中国地质灾害成因分析

刘传正, 陈春利
自然资源部地质灾害技术指导中心,北京,100081

内容提要: 中国地质环境的特殊性决定了地质灾害的多样性、易发性及其区域变异性。地质灾害的发生不仅取决于地质环境演变,还与区域降雨渗流、冻融作用、地震损伤和人类活动等多种因素叠加作用密切相关。基于大数据思维,作者统计研究了中国年均降雨量、地质灾害数量、多年降雨距平、死亡失踪人数、直接经济损失等参数的相关关系。提出了重合度概念及其计算方法,计算了1998~2018年各年度降雨正距平分布区与地质灾害易发区的重合度,得出地质灾害危害程度与重合度正相关。例如,1998年年均降雨量距平10.5%,重合度达60%,危害损失大;2010年年均降雨量距平7.8%,重合度高达65%,危害损失巨大;2011年年均降雨量距平为-9.8%,重合度只有10%,危害损失小;2018年年均降雨量距平5.9%,但重合度仅15%,危害损失小。研究证明,中国地质灾害防治成效是显著的,灾情大小与年度降雨作用和地质灾害易发区的重合度正相关,"人努力,天帮忙"的说法是有一定道理的。

关键词:地质灾害;重合度指数;降雨渗流;冻融作用;地震损伤;人类活动

地质灾害已成为人类生存发展、工程建设甚至休闲活动无法回避的重要问题。中国地质灾害防治的历史进程是与中国社会经济进步的防灾减灾需求紧密相关的,是与社会经济发展水平相适应的。1980年代中期以前,中国滑坡泥石流、地面塌陷或地面沉降等的认识与防范主要服务于工程建设的地质安全选址评价和工程防护方面,一般把其当作工程地质问题进行工程绕避、处理或工程地质改良。进入1990年代以来,"地质灾害"作为一个专门的术语用于概括崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝和地面沉降等逐步为政府、企业、社会和学术界所接受。进入21世纪,中国地质灾害调查评价、监测预警、综合防治和应急响应等已发展成为一个行业,防灾减灾需求也更加多样而迫切。

基于大数据思维研究全国地质灾害相关数据的内在关联性,需要全面考察利用所有数据而非随机样本或部分数据,接受数据的混杂性或不精确性而进行有价值的"提纯",建立数据群的相关关系才能寻求正确的整体认识,而不苛求精准定位(刘传正,2015)。事实上,中国地质灾害相关因素如气象、水文、地质、地震、社会、经济和政府管理等大数据的获取、储存、分析、集成和共享等已经具备了从国家尺度和较长的时间尺度研究地质灾害成因和防治成效的数据基础,研究结果可以为国家更加理性地制定防灾减灾对策提供依据。

本文提出了年度降雨量正距平与地质灾害易发区的重合度(重合比例)概念及其计算模型,研究了中国年度降雨量、地质灾害数量、重合度、降雨距平、年度死亡失踪人数和直接经济损失等数据的相关关系。研究发现,年度减灾成效所谓"人努力,天帮忙"的说法是有一定道理的。"人努力"是指中国地质灾害调查评价、监测预警、综合防治和应急响应工作取得显著防灾减灾成效的必然性。"天帮忙"是指区域降雨作用与地质灾害易发区的重合度决定灾害大小,重合度大时则灾情大,小时则灾情小,但总趋势上存在时间上的渐趋弱化性和具体地域人类活动干扰的偶然性。

1 中国地质环境特征

1.1 地貌气候环境

中国地域广阔,地理环境复杂多样,地貌格局西高东低,从西部的高原沙漠到中部的高中山区,再到东部的低山丘陵平原,山地丘陵约占中国陆域面积的65%(李炳元等,2008)。以全国性分水岭或雪线

注: 本文为国家重点研发计划项目课题"基于地质气象大数据的区域地质灾害高精度预警模型研发"(编号:2018YFC1505503);国家财政事业专项(编号: 1211221481001)的成果。
收稿日期:2019-12-26;改回日期:2020-06-19;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.05.018
作者简介: 刘传正,男,1961年生,博士,研究员, 主要从事工程地质与地质灾害防治研究; Email: liucz@cigem.cn。

为界,全国陆地环境可划分为东北山地平原区、北方干旱沙漠区、黄土高原区、华北平原区、中南东南山地丘陵区、西南中高山区和青藏高原区等区域(刘传正等,2009)。

中国气候类型与陆地环境具有显著的相关性,且受东南季风及西南季风影响。东南地区多雨潮湿,西北地区少雨干旱,大气降水的时空分布极不均衡。全国多年平均年降水量 630 mm 左右,自东南沿海向西北内陆逐渐减少。东南沿海多年平均降水量可达 1500 mm 以上,西北地区多地低于 50 mm。一般地,年降水量的 70%~80%集中在每年的 6~9 月份。

1.2 区域地质环境

中国大陆位于印度板块、欧亚板块与太平洋板块交汇区域,太平洋板块的俯冲和印度板块对欧亚板块的挤压碰撞是中国大陆最主要的地球动力来源,决定了中国大陆的自然地质环境条件和地质灾害的多样性和频发性(张培震等,2013)。

在地层方面,太古宇—古元古界($Ar—Pt_1$)变质杂岩主要分布在华北地区,如阴山、燕山、太行山、泰山、嵩山和辽东等地;中—新元古界($Pt_2—Pt_3$)轻变质岩系主要分布在长江流域、塔里木盆地边缘和天山、昆仑山、祁连山等地;古生界(Pz)海相沉积主要分布在华北、湘鄂黔桂区域、天山、昆仑山、喜马拉雅山脉、横断山脉、秦岭和台湾等地;中生界(Mz)的三叠纪地层在南方为海相,北方为陆相,到侏罗纪时整体转为陆相为主,白垩系—新近系基本为陆相沉积,东部地区多地分布火山堆积。中酸性侵入岩全国各地广泛分布;基性超基性侵入岩多数小规模出露(任国林,1992)。

新生代(Cz)以来多次强烈的构造运动特别是青藏高原的强烈隆升,奠定了中国地貌的总体格局。断裂构造活动对地形和斜坡岩土体的破坏具有控制作用,沿断裂带的山地滑坡泥石流密集分布。中国大陆地质灾害具有东西分异的特点,东西方向上以贺兰山—六盘山—龙门山—哀牢山和大兴安岭—太行山—武陵山—雪峰山两条线为界,分为三区。西部地区主要发育地震、冻融、泥石流和沙漠化等灾害;中部地区主要发育地震、崩塌滑坡、沟谷泥石流、水土流失、土地沙化、地裂缝和黄土湿陷等灾害;东部地区主要发育地震、地面沉降、地裂缝、坡面泥石流、洪水、海岸侵蚀、海水入侵和盐碱(渍)化等灾害。南北方向上以阿尔金山—祁连山—黄土高原北界—五台山—长白山和祁连山—秦岭—伏牛山—大别山—括苍山为界,北部地区主要发育干旱、沙漠化、盐碱化等灾害及局部山洪泥石流,中部地区黄土湿陷、地裂缝、地面沉降和地面塌陷严重,南部地区崩塌、滑坡、泥石流、山洪和岩溶塌陷等灾害多发。受气候变化影响,青藏高原南缘、东缘冰川冻融作用及崩塌滑坡— 碎屑流极为活跃。

1.3 地质灾害控制因素

中国地质灾害的空间分布除受地形地貌、地层岩性、地质构造和地震作用及人类活动影响外,主要受控于大气降水或气温变化的引发作用。地形切割程度影响着崩塌滑坡规模,中国大型崩塌滑坡、泥石流一般出现在西部高山峡谷地区的河流两岸、沟谷源头。易滑地层或构造破碎带控制着崩塌滑坡的发育位置和规模,尤其是区域断裂活动、地震反复作用和新构造运动导致河谷下切或剥蚀作用增强的地区(刘传正,2009)。例如,西南地区的第四系昔格达组、变质砂板岩、侏罗系砂泥岩地层、二叠系煤系或铝土地层、三叠系泥灰岩软层,西北地区的新近系砂泥岩与第四系黄土分界面以及第四系松散堆积物。

一般地,丰水年份特别是区域性持续降雨与崩塌滑坡泥石流易发区重合的地区,地质灾害数量会显著增加,而枯水年引发地质灾害的总量会显著减少,局地强降雨与人类活动叠加作用区域仍可能酿成重大地质灾害事件。

2 中国地质灾害特征

2.1 地质灾害空间分布

根据全国地质灾害防治“十三五”规划,中国崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降和地裂缝等地质灾害的基本情况是清楚的[1]。

图 1 概略显示了中国突发性地质灾害(崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷)的易发程度分区,高易发区域主要包括青藏高原东缘、川滇藏高山峡谷、云贵高原、川西山地、秦巴山地、黄土高原塬边、天山南北麓、川东鄂西山地、湘鄂中低山和东南丘陵山地区域等(孟晖等,2019)。

崩塌滑坡和泥石流灾害高易发区面积约 120×10^4 km^2。岩溶塌陷灾害分布在 24 个省(自治区、直辖市),塌陷坑总数约 5 万处,中南、西南地区约占总数的 70%。华北南部、华中和华南岩溶丘陵盆地是岩溶地面塌陷易发地区,成为城镇和基础工程建设的重大问题(蒋小珍等,2016)。黄土分布地区局部出现湿陷性塌陷灾害。矿山采空沉陷主要出现在煤矿分布区,开裂沉陷区总面积超过 1200 km^2。

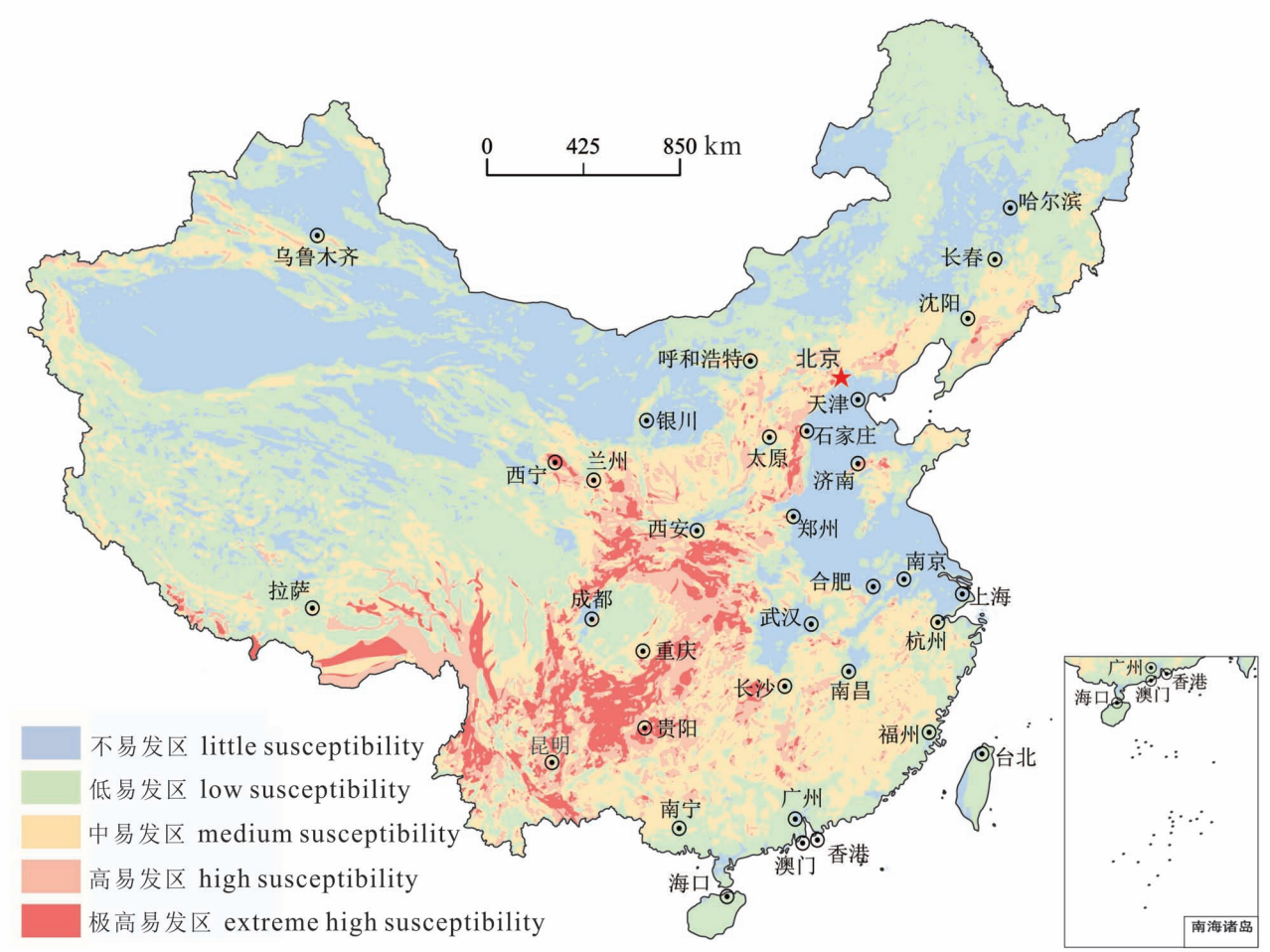


图 1 中国突发性地质灾害易发程度分区图(据孟晖等,2019)

Fig. 1 Zoning map of susceptibility for geological disaster proneness area in China (From Meng Hui et al., 2019&)

地面沉降、地裂缝灾害主要出现在华北平原、长江三角洲和汾渭断陷盆地等区域。全国有 80 多个城市存在地面沉降,其中出现灾害性地面沉降的城市或地区 50 多个,总沉降面积约 5×10^4 km^2。长江三角洲和环渤海地区的地面沉降范围已从城市扩展到农村,形成区域性地面沉降。沿海城市如上海市多年来超高建筑群荷载作用与深基坑降排水成为中心城区地面沉降的重要影响因素。地裂缝灾害主要分布在汾渭盆地、河北平原、大别山东北麓平原和长江三角洲中北部地区,形成多个地裂缝密集区。

2.2　地质灾害时间分布

中国崩塌滑坡和泥石流等突发性地质灾害的时间分布既反映了中国气候变化、水文环境与地质环境叠加作用的演化规律,也反映了中国人类工程经济活动干扰地质环境强度与范围的变化。总体趋势上,2001~2010 年地质灾害年度发生数量呈上升趋势,2011 年以后呈下降趋势。前一时段反映了中国地质环境开发利用盲目无序态势未得到有效控制,地质灾害防治能力不足;后一时段反映国家地质灾害防治能力快速提升,生态环境保护和恢复改良行动逐步加强,地质灾害综合治理体系建设成效逐渐显现,地质灾害发生数量显著减少。

多年统计数据显示,约三分之二的突发性地质灾害主要发生在每年的 5~9 月。这个时段除了区域地质环境控制和人为因素引发作用外,大气降雨成为主要的直接引发或间接加剧地质灾害的因素。

2.3　地质灾害强度分布

2.3.1　地质灾害危害特征

中国大型崩塌滑坡或沟谷型泥石流主要出现在地形高陡、构造活动强烈和局地强降雨以及冰川消融作用叠加的西北、西南地区,常常表现为高位远程崩塌滑坡—碎屑流灾害和远程沟谷型山洪泥石流灾

害。东南、华南山地丘陵区以降雨引发的群发且小型崩塌滑坡或坡面泥石流为主,主要出现在“房前屋后”。“房前”表现为降雨渗流导致的斜坡蠕动变形破坏,“屋后”表现为切坡卸荷崩塌滑坡和植被茂密的高陡斜坡在局地强降雨条件下形成的坡面泥石流(山泥倾泻)。岩溶地面塌陷灾害主要出现在隐伏碳酸盐岩分布区。在危害性方面,造成重大人员伤亡或经济损失的地质灾害事件主要出现在人类聚居和工程经济活动区域。灾害性地面沉降主要出现在地下水资源超采严重的城市群地区,如上海、苏州—无锡—常州地区、天津、西安、北京东北部和河北沧州等地。

根据 1997 年以来全国地质灾害统计数据研究[2,3,4],中国地质灾害造成的死亡失踪人数随时间显著下降,城乡社区直接经济损失占国民经济生产总值(GDP)的比例不断降低,地质灾害数量趋势性减少,但单次地质灾害损失显著增大,地质灾害来临时提前应急避险的主动性提升(刘传正等,2020)。

2.3.2 地质灾害数量与危害的趋势性变化

2001~2010 年,地质灾害发生数量呈显著增长趋势,因地质灾害造成的人员死亡失踪数量却呈波动性下降,说明地质灾害防治努力在艰难中取得成效。2011~2018 年,地质灾害发生数量呈持续下降趋势,造成的死亡失踪人数也呈现趋势性下降(图 2a)。2003 年及以前,地质灾害数量与城乡社区直接经济损失趋势一致,2010~2018 年地质灾害数量出现显著的趋势性下降,但经济损失仍表现为明显的涨落变化(图 2b)。2010 年是个非常特殊的年份,出现多次强降雨过程与地质灾害高易发区叠加,重大地质灾害事件多次发生,导致死亡失踪人数远高于其前后年份。

全国地质灾害数量与造成的死亡失踪人数相关性比较高,但总体上死亡失踪人数并不随地质灾害数量增加显著增加,而是局限于一定范围,反映了地质灾害发展态势逐步得到控制,地质灾害防治成效逐步显现(图 3a)。地质灾害发生数量与直接经济损失的相关性比较离散,其中,2010 年灾情重,2013、2016 年中南、东南地区经济损失大(图 3b)。总体上,地质灾害发生数量从增多到减少,对应的直接经济损失并无明显减轻,单次地质灾害造成的损失大幅增加,反映城乡居民随着社会经济发展个人财富持续增加。

3 中国地质灾害成因分析

一般地,地质灾害是地质因素、引发条件耦合作用和承灾对象遭遇的结果。地质因素包括地形地貌、地质成分结构和构造活动背景等,决定了地质灾害的易发程度。引发条件包括气温变化引起的冻融作用、降雨渗流、地震作用和人类工程活动等多因素叠加效应(刘传正,2014)。承灾对象包括人员、财产、基础设施和生态环境等,决定了危害类型及社会影响。

3.1 自然演化累积效应

地质环境自然演化的必然性与人类生存发展遭遇的偶然性或概率增大,是地质灾害成生的重要因素。例如,长江三峡仙女山活动断裂带既是构造地

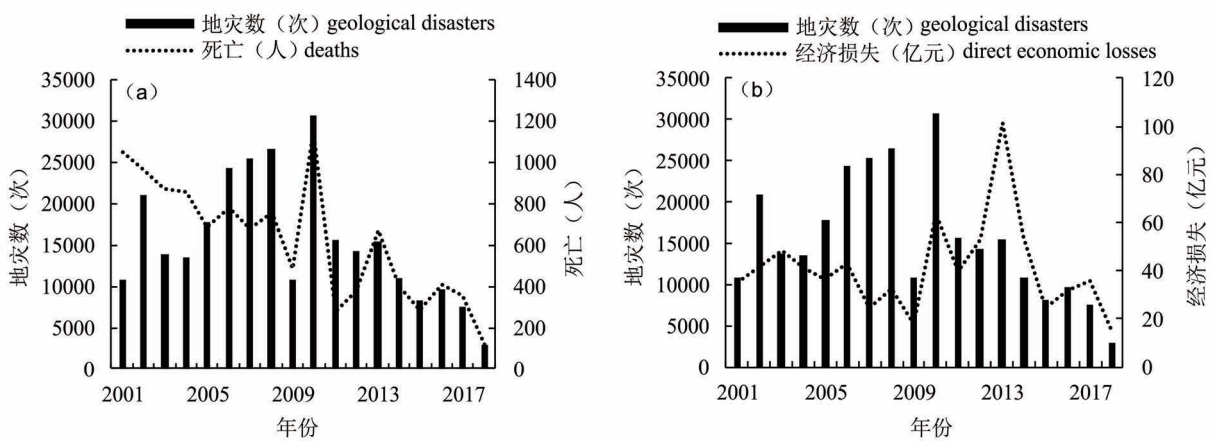


图 2 (a)中国地质灾害数量与死亡人数时间分布;(b)中国地质灾害数量与经济损失时间分布。
图中数据引自《全国地质灾害通报》[2,3,4]

Fig. 2 (a) Distribution of geological disasters and human deaths from 2001 to 2018 in China; (b) Distribution of geological disasters and direct economics losses from 2001 to 2018 in China. Data from Notes [2,3,4]

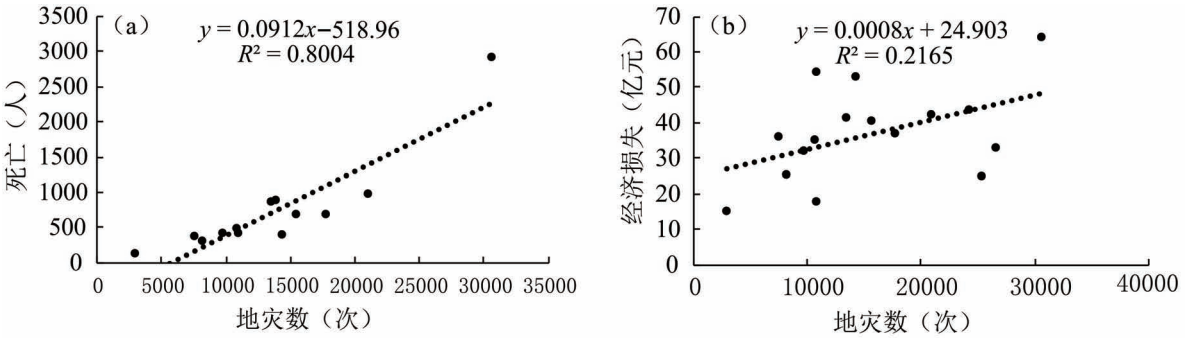


图 3 (a)2001 年以来中国地质灾害数量与死亡人数相关性;(b)2001 年以来中国地质灾害数量与经济损失相关性。图中数据引自《全国地质灾害通报》[2][3][4]

Fig. 3 (a) Relations of geological disasters and human deaths since 2001 in China; (b) Relations of geological disasters and direct economics losses since 2001 in China. Data from Notes [2][3][4]

震带,也是崩滑灾害发育带,沿断裂带南有老林河崩塌体,中有狮子崖崩塌,北部(长江边)则有新滩滑坡,表现出显著的空间系统性。新滩滑坡自汉永元 12 年(公元 100 年)以来具有约 460 年的复发周期,与该地区的地震活动期基本对应,崩滑活动期稍滞后于地震活跃期,是内动力作用(地震)控制外动力作用(崩滑)的一处典型案例(刘传正,1990)。

自然演化形成的崩塌滑坡和泥石流广泛存在,在地质构造复杂、地壳活动强烈和气候变化显著地区的表现尤其突出(王兰生等,1994)。2018 年 10 月,金沙江、雅鲁藏布江先后发生山体滑坡堵江形成堰塞湖,水位升高漫顶泄洪及涌浪造成巨大经济损失和广泛社会影响。事实上,早在 2009 年 7 月,当地政府就发现了金沙江白格滑坡变形迹象,2014 年 11 月,当地政府对滑坡威胁范围内的村民全部实施了搬迁避让(刘传正,2019)。雅鲁藏布江色东普段数十年来因冰川消融引发多次崩滑—碎屑流堵江事件,2018 年堵江灾害发生前,该河段三分之二处于堰塞状态,沟源区存在崩滑堆积“零存整取”现象,河道多次堰塞形成“累积效应”(童立强等,2018;刘传正等,2019)。

3.2　气温变化与冻融地质灾害

3.2.1　区域气温变化

全球气候变暖是极端事件增多增强的大背景,气温升高或气温变率加大会导致极端天气气候事件增多趋强,成为暂时性或长期性冰雪冻融和山地斜坡稳定性变化的重要因素。1951~2001 年全国平均气温在 1980 年代以后上升更为明显,西南高山低温区在 1990 年代以后温度也处于上升状态(王遵娅等,2004)。

由于青藏高原影响着东亚季风气候,使中国成为全球气候变化的敏感区和影响显著区。1951~2018 年,中国地表年平均气温平均升高 0.24℃/10a,升温率高于同期全球平均水平[5](图 4)。其中,北方增温速率明显大于南方地区,西部地区大于东部,其中青藏地区增温速率最大。

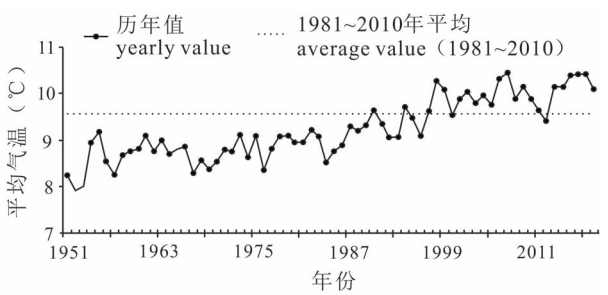


图 4 1951~2018 年全国年平均气温变化。图中数据引自《中国气候公报》[5]

Fig. 4 Mean temperature changes from 1951 to 2018 in China. Data from Note[5]

1961 年以来,西藏高原年气温平均上升 0.32℃/10a,尤其表现在秋冬两季。1981 年以来升温 0.60℃/10a。气候变化造成普遍性冰川退缩、湖泊面积扩张、冻土深度变浅、植被增加和强降水、干旱日数、冰湖溃决、冰崩、滑坡—碎屑流等极端事件显著增多。

3.2.2　冻融引发的地质灾害

中国西北、西南高山峡谷地区或黄土塬边对秋冬或春夏交替温度变化引起的冻融作用反应敏感,冰雪冻融水流下渗或在斜坡前缘形成“冻结滞水”

后融化软化引发崩塌滑坡—碎屑流灾害(刘传正,2014)。2000 年 4 月 9 日,西藏波密县易贡藏布河扎木弄沟左侧山体巨型冰崩—滑坡碎屑流,堵河形成堰塞湖,溃决后造成下游 100 多人失踪和巨大经济损失(刘伟,2002)。事后调查,该地段 1998 年 5 月以来山体断续出现垮塌,2000 年 3 月数日"高温"和降雨叠加作用引发大规模崩滑事件。另外,冰湖溃决引发的山洪泥石流值得关注(崔鹏等,2003;康志成等,2004)。

2009 年 11 月 16 日,山西中阳县张子山乡张家咀村降雪融水渗流引发黄土崩塌造成 23 人死亡;2010 年 3 月 10 日,陕西子洲县双湖峪镇石沟村降雪融水渗流引发黄土崩塌造成 27 人死亡;2013 年 1 月 11 日,云南镇雄县果珠乡赵家沟降雪融水渗流引发滑坡造成 46 人死亡;2013 年 3 月 29 日,西藏墨竹工卡县扎西冈乡普朗沟因降雪融水渗透导致矿山弃土场滑坡碎屑流造成 83 人死亡失踪。

1977~2018 年期间,藏东雅鲁藏布江色东普流域因气温升高冰川退缩面积达 15.67 km^2,退缩率为 45.46%(童立强等,2018)。气温升高造成南迦巴瓦峰格嘎冰川和加拉白垒峰色东普冰川自 1950 年代以来多次活动跃进引发崩滑碎屑流,冲击堵塞雅鲁藏布江(刘传正等,2019)。

3.3 大气降雨与地质灾害

3.3.1 区域"重合度"模型

降雨因素具有覆盖面广、持续时间长和局地冲刷渗流作用强烈等特征,是地质灾害的主要引发因素。本文提出"重合度"概念及其计算模型,用以描述区域降雨量与地质环境的叠加作用。

在气象领域,年度降水量距平用当年降水量与多年降水量平均值(一般 20 年以上平均)的差值与后者的比值表征当年降水的偏多(正距平)或偏少(负距平),一般用百分率(%)表示。

"重合度"是指降雨作用等引发条件与地质灾害易发区或高潜势度区域在空间的叠加重合比例,可用于大范围降雨引发地质灾害的成因分析、趋势预测或风险评估。以年度区域降雨重合度分析为例,年均降雨量正距平与地质灾害易发区的重合度计算模型可表达为:

$$R = A_{(r\cap s)}/A_s$$

式中,R—重合度,年度降雨正距平与地质灾害高潜势度区或易发区重合部分的面积比例(%);

$A_{(r\cap s)}$—年度降雨正距平分布区域与地质灾害易发区重合的面积(km^2);

A_s—地质灾害易发区或高潜势度分布区的面积(km^2)。

全国尺度年度降雨"重合度"的计算步骤是:① 确定突发性地质灾害易发区,如中南山地区、东南华南山地丘陵区、西南西北高中山峡谷地区、秦巴山区、黄土高原塬边地区等;② 确定某一年度的降雨正距平约在 20%的区域;③ 把年度降雨量正距平区域与地质灾害易发区进行空间叠加,分别计算各区域的重合比例;④ 根据地质灾害易发程度设定权值分配,最后合并计算全国的重合比例(重合度)。

3.3.2 年度降雨量与地质灾害关系研究

中国夏季风的进退同大陆上主要雨带的季节性位移密切相关。1951~2001 年全国年平均降水量波动略有减少,但 1990 年代以后夏季降水增加明显(王遵娅等,2004)。1951~2009 年期间,中国华北、西南地区年均降水量减少明显(李聪等,2012)。

通过统计分析全国地质灾害通报(1997~2018)[2][3][4]、中国气候报告(1997~2018)[5]和中国水资源公报(1997~2018)[6],可以研究全国地质灾害数量、死亡失踪人数、直接经济损失与年均降雨量和降雨距平及重合度的统计相关关系。要说明的是:

(1)中国年均降雨量采用水利部门的数据主要考虑其山地丘陵小流域雨量观测部署较多,更符合地质灾害易发区的实际降雨状况。水利部门的年降雨量数据一般比气象部门的数据偏大 10 mm 左右,反映了山地丘陵区降雨量一般大于临近的平坦地区城镇的降雨量。

(2)1997~2018 年共 22 年平均年降雨量 645.3 mm,各年度降雨距平据此计算。

(3)年度降雨正距平与地质灾害易发区重合度(%)依据中国气象局公布的年度降水正距平 20%左右分布图[5]与全国地质灾害易发区分布图(图 1)叠加计算。

(4)地质灾害造成的人员死亡失踪、直接经济损失和地质灾害发生数量采用自然资源部门统计数据[2][3][4]。

(5)以 0.5、0.3、0.15 和 0.05 分别作为西南西北、中南东南、黄土塬边和天山及北方地质灾害易发区的权重折算重合度。表 1 列出了各类数据集成计算处理结果。

2001~2010 年间,全国地质灾害数量与年均降雨量吻合较好,年均降雨量大的年份地质灾害相应高发,如 2002、2008、2010 年(图 5a)。2011~2018 年,年均降雨量处于偏多态势,但地质灾害发生数量

呈逐年下降趋势,且与降雨量的相关性显著降低,仅2013、2016 年地质灾害数量与年均降雨量趋势一致,且 2016 年存在超强“厄尔尼诺”效应。

表 1 中国地质灾害统计研究相关数据

Table 1 Statistical data of geological disasters in China

年份	Ra (mm)	△*L* (%)	*Ri* (%)	*Na* (次)	*Da* (人)	*Ea* (亿元)
1997	613	-5.0			1160	
1998	713	10.5	60		1573	
1999	629	-2.5	40		864	
2000	633	-1.9	30		1080	49.5
2001	612	-5.1	20	10793	1049	35.0
2002	660	2.3	35	20977	962	42.0
2003	638	-1.1	20	13832	868	48.6
2004	601	-6.8	25	13555	858	40.9
2005	644	-0.2	20	17751	682	36.5
2006	611	-5.3	15	24340	774	43.2
2007	610	-5.4	20	25364	715	24.8
2008	655	1.6	40	26580	757	32.7
2009	591	-8.4	10	10840	486	17.7
2010	695	7.8	65	30670	2915	63.9
2011	582	-9.8	10	15664	277	40.1
2012	688	6.7	45	14323	375	52.8
2013	662	2.6	35	15403	669	101.5
2014	622	-3.6	40	10907	400	54.1
2015	661	2.5	35	8224	287	24.9
2016	730	13.2	55	9710	405	31.7
2017	665	3.1	30	7521	354	35.9
2018	683	5.9	15	2966	112	14.7

注:*Ra*—全国年均降雨量(mm);△*L*—1997~2018 年全国年均降雨量距平(%);*Ri*—降雨正距平分布区与地质灾害易发区的重合度(%);*Na*—年度地质灾害数量(次);*Da*—年度死亡失踪数(人);*Ea*—年度城乡直接经济损失(亿元)。

1997 年以来,年均降雨量与地质灾害造成的死亡失踪人数总体正相关,但死亡失踪人数随时间趋势性下降(图 5b)。1998、2010 和 2013 年趋势一致,2005、2015 和 2018 年趋势不同,尤其是 2011 年以后,年度降雨量总体增加,但因灾死亡失踪人数显著下降。1998 年,中国华中、华南、东北地区强烈降雨引发大规模洪水灾害,同时也是地质灾害严重年份。2005 年台风“海棠”、“麦莎”、“珊瑚”、“泰利”、“卡努”和 2006 年超强台风“碧利斯”和“桑美”等带来的强降雨在中国东南山地丘陵区引发群发型地质灾害,造成的经济损失较大。2010 年人员伤亡最严重,主要是局地强降雨引发的特大型地质灾害事件较多。

2000 年以来,全国年均降雨量与城乡社区地质灾害造成的直接经济损失总体上趋势一致(图 5c)。2010 年以前年度降雨量与地质灾害造成的经济损失基本对应,其后降雨量总体增加,经济损失虽有波动,但出现减少趋势。2010 年出现经济损失大主要是地质灾害广泛发生在华东、中南、西南以及西北的部分地区。2016 年地质灾害造成的经济损失最大,主要是甘肃、四川、重庆、云南、广东、西藏、辽宁和云南等地居民财产和农业损失严重。

1997 年以来,年度降雨量与重大地质灾害(人员伤亡超过 20 人或经济社会影响巨大)数量具有一定相关性(图 5d)。2003 年以前,重大地质灾害相对低发,平均 2.5 次/年;2003~2010 年,重大地质灾害高发,平均 6.1 次/年;2011 年及以后,重大地质灾害低发,平均 3.4 次/年。2010 年是局地降雨与地质灾害易发区高度叠加的年份,发生重大伤亡的地质灾害事件达 15 次。

3.3.3　年度降雨正距平与地质灾害易发区重合度

2001 年以来,全国年度地质灾害数量和降水正距平 20%左右区域与地质灾害高易发或高潜势区域的重合度存在一定相关性(图 6a)。2001~2010 年地质灾害发生数量与重合度基本正相关,只有 2006、2007 年相关性较低。2011 年以来,地质灾害发生数量趋势性减少,与降雨区域重合度显示弱相关性,如 2016 年重合度为高峰值,但地质灾害数量虽比其前后年份多,但远低于 2013 年以前的年份。部分年份二者波动不一致与局地异常强降雨有关,如 2013 年四川省都江堰地区过程降雨量达 1106.9 mm,引发了区域群发性地质灾害,都江堰中兴镇三溪村“7.10”特大型滑坡灾害造成 161 人死亡失踪。

1998 年以来,全国地质灾害造成的死亡失踪人数与降雨区域重合度波动趋势基本一致(图 6b)。重合度较高的年份,地质灾害造成的死亡失踪人数一般较多,如 1998、2010 和 2016 年。降雨重合度较低的年份,地质灾害造成的人员死亡失踪人数一般较少,如 2009、2011 和 2018 年。2011 年以来,重合度与地质灾害造成的死亡人数逐渐偏离,即使重合度处于较高水平,但地质灾害造成的死亡人数仍趋势性降低,说明因地质灾害搬迁避让和综合防治能力持续提升,应对强降雨引发地质灾害的预警响应和应急避险的成效显著。

2000 年以来,全国地质灾害造成的城乡社区直接经济损失与降雨区域重合度波动趋势基本一致,2013 年及以前二者相关性比较显著,2014 年以来相关性显著降低(图 6c)。年均降雨量重合度较高的

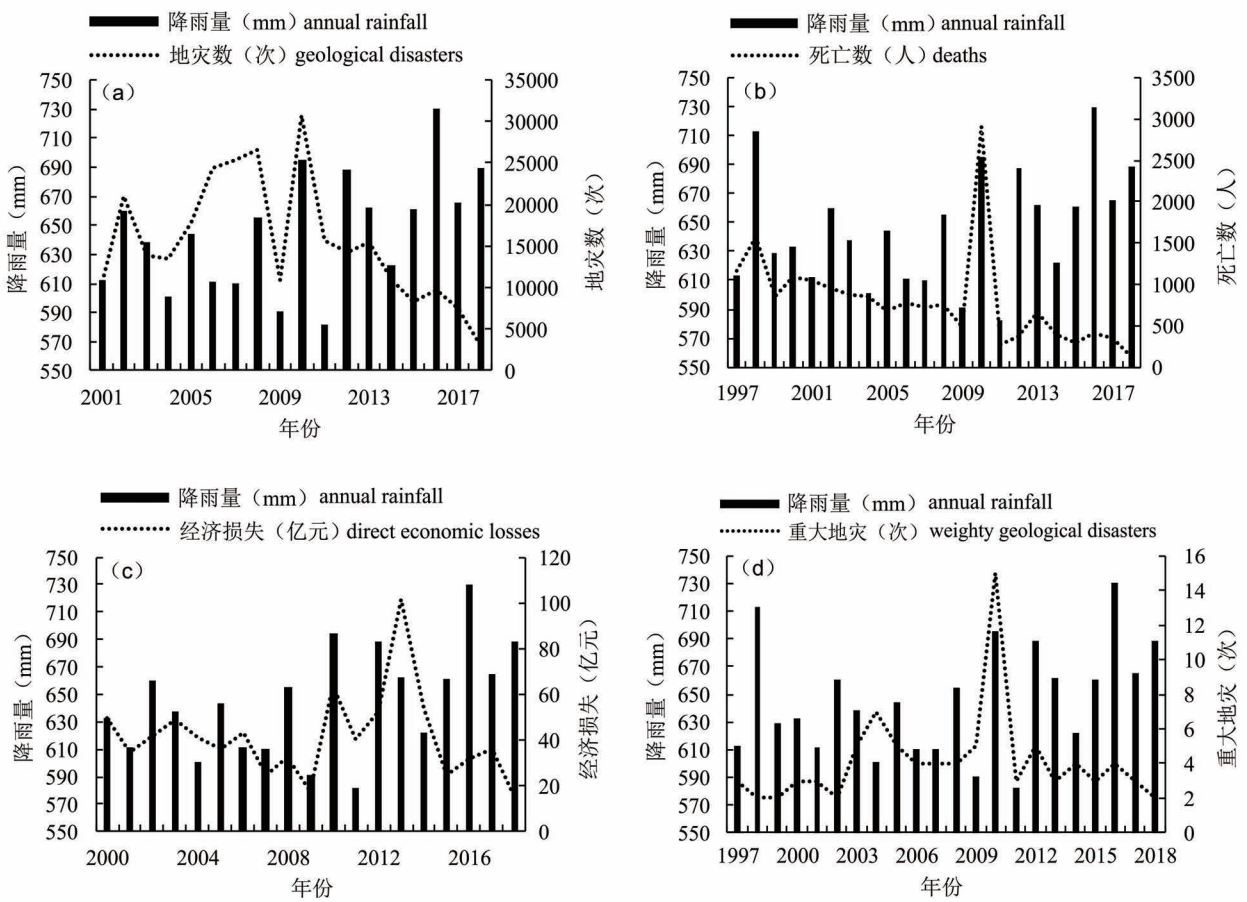


图 5(a)中国年度降雨量与地质灾害数量的时间分布;(b)中国年度降雨量与地质灾害死亡人数的时间分布;(c)中国年度降雨量与经济损失的时间分布;(d)中国年度降雨量与重大地质灾害次数的时间分布。图中数据引自《全国地质灾害通报》[2][3][4]、《中国气候公报》[5]、中国水资源公报[6]

Fig. 5(a) Distribution of annual rainfall and geological disasters from 2001 to 2018 in China; (b) Distribution of annual rainfall and human death from 1997 to 2018 in China; (c) Distribution of annual rainfall and economic losses from 2000 to 2018 in China; (d) Distribution of annual rainfall and mega-geo-disasters from 1997 to 2018 in China. Data from Notes[2][3][4][5][6]

年份,地质灾害造成的直接经济损失一般较高,如2008、2010 和 2017 年。降雨重合度较低的年份,地质灾害造成的直接经济损失一般较少,如 2001、2009、2011 和 2018 年。地质灾害造成的直接经济损失不但与降雨重合度有关,更与地质灾害发生地区的社会经济状况、局地强降雨特征和人类活动密切相关。

1998 年以来,全国年均降雨量与重合度总体一致,但例外年份也是明显的,即年均降雨量大的年份重合度不一定高,年均降雨量小的年份重合度却较高(图 6d)。例如,2004、2014 年均降雨量小,但重合度相对较高;2018 年均降雨量大,但重合度低。年均降雨量较少而重合度较高,说明降雨较多落在地质灾害易发区,降雨引发地质灾害的效应较高。年均降雨量较多而重合度低,说明降雨落在地质灾害易发区较少,这是 2018 年地质灾害发生数量最少的主要原因之一。

1998 年以来,全国年均降雨正负距平与重合度大小分布总体一致(图 6e)。1999~2009 年,降雨负距平为主,重合度总体偏低。2010~2017 年降雨正距平为主,重合度总体较高。例外的是,1999、2000 和 2014 年的年均降雨量是负距平,但重合度较高;2018 年降雨量显著正距平,但重合度很低。2014 年均降雨量负距平,但重合度高达 40%,年度降雨总量虽然较少,但降雨较多地落在地质灾害高易发区,引发地质灾害数量较大,造成的死亡失踪人数较多,直接经济损失较严重。2018 年降雨量显著正距平,但重合度仅为 15%,该年度降雨总量虽然多,但降

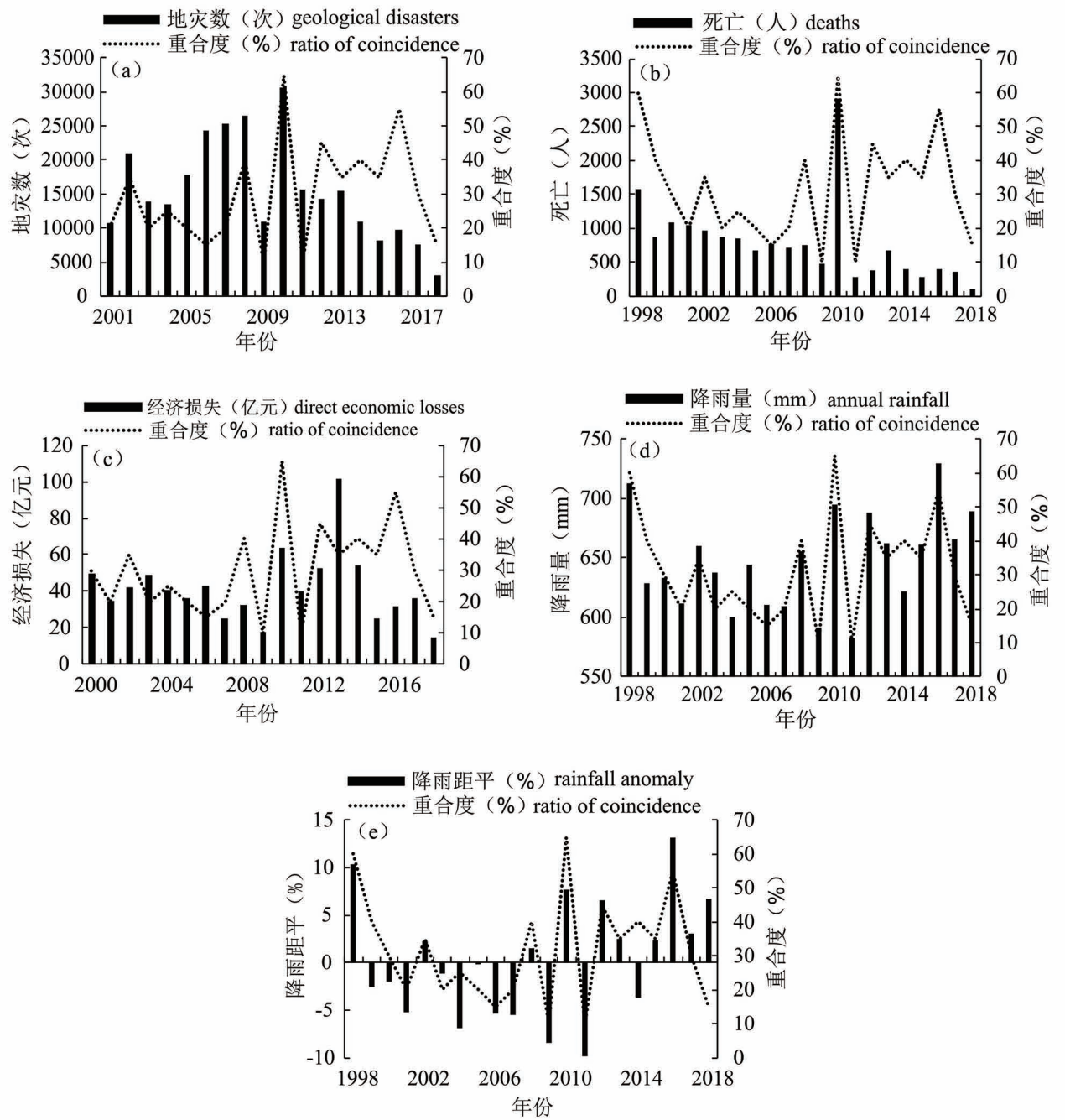


图 6(a)中国地质灾害数量与降雨重合度的时间分布;(b)中国地质灾害死亡人数与降雨重合度的时间分布;(c)中国地质灾害经济损失与降雨重合度的时间分布;(d)中国年降雨量与降雨重合度的时间分布关系;(e)中国降雨距平与降雨重合度的时间分布关系。图中数据引自《全国地质灾害通报》[2][3][4]、《中国气候公报》[5]、中国水资源公报[6]

Fig. 6(a) Distribution of geological disasters and coincidence ratio in raining from 2001 to 2018 in China;(b) Distribution of human deaths and coincidence ratio in raining from 1998 to 2018 in China;(c) Distribution of economics losses and coincidence ratio in raining from 2000 to 2018 in China;(d) Distribution of rainfalls and coincidence ratio in raining from 1998 to 2018 in China;(e) Distribution of precipitation anomalies and coincidence ratio in raining from 1998 to 2018 in China. Data from Notes[2][3][4][5][6]

雨落在地质灾害高易发区较少,是 2018 年地质灾害危害小的主要原因。

2001 年以来全国地质灾害数量与年度降雨量相关性比较离散,但地质灾害数量与降雨—地质重合度相关性明显(图 7a、b)。地质灾害导致的死亡失踪人数和降雨—地质重合度相关性较高,但地质

灾害造成的直接经济损失与降雨—地质重合度相关性不大(图 7c、d)。地质灾害造成的直接经济损失涉及因素较多,如目前的统计数据主要局限于城乡社区而基本不包括工矿企业,我国东西部、南北方经济发展水平差距较大等(刘传正等,2020)。

3.3.4 年度地质灾害与降雨—地质重合度案例分析

基于降雨—地质重合度分析发现,地质灾害的发生与全国年均降雨量并不一定正相关,但与降雨量和地质灾害易发区的重合程度显著正相关,即地质灾害的发生数量及危害大小取决于降雨区域与地质灾害易发区的重合度高低,证明了"人努力,天帮忙"的说法是有一定科学道理的。降雨区域与地质灾害易发区的重合度高的年份,即使努力增加防灾减灾成本,危害或损失仍然可能会比较高。

2018 年全国地质灾害共造成 112 人死亡,73 人受伤,是有历史记录以来的最低值。2018 年全国年平均降水量 683 mm,比常年(1997 年以来 22 年降雨量均值,下同)偏多,正距平 5.9%,局地暴雨次数、强度低于常年。全国地质灾害高易发地区的降雨量明显低于常年水平,年降水量分布正距平与地质灾害高易发区的重合度只有 15%,是 2018 年地质灾害危害低的主要原因。

2011 年全国地质灾害造成 277 人死亡,138 人受伤。2011 年全国年平均降水量 582 mm,比常年显著偏少,降雨负距平-9.8%,全国降水量正距平分布区与地质灾害易发区的重合度仅为 10%,是地质灾害显著减少的重要原因。

2010 年全国地质灾害造成 2915 人死亡,是历史记录以来的最高值。2010 年全国年平均降水量 695 mm,比常年偏多,降水正距平 7.8%,暴雨日数比常年偏多 21.5%(王遵娅等, 2011)。2010 年降水量正距平分布区与高地质灾害易发区的重合度高达 65%,甘肃、四川、贵州、云南等地因多次局地强降雨过程的叠加效应或累积效应酿成重大地质灾害事件达 15 次。例如,6 月 2 日,广西玉林地区局地

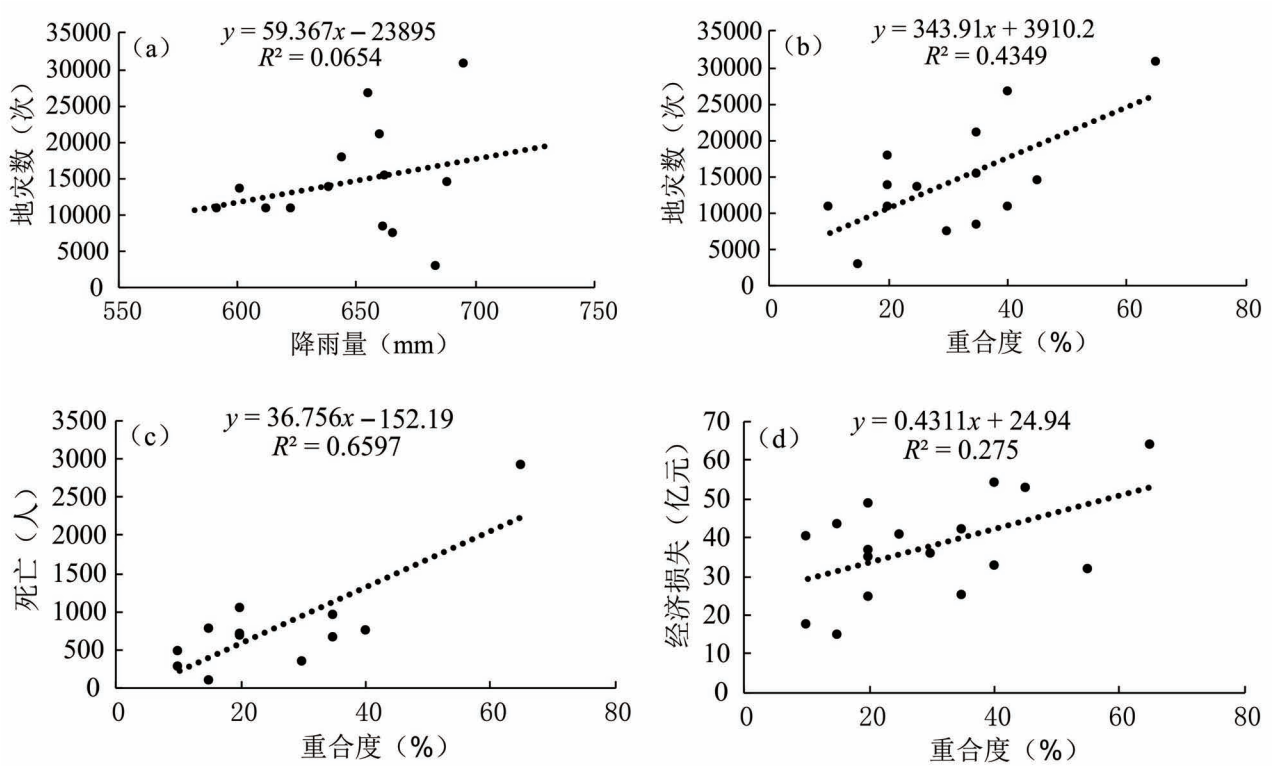


图 7 (a)2001 年以来中国地质灾害数量与年度降雨量的相关性;(b)2001 年以来中国地质灾害数量与降雨重合度的相关性;(c)1998 年以来中国地质灾害死亡人数与降雨重合度的相关性;(d)2000 年以来中国经济损失与降雨重合度的相关性。图中数据引自《全国地质灾害通报》[2-3-4]、《中国气候公报》[5]、中国水资源公报[6]

Fig. 7 (a) Relations of geological disasters and annual rainfall since 2001 in China; (b) Relations of geological disasters and coincidence ratio in raining since 2001 in China; (c) Relations of human death and coincidence ratio in raining since 1998 in China; (d) Relations of economic losses and coincidence ratio in raining since 2000 in China. Data from Notes[2-3-4-5-6]

强降雨引发群发性滑坡泥石流造成 43 人死亡;6 月 28 日,贵州关岭县岗乌镇大寨村持续强降雨引发山体滑坡造成 99 人死亡失踪;7 月 18~24 日,陕西安康市局地强降雨先后引发大竹园镇七堰村、山阳县高坝镇桥耳沟滑坡分别造成 29 人、24 人死亡失踪;8 月 8 日,甘肃舟曲县城区及上游村庄因后山降雨汇流引发山洪泥石流造成 1765 人死亡失踪;8 月 18 日,云南贡山县普拉底乡东月谷村泥石流造成 92 人死亡失踪;9 月 1 日,云南保山市隆阳区瓦马乡河东村强降雨引发滑坡造成 48 人死亡失踪。

1998 年全国地质灾害造成 1573 人死亡(含部分山洪死亡者,当时泥石流与山洪灾害尚未明确区分)。1998 年年均降水量正距平与地质灾害易发区的重合度达 60%,造成华中、华南和西南地区地质灾害多发频发,出现地质灾害造成死亡失踪人数高峰值。

3.4　地震活动

地震作用表现在长期多次地震活动累积效应造成山体结构损伤、斜坡的渐进性破坏,强烈地震作用直接拉断岩土体,引发崩塌滑坡及碎屑流堆积,其滞后效应可延续数十年(黄润秋,2011;刘传正等,2017)。

一般地,地震烈度 Ⅵ 度以上区域的山体斜坡才可能出现变形破坏,Ⅷ度及其以上区域可能出现大型山体崩塌滑坡,Ⅸ度及以上区域肯定出现大型崩塌滑坡(刘传正,2009)。2008 年“5.12”汶川地震激发的大型崩塌滑坡主要分布在Ⅸ~Ⅺ地震烈度区内,尤其出现在顺向斜坡结构地带或斜坡坡向与地震作用方向一致的区域(黄润秋等,2008;Liu Chuanzheng,2008)。地震台网监测发现,地震 PGA 超过 0.2 g 的区域才会引发比较严重的崩塌滑坡灾害(王秀英,2010)。单就地震引发的崩塌滑坡数量而论,由于不同学者掌握的资料、研究问题的出发点、工作范围、工作方法、现场核实、遥感解译分辨率、地震新生崩滑还是历史存在、规模与危害、地震影响程度和研究深度等的不同,得出的数量可能相差极大。黄润秋等(2008)提出四川现场调查和遥感解译地质灾害点 1.13 万处。殷跃平(2009)提到汶川地震触发 1.5 万处崩滑流,隐患点 1.27 万处。崔鹏等(2011)根据卫星遥感数据估算地震触发崩塌滑坡 4~5 万处。许冲等(2010)、许冲(2012)曾进行文献调研,统计了国内外 10 位学者基于遥感目视解译得到的汶川地震引发崩塌滑坡数量多在不足 1 万或 5 万处左右,但也有高达 19.7 万处和 113.5 万处的数据。实际上,相当多的研究者把光学遥感能够分辨出的植被裸露或水土流失均作为汶川地震引发的崩塌滑坡了,这与本文关于地震滑坡灾害的界定已完全不同了。

Liu Chuanzheng(2008)在技术上负责编制国家专项规划时采用汶川地震区川甘陕三省 51 个县(市、区)地质灾害 11651 处[7]。刘传正等(2016,2017)研究了 2008 年“5.12”汶川地震烈度 Ⅵ 度以上地区,涉及川甘陕三省的 62 个县,约 15×10^4 km^2,共统计录入数据库地质灾害 20865 处。其中,“5.12”汶川地震前因降雨、采矿、人工切坡堆载等引发的崩塌滑坡和泥石流灾害 4913 处,占比 23.5%;“5.12”汶川地震直接引发崩塌滑坡灾害共 10173 处,占比 48.8%;“5.12”汶川地震后至 2013 年底约 5 年半时间因地震作用滞后效应和降雨渗流等综合作用引发崩塌滑坡泥石流灾害 5779 处,占比 27.7%(图 8)。后两个时段崩塌滑坡和泥石流的数量占比达 76.5%。可见,强烈地震活动及其滞后效应完全改变了该区域的地质灾害时空演化态势。

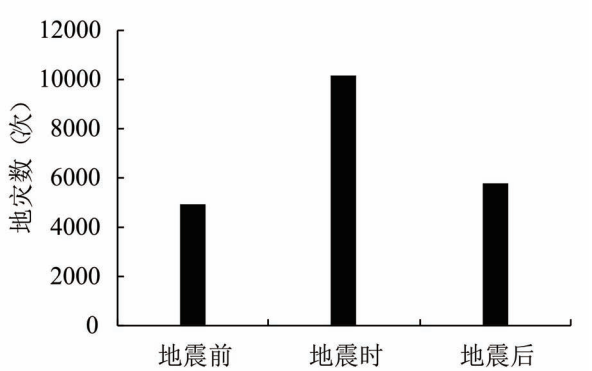


图 8 2008 年“5.12”汶川地震前、地震时和地震后地质灾害数量对比。图中数据引自“5.12”汶川地震区地质灾害防治专项规划[7]

Fig. 8 Distribution of the number of geological disaster occurrence before, during and after the “5.12” Wenchuan Earthquake, 2008. Data from Note[7]

3.5　人类工程活动

人类活动如地下开挖、地表切坡、弃土堆载、水库浸润、灌溉渗漏和爆破振动等会加剧原有的滑坡活动或直接形成新的地质灾害(刘传正,2014)。多年前开挖的边坡在持续降雨条件下失稳,错误的治理工程可能酿成地质灾难。水库水位涨落伴随的反复浸润岩土体特别是弱化带引发的滑坡可能沿水库

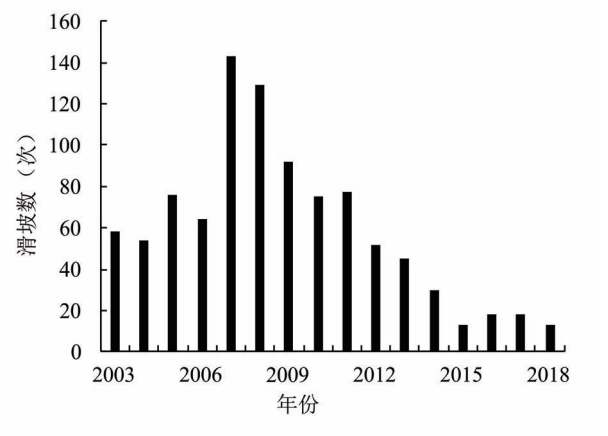


图 9 长江三峡水库蓄水以来滑坡动态响应数量随时间变化(滑坡变形总数 957)

Fig. 9 Annual distribution of landslides activity from 2003 to 2018 in Three Gorges water reservoir of Changjiang river (the total number of landslide deformation is 957)

周边成带成群出现。溶蚀侵蚀、水位升降(涨落)会在斜坡内部产生软化作用、浮托作用和向外的动水压力作用及其滞后效应,会急剧降低斜坡的整体稳定性。黄润秋(2007)曾概略分析了我国部分大型滑坡的发生机制。

2003~2018 年长江三峡水库蓄水及运营期间,水位变动引发 957 次明显的滑坡活动(图 9)。2003~2008 年水库水位从 135 m 逐渐升到 175 m,水库作用引发的滑坡活动数量逐年增加,2007~2008 年最高水位期间滑坡活动数量达到峰值。2008 年以后,水库水位每年在 145~175 m 之间变动,水库水位涨落引发的滑坡活动数量趋势性减少,说明库岸滑坡对水库水位升降作用的敏感性逐步降低,两岸斜坡适应性增强,只有出现局地强烈降雨叠加作用时,滑坡活动响应才会明显增强。

图 10 表示了长江三峡库区树坪滑坡 2003-2009 年 GPS 监测数据与同期的降雨量、水库水位涨落的关系。每年秋季水位从 145 m 向 175 m 上升时,树坪滑坡变形曲线缓慢上升。每年春季水位从 175 m 向 145 m 回落时,变形曲线出现一个明显的快速增长台阶,整个变形曲线表现出“阶跃式”变化特征。水位上升时滑坡体内地下水位升高,孔隙水压力增加,滑动带抗剪强度减小,不利于滑坡体稳定,但初始阶段自外向内的渗透压力和坡面水压力也会暂时性的有利于滑坡稳定。水库水位消落特别是水位骤降过程中,滑坡体内地下水位下降滞后于水库水位消落,造成斜坡内部的地下水渗透力或暂态孔隙水压力指向岸坡之外,显著不利于滑坡体稳定,向外的动水压力与滑坡岩土体下滑力具有更大的耦合作用效应。降雨渗流软化和水库水位下降两

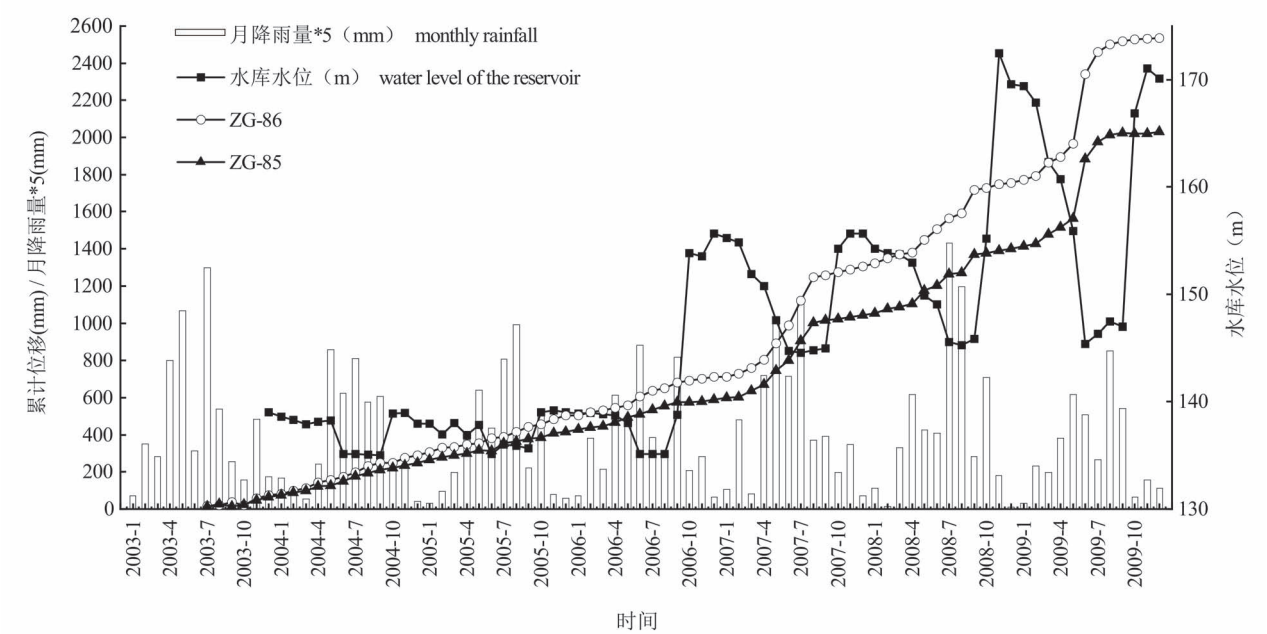


图 10 长江三峡水库水位变动与树坪滑坡累积位移及降雨量关系

Fig. 10 Regional rainfalls and cumulative displacements of Shuping landslide, water fluctuation of Three Gorges reservoir in Changjiang River

个因素同时出现时,叠加耦合效应更会使水库滑坡活动幅度显著增大。

4　结论

(1)中国地质环境的特殊性决定了地质灾害的多样性、易发性及其区域变异性。地质灾害的发生不仅取决于地质环境演化,还与区域降雨渗流、冻融作用、地震损伤和人类活动等多因素叠加作用密切相关。

(2)中国地质灾害的时间分布主要是由季风气候决定的,即每年汛期是地质灾害高发期,冻融季节则使某些地区滑坡泥石流活跃。特殊地区存在地震激发作用、工程活动与滑坡动态的耦合响应关系及其滞后效应。

(3)中国地质灾害数量、死亡失踪人数、直接经济损失等和年度降雨正距平与地质灾害易发区的重合度正相关。年均降雨量正距平大,重合度高,危害损失大;年均降雨量负距平,重合度小,危害损失小;年均降雨量正距平,但重合度小,危害损失也小。

(4)中国地质灾害数量是趋势性减少的,造成的人员伤亡总体上是逐年降低的。城乡社区直接经济损失总量占国家 GDP 的比例总体下降,但单次地质灾害的直接经济损失呈增长趋势。

(5)地质灾害调查评价、监测预警、工程治理、搬迁避让和应急避险工作的防灾减灾成效是显著的,同时存在"人努力,天帮忙"的现象。2019 年,全国发生地质灾害 6181 次,造成 224 人死亡失踪,直接经济损失 27.7 亿元,均远高于 2018 年的对应数据,再次佐证这一认识❽。

说明与致谢:限于资料,本项研究的范围暂不包括我国台湾省、香港和澳门特别行政区。国家气候中心艾婉秀研究员提供了中国气象资料,三峡库区地质灾害监测预警中心付小林研究员、叶润清博士、霍志涛博士等提供了长江三峡水库区蓄水以来沿岸滑坡动态监测资料,在此由衷感谢!

注　释　/　Notes

❶ 中华人民共和国国土资源部. 2016. 全国地质灾害防治"十三五"规划.

❷ 中华人民共和国地质矿产部. 1997. 全国地质灾害通报.

❸ 中华人民共和国国土资源部. 1998~2017. 全国地质灾害通报.

❹ 中华人民共和国自然资源部. 2018. 全国地质灾害通报.

❺ 中国气象局. 1997~2018. 中国气候公报.

❻ 中华人民共和国水利部. 1997~2018. 中国水资源公报.

❼ 中华人民共和国国土资源部. 2008. "5.12"汶川地震区地质灾害防治专项规划.

❽ 中华人民共和国自然资源部. 2019. 全国地质灾害通报.

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

崔鹏,马东涛,陈宁生,蒋忠信. 2003. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策. 第四纪研究,23(6):621~628.

崔鹏,何思明,姚令凯. 2011. 汶川地震山地灾害形成机理与风险控制. 北京:科学出版社.

黄润秋. 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. 岩石力学与工程学报,26(3):433~454.

黄润秋,李为乐. 2008. 5. 12 汶川大地震引发地质灾害的发育分布规律研究. 岩石力学与工程学报,27(12):2585~ 2592.

黄润秋. 2011. 汶川地震地质灾害后效应分析. 工程地质学报, 19(2):145~151.

蒋小珍,雷明堂,郑小战,管振德. 2016. 岩溶塌陷灾害监测技术. 北京:地质出版社

康志成,李焯芬,马蔼乃,罗锦添. 2004. 中国泥石流研究. 北京:科学出版社

李炳元,潘保田,韩嘉福. 2008. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨. 第四纪研究,28(4):535~543.

李聪,肖子牛,张晓玲. 2012. 近 60 年中国不同区域降水的气候变化特征. 气象,38(4):419~424.

刘传正. 1990. 区域构造孕震活动与重力崩滑时空相谐的一个例证. 水文地质工程地质,17(4):51~52.

刘传正,刘艳辉,温铭生. 2009. 中国地质灾害区域预警方法与应用. 北京:地质出版社.

刘传正. 2009. 重大地质灾害防治理论与实践. 北京:科学出版社.

刘传正. 2014. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型. 地质论评,60(4):858~868.

刘传正. 2015. 地质灾害防治研究的认识论与方法论. 工程地质学报,23(5):809~820.

刘传正,温铭生,刘艳辉,刘秋强. 2016,汶川地震区地质灾害成生规律研究. 水文地质工程地质, 43(5):1~16.

刘传正,温铭生, 刘艳辉. 2017. 汶川地震区地质灾害成生规律研究. 北京:地质出版社.

刘传正. 2019. 加强沟通联动/完善地质灾害防治体系. 中国应急管理,13(2):34~37

刘传正, 吕杰堂, 童立强, 陈红旗, 刘秋强, 肖锐铧, 涂杰楠. 2019. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑~碎屑流堵江灾害初步研究. 中国地质, 46(2):219~234.

刘传正, 陈春利. 2020. 中国地质灾害防治成效与问题对策. 工程地质学报,28(2):375~383.

刘伟. 2002. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析. 中国地质灾害与防治学报,13(3):9~18

孟晖,张若琳,石菊松,李春燕. 2019. 地质环境安全评价[J/OL]. 地球科学. http://kns. cnki. net/kcms/detail/42. 1874. P. 20190314. 1015. 002. html

任国林. 1992. 中国区域工程地质条件基本特征. 水文地质工程地质, 19(3):36~38.

童立强,涂杰楠,裴丽鑫,郭兆成,郑雄伟,范景辉. 2018. 雅鲁藏布江加拉白垒峰色东普流域频繁发生碎屑流事件初步探讨. 工程地质学报,26(6):1552~1561.

王兰生,李天斌,赵其华. 1994. 浅生时效构造与人类工程. 北京:地质出版社.

王秀英. 2010. 汶川地震引发滑坡与地震动峰值加速度对应关系研究. 岩石力学与工程学报, 29(1): 82~89.

王遵娅,丁一汇,何金海,虞俊. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报,62(2):228~236.

王遵娅,曾红玲,高歌,陈峪,司东,刘波. 2011. 2010 年中国气候概况. 气象,37(4):439~445

许冲,戴福初,徐锡伟. 2010. 汶川地震滑坡灾害研究综述. 地质论评,56(6):860~874.

许冲. 2012. 汶川地震滑坡详细编录及其与全球其他地震滑坡事件对比. 科技导报,30(25):18~26.

殷跃平. 2009. 汶川地震地质与滑坡灾害概论. 北京:地质出版社.

张培震, 邓起东,张竹琪. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程. 中国科学(D 辑):地球科学, 43(10):1607~1620.

Cui Peng, Ma Dongtao, Chen Ningsheng, Jiang Zhongxin. 2003&. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacial lake outburst. Quaternary Sciences, 23(6):621~628.

Cui Peng, He Siming, Yao Lingkai. 2011#. Mechanism of Mountainous Disasters and Its Risk Control in the Wenchuan Earthquake Area. Beijing: Science Press.

Huang Runqiu. 2007&. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in china since the 20th Century. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(3):433~454.

Huang Runqiu. Li Weile. 2008&. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th, May. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(12): 2585~ 2592.

Huang Runqiu. 2011&. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 19(2):145~151.

Jiang Xiaozhen, Lei Mingtang, Zheng Xiaozhan, Guan Zhende. 2016#. Monitoring Techniques for Karst Collapse Hazards. Beijing: Geological Publishing House.

Kang Zhicheng, Li Zuofen, Ma Ainai, Luo Jintian. 2004#. Debris Flow Disasters Research in China. Beijing: Science Publishing Press.

Li Bingyuan, Pan Baotian, Han Jiafu. 2008&. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions. Quaternary Sciences, 28(4):535~543.

Li Chong, Xiao Ziniu, Zhang Xiaoling. 2012&. Climatic characteristics of precipitation in various regions of China for the past 60 years. Meteorological Monthly, 37(4):419~424.

Liu Chuanzheng. 1990#. An example of regional seismic activity related with landslides in time and space. Hydrogeology & Engineering Geology, 17(4):51~52.

Liu Chuanzheng. 2008. Research on the geohazards induced by "5.12" wenchuan earthquakes in China. In; Proceedings of the First World Landslide Forum, Tokyo. Japan, Global Promotion Committee of the International Programme on Landslides (IPL): 353~357.

Liu Chuanzheng, Liu Yanhui, Wen Mingsheng. 2009 #. Method and Application of Regional Warning for Geo-disasters in China. Beijing: Geological Publishing House.

Liu Chuanzheng. 2009&. Theory and Its Application on Mega-geodisasters Mitigation. Beijing: Science Press.

Liu Chuanzheng. 2014&. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China. Geological Review, 60(4):858~868.

Liu Chuanzheng. 2015&. Epistemology and methodology on geo~hazard research. Journal of Engineering Geology, 23(5):809~820.

Liu Chuanzheng, Wen Mingsheng, Liu Yanhui, Liu Qiuqiang. 2016&. Regional assessment on geological disasters in "5.12" Wenchuan seismic area, China. Hydrogeology & Engineering Geology, 43(5): 1~16.

Liu Chuanzheng, Wen Mingsheng, Liu Yanbhui. 2017 #. Regional Assessment on Geological Disasters in Wenchuan Seismic Area, China. Beijing: Geological Publishing House.

Liu Chuanzheng. 2019#. Strengthened communication and linkage to improve the reductive systems of geological disasters. China Emergency Management, 13(2):34~37.

Liu Chuanzheng, Lü Jietang, Tong Liqiang, Chen Hongqi, Liu Qiuqiang, Xiao Ruihua, Tu Jienan. 2019&. Research on glacial/rock fall—landslide—debris flows in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet. Geology in China, 46(2): 219~234.

Liu Chuanzheng, Chen Chunli. 2020&. Achievements and countermeasures in risk reduction of geological disasters in China. Journal of Engineering Geology, 28(2):375~383.

Liu Wei. 2002&. Study on the characteristics of huge scale~super high speed - long distance landslide chain in Yigong, Tibet Chinese Journal of Geological Disasters and Control, 13(3):9~18.

Meng Hui, Zhang Ruolin, Shi Jusong, Li Chunyan. 2019&. Geological environment safety evaluation[J/OL]. Earth Science; http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20190314.1015.002.html

Ren Guolin. 1992 #. Basic characteristics of engineering geological conditions in China. Hydrogeology & Engineering Geology, 19(3): 36~38.

Tong Liqiang, Tu Jienan, Pei Lixin, Guo Zhaocheng, Zheng Xiongwei, Fan Jinghui. 2018&. Preliminary discussion of the frequently debris flow events in Sedongpu Basin at Gyalaperi peak, Yarlung Zangbo River. Journal of Engineering Geology, 26(6):1552~1561.

Wang Lansheng, Li Tianbin, Zhao Qihua. 1994#. Shallow Structures in Time-effects and Human Engineering. Beijing: Geological Publishing House.

Wang Xiuying. 2010&. Research on relation between landslides and peak ground accelerations induced by Wenchuan earthquake. Chinese Journal of Rocks Mechanics and Engineering, 29(1): 82~89.

Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, Yu Jun. 2004&. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. Acta Meteorological Sinica, 62(2):228~236.

Wang Zunya, Zeng Hongling, Gao Ge, Chen Yu, Si Dong, Liu Bo. 2011&. Climatic characteristics in 2010's China. Meteorological Monthly, 37(4):439~445.

Xu Chong, Dai Fuchu, Xu Xiwei. 2010&. Wenchuan earthquake~induced landslides: an overview. Geological Review, 56(6):860~874.

Xu Chong. 2012&. Detailed inventory of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake and its comparison with other earthquake events in the world. Science & Technology Review, 30(25):18~26.

Yin Yueping. 2009#. An Introduction on Geology and Landslides in the Wenchuan Earthquake Area. Beijing: Geological Publishing House.

Zhang Peizheng, Deng Qidong, Zhang Zhuqi. 2013&. Active faults, earthquake disasters and associated geodynamics process in continental China. Science China [Earth Science(D)], 43(10): 1607~1620.

Research on the origins of geological disasters in China

LIU Chuanzheng, CHEN Chunli

Consultative Centre of Geo-Hazard Mitigation. MNR. Beijing, 100081

Abstract: The geological features of China determine the diversity, susceptibility and regional variability of its geological disasters. The occurrence of geological disasters results from the evolution of geological environments, but related closely to multiple factors such as raining seepage, unfreezing, seismic action and human activities. The correlations of some factors is researched which consists of number of geological disasters, casualty, direct economic losses, annual precipitation and precipitation anomaly percentage. A new concept, ratio of coincidence and its computing method, are proposed in this paper. The ratio of coincidence expresses a portion of that the areas with 20% precipitation anomaly matches in susceptible areas of geological disasters. For instance, in 1998, the precipitation anomaly is 10.5% and the ratio of coincidence is 60% in which occurred with great losses. In 2010, the precipitation anomaly is 7.8% and the ratio of coincidence is 65% in which occurred with heavy losses. In 2011, the precipitation anomaly is −9.8% and the ratio of coincidence is 10% in which occurred with lighter losses. In 2018, the precipitation anomaly is 5.9%, but the ratio of coincidence is less than 15% in which occurred with less losses. It is found, total than geological disasters decrease along time, but economic losses increases in single event. There is a positive correlation between the size of the disaster and the triggering factors, especially the ratio of coincidence between the strong rainfall and the geological disaster prone areas is important. Therefore, effective reduction of geological disasters depends on human efforts, but extreme natural force, such as strong raining in a long time, is not neglected in disaster reduction.

Keywords: geological disasters; ratio of coincidence; rainfall seepage; freezing and thawing; seismic damage; human activity

Acknowledgements: This study was Supported by national plan in key development subjects (Grant No. 2018YFC1505503), and the special project of national finance (Grant No. 1211221481001).

First author: LIU Chuanzheng, male, born in1961, Ph. D. professor, mainly engaged in engineering geology and geo-disaster mitigation; Email: liucz@cigem.cn

Manuscript received on: 2019-12-26; Accepted on: 2020-06-19; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2020.05.018