

# 丹江口市农村房屋震害预测研究<sup>①</sup>

何申海<sup>1,2</sup>, 王秋良<sup>1,2</sup>, 龚平<sup>3</sup>, 郑水明<sup>1</sup>

(1.中国地震局地震研究所 地震大地测量重点实验室,湖北 武汉 430071;

2.丹江口水库诱发地震监测系统武汉分析中心,湖北 武汉 430071; 3.中国地震局第一监测中心,天津 300180)

**摘要:**通过资料收集和现场调查,得到丹江口市农村房屋建筑基本资料的统计数据。在此基础上,运用建筑物地震易损性的概率分析法,对该市农村房屋建筑进行震害预测。预测结果表明,丹江口市农村房屋建筑基本能到达Ⅵ度的抗震设防要求,但当遭遇到烈度为Ⅶ度的地震作用时,发生毁灭性破坏的可能性极小,可能会大范围发生中等破坏,并导致较大的经济损失和人员伤亡。通过抗震措施经济分析认为,增加约 6% 的建房投资,即可实现三水准的抗震设防目标,并提出一些具体的民居防震减灾政府规划管理建议和技术措施。

**关键词:**丹江口; 房屋建筑; 易损性; 震害预测; 抗震减灾

**中图分类号:** P315.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2016)增刊 2-0291-05

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.Supp.2.0291

## Research on Seismic Damage Prediction of Rural Residential in Danjiangkou City

HE Shen-hai<sup>1,2</sup>, GONG Ping<sup>3</sup>, WANG Qiu-liang<sup>1,2</sup>, ZHEN Shui-ming<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China;

2. Wuhan Analysis Center of Danjiangkou Reservoir Induced Seismicity Monitoring System, Wuhan 430071, Hebei, China

3 First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

**Abstract:** Statistical data of the basic data about Danjiangkou city's houses are obtained through documents collection and field investigation. On the basis of the data, we used probability analysis method of seismic vulnerability to make prediction of earthquake damage to buildings in Danjiangkou city. Prediction results show that Danjiangkou city has already reached basic requirements of seismic fortification VI degree, which means that the probability of a catastrophic failure is very small while suffers a VII degree earthquake, but moderate damage will likely occur widely, and lead to greater economic losses and casualties. The economic analysis of anti-seismic measures indicates that Danjiangkou city could achieve three levels of anti-seismic fortification target if about 6% of building investment was increased. Meanwhile, this paper puts forward some anti-seismic measures and advices for the government planning and management of earthquake prevention and disaster relief.

**Key words:** Danjiangkou city; building; vulnerability; seismic damage prediction; earthquake prevention and disaster relief

① 收稿日期: 2016-05-10

基金项目: 中国地震局社会公益研究项目(1521401800062)

作者简介: 何申海(1991-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事地震工程研究。E-mail: hesh1991@sina.com。

通信作者: 龚平(1958-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地震观测、地震地质、地震工程和岩土工程等方面研究。

E-mail: gongping201108@163.com。

## 0 引言

震害预测是指在可能遭遇到的各种强度地震作用下,一个地区的工程结构发生某种破坏程度的可能性。震害预测的研究最早起源于20世纪30年代的美国<sup>[1]</sup>,从20世纪80年代开始我国有众多学者进行了城市的未来地震灾害研究<sup>[2-5]</sup>。目前震害预测方法主要分为确定性方法和概率性方法两类,本文采用概率性方法中的易损性分析法对丹江口市进行震害预测研究。丹江口市位于南水北调中线工程核心水源区的丹江口水库库区,该区域既有构造地震环境背景,又有水库诱发地震环境背景。据相关文献<sup>[6]</sup>显示,丹江口库区历史最大地震发生于公元788年的竹山6.5级地震,最近一次发生于1973年的宋湾4.7级地震,震中距研究区约13 km,震中烈度达到Ⅶ度强。从第五代地震动参数区划图可知,丹江口市部分区域设防标准为0.05 g(相当于烈度Ⅵ度),部分区域为0.10 g(相当于烈度Ⅶ度)。由于丹江口市特殊的地理位置,对其进行房屋震害预测研究可以为南水北调中线工程核心水源区防震减灾规划的制定提供参考性依据。为此,本文对研究区进行了地震经济损失和人员伤亡预测,并对丹江口市的抗震设防措施进行了经济分析,依据探讨结果对丹江口市的抗震减灾工作提出了参考性建议。

## 1 丹江口市的房屋概况

丹江口市位于湖北省西北部、汉江中上游。根据《湖北统计年鉴—2015》显示,丹江口市行政面积3 121 km<sup>2</sup>,人口45.99万。文献<sup>[7]</sup>从建设年代和建筑结构两方面对丹江口市的75 963户房屋建筑进行了全面调查,其中30 313户为二层建筑(占比39.90%)。丹江口市的房屋结构主要分为土木结构、砖木结构和砖混结构,房屋的建设年代主要为上世纪80年代及以前(占比38.22%)和2000年以后(占比45.66%)。具体如表1,表2所列。

表1 房屋建筑结构统计结果

结构类型	土木结构	砖木结构	砖混结构	合计
户数	22 981	19 386	33 596	75 963
面积/万 m <sup>2</sup>	354.053 8	156.442 3	401.104 1	911.600 3
比例/%	38.84	17.16	44.00	100

表2 房屋建筑建造年代统计结果

年代	1980年 代以前	1980~ 1989年	1990~ 1999年	2000~ 2004年	2005 年以后
比例/%	23.43	14.79	16.12	16.95	28.71

另据工程造价的相关文献<sup>[8]</sup>,丹江口市的房屋结构面积及土建工程造价(按2014年价格)如表3所列。

表3 丹江口市房屋造价

结构类型	土木结构	砖木结构	砖混结构	合计
造价/(元·m <sup>-2</sup> )	525.70	675.90	751.00	
总价/千万元	186.126	105.739	301.229	593.094

## 2 震害预测

### 2.1 地震总经济损失预测

某城市或地区在遭遇到某一烈度地震作用时,该城市或地区总经济损失为:

$$L(I) = \varphi \cdot (1 + \gamma + \pi) \cdot \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^5 \left[ P(D_j | I) \cdot (L_1(D_j)_k \cdot W_k + L_2(D_j)_k \cdot Y_k) \right] \quad (1)$$

式中: $L(I)$ 表示城市的总经济损失; $I$ 表示该城市遭遇的地震烈度; $\varphi$ 表示自然资源损失(以及其他忽略的损失)与地震直接经济损失的比值,本文取 $\varphi = 1.1$ <sup>[9]</sup>; $\gamma$ 表示的是间接损失与直接损失之比<sup>[9]</sup>,考虑到丹江口实际的经济状况,取 $\gamma = 0.5$ ; $\pi$ 表示地震救灾直接投入的费用与地震直接经济损失的比值,按表4取值; $k$ 表示建筑结构分类,本文分三类; $D_j$ 表示建筑结构的破坏等级,其分五类; $P(D_j | I)$ 表示建筑在遭遇烈度 $I$ 时产生 $D_j$ 级破坏的概率,按表5取值; $L_1(D_j)_k$ (%)表示第 $k$ 类结构各级破坏对应的直接经济损失比,本文的土木结构和砖木结构的损失比分别参考尹之潜<sup>[4]</sup>农村建筑和城镇平房损失比,砖混结构的损失比参考谢礼立等<sup>[12]</sup>的多层砖房的损失比; $W_k$ 表示 $k$ 类建筑结构的工程造价; $L_2(D_j)_k$ (%)表示建筑结构内各级破坏对应的室内物资经济损失比,等于室内物资损失值与室内物资总价值比值,如表6所列; $Y_k$ 表示第 $k$ 类结构室内物资总价值,本文参考美国HAZUS97的相关规定及计算方法,由于本文涉及的结构主要为住宅类,故取室内资产平均值与结构造价比为50%。

表4  $\pi$ 的取值

震级	6级以下地震	6、7级地震	7级以上地震
$\pi$ 的取值	1.5%	3.5%	6.0%

通过震害预测,可以得到丹江口市在遭遇到不同烈度的地震作用时,丹江口市各种结构类型的房屋建筑经济损失如表7所列。

表 5 房屋结构的破坏概率矩阵<sup>[10-11]</sup> $P(D_j | I)$ (%)

破坏等级		地震烈度			
		VI	VII	VIII	IX
土木结构	基本完好	50	19.5	7.8	2.6
	轻微破坏	32	34	7	3.7
	中等破坏	15	25.6	29	16.5
	严重破坏	3	13.4	28	17
	倒塌	0	7.5	28.2	60.2
砖木结构	基本完好	75	49	22	9
	轻微破坏	15	24	23	16
	中等破坏	8	15	30	20
	严重破坏	2	11	21	42
	倒塌	0	1	4	13
砖混结构	基本完好	90	47	9	3
	轻微破坏	6	30	25	12
	中等破坏	4	22	54	27
	严重破坏	0	1	12	55
	倒塌	0	0	0	3

表 6 结构各级破坏对应的物资损失比<sup>[4]</sup>(%)

破坏等级	完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
室内物资经济损失比	0	0	0	20~40	40~95

通过地震经济损失预测结果可知,当丹江口市遭遇烈度为 VI 度以上地震作用时,土木结构(7.54%)和砖木结构(3.41%)导致的经济损失严重,砖混结构相对较好。当遭遇烈度为 VII 度以上地震时,丹江口市的平均损失比高达 11.86%,远低于遭遇中震时的设防目标要求。该市遭遇地震产生重大经济损失的原因在于土木结构和砖木结构的房屋占比过大,砖混结构抗震设计不合理(甚至没有抗震设计),居民防震减灾意识淡薄。

2.2 人员伤亡预测

地震导致的人员伤亡不仅受地震强度的影响,

表 7 地震经济损失预测结果

遭遇地震烈度	总地震经济损失(千万元)							
	土木结构		砖木结构		砖混结构		合计	
	直接损失	损失比/%	直接损失	损失比/%	直接损失	损失比/%	总损失	平均损失比/%
VI	21.050 9	7.54	5.413 8	3.41	4.458 2	0.99	51.542 0	3.98
VII	59.057 8	21.15	13.820 1	8.71	25.905 7	5.73	164.651 6	11.86
VIII	130.385 0	46.70	26.350 2	16.61	71.993 7	15.93	381.243 3	26.41
IX	190.555 8	68.25	48.365 0	30.49	151.849 5	33.61	651.332 6	44.12

还与建筑结构、发震时间、人口密度等因素有关,本文采用下式进行受伤率  $L_1(I)$  和死亡率  $L_2(I)$  估算。

$$L_1(I) = f_t \cdot f_\rho \cdot \left( \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^5 \eta_k P(D_j | I) \cdot L_1(D_j) \cdot M \right) \quad (2)$$

$$L_2(I) = f_t \cdot f_\rho \cdot \left( \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^5 \eta_k P(D_j | I) \cdot L_2(D_j) \cdot M \right) \quad (3)$$

式中: $f_t$  和  $f_\rho$  分别为发震修正系数和人口密度修正系数; $\eta_k$  为三种房屋结构的户数占总调查户数的比值; $L_1(D_j)$  表示不同破坏状态下人员的受伤率, $L_2(D_j)$  表示不同破坏状态下人员的死亡率; $M$  表示总人口数。其中  $f_t$ 、 $f_\rho$ 、 $L_1(D_j)$  及  $L_2(D_j)$  均参考等文献[12]中的建议取值。

丹江口市由地震导致的三种房屋结构对应的人员死亡率和受伤率预测如图 1 所示。其中 VI 度和 VII 设防死亡率分别采用文献[12]中按 VI 度和 VII 设防建筑的破坏概率矩阵,以式(2)和式(3)计算得到相应的地震人员死亡率,来对比反映丹江口市各种房屋

结构导致人员死亡的情况。

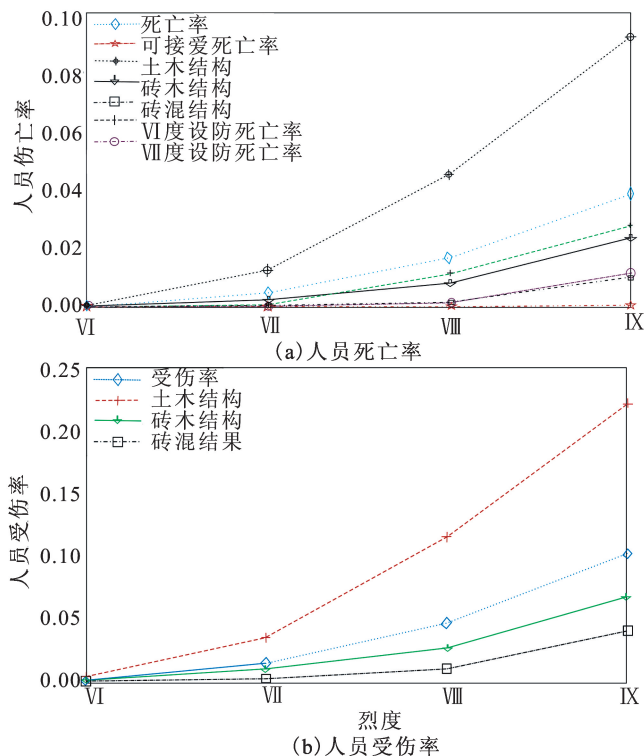


图 1 地震人员死亡率及受伤率曲线

从地震人员伤亡曲线可以看出,丹江口市现有

三种建筑结构对应的死亡率水平均远高于社会可接受地震人员死亡率水平,尤其是土木结构。说明该市现有的三种房屋建筑抗震能力差,城市整体的抗震能力薄弱,面临较大的抗震减灾压力。

为了直观地表征丹江口市的房屋建筑抗震能力情况,某类型结构在某一地震烈度下的平均抗震能力指数可由下式计算:

$$D_k(I) = 1 - \sum_{j=1}^5 P(D_j | I) \cdot d_j \quad (4)$$

$$D(I) = \sum_{k=1}^3 \gamma_k D_k(I) \quad (5)$$

其中: $D_k(I)$ 为某类结构在烈度 $I$ 下的平均抗震能力指数; $D(I)$ 为丹江口市整体在烈度 $I$ 下的平均抗震能力指数; $d_j$ 为与破坏等级 $D_j$ 对应的破坏指数,按表8取值; $\gamma_k$ 为某种结构在整体中所占的面积比例。图2为该市其房屋建筑平均抗震指数分布。

表8 破坏等级和破坏指数

破坏等级( $D_j$ )	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
破坏指数( $d_j$ )	0.05	0.2	0.45	0.7	0.9

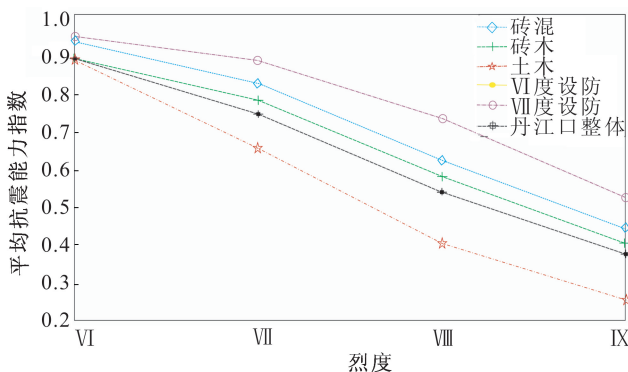


图2 房屋建筑平均抗震指数分布图

为更直观地反映出丹江口市各类房屋结构的抗震能力情况,采用谢礼立院士推荐的按Ⅵ度和Ⅶ度设防的结构破坏概率矩阵,依照式(4)和(5)计算得到图中的Ⅵ度和Ⅶ度设防条件下的房屋建筑抗震能力曲线。

### 2.3 震害分析

震害分析认为:(1)丹江口市在烈度为Ⅶ度的地震作用下不会发生毁灭性破坏,但会发生大面积的中等破坏,且主要发生在土木结构和砖木结构密集地区,将会产生较大的经济损失和人员伤亡;(2)该市现有的三种类型房屋建筑均达不到Ⅶ度设防要求,砖混结构的抗震性能较好,基本能达到Ⅵ度设防的要求,但土木结构和砖木结构抗震性能较差,容易造成巨大地震经济损失和人员伤亡;(3)由于该市现

有的房屋结构中房龄超15年以上的占比54.34%,土木和砖木结构占其中55.77%,而砖混结构中大部分为底层缩进、二层挑出的未设置构造圈梁和构造柱的建筑,因此丹江口市整体的抗震设防能力偏弱,尤其是设防烈度为Ⅶ度的区域面临较大的抗震减灾压力;(4)在烈度为Ⅵ度的地震作用下时,该市地震人员死亡率远高于社会可接受地震人员死亡率标准,其中以土木和砖木结构导致的人员伤亡最甚,仅当按烈度Ⅶ度进行设防时,其人员死亡率才接近社会可接受死亡率标准。

### 3 抗震减灾措施的经济分析

对房屋建筑采取抗震措施,可以有效减轻地震经济损失和人员伤亡。本文利用抗震设防标准决策分析基本模型<sup>[12]</sup>,探讨丹江口市进行不同烈度设防时经济损失和人员伤亡的变化情况,以及因抗震设防标准的提高而导致的抗震经济投入,以期通过定量的方式找到该市最佳设防烈度。抗震设防标准决策分析基本模型本质上是以减轻地震经济损失 $L(I_d)$ 及减少抗震投入 $C(I_d)$ 为主要目标,以人员伤亡率为约束条件,选取一个经济最优、人员伤亡率在社会可接受度之内的设防标准。经济最优设防烈度是在不考虑人员伤亡的情况下,使目标函数 $S(I_d) = L(I_d) + C(I_d)$ 取最小值时的烈度。抗震投入 $C(I_d)$ 按照文献<sup>[13]</sup>所述方法进行计算,地震危险性取值参考《南水北调中线核心水源区地震安全系统建设项目》。其计算结果如图3所示。

从图3可知,丹江口市经济最优设防烈度为Ⅵ度(0.05g),但此时的地震人员死亡率为 $2.3 \times 10^{-4}$ ,与文献<sup>[10]</sup>所计算的地震人员死亡率接近,但远高于社会可接受地震人员死亡率( $2 \times 10^{-2}$ )。因此综合考虑抗震投入和地震人员死亡率等因素,丹江口市的最佳抗震设防标准为Ⅶ度(0.10g)。此时三种房屋建筑因抗震设防标准的提高而产生的经济投入占各自结构造价的5.6%(土木)、4.0%(砖木)及6.33%(砖混),这与周安等<sup>[14]</sup>对砖混结构的抗震投入计算结果接近。提高设防标准后,即可达到三水准的抗震设防目标,此时的地震人员死亡率基本符合社会可接受地震人员死亡率要求。

### 4 抗震减灾措施建议

结合《湖北统计年鉴—2015》中有关丹江口市的房屋建筑和社会经济(包括居民人均收入)调查结果,对该市抗震减灾事业提出如下参考性建议:

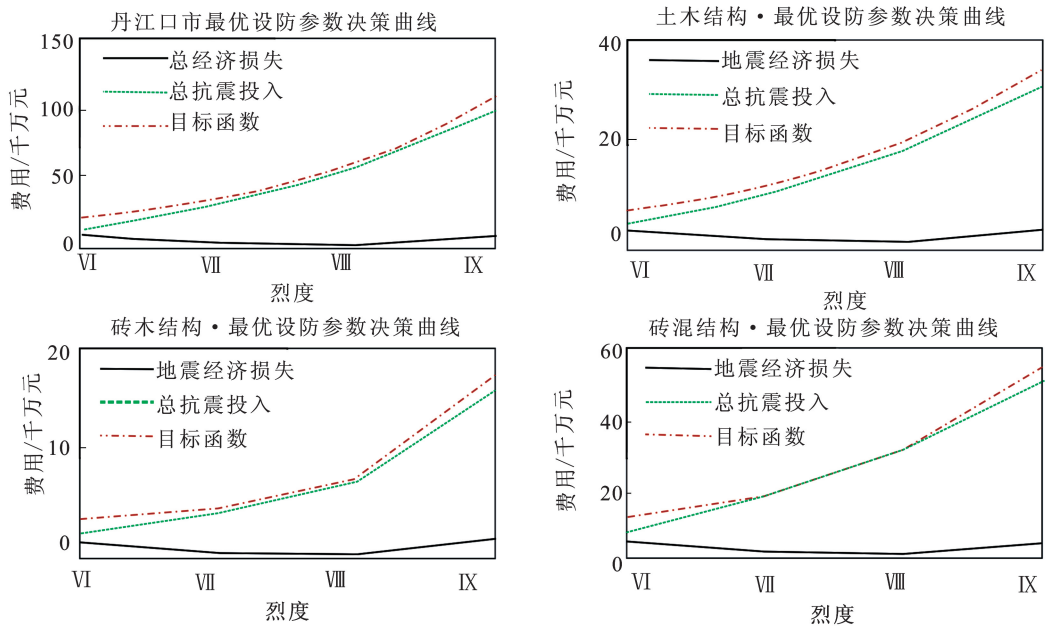


图 3 经济最优设防决策曲线

(1) 在综合考虑经济基础的条件上,积极改善乡镇建设,减少土木、砖木结构等抗震性能差的房屋结构类型比例,全面提高城市的抗震水平。

(2) 以新农村建设为契机,提高居民防震减灾意识,优化乡镇和农村建设规划,加强建设场地的抗震勘察,编制通俗易懂的房屋抗震设防构造图集,提供抗震技术支持。

(3) 对于新建房屋,尽量避免底层缩进,二层挑出等上下层承重墙不连续布置以及纵横墙不对称布置,同时应尽量设置构造圈梁和构造柱,以加强新建房屋的抗震能力。

(4) 严把建筑材料和施工质量关。

## 5 结语

乡镇和农村自建住房的防震减灾问题一直是政府监管的盲区,本文的预测结果可为丹江口市乡镇和农村防震减灾政策的制定以及地方抗震技术规程的编制提供参考性依据。总体认为,丹江口市基本能达到Ⅵ度的抗震设防要求,且当该市遭遇Ⅶ度的地震作用时发生毁灭性破坏的可能性极小,将可能发生大面积中等破坏,并伴随较大的经济损失和人员伤亡,因此丹江口市设防烈度为Ⅶ度的区域面临较大的防震减灾压力。通过抗震减灾措施经济分析认为,当增加约 6%建房投资情况下可基本达到三水准的抗震设防目标。

致谢:本文在成文的过程中,得到姚运生研究员

和曾心传研究员的精心指导,在此表示衷心的感谢。

## 参考文献

- [1] 国家地震局灾害防御司,译.未来地震的损失估计方法[M].北京:地震出版社,1991.
- [2] 傅征祥,李革平.地震生命损失研究[M].北京:地震出版社,1993.
- [3] 周雍年.设防标准研究中的结构易损性分析方法[R].哈尔滨:国家地震局工程力学研究所,1995.
- [4] 尹之潜.地震灾害及损失预测方法[M].北京:地震出版社,1996.
- [5] 李荷,高小旺,苏经宇,等.城市和企业地震影响灾害预测及减灾对策[M].北京:中国铁道出版社,1997.
- [6] 熊继平.湖北地震史料证考[M].北京:地震出版社,1985.
- [7] 孙延琦.十堰市农房抗震性能调查浅析[C]//湖北省地震学会2015年学术会议论文集.武汉:湖北省地震学会,2015.
- [8] 袁丽,王婧,陈圆圆,等.砖混结构农居工程造价受抗震设防标准的影响分析[J].地震工程学报,2014,36(1):153-157.
- [9] 中国地震局编.地震现场工作大纲和技术指南[M].北京:地震出版社,1998.
- [10] 何钧,杜宪宋.鲁南地区城市房屋震害预测[J].高原地震,1998,10(2):35-42.
- [11] 邱舒睿,高惠瑛.青海省农居地震灾害易损性研究[J].震灾防御技术,2015,10(4):969-978.
- [12] 谢礼立,马玉宏,翟长海.基于性态的抗震设防与设计地震动[M].北京:科学出版社,2009:62-200.
- [13] 李树桢,李冀龙.房屋建筑的震害矩阵计算与设防投资比确定[J].自然灾害学报,1998(4):106-114.
- [14] 周安,孙洁,杨勇.基于抽样调查的安徽农村民居震害预测与减灾对策[J].地震学报,2009,(1):100-107.