

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

刘 毅¹, 吴绍洪¹, 徐中春^{1, 2}, 戴尔阜¹

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 自然灾害发生的可能损失一直是灾害风险评估上的难题。本研究以自然灾害风险评估经典模型为基础, 提出了新的自然灾害风险评估与风险等级划分方法, 利用历史灾情和孕灾环境解决风险评价中致灾因子破坏力与灾害发生的可能, 并以山西省地震灾害风险为例进行了定量化评估研究。主要改进在于: 确定灾害损失率和环境参数以建立地震灾害可能损失计算模型, 计算承灾体地震灾害风险的可能损失量; 用标准差和对数位转换的相关计算对地震灾害风险等级进行划分。案例结果显示: 山西全省发生地震灾害, 可能损失风险包括房屋破坏风险超过3百万间, 经济损失风险超过130亿元, 人员伤亡风险将近30万人。山西省各县市之间地震灾害综合风险差异明显, 最高风险区域是太原市辖区、大同市辖区、晋中市辖区等15个县市区。

关键词: 风险; 风险评估; 分级方法; 地震灾害; 山西省

文章编号: 1000-0585(2011)02-0195-14

自然灾害是人类社会经济可持续发展的一个重大障碍。我国是世界上受自然灾害影响最为严重的国家之一, 存在着灾害种类多、影响范围广、发生频率高、造成损失重^[1]等特征。近年来, 我国平均每年因各类自然灾害造成约3亿人(次)受灾, 倒塌房屋约300万间, 紧急转移安置人口约800万人, 直接经济损失近2000亿元^[2]。随着我国社会经济的发展, 同等灾害造成的损失在增加。1949年以来, 我国逐步建立起了一套较为完整的自然灾害救援、救济体系。然而, 从2008年的南方雨雪冰冻灾害和汶川特大地震灾害等来看, 我国防灾减灾工作凸现出来的最大问题是备灾的不足, 即对我国各地自然灾害风险分布情况的认识不足^[1~3], 这给救灾抢险等造成了巨大困难。因此, 自然灾害风险研究对灾害管理显得尤其重要。在众多防灾减灾措施中, 地震灾害风险评估与防范管理是减轻灾害损失最有效的途径。这一点从海地地震(7.3级, 死亡11.3万人)与新西兰克赖斯特彻奇地震(7.2级, 2人重伤)灾情统计比较中很容易得出。

对于地震灾害风险的研究, 大多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: 风险=危险度×易损度或风险矩阵分析方法来实现地震灾害风险的评估^[4]。也有通过构建具体的风险计算公式来实现地震灾害风险的评估。如聂高众等在分析地震灾害风险特点与构成的基础上, 提出了地震灾害绝对风险与相对风险计算公

收稿日期: 2010-10-21; 修订日期: 2010-01-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向项目(KZCX2-YW-Q03-01); “十一五”国家科技支撑计划(2008BAK50B05)

作者简介: 刘毅(1957-), 男, 北京市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事经济地理和区域可持续发展等研究。

Email: liuy@igsnrr.ac.cn. 吴绍洪(1961-), 男, 广东人, 研究员, 博士生导师, 主要从事自然地理综合研究。E-mail: wush@igsnrr.ac.cn

式，并利用相对风险公式来对中国未来 10~15 年地震灾害的风险评估^[5]。

本文在分析目前自然灾害风险研究状况的基础上，提出自然灾害风险的识别与评估方法，并以山西省为例来具体实现自然灾害风险的定量评估和分级研究。

1 自然灾害风险评估方法

自然灾害风险是指在自然灾害发生前可预见到的可能损失。自然灾害风险是一个新兴的研究课题，很多学者^[6~9] 分别对致灾因子危险性与承灾体脆弱性分等定级，然后通过构建评估矩阵等方法来对区域风险进行评估。目前，比较普遍的研究方法是自然灾害风险等级评估^[10~12]。一般采用的模型为：

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

即：风险＝（自然灾害）危险性×（承灾体）脆弱性

式（1）中的危险性一般包括自然灾害的强度和发生的可能性两个因素。因此，危险性近似于灾害发生预报。由于此项工作复杂，难度大，许多自然灾害的机理尚未完全明了。因而，许多研究的做法是将自然灾害的危险性与脆弱性分等定级。按照风险事件发生的频率设定其可能性等级，并按照损失的强度设定风险事件的强度等级^[13]，最终根据风险评估矩阵来表示自然灾害的风险等级（表 1）。

这种等级划分结果优点是：在相关数据不够充足的情况下，能够比较各制图单元（如县域或省域）风险相对大小，结果相对容易获得。但其不足表现在：后果等级和可能性等级没有必然联系，两者生成的风险等级是组合出来的。未能体现各风险等级的具体内容，比如人员伤亡、经济损失、资源环境破坏等。

随着自然灾害风险向评估结果定量化、区域综合化、管理空间化的方向发展，原有的自然灾害风险等级评估由于不能定量表现各等级之间的具体差别，因而未能满足灾害风险管理的要求。现实社会的防灾减灾工作迫切要求风险评估结果具有确定的定量风险值。由于自然灾害预报的复杂性，目前尚没有任何一个灾种能够实现时空尺度上的预报，只是在某些灾害预计的准确度比另一些高而已。自然灾害风险的评估除了灾害的发生之外，更重要的是可能性损失。鉴于我国实际防灾减灾工作的要求，一方面不能仅停滞在灾害预报上；另一方面要体现灾害的可能损失，因而现实风险管理需要对灾害损失的评估进行改进。本研究在式（1）理念的基础上，参考他人研究^[14~21]，认为灾害风险应由自然灾害破坏力（D），承灾体暴露量（E）^[22]，灾害发生可能性或孕灾环境参数（P）三个因子组成：

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

即：风险＝（致灾因子）破坏力×（承灾体）暴露量×孕灾环境参数

致灾因子破坏力（D）是指灾害的物理损毁标准，应该由试验获得。但鉴于目前此类试验不多且不够系统，所需数据只能从以往的灾害后果中获得。这方面将借助于许多关于灾情的研究结果。承灾体的暴露量（E），即全国或不同区域的社会经济、资源环境状况，从统计数据库、空间数据库、地图集、行业的研究等可以获取需要的数据。灾害发生的可能性或孕灾环境参数（P），自然灾害的发生虽然有其预报上的复杂性，但还是有其遵循

表 1 自然灾害风险等级^[13]

Tab. 1 Natural disaster risk grades

		后果等级				
		低	较低	中	高	
可能性等级		4	3	2	1	
	极小	4	16	12	8	4
	不太可能	3	12	9	6	3
	有可能	2	8	6	4	2
	很可能	1	4	3	2	1

的客观规律。比如说周期性发生的自然现象所引起的灾害，像台风、洪旱等，其发生的范围也基本上是可以识别；另外的一些灾害，像地震、地质灾害是与其孕灾的环境密切相连，其范围和频率也是可以识别出来。这个因子的数据可以从历史灾害发生纪录和相关的专业研究成果中获取，如台风路径图，地震带分布图等。其中， $(D \times E)$ 为承灾体脆弱性的量化结果，可以看作自然灾害的理论损失。这样，自然灾害的风险即为这一理论损失与灾害可能性的乘积。在现实中，承灾体理论损失与致灾因子破坏力密切相关，是暴露量与致灾因子破坏力的函数。例如房屋损毁状况决定于房屋的建筑结构和地震烈度，这一点应该不存在地域差异。

2 山西省地震风险案例

山西省是一个地震灾害损失较严重的省份，具有较高的地震灾害风险。同时，地震灾害孕灾环境数据以及人口、房屋等承灾体数据收集整理较充分，便于风险评估与模型方法探研。因此，本研究将以山西省地震灾害为例，详细说明地震灾害风险的评估，包括风险因子的选择，损失模型及风险算法的构建，并计算山西省不同等级地震风险和综合地震风险，并进行风险等级划分。

2.1 研究区概况

山西省位于我国北部，地处黄土高原中部。由于地质构造的演变，地质地貌类型复杂，新构造运动强烈，是一个地震灾害频发、灾害损失严重的省份。境内有山西活动地震带，属于中国 23 个活动地震带之一，是一个著名的大陆板块内地震带。总体呈北北东的“S”型走向^[23]。随着山西省经济社会的快速发展以及人口数量的大幅度增加，地震灾害造成的损失越来越严重。据统计，烈度在 VII 度及 VII 度以上地区的面积约占全省总面积的 42% 左右。地震灾害已经严重影响山西省区域经济社会的正常发展，区域人口的生存与发展面临严峻的挑战。因此，山西省已被列为全国地震重点监视防御区和地震危险区，防震减灾工作任重而道远。根据 2008 年山西省行政区划，现辖有 11 个地级市、23 个市辖区、11 个县级市、85 个县。面积约 16 万 km²，人口 3410.64 万人^[24]。

2.2 地震灾害风险评估

综合自然灾害风险评估内容的完整性和数据可获取性，本研究选取三类承灾体（房屋、人员、经济）进行评估。其概念模型图 1。

图 1 所包括的是模型最基本的内容，如果承灾体数据获取允许和破坏力明确的基础上，可以增加评估的项目，如地震对环境的破坏等。

根据式（2）原理和图 1 的结构，首先分别构建各项因子的计算模型：

（1）房屋损毁风险

$$RB = \left[\sum_{i=1}^n (B_{hi} \times B_{hit}) \right] \times K_e \tag{3}$$

RB 为房屋损毁风险； B_{hi} 为某类建筑物的损毁率； B_{hit} 为县域某类建筑物的总量； K_e 为孕灾环境参数； n 为房屋建筑类型，分为钢混、砖混、砖木、土木四种结构。

（2）人员伤亡风险

$$RP = (P_h \times P_t) \times K_e \tag{4}$$

RP 为人员伤亡风险； P_h 为人员伤亡率； P_t 为人口总数。

（3）经济损失风险

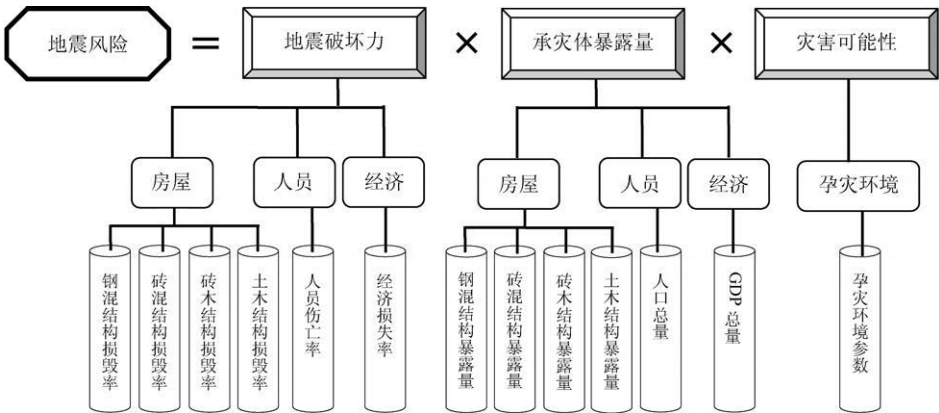


图 1 地震灾害风险评估概念模型

Fig 1 Conceptual model of seismic-disaster risk assessment

$$RE=(E_h\times E_t)\times K_e\tag{5}$$

RE 为经济损失风险；E_h 为经济损失率；E_t 为经济总量。

三个因子首先按照微度、轻度、中度和重度地震的分别计算其各自的损失，然后按照等概率发生对不同等级地震损失分别进行合成，获得地震灾害风险。

2 3 数据获取与处理

(1) 地震灾害破坏力 D

地震灾害破坏力，即地震活动对承灾体的物理损毁标准，目前试验不足以支撑研究，只能从以往的震害资料中获得。本研究采用地震烈度作为地震强度的表征指标。具体建立过程是利用震害资料，针对不同承灾体的群体特征，根据宏观现象和定量指标相统一的原则，把相同或近似的情况划分在一起来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。房屋破坏率根据《中国地震烈度表》（GB/ T17742—2008）等^[25~27]对我国地震烈度分级（表 2），确定各级地震灾害的平均损毁率。在房屋结构分类与震害等级划分的基础上，以地震灾情统计资料为依据，在参考前人研究成果^[28, 29]以及国家相关标准，建立适合我国地震灾害风险评估的房屋破坏率标准（表 3）。

表 2 我国地震灾害等级分类标准^{22,25 26}

Tab 2 Classification standard of seismic-disaster

地震 烈度/度	地震 震级/级	地震动峰值 加速度/（m/ s ² ）	等级 类别
I ~ V	<5	< 0.05 g	微度地震
VI~ VII	5~6	0.05~0.15 g	轻度地震
VIII~ IX	6~7	0.2~0.4 g	中度地震
X ~ XII	≥7	≥0.4 g	重度地震

表 3 地震灾害房屋破坏率标准

Tab 3 Building damage ratio standard of seismic-disaster

损失指标 地震等级	房屋破坏率/ %			
	土木结构	砖木结构	砖混结构	钢筋混凝土
微度地震	0	0	0	0
轻度地震	15（4.5~21）	10（4.5~19.5）	8（4.5~18.5）	5（3.5~15）
中度地震	50（39~61）	40（36.5~58）	35（30~57）	20（20~50）
重度地震	100（86~100）	95（84~100）	90（83~100）	60（60~100）

注：表中给出的“房屋破坏率”是参考值，括弧内给出的是变动范围，表 4 同。

基于地震灾害历史灾情的分析^[30]，参考他人研究成果^[28~34]，建立我国地震灾害风险评估的人口伤亡率与经济损失率标准（表 4）。其中，地震灾害经济损失率标准制定的前提是：由地震灾害导致的直接损失和间接损失与该地区的经济条件（GDP 或 GNP）直接相关。

(2) 承灾体暴露量 E

承灾体暴露量是指研究区域内房屋建筑、居民人口、社会经济等方面的数量分布状况。这些数据通过山西省统计年鉴等获得^[35, 36] 其中涉及的社会经济总量采用宏观经济指标——国内生产总值（GDP）来描述。

(3) 孕灾环境参数 K 。

孕灾环境参数是指研究区域未来地震灾害发生的可能性。尽管地震灾害是突发性地质灾害，属于难以预测的事件，但从长时间序列和物理环境来看具有一定发生必然性的可能。本研究采用历史地震灾害发生情况和孕灾环境等定量分析得到孕灾环境参数，标准见表 2。一般认为，在已经发生地震灾害的地方、有充分地质活动断裂构造发育的地方^[37~41] 等将有发生地震灾害的可能，至少是较小等级的地震的发生可能性很大。本研究将山西省历史地震烈度分布、山西省地震活动断裂带分布以及山西省地震动峰值加速度^[23] 三方面综合分析得到孕灾环境参数（图 2，表 5）。

表 4 地震灾害人口伤亡率与经济损失率标准
Tab 4 Standards of population mortality and economic loss rate of seismic disaster

损失指标 地震等级	人口伤亡率/ %	经济损失率/ %
微度地震	0	0.5 (0~0.5)
轻度地震	0.1 (0.05~0.3)	5 (0.5~20)
中度地震	2 (0.5~3)	20 (5~50)
重度地震	10 (5~20)	60 (50~100)

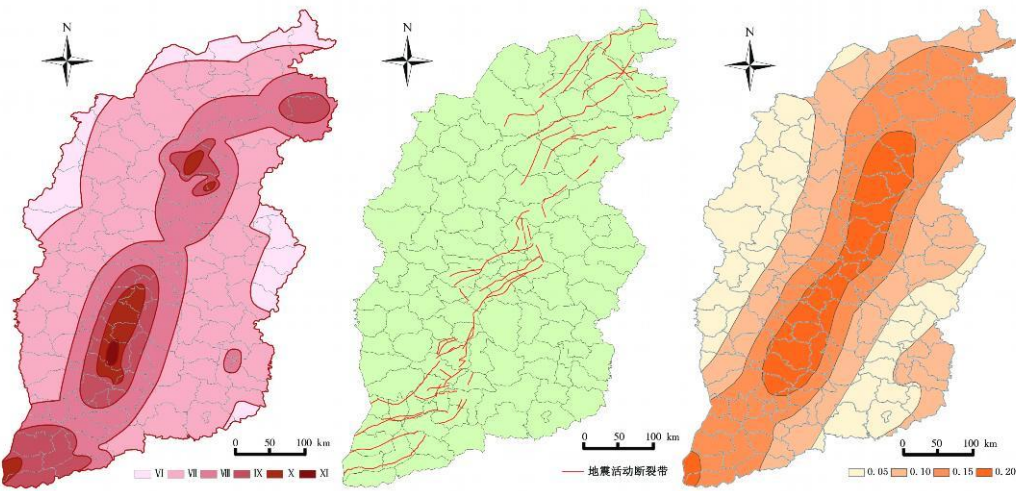


图 2 山西省地震灾害孕灾环境

(左: 历史地震综合烈度; 中: 地震活动断裂带分布; 右: 地震动峰值加速度)

Fig 2 Disaster-breeding environments of Shanxi seismic disaster

(left: History seismic integrated intensity; middle: Seismic activity fault belts distribution; right: Seismic peak ground acceleration)

表 5 山西省县市孕灾环境参数举例

Tab 5 Disaster-breeding environment parameters of Shanxi province

县市区	历史烈度/度	断裂带分布	峰值加速度/g	孕灾环境参数			
				微度地震	轻度地震	中度地震	重度地震
洪洞县	11	1	0.2	1	1	1	0.667
灵石县	10	1	0.2	1	1	1	0.667
霍州市	10	1	0.2	1	1	1	0.667
灵丘县	9	1	0.15	1	1	0.667	0.333
襄汾县	9	1	0.2	1	1	1	0.333
古县	9	0.5	0.2	0.833	0.833	0.833	0.167
汾阳市	9	1	0.15	1	1	0.667	0.333
太原市辖区	8	1	0.2	1	1	1	0.333
潞城市	8	0	0.1	0.667	0.667	0.333	0
垣曲县	8	0.5	0.1	0.833	0.833	0.5	0.167
朔州市辖区	7	1	0.15	1	1	0.333	0.333
右玉县	7	0	0.1	0.667	0.667	0	0
天镇县	6	1	0.1	1	1	0.333	0.333
和顺县	6	0	0.1	0.667	0.667	0	0

2.4 地震灾害风险的标准化与分级

在计算了房屋、人员、经济可能损失结果之后，按照研究区域（山西省）以县为单位进行分别统计房屋、人员和经济的损失情况（不发生房屋损毁、人员伤亡和经济损失的为“基本无风险”）。为了在县域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。具体的方法是，将各县的各个损失项进行自然对数转换后分别计算各自标准差，具体参照式（6）、式（8）、式（10）。然后对“距标准差”进行分级赋值，即式（7）、式（9）、式（11）：负一个标准差以上的为轻微（0.25）、不足负一个标准差的为轻度（0.50）、不足正一个标准差的为中度（0.75），正一个标准差以上的为重度（1.00）。

（1）房屋损毁标准差：

$$\alpha_{RB} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RB_{hi} - \overline{RB})^2}{n-1}}$$

(6)

α_{RB} 为房屋损毁标准差， RB_{hi} 为第 i 个县 的损毁数， $\overline{RB}$ 为区域各县房屋损毁平均数， n 为研究区域中县的总数。

（2）房屋损毁距标准差计算：

$$RB_{ij} = \frac{RB_{ij} - \overline{RB}}{\alpha_{RB}}$$

(7)

RB_{ij} 为第 j 县的房屋损毁距标准差值。

（3）人员伤亡标准差计算：

$$\alpha_{RP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RP_{hi} - \overline{RP})^2}{n-1}}$$

(8)

α_{RP} 为人员伤亡标准差, RP_{hi} 为第 i 个县人员伤亡数, $\overline{RP}$ 为区域各县人员伤亡平均数。

(4) 人员伤亡距标准差值:

$$RP_{ij} = \frac{RP_i - \overline{RP}}{\alpha_{RP}} \tag{9}$$

RP_{ij} 为第 j 县的人员伤亡距标准差值。

(5) 财产损失标准差计算:

$$\alpha_{RF} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RF_{hi} - \overline{RF})^2}{n-1}} \tag{10}$$

α_{RF} 为财产损失标准差, RF_{hi} 为第 i 个县财产损失数, $\overline{RF}$ 为区域各县财产损失平均数。

(6) 财产损失距标准差值:

$$RF_{ij} = \frac{RF_i - \overline{RF}}{\alpha_{RF}} \tag{11}$$

RF_{ij} 为第 j 县的财产损失距标准差值。

对三个因子的距标准差赋予标准值, 这样即可将不同的损失进行分等, 表 6 为赋值结果, 然后按五类分别对应于风险强度。

将三个指标的标准值相加, 得到每一个县的地震风险标准值, 式 (12)。

$$RE_i = RB_i + RP_i + RF_i \tag{12}$$

对于不同灾种的综合, 首先计算出每个县的各个灾害风险标准值, 将所有的标准值相加, 然后按照前面的标准差方案进行综合灾害风险等级划分。在本研究中, 由于三类风险损失基本都呈对数分布 (图 3), 因而在做

表 6 不同承灾体损失状况标准化

Tab 6 Loss standardization of different hazard-bearing

赋标准值	1 00	0 75	0 50	0 25	0
距标准差值					
房屋 RB_{ij}	> 1	0~1	-1~0	<-1	0 (无损失)
人员 RP_{ij}	> 1	0~1	-1~0	<-1	0 (无损失)
经济 RF_{ij}	> 1	0~1	-1~0	<-1	0 (无损失)
相当于风险等级	重度	中度	轻度	微度	无

标准差、距标准差计算和赋标准值之前, 先对实际的可能损失值做了自然对数的转换, 以便使不同的损失更为合理地划分为不同的等级。

3 案例结果分析

将各个县的地震风险标准值, 按照上面的标准差方法进行计算, 可以得到各个县的风险等级。按照前面的流程设计进行计算, 由于篇幅所限以房屋为例进行风险计算 (表 7)。同样方式计算人员伤亡风险和经济损失风险, 并依照式 (12) 相加并进一步的标准差计算和分级, 最终得到山西省各县的地震风险等级 (表 8、图 4)。

按照地震强度等级计算山西省地震风险的总体可能损失如表 9 所示。分析表 8, 可以得出山西省各县市之间地震灾害综合风险差异明显, 风险最高的是太原市辖区、大同市辖区、晋中市辖区、运城市辖区、临猗县、永济市、忻州市辖区、原平市、临汾市辖区、襄汾县、洪洞县、清徐县、平遥县、介休市、霍州市等 15 个县市区 (图 4)。

表 7 山西省地震房屋损毁风险与等级

Tab 7 Building-damage risk and its grades of Shanxi seismic disaster

县市区	房屋损毁（间）	对数值	距标准差	标准值	县市区	房屋损毁（间）	对数值	距标准差	标准值	县市区	房屋损毁（间）	对数值	距标准差	标准值
太原市区	266881	12.49	1.95	1.00	繁峙县	39711	10.59	0.72	0.75	阳泉市区	6715	8.81	-0.43	0.50
原平市	160670	11.99	1.63	1.00	山阴县	33304	10.41	0.61	0.75	长治县	6592	8.79	-0.44	0.50
临汾市区	148730	11.91	1.57	1.00	灵丘县	31638	10.36	0.57	0.75	陵川县	5129	8.54	-0.60	0.50
大同市区	114045	11.64	1.40	1.00	怀仁县	30423	10.32	0.55	0.75	屯留县	4951	8.51	-0.62	0.50
洪洞县	111441	11.62	1.39	1.00	交城县	30202	10.32	0.55	0.75	临县	4905	8.50	-0.63	0.50
临猗县	99273	11.51	1.32	1.00	阳高县	28591	10.26	0.51	0.75	蒲县	4394	8.39	-0.70	0.50
忻州市区	98288	11.50	1.31	1.00	侯马市	26495	10.18	0.46	0.75	平定县	4244	8.35	-0.72	0.50
定襄县	97278	11.49	1.30	1.00	阳曲县	24065	10.09	0.40	0.75	晋城市区	3509	8.16	-0.85	0.50
永济市	93436	11.45	1.28	1.00	垣曲县	23971	10.08	0.39	0.75	襄垣县	3498	8.16	-0.85	0.50
运城市区	89303	11.40	1.25	1.00	平陆县	23960	10.08	0.39	0.75	安泽县	3275	8.09	-0.89	0.50
襄汾县	85189	11.35	1.21	1.00	长治市区	23388	10.06	0.38	0.75	昔阳县	3122	8.05	-0.92	0.50
夏县	84527	11.34	1.21	1.00	天镇县	23089	10.05	0.37	0.75	黎城县	2872	7.96	-0.97	0.50
万荣县	76197	11.24	1.14	1.00	汾西县	23085	10.05	0.37	0.75	平顺县	2780	7.93	-0.99	0.50
清徐县	71263	11.17	1.10	1.00	曲沃县	18109	9.80	0.21	0.75	岚县	2555	7.85	-1.05	0.25
平遥县	70812	11.17	1.10	1.00	浮山县	17684	9.78	0.20	0.75	河曲县	2369	7.77	-1.10	0.25
晋中市区	64758	11.08	1.04	1.00	大同县	17071	9.75	0.18	0.75	左权县	2369	7.77	-1.10	0.25
五台县	64214	11.07	1.03	1.00	盂县	16997	9.74	0.17	0.75	沁县	2191	7.69	-1.15	0.25
稷山县	60331	11.01	0.99	0.75	壶关县	16272	9.70	0.15	0.75	柳林县	2125	7.66	-1.17	0.25
汾阳市	58215	10.97	0.97	0.75	沁源县	15984	9.68	0.14	0.75	静乐县	1881	7.54	-1.25	0.25
介休市	56854	10.95	0.95	0.75	沁水县	14970	9.61	0.09	0.75	兴县	1868	7.53	-1.25	0.25
朔州市区	55727	10.93	0.94	0.75	寿阳县	13064	9.48	0.01	0.75	五寨县	1671	7.42	-1.32	0.25
太谷县	53748	10.89	0.92	0.75	广灵县	12520	9.44	-0.02	0.50	和顺县	1665	7.42	-1.32	0.25
新绛县	52174	10.86	0.90	0.75	武乡县	12272	9.42	-0.03	0.50	保德县	1301	7.17	-1.48	0.25
文水县	51927	10.86	0.90	0.75	古交市	11199	9.32	-0.10	0.50	偏关县	1298	7.17	-1.48	0.25
翼城县	51432	10.85	0.89	0.75	乡宁县	10903	9.30	-0.11	0.50	中阳县	1288	7.16	-1.49	0.25
孝义市	47125	10.76	0.83	0.75	潞城市	10440	9.25	-0.14	0.50	方山县	1260	7.14	-1.50	0.25
绛县	44652	10.71	0.80	0.75	离石区	9591	9.17	-0.19	0.50	右玉县	1214	7.10	-1.53	0.25
灵石县	43907	10.69	0.79	0.75	高平市	9484	9.16	-0.20	0.50	交口县	1142	7.04	-1.57	0.25
霍州市	43881	10.69	0.79	0.75	阳城县	9362	9.14	-0.21	0.50	岢岚县	1065	6.97	-1.61	0.25
祁县	43394	10.68	0.78	0.75	宁武县	9356	9.14	-0.21	0.50	娄烦县	1035	6.94	-1.63	0.25
代县	41914	10.64	0.75	0.75	左云县	8795	9.08	-0.25	0.50	石楼县	906	6.81	-1.72	0.25
芮城县	41700	10.64	0.75	0.75	泽州县	8643	9.06	-0.26	0.50	隰县	780	6.66	-1.81	0.25
河津市	40886	10.62	0.74	0.75	古县	8205	9.01	-0.30	0.50	吉县	562	6.33	-2.03	0.25
应县	40770	10.62	0.74	0.75	长子县	7250	8.89	-0.37	0.50	永和县	521	6.26	-2.07	0.25
浑源县	40276	10.60	0.73	0.75	神池县	7062	8.86	-0.39	0.50	大宁县	432	6.07	-2.19	0.25
闻喜县	40193	10.60	0.73	0.75	榆社县	7034	8.86	-0.39	0.50					

表 8 山西省地震灾害综合风险等级
Tab 8 Integrated risk grades of Shanxi seismic-disaster

县市区	总标准值	总距 标准差	风险等级	县市区	总标准值	总距 标准差	风险等级	县市区	总标准值	总距 标准差	风险等级
太原市区	3 00	1 56	重度	稷山县	2 25	0 53	中度	神池县	1 50	－0 49	轻度
大同市区	3 00	1 56	重度	新绛县	2 25	0 53	中度	安泽县	1 50	－0 49	轻度
晋中市区	3 00	1 56	重度	绛县	2 25	0 53	中度	蒲县	1 50	－0 49	轻度
运城市区	3 00	1 56	重度	垣曲县	2 25	0 53	中度	平定县	1 25	－0 84	轻度
临猗县	3 00	1 56	重度	芮城县	2 25	0 53	中度	长治县	1 25	－0 84	轻度
永济市	3 00	1 56	重度	代县	2 25	0 53	中度	襄垣县	1 25	－0 84	轻度
忻州市区	3 00	1 56	重度	繁峙县	2 25	0 53	中度	屯留县	1 25	－0 84	轻度
原平市	3 00	1 56	重度	曲沃县	2 25	0 53	中度	黎城县	1 25	－0 84	轻度
临汾市区	3 00	1 56	重度	翼城县	2 25	0 53	中度	长子县	1 25	－0 84	轻度
襄汾县	3 00	1 56	重度	浮山县	2 25	0 53	中度	陵川县	1 25	－0 84	轻度
洪洞县	3 00	1 56	重度	汾西县	2 25	0 53	中度	昔阳县	1 25	－0 84	轻度
清徐县	2 75	1 22	重度	侯马市	2 25	0 53	中度	临县	1 25	－0 84	轻度
平遥县	2 75	1 22	重度	文水县	2 25	0 53	中度	平顺县	1 00	－1 18	微度
介休市	2 75	1 22	重度	交城县	2 25	0 53	中度	柳林县	1 00	－1 18	微度
霍州市	2 75	1 22	重度	孝义市	2 25	0 53	中度	娄烦县	0 75	－1 52	微度
长治市区	2 50	0 88	中度	汾阳市	2 25	0 53	中度	沁县	0 75	－1 52	微度
朔州市区	2 50	0 88	中度	古交市	2 00	0 19	中度	右玉县	0 75	－1 52	微度
灵石县	2 50	0 88	中度	天镇县	2 00	0 19	中度	左权县	0 75	－1 52	微度
万荣县	2 50	0 88	中度	广灵县	2 00	0 19	中度	和顺县	0 75	－1 52	微度
闻喜县	2 50	0 88	中度	沁源县	2 00	0 19	中度	静乐县	0 75	－1 52	微度
夏县	2 50	0 88	中度	寿阳县	2 00	0 19	中度	五寨县	0 75	－1 52	微度
河津市	2 50	0 88	中度	平陆县	2 00	0 19	中度	岢岚县	0 75	－1 52	微度
定襄县	2 50	0 88	中度	古县	2 00	0 19	中度	河曲县	0 75	－1 52	微度
五台县	2 50	0 88	中度	乡宁县	2 00	0 19	中度	保德县	0 75	－1 52	微度
阳曲县	2 25	0 53	中度	离石区	2 00	0 19	中度	偏关县	0 75	－1 52	微度
阳高县	2 25	0 53	中度	左云县	1 75	－0 15	轻度	吉县	0 75	－1 52	微度
灵丘县	2 25	0 53	中度	阳泉市区	1 75	－0 15	轻度	大宁县	0 75	－1 52	微度
浑源县	2 25	0 53	中度	壶关县	1 75	－0 15	轻度	隰县	0 75	－1 52	微度
大同县	2 25	0 53	中度	武乡县	1 75	－0 15	轻度	永和县	0 75	－1 52	微度
孟县	2 25	0 53	中度	潞城市	1 75	－0 15	轻度	兴县	0 75	－1 52	微度
沁水县	2 25	0 53	中度	泽州县	1 75	－0 15	轻度	石楼县	0 75	－1 52	微度
山阴县	2 25	0 53	中度	榆社县	1 75	－0 15	轻度	岚县	0 75	－1 52	微度
应县	2 25	0 53	中度	宁武县	1 75	－0 15	轻度	方山县	0 75	－1 52	微度
怀仁县	2 25	0 53	中度	晋城市区	1 50	－0 49	轻度	中阳县	0 75	－1 52	微度
太谷县	2 25	0 53	中度	阳城县	1 50	－0 49	轻度	交口县	0 75	－1 52	微度
祁县	2 25	0 53	中度	高平市	1 50	－0 49	轻度				

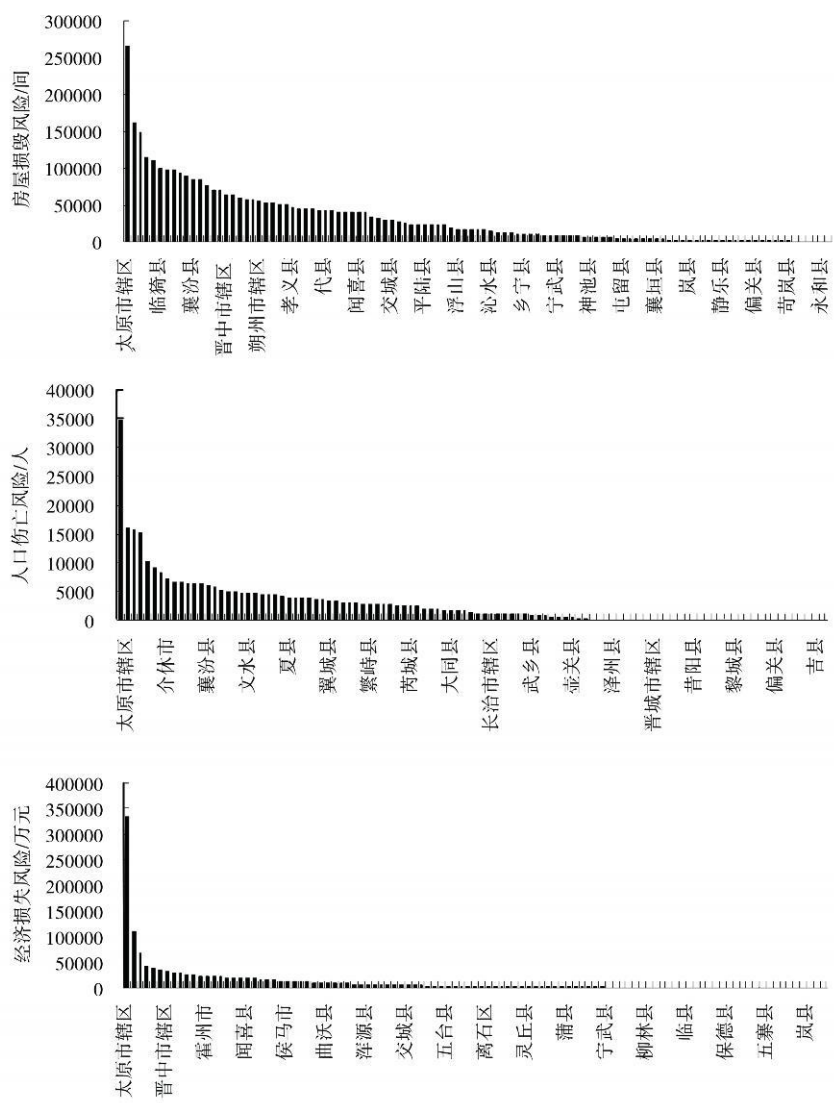


图 3 可能损失排序分布

Fig. 3 Possible losses distributions

表 9 山西地震风险可能损失

Tab 9 Summary of possible loss of seismic hazard in Shanxi Province

地震等级	房屋损毁/ 间	人员伤亡/ 人	经济损失/ 万元
微度	0	0	74453 74
轻度	2267159	28820	744537 44
中度	5138925	331078	1816596 30
重度	6302242	835503	2613618 10
综合	3427081	298850	1312301 40

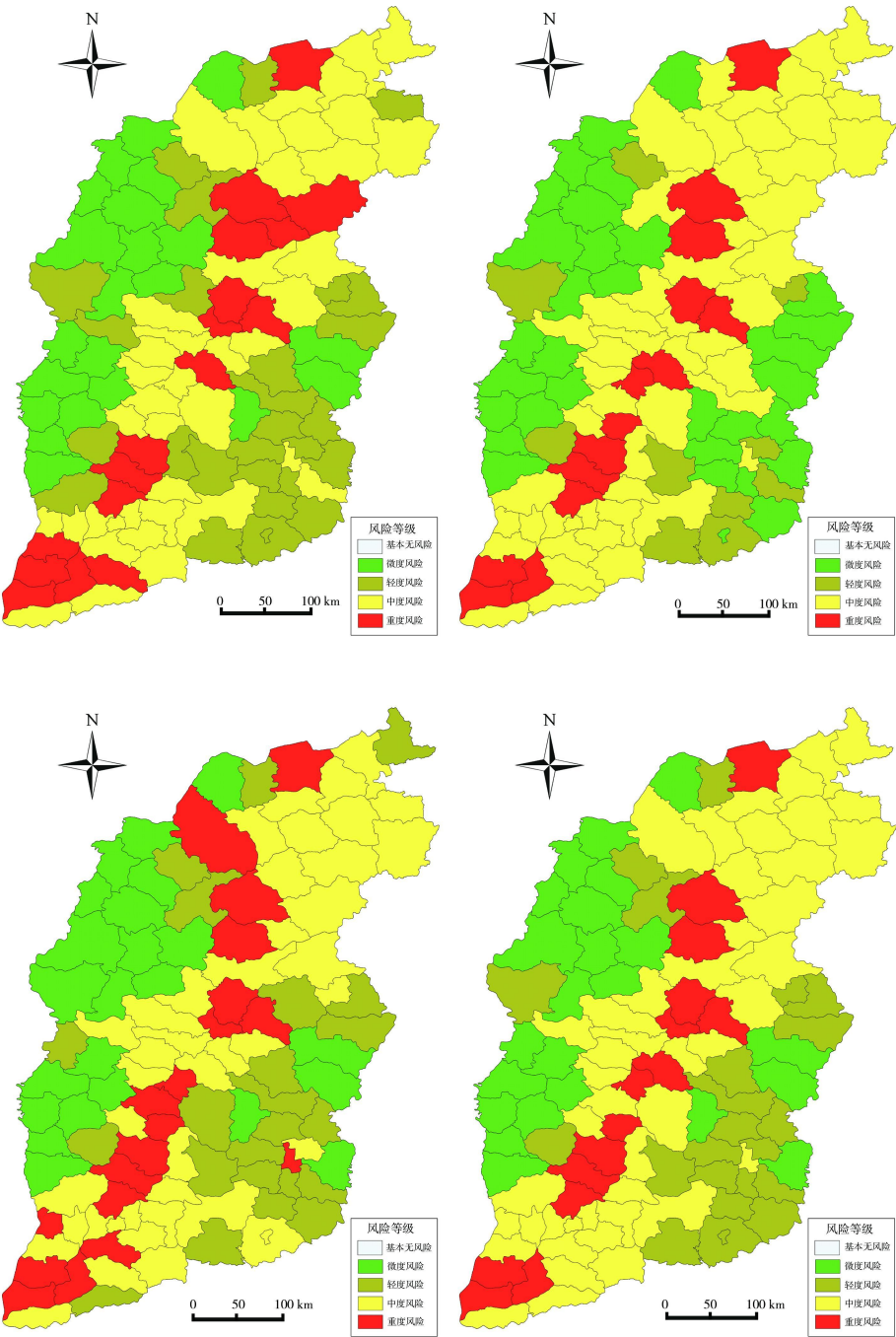


图4 山西省地震灾害风险等级

(A: 房屋损毁风险; B: 人口伤亡风险; C: 经济损失风险, D: 综合)

Fig 4 Seismic-hazard risk classes of Shanxi province

(A: building-damage risk; B: population mortality risk;

C: economy loss risk, D: integrated seismic disaster risks)

4 结论

本文在改造传统风险评估方法的基础上,提出了新的自然灾害风险评估方法,并且应用标准差的计算和距标准差的幅度等对承灾体可能受损进行标准化,划分出风险等级。以山西省地震灾害风险为例,验证了上述方法,得出以下主要结论:

(1) 通过改进自然灾害风险评估方法,通过孕灾环境得到了灾害发生的可能,可以定量预估自然灾害风险的可能损失。

(2) 评估自然灾害风险的关键是致灾因子破坏力的确定,即其对承灾体的破坏程度,称为损失标准(或叫脆弱性曲线)。自然灾害风险为特定灾害破坏力下,承灾体理论损失与发生可能性的乘积。

(3) 通过对一定区域内可能损失风险的数学转换,应用标准差、距标准差的计算以及标准值的赋值,可以对该区域的风险损失进行标准化,即可对风险损失大小进行分级。由于不同等级的计算源于可能损失的大小,因而对于不同的等级可以回溯到具体的损失。

(4) 通过案例区——山西省地震灾害风险的计算,显示了本方法既可估算自然灾害的风险损失,同时亦可识别区域自然灾害风险的不同等级。此方法既可向其他区域和全国推广,也可以应用于其他种类自然灾害风险的评估,而且可以用于同一区域中不同灾种风险评估的综合集成。

需要说明的是,由于各个地区地震烈度、承灾体类型和易损性各不相同,成灾机理和成灾过程也不同,所以地震灾害损失标准的建立是复杂而困难的。存在数据依赖性大、统计离散和同质数据不足等问题。总之,目前建立的各类承灾体损失率与地震等级之间的关系是基于比较有限的震害资料统计所得,具有很大的离散性^[31~33]。分析结果是初步的,还需要不断积累更多的地震灾情资料来进行修正,使其更具有代表性。

对于人口灾损敏感性和经济损失敏感性,也应进一步分析过去的灾情数据,在人口方面对性别和年龄结构进行分别的统计,以确定不同性别和年龄结构的敏感性。而经济灾损敏感性则可按产业结构分别统计第一、第二、三产业 GDP 的损失敏感性。换句话说,其他承灾体要像房屋结构类型一样分门别类地统计出损失标准。以此为基础,逐步将承灾体的抗灾能力纳入风险的预估中。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅. 中国的减灾行动. 北京: 外文出版社, 2009
- [2] 中华人民共和国国务院办公厅. 国家综合减灾“十一五”规划. 北京, 2007
- [3] 史培军, 李宁, 叶谦, 等. 全球环境变化与综合灾害风险防范研究. 地球科学进展, 2009, 24(4): 428~435
- [4] 徐伟, 王静爱, 史培军, 等. 中国城市地震灾害危险度评价. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 9~15
- [5] 聂高众, 高建国, 马宗晋, 等. 中国未来 10~15 年地震灾害的风险评估. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 68~73
- [6] Shi P J, Du J, Ji M X, *et al*. Urban risk assessment research of major natural disasters in China. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2): 170~177
- [7] 朱良峰, 殷坤龙, 张梁, 等. 基于 GIS 技术的地质灾害风险分析系统研究. 工程地质学报, 2002, 10(4): 428~433
- [8] Remondo J, Bonachea J, Cendrero A. A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: from landslide susceptibility to quantitative risk assessment. *Landslides*, 2005, 2(4): 321~328
- [9] 王静爱, 史培军, 王平. 中国自然灾害时空格局. 北京: 科学出版社, 2006
- [10] Lee S, Pradhan B. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 2007, 4(1): 33~41

- [11] Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, *et al* Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 1999, 31(1-4): 181~216
- [12] Sarris A, Loupasakis C, Soupios P, *et al* Earthquake vulnerability and seismic risk assessment of urban areas in high seismic regions; application to Chania City, Crete Island, Greece. *Natural Hazards*, 2010, 54(2): 395~412
- [13] 全国减灾救灾标准化技术委员会. 综合灾害风险分类标准. 北京: 中国标准出版社, 2010
- [14] Balassanian S Y, Melkounian M G, Arakelyan A R, *et al* Seismic risk assessment for the territory of Armenia and strategy of its mitigation. *Natural Hazards*, 1999, 20(1): 43~55
- [15] Catani F, Casagli N, Ermini L, *et al* Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin. *Landslides*, 2005, 2(4): 329~342
- [16] Meroni F, Zonno G. Seismic Risk Evaluation. *Survey Geophys*, 2000, 21(2): 257~267
- [17] Nadim F, Kjekstad O. Assessment of global high-risk landslide disaster hotspots. *landslides* 2009, 3(11): 213~221
- [18] Dai F C, Lee C F, Ngai Y Y. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 2002, 64(1): 65~87
- [19] Zonno G, Garcia-Fernandez M, Jimenez M J, *et al* The SERGISAI procedure for seismic risk assessment. *Journal of Seismology*, 2003, 7(2): 259~277
- [20] Pasquale G D, Orsini G, Romeo R W. New developments in seismic risk assessment in Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2005, 3(1): 101~128
- [21] United Nations Disaster Relief Organization. *Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options (A Manual for Policy makers and Planners)*. New York: United Nations, 1991
- [22] 葛全胜, 邹铭, 郑景云, 等. 中国自然灾害风险综合评估初步研究. 北京: 科学出版社, 2008
- [23] 山西省地图集编纂委员会. 山西省灾害地图集. 济南: 山东省地图出版社, 2007
- [24] 山西省统计局, 国家统计局. 2009年山西省统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2009
- [25] 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. 中国地震烈度表(GB/T 17742-2008). 北京: 中国标准出版社, 2008
- [26] 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. 地震现场工作第4部分: 灾害直接损失评估(GB/T 18208.4-2005). 北京: 中国标准出版社, 2005
- [27] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- [28] Lantada N, Izarry J, Barbat A H, *et al* Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the risk-UE vulnerability index method. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010, 8: 201~229
- [29] 尹之潜, 杨淑文. 地震损失分析与设防标准. 北京: 地震出版社, 2004
- [30] 国家统计局, 民政部. 中国灾情报告(1949~1995). 北京: 中国统计出版社, 1995
- [31] Chen Y, Chen Q F, *et al* Assessment of global seismic loss based on macroeconomic indicators. *Natural Hazards*, 1998, 17(3): 269~283
- [32] Chen L S, Chen Y, Chen Q F, *et al* Vulnerability analysis in earthquake loss estimate. *Natural Hazards*, 2001, 23(2): 349~364
- [33] 陈棋福, 陈颢, 陈凌, 等. 全球地震灾害预测. *科学通报*, 1999, 44(1): 21~25
- [34] 高庆华, 马宗晋, 张业成, 等. 自然灾害评估. 北京: 气象出版社, 2007
- [35] 山西省人口普查办公室编. 山西省2000年人口普查资料. 北京: 中国统计出版社, 2002
- [36] 山西省统计局, 国家统计局. 2001年山西省统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001
- [37] 国家科委国家计委国家经贸委自然灾害综合研究组. 中国自然灾害区划研究的进展. 北京: 海洋出版社, 1998
- [38] 高庆华, 张业成, 刘惠敏, 等. 中国自然灾害风险与区域安全性分析. 北京: 气象出版社, 2005
- [39] Kijko A, Retief S, Graham G. Seismic hazard and risk assessment for Tulbagh, South Africa: Part I - Assessment of seismic risk. *natural hazards*, 2002, 26(2): 175~201
- [40] Kijko A, Retief S, Graham G. Seismic hazard and risk assessment for Tulbagh, South Africa: Part II - Assessment of seismic risk. *Natural Hazards*, 2003, 30(1): 25~41
- [41] 陈立春, 王虎, 冉勇康, 等. 玉树 $M_s 7.1$ 级地震地表破裂与历史大地震. *科学通报*, 2010, 55(13): 1200~1205

Methodology for assessment and classification of natural disaster risk: A case study on seismic disaster in Shanxi Province

LIU Yi¹, WU Shao-hong¹, XU Zhong-chun^{1,2}, DAI Erfu¹

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The study on possible losses is one of the most important points for disaster risk management. In this paper, the classical disaster risk-assessing model was modified to assess natural disasters risks, especially in quantifying possible loss and risk severe level. Disaster risk was attributed to three main factors: disaster damage force (D), disaster resilience society exposure (E), and disaster-breeding environment (P). Disaster risk is the function of these three factors. Damage force (D) indicates damage rate of a disaster in a certain intensity, which might be obtained from results of disaster events in the past. Exposure (E) includes mainly personnel, property/economic and natural resources. D and E give the quantified vulnerability of a region. Disaster-breeding environment (P) gives the occurrence possibility of environmental conditions, such as geological structure, land surface materials, land cover, and cycling occurrence event etc. P was characterized by a parameter in this paper. Shanxi Province, a high frequent earthquake region, was taken as a case study. In the case, D and E were concerned with issues of structure of buildings, casualty rate (mortality/wounded) and GDP. Parameter of P was determined by combining historical seismic integrated intensity, seismic activity fault belts distribution, and seismic peak ground acceleration. The basic risk calculating unit was based on the county level. After possible losses were calculated, integrated loss levels and their severe levels were ranked with relative calculation on standard deviation. The results showed that: the damaged building might be more 3 million rooms, the direct economic loss would be over 13 billion RMB Yuan, and the total casualty could be near 300 thousand. In Shanxi Province, there were great differences between counties in terms of the integrated risk. Integrated risk levels were ranked into four classes. In general, high risk would mainly occur in urban areas. The highest risk level was observed in districts under the jurisdiction of 15 cities such as Taiyuan, Datong and Jinzhong. This method has improved in two aspects: firstly quantifying possible losses, and secondly avoiding the constraint in disaster prediction to make the calculation possible.

Key words: risk; risk assessment; riskiness level classification; seismic disaster; Shanxi Province