基于自适应层次分析法的关退矿井资源智能评价系统设计与实现*

李丹丹[1,2],刘钦节[1,2],杨友兴[1,2],蓝天[1,2],张家驹[1,2],陈强[1,2]

(1.安徽理工大学 矿业工程学院, 安徽 淮南市 232001;
2.安徽关闭/废弃矿井资源开发利用工程研究中心, 安徽 淮南市 232001)

摘要:为解决关退矿井资源开发中评估方法主观性强、动态适应性差、评估效率低等问题,以"能源化、资源化、功能化"三化协同理念为指导,构建了"目标层-准则层-指标层"三层架构的多维度评价指标体系。综合利用层次分析法(AHP)、轻量梯度提升机(LightGBM)、孤立森林(iForest)等算法,构建了权重动态优化与一致性检验的智能化模型,并采用Java语言,基于Vue.js与Spring Boot框架,利用MySQL、Redis、Apache POI及Docker等技术,开发了自适应层次分析法的关退矿井资源智能评价系统,实现了数据导入、层次分析计算与结果可视化等功能,克服了传统评估方法中权重静态与人工干预过多的不足。针对龙东煤矿的实际条件进行案例分析,结果表明该系统能够准确反映矿井资源特征,并具有良好的实用性。研究结果可为关退矿井资源智能评价提供可复制的技术路径。

关键词:自适应层次分析法;智能评价系统;关退矿井;资源利用

中图分类号:TD80 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)08-0266-12

Design and Implementation of an Intelligent Evaluation System for Closed/Abandoned Mine Resources Based on Adaptive Analytic Hierarchy Process

Li Dandan[1,2], *Liu Qinjie*[1,2], *Yang Youxing*[1,2], *Lan Tian*[1,2], *Zhang Jiaju*[1,2], *Chen Qiang*[1,2]

(1.School of Mining Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
2.Anhui Engineering Research Center of Exploitation and Utilization of Closed/Abandoned Mine Resources, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: To solve the problems of strong subjectivity, poor dynamic adaptability, and low evaluation efficiency in the resource development of closed/abandoned mines, a multi-dimensional evaluation index system with a three-tier framework of "target layer, criterion layer, and index layer" was constructed under the guidance of the collaborative concept of "energy-oriented, resource-oriented, and function-oriented" utilization. By integrating algorithms such as Analytic Hierarchy Process (AHP), Light Gradient Boosting Machine (LightGBM), and Isolation Forest, an intelligent model for dynamic weight optimization and consistency check was constructed. The intelligent evaluation system for closed/abandoned mine resources based on adaptive AHP was developed using Java language, with the Vue. js and Spring Boot frameworks, and technologies including MySQL, Redis, Apache POI, and Docker. In the system, functions such as data import, hierarchical analysis calculation, and result visualization are realized, and the shortcomings of traditional evaluation methods, such as static weights and excessive manual intervention, are overcome. A case study was conducted under the actual conditions of the Longdong Coal Mine. The results show that the system can accurately reflect the characteristics of the mine resources and exhibits good practicality. The research results can provide a replicable technical path for the intelligent evaluation of closed/abandoned mine resources.

Key words: Adaptive Analytic Hierarchy Process, Intelligent evaluation system, Closed/abandoned mine, Resource utilization

---

* **收稿日期**:2025-10-21
基金项目:国家科技重大专项项目(2024ZD1004107);安徽理工大学研究生创新基金项目(2025cx2035)
作者简介:李丹丹(2002—),女,山西长治人,硕士,主要从事废弃矿井资源开发与利用方面的研究。E-mail:2726936929@qq.com
通信作者:刘钦节(1980—),男,山东临沂人,博士,教授,主要从事废弃矿井资源开发利用与深部岩石力学等方面的研究。E-mail:qjliu@aust.edu.cn

0 引言

煤炭长期在能源体系中发挥稳定器和压舱石功能,不应简单地实施“去煤化”策略,而应积极探索减排与中和相结合的新型发展路径,对关退矿山的资源进行合理的开发利用。在“双碳”目标持续推进和煤炭行业供给侧改革不断深化的背景下,全国关停矿井数量不断攀升,这些矿井中仍蕴藏着丰富的资源,其高效与科学开发已成为重要课题[1-4]。面对不同区域地质条件、资源类型和发展需求的显著差异,亟须系统开展关停矿井资源评价与开发模式的创新。

目前,国内外学者在关退矿井资源利用领域的研究已取得一定进展。袁亮等[5]充分释放废弃矿井负碳增能潜力,提出废弃矿井绿色低碳多能互补体系。谢友泉等[6]提出关退矿井资源利用应走绿色发展的道路,注重废弃矿井资源开发和生态保护的协调发展。张佳启等[7]分析了关退矿井资源化综合利用的必要性和适用性,为关退矿井资源化综合利用提供参考。崔超群[8]借助模型揭示了区域关退矿井再利用潜力特征和空间分布规律,推动了行业的发展。吉莉等[9]给出了关闭矿山地下空间资源划分标准,提出了关闭矿山资源定量评估方法,为关闭矿山企业提供转型脱困和可持续发展的新思路。冯飞胜等[10]使用Adaboost迭代算法建立了关退矿井利用的可能性等级模型,并将模型应用于海州露天矿三位一体治理及废弃巷道储能电站建设。何虎军等[11]基于博弈论-改进的未确知测度理论构建了废弃矿井地下水污染风险评价模型,为废弃矿井地下水污染风险综合评价提供了一种新的思路。Ji等[12]建立了矿山资源分类体系,并提出了关退矿山改造模式的确定方法。Shi等[13]为在关退矿山建设光伏开发了合适区域选址模型,为其可持续利用提供了一个全面的框架。He等[14]引入最佳最劣方法,并结合解释结构模型对关退矿井升级能源项目进行生命周期风险评估。上述研究为关退矿井资源评价与利用提供了多元化的方法,但仍存在评价体系不全面、评价指标参数不统一、开发利用模式研究短缺等问题。笔者所在团队针对上述问题进行了研究,根据地下空间的差异特性,提出了一种地下空间分类分级精准利用模式;采用层次分析法建立了废弃矿井地下空间物理储能方式评价指标体系和旅游资源开发可行性评价模型;同时构建了关退矿井资源分类分级开发利用评价指标体系,并在龙东煤矿开展了可行性验证[15-18]。然而,现有研究仍存在关退矿井资源评价的传统方法与智能化需求脱节的问题,主要体现在人工干预过多、评估效率低下、权重自适应能力差等方面。

基于上述问题,本研究借鉴“能源化、资源化、功能化”三化协同理念,将层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)与轻量梯度提升机(Light Gradient Boosting Machine, LightGBM)、孤立森林(Isolation Forest, iForest)等算法融合,构建多层级评价体系模型,开发自适应层次分析法的关退矿井资源智能评价系统,并针对龙东煤矿的实际条件进行案例分析,验证系统的实用性,为关退矿井资源的科学评估与精准利用提供借鉴。

1 关退矿井资源智能评价体系构建

1.1 核心矛盾

关退矿井资源评价面临传统方法与智能化需求脱节的核心矛盾,主要体现在以下三个方面。

(1) 多源数据融合与静态评价框架的冲突。关退矿井资源数据具有多模态特征,包括地质勘探数据、开发利用条件、附近资源相关情况等,数据动态变化频繁。传统评价模型(如层次分析法)采用固定指标体系,缺少多源数据动态校准机制,使得评价结果与实际资源价值产生偏差。

(2) 权重计算的动态适应性不足。现有评价模型依赖预设专家判断矩阵,权重分配难以根据矿井类型差异、开发阶段演进进行自适应调整优化。这种静态权重机制影响评价结果的时效性。

(3) 专家知识非结构化。专家经验与历史案例数据未被有效转化为可计算的知识图谱,缺乏权重演化规则库、异常特征模式库等结构化知识支撑,导致智能评价系统难以实现知识驱动的评价决策升级。

1.2 关退矿井智能评价体系设计

本研究构建了智能评价体系的四层架构,从理论层、方法层、技术层和系统层等层面,为关退矿井资源评价提供依据。各层相互关联、协同运作,共同支撑起整个智能评价体系。

1.2.1 三化协同评价理论构建

在理论层方面,本研究构建的评价指标体系在“能源化、资源化、功能化”三化协同开发理念的基础上进行了优化。本研究融合系统科学与智能理论,遵循“系统性原则、可操作性原则、动态适应性原则”的逻辑,构建了基于“目标层-准则层-指标层”架构的多维度评价指标集,有效解决了传统单维度评价无法全面反映资源特性的局限性,使评价结果更科学。

(1) 构建评价指标集。

关退矿井分类评价指标体系如图 1 所示,目标层为关退矿井分类评价;准则层由能源化、资源化和功能化三个维度组成,对资源进行多维度评估;指标层进一步细化成 9 个具体指标。关退矿井分级评价指标体系如图 2 所示,目标层是关退矿井分级评价;准则层为开发优先级评估综合指标;指标层细化为资源条件、开采条件、安全条件 3 个指标,且各指标根据能源类、资源类和功能类的不同特点进一步细分具体参数,从而形成系统化的评价模型。

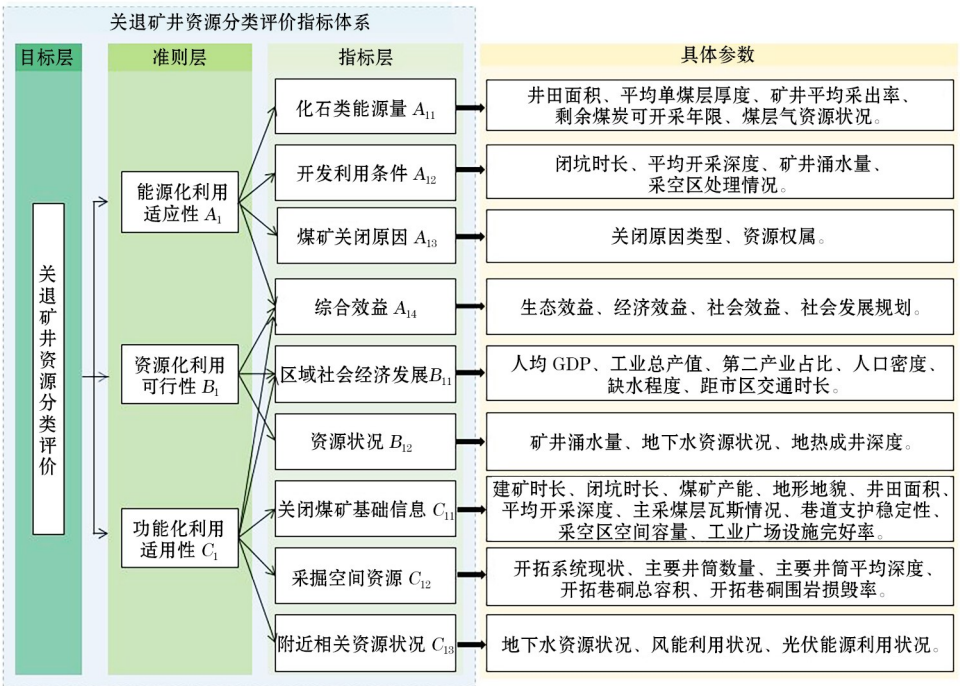


图 1 关退矿井分类评价指标体系

Fig.1 Classification evaluation index system for closed/abandoned mines

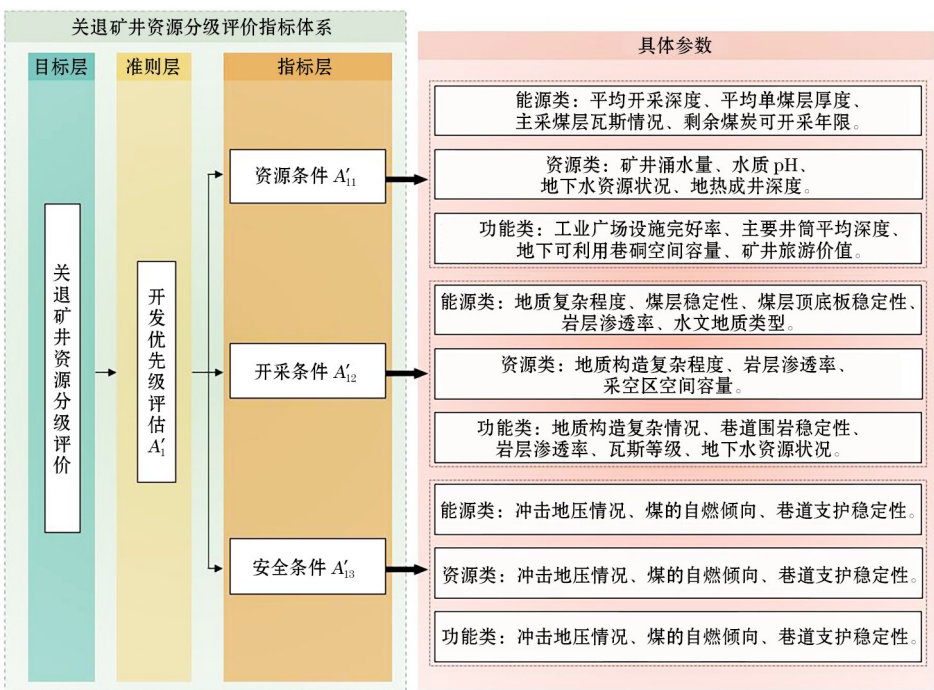


图 2 关退矿井分级评价指标体系

Fig.2 Graded evaluation index system for closed/abandoned mines

(2) 划分资源评价标准论域。

根据遗留资源状况和矿井条件,将关退矿井遗留资源划分为五类:A 类能源化利用的关退矿井、B 类资源化利用的关退矿井、C 类功能化利用的关退矿井、D 类综合利用的关退矿井、E 类暂不可利用的关退矿井。采用百分制原则进行评判,评判依据见表 1。

表 1 资源类型评判依据[18]

Table 1 Resource type evaluation basis[18]

关退矿井类型	综合评价得分
A 类能源化利用	能源类得分≥80 且其他两类得分<80
B 类资源化利用	资源类得分≥80 且其他两类得分<80
C 类功能化利用	功能类得分≥80 且其他两类得分<80
D 类综合利用	两类或以上得分≥80
E 类暂不可利用	所有分类计算得分均<80

根据关退矿井资源开发利用分类结果,进一步收集整理关退矿井的具体开发利用方式,并通过确定评价指标体系、利用自适应层次分析法等对关退矿井资源利用难易程度或时间规划序列进行综合评价,将每一类关退矿井资源开发利用等级细分为四个等级:Ⅰ级优先开发[85,100]、Ⅱ级当前开发[70,85)、Ⅲ级中期规划开发[60,70)、Ⅳ级远期规划开发[0,60)。

1.2.2 智能评价方法

在方法层方面,融合层次分析法与多源数据智能处理方法,基于层次分析法,通过历史数据驱动和机器学习算法增强传统模型的适应性,具体通过以下机制实现。

(1) 历史数据驱动的权重优化。为解决传统方法权重静态化的问题,本研究采用 LightGBM 算法确定初始权重矩阵。LightGBM[19-20]是一种通过基于梯度的单边采样和互斥特征捆绑的高度优化的决策树算法,能够以并行训练的方式高效地完成分类和回归任务。每次应用系统进行矿井评价后会自动保存历史评价数据至历史案例库,并以此为训练集,利用 LightGBM 算法构建从矿井特征到 AHP 指标权重的映射模型。模型以矿井特征向量为输入,以经专家共识验证的可靠权重为监督学习的训练标签。当输入新矿井数据时,通过学习历史案例中“能源化-资源化-功能化”三个维度的权重分布,系统会根据矿井类型从数据库中匹配相似案例,自动形成初始权重矩阵。

(2) 机器学习动态权重校准。形成初始权重矩阵后,需针对当前评价对象的特殊性进行调整。本研究构建了基于梯度提升决策树(Gradient Boosting Decision Tree, GBDT)的实时权重校准模型。梯度提升决策树是一种基于集成学习的高效算法,通过迭代组合弱学习器逐步修正模型误差,被广泛应用于量化特征差异[21-22]。GBDT 模型对输入的矿井特征数据进行处理,输出综合差异度量值以量化当前评价数据与历史案例的特征差异。当某类指标特征值偏离群体均值阈值时,系统自动对关联指标权重进行动态修正。正向偏离时降低相关约束指标权重,负向偏离时提升对应指标权重,修正幅度由特征偏离程度与历史影响因子协同确定。整个过程无需人工干预,实现权重分配从“专家主观赋值”到“数据智能适配”的转变。

(3) 智能一致性检验增强。为保证生成的权重矩阵符合一致逻辑性,将传统一致性比率(CR)计算与 iForest 算法结合,构建双层校验机制。iForest 是一种有效的异常点检测算法,它基于随机森林的原理,通过随机划分特征空间以“孤立”观测点,特别适用于处理高维数据[23-24]。当 $CR \geq 0.1$ 时,系统首先通过孤立森林识别异常打分数据,标记为可疑数据点,并触发历史案例回溯,即检索历史上同类型矿井的判断矩阵,利用加权平均法生成修正矩阵,如复用相似矿井判断矩阵的 70%权重,同时保留专家原始打分的 30% 主观判断。

1.2.3 智能评价支撑技术

技术层为整个智能评价体系提供技术保障,包括数据处理、算法加速和可视化等多方面技术,提升运行效率和结果展示效果。技术映射配置见表 2,采用 Apache POI 结合正则表达式智能解析 Excel 打分表,自动提取矿井名称、指标类型等关键信息,提升数据处理效率。利用 Redis 缓存高频访问判断矩阵和权重计算结果,测试表明,重复计算效率得到很大改善,评价时间明显缩短,系统响应速度提高。基于 ECharts 实现可视化,直观展示不同关退矿井的分级、分类得分和评价结果,为资源开发策略制定提供依据。

表 2 技术映射配置

Table 2 Technology mapping configuration

方法层组件	技术层实现	功能说明
数据解析	Apache POI+正则表达式	Excel 打分表智能解析
历史权重匹配	Redis 缓存	高频矩阵数据加速查询
异常检测	孤立森林算法	专家打分异常值识别
动态权重校准	GBDT 模型	指标权重实时修正
结果可视化	ECharts	多维评分图生成

1.2.4 智能评价支撑工具

系统层聚焦于评价工具的构建,通过开发智能评价系统实现数据实时采集和评价流程自动化。构建涵盖数据导入、智能计算及结果可视化的闭环系统,整合智能采集与人工录入数据,调用自适应层次分析法完成权重计算与综合评价,以可视化形式输出结果,为系统设计提供功能原型,实现关退矿井资源评价流程的自动化,提升评价效率。

2 关退矿井资源智能评价平台设计

2.1 系统总体架构

本研究采用分层架构设计实现数据采集至评价决策全流程智能化管理,如图 3 所示,系统由展示层、应用层、服务层、算法层、数据层及基础设施层组成。展示层运用 Vue.js 框架搭建响应式前端界面,支持网页端访问;应用层基于 Spring Boot 微服务架构封装数据导入、专家评分、资源分类、等级评定等核心业务逻辑;服务层整合 Apache POI 文档处理、Spring Cache 缓存管理等基础服务组件;算法层采用改进的 AHP 评价模型,通过算法融合,实现权重分配从“静态专家依赖”到“数据智能驱动”的转变;数据层采用 MySQL 关系型数据库存储专家评分和评价结果,引入 Redis 缓存机制提升系统响应速度;基础设施层依托 Docker 容器化技术实现快速部署,结合 Spring Security 安全框架和 JWT 令牌机制构建多层次安全防护体系。同时充分考虑系统的可扩展性与灵活性,通过标准化 RESTful API 实现各层松耦合通信,实现评价流程可视化、算法计算标准化及系统管理规范化,为关退矿井资源评价提供高效可靠方案。

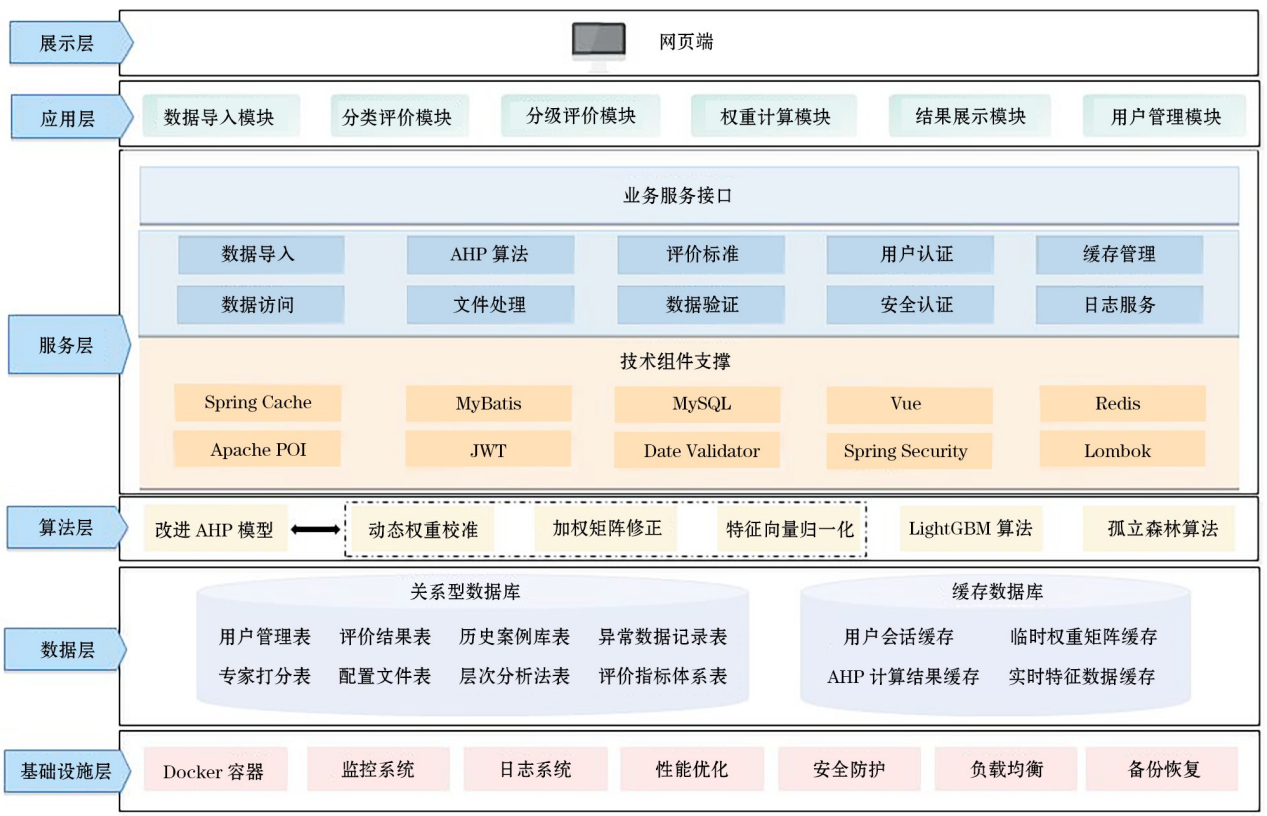


图 3 关退矿井资源智能评价平台总体架构

Fig.3 The overall architecture of closed/abandoned mine resource intelligent evaluation platform

2.2 系统总体设计

2.2.1 功能模块设计

关退矿井资源分类、分级与评价系统采用模块化架构,通过功能分解实现了系统的高内聚、低耦合特性。系统功能模块设计充分考虑用户角色差异和业务需求,将整体架构划分为用户登录、专家打分管理、自适应 AHP 计算、评价结果查询、用户管理五大核心部分,系统总体功能模块设计如图 4 所示。

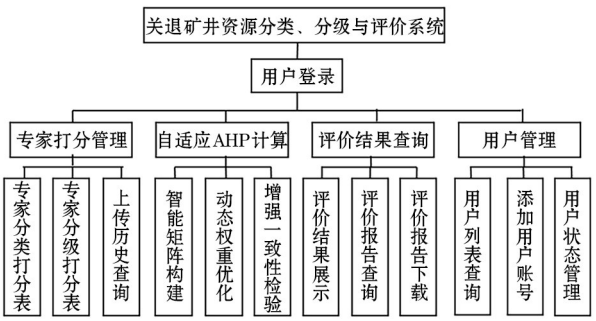


图 4 系统总体功能模块设计

Fig.4 System overall function module design

2.2.2 业务流程设计

业务流程分为用户操作与数据流转两部分。用户操作流程如图 5 所示,对系统权限采用分层控制。

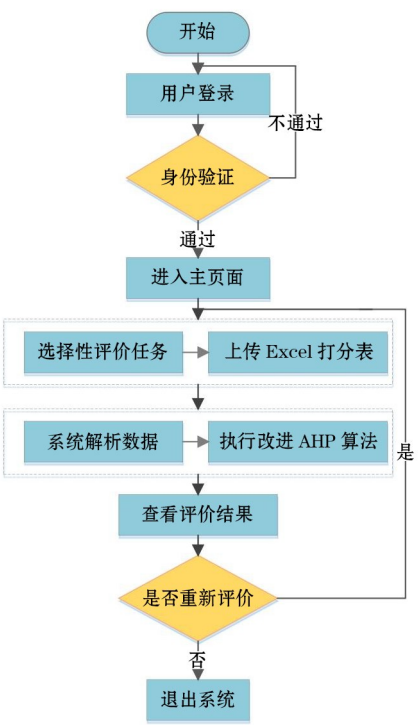


图 5 用户操作流程

Fig.5 User operation flow

用户注册登录完成身份认证后下载预设指标的 Excel 模板,填写数据后可将表格直接上传至系统;系统经自动化校验保障数据格式与逻辑合规;随后结合改进层次分析法与智能算法构建判断矩阵、计算权重并完成一致性检验,最终生成含可视化图表与开发建议的标准化评价报告。

数据流转层面构建“输入-处理-输出”闭环管理:专家打分数据经前端 Vue.js 接收后由 Spring Boot 后端过 Apache POI 结合正则表达式智能解析并存储至 MySQL 数据库,同时利用 Redis 缓存机制加速高频数据读取。AHP 计算时,系统通过 LightGBM 算法挖掘历史案例的权重分布规律,匹配相似的矿井类型并生成初始权重矩阵。借助 GBDT 量化与历史案例的特征差异,当特征值偏离群体均值阈值时,自动触发权重动态修正机制。一致性检验采用 CR 值计算和孤立森林算法双层校验机制,当 $CR \geqslant 0.1$ 时,通过孤立森林算法识别可疑数据,回溯历史同类型矿井判断矩阵并进行矩阵修正。最终评价结果以 JSON 格式回传前端,经 ElementUI 渲染实现可视化展示,并借助文件流机制生成结果报告,实现从数据采集到结果输出的全流程闭环处理。系统分层数据流闭环图如图 6 所示。

2.3 数据库设计

2.3.1 E-R 图设计

在数据库设计过程中,实体-联系(Entity-Relationship, E-R)图设计可减少数据库中的冗余数据,实现数据库资源的有效利用,提高数据库执行速度,为开发者提供清晰有序的途径规划与数据库架构[25-28]。开发者通过精准界定实体及其关联可确保数据库逻辑完整性,以满足用户需求。系统 E-R 图如图 7 所示,包括用户、专家打分表、评价指标体系、层次分析法计算、异常数据记录、历史案例库、评价结果七大核心实体及各实体的属性。实体关系方面,用户与专家打分表、层次分析计算、评价结果均为一对多关系,即用户可上传多个专家打分表、管理多次计算、查看多项结果。评价指标体系与专家打分表为一对多的关系,即每个指标对应多条打分记录。专家打分表与层次分析计算为多对一关系,专家打分表作为层次分析计算的输入来源。层次分析计算与评价结果呈一对一关系,层次分析计算输出对应唯一的评价结果;层次分析计算与历史案例库和异常数据呈一对多关系,即一次计算可参考多个历史案例,产生多条异常记录。异常数据记录与专家打分表和评价指标体系都为多对一的关系,便于识别问题打分记录与指标。

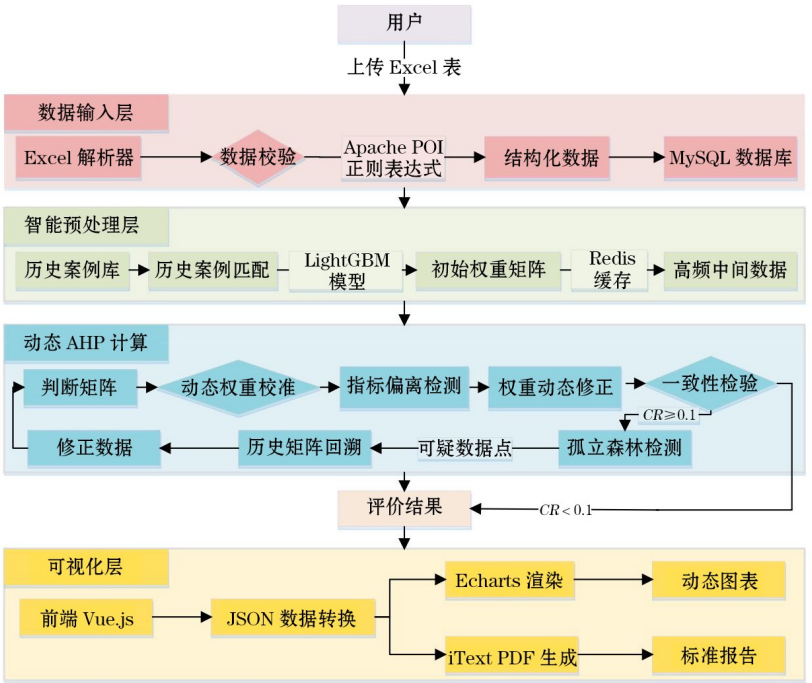


图 6　系统分层数据流闭环图

Fig.6　Closed-loop diagram of the system hierarchical data flow

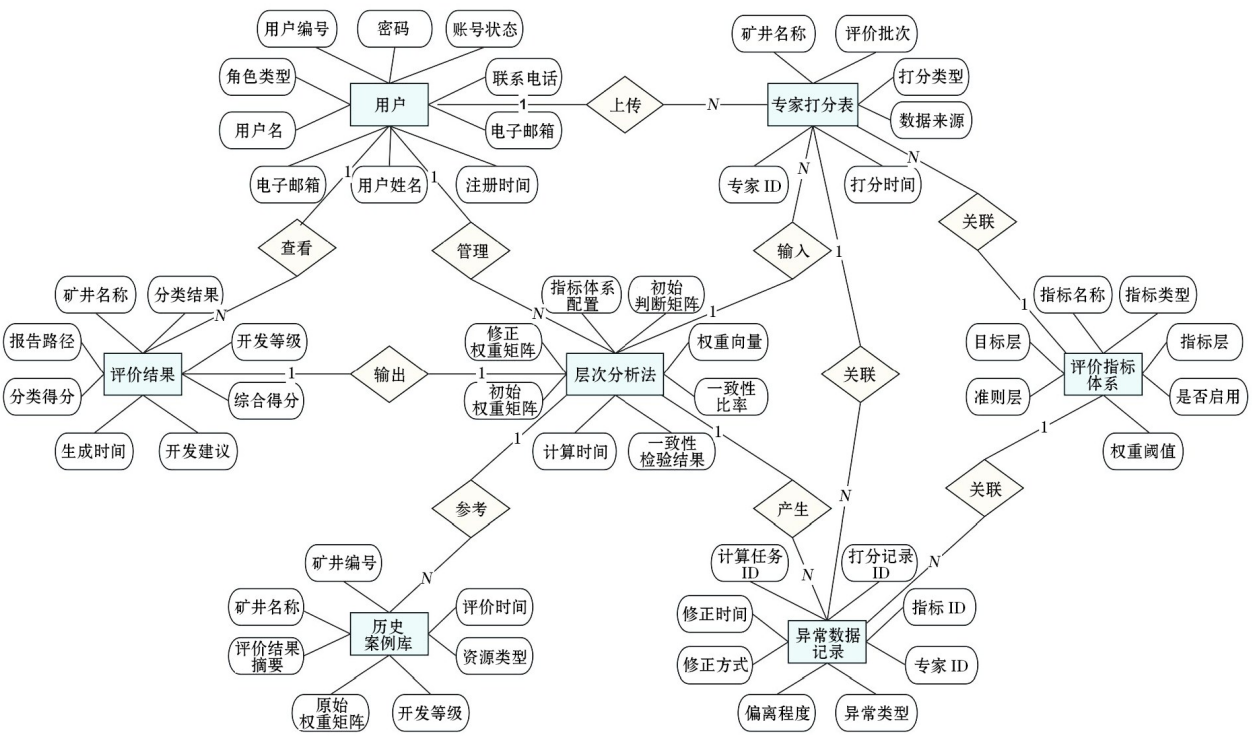


图 7　系统 E-R 图

Fig.7　E-R diagram of the system

2.3.2　数据库逻辑设计

系统采用 Excel 表导入专家打分等数据,并基于 MySQL 8.0 构建数据库,实现评价数据的长期存储和管理。数据库设计包含 10 个主要数据表,其表间关联结构见表 3,各数据表通过主键与索引建立关联,形成完整的数据存储框架。

表 3 数据库逻辑设计

Table 3 Database logic design

序号	数据表名称	数据属性
1	专家分类打分表	矿井 ID、评价批次、创建时间、专家 ID、评价指标、资源类型、专家打分值、备注等。
2	专家分级打分表	矿井 ID、评价批次、创建时间、专家 ID、评价指标、等级划分、专家打分值、备注等。
3	用户管理表	用户名、账号、密码、头像、手机号、职位、邮箱、用户状态、创建时间等。
4	用户角色表	角色名称、角色描述、账号状态等。
5	评价指标体系表	指标名称、指标类型、权重阈值、是否启用等。
6	历史案例库表	矿井 ID、评价批次、评价时间、资源类型、等级划分、权重矩阵等。
7	层次分析法表	矿井 ID、初始判断矩阵、权重类型、一致性比率等。
8	配置文件表	主键、配置参数名称、配置参数值、路径等。
9	异常数据记录表	异常类型、修正方式、修正时间、备注等。
10	评价结果表	分类评价结果、推荐类型、分级评价结果、综合得分、开发等级、备注等。

3 系统实现与案例验证

3.1 平台功能模块开发

基于平台功能设计需求与业务逻辑,为保障系统高效运行与用户体验,在平台功能模块开发过程中,需实现以下五大核心功能。

(1) 在用户登录模块的设计中,采用基于角色的访问控制方法,专门设置了管理员和专家两个不同的身份认证入口。该模块完整涵盖了用户注册和登录功能:新用户首次使用系统时,需在注册页面填写账号、密码等必要信息,还要补充姓名、电子邮箱和手机号码,以此完善个人身份资料;注册完成后,用户便能使用注册时设置的账号和密码登录系统,通过身份验证后,进入符合自身权限的系统首页。这种设计既能保证每个用户身份真实且不重复,又能根据不同角色划分权限,为后续根据用户角色展示不同业务功能做好准备。用户成功通过登录验证后会进入系统主页面,系统功能首页界面如图 8 所示。



图 8 系统首页界面

Fig.8 Homepage interface of the system

(2) 在专家打分管理模块建立标准化数据录入渠道,规范矿井名称、评价批次等基础信息的录入。借助 Excel 模板导入功能快速采集专家评价数据,采用结构化数据录入方式,允许用户分别上传合规的分类打分表与分级打分表。系统自动校验数据格式及内容完整性,确保输入数据契合 AHP 计算所需的一致性要求,为后续数据分析提供可靠数据保障。

(3) 自适应层次分析法计算模块采用动态矩阵配置方式,能够灵活调整并实时更新多个矿区的评价指标体系。模块结合智能算法设计了可按需设定的判断矩阵生成方法,针对不同矿区的评价指标,分别计算出对应的权重值。该模块依据专家实时提交并统一处理后的打分数据,自动完成分类评价与分级评价的运算工作。通过执行一致性检验确保计算结果的准确性,最终输出分类、分级得分及综合评价结果的结构化数据。

(4) 评价结果模块以层次分析法搭建的评价体系为基础,对矿井资源进行量化评估,并通过多种方式直观呈现评估结果。用户可随时查看资源类、功能类、能源类三类资源的单项得分,以及资源的综合分级情况。系统将评价结果以数据表格和可视化图表相结合的形式输出,方便查阅分析。针对不同矿区,系统会自动生成标准格式的评价报告,报告内容包含评价总体情况介绍、各类资源评价分析、资源等级评定、潜在风险分析,以及具有针对性的改进建议等五个主要部分。

(5) 用户管理模块为管理员提供全面的用户信息管理工具。管理员可查看系统中所有用户基本信息,并支持对用户账号进行创建新账号、注销或停用账号、修改用户信息及按特定条件查找用户等全流程管理操作。

3.2 案例验证

3.2.1 案例背景

龙东煤矿隶属于上海大屯能源股份有限公司,地处苏鲁交界的微山湖畔,该煤矿已关退,其资源特征见表 4,是典型的多资源赋存关退矿井。验证目标为测试关退矿井资源智能评价系统分类、分级评价的准确性与实用性。

表 4 龙东煤矿资源特征

Table 4 Resource characteristics of Longdong Coal Mine

信息名称	具体参数
工业总价值/亿元	1 012
建矿时长/a	43
闭矿时长/a	2.9
巷道支护稳定性	良好
工业场地占地面积/km^2	37.78
工业广场设施完好率/%	75
开采深度/m	−154～−580
开拓巷硐围岩损毁率/%	<10
地形地貌	平原
主采煤层瓦斯情况	低瓦斯
开采系统现状	保存一般
主要井筒数量/个	4
煤层气残留	良好
地下空间	较完整
地下水资源状况	一般
风能利用状况	一般
光伏能源利用状况	一般
生态效益	优良
经济效益	一般
社会效益	优良

3.2.2 系统应用

本文基于已建立的指标体系,通过现场调研、查阅文献、专家打分等方法采集整理了龙东煤矿资源指标打分数据。上传 Excel 打分表至专家打分管理模块后,系统自动完成数据解析和格式校验。调用改进 AHP 算法,动态校准当前指标权重和双层检验后,生成分类、分级评价结果,如图 9 所示。



(a) 分类评价结果



(b) 分级评价结果

图 9 龙东煤矿分类、分级评价结果

Fig.9 Classification and graded evaluation results of Longdong Coal Mine

3.2.3 结果分析

龙东煤矿能源类、资源类、功能类得分分别为73.61,75.62,83.62,根据表1评判标准判定为C类功能化利用的关退矿井;综合得分为81.2,对应开发等级为Ⅱ级当前开发,得分与该煤矿地下空间完整、可采煤层厚度大等特征吻合。

龙东煤矿的最终得分81.2与文献[18]中的评价结果83.94基本吻合,验证了系统的可靠性。但本研究通过引入智能算法,使评价效率和一致性检验效果得以明显提升,有效降低了人工主观性和数据更新滞后性,提高了评价的高效性与准确性。此外,评级结果也与文献[29]提出的"一核两翼多点"立体开发利用模式及结论相呼应,进一步验证了系统的实用性,可为同类矿井遗留资源开发利用提供重要参考。

4 结论

本研究针对关退矿井资源开发利用的复杂性,开发了一套基于自适应层次分析法的智能评价系统,得出的主要结论如下。

(1) 基于"能源化、资源化、功能化"三化协同理念,构建了多层级评价指标体系,将层次分析法与LightGBM、孤立森林等机器学习算法相结合,实现了评价权重的动态调整和一致性检验的智能化,改善了传统方法中权重静态和人工干预过多的问题。

(2) 基于Vue.js与Spring Boot架构,采用Java语言,综合利用MySQL、Redis、Apache POI、Docker等技术开发了关退矿井资源智能评价系统,实现了数据导入、层次分析法计算、结果可视化等功能。通过对龙东煤矿的实际案例分析,证实了系统的评价结果与资源特征高度吻合,验证了系统的准确性。

(3) 研究结果可为关退矿井资源的科学评估与精准利用提供借鉴,对推动国家矿产资源可持续发展与能源转型发展具有重要意义。后续研究可进一步探索建立评价标准的动态更新机制,并推动系统与地质勘探、生产管理、安全评价等平台的有机集成,以形成更完整的决策支持生态。

参考文献(References):

[1] 袁亮,赵毅鑫."我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用研究"专题特邀主编致读者[J].煤炭学报,2022,47(6):2125-2126.
Yuan Liang, Zhao Yixin. Special issue on "precision development and utilization of resources in closed/abandoned mines in China": a message from the guest editors[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(6):2125-2126.

[2] 袁亮,张农,阚甲广,等.我国绿色煤炭资源量概念、模型及预测[J].中国矿业大学学报,2018,47(1):1-8.
Yuan Liang, Zhang Nong, Kan Jiaguang, et al. The concept, model and reserve forecast of green coal resources in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2018,47(1):1-8.

[3] 袁亮.废弃矿井资源综合开发利用助力实现"碳达峰、碳中和"目标[J].科技导报,2021,39(13):1.
Yuan Liang. Comprehensive development and utilization of abandoned mine resources, help achieve the goal of "emission peak and carbon neutralization"[J]. Science & Technology Review,2021,39(13):1.

[4] 袁亮,杨科.再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J].煤炭学报,2021,46(1):16-24.
Yuan Liang, Yang Ke. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(1):16-24.

[5] 袁亮,张通,张庆贺,等.双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J].煤炭学报,2022,47(6):2131-2139.
Yuan Liang, Zhang Tong, Zhang Qinghe, et al. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(6):2131-2139.

[6] 谢友泉,高辉,苏志国,等.废弃矿井资源的可再生能源开发利用[J].可再生能源,2020,38(3):423-426.
Xie Youquan, Gao Hui, Su Zhiguo, et al. Exploitation and utilization of renewable energy from waste mine resources[J]. Renewable Energy Resources,2020,38(3):423-426.

[7] 张佳启,赵国贞,刘少炜,等.国内外废弃矿井资源化利用现状与关键技术研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):174-184.
Zhang Jiaqi, Zhao Guozhen, Liu Shaowei, et al. Current status and key technologies of resource utilization of abandoned mines at home and abroad[J]. Mining Research and Development,2024,44(5):174-184.

[8] 崔超群.废弃煤矿再利用评价模型及其应用研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2021.
Cui Chaoqun. Research on evaluation models for abandoned coal mine reutilization and their applications[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing,2021.

[9] 吉莉,刘峰,尚建选,等.关闭矿山地下空间资源定量评估与再利用途径[J].煤炭科学技术,2022,50(5):281-289.

Ji Li, Liu Feng, Shang Jianxuan, et al. Quantitative evaluation and reuse path of underground space resources in closed mines[J]. Coal Science and Technology,2022,50(5):281-289.

[10] 冯飞胜,张继强,王于.中国关闭/废弃矿井的分类利用与等级评价[J].科技导报,2022,40(22):105-112.
Feng Feisheng, Zhang Jiqiang, Wang Yu. Classified utilization and grade evaluation of closed/abandoned mines in China[J]. Science & Technology Review,2022,40(22):105-112.

[11] 何虎军,田洪旭,王景昊,等.基于博弈论-改进的未确知测度理论的废弃矿井地下水污染风险评价[J].中国矿业,2025,34(9):196-202.
He Hujun, Tian Hongxu, Wang Jinghao, et al.Evaluation of groundwater pollution risk for abandoned mines based on game theory and improved uncertainty measure theory[J]. China Mining Magazine,2025,34(9):196-202.

[12] Ji Li , Dong Jihong, Kienberger Thomas, et al. Quantitative assessment and development utilization modes of space resources in closed and abandoned mines [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,2023,45(4):10366-10380.

[13] Shi Fang, Li Xiaodan, Li Mingrui, et al. Site selection strategy for photovoltaic power plants construction on gangue hills: an integrated method based on GIS and AHP-TOPSIS[J]. Energy Strategy Reviews,2025,59:101722.

[14] He Jiaming, Wu Yunna, Yong Xingkai, et al. Lifecycle risk assessment on the sustainable development of upgrading energy projects using abandoned mines: an ISM-BWM method [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments,2022, 54: 102833.

[15] 刘钦节,王金江,杨科,等.关闭/废弃矿井地下空间资源精准开发利用模式研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(4):71-78.
Liu Qinjie, Wang Jinjiang, Yang Ke, et al.Research on the model of accurate exploitation and utilization of underground space resources in closed/abandoned mines [J]. Coal Geology & Exploration,2021,49(4):71-78.

[16] 修雅馨,刘钦节,付强,等.废弃矿井地下空间物理储能方式对比与优选[J].绿色矿冶,2024,40(2):6-13.
Xiu Yaxin, Liu Qinjie, Fu Qiang, et al. Comparison and optimization of physical energy storage methods in underground space of abandoned mines[J]. Green Mining and Metallurgy,2024,40(2):6-13.

[17] 韩运.废弃矿井地下空间旅游资源开发可行性评价模型构建与应用[D].淮南:安徽理工大学,2022.
Han Yun. Construction and application of feasibility evaluation model for tourism resources development in abandoned mine underground space[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology,2022.

[18] 刘钦节,郭少波,修雅馨,等.关闭/废弃矿井资源分类、分级开发利用评价指标体系研究[J].矿业安全与环保,2025,52(6):121-132.
Liu Qinjie, Guo Shaobo, Xiu Yaxin, et al. Research on the evaluation index system for the classified and graded development and utilization of resources in closed or abandoned mines [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2025,52(6):121-132.

[19] 尹超,李宝,蔡士雪,等.融合特征优选与LightGBM算法的时序Sentinel-2耕地提取研究[J].测绘科学,2025,50(8):124-133.
Yin Chao, Li Bao, Cai Shixue, et al. Research on cultivated land extraction from time-series Sentinel-2 images by combining feature optimization and LightGBM[J]. Science of Surveying and Mapping,2025,50(8):124-133.

[20] 臧燕杰.基于IWOA-LightGBM的煤自燃程度预测方法研究[J].中国安全科学学报,2025,35(增刊1):64-70.
Zang Yanjie. Research on prediction method of coal spontaneous combustion degree based on IWOA-LightGBM [J]. China Safety Science Journal,2025,35(Suppl.1):64-70.

[21] 张国晶,颜青松,秦文强,等.基于梯度提升回归树的三江源地区植被指数的预测方法研究[J].草地学报,2025,33(5):1655-1668.
Zhang Guojing, Yan Qingsong, Qin Wenqiang, et al. A comparison study on the prediction methods of vegetation index in the Sanjiangyuan region based on gradient boosting regression trees [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(5):1655-1668.

[22] 赵鑫,王然风,付翔.选煤设备无线智能点巡检系统设计与实现[J].矿业研究与开发,2021,41(5):168-174.
Zhao Xin, Wang Ranfeng, Fu Xiang. Design and implementation of wireless intelligent spot inspection system for coal preparation equipment [J]. Mining Research and Development,2021,41(5):168-174.

[23] 程静飞.基于孤立森林算法的锂电池内部故障分析策略[J].储能科学与技术,2025,14(7):2878-2880.
Cheng Jingfei. Internal fault analysis strategy of lithium battery based on isolation forest algorithm [J]. Energy Storage Science and Technology,2025,14(7):2878-2880.

[24] 史小凡,刘鑫磊.基于局部离群因子和孤立森林的两阶段混合电表异常检测方法[J].长江信息通信,2025,38(8):66-69.
Shi Xiaofan, Liu Xinlei. Two-stage hybrid method for electric meter anomaly detection based on local outlier factor and isolation forest [J]. Changjiang Information & Communications,2025,38(8):66-69.

[25] 李志.论E-R图在数据库建模过程中的重要性[J].信息记录材料,2020,21(6):143-145.
Li Zhi. On the importance of E-R diagram in the process of database modeling [J]. Information Recording Materials, 2020,21(6):143-145.

[26] 张洪亮.时序数据库技术在煤矿安全监控系统中的应用[J].煤矿安全,2025,56(8):214-220.
Zhang Hongliang. Application of time series database technology in coal mine safety monitoring system[J]. Safety in Coal Mines,2025,56(8):214-220.

[27] 张泽琛,张苏江,刘晶晶,等.化探样品信息管理服务系统研究与实现[J].地质论评,2026,72(1):314-320.
Zhang Zechen, Zhang Sujiang, Liu Jingjing, et al. Research and implementation of chemical exploration sample information management and service system[J]. Geological Review,2026,72(1):314-320.

[28] 罗永梅.基于 Vue 的响应式数据可视化平台的设计与实现[J].信息技术与信息化,2020(9):20-22.
Luo Yongmei. Design and implementation of a responsive data visualization platform based on Vue[J]. Information Technology and Informatization,2020(9):20-22.

[29] 张照伟,孙强,左磊.龙东煤矿关闭退出空间资源立体开发利用模式研究[J].煤炭工程,2024,56(9):1-6.
Zhang Zhaowei, Sun Qiang, Zuo Lei. Stereoscopic development and utilization mode of spatial resources after Longdong Coal Mine closure and exit[J]. Coal Engineering, 2024,56(9):1-6.