

文章编号: 1000-1301(2011)01-0114-10

玉树 7.1 级地震震后损失快速评估

徐国栋¹, 袁艺², 方伟华³, 史培军³

(1 防灾科技学院, 北京 101601; 2 民政部国家减灾中心, 北京 100053; 3 北京师范大学 减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 2010年4月14日7时49分, 在青海省玉树县发生里氏7.1级地震, 震中位于北纬33.2°、东经96.6°, 震源深度为14 km。在玉树地震发生后, 基于经验模型的震后损失快速评估方法, 用较少的信息和数据, 对玉树地震灾情进行了快速应急评估, 绘制了经验等震线图, 给出了房屋损失的初步评估结果, 与最终的损失调查统计结果相比, 震后损失快速评估结果的合理程度比较令人满意。经过汶川地震、玉树地震等多个地震的损失快速评估工作, 作者认为还需在地震断裂统计模型、地震动强度衰减关系模型、承灾体易损性模型、人口伤亡预测模型等多个方面进行改进和完善, 来提高基于经验模型的震后损失快速评估精度。

关键词: 玉树地震; 断层; 承灾体; 易损性; 损失快速评估

中图分类号: P315.957 文献标志码: A

Fast loss assessment of M 7.1 Yushu earthquake

XU Guodong¹, YUAN Y i², FANG W eihua³, SH I Peijun³

(1. Institute of Disaster Prevention Beijing 101601, China 2 National Disaster Reduction Center of China Ministry of Civil Affairs Beijing 100053 China 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management Beijing Normal University Beijing 100875, China)

Abstract On April 14, 2010 at 7:49 (am), an M 7.1 earthquake shook Yushu County, Qinghai Province. Its epicenter is located at latitude 33.2° N and longitude 96.6° E, with hypocenter around 14km deep. After Yushu earthquake, using the empirical model of the post-earthquake fast loss assessment with some statistical data and vulnerability curves of building rapid emergency assessments were implemented, including the experience isoseismic zoning map and preliminary loss assessment results. Compared with the final survey results, the accuracy of the loss assessment results was satisfactory. For further improving the assessment accuracy of the empirical models, it is also argued that some empirical model need be enhanced, including the fault rupture model, ground motion attenuation relationship model, vulnerability model of buildings, and the forecasting model of the casualties.

Keywords Yushu earthquake; fault disaster body; vulnerability; fast loss assessment

引言

2010年4月14日7时49分, 在青海省玉树县发生里氏7.1级地震, 震中位于北纬33.2°、东经96.6°, 震源深度为14 km。震后发生余震上千次, 其中最大一次为4月14日9时25分发生的6.3级地震。截至4

收稿日期: 2010-05-23 修订日期: 2010-09-29

基金项目: 国家科技支撑计划(2008BAK49B04, 2006BAD20B03)

作者简介: 徐国栋(1974-), 男, 博士, 主要从事结构抗震减灾方面的研究。Email: 23451070@qq.com

通讯作者: 方伟华(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事灾害风险管理方面的研究。Email: weihua_fang@bnu.edu.cn

月29日,地震导致人员死亡2220人,失踪70人,伤病12146人,其中重伤1434人。地震发生后,中国政府迅速派出救援力量开展震后救援;有关减灾部门也迅速开展了地震灾情综合研判,利用卫星遥感、无人机航拍、地震现场调查、经验模型分析评估等方法,进行了震后损失快速评估,提供了大量损失评估图件和灾情数据作为震后救援和恢复重建的决策依据。

玉树地震灾区有以下特点:(1)地震发生在生存环境恶劣、经济相对落后的三江源区,重灾区的平均海拔约4000多米,高原反应给救援增加了不少难度;(2)玉树地区是少数民族集中的地区,其中藏族占总人口的97%;(3)玉树地区的抗震设防标准不高,设计基本地震峰值加速度值为0.10g~0.15g(七度设防),而这次地震的最大烈度达九度;(4)玉树地区是贫困地区,大部分是土木结构的房子,或者石块搭起来的房子,抗震性能普遍较差。(5)地震发生时间为北京时间上午7点49分,在这个时间当地大部分人处于室内。(6)玉树地区的产业较单一,交通不便,建筑材料基本靠外运,因此建筑的单位造价较一般地区高许多,加大了恢复重建的难度。

从汶川地震、玉树地震等震后损失评估的情况和经验来看,震后损失评估可分为三个阶段:(1)震后损失快速应急评估阶段。破坏性地震发生后,利用较少的信息和数据量(如地震参数、活动构造、地形地貌、人口分布、住房等相关数据),采用基于经验模型的震后损失评估方法,快速给出经验等震线图和地震损失评估初步结果。(2)震后灾情综合研判阶段。综合利用卫星遥感、航拍、现场调查等信息和数据,绘制等震线图,并按灾情程度进行分区,如极重灾区、重灾区、一般灾区,给出修正的地震损失评估结果。(3)震后损失综合评估阶段。对灾情程度、空间分布、定量损失大小等进行详细调查、统计和汇总,形成断层破裂程度分区、等震线、灾情程度分区、地震损失综合评估等工作报告。

在玉树地震发生后,作者用基于经验模型的震后损失评估方法,对玉树地震灾情进行了快速应急评估,绘制了经验等震线图,给出了房屋损失的初步评估结果,与最终的损失调查统计结果相比,震后损失快速评估结果的合理程度比较令人满意。

1 基于经验模型的地震损失评估技术流程

综合汶川地震、玉树地震等多个地震震后损失评估的经验,作者进一步完善了基于经验模型的地震损失评估技术流程(如图1所示):

(1)接收地震局公布的地震参数(震级和震中位置),根据震级大小、震中附近活动构造空间展布特点和地震地质条件,选择点震源模型或线震源模型。

如果震级大于6.5,震源深度在33km以内,震中附近覆盖层厚度较薄,可以选用线震源模型,计算断层破裂长度,结合地震地质和活动构造,确定断层破裂的空间展布特点;否则可选用点震源模型,并依据震中附近断层空间展布的方向来确定地震动强度空间分布的长短轴方向。

(2)依据震源模型,选用合理的地震动强度衰减关系模型,编绘经验峰值加速度或烈度等震线图。

(3)根据经验地震动参数或烈度分区图,结合本地区的土地利用分区图和社会经济统计数据(如人口数量及组成、人均住房面积、住房不同结构类型抽样统计数据等),快速确定不同地震动参数分区或烈度分区的暴露度数据,如受灾面积、人口数量、室内人口数量及百分比、不同结构类型的住房数量等。

(4)根据本地区的历史震害统计数据或类似地区的震害统计数据,结合当地社会经济发展水平、建筑抗震设防水准、建造年代以及地区特点,给出本地区不同住房类型的易损性曲线。

(5)根据当地不同类型住房的单位造价及室内财产,采用相应的损失评估模型,快速计算出不同地震动参数分区或烈度分区的面积、人口数量等暴露度数据,结合承灾体易损性和房屋单位造价、室内财产等,评估震后损失情况,如不同破坏程度的房屋数量、房屋倒塌数量、震后人员伤亡数量、转移安置人数、直接经济损失等。

这个技术流程在多个地震的损失快速评估中进行了应用,在实际工作中也进行了不断的改进和完善,基本上能够满足震后损失快速评估工作的需要。

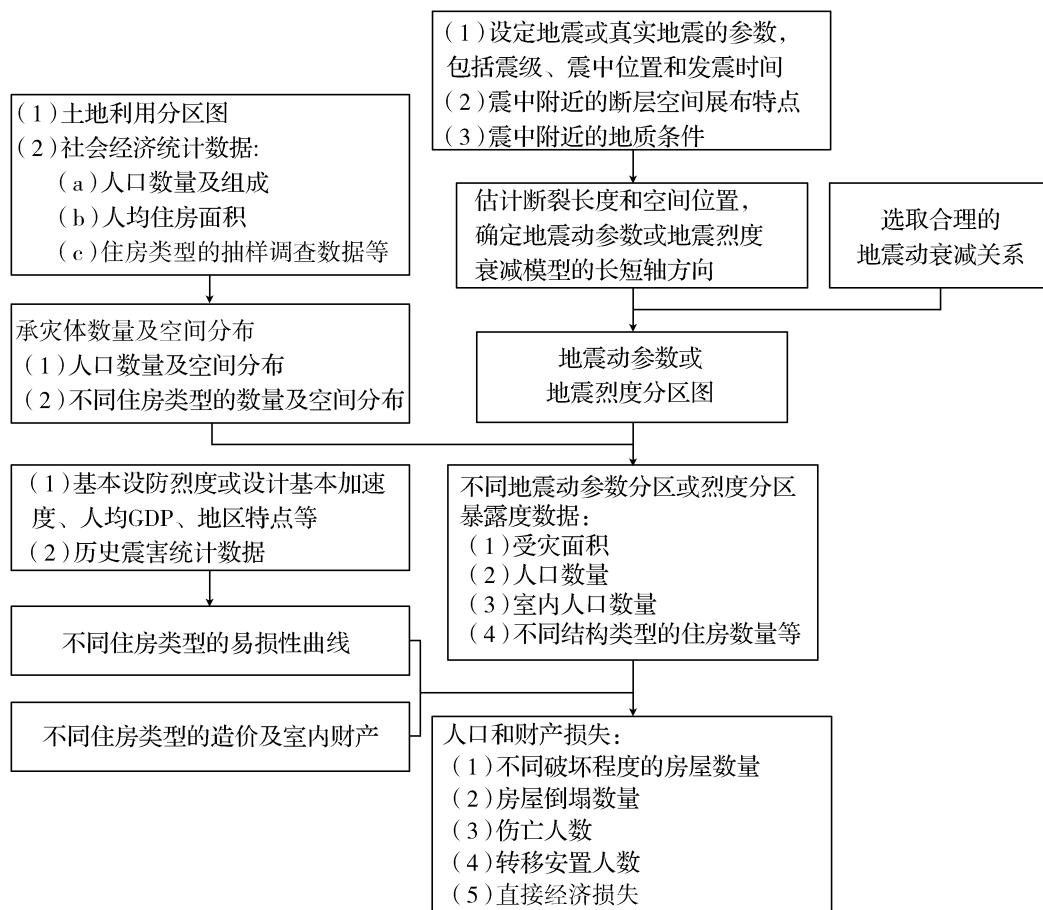


图 1 地震震后损失快速评估技术流程

Fig 1 The postearthquake fast loss assessment flow

2 经验等震线图的编制

目前经验等震线空间分布模型可分为: (1)基于点源的椭圆模型; (2)基于断层破裂线的等断层距模型。在工作中采用哪种等震线模型要根据震级大小、震源深度、震中区覆盖层厚度、活动构造等进行综合判定。如震级较大(6.5级以上)、震源深度浅、覆盖层厚度小、震中有明显的活动构造等,可采用基于断层破裂线的等断层距模型来编制等震线图;否则可采用基于点源的椭圆衰减模型来编制等震线图。

(1) 地震参数和地震活动构造

玉树7.1级地震发生后,中国地震局第一次发布地震参数如下:发震时间 2010年 4月 14日 7时 49分(北京时间);发震地点青海玉树州玉树县(北纬 33.1°、东经 96.7°);震级为 7.1;震源深度为 33 km。随着地震观测数据的积累,中国地震局对玉树 7.1 级地震参数进行了修正:震中位置调整为北纬 33.2°、东经 96.6°;震源深度调整为 14 km。

根据《中国活动构造图》(邓起来, 2007),玉树地震发生在巴颜喀拉地块的边缘地区,震源位置在甘孜—玉树断裂带(走向北西)上,如图 2 所示。

根据中国地形图,震中位置的海拔高度在 4 000 m 以上,周围是山地,可以判断震中区域的覆盖层厚度较小。

由于震级比较大,震源较浅,覆盖层较薄,可以判断在地表附近会出现较明显的断层错动(或地面破裂线)。

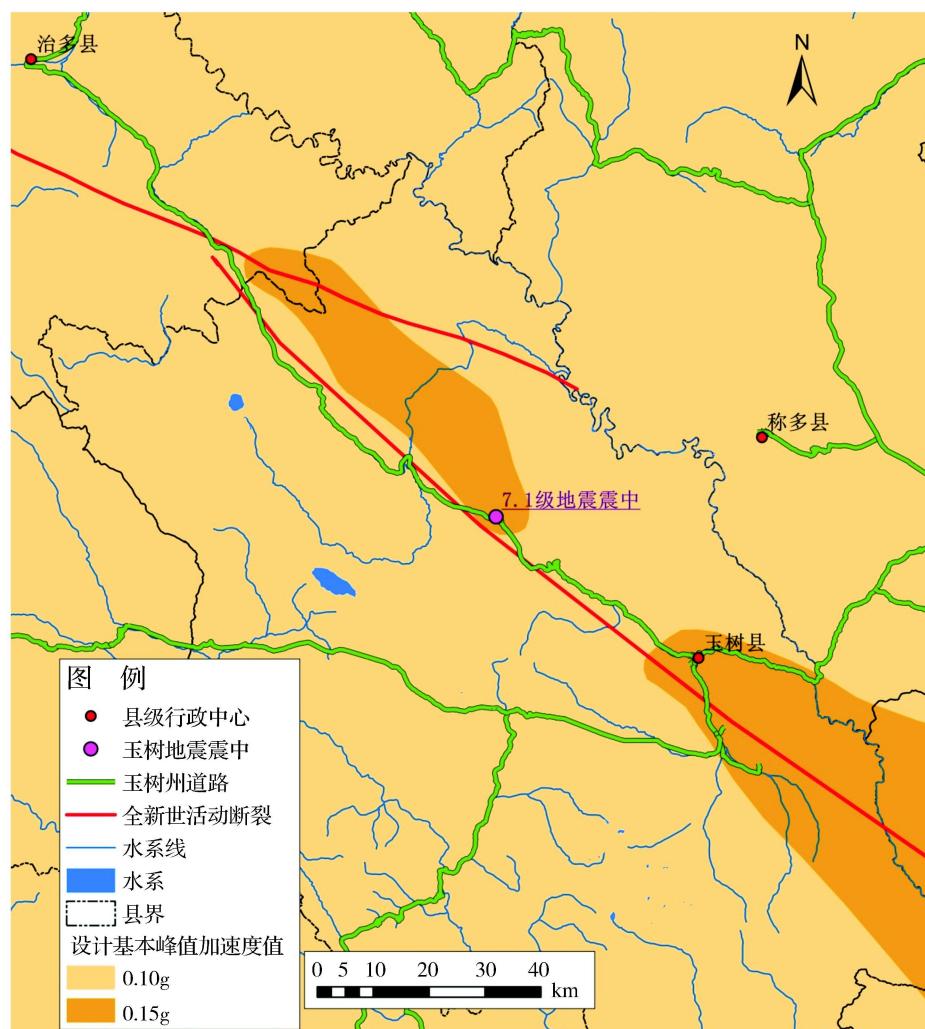


图 2 玉树地震灾区的活动构造和设计基本地震动峰值加速度

Fig 2 The Design basic PGA values and the fault in Yushu-E arhquake d isaster districts

(2) 断层破裂长度估算

目前对于强震引起的断层破裂长度(或地面破裂长度)与震级的关系,国内外已给出了大量的经验统计模型,一般认为强震引起的破裂长度的对数与震级大小成线性相关关系。这里采用 Wells(1994)给出的考虑断层错动类型的矩震级 M_w 破裂长度 L 的统计关系:

$$\lg(L) = a + bM_w \quad (1)$$

其中 a , b 是回归系数,取值见表 1。这个统计模型中包含如下假设:只要断层破裂在空间上不受限制,那么震中两侧断层的破裂长度是相同的。因此断层破裂长度及空间展布情况还需根据震中附近断层的空间特征进行调整,或直接采用实地调查的断层破裂空间展布。

表 1 断层破裂长度经验公式的回归系数 (Wells 1994)

Table 1 the regressive coefficients of the fault nupture length relationshp(Wells 1994)

破裂类型	断层错动类型	a	b
表面破裂长度	走滑	-3.55	0.74
	逆冲	-2.86	0.63
	所有	-3.22	0.69
地下破裂长度	走滑	-2.57	0.62
	逆冲	-2.42	0.58
	所有	-2.44	0.59

需要说明的是,当里氏震级小于7.25时,没有明显的震级饱和效应,里氏震级和矩震级基本相同,在评估玉树地震断层破裂长度的时候可近似用里氏震级代替矩震级。

(3) 地震动强度衰减关系

对于基于点源的椭圆形地震动强度衰减关系,国内外有多种经验衰减模型;而对于基于破裂线的等断层距地震动强度衰减关系,国内还没有较准确的衰减模型。

通过对多种衰减关系的比较,这里用中国西部的烈度衰减关系(汪素云等,2000)来进行烈度区评估,衰减关系模型见式(2)。

$$\begin{cases} I_a = 5.253 + 1.398M - 4.1641g(R + 26) \\ I_b = 2.019 + 1.398M - 2.9431g(R + 8) \end{cases} \quad \sigma = 0.632 \quad (2)$$

这里 M 为震级, R 为震中距, I_a 和 I_b 分别为长短轴方向上的地震烈度。

需要说明的是:(1)由于玉树7.1级地震过程有明显的断层破裂,这里用短轴半径来估算不同地震动强度的断层距。(2)在式(2)中的地震动强度是用烈度来描述,本文中则是用峰值加速度值来表达地震动强度,在用式(2)进行计算时,利用烈度和峰值加速度的近似关系[0.40g(9度)、0.30g(8.5度)、0.20g(8度)、0.15g(7.5度)、0.10g(7度)、0.05g(6度)]来完成不同峰值加速度值相应断层距的计算。

(4) 经验等震线图

根据中国地震局发布的地震参数,作者先后给出多个版本的等震线模型,这里只介绍最初版本的等震线和最后版本的等震线。

根据中国地震局最早给出的地震参数(2010年4月14日),用Wells给出的断层破裂长度计算模型,并假设震中位于断层破裂线中点,断层破裂总长度约为40km;汪素云地震动衰减关系模型(式(2)中短轴方向上的烈度衰减公式),辅以经验判断,确定峰值加速度为0.40g、0.30g、0.20g、0.15g、0.10g和0.05g等震线的断层距分别为2.5、10、20、40、80km,初始版本的峰值加速度经验等值线如图3所示。根据遥感和航片资料、实地调查反馈等,对经验等震线还进行过一些调整和修正。

在中国地震局修改地震参数(2010年4月18日)之后,考虑震源较浅,结合陈运泰研究小组给出的地震破裂过程,断层破裂总长度修正为50km,由于发震断层在震源西北方向有较明显的转折,断层破裂在空间上受到了限制,震源西北侧断层部分的破裂长度定为10km,震源东南部分的破裂长度为40km;用地震动衰减关系模型(式2中短轴方向上的烈度值),辅以经验判断,确定峰值加速度为0.40g、0.30g、0.20g、0.15g、0.10g和0.05g的等震线断层距分别为2.4、8、20、40、90km。修正的最后版本的峰值加速度经验等值线如图4所示。

3 房屋类型及易损性

按照《地震现场工作第4部分:灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—2005),将住宅房屋的破坏程度分为五种:基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏。

按房屋抗震能力,将房屋类型分为A类(主要为钢筋混凝土结构)、B类(主要为砖混结构)、C类(主要为砖木结构)、D类(主要为生土结构和块石干砌房屋)。根据2005年全国1%人口抽样调查数据,结合当地实际情况,确定A、B、C、D类房屋的比例,如表2所示。

按照中国地震动参数区划图,震中位置的设计基本加速度值为0.10g,玉树县城的设计基本加速度值为0.15g。考虑当地的抗震设防水平,四种类型房屋的不同地震动峰值加速度作用下的易损性曲线如图5~图8所示。

表2 地震影响区范围城镇和乡村的不同类型房屋比例

Table 2 The percentage of building types in the urban and rural districts respectively

土地利用	A类房屋	B类房屋	C类房屋	D类房屋	%
城镇	10	15	50	25	
乡村	1.2	1.8	52.9	44.1	

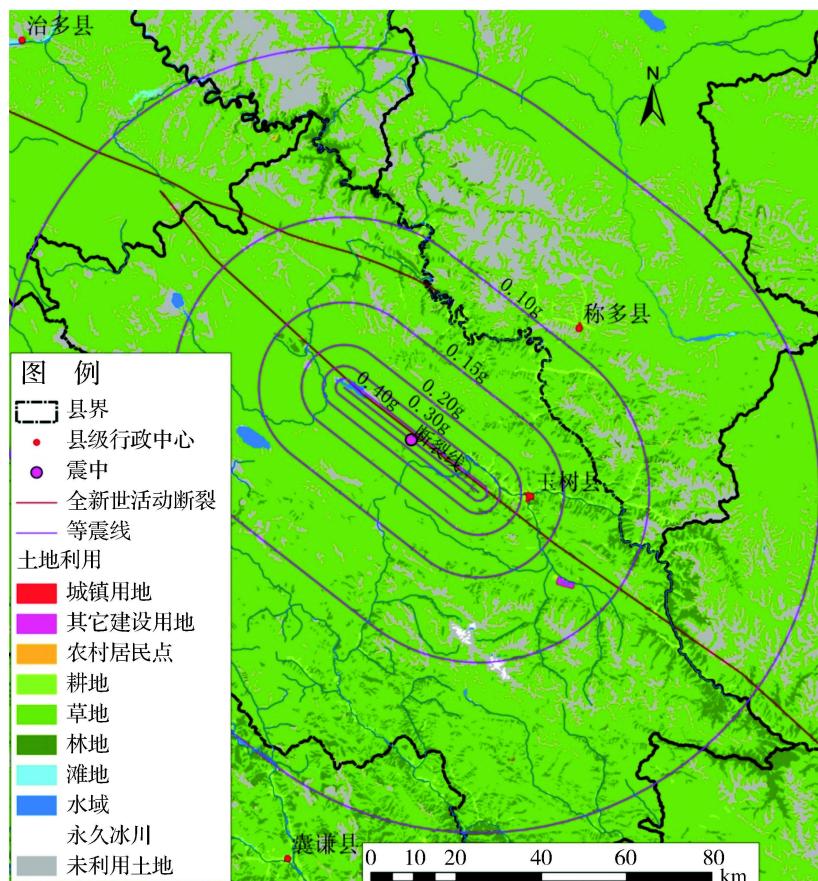


图3 最初的经验等震线图(2010年4月14日12点发布)

Fig. 3 The preliminary empirical isoseismal line by PGA (issued at 12:00 On April 14)

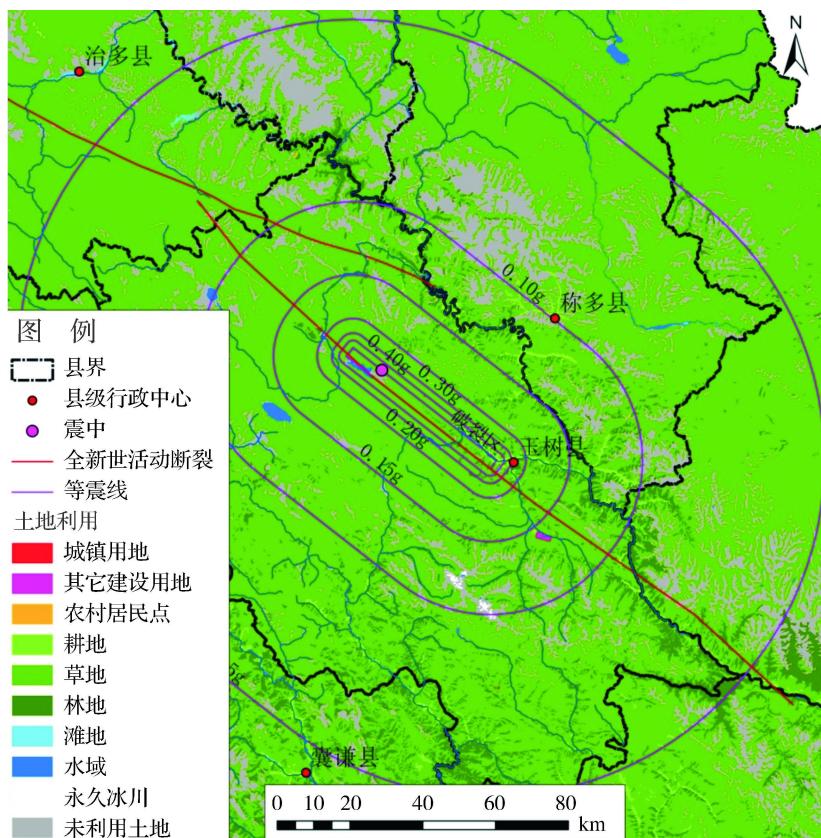


图4 最后修正的经验等震线图(2010年4月18日14点发布)

Fig. 4 The final empirical isoseismal line by PGA (issued at 14:00 On April 18)

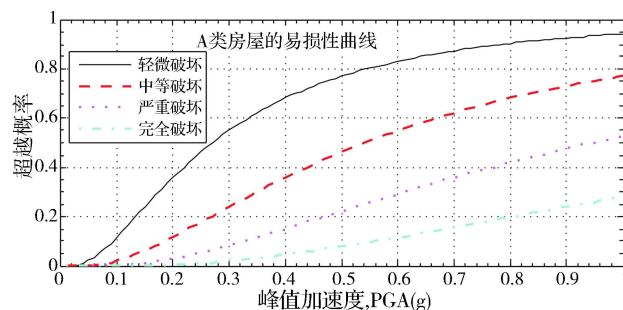


图 5 A类房屋的易损性曲线

Fig 5 The vulnerability curves of A-type buildings

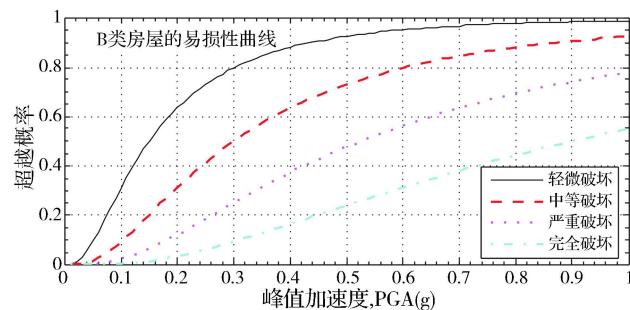


图 6 B类房屋的易损性曲线

Fig 6 The vulnerability curves of B-type buildings

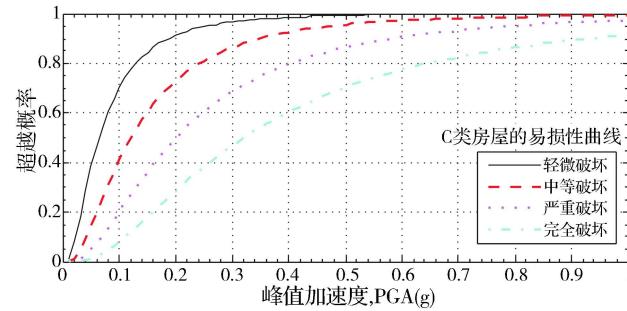


图 7 C类房屋的易损性曲线

Fig 7 The vulnerability curves of C-type buildings

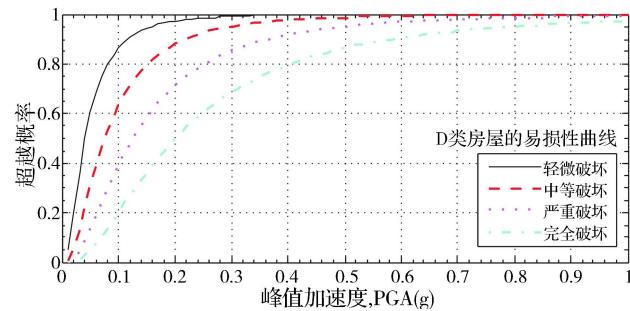


图 8 D类房屋的易损性曲线

Fig 8 The vulnerability curves of D-type buildings

4 地震损失评估

地震损失评估包括多个内容,如房屋破坏状态及数量、基础设施破坏及损失、人员伤亡数量、无家可归人数、直接经济损失等。由于模型和数据有限,本文只对住房破坏状态、数量及其经济损失、无家可归人数进行评估;评估过程分三步:(1)收集人口和社会经济数据,结合土地利用数据确定人口、住房的空间分布;(2)进行承灾体暴露度评估,本文评估了土地、人口和房屋等承灾体的暴露度;(3)根据承灾体暴露度的评估结果,结合房屋易损性来确定相应的损失情况。

4.1 人口和社会经济数据

这里采用2006年人口统计数据。考虑到在玉树县的流动人口较多,仅结古镇就有约10万人左右,玉树县的人口数定为150万人,其中乡村人口为5万人。而人均住房面积是根据2005年全国1%人口抽样调查数据,并考虑经济发展情况进行合理推测。本文中所用的社会人口经济数据见表3所示。

表 3 人口和经济数据

Table 3 The population and economy data

所属省份	县级名称	年末总人口(万人)	城镇人口(万人)	乡村人口(万人)	城镇人均住房面积(㎡)	乡村人均住房面积(㎡)
青海省	玉树县	15.0	10.0	5.0	23.0	28.0
青海省	称多县	5.0	1.0	4.0	23.0	28.0
青海省	囊谦县	7.2	1.2	6.0	23.0	28.0
青海省	杂多县	5.0	1.0	4.0	23.0	28.0
青海省	治多县	3.2	0.2	3.0	23.0	28.0
青海省	曲麻莱县	3.0	1.0	2.0	23.0	28.0
西藏	生达县	3.0	0.3	2.7	23.0	28.0
四川省	石渠县	6.5	0.4	6.1	23.0	28.0

注:考虑到结古镇有约10万流动人口,玉树县的总人口定为150万。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

4.2 承灾体暴露度评估

不同峰值加速度分区的土地面积见表4所示,不同峰值加速度分区下的人口数量见表5所示。

表4 土地暴露度

Table 4 The exposure land area in different PGA zones of Yushu earthquake

地震动强度	0.40g(9度)	0.30g(8度)	0.20g(8度)	0.15g(7度)	0.10g(7度)	0.05g(6度)
土地面积(km ²)	375	249	575	2328	5889	25711

由表5可知,地震动强度在0.20g及以上的区域(即八度及以上区),人口数约为1039万人;地震动强度在0.10g~0.15g(即7度区)的区域人口数约为302万人;地震动强度在0.05g(即六度区)的区域人口数约为7.51万人。地震动强度达六度及六度以上的区域面积达35127km²,影响人口约为209万人。

表5 人口暴露度

Table 5 The exposure population in different PGA zones of Yushu earthquake

省名	县名	不同峰值加速度分区下的人口数量(人)					
		≥0.40g	0.30g	0.20g	0.15g	0.10g	0.05g
青海省	玉树县	2079	39787	62014	8270	15613	20767
	称多县					6209	23330
	治多县						1674
	杂多县						3413
	曲麻莱县						874
西藏自治区	囊谦县						12426
	生达县						1897
四川省	石渠县					100	10752
	小计	2079	39787	62014	8270	21922	75133

4.3 住房直接经济损失评估

建筑物的不同破坏程度有相应的损失比。根据《地震现场工作第4部分:灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—2005)和现场损失情况调查,本文中所采用的不同破坏状态下的损失比如表6所示。

考虑到玉树地震灾区建筑材料主要依靠外地输入和地处高原区,房屋单位造价较高,因此A类(钢筋混凝土结构)房屋的单位造价按2200元/m²计算,B类(砖混结构)房屋的单位造价按1600元/m²计算,C类(砖木结构)房屋的单位造价按1200元/m²计算,D类(生土结构)民房的单位造价按700元/m²计算。

根据本文给出的玉树地震经验地震动强度分区、房屋类型及比例、房屋易损性曲线、损失比、单位造价等,可以计算住房不同破坏程度的数量和住房直接经济损失,计算结果如表7所示。

表6 住宅建筑不同破坏程度的损失比平均值

Table 6 The mean of loss ratio corresponding to different damage states of buildings

建筑破坏程度	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏
损失比平均值	0.00	0.15	0.40	0.70	1.00

4.4 无家可归(灾后安置)人员

无家可归人员的安置是灾后应急救援阶段以及恢复重建阶段的主要工作之一,特别是对于较大的地震灾害,需要快速评估无家可归人员的数量,为震后应急安置和恢复重建提供基础数据。在估计无家可归人数时,把毁坏、严重破坏房屋的居住者与中等破坏房屋居住者的一半定为无家可归人员,其它居民不属无家可归。无家可归人数可用下式估计(李树桢,1993;尹之潜,2004):

$$M_n = \frac{A_5 + A_4 + A_3/2}{A_m} - M_d \quad (3)$$

其中, M_n 为无家可归人数; A_3 、 A_4 、 A_5 分别对应中等、严重、完全破坏的住宅面积; A_m 为人均住房面积; M_d 为地震死亡人数。对无家可归人数的估计如表 7 所示。

由表 7 给出的玉树地震损失评估结果, 仅住房破坏造成的损失就达到了 25 亿元人民币; 完全破坏的住房约为 251.17 万 m^2 , 如按人均 25 m^2 住房面积计算, 约 10 万人受倒房威胁; 考虑到灾区大量的砌体类房屋易倒塌, 如完全破坏房屋有 30% 倒塌率, 生命受威胁的人数约为 30 万人, 估计最终死亡人数在数千人左右。

表 7 住房破坏程度、经济损失、无家可归人数评估结果

Table 7 The assessment results of damage and economic loss of residential buildings and homeless population

所属省份	县级名称	住房总损失 (万元)	住房不同破坏程度的数量(万 m^2)					无家可归人数 (人)
			基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏	
青海省	玉树县	197 163.481 6	12 743 1	29 863 9	47. 023 0	61. 231 2	215 031 6	123 380
	称多县	26 785.444 7	9 317 0	16 411 8	18. 164 5	15. 375 9	18 473 8	16 239
	囊谦县	11 108.643 4	4 750 8	7 988 9	8 372 1	6. 659 3	7 024 3	638 2
	杂多县	3 051.298 8	1 304 9	2 194 4	2 299 6	1. 829 2	1 929 4	1 753
	治多县	1 497.802 5	0 639 9	1 076 2	1 128 1	0. 897 6	0 947 6	861
西藏自治区	曲麻莱县	781.160 0	0 334 1	0 561 8	0 588 7	0. 468 3	0 494 0	449
	生达县	1 695.691 9	0 731 4	1 221 3	1 276 6	1. 013 9	1 068 0	971
四川省	石渠县	9 732.863 1	4 097 8	6 945 1	7 309 1	5. 836 0	6 199 5	5 604
小计		251 816.386 0	33 918 9	66 263 4	86 161 6	93. 311 4	251 168 2	155 639

5 结论

本文中所用的损失评估技术流程和模型在汶川地震后进行了改进和提高, 并在 2008 年后中国多个地震的损失评估中进行了应用和修正。在玉树地震发生后, 作者采用这种经验模型分析流程及方法, 给出了较为合理地经验地震动强度分区, 给出了不同地震动强度分区下的人口数量和土地面积; 依据玉树地震灾区房屋实际情况, 给出了不同类型房屋的易损性曲线; 综合经验地震动强度分区、承灾体暴露度(在不同地震动强度分区内承灾体的数量)和易损性曲线, 进行了不同破坏状态房屋数量、房屋直接经济损失、无家可归人数、生命安全受威胁人数等损失指标的快速评估, 评估主要结果为: 住房损失达 25 亿元人民币; 约 251 万 m^2 的房屋处于完全破坏状态; 震后安置人口达 15.6 万人; 约 3 万人的生命安全受到威胁, 最终的死亡人口可能达数千人。

基于经验模型的震后损失快速应急评估, 所需信息和数据少, 模型及参数需在实际地震灾情评估工作中进行不断改进和修正, 以进一步提高损失评估结果的精度和合理性。根据汶川地震和玉树地震损失快速评估的经验积累, 基于经验模型的震后损失快速应急评估还需要在以下方面进行改进:

(1) 不同震源模型的经验地震动强度衰减规律。不同的震源模型有不同的地震动强度经验衰减关系, 研究建立更加合理准确的不同震源类型的经验衰减关系模型, 尤其是大地震的断层破裂和地面破裂的经验统计模型、地震动强度衰减模型是震后损失快速评估准确程度的保障。

(2) 根据当地的设计基本烈度、房屋特点、经济发展程度、地区特点等因素, 合理确定不同类型房屋易损性曲线、建立更加详细的承灾体数据库, 都是提高损失评估精度和合理性的重要手段。

(3) 建立合理的人员伤亡评估模型。目前对地震造成的人员伤亡预测评估的精度较差, 而人员伤亡是评估灾情的一个重要指标, 在这个方面还需进行大量的工作, 来提高人员伤亡预测的准确程度。

地震震后损失评估与灾情研判具有较强的关联性与综合性, 更加注重经验模型、实际调查、卫星遥感、无人机航拍等多种方法和手段的综合运用, 编制地震动强度分区图、断层错动量分区图、灾区灾情程度分区图等, 能进一步完善和丰富地震损失评估数据与成果。灾情综合评估与研判所提供的灾情数据和信息, 不仅能为震后救灾和恢复重建的决策提供数据支持, 还能提高地震震后损失评估的精度和工作效率。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. (GB/T 18208.4—2005)地震现场工作第4部分:灾害直接损失评估 [S]. 北京:中国标准出版社, 2005
- [2] 李树桢,尹之潜. 地震损失评估与数据库系统 [J]. 中国地震, 1993, 9(3): 264—275
- [3] 王瑛,史培军,王静爱. 云南省农村乡镇地震灾害房屋损失评估 [J]. 地震学报, 2005, 27(5), 551—560.
- [4] 尹之潜,赵直,杨淑文. 建筑物易损性和地震损失与地震加速度谱值的关系(上) [J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(4), 195—200.
- [5] 尹之潜,杨淑文. 地震损失分析与设防标准 [M]. 2004. 北京:地震出版社.
- [6] 胡少卿,孙柏涛,王东明,等. 经验震害矩阵的完善方法研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6), 46—50.
- [7] 徐国栋,方伟华,史培军,等. 汶川地震损失快速评估 [J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6), 65—74
- [8] Charles A Kirschner, Robert V Whitman, William T Holmes. HAZUS Earthquake Loss Estimation Methods [J]. Natural Hazards Review, 2006, 7(2): 45—59
- [9] Federal Emergency Management Agency (FEMA). HAZUS-MH MR1, Advanced Engineering Building Module Technical and User's Manual [M]. 2003. Washington, D.C.
- [10] Tianqing Cao, Mark D. Petersen. Uncertainty of Earthquake Losses due to model uncertainty of input ground motions in the Los Angeles Area [M]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(2): 365—376