

地震灾害损失评估与遥感技术现状和展望

安立强^{1,2}, 张景发³, Ricardo Monteiro⁴, 张磊²

1. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080;
2. 天津市地震局, 天津 300201;
3. 应急卫星工程与应用应急管理部重点实验室, 北京 100124;
4. 意大利帕维亚高等研究院, 帕维亚 意大利 27100

摘要: 地震灾害损失评估是地震震前应急准备、震后应急响应和恢复重建的重要工作内容。随着地震灾害风险的加剧以及对防灾减灾救灾工作需求的提升, 近年来地震灾害损失评估技术得到较快的发展。同时, 随着遥感技术进入大数据、智能化时代, 遥感数据在地震灾害损失评估中也得到了广泛的应用。本文对地震灾害损失评估及其中遥感技术应用的发展进行了梳理: 首先回顾了地震灾害损失评估的发展现状, 对比分析了国内外地震灾害损失评估软件平台的异同点; 归纳了人口和经济损失估计的典型方法; 然后分别对震后遥感灾害损失评估以及基于遥感的震害预测方法现状进行了总结。最后本文讨论了目前地震灾害损失评估工作存在的一些问题并提出了相应的建议, 在此基础上对遥感数据应用于地震灾害损失评估工作的趋势进行了展望。

关键词: 震害预测, 地震风险, 损失评估, 震害评估, 遥感数据

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 安立强, 张景发, Ricardo Monteiro, 张磊. 2024. 地震灾害损失评估与遥感技术现状和展望. 遥感学报, 28(4): 860-884

An L Q, Zhang J F, Ricardo M and Zhang L. 2024. A review and prospective research of earthquake damage assessment and remote sensing. National Remote Sensing Bulletin, 28(4): 860-884 [DOI: 10.11834/jrs.20232093]

1 引言

中国是世界上遭受地震灾害最为严重的国家之一, 随着社会经济水平不断发展, 城镇化进程不断推进, 国民富裕程度不断提高, 各类地震承灾体暴露数量也在不断增加, 所面临的地震灾害风险也日益严重。常态减灾工作中, 开展震害预测、地震灾害风险评估工作, 是减轻地震灾害损失的基础和有效途径。非常态救灾工作中, 地震发生后能否快速、准确地对灾区破坏、人员伤亡和经济损失做出较为准确的评估, 对应急救援、抗震救灾行动能否收到实效具有重大的影响(刘如山等, 2014)。

近年来, 随着地震灾害风险意识的提高以及计算机软件等相关技术的成熟, 地震灾害评估方

法的研究也得到了促进(李延唯和余世舟, 2021)。对单体工程的震害预测逐步由基于大量样本的模糊数学判别和有限元建模的易损性分析, 替代了利用实际震害统计分析、半理论一半经验的简化方法和简化的抗震分析方法等; 对城市或区域的群体震害预测和损失评估网格化表征已成为研究工作和实际应用的增长点(孙柏涛和李洋, 2021)。然而, 精细化的定量研究往往会在数据支撑方面受到限制, 一些研究成果的大范围推广往往因数据完备性问题而受到阻碍(王晓青等, 2009a; 付泽钰和陈奇放, 2019)。

与此同时, 随着遥感数据的爆炸性增长, 遥感技术应用已经进入了具有多源、海量、多维度等特点的遥感大数据时代。遥感数据分析技术也随着人们对遥感图像理解的要求提升而不断进步。

收稿日期: 2022-03-11; 预印本: 2022-08-03

基金项目: 应急管理部国家自然灾害防治研究院中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助项目(编号: ZDJ2017-29); 天津市重点研发计划(编号: 20YFZCSN01010)

第一作者简介: 安立强, 研究方向为防震减灾技术及遥感的理论和应用。E-mail: anliqiang@sina.com

通信作者简介: 张景发, 研究方向为遥感特征信息提取与定量遥感技术。E-mail: zhangjingfa@hotmail.com

在数据快速丰富和分析技术进步的双重驱动下，震后遥感震害信息提取工作正向着多源信息深度融合和信息智能化挖掘的方向发展。遥感技术也在不断适应地震灾害损失精细化评估的需求。目前，应用遥感技术进行震后损失评估的工作流程已经日趋成熟（王栋梁，2007；王龙，2007；王晓青等，2015b；张景发等，2018；和海霞等，2018；李强，2018）。应用多源遥感数据实现对单体建筑物进行详细的易损性类别划分进而支撑建筑物震害预测的方法和流程正在逐渐完善（Dell’Acqua等，2013；Geiß等，2015；Wieland等，2015；Riedel等，2015；刘耀辉，2020）。

随着遥感数据应用于地震灾害损失评估的成果的不断积累并取得了很好的效果，针对这些应用总结归纳文献的重要性不断凸显。现有关于遥感技术应用于地震灾害损失评估研究的综述性论文一般覆盖面不够广，只关注地震灾害损失评估某一个具体问题（吴焕娟等，2006；安立强和张景发，2011）。又或者综述的重心只放在其中遥感数据分析方法上，缺乏从地震灾害损失评估出发的分析视角（陈文凯等，2008；崔丽萍和王晓青，2016）。鉴于此，本文在对照分析地震灾害损失评估软件发展现状、地震灾害损失评估技术进展的基础上又对遥感技术在这一领域的应用现状进行归纳总结。最后分别提出地震灾害损失评估技术以及这

一领域中遥感技术应用的趋势、前景和展望，以期将来遥感技术应用于地震灾害损失评估提供参考。

2 地震灾害损失评估技术发展概况

2.1 地震灾害损失评估的研究范畴

地震灾害损失评估是对地震灾害造成的损失的程度做出评定与估计（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会，2008）。通常，一次地震发生后，在很短时间内开展的灾害损失程度评估工作则被称为地震灾害损失快速评估。地震灾害预测或地震风险评估指的则是对未来潜在地震可能造成的灾害损失做出估计，如估计某一区域在遭受一定强度地震作用下，工程结构可能发生的破坏程度，以及由此导致的人员伤亡、经济损失、危害程度和社会影响等（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会，2015）。地震灾害损失评估（或地震灾害损失预测、地震灾害风险评估）、地震灾害损失快速评估以及地震实际震害监测与损失评估，在工作内容上存在着极其紧密的联系，表1给出了地震灾害损失评估涵盖的3种类别在工作时间段、工作范围，主要工作目的上的对比。本文在研究地震灾害损失评估技术发展时，将上述几类工作视为同一研究范畴。

表1 3种地震灾害损失评估工作的简单对比

Table 1 Three types of earthquake disaster damage assessment

类别	工作时间段	工作范围	主要目的
震害预测	震前预防阶段	某一栋建筑或一个城市或某一区域	评估未来一段时间内的地震灾害风险或损失，提出减灾对策措施。作为规划依据、韧性城市评价指标等。
震害损失快速评估	震后极短时间内	地震可能影响的范围	为启动应急响应级别，部署应急救援提供决策建议
地震实际震害监测与损失评估	震后应急及灾后重建阶段	地震影响的范围为主	组织救援抢险、制定重建规划

2.2 地震灾害损失评估工作的发展现状

20世纪60年代起，日本、美国先后开始了地震灾害损失评估及预测相关的研究工作。日本在1960年代先后经历了1961年美浓M7.0级地震和1964年新泻M7.5级地震，促使防灾工作得到了显著推进。1978年的东京都防灾会议发表了《地震时各地区震害预测报告》，震害预测工作为制定地震防灾对策提供了依据（刘锡荟和陈一平，1985）。进入21世纪，日本在2001年批准启动了

城市地震减灾相关重大科研计划，2006年启动了城市地震危险预测以及城市地震安全评定相关计划（林捷，2011）。

20世纪70年代美国“国家减少地震灾害计划”组织有关研究人员开展了大尺度灾害损失研究工作，形成了NOAA/USGS建筑震害预测方法，通过分析灾害损失历史资料，归纳了20多种类型建筑的地震易损性曲线。进入80年代，美国联邦紧急事务管理局（FEMA）组织开展了美国的城市

震害预测与防震减灾对策研究，推出了建筑物震害预测 ATC-13、生命线工程震害预测 ATC-25 等一系列震害预测标准。1997年，美国联邦紧急事务管理局（FEMA）和美国国家建筑科学研究所（NIBS）提出了 HAZUS 系统以实现潜在地震、洪水、飓风 3 类自然灾害进行风险评估或损失评估，在美国和国际上其他地区相关工作中得到广泛应用（FEMA 和 NIBS, 1997；胡少卿, 2007）。HAZUS 的建筑物震害预测法是以地震动参数作为输入，对每种类型的结构分别建立其等效单自由度结构分析模型，定义各个破坏状态的判断准则，采用能力谱方法得到地震动强度和建筑破坏状态的关系。在建筑物以及生命线系统等的震害预测基础上，再对人员伤亡、直接经济损失等进行计算。图 1、图 2 分别为 HAZUS 系统功能模块和损失

计算流程。HAZUS 的成功经验和模式以及理论基础为众多地震灾害损失评估系统或工具的发展提供了重要的参考价值。表 2 中按照大致的诞生年代顺序列举了 20 世纪 90 年代以来国外主要地震灾害损失评估技术系统的名称、损失计算核心方法、研发国家或机构、主要功能或产出等信息。其中，Ergo-EQ 地震风险评估工具（前身为 MAEviz）是在吸收了大量 HAZUS 的成果基础上，引入了基于后果的风险管理框架（McLaren 等, 2008）。Ergo-EQ 目前也被整合到土耳其地震风险评估平台 HAZTurk（Karaman 等, 2008）、欧洲 EQvis 平台（Schäfer 等, 2013）以及 SYNER-G 项目中。具有 web 的用户界面的 ER2-Earthquake（Abo El Ezz 等, 2019）也是一种基于 HAZUS 的风险评估软件，可供专家和非专家用户使用。

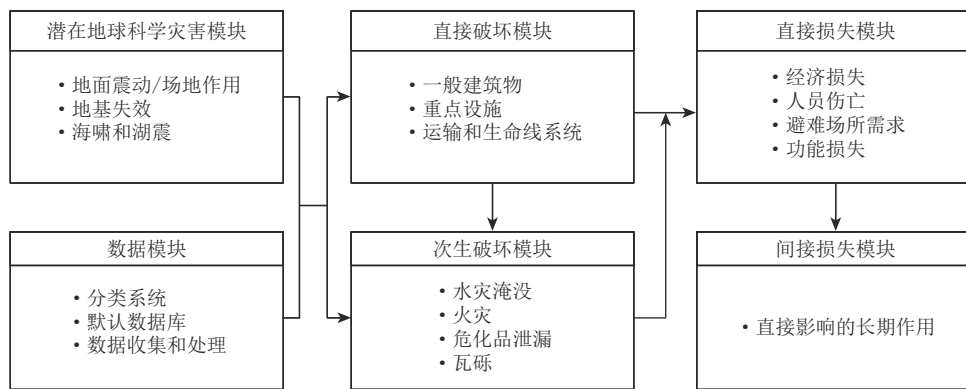


图 1 HAZUS 系统功能模块(FEMA 和 NIBS, 1997)

Fig.1 HAZUS function module(FEMA & NIBS, 1997)

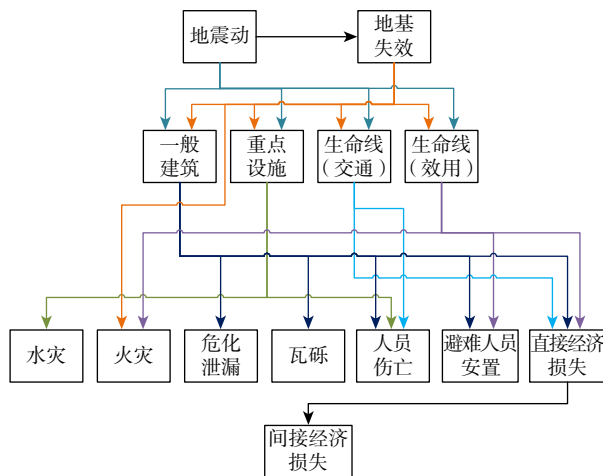


图 2 HAZUS 地震灾害损失计算总体流程 (FEMA 和 NIBS, 1997)

Fig.2 Overall earthquake disaster losses calculation process of HAZUS(FEMA & NIBS, 1997)

其他一些软件中也或多或少吸收了 HAZUS 的方法。SELENA 地震灾害损失评估系统（Molina 等, 2010），在破坏估计方法上应用了与 HAZUS 类似的能力谱法。SELENA 的特点在于考虑了不确定性的存在，通过逻辑树方法使各种输入参数隐含的不确定性得到表达，并且结果产出时提供了相应的置信度。EQRM 采用基于事件的方式进行建模，在破坏估计的方法上基于 HAZUS 的方法进行了改进和调整（Dhu 等, 2008）。ELER 的 Level 2 级评估采用与 HAZUS 类似的方法（Hancilar 等, 2010）。KOERILOSS（Strasser 等, 2008）可以基于经验易损性矩阵或基于类似 HAZUS 的方法进行易损性计算。OOFIMS（OOFIMS, 2020）软件在其最新版本中，供水系统的易损性分析用到了 HAZUS 的相关模型。

表2 90年代以来国外主要地震灾害评估软件系统
Table 2 Foreign earthquake damage assessment software system since the 1990s

年代	名称	损失计算核心方法	国家或机构	主要功能或产出
1990年代	CATS(Consequences Assessment Tool Set)	—	美国国防威胁降低局(DTRA)和联邦紧急事务管理局(FEMA)	绘制灾害范围及影响程度,制定辅助决策
	RADIUS(Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters)	—	联合国国际减灾十年(IDNDR)	为城市制定防震减灾规划提供依据。通过案例研究提高了决策者、公众和媒体对地震风险的认识
	EPEDAT(The Early Post-earthquake Damage Assessment Tool)	—	美国加州EQE 国际	地震影响区的破坏、人员伤亡、建筑物及生命线工程的损失估计结果
	HAZUS	分析法	由美国联邦紧急事务管理局(FEMA)与美国国家建筑科学研究院(NIBS)签订合同	<p>量化评估并绘制风险信息,包括:灾害对住宅和商业建筑、学校、关键设施和基础设施造成的破坏</p> <p>经济损失,包括失业、业务中断、维修和重建费用;社会影响,包括对流离失所的家庭、住房需求以及遭受洪水、地震、飓风和海啸影响的人口的估计;一般减灾策略的成本效益</p>
2000年后	Ergo-EQ(MAEviz)	分析法 经验法	中美地震中心和伊利诺伊大学美国国家超级计算应用中心	面向减灾规划、灾后应急救援、恢复重建等工作的具备空间数据处理和可视化功能的地震风险评估和分析工具。
	PAGER(Prompt Assessment of Global Earthquake for Response)	宏观法	美国USGS	自动触发,获得地震动场分布,并基于经验模型及数据快速的评估地震灾害造成的人员伤亡、经济损失和受灾人口分布等。
	SELENA(SEismic Loss Estimation using a logic tree Approach)	分析法:HAZUS易损性曲线或用户自定义易损性曲线	国际地质灾害中心通过挪威地震台阵和西班牙阿利坎特大学开发	可以产出:地震动图、地震破坏概率和程度、人员伤亡和经济损失估计、避难场所需求。
	KOERILOSS	基于土耳其相关文献的经验法; 根据土耳其建筑物校准的HAZUS易损性曲线的分析法	土耳其海峡大学KOERI 研究中心	建筑物破坏情况以及由建筑破坏造成的人员伤亡及直接经济损失
	EQRM(Geoscience Australia's Earthquake Risk Model)	分析法 经验法	澳大利亚地球科学局	地震危险性分布图、危险性超越曲线和均匀危险性谱,累计和分解的年损失
	CAPRA – Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment(Cardona等,2012)	分析法 经验法	由中美洲政府、中美洲自然灾害预防协调中心、联合国国际减灾战略中心、美洲开发银行及世界银行共同资助开发的中美洲概率风险评估平台	一组或单个建筑物破坏的超越概率曲线、可能的最大损失和平均年损失。
2010年后	ELER(Earthquake Loss Estimation Routine)	分析法	欧洲地震学研究基础设施网络项目内容,由土耳其海峡大学KOERI 研究中心、帝国理工大学、挪威地震台阵,欧洲—地中海地震中心共同开发	地震造成的城市建筑物破坏情况以及由建筑破坏造成的人员伤亡及直接经济损失
	OpenQuake	分析法 经验法	全球地震模型基金会 GEM	确定情景地震风险计算、基于地震事件的地震风险计算以及基于PSHA的地震风险计算等共5种模式的地震风险计算功能,可以产出各类地震危险性产品以及地震灾害损失估计结果
	ER2-Earthquake(Rapid Risk Evaluator)	分析法	加拿大自然资源部	地震可能造成的破坏程度、建筑物损失及重置成本、人员伤亡

上述众多软件平台大多是面向某一地区的应用而研发的, 采用的区域专用易损性模型或暴露数据。而目前, 全球地震模型基金会 GEM (Global Earthquake Model) 则将目标指向为全球范围提供一套通用的、公开的、标准化的应用、交流平台。由 GEM 开发的 OpenQuake Engine 是目前较为先进的、功能全面的、开源地震灾害和地震风险评估软件 (Silva 等, 2014)。该软件具备确定情景地震风险计算、基于地震事件的地震风险计算以及基于概率地震危险性分析 (PSHA) 的地震风险计算等共 5 种模式的地震风险计算功能, 可以产出各类地震危险性产品以及地震灾害损失估计结果, 是为数不多的面向全球应用的产品。表 2 为 90 年代以来国外主要地震灾害评估软件情况。

中国在经历了 1966 年—1976 年地震灾害严重的十年后, 进入了地震工程学科繁荣发展的第一个十年 (1977 年—1987 年) (刘恢先, 1988)。中国在 1980 年首次进行震害预测, 1985 年颁布了《城市抗震防灾规划编制工作暂行规定》, 标志着建筑物震害预测正式成为城市抗震防灾规划的基础工作, 而震后地震灾害损失评估工作起始于 1989 年大同一阳高地震, 通过实际地震损失评估探索明确了震后地震灾害损失评估工作内容涵盖人员伤亡、经济损失、建筑物破坏以及无家可归人数等的计算, 并基于 FORTRAN 语言设计和开发实现了震害评估软件 EDEP (李树桢等, 1995)。在此之前的震害调查工作主要是以总结经验, 改进抗震设计方法为主要目的, 没有把地震破坏与经济损失直接联系起来 (李树桢和尹之潜, 1993)。同年, 中国地震局组织有关单位开展了

“中国地震灾害损失预测”研究, 把地震灾害损失预测研究列为中国地震局的重点课题。90 年代开始, 中国的地震灾害损失预测与评估研究产生了大批成果。例如, 李树桢和尹之潜 (1993) 根据 1989 年大同一阳高地震的工作经验提出以建筑物破坏等级评估为基础的震害快速评估实用方法, 设计了震害评估计算程序, 并提出震害评估数据库系统的建立方法。程家喆和杨喆 (1996) 对一天中人在不同时间段逗留在房屋内部的概率进行了讨论, 从而建立地震人员伤亡评估的数学模型, 在此基础上研发地震人员伤亡的快速评估系统。温瑞智 (1997) 较早提出了基于 GIS 的地震灾害损失评估系统框架和构建设想。王晓青等 (2000) 完成了 EDLP 1.0 for Windows 系统的开发, 该系统是以地震危险性分析、建筑物易损性分析、概率统计理论及震害经验为依据编制而成的地震灾害损失预测应用软件系统, 具有常见的框架结构、砖混结构、钢筋混凝土厂房、砖柱厂房的单体和群体地震易损性评估、单体震害和损失预测, 以及更多常见结构类型的群体地震灾害损失预测功能, 其使用对象定位于各级地方地震部门, 兼顾专业地震灾害损失预测研究部门。

为了配合由中国地震局颁布的《地震灾害损失评估工作规定》(试行) 的实施, 丁香等 (1998) 完成了地震灾害损失现场评估软件系统 (EDLES 1.0) 的研发, EDLES 1.0 是国内首个具有可视集成控制环境的地震灾害损失评估系统。图 3 为 1980 年代以来中国地震灾害损失评估工作发展过程。

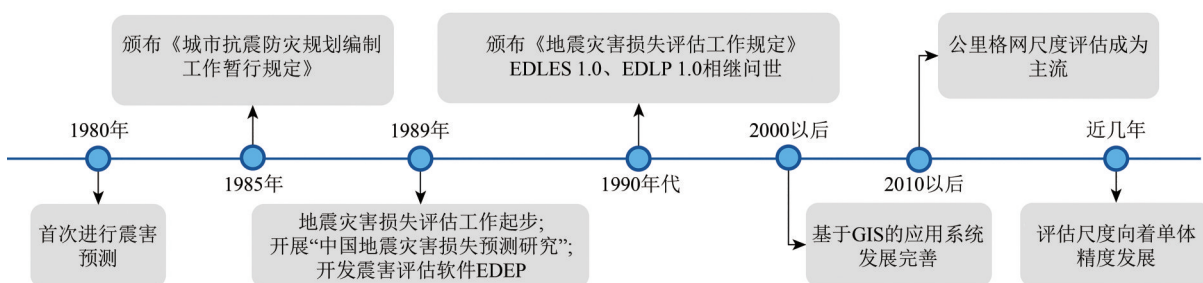


图 3 1980 年代以来中国地震灾害损失评估工作发展情况

Fig.3 Development of earthquake disaster damage assessment in China, since the 1980s

总体而言, 2000 年后, 随着研究人员对 GIS 系统的熟悉, 以及各类软件系统的发展完善, 地震灾害损失评估以及震害预测相关研究成果得到

了极大丰富。随着评估需求和方法的不断改进, EDLES 系统也得到了不断升级和功能完善: 于 2000 年推出非 GIS 版的首个具有评估报告自动生

成功能的EDLES 2.5版；2001年推出基于GIS的地震灾害损失评估系统Map EDLES 2001（王晓青和丁香，2004）；2007年推出兼容GIS环境和非GIS环境使用的Map EDLES 2007。EDLES系列系统可以称之为中国地震灾害损失现场评估领域里程碑式的系统，在全国包括汶川地震、玉树地震等70多次破坏性地震的灾害损失调查和评估实际应用中发挥重要作用。在“十五”期间（2000年代初期）中国地震行业基本上完成了全国范围的区域、省、市不同级别的标准化地震灾害评估软件建设（姜立新等，2003），基于GIS平台实现了包括地震应急基础数据库管理、地震影响场快速估计、地震经济和人员以及破坏评估、报告产出等功能。丁香等（2011）研发了EQRiskAsia 2010，用以对未来10年尺度亚洲地震巨灾风险进行评估计算。系统的主要包括数据库管理、地震损失评估及风险评估、地震风险综合评估、地震震后快速评估。陈洪富（2012）实现了基于云计算平台的HAZ-China地震灾害损失评估系统，陈洪富等（2014）建立了基于Web GIS的基础数据库共享平台。陈焜浩等（2017）建立了模块化的城镇地震灾害风险评估系统。

近年来，为了提高地震灾害损失评估工作的准确性，承灾体数据以及评估单元的粒度得到明提升。安基文等（2015），徐敬海等（2016）在地震灾害快速评估中应用到了30"×30"精度的承灾体数据，并基于千米格网数据开发了地震应急灾情预评估数据。张勇等（2018）在进行上海市地震快速评估系统研究时，将评估的精度提高到社区一级。丁香等（2019）则基于格网数据实现了全国尺度的地震灾害损失预测系统。孙哲等（2019）基于公里格网数据，通过预先将多个烈度等级下地震可能造成的损失情况的估算结果存入数据库的方式，实现地震发生后以查询替代计算得到损失结果估计。随着建筑震害预测的不断发展以及数据完备性的提升，地震灾害损失评估技术在精细化方面也取得了进步。西安建筑科技大学研发的中国地震灾害损失评估系统（CEDLAS）则可以对单体建筑、城市区域、国家范围不同尺度下进行震前灾害风险评估、震中实时评估、震后境况模拟的灾害损失评估（郑跃等，2020）。表3分别按照大致的诞生年代顺序列举了90年代以来国内主要地震灾害损失评估技术系统的软件名称、发

布年代及主要开发者、地震影响类型、损失计算核心方法、主要应用场景以及评估尺度等信息。

对比分析国内外地震灾害损失评估软件的发展现状可以看出，目前在实际应用中地震灾害损失的核心计算方法主要分为基于震例资料的宏观法和基于易损性的方法。按照易损性的表达方式，基于易损性的方法又分为基于易损性矩阵的经验法和基于易损性曲线的分析法。大体上，国外有代表性的软件平台多数采用基于易损性的损失计算方法，一般在以分析法为主的同时还兼顾经验法的应用。而中国目前可业务化运行的多项软件平台则大部分以经验法作为损失评估的核心方法。但实际上，造成投入使用的业务平台中地震灾害损失计算方式差异的主要原因，首先应该归结于数据完备性的问题，不同的计算方式所需的数据的获取难度相差甚远。

2.3 地震灾害损失评估方法的发展现状

经济损失和人员伤亡是地震灾害损失评估的主要内容。本文根据地震灾害损失评估方法的研究尺度以及模型的差异，将地震灾害损失评估方法按是否考虑结构地震易损性划分为两类：（1）不考虑结构地震易损性的方法，基于历史震例资料，直接建立宏观数据与地震灾害损失之间的联系，进行模型的拟合。（2）基于结构地震易损性的震害评估方法，一般是以地震造成的结构破坏导致的直接经济损失以及人员伤亡为目标，核心问题是求解不同结构在地震作用下的破坏情况，又可以按建筑易损性的应用模式分为基于地震易损性矩阵的经验方法和基于弹塑性分析和易损性曲线的分析方法。其中机器学习方法属于对宏观数据的应用，本文中将其归为基于宏观数据和历史震例的方法。图4简要描述了两种地震灾害损失评估流程。

2.3.1 地震灾害经济损失评估

基于历史震例宏观数据，对地震灾害造成的经济损失率、直接经济损失或总损失进行建模，从而对地震造成的总体经济损失进行评估（国家地震局震害防御司未来地震灾害损失预测研究组，1990；陈棋福和陈凌，1997；王晓青等，2009a；蔡友军等，2015；陈尧等，2017），是一种相对传统但易于计算的方法。例如，陈尧等（2017）通过最小二乘法构建地震直接经济损失快速评估

模型时仅用震中烈度或震级分别建立了两种一元函数式:

$$\lg L = 0.84444I - 1.831 \quad (1)$$

$$\lg L = 0.5996M + 0.4011 \quad (2)$$

式中, L 为地震直接经济损失, M 为震级; I 为震中烈度。

表3 90年代以来中国主要地震灾害评估软件系统

Table 3 Domestic earthquake damage assessment software system since the 1990s

年代	软件名称及主要开发者等相关信息	地震影响类型	损失计算核心方法	主要应用场景	评估尺度
1990年代	EDEP-93 (李树桢和尹之潜, 1993年)	—	抽样调查后综合, DOS环境	地震损失快速评估 地震损失总评估	评估区/单独评定/ 行政单元
	地震人员伤亡评估系统 (程家喻和杨喆, 1996年)	地震烈度	经验法	人员伤亡预测 (基于建筑物)	乡镇(街道)
	EDLP 1.0 for Windows (王晓青等, 1998年)	地震烈度	经验法 分析法	地震易损性评估、 震害和损失预测	单体建筑、群体建筑
	EDLES 1.0 (王晓青等, 1997年)	地震烈度	抽样调查后综合	地震现场灾害 损失评估	评估区/单独评定/ 行政单元
2000年后	EDLES 2.5 (王晓青等, 2000年)	地震烈度	抽样调查后综合, 评估报告自动创建	地震现场灾害 损失评估	评估区/单独评定/ 行政单元
	MapEDLES 2001 (王晓青等, 2001年)	地震烈度	抽样调查后综合, GIS环境	地震现场灾害 损失评估	评估区/单独评定/ 行政单元
	MapEDLES 2007 (王晓青等, 2007年)	地震烈度	抽样调查后综合, GIS/非GIS通用	地震现场灾害 损失评估	评估区/单独评定/ 行政单元
	国务院抗震救灾指挥部 技术系统(一期)	地震烈度	经验法	震害快速评估	区县/乡镇(街道)
2010年后	HAZ-China (孙柏涛等, 2013)	地震烈度	经验法 分析法	震害预测 震害快速评估 灾后重建	乡镇(街道)/2.5'格网
	EQRiskAsia 2010 for Windows (2010年)	地震烈度	宏观法	震害预测 震害快速评估	区县宏观统计数据
	模块化城镇地震灾害 风险评估系统(2017年)	地震动峰值加速度	经验法 分析法	震害预测 震害快速评估	乡镇(街道)
	安基文等的系统	地震烈度	经验法	震害快速评估	30"格网/公里格网
	基于社区的上海地震 快速评估系统研究(2018年)	地震烈度	经验法	震害快速评估	单体建筑/社区
	全国尺度地震灾害 损失预测系统(2018年)	地震烈度	考虑多因素影响修正的 地震损失预测模型	震害预测 震害快速评估	公里格网
	陕西省地震损失自动评估系 统(孙哲等, 2019年)	地震烈度	经验法	震害快速评估	公里格网
CEDLAS (郑山锁等, 2019年)	地震动峰值加速度	分析法	震害预测 震害快速评估 震后境况模拟	单体建筑/乡镇(街道)/ 城市(区域)/国家	

中国地震局灾害防御司组织开展的中国首次地震灾害损失预测研究中按“受地震影响的经济总量”×“地震造成的经济损失率”计算固定场地在 T 年的期望损失(国家地震局震害防御司未来地震灾害损失预测研究组, 1990):

$$E_T = \sum_{B_k} \left(\sum_{I_i} P(I_i) \cdot \left(\sum_{d_j} P(d_j|I_i, B_k) \cdot r(d_j|B_k) \right) \cdot V_{B_k} \right) \quad (3)$$

式中, E_T 为总损失, B_k 为场地中建筑结构设施的类型, I_i 为场地可能遭受到的地震烈度, d_j 表示第 j 级破坏, V_{B_k} 为场地中建筑结构的总价值, $P(I_i)$ 为 T 年内场地遭受烈度 I_i 的概率, $P(d_j|I_i, B_k)$ 为 B_k 类建筑遭受地震烈度 I_i 时破坏等级 d_j 发生的概率, $r(d_j|B_k)$ 为建筑发生 j 级破坏的损失率。

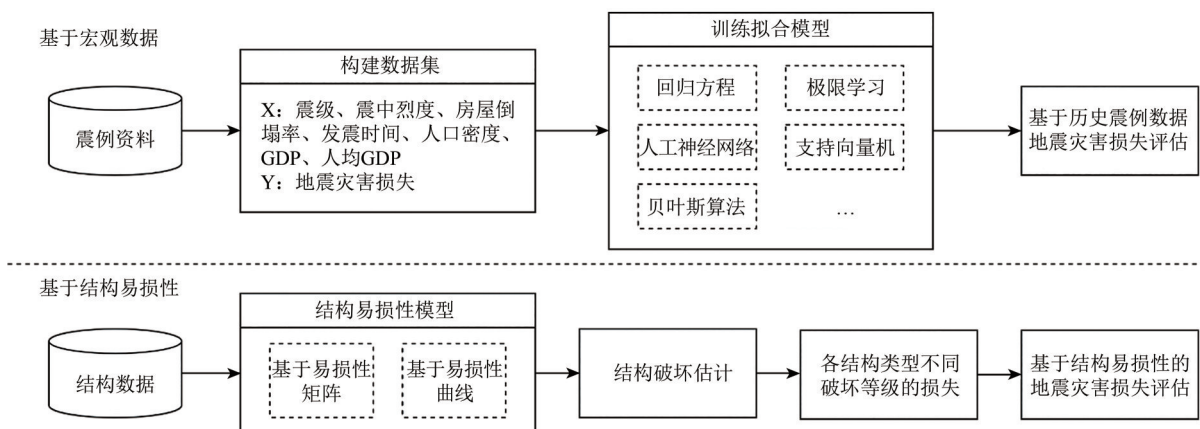


图4 地震灾害损失评估流程

Fig.4 Earthquake loss assessment process

考虑到式 (3) 所应用的调查数据的获取难度，陈棋福和陈凌 (1997) 通过建立地震经济损失随地震烈度的非线性变化关系，提出了利用宏观经济指标 GDP 进行地震灾害损失预测和评估的方法：

$$E_p = \sum_{I_i} P_T(I_i) \cdot f(I_i, GDP) \cdot GDP \quad (4)$$

式中， E_p 是固定资产的期望损失估值， $P_T(I_i)$ 是 T 年内场地遭受地震烈度 I_i 的概率， $f(I_i, GDP)$ 表示基于年度 GDP 的地震灾害损失率与地震烈度和以 GDP 表征的社会财富之间的关系，对应传统方法中的损失率。

式 (5) 为王晓青等 (2009a) 在对汶川地震进行损失估计时，根据 157 次历史震例数据进行分段幂函数拟合得到“地震 GDP 损失率”估计公式：

$$F(I, GDP) = \begin{cases} 2 \times 10^{-8} I^{9.8082}, & \text{人均GDP} < 2700 \text{元} \\ 2 \times 10^{-10} I^{11.585}, & 2700 \text{元} \leq \text{人均GDP} < 10000 \text{元} \\ 2 \times 10^{-11} I^{11.377}, & \text{人均GDP} \geq 10000 \text{元} \end{cases} \quad (5)$$

式中， $F(I, GDP)$ 为地震造成的 GDP 损失率， I 为烈度。

在蔡友军等 (2015) 提出的基于贝叶斯模型的地震直接经济损失快速评估方法中，直接经济损失系数 y 的函数式为

$$\begin{cases} y = 10^{(\alpha \cdot a + (1 - \alpha) \cdot b)} \\ a = 18.92M^{-1.368} + 1.318 \\ b = 0.2852I_0 - 2.474 \end{cases} \quad (6)$$

式中， M 为震级， I_0 为震中烈度， α 为震级权重系数，地震直接经济损失评估值 $D\text{Loss}_{\text{esti}}$ 按照下式计算：

$$D\text{Loss}_{\text{esti}} = n \cdot \beta \cdot y \quad (7)$$

式中， n 为受灾人口， β 为地震发生省份当年居民消费水平，二者的乘积表达了“受地震影响的经济总量”；计算地震直接经济损失评估区间： $(0.2D\text{Loss}_{\text{esti}}, 2.2D\text{Loss}_{\text{esti}})$ 。

由于具有较好的回归预测精度和较强的数据自适应能力，神经网络方法被用于基于宏观数据的地震经济损失估计方法中。郭章林等 (2004) 将震级、人均 GDP、受灾面积、人口密度等作为样本特征，通过训练遗传神经网络模型实现地震灾害损失的快速评估或预测。类似针对地震直接经济损失进行研究的还有马亚杰等 (2007)、王伟哲 (2012) 分别选择 37 个、55 个样本训练了 3 层 BP 神经网络模型，赵士达等 (2016) 采用了 30 个样本训练了 LM_BP 神经网络；谢家智等 (2017) 应用了 68 个样本训练了随机神经网络模型；李利 (2009) 应用 265 个样本训练并验证了神经网络模型，提出了基于遗传算法的 GA-ANN 宏观易损性模型的震灾经济损失预测方法。

基于历史震例宏观数据的地震灾害经济损失估计方法易于计算，可以直接求解地震总体经济损失，在实际工作中可以为震后快速响应提供重要的信息。但是这类方法难以表达损失在空间上的精细化差异，且方法迁移时存在较大的不确定性，构建适用性强的模型相对困难。而基于建筑物结构类型划分和易损性矩阵（震害矩阵），按烈度区域划分进行地震直接经济损失估计的方法是目前应用最广泛的 (尹之潜, 1995; 刘允清等, 1998; 郭建立, 2003)，也是目前《地震现场工作

第4部分：灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4-2011)所采用的。该标准中，按照各烈度下各类结构破坏、生命线工程、室内外财产、装饰装修等损失的总和计算直接经济损失。其中各评估子区各类房屋在某种破坏等级下的损失按照下式进行计算：

$$L_h = S_h \times R_h \times D_h \times P_h \quad (8)$$

式中， S_h 表示该评估子区同类房屋的总建筑面积； R_h 表示该评估子区同类房屋的某种破坏等级的破坏比； D_h 表示该评估子区同类房屋某种破坏等级的损失比； P_h 表示该评估子区同类房屋重置单价。最终房屋破坏的直接经济损失按照全部破坏等级，全部房屋类型，全部评估子区进行逐级汇总求和。

王晓青和丁香(2019)在2016年—2025年中国大陆地震损失预测研究工作中采用了建筑面积与单位建筑面积造价的乘积作为建筑结构总价值，并提出了生命线工程损失的修正系数，计算公式如下：

$$L_{Eco} = \sum_Y (1 + r(Y)) P(Y) V_{Bld}(Y)^{f_E(Y)} A \cdot Z \quad (9)$$

式中， $V_{Bld}(Y)$ 为地震动强度 Y 作用下的建筑物损失率； A 为建筑面积； Z 为建筑物单位面积造价； $f_E(Y)$ 为多因素影响下的地震动强度 Y 作用下的房屋建筑损失率修正指数； $r(Y)$ 为地震动强度 Y 作用下生命线系统损失相对于建筑物损失的比率。

采用分析法，将通过结构易损性曲线计算破坏比作为主要过程的地震直接经济损失计算，可以实现单体精度的地震直接经济损失计算，已经被诸如EDLP、HAZUS、OpenQuake、CEDALS等平台广泛采用。而目前由FEMA提出的FEMA-P58建筑地震损失评价方法则是基于建筑物构件数据和弹塑性分析进行地震经济损失评估的更精细的方法，例如曾翔等(2016)运用该方法对三栋典型建筑实现了基于建筑构件数据的地震经济损失预测。表4中将地震灾害经济损失估计方法进行了总结。

表4 地震灾害经济损失估计方法

Table 4 Methods for estimating economic damage caused by earthquakes

方法类型	主要参数	代表性方法	相关研究
基于历史震例和宏观统计数据	面向总损失建模	1.地震烈度/地震震级 2.GDP L 为地震直接经济损失, M 为震级; I 为震中烈度	陈尧等,2017 $\lg L = 0.84444I - 1.831$ $\lg L = 0.5996M + 0.4011$ 陈尧等,2017
	面向损失率建模	1.地震烈度/地震震级 2.GDP $F(I, GDP) = \begin{cases} 2 \times 10^{-8} I^{9.8082} & PGDP < 0.27 \text{万} \\ 2 \times 10^{-10} I^{11.585} & 0.27 \text{万} \leq PGDP < 1 \text{万} \\ 2 \times 10^{-11} I^{11.377} & PGDP \geq 1 \text{万} \end{cases}$ $F(I, GDP)$ 为地震造成的GDP损失率, I 为烈度	陈棋福和陈凌(1997)、王晓青等(2009a)、蔡友军等(2015)
	基于机器学习的方法	震级、人均GDP、受灾面积、人口密度等	神经网络
基于结构破坏	结构类型层次的方法	各类建筑: 1.总建筑面积 2.破坏比 3.损失比 4.重置单价 S_h 表示该评估子区同类房屋的总建筑面积; R_h 表示该评估子区同类房屋的某种破坏等级的破坏比; D_h 表示该评估子区同类房屋某种破坏等级的损失比; P_h 表示该评估子区同类房屋重置单价	GB/T 18208.4-2011: $L_h = S_h \times R_h \times D_h \times P_h$ 刘允清等(1998)、尹之潜(1995)、郭建立(2003)、王晓青和丁香(2019)
	构件层次的精细化方法	建筑物的结构类型、非结构构件类型、数量、分布;建筑内部财产数量、分布等;建筑财产数据、性能模型	FEAM-p58 曾翔等(2016)

2.3.2 地震人员损失评估

对地震造成的人员伤亡进行估计的研究始终是一项热点，已经产生了丰富的研究成果。本文

将地震人员损失的估计方法按照“不考虑房屋破坏”、“考虑房屋破坏但不进行类型区分”以及“考虑房屋类型以及破坏等级差异”3种方法进行归纳。

不考虑房屋破坏的地震人员损失估计方法是从宏观数据入手, 根据历史震例资料直接建立地震死亡人数或死亡率与地震震级、地震烈度之间的关系(肖光先, 1986; 傅征祥和李革平, 1993; 施伟华等, 2012; 刘金龙和林均岐, 2012; 陈尧, 2015), 其一般形式可以表示为

$$N = f(I) \cdot g(\rho) \cdot h(T) \cdot j(M) \quad (10)$$

式中, N 为死亡人员数量, $f(I)$, $g(\rho)$, $h(T)$, $j(M)$ 分别为地震烈度 I , 人口密度 ρ , 发震时间 T , 地震震级 M 对人口死亡总数的影响。或先对人员死伤率进行拟合, 再根据人口总量求得人员损失总和(国家地震局震害防御司未来地震灾害损失预测研究组, 1990; 肖光先, 1991; 王晓青等, 2009a), 其计算公式可以表示为

$$R = r(I), N = R \cdot A \cdot \rho \quad (11)$$

式中, $R = r(I)$ 表示地震烈度为自变量的地震人口损失率函数, $A \cdot \rho$ 为某烈度区的面积 A 与该烈度区内平均人口密度的乘积, 即该烈度下的总人口数。得到各烈度下的人口损失后进行汇总即可得到总体人员损失估计值。中国地震局灾害防御司组织开展的中国首次地震灾害损失预测研究中采用的人口损失预测也采用了“地震伤亡率” \times “人口总数”的方法(国家地震局震害防御司未来地震灾害损失预测研究组, 1990), 所用公式为

$$R_k(m_j) = \sum_I P(m_j|I) \cdot P_k(I) \cdot B_k \quad (12)$$

式中, $R_k(m_j)$ 为在某地区 R_k , 由地震造成的人员伤亡的期望值; $P(m_j|I)$ 为地震伤亡率, 表示在烈度 I 下的地震伤亡率; $j=1, 2$ 对应 m 分别表示人员受伤和死亡情况; $P_k(I)$ 为在 R_k 地区烈度 I 的发生率, B_k 为该地区人口数。不考虑房屋破坏的这类方法的特点是所需的数据容易获取, 计算过程简单快速, 对在地震发生后第一时间快速评估地震造成的人员伤亡情况, 提供地震应急决策支持, 是有重要意义的。出于对地震造成人员伤亡中的一些不确定因素的考虑, 一些方法中也增加了对不同时段人员在室率、地形因素、震中烈度以及震中位置等影响的考虑(Liu, 1981; 傅征祥和李革平, 1993; 施伟华等, 2012; 陈尧, 2015)。

以建筑物的破坏总量作为估计地震人员损失的主要因素的方法主要是将建筑物破坏比、倒塌率、倒塌数、倒塌面积之一做为自变量, 构建人员伤亡估计模型(刘锡荟等, 1985; 肖光先,

1986, 1987; 尹之潜, 1991, 1995; 傅征祥和李革平, 1993; 程家喻和杨喆, 1993; 马玉宏和谢礼立, 2000; 高惠瑛和李清霞, 2010; 田丽莉, 2012)。通过建立“建筑物倒塌率”或“破坏比”与“地震人员死伤率”之间的联系, 然后乘以总人口数进行地震人员死伤计算的方法(尹之潜, 1991, 1995; 傅征祥和李革平, 1993; 程家喻和杨喆, 1993; 马玉宏和谢礼立, 2000; 田丽莉, 2012), 简化公式可以表示为

$$RD = f(RB), ND = RD \cdot N \quad (13)$$

这里 RD 为人员死亡率(或死、伤率), RB 为房屋倒塌率(或破坏比), $f(RB)$ 表示房屋倒塌对人员伤亡的影响, ND 死亡总人数, N 为发震时在室总人口数。一些研究在对 RD 的计算中也涉及到对发震时间、人口密度、震灾规模等影响因素的考虑(尹之潜, 1995; 马玉宏和谢礼立, 2000; 田丽莉, 2012)。通过建立“房屋倒塌数”和“人口死亡数”之间的联系进行估算的方法(傅征祥和李革平, 1993; 肖光先, 1987; 刘锡荟等, 1985), 简化公式可以表示为

$$ND = f(NBD) \cdot g(\rho) \cdot h(T) \cdot j(M) \quad (14)$$

式中, ND 为死亡总人数, NBD 为房屋倒塌数。 $f(NBD)$, $g(\rho)$, $h(T)$, 分别达房屋倒塌数 NBD , 人口密度 ρ , 发震时间 T , 地震震级 M 对人口死亡总数的修正。此外还有一些研究应用了房屋毁坏面积和房屋破坏面积进行建模(高惠瑛和李清霞, 2010)。

考虑不同类型建筑结构易损性及不同破坏程度死伤率差异的地震灾害人员损失模型, 可以体现出不同建筑结构的异质性, 适用于具有完备建筑结构数据的震害评估应用场景。这类方法大多采用概率评估方法, 使对建筑物类型划分以及区分不同建筑震害等级下的人员损失率等精细化评估思想得以表达, 也是目前在地震灾害风险评估, 或地震灾害损失预测等工作中常用的一类方法(肖光先, 1986; 丁伯阳, 1991; 邹其嘉等, 1995; 程家喻和杨喆, 1996; 谢礼立和尹之潜, 1996; 李媛媛等, 2015)。其中谢礼立和尹之潜(1996)给出的方法具有代表性:

$$NDI = \sum_s \sum_j P(D_j|I) A_s \cdot r_d \cdot d_m = \sum_s P(m|I) A_s \cdot d_m \quad (15)$$

式中, NDI 为伤亡人数; $P(D_j|I)$ 为烈度 I 下建筑物发生 D_j 级破坏的概率; A_s 为 S 类结构的房屋总面积

积; r_d 为房屋不同破坏程度的死伤率; d_m 为某时刻 S 类房屋单位建筑面积人口数; $P(mlI)$ 为地震烈度为 I 时的死伤率。

HAZUS的人员伤亡按照事件树方法进行计算,事件类型首先分为(1)建筑结构破坏导致的室内伤亡;(2)建筑结构破坏导致的室外伤亡;(3)桥梁破坏造成的通勤人员伤亡。其中建筑破坏导致的人员室内伤亡又分为:(1)建筑结构在轻微、中等、严重破坏的情况;(2)毁坏但没倒塌的情况;(3)倒塌的情况;(4)完全破坏的情况。其中建筑物内的人员伤亡估算以网格为单元,每个网格伤亡等级为 s 的人员数量 NDI_s 可以按下式计算得到(李媛媛等, 2015):

$$NDI_{b,s} = N_b \cdot \sum_{d=1}^4 (P_{b,d} \cdot C_{b,d,s}) \quad (16)$$

$$NDI_s = \sum_{b=1}^n NDI_{b,s} \quad (17)$$

式中, $NDI_{b,s}$ 表示类型 b 的建筑物中伤情等级为 s 的人员数量, N_b 表示处在 b 类型建筑中的人口总数, $P_{b,d}$ 表示 b 类型建筑物的破坏程度为 d 的概率, $C_{b,d,s}$ 表示在破坏程度为 d 的类型 b 建筑中伤情等级为 s 的人员比例。

近几年,神经网络及其他机器学习方法在基于宏观数据的地震灾害人口损失估计研究中也得到了应用,例如:于山等(2005)根据地震发生时刻、地震震级、震中烈度、建筑物破坏程度、抗震设防水准、地震预报、人口密度等因素建立了3层BP神经网络人员伤亡预测模型。杨帆等(2009),根据邢台、通海、海城、唐山4次地震的人口、震级、是否预测、是否凌晨4个特征建立BP神经网络模型进行人员伤亡预测。钱枫林和崔健(2013)根据地震发生时间、震级、震中烈度、人口密度、抗震设防烈度、预报水平等主要因素作为评价指标,选取53次破坏性地震构建数据集,通过BP神经网络建立地震伤亡人数预测模型。黄星和孙明(2016)按照人员自救能力、应急救援水平、震时人员在室数、次生灾害发生概率、建筑物损毁程度建立RBF神经网络模型进行地震伤亡人数预测。黄佩蒂(2018)根据15个境外地震震例,选取9个相关指标基于层次分析法、灰色关联度法和模糊综合评价法构建了境外地震人员伤亡评估模型。贾晗曦(2020)建立了19个特征295个震例的数据集,采用TensorFlow框架对

含有两层隐藏层的神经网络模型进行训练。表5对地震人口损失估计方法进行了总结。

3 遥感数据在地震灾害损失评估中的应用现状

目前,遥感数据服务于地震灾害损失评估的应用场景中,遥感数据均以提供数据支撑为主要任务,在工作流程中,处于数据处理、信息提取等靠前的环节。主要包括:(1)震后应急阶段获取遥感影像数据,对地震造成的灾情信息进行提取以及评估震害造成的损失;(2)在地震灾害风险评估或地震灾害预测过程中,通过遥感数据为承灾体信息以及结构易损性评估提供数据支撑。

3.1 震后遥感灾害损失评估研究现状

应用遥感影像,在震后应急期进行震害目标识别,提取震害信息,从而基于遥感数据进行受灾范围圈定、灾害损失评估、地震烈度评定,是一项极具实用价值的研究工作。遥感震害信息提取及相关工作吸引了国内外大量的研究人员参与其中,经过近几十年的快速发展,产生了非常丰富的研究成果。从1966年邢台地震、1976年唐山地震,开展震后基于航空遥感资料的灾情解译起;经过1988年云南澜沧—耿马地震应急期航空遥感灾情调查;以及2000年前后破坏性地震应急期基于多平台遥感数据的震害评估;到2008年汶川地震时,已进入全阶段多角度遥感技术应用阶段;我们国家的遥感震害调查工作已经从一种额外辅助手段演变成常规的实用业务(安立强和张景发, 2011)。例如在对2013年芦山地震的应用中,地震烈度遥感快速评估的总体正确率达到80%, Kappa检验值达到0.71(王晓青等, 2015b)。

早期星载传感器的空间分辨率不足时,航空影像一直作为遥感震害评估的主要支撑数据源。机载多光谱数据被用于建筑物破坏以及砂土液化、火灾的识别(Mitomi和Takeuchi, 1995; Mitomi等, 2001; 王晓青等, 2003; Turker和San, 2004; Yamazaki等, 2008)。随着全球空间基础设施向体系化和全球服务化不断迈进(范一大等, 2016),星载遥感传感器的持续进步,SPOT、IKONOS、QuickBird等高分辨率卫星数据也相继投入到震害信息提取工作中。在2008年汶川地震中,IRS-P6、Landsat 5、Landsat 6、Landsat 7、SPOT2、SPOT4、

SPOT5、QuickBird、IKONOS、EROS-B、ASTER、WorldView-1、RADARSAT-1、RADARSAT-2、ALOS-1、COSMO-SkyMed、TerraSAR-X、资源二号、福卫2号、北京一号等24颗卫星，1277景数

据（和海霞等，2018）被应用到建筑物震害识别、交通道路破坏点位分布、滑坡和堰塞湖等次生灾害提取以及临时安置点监测（李素菊和刘明，2018）。

表5 地震人口损失估计方法

Table 5 Methods for estimating casualties caused by earthquakes

方法类型	主要参数	代表性方法	相关研究
不 考 虑 结 构 破 坏	面向总死伤数量建模	Liu(1981): $\ln(N_{\text{day}}) = -22.73 + 10.6\ln(I) + 0.34\ln(\rho)$ $\ln(N_{\text{night}}) = -11.35 + 5.77 \times \ln(I) + 0.36\ln(\rho)$ $\ln(N_{\text{night}}/N_{\text{day}}) \cong 11.38 - 4.83\ln(I)$ $N_{\text{day}}, N_{\text{night}}$ 白天、夜间发震死亡人数 ρ 人口密度, I 烈度。	Liu(1981);傅征祥和李革平(1993);施伟华等(2012);刘金龙和林均岐(2012);陈尧(2015)
	面向人员死伤率建模	国家地震局震害防御司未来地震灾害损失预测研究组(1990): $R_k(m_j) = \sum_l P(m_j I) \cdot P_k(I) \cdot B_k$ 其中, $R_k(m_j)$ 为在某地区 R_k , 由地震造成的人员伤亡的期望值; $P(m_j I)$ 为地震伤亡损失矩阵, 表示在烈度 I 下的地震伤亡率; $j=1, 2$ 对应 m 分别表示人员受伤和死亡情况; $P_k(I)$ 为在 R_k 地区烈度 I 的发生率, B_k 为该地区人口数。	国家地震局震害防御司未来地震灾害损失预测研究组(1990);肖光先(1991);王晓青等(2009a)
	基于机器学习的方法	震发生时间、震级、震中烈度、人口密度、抗震设防烈度、预报水平等 神经网络等方法	于山等(2005);杨帆等(2009);钱枫林和崔健(2013);黄星和孙明(2016);黄佩蒂(2018);贾哈曦(2020)
考 虑 房 屋 破 坏	基于房屋破坏总量	马玉宏和谢礼立(2000): $\ln RD = 9.0 \cdot RB^{0.1} - 10.07$ $ND = f_i \cdot f_\rho \cdot RD \cdot M$ RD 人员死亡率; ND 人口死亡数估计值; RB 房屋倒塌率; M 总人口数; f_i 发震时间修正系数; f_ρ 人口密度修正系数;	尹之潜(1991);肖光先(1987);刘锡荟等(1985);尹之潜(1995)傅征祥和李革平(1993);程家喻和杨喆(1993);马玉宏和谢礼立(2000);高惠瑛和李清霞(2010);田丽莉(2012)
	考虑房屋类型以及破坏等级差异	各类建筑: 1. 建筑结构破坏程度 2. 各破坏等级下的死伤率 3. 人员在室数量 谢礼立和尹之潜(1996): $NDI = \sum_s \sum_j P[D_j I] A_s \cdot r_{s,j} \cdot d_m$ NDI 伤亡人数; $P[D_j I]$ 烈度 I 下建筑物发生 D_j 级破坏的概率; A_s 为 S 类结构的房屋总面积; $r_{s,j}$ 为房屋不同破坏程度的死伤率; d_m 为某时刻 S 类房屋人员平均密度;	肖光先(1986);程家喻和杨喆(1996);丁伯阳(1991);邹其嘉等(1995);谢礼立和尹之潜(1996);李媛媛等(2015);(FEMA和NIBS, 1997);陈飞(2016);郑山锁等(2019)

对于单时相的遥感数据，一般通过单一或多个影像特征，进行基于像元或面向对象的影像分类以及阈值分割的方法进行震害信息提取（张伟等，2013；董燕生等，2014；田卫方，2015；叶昕等，2019）。对于多时相的遥感数据，主要基于变化检测的思想进行震害信息提取（龚丽霞等，2013；薛腾飞等，2016；薛腾飞，2017；袁玉，2018）。近几年，一些方法在多源数据信息融合方面进行了探索。不同分辨率的数据、SAR影像、光学影像、DEM数据、矢量辅助数据在震害提取过程中发挥各自优势，对提高信息提取的准确度效果显著（张景发等，2018；李强，2018）。与此同时，应用深度学习进行震害信息提取的方法也

逐渐得到发展，利用深度卷积神经网络模型，可以实现灾情智能化识别（Bai等，2018；Ji等，2018；Vetrivel等，2018；陈丹丹，2020）。鉴于遥感震害信息提取和识别不是本文分析的重点内容，不再对具体方法进行赘述。

基于遥感影像对地震烈度以及地震造成的损失进行量化评估，是遥感震害信息提取工作的延伸。基于遥感数据进行地震烈度估计方面，魏成阶等（1996）以唐山、海城等地震的震害资料和航空遥感为素材，进行震害遥感图像判读指标、地震烈度标志和判读模型建立，初步建立了应用遥感数据快速生成高烈度区地震烈度包络线的工作流程。中国地震局地震预测研究所王晓青团队

提出并逐步完善了基于遥感震害指数的地震烈度圈定方法(王晓青等, 2009b, 2013, 2015b; 中国地震局地震预测研究所和中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 2010)。该方法包括遥感震害识别、遥感震害等级划分, 遥感震害指数计算(王栋梁, 2007)建立遥感震害指数与地面震害指数的联系多个系统性技术环节。经过持续性的研究和国内外多次震例等的检验, 使该方法得以向业务化、实用化发展。范一大等(2008)通过遥感影像信息提取方法计算出建筑物倒塌率, 然后通过空间分析模型对没有影像覆盖的灾区范围进行外推, 实现地震烈度推算。程希萌等(2016)应用eCognition进行面向对象监督分类, 提取出倒塌建筑物, 在此基础上对照易损性矩阵对烈度进行推算。

基于遥感数据进行震害损失估计的研究成果较少。王晓青团队在提出的遥感震害定量化评估和遥感地震烈度圈定方法的基础上, 结合多种地震灾害损失评估方法实现了基于遥感的损失评估。王龙(2007)以2003年巴楚—伽师6.8级地震为例分别采用基于遥感震害指数和基于遥感震害分类结果方法进行了的震害损失评估。Wang等(2011), 应用Geo-eye卫星影像对2010年海地地震进行应急灾害和损失遥感评估中, 将遥感提取的建筑震害结果与基于GDP和地震烈度的宏观损失评估法结合, 实现了对经济损失人员伤亡的估计。经过2010年玉树地震、2010年海地地震、2013年芦山地震后开展的基于遥感的震害损失估计检验, 目前该团队已经将这项工作作为业务化开展(王晓青等, 2015a)。吴恒璟等(2013)提出了通过遥感影像和GIS数据分析构建建筑物损毁程度、建筑物材质结构和地震人员伤亡之间的关系, 建立了基于遥感影响到地震人员伤亡估计模型。中国地震局(2018)中给出了基于遥感数据进行地震直接经济损失的详细方法和流程, 其总体思路参考了《GB/T 18208.4-2011. 地震现场工作第4部分: 灾害直接损失评估标准》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2012), 通过评估单元中建筑物面积、重置单价和地震损失率等逐级汇总进行计算得到遥感评估区内建筑破坏造成的经济损失以及地震灾区建筑结构破坏造成的经济损失, 再由地震建筑物损失推断地震直接经济损失。Lu等

(2018)提出的一种基于弹塑性方法的地震经济损失计算方法: 首先通过航拍得到倒塌建筑物分布, 然后通过城市抗震弹塑性分析, 构建建筑物倒塌分布的情景, 最后通过真实倒塌分布与模拟倒塌分布进行匹配, 选择最接近的模拟结果进行地震经济损失的计算。图5为本文总结的震后遥感灾害损失评估工作流程。

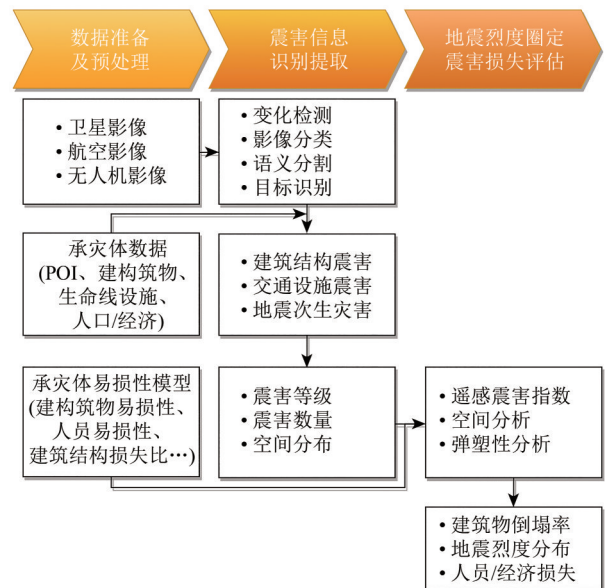


图5 震后遥感灾害损失评估工作流程

Fig.5 Flowchart of post-earthquake damage and loss assessment based on remote sensing

目前震后应用遥感数据进行震害评估技术的发展趋势可以归纳为: 在震害信息提取方面以“多源数据”、“智能提取”为热点; 在震害损失评估方面, 以遥感地震烈度评定为核心的灾害损失定量化评估已经进入实用阶段, 正在向着与更精细的易损性分析结合的方向发展。

3.2 基于遥感的震害预测研究现状

伴随着遥感技术的发展以及对地震灾害风险评估要求的提高, 全世界范围的研究人员开始了将遥感数据引入到震害预测以及地震灾害风险估计工作中, 用以解决数据完备性问题, 从而实现在大范围内开展相关的地震灾害减轻工作。国内外研究学者在该领域几乎同时起步, 国际对地观测组织 GEO (Group on Earth Observations) 在2009年—2011年的工作任务中提出通过遥感数据估计建筑物的地震易损性的工作思路。2009年, Polli等(2009)中提出了基于对地观测数据评估

建筑物地震易损性的总体流程。同年, 翟永梅 (2009) 开展了基于高分辨率遥感影像获取地震灾害预测方法的研究, 提出了基于遥感影像的城市快速震害预测工作流程, 并设立试验区进行了不同烈度下的震害预测实验。在近十几年的发展历程中, 研究者大多数是以应用遥感数据进行建筑结构易损性类型划分为切入点。Dell' Acqua 等 (2013) 以建立全球地震模型所需数据库 GED4GEM (Global Exposure Database for the Global Earthquake Model) 为出发点, 讨论了遥感数据及空间分析技术在精细化暴露 (exposure) 数据加工中的优势及局限, 分析了遥感数据的应用潜力。这项工作的开展一般基于以下假设:

(1) 建筑结构地震易损性的空间自相关性: 在有限的区域范围内, 相互邻近的建筑结构拥有相似的建筑年代、采用同一种建筑材料、属于同一种建筑结构类型, 即具有相近的地震易损性。

(2) 建筑结构地震易损性的遥感可辨识性: 基于遥感观测及其他辅助数据得到的某些建筑结构特征指标 (建造年代、几何尺寸、用途、屋顶材质等) 相近的建筑结构具有相近的结构类型以及地震易损性。

在早期的应用模式中, 研究者们仅仅将建筑物的高度及其他外形指标作为判断建筑结构类型的依据, 如何发挥遥感数据提取建筑物外形几何属性的能力是研究人员的关注点。Borzi 等 (2011), 通过 QuickBird 影像提取了意大利西西里岛一处工业场地内储油罐以及烟囱的外形几何参数。并通过历史震例易损性数据得到了该工业区的建筑物地震易损性评估。Polli 和 Dell' Acqua (2011) 在识别建筑物轮廓和层高分别采用 QuickBird 高分辨率高分影像以及高分辨率 SAR 影像。利用 SAR 影像侧视成像的特点, 通过拍摄角度不同的两景 SAR 数据提取出建筑物的层高, 进而推断出建筑物结构类型。

随着研究的深入, 在面对在更大范围内进行遥感震害预测应用时, 建筑结构易损性的丰富程度以及具有相似易损性结构的遥感影像特征多样化等问题, 促使各国的研究者纷纷采用统计数据、地面调查数据、街景以及数字地表模型等与遥感数据进行信息综合 (王淮峰 等, 2010; 赵琪 等, 2012; 马建军 等, 2013; Pittore 和 Wieland, 2013; Matsuoka 等, 2013, 2014; Geiß 等, 2015; Wieland

等, 2015; Riedel 等, 2015)。

一般地, 基于遥感的建筑结构震害预测流程可以归纳为如图 6 所示。在整个流程中, 遥感数据作为主要数据源实现建筑结构承灾体数据的制备。首先, 多源遥感影像数据经过影像特征提取, 得到空间、波普及时间特征。然后基于这 3 类特征, 再结合地面调查等辅助数据, 可以对与建筑结构易损性相关的高度、建造年代、结构类型、用途等指标进行提取。接着再根据这些指标对建筑结构进行易损性归类, 最后将归类结果接入到震害预测或地震灾害风险评估的流程中, 最终实现基于遥感的地震灾害损失评估。

其中, 对建筑物高度的提取, 现有方法主要应用高分辨率光学影像中建筑结构的阴影长度 (翟永梅, 2009; Polli 和 Dell' Acqua 等, 2011; Borzi 等, 2011; Geiß 等, 2015), SAR 影像成像几何特性 (Polli 和 Dell' Acqua 等, 2011), LiDAR (Geiß 等, 2015), DSM (Matsuoka 等, 2013; Geiß 等, 2015)。对建筑年代的提取一般通过多年期 Landsat 卫星数据进行建筑物分布的变化检测实现 (Matsuoka 等, 2013; Pittore 和 Wieland, 2013; Geiß 等, 2015; Wieland 等, 2015), 或者根据逐年夜间灯光数据提取人类活动范围的变化 (付泽钰和陈奇放, 2019)。根据多种指标对建筑物进行易损性归类时, 主要依靠几种机器学习方法, 包括: 加权海明距离类比法 (马建军 等, 2013), 决策树分类器 (Matsuoka 等, 2014), 支持向量机 (Geiß 等, 2015), 关联学习 (Riedel 等, 2015) 以及随机森林 (Geiß 等, 2015)。其中 Geiß 等 (2015) 得到了整体精度 83% 的建筑物结构类型分类结果。

近年来基于遥感的地震灾害损失估计工作的各个环节均产生了一些创新。例如, Qi 等 (2017) 设计了一套基于“互联网+”和高分辨率遥感数据提取建筑物属性信息的方法。朱志忠等 (2020) 基于 WorldView-3 遥感影像对嘉兴老城区进行震害预测时, 提出“单元点密度”概念, 用单元点密度分析房屋年代。刘耀辉 (2020) 提出了两种基于卷积神经网络的高分辨率遥感影像建筑物分割模型, 以实现建筑物轮廓的高精度、快速、自动提取; 在此基础上, 采用机器学习和数据挖掘的方法, 建立建筑物属性信息与建筑物易损性之间的对应规则。

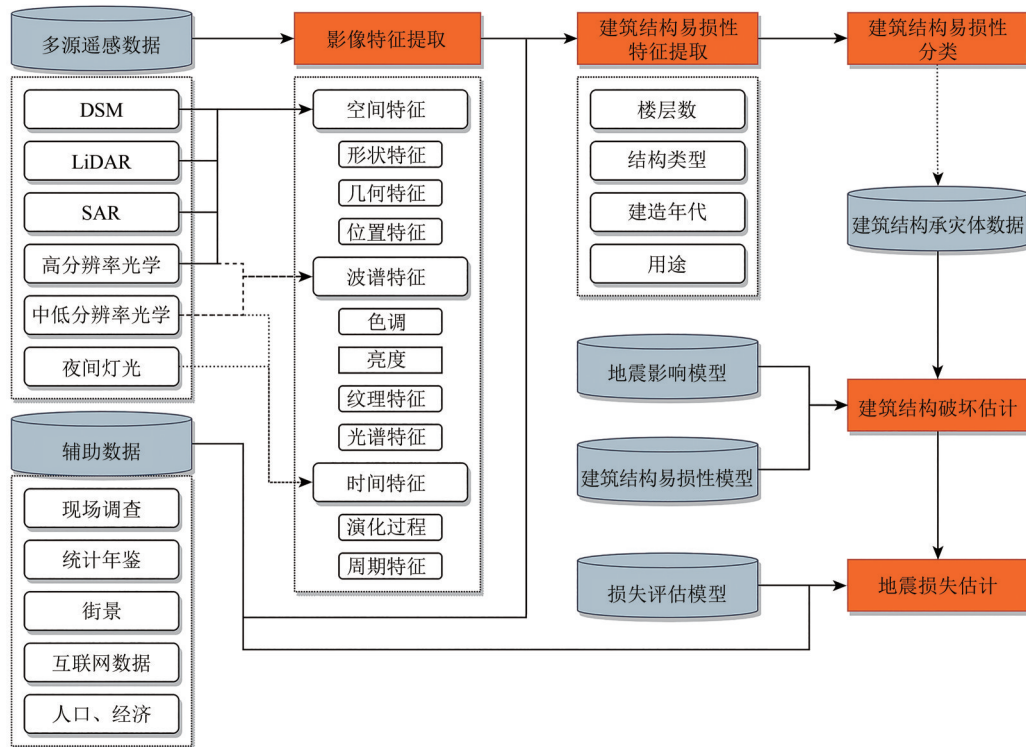


图6 基于遥感的震害预测流程

Fig.6 Flowchart of RS image based earthquake loss assessment

4 结 语

经过近几十年的发展,地震灾害损失评估技术以及遥感技术均取得了很大的进展。一方面,地震灾害损失评估粒度从宏观向着单体、构件级发展的同时,相应的评估方法也逐渐细致化,但是目前这项工作仍面临几个方面的问题。

(1) 数据准备难度对精细化方法推广的限制。中国地震灾害损失评估工作在空间尺度上,地震灾害损失评估的精度由县乡行政单元为最小尺度,逐渐升级到公里格网,百米格网精度,并朝着建筑单体精度的方向发展;在计算方法上,估计损失所依赖的易损性模型也由传统的经验震害矩阵逐步被更精细化的方法取代。但是在较大范围内开展地震灾害的影响分析时,获取复杂方法所需的精细程度较高的数据,是极具挑战的。特别是中国国土辽阔,建筑物总量非常巨大,建筑物类型极度复杂,再加上城市化建设进程速度也为全国范围的承灾体数据整理和建库带来非常大的挑战。而在采用一些简化方法时,又往往带有很强的地域特色,方法拓展存在阻碍。

(2) 缺乏全国性的地震灾害风险管理平台。

中国业务化运行的地震灾害损失评估软件平台,大多在功能方面更多侧重于震后应急评估。研究人员在进行软件设计开发时,往往更注重对所在地区理论研究成果的应用和模型的本地化。例如一般在烈度衰减关系、损失评估方法、数据精细化以及应急决策建议方面进行本地化的投入较大。而随着对精细化地震灾害损失评估的需求的不断攀升,为业务平台系统升级更多复杂模块、精细化评估模型,则对从业人员的专业水平提出了更高的要求。

(3) 对结果中不确定性的表达缺失。地震灾害损失评估中,大量存在的不确定性对评估结果的可靠性产生影响。例如地面运动预测方程的选择,断层几何形状复杂性,基础数据的可靠性,易损性的随机不确定性以及经验震害矩阵中调查人员的主观因素等。面对这些复杂因素,应该考虑损失估计结果的不确定性范围的表达,以便非专业用户可以更好地理解地震灾害评估结果。

针对地震灾害损失评估工作面临的问题,本文作者认为可以在以下几方面开展研究:(1)需要在考虑精度和数据获取成本而采用简化方法的同时,增加对典型建筑物或关键基础设施采用更

精细评估方法的比例。同时进一步发挥遥感数据的支撑作用。(2) 在行业层面进行资源整合, 推动数据准备、计算方法、产品产出的标准化建设。打造现代化, 高质量的全国性业务支撑统一平台, 是发展和解决精细化评估技术的有效途径。(3) 从服务社会的角度出发, 丰富和发展地震灾害损失评估成果的表达形式。针对政府机构、非政府机构的专业、非专业用户提供产品及服务定制功能。分层次分行业拓展用户, 以用户需求推进产品革新, 从受众角度完善地震灾害损失评估成果的表述。

而另一方面, 遥感技术在地震灾害损失评估中的应用模式, 从最初的利用利用遥感技术快速、大范围的观测能力开展震后灾情识别, 逐渐发展为震后灾害损失评估、震害预测中的全过程数据支撑, 再到目前已经产生的智能化、精细化、信息多源化应用模式。结合本文对地震灾害损失评估技术发展趋势的分析, 本文作者认为遥感技术在地震灾害损失评估中的应用趋势主要有以下两点:

(1) 面向地震灾害损失评估的遥感信息提取技术智能化会进一步提升。随着人工智能算法所需要理解的语义信息层次和输出数据精准度要求步步攀升, 计算机视觉任务从图像级理解到像素级语义理解不断演化中产生的智能分析算法大都被引入到了解决从海量遥感影像中提取有效信息的问题。由 Long 等 (2015) 提出的全卷积网络模型 FCN (Fully Convolutional Networks)、Ronneberger 等 (2015) 的 U-net 模型、Badrinarayanan 等 (2017) 设计的 SegNet 网络模型、Facebook 人工智能实验室 He 等 (2017) 提出的 Mask R-CNN 实例分割算法、Zhao 等 (2017) 的 PSPNet 模型、谷歌的 Chen 等 (2017, 2018a, 2018b) 的 DeepLabV3+ 图像分割模型等都已经在了遥感影像智能分析中得到了广泛的应用。随着 Transformer 模型 (Vaswani 等, 2017) 和注意力机制被越来越多的引入到计算机视觉领域的应用中, 一些研究人员也在解决遥感信息提取问题时融入了这一新技术, 均取得了不错的效果。张涵等 (2021) 应用注意力引导的三维卷积网络用于遥感场景变化检测。刘文祥等 (2020) 采用双注意力机制 Deeplabv3+ 算法进行了遥感影像语义分割。李道纪等 (2020) 融合 Unet 和注意力机制进行遥感影像分类实践。

可以相信, 在当前建筑物精细数据获取仍然具有很大挑战的情况下, 遥感影像可以在大范围、多尺度建筑物震害预测以及建筑抗震能力估计提供相对丰富的信息。同时遥感数据的丰富, 遥感影像智能分析技术的不断完善也为遥感信息批量化、自动化提取提供了技术支撑。

(2) 遥感技术在地震灾害损失评估中的应用会更加深入。遥感数据在地震灾害损失评估中的应用, 是受地震灾害损失评估技术发展和遥感传感器水平发展共同驱动的。随着遥感数据的多源化以及遥感信息提取的自动化和智能化不断提升, 地震灾害损失评估向着精细化方向发展, 遥感技术与地震灾害损失评估将产生新的结合点。例如, 进行基于结构弹塑性时程分析的相对精细化震害模拟时, 需要详尽数据的支撑 (陈夏楠 等, 2021)。而在林旭川 (2017) 开发的具有城市群建筑自动建模、地震响应高性能计算、结果深度分析及三维动态可视化模块的城市震害模拟器 (YouSimulator) 中, 可应用单体建筑 GIS 数据进行建模, 实现 10 min 内完成百万栋建筑的非线性地震动时程分析。陆新征等 (2020) 提出了“城市抗震弹塑性分析方法”以实现了高效、准确的城市建筑震害模拟。该方法在数据建模过程中应用宏观 GIS 数据, 获取了包括结构、高度、类型、建设年代、面积、层数、功能等信息。而上述多种信息要素, 也正是多源遥感数据智能分析的潜力所在。可以预见, 在 CIM 平台得以发展, 数字孪生城市得到实现以及城市地震灾害风险精准化治理在智慧城市软件系统中得到集成的过程中, 遥感技术在与地震灾害损失评估相关的数据采集、模型构建、数据呈现与展示方面将继续发挥其优势和不可替代的作用。

综上所述, 本文在充分总结地震灾害损失评估工作、软件平台、人员及经济损失评估方法发展现状的基础上, 将遥感数据在震后损失评估、震害预测中的应用模式进展进行了全面梳理。最后, 通过总结地震灾害损失评估工作面临的几个问题及解决的建议, 对遥感技术在地震灾害损失评估中的应用趋势提出了展望。

参考文献 (References)

Abo El Ezz A, Smirnoff A, Nastev M, Nolle M J and McGrath H.

2019. ER2-Earthquake: interactive web-application for urban seismic risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 34: 326-336 [DOI: 10.1016/j.ijdrr.2018.12.022]
- An J W, Xu J H, Nie G Z and Bai X F. 2015. Earthquake disaster rapid assessment for emergency response supported by high-precision data of hazard bearing body. *Seismology and Geology*, 37(4): 1225-1241 (安基文, 徐敬海, 聂高众, 白仙富. 2015. 高精度承灾体数据支撑的地震灾情快速评估. *地震地质*, 37(4): 1225-1241) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2015.04.022]
- An L Q and Zhang J F. 2011. Application situation and trend of remote sensing technology used in earthquake disaster survey. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 31(2): 182-188 (安立强, 张景发. 2011. 遥感技术在震害调查中的应用现状及发展趋势. *地震工程与工程振动*, 31(2): 182-188) [DOI: 10.13197/j.eeev.2011.02.002]
- Badrinarayanan V, Kendall A and Cipolla R. 2017. SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(12): 2481-2495 [DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2644615]
- Bai Y B, Mas E and Koshimura S. 2018. Towards operational satellite-based damage-mapping using U-Net convolutional network: a case study of 2011 Tohoku earthquake-tsunami. *Remote Sensing*, 10(10): 1626 [DOI: 10.3390/rs10101626]
- Borzi B, Dell'Acqua F, Faravelli M, Gamba P, Lisini G, Onida M and Polli D. 2011. Vulnerability study on a large industrial area using satellite remotely sensed images. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(2): 675-690 [DOI: 10.1007/s10518-010-9211-9]
- Cai Y J, Lin J Q, Liu J L, Chen Y, Huang X K and Lin Q L. 2015. Study on the rapid evaluation method for direct economic loss of earthquake based on Bayesian model. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 35(2): 144-150 (蔡友军, 林均岐, 刘金龙, 陈尧, 黄孝昆, 林庆利. 2015. 基于贝叶斯模型的地震直接经济损失快速评估方法研究. *地震工程与工程振动*, 35(2): 144-150) [DOI: 10.13197/j.eeev.2015.02.144.caiyj.017]
- Cardona O D, Ordaz M G, Reinoso E, Yamin L E and Barbat A H. 2012. CAPRA-Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment: international initiative for risk management effectiveness//15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisboa: [s.n.]: 1-10
- Chen D D. 2020. Research on Extraction Method of Road Damage Information from High-Resolution Remote Sensing Image Based on Deeplabv3+. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration (陈丹丹. 2020. 基于Deeplabv3+的高分遥感影像道路损毁信息提取方法研究. 北京: 中国地震局地震预测研究所) [DOI: 10.27488/d.cnki.ggjfz.2020.000004]
- Chen F. 2016. Research on Evaluation Method of Seismic Casualties and Program Implementation. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology (陈飞. 2016. 地震灾害人员伤亡评估方法研究及程序实现. 西安: 西安建筑科技大学) [DOI: 10.27393/d.cnki.gxazu.2016.000241]
- Chen H F. 2012. General Development and Design of HAZ-China Earthquake Disaster Loss Estimation System. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (陈洪富. 2012. HAZ-China地震灾害损失评估系统设计与初步实现. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所)
- Chen H F, Sun B T and Chen X Z. 2014. GIS-based earthquake database information management system. *Journal of Seismological Research*, 37(4): 648-653 (陈洪富, 孙柏涛, 陈相兆. 2014. 基于GIS的地震基础数据库管理系统. *地震研究*, 37(4): 648-653) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0666.2014.04.024]
- Chen K H, Wang L X, Liu Z and Wu H P. 2017. Design, development and implementation of the modular urban earthquake disaster risk assessment system. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 12(4): 947-955 (陈焜浩, 王立新, 刘智, 吴华平. 2017. 模块化城镇地震灾害风险评估系统设计、开发与实现. *震灾防御技术*, 12(4): 947-955) [DOI: 10.11899/zzyfz.20170422]
- Chen L C, Papandreou G, Kokkinos I, Murphy K and Yuille A L. 2018a. DeepLab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 40(4): 834-848 [DOI: 10.1109/TPAMI.2017.2699184]
- Chen L C, Papandreou G, Schroff F and Adam H. 2017. Rethinking Atrous Convolution for Semantic Image Segmentation. [DOI: 10.48550/arXiv.1706.05587]
- Chen L C, Zhu Y K, Papandreou G, Schroff F and Adam H. 2018b. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation//15th European Conference on Computer Vision. Munich: Springer: 833-851 [DOI: 10.1007/978-3-030-01234-2_49]
- Chen Q F and Chen L. 1997. Earthquake loss assessment based on GDP and population data. *Acta Seismologica Sinica*, 19(6): 640-649 (陈祺福, 陈凌. 1997. 利用国内生产总值和人口数据进行地震灾害损失预测评估. *地震学报*, 19(6): 640-649)
- Chen W K, He S L, Zhang J F, Zhou Z H and Guo X N. 2008. A review on methods of extracting earthquake damage information using remote sensing technology. *Northwestern Seismological Journal*, 30(1): 88-93 (陈文凯, 何少林, 张景发, 周中红, 郭晓宁. 2008. 利用遥感技术提取震害信息方法的研究进展. *西北地震学报*, 30(1): 88-93) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2008.01.018]
- Chen X N, Zhang L X, Lin X C and Lu X Z. 2021. Study on matching algorithm of urban seismic scenarios based on ground motion database. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 41(2): 76-83 (陈夏楠, 张令心, 林旭川, 陆新征. 2021. 基于地震动库的城市地震灾害情景快速匹配算法研究. *地震工程与工程振动*, 41(2): 76-83) [DOI: 10.13197/j.eeev.2021.02.76.chenxn.008]
- Chen Y. 2015. Study on Rapid Assessment Method for Destructive Earthquake Casualty. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (陈尧. 2015. 破坏性地震人员伤亡快速评估方法研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所)
- Chen Y, Lin J Q, Liu J L, Cai Y J, Huang X K and Lin Q L. 2017. Study on rapid assessment method of earthquake direct economic loss. *World Earthquake Engineering*, 33(1): 188-193 (陈尧, 林均岐, 刘金龙, 蔡友军, 黄孝昆, 林庆利. 2017. 地震直接经济损失快速评估方法研究. *世界地震工程*, 33(1): 188-193)

- Cheng J Y and Yang Z. 1993. Regression analysis of mortality and the ratio of collapsing houses by Tangshan earthquake. *Seismology and Geology*, 15(1): 82-87 (程家喻, 杨喆. 1993. 唐山地震人员震亡率与房屋倒塌率的相关分析. *地震地质*, 15(1): 82-87)
- Cheng J Y and Yang Z. 1996. A software system of evaluating earthquake casualties. *Seismology and Geology*, 18(4): 462-470 (程家喻, 杨喆. 1996. 评估地震人员伤亡的软件系统. *地震地质*, 18(4): 462-470)
- Cheng X M, Shen Z F, Xing T Y and Dong W. 2016. Damaged building extraction and rapid assessment for earthquake disasters based on high-resolution remote sensing images. *Journal of Natural Disasters*, 25(3): 22-31 (程希萌, 沈占锋, 邢廷炎, 董文. 2016. 基于高分遥感影像的地震受灾建筑物提取与倒损情况快速评估. *自然灾害学报*, 25(3): 22-31) [DOI: 10.13577/j.jnd.2016.0303]
- China Earthquake Administration. 2018. DB/T 79-2018 Earthquake disaster assessment based on remote sensing—Earthquake-caused direct economic loss. Beijing: Standards Press of China (中国地震局. 2018. DB/T 79-2018 地震灾害遥感评估 地震直接经济损失. 北京: 中国标准出版社)
- Cui L P and Wang X Q. 2016. A survey on the earthquake induced building damage detection using SAR imagery. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 11(2): 239-250 (崔丽萍, 王晓青. 2016. SAR 影像建筑物震害检测方法研究综述. *震灾防御技术*, 11(2): 239-250) [DOI: 10.11899/zzfy20160207]
- Dell'Acqua F, Gamba P and Jaiswal K. 2013. Spatial aspects of building and population exposure data and their implications for global earthquake exposure modeling. *Natural Hazards*, 68(3): 1291-1309 [DOI: 10.1007/s11069-012-0241-2]
- Dhu T, Robinson D, Clark D, Gray D and Row P. 2008. Event-based earthquake risk modelling//The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: [s.n.]
- Ding B Y. 1991. Two methods of earthquake Damace loss evaluation. *Journal of Catastrophology*, 6(2): 45-47 (丁伯阳. 1991. 介绍两种震害损失估算方法. *灾害学*, 6(2): 45-47)
- Ding X, Wang X Q, Dou A X, Yuan X X and Ding L. 2019. Design and realization of earthquake loss prediction system in nationwide scale based on grid data. *Earthquake Research in China*, 35(2): 238-247 (丁香, 王晓青, 窦爱霞, 袁小祥, 丁玲. 2019. 基于格网的全国尺度地震灾害损失预测系统设计与实现. *中国地震*, 35(2): 238-247) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-4683.2019.02.003]
- Ding X, Wang X Q and Jiang L X. 1998. Computer-aided system for earthquake disaster loss estimation. *Earthquake*, 18(3): 286-292 (丁香, 王晓青, 姜立新. 1998. 地震灾害损失现场评估的计算机辅助系统. *地震*, 18(3): 286-292)
- Ding X, Wang X Q, Wang L and Zheng Y H. 2011. The development and application of catastrophe earthquake risk estimation system. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 6(4): 454-460 (丁香, 王晓青, 王龙, 郑友华. 2011. 地震巨灾风险评估系统的研制与应用. *震灾防御技术*, 6(4): 454-460) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-5722.2011.04.011]
- Dong Y S, Chen H P, Pan Y Z and Fang W H. 2014. A rapid method for extracting building rubble based on post-earthquake high-resolution satellite imagery. *Journal of Basic Science and Engineering*, 22(6): 1079-1088 (董燕生, 陈洪萍, 潘耀忠, 方伟华. 2014. 基于震后高分辨率卫星遥感影像的建筑物瓦砾快速提取方法. *应用基础与工程科学学报*, 22(6): 1079-1088) [DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2014.06.004]
- Fan Y D, Wu W, Wang W, Liu M and Wen Q. 2016. Research progress of disaster remote sensing in China. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1170-1184 (范一大, 吴玮, 王薇, 刘明, 温奇. 2016. 中国灾害遥感研究进展. *遥感学报*, 20(5): 1170-1184) [DOI: 10.11834/jrs.20166171]
- Fan Y D, Yang S Q, Wang L, Wang W, Nie J and Zhang B J. 2008. Study on urgent monitoring and assessment in Wenchuan earthquake. *Journal of Remote Sensing*, 12(6): 858-864 (范一大, 杨思全, 王磊, 王薇, 聂娟, 张宝军. 2008. 汶川地震应急监测评估方法研究. *遥感学报*, 12(6): 858-864) [DOI: 10.11834/jrs.200806115]
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) and National Institute of Building Sciences (NIBS). 1997. Earthquake Loss Estimation Methodology. HAZUS97. Federal Emergency Management Agency
- Fu Z X and Li G P. 1993. Study on earthquake caused loss of life. Beijing: Seismological Press (傅征祥, 李革平. 1993. 地震生命损失研究. 北京: 地震出版社)
- Fu Z Y and Chen Q F. 2019. Earthquake disaster risk assessment based on nighttime lighting data: a case study of Yinchuan City//Urban Planning Society of China. Proceedings of the 2019 China Urban Planning Annual Conference 01 Urban Safety and Disaster Prevention Planning. Beijing: China Architecture and Building Press: 333-345 (付泽钰, 陈奇放. 2019. 基于夜间灯光数据的地震灾害风险评估——以银川市为例//中国城市规划学会. 活力城乡 美好人居——2019中国城市规划年会论文集(01城市安全与防灾规划). 北京: 中国建筑工业出版社: 333-345) [DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.004946]
- Future Earthquake Loss Prediction Research Group of the Earthquake Hazard Prevention Department of the National China Earthquake Administration. 1990. Research on Earthquake Loss Prediction in China. Beijing: Seismological Press (国家地震局震害防御司未来地震灾害损失预测研究组. 1990. 中国地震灾害损失预测研究. 北京: 地震出版社)
- Gao H Y and Li Q X. 2010. Study on the rapid evaluation model for seismic casualties. *Journal of Catastrophology*, 25(S1): 275-277 (高惠瑛, 李清霞. 2010. 地震人员伤亡快速评估模型研究. *灾害学*, 25(S1): 275-277) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2010.z1.059]
- Geiß C, Aravena Pelizari P, Marconcini M, Sengara W, Edwards M, Lakes T and Taubenböck H. 2015. Estimation of seismic building structural types using multi-sensor remote sensing and machine learning techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104: 175-188 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.07.016]
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and Standardization Admin-

- istration of the People's Republic of China. 2008. GB/T 18207.1-2008 Terminology of protecting against and mitigating earthquake disasters—Part 1: basic terms. Beijing: Standards Press of China (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. 2008. GB/T 18207.1-2008 防震减灾术语 第1部分: 基本术语. 北京: 中国标准出版社)
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and Standardization Administration of the People's Republic of China. 2012. GB/T 18208.4-2011 Post-earthquake field works—Part 4: assessment of direct loss. Beijing: Standards Press of China (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. 2012. GB/T 18208.4-2011 地震现场工作 第4部分: 灾害直接损失评估. 北京: 中国标准出版社)
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and Standardization Administration of the People's Republic of China. 2015. GB/T 19428-2014 Code for earthquake loss estimation and its information management system. Beijing: Standards Press of China (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会. 2015. GB/T 19428-2014 地震灾害预测及其信息管理系统技术规范. 北京: 中国标准出版社)
- Gong L X, Li Q, Zhang J F, Zeng Q M, Liu M Z and Li C L. 2013. Object-oriented detection of earthquake building damages. *Earthquake*, 33(2): 109-114 (龚丽霞, 李强, 张景发, 曾琪明, 刘明众, 李成龙. 2013. 面向对象的房屋震害变化检测方法. *地震*, 33(2): 109-114) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2013.02.014]
- Guo J L. 2003. The prediction of the economic loss and casualty due to earthquake. *Earthquake Research in Shanxi*, 2: 4-6, 16 (郭建立. 2003. 地震经济损失预测和人员伤亡预测. *山西地震*, (2): 4-6, 16) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6265.2003.02.002]
- Guo Z L, Liu M G and Xie D C. 2004. Genetic algorithm-neural network-based economic losses assessment of seismic disaster. *Journal of Natural Disasters*, 13(6): 92-96 (郭章林, 刘明广, 解德才. 2004. 震灾经济损失评估的遗传神经网络模型. *自然灾害学报*, 13(6): 92-96) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2004.06.016]
- Hancilar U, Tuzun C, Yenidogan C and Erdik M. 2010. ELER software—a new tool for urban earthquake loss assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(12): 2677-2696 [DOI: 10.5194/nhess-10-2677-2010]
- He H X, Wu B, Li R and Han X Z. 2018. Research on requirements and strategies of satellite cooperative observation for natural disaster emergency response. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 39(6): 91-101 (和海霞, 武斌, 李儒, 韩杏子. 2018. 面向自然灾害应急的卫星协同观测策略研究. *航天返回与遥感*, 39(6): 91-101) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.06.011]
- He K M, Gkioxari G, Dollár P and Girshick R. 2017. Mask R-CNN// 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice: IEEE: 2980-2988 [DOI: 10.1109/ICCV.2017.322]
- Hu S Q. 2007. The Research on Earthquake Damage Prediction of Building Stock and the Discussion of Direct Economic Loss of Infrastructure. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (胡少卿. 2007. 建筑物的群体震害预测方法研究及基础设施经济损失预测方法探讨. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所)
- Huang P D. 2018. Study on the Influencing Factors of Casualties Caused by Earthquakes Abroad. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (黄佩蒂. 2018. 境外地震人员伤亡影响因素研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所)
- Huang X and Sun M. 2016. The rapid assessment of wounded personnel based on RBF neural network model under the background earthquake disaster. *Systems Engineering*, 34(8): 129-135 (黄星, 孙明. 2016. 基于RBF神经网络的震伤人员快速评估模型. *系统工程*, 34(8): 129-135)
- Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration and Center for Earth Observation and Digital Earth Chinese Academy of Sciences. 2010. Atlas of Remote Sensing Interpretation of Building Damage in Wenchuan Earthquake. Beijing: Seismological Press (中国地震局地震预测研究所, 中国科学院对地观测与数字地球科学中心. 2010. 汶川地震建筑物震害遥感解译图集. 北京: 地震出版社)
- Ji M, Liu L F and Buchroithner M. 2018. Identifying collapsed buildings using post-earthquake satellite imagery and convolutional neural networks: a case study of the 2010 Haiti earthquake. *Remote Sensing*, 10(11): 1689 [DOI: 10.3390/rs10111689]
- Jia H X. 2020. Research of Seismic Casualties Assessment Model Based on Machine Learning Algorithm. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (贾哈曦. 2020. 基于机器学习算法的地震人员伤亡评估研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所) [DOI: 10.27490/d.cnki.ggjgy.2020.000017]
- Jiang L X, Shuai X H, Zhang J F and Li Z Q. 2003. Study of earthquake emergency command system. *Earthquake*, 23(2): 115-120 (姜立新, 帅向华, 张建福, 李志强. 2003. 地震应急指挥管理信息系统的探讨. *地震*, 23(2): 115-120) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2003.02.014]
- Karaman H, Şahin M and Elnashai A S. 2008. Earthquake loss assessment features of Maeviz-Istanbul (Hazturk). *Journal of Earthquake Engineering*, 12(S2): 175-186 [DOI: 10.1080/13632460802014006]
- Li D J, Guo H T, Lu J, Zhao C, Lin Y Z and Yu D H. 2020. A remote sensing image classification procedure based on multilevel attention fusion U-Net. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 49(8): 1051-1064 (李道纪, 郭海涛, 卢俊, 赵传, 林雨准, 余东行. 2020. 遥感影像地物分类多注意力融和U型网络法. *测绘学报*, 49(8): 1051-1064) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190407]
- Li L. 2009. Study on Earthquake Damage Prediction of Urban Buildings and Earthquake Economic Losses. Dalian: Dalian University of Technology (李利. 2009. 城市建筑物震害及震害经济损失预测方法研究. 大连: 大连理工大学)
- Li Q. 2018. Study on Key Technology of Earthquake Emergency Using Multi-Mode Remote Sensing Data. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (李强.

2018. 多模式遥感数据地震应急关键技术研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所)
- Li S J and Liu M. 2018. Application of satellite remote sensing in emergency monitoring of major earthquake disaster in China. *City and Disaster Reduction*, (4): 7-10 (李素菊, 刘明. 2018. 卫星遥感在中国重大地震灾害应急监测中的应用. *城市与减灾*, (4): 7-10) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-0495.2018.04.003]
- Li S Z, Jia X Y and Zhu Y L. 1995. Earthquake damage evaluation software EDEP-93 and its use in puer earthquake. *Journal of Natural Disasters*, 4(1): 39-46 (李树楨, 贾相玉, 朱玉莲. 1995. 震害评估软件 EDEP-93 及其在普洱地震中的应用. *自然灾害学报*, 4(1): 39-46)
- Li S Z and Yin Z Q. 1993. Evaluation of earthquake and database system. *Earthquake Research in China*, 9(3): 74-85 (李树楨, 尹之潜. 1993. 地震损失评估与数据库系统. *中国地震*, 9(3): 74-85)
- Li Y W and Yu S Z. 2021. Study on the assessment method of earthquake casualties in the eastern region. *World Earthquake Engineering*, 37(3): 207-213 (李延唯, 余世舟. 2021. 东部地区地震人员伤亡评估方法研究. *世界地震工程*, 37(3): 207-213) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-6069.2021.03.023]
- Li Y Y, Chen J G, Zhang X L and Yuan H Y. 2015. Structure destruction based earthquake casualty estimates. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 55(7): 803-807, 814 (李媛媛, 陈建国, 张小乐, 袁宏永. 2015. 基于建筑结构破坏的地震伤亡评估方法及应用. *清华大学学报(自然科学版)*, 55(7): 803-807, 814) [DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2015.07.016]
- Lin J. 2011. Research trends of Earthquake disaster mitigation in USA and Japan. *Overview of Disaster Prevention*, (1): 32-35 (林捷. 2011. 美日防震减灾研究动态. *防灾博览*, (1): 32-35)
- Lin X C. 2017. Numerical simulation and risk control of earthquake disasters in urban building complexes. *City and Disaster Reduction*, (3): 18-22 (林旭川. 2017. 城市建筑群地震灾害数值仿真与风险控制. *城市与减灾*, (3): 18-22) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-0495.2017.03.007]
- Liu B C. 1981. *Earthquake Risk and Damage Functions: Application to New Madrid*. Boulder: Westview Press
- Liu H X. 1988. Development of earthquake engineering in China-review and outlook. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8(2): 1-7 (刘恢先. 1988. 地震工程学科在中国的发展——回顾与前瞻. *地震工程与工程振动*, 8(2): 1-7) [DOI: 10.13197/j.eeev.1988.02.001]
- Liu J L and Lin J Q. 2012. Study on assessment method for earthquake casualty based on epicentral intensity. *Journal of Natural Disasters*, 21(5): 113-119 (刘金龙, 林均岐. 2012. 基于震中烈度的地震人员伤亡评估方法研究. *自然灾害学报*, 21(5): 113-119) [DOI: 10.13577/j.jnd.2012.0516]
- Liu R S, Yu S Z, Yan D Q, He M L, Yue X and Li J. 2014. Refined method for rapid assessment of seismic damage and economic loss. *Journal of Basic Science and Engineering*, 22(5): 928-940 (刘如山, 余世舟, 颜冬启, 贺梦龙, 越潇, 李吉. 2014. 地震破坏与经济损失快速评估精细化方法研究. *应用基础与工程科学学报*, 22(5): 928-940) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2014.05.009]
- Liu W X, Shu Y Z, Tang X M and Liu J M. 2020. Remote sensing image segmentation using dual attention mechanism Deeplabv3+ algorithm. *Tropical Geography*, 40(2): 303-313 (刘文祥, 舒远仲, 唐小敏, 刘金梅. 2020. 采用双注意力机制 Deeplabv3+ 算法的遥感影像语义分割. *热带地理*, 40(2): 303-313) [DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003229]
- Liu X H and Chen Y P. 1985. A review of urban earthquake disaster prevention technologies abroad. *World Earthquake Engineering*, 1(2): 10-17 (刘锡荟, 陈一平. 1985. 国外城市地震防灾技术述评. *世界地震工程*, 1(2): 10-17)
- Liu X H, Li H and He J. 1985. A framework for seismic losses estimation. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 5(4): 1-12 (刘锡荟, 李荷, 何进. 1985. 地震损失估计和经济决策模型. *地震工程与工程振动*, 5(4): 1-12) [DOI: 10.13197/j.eeev.1985.04.001]
- Liu Y H. 2020. *Extraction and Research on Building Information from High-Resolution Remote Sensing Image for Seismic Risk Assessment*. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration (刘耀辉. 2020. 面向地震风险评估的高分辨率遥感影像建筑物信息提取与研究. 北京: 中国地震局地质研究所) [DOI: 10.27489/d.cnki.gzdds.2020.000001]
- Liu Y Q, Cai H C, Zhao J and Feng S M. 1998. Prediction of economic losses caused by seismic hazard in northern part of Hebei province. *North China Earthquake Sciences*, 16(4): 39-50 (刘允清, 蔡华昌, 赵军, 冯书明. 1998. 河北省北部地震灾害经济损失预测. *华北地震科学*, 16(4): 39-50)
- Long J, Shelhamer E and Darrell T. 2015. Fully convolutional networks for semantic segmentation//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Boston: IEEE: 3431-3440 [DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298965]
- Liu X Z, Zeng X, Xu Z, et al. 2018. Improving the accuracy of near-real-time seismic loss estimation using post-earthquake remote sensing images. *Earthquake Spectra*, 34(3): 1219-1245.
- Liu X Z, Tian Y, Xu Z and Xiong C. 2020. A new urban earthquake disaster simulation method: city-scale nonlinear time-history analysis. *Chinese Science Bulletin*, 65(11): 1055-1062 (陆新征, 田源, 许镇, 熊琛. 2020. 一种新型城市地震灾害模拟方法: 城市抗震弹塑性分析方法. *科学通报*, 65(11): 1055-1062) [DOI: 10.1360/TB-2019-0679]
- Ma J J, Feng Q M and Zhou H Y. 2013. Method for predicting earthquake damage of housing building groups based on image explanation. *Journal of Natural Disasters*, 22(3): 62-67 (马建军, 冯启民, 周宏宇. 2013. 基于影像解译的住宅建筑群体震害预测方法. *自然灾害学报*, 22(3): 62-67) [DOI: 10.13577/j.jnd.2013.0309]
- Ma Y H and Xie L L. 2000. Methodologies for assessment of earthquake casualty. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 20(4): 140-147 (马玉宏, 谢礼立. 2000. 地震人员伤亡估算方法研究. *地震工程与工程振动*, 20(4): 140-147) [DOI: 10.13197/j.eeev.2000.04.021]
- Ma Y J, Li Y Y and Han X L. 2007. Earthquake economic loss estimation based on the ANN. *World Earthquake Engineering*, 23(1): 146-150 (马亚杰, 李永义, 韩秀丽. 2007. 基于人工神经网络的

- 地震经济损失评估. 世界地震工程, 23(1): 146-150 [DOI: 10.3969/j.issn.1007-6069.2007.01.028]
- Matsuoka M, Mito S, Midorikawa S, Miura H, Quiroz L G, Maruyama Y and Estrada M. 2014. Development of building inventory data and earthquake damage estimation in Lima, Peru for future earthquakes. *Journal of Disaster Research*, 9(6): 1032-1041 [DOI: 10.20965/jdr.2014.p1032]
- Matsuoka M, Miura H, Midorikawa S and Estrada M. 2013. Extraction of urban information for seismic hazard and risk assessment in Lima, Peru using satellite imagery. *Journal of Disaster Research*, 8(2): 328-345 [DOI: 10.20965/jdr.2013.p0328]
- McLaren T M, Myers J D, Lee J S, Tolbert N L, Hampton S D and Navarro C M. 2008. MAEviz: an earthquake risk assessment system// *Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. Irvine: ACM: 88 [DOI: 10.1145/1463434.1463534]
- Mitomi H, Yamazaki F and Matsuoka M. 2001. Development of automated extraction method for building damage area based on maximum likelihood classifier//8th International Conference on Structural Safety and Reliability. Newport Beach: [s.n.]
- Mitomi Y and Takeuchi S. 1995. Analysis of spectral feature of the damaged areas by liquefaction and fire using airborne MSS data// *Proceedings of the 18th Japanese Conference on Remote Sensing*. [s.l.]: [s.n.]
- Molina S, Lang D H and Lindholm C D. 2010. SELENA-An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure. *Computers and Geosciences*, 36(3): 257-269 [DOI: 10.1016/j.cageo.2009.07.006]
- OOFIMS. 2020. Object-Oriented Framework for Infrastructure Modeling and Simulation[EB/OL]. [2021-10-30]. <https://sites.google.com/a/uniroma1.it/oofims/download>
- Pittore M and Wieland M. 2013. Toward a rapid probabilistic seismic vulnerability assessment using satellite and ground-based remote sensing. *Natural Hazards*, 68(1): 115-145 [DOI: 10.1007/s11069-012-0475-z]
- Polli D and Dell'Acqua F. 2011. Fusion of optical and SAR data for seismic vulnerability mapping of buildings//Prasad S, Bruce L M and Chanussot J, eds. *Optical Remote Sensing: Advances in Signal Processing and Exploitation Techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer: 329-341 [DOI: 10.1007/978-3-642-14212-3_15]
- Polli D, Dell'Acqua F and Gamba P. 2009. First steps towards a framework for earth observation (EO)-based seismic vulnerability evaluation. *Environmental Semeiotics*, 2(1): 16-30 [DOI: 10.3383/es.2.1.2]
- Qi W H, Su G W, Sun L, Yang F and Wu Y. 2017. "Internet+" approach to mapping exposure and seismic vulnerability of buildings in a context of rapid socioeconomic growth: a case study in Tangshan, China. *Natural Hazards*, 86(S1): 107-139 [DOI: 10.1007/s11069-016-2581-9]
- Qian F L and Cui J. 2013. Application of BP neural network analysis in forecasting emergency demand——A case study on earthquake casualty forecasting. *China Safety Science Journal*, 23(4): 20-25 (钱枫林, 崔健. 2013. BP神经网络模型在应急需求预测中的应用——以地震伤亡人数预测为例. *中国安全科学学报*, 23(4): 20-25) [DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2013.04.017]
- Riedel I, Guéguen P, Dalla Mura M, Pathier E, Leduc T and Chanussot J. 2015. Seismic vulnerability assessment of urban environments in moderate-to-low seismic hazard regions using association rule learning and support vector machine methods. *Natural Hazards*, 76(2): 1111-1141 [DOI: 10.1007/s11069-014-1538-0]
- Riedel I, Guéguen P, Dalla Mura M, Pathier E, Leduc T and Chanussot J. 2015. Seismic vulnerability assessment of urban environments in moderate-to-low seismic hazard regions using association rule learning and support vector machine methods. *Natural Hazards*, 76(2): 1111-1141 [DOI: 10.1007/s11069-014-1538-0]
- Ronneberger O, Fischer P and Brox T. 2015. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation//18th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention. Munich: Springer: 234-241 [DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28]
- Schäfer D, Pietsch M and Wenzel H. 2013. EQvis: a consequence based risk management software tool//Zingoni A, ed. *Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. London: CRC Press
- Shi W H, Chen K H, Xie Y Q, Li X, Pang W D and Dai B Y. 2012. Prediction method research on casualties due to earthquake disaster in Yunnan. *Journal of Seismological Research*, 35(3): 387-392 (施伟华, 陈坤华, 谢英情, 李西, 庞卫东, 代博洋. 2012. 云南地震灾害人员伤亡预测方法研究. *地震研究*, 35(3): 387-392) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0666.2012.03.015]
- Silva V, Crowley H, Pagani M, Monelli D and Pinho R. 2014. Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Natural Hazards*, 72(3): 1409-1427 [DOI: 10.1007/s11069-013-0618-x]
- Strasser F O, Bommer J J, Şeşetyan K, Erdik M, Çağnan Z, Irizarry J, Goula X, Lucantoni A, Sabetta F, Bal I E, Crowley H and Lindholm C. 2008. A comparative study of European earthquake loss estimation tools for a scenario in Istanbul. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(S2): 246-256 [DOI: 10.1080/13632460802014188]
- Sun B T and Li Y. 2021. Evolution and development of earthquake disaster prediction in China. *Engineering Mechanics*, 38(1): 1-7, 51 (孙柏涛, 李洋. 2021. 中国震害预测工作的沿革与发展. *工程力学*, 38(1): 1-7, 51) [DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.ST04]
- Sun Z, Guo J X and Zhao X. 2019. Design and implementation of automatic system of earthquake emergency disaster information pre-evaluation based on kilometer grid. *Information and Communications*, (7): 74-76 (孙哲, 郭建兴, 赵曦. 2019. 基于公里格网的陕西省地震损失自动评估系统的设计与实现. *信息通信*, (7): 74-76) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-1131.2019.07.033]
- Tian L L. 2012. Analysis of the influencing factors of casualties in earthquake disasters and the formulas for estimating casualties. Beijing: Capital University of Economics and Business (田莉莉. 2012. 地震灾害人员伤亡影响因素分析及人员伤亡估算公式. 北京: 首都经济贸易大学)

- Tian W F. 2015. Research on Recognition of Earthquake Damaged Road Based on High Resolution Remote Sensing Imagery—Taking Ludian Earthquake for an Example. Beijing: Beijing Jiaotong University (田卫方. 2015. 基于高分辨率遥感影像的震后道路损毁识别研究——以鲁甸地震为例. 北京: 北京交通大学)
- Turker M and San B T. 2004. Detection of collapsed buildings caused by the 1999 Izmit, Turkey earthquake through digital analysis of post-event aerial photographs. *International Journal of Remote Sensing*, 25(21): 4701-4714 [DOI: 10.1080/01431160410001709976]
- Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, Uszkoreit J, Jones L, Gomez A N, Kaiser Ł and Polosukhin I. 2017. Attention is all you need//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach: Curran Associates Inc.: 6000-6010
- Vetrivel A, Gerke M, Kerle N, Nex F and Vosselman G. 2018. Disaster damage detection through synergistic use of deep learning and 3D point cloud features derived from very high resolution oblique aerial images, and multiple-kernel-learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 140: 45-59 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.03.001]
- Wang D L. 2007. Quantitative study on the relationship between remote sensing seismic damage index and ground survey seismic damage index. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration (王栋梁. 2007. 遥感震害指数与地面调查震害指数关系的定量研究. 北京: 中国地震局地震预测研究所)
- Wang H F, Zhai Y M and Chen X. 2010. Rapid prediction of earthquake disaster of buildings based on remote sensing images. *North China Earthquake Sciences*, 28(2): 45-47 (王淮峰, 翟永梅, 陈希. 2010. 基于遥感图像的快速震害预测. 华北地震科学, 28(2): 45-47) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-1375.2010.02.010]
- Wang L. 2007. Research and implementation of earthquake disaster loss assessment method based on remote sensing images. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration (王龙. 2007. 基于遥感影像的地震灾害损失评估方法研究与实现. 北京: 中国地震局地震预测研究所)
- Wang L, Dou A X, Wang X Q, Dong Y F, Ding X, Li Z, Yuan X X and Qiu Y R. 2011. Damage assessment of Haiti earthquake emergency using high resolution remote sensing imagery//Proceedings of SPIE 8203, Remote Sensing of the Environment: The 17th China Conference on Remote Sensing. Hangzhou: SPIE: 820310 [DOI: 10.1117/12.910416]
- Wang W Z. 2012. Earthquake-Caused Direct Economic Loss Assessment: BP Neural Network and Its Application. Chengdu: Southwestern University of Finance and Economics (王伟哲. 2012. 地震直接经济损失评估: BP神经网络及其应用. 成都: 西南财经大学)
- Wang X Q and Ding X. 2004. Estimation system of disastrous losses in seismic site based on GIS. *Journal of Natural Disasters*, 13(1): 118-125 (王晓青, 丁香. 2004. 基于GIS的地震现场灾害损失评估系统. 自然灾害学报, 13(1): 118-125) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2004.01.019]
- Wang X Q and Ding X. 2019. Forecasting researches on disaster loss of Chinese mainland during 2016 to 2025. 2016~2025 Forecasting Researches on Earthquake Risk Region and Disaster Loss of Chinese Mainland During 2016 to 2025. Beijing: Sinomap Press (王晓青, 丁香. 2019. 2016~2025年中国大陆地震损失预测研究. 2016~2025年中国大陆地震危险区与地震灾害损失预测研究. 北京: 中国地图出版社)
- Wang X Q, Ding X, Wang L and Wang Y. 2009a. A study on fast earthquake loss assessment and its application to 2008 Wenchuan M_8 earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 31(2): 205-211 (王晓青, 丁香, 王龙, 王岩. 2009a. 四川汶川8级大地震灾害损失快速评估研究. 地震学报, 31(2): 205-211) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-3782.2009.02.010]
- Wang X Q, Dou A X, Ding X and Li Y W. 2015a. Advance on the RS-based emergency seismic intensity assessment. *Journal of Geo-Information Science*, 17(12): 1536-1544 (王晓青, 窦爱霞, 丁香, 李旖雯. 2015a. 地震烈度应急遥感评估研究与应用进展. 地球信息科学学报, 17(12): 1536-1544) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.01536]
- Wang X Q, Dou A X, Sun G Q, Ding X, Wang L and Yuan X X. 2013. Intensity assessment of the 2010 Yushu $M_7.1$ earthquake based on synthetic seismic damage index. *Earthquake*, 33(2): 1-10 (王晓青, 窦爱霞, 孙国清, 丁香, 王龙, 袁小祥. 2013. 基于综合震害指数的玉树地震烈度遥感评估研究. 地震, 33(2): 1-10) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2013.02.001]
- Wang X Q, Dou A X, Wang L, Yuan X X, Ding X and Zhang W. 2015b. RS-based assessment of seismic intensity of the 2013 Lushan, Sichuan, China $M_7.0$ earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(1): 163-171 (王晓青, 窦爱霞, 王龙, 袁小祥, 丁香, 张伟. 2015a. 2013年四川芦山7.0级地震烈度遥感评估. 地球物理学报, 58(1): 163-171) [DOI: 10.6038/cjg20150114]
- Wang X Q, Fu Z X, Ding X and Xu Y J. 2000. The algorithm principle and main functions of earthquake disaster and loss prediction system. *Earthquake*, 20(S1): 222-226 (王晓青, 傅征祥, 丁香, 许永江. 2000. 地震灾害损失预测系统计算原理与主要功能. 地震, 20(S1): 222-226) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2000.z1.036]
- Wang X Q, Wang L, Zhang X H, Ding X, Qiu H, Dong Y F, Dou A X, Zhang F Y and Liu Z T. 2009b. Primary quantitative study on earthquake damage extracted from remote sensing imagery—A case study of Doujiangyan due to the Wenchuan $M_8.0$ earthquake. *Earthquake*, 29(1): 174-181 (王晓青, 王龙, 章熙海, 丁香, 邱虎, 董彦芳, 窦爱霞, 张飞宇, 刘在涛. 2009b. 汶川8.0级地震震害遥感定量化初步研究——以都江堰城区破坏为例. 地震, 29(1): 174-181) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2009.01.021]
- Wang X Q, Wei C J, Miao C G, Zhang J F, Shan X J and Ma Q Z. 2003. The extraction of seismic damage from remote sensing images—a case study of Bachu-Jiashi earthquake with $M_s=6.8$ occurred on Feb. 24, 2003. *Earth Science Frontiers*, 10(S1): 285-291 (王晓青, 魏成阶, 苗崇刚, 张景发, 单新建, 马庆尊. 2003. 震害遥感快速提取研究——以2003年2月24日巴楚—伽师6.8级地震为例. 地学前缘, 10(S1): 285-291) [DOI: 10.3321/j.issn:1005-2321.2003.z1.039]

- Wei C J, Zhang Y Z, Zhu B Q, Zhang Z K, Yu T X and Gao Z M. 1996. Application of remote sensing and GIS techniques in producing earthquake isoseismal. *Journal of Natural Disasters*, 5(3): 18-28 (魏成阶, 张渊智, 朱博勤, 张宗科, 于天旭, 高志明. 1996. 地震烈度包络线的遥感与GIS方法快速生成. *自然灾害学报*, 5(3): 18-28)
- Wen R Z. 1997. The constitution of GIS-based urban earthquake resistance system. *World Information on Earthquake Engineering*, 13(4): 28-33 (温瑞智. 1997. 基于GIS的城市抗震防灾系统的设计. *世界地震工程*, 13(4): 28-33)
- Wieland M, Pittore M, Parolai S, Begaliev U, Yasunov P, Tyagunov S, Moldobekov B, Saidiy S, Ilyasov I and Abakanov T. 2015. A multiscale exposure model for seismic risk assessment in Central Asia. *Seismological Research Letters*, 86(1): 210-222 [DOI: 10.1785/0220140130]
- Wu H J, Feng T N, Hong Z H, Ai Z S, Wang C X and Jiang C H. 2013. Earthquake casualty prediction model based on remote sensing images. *Journal of Tongji University (Medical Science)*, 34(5): 36-39 (吴恒璟, 冯铁男, 洪中华, 艾自胜, 王朝昕, 姜成华. 2013. 基于遥感图像的地震人员伤亡预测模型研究. *同济大学学报(医学版)*, 34(5): 36-39) [DOI: 10.3969/j.issn1008-0392.2013.05.008]
- Wu H J, Guo M Z and Zhang J. 2006. Application of remote sensing technology in the field of earthquake prevention and disaster reduction. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 26(3): 267-269 (吴焕娟, 郭明珠, 张皎. 2006. 遥感技术在防震减灾领域中的应用. *地震工程与工程振动*, 26(3): 267-269) [DOI: 10.13197/j.eeev.2006.03.075]
- Xiao G X. 1986. Economic problems in earthquake engineering. *World Earthquake Engineering*, 2(1): 3-10, 19 (肖光先. 1986. 地震工程中的经济问题. *世界地震工程*, 2(1): 3-10, 19)
- Xiao G X. 1987. A prediction method for earthquake loss. *Journal of Seismology*, (1): 1-8 (肖光先. 1987. 地震损失的预测方法. *地震学刊*, (1): 1-8)
- Xiao G X. 1991. Rapid assessment of disaster losses in post-earthquake. *Journal of Catastrophology*, 6(4): 12-17 (肖光先. 1991. 震后灾害损失快速评估. *灾害学*, 6(4): 12-17)
- Xie J Z, Che S F and Lin Y. 2017. Earthquake disaster economic loss estimation and prediction based on Neural Networks with random weights. *Journal of Catastrophology*, 32(1): 1-4, 10 (谢家智, 车四方, 林涌. 2017. 基于随机权神经网络的地震灾害经济损失评估与预测. *灾害学*, 32(1): 1-4, 10) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.01.001]
- Xie L L and Yin Z Q. 1996. Research on earthquake damage assessment technology for future earthquakes in Chinese mainland//Proceedings of the Second Earthquake Symposium Across the Taiwan Straits (谢礼立, 尹之潜. 1996. 中国大陆未来地震的震害评估技术研究//第二届两岸地震学术讨论会论文集)
- Xu J H, An J W and Nie G Z. 2016. Development of earthquake emergency disaster information pre-evaluation data based on km grid. *Seismology and Geology*, 38(3): 760-772 (徐敬海, 安基文, 聂高众. 2016. 基于千米格网的地震应急灾情预评估数据开发. *地震地质*, 38(3): 760-772) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2016.03.020]
- Xue T F. 2017. Earthquake Damaged Buildings Extraction from SAR Images Using Change Detection Technology Based on Multiple Features. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (薛腾飞. 2017. 基于SAR多特征变化检测的震害建筑物提取研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所)
- Xue T F, Zhang J F and Li Q. 2016. Extraction of earthquake damage buildings from multi-source remote sensing data based on correlation change detection and object-oriented classification techniques. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 496-505 (薛腾飞, 张景发, 李强. 2016. 基于相关变化检测与面向对象分类技术的多源遥感图像震害信息提取. *地震学报*, 38(3): 496-505) [DOI: 10.11939/jass.2016.03.017]
- Yamazaki F, Suzuki D and Maruyama Y. 2008. Use of digital aerial images to detect damages due to earthquakes//The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: [s.n.]
- Yang F, Zheng B Z and Yan L L. 2009. System of earthquake casualty assessment based on BP neural network. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 4(4): 428-435 (杨帆, 郑宝柱, 剡亮亮. 2009. 基于BP神经网络的地震伤亡人数评估体系研究. *震灾防御技术*, 4(4): 428-435) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-5722.2009.04.008]
- Ye X, Qin Q M, Wang J, Zheng X P and Wang J H. 2019. Detecting damaged buildings caused by earthquake from remote sensing image using local spatial statistics method. *Geomatics and Information Science of Wuhan Unive*, 44(1): 125-131 (叶昕, 秦其明, 王俊, 郑小坡, 王建华. 2019. 利用高分辨率光学遥感图像检测震害损毁建筑物. *武汉大学学报(信息科学版)*, 44(1): 125-131) [DOI: 10.13203/j.whugis20150490]
- Yin Z Q. 1991. A study for predicting earthquake disaster loss. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 11(4): 87-96 (尹之潜. 1991. 地震灾害损失预测研究. *地震工程与工程振动*, 11(4): 87-96) [DOI: 10.13197/j.eeev.1991.04.010]
- Yin Z Q. 1995. Methods for Predicting Seismic Hazard and Loss. Beijing: Seismological Press (尹之潜. 1995. 地震灾害及损失预测方法. 北京: 地震出版社)
- Yu S, Wang H X and Ma Y J. 2005. Three-layer BP network model for estimation of casualties in an earthquake. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 25(6): 113-117 (于山, 王海霞, 马亚杰. 2005. 三层BP神经网络地震灾害人员伤亡预测模型. *地震工程与工程振动*, 25(6): 113-117) [DOI: 10.13197/j.eeev.2005.06.019]
- Yuan Y. 2018. Study of Earthquake-Induced Building Damage Information Extraction by Using Change Detection of SAR Images Coherence. Langfang: Institute of Disaster Prevention (袁玉. 2018. 基于SAR图像相干变化检测的建筑物震害信息提取研究. 廊坊: 防灾科技学院)
- Zeng X, Liu S X, Xu Z and Lu X Z. 2016. Earthquake loss prediction for campus buildings based on FEMA-P58 method: a case study. *Engineering Mechanics*, 33(S1): 113-118 (曾翔, 刘诗璇, 许镇, 陆新征. 2016. 基于FEMA-P58方法的校园建筑地震经济损失预

- 测案例分析. 工程力学, 33(S1): 113-118 [DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.03.S050]
- Zhai Y M. 2009. Research on Application of High Resolution Remote Sensing Image in Prediction and Rapid Evaluation of Urban Earthquake Damage. Shanghai: Tongji University (翟永梅. 2009. 城市震害预测和快速评估中高分辨率遥感技术的应用研究. 上海: 同济大学) [DOI: 10.7666/d.y1832291]
- Zhang H, Qin K, Bi Q, Zhang Y and Xu K. 2021. Attention guided 3D ConvNet for aerial scene change detection. Journal of Applied Sciences, 39(2): 272-280 (张涵, 秦昆, 毕奇, 张晔, 许凯. 2021. 注意力引导的三维卷积网络用于遥感场景变化检测. 应用科学学报, 39(2): 272-280) [DOI: 10.3969/j.issn.0255-8297.2021.02.009]
- Zhang J F, Li Q, Zhang Q Y, Tian T, Shen W H, Xue T F and Wang J F. 2018. Intensity zone of the 1976 Ms7.8 Tangshan earthquake based on multi-source remote sensing images. Journal of Remote Sensing, 22(S1): 162-173 (张景发, 李强, 张庆云, 田甜, 申文豪, 薛腾飞, 王建飞. 2018. 多源遥感图像的1976年Ms7.8唐山大地震等烈度区判定. 遥感学报, 22(S1): 162-173) [DOI: 10.11834/jrs.20187282]
- Zhang W, Wang X Q, Sun G Q, Ding X, Yuan X X and Guo J X. 2013. An improved change detection algorithm for building damage extraction based on high resolution RS images. Earthquake, 33(2): 87-95 (张伟, 王晓青, 孙国清, 丁香, 袁小祥, 郭建兴. 2013. 高分遥感影像震害提取的变化检测算法改进. 地震, 33(2): 87-95) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2013.02.011]
- Zhang Y, Wang X M and Zhao X Z. 2018. Study on community based rapid earthquake assessment system of Shanghai. Computer Programming Skills and Maintenance, (10): 15-17 (张勇, 王小明, 赵学志. 2018. 基于社区的上海地震快速评估系统研究. 电脑编程技巧与维护, (10): 15-17) [DOI: 10.16184/j.cnki.comprg.2018.10.005]
- Zhao H S, Shi J P, Qi X J, Wang X G and Jia J Y. 2017. Pyramid scene parsing network//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu: IEEE: 6230-6239 [DOI: 10.1109/CVPR.2017.660]
- Zhao Q, Zhai Y M and Li T Z. 2012. Study on application of high resolution remote sensing images in rapid prediction of earthquake disaster in urban area. Journal of Catastrophology, 27(2): 72-76 (赵琪, 翟永梅, 李铁铮. 2012. 高分辨率遥感图像在城市快速震害预测中的应用研究. 灾害学, 27(2): 72-76) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2012.02.015]
- Zhao S D, Zhang N, Zhang S W and Sun X D. 2016. Research on rapid evaluation method of earthquake direct economic loss based on LM-BP neural network. Journal of Seismological Research, 39(3): 500-506 (赵士达, 张楠, 张斯文, 孙晓东. 2016. 基于LM-BP神经网络的地震直接经济损失快速评估方法研究. 地震研究, 39(3): 500-506) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0666.2016.03.020]
- Zheng S S, Zhang R M, Chen F, Long L, Zhou Y and Zheng J. 2019. Research on theory and application of earthquake casualty estimates. World Earthquake Engineering, 35(1): 87-96 (郑山锁, 张睿明, 陈飞, 龙立, 周炎, 郑捷. 2019. 地震人员伤亡评估理论及应用研究. 世界地震工程, 35(1): 87-96)
- Zheng Y, He J C, Zheng S S, Ke L, Long L and Sun L F. 2020. Study on China earthquake disaster loss assessment system. Journal of Natural Disasters, 29(4): 34-42 (郑跃, 贺金川, 郑山锁, 可亮, 龙立, 孙龙飞. 2020. 中国地震灾害损失评估系统研究. 自然灾害学报, 29(4): 34-42) [DOI: 10.13577/j.jnd.2020.0404]
- Zhu Z Z, Lu J Y, Li M and Zhao Y. 2020. Building age estimation and seismic damage prediction based on remote sensing image and point density. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 41(4): 382-386, 404 (朱志忠, 陆吉赞, 李敏, 赵宇. 2020. 基于遥感影像和点密度的房屋年代分析及震害预测. 江苏大学学报(自然科学版), 41(4): 382-386, 404) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2020.04.002]
- Zou Q J, Mao G M, Sun Z K, Ma C Q and Ma G M. 1995. Vulnerability study on casualties due to earthquake. Journal of Natural Disasters, 4(3): 60-68 (邹其嘉, 毛国敏, 孙振凯, 马春勤, 马桂明. 1995. 地震人员伤亡易损性研究. 自然灾害学报, 4(3): 60-68)

A review and prospective research of earthquake damage assessment and remote sensing

AN Liqiang^{1,2}, ZHANG Jingfa³, RICARDO Monteiro⁴, ZHANG Lei²

1. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China;

2. Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China;

3. Key Laboratory of Emergency Satellite Engineering and Application, Ministry of Emergency Management, Beijing 100124, China;

4. University School for Advanced Studies IUSS Pavia, Pavia 27100, Italy

Abstract: Earthquake loss assessment is an important part of earthquake emergency preparedness, emergency response, and reconstruction. With the increased awareness of earthquake risk and the increasing demand for earthquake protection and disaster reduction, earthquake disaster loss assessment technology has undergone rapid development in recent years. Moreover, as remote sensing technology has entered the era of big data, remote sensing data are beginning to be widely used in earthquake loss assessment. This study reviews and summarizes the development of earthquake loss assessment and its use in remote sensing techniques. In particular, we initially reviewed the development

of earthquake loss assessments and compared and analyzed the differences between loss calculation methods and the main functions of earthquake loss assessment software platforms at home and abroad. Second, we summarize the calculation methods for estimating casualties, injuries, and economic loss according to whether structural damage is considered. Third, we summarize the development of emergency earthquake loss assessment methods and earthquake loss prediction methods based on remote sensing. Finally, we analyzed the application prospects of NTL remote sensing data as a spatialization tool for population and GDP data for earthquake disaster loss. The following conclusions can be drawn. (1) In recent years, the calculation granularity of the domestic earthquake disaster loss estimation system has gradually improved. The applied structural damage estimation method has changed from the traditional empirical earthquake damage matrix to the fragile curve, and the system application scenario has developed from the post-earthquake period to full-time application. (2) A seismic loss assessment based on macro-data and historical earthquake cases is easy to calculate, but its reusability needs to be improved. Comparatively, various sophisticated methods for building loss information involve logical reasoning, but they are restricted by varying degrees of data completeness. (3) Post-earthquake loss assessment and earthquake damage prediction technologies based on remote sensing have gradually improved. The current development trends include methods for acquiring multisource remote sensing data and intelligent remote sensing data analysis. However, current earthquake loss assessment work is limited by incomplete data, which hinders the promotion of new methods, the lack of a unified national business platform, and the lack of uncertainty.

The following suggestions are proposed: (1) further develop the role of remote sensing data in the entire process of earthquake disaster loss estimation; (2) build a professional, high-quality, and national unified earthquake disaster risk management platform; and (3) enrich and develop the reporting mechanism of earthquake disaster assessment results from the perspective of the identified audience.

Key words: earthquake damage estimation, earthquake risk assessment, loss assessment, earthquake damage assessment, remote sensing data
Supported by Research Grant from Institute of National Institute of Natural Hazards (No. ZDJ2017-29); Tianjin Key Scientific and Technological Research and Development (No. 20YFZCSN01010)