

矿井水文地质条件综合评价方法研究

韩磊

河北省煤田地质局第二地质队(河北省干热岩研究中心) 河北 邢台 054000

摘要: 矿井水文地质条件综合评价方法研究聚焦于构建科学系统的评价体系以保障矿井安全生产。本研究以多因素耦合分析为核心,整合地质构造、水文地质参数、开采扰动及气象补给等关键指标,采用层次分析法确定权重、模糊综合评价法处理不确定性,结合GIS空间分析实现动态可视化模拟。通过建立多因素耦合模型与动态评价机制,实现“监测-评价-预警”闭环管理,有效提升矿井水害防控的时效性与精准性。

关键词: 矿井;水文地质条件;综合评价方法

引言: 矿井水文地质条件作为影响矿山安全生产的核心要素,其复杂性与动态性直接决定了水害防控的难度。传统评价方法多依赖单因素分析或静态地质资料,难以准确反映开采扰动下隔水层破坏、导水通道演化等动态过程,导致水害预警滞后、防控措施失效。本研究基于多源数据融合与多因素耦合分析理念,构建涵盖地质构造、水文参数、开采活动及气象补给的动态评价体系,旨在突破传统方法局限,为矿井水害的精准预测与分级防控提供科学依据与技术支撑。

1 矿井水文地质条件基础理论

1.1 水文地质条件核心要素

(1) 含水层与隔水层分布: 含水层是矿井充水的主要水源载体,其岩性、厚度、埋藏深度及富水性直接决定充水潜力,常见类型包括松散孔隙含水层、裂隙含水层及岩溶含水层;隔水层则作为阻水屏障,其完整性与稳定性是防控水害的关键,一旦受破坏易引发突水风险。(2) 地下水补给、径流、排泄条件: 补给来源包括大气降水、地表水入渗及相邻含水层越流,补给强度受气候、地形影响显著;径流通道由裂隙、溶隙等构成,径流方向与强度受控于地质构造;排泄方式分为自然排泄与人工排泄,矿井开采易改变原有排泄路径。(3) 构造破碎带与导水通道: 断层、节理密集带等构造破碎带是主要导水通道,其导水性取决于破碎程度、充填物性质及水压条件。导水通道的连通性直接影响矿井水害的发生概率与危害程度,是水文地质评价的重点对象^[1]。

1.2 矿井水害类型与成因

(1) 突水、淹井、溃砂等灾害机制: 突水是地下水沿导水通道快速涌入矿井的现象,多伴随高压水流冲击;淹井为突水后水量失控导致矿井被淹没的极端情况;溃砂常与松散含水层突水相伴,砂水混合物涌入易造成巷道堵塞、设备损毁。(2) 地质构造、开采活动、气候等因

素的影响: 地质构造控制导水通道分布,是水害发生的基础条件;开采活动破坏隔水层完整性、导通含水层,是诱发水害的主要人为因素;强降雨、融雪等气候现象会增加地下水补给量,提升水害发生风险。

1.3 传统评价方法的局限性

(1) 单因素分析法: 单因素分析法仅关注单个水文地质参数,忽略各因素间的相互作用。如涌水量预测仅依据含水层厚度、渗透系数等单一指标,难以准确反映地质构造、开采扰动等复杂条件下的涌水量变化规律。(2) 静态评价与动态变化的矛盾: 传统评价多基于历史地质资料进行静态分析,无法实时反映开采过程中隔水层破坏、导水通道演化等动态变化。静态评价结果与矿井实际水文地质条件存在偏差,难以有效指导动态水害防控工作。

2 矿井水文地质条件综合评价方法体系构建

2.1 评价原则与目标

(1) 科学性、系统性、可操作性原则: 科学性原则以水文地质基础理论为依托,确保指标选取、方法应用符合客观地质规律;系统性原则强调统筹地质构造、水文地质等多因素耦合作用,避免孤立分析;可操作性原则聚焦指标易获取性与方法实用性,依托常规勘察监测手段,简化流程便于工程应用。(2) 动态评价与风险预警目标: 动态评价旨在突破静态评价局限,实时追踪开采扰动下隔水层完整性、地下水水位等关键参数变化;风险预警以动态评价为基础,识别水害隐患等级,建立分级预警机制,预判突水等灾害风险,为防控决策提供精准及时的支撑,保障矿井生产安全。

2.2 评价指标体系设计

(1) 地质构造指标: 核心包括断层密度、褶皱复杂度、构造破碎带厚度及导水性。断层密度以单位面积断层长度/数量表征,反映构造发育程度;褶皱复杂度通过形态、翼部倾角等参数衡量,复杂褶皱易加剧岩层裂隙

发育；破碎带导水性通过抽水试验、物探手段确定，是导水能力的关键判据。(2) 水文地质指标：关键指标涵盖含水层厚度、渗透系数、水位动态、富水性及隔水层完整性。含水层厚度与富水性决定水源储备，渗透系数反映渗水能力，水位动态直观体现补给径流变化；隔水层完整性是阻水核心，其破坏程度直接关联突水风险，需重点监测评估。(3) 开采活动指标：主要包括开采深度、工作面推进速度、采空区分布及巷道布置。开采深度增加加剧地应力与岩层破坏，推进速度过快易引发隔水层突发破裂；采空区积水与巷道掘进扰动原有水文平衡，均为水害诱发关键因素^[2]。(4) 气象与补给指标：核心为降雨量、蒸发量、地表径流系数及汛期时长。降雨量是地下水主要补给源，强降雨强度与时长直接影响水位涨幅；蒸发量与径流系数反映区域水循环特征，汛期时长为风险时段预判提供依据。

2.3 评价方法选择与优化

(1) 层次分析法(AHP)：用于确定各评价指标的权重。通过构建目标层(水文地质条件综合评价)、准则层(地质构造、水文地质等)、指标层(断层密度、渗透系数等)的层次结构模型，采用两两比较判断矩阵计算指标相对重要性，经一致性检验后确定最终权重，为综合评价提供量化依据。(2) 模糊综合评价法：用于处理评价过程中的不确定性问题。矿井水文地质条件中诸多指标(如破碎带导水性、隔水层完整性)具有模糊性，通过建立模糊评价矩阵，将定性描述与定量数据相结合，对各指标进行模糊评判，最终得出综合评价结果，提升评价的全面性与准确性。(3) GIS空间分析法：实现评价结果的可视化与动态模拟。利用GIS的空间数据管理与分析功能，整合地质勘察、监测数据，生成水文地质专题图(如含水层分布、断层导水性分区图)；通过空间叠加分析、缓冲区分析等功能，模拟开采扰动下水文地质条件的空间变化，直观呈现水害隐患分布区域^[3]。

2.4 评价模型建立

(1) 多因素耦合模型构建：基于各评价指标的权重与模糊综合评价结果，构建多因素耦合评价模型。模型以地质构造、水文地质、开采活动、气象补给四大类指标为输入变量，通过耦合分析各因素间的相互作用机制(如开采扰动与构造破碎带导水性的协同增强效应)，建立变量与水害风险等级的函数关系，实现多维度综合评价。(2) 动态评价机制设计：引入时间序列分析方法，构建动态评价机制。通过对不同时间节点的监测数据(水位、降雨量、开采进度等)进行时序建模，分析指标参数的动态变化趋势与突变特征；结合开采计划，预判不

同开采阶段的水文地质条件变化规律，实时更新评价结果，实现“监测-评价-预警”的动态闭环管理，提升水害防控的时效性与针对性^[4]。

3 案例分析与应用验证

3.1 研究区概况

(1) 矿井地理位置与地质背景：研究区矿井位于华北煤田西部，地处温带半湿润气候区，地形以低山丘陵为主。区域地质构造隶属于华北克拉通次级断陷盆地，地层主要发育石炭-二叠系含煤地层，含煤3-5层，煤层平均厚度6.2m，开采深度450-800m，区内构造以断裂构造为主，褶皱构造不发育。(2) 水文地质条件特征：区内主要发育三层含水层，分别为第四系松散孔隙含水层(厚度15-30m，富水性中等)、二叠系砂岩裂隙含水层(厚度40-60m，富水性较弱)及奥陶系岩溶含水层(厚度大，富水性强，为主要充水威胁源)；发育F1、F2两条主要断层，均为正断层，断层破碎带厚度2-5m，经物探与钻探验证为导水断层，是矿井突水的主要风险点。

3.2 数据采集与处理

(1) 地质勘探数据、监测数据：收集研究区1:5000地质地形图、钻孔勘探报告等基础资料，获取断层分布、含水层厚度等地质数据；布设12个地下水水位监测孔、3个矿井涌水量监测点，连续监测6个月，获取水位动态、涌水量变化等时序数据；同步收集区域近10年降雨量、蒸发量等气象数据。(2) 数据标准化与归一化处理：针对不同指标量纲差异，采用极差标准化方法对数据进行预处理，消除量纲影响；对定性指标(如断层导水性)采用等级赋值法转化为定量数据；通过归一化处理将所有指标值映射至[0,1]区间，确保后续评价指标的可比性与一致性。

3.3 综合评价过程

(1) 指标权重计算：构建三层评价体系，通过专家打分建立判断矩阵，计算得出地质构造、水文地质、开采活动、气象补给指标权重分别为0.35、0.40、0.15、0.10，经一致性检验($CR < 0.1$)，权重分配合理。(2) 模糊综合评价步骤：确定评语集为“低风险、中风险、高风险”，建立模糊关系矩阵；结合AHP计算的权重向量与模糊矩阵进行合成运算，得出各评价单元的综合风险等级。(3) GIS空间分析结果展示：利用GIS叠加各指标专题图，生成矿井水文地质风险分区图，清晰呈现高风险区集中于F1、F2断层影响带及奥陶系含水层露头区。

3.4 评价结果验证

(1) 与实际水害事件对比分析：研究区2022年在F1断层附近工作面曾发生小型突水事件，该区域恰被评价

为高风险区；低风险区开采至今未发生水害，评价结果与实际情况契合度较高。（2）模型准确性与可靠性评估：采用混淆矩阵计算模型准确率为89.2%，Kappa系数为0.82，表明模型具有较高的准确性与可靠性，可有效应用于同类矿井水文地质条件综合评价。

4 矿井水害防治对策与建议

4.1 基于评价结果的分级管理

（1）高风险区划分与管理：将断层导水带、强含水层直接揭露区等评价为高风险区，实行“先治后采”刚性原则，严禁盲目推进开采。需加密监测频次至每2小时1次，增设探放水钻孔密度，确保钻孔覆盖全风险区，同时划定禁采红线，明确专人24小时值守管控。（2）中风险区划分与管理：涵盖弱导水构造影响区、含水层间接影响区等中风险区，实施“边探边采”模式。定期开展水文地质条件复核，每月更新风险评价结果，优化开采参数，控制工作面推进速度，避免集中扰动岩层引发导水通道发育。（3）低风险区划分与管理：针对无明显导水构造、远离强含水层的低风险区，执行常规防治管理。保持日常监测频率，定期开展隐患排查，重点防范开采累积扰动引发的风险升级，确保防治措施不松懈。

4.2 防治技术措施

（1）探放水工程优化：采用“物探先行、钻探验证”综合手段，高风险区实施定向钻探，扩大探测范围；根据含水层富水性动态调整钻孔深度与间距，确保探放水深度超前开采工作面不少于20m，彻底消除水害隐患。（2）隔水层注浆加固：对高、中风险区薄弱隔水层实施注浆加固，选用水泥-水玻璃双液浆提升加固效率，通过压水试验检验加固效果，确保隔水层渗透系数满足安全要求，构建可靠阻水屏障。（3）应急排水系统设计：按最大突水量1.2倍配置排水设备，高风险区增设临时排水泵房，优化

排水管路布局，确保管路互联互通；定期开展排水系统联合调试与应急演练，提升突发水害处置能力^[5]。

4.3 管理策略建议

（1）动态监测预警机制完善：整合水位、涌水量、降雨量等监测数据，搭建智能化监测预警平台，设置分级预警阈值，实现数据实时传输、异常自动报警，为动态防控提供数据支撑。（2）多部门协同防控体系构建：建立地质、生产、安全、调度等多部门联动机制，明确各部门防控职责，定期召开水文地质分析会，共享监测评价数据，形成“监测-评价-防控-处置”闭环管理。

结束语

矿井水文地质条件综合评价是保障矿山安全生产的关键环节。本研究通过构建多因素耦合评价体系，融合动态监测与空间分析技术，实现了对复杂水文地质条件的精准模拟与风险预警。实践表明，该方法可有效识别高风险区，为水害防治提供科学决策依据。未来需进一步深化多源数据融合与智能算法应用，提升动态评价的时效性与适应性，为矿井水害防控提供更可靠的技术保障。

参考文献

- [1]李月月,关民全,张文,等.矿井水文地质条件综合探测及防治水技术研究[J].能源与环保,2024,46(11):58-62.
- [2]霍槟槟,刘俊生.水文地质条件复杂矿井底板高承压含水层综合治理技术[J].能源技术与管理,2022,47(03):84-85.
- [3]欧强.矿山水文地质调查与评价方法的研究与应用[J].中国金属通报,2024,(01):237-239.
- [4]曹旭东.瞬变电磁法在兼重组矿井水文地质调查中的应用分析[J].当代化工研究,2021,(04):97-98.
- [5]姚建伟,齐跃明.辛置矿井充水条件及水害防治对策[J].煤炭技术,2020,39(3):73-76.