



矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统设计与实现

刘举庆 李军 王兴娟 张成业 杜梦豪 冉文艳 王金阳 胡靖宇

引用本文:

刘举庆, 李军, 王兴娟, 等. 矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统设计与实现[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 346-358.

LIU Juqing, LI Jun, WANG Xingjuan. Design and implementation of quantitative remote sensing monitoring and intelligent analysis system for mine ecological environment[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 346-358.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0456>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

神东矿区井上井下生态环境综合治理技术

Comprehensive treatment technology of ecological environment above and underground in Shendong mining area
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 56-65 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/cf822158-cbcb-4285-9858-5bef547caaba>

智能化煤矿大数据平台架构及数据处理关键技术研究

Study on big data platform architecture of intelligent coal mine and key technologies of data processing
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b0ab44ca-6dcf-4469-aa36-9945f0f926c9>

基于时间序列模型的戈壁荒漠露天矿生态环境评价

Ecological environmental assessment of Gobi desert open-pit mine based on time series model
煤炭科学技术. 2023, 51(12): 125-139 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0290>

基于RS和GIS矿区生态指标提取与安全评价—以焦作矿区为例

Ecological indexes extraction and safety assessment of coal mining area based on RS and GIS: taking Jiaozuo Coal Mining Area as an example
煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7cc75af1-d923-4d7f-9c23-28a537b7d0f3>

基于熵权法-云模型保水开采生态环境评价研究

Study on ecological environment assessment of water conservation mining based on entropy weight method and cloud model
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 291-298 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f09c6c57-2768-4b38-8d21-1ed8f604fee5>

露天煤矿绿色开采生态环境评价体系模糊评判研究

Study on evaluation model and application of green mining ecological environment evaluation system in open-pit coal mine
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5ac1606a-275a-44ce-99fa-ad72adf94ba0>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

碳中和科学与工程



移动扫码阅读

刘举庆, 李 军, 王兴娟, 等. 矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统设计与实现[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 346–358.

LIU Juqing, LI Jun, WANG Xingjuan, *et al.* Design and implementation of quantitative remote sensing monitoring and intelligent analysis system for mine ecological environment[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 346–358.

矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统设计与实现

刘举庆, 李 军, 王兴娟, 张成业, 杜梦豪, 冉文艳, 王金阳, 胡靖宇

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 矿山生态环境监测与治理是国家生态文明建设和“双碳”目标下的重中之重, 其信息化、智能化建设在新一代信息技术革命的助推下成为数字中国建设的重要一环, 也是当下时代发展的必然趋势。然而, 现有矿山生态环境监测系统仍然停留在单一专题、要素不全、基础量测、本地管理的初级阶段, 无法满足现实环境中对矿山生态环境多要素、长时序、高频次监测与分析的需求。基于此, 提出一种 B/S 架构下的矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统——矿山生态天眼, 并详细介绍了其研发需求、技术架构、关键技术及核心功能。系统依托卫星遥感技术及其他监测手段, 获取并聚合不同来源、信息丰富的矿山生态大数据, 形成矿山分布一张图和数据资源服务; 进而基于定量遥感反演矿山生态环境各生态参数, 形成一套长时序、多要素的矿山生态监测产品, 涵盖人类活动、自然地理条件和“植-土-水-气”各生态要素; 在此基础上, 系统提供 GIS 时空分析、统计分析及综合定量评价等工具集, 分别实现对矿区土地利用、归一化植被指数(NDVI)等参数伴随采矿活动在空间上的变化监测, 对土壤含水量、水体悬浮物浓度等生态要素历史统计值在不同时空位置和区域下的查询与可视化, 对顾及多项生态因子的矿山生态环境质量综合定量评价, 并最终形成矿山生态扰动与治理监测报告。矿山生态天眼的应用将服务于矿山生态环境全过程变化监测、数据管理、智能分析和决策应用, 有望提高矿山生态环境监测与治理的效率和智能化水平, 为推动生态文明信息化建设提供参考方案。

关键词: 矿山生态环境; 治理; 变化监测; 生态大数据; 定量遥感; 智能分析; 网络地理信息系统

中图分类号: X75; X87

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)04-0346-13

Design and implementation of quantitative remote sensing monitoring and intelligent analysis system for mine ecological environment

LIU Juqing, LI Jun, WANG Xingjuan, ZHANG Chengye, DU Menghao,

RAN Wenyan, WANG Jinyang, HU Jingyu

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Mine ecological environment monitoring and governance is a critical requirement for national ecological civilization construction and the dual carbon goal. The informatization and intelligent construction of the mine ecological environment have become an important part of Digital China driven by the new generation of information technology, and it is also an inevitable trend in the development of the current era. However, existing mine ecological environment monitoring systems are still in the primary stage with a single theme, incomplete elements, basic measurement, and local management, and they cannot meet the demand for multi-element, long-term, high-frequency monitoring and analysis of the mine ecological environment. To address this problem, the quantitative remote sensing monitoring and intelligent analysis system for the mine ecological environment under B/S architecture is proposed, called Mine Ecology Remote Eyes.

收稿日期: 2023-04-01

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2023-0456

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42271480); 中央高校基本科研业务费资助项目(2022JCCXDC04, 2023ZKPYDC10)

作者简介: 刘举庆(1995—), 男, 山东临沂人, 博士研究生。E-mail: juq.liu@student.cumtb.edu.cn

通讯作者: 李 军(1987—), 男, 湖北汉川人, 教授, 博士生导师。Tel: 010-62339396, E-mail: junli@cumtb.edu.cn

The development requirements, technical framework, key technologies, and core functions of the system are further described in detail. The system utilizes satellite remote sensing technology and other monitoring methods to obtain and aggregate mine ecological big data from different sources, forming a map of mine distribution and data resource services. Using quantitative remote sensing to invert ecological parameters of mine environments, a set of long-term and multi-element monitoring products can be generated. These products cover various ecological elements such as human activities, natural geographical conditions, and “vegetation-soil-water-atmosphere” parameters. The system provides a range of tools for GIS spatial and temporal analysis, statistical analysis, and comprehensive quantitative evaluation. With these tools, users can monitor spatial changes in ecological parameters such as land use and normalized difference vegetation index (NDVI) in mining areas along with mining activities, as well as query and visualize historical statistical values of ecological elements such as soil water content and suspended solids concentration in water under different spatiotemporal locations or regions. Additionally, the system enables comprehensive quantitative evaluation of the quality of the mine ecological environment taking into account multiple ecological elements. Finally, the system generates a monitoring report on ecological disturbance and governance of the mine. The application of Mine Ecology Remote Eyes will facilitate the change monitoring, data management, intelligent analysis, and decision-making applications of the mine ecological environment. This system has the potential to improve the efficiency and intelligence level of monitoring and governance of the mine ecological environment, and provides a reference for promoting the informatization of ecological civilization.

Key words: mine ecological environment; governance; change monitoring; ecological big data; quantitative remote sensing; intelligent analysis; WebGIS

0 引言

国家的社会经济发展离不开矿产资源,而矿山开采会不可避免地对生态环境产生扰动,从而形成一种人类活动和自然资源相互作用的特殊地域场所——矿山生态环境^[1-3]。近年来,伴随着生态文明建设、“30·60”双碳战略的稳步推进,矿山生态环境因其具有敏感性、脆弱性和复杂性得到重点关注,如何实现对其科学监测与治理成为人与自然和谐共生的重要一环^[4-7]。然而,矿山生态环境监测涉及生态要素众多、时间跨度大且连续性强、地域范围广且多尺度,传统的人工监管模式难以满足当下高精度、高时效的监测和治理需求^[8-10]。因此,迫切需要一套面向矿山生态环境监测与分析的技术体系与信息化系统,实现对矿山开采前-中-后全过程的生态环境监测与精准分析^[11-13]。

自21世纪初,随着计算机技术的快速发展,生态环境信息技术得到进一步提升^[14],数字矿山的概念及相关技术也被提出并不断完善^[15-17],使得矿山生态环境的信息化监测手段及分析技术日渐丰富^[18-20],为矿山生态信息化监测系统的构建提供了数据和技术基础。在此背景下,国内外学者围绕矿山生态环境监测信息化系统建设开展了一系列相关研究,主要集中在矿山环境数据库构建、矿山生态环境监测系统设计2部分内容。例如,学者们基于空间型数据库如 Personal Geodatabase 数据库、ArcSDE,关系型数据库 Access、Oracle、SQL-Server 实现对空间数据和属性信息的存储与管理,构建了矿山生态环境数据库,并通过 ArcGIS En-

gine 实现数据可视化^[21-23];部分学者在管理矿山环境数据的基础上,通过构建矿山生态环境监测系统,对矿区地表沉降、植被覆盖度、土壤含水量、水体面积等单一生态要素进行监测,并提供各土地利用类型的变化分析^[18,24-26]。虽然现有研究在矿山生态环境监测信息化系统建设方面做了积极的探索与应用实践,但随着监测终端日益多样化、监测数据爆炸式增长、用户需求高标准,现有矿山生态环境监测系统仍面临以下问题:①系统监测数据不完备,监测要素不全面。过去数据采集主要面向单一生态要素,难以全面地刻画矿山生态环境各类生态要素状态信息,并且当面临现阶段来源多样、格式繁杂的矿山生态监测大数据时,无法应对数据融合与管理所带来的技术挑战;②系统功能局限,缺乏智能分析。现有系统功能主要包括地图浏览、几何测量、属性查询等基础操作,无法实现大规模生态数据的高效统计分析 with 变化监测,难以满足用户对数据中所蕴涵的决策信息的挖掘分析需求;③系统架构难以支撑矿山生态环境在线监测与大数据分析。现有系统多采用 C/S 架构,需要本地部署软件系统及数据库,操作难度大,时间成本高,并且难以实现功能拓展与系统更新,无法满足用户定制化需求。

针对上述问题,本文依托定量遥感监测技术、大数据技术、WebGIS 等信息技术,设计了矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统(简称“矿山生态天眼”),搭建了系统总体技术架构并研究其关键技术,进而实现了系统的研发,并对其功能与应用开展了详细描述与展示,旨在为矿山生态环境科学治理提

供全面且精细的信息支撑与操作平台,推动生态文明信息化建设。

1 矿山生态天眼系统需求分析

在数字中国建设背景下^[13],系统研发的核心需求是为用户在矿山生态环境监测与治理实际应用中提供一套切实可用、功能齐全、技术先进的信息化软件系统,一方面能够为用户提供决策参考信息,回答在矿山生态环境治理过程中所面临的诸多关键问题,如:矿山生态环境在采矿前、中、后的状态如何?各生态要素伴随着采矿活动是怎样变化的?生态环境综合质量是否有损伤?生态环境治理后的效果如何等;另一方面可以实现政府机构、矿山企业、公众等多方用户高效统一在线监管、治理与监督。因此,矿山生态天眼系统研发需求可以总结为对矿山生态环境全面监测、智能分析与服务功能3个方面。

1.1 矿山生态环境全面监测需求

矿山生态环境是人类活动与自然资源相互作用的有机整体,涉及生态要素众多,变化过程复杂、且扰动时间长^[9,27]。掌握矿山生态环境在采矿活动各个阶段的状态信息是进行矿山生态环境修复治理的重要前提,也是矿山生态环境监管的重要现实参考。然而,传统的“影像目视解译+外业调绘”为主的人工作业模式已无法满足精细化、高时效的监测需求,迫切需要通过以遥感监测技术为主并结合其他监测手段实现对矿山生态环境大范围、多要素、长时序、高频次的全面监测,为矿山生态治理提供客观丰富的环境状态信息^[28-30]。

1.2 矿山生态环境智能分析需求

矿山生态环境智能分析的核心需求在于对生态大数据潜在信息的挖掘,需要从时间、空间、要素3个维度对矿山生态环境的现状、变化过程、要素关系进行智能分析^[31-32]。具体来说,需要分析各个土地利用类型或生态要素在时间序列上的变化量及趋势;分析矿区地表伴随采矿活动的沉降规律及态势;量化采矿活动对“植被-土壤-水体-大气”等生态要素的空间影响程度及差异;分析各个生态要素的参数值及其相互关系,从而定量化评估矿山生态综合质量等。依据分析结果,矿山企业可以准确获得各类生态要素伴随采矿活动的变化量、变化趋势、损伤程度等信息,从而可以有针对性地制定治理方案。政府机构和公众也可以通过矿山生态综合质量分析等功能直观监督矿山生态状况,做到有问题及时发现与反馈,督促责任主体将矿山生态环境修复与治理

落到实处。

1.3 矿山生态环境服务功能需求

随着云计算、通信技术的快速发展,用户对于软件服务功能的需求逐步从单机版功能转向以云服务为核心的在线操作平台,尤其是在空间分布广、涉及生态要素多、开采持续时间长的矿山生态环境监测与治理应用场景中^[12,14],需要服务功能先进的信息化系统来提高矿山生态环境治理的效率,节省人力、物力、时间等成本。因此,系统研发在服务功能方面应该满足以下需求:①监测过程信息化,可以实现Web端的在线操作与监测,降低大范围人工巡查、本地部署等工作量;②数据资源云服务,可以提供包含遥感大数据及其他监测数据资源服务,实现在线数据浏览、查询和应用,同步监测多种生态要素;③系统操作性能高,在线编辑、浏览、分析要求响应快,体验流畅;④系统可拓展,用户定制化程度高,以满足不同应用场景下的多样化需求。

2 矿山生态天眼系统技术构架

围绕矿山生态环境监测、智能分析和服务功能需求,遵循要素全面性、方法先进性、查询高性能、在线云服务及用户定制化等原则,设计并研发矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统,简称“矿山生态天眼”。系统以定量遥感监测为主,其他监测手段为辅,聚合多源矿山生态监测数据,利用数据挖掘、时空分析等分析方法,实现矿山开采前-中-后全过程生态环境遥感监测、数据管理、智能分析与可视化渲染。系统技术架构如图1所示,包括底层架构设计、数据融合管理、生态参数遥感反演、生态环境智能分析、数据可视化技术、业务应用6项核心内容。系统底层采用B/S架构,通过Web端实现矿山生态大数据的统一管理与数据请求,并对矿山生态环境各要素进行监测与挖掘分析,进而通过数据可视化技术直观展示给矿山企业、政府部门及公众用户,以实现矿山环境变化监测、生态质量评价、生态风险预警、生态修复评价等业务应用。

2.1 系统底层架构

矿山生态天眼采用无插件B/S架构,以Web端进行数据操作和查询交互,无需本地部署任何软件和数据库,实现系统的“即得即用”。B/S架构按照网络节点的分布逻辑主要划分为3层:浏览器端、服务器端与中间件。①浏览器端主要用于呈现矿山生态环境监测数据及其分析结果,提供用户与系统在线交互的门户。前端采用开源且跨平台的Cesium

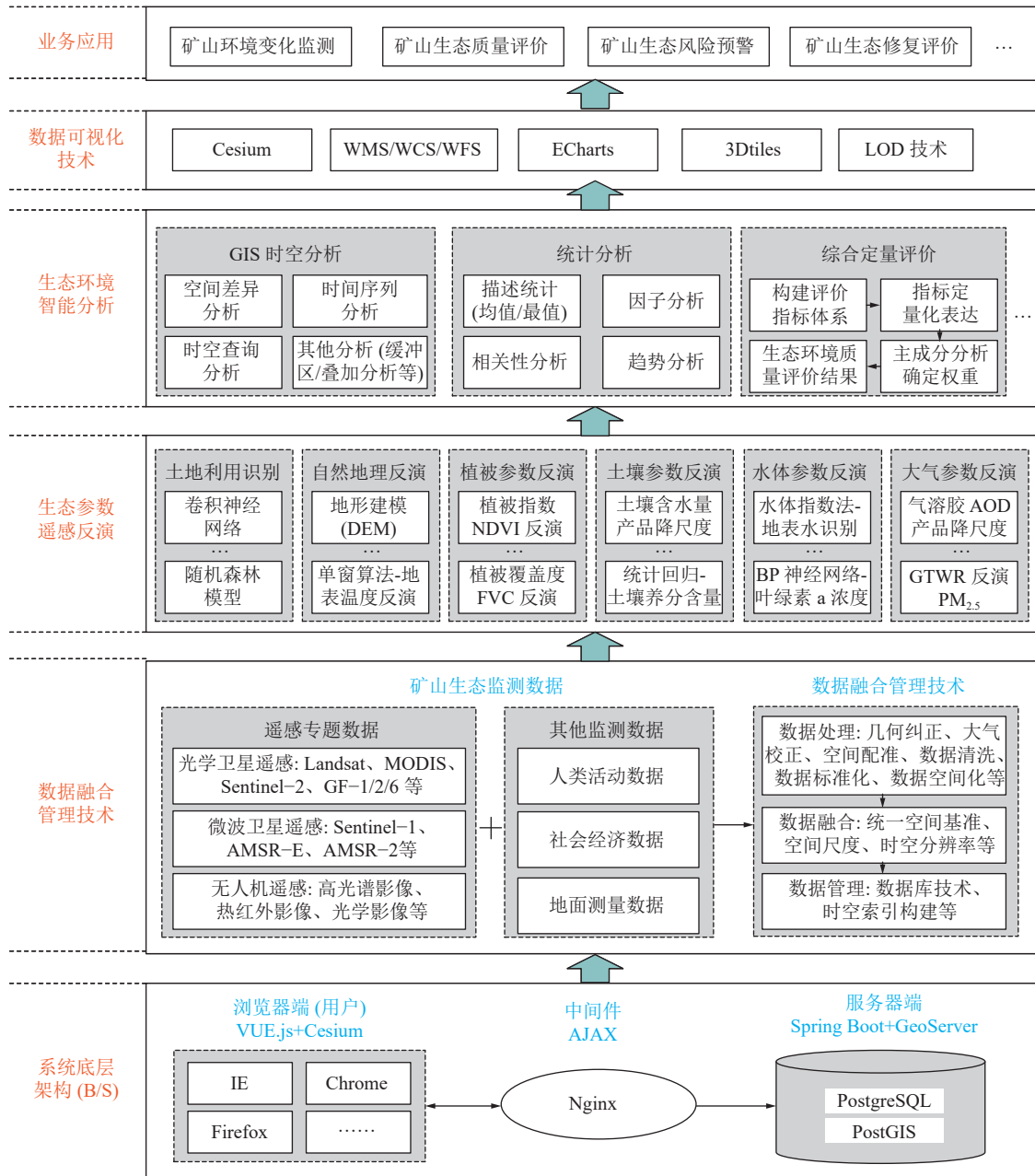


图1 矿山生态天眼系统总技术架构

Fig.1 General technical framework of Mine Ecology Remote Eyes

三维地球引擎, 可以支持 IE、Chrome、Firefox 等主流浏览器, 并利用渐进式 VUE.js 开发框架, 通过数据双向绑定的思想实现用户请求与数据更新的同步响应。②服务器端用于管理矿山生态环境监测数据、提供数据服务与智能分析功能。系统采用 PostgreSQL+PostGIS 数据库来存储时空数据及属性信息; 采用 Spring Boot 作为后端开发框架, 并遵循“数据即服务”的原则编写数据服务接口; 借助 GeoServer 地图服务发布矿山生态环境监测时空数据, 允许用户对监测数据进行三维地形建模、生态要素查询、空间计算、时空分析、统计分析等操作。③中间件是运

行在浏览器与服务器中间, 提供双向信息传输的桥梁。选择 AJAX 技术和 Nginx 作为系统的中间件, 保证系统前后端的信息通信。另外, 系统整体以组件化形式开发, 可个性化定制与升级改造, 可以满足不同用户对于不同应用场景的矿山生态环境监测与分析多样化需求。

2.2 数据融合管理技术

为实现矿山生态环境多要素、高频次、长时序的动态监测, 矿山生态天眼依托不同传感器采集的生态监测数据, 包括光学卫星遥感、微波卫星遥感、无人机遥感在内的遥感专题数据, 人类活动、社会经济、

地面测量等其他监测数据。面对来源不同、格式不一、结构多样、尺度各异的矿山生态监测大数据,通过数据融合管理技术实现数据的统一管理、组织与存储,具体包括数据预处理、数据融合与数据管理3个过程。①数据预处理是对原始数据进行加工和处理,如通过几何纠正、大气校正、辐射校正及空间配准等过程得到高质量遥感影像^[33],利用数据清洗、数据标准化、数据空间化、坐标系转换、几何匹配等方法进行空间数据一致性处理^[34]。②数据融合是利用投影变换、空间降尺度、空间内插等方法统一矿山生态监测数据的空间基准、空间尺度、时空分辨率等,例如利用卷积神经网络将基于 SMAP/Sentinel-1 土壤含水量数据降尺度为 30 m,提高其空间分辨率^[35]。③数据管理技术主要是依托现有的数据库技术和时空索引结构实现对监测数据的统一管理和存储,例如利用 PostGIS 建立 GiST(Generalized Search Trees)、R-Tree 空间索引结构管理空间型数据,通过 PostgreSQL 建立 B-Tree 索引结构管理矿山基础信息、遥感元数据、生态要素属性等关系型数据,通过文件系统存储大规模的遥感影像及反演产品数据。

2.3 矿山生态参数遥感反演方法

矿山生态参数遥感反演的核心在于利用定量遥感技术反演得到矿山生态环境多要素参数信息,基本思路是基于物理模型建立电磁波与矿区各生态要素之间的复杂作用关系,并构建针对各生态要素的参数反演模型^[36-37]。具体包括:利用基于卷积神经网络和随机森林模型的土地利用识别方法实现对土地利用类型、采矿活动、城镇活动等人类活动的动态监测;利用无人机倾斜摄影测量技术获取多期矿区数字影像,构建数字高程模型(DEM),监测地表伴随开采活动的沉降情况,并提取矿区坡度、坡向等地形地貌因子,进而结合单窗算法等实现对地表温度及其它自然地理条件的定量监测;利用植被辐射传输反演模型对归一化植被指数 NDVI、植被覆盖度 FVC 等参数进行反演;基于空间降尺度、统计回归等方法对土壤参数如含水量、土壤养分等定量反演;通过水体指数法、BP 神经网络等方法反演水体的面积、叶绿素 a 浓度等几何及水质参数;基于现有的气溶胶光学厚度 AOD 产品、回归建模等方法反演大气参数,最终实现矿山生态环境各生态要素的协同监测。

2.4 矿山生态环境智能分析方法

矿山生态环境分析方法主要包括 GIS 时空分析、统计分析、综合定量评价等,旨在对矿山生态环境大

数据进行充分的挖掘,揭示采矿活动对生态环境扰动的空间差异、变化规律及关键时间节点等信息。GIS 时空分析方法具体包括空间差异分析、时间序列分析、时空查询分析、缓冲区分析、叠加分析等,可以在空间维度、时间维度、要素维度上对各个生态要素进行历史查询、分布差异分析、变化过程监测及多要素关联分析。统计分析方法可以发掘矿山生态大数据隐含的价值信息,如利用描述统计方法对各参数历史数据(如矿山及周边区域历史气温、降水、风速等气候气象因子)的均值或最大值等指标来表达生态要素的历史状态、变化量及变化特征;可以根据地表沉降规律、“植-土-水-气”各参数时序变化等信息,识别各生态要素的损伤区域,例如通过 CCDC(Continuous Change Detection and Classification)算法根据像元植被变化轨迹识别植被损毁区域^[38],并利用趋势分析方法推演各生态要素的变化走向。通过因子分析、相关分析可以揭示生态要素如植被受采矿活动扰动及其他因子的相关关系。综合定量评价是围绕矿山生态质量构建一套评价指标体系,通过 GIS 量化表达与主成分分析确定各因子权重,实现对矿区生态质量的科学评估^[39]。

2.5 数据可视化技术

数据可视化技术为矿山生态天眼直观形象地表达矿山生态监测数据、参数遥感反演、智能分析结果等提供了技术支撑,以地图、图像、统计图表等可视化方式显式地展现矿山生态环境并进行交互。系统以 Cesium 为可视化平台,遵循 WMS、WCS、WFS 等国际地图服务标准,基于 GeoServer 实现对包括遥感影像、地面测量在内的二维栅矢空间数据类型的图层发布与可视化渲染,利用 ECharts 图表库展示统计数据,通过 3DTiles 格式实现无人机遥感倾斜三维地形的可视化展示,并进一步利用细节层次模型技术(LOD 技术)解决大规模数据的加载问题。其中,Cesium 可视化平台是提供二/三维可视化所需要的 JavaScript 界面类库,它采用 WebGL 硬件加速,并实现跨浏览器、跨平台支持,为大规模矿山生态监测数据在线展示提供保障。WMS、WCS 地图协议提供了加载地图服务、遥感影像等栅格数据可视化标准;WFS、GeoJSON 服务则可以快速可视化矿山边界等矢量数据,并提供基础的生态要素查询、选择及更新等操作。ECharts 是一个同样基于 JavaScript 的开源可视化图表库,可以提供折线图、柱状图、雷达图在内的近 20 余种图表类型,为矿山环境各生态要素参数的统计分析结果的图形化展示提供支持^[40]。LOD

技术是采用分层切片的瓦片加载方式实现不同空间参考、不同来源结构、大规模矿山监测数据的动态加载。

3 系统功能与应用

基于上述理论与技术方法，研发了矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统——矿山生态天

眼，系统总界面如图2所示。矿山生态天眼涵盖矿山分布一张图、数据资源目录、生态参数反演、生态智能分析、生态监测报告、系统运维管理6项核心功能，形成一套面向矿山开采前-中-后全过程生态环境监测与分析的功能体系，具体内容如图3所示。为展示该系统的有效性和科学性，通过案例详细介绍系统在矿山生态环境监测与分析中发挥的实际作用。



图2 矿山生态天眼的主界面
Fig.2 System interface of Mine Ecology Remote Eyes

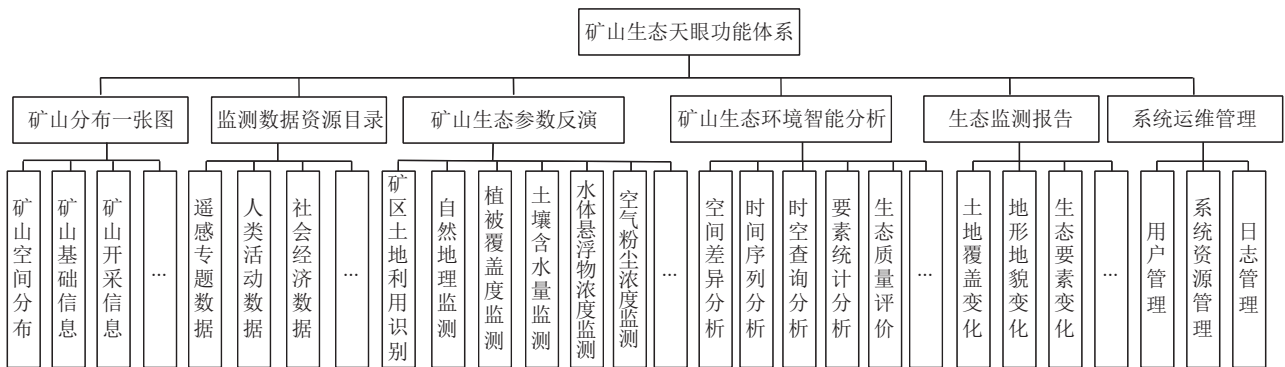
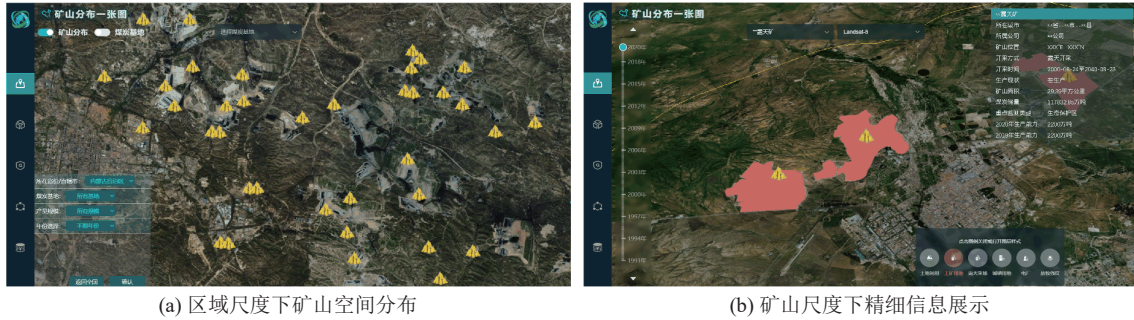


图3 矿山生态天眼功能体系
Fig.3 Functions of Mine Ecology Remote Eyes

3.1 矿山分布一张图

矿山分布一张图是将分散在各地的矿山统一管理起来，以地图的方式呈现各个矿山的空间分布，并提供矿山基础及开采信息的查询，为矿山生态环境监测提供全面的本底信息。由于矿山本身具有空间分布广、局部精细化的特点，系统采用区域尺度和矿山尺度两个空间尺度统筹管理。区域尺度下，系统支持对特定省市、特定产量、开采年份下的目标矿山检索，呈现矿山在目标区域下

的空间分布信息，方便企业集团对所属矿山重点监测，也有助于各级政府部门对辖区内的矿山进行管理(图4a)。矿山尺度下侧重精细信息的展示，包括目标矿山基础信息如矿山名称、所在城市、所属公司、矿山位置、开采方式、开采时间、生产现状、矿山面积、煤炭储量、重点监测类型、各年度生产能力等，并支持呈现目标矿山的具 体开采信息，包括采场及周边各土地利用类型、采矿权矢量范围、工矿用地及其生产量与剥离量、露天采场范围及其开采



(a) 区域尺度下矿山空间分布

(b) 矿山尺度下精细信息展示

图 4 矿山分布一张图

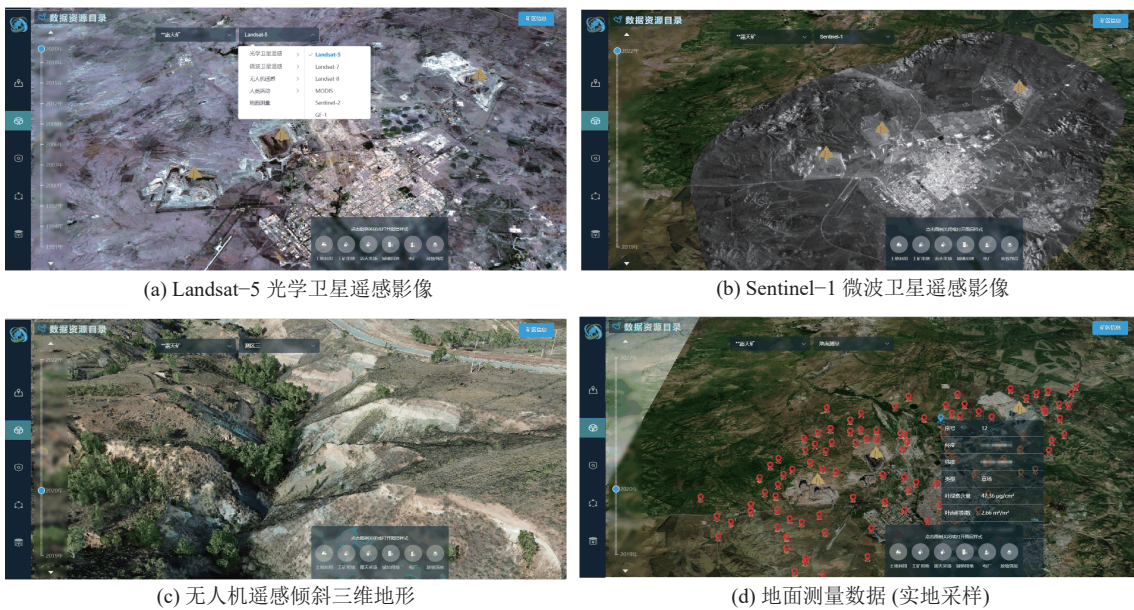
Fig.4 One map of mine distribution

面积等,帮助用户更全面和详细地了解矿山开采情况(图 4b)。

3.2 数据资源目录

数据资源目录是在细致梳理矿山生态监测数据需求基础上,收集并聚合了精细、长时序的矿山生态监测数据,实现原始数据资源的统一管理并组织,并提供包括数据查询、数据更新、数据调用、数据下载、数据可视化等一系列数据服务,节省用户在数据搜

集、整理、查看等方面的时间和精力。数据资源目录具体包括光学遥感、微波遥感、高光谱遥感、热红外遥感专题数据,也包含人类活动、社会经济、地面测量等其他数据,例如图 5a 展示了 Landsat-5 光学卫星遥感影像;图 5b 展示了 Sentinel-1 微波卫星遥感影像;图 5c 展示了无人机倾斜摄影数据;图 5d 展示了地面实地测量数据。数据资源目录中详细的数据内容、数据描述、数据格式等见表 1。



(a) Landsat-5 光学卫星遥感影像

(b) Sentinel-1 微波卫星遥感影像

(c) 无人机遥感倾斜三维地形

(d) 地面测量数据(实地采样)

图 5 矿山生态天眼数据资源目录

Fig.5 Data catalog of Mine Ecology Remote Eyes

3.3 矿山生态参数遥感反演

矿山生态参数遥感反演是在数据资源基础上,通过影像识别或定量遥感模型生成的人类活动、自然地理条件、植被参数、土壤参数、大气参数、水体参数 6 类要素的矿山生态环境监测产品,提供在线查看、调用服务,满足用户对矿山生态环境监测长时序、高频次、多尺度的高标准要求。具体来看:①生态参数遥感反演产品可靠,使用的算法有两类:一是

采用成熟并被广泛应用于各类场景的算法,以保证参数产品的准确性,例如利用像元二分模型^[41]、GF-SG^[42]、单窗算法^[43]、BP 神经网络^[44]分别生产 FVC、NDVI、地表温度、水体叶绿素 a 浓度等产品。二是根据矿区场景特点做针对性改进的算法,例如在矿区地物识别方面,改进现有算法 DeepLabv3+^[45],基于 OM-DeepLab^[46]的露天矿提取精度优于现有方法 U-Net^[47]、PSPNet^[48]、Mask R-CNN^[49](图 6);改

表 1 矿山生态监测数据资源
Table 1 Data source of the Mine Ecology Remote Eyes

数据类型	数据	数据描述	数据格式	
光学卫星遥感	Landsat 卫星遥感影像	空间分辨率 30 m		
	MODIS 卫星遥感影像	空间分辨率250/500/1000 m		
	Sentinel-2 卫星遥感影像	空间分辨率 10 m		
	GF-1/2/6 卫星遥感影像	空间分辨率0.5 m		
遥感专题数据	Sentinel-1 卫星遥感影像	空间分辨率5 m×20 m	栅格	
	微波卫星遥感	AMSR-E卫星遥感影像		
	AMSR-2 卫星遥感影像	空间分辨率 25 km		
无人机遥感	高光谱遥感影像			
	热红外遥感影像/光学遥感影像 倾斜遥感影像	空间分辨率0.01 ~ 0.1 m		
其他监测数据	人类活动	煤炭生产/城镇活动/电厂分布/电量生产/放牧强度	时间分辨率:逐年 矢量/栅格	
	社会经济	人口统计/经济统计	时间分辨率:逐年 栅格	
	地面测量	土地利用调查/植被类型调查/生态要素实地采样/地物光谱测量	时间分辨率:逐年 矢量/栅格/图表	

进 UNet++ 网络^[50]，基于深度学习模型 DA-UNet++^[51]对露天矿变化区域提取精度也优于 DeepLabv3+^[45]、PSPNet^[48]、FCN^[52]等方法。②产品时间跨度长，多数产品从 1990 年开始反演至今，可以对采矿和修复的各个过程阶段进行监测。③遥感监测频次高，能够实现逐月/周/天时间分辨率下的动态观测，保证监测产品的时效性。④产品具有空间多尺度(千米/米/厘米)特性，可以通过 30 m 分辨率监测区域性生态环境，以厘米级分辨率监测矿山及周边生态环境要素变化，尤其是扰动土地、工矿用地等重点关注对象。表 2 给出了矿山生态参数遥感反演产品的具体内容，包括监测的各生态因子及其数据

来源。部分产品如图 7 所示，分别展示了矿区及周边区域的土地利用类型(图 7a)、数字高程模型 DEM(图 7b)、归一化植被指数 NDVI(图 7c)、土壤含水量(图 7d)、水体叶绿素 a 浓度(图 7e)、大气水汽密度(图 7f)。

3.4 矿山生态环境智能分析

矿山生态环境智能分析功能为用户提供了一套数据挖掘与分析的工具，不仅涵盖传统地图浏览、几何测量、属性查询等基础操作，更是融入了 GIS 时空分析(空间差异分析、时间序列分析、时空查询分析)、要素统计分析及生态质量评价等高级功能。图 8a 以归一化植被指数 NDVI 为例展示了其空间分布差

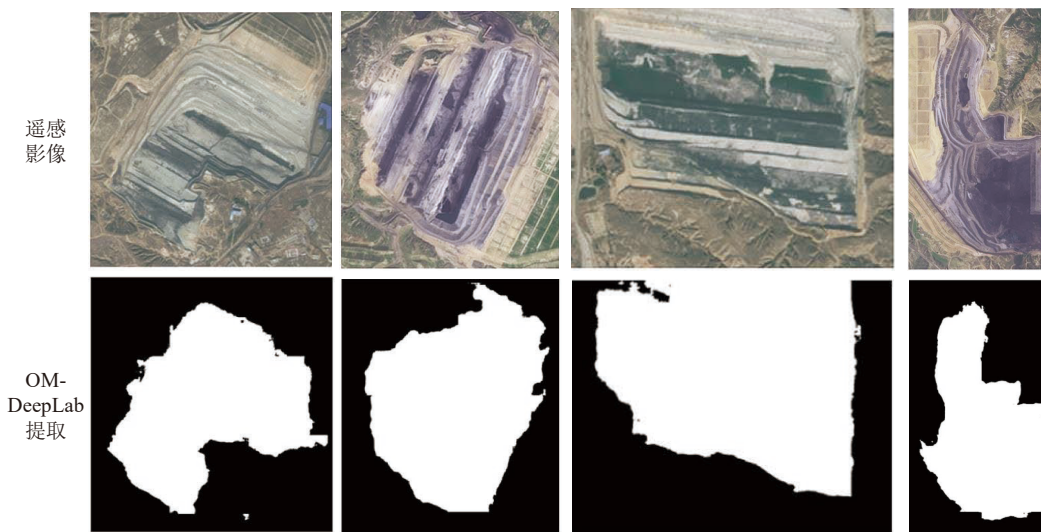


图 6 基于 OM-DeepLab 的露天矿提取^[46]
Fig.6 Extraction of open-pit mine areas based on OM-DeepLab^[46]

表2 矿山生态参数遥感反演产品
Table 2 Remote sensing inversion products for mine ecological parameters

矿山生态参数遥感反演产品	生态因子	数据来源
人类活动	土地利用/城镇活动/采矿活动	Landsat、Sentinel
	发电活动/放牧活动	统计数据
自然地理条件	气温/地表气压/地表温度/相对湿度/比湿/总可降水量/DEM/坡度/坡向	Landsat、MODIS、Sentinel
植被参数	叶绿素/冠层叶绿素/干物质/叶片等效水厚度/NDVI/植被覆盖度/叶面积指数/NPP	Landsat、实地采样数据
土壤参数	土壤含水量/土壤养分含量有机质/氮/磷/钾	Landsat、MODIS
水体参数	叶绿素a浓度/悬浮物质浓度/总磷/总氮/藻蓝素浓度	Landsat、MODIS、Sentinel、实地采样数据
大气参数	气溶胶光学厚度/PM _{2.5} /PM ₁₀	MODIS、GF
	蒸发量/风速/大气水汽密度	ERA5大气再分析数据集

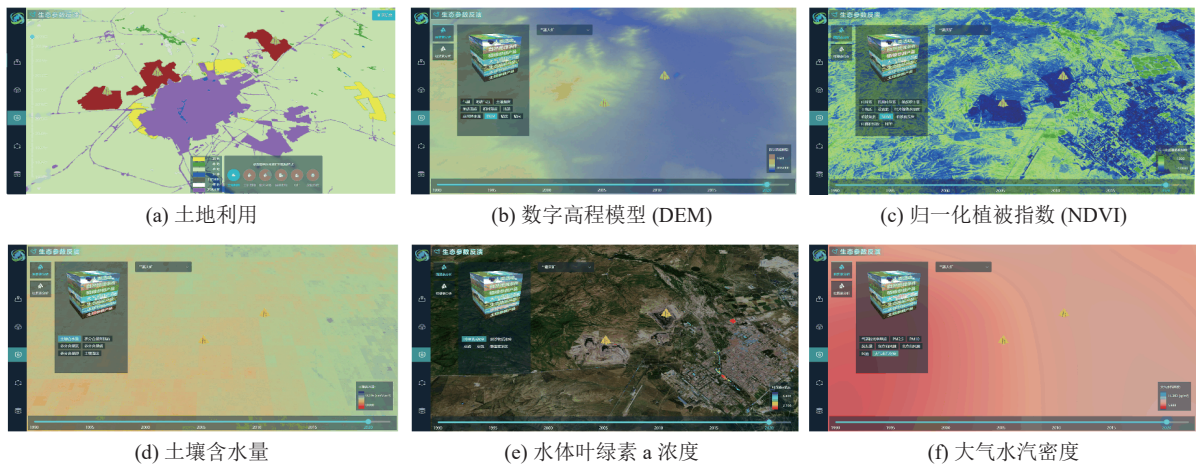


图7 矿山生态参数遥感反演产品示例

Fig.7 Examples of remote sensing inversion products of mine ecological parameters

异。图 8b 以 NDVI、采矿活动为例展示了矿山及周边环境在 1991—2020 年 30 a 间的变化过程,为用户提供了长时序、动态直观的场景回溯。图 8c 展示了在任意空间位置、任意时间片对多要素的纵向查询,可以一键获得多要素的参数信息,为多要素之间的联合分析提供基础;并展示了要素统计分析得出的气候气象数据如气温、降水、风速等因子的历年最大值或平均值的可视化图表。最后,系统基于上述各生态要素的状态信息,实现对矿区生态质量的综合评价,结果如图 8d 所示。系统采用矿区综合生态指数 CMEI 等评价矿区生态综合质量^[53],并通过等间距法划分评价等级^[54],为矿区生态环境风险诊断提供判定依据。此外,系统在大规模数据下实现上述查询及分析的快速响应,为用户提供了快速流畅的数据分析体验。

3.5 矿山生态扰动与治理监测报告

矿山生态扰动与治理监测报告功能是在矿山生

态环境监测与数据分析基础上,分别以月度、季度、年度为时间节点自动生成,支持在线浏览与下载,帮助用户整理与汇总矿山生态环境遥感监测与分析结果(图 9)。矿山生态扰动与治理监测报告内容主要侧重:①矿山开采前—中—后矿区土地利用类型变化,统计工矿用地、城镇用地、耕地、林地、草地、水体、裸地各类型土地面积的变化过程,并提供随着采矿活动推进前后的对比图,尤其是采矿扰动土地变化的占比,同时统计矿区土地复垦面积和复垦率;②地形地貌变化,统计矿区地表塌陷区、坡度、坡向等地形地貌参数变化量;③随着矿山开采活动的进行,“植—土—水—气”生态要素的变化;④监测矿区内各生态质量等级下空间区域的变化,重点关注低质量和中低质量区域的面积占比。最后,依据国家/行业标准、地方性政策法规,如土地复垦质量控制标准(TD/T1036—2013)^[55]、地表水环境质量标准(GB 3838—2002)^[56],系统给出监测结论和建议,也

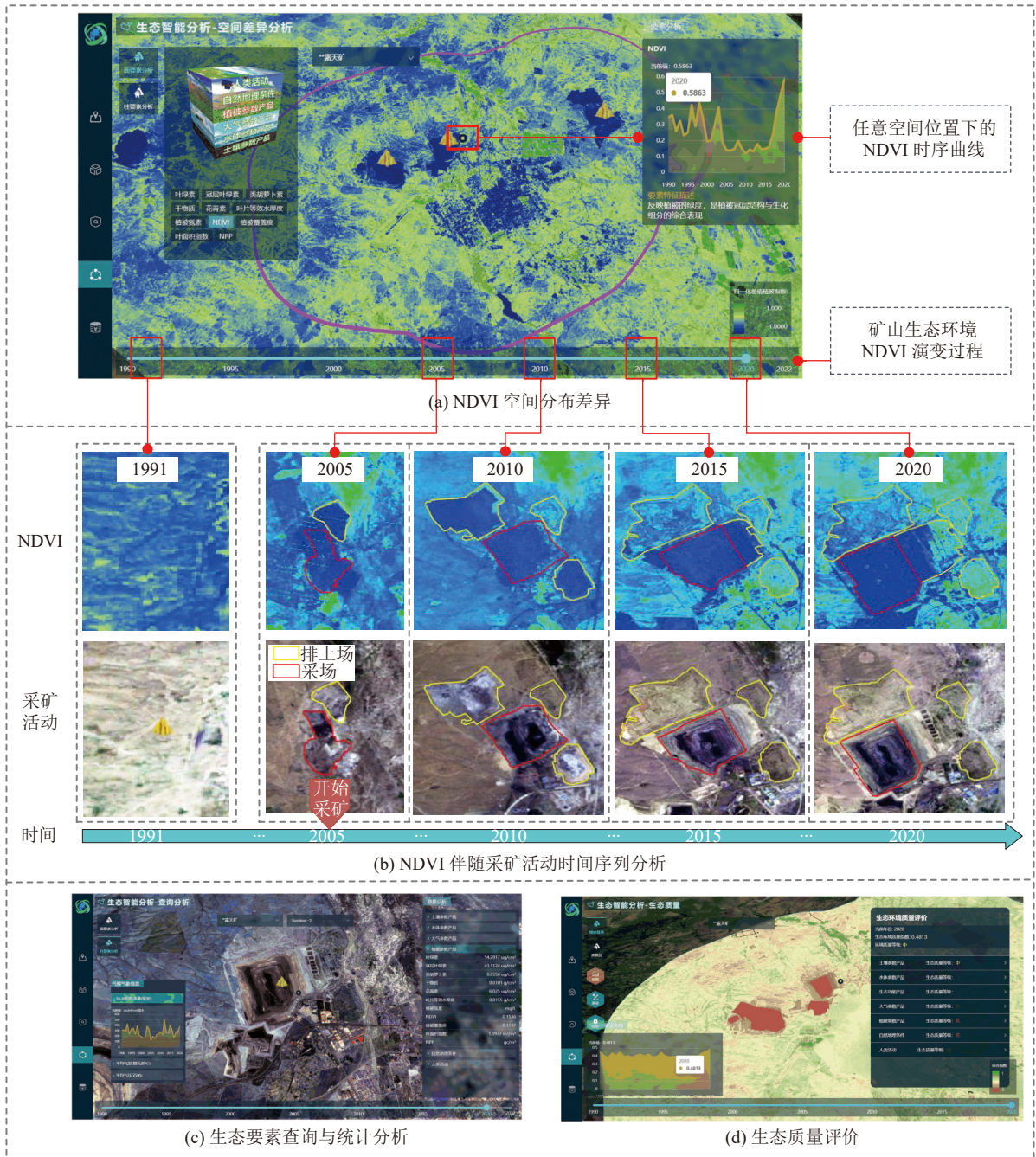


图 8 矿山生态环境智能分析

Fig.8 Intelligent analysis of mine ecological environment

支持用户根据具体应用场景更新相关标准和评判依据,保证生态监测结论的科学性和准确性。

4 结论与展望

现有矿山生态环境监测分析平台缺失、功能单一、监测要素不全面等现实问题与日益增长的信息化建设需求的矛盾日益突出,现有系统无法支撑矿山生态环境大范围、多要素、长时序、高频次监测与分析。因此,如何融入遥感技术、大数据分析、GIS等新一代信息技术,构建一个监测要素全面、数据丰

富、方法智能的矿山生态环境定量遥感监测与分析系统成为一个重要任务。

本文立足上述现实需求,遵循高性能、云服务、可拓展的系统设计原则,提出并构建了矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统(矿山生态天眼)。系统采用 B/S 在线服务模式,关键技术包括底层架构搭建、数据融合管理、生态参数遥感反演方法、生态环境智能分析方法、数据可视化技术。系统具有矿山分布一张图、数据资源目录、生态参数遥感反演、生态环境智能分析、生态扰动与治理监测报告、系统

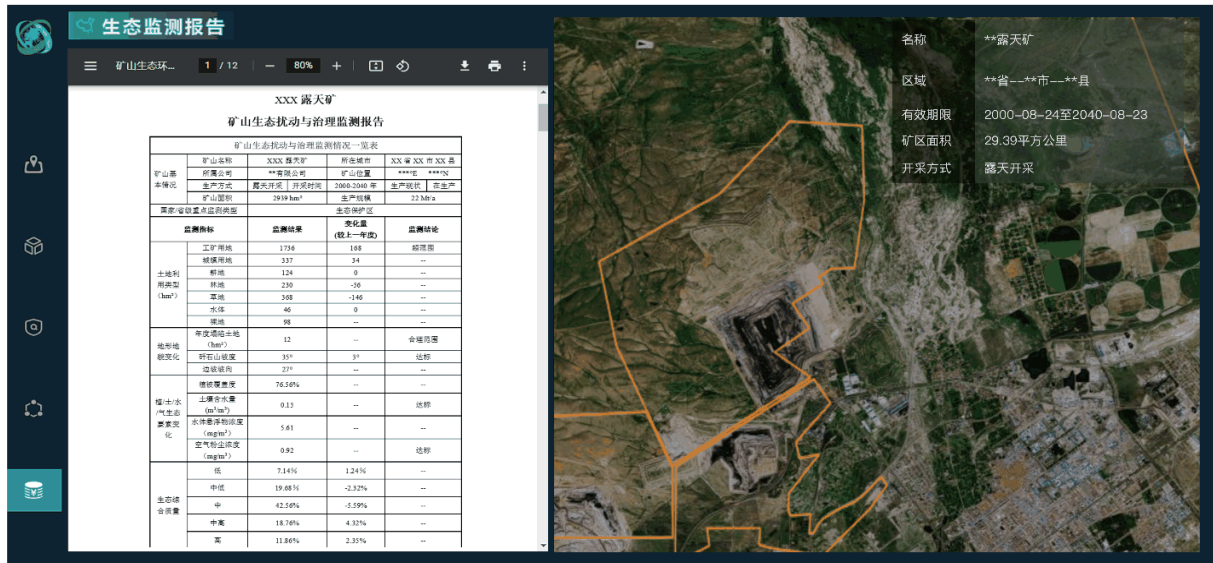


图9 矿山生态扰动与治理监测报告

Fig.9 Monitoring report of mine ecological disturbance and governance

运维管理6项核心功能,可以实现对区域性矿山的统一管理,对矿山监测数据的发布、可视化与调用服务,对矿山各生态要素参数的反演与监测,对矿山生态要素在空间、时间、要素3个维度的智能分析,并提供监测分析报告。综上,矿山生态天眼有望为推动矿山生态环境监测信息化进程提供支撑,提高矿山生态环境监测效率与质量。

未来,随着信息技术的进一步发展及用户需求的提高,矿山生态天眼也需要进一步优化和提升^[57]。首先,系统需要伴随着技术进步对现有功能模块进行完善,例如完善矿山生态环境监测网络,可以考虑纳入更多的传感器,如走航监测机器人、生态监测站等;提升系统智能分析能力,对采矿活动扰动下的矿山生态演变规律进行建模,挖掘生态环境变化的规律和知识,能够推演预测未来不同时期矿区生态参数的状态。然后,系统需要在现有基础上演化出辅助决策模块,可以直接为矿山生态环境监测与治理的各个决策环节提供参考。辅助决策模块考虑采用人工神经网络、深度学习、显著性检验等处理方法,通过融入专家经验建立专业性决策模型集,形成矿山生态环境“体检-诊断-治理-评估”决策体系。经过上述优化提升,最终构建一个矿山开采前-中-后全过程生态环境监测、感知、管理、计算、模拟、推演与决策的矿山生态环境数字孪生系统。

参考文献(References):

- [1] 武强,刘宏磊,赵海卿,等.解决矿山环境问题的“九节鞭”[J].煤炭学报,2019,44(1):10-22.
- [2] 刘峰,郭林峰,赵路正.双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J].煤炭学报,2022,47(1):1-15.
- [3] VARINDER Saini, RAVI P. Gupta, MANOJ K. Arora. Environmental impact studies in coalfields in India: a case study from Jharia coal-field[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1222-1239.
- [4] 彭苏萍,毕银丽.黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J].煤炭学报,2020,45(4):1211-1221.
- [5] 李树志,李学良,尹大伟.碳中和背景下煤炭矿山生态修复的几个基本问题[J].煤炭科学技术,2022,50(1):286-292.
- [6] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报,2021,46(7):2197-2211.
- [7] 卞正富,于昊辰,韩晓彤.碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J].煤炭学报,2022,47(1):449-459.
- [8] 雷少刚,卞正富,杨永均.论引导型矿山生态修复[J].煤炭学报,2022,47(2):915-921.

- guided restoration for mine ecosystem[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 915–921.
- [9] 李 军, 彭苏萍, 张成业, 等. 矿区生态环境定量遥感监测评价技术框架与应用[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(1): 9–25, 88.
LI Jun, PENG Suping, ZHANG Chengye, *et al.* Quantitative remote sensing-based monitoring and evaluation of the ecological environment in mining areas: technology framework and application[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(1): 9–25, 88.
- [10] KOPEĆ A, TRYBAŁA P, GLĄBICKI D, *et al.* Application of remote sensing, gis and machine learning with geographically weighted regression in assessing the impact of hard coal mining on the natural environment[J]. *Sustainability*, 2020, 12, (22): 9338.
- [11] 吴立新, 余接情, 胡青松, 等. 数字矿山与智能感控的统一空间框架与精确时间同步问题[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1584–1592.
WU Lixin, YU Jieqing, HU Qingsong, *et al.* Unified spatial framework and precise time synchronization for digital mine and mine intelligent perception-control[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1584–1592.
- [12] 王国法, 张铁岗, 王成山, 等. 基于新一代信息技术的能源与矿业治理体系发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(1): 176–189.
WANG Guofa, ZHANG Tiegang, WANG Chengshan, *et al.* Development of energy and mining governance system based on new-generation information technology[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(1): 176–189.
- [13] 中共中央国务院印发《数字中国建设整体布局规划》[EB/OL], http://www.gov.cn/zhengce/2023-02/27/content_5743484.htm, 2023/2023.
- [14] 章少民. 中国生态环境信息化: 30 年历程回顾与展望[J]. *环境保护*, 2021, 49(2): 37–44.
ZHANG Shaomin. Ecology and environment informatization in china: 30 years development and expectation[J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(2): 37–44.
- [15] 吴立新, 殷作如, 邓智毅, 等. 论 21 世纪的矿山: 数字矿山[J]. *煤炭学报*, 2000, 23(4): 337–342.
WU Lixin, YIN Zuoru, DENG Zhiyi, *et al.* Research to the mine in the 21st century: digital mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 23(4): 337–342.
- [16] 卢新明, 尹 红. 数字矿山的定义、内涵与进展[J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(1): 48–52.
LU Xinming, YIN Hong. Definition, connotations and progress of digital mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(1): 48–52.
- [17] 毕 林, 王晋森. 数字矿山建设目标、任务与方法[J]. *金属矿山*, 2019(6): 148–156.
BI Lin, WANG Jinmiao. Construction target, task and method of digital mine[J]. *Metal Mine*, 2019(6): 148–156.
- [18] 汪云甲. 矿区生态扰动监测研究进展与展望[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1705–1716.
WANG Yunjia. Research progress and prospect on ecological disturbance monitoring in mining area[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1705–1716.
- [19] 徐良骥, 刘曙光, 孟雪莹, 等. 煤矿沉陷水域重金属含量高光谱反演[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3539–3546.
XU Liangji, LIU Shuguang, MENG Xueying, *et al.* Hyperspectral inversion of heavy metal content in subsided waters of coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3539–3546.
- [20] 范立民, 吴群英, 彭 捷, 等. 黄河中游大型煤炭基地地质环境监测思路和方法[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1417–1427.
FAN Limin, WU Qunying, PENG Jie. Thoughts and methods of geological environment monitoring for large coal bases in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1417–1427.
- [21] 马明舟, 武文波, 樊 硕. 矿区基础地理信息系统的建立研究[J]. *测绘科学*, 2009, 34(S1): 153–154, 52.
MA Mingzhou, WU Wenbo, FAN Shuo. The establishment of mining area base geographic information system[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(S1): 153–154, 52.
- [22] 相诗尧, 陈宜金, 徐东晶. 基于 GIS 的露天煤矿多源空间数据管理系统[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(12): 1–4.
XIANG Shiyao, CHEN Yijin, XU Dongjing. Management system of multi-source spatial data in open pit coal mine based on GIS[J]. *Journal of Mine Automation*, 2015, 41(12): 1–4.
- [23] CHOI Y, BAEK J, PARK S. Review of GIS-based applications for mining: planning, operation, and environmental management[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(7): 2266.
- [24] KIM Sung-min, CHOI Yosoon, SUH Jangwon, *et al.* ArcMine: a GIS extension to support mine reclamation planning[J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 46: 84–95.
- [25] 简焯祥, 杨永均. 基于空间信息技术的矿区生态监测系统[J]. *中国矿业*, 2013, 22(5): 53–56.
JIAN Xuanxiang, YANG Yongjun. Ecological monitoring system in mining area based on space information technique[J]. *China Mining Magazine*, 2013, 22(5): 53–56.
- [26] 曹志国, 王瑞国, 何瑞敏. 基于 WEB-GIS 的矿区生态监测与管理信息系统[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(3): 161–163, 168.
CAO Zhiguo, WANG Ruiguo, HE Ruimin. Ecological environment monitoring and management information system of coal mining area based on WEB-GIS[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(3): 161–163, 168.
- [27] 吴振华. 基于 3S 集成技术的半干旱草原区大型露天煤炭基地景观格局优化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020: 1–3.
WU Zhenhua. Study on landscape pattern optimization of large-scale surface coal base in semi-arid steppe based on 3S integrated technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020: 1–3.
- [28] 杨泽发, 张庆君, 丁晓利, 等. 基于地球同步轨道 InSAR 每日生成 DEM 质量分析[J]. *Engineering*, 2020, 6(8): 913–925.
YANG Zefa, ZHANG Qingjun, DING Xiaoli, *et al.* Analysis of the quality of daily DEM generation with geosynchronous InSAR[J]. *Engineering*, 2020, 6(8): 913–925.
- [29] 张成业, 李 军, 雷少刚, 等. 矿区生态环境定量遥感监测研究进展与展望[J]. *金属矿山*, 2022, 51(3): 1–27.
ZHANG Chengye, LI Jun, LEI Shaogang, *et al.* Progress and prospect of the quantitative remote sensing for monitoring the eco-environment in mining area[J]. *Metal Mine*, 2022, 51(3): 1–27.
- [30] 肖 武, 陈文琦, 何厅厅, 等. 高潜水位煤矿区开采扰动的长时序过程遥感监测与影响评价[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 922–933.
XIAO Wu, CHEN Wenqi, HE Tingting, *et al.* Remote sensing monitoring and impact assessment of mining disturbance in mining area with high undergroundwater level[J]. *Journal of China*

- Coal Society, 2022, 47(2): 922–933.
- [31] LI Jun, QIN Tingting, ZHANG Chengye, *et al.* A new method for quantitative analysis of driving factors for vegetation coverage change in mining areas: GWDF-ANN[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1579.
- [32] 李全生. 蒙东草原区大型露天煤矿减损开采与生态修复关键技术[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(5): 1–15.
LI Quansheng. Key technologies for damage reduction mining and ecological restoration of large-scale open pit coal mines in grassland area of eastern inner mongolia[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(5): 1–15.
- [33] LILLESAND Thomas, KIEFER Ralph W, and CHIPMAN Jonathan. Remote sensing and image interpretation[M]. John Wiley & Sons, 2015: 150–194.
- [34] 孙群, 温伯威, 陈欣. 多源地理空间数据一致性处理研究进展[J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1561–1574.
SUN Qun, WEN Bowei, CHEN Xin. Research on consistency processing of multi-source geospatial data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1561–1574.
- [35] SANG Xiao, LI Jun, ZHANG Chengye, *et al.* Downscaling microwave soil moisture products with SM-RDNet for semiarid mining areas[J]. *Water*, 2022, 14(11): 1792.
- [36] 梁顺林, 李小文, 王锦地. 定量遥感: 理念与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 25–29.
- [37] WEN Song, WEI Song, GU Haihong, *et al.* Progress in the remote sensing monitoring of the ecological environment in mining areas[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(6): 1846.
- [38] 李军, 张艺霖, 张彩月等. 基于 LandTrendr 和 CCDC 算法的神东煤炭基地植被损毁识别对比分析[J]. *金属矿山*, 2023, 52(1): 55–64.
LI Jun, ZHANG Yicong, ZHANG Caiyue, *et al.* Applicability analysis of Landtrendr and CCDC algorithms for vegetation damage identification in Shendong coal base[J]. *Metal Mine*, 2023, 52(1): 55–64.
- [39] 包妮沙, 李秋玥, 杨天鸿, 等. 耦合多因子的地表生态状况指数在干旱半干旱区露天矿的应用效果评价[J]. *金属矿山*, 2023, 52(1): 40–54.
BAO Nisha, LI Qiuyue, YANG Tianhong, *et al.* Evaluation of the application effects of land surface ecological status indices based on Integrated multi-factor in open-pit mines in arid and semi-arid areas[J]. *Metal Mine*, 2023, 52(1): 40–54.
- [40] LI Deqing, MEI Honghui, SHEN Yi, *et al.* ECharts: a declarative framework for rapid construction of web-based visualization[J]. *Visual Informatics*, 2018, 2(2): 136–146.
- [41] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. *资源科学*, 2004, 28(4): 153–159.
LI Miaomiao, WU Bingfang, YAN Changzhen, *et al.* Estimation of vegetation fraction in the upper basin of miyun reservoir by remote sensing[J]. *Resources Science*, 2004, 28(4): 153–159.
- [42] CHEN Yang, CAO Ruyin, CHEN Jin, *et al.* A practical approach to reconstruct high-quality Landsat NDVI time-series data by gap filling and the Savitzky–Golay filter[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 180: 174–190.
- [43] 覃志豪, ZHANG Minghua, ARNON Karnieli 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. *地理学报*, 2001, 55(4): 456–466.
QIN Zhihao, ZHANG Minghua, ARNON Karnieli, *et al.* Mono-
- window algorithm for retrieving land surface temperature from landsat TM6 data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 55(4): 456–466.
- [44] 朱云芳, 朱利, 李家国, 等. 基于 GF-1 WFV 影像和 BP 神经网络的太湖叶绿素 a 反演[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(1): 130–137.
ZHU Yunfang, ZHU Li, LI Jianguo, *et al.* The study of inversion of chlorophyll a in Taihu based on GF-1 WFV image and BP neural network[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(1): 130–137.
- [45] CHEN Liangchih, ZHU Yukun, PAPANDREOU George, *et al.* Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation[C]// In Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV), 2018: 833–851.
- [46] DU Shouhang, XING Jianghe, LI Jun, *et al.* Open-Pit mine extraction from very high-resolution remote sensing images using OM-DeepLab[J]. *Natural Resources Research*, 2022, 31(6): 3173–3194.
- [47] RONNEBERGER Olaf, FISCHER Philipp, and BROX Thomas. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]// In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention: Springer, 2015: 234–241.
- [48] ZHAO Hengshuang, SHI Jianping, QI Xiaojuan, *et al.* Pyramid scene parsing network[C]// In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2017: 2881–2890.
- [49] HE Kaiming, GKIOXARI Georgia, DOLLÁR Piotr, *et al.* Mask r-cnn[C]// In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 2017: 2961–2969.
- [50] ZHU Dongjun, XIA Shixiong, ZHAO Jiaqi, *et al.* Diverse sample generation with multi-branch conditional generative adversarial network for remote sensing objects detection[J]. *Neurocomputing*, 2020, 381: 40–51.
- [51] DU Shouhang, LI Wei, LI Jun, *et al.* Open-pit mine change detection from high resolution remote sensing images using DA-UNet++ and object-based approach[J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2022, 36(7): 512–535.
- [52] FU Gang, LIU Changjun, ZHOU Rong, *et al.* Classification for high resolution remote sensing imagery using a fully convolutional network[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(5): 498.
- [53] SUN Yuanheng, LI Jun, ZHANG Chengye, *et al.* Environment monitoring of mining area with comprehensive mining ecological index (CMEI): a case study in Xilinhot of Inner Mongolia, China[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2023, 30(7): 814–825.
- [54] NIE Xinran, HU Zhenqi, RUAN Mengying, *et al.* Remote-sensing evaluation and temporal and spatial change detection of ecological environment quality in coal-mining areas[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(2): 345.
- [55] TD/T 1036-2013, 土地复垦质量控制标准[S]. 中华人民共和国国土资源部.
- [56] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S]. 中华人民共和国生态环境部.
- [57] WANG Guofa, XU Yongxiang, REN Huaiwei. Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: Review and prospects. [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(2): 161–169.