

基于人口公里格网的地震压埋人员分布 评估方法的应用与评价^{*}

——以甘肃岷县漳县 6.6 级地震为例

周中红, 陈文凯, 何少林, 孙艳萍, 李 雯

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 采用基于人口公里格网的地震压埋人员分布评估方法, 结合甘肃省人口公里格网数据, 以 ArcGis 软件为平台, 对 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震进行了压埋人员的分布评估, 并结合甘肃地区的人口分布区域特点及岷县漳县 6.6 级地震的实际特点, 对该方法中的参数进行本地化改进, 并将评估结果与实际分布进行比较分析。结果表明: 改进后的方法使评估结果的适用性有了一定程度的提高, 可在震后快速给出震区人员压埋分布评估结果图, 实现对甘肃地区震后地震压埋人员评估辅助决策内容的有效补充。

关键词: 压埋人员; 分布评估; GIS; 甘肃地区; 岷县漳县 6.6 级地震

中图分类号: P315.94

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)02-0288-07

0 引言

破坏性地震发生后, 对于震区压埋人员分布的预估是震后初期救援辅助决策的一项重要内容, 关系到压埋人员的有效救援。汶川地震等应急救援表明, 科学合理地调动和配置救援资源是减少地震灾害生命损失的有效途径(魏本勇等, 2017)。近年来, 陆续有学者在震后压埋人员评估方面做了相关的研究, 如许建东等(2008)研究了地震发震时间与伤亡人数之间的关系, 提出了地震灾害中因建筑物倒塌而被压埋人员的评估方法; 肖东升等(2009)分析了影响地震压埋人员的主要因素(建筑物的倒塌率、人员在室率等), 提出了基于建筑物的倒塌率和人员在室率的压埋率计算模型; 吴晨等(2011)根据国内 8 次地震的人员伤亡统计数据, 得到了基于建筑物倒塌率的压埋率计算公式。总体来说, 有关震后压埋人员的估计和分布评估的研究比较少, 这些方法或是没有经过实际震例的检验, 或是主要集中在震后人员伤亡数量的评估上, 评估单元也多到县(市)一级, 不能有效体现压埋人员分布的区域差别及重点区域的识别。

目前, 甘肃地区还没有关于地震压埋人员分布评估的相关研究, 这不利于在震后初期实施有效救援。余世舟等(2015)提出的基于人口公里格网的震后人员压埋分布评估方法, 能反映出不同公里格网单元的可能压埋人员的分布情况及其在灾区域内的分布差异, 可以识别出压埋人员重点区域, 有助于地震初期救援力量的调配, 提高救援效率。

本文以 2013 年 7 月 22 日甘肃岷县漳县 6.6 级地震为例, 探讨基于人口公里格网的地震压埋人员分布评估方法在甘肃地区破坏性中强地震中的应用可行性及本地化改进。

1 研究方法简介

肖光先(1991)给出的基于烈度和人口密度的震后死亡率评估方法, 已被《地震灾情应急评估》(BG/T30352—2013)推荐用来评估人员死亡率。基于人口公里格网的地震压埋人员分布评估方法在肖光先(1991)方法的基础上, 对行政区域按照城市、乡镇、农村进行 3 级划分, 引入了行政区域级别的调整系数(λ_{j1} , λ_{j2}), 改进原有公式

^{*} 收稿日期: 2018-12-21.

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFB0504104)和甘肃省科技支撑项目(1504FKCA065)联合资助。

死亡率计算结果偏低的问题，并通过该系数体现低烈度区乡镇、农村死亡率偏高的实际特点（余世舟等，2015）；同时还考虑了其它影响压埋率的主要因素，如搜救影响、建筑破坏的调整系数、抗震设防影响等。该方法原理详见余世舟等（2015）的研究，具体的表达式如下：

$$\ln R_{ij} = -44.466 + 14.33 \ln \lambda_{j1} (I_j + \lambda_{j2}) + 0.960 \ln \rho_{ij} \quad (1)$$

$$N_b = \lambda_{sr} \lambda_B \left(\sum_{I=6}^{I=12} \sum_{j=1}^{j=3} \lambda_I \lambda_{j0} A_{ij} \rho_{ij} R_{ij} \right) \quad (2)$$

式中： R_{ij} 是地震烈度为 I 的 j 级行政单元区域内人员死亡率； ρ_{ij} 是地震烈度为 I 的 j 级行政区域的人口密度（表1）； λ_{j1} ， λ_{j2} 是 j 级行政区域调整系数（表1）； N_b 是震区总压埋人数； λ_{sr} 是搜救影响系数，取值1.1； λ_B 是考虑压埋原因（主要指建筑破坏）的调整系数，取值0.95； λ_I 是地震烈度 I 的发震时间修正系数（夜晚），令 λ_I （白天）=1，则 λ_I （夜晚）为地震发生在夜晚的死亡率与发生在白天的死亡率之比，烈度为VI，VII，VIII，IX，X，XI时， λ_I 取值分别为17，8，4，2，1.5，1.3； λ_{j0} 是地震烈度 I 的抗震设防影响系数，表示为：

$$\begin{cases} \lambda_{j0} = 0.5 & I \geq 7 \\ \lambda_{j0} = 1.0 & I < 7 \end{cases} \quad (3)$$

表1 各级行政区域人口密度及调整系数
Tab.1 The population densities and adjustment coefficients of each administrative region

行政区域级别	ρ_{ij}	λ_{j1}	λ_{j2}
城市	300	1.22	-0.34
乡镇	200	1.1	0.7
农村	80	1.1	0.7

结合式（1）及式（2），可直接估算出各公里格网的压埋人数及分布，做成图件后可以直观地判定出重点压埋人员区域，也可以反映出不同公里格网单元的可能压埋人员的差异。

2 岷县漳县6.6级地震算例

2.1 人员伤亡基本情况

2013年7月22日甘肃省岷县、漳县交界发生6.6级地震，造成95人死亡，其中定西市岷县死亡92人，定西市漳县、陇南市礼县、陇南市宕昌县各死亡1人。按烈度区划分，VIII度区死亡82人，

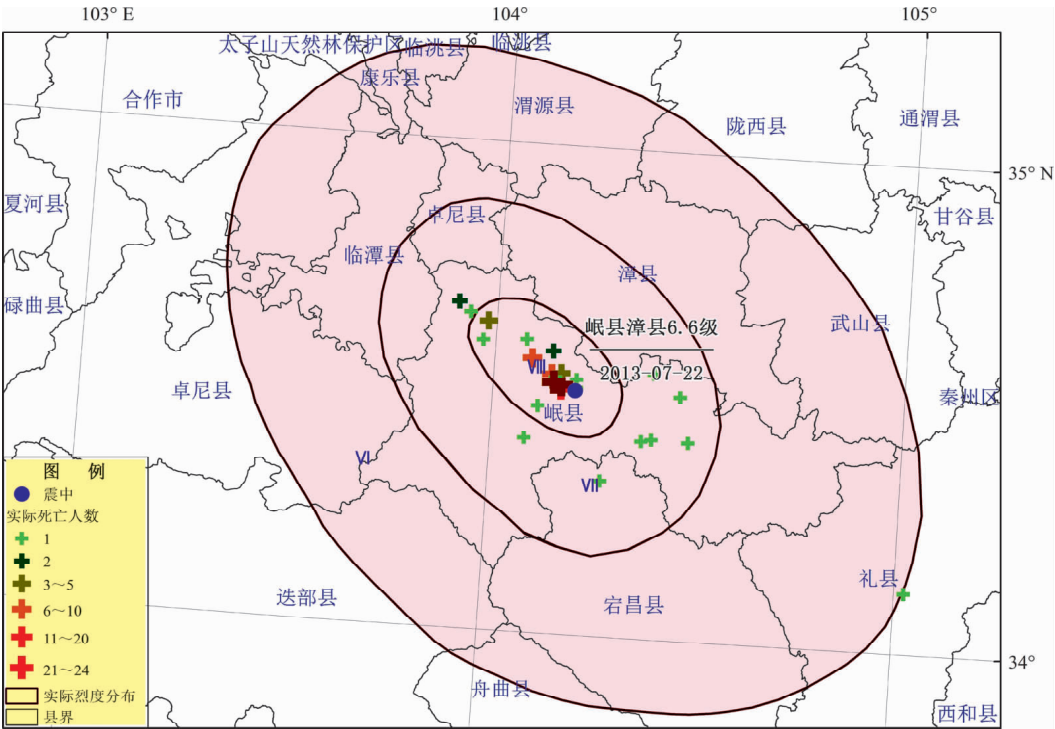


图1 甘肃岷县漳县6.6级地震死亡人员分布图
Fig.1 Distribution of deaths of the Minxian - Zhangxian M6.6 earthquake in Gansu

其中房屋倒塌致死 70 人；Ⅷ度区死亡 11 人，其中房屋倒塌致死 9 人；Ⅵ度区及以外各死亡 1 人，均由房屋倒塌所致（石玉成等，2013；张苏平等，2017），分布见图 1。

2.2 原始参数评估结果

本文基于 GIS 程序简化了评估算法，流程如图 2 所示。计算过程各个参数的取值说明如下。

依据《统计上划分城乡的规定》^①对烈度区内各级行政区域进行单元划分，利用格网单元与乡镇行政区划面状数据（乡镇界）进行空间分析，将各个公里格网单元与 3 级行政区域的划分相互对应起来。分析得到，该发震区域内没有城市区域，但有县政府驻地。为了体现人员伤亡、压埋程度的差异性，将经济条件、建筑条件相对发达的所有县政府驻地所在地列为城市区域。

采用表 1 对公式（2）进行取值，其中 $A_{ij}\rho_{ij}$ 用人口公里格网数据 N_i 替换：

$$N_b = \lambda_{sr} \lambda_B \left(\sum_{I=6}^8 \sum_{j=1}^3 \lambda_I \lambda_{I0} N_i R_{ij} \right) \quad (4)$$

通过在人口公里格网人口属性表中增加压埋数值字段，根据属性选择和字段计算器功能对该字段表进行赋值操作，赋予各公里格网压埋人数，

ArcMap 中成图后按颜色梯度表示单元格网内可能压埋人员数量，压埋人员集中的区域，即为压埋重点区域。计算过程与结果如表 2、图 3 所示。

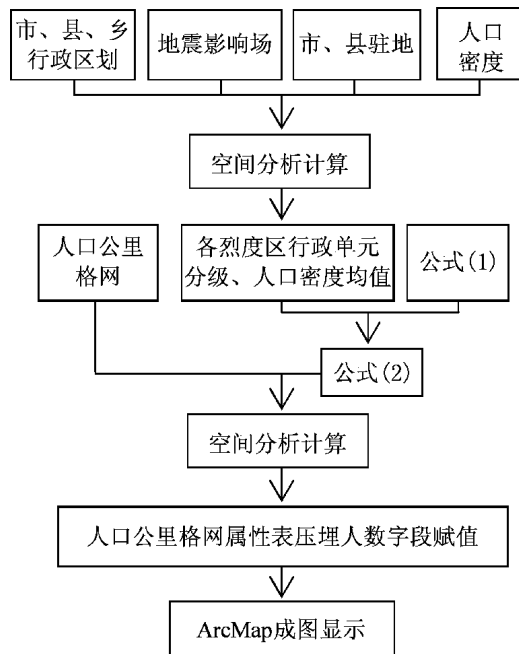


图 2 基于 GIS 的压埋人员分布评估程序流程图

Fig. 2 Flow chart of the assessment of buried population distribution based on GIS

表 2 原始参数计算岷县漳县地震各烈度区死亡、压埋人数

Tab. 2 Death and buried tolls calculated by original parameters in different intensity areas of the Minxian - Zhangxian M6. 6 earthquake

行政区域级别	Ⅷ度区			Ⅶ度区			Ⅵ度区		
	总人口	万人死亡数	压埋人数	总人口	万人死亡数	压埋人数	总人口	万人死亡数	压埋人数
城市	4110	9.467	2	40 076	1.275	3	123 673	0.124	2
乡镇	112 191	9.018	53	199 946	1.567	16	600 732	0.213	13
农村	20 057	3.742	4	238 575	0.650	18	526 908	0.089	5

从图 3 可以较为明显地看出压埋人员重点分布在Ⅷ度区、Ⅶ度区及Ⅵ度区的部分区域。

通常通过自救互救而脱险的压埋人员，对应应急救援需求的影响不大，因此暂不考虑这部分压埋人员，本文所研究的压埋人员指被救援队成功搜救出的人员。汶川地震和唐山地震中被成功救出的人数与实际死亡和失踪人数的比值为 1.1，参考该比值且由于地震救援主要针对建筑破坏造成的压埋人员（余世舟等，2015，杨明儒，2014），

故按照此方法，在岷县漳县地震中实际压埋人员分布为：Ⅷ度区 77 人，Ⅶ度区 10 人，Ⅵ度区及以外 2 人（压埋人数 = 房屋倒塌造成的死亡人数 × 搜救影响系数）。

通过与实际情况对比，发现该计算结果存在一定的不足，主要表现在：一是采用各个参数的原始取值的评估结果，虽然在总量上与实际结果接近，但在各个烈度区的分布与实际有较大的差异（图 4），其中Ⅵ ~ Ⅶ度烈度区内的压埋人员实

① <http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjbz/2006101t20061018-8666.html>.

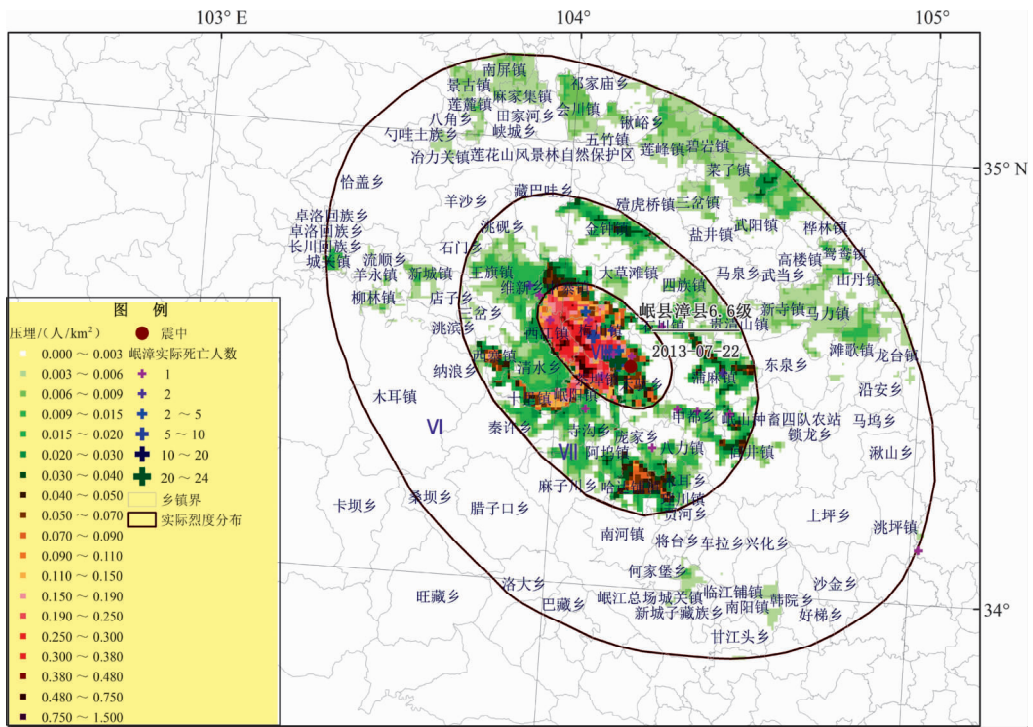


图 3 原始参数值计算的甘肃岷县漳县 6.6 级地震压埋人员分布评估图
Fig. 3 Assessment map of the distribution of burial toll calculated by original parameter value in Minxian - Zhangxian M6.6 earthquake

际结果是Ⅵ度区 1 人、Ⅶ度区 10 人，占实际总压埋人数的 12.4%。而使用原始参数值计算压埋人员结果是Ⅵ度区 20 人、Ⅶ度区 27 人，占计算总压埋人数的 44.34%。这个评估结果很有可能会导致

震后救援力量的部署安排不合理，影响及时有效的人员搜救。二是在Ⅷ度区内，城市区域的万人死亡数最高，达 9.467 人/万人，而Ⅷ度区内实际死亡人员均分布在乡镇及农村（岷县县政府驻地岷阳镇在Ⅷ度区无人员死亡），一般若不是城市直下型的地震，城市的人员死亡率相对于乡镇农村来说是较低的。因此，针对此类中强地震，采用原始参数取值计算而得到压埋评估结果存在一定的不合理性，需要考虑改进。

2.3 改进参数值评估结果

就本文算例引用的具体参数，行政区域调整系数 (λ_{j1} , λ_{j2})、人口密度 ρ_{ij} 、建筑系数 λ_B 、抗震设防影级 λ_{i0} 参数对计算结果均有影响且影响作用各不同，故可根据区域的实际状况对这几个参数做本地化的改进与调整。

①人口密度 ρ_{ij} 调整。甘肃地区人口密度地域分布差异明显，如图 5 所示：从河西走廊的不足 1 人/ km^2 到中东部的 1 万人/ km^2 以上，城市、乡镇、农村行政单元的人口密度也差别明显，因此，考虑本地区的人口密度特点进行取值，对于不同烈度区的各级行政区域的人口密度，本文采用了

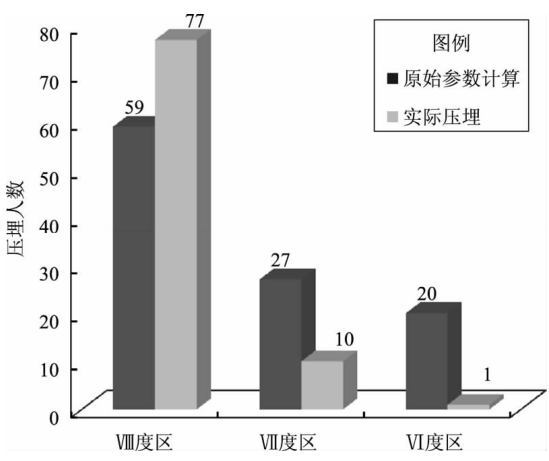


图 4 甘肃岷县漳县 6.6 级地震压埋人员原始参数值评估结果与实际值比较
Fig. 4 Comparisons between the evaluation results and the actual values of burial toll calculated by original parameters in the Minxian - Zhangxian M6.6 earthquake

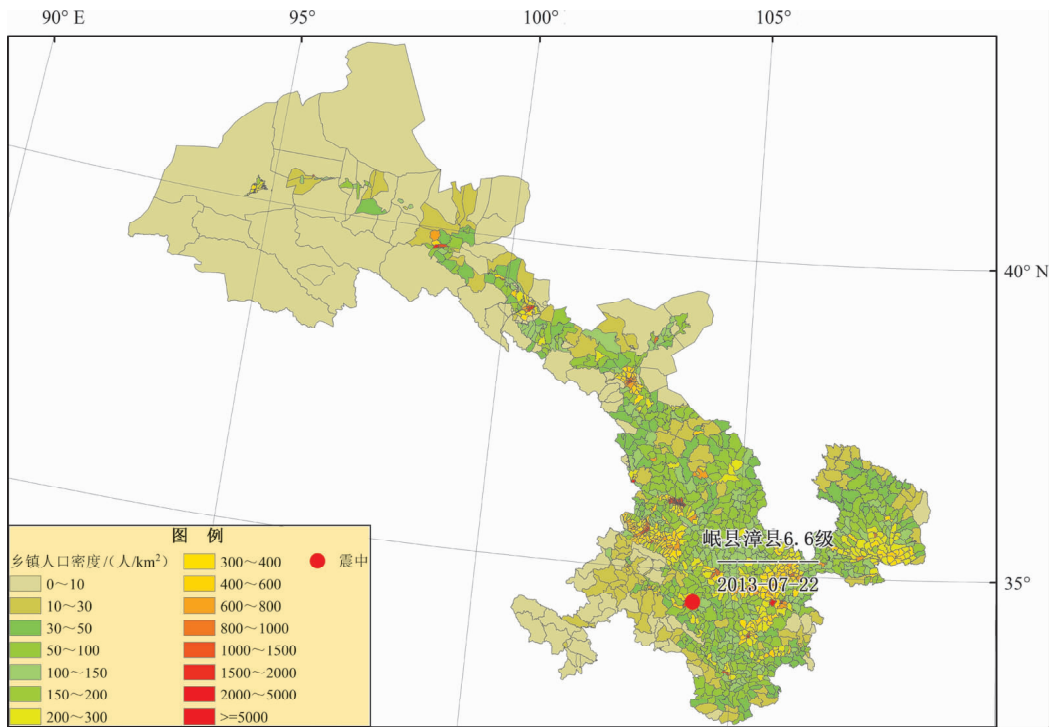


图 5 甘肃省乡镇人口密度分布图

Fig. 5 Distribution of township population density in Gansu province

该级区域的人口密度均值代替原始取值 ρ_{ij} 。

②行政区域系数 $(\lambda_{j1}, \lambda_{j2})$ 调整。这 2 个系数没有具体的物理含义，但从地震风险的 3 个方面（地震中人员的暴露程度、地震的危险性、承灾体脆弱性）来看，此系数可以在一定程度上体现不同行政区域地震危险性及承灾体脆弱性的程度；从系数的原始取值上来看，也是旨在体现相同烈度区内，城市区域的破坏程度相对低、人员伤亡低于乡镇，即人员伤亡率低。通过分析该系数的变化与影响人员伤亡率的趋势，结合岷县漳县地震中不同烈度区的人员伤亡、死亡率的调研结果（石玉成等，2013；张苏平等，2017），本文对这 2 个系数做了相应的调整，不同烈度区使用不同的行政区域系数，具体如表 3 所示。

表 3 各级行政区域系数调整值 $(\lambda_{j1}, \lambda_{j2})$
Tab. 3 Adjustment values of coefficient $(\lambda_{j1}, \lambda_{j2})$
of each administrative region

行政区域	Ⅵ度区	Ⅶ度区	Ⅷ度区	Ⅸ度区
城市	(0.9, -0.5)	(0.9, -0.5)	(1, -0.5)	(1, -0.5)
乡镇	(1, 0)	(1.05, 0.3)	(1.1, 0.6)	(1.1, 0.6)
农村	(1, 0)	(1.05, 0.3)	(1.1, 0.6)	(1.1, 0.6)

③建筑系数 λ_B 调整。依据对岷县漳县地震各个烈度区死亡人数和死亡原因的调查结果（张苏平等，2017），取 $\lambda_{BⅧ}=0.85$ ， $\lambda_{BⅨ}=0.82$ 。

④抗震设防影响系数 λ_{j0} 调整。在式（2）中引入此参数的目的是体现抗震设防要求的区域差异，对式（1）的人员伤亡结果进行调整（余世舟等，2015）。笔者认为经过对行政区域系数 $(\lambda_{j1}, \lambda_{j2})$ 调整已经体现，故暂取值 $\lambda_{j0}=1$ 。

经过对参数值的本地化改进，对评估结果重新计算，结果如图 6 所示。从图 6a 可以看出，不同烈度区的死亡率有较大差异，死亡率随烈度的衰减降低明显；相同烈度区内乡镇区域的死亡率最高（Ⅷ度区除外），城市次之，农村最低，基本符合一般规律，与实际调查的结果也较为相符。

从图 7 可以看出，改进参数取值后的评估结果较原始参数取值在合理性上有了一定的提高：Ⅷ度区的压埋人员重点集中在梅川镇、茶埠镇、中寨镇、西江镇、禾驮乡；Ⅶ度区的压埋人员相对集中在蒲麻镇、闫井镇、西寨镇、中寨镇、十里镇、哈达铺镇、申都乡等；Ⅵ度区基本无压埋人员分布，这与实际情况基本吻合。

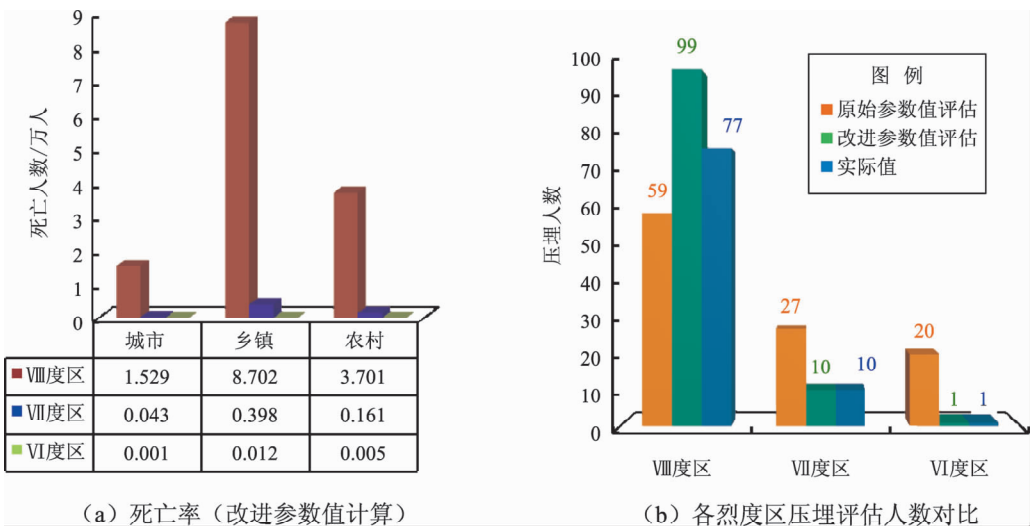


图 6 甘肃岷县漳县 6.6 级地震人员死亡率及压埋人数（参数值本地化改进后计算结果）

Fig. 6 Assessment of mortality, buried population calculated by modified parameter values in the Minxian – Zhangxian M6.6 earthquake

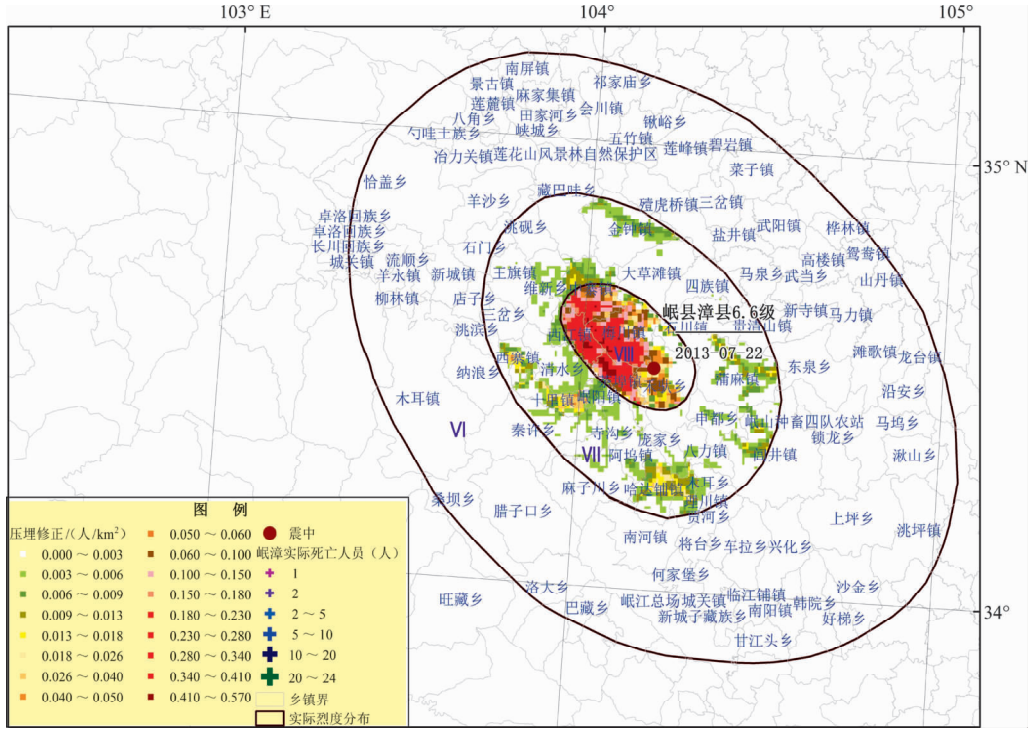


图 7 改进参数值计算的甘肃岷县漳县 6.6 级地震人员压埋分布评估图

Fig. 7 Assessment map of the distribution of burial toll calculated by modified parameter values in the Minxian – Zhangxian M6.6 earthquake

3 结论

本文引用基于人口公里格网的地震压埋人员分布评估公式，结合岷县漳县 6.6 级地震震例的实

际灾情及人口公里格网数据，验证了该公式在甘肃地区破坏性中强地震中的可用性，同时，结合甘肃地区的人口分布区域特点及岷县漳县地震的实际震例特点，对公式中的参数取值做了一些本地化的改进，提高了其适用性，使评估结果的合

理性与准确度有了一定程度的提高。同时,基于 GIS 程序化算法,可以在震后快速给出压埋分布的评估结果。

由于历史震例的基础数据所限,本文只采用了数据较为完备的岷县漳县 6.6 级地震震例,由此给出的参数取值可能会有所局限;但是该地震对于甘肃地区来说,无论是地理环境、震区建筑特征,还是人口分布方面,均有一定的代表性。若是地震发生在相似的区域,震中烈度不超过 IX 度,经过本地化的评估公式还是有一定的合理性及适用性,可以用于震后的压埋人员分布评估,这对于甘肃省破坏性中强地震的震后初期应急救援力量的部署有较大的辅助决策意义。随着震例的不断丰富,人口和建筑等相关基础数据的陆续完备与准确获取,将对该结果进行更进一步的完善,以便更好地为震后的应急救援辅助决策提供服务。

参考文献:

- 石玉成,高晓明,谭明,等. 2013. 2013 年岷县漳县 6.6 级地震灾害损失评估[J]. 地震工程学报,35(4):717-723.
- 魏本勇,聂高众,苏桂武,等. 2017. 地震灾害压埋人员评估的研究进展[J]. 灾害学,32(1):155-159.
- 吴晨,殷海涛,孙庆文,等. 2011. 基于 ArcGIS 的地震搜救信息系统可行性研究[J]. 高原地震,23(2):54-59.
- 肖东升,黄丁发,陈维锋,等. 2009. 地震压埋人员压埋率预估模型[J]. 西南交通大学学报,44(4):574-579.
- 肖光先. 1991. 震后灾害损失快速评估[J]. 灾害学,4(6):12-17.
- 许建东,危福泉,张来泉,等. 2008. 地震人员伤亡与压埋人员评估方法的初步研究——以福建省漳州市区为例[J]. 地震研究,31(4):382-387.
- 杨明儒. 2014. 地震压埋人员分布评估方法研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 余世舟,张令心,杨明儒. 2015. 地震压埋人员分布评估方法初探[J]. 地震工程与工程振动,35(2):138-143.
- 张苏平,聂高众,孙艳萍,等. 2017. 甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震重灾区房屋类型与致死的关系研究[J]. 地震工程学报,39(4):781-789.

Application and Evaluation on a Evaluating Method for Distribution of Earthquake Buried Personnel Based on Population Kilometer Grid: Taking Minxian – Zhangxian $M6.6$ Earthquake as an Example

ZHOU Zhonghong, CHEN Wenkai, HE Shaolin, SUN Yanping, LI Wen

(Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

Based on population kilometer grid data, we evaluated the distribution of the buried people of the 2013 Minxian – Zhangxian $M6.6$ earthquake by a method of evaluating the distribution of buried personnel in earthquake based on population kilometer grid. Combining the population distribution in Gansu province and the characteristics of Minxian – Zhangxian $M6.6$ earthquake, we improved the parameters of this method for some localization optimizations, and compared the evaluation results with the actual distribution. The evaluation results show that the improved method improves the applicability of the evaluation results to a certain extent. It can quickly give the evaluation result map of the buried personnel distribution in the earthquake-stricken area after the earthquake, and realize the effective supplement of the assistant decision-making content for the evaluation of the personnel buried in Gansu area after the earthquake.

Keywords: buried personnel; distribuiton assessment; GIS; Gansu region; the Minxian – Zhangxian $M6.6$ earthquake