

李昌珑,李宗超,吕红山等. 2019. 基于三维图像模式识别的西藏东南部地震灾害损失风险评估. 地球物理学报, 62(1):393-410, doi:10. 6038/cjg2019M0360.

Li C L, Li Z C, Lü H S, et al. 2019. Seismic disaster loss risk assessment for southeastern Tibet based on 3D image pattern recognition. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 62(1):393-410, doi:10. 6038/cjg2019M0360.

基于三维图像模式识别的西藏东南部 地震灾害损失风险评估

李昌珑, 李宗超, 吕红山, 高孟潭

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 本文在对西藏东南部各县的建筑类型、数量、易损性调查的基础上,对不同类型的建筑建立了模式类向量,使用三维图像模式识别技术估计了各类型建筑在西藏东南部各县市的数量分布,建立了不同建筑物的结构易损性和人口易损性模型,并且估算了西藏东南部各县在遭遇一次设定地震时的损失分布和基于危险性的未来 50 年可能的损失分布情况. 本文研究表明,若曲松—桑日发生 7.5 级地震,可能造成拉萨、山南两市较重的人员伤亡,其中曲松县和乃东区伤亡最重. 西藏东南部未来 50 年建筑地震风险最高的地区是拉萨市区、林芝市区和错那县,其中拉萨市区的建筑财产损失风险最高.

关键词 模式识别; 地震风险; 地震危险性; 建筑类型; 结构易损性

doi:10. 6038/cjg2019M0360

中图分类号 P315

收稿日期 2018-06-13, 2018-10-08 收修定稿

Seismic disaster loss risk assessment for southeastern Tibet based on 3D image pattern recognition

LI ChangLong, LI ZongChao, LÜ HongShan, GAO MengTan

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract This paper investigated the numbers, types, and vulnerability of the buildings in Southeastern Tibet and built pattern classes for difference types of buildings. Then we assessed the distribution of each type of buildings in every town based on 3D image pattern recognition, and made an event-based and a 50-year hazard-based seismic risk assessment for the towns in Southeastern Tibet. Our study indicated that if an $M7.5$ earthquake happened in Qusong-Sangri, it may cause serious casualties in Lhasa and Shannan area. The town of Qusong and Naidong may have the most casualties. Areas with the highest seismic risk are urban areas of Lhasa and Nyingchi and Cuona Town, and urban Lhasa has the highest seismic risk of building structural economic losses.

Keywords Pattern recognition; Seismic risk; Seismic hazard; Building classification; Structural vulnerability

0 引言

随着社会的现代化发展,地震风险(Seismic Risk)的概念正被越来越频繁地使用.一个地区的地震风险指这个地区可能遭受的因地震引起的损失的可能性和程度.地震风险的计算可由式(1)表示:

$$\text{Seismic Risk} = \text{Seismic Hazard} \times \text{Vulnerability} \times \text{Exposure}, \quad (1)$$

地震危险性、人工设施的易损性(Vulnerability)和承灾体(人工设施)暴露在地震危险性中的规模(Exposure)是影响地震风险的三个因素.

地震风险研究是当今地震学界的热点问题.在国际上,全球地震模型(GEM)基金会致力于全球地震风险的研究(Silva et al., 2014),目前已完成及正在进行欧洲、中亚、美国、南美等全球多地的地震风险分析工作(Silva et al., 2014; Wieland et al., 2015; Despotaki et al., 2017).同时,GEM开发了地震风险计算工具 OpenQuake(Silva et al., 2014),正在组织全球的地震风险评估工作.

除 GEM 外,还有许多其他的地震风险相关研究. Salgado-Gálvez 等(2016)进行了哥伦比亚麦德林地区的地震风险评估,划分了麦德林城市的不同地震风险等级. Bartoli 等(2016)对意大利 San Gimignano 的古建筑进行了地震风险评估,建立了不同类型建筑的易损性模型,并给出了不同建筑对地震作用的响应.在国内,地震风险评估工作近年来也广泛开展.王志涛等(2008)研究了城市地震灾害风险区划方法,以厦门市地震灾害风险区划分为例进行了风险区划网格划分,并计算了不同网格的地震灾害风险,找出了厦门市地震风险严重的区域.吕大刚和于晓辉(2013)开展了基于地震易损性解析函数的概率地震风险理论研究,采用幂指数形式的地震危险性函数,进一步将已获得的地震易损性解析函数拓展得到概率地震风险函数的解析形式,发展了地震风险评估的方法.刘吉夫等(2008)研究了中国大陆地震风险分析模型,通过收集中国大陆大量地震灾害基础资料,根据实际地震影响烈度分布特点,改进了地震脆弱性模型.

综上所述,地震风险评估在世界各地的研究开展的时间不长,还处在起步和发展阶段.地震风险评估比较常用的方法是将被地震危险性资料和建筑、人口等承灾体的资料结合,给出承灾体可能遭受的地震损失结果.

图像模式识别(Image Pattern Recognition)技术是人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术的重要分支,是根据图像对象的特征建立模式类,并根据对象的模式取值,确定对象的从属关系的技术.图像模式识别已经在卫星图片、遥感等二维图像处理研究中得到了较多应用(李小涛,2004;李燕等,2012;侯舒维等,2014).但是,对图像中三维特征的处理和识别技术还未在建筑结构类型的统计中获得广泛应用.本文尝试将三维图像模式识别技术应用在无人机航拍图像处理和模式识别中,用于建筑类型和数量的统计,为 AI 技术在地学研究中的更多应用进行探索.

西藏东南部包括拉萨、山南、林芝三市,共 27 个区县(图 1),总人口约 200 万,约占西藏人口的三分之二,是西藏人口最稠密、经济相对发达的地区.同时,西藏东南部位于欧亚板块和印度板块边界,分布有多条大型活动构造断裂,大地震频繁发生,地震危险性较高.西藏东南部三地市辖内有记录的 6 级以上地震共有 33 次,其中 8 级或以上地震 3 次,分别是拉萨当雄在 1411 年和 1951 年的 8 级地震,以及林芝察隅在 1950 年的 8.6 级地震.近年来,中国政府致力于重点扶持西藏的经济建设,西藏东南部是首先发展的地区.因此,了解西藏东南部的地震风险具有重要的意义.本文在对西藏东南部各县的建筑类型、数量、易损性调查的基础上,结合当地的人口和住房特点,估计了不同类型建筑在西藏东南部的分布情况,建立了不同建筑物的结构易损性和人口易损性模型,并且估算了西藏东南部各县在遭遇一次设定地震时的损失分布和基于危险性的未来 50 年可能的损失分布情况.

1 使用的数据和研究方案

1.1 使用的数据

西藏东南部人口分布数据来自第六次人口普查和各县市的年度报告(国务院人口普查办公室和国家统计局人口和就业统计司,2010).可收集到的数据有每个县的总人口和总户数,以及城镇人口数和农村人口数.

建筑的分类基于中国地震局地球物理研究所对西藏东南部的实地考察.考察走访了西藏东南部 27 个区县中的 13 个(图 1),采集的建筑物样本超过一千栋.考察中发现,西藏东南部的建筑分布存在以下几个特点:

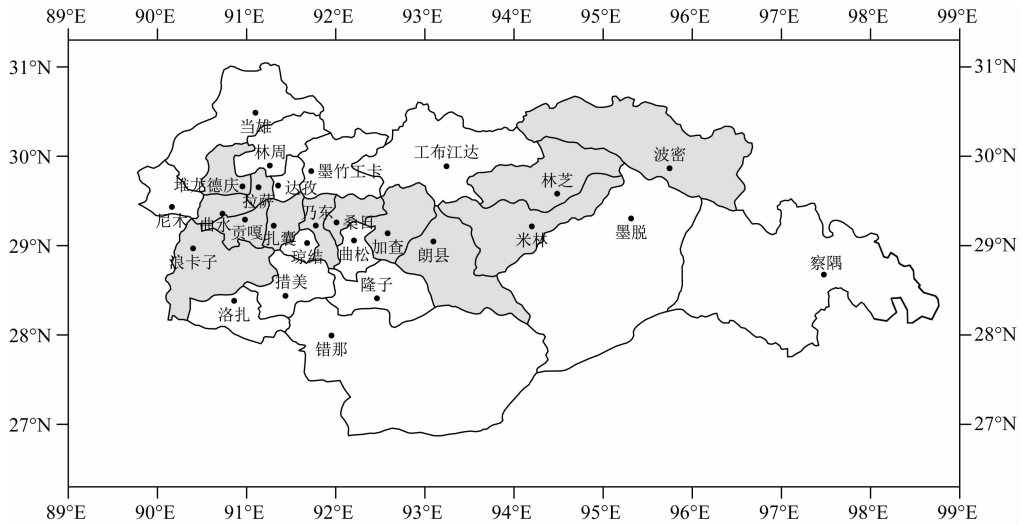


图1 研究区域,其中阴影地区为实地采集建筑资料的地区

Fig. 1 Study area, and the shaded areas have building image data

(1) 人口和建筑多分布于河谷,集中于市区县城。

(2) 民居的结构类型和易损性特征在卫星图片上难识别,但无人机航拍可识别。

(3) 城镇居民和农村居民的房屋结构和易损性存在差别,城区楼房与内地城市差别不大,农村分布有较多自建新房和传统老旧藏式建筑。

(4) 藏东南林区有相当数量的木结构房屋。

1.2 研究方案

根据 1.1 的数据特征,对西藏东南部的建筑进行逐栋的精确统计和分类很难实现.因此,本文考虑使用合理的估算与抽样调查相配合的方法,得到各类型建筑的数量.本文建筑分类和建立承灾体规模模型的方案如下:

(1) 假设所有的人口和建筑都集中在市区和县城的中心区域(即图 1 中各点的位置)。

(2) 由于城镇居民和农村居民住房结构类型和易损性存在差异,因此将人口分为城镇人口和农村人口分别统计。

(3) 在建筑分类时,将易损性相同的房屋归为一类。

(4) 由于很难精确统计出不同类型房屋的具体总数,因此假设同属一户的房屋易损性相同,将户数作为房屋数量统计。

(5) 假设城镇与农村的人口/户数比相同,按照城镇/农村的人口比分配城镇和农村的总户数。

以下介绍具体的模型建立和地震风险计算过程。

2 承灾体模型的建立

2.1 人口分布

西藏东南部各县人口数量如图 2 所示.按照 1.2 的方法统计各县的农村人口和户数、城镇人口和户数.例如图 3 给出了各县农村户数的分布.各县城镇、农村人口及户数分布如表 1 所示。

2.2 建筑分类

根据在西藏东南部的实地调查结果,将西藏东南部的建筑分为以下四类:公建房(PUB)、自建新房(PRV)、老旧房(OLD)和木结构房(WOD).四种建筑的典型图如图 4 所示。

4 类建筑结构的外观特征较为鲜明:

(1) 公建房通常层数较多,多不少于 3 层,而其他 3 类建筑很少超过 2 层。

(2) 老旧房具有传统藏式建筑的特征,开窗较小,明显小于其他 3 类建筑。

(3) 木结构建筑的外观有明显的由于木桩(板)拼接形成的密集栅格状纹理。

这些特征可用于建立各类建筑的模式和模式类。

2.3 建筑类型模式类向量的建立和模式识别

2.3.1 模式类向量和模式识别算法

要对建筑的图像进行模式识别,需要确定所考虑的模式.通过对 2.2 节四种建筑类型的特征分析,考虑建筑的 3 个模式:层数(F)、窗户面积比(W)和

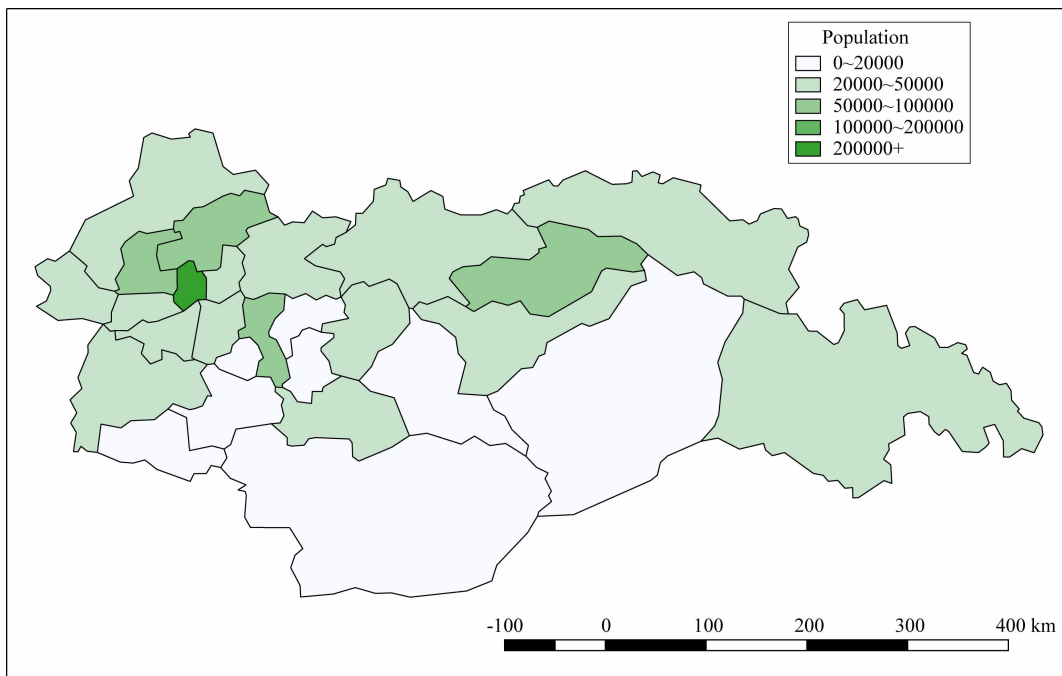


图 2 西藏东南部各县人口分布图(数据来源:第六次人口普查)

Fig. 2 Population of the towns in Southeastern Tibet (Data from the 6th National Census of China)

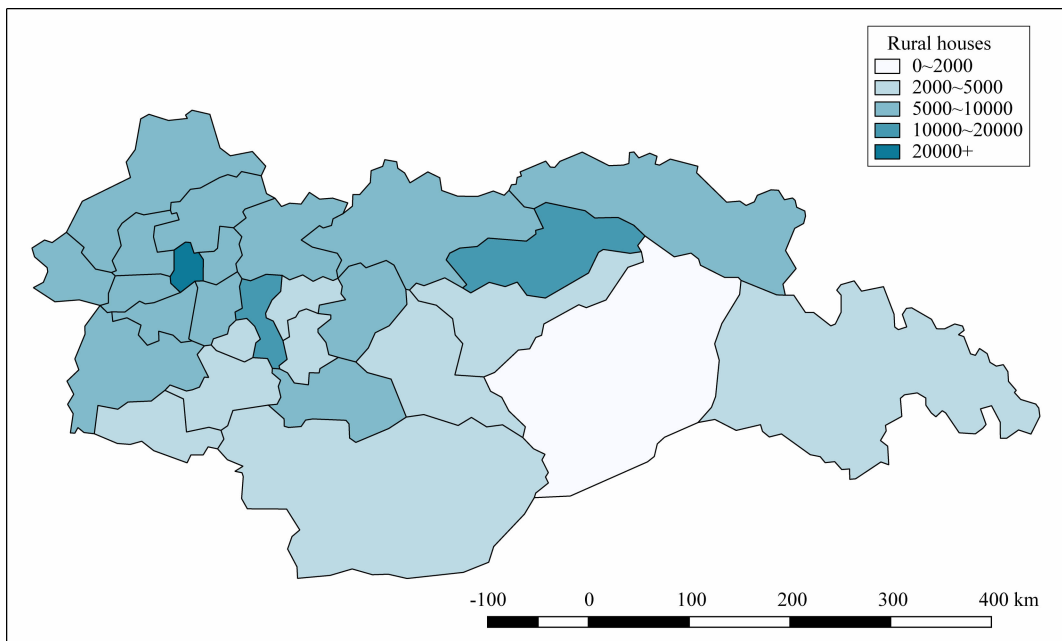


图 3 西藏东南部各县农村户数分布图

Fig. 3 Numbers of rural households in each town

密集栅格状纹理(T). 3 个模式分别说明如下:

(1) 层数 F : 建筑的层数. 该模式主要用于识别出公建房.

(2) 窗户面积比 W : 外墙窗户面积与墙面面积之比. 该模式主要用于识别出老旧传统藏式建筑.

(3) 密集栅格状纹理 T : 外墙有密集栅格状纹理记为 $T=1$, 反之记为 $T=0$. 该模式主要用于识别出木结构建筑.

3 个模式对应的模式类向量可表示为层数模式类($F_{PUB}, F_{PRV}, F_{OLD}, F_{WOD}$)、窗户面积比模式类($W_{PUB}, W_{PRV}, W_{OLD}, W_{WOD}$)和栅格状纹理模式类($T_{PUB}, T_{PRV}, T_{OLD}, T_{WOD}$). 模式识别的思想为, 将图像转换为像素信息矩阵; 在像素信息矩阵中识别出符合建筑矩阵特征的子矩阵, 作为建筑单元并统计建筑数量; 以每幢建筑为单位, 分别读取建筑图像模式 F 、 W 和 T , 当 $F \geq 3$ 时识别为 PUB; 当 $F < 3$ 且

表 1 各城镇、农村人口及户数统计表
Table 1 Numbers of urban and rural households in each town

地市	区县	户数	最新人口	城镇人口	农村人口	城镇户数	农村户数
拉萨市	城关区	66316	279074	233189	45885	55414	10902
	堆龙德庆区	9340	52249	6249	46000	1117	8223
	林周县	9132	70000	3752	66248	489	8643
	当雄县	7116	46463	2411	44052	369	6747
	尼木县	5069	34044	1770	32274	264	4805
	曲水县	6676	31860	1657	30203	347	6329
	达孜县	5422	29152	1516	27636	282	5140
	墨竹工卡县	7634	44674	2323	42351	397	7237
山南市	乃东区	15783	63111	41079	22032	10273	5510
	扎囊县	7107	40000	1520	48480	269	6838
	贡嘎县	9411	50000	4000	46000	753	8658
	桑日县	4409	17261	653	16608	167	4242
	琼结县	4057	18807	711	17096	153	3904
	曲松县	3750	16309	1882	14427	433	3317
	措美县	3222	14000	529	13471	122	3100
	洛扎县	4439	20000	756	19344	168	4271
	加查县	6851	21608	817	20791	259	6592
	隆子县	7895	35248	1332	33916	298	7597
	错那县	4148	15277	577	14700	157	3991
	浪卡子县	6583	34767	1314	33453	249	6334
林芝市	巴宜区	11187	67000	50205	16795	8382	2805
	工布江达县	7356	27532	2203	25329	588	6768
	米林县	4345	23000	6100	16900	1152	3193
	墨脱县	1789	14040	3265	10775	416	1373
	波密县	5489	31000	7130	23870	1262	4227
	察隅县	4951	32449	7425	25024	1133	3818
	朗县	3537	15037	1248	13789	294	3243

$W < 0.1$ 是识别为 OLD; 当 $F < 3$ 且 $W \geq 0.1$ 且 $T = 1$ 时识别为 WOD; 其余识别为 PRV. 模式识别的流程图如图 5 所示. 对一幅图像的模式识别示例如图 6 所示.

2.3.2 模式识别算法准确率分析

2.3.1 节的模式识别算法的准确率如何, 需要实例加以检验. 本节选取了房屋数量较少的 4 张无人机航班照片, 比较采用模式识别算法与人工统计方法的结果, 分析模式识别算法的准确率.

4 张照片分别计为照片 1—4, 如图 7 所示. 模式识别和人工统计的各类型建筑的数量及准确率如表 2 所示. 由表 2 可见, 本文的模式识别算法对公建房、老旧房识别准确率较高, 木结构识别准确率稍低, 但总体对类型建筑数量的统计较准确.

表 2 模式识别与人工统计建筑数量统计表(幢)
Table 2 Building numbers counted by pattern recognition and by artificial counting

建筑类型	照片 1	照片 2	照片 3	照片 4				
Public	模式	0	模式	0	模式	0	模式	4
	人工	0	人工	0	人工	0	人工	4
Private	模式	2	模式	3	模式	12	模式	30
	人工	2	人工	1	人工	11	人工	30
Old	模式	1	模式	1	模式	2	模式	2
	人工	1	人工	1	人工	2	人工	2
Wood	模式	16	模式	22	模式	5	模式	0
	人工	17	人工	24	人工	4	人工	0
准确率	95%	96.2%	88.2%	100%				



图4 四种房屋建筑类型典型图

(a) 公建房; (b) 自建新房; (c) 老旧房; (d) 木结构. 资料来源: 中国地震局地球物理研究所地震保险项目组.

Fig. 4 Typical images of the four building types

(a) Public; (b) New-built Private; (c) Old; (d) Wood. Data source: Earthquake Insurance Group of Institute of Geophysics, China Earthquake Administration.

2.4 建筑数量统计

用抽样调查的方法估算四种类型的建筑在各县的分布数量. 将拉萨、山南、林芝三个市的市区分为市主城区和市郊乡村两类区域分别统计, 将 24 个县也分为县城城区和县辖乡村分别统计. 林区的木结构分布区也抽样统计. 选用的抽样地区如表 3 所示. 抽样采用无人机航拍的方式. 各抽样点的航拍图如图 8 所示. 使用 2.3 节的模式识别方法统计出各抽样地区的建筑数量分布, 如表 4 所示, 其中岗堆村与帮

加村联合统计, 代表木结构分布密集区.

表 3 建筑数量统计抽样地区

Table 3 Building number sampling areas

城乡类型	抽样地区
市主城区	山南市乃东区
市郊乡村	拉萨市城关区娘热乡
县城城区	拉萨市曲水县才纳乡
县辖乡村	林芝市鲁朗镇
木结构分布区	波密县岗堆村、米林县帮加村

表 4 抽样点的各类型建筑分布数量与比例统计

Table 4 Numbers and proportion of buildings at sampling points

抽样点	总数	公建房	自建房	老旧房	木结构	公建房比例	自建房比例	老旧房比例	木结构比例
拉萨市娘热乡	122	14	56	52	0	11.48%	45.90%	42.62%	0.00%
曲水县才纳乡	456	283	118	55	0	62.06%	25.88%	12.06%	0.00%
山南市乃东区	360	219	131	10	0	60.83%	36.39%	2.78%	0.00%
林芝市鲁朗镇	73	2	28	41	2	2.74%	38.36%	56.16%	2.74%
波密县岗堆村	21	1	7	6	7	4.76%	33.33%	28.58%	33.33%
米林县帮加村	47	1	3	15	28	2.13%	6.38%	31.91%	59.58%
岗堆+帮加	68	2	10	21	35	2.94%	14.71%	30.88%	51.47%

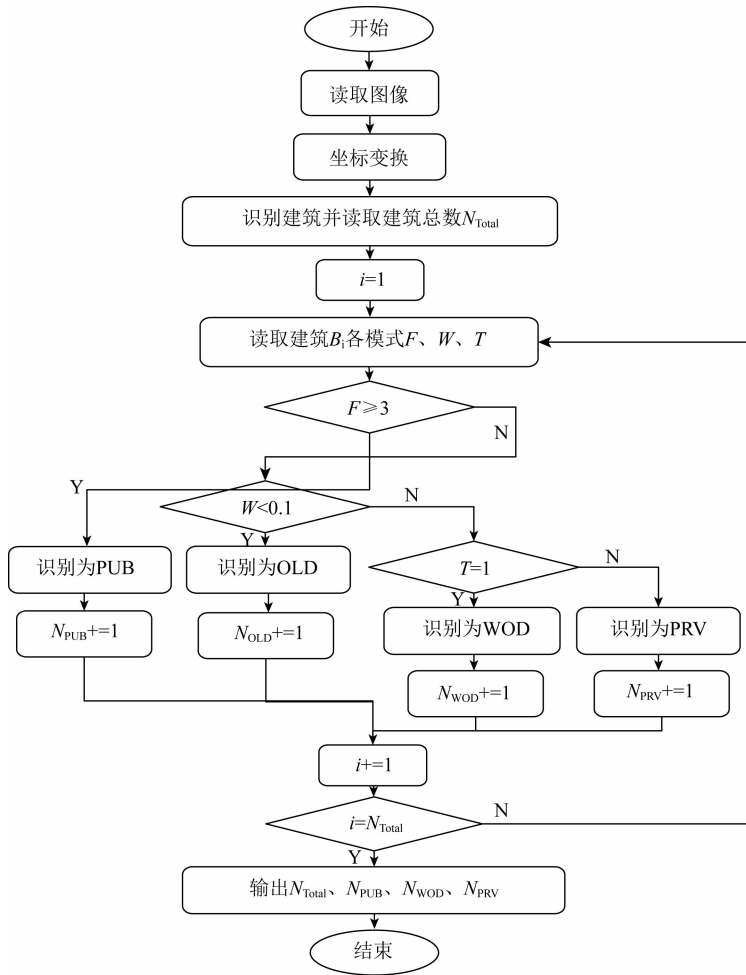


图 5 建筑图像模式识别流程图

Fig. 5 Flow chart of building image pattern recognition

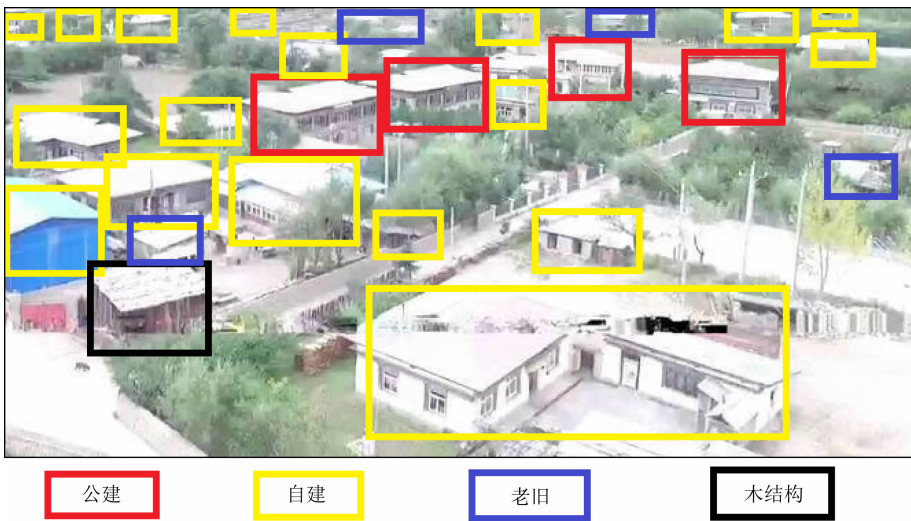


图 6 建筑图像模式识别示例

Fig. 6 An example of pattern recognition for a building image

将表 1 中的各县城镇和农村户数按照表 4 中的比例分配各类型建筑数量. 例如, 拉萨市林周县城镇户数 489 户, 则各类型建筑的比例参照县城城区曲

水县才纳乡的统计结果, 林周县县城区自建新房数量为 $489 \times 25.88\% \approx 127$ (栋). 据此方法统计出的西藏东南部各县各类型建筑数量如表 5 所示.

表 5 各县各类型建筑总数统计表
Table 5 Numbers and occupancy of each building type in each town

地市	区县	公建房	自建新房	老旧房	木结构	公建房人口	自建新房人口	老旧房人口	木结构人口
拉萨市	城关区	34960	25169	6187	0	147120	105917	26036	0
	堆龙德庆区	1144	3443	4753	0	6400	19261	26589	0
	林周县	777	3442	4913	0	5956	26384	37660	0
	当雄县	599	2683	3834	0	3911	17518	25034	0
	尼木县	428	1911	2730	0	2874	12835	18335	0
	曲水县	562	2518	3596	0	2682	12017	17161	0
	达孜县	456	2045	2921	0	2452	10995	15705	0
	墨竹工卡县	643	2879	4112	0	3763	16848	24063	0
山南市	乃东区	6882	6267	2634	0	27519	25060	10532	0
	扎囊县	542	2693	3872	0	3051	15157	21793	0
	贡嘎县	942	3516	4953	0	5005	18680	26315	0
	桑日县	337	1670	2402	0	1319	6538	9404	0
	琼结县	309	1538	2210	0	1432	7130	10245	0
	曲松县	451	1384	1915	0	1961	6019	8328	0
	措美县	246	1221	1755	0	1069	5305	7626	0
	洛扎县	338	1681	2420	0	1523	7574	10903	0
	加查县	422	2696	3733	0	1331	8503	11774	0
	隆子县	602	2991	4302	0	2688	13354	19207	0
	错那县	316	1572	2260	0	1164	5790	8324	0
	浪卡子县	502	2494	3587	0	2651	13172	18944	0
林芝市	巴宜区	5421	4337	1429	0	32467	25975	8558	0
	工布江达县	736	2748	3872	0	2755	10285	14492	0
	米林县	809	768	1125	1643	4282	4065	5955	8697
	墨脱县	298	310	474	707	2339	2433	3720	5549
	波密县	907	949	1457	2176	5122	5360	8229	12289
	察隅县	815	855	1316	1965	5342	5604	8625	12879
	朗县	360	1320	1857	0	1530	5612	7895	0

2.5 建筑居住人口和价值估计

为了计算地震可能造成的人员伤亡,需要统计出各类型建筑中居住的人口.将各区县的总人口乘以该县特定类型建筑的比例,可计算出该县该类型建筑居住的总人口.各县各类型建筑的建筑人口如表 5 中所列.

为了计算地震造成的财产损失,需统计出各类型建筑的价值.本文只考虑地震造成的建筑结构破坏造成的损失.根据市场行情,本文取市区公建房、县城公建房、自建新房、老旧房和木结构的价值分别为每栋 30 万元、25 万元、20 万元、10 万元和 10 万元.统计出的各县各类型建筑的总价值如表 6 所示.

3 易损性模型

对第 2 节的四种建筑类型建立易损性模型.建立方法主要基于西藏及周边地区近年来地震灾害的震害统计资料,如 2010 年青海玉树地震 $M7.1$ 级地震(谭明等,2010;秦松涛等,2010;黄思凝等,2011;白国良等,2011),2015 年尼泊尔 $M_w7.8$ 级地震(高锦瑞等,2015;王晓青等,2015;曲哲和杨永强,2015;张昊宇等,2016;潘毅等,2017)、2017 年西藏米林 $M6.9$ 地震等.玉树地震、尼泊尔地震的典型震害图片如图 9 所示.



图 7 模式识别算法检验实例图

(a) 照片 1; (b) 照片 2; (c) 照片 3; (d) 照片 4.

Fig. 7 Examples of testing the pattern recognition algorithm

(a) Picture 1; (b) Picture 2; (c) Picture 3; (d) Picture 4.

表 6 各县各类型建筑总价值(单位:万元)

Table 6 Total value of each building type in each town (in 10⁴ RMB)

地市	区县	公建房	自建新房	老旧房	木结构
拉萨市	城关区	1048800	503380	61870	0
	堆龙德庆区	28600	68860	47530	0
	林周县	19425	68840	49130	0
	当雄县	14975	53660	38340	0
	尼木县	10700	38220	27300	0
	曲水县	14050	50360	35960	0
	达孜县	11400	40900	29210	0
	墨竹工卡县	16075	57580	41120	0
山南市	乃东区	206460	125340	26340	0
	扎囊县	13550	53860	38720	0
	贡嘎县	23550	70320	49530	0
	桑日县	8425	33400	24020	0
	琼结县	7725	30760	22100	0
	曲松县	11275	27680	19150	0
	措美县	6150	24420	17550	0
	洛扎县	8450	33620	24200	0
	加查县	10550	53920	37330	0
	隆子县	15050	59820	43020	0
错那县	7900	31440	22600	0	
浪卡子县	12550	49880	35870	0	
林芝市	巴宜区	162630	86740	14290	0
	工布江达县	18400	54960	38720	0
	米林县	20225	15360	11250	16430
	墨脱县	7450	6200	4740	7070
	波密县	22675	18980	14570	21760
	察隅县	20375	17100	13160	19650
	朗县	9000	26400	18570	0

根据以上资料,分别统计上述地震在不同地震动强度地区造成的不同建筑类型的损失率和人口伤亡率,如表 7 和表 8 所示. 绘出四种建筑类型的结构和人口易损性曲线如图 10 所示.

表 7 不同地震动强度造成的建筑损失率表

Table 7 Loss ratio of buildings destructed by different ground motions

PGA(g)	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
Public	0	0.02	0.14	0.32	0.48	0.56
Private	0	0.05	0.21	0.45	0.61	0.75
Old	0	0.11	0.51	0.66	0.81	0.88
Wood	0	0.03	0.15	0.33	0.48	0.58
标准差	0	0.32	0.29	0.35	0.18	0.14

表 8 不同地震动强度造成的不同建筑类型的人口伤亡率表

Table 8 Casualties from buildings by different ground motions

PGA(g)	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
Public	0	0.001	0.007	0.022	0.04	0.06
Private	0	0.008	0.04	0.07	0.11	0.125
Old	0	0.022	0.088	0.137	0.165	0.18
Wood	0	0.001	0.009	0.024	0.039	0.053
标准差	0	0.24	0.31	0.16	0.22	0.12



图 8 各抽样点航拍图

(a) 山南市乃东区; (b) 拉萨市城关区娘热乡; (c) 拉萨市曲水县才纳乡; (d) 林芝市鲁朗镇;
(e) 波密县岗堆村; (f) 米林县帮加村. 资料来源: 中国地震局地球物理研究所地震保险项目组).

Fig. 8 UAV aerial images of each sampling point

(a) City center of Shannan; (b) Niangre County; (c) Qushui Town; (d) Lulang County; (e) Gangdai Village, (f) Bangjia Village.
Data source: Earthquake Insurance Group of Institute of Geophysics, China Earthquake Administration.

同时, 本文将所建立的易损性模型与 Chaulagain 等(2015)对尼泊尔的地震危险性和地震风险评估研究中尼泊尔的几种建筑的易损性进行了比较. 选取的尼泊尔的建筑类型分别为混凝土、不设防砖混、土坯房、木结构. 四种建筑结构分别与尼泊尔的四种建筑的结构易损性曲线比较如图 11 所示. 由图可见, 西藏的公建房、自建新房的抗震性好于尼泊尔的混凝土和不设防砖混, 老旧房与土坯房易损性接近, 两地区的木结构易损性接近.

4 基于设定地震的损失估计

根据以上建立的承灾体规模模型和易损性模型, 估算西藏东南部一次地震可能造成的损失情况. 考虑模拟历史地震的重现. 图 12 为西藏东南部的断层分布和历史地震(截止 2012 年)情况. 其中曲松—

桑日断裂 1915 年发生了 7~7.5 级地震. 另外, 2017 年 11 月 18 日林芝米林发生了 6.9 级地震. 地震动模拟是生成地震动影响场的常用方法(孟庆筱和党学会, 2018). 模拟米林地震并产出震后损失分布图, 与实际震害比较, 能够在一定程度上验证本文承灾体模型和易损性模型的可靠性. 因此本文分别模拟了这两次地震的地震动分布, 并计算了西藏东南部可能遭受的人员伤亡分布.

4.1 模拟米林 6.9 级地震损失估计

设定地震使用的断层参数如表 9 所示. 发震断层设为一条与雅鲁藏布江断裂共轭的 NW-SE 走向断裂. 震级-破裂尺度的经验关系使用 Wells 和 Coppersmith (1994) 提出的关系, 地震动衰减关系使用俞言祥等(2013)对中国地震动参数区划图使用的衰减关系. 模拟出的地震动分布如图 13 所示.



图9 震害统计图片

(a) 尼泊尔地震后的西藏樟木,烈度 8 度; (b) 尼泊尔地震后的西藏吉隆,烈度 8 度; (c) 玉树地震后的结古镇,烈度 9 度; (d) 米林地震后的林芝市,烈度 7 度. 图片来源:高锦瑞等(2015);白国良等(2011);曲哲和杨永强(2015).

Fig. 9 Images of destruction in earthquake disasters in Tibet and surrounding areas in recent years

(a) Zhangmu after the 2015 Nepal Earthquake; (b) Jilong after the 2015 Nepal Earthquake; (c) Jiegu after the 2010 Yushu Earthquake; (d) Nyingchi after the 2017 Milin Earthquake. Data source: Gao et al. (2015); Bai et al. (2011); Qu and Yang (2015).

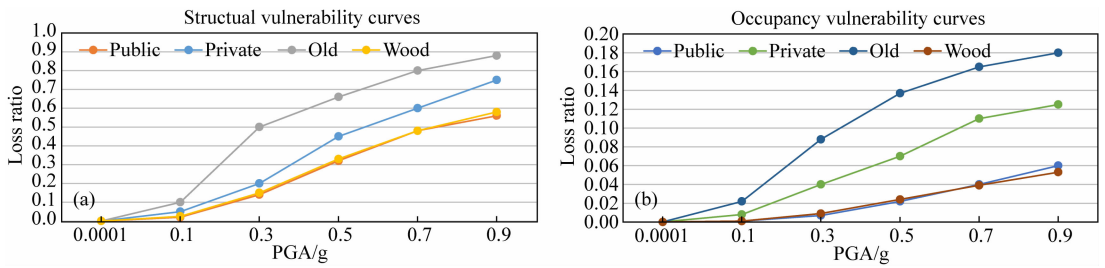


图 10 四种类型建筑的易损性曲线

(a) 结构易损性; (b) 人口易损性.

Fig. 10 Vulnerability curves of the four types of buildings

(a) Structural vulnerability; (b) Occupancy vulnerability.

表 9 模拟米林地震的断层参数

Table 9 Fault parameters of simulated Milin Earthquake

震级	震中位置	走向 (°)	倾角 (°)	滑动角 (°)	震源深度 (km)
6.9	95.02E, 29.75 N	120	45	60	20

根据地震动影响场、承灾体规模模型和易损性模型,计算曲松-桑日地震在西藏东南部各县造成的

建筑物轻度以上破坏数量和人员伤亡分布,如图 14—15 所示. 本文所述的轻度以上破坏指建筑物损失率超过 10%. 各县建筑物轻度以上破坏数量和人员伤亡如表 10 所示. 可见,模拟的米林地震可能造成的建筑物轻度以上破坏数量总数约 6600 间,人员伤亡总数约 50 人,其中林芝市损失最重.

2017 年米林 6.9 级地震的实际震害为房屋受

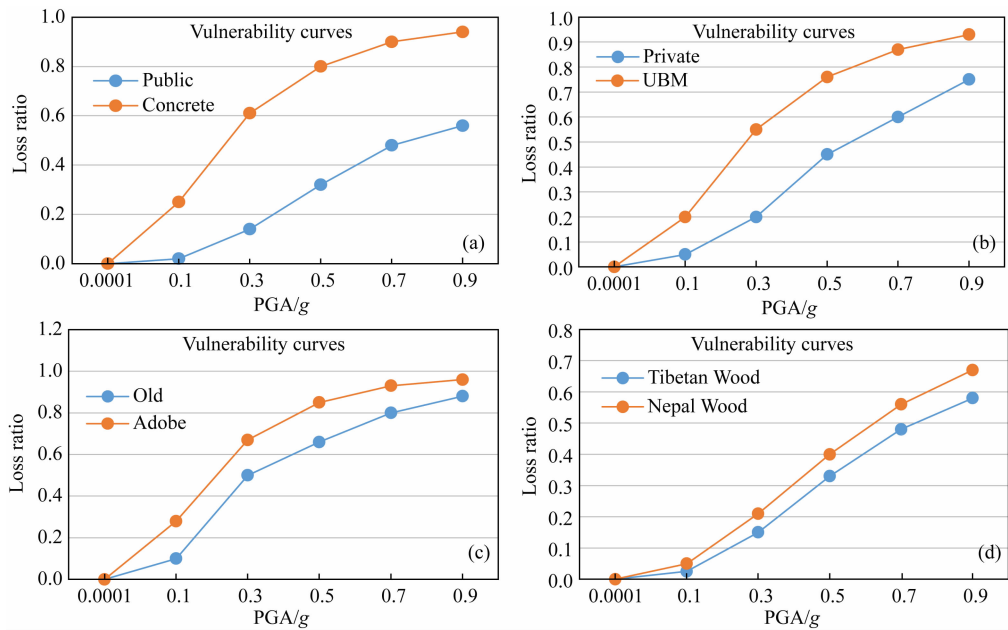


图 11 西藏与尼泊尔建筑结构易损性曲线的比较

- (a) 西藏公建房与尼泊尔混凝土结构易损性比较; (b) 西藏自建新房与尼泊尔不设防砖混易损性比较;
(c) 西藏老旧房与尼泊尔土坯房易损性比较; (d) 西藏木结构与尼泊尔木结构易损性比较。

Fig. 11 Vulnerability models comparison between buildings in Southeastern Tibet and Nepal

- (a) Public vs Concrete; (b) Private vs UBM; (c) Old vs Adobe; (d) Tibetan Wood vs Nepal Wood.

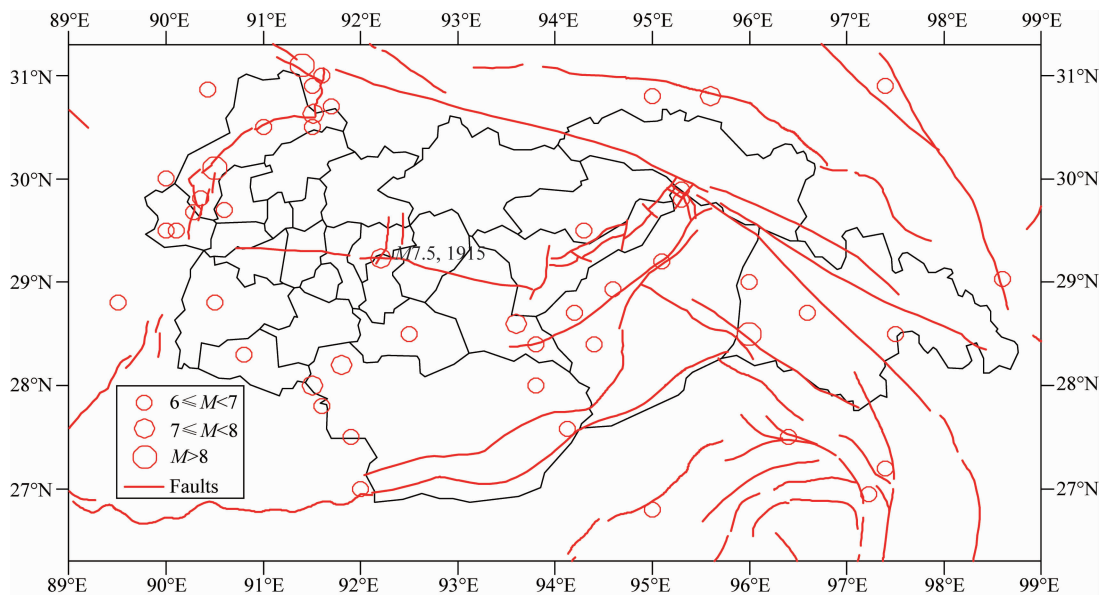


图 12 西藏东南部的断层分布和历史地震分布图(截止 2012 年)

Fig. 12 Faults and history earthquakes in Southeastern Tibet (Until 2012)

损 7800 余间, 2 人受伤。可见本文的建筑损失的模拟结果比实际震害偏轻, 人员伤亡的模拟结果比实际震害偏重, 但总体误差在合理范围内。

4.2 模拟曲松—桑日 M7.5 级地震损失估计

设定地震使用的断层参数如表 11 所示。发震断层设为曲松—桑日断裂。震级—破裂尺度的经验关系使用 Wells 和 Coppersmith (1994) 提出的关系, 地

震动衰减关系使用俞言祥等(2013)对中国地震动参数区划图使用的衰减关系。模拟出的地震动分布如图 16 所示。

根据地震动影响场、承灾体规模模型和易损性模型, 计算曲松—桑日地震在西藏东南部各县造成的人员伤亡分布, 如图 17 所示。人员伤亡最严重的 10 个县列表如表 12 所示。可见, 如果曲松—桑日

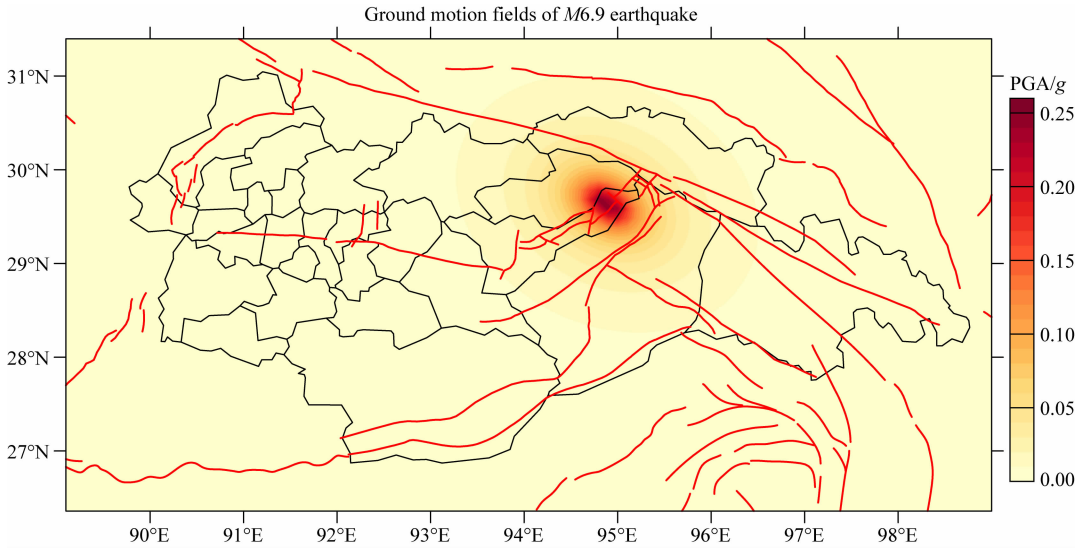


图 13 模拟米林 6.9 级地震的地震动影响场

Fig. 13 Ground motion field of simulated Milin M6.9 Earthquake

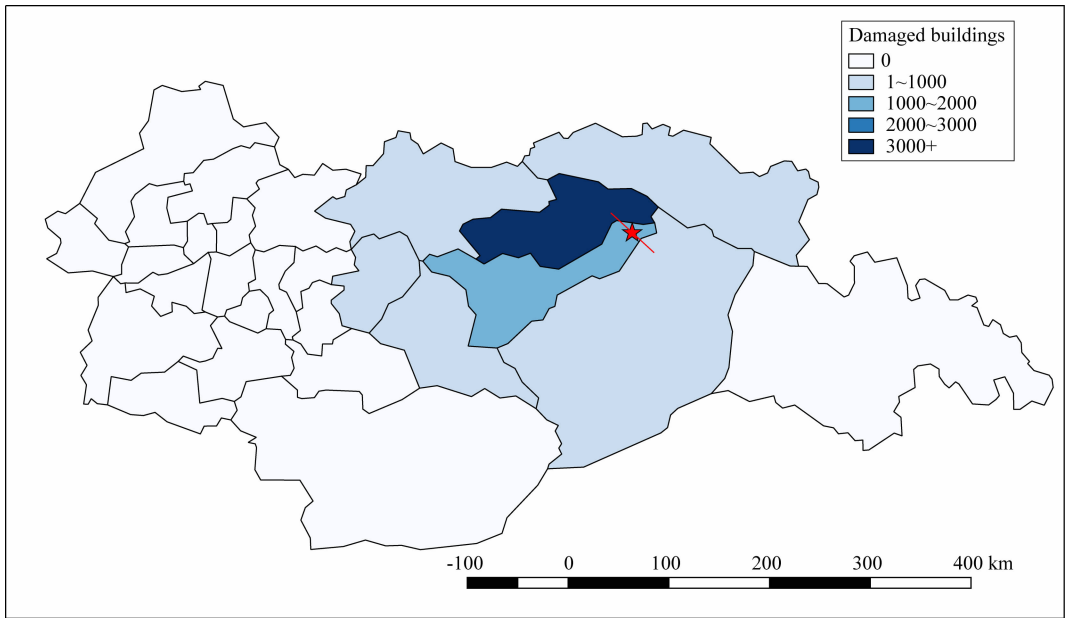


图 14 模拟米林 6.9 级地震在西藏东南部造成的建筑轻度以上受损数量分布

Fig. 14 Numbers of simulated damaged buildings worse than slight damage by M6.9 Milin Earthquake

表 10 模拟米林 6.9 级地震造成各县人员伤亡列表

Table 10 Simulated casualties in each town in Milin M6.9 Earthquake

名次	区县	轻度以上破坏房屋	伤亡
1	林芝	3352	30
2	米林	1407	15
3	工布江达	839	6
4	加查	573	4
5	波密	325	2
6	朗县	63	1
7	墨脱	42	1
合计		6601	59

表 11 模拟曲松—桑日地震的断层参数

Table 11 Fault parameters of the simulated Qusong-Sangri Earthquake

震级	震中位置	走向(°)	倾角(°)	滑动角(°)	震源深度(km)
7.5	92.2°E, 29.3°N	10	60	-60	5

发生 7.5 级地震,可能对拉萨、山南两市造成较重的人员伤亡,其中乃东区 and 曲松县最重,可能均超过 1500 人.

本文还研究了震源深度可能对地震损失的分布产生的影响.使用相同方法模拟了曲松—桑日 7.5 级地震震源深度分别为 10 km、15 km 和 20 km(其余

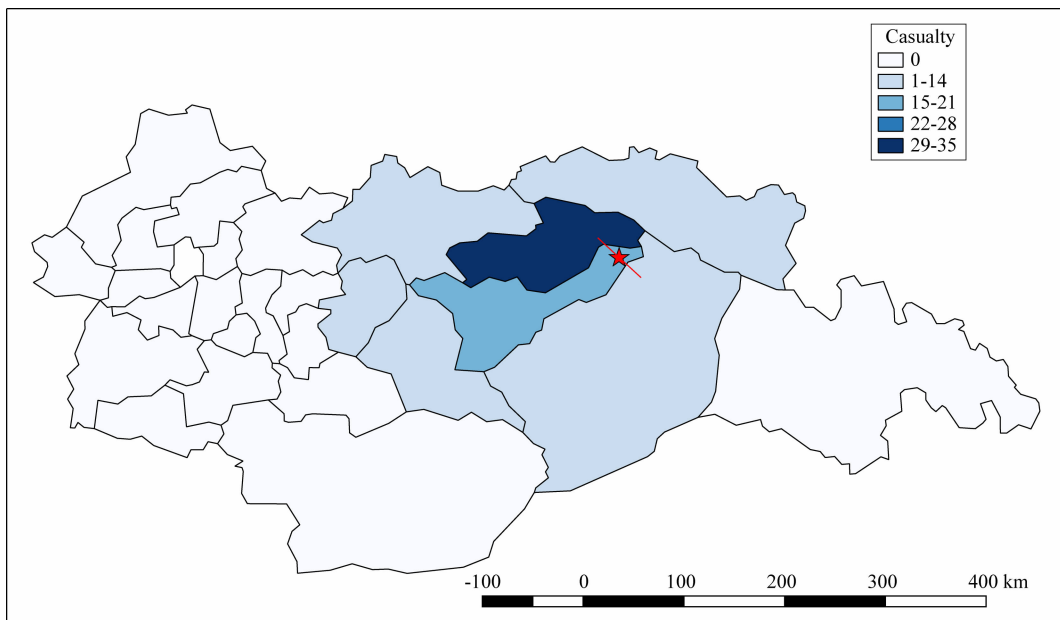


图 15 模拟米林 6.9 级地震在西藏东南部造成的人员伤亡分布

Fig. 15 Simulated casualties in Milin M6.9 Earthquake

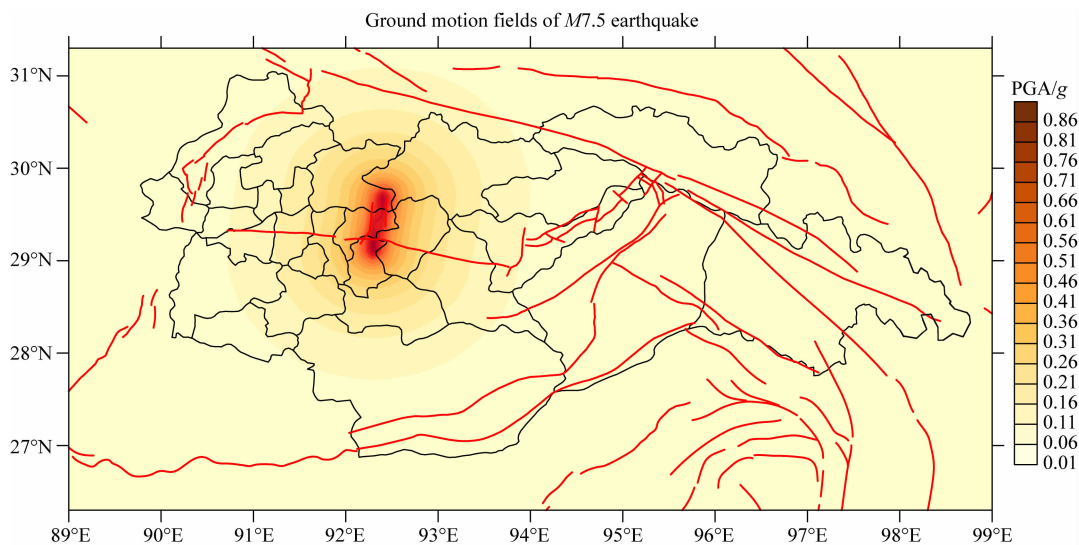


图 16 模拟曲松—桑日 7.5 级地震(震源深度 5 km)的地震动影响场

Fig. 16 Ground motion field of simulated Qusong-Sangri Earthquake (hypocenter depth is 5 km)

参数均不变)时在各县可能造成的伤亡情况,也列在表 12 中.由表 12 可看出,随着震源深度的增加,各地的可能伤亡数量均呈加速减少趋势.可见震源深度对大地震的损失分布有明显影响,随着震源深度的增加,可能造成的伤亡加速减少.

5 基于地震危险性的地震风险分析

本节基于西藏东南部的地震危险性资料估算未来 50 年可能遭受的地震财产损失分布.地震危险性的资料来源于《中国地震动参数区划图(GB18306-

表 12 模拟曲松—桑日 7.5 级地震造成人员伤亡最重的 10 个县列表

Table 12 Top ten towns with the most serious casualties in Qusong-Sangri M7.5 Earthquake

名次	区县	震源深度 5 km 的 伤亡	震源深度 10 km 的 伤亡	震源深度 15 km 的 伤亡	震源深度 20 km 的 伤亡
1	曲松	1922	1853	1684	1402
2	乃东	1897	1820	1642	1353
3	琼结	1393	1366	1243	1084
4	墨竹工卡	1379	1334	1225	1043
5	城关区	1108	1083	974	886
6	桑日	989	961	902	840
7	林周	893	869	793	718
8	措美	815	798	712	606
9	错那	657	632	550	443
10	堆龙德庆	475	465	424	355

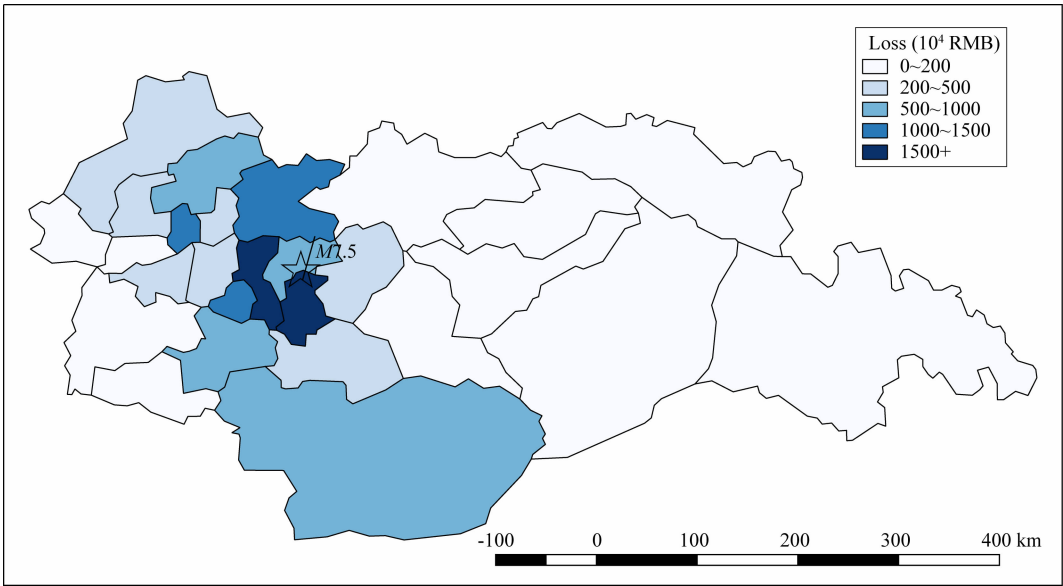


图 17 模拟曲松—桑日 7.5 级地震(震源深度 5 km)在西藏东南部造成的人员伤亡分布
 Fig. 17 Simulated casualties in Qusong-Sangri M7.5 Earthquake (hypocenter depth is 5 km)

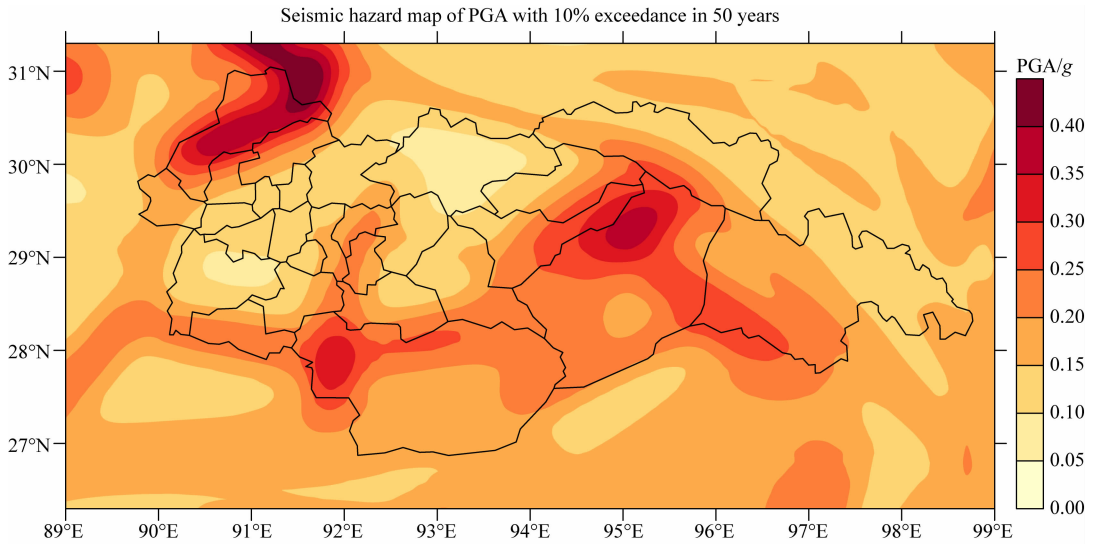


图 18 西藏东南部地震危险性图
 Fig. 18 Seismic hazard map of Southeastern Tibet

2015)》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会, 2015). 西藏东南部地震危险性图如图 18 所示.

使用基于蒙特卡洛的地震危险性计算方法 (Ebel and Kafka, 1999) 生成 50 年的随机地震目录, 对每次地震计算个各县的损失情况, 再计算出 50 年的总损失. 各县的 50 年超越概率 10% 的损失分布情况如图 19 所示. 经济损失风险最高的 10 个县的列表如表 13 所示. 可见, 未来 50 年财产损失风险最高的地区是拉萨市区、林芝市区和错那县, 超越概率 10% 的损失可能超过 6 亿元. 其中拉萨市区可能超过 20 亿元.

6 讨论与结论

本文使用西藏东南部的人口和建筑结构类型资料, 用估算的方法建立了人口和建筑的承灾体模型, 根据藏式建筑结构在历史地震中的震害资料建立了各类型建筑的结构易损性和人口易损性模型, 并对西藏东南部的地震人员伤亡和建筑经济损失风险进行了评估. 本文的研究中有以下几点值得讨论:

(1) 本文建立承灾体规模模型的过程中, 使用了诸多假设, 如假设全县人口均集中在县城、假设城乡的人口/户数比例相同等. 这些假设源自实地调研

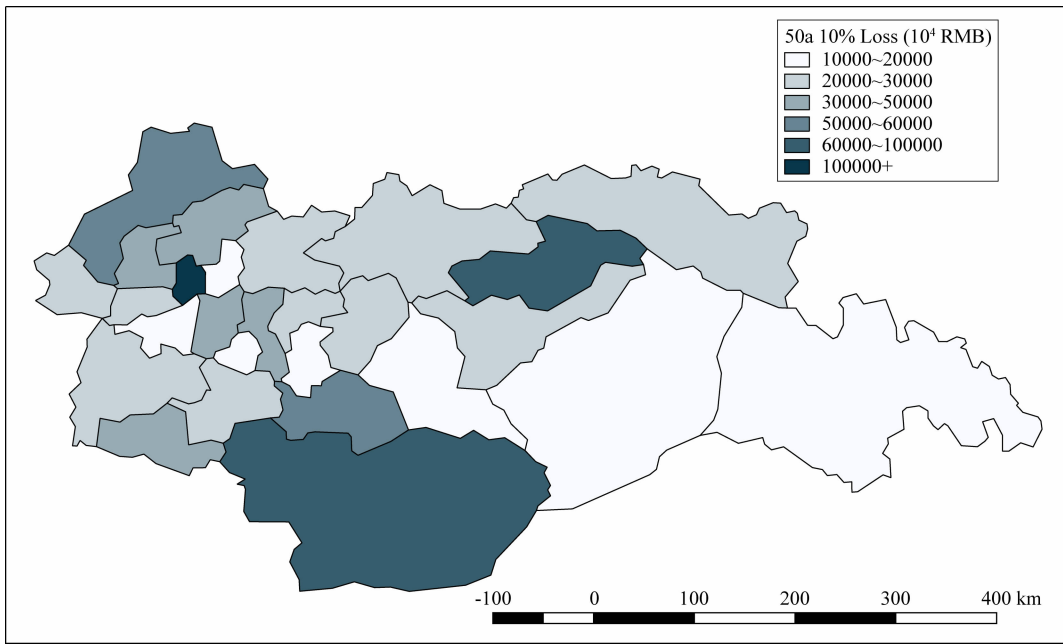


图 19 西藏东南部各县 50 年超越概率 10% 的财产损失分布图

Fig. 19 Building economic losses with 10% exceedance in 50 years in Southeastern Tibet

表 13 西藏东南部地震财产损失风险最高的 10 个县列表

Table 13 Top ten towns with most losses in 50 years in Southeastern Tibet

名次	区县	损失(万元)
1	城关区	203800
2	巴宜区	65610
3	错那	64410
4	当雄	53020
5	隆子	52300
6	扎囊	41020
7	洛扎	37530
8	乃东	36220
9	林周	32090
10	堆龙德庆	31900

的认识,多数假设符合当地特点和实际,类似方法可在有相同特点地区推广。

(2) 本文估算不同建筑类型居住人口的方法,类似于“费米问题”(周小奋,2011)使用的估算方法,虽存在误差,但总体是合理的,今后如能获取更精确的数据,能改进本文的结果。

(3) 本研究随机不确定性主要来自于易损性模型标准差,认知不确定性主要来自于建立承灾体规模模型过程中的假设、模式识别正确率的不确定性,以及建筑分类、抽样调查中认知不足造成的不确

定性。

(4) 西藏东南部近年来重大工程、基础设施建设快速发展,吸引了许多内地人支援建设,人口增长十分迅速,因此,承灾体模型正在不断变化,本文的研究希望能对认识该地区的地震风险现状、制定减灾对策提供参考。

(5) 本文的模式识别方案是利用建筑的外观识别建筑的模式,当外观特征不明显难以识别时(如木结构的密集栅格),需要人工辅助识别,本文的三维图像模式识别方法是否适用于更多地区更多类型的建筑,如何提高识别的正确率,还需要更多的研究和应用的检验和探索。

本文得出的主要结论有:

(1) 西藏东南部的公建房和木结构房抗震性能较好,自建新房有一定抗震能力,老旧房抗震性能较差。

(2) 本文的米林 6.9 级地震建筑损失模拟结果比实际震害偏轻,人员伤亡模拟结果比实际伤亡偏重,但总体误差在合理范围内,证明了本文模型的合理性。

(3) 若曲松—桑日发生 7.5 级地震,可能造成拉萨、山南两市较重的人员伤亡,其中曲松县和乃东区最重,可能均超过 1500 人。

(4) 震源深度对大地震的损失分布有明显影响,随着震源深度的增加,可能造成的伤亡呈加速减少趋势。

(5) 西藏东南部未来 50 年建筑地震风险最高的地区是拉萨市区、林芝市区和错那县,其中拉萨市区的建筑财产损失风险最高。

(6) 本文使用的三维图像模式识别方法在数秒内识别了 1000 余幢建筑物的模式特征,效率远高于人工识别,根据识别结果建立的承灾体模型结果模拟地震震害的检验,说明了该 AI 技术在对西藏东南部建筑图像分类与识别中的有效性。

致谢 本文资料收集及撰写过程中,得到了以下单位和个人的大力支持和无私帮助,在此特别表示感谢:西藏自治区政府、西藏地震局、拉萨市城关区娘热乡政府、娘热乡加尔西村支部、堆龙德庆区桑木村支部、山南市地震局、林芝市地震局。本文计算地震风险使用的是全球地震模型(GEM)基金会开发的 OpenQuake 软件(Silva et al., 2013, 2014)。2017 年西藏米林 $M_s 6.9$ 地震的震害资料来自网络和中国地震局地震应急救援队。

References

- Bai G L, Xue F, Xu Y Z. 2011. Seismic damage analysis and reduction measures of buildings in village and town in the Yushu Earthquake. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)* (in Chinese), 43(3): 309-315.
- Bartoli G, Betti M, Vignoli A. 2016. A numerical study on seismic risk assessment of historic masonry towers: a case study in San Gimignano. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(6): 1475-1518.
- Chaulagain H, Rodrigues H, Silva V, et al. 2015. Seismic risk assessment and hazard mapping in Nepal. *Natural Hazards*, 78(1): 583-602.
- China General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine (CGAQSIQ), China National Standardization Administration (CNSA). 2015. GB 18306-2015 Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China. Beijing: China Standard Press.
- Despotaki V, Burton H V, Schneider J, et al. 2017. "Back to Normal": Earthquake Recovery Modelling. California Seismic Safety Commission, CSSC Publication No. 2017-06.
- Ebel J E, Kafka A L. 1999. A Monte Carlo approach to seismic hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(4): 854-866
- Gao J R, Nima, Wen S L, et al. 2015. Characteristics of seismic damage by the Nepal $M_8.1$ earthquake in the Tibet area of China. *Technology for Earthquake Disaster Prevention* (in Chinese), 10(4): 961-968.
- Hou S W, Sun W F, Zheng X S. 2014. Overview of cloud detection methods in remote sensing images. *Space Electronic Technology* (in Chinese), 11(3): 68-76, 86.
- Huang S N, Yuan Y F, Meng Q L, et al. 2011. Study on seismic resistance of rural houses based on earthquake damage to buildings in Yushu earthquake. *World Earthquake Engineering* (in Chinese), 27(2): 77-82.
- Li X T. 2004. Application Research on remote sensing image classification based on geostatistics and ANN [Master's thesis] (in Chinese). Ji'nan: Shandong University of Science and Technology.
- Li Y, Chen Y, Dong X L, et al. 2012. Remote sensing image recognition algorithm based on neural network. *Geomatics & Spatial Information Technology* (in Chinese), 35(2): 156-158.
- Liu J F, Chen Y, Shi P J, et al. 2008. On seismic risk assessment in Mainland China. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)* (in Chinese), 44(5): 520-523.
- Lv D G, Yu X H. 2013. Application study of probabilistic seismic risk assessment based on analytical functions of seismic fragility. *Journal of Building Structures* (in Chinese), 34(10): 49-56.
- Meng Q X, Dang X H. 2018. Research on Current Crustal Deformation in the Jiuzhaigou Area under the Constraints of GPS Results by Discontinuous Contact Model. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 41(3): 390-397.
- Pan Y, Wang Z K, Shi S J, et al. 2017. Investigation and analysis on seismic damage of residential buildings along the highway from Kathmandu to Zhangmu in $M_s 8.1$ Gorkha Earthquake. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)* (in Chinese), 44(3): 35-44.
- Qin S T, Li Z M, Tan M, et al. 2010. Analysis of damage characteristics of the $M_7.1$ Yushu earthquake of Qinghai and the enlightenments. *Journal of Catastrophology* (in Chinese), 25(3): 65-70
- Qu Z, Yang Y Q. 2015. Seismic damages to owner-built dwellings in the 2015 earthquake sequence in Nepal. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics* (in Chinese), 35(4): 51-59.
- Salgado-Gálvez M A, Romero D Z, Velásquez C A, et al. 2016. Urban seismic risk index for Medellín, Colombia, based on probabilistic loss and casualties estimations. *Natural Hazards*, 80(3): 1995-2021, doi: 10.1007/s11069-015-2056-4.
- Silva V, Crowley H, Pagani M, et al. 2014. Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Natural Hazards*, 72(3): 1409-1427, doi: 10.1007/s11069-013-0618-x.
- State Council Census Committee (SCCC), National Bureau of Statistics Population and Employment Statistics Division (NBSPESD). 2010. Tabulation on the 2010 Population Census of the People's Republic of China (in Chinese). Beijing: China Statistics Press.
- Tan M, Li Y, Hu W H, et al. 2010. Investigation and analysis on seismic hazards on building construction of Yushu 7.1 Earthquake in

- Qinghai. *Inland Earthquake* (in Chinese), 24(2): 173-179.
- Wang Z T, Su J Y, Ma D H, et al. 2008. Research on risk zoning of urban seismic disasters. *China Safety Science Journal* (in Chinese), 18(9): 5-10.
- Wang X Q, Huang S S, Ding X, et al. 2015. Extraction and analysis of building damage caused by Nepal $M_s 8.1$ earthquake from remote sensing images. *Technology for Earthquake Disaster Prevention* (in Chinese), 10(3): 481-490.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974-1002.
- Wieland M, Pittore M, Parolai S, et al. 2015. Towards a cross-border exposure model for the Earthquake Model Central Asia. *Annals of Geophysics*, 58(1): S0106, doi: 10.4401/ag-6663.
- Yu Y X, Li S Y, Xiao L. 2013. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China. *Technology for Earthquake Disaster Prevention* (in Chinese), 8(1): 24-33.
- Zhang H Y, Wang T, Lin X C, et al. 2016. Seismic damages of RC frames in Nepal $M_s 8.1$ earthquake. *Engineering Mechanics* (in Chinese), 33(9): 59-68.
- Zhou X F. 2011. Three cases of Fermi problems. *Physics Bulletin* (in Chinese), (5): 85-88.
- 子技术, 11(3): 68-76, +86.
- 黄思凝, 袁一凡, 孟庆利, 等. 2011. 由玉树地震结构震害看村镇房屋抗震. *世界地震工程*, 27(2): 77-82.
- 李小涛. 2004. 地统计学和神经网络在遥感影像分类中的应用研究 [硕士学位论文]. 济南: 山东科技大学.
- 李燕, 陈莹, 董秀兰等. 2012. 基于神经网络的遥感图像识别算法. *测绘与空间地理信息*, 35(2): 156-158.
- 刘吉夫, 陈颀, 史培军等. 2008. 中国大陆地震风险分析模型研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 44(5): 520-523.
- 吕大刚, 于晓辉. 2013. 基于地震易损性解析函数的概率地震风险理论研究. *建筑结构学报*, 34(10): 49-56.
- 孟庆筱, 党学会. 2018. GPS约束下九寨沟地区断裂带现今运动速率的非连续接触模拟研究. *地震研究*, 41(3): 390-397.
- 潘毅, 王忠凯, 时胜杰等. 2017. 尼泊尔 8.1 级地震加德满都一樟木沿线民居震害调查与分析. *湖南大学学报(自然科学版)*, 44(3): 35-44.
- 秦松涛, 李智敏, 谭明等. 2010. 青海玉树 7.1 级地震震害特点分析及启示. *灾害学*, 25(3): 65-70.
- 曲哲, 杨永强. 2015. 尼泊尔自建民居在 2015 年地震序列中的震害. *地震工程与工程振动*, 35(4): 51-59.
- 谭明, 李洋, 胡伟华等. 2010. 青海玉树 7.1 级地震房屋建筑震害调查和分析. *内陆地震*, 24(2): 173-179.
- 王志涛, 苏经宇, 马东辉等. 2008. 城市地震灾害风险区划的研究. *中国安全科学学报*, 18(9): 5-10.
- 王晓青, 黄树松, 丁香等. 2015. 尼泊尔 8.1 级地震建筑物震害遥感提取与分析. *震灾防御技术*, 10(3): 481-490. 俞言祥, 李山有, 肖亮. 2013. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系. *震灾防御技术*, 8(1): 24-33.
- 张昊宇, 王涛, 林旭川等. 2016. 尼泊尔 8.1 级地震钢筋混凝土框架典型震害及讨论. *工程力学*, 33(9): 59-68.
- 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2015. GB 18306-2015 中国地震动参数区划图. 北京: 中国标准出版社.
- 周小奋. 2011. 费米问题三例. *物理通报*, 2011(5): 85-88.

(本文编辑 胡素芳)

附中文参考文献

- 白国良, 薛冯, 徐亚洲. 2011. 青海玉树地震村镇建筑震害分析及减灾措施. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 43(3): 309-315.
- 高锦瑞, 尼玛, 文升梁, 等. 2015. 尼泊尔 8.1 级地震对中国西藏地区造成的震害特征分析. *震灾防御技术*, 10(4): 961-968.
- 国务院人口普查办公室委员会, 国家统计局人口和就业统计司. 2010. 中国 2010 年人口普查资料. 北京: 中国统计出版社.
- 侯舒维, 孙文方, 郑小松. 2014. 遥感图像云检测方法综述. *空间电*