

地质灾害多源基础数据结构体系及应用

彭志忠¹, 袁飞云¹, 何朝阳², 李东来¹, 解明礼², 饶泽迅²

1. 四川泸石高速公路有限责任公司, 成都 610047;

2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

[摘要] 地质灾害基础数据具有多源性、异构性、多尺度等特点, 大量的数据没有形成统一的管理模式, 共享程度较低。当前普遍施行的地质灾害数据管理, 采用的是从多角度、多层面、多空间等对地质灾害体及其孕育环境表达的多尺度数据集, 因此各类数据的表达形式、数据精度、数据质量、时间表达等多方面存在着较大的差异性。构建了地质灾害多源异构数据集成方法体系, 系统总结了数据的结构特征与管理方法, 结合数据结构特征, 使用 PostgreSQL 数据库管理属性数据, 使用 MongoDB 数据库集群进行管理, 使用 GeoServer 平台进行空间数据服务发布。研发地质灾害大数据 ETL 工具, 集成数据库驱动、数据库适配器、数据模型等模块, 实现对多源异构地质灾害大数据的有效管理。研发了一体化数据管理可视化平台, 实现对各类数据进行统一管理, 为地质灾害基础数据的统一管理提供了综合数据平台, 为地质灾害的防灾减灾、应急决策等提供数据和平台支撑。

[关键词] 地质灾害基础数据; 属性数据; 空间数据; 多媒体数据; 数据集成

[分类号] TV697.3

[文献标志码] A

System to integrate and manage multi-source data on geological hazards and its application

PENG Zhizhong¹, YUAN Feiyun¹, HE Chaoyang², LI Donglai¹,
XIE Mingli², RAO Zexun²

1. Sichuan Lushi Expressway Co., Ltd., Chengdu 610047, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The basic data on geological disasters have multiple sources; they are heterogeneous and collected at varying scales. No unified system is currently available for managing the large amount of data on such

[收稿日期] 2023-07-03。

[基金项目] 四川省自然科学基金面上项目(2023NSFSCO264)。

[第一作者] 彭志忠(1980—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向: 高速公路建设管理, E-mail: 99975724@qq.com。

[通信作者] 何朝阳(1987—), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 地质灾害评价、地质灾害监测预警及其平台研发, E-mail: hechaoyang2013@mail.cdut.edu.cn。

[引用格式] 彭志忠, 袁飞云, 何朝阳, 等, 2024. 地质灾害多源基础数据结构体系及应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(4): 630-640+653.

Peng Z Z, Yuan F Y, He C Y, et al., 2024. System to integrate and manage multi-source data on geological hazards and its application[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4): 630-640+653.

disasters. Such data constitute a multi-scale dataset that represents the relevant area as well as the environment from multiple angles, layers, and spaces, and this leads to significant differences in their forms of expression, accuracy, quality and temporal representation. In this paper, we construct a system to integrate the multi-source and heterogeneous data on geological disasters, and systematically summarize their structural features and methods to manage them. We used the PostgreSQL database in conjunction with the structural features of data to manage their attributes, and applied the MongoDB database cluster to manage them. The GeoServer platform was used to share the spatial data on geological hazards. Moreover, we used the ETL tool used to handle big data on geological disasters, and integrated a database driver, database adapter, data model, and other modules into the system to effectively manage the multi-source and heterogeneous data. We then developed an integrated data management and visualization platform to handle the different kinds of data. It is a comprehensive platform for the unified management of basic data on geological disaster, and provides data and platform-related support for the prevention of geological disasters and rapid decision-making in their aftermath.

Key words: basic data on geological disasters; attribute-related data; spatial data; multi-media data; data integration

地质灾害基础数据管理与应用是地质灾害分析工作的前提与基石,数据的高效管理一直以来是研究的热点(陈廷方等,2006;刘军旗等,2021)。地质灾害基础数据是一个涵盖了地质属性、表征数据、勘测数据等众多领域且各个领域间相互关联的多方面的数据集(刘汉龙等,2021)。传统的地质数据调查通常是地质工作者通过野外实地考察绘制剖面图、立面图,使用钻孔等方法观察地下岩层的情况,记录地质数据。而今随着科学技术的发展,地质灾害的数据收集已经变成利用各类地质勘测仪器、无人机、LiDAR、3S技术、大数据等技术共同结合(王哲威等,2021),从而高效精准地收集区域数据并进行分析监测。

地质灾害基础数据主要包括地质灾害基本属性数据、空间数据与多媒体数据。空间数据指的是地质空间信息的数据,例如地质图、地形图等。GIS技术是运用计算机对地质数据进行分析,然后以图像的形式反馈分析结果的一种技术手段(解明礼等,2021)。因为GIS技术的特点能够很好地与地质灾害研究相结合,于是GIS技术在该领域很快得到了发展与应用,在防灾减灾的研究当中也成果斐然(方海东等,2001;Colombo et al.,2015)。通过使用ArcGIS的地图服务和相关数据库技术,成功开发出了地质灾害应急调查系统,实现了地质灾害相关数据的分析与管理(古黄玲,2013)。而文档数据主要包括报告、属性数据等,通常利用实体文档、数据库等方式进行管理。

这类数据还有地质档案信息形式多样、地质档案形成过程特殊、地质档案价值功能多样等特点(马丽萍,2019)。

在计算机和互联网都不发达的年代,地质资料的管理主要依赖工作人员对地质资料进行登记归档,但也只限于对纸质文档的管理(王晶等,2021)。而在各项技术日渐发展的今天,利用计算机技术对地质数据进行存储和管理已成为十分重要的数据处理方法。近年来在物联网、大数据、地质云等领域,许多专家都展开了研究(任晓霞等,2018;谢和平等,2021),使用MongoDB, PostgreSQL等NoSQL数据库作为空间仓库,管理地质空间数据(李绍俊等,2017);搭建Hadoop集群实现小文件合并、负载均衡,解决了海量地质数据的存储问题(邢建华,2017)。

针对地质灾害基础数据多源性、异构性、多尺度等特点(Shafizadeh-Moghadam et al.,2019;董云鹏等,2022),本文构建地质灾害多源异构数据集成方法体系,建立地质灾害属性数据、空间数据与非结构化数据标准,实现海量、高并发、多时效性强的地质灾害基础数据入库,实现多类型、多尺度地质灾害大数据的有效管理。

1 地质灾害多源数据特征与分类

1.1 地质灾害数据特征

地质灾害基础数据包括地质灾害属性数据、空间数据以及多媒体数据等;从数据类型看,又可

分为结构化数据和非结构化数据。不同的数据类型,在管理和利用上具有各自的特点。

结构化数据是指数据属性与结构固定,可以通过固有键值获取相应信息的数据,通常表现为二维表的形式。结构化数据一般以行为单位,一行数据表示一条信息的记录;一列表示一个数据内容项,也被称为字段。多个列组合而成的表也被称为关系,可以使用关系型数据库来表示和存储,如 MySQL, Oracle, PostgreSQL 等。结构化数据的存储和排列是具有其规律性的,这使得对数据的查询和修改都非常的便捷。

非结构化数据则是没有固定结构、无法根据固定格式描述数据的一类数据的集合,包括音频、视频、图像、文档、报表等文件。非结构化数据的结构内容各不相同,其存储和管理也没有统一的方式。这些信息虽然无法直接查询特定的信息,但也蕴含着较高的数据价值,对地质灾害防治和地质环境保护利用等具有较大的意义。

1.2 数据分类

1.2.1 属性数据

属性数据即非空间数据,是与地理实体相联系的地理变量或地理意义,地质灾害属性数据包括地质灾害基本信息、详查信息、威胁危害、防治措施等相关信息,这些数据具有固定的结构,通常使用二维表的形式存储,属于结构化数据。

属性数据表的行数主要在数千至数万这一数量级。这样数量级的数据,传统的关系型数据库即可实现较好的管理效果,并且能够实现查询分析、多表联合查询等多种分析手段。

1.2.2 空间数据

空间数据是用来表示物体的位置、形态、大小、分布等各方面信息的数据,通常指以地球参考空间位置为参考的与地质灾害体相关的地质、地理、地形等数据,主要包括地理属性数据、地层属性数据、地形属性数据、遥感影像数据等。本文中主要是指各类地图、影像等数据,按格式类型分类可划分为栅格数据和矢量数据 2 类。通常使用 GIS 软件进行处理和管理。

1.2.3 多媒体数据

主要包括现场照片、素描图、勘察报告、监测报告等多种内容,这些数据包含多种文件格式,包括图片、文档、视频等内容。这些数据没有固定的数据结构、大小和文件格式,又被称为非结构化数据。

在地质灾害调查过程中,根据调查阶段、成果类别、调查目的的不同,往往会对一次调查过程中的成果进行分类管理和总结。地质灾害多媒体数据,不同于结构化的属性数据,多媒体数据由于文档、图片、视频等内容存在,没有固定的文件格式和数据内容。

2 不同类型数据管理方法对比分析

2.1 属性数据

地质灾害属性数据采用关系型数据库进行存储管理。关系型数据库技术成熟、应用广泛,可以应对复杂的数据操作,是目前存储和管理结构化数据的主要数据库类型。由于关系型数据库原理容易理解,能够实现海量结构化数据的存储和访问、分析,经过几十年的快速发展,已成为主流的数据库结构模型。目前,主流的关系型数据库有 SQL Server, Access, Oracle, MySQL, PostgreSQL 等。由于关系型数据库的应用广泛,在不断地迭代优化中,主流的数据库软件对于 ACID、事务、索引等项目都有良好的支持,对关系型数据库的选择更多是从成本、技术路线等方面的取舍。对主流关系型数据库的对比分析(表 1),可以看到在各对比项目上,不同数据库软件的支持效果都比较好,只是在具体实现上有一定的差别。PostgreSQL 是一款拥有超过 35 年开发维护历史的开源关系型数据库管理系统,具有部署相对简单、可定制、可拓展及安全性高等优点,是地质灾害属性数据管理的最佳数据库。

2.2 空间数据

相比地质灾害多媒体数据通常为图片、文档、视频等内容,可以直接在线浏览文件或下载源文件,地质灾害空间数据需要加载到三维地球上才能很好地进行查看、分析。直接将完整的遥感影像或其他空间数据加载到三维地球,其数据量较大,对系统运行带来很大的压力,空间数据的加载速度也会大大降低。目前最佳的解决方式则是提前根据不同的缩放比例生成不同精度的栅格图片,三维地球再根据当前查看的位置和缩放比例读取对应的图片进行加载,以提高空间数据的加载速度。其中,使用原始空间数据生成不同精度图片的过程也被称为切片。而根据经纬度和缩放比例向三维地球提供栅格图片,则通过空间数据服务实现。

表 1 主流关系型数据库对比
Table 1 Comparison of mainstream relational databases

对比项目	SQL Server	Oracle	MySQL	PostgreSQL	OpenGauss
是否开源	不开源	不开源	开源	开源	开源
授权	商业	商业	GPL	BSD	MulanPSL2
跨平台	Windows, Linux	Windows, Linux, MacOS	Windows, Linux, MacOS	Windows, Linux, MacOS	Windows, Linux, MacOS
ACID	支持	支持	支持	支持	支持
索引	支持	支持	支持	支持	支持
临时表	支持	支持	支持	支持	支持
物化视图	支持	支持	不支持	支持	支持
排序	支持, null 被视为低于任何非 null 值	支持, null 被视为高于任何非 null 值	支持, null 被视为低于任何非 null 值	支持, null 被视为高于任何非 null 值	支持, null 被视为低于任何非 null 值
布尔类型	支持	支持	提供不符合标准的布尔类型, true 和 false 分别作为 1 和 0 的别名	支持	支持
日期时间	插入时间会进行严格的合法性检查	插入时间会进行严格的合法性检查	插入时间会进行不严格的合法性检查	插入时间会进行严格的合法性检查	插入时间会进行严格的合法性检查
唯一约束	支持, 如果允许 null 则最多只允许一个 null	支持, 如果允许 null 则可以有任何个 null	支持, null 允许方式可选	支持, null 允许方式可选	支持, 如果允许 null 则可以有任何个 null

目前,主流的空间数据服务软件包括 ArcGIS Server, Geoserver, MapGuide, MapServer 等,为选择合适的空间数据服务平台,就是否开源、支持数据格式、支持服务类型等项目进行对比分析

(表 2)。综合对比之下,Geoserver 具有开源、跨平台、支持数据格式丰富、修改样式后不需要重新发布服务等优势,Geoserver 是作为地质灾害空间数据的服务发布最优平台。

表 2 主流关系型数据库对比(何朝阳,2020)
Table 2 Comparison of mainstream spatial data service platforms

对比项目	GeoServer	MapServer	ArcGIS Server	MapGuide
是否开源	开源	开源	商业	开源
跨平台	Linux, Windows, OS X	Linux, Windows, OS X	Linux, Windows	Linux, Windows
支持数据	PostgreSQL, Shapefile, ArcSDE, Oracle, VPF, MongoDB, MySQL, MapInfo; TIFF/GeoTIFF, EPPL7 等	ESRI shapefiles, PostGIS, ESRI 的 ArcSDE 等; TIFF/GeoTIFF, EPPL7 等	PostgreSQL, Shapefile, ArcSDE, Oracle, VPF, MySQL; TIFF/GeoTIFF, EPPL7 等	Autodesk DWG, Shapefile, ArcSDE, Oracle; TIFF/GeoTIFF, EPPL7 等
要素特性显示	支持	否	支持	支持
地图编辑	支持	支持	支持	支持
图层渲染	支持	支持	支持	支持
查询服务	支持	支持	支持	支持

续表 2

对比项目	GeoServer	MapServer	ArcGIS Server	MapGuide
是否支持多线程	支持	否	支持, 仅 ArcGIS Pro 支持	支持
支持服务类型	WMS, WFS, WCS, WMC	WMS, WFS, WCS, WMC	WMS, WFS, WCS, WPS	WMS, WFS
矢量切片服务	支持	否	支持, 仅 ArcGIS Pro 支持	否
修改样式后是否需要重新发布服务	否	是	是	是

2.3 多媒体数据

对于地质灾害多媒体数据, 目前有 3 种技术方法: (1) 将文件转换为二进制代码的形式, 使用 BLOB 数据格式保存在关系型数据库中。但对这类数据没有很好的处理方式, 只能任由数据库容量不断膨胀, 然后降低检索性能, 并影响整个系统的运行效率。(2) 直接以文件的形式存储多媒体数据原始文件, 然后数据库中只存储文件的路径、格式、描述等信息。这种方式会将文件保存在 Web 服务器上, 服务器同时担任 Web 服务器和文件服务器的角色, 增加服务器的负载, 降低系统的整体运行效率。(3) 借助于非关系型数据库的

特点, 可以使用集群技术、分布式计算技术和虚拟化技术等, 通过多台计算机为用户提供数据存储服务, 提高整体数据吞吐能力。

对比不同存储方式的优缺点(表 3), 选择使用非关系型数据库来存储和管理地质灾害非结构化数据, 可以在保证数据可靠性的基础上具有较高的查询效率和扩展能力。用于存储非结构化数据的非关系型数据库主要有 HBase, MongoDB, PostGIS 等, 为选择合适的非结构化数据存储管理数据库软件, 对主流的几个非关系型数据库对比分析。PostGIS 是 PostgreSQL 数据库的一款扩展程序, 虽然支持的操作系统最多, 但由于模式

表 3 主流非关系型数据库对比

Table 3 Comparison of mainstream non-relational databases

对比项目	MongoDB	HBase	PostGIS
是否开源	开源	开源	开源
授权	AGPL	Apach	GPL
数据库类型	文档数据库	基于 Hadoop 和 BigTable 的宽列存储	PostgreSQL 的扩展程序
跨平台	Linux, OS X, Solaris, Windows	Linux, Unix, Windows	Linux, NetBSD, OpenBSD, OS X, Solaris, Unix, Windows
数据模式	无模式	无模式	模式化
数据类型	不限制	不限制	图形、几何对象等
SQL 查询	类 SQL	不支持	支持
访问方式	JSON	Java API, HTTP API, Thrift	ADO, NET, JDBC, ODBC
支持语言	C, C#, C++, Dart, Delphi, Erlang, Go, Java, JavaScript, Lisp, MatLab, Perl, PHP, Python, R, Ruby, Rust, Swift 等	C, C#, C++, Groovy, Java, PHP, Python, Scala	.Net, C, C++, Delphi, Java info, JavaScript (Node.js), Perl, PHP, Python, Tcl
分区方式	分片	分片	按范围、哈希分区
并发	是	是	是
数据持久化	是	是	是

化设计只能用于管理空间数据;HBase 无模式设计,不限制存储数据类型,但依赖 Hadoop 平台,不支持 SQL 查询语言,学习成本高;MongoDB 同样采用无模式设计,不限制存储数据类型,且提供类 SQL 的查询语言,功能丰富,学习成本较低。综合对比之下, MongoDB 作为地质灾害非结构化数据的存储管理数据库最优软件。

3 地质灾害多源基础数据综合管理平台研究

3.1 数据管理方案

地质灾害基础数据包括多种类型的数据,其各有不同的内容与特征。单一数据库已经难以满

足地质灾害基础数据的储存需求,因此需要利用多种数据库软件的优势,对地质灾害基础数据进行综合管理。经各种类型数据管理方法对比分析,建立如图 1 所示的多源基础数据一体化综合管理平台。

由于不同类型的数据存储和使用的方式不同,不同类型的数据库软件其连接和使用方法也不同,构建地质灾害基础数据管理 ETL 层,用于分别和不同的数据库软件进行连接,再向系统提供统一接口。ETL 是 Extract, Transform, Load 3 个英文单词的缩写,中文是抽取、转换、加载。在网络系统中,对于分散、零乱、标准不统一的数据需要整合到一起,则需要使用 ETL 技术。

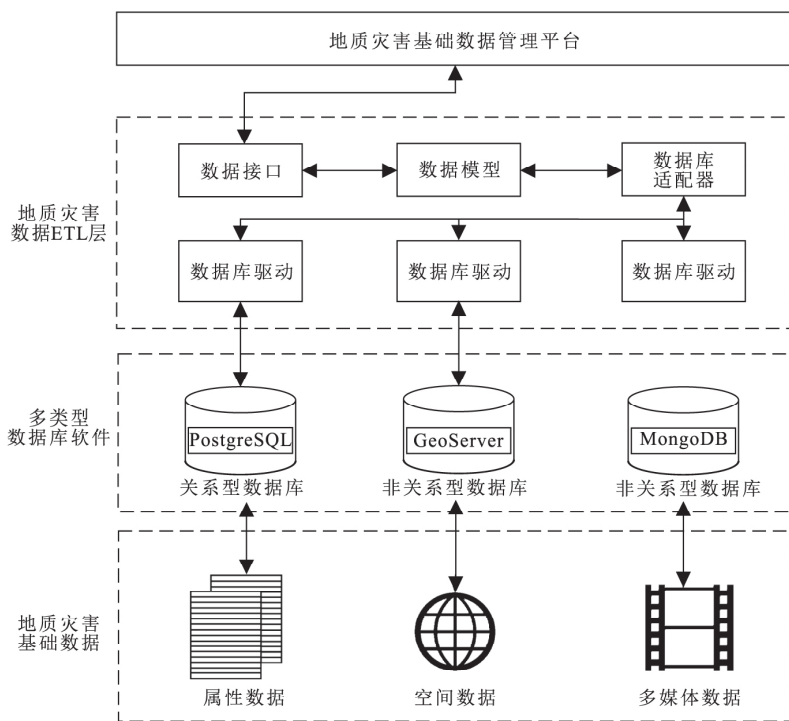


图 1 地质灾害基础数据管理结构

Fig. 1 Structure of management of basic data on geological disasters

地质灾害基础数据 ETL 层主要由数据接口、数据模型、数据库适配器以及多种数据库驱动组成。数据库驱动用于访问和控制不同的数据库软件。不同的数据库软件其连接方式、查询语句均有所不同,通过数据库驱动,对数据库软件的查询语句进行封装,使之可以通过相同的方法进行控制。数据库适配器的作用是根据数据类型的不同,选择不同的数据库驱动进行数据查询操作。数据模型存储不同类型的数据及其结构特征,用于生成填充数据的变量实体,方便在程序中对数

据进行操作。数据接口则是 ETL 层的对外接口,接受系统平台的指令和返回查询结果。

3.2 管理平台研发

以服务地质灾害防治工作为宗旨,借鉴国内外先进经验,综合运用信息化手段、大数据技术、GIS 技术、云计算技术等,建立从多渠道汇聚而来的地质灾害信息的大数据资源池,实现从数据汇聚、数据管理、综合防治等全过程信息化、智能化和标准化管理,系统总体的设计如图 2 所示。

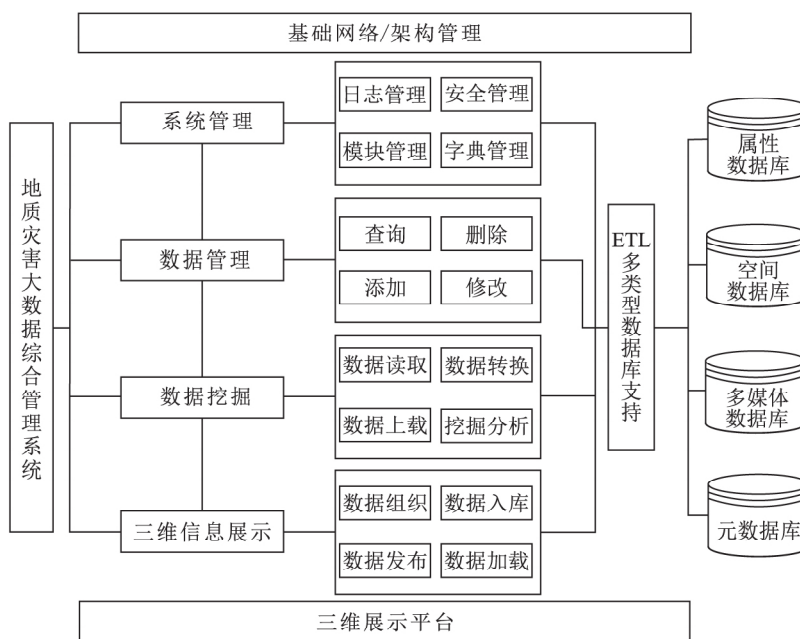


图 2 地质灾害基础数据管理平台架构

Fig. 2 Architecture of proposed data management platform

(1) 属性数据

本文所涉及属性数据主要指 1:5 万详查数据。通过“基础数据”模块实时将基础数据传输至后台 PostgreSQL 数据库中,将数据汇总在一个列表中,在这个页面可以对地质灾害点进行基本

的查询、添加、编辑、删除等操作。为方便查看,列表主要展示了编号、名称、地理位置、威胁人口等基础数据,并且提供可各种操作按钮。用户可以跳转至地图查看具体位置,也可以查看其具体的详查数据,或者进行数据编辑等操作(图 3)。

项目名称	古蔺稻香村滑坡		图幅名		图幅编号	
*名称	古蔺稻香村滑坡		野外编号		室内编号	
*统一编号	510525010001		县(市)编号			
滑坡时间	滑坡年代	老滑坡				
*地理位置		龙山镇	乡	稻香村	村	4组 组 点
X	105.95		Y	27.96		
*地理坐标	经纬度类型	经纬度	经度	105.9465 °	纬度	27.9632 °
标高(m)	坡顶	970	坡脚	820		
滑坡类型	<input checked="" type="radio"/> 推移式滑坡 <input type="radio"/> 牵引式滑坡 <input type="radio"/> 复合式滑坡		滑体性质	<input checked="" type="radio"/> 岩质 <input type="radio"/> 碎石石 <input type="radio"/> 土质		
地质环境	地层岩性		地质构造		微地貌	
	岩性	时代	产状(°)	构造部位	地震烈度	地下水类型
	灰岩	石牛栏组(S1sn)	350 ∠ 15	扬子准地台	VI	<input checked="" type="checkbox"/> 孔隙水 <input checked="" type="checkbox"/> 裂隙水 <input checked="" type="checkbox"/> 岩溶水
自然地理环境	降水量(mm)			水文		
	年均	日最大	时最大	洪水位(m)	枯水位(m)	滑坡相对河流位置
		164	63.9			<input type="radio"/> 左岸 <input type="radio"/> 右岸 <input type="radio"/> 凹岸 <input type="radio"/> 凸岸
滑坡环境	原始坡高	坡度(°)	斜坡结构类型		控滑结构面	

图 3 地质灾害属性数据表

Fig. 3 Data sheet of attributes of the data on geological disasters

(2)空间数据

空间数据主要由遥感影像、无人机摄影、InSAR、LiDAR 等方式进行收集,并由上述的监测体系收集整理且基于 GIS 平台完成可视化效果展示,

采用 GeoServer 相结合的方式,将数据发布成空间数据服务,支持 TMS, WMS, WMTS, WMS-C, WFS, WCS, 3DTiles 等多种规范,供三维可视化平台调用与可视化展示,满足多场景需求(图 4)。

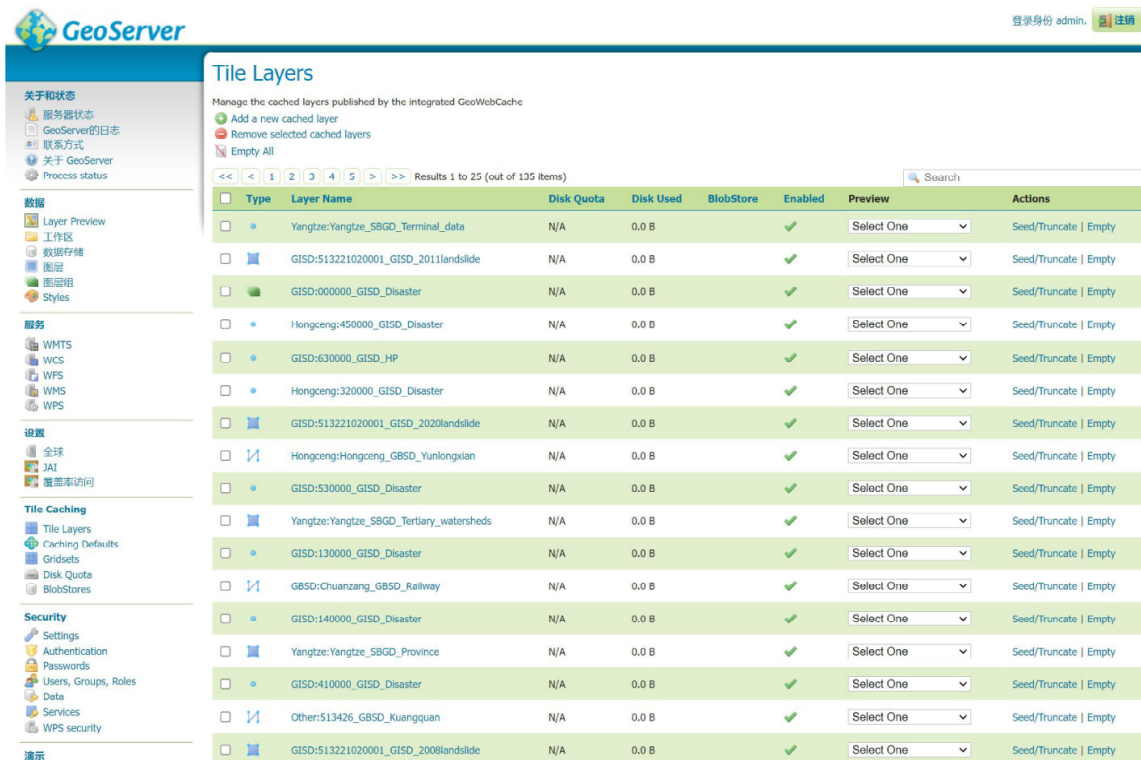


图 4 地质灾害空间数据管理页面

Fig. 4 Data management page of platform to handle data on geological disasters

(3)多媒体数据

一般是指地质灾害的附件资料、系统自动生

成的监测报表等,主要以文件形式保存在平台中,类型有 Word, PPT, Excel, PDF, DWG, JPG 等,

这类数据要实现在线展示与管理,则需要对不同的文件类型开发相应的展示模块,常用开源的框架有 PDF.js, Viewer.js 等(图 5)。

(4) 三维可视化平台

通过整合天空之地的各类数据,将各类数据通过三维数字地球进行统一的管理与展示,并集

成基础信息、InSAR、LiDAR、无人机高清航拍影像、三维模型、平面图、典型地质剖面图、地质图等,建立起一整套地质灾害基础数据管理体系,基于 WebGL 技术搭建地质灾害天空-地一体化数据展示平台,为地质灾害分析、预警、救援指挥工作提供后台支持(图 6)。

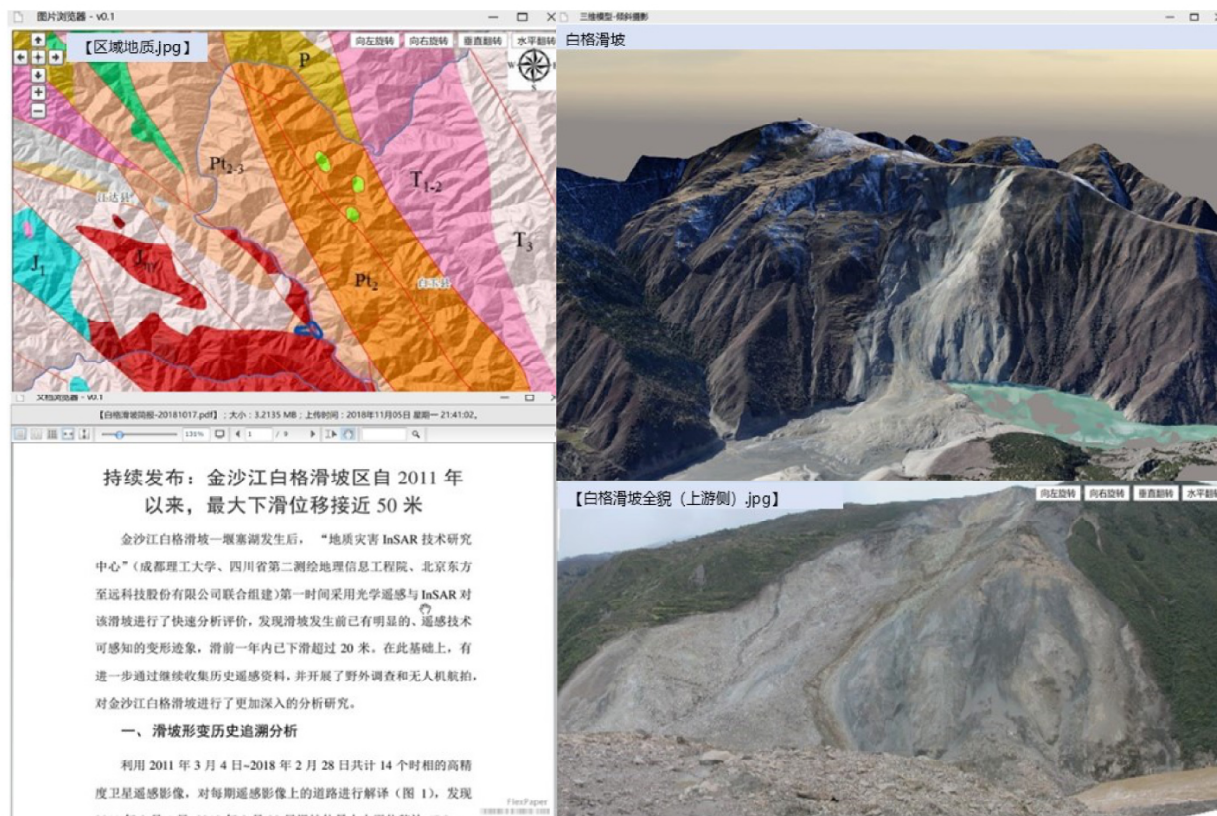


图 5 地质灾害多媒体数据
Fig. 5 Multi-media data on geological disasters

4 结论

以地质灾害基础数据管理需求实际出发,系统总结了数据的结构特征与管理方法,结合数据结构特征,研发了一体化数据管理可视化平台,实现对各类数据进行统一管理与集成,为地质灾害基础数据的统一管理提供了综合数据平台,为地质灾害的防灾减灾、应急决策等提供数据和平台支撑。得到了以下结论:

- a. 地质灾害数据管理是从多角度、多层面、多空间等对地质灾害体及其孕育环境表达的多尺度数据集,导致各类数据的表达形式、数据精度、数据质量、时间表达等多方面存在着较大的差异性。
- b. 构建了一套综合利用多种数据库软件优

势的地质灾害大数据管理技术方案。对于各类型数据分别使用 SQL Server 数据库管理地质灾害属性数据,使用 MongoDB 数据库集群进行管理,使用 GeoServer 平台进行地质灾害空间数据服务发布。

c. 研发地质灾害大数据 ETL 工具,集成数据库驱动、数据库适配器、数据模型等模块,实现对多源异构地质灾害大数据的有效管理。

d. 研发了一套多源基础数据一体化综合管理平台,实现了对地质灾害多源数据可视化动态展示,对基础资料进行统一管理,方便对各类数据的检索与可视化展示,为公路运营、日常管理、沿线地质灾害的防治、应急决策等提供了数据与平台支撑,提升了数字化管理水平。

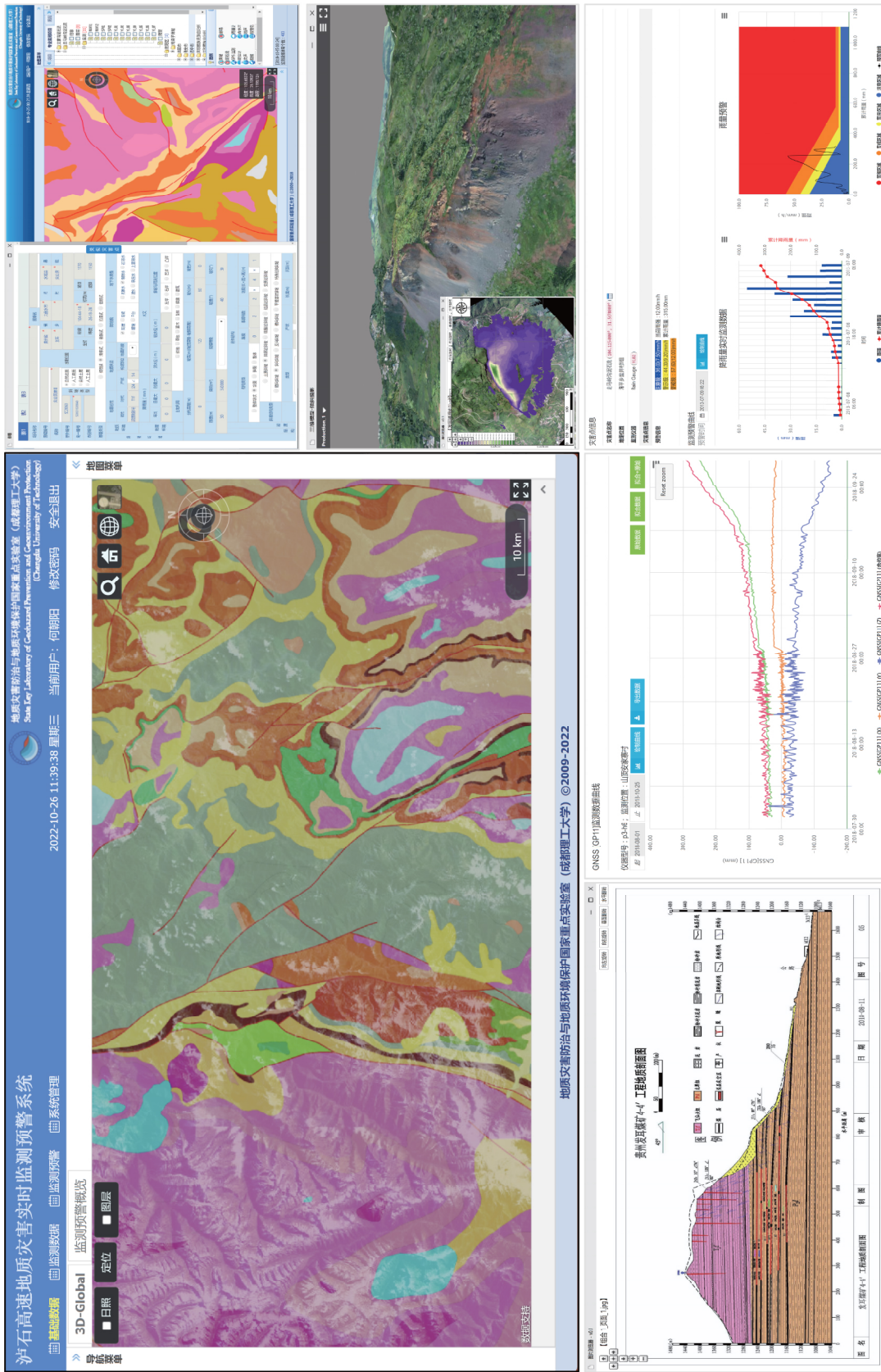


图 6 地质灾害多源数据综合展示
Fig 6 Comprehensive representation of multi-source data on geological disasters

[参 考 文 献]

- 陈廷方,崔鹏,姚令侃,2006.西南山区公路工程建设对地质环境的影响——模糊综合评价[J].自然灾害学报,15(3):8-13.
- Chen T F, Cui P, Yao L K, 2006. Impact of highway engineering construction on geological environment in southwest mountain area; Fuzzy synthetic evaluation [J]. Journal of Natural Disasters, 15(3): 8-13. (in Chinese)
- 董云鹏,任建国,张志飞,等,2022.地质学科未来5~10年发展战略:趋势与对策[J].科学通报,67(23):2708-2718.
- Dong Y P, Ren J G, Zhang Z F, *et al.*, 2022. Development strategy of geology in next 5-10 years: Trends and countermeasures [J]. Chinese Science Bulletin, 67(23): 2708-2718. (in Chinese)
- 方海东,施斌,王宝军,2001. GIS 在环境岩土工程中的应用的回顾与展望[J]. 桂林工学院学报, 21(4): 371-375.
- Fang H D, Shi B, Wang B J, 2001. Review and prospect of GIS application in environmental geotechnology[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 21(4): 371-375. (in Chinese)
- 古黄玲,2013.湖南省突发性地质灾害应急调查系统研究与实现[D].长沙:中南大学档案馆.
- Gu H L, 2013. The Study and Implementation on Emergency Survey System of Hunan Geological Disaster [D]. Changsha: The Archive of Central South University. (in Chinese)
- 何朝阳,2020.滑坡实时监测预警系统关键技术及其应用研究[D].成都:成都理工大学档案馆.
- He C Y, 2020. Research on Key Technology and Application of Real-time Monitoring and Early Warning System of Landslide [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 李绍俊,杨海军,黄耀欢,等,2017.基于 NoSQL 数据库的空间大数据分布式存储策略[J].武汉大学学报(信息科学版),42(2):163-169.
- Li S J, Yang H J, Huang Y H, *et al.*, 2017. Geo-spatial big data storage based on NoSQL database[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 42(2): 163-169. (in Chinese)
- 刘汉龙,马彦彬,仇文岗,2021.大数据技术在地质灾害防治中的应用综述[J].防灾减灾工程学报,41(4):710-722.
- Liu H L, Ma Y B, Zhang W G, 2021. Application of big data techniques in geological disaster analysis and prevention; A systematic review[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 41(4): 710-722. (in Chinese)
- 刘军旗,刘强,刘千慧,等,2021.大数据时代地质灾害数据管理及应用模式探讨[J].地质科技通报,40(6):276-282.
- Liu J Q, Liu Q, Liu Q H, *et al.*, 2021. Discussion of geological hazard data management and application model in big data era[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(6): 276-282. (in Chinese)
- 马丽萍,2019.大数据时代地质档案开发与利用研究[J].档案时空,18(2):18-21.
- Ma L P, 2019. Research on the development and utilization of geological archives in the era of big data [J]. Archives Space, 18(2): 18-21. (in Chinese)
- 任晓霞,喻孟良,张鸣之,等,2018.基于 Hadoop 分布式系统的地质环境大数据框架探讨[J].中国地质灾害与防治学报,29(1):130-134.
- Ren X X, Yu M L, Zhang M Z, *et al.*, 2018. Geological environment big data framework based on Hadoop [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 29(1): 130-134. (in Chinese)
- 王晶,马卓敏,王蕊,2021.地质资料管理在工程项目管理中实践意义及大数据集成化探讨[J].山东国土资源,37(3):75-78.
- Wang J, Ma Z M, Wang R, 2021. Discussion on the practical significance of geological data management in engineering project management and the integration of large geological data [J]. Shandong Land and Resources, 37(3): 75-78. (in Chinese)
- Wang J, Ma Z M, Wang R, 2021. Discussion on the practical significance of geological data management in engineering project management and the integration of large geological data [J]. Shandong Land and Resources, 37(3): 75-78. (in Chinese)
- 王哲威,冯涛,徐正宣,等,2021. CZ 铁路折多山越岭段“空天地”一体化地质选线[J].铁道工程学报,38(10):9-14.
- Wang Z W, Feng T, Xu Z X, *et al.*, 2021. The application of the geological line selection method of “Air-space-ground” in the Zheduo Mountain area of CZ Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 38(10): 9-14. (in Chinese)
- 谢和平,张茹,邓建辉,等,2021.基于“深地-地表”联动的深地科学与地灾防控技术体系初探[J].工程科学与技术,53(4):1-12.
- Xie H P, Zhang R, Deng J H, *et al.*, 2021. A preliminary study on the technical system of deep earth science and geo disaster prevention-control based on the “deep earth-surface” linkage strategy [J]. Advanced Engineering Sciences, 53(4): 1-12. (in Chinese)

- radar topography mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 45(2):RG2004.
- Jónsson S, Zebker H, Segall P, *et al.*, 2002. Fault slip distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4):1377–1389.
- Massonnet D, Feigl K L, 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface[J]. *Reviews of Geophysics*, 36(4):441–500.
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, *et al.*, 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. *Nature*, 364(6433):138–142.
- Okada Y, 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2):1018–1040.
- Song C, Yu C, Li Z H, *et al.*, 2019. Coseismic slip distribution of the 2019 Mw 7.5 New Ireland earthquake from the integration of multiple remote sensing techniques[J]. *Remote Sensing*, 11(23):1–16.
- Wright T J, Parsons B E, Lu Z, 2004. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 31(1):L01607.
- Wessel P, Luis J F, Uieda L, *et al.*, 2019. The generic mapping tools version 6[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 20(11):5556–5564.
- Xiao R Y, Yu C, Li Z H, *et al.*, 2021. Statistical assessment metrics for InSAR atmospheric correction: Applications to generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS) in Eastern China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96:102289.
- Yu C, Li Z H, Penna N T, 2018a. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 204:109–121.
- Yu C, Li Z H, Penna N T, *et al.*, 2018b. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 123(10):9202–9222.
- Yu C, Li Z H, Penna N T, 2020. Triggered afterslip on the southern Hikurangi subduction interface following the 2016 Kaikoura earthquake from InSAR time series with atmospheric corrections [J]. *Remote Sensing of Environment*, 251:112097.
- Zhao B, Huang Y, Zhang C H, *et al.*, 2015. Crustal deformation on the Chinese mainland during 1998–2014 based on GPS data[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 6(1):7–15.

(责任编辑:甘娟娟)



(上接第 640 页)

- 解明礼, 巨能攀, 赵建军, 等, 2021. 区域地质灾害易发性分级方法对比分析研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 46(7):1003–1014.
- Xie M L, Ju N P, Zhao J J, *et al.*, 2021. Comparative analysis on classification methods of geological disaster susceptibility assessment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(7):1003–1014. (in Chinese)
- 邢建华, 2017. 基于 Hadoop 的地质云计算平台搭建与应用[D]. 湘潭:湖南科技大学档案馆.
- Xing J H, 2017. Construction and Application of Geological Cloud Computing Platform Based on Hadoop Cluster[D]. Xiangtan: The Archive of Hunan University of Science and Technology. (in Chinese)
- Colombo A, Lanteri L, Ramasco M, *et al.*, 2015. Systematic GIS-based landslide inventory as the first step for effective landslide-hazard management[J]. *Landslides*, 2:291–301.
- Shafizadeh-Moghadam H, Minaei M, Shahabi H, *et al.*, 2019. Big data in geohazard; pattern mining and large scale analysis of landslides in Iran[J]. *Earth Science Informatics*, 12(1):1–17.

(责任编辑:黄维婷)