

夏珊, 刘爱文. 2009. 抗震设防地区评定地震烈度的平均震害指数法. 地震学报, 31(1): 92-99.  
Xia Shan, Liu Aiwen. 2009. Assessment of seismic intensity with mean damage index in an earthquake-resistant region.  
*Acta Seismologica Sinica*, 31(1): 92-99.

# 抗震设防地区评定地震烈度 的平均震害指数法<sup>\*</sup>

夏 珊 刘爱文<sup>†</sup>

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 在我国烈度表中提到的房屋指的是未经过抗震设计或加固的单层或数层的砖混和砖木房屋. 但是随着我国经济的发展, 这类房屋的数量在逐渐减少, 能够根据抗震设防房屋的破坏情况进行烈度评定对目前的地震现场工作具有重要意义. 本文通过震害矩阵和平均震害指数的关系, 尝试利用框架结构和砖混结构的震害矩阵得到设防烈度-震害指数的拟合关系, 建立不同抗震设防水准的框架结构和砖混结构的烈度评定标准, 并利用近年来9次中国大陆地震的烈度评定结果对该评定标准进行验证. 本文评定的结果与这些地震现场评定结果基本一致. 本研究结果可作为在我国抗震设防地区利用多种结构形式的建筑物破坏情况进行烈度评定的依据.

**关键词** 地震烈度 框架结构和砖混结构 震害矩阵 平均震害指数法

文章编号: 0253-3782(2009)01-0092-08 中图分类号: P315. 9 文献标识码: A

## Assessment of seismic intensity with mean damage index in an earthquake-resistant region

Xia Shan Liu Aiwen<sup>†</sup>

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

**Abstract:** The buildings referred to in China Intensity Scale are those without seismic design. With the economy development of China, the amount of the buildings without earthquake-resistant design is decreasing. The assessment of seismic intensity based on the damage state of buildings with the seismic design is urgently needed. According to the relationship between seismic damage matrix and mean damage index, the seismic intensity scale of the mean damage index for frame structure and masonry structure with different seismic design level is proposed. This seismic intensity scale is verified with the intensity assessment result of 9 earthquakes in the mainland of China. The research result of this paper can be used in the seismic intensity assessment in the earthquake-re-

\* 基金项目 国家标准化行业公益性科研专项(10110)、地震行业科研专项(200708005, 200808061)和中央级公益性科研院所基本科研业务专项(DQJB06A01)资助. 中国地震局地球物理研究所论著 09AC1003.

收稿日期 2008-03-20 收到初稿, 2008-11-11 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: law73@163.com

sistant region of China.

**Key words:** earthquake intensity; the frame structure and masonry structure; seismic damage matrix; the mean damage index

## 引言

烈度评定的依据是地震烈度表。目前被广泛使用的烈度表主要有中国地震烈度表(GB/T17742-1999)(国家质量技术监督局, 1999)、美国的烈度表(MM-56)、欧洲的烈度表(EMS-98)和日本的新地震烈度表。在地震现场, 烈度评定的最后结果是多指标综合给出的。根据我国烈度表对烈度评定的规定, I度—V度以地面上人的感觉及其它震害现象为主, XI度—XIII度以地表震害现象为主, 而最常遇的VI度—X度则是以房屋的震害为主, 并结合其它震害现象进行综合考虑。房屋作为评定地震烈度的重要指标, 是因为其数量很多、分布面极广。另外, 从某种意义上说, 房屋也可以看作是一种最结合实际的地震仪, 可以依据其抗震能力、结构的固有周期及其破坏的程度来估计地震动的强弱。

值得注意的是, 我国烈度表所指的房屋为未经抗震设计或加固的单层或数层砖混和砖木房屋, 并不包括经过抗震设计的框架结构等当代建筑。随着我国经济的快速发展, 人们防震减灾的意识不断提高, 经过抗震设计或者抗震加固的建筑越来越多。因此, 如何根据这些当代建筑的震害进行烈度评定是我国地震现场灾害评估工作中需要迫切解决的问题之一。

但我国目前还没有将抗震设防地区的当代建筑作为烈度评定的指标。相关的研究工作主要集中在城市的震害预测和钢筋混凝土框架等结构的易损性方面。例如, 根据全国城镇房屋普查资料得到2000年左右我国各类房屋的震害矩阵(尹之潜, 杨淑文, 2004)。温增平(1999)对砖混结构和框架结构的易损性曲线进行了研究。欧洲烈度表在其最新版本(EMS-98)(Grunthal, 1998)中将当代不同结构类型的房屋依据其抗震能力分成易损性A, B, C, D, E和F六类, 给出了在各个烈度情况下不同易损性等级房屋的震害程度。由于国情之间的差异, 我们不能够照搬欧洲烈度表。另外, 欧洲烈度表没有采用震害指数这一定量指标, 而是使用定性的语言来描述各类结构的震害情况, 在使用过程中会存在较大的不确定性。

其实, 近些年来国内地震中, 框架结构等当代建筑的震害资料已经得到了一定积累。例如, 澜沧—耿马、云南武定、丽江等地震灾区的城镇当代建筑进行了仔细地震害调查分析(叶燎原, 何纪政, 1989; 叶燎原等, 1997; 潘文等, 1998)。2007年6月, 作者参与了宁洱6.4级地震现场调查工作, 收集了宁洱县城城区各类建筑的房屋安全鉴定数据(宁洱地区抗震设防烈度为Ⅲ度), 同时系统地整理了我国其它抗震设防地区房屋的震害数据。本文在这些建筑震害数据的基础上, 探讨了根据经过抗震设防的砖混结构和框架结构的破坏情况, 利用平均震害指数进行烈度评定的方法。

## 1 平均震害指数方法

### 1.1 平均震害指数的定义

上世纪六七十年代, 为了度量地震强度和破坏等级, 提高宏观烈度的评定精度, 胡聿贤(1988)提出了震害指数的概念。参考尹之潜等(1987)提出的震害等级对应的震害指数, 本文中震害指数的定义如表1所示。

表1 震害指数的定义

Table 1 Definition of the mean damage index

震害等级	宏观现象	震害指数
基本完好	各类构件无破损,或个别非结构部件偶有轻微损坏	0.0
轻微破坏	部分构件有明显破损现象,个别非结构构件破坏稍重,对承载能力和正常使用无明显影响	0.2
中等破坏	非结构构件普遍破坏,个别主体结构构件破坏较重,但经局部修复或加固仍可恢复使用	0.4
严重破坏	主体结构普遍遭到破坏,或部分有严重的破坏,须经大修方可使用,或修复造价过大	0.7
倒塌	主体结构局部或全部濒于倒塌或已倒塌,或已无修复价值	1.0

根据我国烈度表中震害指数定义,某类结构  $i$  的平均震害指数  $\lambda_i$  的计算公式如下:

$$\lambda_i = \sum_j \left[ d_{i,j} \frac{S_{i,j}}{\sum_j S_{i,j}} \right] \quad (1)$$

其中,  $d_{i,j}$  是第  $i$  类房屋破坏等级为  $j$  ( $j=1, 2, 3, 4, 5$ ) 的震害指数;  $S_{i,j}$  是第  $i$  类房屋破坏等级为  $j$  的房屋面积或者栋数。

在实际的地震现场调查中,一般将地震灾区分成若干个调查区,一个调查区可能包括  $N$  类房屋结构,根据公式(1)可以得到各类结构房屋的平均震害指数  $\lambda_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ )。目前得到某个调查区内房屋平均震害指数的一般方法是,对各类结构的震害指数  $\lambda_i$  按面积(平方米或间)加权平均。

$$\bar{\lambda} = \sum_i \left[ \lambda_i \frac{\sum_j S_{i,j}}{\sum_i \sum_j S_{i,j}} \right] \quad (2)$$

其中,  $\sum_j S_{i,j}$  为调查区  $i$  类房屋的总面积,  $\sum_i \sum_j S_{i,j}$  为调查区内所有类型房屋的总面积。

这种方法的缺陷是没有考虑不同类型结构的抗震能力的差异,特别是在抗震设防地区。例如,某城镇的抗震设防烈度为Ⅷ度,房屋均是近年来经过正规抗震设计的新建框架房屋,假设遭受地震烈度为Ⅷ度的影响,这些框架房屋与未抗震设防建筑的震害相比将较轻微,若按照公式(2)得到房屋平均震害指数进行烈度评定,将会低估该城镇的地震烈度。其实,应该以未经抗震设计或加固的单层或数层砖混和砖木房屋的平均震害指数为基准,将其它类型结构房屋的震害指数,根据对比关系换算到砖混或者砖木房屋的平均震害指数,再进行各类房屋面积的加权平均。但是,目前这种换算关系的研究成果还很少,因此,本文尝试采用一种新的途径——直接利用这些经过抗震设防房屋的震害进行烈度评定。

## 1.2 不同类型结构的震害矩阵与平均震害指数的关系

结构的震害矩阵是指该结构类型的群体建筑在某一强度地震作用下不同破坏状态的概率分布,一般可以表示为

$$P[D_j|t, I] = \int_0^{\infty} f(R, t) P[D_j|R, I] dR \quad (3)$$

式中,  $P[D_j|t, I]$  为  $t$  年地震烈度为  $I$  时,建筑物发生  $j$  级破坏的概率;  $f(R, t)$  为  $t$  年一个地区某类房屋的抗力概率密度分布;  $P[D_j|R, I]$  为结构的抗力为  $R$ ,遇到烈度为  $I$  的地震时,发生  $j$  级破坏的概率(尹之潜, 1996)。

从理论上得到的结构在不同烈度下的平均震害指数为

$$\lambda = \sum_{j=1}^5 d_j P[D_j|I] \quad (4)$$

### 1.3 抗震设防框架结构的震害指数与地震烈度的对应关系

以抗震设防城镇地区常见的钢筋混凝土框架结构为研究对象, 根据框架结构的震害矩阵(陈颤等, 1995; 尹之潜, 杨淑文, 2004), 得到不同烈度时结构的平均震害指数。不同地震烈度作用下框架结构设防烈度(SI)与震害指数(MDI)的关系如图1所示。由图1可以看出, 随着设防烈度的提高, 框架结构的震害指数下降, 其设防烈度和震害指数呈较好的线性关系。经过线性拟合得到了在不同烈度时设防烈度与震害指数拟合直线的负斜率, VI度为0.01, VII度为0.04, VIII度为0.07, IX度为0.10, X度为0.14。

拟合得到的直线的负斜率表示在相同的地震烈度作用下, 抗震设防烈度每提高一度, 其对应的震害指数的减少量。本文参照我国烈度表的平均震害指数的范围, 结合拟合的结果得到了不同设防水平下框架结构的平均震害指数与烈度的对应关系如表2所示。

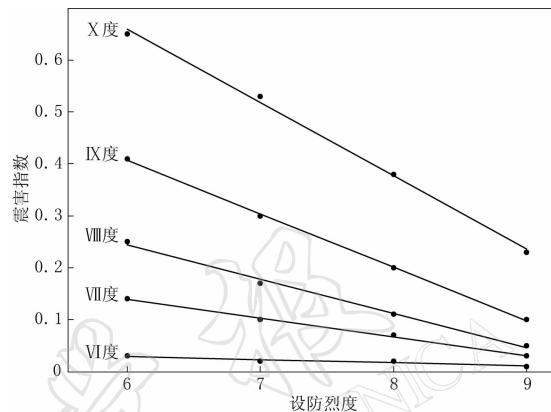


图1 框架结构在不同烈度下 SI-MDI 曲线

Fig. 1 The curves of SI-MDI of RC structure

表2 框架结构各设防水平下不同烈度对应的震害指数

Table 2 The range of mean damage index of RC on different earthquake action

设防烈度	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
6度	0.00—0.09	0.10—0.26	0.27—0.43	0.44—0.60	0.61—0.76
7度	0.00—0.08	0.09—0.22	0.23—0.36	0.37—0.50	0.51—0.62
8度	0.00—0.07	0.08—0.18	0.19—0.29	0.30—0.40	0.41—0.48
9度	0.00—0.06	0.07—0.14	0.15—0.22	0.23—0.30	0.31—0.34

### 1.4 抗震设防或加固砖混结构的平均震害指数与烈度的关系

随着我国经济的快速发展, 经过抗震设防或加固的砖混结构房屋已成为我国目前抗震设防地区最普遍的结构形式, 这类结构主要是砖墙承重。由于气候的影响, 我国不同地区砖结构的外墙厚度不同, 对结构的抗力有一定的影响。将全国分为3类地区: I类地区是在北纬43°以北, 外墙一般为49 cm厚; II类地区在北纬35°—43°之间, 外墙一般为37 cm厚; III类地区在北纬35°以南, 外墙一般为24 cm厚(尹之潜, 杨淑文, 2004)。类似于上文框架结构的方法, 在得到了不同地区砖混结构的震害矩阵后, 计算不同烈度时结构的平均震害指数。由图2中砖混结构的设防烈度与震害指数的拟合关系, 可以看出两者也呈现较好的线性关系。经过线性拟合得到直线的负斜率如表3所示。

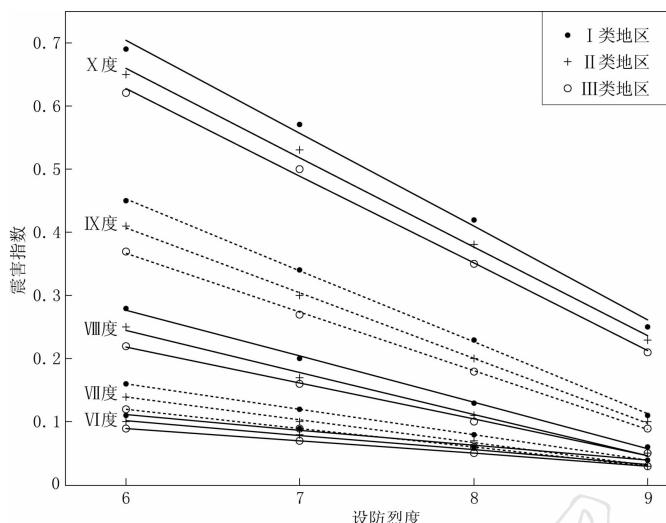


图 2 砖混结构在不同烈度下 SI-MDI 曲线

Fig. 2 SI-MDI curves for masonry structure

为了便于应用,取3类地区SI-MDI拟合曲线的负斜率的平均值,作为砖混结构在相同的地震烈度作用下,抗震设防烈度每提高一度,其对应的震害指数的减少量。类似于上文框架结构的方法,得到了不同设防水平的砖混结构震害指数与地震烈度的对应关系,如表4所示。

表3 砖混结构不同烈度下 SI-MDI 拟合曲线的负斜率

Table 3 Negative slopes of the fitting lines for masonry structure

地区分类	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
I类	0.02	0.03	0.06	0.09	0.14
II类	0.02	0.04	0.07	0.10	0.14
III类	0.02	0.04	0.07	0.11	0.15

表4 砖混结构各设防水平下不同烈度对应的震害指数

Table 4 Mean damage index of masonry structure under different earthquake action

设防烈度	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
未设防	0.00—0.10	0.11—0.30	0.31—0.50	0.51—0.70	0.71—0.90
6度	0.00—0.08	0.09—0.26	0.27—0.43	0.44—0.60	0.61—0.76
7度	0.00—0.06	0.07—0.22	0.23—0.36	0.37—0.50	0.51—0.62
8度	0.00—0.04	0.05—0.18	0.19—0.29	0.30—0.40	0.41—0.48
9度	0.00—0.02	0.03—0.14	0.15—0.22	0.23—0.30	0.31—0.34

## 2 实际地震对烈度评定方法的验证

本文系统地收集了中国大陆地区1996—2007年发生在近城镇地区且具有较详细震害调查资料的地震,包括:①1996年2月丽江地震(杨玉成等,1996;潘文等,1998);②1996年5月包头地震(中国地震局监测预报司,2001;包头市地震局,2006);③2000年1

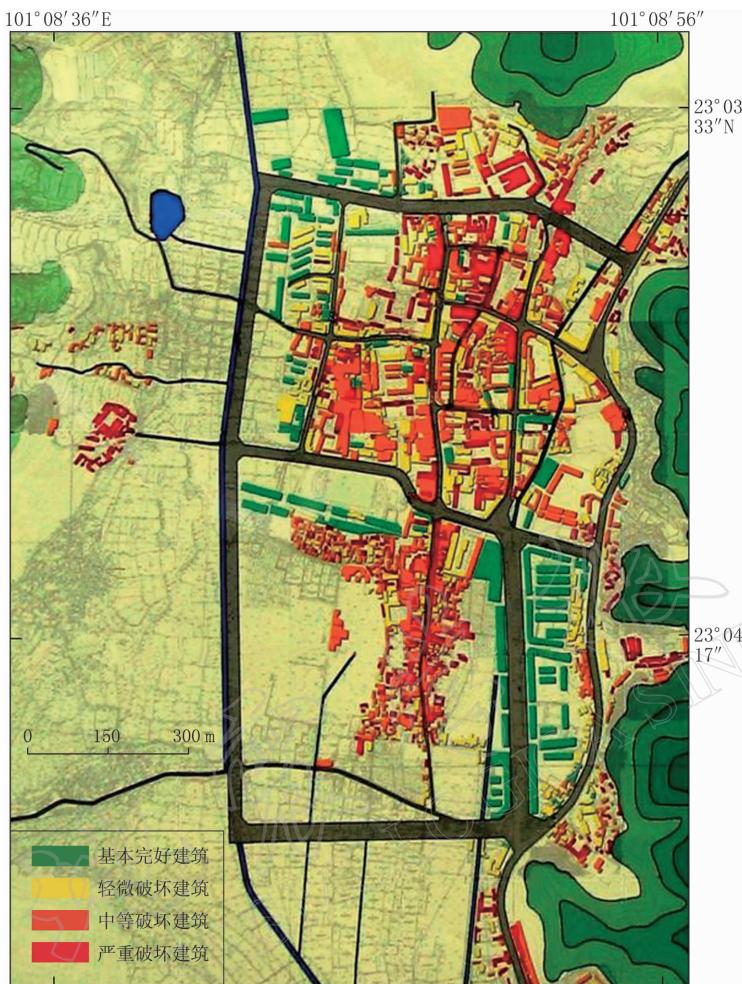


图3 宁洱中心城区房屋的破坏分布

Fig. 3 Damage distribution of structures in the central city of Ning'er

月姚安地震(毛玉平, 万登堡, 2001); ④ 2001年4月施甸地震(非明伦等, 2002; 王锡财等, 2002a); ⑤ 2001年10月永胜地震(王锡财等, 2002b); ⑥ 2003年7月大姚地震; ⑦ 2003年10月大姚地震; ⑧ 2004年8月鲁甸地震(非明伦等, 2006); ⑨ 2007年6月宁洱地震。

以2007年宁洱6.4级地震为例, 2007年6月6日—14日建设部门对宁洱城区房屋逐栋进行了安全鉴定, 并将城区房屋的破坏状态分为4类: 基本完好、轻微破坏、中等破坏和严重破坏(图3)。由公式(1)计算了各个调查点每种结构类型房屋

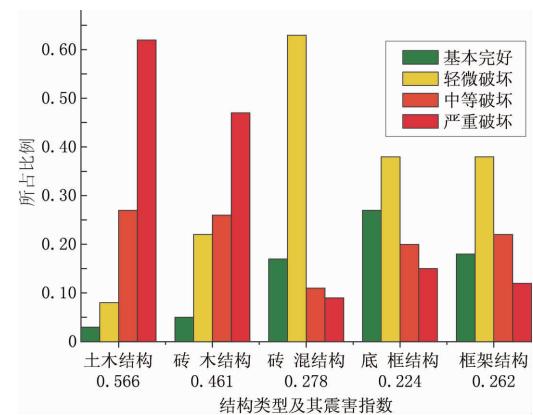


图4 宁洱城区各结构破坏情况及其震害指数

Fig. 4 Mean damage index of the structures in Ning'er urban districts

的平均震害指数。图 4 为宁洱城区不同结构类型房屋各破坏等级所占的比重及其平均震害指数。

在宁洱县城,土木结构和砖木结构房屋基本上不设防,砖混结构一般设有圈梁和构造柱,底框和框架结构一般按照Ⅷ度设防,这些经过抗震设防房屋的栋数占宁洱城区房屋总栋数的 64.7%,这个比例随着我国城镇的快速建设将继续提高。宁洱地震后的烈度评定主要是依据占少部分的未经抗震设防的土木、砖木结构的震害结果,评定结果为Ⅷ度。

根据本文提出的震害指数与烈度的对应关系,分别计算了不同的结构类型房屋的平均震害指数,并运用表 2、表 4 所示的平均震害指数评定烈度的定量标准,得到了利用框架结构和砖混结构的破坏情况评定的烈度,并与现场评定结果作了对比,如表 5、表 6 所示。

表 5 框架结构的例证

Table 5 Verification of RC structure

地震名称	日期 年-月	震级	评定地点	设防烈度	震害指数	现场评定烈度	本方法评定烈度
云南丽江	1996-02	7.0	丽江县城	8	0.22	Ⅷ	Ⅷ
内蒙古包头	1996-05	6.4	包头市区	8	0.21	Ⅷ	Ⅷ
云南姚安	2000-01	6.5	姚安县城	7	0.33	Ⅷ	Ⅷ
云南姚安	2000-01	6.5	大姚县城	7	0.19	Ⅶ	Ⅶ
云南姚安	2000-01	6.5	牟定县城	7	0.07	Ⅵ	Ⅵ
云南施甸	2001-04	5.9	施甸辛街	8	0.12	Ⅶ	Ⅶ
云南施甸	2001-04	5.9	施甸新城	8	0.07	Ⅵ	Ⅵ
云南永胜	2001-10	6.0	永胜县城	8	0.07	Ⅶ	Ⅶ
云南永胜	2001-10	6.0	宾川县城	8	0.02	Ⅵ	Ⅵ
云南大姚	2003-07	6.2	大姚县城	7	0.04	Ⅵ	Ⅵ
云南大姚	2003-10	6.1	大姚红光	7	0.20	Ⅶ	Ⅶ
云南鲁甸	2004-08	5.6	鲁甸县城	7	0.05	Ⅵ	Ⅵ
云南宁洱	2007-06	6.4	宁洱县城	7	0.26	Ⅷ	Ⅷ

表 6 砖混结构的例证

Table 6 Verification of masonry structure

地震名称	日期 年-月	震级	评定地点	设防烈度	震害指数	现场评定烈度	本方法评定烈度
云南丽江	1996-02	7.0	丽江县城	8	0.28	Ⅷ	Ⅷ
内蒙古包头	1996-05	6.4	包头市区	8	0.23	Ⅷ	Ⅷ
云南姚安	2000-01	6.5	姚安县城	7	0.26	Ⅷ	Ⅷ
云南姚安	2000-01	6.5	大姚县城	7	0.21	Ⅶ	Ⅶ
云南施甸	2001-04	5.9	施甸太平	8	0.33	Ⅷ	Ⅸ
云南施甸	2001-04	5.9	施甸辛街	8	0.13	Ⅶ	Ⅶ
云南永胜	2001-10	6.0	永胜县城	8	0.08	Ⅶ	Ⅶ
云南永胜	2001-10	6.0	宾川县城	8	0.04	Ⅵ	Ⅵ
云南大姚	2003-07	6.2	大姚新街	7	0.32	Ⅷ	Ⅷ
云南大姚	2003-07	6.2	大姚红光	7	0.12	Ⅶ	Ⅶ
云南大姚	2003-10	6.1	鲁甸桃源	7	0.11	Ⅶ	Ⅶ
云南鲁甸	2004-08	5.6	鲁甸新街	7	0.31	Ⅷ	Ⅷ
云南鲁甸	2004-08	5.6	宁洱县城	7	0.17	Ⅶ	Ⅶ
云南宁洱	2007-06	6.4	丽江县城	7	0.28	Ⅷ	Ⅷ

### 3 结论

本文通过由理论分析得到的结构震害矩阵, 研究了经过抗震设计的结构平均震害指数随其抗震设防水平变化的规律。在抗震设防烈度越高的地区, 经过正规抗震设计的结构的平均震害指数越小。参照目前我国地震烈度表中未经过抗震设防房屋的平均震害指数, 本文提出了经过抗震设防的框架结构和砖混结构与地震烈度相应的平均震害指数范围。通过与1996—2007年的9次中国大陆地震现场烈度评定结果的比较, 检验了本文烈度评定标准的有效性, 并确保由抗震设防房屋的震害指数得到的烈度评定结果与以前依据未抗震设防房屋的震害指数得到的烈度评定结果之间的延续性。目前, 本文给出的平均震害指数范围随地震烈度的增加是连续变化的, 因此在两个相邻烈度的平均震害指数边界值上, 应依据其它的烈度评定指标进行综合判定。在今后的研究中, 还可以考虑两个相邻烈度所对应的震害指数范围互相搭接的情况。目前因为相应的震害资料不足, 尚未给出, 应作为后续研究的方向。

### 参 考 文 献

- 包头市地震局. 2006. 一九九六年包头地震回顾[M]. 北京: 地震出版社: 115—137.
- 陈颙, 陈鑫连, 傅征祥. 1995. 十年尺度中国地震灾害损失预测研究[M]. 北京: 地震出版社: 58—66.
- 非明伦, 崔建文, 赵永庆, 包一峰, 王锡财, 杨昆杰. 2002. 施甸地震震害分析[J]. 地震研究, 25(2): 192—199.
- 非明伦, 于庆坤, 谢英情, 卢永坤, 邵文丽. 2006. 鲁甸5.6级地震震害分析[J]. 地震研究, 29(1): 87—91.
- 国家质量技术监督局. 1999. 中国地震烈度表(GB/T17742-1999)[S]. 北京: 中国标准出版社: 1—7.
- 胡聿贤. 1988. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社: 92.
- 毛玉平, 万登堡. 2001. 2000年云南姚安6.5级地震[M]. 昆明: 云南科技出版社: 32.
- 潘文, 叶燎原, 缪升, 葛学礼, 沙安. 1998. 1996年丽江7.0级地震县城现代房屋震害指数评定[J]. 工程抗震, 6(2): 36—39.
- 王锡财, 崔建文, 施伟华, 非明伦, 王勇, 吕明. 2002a. 施甸5.9级地震房屋震害分析[J]. 自然灾害学报, 11(1): 74—80.
- 王锡财, 崔建文, 施伟华, 非明伦, 吕明, 钱进. 2002b. 永胜6.0级地震灾害调查及分析[J]. 中国地震, 18(2): 214—220.
- 温增平. 1999. 建筑物地震易损性分析研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 177.
- 杨玉成, 袁一凡, 郭恩栋, 柳春光, 杨雅玲. 1996. 1996年2月3日云南丽江7.0级地震丽江县城震害统计和损失评估[J]. 地震工程与工程振动, 16(1): 19—29.
- 叶燎原, 何纪政. 1989. 耿马县城房屋震害指数评定[J]. 云南工学院学报, 5(3): 23—27.
- 叶燎原, 白良, 缪升, 周亦唐, 冯骆, 方祥. 1997. 云南武定6.5级地震砖混房屋震害指数评定[J]. 工程抗震, 9(8): 37—39.
- 尹之潜, 李树桢, 杨淑文. 1987. 单层工业厂房震害估计方法[J]. 地震工程与工程振动, 7(4): 78—86.
- 尹之潜. 1996. 结构易损性分类和未来地震灾害估计[J]. 中国地震, 12(1): 49—55.
- 尹之潜, 杨淑文. 2004. 地震损失分析与设防标准[M]. 北京: 地震出版社: 74—127.
- 中国地震局监测预报司. 2001. 中国大陆地震灾害损失评估汇编[M]. 北京: 地震出版社: 347—348.
- Grunthal G. 1998. *European Macroseismic Scale* [S]. Luxembourg: Imprimerie Joseph Beffort, Helfent-Bertrange: 8—16.