

陈文凯,周中红,张灿,等.新一代区域地震灾害快速评估系统设计与实现——以甘肃省为例[J].地震工程学报,2020,42(6):1683-1692.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1683
CHEN Wenkai,ZHOU Zhonghong,ZHANG Can,et al.Design and Implementation of a Rapid Assessment System for Regional Earthquake Disasters in Gansu Province[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(6):1683-1692.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1683

新一代区域地震灾害快速评估系统设计与实现 ——以甘肃省为例

陈文凯,周中红,张 灿,孙艳萍,张苏平,马小平

(中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要:破坏性地震发生后,地震灾情快速评估作为地震应急指挥技术系统中的核心模块能够为各级政府和应急管理部门地震应急指挥决策提供重要的信息服务,是地震应急救援与指挥决策重要的支撑平台。随着学者对地震应急领域几十年的研究,已经具备了开发新一代地震灾害快速评估系统的条件。本文基于甘肃省分震级地震烈度衰减模型、分区域的地震灾害人员伤亡评估模型、地震应急专题图设计等研究基础,研发了新一代甘肃省地震灾害快速评估原型系统,实现了软件自动触发、分震级地震影响范围估计、分区地震灾害人员伤亡计算,自动生成地震灾情评估报告,提高了系统的自动化水平和计算结果的精度。该软件能够提升甘肃省地震灾害快速响应能力,能够为甘肃省地震灾害应急救援和指挥决策提供更为科学可靠信息服务。

关键词:地震灾害;快速评估;原型系统;甘肃省

中图分类号: TU984

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1683-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1683

Design and Implementation of a Rapid Assessment System for Regional Earthquake Disasters in Gansu Province

CHEN Wenkai, ZHOU Zhonghong, ZHANG Can, SUN Yanping, ZHANG Suping, MA Xiaoping

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

Abstract: After a destructive earthquake, the rapid assessment of earthquake disaster, as the core module of the earthquake emergency command technology system, provides important information services for the earthquake emergency command and decision making of government and emergency management departments at all levels. It is also an important support platform for earthquake emergency rescue and command and decision making. After decades of research in the field of earthquake emergency, the conditions for developing a new generation of rapid assessment system for earthquake disasters have been prepared. In this paper, based on the research foundation of the earthquake intensity attenuation model of different magnitudes, the evaluation model

收稿日期:2020-07-01

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC1500906)

第一作者简介:陈文凯(1983—),男,副研究员,主要从事 GIS、遥感技术应用研究。E-mail: cwk2000@yeah.net。

of casualties in different regions, and the design of earthquake emergency thematic map in Gansu Province, a new generation of rapid evaluation prototype system of earthquake disaster in Gansu Province is developed, which can automatically trigger a software, estimate the impact range of earthquake with different magnitudes, calculate the casualties of earthquake disaster personnel in different regions, automatically generate earthquake disaster assessment report, and improve the automation level of the system and the accuracy of calculation results. The software can improve the rapid response ability from an earthquake disaster and can provide more scientific and reliable information services for emergency rescue and command decision making from an earthquake disaster in Gansu Province.

Keywords: earthquake disaster; rapid assessment; prototype system; Gansu Province

0 引言

地震是人类最具威胁的自然灾害之一,它具有影响范围广、突发性和不可预测性的特点。破坏性地震往往会给人民生命和财产安全造成巨大影响,尤其是大地震会给人类带来巨大的灾难,比如 2008 年四川汶川 8.0 级地震、2011 年日本东北 9.0 级地震。目前因地震预报仍未解决,而地震预防又需要强大的经济条件支撑,因此,震后应急救援成为减轻地震灾害的有效途径之一。我国地震应急指挥技术系统自 2000 年开始建设以来^[1-4],通过近十年的发展,2008 年建成了遍布全国 31 个省市自治区的省级地震应急指挥技术系统^[5-10],并正式启用,进行 365 天 24 小时业务化运行,其间应对了 2008 年四川汶川 8.0 级地震、2010 年青海玉树 7.1 级地震、2013 年四川芦山 7.0 级地震、甘肃岷县漳县 6.6 级地震、2014 年云南鲁甸 6.5 级地震、2016 年青海门源 6.4 级地震、2017 年四川九寨沟 7.0 级地震等一系列重特大地震事件。经过长期业务化运行和实际地震事件检验,“十五”期间建设的地震应急指挥技术系统已不能满足实际地震应急需求,“十二五”期间我国开始实施国家地震社会服务工程,采用卫星、无人机等高新技术获取地震灾情信息,2016 年建成地震应急救援系统。多震省份根据本省实际地震需求又陆续开发了一些本地化的地震应急技术系统^[11-12],使地震应急技术系统更适用于地震灾害应急救援与指挥决策。

地震应急指挥技术系统经十几年的实际地震检验,技术系统中核心评估模型的合理性、准确性逐步受到学者重视,普遍认为技术系统必须依托区域评估模型才能有效支撑应急救援和指挥决策。地震烈度衰减模型^[13-22]、地震灾害人员伤亡评估模型^[23-24]、地震埋压人员评估模型^[25-29]、地震次生地质灾害评估^[30-33]等技术系统中的核心模型区域化研

究逐步开展^[34]。通过学者多年研究,逐步认识到评估模型存在显著区域特征和震级分档现象^[23-35],只有将技术系统中的模型进行本地化改进后才能产出与实际相符的地震灾情信息^[36]。因“十五”“十二五”期间建设的应急技术系统中各类评估模型无法按照区域特点进行本地化修正。本文将根据甘肃省地震灾害特点及区域特征,基于甘肃省多年的理论研究成果(分震级地震烈度衰减模型^[13-16,37]、分区地震灾害人员伤亡评估模型^[23-24]、地震应急专题图设计^[38-39]和分区建筑物易损性矩阵^[40])设计开发甘肃省地震灾害快速评估原型系统,改进甘肃省地震应急指挥技术系统中的评估模型,切实提高甘肃省地震灾害应急响应能力。

1 软件框架设计

1.1 建设目标

甘肃省地震灾害快速评估原型软件是基于甘肃省地震应急基础数据库、EQIM 服务器、甘肃省区域特点及区域评估模型等研究成果研制的,具有自动触发计算、快速获取重点目标震中距离、地震灾害人员伤亡评估、地震影响范围和灾害程度估计、自动产出应急专题图等功能,实现震后地震影响范围和灾害程度评估,人员伤亡和经济损失估计,为地震应急响应和指挥决策提供技术支撑。

该软件建成后,将实现甘肃区域地震自动响应,震后快速评估应急产出,分区域分震级进行地震灾害快速评估,以报告、专题图、统计表格等形式提供应急产品,使甘肃省地震应急领域内的研究成果应用于实际地震应急工作中,有效提升地震灾害快速评估结果的合理性,以实现不断提高我省地震灾害应急响应能力的目标。

1.2 技术流程

地震灾害快速评估工作分为地震三要素获取、

重要目标震中距计算、生成地震影响范围、地震人员伤亡评估、经济损失评估、应急专题图制作等关键内容。根据近几年甘肃省地震应急领域研究成果和实际地震应急需求,系统设计了甘肃省地震灾害快速评估软件技术流程,软件工作流程如图 1 所示。

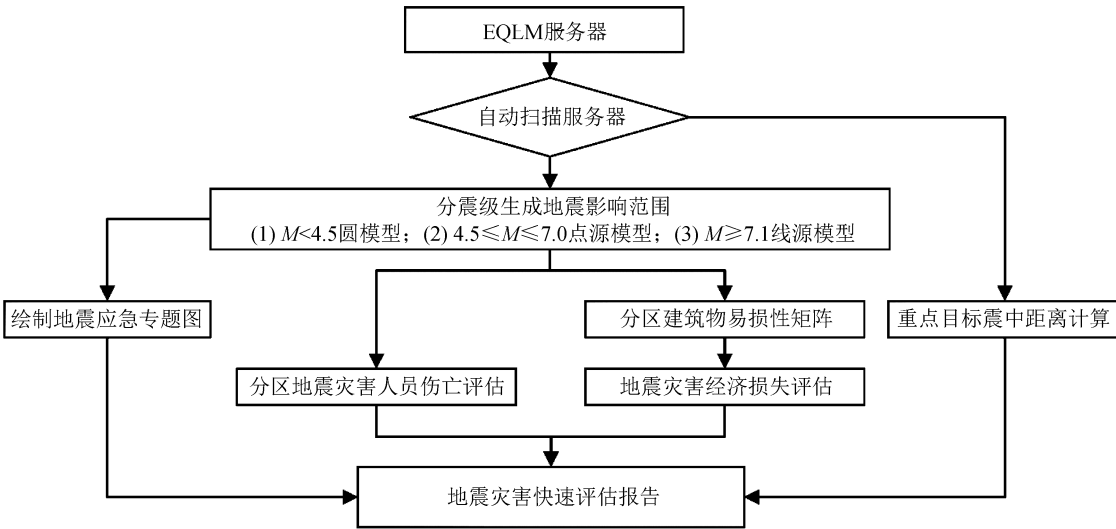


图 1 工作流程图
Fig.1 Workflow chart

2 软件核心评估模型

甘肃省地震灾害快速评估原型软件核心模型包含地震烈度衰减模型、地震灾害人员伤亡评估模型、建筑物震害矩阵、经济损失评估模型。下面详细描述软件中使用的核心评估模型。

2.1 分震级地震烈度衰减模型

本软件采用分震级 ($M < 4.5$ 、 $4.5 \leq M \leq 6.9$ 、 $M \geq 7.0$) 的区域地震烈度衰减模型进行地震影响范围估计,地震后自动生成地震影响范围及地震灾害程度估计(地震烈度)。分震级地震烈度衰减模型如下所示:

(1) $M < 4.5$ 时采用圆模型,给出地震震中理论烈度,计算地震影响面积。

$$R = (M/V)L \tag{1}$$

式中: R 为圆半径; M 为震级; V 为协调系数,值为 4.5; L 为经验常数,值为 50。

(2) $4.5 \leq M \leq 7.0$ 时采用甘肃及邻区地震烈度衰减关系^[13],具体参数如下所示:

长轴 $I_a = 4.864 + 1.464M - 1.783\ln(R_a + 22)$ (2)

短轴 $I_b = 3.032 + 1.321M - 1.343\ln(R_b + 9)$ (3)

式中: I_a 、 I_b 为烈度; M 为震级; R_a 为长轴半径; R_b 为短轴半径。

(3) $M > 7.0$ 时采用西部破裂尺度经验公式^[41]和甘肃及邻区线源地震烈度衰减关系^[13-15,41],具体实现流程如图 2 所示。

2.2 地震灾害人员伤亡分区模型

软件中的地震灾害人员伤亡评估模型采用李雯得到的地震灾害人员伤亡分区模型^[24],模型如下所示。该模型将震区面积引入到人员伤亡评估中,有效减小因不同震级产生相同烈度时的人员伤亡计算的误差,根据甘肃地区实际震例验证较前人研究模型精度方面有较大改善。

$$D = e^{(b_0 + b_1 I + b_2 S + b_3 \Delta I)} \tag{4}$$

式中: D 为地震死亡人数; I 为震中烈度; S 为震区面积; ΔI 为震中烈度与抗震设防烈度之差。

表 1 人口密度分组参数

Table 1 Population density grouping parameters

人口密度(人/km ²)	b_0	b_1	b_2	b_3	相关系数 R^2
$\rho < 20$	0.636	-0.182	0.000 25	2.01	0.65
$20 \leq \rho < 60$	-5.122	1.004	0.000 1	-1.668	0.812
$\rho > 60$	-7.818	1.194	0.000 11	-0.024	0.98

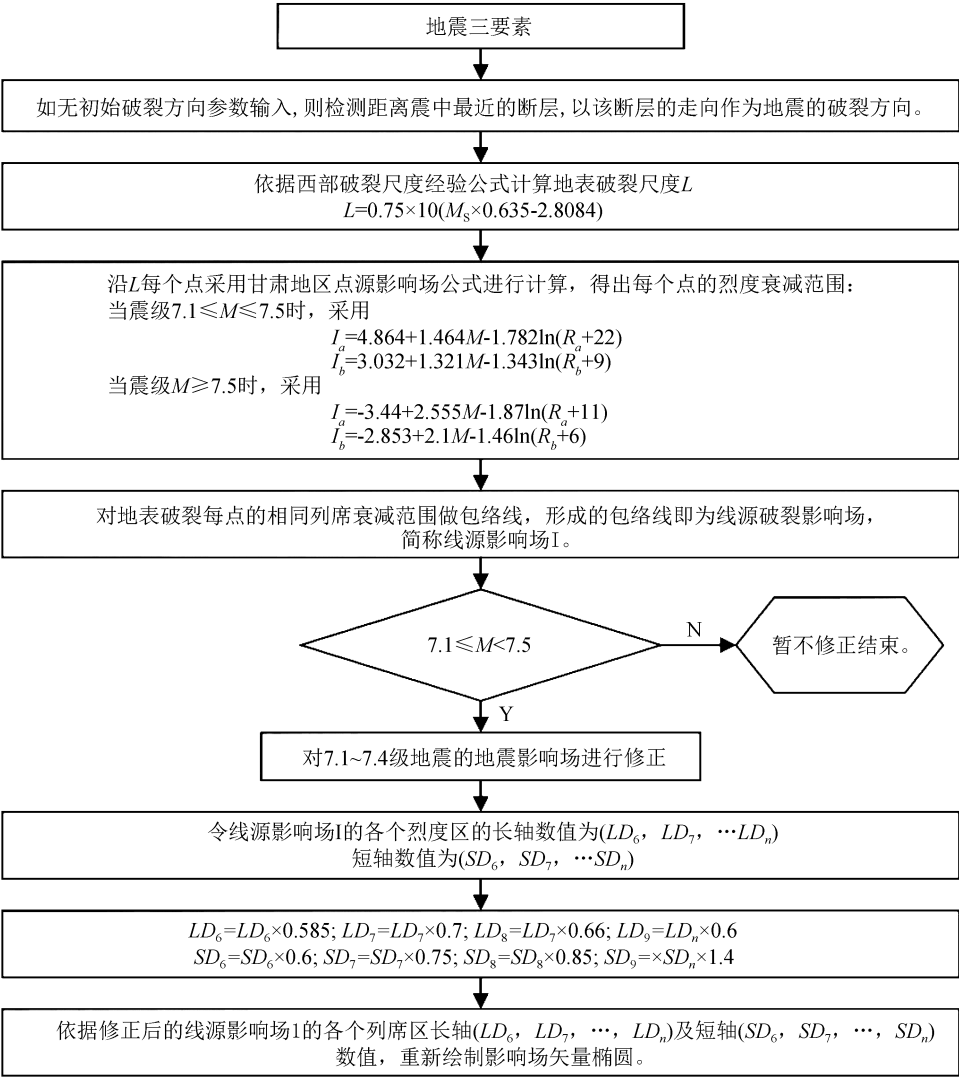


图 2 甘肃省地震烈度衰减模型(线源)

Fig.2 Attenuation model of earthquake intensity in Gansu Province (Line source)

2.3 分区建筑物易损性矩阵

软件中的建筑物震害矩阵采用刘如山等人^[40]得到的甘肃省建筑物易损性矩阵,将甘肃省分为 5 个区域(I 区:河西地区;II 区:中部山区;III 区:甘南草原;IV 区:陇南山地;V 区:陇东黄土高原),每个区域分四类建筑物结构(土木、砖木、砖混、框架)给出易损性矩阵,I 区建筑物易损性矩阵参数如下表所示。因建筑物易损性矩阵更加细化,使得快速评估结果更符合地区实际情况。

3 软件系统功能

甘肃省地震灾害快速评估原型系统核心功能包括:数据库管理功能、EQIM 服务器自动监测功能、地震灾害损失评估功能。设计研发的软件主界面如图 3 所示。软件采用 ArcGIS Geodatabase 空间数

据库,对基础地理数据、地震信息、灾害损失评估等数据进行管理(图 4);软件连接 EQIM 服务器,根据设定时间自动对地震信息进行扫描(图 5),发现地震信息(时间、地点、震级)后自动启动地震灾害损失评估模块;软件获取地震三要素后根据震级大小和区域人口密度特征进行地震影响范围估计,基于地震影响范围评估人员伤亡和经济损失,生成地震应

表 2 框架结构建筑物易损性矩阵(%)

Table 2 Vulnerability matrix of frame structure buildings (%)

破坏程度	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
基本完好	93.5	81	44	15	1
轻微破坏	6	15	46	27	5
中等破坏	0.5	4	8	28	14
严重破坏	0	0	2	23	55
毁坏	0	0	0	7	25

表 3 砖混结构建筑物易损性矩阵(%)

Table 3 Vulnerability matrix of brick-concrete structure buildings (%)					
破坏程度	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
基本完好	85	50	22	8	1
轻微破坏	14	36	37	13	3
中等破坏	1	13	30	24	11
严重破坏	0	1	9	42	50
毁坏	0	0	2	13	35

表 4 砖木结构建筑物易损性矩阵(%)

Table 4 Vulnerability matrix of brick-wood structure buildings (%)					
破坏程度	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
基本完好	66	33	9	0	0
轻微破坏	25	37	26	9	0
中等破坏	8	26	34	18	9
严重破坏	1	4	23	52	26
毁坏	0	0	8	21	65

表 5 土木结构建筑物易损性矩阵(%)

Table 5 Vulnerability matrix of civil structure buildings (%)					
破坏程度	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
基本完好	55	19	5	0.5	0
轻微破坏	27	30	8	2.5	0
中等破坏	14	25	30	15	1
严重破坏	4	20	34	28	8.5
毁坏	0	6	23	54	90.5

急专题图,获取震区基本信息(行政区划、人口、经济、历史地震、断层分布等),快速产出地震灾害评估报告(图 6,图 7)。

4 软件主要技术特点

本文系统概括了我国地震灾害快速评估领域内主要评估模型研究现状,针对目前业务化运行系统中存在的问题,基于甘肃省地震应急领域学者多年研究成果,采用分震级地震烈度衰减模型(圆模型、

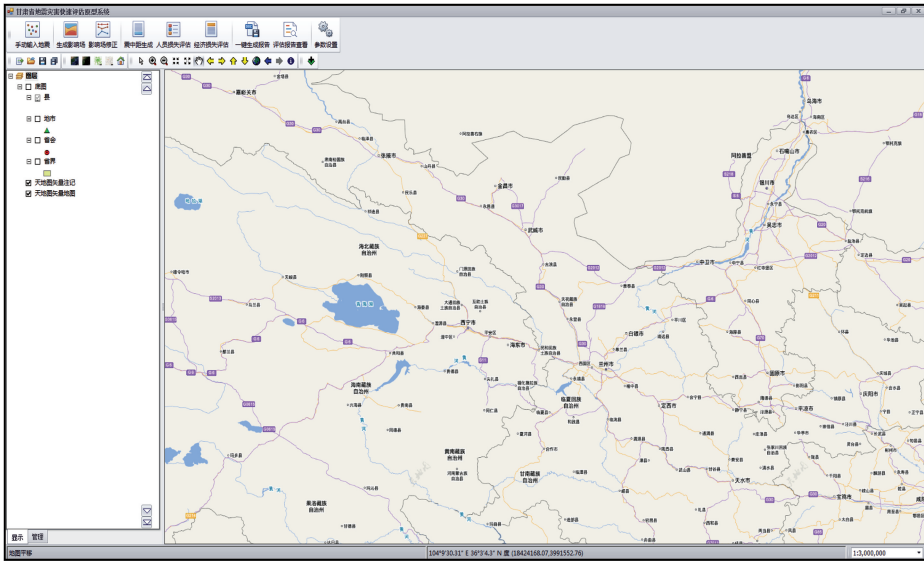


图 3 软件主界面

Fig.3 Main interface of software

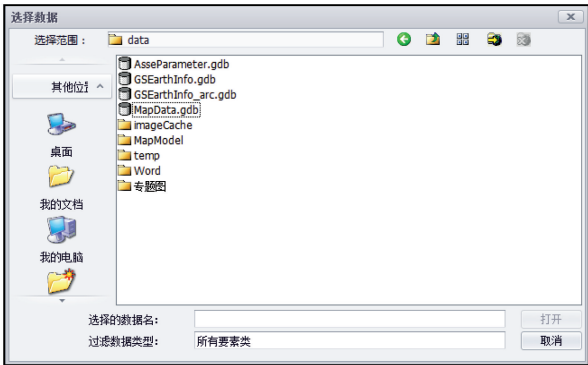


图 4 数据库管理

Fig.4 Database management

点源模型和线源模型)、分区地震灾害人员伤亡评估模型(根据人口密度不同进行分级)及分区建筑物易损性矩阵(甘肃省细分为 5 个区域),详细设计了软件工作流程及软件功能,研发了甘肃省地震灾害快速评估原型系统。该软件系统较“十五”“十二五”建设的地震应急技术系统中评估软件有以下技术特点:

(1) 系统通过对 EQIM 服务器进行自动扫描,实现地震信息的自动获取,实现了地震灾情快速评估报告的一键式生成,极大提高了软件自动化程度。通过实际震例实验计算,正式地震速报信息获取后 1~2 分钟,就能生成地震灾情快速评估报告。



图 5 EQIM 服务器自动扫描获取地震信息

Fig.5 Automatic scanning of EQIM server for earthquake information

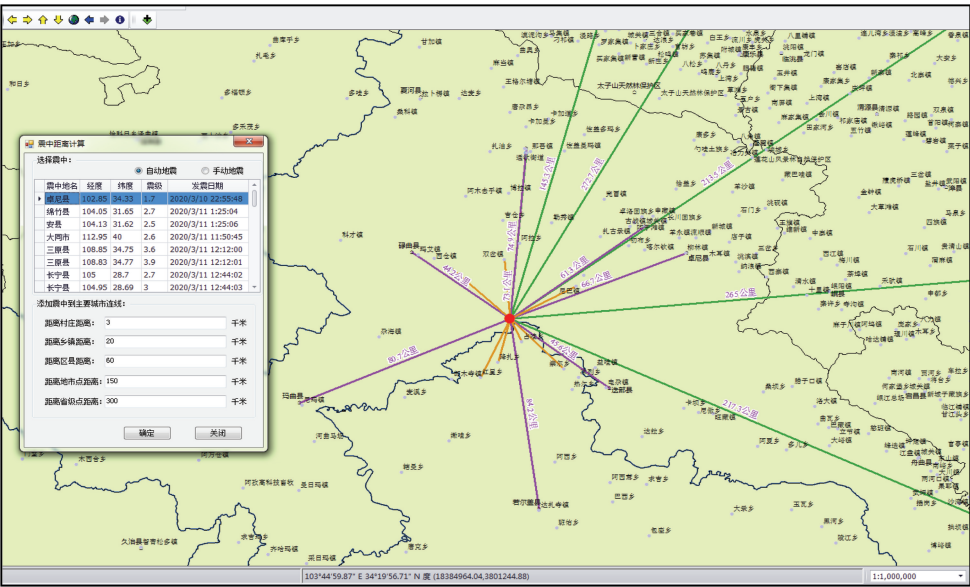


图 6 主要目标震中距离计算

Fig.6 Epicentral distance calculation of main target

(2)系统首次集成了甘肃区域内分震级地震烈度衰减模型、分区地震灾害人员伤亡评估模型、分区建筑物易损性矩阵,使得生成的地震影响范围更符合实际,一定程度上解决了大地震时点源模型无法模拟计算断裂破裂长度,重灾区长轴和范围偏小的问题;基于较为准确的地震影响范围估计,采用分区人员伤亡评估模型和建筑物易损性矩阵,使得人员伤亡评估和经济损失评估精度有了较大提高。

(3)系统实现了地震应急指挥技术系统中核心功能计算,自动产出震区基本信息、主要目标震中距离表、震区历史地震情况、地震影响范围、地震灾害程度、人员伤亡和经济损失等信息,为政府和应急管理

理部门应急响应和指挥决策提供技术支持。软件系统将甘肃区域内的理论研究成果以程序模块实现,使得理论研究成果能够转化为实际应用。该软件的工作流程、设计思路对于理论研究成果如何应于实际地震应急工作具有重要的参考价值。

5 结论与讨论

地震应急指挥技术系统涵盖地震学、计算机、地理信息科学、遥感技术、地质学等多学科,是多种高新技术的综合应用,是一项复杂的技术系统^[8]。作为应急指挥技术系统核心功能地震灾害快速评估更需要通过学者研究完善相关评估模型,不断提高技

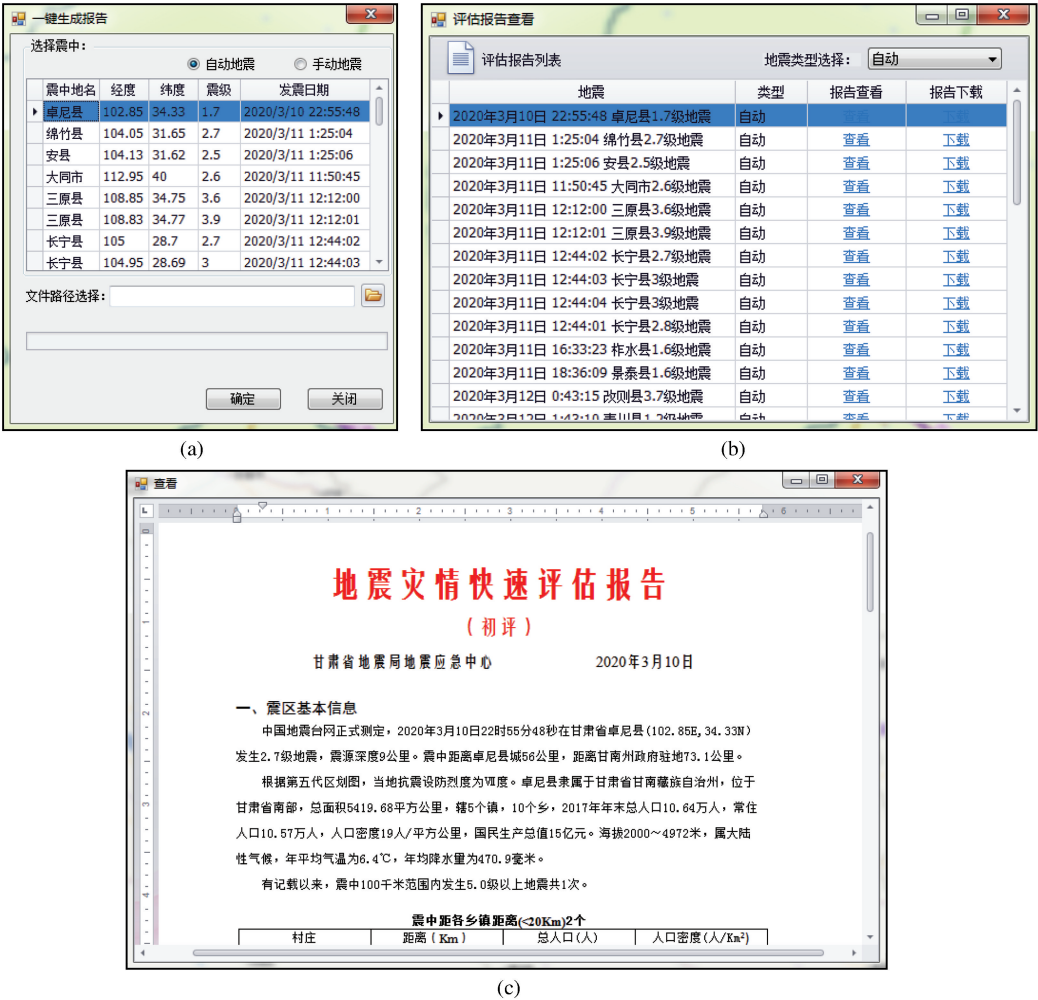


图 7 自动生成地震灾情快速评估报告

Fig.7 Automatic generation of earthquake disaster rapid assessment report

术系统产出信息的科学性和合理性。本文研发的甘肃省地震灾害快速评估原型系统虽然集成了近年来的研究成果,较目前业务化运行的技术系统评估结果精度方面有较大改进,但是还是未能有效解决大地震的影响范围估计,比如 7 级以上地震后,虽然线源模型能够模拟地震发震断层的破裂,但是无法评估地震断层破裂方向及破裂长度,需要专家通过经验判定,而专家经验往往会失效。自 2008 年四川汶川 8.0 级地震后,实时地震学发展迅速^[42-45],震后利用实时监测地震波形进行震源参数反演,30 分钟内能够自动获取地震断层破裂方向及长度,能够为地震应急响应和应急指挥决策提供技术支撑,这将是地震灾害快速评估系统中烈度衰减模型下一步发展的一个重要方向。

参考文献(References)

[1] 宋俊高,朱元清,火恩杰,等.上海市防震减灾应急决策信息系

统;GIS 的应用[J].地震学报,2000,22(4):424-432.

SONG Jungao,ZHU Yuanqing,HUO Enjie,et al.Information System for Emergence Decision on the Protection Against Earthquake and Disaster Reduction in Shanghai City:Application of Gis[J].Acta Seismologica Sinica,2000,22(4):424-432.

[2] 庄灿涛.国家防震减灾中心技术系统的建设[J].地震,2001,21(4):1-6.

ZHUANG Cantao.Development of the Technical System of the China National Earthquake Mitigation Center[J].Earthquake,2001,21(4):1-6.

[3] 帅向华,成小平,姜立新.基于 ArcVieW 的地震应急快速响应信息系统[J].地震,2001,21(4):94-99.

SHUAI Xianghua,CHENG Xiaoping,JIANG Lixin. Earthquake Emergency Response Information System Based on Arc-View[J].Earthquake,2001,21(4):94-99.

[4] 姜立新,聂高众,帅向华,等.我国地震应急指挥技术体系初探[J].自然灾害学报,2003,12(2):1-6.

JIANG Lixin,NIE Gaozhong,SHUAI Xianghua,et al.Primary Exploration of Earthquake Emergency Command System in China[J].Journal of Natural Disasters,2003,12(2):1-6.

- [5] 聂树明,何萍,李慧婷.广东省地震应急指挥中心信息系统设计与实现[J].华南地震,2005,25(2):62-67.
NIE Shuming, HE Ping, LI Huiting. The Design and Realization of the Information System for Guangdong Commanding Center of Earthquake Emergency Response[J]. South China Journal of Seismology, 2005, 25(2): 62-67.
- [6] 李东平,赵锦慧,沈晓健,等.基于GIS技术的浙江省地震应急指挥演练系统[J].地震研究,2006,29(3):290-293.
LI Dongping, ZHAO Jinhui, SHEN Xiaojian, et al. Zhejiang Provincial Earthquake Emergency Commanding Rehearsal System Based on GIS[J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(3): 290-293.
- [7] 帅向华,姜立新,李志强,等.国家地震应急快速响应信息系统建设:以首都圈地区为基础[J].自然灾害学报,2006,15(5):132-135.
SHUAI Xianghua, JIANG Lixin, LI Zhiqiang, et al. National Earthquake Disaster Emergency Rapid Response System: Beijing Aimed at Capital Circle Area[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(5): 132-135.
- [8] 何少林,李佐唐,张苏平,等.甘肃省地震应急指挥技术系统设计与实现[J].地震地磁观测与研究,2007,28(5):71-79.
HE Shaolin, LI Zuotang, ZHANG Suping, et al. Design and Implement of Technical System for Earthquake Emergency Direction in Gansu Province[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2007, 28(5): 71-79.
- [9] 管友海,王素珍.青岛市地震应急指挥决策支持软件的设计与开发[J].地震,2007,27(1):142-149.
GUAN Youhai, WANG Suzhen. Design and Development of the Qingdao Earthquake Emergency Command Decision Support Software[J]. Earthquake, 2007, 27(1): 142-149.
- [10] 危福泉,傅再扬.福建地震应急指挥中心技术系统[J].防灾博览,2008(2):24-25.
WEI Fuquan, FU Zaiyang. Technical System of Fujian Earthquake Emergency Command Center[J]. Overview of Disaster Prevention, 2008(2): 24-25.
- [11] 张翼,林洋,唐妹娅.四川地震应急指挥大厅技术系统集成及应用[J].四川地震,2012(4):34-37.
ZHANG Yi, LIN Yang, TANG Meiya. Integration and Application of the Seismic Emergency Commanding Technique System in Sichuan Province[J]. Earthquake Research in Sichuan, 2012(4): 34-37.
- [12] 张方浩,李永强,曹彦波,等.基于云技术的云南地震现场应急指挥技术系统优化[J].地震研究,2019,42(2):257-264.
ZHANG Fanghao, LI Yongqiang, CAO Yanbo, et al. Optimization of the Yunnan Post-Earthquake Field Emergency Command Technical System Based on Cloud Technology[J]. Journal of Seismological Research, 2019, 42(2): 257-264.
- [13] 周中红,何少林,陈文凯.甘肃省地震烈度衰减关系研究[J].西北地震学报,2010,32(1):72-75.
ZHOU Zhonghong, HE Shaolin, CHEN Wenkai. Study on the Attenuation Relationship of Seismic Intensity in Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(1): 72-75.
- [14] 孙艳萍,陈文凯,周中红,等.甘肃地区地震烈度影响场评价及其与地形因子的关系[J].地震工程学报,2014,36(3):697-704.
SUN Yanping, CHEN Wenkai, ZHOU Zhonghong, et al. Evaluation of Seismic Intensity Influence Field in Gansu Province and Its Relationship with Terrain Factors[J]. Northwestern Seismological Journal, 2014, 36(3): 697-704.
- [15] 张苏平,陈文凯,周中红,等.中国西部地区大地震($M_s \geq 7$)烈度衰减关系改进[J].自然灾害学报,2015,24(1):104-113.
ZHANG Suping, CHEN Wenkai, ZHOU Zhonghong, et al. Improvement of Intensity Attenuation Relationship of Large Earthquake ($M_s \geq 7$) in the Western Area of China[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(1): 104-113.
- [16] 周中红,何少林,陈文凯,等.甘肃地区地震烈度影响场计算模型参数的改进研究与应用[J].震灾防御技术,2011,6(2):180-189.
ZHOU Zhonghong, HE Shaolin, CHEN Wenkai, et al. Parameters in Seismic Intensity Affecting Field Model of Gansu Area[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2011, 6(2): 180-189.
- [17] 苗庆杰,许萍.山东及近邻区地震烈度衰减关系探讨[J].西北地震学报,2008,30(3):282-287.
MIAO Qingjie, XU Ping. Study on the Formula of Seismic Intensity Attenuation in Shandong and Its Adjacent Areas[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(3): 282-287.
- [18] 孙继浩,帅向华.川滇及其邻区中强地震烈度衰减关系适用性研究[J].地震工程与工程振动,2011,31(1):11-18.
SUN Jihao, SHUAI Xianghua. Study on Moderate-strong Seismic Intensity Attenuation Relations in Sichuan-Yunnan and Its Adjacent Areas[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(1): 11-18.
- [19] 肖亮,俞言祥.中国西部地区地震烈度衰减关系[J].震灾防御技术,2011,6(4):358-371.
XIAO Liang, YU Yanxiang. Earthquake Intensity Attenuation Relationship in Western China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2011, 6(4): 358-371.
- [20] 孙继浩,帅向华,李智蓉.中国西南地区强震烈度衰减模型的研究[J].地震,2013,33(3):51-59.
SUN Jihao, SHUAI Xianghua, LI Zhirong. Intensity Attenuation Model of Strong Earthquakes in Southwest China[J]. Earthquake, 2013, 33(3): 51-59.
- [21] 董曼,杨天青,郑通彦,等.川滇地区走滑型地震烈度衰减特征研究[J].地震,2015,35(3):147-154.
DONG Man, YANG Tianqing, ZHENG Tongyan, et al. Intensity Attenuation Characteristics of Strike-slip Earthquakes in Sichuan and Yunnan Regions[J]. Earthquake, 2015, 35(3): 147-154.
- [22] 张方浩,蒋飞蕊,李永强,等.云南地区地震烈度评估模型研究

- [J].中国地震,2016,32(3):511-521.
- ZHANG Fanghao,JIANG Feirui,LI Yongqiang,et al.Study of the Evaluation Model of the Earthquake Influence in Yunnan[J].Earthquake Research in China,2016,32(3):511-521.
- [23] 李雯,陈文凯,周中红,等.中国典型区域地震灾害生命易损性模型适用性评价[J].北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(2):284-290.
- LI Wen,CHEN Wenkai,ZHOU Zhonghong,et al.Assessing the Applicability of Life Vulnerability Models for Earthquake Disasters in Typical Regions of China[J].Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2019,55(2):284-290.
- [24] 李雯.地震灾害生命易损性研究[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2019.
- LI Wen.Study on Life Vulnerability of Earthquake Disaster [D].Lanzhou:China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology,2019.
- [25] 周中红,陈文凯,何少林,等.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[J].地震研究,2019,42(2):288-294.
- ZHOU Zhonghong,CHEN Wenkai,HE Shaolin,et al.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[J].Journal of Seismological Research,2019,42(2):288-294.
- [26] 魏本勇,聂高众,苏桂武,等.地震灾害埋压人员评估的研究进展[J].灾害学,2017,32(1):155-159.
- WEI Benyong,NIE Gaozhong,SU Guiwu,et al.Advances on the Assessment Methods of Buried Personnel Distribution in Earthquake Disaster[J].Journal of Catastrophology,2017,32(1):155-159.
- [27] 陈长坤,谢明峰,雷鹏,等.地震震后埋压人员伤亡程度分级研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(1):182-188.
- CHEN Changkun,XIE Mingfeng,LEI Peng,et al.Research on Grading for Injury Degree of Buried Personnel after Earthquake[J].Journal of Safety Science and Technology,2020,16(1):182-188.
- [28] 白仙富,戴雨茨,叶燎原,等.基于高精度房屋、人口数据的地震压埋人员和紧急搜救区评估模型研究[J].防灾减灾学报,2018,34(4):1-12.
- BAI Xianfu,DAI Yuqian,YE Liaoyuan,et al.Assessment Models of Trapped-victim in Earthquake&Emergency Rescue Area Based on High-precision Building and Population Data[J].Seismological Research of Northeast China,2018,34(4):1-12.
- [29] 余世舟,张令心,杨明儒.地震压埋人员分布评估方法初探[J].地震工程与工程振动,2015,35(2):138-143.
- YU Shizhou,ZHANG Lingxin,YANG Mingru.Assessment of Buried People Distribution after Earthquake[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2015,35(2):138-143.
- [30] 陈文凯,何少林,张苏平,等.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,2011,33(4):363-369.
- CHEN Wenkai,HE Shaolin,ZHANG Suping,et al.Analysis on the Geo-hazards Triggered by Wenchuan Earthquake in Wenxian County,Gansu Province,Based on Remote Sensing Information[J].Northwestern Seismological Journal,2011,33(4):363-369.
- [31] 孙艳萍,张苏平,陈文凯,等.汶川地震滑坡危险性评价:以武都区和文县为例[J].地震工程学报,2018,40(5):1084-1091.
- SUN Yanping,ZHANG Suping,CHEN Wenkai,et al.Risk Assessment of Landslides Caused by Wenchuan Earthquakes:a Case Study in the Wudu District and Wenxian County,Gansu Province[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(5):1084-1091.
- [32] 许冲,戴福初,陈剑,等.汶川 M_s8.0 地震重灾区次生地质灾害遥感精细解译[J].遥感学报,2009,13(4):745-762.
- XU Chong,DAI Fuchu,CHEN Jian,et al.Identification and Analysis of Secondary Geological Hazards Triggered by a Magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake[J].Journal of Remote Sensing,2009,13(4):745-762.
- [33] 白仙富,戴雨茨,余庆坤,等.地震滑坡危险性评估模型及初步应用[J].地震研究,2015,38(2):301-312.
- BAI Xianfu,DAI Yuqian,YU Qingkun,et al.Risk Assessment Modeling of Earthquake-induced Landslides and Its Preliminary Application[J].Journal of Seismological Research,2015,38(2):301-312.
- [34] 何少林,陈文凯,周中红,等.甘肃岷县漳县 6.6 级地震灾情快速评估及应急处置保障[J].地震研究,2014,37(4):588-593.
- HE Shaolin,CHEN Wenkai,ZHOU Zhonghong,et al.Disaster Situation Fast Assessment and Emergency Disposition Support for Minxian-Zhangxian M_S6.6 Earthquake in Gansu Province[J].Journal of Seismological Research,2014,37(4):588-593.
- [35] 李雯,陈文凯,周中红,等.中国大陆地震灾害生命损失时空特征分析[J].灾害学,2019,34(1):222-228.
- LI Wen,CHEN Wenkai,ZHOU Zhonghong,et al.Analysis of Temporal-spatial Distribution of Life Losses Caused by Earthquake Hazards in Chinese Mainland [J].Journal of Catastrophology,2019,34(1):222-228.
- [36] 何少林,习聪望,高安泰,等.提升甘肃地震应急指挥系统服务能力的措施和思考[J].防灾减灾学报,2015,31(4):8-13.
- HE Shaolin,XI Congwang,GAO Antai,et al.Measures and Thoughts to Enhance the Service Capabilities of Gansu Earthquake Emergency Command System[J].Journal of Disaster Prevention and Reduction,2015,31(4):8-13.
- [37] 张苏平,孙艳萍,陈文凯.余震信息在岷县漳县 6.6 级地震震后应急救援重灾区快速判定时作用探讨[J].地震工程学报,2013,35(3):465-470.
- ZHANG Suping,SUN Yanping,CHEN Wenkai.Effects of Aftershocks on Quick Determination of Hard-hit Area for Emergency Rescue after the Minxian—Zhangxian M_S6.6

- Earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):465-470.
- [38] 陈文凯,孙艳萍,周中红,等.甘肃省地震应急专题图的设计与实现[J].地震工程学报,2015,37(3):884-889,900.
- CHEN Wenkai,SUN Yanping,ZHOU Zhonghong,et al.Design and Implementation of Earthquake Emergency Thematic Map of Gansu Province[J].Northwestern Seismological Journal,2015,37(3):884-889,900.
- [39] 孙艳萍,马小平,陈文凯,等.甘肃地震应急专题图改进设计与研究[J].国际地震动态,2019(10):12-18.
- SUN Yanping,MA Xiaoping,CHEN Wenkai,et al.Improved Design and Research of Earthquake Emergency Thematic Map in Gansu[J].Recent Developments in World Seismology,2019(10):12-18.
- [40] 刘如山,余世舟,颜冬启,等.地震破坏与经济损失快速评估精细化方法研究[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(5):928-940.
- LIU Rushan,YU Shizhou,YAN Dongqi,et al.Refined Method for Rapid Assessment of Seismic Damage and Economic Loss[J].Journal of Basic Science and Engineering,2014,22(5):928-940.
- [41] 耿冠世,俞言祥.中国西部地区震源破裂尺度与震级的经验关系[J].震灾防御技术,2015,10(1):68-76.
- GENG Guanshi,YU Yanxiang.The Empirical Relationship between Subsurface Rupture Length and Earthquake Magnitude in Western China[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2015,10(1):68-76.
- [42] WANG D,KAWAKATSU H,ZHUANG J C,et al.Automated Determination of Magnitude and Source Length of Large Earthquakes Using Backprojection and P Wave Amplitudes[J].Geophysical Research Letters,2017,44(11):5447-5456.
- [43] 郑绪君,张勇,马强,等.基于强震动资料的破裂过程快速反演及其自动化的可行性[J].地球物理学报,2018,61(10):4021-4036.
- ZHENGXujun,ZHANG Yong,MA Qiang,et al.Fast Inversion of Rupture Process Based on Strong Motion Data and the Feasibility of Its Automation[J].Chinese Journal of Geophysics,2018,61(10):4021-4036.
- [44] 岳汉,张勇,盖增喜,等.大地震震源破裂模型:从快速响应到联合反演的技术进展及展望[J].中国科学(地球科学),2020,50(4):515-537.
- YUE Han,ZHANG Yong,GE Zengxi,et al.Resolving Rupture Processes of Great Earthquakes:Reviews and Perspective from Fast Response to Joint Inversion[J].Scientia Sinica (Terrae),2020,50(4):515-537.
- [45] 王德才,倪四道,李俊.地震烈度快速评估研究现状与分析[J].地球物理学进展,2013,28(4):1772-1784.
- WANG Decai,NI Sidao,LI Jun.Research Status of Rapid Assessment on Seismic Intensity[J].Progress in Geophysics,2013,28(4):1772-1784.