

赵正贤, 张方浩, 曹彦波, 等. 地震灾害损失精细化预评估成果集成及可视化应用研究[J]. 华南地震, 2023, 43(3): 122–129. [ZHAO Zhengxian, ZHANG Fanghao, CAO Yanbo, et al. Research on Integration and Visualization Application of Refined Pre-assessment Results of Earthquake Disaster Loss[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(3): 122–129]

地震灾害损失精细化预评估成果集成及 可视化应用研究

赵正贤, 张方浩, 曹彦波, 杜浩国, 和仕芳, 张原硕, 徐俊祖, 邓树荣
(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 为解决云南地震灾害损失精细化预评估工作中大量的评估成果零散化、难以直观展示应用的问题, 基于 .NET Core 开发框架构建了云南省本地化的精细化预评估平台, 该平台以云南省峨山县为试点, 实现了峨山县精细化预评估的重点成果集成和三维可视化应用。该平台不仅丰富了预评估成果, 还能够直观、清晰地展示预评估成果, 为今后其他地区开展预评估工作提供思路和技术参考。

关键词: 地震灾害; 精细化预评估; 成果集成; 可视化

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)03-0122-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.03.14

Research on Integration and Visualization Application of Refined Pre-assessment Results of Earthquake Disaster Loss

ZHAO Zhengxian, ZHANG Fanghao, CAO Yanbo, DU Haoguo, HE Shifang,
ZHANG Yuanshuo, XU Junzu, DENG Shurong
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China)

Abstract: In order to solve the problem that a large number of assessment results are scattered and difficult to display intuitively in the fine pre-assessment of earthquake disaster loss in Yunnan. Based on the .NET Core development framework, this paper constructs a localized refined pre-evaluation platform for Yunnan Province. Taking Eshan County of Yunnan Province as a pilot, the platform realizes the key results integration and three-dimensional visualization application of refined pre-evaluation in Eshan County. The platform not only enriches the pre-assessment results, but also can intuitively and clearly show the pre-assessment results, providing ideas and technical references for future pre-assessment work in other regions.

Keywords: Earthquake disaster; Refined pre-assessment; Results integration; Visualization

收稿日期: 2023-02-10

作者简介: 赵正贤(1994–), 男, 助理工程师, 主要从事地震灾害风险评估和应急技术应用研究。

E-mail: oliverup@163.com

0 引言

我国是一个地震多发的国家,地震活动具有震级大、频度高、范围广和灾害重等特征,其次庞大的人口基数和复杂脆弱的地理环境,使我国在多次地震中遭受了巨大的人员伤亡和经济损失,20世纪,我国因地震死亡人数约占全球地震死亡人数的1/2。为尽可能减少地震灾害损失,做好震前防御和应急准备措施^[1-2],提高震后应急处置和快速评估的准确性^[3],从2014年起,我国在全国地震重点危险区开展地震灾害损失预评估工作^[4]。地震灾害损失预评估是指在地震发生前,对地震危险区开展实地调查,根据已掌握的地质构造、地理环境、人口经济、建筑特征、潜在危险源等信息,利用快速评估模型和软件工具,计算出设定地震烈度下可能造成的人员伤亡、经济损失、房屋交通破坏等综合评估结果^[5]。

早在上世纪60年代,美国、日本等发达国家开始了地震灾害损失评估工作^[6]。在上世纪六七十年代,美国学者 Algermissen 开展不同烈度下房屋破坏率的灾害损失研究^[7]。1970—1973年美国完成了加利福尼亚州的地震灾害风险评估,得出加州未来三十年地震可能造成的损失情况^[8]。日本从1965年开始对地震灾害开展定量的调查研究,而后在80年代在大阪等地开展震害损失预测^[4]。我国从1988年山西大同一阳高地震开始,首次应用科学的方法开展了地震灾害损失评估,并在1990年制定了地震灾害损失评估的指南和细则^[9]。云南地区,地处欧亚地震带侧缘,是我国地震活动最频繁、地震灾害最严重的省份之一。为落实好云南地区的防震减灾工作,2022年云南省地震局在峨

山县开展了地震灾害损失精细化预评估试点工作。

近年来,地震灾害损失精细化预评估工作形成了大量的评估成果。对于决策部门而言,预评估成果的有效使用和挖掘,是做好地震风险防范、地震应急准备、最大程度减少地震灾害损失的前提。但预评估工作的成果都是以报告、专题图集、统计图表、各种类型的数据形式(如矢量、栅格、文本等)进行展示和存储,这些成果内容丰富、种类众多,但是这也造成了预评估成果难以便捷快速地进行查询、分析和应用。因此,如何应用好预评估成果,并将其进行集成和展示,成为预评估工作急需解决的问题。针对上述问题,本文以云南省峨山县为试点,基于.NET Core 开发框架,设计了云南地震灾害损失精细化预评估试点平台(以下简称“精细化预评估平台”)。该平台将预评估的各类成果进行了集成和可视化,实现了预评估区域的基础信息查询展示、地震灾害损失风险评估、重点隐患风险分析,以及单体建筑死亡风险评估的三维可视化,可为今后预评估成果的应用提供参考和技术支持。

1 评估数据与模型

1.1 评估数据

精细化预评估平台主要以云南地震应急数据库为基础,结合全国地震灾害风险普查工程—云南地震灾害风险普查数据成果,同时应用现场抽样核查等手段,建立用于精细化预评估的数据集,主要涉及矢量数据、栅格数据、属性数据等多类评估数据,具体的数据内容和说明如下(表1)。

表1 地震灾害损失精细化预评估数据

Table 1 Refined pre-assessment data of earthquake disaster loss

序号	名称	类型	数据内容
1	房屋图斑数据	矢量	面积、类型、抗震能力等,8094个
2	房屋详查数据	文本	房屋抽样调查信息
3	建筑矢量数据	矢量	面积、结构类型、层高等,3.6万个
4	基础地理数据	矢量	行政区划、驻地、居民点、DEM等
5	重点目标数据	矢量	地质灾害隐患点、危险源、矿山、医院、学校、水库等
6	社会经济数据	矢量/数值	人口、经济、房屋统计等
7	遥感影像数据	栅格	城区、农村地区全域遥感影像数据

1.2 评估模型

评估模型是精细化预评估平台成果产出和地震灾害损失评估的基础,为做好精细化预评估工作,使预评估成果更好应用于实际,在评估模型的建立和选择上遵循简洁、科学、实用的原则。平台涉及人员伤亡评估、直接经济损失评估、滑坡风险评估、综合风险评估、地震烈度评估等多个评估模型,本文重点对地震死亡人数、受伤人数、地震烈度3个评估模型展开说明。

1.2.1 地震死亡人数评估模型

云南自然环境复杂,人口聚集,各类建筑物的抗震性能不一,在多种因素共同作用下,使得地震发生后各地方的单体建筑死亡人数预测困难,为客观、科学地评价云南地区的单体建筑死亡人数,平台应用许瑞杰模型^[10]进行单体建筑死亡人数评估,算法如下:

$$D = \left(\sum_{i=1}^n P_i * X_i \right) * R \quad (1)$$

式(1)中, D 表示地震死亡人数; P_i 为第 i 个图斑的人口; X_i 表示第 i 个图斑的死亡率; R 为修正系数。

1.2.2 地震受伤人数评估模型

云南地区地震受伤人数除受区域影响外,还取决于地震震级、烈度大小等因素,平台使用和仕芳^[11]建立的云南本地化地震受伤人数评估模型进行计算,模型将地震受伤人员风险分为高、中、低3类风险区进行计算,计算公式如下:

高风险区:

$$N_h = 278e^{1.0113I} * 10^{-9} * N_p * T \quad (2)$$

中风险区:

$$N_h = 97e^{1.2119I} * 10^{-9} * N_p * T \quad (3)$$

低风险区:

$$N_h = 240e^{1.0374I} * 10^{-9} * N_p * T \quad (4)$$

上式中, N_h 表示受伤人数; N_p 表示受灾人口; I 表示极震区烈度; T 表示发震时间修正系数(表2)。

表2 发震时间修正系数

Table 2 Correction coefficient of earthquake time

时段	白天	夜间
	(08:00 ~ 20:00)	(20:00 ~ 08:00)
地震受伤人数高风险区	1.0	1.5
地震受伤人数中风险区	1.0	1.2
地震受伤人数低风险区	1.0	1.0

1.2.3 地震烈度评估模型

精细化预评估平台集成了张方浩^[12]的地震烈度衰减模型,该模型以云南地区1900—2014年5.0级以上地震烈度数据为基础,将云南划分为滇西、川滇、川滇东部3个构造分区,并以分区内的烈度等震线为样本,采用统计回归分析方法拟合出各分区的烈度衰减模型,计算公式如下:

滇西区域:

$$I_a = 6.8053 + 1.2972M - 4.7603 \lg(R_a + 22), \quad \sigma = 0.5621 \quad (5)$$

$$I_b = 5.3315 + 1.2013M - 4.1917 \lg(R_b + 10), \quad \sigma = 0.4786 \quad (6)$$

川滇区域:

$$I_a = 4.2456 + 1.4025M - 3.8238 \lg(R_a + 11), \quad \sigma = 0.5018 \quad (7)$$

$$I_b = 3.5915 + 1.1432M - 2.8546 \lg(R_b + 5), \quad \sigma = 0.4426 \quad (8)$$

川滇东部区域:

$$I_a = 6.9753 + 1.3067M - 4.7952 \lg(R_a + 23), \quad \sigma = 0.4891 \quad (9)$$

$$I_b = 5.5615 + 1.1762M - 4.0829 \lg(R_b + 12), \quad \sigma = 0.4632 \quad (10)$$

上式中 I_a 、 I_b 表示长、短轴地震烈度; M 表示震级; R_a 、 R_b 分别为烈度 I 的椭圆等震线的长半轴和短半轴长度, σ 为标准差。

对于强震而言,点源模型在地震影响场计算时具有较大的局限性,线源模型更适用于强震影响场的计算。因此针对7.0级以上地震,本文根据张方浩^[12]的研究集成了李忠华^[13]与秦嘉政^[14]的地震震级—破裂长度模型,模型如下:

$$\lg L = 0.39M - 1.24 \quad 7.0 \leq M \leq 7.7 \quad (10)$$

$$\lg L = M - 5.90 \quad M \geq 7.89 \quad (11)$$

上式中 L 表示地震破裂长度; M 表示震级。

1.2.4 地震滑坡风险评估模型

在云南地区,地震滑坡不仅是最常见的、破坏最严重的次生灾害之一,同时也是造成重大生命财产损失的主要原因,因此地震滑坡风险评估成为了精细化预评估工作中的一项重要内容。对于云南地震滑坡危险性的研究,白仙富^[15]等人根据云南地震滑坡的特点,首先选取坡度和烈度因子建立滑坡密度模型,其次根据滑坡密度值进行分级,给出对应的滑坡危险性等级。依据地震滑坡

密度的高低,将地震滑坡的危险性分为几无、轻微、中等、严重、特重5个等级,并且比较了不同坡度下的指数和逻辑斯蒂两种地震滑坡密度模型的实用性,模型比较如下:

表3 不同坡度下的地震滑坡密度模型
Table 2 Density model of earthquake induced landslides under different slope range

坡度范围	指数模型		逻辑斯蒂模型	
	γ	R^2	Y	OR
$\leq 1^\circ$	$2E-10e^{1.5508x}$	0.166 4	$1/(1+\exp(8.221\ 78-0.343\ 29x))$	1.409 577
$1^\circ \sim 3^\circ$	$2E-07e^{1.2596x}$	0.943 9	$1/(1+\exp(9.279\ 05-0.633\ 448x))$	1.884 096
$3^\circ \sim 7^\circ$	$3E-07e^{1.2683x}$	0.968 4	$1/(1+\exp(11.398\ 3-0.916\ 239x))$	2.499 872
$7^\circ \sim 10^\circ$	$1E-06e^{1.1574x}$	0.955 5	$1/(1+\exp(10.602\ 5-0.849\ 128x))$	2.337 608
$10^\circ \sim 15^\circ$	$2E-06e^{1.1368x}$	0.952 5	$1/(1+\exp(10.351\ 7-0.852\ 482x))$	2.345 462
$15^\circ \sim 20^\circ$	$3E-06e^{1.0869x}$	0.952 4	$1/(1+\exp(10.007\ 8-0.847\ 624x))$	2.334 094
$20^\circ \sim 25^\circ$	$6E-06e^{1.0558x}$	0.940 6	$1/(1+\exp(9.197\ 21-0.789\ 875x))$	2.203 122
$25^\circ \sim 30^\circ$	$1E-05e^{1.013x}$	0.952	$1/(1+\exp(9.681\ 42-0.852\ 073x))$	2.344 501
$30^\circ \sim 35^\circ$	$2E-05e^{0.9709x}$	0.951 8	$1/(1+\exp(9.651\ 06-0.884\ 7x))$	2.422 259
$35^\circ \sim 40^\circ$	$4E-05e^{0.9081x}$	0.961 7	$1/(1+\exp(10.115\ 4-0.968\ 573x))$	2.634 182
$40^\circ \sim 45^\circ$	$6E-05e^{0.8946x}$	0.949 7	$1/(1+\exp(10.177\ 3-1.012\ 792x))$	2.753 278
$45^\circ \sim 50^\circ$	$9E-05e^{0.8621x}$	0.938 8	$1/(1+\exp(9.896\ 83-1.007\ 739x))$	2.739 4
$> 50^\circ$	$3E-05e^{0.9743x}$	0.907 1	$1/(1+\exp(9.800\ 03-0.989\ 653x))$	2.690 301

注:式中 γ 表示滑坡频度; x 表示地震烈度。

1.3 技术路线

在预评估工作中,每年都会产出较多的评估成果,为提炼出预评估的重点成果,挖掘成果潜在价值,让预评估成果更加直观清晰、便于应用,本文构建了精细化预评估平台,将预评估的多种成果进行集成和可视化。整个工作流程分为三个阶段(图1):在预评估阶段,利用云南地震应急数据库、灾害风险普查数据和实地调研等基础数据对地震重点危险区开展预评估工作,得到预评估初步成果;在成果集成可视化阶段,首先构建精细化预评估系统环境,提炼出预评估的重点成果,其次根据需要集成的预评估成果设计系统的功能模块,将预评估的各类成果进行集成,最后将预评估成果在系统上进行展示应用;目前,云南省地震局已经建成了地震灾害超快评估系统^[3],但为了更好地服务震后快速应急响应和灾情快速评估,在震后快速应急响应阶段,精细化预评估系统可为震后的应急响应提供震区基础信息、灾害评估、响应决策等方面的支持,同时可以对地震灾害超快评估系统产出结果进行修正、调整。

2 平台设计与实现

2.1 平台选择和系统环境

本系统使用 .NET Core 作为开发平台。 .NET Core 是 .NET Framework 的新一代版本,是一个开源通用、支持跨平台的开发框架,支持在 Window, MacOS, Linux 系统上进行开发和部署。 .NET Core 可以导入相同的程序集和库,并在多个平台上使用,这些程序集和库可用使用 C#、VB.NET 或 F# 程序设计语言。其次, .NET Core 是现代、可共享的,在全球 web 框架测试中, .NET Core 运行速度比其他同类框架要快得多,其类库的广泛覆盖,允许开发者在多平台上共享,包括 Web, 桌面, 移动, 云, 游戏, 物联网等。最后, .NET Core 是轻量级且免费开源的,以前 .NET 的不开源性使公司或用户在考虑成本时,往往选择其他平台,而 .NET Core 平台的免费和开源,使 .NET Core 变得更流行、功能特性上更符合大众实际需求。综上所述, .NET Core 的共享、免费、开源、速度和稳定性,使其成为了一个良好的软件开发平台。

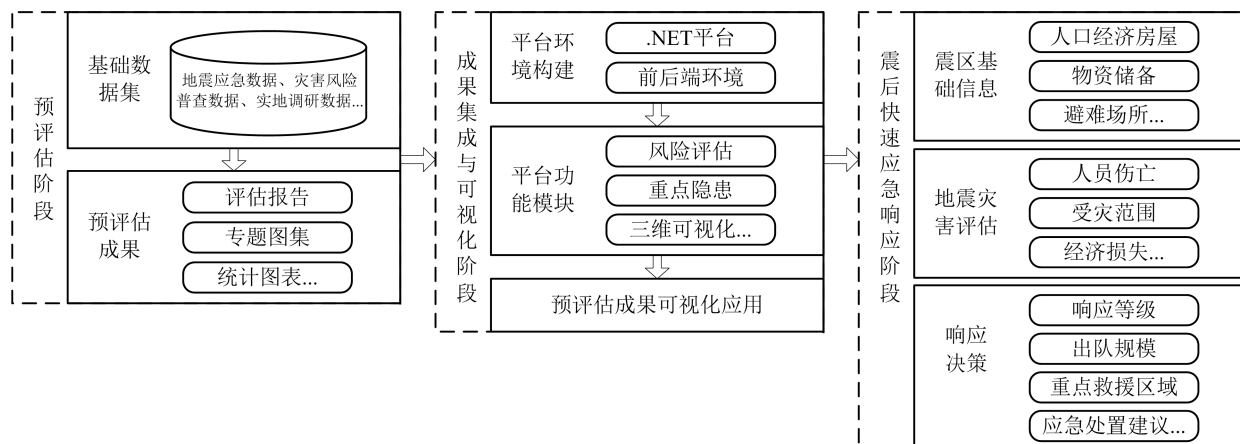


图1 技术路线图

Fig.1 Technology roadmap

本系统的开发环境包括前端和后端两部分。前端基于HBuilder开发工具,以Bootstrap为前端开发框架进行系统的前端开发。后端基于Microsoft Visual Studio 2019开发工具,以.NET5为后端开发框架,以MySQL 8.0为系统数据库,开展后端的开发与部署。

2.2 平台体系结构

基于.NET Core框架开发的精细化预评估平台,实现了预评估区域的信息查询展示、风险评估、隐患风险分析等功能,平台体系结构分为4层,分别是环境层、数据层、应用层、展示层,如图2。环境层是精细化预评估平台建立和运行的基础,

为平台提供运行环境和硬件支撑,包括前、后端环境和操作系统。数据层包含了精细化预评估平台进行地震灾害损失评估和可视化所需要的基础数据,以及存储用户服务信息数据,其包括4类数据库,分别是地震应急基础数据库、地震灾害风险普查工程数据库、空间数据库、用户信息权限数据库。应用层是精细化预评估平台主要的功能模块,包含预评估区基本情况、地震灾害损失风险评估、预评估区重点风险隐患、单体建筑死亡风险三维可视化4个模块。展示层是利用图表或地图可视化的形式对平台计算出来的各类评估数据、基本情况数据、应急准备建议等信息进行直观展示。

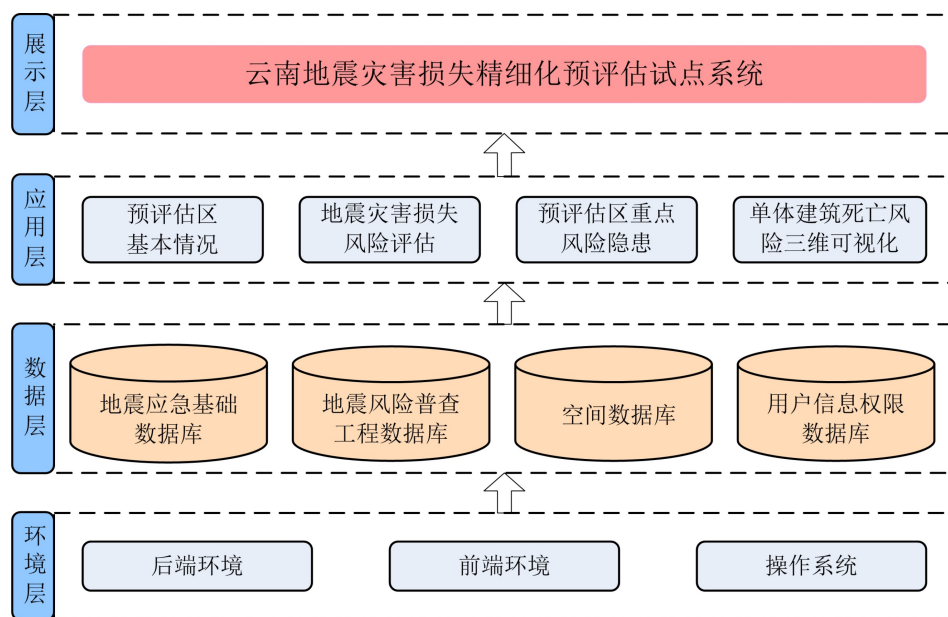


图2 云南地震灾害损失精细化预评估平台体系结构

Fig.2 The architecture of Yunnan earthquake disaster loss refined pre-assessment platform

2.3 平台功能模块

精细化预评估平台的功能模块如图3所示,包含了基本情况模块、风险评估模块、重点隐患分析模块、三维可视化模块。基本情况模块主要展示了评估区各类基础数据,如人口、经济、学校

等;风险评估模块对评估区在不同地震烈度(VI-IX)下的人员伤亡风险、经济损失风险、地质隐患风险、交通通行能力、设定地震损失进行评估;重点隐患分析是对评估区重点危险源进行评估,给出防治建议;三维可视化是对单体建筑死亡人数进行三维建模展示。

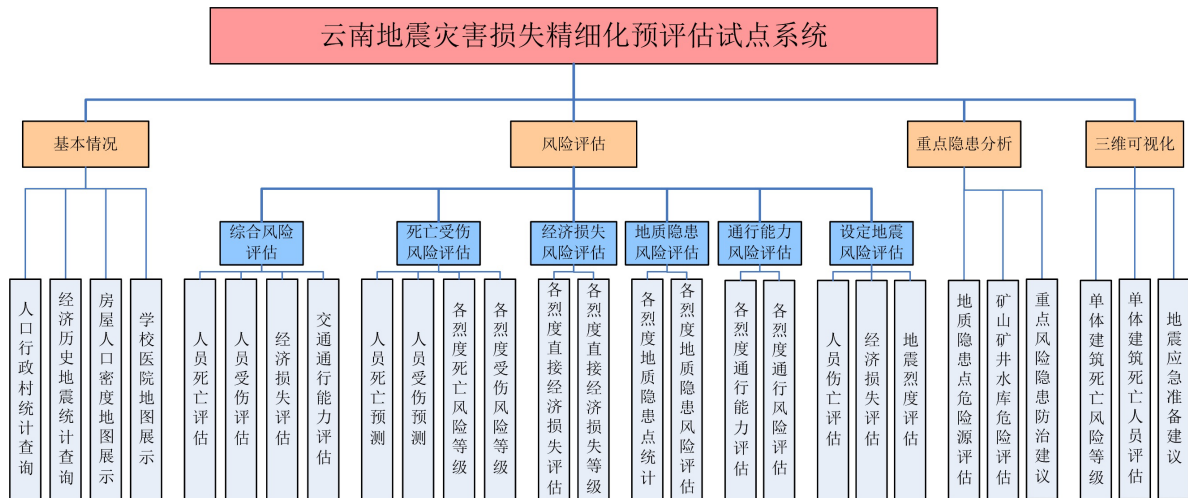


图3 云南地震灾害损失精细化预评估平台功能模块

Fig.3 The function module of Yunnan earthquake disaster loss refined pre-assessment platform

2.4 数据库实现

平台的数据采用MySQL数据库进行存储,将平台的用户信息、权限数据、基础信息数据存储在MySQL数据库中,基础信息数据包含表1中的数据资源,如经济、交通、房屋、学校、医院、水库、历史地震数据等。由于MySQL是轻量型的关系数据库,需要将矢量数据进行转换存储,然后在前端地图上查询和展示。

3 应用分析

峨山县地处云南省中部,位于玉溪南部,县域面积1972 km²,下辖3乡3镇2街道,常住人口14.39万人,境内地形地质条件十分复杂,断裂构造纵横交错,历史上共发生4次5.0级以上地震,多年来一直被列为地震重点监视防御区。为防范化解地震灾害风险,强化重特大地震应急准备工作,按照中国地震局部署要求,根据云南省2022年度重点危险区,云南省地震局、中国地震局工程力学研究所对云南峨山县开展了地震灾害损失精细化预评估工作。本文构建的精细化预评估平台实现了峨

山县预评估成果的集成与可视化,平台的具体应用如下。此外,平台的设计开发服务于云南地区开展地震灾害损失精细化预评估,同时也为其他地区开展同类型工作提供思路和技术参考。基于.NET Core开发的精细化预评估平台含用户信息登陆和四个核心模块,在核心模块下包含多个子模块。

3.1 平台用户登陆和基本情况模块

为便于用户信息的管理,平台设计了用户登陆入口(图4 a);基本情况模块(图4 b)展示了云南省峨山县的基础县域信息,如:各乡镇人口信息、行政村统计、经济统计、历史地震展示,乡镇建筑结构占比、面积占比、地理分布情况,乡镇人口密度、学校医院地理分布和信息查询。

3.2 地震灾害损失风险评估

为了对地震危险区开展地震灾害损失风险评估,平台设计了风险评估模块。该模块集成了综合风险评估、死亡受伤风险评估、经济损失风险评估、地质隐患风险评估、通行能力风险评估、设定地震风险评估,具体功能描述见表4。

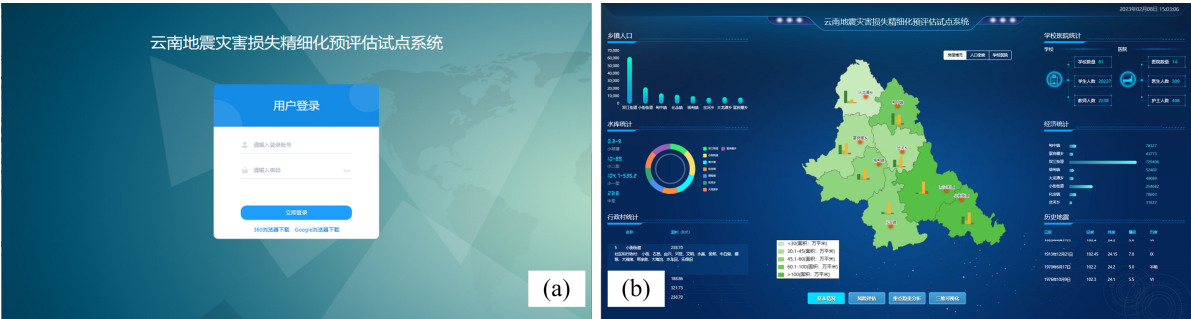


图4 用户登陆与基本情况模块

Fig.4 User login and basic situation module

表 4 风险评估模块功能描述

Table 4 The function description of risk assessment module

功能模块	功能描述
综合风险评估	对峨山县各乡镇不同烈度下的人员受伤、人员死亡、经济损失、交通通行能力进行整体评估;绘制峨山县各乡镇VI-IX度地震灾害综合风险图。
死亡受伤风险评估	根据死亡人数评估模型计算峨山县各乡镇不同烈度下人员死亡数,各乡镇地震死亡风险等级分级、绘制峨山县各乡镇VI-IX度人员死亡风险等级图;根据受伤人数评估模型计算峨山县各乡镇不同烈度下受伤人员数,各乡镇地震受伤风险等级分级、绘制峨山县各乡镇VI-IX度人员受伤风险等级图;人员死亡、受伤评估信息提要。
经济损失风险评估	峨山县各乡镇不同烈度下直接经济损失、各乡镇直接经济损失风险等级分级、绘制各乡镇VI-IX度直接经济损失风险等级图。
地质隐患风险评估	峨山县各乡镇地质隐患的类型、数量、灾害等级、受威胁人数;不同烈度下各乡镇受地质灾害影响情况说明;根据地震滑坡风险评估模型绘制峨山县VI-IX度地震滑坡风险图。
通行能力风险评估	峨山县境内国道、省道、县道名称、长度;地震灾害影响下VI-IX度各级道路通行风险等级;绘制VI-IX度各级道路通行能力风险等级图。
设定地震风险评估	峨山县设定地震震级上下限,设定地震下的灾区总面积、受灾人口、死亡人数、受伤人数、经济损失;绘制设定地震烈度预评估图(烈度圈范围、面积、涉及县市、乡镇、人口等)。

此外,模块进行了分烈度灾害损失风险评估,本模块以乡镇为基本统计单元,针对各地震烈度(VI-IX)下的人员伤亡、经济、地质隐患、通行能力进行损失风险评估(图5)。根据峨山县建筑、人口、经济等应急基础数据、地质危险性分析结果和地震灾害损失评估模型,计算得出峨山县未来可能遭遇的地震震级上下限。在设定震级下,展示了地震烈度范围、受灾人口、伤亡人数和经济损失情况等(图5 d)。

3.3 地震重点隐患分析和单体建筑死亡风险评估

针对峨山县存在的重点隐患风险,平台集成了地质隐患、危险源、水库、矿山矿井的风险内容,并对存在的隐患风险给出相关的防治建议(图6 a)。为更加直观明了地展示不同地震烈度下

单体建筑中人员的死亡风险,利用三维表达技术与数字地形图叠加,建立了峨山县在遭遇VI-IX度4种地震烈度下单体建筑死亡风险模型(图6 b)。

4 结论与讨论

地震灾害损失精细化预评估工作的开展,旨在防范化解地震灾害风险,强化重特大地震应急准备工作,但由于地震灾害损失精细化预评估的成果种类丰富,难以快速和有效对预评估成果进行应用,本文以云南省峨山县为试点,基于.NET Core平台构建精细化预评估平台,平台集成了峨山县基本情况、风险评估、重点隐患分析、单体建筑死亡人员三维可视化等多类预评估成果,平台的构建不仅丰富了预评估成果,还使预评估成果能够以更加直观、清晰的方式展示和应用。

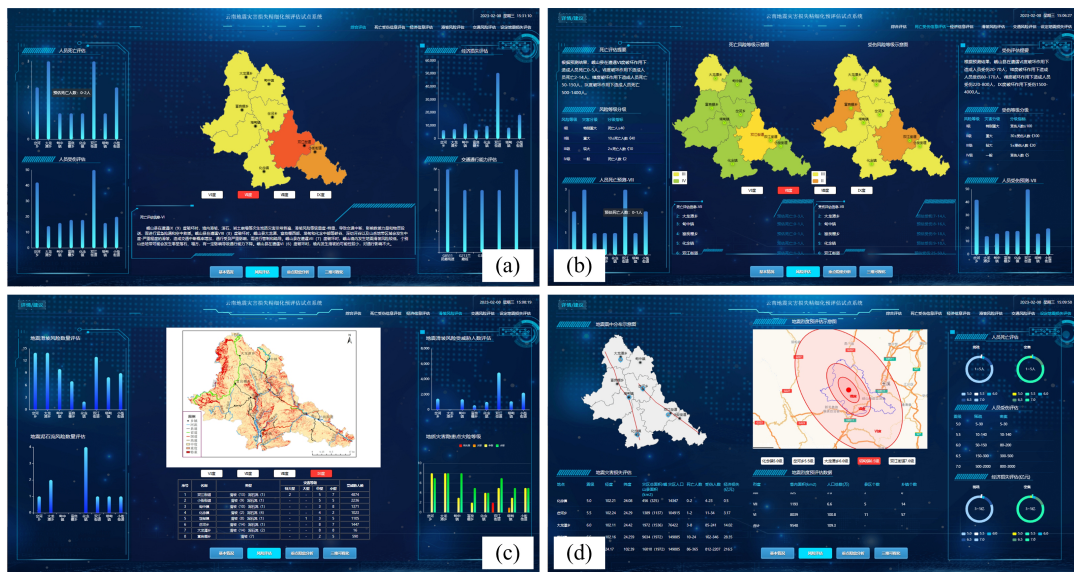


图5 地震灾害损失风险评估

Fig.5 Risk assessment of earthquake disaster loss



图6 地震重点隐患分析和单体建筑死亡风险评估

Fig.6 Analysis of main hidden dangers of earthquake and mortality risk assessment of single building

但精细化预评估是今后的一个长期系统工程,各个地区的地震活动、自然环境、人口分布、建筑特点等方面都存在差异性,使预评估系统的评估模型、突出内容、适用性等方面存在局限性。未来新形势、新需求下的系统推广应用,可结合各地区的特点,应用互联网、物联网和人工智能等技术进行完善和改进。

参考文献

- [1] 黎益仕,林碧苍,陈华静,等.基于灾害风险管理的震害防御业务体系架构建立[J].震灾防御技术,2021,16(1):186-192.
- [2] 邓树荣,郑川,余庆坤,等.云南地震应急救援物资储备特点与流调分析[J].华南地震,2021,41(4):47-55.
- [3] 曹彦波,李永强,李兆隆,等.云南漾濞6.4级地震灾情快速评估[J].地震工程学报,2021,43(4):751-759.
- [4] 李华玥.晋冀蒙交界区地震灾害损失预评估[D].北京:中国地震局地质研究所,2017.
- [5] 宋平,聂高众,邓砚,等.基于现场调查的地震灾害损失预评估——以云南省德宏傣族景颇族自治州为例[J].地震地质,2016,38(4):1148-1159.

- [6] 杜秋男,杜天然.地震快速预评估方法研究现状[J].科学技术创新,2018,(28):3-4.
- [7] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,2006.
- [8] Brabb E E, Panpeyan E H, Bonilla M G. Landslide susceptibility in San Mateo County, California[R]. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 1972.
- [9] 苗崇刚.地震灾害损失评估[J].自然灾害学报,2000,9(1):105-108.
- [10] 许瑞杰,贾召亮,郑川,等.滇西地区基于单体建筑的震后人员死亡评估方法研究[J].地震研究,2023,46(3):394-402.
- [11] 和仕芳,于江,余庆坤,等.云南地震灾害受伤人数快速评估方法[J].华北地震科学,2020,38(3):60-68.
- [12] 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.
- [13] 李忠华,苏有锦,蔡明军,等.云南地区震源破裂长度与震级的经验关系[J].西北地震学报,1999,21(3):108-110.
- [14] 秦嘉政,刘祖荫,张俊伟.用地震标定律研究丽江7.0级地震的破裂过程[J].地震研究,1997,20(1):49-59.
- [15] 白仙富,戴雨芃,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.