究 [A]. *中国地震学会第七次学术大会论文摘要集* [C]. *中国地震学会*, 1998, 13.
Wang Qingliang, Zhang Xi, Wang Wenping, et al. The research on effective relaxation cycle of postseismic deformation of typical earthquakes in China [A]. *Abstract Proceedings of Seventh Academic Conference of the Seismological Society of China* [C]. *Seismological Society of China*, 1998, 13. (in Chinese)

RESEARCH REVIEW ON LONG-TERM ACTIVITY OF POST-EARTHQUAKE GEOHAZARD IN STRONG SEISMIC-DISTURBED REGIONS

YANG Zhihua¹, LAN Hengxing², ZHANG Yongshuang³, GUO Changbao¹

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

3. *China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China*)

Abstract: Earthquake can significantly change the physical and mechanical properties of surface rock masses, which leads to an obvious geohazard increase after earthquake for a long period of time. Based on the review and analysis of the current research status of long-term activity of post-earthquake geohazard, the current research methods and achievements of development, distribution rule and evolution trend of earthquake-induced geohazard are systematically summarized, the problems and weaknesses during the research process are discussed, and the prospects and the future research directions and trends are presented. At present, there is no perfect research system and effective research methods and techniques for long-term activity of post-earthquake geohazard, and the research results have a big difference. In-depth scientific research on long-term activity of post-earthquake geohazard in seismic-disturbed regions can provide scientific support for long-term disaster prevention, mitigation and risk control of geohazard after the earthquake and also present a reference for further study of this scientific problem.

Key words: earthquake; geohazard; long-term activity; active cycle; review