

张方浩,杜浩国,邓树荣,等.2022.以乡镇为单元评估云南省建水县地震灾害风险[J].地震研究,45(1):109-117,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0012.

Zhang F H, Du H G, Deng S R, et al. 2022. Assessment of earthquake-hazard risk of Jianshui County, Yunnan Province based on township units[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(1):109-117, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0012.

以乡镇为单元评估云南省建水县地震灾害风险^{*}

张方浩, 杜浩国, 邓树荣, 卢永坤, 张原硕, 吕佳丽, 和仕芳

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 基于云南省建水县的建筑物、人口数量、生命线工程、地形地貌等数据, 选取地震灾害损失风险评估因子, 利用评估模型对设定烈度下可能造成的人员死亡、房屋破坏、滑坡密度等进行计算, 给出地震灾害损失定量评估结果。在传统风险评估方法基础上, 对无法建立灾害损失关系的承灾体用风险暴露量来代替灾害损失量进行风险评估。最后应用极差变换法对地震灾害损失的不同因子进行标准化, 通过综合赋权划分地震灾害风险等级。结果表明: 建水县地震灾害高风险的乡镇有5个, 主要分布在建水北部的曲江, 南部的南庄、西庄、临安、官厅一带; 中风险乡镇有6个, 低风险乡镇有3个。

关键词: 风险评估; 地震灾害; 乡镇单元; 建水县

中图分类号: P315.941

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2022)01-0109-09

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0012

0 引言

我国是世界上受自然灾害影响最严重的国家之一, 灾害种类多, 发生频率高, 造成损失重。全国各省市均不同程度受到自然灾害影响, 有70%以上的城市、50%以上的人口分布在气象、地震、地质、海洋等自然灾害严重的地区(全国自然灾害综合风险普查技术总体组, 2020)。云南省因地理位置特殊、地形地貌复杂、气候类型多样、区域环境差异大, 气象灾害和地质灾害频发, 地震灾害及其它自然灾害不断发生(聂选华, 2017)。随着区域经济的快速发展, 频繁的地震灾害对云南社会经济的影响会越来越大, 区域人口的生存与发展面临严峻的挑战。因此, 对云南地区的灾害风险进行有效评估是很有必要的。

灾害风险是指发生某种程度灾害的可能性与其造成后果的乘积, 它与灾害本身的危险性、承灾体的暴露性及易损性有关(Dilley, Mundial,

2005)。地震灾害风险分析是对遭受不同强度地震灾害的可能性及其可能造成的后果进行的定量分析和评估(姚清林, 黄崇福, 2002)。通过对地震灾害范围、特性等的研究, 将风险量化并评价是进行地震风险管理和决策的依据(向喜琼, 黄润秋, 2000)。以往对于地震灾害风险的研究, 大多是在构建致灾因子危险性指数、承灾体易损性指数的基础上, 根据风险概念模型公式, 即风险度=危险度×易损度或风险矩阵的分析方法来实现地震灾害风险的评估(徐伟等, 2004)。而为了实现地震灾害风险建模与评价, 首先要确定影响地震灾害风险的要素。影响地震灾害风险的因素有很多, 因此不同学者从不同侧重点出发, 建立了反映地震灾害风险评估要素及水平的指标体系, 有的指标体系偏向于宏观, 有的注重细节(唐丽华等, 2016)。在评价的空间尺度上, 有分别基于省级、市级和县级行政单元的, 但对于乡镇级行政单元的地震灾害风险评价尚未见文献报道。

^{*} 收稿日期: 2020-11-11.

基金项目: 国家重点研发计划“地震应急全时程灾情汇聚与决策服务技术研究(2018YFC1504505)”和云南省地震局青年基金自立课题“建水县地震灾害风险预评估(2019ZL04)”联合资助。

第一作者简介: 张方浩(1988-), 高级工程师, 主要从事地震灾害风险评估和地震应急技术研究工作。

E-mail: zfh125@sina.com.

近年来,国家提出要加强基层政府和基层组织的应急能力建设,探索基层社会应急管理治理新模式,把更多应急资源和应急功能下沉到基层,这将是国际和国内应急管理发展的共识和趋势。乡镇作为我国最基层的行政单元,是落实防震减灾救灾工作的重要一环。作为地震应急准备和灾害处置的重要抓手,基层政府需要在震前充分认知区域地震灾害风险背景、特征和等级程度,有针对性地做好应对机制和对策,以便在地震来临时做到临震不慌、科学应对。

因此,本文以云南省建水县为例,获取研究区建筑物、人口分布、生命线工程、地形地貌等基础数据,基于乡镇级行政单元,利用改进的地震灾害风险评估模型,结合承灾体和孕灾环境的耦合性,开展地震灾害风险评估。选取地震灾害损失风险评估因子,利用评估模型进行地震灾害损失定量评估。结合现场抽样调查的情况,对于部分承灾体,由灾害风险暴露量代替损失量进行风险评估。最后根据评估结果开展地震灾害风险等级划分及特征分析,为地震灾害风险隐患排查和治理提供参考依据。

1 评估方法

地震灾害风险是指地震作用所引起的房屋损坏或生命损失等危害后果发生的可能性(Reiter, 1990),它与致灾因子危险性与承灾体脆弱性密切相关。很多学者都对致灾因子危险性与承灾体脆弱性进行过分等定级,然后通过构建评估矩阵等方法对区域地震灾害风险进行评估(孙柏涛,张桂欣,2017;唐丽华等,2016;李波等,2019)。一般采用的地震灾害风险评估模型为:

$$R = H \times V \quad (1)$$

式中: R 表示地震灾害风险; H 表示(地震)危险性; V 表示(承灾体)脆弱性。其中的危险性包括地震的强度和发生的可能性两个因素。

新时代防震减灾工作迫切要求风险评估结果具有确定的定量风险值。随着地震灾害风险评估向量化、区域综合化的方向发展,采用灾害风险等级评估不能定量表现各等级之间的具体差别,已不能满足灾害风险管理的要求。由于地震预报的复杂性,地震发生机理尚未完全明了,短期内

很难实现地震时空尺度上的准确预报。地震灾害风险的评估除了地震的发生之外,更重要的是其造成的损失。鉴于新时期防震减灾工作的要求,不仅要在区域地震活动规律和趋势方面下功夫,也要摸清地震灾害可能造成的损失。在综合对比前人的研究方法的基础上,本文采用刘毅等(2011)提出的改进的地震灾害风险评估模型:

$$R = (D \times E) \times P \quad (2)$$

式中: D 表示致灾因子破坏力,指地震灾害的对承灾体(包括建构筑物、人员生命、生态环境等)造成损毁的标准; E 表示承灾体的暴露量,指评估区域内的社会经济、人口数量、资源环境状况等承灾体的总量; P 表示灾害发生的可能性或孕灾环境参数,指发生某种程度灾害的概率。

1.1 地震破坏力

地震破坏力,即地震活动对承灾体的物理损毁标准(刘毅等,2011)。自从现代地震学形成以来,人们一直沿用地震烈度来度量地震的破坏后果和破坏程度(郝敏等,2005)。因此,可以采用地震烈度作为地震破坏强度的表征指标,利用历史震害资料,针对不同承灾体的特征,根据定性描述和定量指标相统一的原则,建立不同烈度地震灾害与各类承灾体损失率之间的对应关系。由于统计样本所覆盖的时间长度被限制在100 a左右,强震样本涵盖的数量少,高烈度区(X度及以上)样本数量少,无法建立统计对应关系,本文仅考虑VI~IX度4个烈度区。

1.2 承灾体暴露量

承灾体暴露量是指研究区域内房屋建筑、居民人口、社会经济、生命线工程、危险源、地质灾害隐患点等方面的数量分布状况。这些数据可通过当地社会经济统计年鉴和地震应急基础数据库获取。

1.3 孕震环境参数

孕震环境参数是指研究区域未来发生地震灾害的可能性。地震灾害是突发性灾害,属于难以预测的事件。目前,用来评估地震灾害的方法主要有3种:概率法、经验法、指标权重法。

概率法自Cornell(1968)提出后得到了广泛的应用,但是其应用结果存在严重问题。例如在2008年汶川8.0级地震、2010年海地7.0级地震和2011年日本东海9.0级大地震中,通过概率法

计算出的这些地震震中区的地震动强度远低于真实地震所产生的地震动强度。最近的研究表明，地震危险性评定的概率法的原始公式存在科学缺陷，尤其是数学错误，即把无量纲的年超越概率等同于有量纲的年超越频率。因此，地震危险性评定的概率方法变成了纯粹的概率分析：一个缺少地震科学依据的数学模型（刘静伟等，2014）。

经验法是通过历史烈度观测资料做直接的统计分析，建立地震烈度与其发生频率（或重复周期）之间的关系。这需要各评估单元内有丰富的历史地震烈度资料，由于烈度统计样本所覆盖的时间长度被限制在100 a左右，样本涵盖的数量少；同时本文评估单元为乡镇级，地域范围较小，导致某些单元烈度样本太少或者没有样本，无法建立统计对应关系。

指标权重法是对历史上发生过地震的地方、活动断裂构造发育的地方等未来发生地震灾害的可能认知，一般选取评估单元内历史地震次数、历史最大震级、活动断层总长度、地震动峰值加速度等指标，通过专家经验给每个指标赋上权重值，计算出各评估单元的风险值，再进行分级评价。由于地震灾害的机理尚未完全明了、不同孕灾环境的差异性以及专家的主观意见和经验，以上方法并不能完全体现评价的客观性。综上，考虑到本

文研究区域限定在建水县内，区域内孕震环境虽有差异，但从总体来看发震水平相似。因此，本文采用设定烈度的方式对地震灾害风险开展评估。

2 评估区概况及资料来源

建水县总面积为3 789 km²，辖6乡8镇，137个村委会、16个社区、1 561个村民小组，常驻人口55.31万（建水县地方志编纂委员会办公室，2018）。建水县地处滇东高原南缘，地势南高北低，地质地貌类型复杂。建水地处滇东南加里东褶皱带西部，区域内断裂构造十分发育，境内有7条断裂，其中红河断裂、曲江断裂、石屏—建水断裂具有7.0级历史地震背景。自有历史地震记载以来建水县共发生5.0级以上破坏性地震12次。1588年8月9日建水曲溪发生7.0级地震，最高烈度大于Ⅸ度，死亡人数甚众。1970年通海发生7.8级大地震，震中位于通海县高大乡、峨山县小街镇和建水县曲江镇之间（曲江断裂带附近），造成15 621人死亡，其中建水县曲江镇死亡7 479人，占死亡总人数的48%。

通过实地抽样调查对建水县各部门、行业、乡镇填报汇总的主要承灾体暴露量进行汇总，结果见表1。

表1 建水县主要承灾体暴露量
Tab.1 Amount of the exposed disaster - bearers in Jianshui County

乡镇名称	国土面积/ km ²	人口 数	框架结构/ m ²	砖混结构/ m ²	砖木结构/ m ²	土木结构/ m ²	地质灾害隐患 点面积/m ²	易燃易爆危 险源数量	水库容量/ 万 m ³	桥梁跨径 总长/m	人均应急避难 场所面积/m ²
临安镇	351	160 675	255 213	2 513 658	385 557	317 617	23 600	14	1 307.91	813	1.3
官厅镇	382	37 640	10 420	316 153	315 961	321 567	517 818	2	529.14	32	1.7
西庄镇	145	36 242	21 562	633 771	173 668	218 620	36 650	1	1 846.7	845	0.5
青龙镇	330	16 214	65 000	209 100	279 200	144 300	36 650	1	1 426.5	34	0.7
南庄镇	214	54 003	48 370	1 981 030	243 630	260 204	7 000	3	2 780.49	174	0.4
岔科镇	283	26 268	31 325	176 454	257 991	192 390	15 800	1	465.13	465	0.7
曲江镇	347	73 348	80 610	858 610	367 806	1 351 450	10 400	3	978.1	588	0.9
面甸镇	351	41 329	84 000	358 000	222 000	160 000	4 885	5	805.1	361	0.5
普雄乡	260	13 662	19 701	181 047	95 213	136 391	11 920	1	313.3	20	0.4
坡头乡	317	24 982	2 040	132 145	90 540	299 315	17 100	2	152	15	0.2
盘江乡	225	11 754	4 760	40 830	144 640	168 940	14 800	1	155	27	1.9
甸尾乡	157	15 092	25 000	59 400	86 700	245 000	600	1	6 321.42	121	1.1
李浩寨乡	165	17 403	10 774	31 820	148 400	88 920	330	1	441.18	71	0.8
利民乡	255	14 829	11 067	117 500	59 880	312 000	76 130	1	52.09	47	0.6

3 地震灾害损失风险评估

地震灾害损失包括地震对人造成的伤害以及对人类生存的自然环境和社会环境的破坏。地震对人造成的伤害是死亡和受伤,对人类生存的社会环境的主要破坏包括房屋和生命线工程损坏,自然环境主要破坏包括滑坡、崩塌、滚石、地裂缝、堰塞湖等。考虑到数据的可获取性和建模的可行性,本文选取房屋破坏损失、人员死亡、滑坡 3 类主要灾害损失进行风险定量评估。根据《中国地震动峰值加速度区划图》(GB 18306—2015),建水县境内地震动峰值加速度为 0.15 ~ 0.3 g。本文按《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)规定的 II 类场地地震动峰值加速度与地震烈度对照表(表 2),来确定地震动峰值加速度与烈度之间的转换分界值,可知建水县烈度区划最高为 VIII 度。因此,本文假设未来建水县遭遇 VIII 度破坏下,计算各乡镇可能造成的房屋破坏损失、人员死亡和滑坡密度。

表 2 II 类场地地震动峰值加速度与地震烈度对照表

Tab. 2 Comparison between the peak ground acceleration and the seismic intensity on Type II site

II 类场地地震动峰值加速度/g	地震烈度
$0.04 \leq a_{\max} < 0.09$	VI
$0.09 \leq a_{\max} < 0.19$	VII
$0.19 \leq a_{\max} < 0.38$	VIII
$0.38 \leq a_{\max} < 0.75$	IX
$a_{\max} \geq 0.75$	$\geq X$

3.1 房屋破坏损失

根据《地震现场工作第 4 部分:灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—2011),将房屋按结构类型分为框架、砖混、砖木、土木 4 类;框架结构和砖混结构房屋破坏等级分为毁坏、严重破坏、中等破坏、轻微破坏、基本完好 5 个等级;砖木结构和土木结构房屋破坏等级分为毁坏、中等破坏、基本完好 3 个等级。房屋建筑的破坏比矩阵可以通过历史震害统计法和理论计算法分析统计获得。历史震害统计法主要依据历次地震所造成的房屋震害的历史资料,通过统计得出不同结构类型在不同地震烈度下的破坏比。该方法数据可靠,资料详实,但受震例限制,高烈度区震例较少,不

能全面反映高烈度区的震害。因此,本文通过历史震害统计低烈度区数据,用理论辅助计算高烈度区数据,综合得出云南省房屋建筑破坏比矩阵。根据云南历史地震灾害直接经济损失评估报告统计得出房屋破坏损失比矩阵。房屋破坏损失率算法如下:

$$L_b = \sum_{i=1}^n (R_b \times D_b) \quad (3)$$

式中: L_b 表示某类房屋损失率; R_b 表示同类房屋某种破坏等级的破坏比,见表 3; D_b 表示同类房屋某种破坏等级的损失比,见表 4; n 为房屋破坏等级。本文计算得到云南地区历史地震房屋破坏损失率,见表 5。

表 3 云南地区历史地震不同结构房屋破坏比矩阵 (%)

Tab. 3 A matrix of damage ratios of buildings hit by historical earthquakes in Yunnan (%)

烈度区	结构类型	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
VI	框架结构	0	0.09	0.89	15.83	83.19
VI	砖混结构	0.02	0.29	2.21	19.33	78.15
VI	砖木结构	0.77	0	23.59	0	75.64
VI	土木结构	1.11	0	27.25	0	71.64
VII	框架结构	0	1.69	8.49	31.86	57.96
VII	砖混结构	0.39	4.21	13.7	33.02	48.68
VII	砖木结构	5.91	0	51.9	0	42.19
VII	土木结构	9.01	0	51.74	0	39.25
VIII	框架结构	1.69	8.89	15.38	34.08	39.96
VIII	砖混结构	3.71	13.59	30.72	33.39	18.59
VIII	砖木结构	28.67	0	61.07	0	10.26
VIII	土木结构	31.82	0	57.34	0	10.84
IX	框架结构	18.06	31.69	25.54	17.32	7.39
IX	砖混结构	39.96	32.72	15.64	7.08	4.58
IX	砖木结构	83.15	0	16.74	0	0.11
IX	土木结构	85.45	0	14.55	0	0

表 4 云南地区不同结构房屋破坏损失比矩阵 (%)

Tab. 4 A matrix of loss - ratios of buildings in Yunnan (%)

结构类型	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
框架结构	85	55	25	7.5	2.5
砖混结构	85	55	25	7.5	2.5
砖木结构	90	0	40	0	2.5
土木结构	90	0	40	0	2.5

表 5 云南地区历史地震不同结构房屋破坏损失率 (%)
Tab. 5 Loss ratios of buildings caused by historical earthquakes in Yunnan (%)

烈度区	框架结构	砖混结构	砖木结构	土木结构
Ⅵ	3.54	4.13	12.02	13.69
Ⅶ	6.89	9.77	27.13	29.79
Ⅷ	13.73	21.28	50.49	51.85
Ⅸ	40.65	56.52	81.53	82.73

上述方法计算出的是各烈度下不同房屋结构的损失面积，为了掌握房屋整体的破坏情况，需要将房屋损失转换成统一的量纲。一般是采用重置单价来计算房屋总的损失，重置单价指基于当前价格，修复被破坏房屋，恢复到震前同样规模和标准所需的单位建筑价格。经调查建水县的市场水平，当地房屋的重置单价：框架结构 2 100 元/m²、砖混结构 1 400 元/m²、砖木结构 900 元/m²、土木结构 700 元/m²。计算得到建水县各乡镇遭遇Ⅷ度破坏下房屋损失见表 6。

3.2 人员死亡

国内外很多学者在区域震亡特征研究的基础上开展震亡预测评估方法的研究，本文选择尹之潜 (1991) 的基于房屋破坏的震亡模型：

$$\lg D = 12.479A^{0.1} - 13.3 \quad (4)$$

式中： D 表示人员死亡比（死亡人数与本地区总人数之比）； A 表示房屋毁坏比。

房屋毁坏比采用表 3 的结果，根据死亡比和评估单元内的人口总数，即可计算出建水县各乡镇遭遇Ⅷ度破坏下人员死亡情况，见表 6。

3.3 滑坡密度

本文采用白仙富等 (2015) 基于对汶川地震滑坡数据影响因子的统计分析结果，按照科学、实用和简洁的建模原则，选取坡度和烈度因子进行地震滑坡密度建模。基于中国 90 m 的 DEM 数据，采用分段的方式进行建模，也就是针对不同的坡度段给出滑坡密度数学公式。为了充分反映地震滑坡密度与地震烈度和坡度之间的关系以更精细地刻画地震滑坡的本质，对 10° 以后的坡度采用 5° 为步长的等距，即将坡度分为：≤1°、1°~3°、3°~7°、7°~10°、10°~15°、15°~20°、20°~25°、25°~30°、30°~35°、35°~40°、40°~45°、45°~50°、>50° 共 13 个等级，建立了各坡度段内地震滑坡密度与烈度的逻辑斯蒂模型，见表 7。根据表 7 的分段模型，可计算出遭遇Ⅷ度破坏下建水县 90 m 栅格单元的各乡镇地震滑坡平均密度，见表 6。

3.4 地震灾害损失分级

在计算了房屋损失、人员死亡、地震滑坡可

表 6 建水县各乡镇遭遇Ⅷ度破坏下损失定量评估结果

Tab. 6 Quantitative assessment of losses of villages and towns of Jianshui County hit by IntensityⅧ

乡镇名	房屋损失		单位面积房屋损失		人员死亡数		单位面积人员死亡		滑坡平均密度值	
	计算值/ 亿元	距标准 差值	计算值/ (亿元·km ⁻²)	距标准 差值	计算值	距标准 差值	计算值/ (人·km ⁻²)	距标准 差值	计算值 (%)	距标准 差值
临安镇	1 166.43	2.28	3.31	1.64	187	1.92	0.53	1.61	3.9	-1.02
官厅镇	364.21	0.08	0.96	-0.42	108	0.46	0.28	-0.15	6.3	1.48
西庄镇	366.78	0.07	2.55	0.97	66	-0.32	0.46	1.09	4.2	-0.71
青龙镇	264.73	-0.37	0.80	-0.55	42	-0.77	0.13	-1.26	4.3	-0.60
南庄镇	851.44	1.35	3.96	2.20	63	-0.38	0.29	-0.08	3.6	-1.34
岔科镇	252.42	-0.40	0.89	-0.47	77	-0.12	0.27	-0.23	4.7	-0.19
曲江镇	954.95	1.66	2.59	1.01	215	2.44	0.58	1.99	4.4	-0.50
面甸镇	297.44	-0.27	0.85	-0.51	87	0.07	0.25	-0.41	4.5	-0.40
普雄乡	156.24	-0.69	0.60	-0.73	33	-0.93	0.13	-1.27	5.1	0.23
坡头乡	192.55	-0.58	0.61	-0.72	83	-0.01	0.26	-0.31	7	2.22
盘江乡	141.45	-0.73	0.63	-0.70	43	-0.75	0.19	-0.80	5.3	0.44
甸尾乡	154.49	-0.69	0.98	-0.39	53	-0.56	0.34	0.23	4.3	-0.60
李浩寨乡	112.97	-0.81	0.69	-0.65	61	-0.41	0.37	0.48	4.8	-0.08
利民乡	181.15	-0.61	0.67	-0.67	49	-0.64	0.18	-0.89	5.9	1.00

表 7 不同坡度下的地震滑坡密度模型

Tab. 7 Models of earthquake - induced landslide density at variant slope gradients

坡度范围	逻辑斯蒂模型	
$\leq 1^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(8.221\ 78 - 0.343\ 29x)]$	OR = 1.409 577
$1^\circ \sim 3^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(9.279\ 05 - 0.633\ 448x)]$	OR = 1.884 096
$3^\circ \sim 7^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(11.398\ 3 - 0.916\ 239x)]$	OR = 2.499 872
$7^\circ \sim 10^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(10.602\ 5 - 0.849\ 128x)]$	OR = 2.337 608
$10^\circ \sim 15^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(10.351\ 7 - 0.852\ 482x)]$	OR = 2.345 462
$15^\circ \sim 20^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(10.007\ 8 - 0.847\ 624x)]$	OR = 2.334 094
$20^\circ \sim 25^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(9.197\ 21 - 0.789\ 875x)]$	OR = 2.203 122
$25^\circ \sim 30^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(9.681\ 42 - 0.852\ 073x)]$	OR = 2.344 501
$30^\circ \sim 35^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(9.651\ 06 - 0.884\ 7x)]$	OR = 2.422 259
$35^\circ \sim 40^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(10.115\ 4 - 0.968\ 573x)]$	OR = 2.634 182
$40^\circ \sim 45^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(10.177\ 3 - 1.012\ 792x)]$	OR = 2.753 278
$45^\circ \sim 50^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(9.896\ 83 - 1.007\ 739x)]$	OR = 2.739 400
$> 50^\circ$	$Y = 1/[1 + \exp(9.800\ 03 - 0.989\ 653x)]$	OR = 2.690 301

注: Y 表示滑坡频度; x 表示地震烈度.

能造成的损失结果后, 为了在研究区域 (建水县) 乡镇层面上分出不同的等级, 需要对地震灾害可

能损失的不同因子进行标准化。具体的方法是, 将各乡镇的各个损失项分别计算各自标准差, 某项损失标准差计算公式为:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (5)$$

式中: S_i 为某项损失标准差; X_j 为第 j 个乡镇的损失数; \bar{X} 为研究区域内各乡镇损失平均数; n 为研究区域中乡镇的总数。

某个乡镇某项损失“距标准差”值的计算公式为:

$$D_{ij} = \frac{X_j - \bar{X}}{S_i} \quad (6)$$

按上述方法分别计算建水县各乡镇房屋损失、人员死亡、地震滑坡密度的“距标准差”值, 结果如表 6 所示。然后对“距标准差”进行分级赋值: $D_{ij} \leq -1$ 为微度、 $-1 < D_{ij} \leq 0$ 为轻度、 $0 < D_{ij} \leq 1$ 为中度、 $D_{ij} > 1$ 为重度, 建水县地震灾害损失分级结果如图 1 所示。

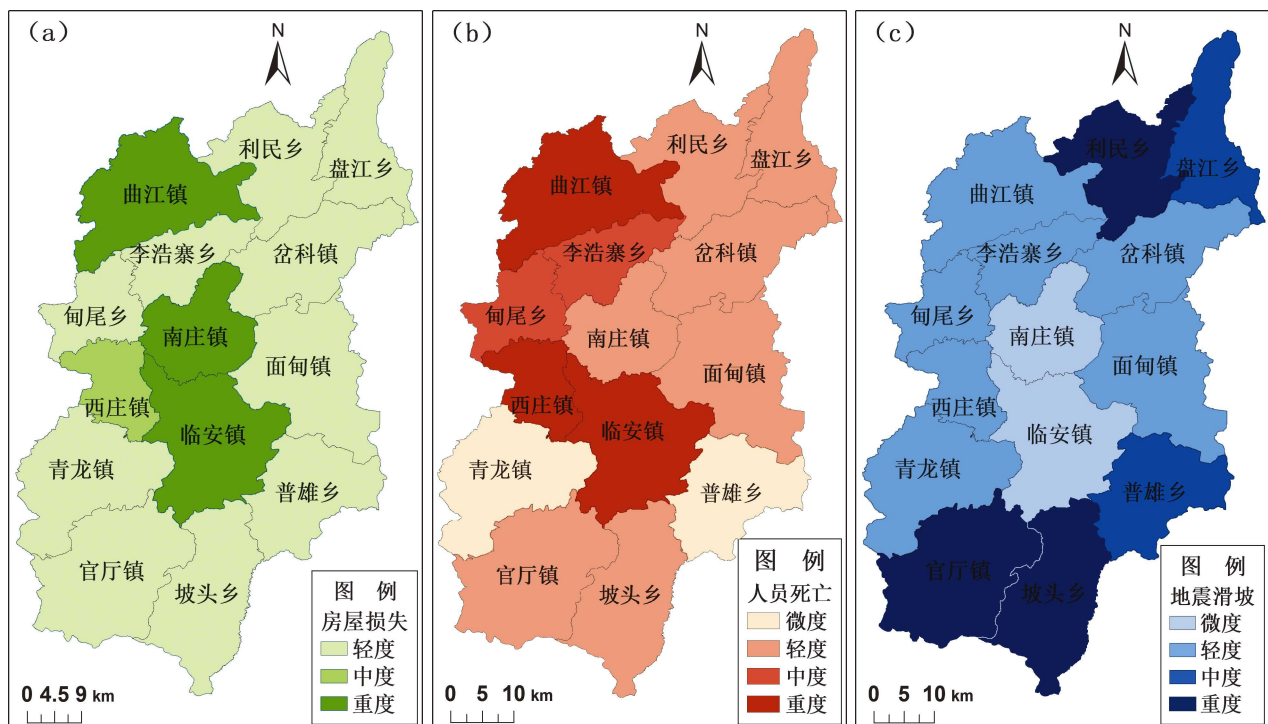


图 1 建水县各乡镇房屋损失 (a)、人员死亡 (b)、地震滑坡 (c) 灾害损失分级

Fig. 1 Grading of earthquake - hazard losses of damage of buildings (a), death toll (b), earthquake - caused landslide (c) in Jianshui County

由图1可知，在设定未来建水县遭遇Ⅷ度破坏下，利用评估模型计算，对并结果进行分级，房屋损失为重度的乡镇是临安市、曲江镇、南庄镇，人员死亡为重度的乡镇是曲江镇、临安市、西庄镇，地震滑坡为重度的乡镇是官厅镇、坡头乡、利民乡。

4 地震灾害风险区划

除上述的人口、房屋、滑坡外，作为主要承灾体的地质灾害隐患点：易燃易爆危险源、水库、桥梁、应急避难场所全部暴露在地震风险中，在开展地震灾害风险区划时，需将这些承灾体的损失风险考虑在内。由于震例和样本较少，这几种承灾体在不同地震破坏力下的损失率对应关系无法建立，因此本文采用暴露量来代替损失量进行风险评估和等级划分。

将建水县以乡镇为单位进行风险等级划分，为了在乡镇层面上分出不同的等级，必须对地震灾害可能损失的不同因子进行标准化。本文用极差变换法（李美娟等，2004）对地震灾害风险指标进行标准化处理。一般而言，评价指标可分为正向指标和逆向指标，本文选取的应急避难场所为逆向指标，人均应急避难场所面积越大，其震后应急避难疏散的效率就越高，灾害的风险就越

低；其余为正向指标，正向评价指标标准化公式为：

$$Y = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \tag{7}$$

逆向评价指标标准化公式为：

$$Y = \frac{\max(X_i) - X_i}{\max(X_i) - \min(X_i)} \tag{8}$$

式中： X_i 表示评价指标的某个单元值； (X_i) 表示评价指标的所有单元值。

为避免某个乡镇面积越大，其损失也越大，容易形成高风险等级的现象，对每个地震灾害风险指标均采用单位面积（每平方千米）均值或人均值进行评价。按照标准化方法将各个乡镇的地震灾害风险指标值进行归一化处理，如表8所示。根据专家经验综合得出各指标权重如下：房屋损失为0.22、人员死亡为0.3、滑坡平均密度为0.16、地质灾害隐患点面积为0.09、易燃易爆危险源为0.06、水库容量为0.08、桥梁跨径总长为0.03、人均应急避难场所面积为0.06。利用ArcGIS的空间分析功能，将标准化后的评价指标值赋予各评价单元，并利用Weighted Sum函数，将各指标按权重系数加权叠加分析后得到评价单元地震灾害风险综合值，见表8。

表8 建水县各乡镇地震灾害风险综合值

Tab. 8 Synthetical values of the earthquake - hazard risk of villages and towns in Jianshui County

乡镇名称	地震灾害风险指标值归一化								地震灾害风险综合值
	单位面积房屋损失	单位面积人员死亡	滑坡平均密度	单位面积地质灾害隐患点量	单位面积易燃易爆危险源	单位面积水库容量	单位面积桥梁跨径长度	人均应急避难场所面积	
临安市	0.81	0.89	0.09	0.05	1.00	0.09	0.39	0.37	0.548 8
官厅镇	0.11	0.33	0.79	1.00	0.08	0.03	0.01	0.13	0.383 6
西庄镇	0.58	0.73	0.18	0.19	0.00	0.32	1.00	0.80	0.487 1
青龙镇	0.06	0.00	0.21	0.08	0.00	0.10	0.01	0.71	0.110 5
南庄镇	1.00	0.36	0.00	0.02	0.15	0.32	0.13	0.85	0.412 7
岔科镇	0.09	0.31	0.32	0.04	0.00	0.04	0.27	0.71	0.222 0
曲江镇	0.59	1.00	0.24	0.02	0.15	0.06	0.27	0.55	0.510 2
面甸镇	0.07	0.27	0.26	0.01	0.31	0.05	0.17	0.79	0.215 7
普雄乡	0.00	0.00	0.45	0.03	0.00	0.03	0.00	0.84	0.137 2
坡头乡	0.00	0.29	1.00	0.04	0.08	0.01	0.00	1.00	0.331 2
盘江乡	0.01	0.13	0.54	0.05	0.00	0.01	0.01	0.00	0.142 1
甸尾乡	0.11	0.47	0.21	0.00	0.00	1.00	0.12	0.49	0.306 9
李浩寨乡	0.03	0.53	0.35	0.00	0.00	0.06	0.07	0.60	0.260 7
利民乡	0.02	0.11	0.68	0.20	0.00	0.00	0.02	0.75	0.225 2

采用 2 倍等比的划分尺度将建水县各乡镇地震灾害风险综合值从小到大划分为 $[0 \sim 0.19]$ 、 $(0.19 \sim 0.38]$ 、 >0.38 共 3 类, 分别代表低、中、高 3 个风险等级, 得到研究区地震灾害风险等级分布, 如图 2 所示。由图 2 可知, 研究区内地震灾害高风险的乡镇是临安区、曲江镇、官厅镇、南庄镇、西庄镇, 地震灾害中风险的乡镇是利民乡、岔科镇、面甸镇、甸尾乡、李浩寨乡、坡头乡, 地震灾害低风险的乡镇是盘江乡、普雄乡、青龙镇。

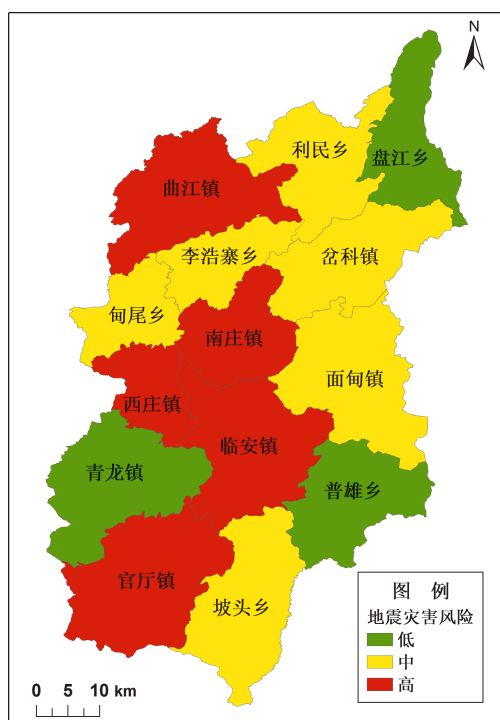


图 2 建水县各乡镇地震灾害风险划分图

Fig. 2 Grading of the earthquake - hazard risk of villages and towns in Jianshui County

5 结论

本文利用云南省建水县的地震孕灾环境、承灾体暴露量、致灾因子破坏力开展地震灾害损失定量评估。在传统风险评估方法的基础上, 对无法建立灾害损失关系的承灾体采用暴露量代替损失量来进行风险评估, 应用极差变换法对地震灾害损失的不同因子进行标准化, 通过综合赋权划分地震灾害风险等级。以云南省建水县为例, 验证了上述方法, 得出以下主要结论:

(1) 在设定未来建水县遭遇Ⅷ度破坏下, 利用灾害损失评估模型计算, 并对计算结果分级, 从评估结果来看: 房屋损失为重度的乡镇有 3 个, 分别是临安区、曲江镇、南庄镇, 中度 1 个, 轻度 10 个; 人员死亡为重度的乡镇有 3 个, 分别是曲江镇、临安区、西庄镇, 中度 2 个, 轻度 7 个, 微度 2 个; 地震滑坡为重度乡镇有 3 个, 分别是官厅镇、坡头乡、利民乡, 中度 2 个, 轻度 7 个, 微度 2 个。

(2) 从建水地震灾害风险评价结果来看, 地震灾害高风险的乡镇有 5 个, 中风险乡镇有 6 个, 低风险乡镇有 3 个。高风险区域为建水北部的曲江, 南部的南庄、西庄、临安、官厅一带。

历史震例表明, 抗震性能较差的简易房屋 (生产用房、临时搭建无梁柱结构房屋等) 是造成地震人员伤亡和经济损失的主要风险源。此类房屋开展调查统计的难度较大, 本文研究的案例中尚未找到详实的统计数据, 暂不能对其风险进行评估, 但其仍是地震灾害中主要安全隐患。目前建立的各类承灾体地震灾害损失率与地震等级之间的关系是基于某个区域近百年有限的历史震例资料统计所得, 具有较大的离散性。相对于全国来说, 云南是个小区域, 但即使是在云南区域内部各个地区的地质构造、场地系数、承灾体类型和易损性, 成灾机理和成灾过程也不尽相同, 可见地震灾害损失标准的建立是复杂的系统性问题。本文仅是得到了初步的分析结果, 还需要不断积累更多的震例资料来进行修正, 使其更具有代表性。另外, 随着社会发展, 各区域人口、经济、房屋结构类型等承灾体均在发生变化, 各地区的地震灾害风险水平也会是一个动态变化的过程。

参考文献:

- 白仙富, 戴雨芡, 余庆坤, 等. 2015. 地震滑坡危险性评估模型及初步应用[J]. 地震研究, 38(2): 301-312.
- 郝敏, 谢礼立, 徐龙军. 2005. 关于地震烈度物理标准研究的若干思考[J]. 地震学报, 5(2): 113-117, 120.
- 建水县地方志编纂委员会办公室. 2018. 建水年鉴(2018)[M]. 芒市: 德宏民族出版社.
- 李波, 朱四虎, 路雁霞. 2019. 基于层次分析法的城市地震灾害风险评估研究[J]. 四川建筑科学研究, 45(2): 21-27.
- 李美娟, 陈国宏, 陈衍泰. 2004. 综合评价中指标标准化方法研究[J]. 中国管理科学, 12(S1): 45-48.
- 刘静伟, 王振明, 谢富仁, 等. 2014. 大华北地区地震灾害与风险评估

- [J]. 地震工程学报, 36(1): 134–143.
- 刘毅, 吴绍洪, 徐中春, 等. 2011. 自然灾害风险评估与分级方法论探研——以山西省地震灾害风险为例[J]. 地理研究, 30(2): 195–208.
- 聂选华. 2017. 近三十年来云南自然灾害史研究述评[J]. 文山学院学报, 30(4): 13–20.
- 全国自然灾害综合风险普查技术总体组. 2020. 全国自然灾害综合风险普查工程(一)开展全国自然灾害综合风险普查的背景[J]. 中国减灾, (1): 42–45.
- 孙柏涛, 张桂欣. 2017. 中国大陆建筑物地震灾害风险分布研究[J]. 土木工程学报, 50(9): 1–7.
- 唐丽华, 李山有, 宋立军. 2016. 地震灾害风险评估方法的对比分析——以乌鲁木齐市为例[J]. 地震工程学报, 38(5): 838–845.
- 向喜琼, 黄润秋. 2000. 地质灾害风险评价与风险管理[J]. 地质灾害与环境保护, 11(1): 38–41.
- 徐伟, 王静爱, 史培军, 等. 2004. 中国城市地震灾害危险度评价[J]. 自然灾害学报, 15(1): 9–15.
- 姚清林, 黄崇福. 2002. 地震灾害风险因素和风险评估指标的模糊算法[J]. 自然灾害学报, 11(2): 51–58.
- 尹之潜. 1991. 地震灾害损失预测研究[J]. 地震工程与工程振动, 11(4): 87–96.
- Cornell C A. 1968. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(5).
- Dille M, Mundial B. 2005. Natural disaster hotspots: A global risk analysis[M]. Washington D C: Hazard Management Unit, World Bank.
- Reiter L. 1990. Earthquake hazard analysis: Issues and insights[M]. New York: Columbia University Press.
- GB 18306—2015, 中国地震动参数区划图[S].
- GB 18306—2015, 中国地震动峰值加速度区划图[S].
- GB/T 18208.4—2011, 地震现场工作第4部分: 灾害直接损失评估[S].

Assessment of Earthquake-hazard Risk of Jianshui County, Yunnan Province Based on Township Units

ZHANG Fanghao, DU Haoguo, DENG Shurong, LU Yongkun, ZHANG Yuanshuo, LYU Jiali, HE Shifang
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

We use the data of buildings, population, topography, lifeline engineering systems, etc in Jianshui County of Yunnan Province, and select suitable risk factors of earthquake disaster losses, to calculate the casualties, damage to buildings, and amount of landslides with the assessment model on condition of the given seismic intensity, and get quantitative results of earthquake disaster losses. As the classical risk-assessment methods fail to help establish disaster-loss relationships for the disaster-bearers, we assess the earthquake-hazard risk using the risk-exposure amount instead of loss amount. Finally, we use the range transformation method to standardize the factors of earthquake disaster losses, and grade the earthquake hazards by comprehensive weighting. The results show that in Jianshui County there are 5 high-risk villages and towns (Qujiang in the north, Nanzhuang, Xizhuang, Lin'an, and Guanting in the south), 6 medium-risk ones, and 3 low-risk ones.

Keywords: risk assessment; earthquake disaster; township unit; Jianshui County