

# 基于透明水文地质模型的工作面顶板水害预警研究

贾红刚 张梦园

陕西省煤层气开发利用有限公司 陕西 西安 710000

**摘要：**透明水文地质模型以多源数据融合与三维可视化技术为核心，为工作面顶板水害防治提供直观且精准的分析基础。研究系统剖析地质构造、含水层特征及采煤活动等致灾因素，构建涵盖水文地质、工程地质及开采活动的预警指标体系，运用数值模拟、数据驱动及综合预警等方法，实现顶板水害风险的科学预判。该研究成果优化了传统水害预警模式，为煤矿安全生产提供可靠技术支撑，对提升顶板水害防控能力具有重要实践价值。

**关键词：**透明水文地质模型；工作面；顶板水害；预警

## 引言

随着煤炭开采深度与强度的不断增加，工作面顶板水害已成为威胁煤矿安全生产的关键因素。传统水文地质分析手段存在数据分散、可视化程度低等局限，难以满足复杂地质条件下的水害精准预警需求。透明水文地质模型凭借其数据整合与动态展示优势，为水害防治开辟新路径。本文基于透明水文地质模型，深入分析顶板水害致灾因素，构建预警指标体系与方法，旨在为煤矿顶板水害防控提供科学有效的技术方案。

## 1 透明水文地质模型概述

透明水文地质模型，作为一种用于描述和分析地下水系统的工具，在水文地质研究领域中具有举足轻重的地位。它将复杂的水文地质系统以直观、可视化的形式呈现，助力研究人员深入理解地下水的流动、存储及与周围环境的相互作用机制。构建透明水文地质模型，需整合多源数据，涵盖地质、水文、气象等多个方面。地质数据包含地层结构、岩石特性等，用以明确地下水的赋存空间与介质条件；水文数据如水位、流量、水质等，直接反映地下水的动态变化；气象数据则在分析降水入渗、蒸发蒸腾等补给排泄过程中发挥关键作用。通过对这些数据的综合分析，运用数学算法和计算机模拟技术，搭建起能精准反映实际水文地质条件的模型框架。在功能与应用层面，透明水文地质模型可模拟不同情景下的地下水流动状态，预测在气候变化、人类活动干扰等因素影响下，地下水位、水量及水质的演变趋势。例如在干旱地区，借助模型评估水资源的可持续性，为合理规划水资源利用提供科学依据；在城市建设中，预测工程建设对地下水系统的影响，提前制定应对策略以避免地面沉降等环境问题。从技术支撑角度看，地理信息系统（GIS）为模型提供强大的空间分析与数据管理能力，可直观展示模型结果的空间分布特征；数

值模拟技术则通过求解复杂的数学方程，实现对地下水系统动态过程的精确模拟；大数据与人工智能技术的融入，能更高效地处理海量数据，优化模型参数，提升模型的准确性与预测能力。透明水文地质模型正不断发展完善，在保障水资源合理开发利用、维护生态环境平衡等方面发挥着愈发重要的作用。

## 2 基于透明水文地质模型的工作面顶板水害致灾因素分析

### 2.1 地质构造因素

地质构造在工作面顶板水害的孕育中扮演着极为关键的角色。断层作为一种常见的构造形式，会破坏地层的完整性与连续性。当断层切割含水层时，会为含水层之间的水力联系搭建通道，致使原本相对独立的含水层相互连通，进而加大了水的补给来源与流动路径的复杂性。例如，一条落差较大的断层可能会将深部强含水层与浅部煤层顶板附近的弱含水层贯通，使强含水层的水能够源源不断地涌入浅部，大幅增加了顶板水害发生的可能性。褶皱构造则通过改变地层的产状，影响地下水的赋存与运移。在向斜构造中，地层呈向下弯曲形态，常形成良好的储水构造，容易汇聚地下水；背斜构造顶部，岩石受张力作用，裂隙发育，也为地下水的运移提供了便利条件。节理与裂隙系统进一步增强了岩石的渗透性，它们相互交织，形成了复杂的网络，使得地下水能够更快速地在岩层中扩散，一旦这些网络与采动裂隙贯通，便极易引发顶板水害<sup>[1]</sup>。

### 2.2 含水层特征因素

含水层的特征对工作面顶板水害的形成有着直接且显著的影响。含水层的富水性决定了其储水能力与供水能力。富水性强的含水层，如厚层砂岩含水层，内部孔隙与裂隙发育良好，能够储存大量的地下水，一旦与采动影响区域沟通，便可能引发大规模的涌水。例如，某

些地区的侏罗系砂岩含水层，厚度可达数十米，且具有较高的孔隙度与渗透率，在采煤活动影响下，成为顶板水害的主要水源。含水层的渗透性则控制着地下水的流动速度与方向。渗透性高的含水层，地下水能够快速地向采动区域运移，增大了水害发生的突发性与危害性。含水层与煤层之间的相对位置关系至关重要。若含水层直接覆盖在煤层之上，且中间缺少有效的隔水层，那么在采煤过程中，随着顶板的垮落，含水层中的水会迅速涌入工作面，造成严重的水害威胁。含水层的补给条件也不容忽视，充足的补给水源会持续维持含水层的高水位与高水压，增加水害发生的风险。

### 2.3 采煤活动因素

采煤活动是诱发工作面顶板水害的重要外在因素。在采煤过程中，采动应力会使煤层上方的覆岩产生变形与破坏，形成导水裂隙带。随着开采范围的扩大与采高的增加，导水裂隙带的高度也随之增大，当导水裂隙带向上发育至含水层时，便为含水层中的水涌入工作面创造了通道。例如，在厚煤层综采放顶煤开采过程中，由于采高较大，顶板垮落剧烈，导水裂隙带发育高度往往能够达到数十米，极易导通上部含水层。采煤方法的选择也对顶板水害有显著影响。长壁开采相比短壁开采，采动影响范围更大，对顶板的破坏更为严重，水害发生的概率也相对较高。采煤速度过快，会使顶板来不及充分压实，导致顶板上方形成较大的离层空间，这些离层空间容易积聚地下水，当积聚到一定程度或受到外界扰动时，便可能引发离层突水灾害。采煤过程中的支护方式与强度若不合理，无法有效控制顶板的变形与垮落，也会增加顶板水害发生的风险。

## 3 基于透明水文地质模型的工作面顶板水害预警指标体系

### 3.1 水文地质指标

在透明水文地质模型构建的工作面顶板水害预警指标体系中，含水层厚度与岩性组合是关键基础指标。含水层厚度直接决定水体储存量，较厚的含水层意味着潜在突水水源充足；岩性组合则影响着含水层的渗透性能，如砂岩、砾岩等粗粒岩石构成的含水层，其渗透性强，水动力传导迅速，会显著增加顶板突水风险。地下水水位与水压参数同样不可或缺，高水位及高水压条件下，水体对顶板的压力作用增强，当超过顶板岩层的抗水压强度时，突水事故极易发生。地下水的补给、径流与排泄条件也深刻影响着水害威胁程度，丰富的补给源和畅通的径流通道，会使含水层水量不断补充，水压持续升高，加大顶板水害发生的可能性。隔水层的厚度、

完整性及抗渗性能也至关重要，厚度大、完整性好且抗渗能力强的隔水层，能有效阻隔含水层水体与顶板的联系，反之则成为水害隐患点，这些指标共同构成了水文地质层面的水害预警基础要素。

### 3.2 工程地质指标

工程地质指标对工作面顶板水害预警具有重要意义。顶板岩层的岩性及力学性质直接关系到顶板的稳定性，泥岩、页岩等软弱岩层强度低、韧性差，在水岩相互作用下易软化变形，难以承受上覆岩层压力及水压，成为水害突破口；砂岩、石灰岩等坚硬岩层虽强度较高，但可能存在发育的构造裂隙，为水体运移提供通道。岩层的层理与节理发育程度也是关键因素，密集且贯通性好的层理和节理，不仅破坏了岩层的整体性，还为地下水的渗透创造条件，加速水对顶板岩层的侵蚀作用。地质构造对工程地质条件影响深远，断层、褶皱等构造区域，岩层完整性遭到破坏，应力集中现象明显，岩石破碎带成为地下水富集和导水的优势通道，极大增加了顶板水害发生概率。这些工程地质指标相互作用，从岩体结构与力学特性角度，揭示了顶板水害发生的内在条件，为预警体系提供重要支撑<sup>[2]</sup>。

### 3.3 开采活动指标

开采活动指标在工作面顶板水害预警中反映了人为扰动对顶板水害形成的影响。开采深度与强度直接决定顶板岩层应力状态改变程度，深度增加，上覆岩层压力增大，顶板更易产生裂隙，高强度开采会加快顶板垮落、缩短稳定周期，提升水害突发风险。开采方法与工艺的选择极为关键。不同方法对顶板破坏程度和变形规律差异显著，像垮落法开采，会使顶板大面积垮落，形成导水裂隙带，一旦与含水层导通就会引发水害；充填法能有效控制顶板变形，减少裂隙发育。回采速度也影响顶板水害发生概率。回采过快，顶板来不及充分下沉压实，裂隙持续发育，水体易沿裂隙渗透；合理控制回采速度，则有助于顶板形成稳定结构，降低水害风险。采掘顺序安排会影响顶板应力分布和地下水径流状态，不合理安排可能造成应力集中和水体通道异常发育。这些开采活动指标全面体现了开采过程对顶板水害形成的诱导作用，是预警体系不可或缺的组成部分。

## 4 基于透明水文地质模型的工作面顶板水害预警方法

### 4.1 数值模拟预警法

(1) 数值模拟预警法借助数学模型，对工作面顶板水害相关的水文地质过程进行数值求解与模拟。在构建模型时，需综合考虑含水层的渗透系数、孔隙度、水位分布等关键参数，以及地质构造如断层、裂隙对水流的

控制作用。通过精确刻画这些因素，能够较为真实地反映顶板水在复杂地质条件下的运移规律。（2）以有限元法、有限差分法等为代表的数值计算方法，被广泛应用于数值模拟预警中。这些方法将研究区域离散化为众多小单元，通过对每个单元建立水流方程并联立求解，得到整个区域的水流状态。例如，利用有限元法对顶板含水层进行网格划分，根据边界条件和初始条件，计算不同时刻的水头分布，进而预测水害发生的可能性及范围。（3）数值模拟预警法的优势在于能够进行多情景模拟分析。通过改变开采强度、排水方案等参数，模拟不同工况下顶板水害的发展趋势，为制定合理的防治措施提供依据。然而，其准确性高度依赖于模型参数的选取和地质条件的准确刻画，参数的微小偏差可能导致模拟结果与实际情况存在较大差异<sup>[3]</sup>。

#### 4.2 数据驱动预警法

（1）数据驱动预警法依托于大量的水文地质监测数据、开采数据等。通过对这些数据的深度挖掘与分析，建立数据之间的内在联系，从而构建能够反映顶板水害发生规律的预警模型。在实际应用中，监测数据涵盖了水位、水压、水质、降雨量等多方面信息，以及开采进度、采高、推进速度等开采相关数据。（2）机器学习算法在数据驱动预警中发挥着核心作用。例如，采用支持向量机算法，以历史监测数据和对应的水害发生情况作为训练样本，对模型进行训练，使其能够学习到数据特征与水害之间的映射关系。当输入新的监测数据时，模型即可预测当前工况下顶板水害发生的概率。（3）数据驱动预警法具有较强的自适应性和实时性。随着监测数据的不断更新，模型能够自动调整参数，提高预警的准确性。能够快速响应实时监测数据的变化，及时发出预警信号。该方法对数据质量要求极高，数据缺失、噪声等问题可能严重影响模型的性能，且模型的物理意义相对不明确，解释性较差。

#### 4.3 综合预警法

（1）综合预警法融合了数值模拟预警法和数据驱动预警法的优势。第一，利用数值模拟对顶板水害的物理

过程进行机理分析，第二，借助数据驱动模型对实时监测数据进行快速处理与预测。通过两者的有机结合，能够更全面、准确地对工作面顶板水害进行预警。（2）在实际操作中，先运用数值模拟方法对研究区域进行长期的水文地质过程模拟，确定水害发生的潜在风险区域和关键影响因素。针对这些关键因素设置密集的监测点，收集实时监测数据，利用数据驱动模型对当前的水害风险进行动态评估。例如，数值模拟确定某断层附近为水害高风险区，数据驱动模型则根据该区域实时的水位、水压变化数据，判断水害是否有发生的趋势。（3）综合预警法还可引入专家系统等辅助手段。专家根据自身经验对数值模拟结果和数据驱动模型输出进行综合研判，提高预警的可靠性。这种多方法融合的方式能够有效弥补单一方法的不足，显著提升工作面顶板水害预警的精度和可靠性，为保障矿井安全生产提供更有力的支持<sup>[4]</sup>。

#### 结语

综上所述，基于透明水文地质模型的工作面顶板水害预警研究，通过系统分析致灾因素、构建多维预警指标体系及创新预警方法，显著提升了顶板水害风险预判的准确性与可靠性。该研究成果有效弥补了传统预警技术的不足，为煤矿安全生产管理提供了有力保障。未来，随着相关技术的持续发展，需进一步深化多源数据融合精度与预警模型智能化水平，以更好地应对复杂多变的水文地质条件。

#### 参考文献

- [1]连会青,晏涛,尹尚先,等.基于透明水文地质模型的工作面顶板水害预警研究[J].煤炭科学技术,2025,53(1):259-271.
- [2]王蛟,付恩三,潘飞,等.基于透明地质的露天煤矿全生命周期开采研究[J].中国煤炭,2025,51(2):121-128.
- [3]樊鑫,程建远,栗升,等.煤矿微震监测系统在回采工作面顶板水害防治中的应用[J].煤田地质与勘探,2024,52(6):115-127.
- [4]孙培培.下组煤首采工作面顶板水害防治技术应用实践[J].煤炭科技,2020,41(5):75-77,86.