

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.02.14

浙江省地质灾害防治管理平台设计与实现

张磊¹, 陈张建², 黄丽³

(1. 浙江省应急管理数字与技术中心, 浙江 杭州 310007; 2. 浙江省测绘科学技术研究院, 浙江 杭州 310012; 3. 浙江省地质环境监测中心, 浙江 杭州 310007)

摘要: 浙江省是我国东南沿海经济较发达的省份,同时也是受地质灾害威胁较为严重的省份。为了深入贯彻习近平总书记“以人民为中心”的发展理念,浙江省自然资源厅越来越重视地质灾害防治工作。在信息时代,利用信息化手段创新地质灾害防治工作方式,提升地质灾害管理工作效率势在必行。本文在借鉴国家和兄弟省份地质灾害防治信息化建设经验的基础上,以本省实际工作需求为依据,按照“统分结合、统一管理,集中服务”的模式,设计了包括基础设施、数据资源、应用支撑和业务应用四层的总体框架,开发建设了由地质灾害管理信息系统、地质灾害应急会商辅助决策支持系统、地质灾害应急调查 APP 系统、地质灾害管理 APP 系统和地质灾害应急快速制图系统等五大系统组成的浙江省地质灾害防治管理平台。通过该平台的开发建设,提升了我省自然资源部门地质灾害防治的履职效能,推动了浙江地质灾害治理体系和治理能力的现代化,对其他兄弟省份地质灾害防治信息化建设也有一定的借鉴意义。

关键词: 地质灾害; 地质灾害防治; 管理平台; 地理信息系统; 信息化

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)02-0102-09

Design and implementation of Zhejiang Province geological disaster prevention management platform

ZHANG Lei¹, CHEN Zhangjian², HUANG Li³

(1. Zhejiang Digital and Technology Center of Emergency Management, Hangzhou, Zhejiang 310007, China;
2. Zhejiang Academy of Surveying & Mapping, Hangzhou, Zhejiang 310012, China;
3. Zhejiang Monitoring Center of Geology Environment, Hangzhou, Zhejiang 310007, China)

Abstract: Located in the coastal areas of southeast China, Zhejiang is a province with relatively developed economy and it is also a province seriously threatened by geological hazards. In order to fully implement the “people-centered” development concept of General Secretary Xi Jinping, Zhejiang Provincial department of natural resources are paying more and more attention to the prevention and control of geological disasters. In the age of information, it is imperative to innovate the methods of geological disaster prevention and control by means of information, and to improve the efficiency of geological disaster management. In reference to the experience of national and brother provinces in information construction of their geological hazard prevention and control, on the basis of the actual work needs and according to the mode of “combination of centralization and decentralization, uniform management and centralized service”, this paper designed the general frame including infrastructure layer, data resource layer, application support layer and business application layer. And we developed geological disaster management information system, the consultation and assistant decision-making supporting system of emergency response for geological disaster, geological disaster emergency

收稿日期: 2019-06-29; 修订日期: 2019-09-04

基金项目: 浙江省地质灾害应急值守工程([省资]2016006); 国家重点研发计划课题项目(2016YFC0803106)

第一作者: 张磊(1979-),男,辽宁凌源人,博士,高级工程师,主要从地质灾害防治与地质环境保护信息化工作。E-mail:4195742@qq.com

investigation APP, geological disaster management APP and geological disaster emergency rapid cartography system, which form Zhejiang province geological disaster prevention management platform. Through the development and construction of this platform, the performance efficiency of geological disaster prevention and control in Natural Resources Department of our province has been improved, and the modernization of Zhejiang's geological disaster management system and management capacity has been promoted. It also has certain reference significance to the information construction of geological disaster prevention and control platform in other provinces.

Keywords: geological hazards; prevention and control of geological disaster; management platform; geographic information system; informatization

0 引言

浙江省地处我国东南沿海,以山地丘陵为主,地质环境条件复杂,全省陆域面积 $1.018 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中突发性地质灾害易发区面积约 $6.67 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全省陆域面积的 65.5%^[1]。近年来,随着“新农村建设”和“农村全域土地综合整治”不断深入,全省农村道路和居住环境大为改善。与此同时,由于许多不规范的建设活动,对地质环境的破坏愈加严重^[2-3],加之近年来气候异常,降水时空分布不均,地质灾害已成为浙江省造成人员伤亡最为严重的自然灾害之一。2001—2018年,全省共发生地质灾害 5 374 起,造成 281 人死亡、15 人失踪、98 人受伤,直接经济损失 8.33×10^8 元。

按照习近平总书记提出的“以人民为中心”的发展理念,2017 年初,浙江省部署开展地质灾害隐患综合治理“除险安居”三年行动,全省各地、各有关部门积极参与,截止到 2018 年底,全省累计投入资金 3.8×10^9 元,完成综合治理项目 3 889 个,减少威胁人数 1.337×10^5 人,核销隐患点 4 532 处。地质灾害隐患点从 5 966 处减少到 1434 处,威胁人员从 1.977×10^5 人减少到 6.4×10^4 人。

随着人类社会进入信息时代,利用信息化手段创新地质灾害防治工作方式,提升地质灾害管理工作水平和效率势在必行。国家和各个兄弟省份在地质灾害防治信息化建设方面都做了大量的探索和实践^[4-8],这些工作为浙江省地质灾害防治管理平台建设提供了良好的参考和借鉴。

本文以浙江省地质灾害防治管理实际需求为依据,以地质灾害核心数据库为基础,以大数据、云计算、物联网、移动互联网和地理信息系统为技术支撑,以浙江省电子政务外网及互联网为运行网络环境,构建了浙江省地质灾害防治管理平台。实现了地质灾害调查评价、监测预警、应急处置技术支撑和综合治理等

地质灾害防治四大体系的信息化建设全覆盖。通过在线与离线相结合、桌面端与移动端相补充、日常管理和成果展示相分离等方式,满足了在各种工作环境下,各类用户的使用需求。通过该平台的开发建设,提升了浙江省自然资源部门地质灾害防治的履职效能,推动了浙江省地质灾害治理体系和治理能力的现代化。

1 总体设计

1.1 总体设计模式

浙江省地质灾害防治管理平台按照“统分结合、统一管理,集中服务”的模式进行总体设计。

统分结合是指划分省、市、县各级部门信息化建设重点,省级负责平台硬件基础设施、数据中心与核心软件功能的开发和建设,市级负责本地区地质灾害气象风险预警预报系统建设,县(市、区)级负责辖区内地质灾害专业监测和视频监控硬件设备安装及系统建设。统一管理是指在全省地质灾害数据汇集至省级数据中心的基础上,依托覆盖全省的用户认证管理系统,对全省地质灾害用户、数据和软件功能进行统一管理(图 1)。集中服务是指面向地质灾害调查评价、监测预警、应急辅助决策支持和综合治理四大核心业务,为领导、专家、专业技术人员、从业企业用户和社会公众集中提供信息的录入、查询、分析、下载和展示等各类服务功能。

1.2 总体架构

浙江省地质灾害防治管理平台总体框架自底向上分为四层,平台总体框架见图 2。

基础设施层为平台运行提供相关的软硬件设备设施,是支撑平台正常运行的保障,主要包括云服务器、网络设备、卫星系统、通讯网路、无人机、视频监控设备、监测仪器和平板设备等。

数据资源层是平台基础,通过用户数据采集、离线数据导入和实时数据接入等数据接入方式,采用数据

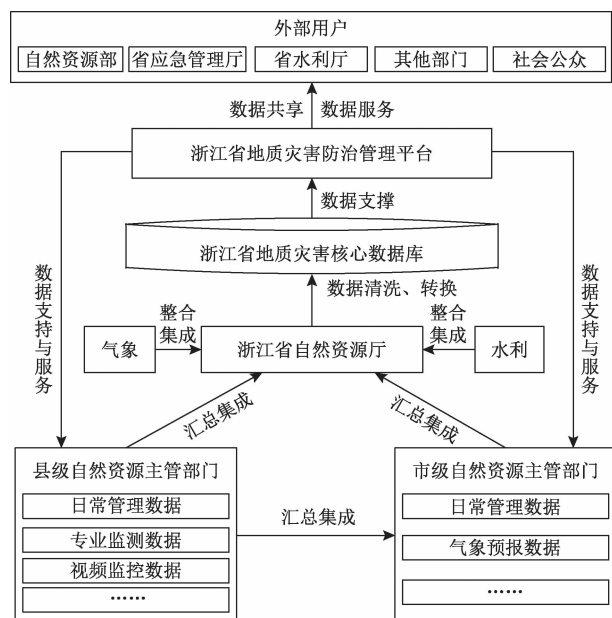


图1 浙江省地质灾害防治管理平台数据流图

Fig.1 Data flow diagram of Zhejiang geological disaster prevention and management platform

标准筛查、数据格式转换和数据质量管控等数据治理手段,接入基础地质调查数据、地质灾害业务数据、实时监测数据、水利气象等数据资源,形成包括基础数据库、业务数据库、监测数据库和三维模型库等的地质灾害数据仓库,为平台运行提供数据支持。

应用支撑层主要包括用户认证与权限管理、平台运行安全服务、系统运行维护监控、大数据查询分析、空间数据融合发布、地灾模型库(含承\致灾体计算模型、气象预报模型、灾害位移分析模型、险情处置模型等)以及知识图谱、神经网络等大数据智慧赋能服务,为平台运行提供核心支撑。

业务应用层在应用支撑层的基础上,根据业务需求,利用封装好的各类组件,组合成各类应用模块,通过UI界面,为用户提供应用服务。

1.3 功能体系

浙江省地质灾害防治管理平台按是否提供在线服务,分为在线系统和离线系统两大部分,按应用平台分为PC端系统和移动端系统两大种类,平台功能体系见图3。

地质灾害管理信息系统是在线版的PC端Web系统,是整个地质灾害防治管理平台的核心,包括用户及系统运维管理、地质灾害隐患点管理、避让搬迁项目管理、工程治理项目管理、月报与数据统计管理、地质灾害气象预警预报管理、地质灾害危险性评估项目监管、

汛期值班管理、实时监控管理、地质灾害巡查管理、应急处置管理、灾情速报管理、防治工作统计管理、日常工作管理和知识法规管理等功能。该系统实现浙江省全域范围内地质灾害数据资源的整合集成、动态更新、实时统计和及时发布,是全省各级地质灾害管理人员、专业技术人员和从业企业日常工作平台,是社会公众了解地质灾害防治工作的窗口。

地质灾害应急会商辅助决策支持系统(地质灾害防治一张图展示系统)是PC端Web系统,该系统包括在线版和离线版两个版本,在线版系统以地质灾害管理系统汇聚整合的数据资源为基础,包含专题图数据展示、地质灾害调查数据展示、实时监测监控数据展示和决策分析工具四大模块,提供地质灾害日常管理成果展示和应急处置决策分析所需各类数据的便捷查询、一站式展示、叠加分析和简洁标绘功能。在日常工作中,实现基于“一张图”,向领导和专家汇报展示全省地质灾害防治管理、工作进展、实时监测及历史应急处置事件等情况;在应急状态下,向应急领导和专家提供灾险情相关的地质灾害调查、实时监测监控、最新无人机航拍影像和应急会商专家应急处置意见建议等信息,并提供简便快捷的灾险情标绘分析工具,制作灾险情报告图和应急处置决策建议图,建立应急事件时间序列灾险情分析处置过程档案,在提高应急处置工作效率的同时,也便于灾后分析总结,不断完善应急工作流程,提升应急处置工作水平。离线版系统基于高性能便携图形工作站,本地配置数据库服务系统和Web系统,为应急处置前方指挥部领导和专家,在无网络链接的情况下,开展应急会商工作提供支撑。

地质灾害应急调查APP系统,内置了全省范围内大量测绘资料,因此该系统设计为离线版安卓平板电脑APP,主要包括地图数据及图层配置、应急调查任务管理、地质灾害应急调查数据采集和量测等辅助工具等模块,基于内置的高精度DOM数据,辅助应急调查人员,开展调查点精准定位、调查表快速填写、灾害情况精确绘制、照片录音视频信息便捷采集等工作。地质灾害应急调查APP系统,可以与地质灾害核心数据库进行无缝对接,调查成果数据以调查任务为单位,导出数据包后,上传至服务器,即可在地质灾害应急会商辅助决策支持系统中进行查看和浏览。通过该系统的开发建设,能够提升应急调查数据获取和分发的便捷性,从而提高应急调查在地质灾害应急处置工作中的作用。

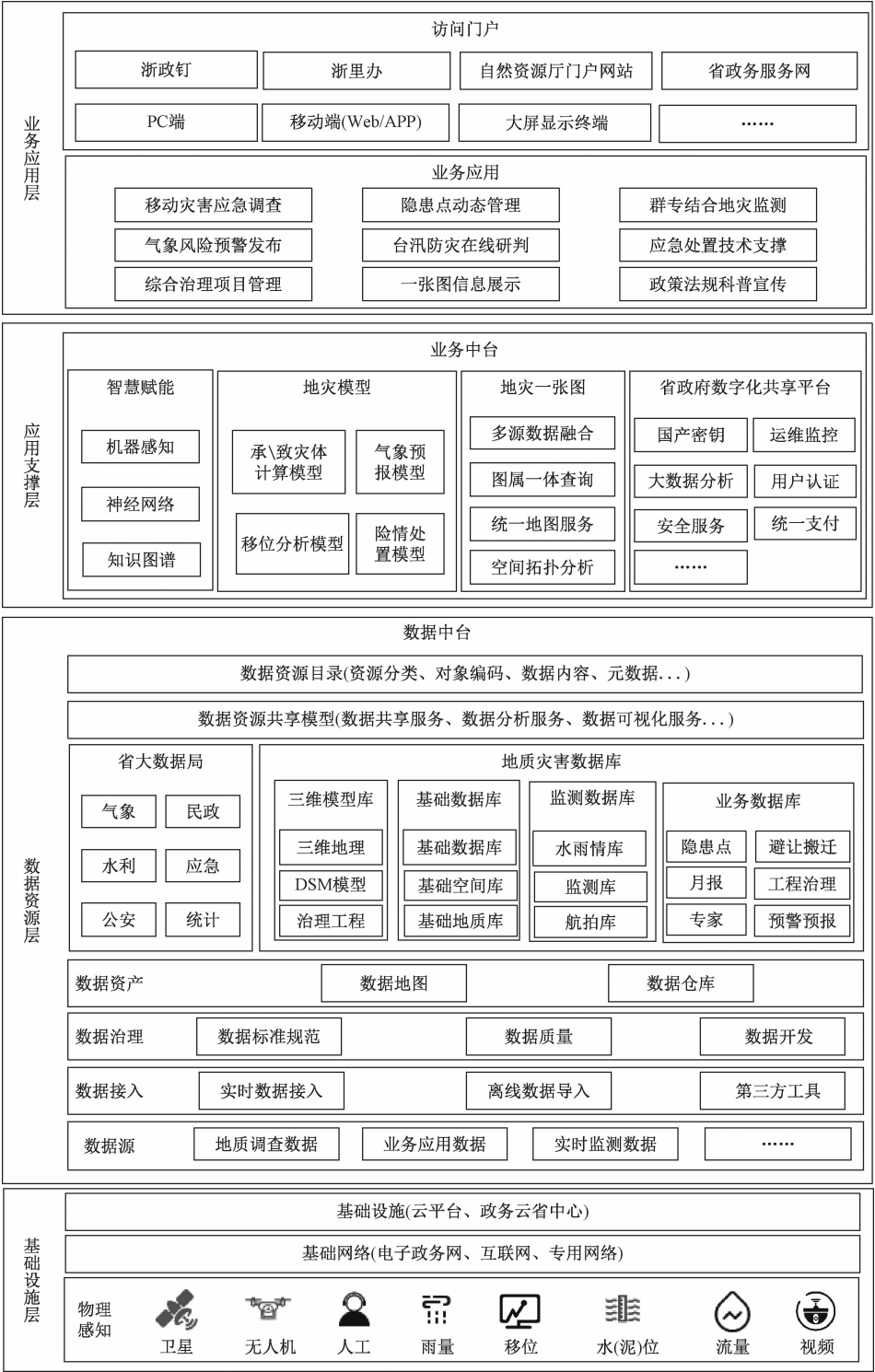


图 2 浙江省地质灾害防治管理平台总体架构

Fig. 2 General frame of Zhejiang geological disaster prevention and management platform

地质灾害管理 APP 系统是在线版的移动端系统，支持 iOS 和 Android 操作系统。该系统主要包括信息总览、地灾预报、隐患点、避让搬迁、成功避让、专业监测、应急预案、应急信息、地灾巡查、防治统计、灾险情

速报、视频通话、防灾百科、政策法规、规程规范和科普知识等 16 个功能模块。地质灾害管理 APP 主要是发挥移动互联网方便快捷的优势，丰富地质灾害管理信息化手段，提高地质灾害管理工作效率。



图3 浙江省地质灾害防治管理平台功能体系

Fig.3 Function architecture of Zhejiang geological disaster prevention and management platform

地质灾害应急快速制图系统是离线版 PC 端系统,内置了全省范围最新的 DLG 和 DOM 底图数据,主要包括数据处理和快速制图两个模块。首先将应急调查 APP 导出的应急调查数据包导入到地质灾害应急快速制图系统,利用数据处理功能将其转换为 GIS 软件可处理的数据类型,然后打开快速出图模块中预设

的模板,对灾害后缘裂缝、灾害体范围、危险区范围等数据进行关联,最后对图名、标注和图例等进行简单的编辑修改,即可导出制图成果。通过打印或投影的方式使用,十分方便快捷。地质灾害应急快速制图系统能够在地质灾害应急处置初期,为前后方应急处置工作提供有利的图件支撑。

2 平台开发与实现

2.1 开发环境

本平台使用 IntelliJ IDEA 2018 和 HBuilder 工具开发 J2EE Web 和移动应用。IntelliJ IDEA 2018 工具集成 Jersey RESTful、Mybatis、Leaflet、Skyline Javascript、Bootstrap 等第三方开发包。Jersey RESTful 是一个开源的 RESTful 框架,实现了 JAX-RS 规范;Mybatis 是一个开源轻量级的持久化框架,支持定制化 SQL、存储过程以及高级映射;Leaflet 是一个开源的 Web 地图开发前端 JavaScript 库,提供构建独立的 WEB 地理应用程序;SkyLine Javascript 是 Terra Skyline 提供的三维地图开发包,支持三维地图服务的调用、叠加显示;Bootstrap 是一个前端框架,具备响应式设计、移动设备优先等优势,以达到支持用户通过各种尺寸的设备浏览网站获得良好视觉效果的目的。Hbuilder 工具是一款支持 HTML5 的、跨平台的移动 Web 开发集成环境,基于 MUI 前端框架,通过前端构建工具条件编译,可同时发布 iOS 和 Android 移动应用。

2.2 技术架构

本平台采用 B/S (Browser/Server) 结构,具体交互关系见图 4。

数据/服务层:为业务层提供数据或数据服务。应用部署支持 Windows/Linux 服务器操作系统;后端属性数据库使用 MySQL5.7 数据库管理系统;空间数据使用 ArcGIS File GDB,通过面向 Web 空间数据服务的 ArcGIS Server 平台、SkyLine 平台分别发布二维地图和三维地图服务;气象、水利、民政等数据服务通过省公共数据共享服务平台共享。

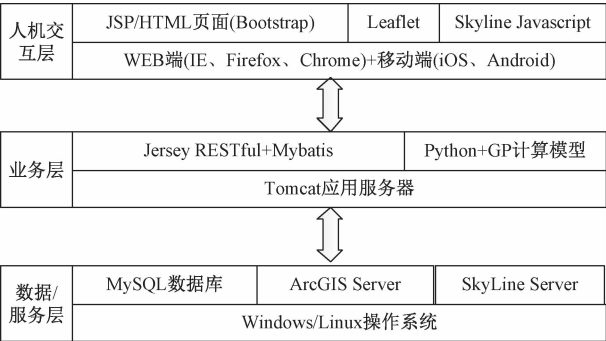


图 4 平台开发技术框架图

Fig. 4 Framework of platform development technology

业务层:进行复杂的业务逻辑处理,负责对数据/服务层的操作、为用户层提供各类 Restful 接口,具有承上启下的作用。业务层的开发集成了 Jersey

RESTful、Mybatis、ArcGIS Geoprocessing 等框架。系统通过 Jersey RESTful 框架提供 RESTful 风格的服务,通过 Mybatis 框架实现数据库的增删改查等操作,简化数据访问层繁琐的重复性代码;ArcGIS Geoprocessing 计算框架支持空间数据的处理与模型计算,支持 Python 编程,支持与气象预报模型等耦合、计算集成。

人机交互层:负责用户和平台之间的人机交互,用于显示数据和接受用户的输入,实现用户和平台的协调操作。人机交互层的开发集成 Leaflet、Bootstrap、Skyline javascript 等框架,支持二/三维地图、Web/移动端应用自适应显示。另外,通过 Json/GeoJson 完成该平台与“浙里办”等第三方系统的数据交互与共享。

2.3 数据库设计

地质灾害数据具有多层次、时空性的特点,数据库设计为属性数据库和空间数据库,数据库物理模型见图 5。

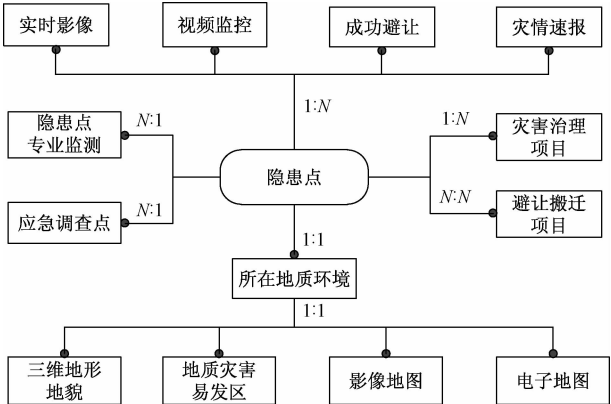


图 5 数据库物理模型

Fig. 5 Database physical model

属性数据库涵盖隐患点、专业监测、视频监控、灾前灾后实时影像、成功避让、避让搬迁项目、工程治理项目和应急调查点、灾情速报等数据实体。隐患点包括滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷、地裂缝、斜坡等六类;专业监测包括测斜设备、雨量、深部位移、水位、位移、GPS、沉降、锚杆压力计、DTU 等 9 种物理量的自动监测仪器;视频监控为灾害点周边固定点位摄像头;实时影像图为灾害点灾前灾后无人机影像图;灾情速报为灾(险)情况速报信息;成功避让为地质灾害成功避让信息;避让搬迁项目为地质灾害危险区受威胁人员的避让搬迁工程;灾害治理项目为隐患点上开展的工程治理项目;应急调查点为突发地质灾害点现场应急调查情况。

空间数据库涵盖隐患点所在地质环境数据,包含

矢量电子地图、某个时刻的影像地图、三维地形地貌和地质灾害易发区等实体信息。空间数据库采用 CGCS2000 坐标系,电子地图、影像地图使用栅格瓦片格式,基础地理信息有关数据由浙江省地理信息交换

共享平台负责提供和数据更新。

2.4 实现

浙江省地质灾害防治管理平台五大系统已经全部完成开发,并上线运行。系统主要界面见图 6~图 9。

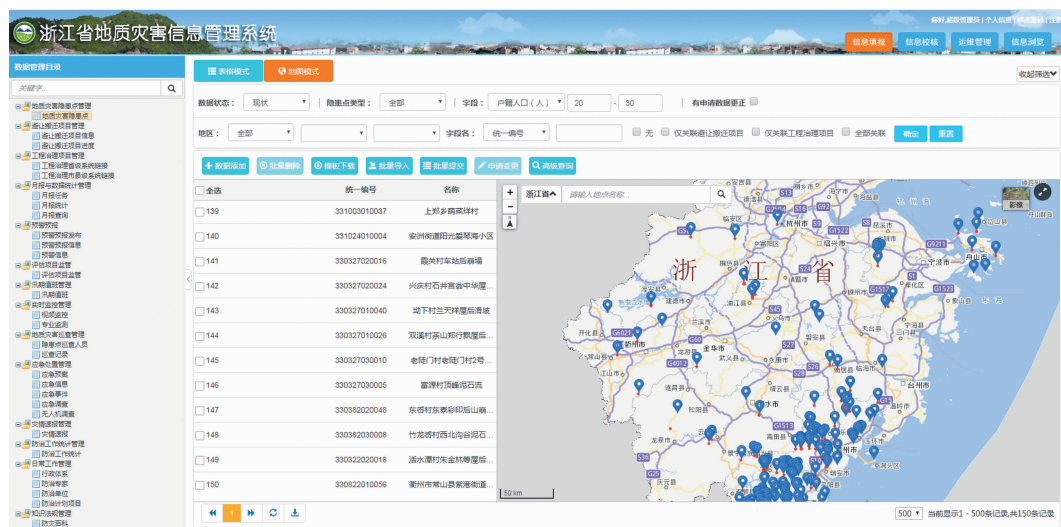


图 6 浙江省地质灾害管理信息系统主界面

Fig.6 The main interface of geological disaster management information system in Zhejiang Province



图 7 浙江省地质灾害应急会商辅助决策支持系统界面

Fig.7 The interface of the consultation and assistant decision-making supporting system of emergency response for geological disaster in Zhejiang Province

目前由平台汇聚整合的浙江省地质灾害核心数据库中,有 5 966 个地质灾害隐患点全生命周期数据,3 600 个避让搬迁项目和 2 685 个工程治理项目数据,9 039 个地质灾害危险性评估项目监管信息,233 个地质灾害专业监测点及监测数据,34 个地质灾害视频监控点信息,853 名地质灾害行政管理人员和 5 966 名群

测群防人员信息,317 位地质灾害防治专家信息,275 家地质灾害资质单位信息以及地质灾害月报统计、历年预警预报信息,以及全省 1:20 万和局部地区 1:5 万区域地质图,省、市、县、乡镇不同比例尺地质灾害易发区分布图和防治规划图 836 幅。总数据量共 1TB 左右。



图 8 浙江省地质灾害管理 APP 界面

Fig. 8 The interface of the geological disaster management APP



图 9 浙江省地质灾害应急调查 APP 界面

Fig. 9 The interface of the geological disaster emergency investigation APP

3 结论

本平台是大数据、云计算、物联网、移动互联网和地理信息系统等高新信息技术综合运用于省级地质灾害防治管理工作的良好实践。平台建设遵循本省地质灾害防治工作实际需求,按照“统分结合、统一管理,集中服务”的模式开展建设,平台划分为基础设施层、数据资源层、应用支撑层和业务应用层四层逻辑层次,包括地质灾害管理信息系统、地质灾害应急会商辅助决策支持系统、地质灾害应急调查 APP 系统、地质灾害管理 APP 系统和地质灾害应急快速制图系统等五大系统,通过在线与离线相结合、桌面端与移动端相补充、日常管理和成果展示相分离的方式,满足各种工作

环境下,各类用户的使用需求。

平台自 2017 年上线运行后,凭借多功能、强服务、重决策的特点,在浙江省地质灾害防治日常管理、汛期应急值守、灾险情应急处置等工作中起到很好的技术支撑作用,为浙江省地质灾害防治工作“取得时效、走在前列”提供了重要保障。同时本平台建设对其他兄弟省份的地质灾害防治信息化建设具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 张磊,陈张建,夏跃珍,等. 浙江省突发性地质灾害应急空间辅助决策支持系统设计与实现[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 135 - 140. [ZHANG L, CHEN Z J, XIA Y Z, et al. Design and realization of spatial assistant decision support system of emergency response for abrupt geological hazards in Zhejiang Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(3): 135 - 140. (in Chinese)]
- [2] 王洲平. 浙江省地质灾害现状及防治措施[J]. 灾害学, 2001, 16(4): 63 - 66. [WANG Z P. Current situation of geological disasters and the prevention measures in Zhejiang Province [J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16(4): 63 - 66. (in Chinese)]
- [3] 余丰华,麻士华,张义顺,等. 浙江省突发性地质灾害预警预报系统应用研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 36 - 39. [YU F H, MA T H, ZHANG Y S, et al. Application and study on abrupt geological hazards for early-warning and prediction in Zhejiang Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(1): 36 - 39. (in Chinese)]
- [4] 房浩,李媛,杨旭东,等. 基于大数据的全国地质灾害信息管理系统研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(14): 4478 - 4482. [FANG H, LI Y, YANG X D, et al. Research on geohazards information management system in China based on big data [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(14): 4478 - 4482. (in Chinese)]
- [5] 王小平,孙仁先,江鸿彬. 省级地质灾害防治管理信息化建设探讨[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(3): 295 - 300. [WANG X P, SUN R X, JIANG H B. Discussion on the construction of informationalization of geological disaster prevention and management at provincial level [J]. Resources

- Environment & Engineering, 2006, 20(3): 295 - 300. (in Chinese)]
- [6] 赵菲, 赵慧, 刘妍芬, 等. 山东省地质灾害信息管理系统建设与应用[J]. 山东国土资源, 2015, 31(4): 79 - 82. [ZHAO F, ZHAO H, LIU Y F, et al. Construction and application of geological hazards management information system in Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 2015, 31(4): 79 - 82. (in Chinese)]
- [7] 徐岩岩. GIS支持下的地质灾害防治信息平台建设[J]. 国土与自然资源研究, 2016(1): 57 - 59. [XU Y Y. Construction geological hazard prevention and control information system based on GIS [J]. Territory & Natural Resources Study, 2016(1): 57 - 59. (in Chinese)]
- [8] 周志华. 广东省地质灾害防治信息化平台建设探讨[J]. 西部资源, 2017(1): 77 - 82. [ZHOU Z H. Discussion on information platform construction of geological disaster prevention and control in Guangdong Province [J]. Western Resources, 2017(1): 77 - 82. (in Chinese)]

(上接第79页)

- [12] LIU Z X, CUI B Q, LIANG Y B, et al. Study on foundation deformation of buildings in mining subsidence area and surface subsidence prediction [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(3): 1755 - 1764.
- [13] 煤矿老采区岩土工程勘察规范: GB51044—2014 [S]. 2014. [Geological and Geotechnical Investigation Specification for Coal Mine Goaf: GB51044—2014 [S]. 2014. (in Chinese)]
- [14] 建筑地基基础设计规范: GB50007—2011 [S]. 2011. [Code for design of building foundation: GB50007—2011 [S]. 2011. (in Chinese)]
- [15] 华南工学院, 等. 地基及基础 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981: 63 - 80. [South China University of Technology, et al. Ground base and foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1981: 63 - 80. (in Chinese)]
- [16] 王有凯. 动静荷载下硐室结构应力场求解及防震设计研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013. [WANG Y K. The research on calculation of stress field in chamber structure under static and dynamic load and [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)]
- [17] AI Z Y, YUE Z Q, THAM L G, et al. Extended Sneddon and Muki solutions for multilayered elastic materials [J]. International Journal of Engineering Science, 2002, 40(13): 1453 - 1483.
- [18] MIRANDA E. Evaluation of site-dependent inelastic seismic design spectra [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(5): 1319 - 1338.
- [19] 钟阳, 王哲人, 郭大智, 等. 求解多层弹性半空间非轴对称问题的传递矩阵法 [J]. 土木工程学报, 1995, 28(1): 66 - 72. [ZHONG Y, WANG Z R, GUO D Z, et al. Transfer matrix method for solving non axisymmetrical problems in multilayered elastic half space [J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(1): 66 - 72. (in Chinese)]
- [20] 徐芝纶. 弹性力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 212 - 226. [XU Z L. Elasticity [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2016: 212 - 226. (in Chinese)]
- [21] 王海永. 高振荡问题的高效数值方法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010. [WANG H Y. Efficient numerical methods for highly oscillatory problems [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)]