

# 地震灾害人口易损性评估 ——以甘肃省陇南地区为例<sup>\*</sup>

习聪望, 何少林, 陈文凯

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 选取烈度、人口总量、老幼人口比例、坡度、断层、建筑物、地貌类型 7 个指标, 采用层次分析法对地震灾害人口易损性情况进行综合评估。为了提高数据准确度和精确度, 选取乡镇实际居民地为研究单元, 基于 GIS 平台分析了乡镇人口易损性空间分布, 计算了实际居民地的地震灾害人口易损性大小。结果表明: 陇南地区居民地地震灾害人口易损性处于中低等级, 人口易损性值大于 0.6 的居民地面积约占居民总面积的 1.2%; 在 196 个乡镇中人口易损值在 0.65~0.76 区间的乡镇有 6 个, 主要集中在陇南地区北部和中南部, 大部分位于礼县、武都区 and 文县, 其中最高的为礼县城关镇。研究结果通过汶川地震陇南地区实际烈度与人员伤亡情况进行了验证, 评价结果与实际情况有较好的一致性。

**关键词:** 地震灾害; 人口易损性; 层次分析法; 居民地; 陇南地区

**中图分类号:** P315.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2016)02-0288-07

## 0 引言

甘肃省是我国地震多发省份之一, 处于南北地震带北段, 历史上曾发生过多起破坏性地震, 造成过严重的人员伤亡。例如, 1920 年海原 8.5 级地震, 导致 273 465 ± 9 700 人死亡 (刘百箴等, 2003); 1927 年古浪 8.0 级地震, 导致 41 471 人死亡 (国家地震局, 1996)。理论上, 地震震级越大, 造成的损失也越大, 然而 2001 年昆仑山口西 8.1 级大地震, 产生了长达 426 千米的地表破裂带 (陈杰等, 2003), 却没有造成人员伤亡, 这种结果的出现与该区域的人口易损性密切相关。1992 年联合国公布了易损性 (Vulnerability) 的定义: “潜在损害现象可能造成的损失程度” (United Nations, 1992)。因此, 地震灾害人口易损性指的就是某地区地震灾害发生后可能造成的人口的损失程度。对于这一课题的研究属于地震灾害风险分析的范畴, 黄崇福 (1999) 提出, 自然灾害风险分析主要涉及致灾因子风险分析、承灾体易损性评价与灾情损失评估 3 个方面, 地震灾害人口易损性评估则是承灾体易损性分析中最重要的研究部分之一。

陇南地区位于甘肃省东南部, 处于西秦岭断

裂和东昆仑断裂的交汇部位, 且区内发育多条小型次级断裂。该地区地震活动性强烈, 历史上曾发生过多起强烈大地震, 其中 1879 年 7 月 1 日武都区、文县之间发生的 8 级大地震 (袁道阳等, 2014), 是本地区历史上最严重的一次地震。该区山脉众多、地形复杂, 崩塌、滑坡、泥石流等地震次生灾害频繁发生, 人口作为主要的承灾体之一, 常常遭遇严重损失, 因此研究地震灾害人口易损性是非常有必要的。本文基于 GIS 软件平台, 对甘肃省陇南地区居民地进行地震灾害人口易损性研究, 对该地区人口易损性提供空间上的展布, 为减灾、救灾、应急等工作提供科学依据。

## 1 地震灾害人口易损性评估方法

纵观国内外地震灾害人口易损性研究方法, 主要可以归纳为两类, 一类是基于历史震害资料的经验方法, 主要是将地震所造成的震害资料数据进行拟合回归, 得到损失程度与各个因子之间的关系; 另一类则是数学方法, 即依据数学公式进行人口易损性综合评价。常用的地震灾害人口易损性评估数学方法为灰色关联分析法、模糊综合评判法、层次分析法。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-04-13.

**基金项目:** 甘肃省青年科技基金计划 (145RJYA289)、中国科学院“西部之光”人才培养计划博士项目和国家地震社会服务工程甘肃省应急救援系统项目联合资助。

### 1.1 灰色关联分析法

邓聚龙在1981年于上海召开的中—美控制系统学术会议上的发言中首次使用“灰色系统”一词，标志着灰色系统理论的诞生（邓聚龙，1983）。此后，灰色关联分析法得到了广泛的应用，其相关理论也日益趋向成熟。

灰色关联分析法主要步骤：

(1) 无量纲处理，有极大型、极小型、定指标型和区间型；

(2) 关联系数：

$$\gamma_{ij} = \frac{\xi \max_i \max_j |f_{ij} - 1|}{|f_{ij} - 1| + \xi \max_i \max_j |f_{ij} - 1|} \quad (1)$$

式中， $\xi \in (0, 1)$  为分辨系数，可人为确定，一般取0.5， $i = 1, 2 \dots m$ ， $j = 1, 2 \dots n$ ， $n$  为评价指标个数， $m$  为样本数；

(3) 关联度计算公式为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_{ij} \quad (2)$$

灰色关联度分析法是一种处理非线性问题的有利工具，更注重描述因素间关系的强弱、大小、次序。但是灰色关联分析法存在一定的缺陷：首先，其量化模型所求出的关联度总为正值，不能全面反映事物之间的关系；其次，其量化模型的理论基础比较狭隘，缺乏科学依据，难以满足规范性操作的要求，易产生序数效应（虞晓芬，傅玳，2004）；最后，无量纲处理后，其关联度可能与原始数据有所差异。

### 1.2 模糊综合评判法

1965年美国加利福尼亚大学的自动控制专家Zadeh（1965）发表了《模糊集》，提出了模糊集理论，为人们进行风险分析研究提供了有力的工具。其后，许多研究者开始使用模糊方法处理风险问题（白海玲，黄崇福，2000）。

模糊综合评判法的主要步骤为：（1）确定目标和指标集；（2）给出评价值及单指标的标准；（3）确定隶属函数，确定的方法很多，常用的有降半正态分布、降（升）半梯形分布、降（升）半凹（凸）形分布、降（升）半哥西分布等；（4）构建评价矩阵；（5）确定权重，依据评价单元各因子的特征数据及各评价因子分级标准的级别均值确定权重矩阵；（6）最终结果计算，将权重矩阵乘以评价矩阵。

模糊综合评判法在指标集对于目标集的影响作用较模糊的研究中，具有一定的优势；对于多

因素、多指标问题，这一方法还体现出了综合考虑各个影响因素的能力，克服了传统数学方法结果单一的缺陷。但模糊综合评判法往往只考虑与评价目标有关的各种因素，未考虑因素之间的相关性，因此可能会重复考虑某一信息；其次，这一方法给出的评价值、单指标的标准和隶属函数形式具有一定的主观性；除此之外，评价结果较粗略、评价精度不高也是模糊综合评判法的一个缺点。

### 1.3 层次分析法

20世纪70年代中期，美国运筹学家Saaty提出了层次分析法（Analytic Hierarchy Process，简称AHP方法），该方法是一种定性和定量相结合的综合分析方法。近年来，层次分析法在不同领域得到了广泛应用。AHP的计算主要有以下步骤：

(1) 建立3层（目标层、准则层、指标层）具有逻辑关系的因子模型；

(2) 构造判断矩阵，进行本层次与之有关各因素之间相对重要性的比较，常采用Saaty标度方法（表1）；

表1 判断矩阵标度方法

Tab.1 The scale method of comparison matrix

标度	涵义
1	表示两个因素相比，具有相同的重要性
3	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素极端重要
倒数	因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 相比得 $b_{ij}$ ，且 <i>j</i> 与 <i>i</i> 比判断为 $1/b_{ij}$

注：2、4、6、8分别为上述相邻判断的中值

(3) 一致性检验。一致性指标（CI）的计算公式为

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

式中， $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征值， $n$ 为影响因子个数。

再根据

$$CR = CI / RI \quad (4)$$

式中， $RI$ 是平均一致性指标，其获取方式见表2。

表2 平均一致性指标值

Tab.2 The index value of mean consistency

<i>N</i>	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<i>RI</i>	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58

进行判断矩阵的一致性检验, 当  $CR < 0.1$  时, 判断矩阵有很好的-致性, 判断合理, 否则就需要对判断矩阵重新进行调整;

(4) 确定单层权重和总权重: 计算判断矩阵的特征向量, 即为单层权重  $a_{ij}$ , 总权重为

$$w_{ij} = l_i \prod_{j=1}^k a_{ij}. \quad (5)$$

(5) 进行实例计算: 通过  $W = \sum ij$  (总权重 \* 指标因子), 得到所要计算的结果。

层次分析法为目标研究提供了清晰的思维框架, 使得研究结构更加严谨; 增加了判断的客观性, 将定性判断与定量推断结合, 增强了科学性和实用性 (吴殿廷, 李东方, 2004), 评价精度较高。但当考虑的影响因素较多 (超过 9 个) 时, 构造判断矩阵和检验一致性时工作量大、复杂、困难, 且求取特征向量时也比较复杂, 在建立判断矩阵时, 只是将各方案的单个指标值进行比较, 没有考虑指标间的相互联系 (谭跃进等, 1999)。在实际问题中, 指标与指标之间有一定的联系, 因此层次分析法有可能扩大或减少某一指标的影响作用。

魏永明等 (1998) 运用关联度分析法和模糊综合评判法对北京市北部山区重点泥石流沟进行了危险度划分, 结果表明两种方法划分的危险度与实际情况基本符合, 模糊综合评判法更加理想一些。然而由于本文数据较多, 不易进行模糊综合评判, 而且模糊综合评判法只是得到一向量, 其最终结果较粗略。因此, 本文选择层次分析法对甘肃省陇南地区的人口易损性进行评估。

## 2 人口易损性的影响因素

Turner 和 Roger (2003) 认为易损性不仅与暴露性有关, 而且还与敏感性和恢复力有关。聂承静和杨林生 (2012) 利用人口总量、儿童人口比例、老年人口比例、人口密度、人均 GDP 这 5 个指标对中国地震灾害人口脆弱性进行了评估, 结果表明, 人口总量是人口脆弱性的主要因素。刘欢等 (2012) 提出地震灾害人口易损性常用人口灾损系数表示方法, 同时指出人口灾损系数应主要考虑致灾因子、孕灾环境和承灾体。

影响人口易损性的因素有很多, 笔者在前人的研究基础上选取其中比较主要的影响因素, 即烈度、人口总量、老幼人口比例、坡度、断层、

建筑物、地貌类型这 7 个指标来综合评估甘肃陇南地区地震灾害人口易损性情况。

### (1) 烈度

地震烈度可以反映某一地区的地面和各类建筑物遭受到一次地震影响后受到毁坏的强弱程度, 地震发生后, 不同的地区受地震影响的破坏程度不同, 烈度也不同。通过对我国历史上地震灾害产生的人员伤亡情况的研究, 可以看出人员伤亡大部分是由建筑物的破坏造成的 (傅征祥, 1994), 因此烈度与人口易损性的研究存在密切的关系。本文采用第四代烈度区划图作为烈度数据, 烈度区划图中采用的烈度是地震基本烈度, 即在 50 年期限内某地区在一般场地条件下可能遭遇超越概率为 10% 的烈度值。陇南地区第四代烈度分布图中有 VI 度、VII 度、VIII 度、IX 度 4 个区域值, 分别赋值 0.1、0.3、0.6、0.9。

### (2) 人口总量

如果大地震发生在人口总量很小的地区, 即使是处于高烈度区, 人员的伤亡数也会很小。如 1988 年 11 月 5 日青海唐古拉山发生  $M_s 6.8$  地震, 震中烈度高达 9 度, 却没有房屋倒塌和人员伤亡 (张肇诚等, 1999)。人口总量作为人口易损性的主要影响因素之一, 反映了人口暴露性的大小, 人口总量越大, 人口暴露性越大, 因此研究区内人口数量越多, 该区域发生地震后, 产生的人员伤亡损失一般也越多。

### (3) 老幼人口比例

老幼人口比例即老年人和儿童的总人数在人口总数中所占的比例。老年人和儿童作为弱势群体, 是灾害发生时最易受伤害的群体。老幼人口比例是人口敏感性的衡量指标之一, 其比例越大, 人口易损性越大。

### (4) 坡度

地震发生过后, 由于坡度的存在, 很容易产生次生灾害, 尤其是在甘肃陇南地区。2008 年 5 月 21 日汶川发生 8.0 级地震, 由于当地地形复杂, 山体受到严重的破坏, 引发了大范围崩塌, 导致形成了大量滑坡隐患点和堰塞湖, 使得进入重灾区的道路被阻断, 严重阻碍了救援队伍和物资的进入。同时特殊的地形易激活大量潜在的地质次生灾害, 严重危害灾区人民的生命和财产安全, 对人口易损性有很大的威胁, 其中汶川地震中陇南地区次生灾害造成的死亡人数与建筑物倒塌造

成的死亡人数相差不大。因此可以推断，甘肃陇南地区高山峻岭与峡谷、盆地相间的复杂地形决定了坡度对该区域人口易损性研究有一定的影响。

#### (5) 断层

地震是由地震活断层突发性快速错动引起的，因此地震与断层存在密不可分的关系。一般来说，离断层越近，地震发生时造成的破坏就越大，造成的人员损失就越大，其中沿断层线的破坏和人员损失最为严重（李山有等，2003）。在台湾集集地震中，距离车笼埔断层两侧 30 m 范围内人员遇难率高达 1.36%，当断层距增加 10 倍时，其人员遇难率降低为 0.3%（白志宏，2006）。因此可以把断层作为研究地震灾害人口易损性的一个重要影响因素。

#### (6) 建筑物

由于农民关于建筑物的抗震设防意识比较薄弱，农村的建筑物大部分未按烈度设防标准搭建。因此，一般来说，城市建筑物的抗震能力普遍高于乡镇和农村，因而地震发生时，城乡建筑物会产生不同程度的损毁，也会对生命造成不同程度的威胁。陇南市有 1 区、8 县、196 乡镇，可将其居民地分为 4 个等级，分别为区居民地、县居民地、乡镇居民地、农村居民地，分别赋值为 0.2、0.4、0.6、0.8。

#### (7) 地貌类型

陇南地区地形复杂，许多农村房屋建在半山腰或者山顶上，当地震灾害发生时，地形的放大效应会导致建筑物更易受到损坏，从而导致人员伤亡和经济损失。因此，地貌作为地震敏感性的影响因素之一（Panizza，1991），对人口易损性也具有一定的影响。不同的地貌类型有：平原（起伏度 < 30 m）、台地（起伏度 > 30 m）、丘陵（起伏度 < 200 m）、小起伏山地（起伏度 200 ~ 500 m）、中起伏山地（起伏度 500 ~ 1 000 m）、大起伏山（起伏度 1 000 ~ 2 500 m），分别赋值为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6。

### 3 数据处理与结果

收集并采用陇南市烈度数据、DEM 数据、断层数据、地貌数据、行政村人口数据、居民地数据以及乡镇人口数据，其中烈度数据来源于第四代烈度区划图，人口数据取自 2013 年 12 月统计数据，包括总人口、大于 65 岁的老年人人口以及小

于 14 岁的儿童人口。

由于一个行政村可能对应多个居民地，因此居民地与行政村之间的对应关系不明确；同时，行政村只有点数据，没有面状数据（行政边界），而且以行政村点为研究对象，坡度的提取会存在很大的误差，降低数据的准确度。因此本文选择以乡镇实际居民地为研究单元，将乡镇总人口按照居民地面积平均分配到居民地上，得到各个居民地人口分布情况，更加符合实际情况的要求。

基于 GIS 软件平台，将计算得到的各乡镇总人口按照居民地面积平均分布到居民地上。利用 Arc-Map 工具箱中 Spatial Analyst 菜单下的 Zonal Statistics as Table 工具提取出居民地的平均坡度和地貌类型。设  $a_1$  为烈度， $a_2$  为人口总量， $a_3$  为老幼人比例， $a_4$  为坡度， $a_5$  为断层， $a_6$  为建筑物， $a_7$  为地貌类型。

依据 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震灾害损失评估报告（甘肃灾区）、汶川地震陇南地区人员死亡原因以及前人对陇南地区的研究（王强等，2008；刘玮等，2010；陈文凯等，2011），并结合对地震灾害专家进行的调查问卷，最终得出构造的对应判断矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 & 2 & 4 & 2 & 4 \\ \frac{1}{2} & 1 & 3 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 & 3 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 3 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & 1 & 3 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

求出矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max} = 7.1070$ ，再通过式 (3)，得到  $CI = 0.0178$ 。由影响因素  $n = 7$ ，得到  $RI = 1.36$ ，依据式 (4) 求出  $CR = 0.0131$ 。由一致性判断标准，得到一致性检验的结果具有很好的 consistency。对应的矩阵特征向量为： $[0.7131 \ 0.3647 \ 0.1156 \ 0.3647 \ 0.2068 \ 0.3647 \ 0.1905]^T$ ，经过归一化处理得到各指标的权重依次为 0.3074，0.1572，0.0498，0.1572，0.0891，0.1572，0.0821。

首先,将人口总量、老幼人比例、坡度各指标标准化 ( $X' = x_i/x_{\max}$ )。由于断层距与地震灾害人口易损性成反比,因此断层距采用公式:

$$X' = (x_{\max} - x_i)/(x_{\max} - x_{\min}). \tag{7}$$

式中,  $x_{\max}$  是断层距最大值;  $x_{\min}$  是断层距最小值。再依据公式  $W = \sum ij$  (总权重 \* 指标因子), 得到陇南市实际居民地人口易损性数据。基于 GIS 平台获得陇南地区各个乡镇中居民地人口易损性, 即陇南地区居民地地震灾害人口易损性值, 如图 1 所示, 其中陇南地区大部分居民区人口易损性值主要集中在 0.36 ~ 0.42, 人口易损值在 0.58 ~ 0.69 区间的居民地主要位于礼县; 人口易损值在 0.47 ~ 0.58 和 0.58 ~ 0.69 区间的居民地主要集中在烈度Ⅷ度和Ⅸ度区域; 在人口易损性比较高的居民地中, 有一部分居民地人口总量小、老幼人口比例小, 但人口易损值大, 这是由于居民地处于高烈度和高坡度区域。

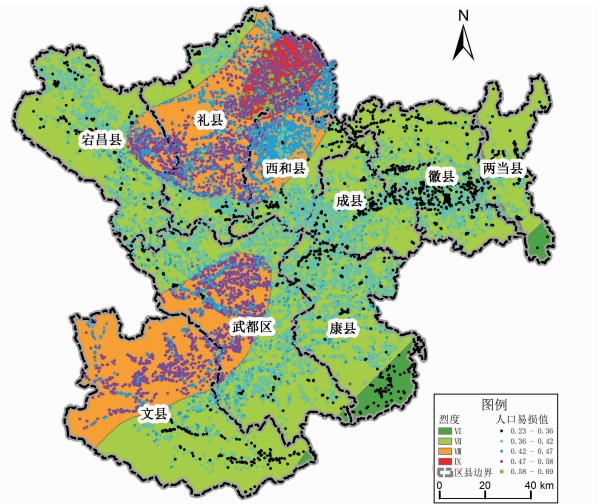


图1 陇南地区居民地地震灾害人口易损性评估结果  
Fig.1 The estimating result of seismic population vulnerability of settlement places in Longnan Region

其次,利用计算得到的居民地人口易损值,以0.1为刻度,分别统计每个区间值的居民地面积百分比,并依次将其划分为5个等级,分别为最低、低、中、高、最高。从图2中可以看出,人口易损值在0.4~0.5之间的居民地面积是最大的,约占总面积的44.33%;其次是人口易损值在0.3~0.4之间的居民地面积,约占总面积的34.79%。总体上说,陇南地区居民地地震人口易损性处于中低等级。

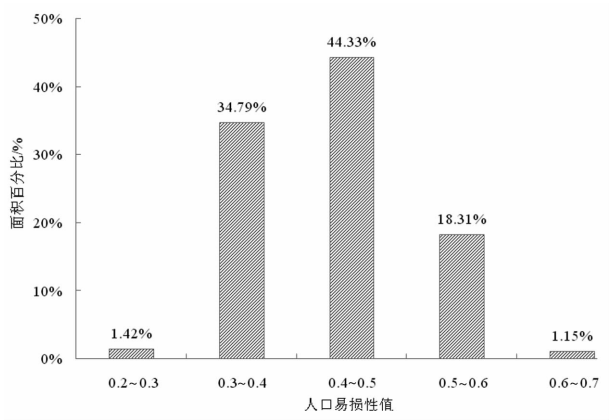


图2 不同人口易损值居民地面积百分比  
Fig.2 Percent of the settlement place area of different population vulnerability

最后,利用陇南地区居民地数据及乡镇人口数据,基于GIS平台统计计算陇南地区196个乡镇人口易损值。从图3可以发现,人口易损值在0.65~0.76区间的乡镇有6个,主要集中在陇南市北部和中西西南地区,集中分布在烈度Ⅷ度和Ⅸ度区域,分别为礼县城关镇、礼县石桥镇、礼县永兴乡、礼县盐官镇、武都区两水镇、礼县永坪乡,其中人口易损值最高的为礼县城关镇。

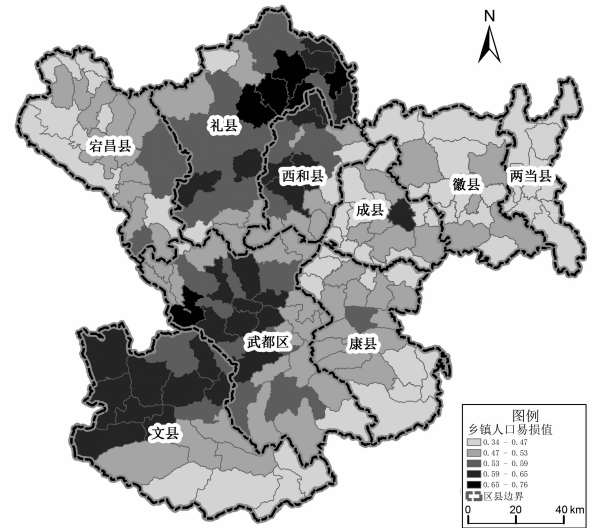


图3 陇南地区各个乡镇人口易损值分布  
Fig.3 Distribution of population vulnerability of every villages and towns in Longnan Region

4 实例验证

为了对人口易损性评估方法进行检验,本文选取汶川地震后陇南地区的震害资料进行实例分

析。2008年5月12日四川汶川发生8.0级地震，造成了严重的人员伤亡和经济损失，其中甘肃陇南地区有337人死亡。将汶川地震烈度代入到模型中，得到该方法下的汶川地震地区乡镇人口易损值（图4a），将其与实际的汶川地震陇南地区乡镇死亡人数（图4b）进行对比发现，在死亡人数超过1个的105个乡镇中有86（即81.9%）个乡镇的人口易损值大于0.46；在死亡人数超过4个的32个乡镇中有25（即78.1%）个乡镇的人口易损值大于0.52；在死亡人数超过6个的17个乡镇中有13（即76.5%）个乡镇的人口易损值大于0.55。

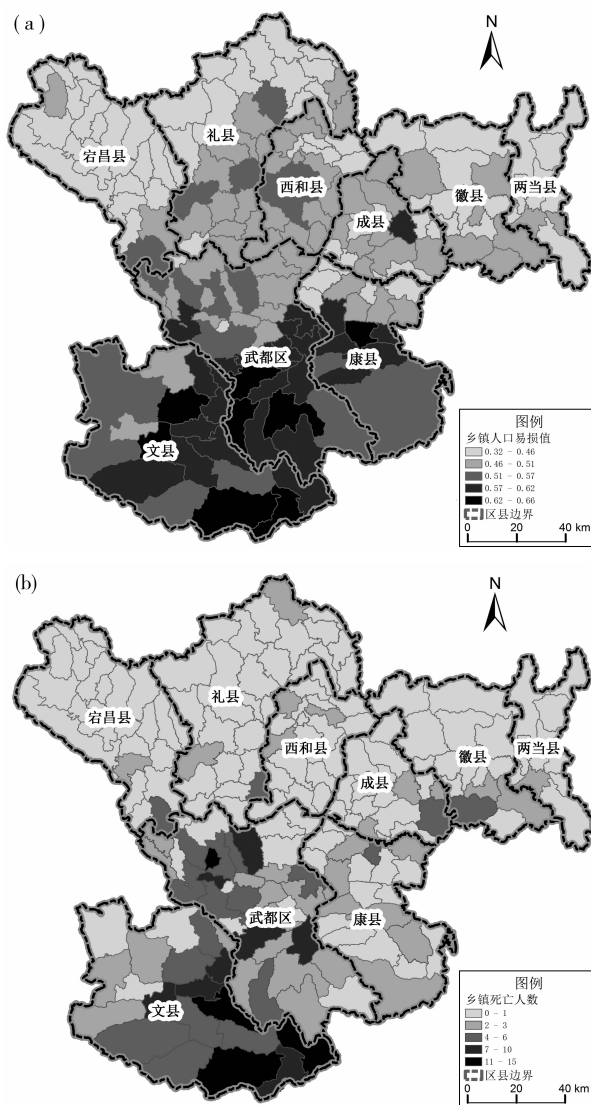


图4 汶川地震陇南地区乡镇人口易损性评估结果 (a) 与实际死亡分布图 (b)

Fig. 4 Assessment result of villages population vulnerability (a) and the distribution of actual death toll (b) of Wenchuan earthquake in Longnan region

由此可见，本文的研究方法计算得到的汶川地震陇南地区乡镇人口易损值与实际的陇南地区乡镇死亡人数的吻合率达到79%，具有较高的可信度。

## 5 结论与讨论

本文综合分析了陇南地区地震灾害人口易损性，但还存在一定的局限性：

(1) 通过对陇南地区地震灾害人口易损性的研究发现，陇南地区大部分居民区人口易损值主要集中在0.36~0.42之间；其中人口易损值在0.58~0.69区间的居民地主要位于礼县；人口易损值在0.47~0.58和0.58~0.69区间的居民地主要集中在烈度Ⅷ度和Ⅸ度区域；人口易损值在0.65~0.76区间的乡镇有6个，主要集中在陇南市北部和中西南地区，集中分布在烈度Ⅷ度和Ⅸ度区域，其中最高的为礼县城关镇。总体来看，陇南地区居民地地震灾害人口易损性处于中低等级。

(2) 笔者将计算得到的评估结果与实际情况进行了对比，发现本文的研究方法计算得到的汶川地震陇南地区乡镇人口易损值有79%与实际的陇南地区乡镇死亡人数相吻合，具有较高的可信度。

(3) 本次研究存在一定的局限性：首先，地震灾害作用复杂，影响人口易损性的因素很多，由于本次研究单元细化到居民地，加之数据本身的限制，因此只考虑了烈度、人口总量、老幼人口比例、坡度、断层、建筑物、地貌类型7个因素，未考虑人口受教育程度、男女比例、人均GDP等其他因素对人口易损性的影响；其次，未获得详细的建筑物资料，只是对陇南地区建筑物进行了粗略的分类，因此对评估结果会有一定的影响；除此之外，本文选用的指标，各指标之间存在一定的联系，有可能会放大某一因素。同时，构造判断矩阵中两者因素重要性之间的比较缺乏数据的支持，依然存在层次分析方法的主观性影响的缺点。因此，本文的评估结果的准确度和精确度还有待提高。

### 参考文献：

- 白海玲, 黄崇福. 2000. 自然灾害的模糊风险[J]. 自然灾害学报, 9(1): 47-53.  
白志宏. 2006. 地震引致人员罹难空间分布之推估[D]. 台湾: 国立



- 中央大学.
- 陈杰,陈宇坤,丁国宇等. 2003. 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震地表破裂带[J]. 第四纪研究, 23(6): 629-639.
- 陈文凯,何少林,张苏平等. 2011. 汶川地震甘肃省文县地震地质灾害遥感分析[J]. 西北地震学报, 33(4): 363-369.
- 邓聚龙. 1983. 灰色系统综述[J]. 世界科学, (7): 1-5.
- 傅征祥. 1994. 华北地震生命损失率与房屋倒塌率的统计关系讨论[J]. 东北地震研究, 10(1): 68-70.
- 国家地震局. 1996. 中国大地震灾害损失评估汇编(1990—1995)[M]. 北京:地震出版社.
- 黄崇福. 1999. 自然灾害风险分析的基本原理[J]. 自然灾害学报, 8(2): 21-30.
- 李山有,马强,武东坡等. 2003. 断层场地地震反应特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 23(5): 32-37.
- 刘百箴,张俊玲,吴建华等. 2003. 1920 年 12 月 16 日海原 8.5 级大地震的伤亡人口再评估[J]. 中国地震, 19(4): 72-85.
- 刘欢,徐中春,吴绍洪等. 2012. 基于 GIS 的中国地震灾害人口风险分析[J]. 地理科学进展, 31(3): 368-374.
- 刘玮,吴志坚,马宏旺等. 2010. 汶川 8.0 级地震甘肃陇南地区建筑震害调查[J]. 西北地震学报, 32(2): 179-185.
- 聂承静,杨林生. 2012. 中国地震灾害宏观人口脆弱性评估[J]. 地理科学进展, 31(3): 375-382.
- 谭跃进,陈英武,罗鹏程等. 1999. 系统工程原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 64-84.
- 王强,王兰民,袁中夏等. 2008. 陇南地区农村民房遭受汶川 8.0 级地震震害分析及启示[J]. 世界地震工程, 24(3): 20-24.
- 魏永明,谢又予,伍永秋. 1998. 关联度分析法和模糊综合评判法在泥石流沟谷危险度划分中的应用[J]. 自然灾害学报, 7(2): 109-117.
- 吴殿廷,李东方. 2004. 层次分析法的不足及其改进的途径[J]. 北京师范大学学报, 40(2): 264-268.
- 虞晓芬,傅耿. 2004. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, (11): 119-121.
- 袁道阳,雷中生,杨青云等. 2014. 1879 年甘肃武都南 8 级地震的震灾特征[J]. 兰州大学学报, 50(5): 611-621.
- 张肇诚,郑大林,徐京华. 1999. 中国震例(1986-1988)[M]. 北京:地震出版社.
- Panizza M. 1991. Geomorphology and seismic risk[J]. Earth Science Reviews, 31(1): 11-20.
- Turner B L, Roger EK. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. National Academy of Science, 100(14): 8074-8079.
- United Nations. 1992. Department of Humanitarian Affairs. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management[M]. DNA/93/36, Geneva.
- Zadeh L A. 1965. Fuzzy Sets[J]. Information and Control, 8(3): 338-353.

## Estimating of Population Vulnerability in Relation to Earthquake Disaster : A Case Study of Longnan Region in Gansu Province

XI Congwang, HE Shaolin, CHEN Wenkai

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

### Abstract

The analytic hierarchy process is used to estimate comprehensively the population vulnerability in relation to earthquake disaster by seven indicators, which are intensity, the total population, the proportion of the young and the old, slope grade, faults, building and types of topography. In order to improve the veracity and accuracy of the data, we selected the actual residential information in villages and towns as the research unit, and analyzed the spatial distribution of population vulnerability based on GIS and calculated the population vulnerability value in relation to earthquake disaster in the actual residential areas. The results show that the population vulnerability about earthquake disaster is in the middle and the low grade in the actual residential areas in Longnan region, and the area of residential area where population vulnerability value is greater than 0.65 accounts for 1.2%. There are six villages whose population vulnerability values are between 0.65 and 0.76 out of 196 villages, they mainly concentrate in north and central south of Longnan region and mostly locate in Li Country, Wudu district and Wen Country, and the town with the highest population vulnerability value is Chengguan Village in Li Country. The study result has a good consistency with the practical situation by verifying the real intensity and seismic casualties in Wenchuan earthquake in Longnan region.

**Key words:** earthquake disaster; population vulnerability; analytic hierarchy process; settlement places; Longnan region