

胡小康, 史培军. 1970—2019 年全球陆地破坏性地震人员伤亡时空特征及其贡献率分析[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 163–167, 174. [HU Xiaokang and SHI Peijun. Spatial-temporal Patterns and Influencing Factor Contributions of Casualties from Global Land Destructive Earthquakes in the World (1970—2019) [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 163–167, 174. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.027.]

1970—2019 年全球陆地破坏性地震人员伤亡时空特征及其贡献率分析*

胡小康^{1,2}, 史培军^{1,2,3}

(1. 北京师范大学 应急管理部—教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875;

2. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875;

3. 青海师范大学 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008)

摘要: 基于区域灾害系统理论, 梳理了 1970—2019 年全球陆地破坏性地震灾害数据, 运用地理探测器模型量化了地震致灾因子(震中烈度)、承灾体(人口密度、人均 GDP)、孕灾环境(海拔、相对高程、坡度)以及房屋损毁对地震人口伤亡的贡献率。结果显示: ①1970—2019 年全球陆地破坏性地震灾害频次呈现波动上升趋势, 地震造成的人员伤亡呈现增加趋势, 近 20 a 来 7.0 级以下地震造成的伤亡人数有下降趋势。②全球陆地破坏性地震灾害约 60% 分布于地中海—喜马拉雅地震带, 约 35% 分布在环太平洋地震带。③房屋损毁对地震造成的人口伤亡贡献率最大, 其次是震中烈度和人口密度。海拔、相对高程和坡度三者中相对高程对地震造成的伤亡人数贡献率最大。④环太平洋地震带和地中海—喜马拉雅地震带上各个影响因子对地震人口伤亡的贡献率存在差异。

关键词: 地震; 区域灾害系统理论; 全球陆地地震; 人员伤亡; 时空特征; 孕灾环境; 贡献率

中图分类号: X43; P954; P315; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)04-0163-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.027

地震灾害是一种突发性灾害事件, 具有破坏性大、不可预测等特点, 严重威胁人类生命安全。根据区域灾害系统理论, 地震灾害系统地域差异是由地震致灾因子、承灾体和孕灾环境决定的^[1], 地震发生在高起伏山区可能会引发崩塌、滑坡, 如遇降雨, 还可能引发泥石流等地质灾害^[2-3], 比如 2008 年汶川 8.0 级大地震发生在山区, 又遇强降水, 地震引发的滑坡、崩塌、泥石流等次生地质灾害^[4]造成了 10 000 多人死亡, 占地震总死亡人数的 14.4%^[5]。因此, 研究不同孕灾环境下的地震致灾成害过程和机理, 分析地貌等对地震造成的人口伤亡的影响, 有利于更深入的了解地震灾害区域差异, 并为地震人口伤亡精确评估提供帮助。

目前国内外对地震造成的人口伤亡评估方法可以分为两类, 其一是基于建筑物易损性分析地震造成的人口伤亡情况, 如尹之潜基于建筑物破坏矩阵^[6]、OHTA 等基于房屋全损数量^[7]来评估人员伤亡。但由于建筑数据比较复杂且较难获取, 这些模型难以用于震后快速评估^[8-9]。其二是基于地震参数构建经验模型来快速评估地震造成的人

口伤亡情况, 有较多的学者基于地震烈度和人口密度来构建经验模型评估人口伤亡^[10-13]。但是, 受地震灾害数据的影响, 经验公式的准确度具有区域局限性^[14]。然而, 这两类评估方法主要考虑的是地震致灾因子和承灾体对地震造成人员伤亡的影响, 而对地貌等孕灾环境的作用考虑较少。事实上, 受海拔、坡度、地层岩性等孕灾环境的影响, 地震诱发的崩塌、滑坡等次生地质灾害也会造成人员伤亡, 并且有研究表明, 1900—1989 年全球地震灾害中滑坡等次生灾害造成人员死亡的比例在上升^[15], 因此, 也有部分学者构建了考虑次生灾害、震中海拔影响的地震人员伤亡评估模型^[16-17]。

综上所述, 目前国内外对于地震人口伤亡的研究多集中在定量评估上, 而研究孕灾环境对地震人口伤亡影响的较少。因此, 本文以 1970—2019 年全球陆地破坏性地震造成的人员伤亡为研究对象, 分析了全球陆地破坏性地震灾害的时空特征, 并基于区域灾害系统理论, 以海拔、相对高程和坡度作为地震的孕灾环境因子, 采用地理探测器模型来量化地震致灾因子(震中烈度), 承

* 收稿日期: 2021-03-31

修回日期: 2021-06-28

基金项目: 高等学校学科创新引智基地项目(BP0820003); 科技部“第二次青藏高原综合科学考察研究”项目(2019QZKK0906)

第一作者简介: 胡小康(1997-), 男, 汉族, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事自然灾害风险评估研究。

E-mail: xiaokangh@foxmail.com

通讯作者: 史培军(1959-), 男, 汉族, 陕西靖边人, 教授, 主要从事环境演变与自然灾害研究。E-mail: spj@bnu.edu.cn

灾体(人口密度、人均 GDP), 孕灾环境(海拔、相对高程、坡度)以及房屋损毁对地震人口伤亡的贡献率, 为进行地震人口伤亡精确评估提供科学支持。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文使用的数据包括全球陆地地震灾害灾情数据、DEM 数据、人均 GDP 数据和人口密度数据, 数据资料时间序列为 1970—2019 年。全球陆地地震灾害灾情数据来源于 NOAA 的“Global Significant Earthquake Database, 2150 B. C. to present”数据库。其中地震数据包括发震时间、震中经纬度、震级, 灾情数据包括地震房屋损毁数、死亡人数和受伤人数, 本文以地震死亡人数和受伤人数之和作为地震伤亡人数。在此基础上, 根据 USGS 的“ANSS Comprehensive Earthquake Catalog”数据库对地震灾害数据进行订正, 并基于 Shakemap 项目^[18-19]补充震中烈度和地震烈度等震区范围数据。依据地震分级表^[20-21]和修正麦加利地震烈度表^[22], 本文定义震级 ≥ 5.0 级, 烈度 $\geq VI$ 度的地震为破坏性地震。全球陆地 DEM 数据来源于 NOAA 的“Global Land One-km Base Elevation Project”, 空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。对每场地震灾害, 计算烈度 $\geq VI$ 度区域内的平均海拔、相对高程和平均坡度。全球人口密度数据来源于 NASA 的社会经济数据与应用中心(SEDAC), 单位为人/ km^2 , 空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。全球人均 GDP 数据来源于 MATTI KUMMU 等的相关研究^[23], 单位为美元, 空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。由于以上社会经济数据的时间不连续, 为了便于研究, 本文中人口密度和人均 GDP 均取 2015 年的数据, 并对每场地震灾害, 计算烈度 $\geq VI$ 度区域内的平均人口密度和平均人均 GDP。

1.2 研究方法

(1) 地理探测器。地理探测器能够探测空间分异性、揭示其背后驱动力, 运用地理探测器模型中的因子探测器, 能够探测自变量 x 多大程度解释了因变量 y 的空间分异, 解释程度(或称贡献率)用 q 度量, 其计算方法^[24-25]如下所示:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (1)$$

式中: $h=1, 2, \dots, L$ 为自变量 x 的分级, N_h 和 N 分别为第 h 级和整体的样本数, σ_h^2 和 σ^2 分别是第

h 级和整体的因变量 y 的方差。 q 的取值范围是 $0 \sim 1$, q 值越大说明自变量 x 对因变量 y 的解释程度越大(即贡献率越大), 反之则越小。

(2) 数据分级。地理探测器要求输入的自变量为离散的类型量, 如果自变量为连续的数量值, 则需要依据相关分级方法对其进行离散化处理^[24]。

地震烈度按照修正麦加利地震烈度表^[22]对其进行分级。参考 NOAA “Global Significant Earthquake Database, 2150 B. C. to present”数据库中对房屋损毁等级的划分, 将房屋损毁数分为 6 级: ≤ 200 间、 $200 \sim 1\,000$ 间、 $1\,000 \sim 2\,000$ 间、 $2\,000 \sim 5\,000$ 间、 $5\,000 \sim 10\,000$ 间、 $>10\,000$ 间。人口密度按照等分位法划分为 5 级。人均 GDP 依据世界银行 2015 年对于各国收入水平划分标准^[26]分为 4 级: $\leq 1\,025$ 美元、 $1\,025 \sim 4\,035$ 美元、 $4\,035 \sim 12\,475$ 美元、 $>12\,475$ 美元。对于地貌环境, 基于相关学者的研究和分类^[27-28], 将震区平均海拔和相对高程按照 $\leq 200\text{ m}$ 、 $200 \sim 500\text{ m}$ 、 $500 \sim 1\,000\text{ m}$ 、 $1\,000 \sim 2\,500\text{ m}$ 、 $>2\,500\text{ m}$ 划分为 5 级, 将震区平均坡度按照 $\leq 1^\circ$ 、 $1 \sim 2^\circ$ 、 $2 \sim 3.5^\circ$ 、 $3.5 \sim 5^\circ$ 、 $>5^\circ$ 划分为 5 级。

2 结果与分析

2.1 时空分布特征

对 1970—2019 年全球陆地破坏性地震灾害频次进行统计(图 1a)可知, 近 50 a 来全球陆地破坏性地震灾害具有明显的波动性, 且波动幅度较大, 地震频次总体上呈现明显的波动上升趋势($P < 0.01$)。近 15 a 来, 环太平洋地震带上的陆地破坏性地震灾害呈现波动上升趋势, 而地中海—喜马拉雅地震带上的陆地破坏性地震灾害呈现波动下降趋势。以 10 a 为一个统计间隔, 对不同震级下的地震频次进行统计(表 1)可看出, 近 50 a 来的全球陆地破坏性地震灾害中, $5.0 \sim 6.0$ 级地震灾害次数最多, 占总地震灾害次数的 39.88%; 7.0 级及以上的地震灾害次数最少, 占总地震灾害次数的 16.95%。1970—2019 年, $5.0 \sim 6.0$ 级、 $6.0 \sim 6.5$ 级地震灾害次数呈现增加趋势, 6.5 级及以上地震灾害次数相对保持稳定。根据 1970—2019 年全球陆地破坏性地震造成的伤亡人数(图 1b)可知, 地震巨灾造成的人员伤亡贡献突出, 并且自 1990 年来地震巨灾造成的人员伤亡呈现增加趋势, 全球伤亡人数主要由地中海—喜马拉雅地震带上的破坏性地震灾害贡献。

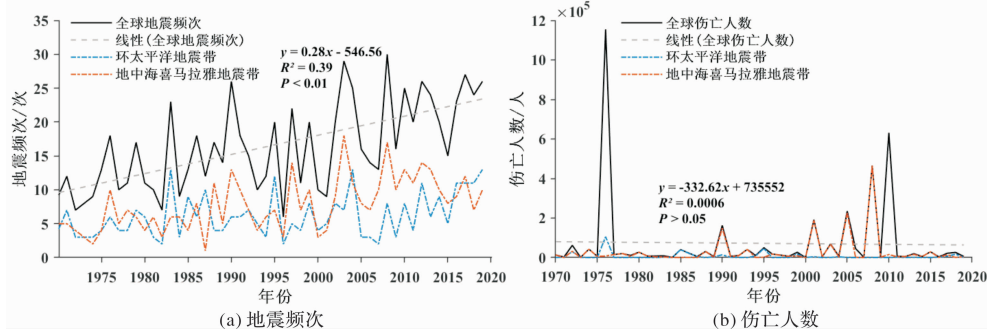


图1 1970—2019 年全球陆地破坏性地震频次和伤亡人数变化

表 1 1970—2019 年全球陆地破坏性地震灾害次数(次)分级统计表

时间段	地震灾害次数				总计
	$5.0 \leq M < 6.0$	$6.0 \leq M < 6.5$	$6.5 \leq M < 7.0$	$M \geq 7.0$	
1970—1979 年	27	31	25	31	114
1980—1989 年	47	37	24	26	134
1990—1999 年	56	42	33	29	160
2000—2009 年	85	48	29	20	182
2010—2019 年	112	52	33	33	230
总计	327	210	144	139	820

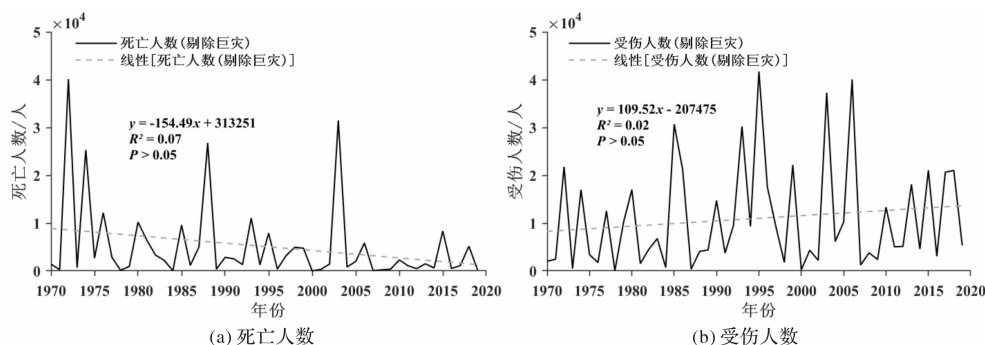


图 2 1970—2019 年全球陆地破坏性地震(剔除巨灾)死亡人数和受伤人数变化

根据相关学者的研究^[29], 巨灾级地震可以定义为震级在 7.0 级及以上, 且造成 10 000 人以上死亡的地震灾害。以此标准对地震巨灾进行剔除(图 2), 剔除巨灾后地震造成的死亡人数呈波动下降趋势, 而受伤人数呈波动上升趋势, 从 2005—2019 年死亡人数和受伤人数均有下降趋势, 表明世界防灾减灾能力在逐步加强。

1970—2019 年全球陆地破坏性地震的空间分布如图 3a 所示, 近 50 a 来的全球陆地破坏性地震基本沿着全球二大地震带分布, 其中约 60% 分布于地中海—喜马拉雅地震带, 约 35% 分布在环太平洋地震带。由于环太平洋地震带是世界二大地震带中活动最强烈的地震带, 其上地震的震级整体较大, 平均地震震级大于 6.5 级; 地中海—喜马拉雅地震带上的地震震级则相对较小, 但在中国青藏高原附近地震活动强烈, 震级明显高于周边地区。地震造成的人口伤亡空间分布如图 3b 所示, 大部分地震造成的人口伤亡数量小于 100 人, 地中海—喜马拉雅地震带上的地震人口伤亡较环太平洋地震带上的口伤亡要严重, 其原因与地中海—喜马拉雅地震带上人口密度较高且经济水平较低有关。

2.2 影响因素分析

计算地震伤亡人数与震中烈度、房屋损毁数、人口密度、人均 GDP、海拔、相对高程和坡度的 Pearson 相关性如表 2 所示。

根据相关性计算结果可知, 地震造成的伤亡人数与震中烈度、房屋损毁数和人口密度均呈显著的正相关关系($P < 0.01$), 震中烈度是刻画地震

灾害强度的指标, 房屋损毁是地震灾害中导致人口伤亡最主要因素^[30], 人口密度在地震人口伤亡评估中可用来表征人口暴露度^[31]。地震造成的伤亡人数与人均 GDP 的相关性很小, 尽管人均 GDP 是衡量各地区经济和社会水平的一个标准, 在一定程度上能够反映该地区应对灾害的设防水平^[32], 但是在地震灾害中, 设防水平主要与房屋的建筑结构有关, 而人均 GDP 并不能很好地代表该地区的房屋结构。

海拔、相对高程和坡度均与地震伤亡人数呈正相关关系。海拔、相对高程和坡度对地震人口伤亡的影响主要体现在两个方面。首先, 海拔、相对高程、坡度均是影响滑坡等地质灾害发生的重要因素。同时, 地震也是诱发滑坡等地质灾害的因素之一。地震过后, 土体、岩体的结构稳定性遭到了破坏, 在海拔高、相对高程大、坡度大的地貌环境下, 经过余震诱导或遭遇强降雨等, 容易引发滑坡等次生地质灾害^[33-35], 次生灾害放大了地震造成的损失, 加剧人员伤亡。其次, 海拔、相对高程和坡度也会对房屋损毁数、人口密度和人均 GDP 造成影响从而间接影响地震造成的人口伤亡。计算海拔、相对高程和坡度与房屋损毁数、人口密度和人均 GDP 的相关系数可知(表 3), 房屋损毁数与海拔、相对高程和坡度呈显著正相关关系, 人口密度与海拔、相对高程和坡度呈负相关关系, 海拔高、相对高程大、坡度大的环境下不适合人类密集分布和生产生活, 并且由于环境相对不稳定, 这些区域的房屋在地震后更容易遭受破坏。

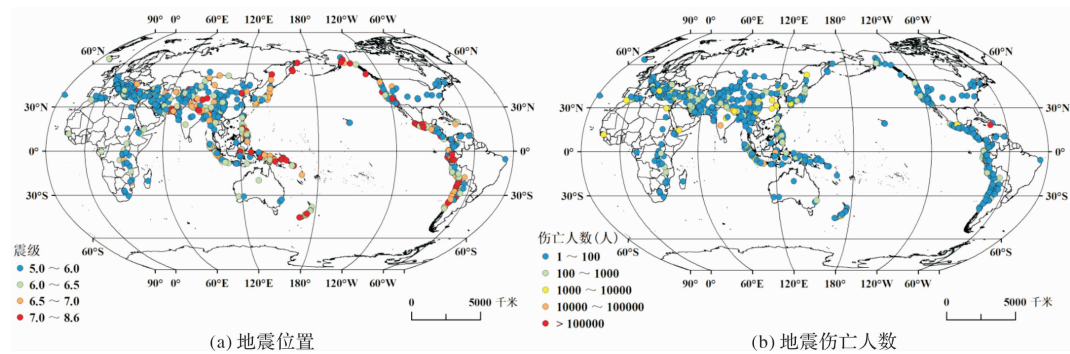


图3 1970—2019 年全球陆地破坏性地震位置和地震伤亡人数分布
(基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1666 号的标准地图制作, 底图无修改)

表2 地震伤亡人数与各影响因素的相关性

	震中烈度	房屋损毁数	人口密度	人均 GDP	海拔	相对高程	坡度
相关系数	0.513 **	0.658 **	0.412 **	0.007	0.014	0.275 **	0.124 *

注: ** 在 0.01 级别, 相关性显著; * 在 0.05 级别, 相关性显著

表3 部分因子的相关系数

	房屋损毁数	人口密度	人均 GDP	海拔	相对高程	坡度
房屋损毁数	1	0.254 **	-0.004	0.228 **	0.138 *	0.138 *
人口密度		1	-0.017	-0.362 **	-0.093	-0.038
人均 GDP			1	-0.099	0.017	0.016
海拔				1	0.324 **	0.473 **
相对高程					1	0.665 **
坡度						1

注: ** 在 0.01 级别, 相关性显著; * 在 0.05 级别, 相关性显著

表4 各影响因子对地震人口伤亡的贡献率(%)

	震中烈度	房屋损毁数	人口密度	人均 GDP	海拔	相对高程	坡度
全球	27.15 **	39.48 **	15.36 **	0.32	0.86	9.77 **	3.41 *
环太平洋地震带	23.77 **	57.24 **	20.88 **	4.28	2.71	2.98	9.00
地中海-喜马拉雅地震带	39.83 **	26.69 **	13.09 **	0.20	0.02	16.59 **	5.83

注: ** 在 0.01 级别贡献显著; * 在 0.05 级别贡献显著

2.3 贡献率分析

对地震人口伤亡数据进行对数化处理, 以降低样本异方差程度。将伤亡人数作为因变量, 震中烈度、房屋损毁数、人口密度、人均 GDP、海拔、相对高程和坡度作为自变量输入地理探测器模型中, 通过因子探测器分析各个影响因子对地震人口伤亡的贡献率, 得到表 4 所示的计算结果。从表中可知, 1970—2019 年全球陆地破坏性地震灾害中房屋损毁对人口伤亡的贡献率最大, 为 39.48%, 其次是震中烈度和人口密度, 贡献率分别为 27.15% 和 15.36%, 这三个因子均在 0.01 水平上对地震人口伤亡显著影响。人均 GDP 对全球陆地地震人口伤亡的贡献率只有 0.32%。海拔、相对高程和坡度三个环境因子中, 相对高程对人口伤亡的贡献最大, 贡献率为 9.77%, 其次是坡度贡献 3.41%, 海拔对人口伤亡的贡献率较小, 只有 0.86%。

环太平洋地震带上对地震人口伤亡影响最大的三个因子依次是房屋损毁数、地震烈度和人口密度, 与全球地震灾害相比, 房屋损毁的贡献率提高至 57.24%, 人均 GDP 的贡献率提高至 4.28%, 三个孕灾环境因子中坡度的贡献率最大为 9.00%。地中海-喜马拉雅地震带上对地震人口伤亡影响最大的是地震烈度, 贡献率达到 39.83%, 其次才是房屋损毁和人口密度, 三个孕灾环境因子中相对高程对人口伤亡的贡献最大为 16.59%。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)1970—2019 年全球陆地破坏性地震灾害频次呈现波动上升趋势, 且主要由 5.0~6.0 级、6.0~6.5 级地震所左右。近 50 a 来全球陆地破坏性地震造成人员伤亡变化幅度较大, 地震巨灾造成的人员伤亡呈现增加趋势, 近 20 a 来 7.0 级以下地震造成的伤亡人数有下降趋势, 全球防灾减灾能力不断上升, 但是应对巨灾能力仍需提高。

(2)全球陆地破坏性地震灾害基本沿着全球二大地震带分布, 约 60% 分布于地中海-喜马拉雅地震带, 约 35% 分布在环太平洋地震带。分布在环太平洋地震带上地震的震级整体上大于分布在地中海-喜马拉雅地震带上的地震震级, 而伤亡人数则整体上小于地中海-喜马拉雅地震带, 其原因与环太平洋地震带经济水平较高有关。

(3)全球陆地破坏性地震灾害中, 房屋损毁对地震造成的人口伤亡贡献率最大, 其次是震中烈度和人口密度。作为孕灾环境的海拔、相对高程和坡度中, 相对高程对地震伤亡人数的贡献率最大, 其次是坡度, 海拔的贡献率较小。

(4)不同地震带上各个影响因子对地震人口伤亡的贡献率存在差异。震中烈度、房屋损毁和人

口密度是对地震人口伤亡贡献率排名前三的因子,环太平洋地震带上房屋损毁的贡献率最大,而地中海-喜马拉雅地震带上则是震中烈度的贡献率最大。三个孕灾环境因子中,环太平洋地震带上贡献最大的是坡度,地中海-喜马拉雅地震带上贡献最大的是相对高程。

3.2 讨论

本研究利用 NOAA 的“Global Significant Earthquake Database, 2150 B. C. to present”数据库中地震灾情数据进行研究分析,由于每次地震灾害事件必须满足一定条件才被收入该数据库,因此,对地震造成的人口伤亡分析可能与实际存在偏差。因为缺乏与地震时间相匹配的长时间序列全球人口密度和人均 GDP 数据,采用的是 2015 年全球人口密度和人均 GDP 数据,这同样也会影响研究结果。采用震区人均 GDP 来衡量设防水平,但是直接影响抗震设防水平的是建筑结构,人均 GDP 与房屋建筑结构水平的关系还有待进一步分析。通过地理探测器模型分析地震人口伤亡与各个影响因素关系时,由于各影响因素之间也存在相互影响,模型运算结果与真实情况存在一定偏差,还需加深对地震致灾-成害机制的理解,完善地震人口伤亡评估模型。此外,在地震灾害发生过程中,还有很多因素影响灾情,本研究只考虑了震中烈度,Ⅵ度烈度区内的平均人口密度、平均人均 GDP、平均海拔、相对高程和平均坡度对全球陆地破坏性地震造成的人员伤亡的影响,还需进一步讨论其它因素。比如震区的场地条件、地层岩性等,其中岩性不仅影响地震波的传播,也会影响地震次生地质灾害的发生,目前 OneGeology 项目 (<http://www.onegeology.org>)^[36] 提供有全球 1:5 000 万的地质岩性数据,但是数据精度较低只有岩浆岩、沉积岩和变质岩三大岩石的数据,而精度较高的岩性数据空间范围一般较小。因此,在以后的研究中可以用某一地震多发的国家作为研究区(如中国),进一步从孕灾环境、致灾因子和承灾体的角度对地震灾害灾情信息进行补充和完善,从而更深入地对地震灾害损失评估进行研究。

参考文献:

- [1] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 1-7.
- [2] 侯建盛, 李洋, 宋立军, 等. 2014 年云南景谷 6.6 级地震与云南鲁甸 6.5 级地震致灾因素分析[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 100-101, 143.
- [3] 李蕾, 聂冠军. 广西地区地震次生地质灾害类型及分布特征[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 118-124.
- [4] 尹卫霞, 王静爱, 余瀚, 等. 基于灾害系统理论的地震灾害链研究——中国汶川“5.12”地震和日本福岛“3.11”地震灾害链对比[J]. 防灾科技学院学报, 2012, 14(2): 1-8.
- [5] 张莹, 郭红梅, 尹文刚, 等. 基于多因素的地震灾害人员伤亡评估模型研究[J]. 震灾防御技术, 2017, 12(4): 870-881.
- [6] 尹之潜. 地震灾害损失预测研究[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(4): 87-96.
- [7] OHTA Y, GOTO N, OHASHI H. An Empirical Construction of Equations for Estimating Number of Victims at an Earthquake[J]. Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan. 2nd ser.), 1983, 36(3): 463-466.
- [8] 李媛媛, 苏国峰, 翁文国, 等. 地震人员伤亡评估方法研究[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 223-227.
- [9] 王晓青, 丁香, 王龙, 等. 四川汶川 8 级大地震灾害损失快速评估研究[J]. 地震学报, 2009, 31(2): 205-211.
- [10] SAMARDJEVA E. Estimation of the Expected Number of Casualties Caused by Strong Earthquakes[J]. Bulletin of The Seismological Society of America, 2002, 92(6): 2310-2322.
- [11] BADAL J, VÁZQUEZ-PRADA M, GONZÁLEZ Á. Preliminary Quantitative Assessment of Earthquake Casualties and Damages[J]. Natural Hazards, 2005, 34(3): 353-374.
- [12] JAISWAL K, WALD D. An Empirical Model for Global Earthquake Fatality Estimation[J]. Earthquake Spectra, 2010, 26(4): 1017-1037.
- [13] 张晓雪, 赵略萍, 王方萍, 等. 基于情景分析的地震人员死亡快速评估[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 197-203.
- [14] 王曦, 周洪建, 张弛. 地震灾害死亡人口快速评估方法对比研究[J]. 地理科学, 2018, 38(2): 314-320.
- [15] 田丽莉. 地震灾害人员伤亡影响因素分析及人员伤亡估算公式[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2012.
- [16] 张莹, 尹文刚, 郭红梅, 等. 地震灾害人员伤亡关键影响因素指标体系构建[J]. 防灾减灾学报, 2017, 33(4): 87-94.
- [17] 黄佩蒂. 境外地震人员伤亡影响因素研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018.
- [18] WORDEN C B, GERSTENBERGER M C, RHOADES D A, et al. Probabilistic Relationships between Ground-Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in California[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(1): 204-221.
- [19] WORDEN C B, THOMPSON E M, HEARNE M, et al. ShakeMap Manual Online: technical manual, user's guide, and software guide[EB/OL]. (2020-02-01)[2020-06-20]. <https://usgs.github.io/shakemap/index.html>.
- [20] GUTENBERG B, RICHTER C F. Magnitude and Energy of Earthquakes[J]. Annals of Geophysics, 2010, 53(1): 7-12.
- [21] 刘家福, 席兰兰, 杨沁瑜, 等. 全球地震空间分布及驱动机制[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 133-140.
- [22] 陈颢, 史培军. 自然灾害(第4版)[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2017: 45-103.
- [23] KUMMU M, TAKA M, GUILLAUME J H A. Gridded global datasets for Gross Domestic Product and Human Development Index over 1990-2015[J]. Scientific Data, 2018, 5(1): 180004.
- [24] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [25] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical Detectors - Based Health Risk Assessment and its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [26] The World Bank Group. How are the income group thresholds determined?[EB/OL]. (2020-07-01)[2020-12-13]. <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/378833-how-are-the-income-group-thresholds-determined>.
- [27] 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 535-543.
- [28] 刘元保, 唐克丽. 国内外坡度分级和王东沟试验区的坡度组成[J]. 水土保持通报, 1987, 7(8): 59-65.
- [29] 史培军. 灾害风险科学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2016: 17-35.
- [30] 魏本勇, 聂高众, 苏桂武, 等. 地震灾害埋压人员评估的研究进展[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 155-159.
- [31] 李柔珂, 韩振宇, 徐影, 等. 高分辨率区域气候变化降尺度数据对京津冀地区高温 GDP 和人口暴露度的集合预估[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 491-504.
- [32] SHI P J, YANG X, FANG J Y, et al. Mapping and ranking global mortality, affected population and GDP loss risks for multiple climatic hazards[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(7): 878-888.
- [33] 梁玉飞, 裴向军, 崔圣华, 等. 汶川地震诱发黄洞子沟地质灾害链效应及断链措施研究[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 201-209.
- [34] 史培军, 杨文涛. 山区孕灾环境下地震和极端天气气候对地质灾害的影响[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 405-414.
- [35] 韩培锋, 田述军, 樊晓一, 等. 芦山地震触发次生灾害特点统计分析及规律预测[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 120-126.
- [36] FAZENDEIRO S L, MORALES-ESTEBAN A, DURAND N P. Regional correlations for estimating seismic amplification. Implications for loss assessment in SW Iberia[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 130: 105993.

Study on Urban Safety Resilience Assessment Based on Entropy Weight-Normal Cloud Model

GUO Yuyu¹, LUO Fuzhou¹ and ZHONG Xingrun²

(1. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to improve the construction of urban safety resilience, the evaluation index system is established from four dimensions, including economy resilience, society resilience, infrastructure resilience and ecological environment resilience, considering the connotation of urban safety resilience and the characteristics of disturbance force, absorption/adaptability and resilience. Then the weight of each index is calculated by entropy weight method, and the evaluation grade criteria are divided. The comprehensive evaluation model of urban safety resilience is established by normal cloud model. Finally, the validity of the model is verified by taking Xi'an in Shaanxi Province as an example. The results show that infrastructure resilience and ecological environment resilience are better than that of economy resilience and society resilience. And that the comprehensive safety resilience level of Xi'an is calculated IV by the model, which is higher resilience.

Key words: resilience; urban safety resilience; safety resilience evaluation; entropy weight-normal cloud model; Xi'an

(上接第 167 页)

Spatial-temporal Patterns and Influencing Factor Contributions of Casualties from Global Land Destructive Earthquakes in the World(1970—2019)

HU Xiaokang^{1,2} and SHI Peijun^{1,2,3}

(1. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

Abstract: Based on regional disaster system theory, we comb the global land destructive earthquake disaster data from 1970 to 2019, and calculate the contributions of earthquake disaster causing factors, which are hazard (epicenter intensity), exposures (population density, per capita GDP) and environments (elevation, relative elevation, slope), on casualties by using the geographical detectors model. The results show that: (1) from 1970 to 2019, the frequency of destructive earthquake disasters in the world fluctuated and increased, and the casualties caused by earthquake catastrophe showed an increasing trend. In the past 20 years, the number of casualties of earthquake disasters below M7.0 showed a downward trend. (2) About 60% of the global land destructive earthquake disasters are distributed in the Mediterranean Himalayan seismic belt and about 35% in the circum-pacific seismic belt. (3) The most important contribution rate to the earthquake is the damage of buildings, followed by the epicenter intensity and population density. Among elevation, relative elevation and slope, relative elevation has the largest contribution to the casualties. (4) The contribution rate of the influence factors on the casualties is different between the circum-pacific seismic belt and the Mediterranean Himalayan seismic belt.

Key words: earthquake; regional disaster system theory; global land earthquakes; casualties; spatial-temporal patterns; disaster-formative environment; contribution rate