



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

郭小铭,王 皓,周麟晟.煤层顶板巨厚基岩含水层空间富水性评价[J].煤炭科学技术,2021,49(9):167-175. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.024

GUO Xiaoming, WANG Hao, ZHOU Linsheng. Evaluation of spatial water enrichment of ultra-thick bedrock aquifer in coal seam roof[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 167-175. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.024

煤层顶板巨厚基岩含水层空间富水性评价

郭小铭^{1,2,3}, 王 皓^{1,2,3}, 周麟晟^{2,3}

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077;

3. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077)

摘 要:我国西部侏罗系煤田煤层顶板含水层垂向非均质性强,富水性差异大,使得导水裂隙带波及含水层深度不同时,工作面涌水量不同,水害威胁程度各不相同。为科学描述垂向不同深度含水层富水性对涌水的影响,将含水层简化为多层层状结构,由此概化出含水层空间富水结构表达模型。以彬长矿区亭南煤矿煤层顶板洛河组含水层为例,提出影响含水层空间富水性差异的含水系统、流动系统和地质构造 3 个方面,确定出含水层厚度、冲洗液消耗量、岩心采取率、中粗砂岩占比、地层埋深、水化学矿化度、褶皱构造 7 个主控因素,并采用 AHP 层次分析法确定各主控因素对富水性的影响权重,形成空间富水性评价模型。绘制含水层垂向各层状结构的主控因素专题图,并将其信息统一归一化处理,采用空间多源信息融合技术叠加,得出含水层上段、下段的富水性分区。评价结果表明,洛河组含水层上段可划分为“强、较强、中等”3 个区,下段划分出“强、较强、中等、较弱、弱”5 个区,对比表明上段富水性整体好于下段,并通过井田范围内不同层段含水层抽水试验成果进行拟合验证。由此得出,该富水性评价模型可充分反映含水层不同空间位置(平面、垂向)的富水性差异,对于导水裂隙带仅波及含水层部分层段条件下的顶板水害危险性评价有指导作用。

关键词:基岩含水层;富水性;多源信息融合;水害防治

中图分类号:P641.8

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)09-0167-09

Evaluation of spatial water enrichment of ultra-thick bedrock aquifer in coal seam roof

GUO Xiaoming^{1,2,3}, WANG Hao^{1,2,3}, ZHOU Linsheng^{2,3}

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Coal Mine Water Hazard Prevention and Control Technology, Xi'an 710077, China)

Abstract: The aquifer of the coal seam roof in the Jurassic coalfield is highly heterogeneous in western China and has large differences in water richness. When the depth of the water-conducting fissure zone affects the aquifer is different, the amount of water inflow from the working face is different, and the threat of water damage is different. In order to scientifically describe the difference in the water inrush of the mine due to the difference of the vertical water yield property of the aquifer, the aquifer is simplified into a multi-layered structure, and an expression model for the spatial water rich structure of the aquifer is generalized. Taking Luohe Formation aquifer in the coal seam roof of the Tingnan coal mine in Binchang mining area as an example, the three main controlling factors affecting the water yield property of the aquifer were proposed: aquifer system, flow system and geological structure, the seven main controlling factors of aquifer thickness, flushing fluid consumption, core extraction rate, proportion of medium-coarse sandstone, stratum burial depth, water chemical salinity, and fold structure were determined, and the weights of each factor were determined by AHP analytic method. Finally, a mathematical model for evaluating the water-rich aquifer is formed. In this paper, the information of the main control factors of different vertical horizons is unified to normalized, using the multi-source information fusion technology to superimpose and establish a water yield property evalua-

收稿日期:2021-01-27;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804100);中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金资助项目(2017XAYQN08)

作者简介:郭小铭(1988—),男,山西吕梁人,助理研究员,博士研究生。Tel:029-87862145, E-mail: guoxiaoming@ cctegxian.com

tion model for aquifer. The evaluation results show that the upper section of Luohe Formation aquifer can be divided into 3 zones: strong, relatively strong, and medium, and the lower section can be divided into 5 zones: strong, relatively strong, medium, relatively weak, and weak. The comparison shows that the upper section has better water richness than the lower section, and it is verified by fitting the results through the pumping tests of aquifers in different intervals within the range of the well field. It can be concluded that the model can fully reflect the difference of water yield property of different spatial positions (horizontal and vertical) of the aquifer, and it can guide the evaluation of the water hazard risk of the roof under the condition that the water-flowing fractured zone only affects the partial layer of the aquifer.

Key words: bedrock aquifer; water-rich; multi-source information fusion; water hazard prevention

0 引言

煤层开采后顶板导水裂隙带向上发育,影响顶板各含水层并使得含水层水进入井下,充水强度受到顶板含水层富水性和导水裂隙带波及含水层厚度两方面影响。我国学者在综合含水层富水性和顶板冒裂安全分区的基础上,形成了顶板水害危险性评价“三图-双预测”方法,已经成为我国煤矿区顶板水害危险性的主要评价方法之一^[1]。依据该评价思路,含水层富水性越强,导水裂隙带波及含水层厚度越大,顶板含水层充水强度越高,对矿井回采影响也越大^[2]。鉴于此,含水层富水性评价成为煤层顶板水害危险性分析的主要因素。

国内外学者针对含水层富水性及非均质特征进行了大量研究。目前,含水层富水性评价主要包含单位涌水量法、地球物理勘探方法、富水性指数法和沉积控水评价。其中,通过水文地质试验,揭示含水层单孔/群孔出水能力以及抽水时含水层水位响应规律,计算单位涌水量是评价含水层富水性最直接手段^[3],但是该评价方法需以专门水文地质钻孔为基础,开展专项水文地质试验,一般仅少量开展;采用地球物理电磁勘探方法测试含水层物性差异,可以评价富水性差异特征^[4];利用信息融合方法,综合影响含水层富水性的多个主控因素形成富水性指数法,可用于含水层富水性评价^[5-6],其评价过程中根据不同地区水文地质条件的差异性,选用不同的控制因素及叠加数学模型。该方法可利用资料多,成果应用广泛,研究手段可靠;从地层沉积规律角度,揭示沉积环境与含水层富水性的关系,以“沉积控水”的学术思想指导评价含水层富水性差异性特征^[7-8]。在多种评价技术中,仅地球物理电磁勘探手段具有空间效应,可评价含水层不同垂向深度富水性差异;其他地质及水文地质评价方法受勘探程度和地下水渗流计算影响,多为平面富水性分区,鲜有考虑垂向差异的评价结果。

由于我国西部煤田多数含水层具有非均质各向异性特征,当导水裂隙带影响含水层深度不同时,波

及到的含水层富水性有较大差异,表现为影响矿井充水强度的含水层富水性空间差异特征。对于厚度有限的含水层,导水裂隙带多可直接波及到含水层顶部,其充水强度不受到导水裂隙带发育高度影响。但是,对于巨厚含水层,导水裂隙带仅可波及含水层下部,采用含水层全段富水性评价结果进行充水强度预测将会造成较大误差。然而,目前的地球物理电磁勘探方法进行富水性评价时,仅能反映含水层富水性相对值,作为水文地质条件探查的参考^[9]。其他评价方法仅对含水层在平面上的富水性差异进行评价,未形成空间的富水性评价方法,制约了巨厚基岩含水层对矿井充水影响程度评价的准确性。同时,多数方法仅针对含水介质的富水能力进行评价,未考虑含水层补给条件的差异特征。

针对煤层顶板非均质巨厚基岩含水层空间(平面、垂向3个维度)富水性评价难题,以富水性指数法为指导思路,从含水介质特征、流动系统和地质构造3个方面进行深入研究,评价含水层不同位置、不同垂直高度的富水性差异,为指导煤层顶板导水裂隙带发育高度不同时含水层充水的差异性提供依据。

1 含水层空间结构与评价思想

非均质含水层不同平面位置、垂向厚度受导水裂隙带影响时,对矿井的充水影响程度各不相同,表现为不同平面位置、不同开采条件造成的矿井涌水量有所差异。引入充水影响指数 Q 概念,用于表征不同条件下含水层对矿井充水的影响程度。

充水影响指数与单位厚度含水层富水性、导水裂隙带波及含水层厚度、煤层开采平面位置及范围均有一定关系,使得同一含水层在不同开采扰动条件下充水影响指数各不相同。因此,充水影响指数可用式(1)表示

$$Q = \iint_D \int_0^m q(z) dz dS_1 \quad (1)$$

式中: $q(z)$ 为单位厚度含水层富水性, $L/(s \cdot m)$; dz 为垂直厚度上的微小单元; Z 为转换系数; m 为导水裂隙带波及的含水层厚度, m ; D 为含水层受开采

影响的区域; dS_1 为面积微分单元。

公式中 Z (转换系数)在水文地质条件类似的同一矿井为定值,因此充水影响指数主要受含水层单位体积富水性、充水面积和导水裂隙带波及厚度3个因素影响。导水裂隙带波及含水层全段时,公式(1)中厚度 m 为定值,可转换为定积分,充水影响指数仅受到平面富水性差异影响,不会受垂向富水性差异影响。但是,若导水裂隙带仅波及部分含水层,公式(1)中厚度 m 为受到不同开采条件影响时的变量,为不定积分表达式,充水影响指数同时受到含水层平面和垂向富水性差异影响,含水层充水影响为含水层单位富水性的三维空间变量函数,是复杂的非线性问题。

一般而言,沉积地层常具备层状结构,在垂向上分层性较为明显^[10-11]。鉴于此,为科学解决含水层空间富水性难题,结合层状地层结构特征,将含水层分为垂向 n 层,单层厚度分别为 m_1, m_2, \dots, m_n ,由此可将公式(1)所述的含水层富水性函数垂向指标由不定积分转换为定积分,便于公式求解和实际应用。具体表达式如下

$$\begin{cases} Q_i = \iint_D \int_0^{m_i} q_i(z) dz dS_1 \\ Q = \sum_{i=1}^n Q_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_i 为含水层第 i 分层厚度, m ; Q_i 为含水层第 i 分层的充水影响指数, L/s 。

式(2)表明,对于厚度较大的含水层,通过分层并叠加方式,可将三维空间变量函数转变为不同层位的二维空间函数的叠加,实现含水层空间富水性的评价。该变换将传统的三维问题转换为多层二维平面问题,在平面上可对比含水层不同位置富水性,垂向上也可对比不同层同一平面位置的富水性差异,实现了含水层空间富水性对比与评价,且便于现场应用,以指导煤层开采导水裂隙带波及含水层不同深度时顶板水害防治工作的开展。

2 含水层空间富水性评价方法

采用分层充水影响指数叠加的方法对彬长矿区洛河组含水层富水性进行分区评价。部分学者对彬长矿区洛河组含水层结构研究表明,由于地层沉积的差异性特征,洛河组下部与上部沉积结构有一定差异性,具备分层特征^[12]。进一步对含水层结构研究表明,含水层内有多层非连续泥岩透镜体结构,可通过最上层泥岩、粉砂岩透镜体划分,将含水层初步划分为上、下2段。

2.1 空间富水性指标体系

含水层富水性差异取决于含水介质空隙结构和地下水补给条件2个方面影响因素。基于水文地质及水动力学基础理论,重点针对含水系统和流动系统,分析含水介质储水结构和地下水补径排条件,提炼能够反映储水结构和补给条件的主要控制因素,形成评价富水性的主控因素。

2.1.1 含水介质特征的主控因素

根据地下水动力学基础理论,仅考虑含水介质的前提下,含水层所能给出水的能力以储水系数 S_c 表示,其表达式^[13]如下

$$S_c = S_g M = \rho g (\alpha + \nu \beta) M \quad (3)$$

式中: S_g 为储水率, m^{-1} ; ρ 为流体密度, g/L ; g 为重力加速度, m/s^2 ; α 为多孔介质固体颗粒压缩系数; ν 为孔隙度,%; β 为水的压缩系数; M 为含水层总厚度, m 。

由此分析,多孔介质给出水能力主要影响指标包含:含水层总厚度 M 、固体颗粒压缩系数 α 、孔隙度 ν 和水的压缩系数 β 。对于同一含水层岩性相似条件下, α 和 β 为定值。因此,多孔介质给出水的能力主要取决于其含水层总厚度 M 和孔隙度 ν ,其中孔隙度通过钻探过程中冲洗液消耗量、取心率和中粗砂岩占比3个指标综合表示。

1) 含水层厚度。含水层厚度是反映含水层给出水能力的最主要指标,与储水系数呈线性正相关关系。根据含水层垂向分段标准,统计洛河组含水层各层段厚度,得出含水层厚度指标。

2) 冲洗液消耗量。钻孔钻进过程中,通过含水层时会有冲洗液的消耗,反映不同位置岩层透水性、与孔隙连通程度,是反映孔隙度的指标之一。冲洗液消耗量越大,孔隙发育程度越高,富水性越好。

查找评价 n 层含水层冲洗液消耗量的变化点,对应地层厚度分别为 m_1, m_2, \dots, m_n ,消耗量为 c_1, c_2, \dots, c_n ,采用式(5)计算层段平均冲洗液消耗量

$$c = \frac{c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots + c_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (4)$$

3) 岩心采取率。岩心采取率是含水介质孔隙发育的宏观表现,同一岩性地层中岩石破碎、裂隙发育、胶结松散等都会造成岩心采取率低。因此,选取平均岩心采取率,作为反映含水层孔隙率的主要指标之一。

量化过程中,采用评价层段平均取心率,其具体计算方法与冲洗液消耗量较为类似,对各小层取心率进行叠加再平均计算。

4) 中粗砂岩占比。含水层富水性除受到介质

孔隙度影响外,孔隙大小尤其是孔喉尺寸直接影响地下水流动。一般而言,颗粒较大时岩体孔隙度减小,但孔喉增大,颗粒大小和孔喉尺寸有正相关关系^[14]。因此,砂岩含水层中,颗粒较大的中粗砂岩、粗砾岩对富水性及导水性有主要影响,中粗砂岩含量可作为影响含水层富水性的主控因素之一。

2.1.2 流动系统表征主控因素

水文地质勘探现场表明,在部分区域厚度大、孔隙发育的地层不一定富水性强,同时也受到补径排条件的影响。因此,在空间富水性评价过程中,利用流动系统理论,考虑能够表征含水层不同垂向深度补径排条件的指标。

大规模地下水流动系统多发育有不同级次的流动系统,低级次流动系统地下水补给路径短,水力交替强烈,地下水矿化度低,循环深度浅,补给条件较好^[15];高级次流动系统地下水径流路径长,径流段水力梯度较小,地下水循环深度大、矿化度高、补给条件相对较差。含水层流动系统对富水性的影响主要表征为单宽流量差异,对于承压含水层和潜水含水层,单宽流量引用如下公式表达

$$\text{承压含水层: } q = KM \frac{h_1 - h_2}{l} \quad (5)$$

$$\text{潜水含水层: } q = K \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l} \quad (6)$$

式中: q 为含水层单宽流量, L/s ; K 为渗透系数, m/d ; h_1 为含水层起始水头高度, m ; h_2 为含水层排泄处水头高度, m ; l 为径流路径长度, m 。

由此可见,同一含水系统中若起始水头 h_1 和排泄处水头 h_2 均相同,单宽流量主要取决于径流路径的长度 l 。流动系统仅为从源到汇的统一的地下水流动场,难以用直接指标进行表示,仅可通过理论分析成果与表征现象进行提炼,总结得出流动系统的主控因素。

1) 地层埋深。地下水循环深度在一定程度上表示了水流路径,可以作为反映流动系统中补给、径流条件的重要指标。地下水埋深大,流动系统级次高,补给条件差且径流缓慢,富水性相对较弱;埋深小,流动系统级次低,补给条件较好且径流较快,富水性相对较好。因此,可以将地层埋深作为表征径流路径长度的主要指标之一。

2) 水化学指标。鉴于流动系统不同级次与不同位置水化学特征,可采用其水化学指标中矿化度值表征流动系统的补径排条件,矿化度越高,表明地下水径流路径越长,补给条件越差。因此,可以间接采用水化学矿化度指标表征地下水的补给条件,可作为反映地下水补给、径流条件的主控因素之一。

2.1.3 地质构造

地质构造会一定程度上影响地层裂隙发育,从而间接对富水性产生促进或抑制作用^[16]。对于侏罗系煤层顶板砂岩含水层,其构造主要包含褶皱构造和断层构造。

1) 褶皱构造。褶皱构造形成时,岩层受顺层挤压力作用发生单层纵弯作用,在褶皱内部形成一个无变形的中和面,中和面以上张应力分布,以下压应力分布^[17],破坏区域主要集中在张应力分布区,使得褶皱构造曲率变大区裂隙较为发育。由此可知,在含水层上段,背斜构造使得富水性增加,而向斜构造却减小富水性,含水层下段相反。模型量化赋值将其富水性增加区赋值 1,富水性减弱区赋值 -0.3。

根据最小曲率原则,以较大曲率端褶皱中心为中点,向两翼作垂线,得出褶皱影响范围(图 1)。

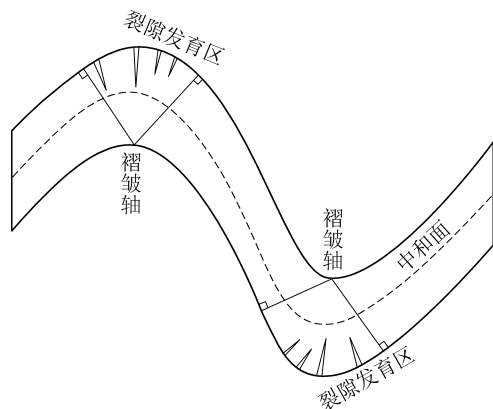


图 1 褶皱不同区域的裂隙影响示意

Fig.1 Schematic diagram of influence of fissures in different areas of folds

2) 断裂构造。断裂构造可作为储水空间、集水廊道、导水通道和隔水屏障,不同性质断裂构造对含水层富水性有较大影响^[14]。但是,由于研究区白垩系洛河组地层形成于燕山运动后期,地质运动不剧烈,洛河组地层内断裂构造不发育。同时,非煤系地层的中小型断裂构造难以直接探查,因此本次研究不考虑断裂构造对富水性的影响。

综合分析可知,影响洛河组含水层富水性的指标包括:含水层厚度、冲洗液消耗量、岩心采取率、中粗砂岩占比、地层埋深、水化学矿化度、褶皱构造。

2.2 基于 AHP 的分段空间富水性评价模型

在主控因素确定基础上,采用富水性指数法评价思维,按照含水介质、流动系统和构造因素 3 个方面,分别确定各主控因素权重。由于该分类方法将目标层按照不同大类进行区分,避免了指标叠加的重复性。

2.2.1 建立 AHP 层次结构分析模型

根据影响含水层空间富水性主控因素的分

析,将研究对象划分为3个层次^[18]。含水层富水性作为模型目标层(A层次),介质特征、水动力场、构造因素决定了富水性,是解决问题的中间环节,即模型的准则层(B层次),各个具体的主控因素指标构成了本模型的决策层(C层次),通过对该层次问题的决策,即可最终达到所求解的目标(图2)。

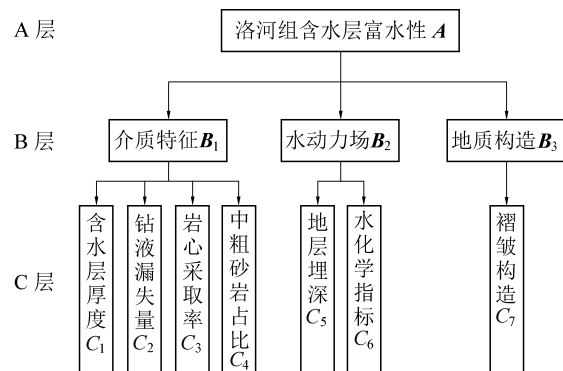


图2 洛河组含水层层次分析结构

Fig.2 Hierarchical analysis structure of Luohe Formation

采用专家打分法对各因素按照1~9标度进行打分,根据累计得分情况进行各因素间的总分比较,由此构建洛河组含水层富水性AHP评价的判断矩阵。由于 B_3 的决策层仅有1项指标,无需进行矩阵计算。 $A \sim B_1, B_2, B_3, B_1 \sim C_1, C_2, C_3, C_4, B_2 \sim C_5, C_6$ 对应的 F_1, F_2, F_3 分别为

$$F_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/4 & 2 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

进行一致性检验后,求取权重判断矩阵。 $A \sim B_1, B_2, B_3, B_1 \sim C_1, C_2, C_3, C_4, B_2 \sim C_5, C_6$ 对应的权重判断矩阵 W_1, W_2, W_3 分别为

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.593 & 6 \\ 0.157 & 1 \\ 0.249 & 3 \end{bmatrix} \quad W_2 = \begin{bmatrix} 0.476 & 1 \\ 0.117 & 0 \\ 0.154 & 7 \\ 0.252 & 3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$W_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.666 & 7 \\ 0.333 & 3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad W_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

最终计算各因素对A的影响权重矩阵W,即

$$W = W_2 W_3 W_4 \times W_1 = \begin{bmatrix} 0.476 & 1 & 0 & 0 \\ 0.117 & 0 & 0 & 0 \\ 0.154 & 7 & 0 & 0 \\ 0.252 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0.666 & 7 & 0 \\ 0 & 0.333 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.593 & 6 \\ 0.157 & 1 \\ 0.249 & 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.282 & 6 \\ 0.069 & 4 \\ 0.091 & 8 \\ 0.149 & 8 \\ 0.104 & 7 \\ 0.052 & 4 \\ 0.249 & 3 \end{bmatrix}$$

由此可知,影响洛河组含水层富水性各指标权重分别为0.282 6、0.069 4、0.091 8、0.149 8、0.104 7、0.052 4、0.249 3。

2.2.2 数据归一化处理

利用数据归一化方法可消除主控因素不同量纲的数据对评价结果的影响,便于建立单因素属性数据库。在本次空间富水性评价中,需将各分层指标的最大值和最小值作为归一化边界,具体归一化方法见式(7)、式(8)。

$$\text{正相关指标: } X_{i1} = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (7)$$

$$\text{负相关指标: } X_{i1} = 1 - \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (8)$$

式中: X_{i1} 为单指标归一化值; X_i 为单指标实际数值; X_{\min} 为各层段单指标最小值; X_{\max} 为各层段单指标最大值。

2.2.3 富水性评价模型建立

采用以往富水性指数S的初始模型来对含水层富水性进行评价^[19]。富水性指数定义为某一空间位置上的各种影响因素对其产生的叠加影响总和,可用模型式(9)表示

$$S = \sum_{k=1}^p W_k f_k(x, y, z) \quad (9)$$

式中： W_k 为影响因素权重； $f_k(x,y,z)$ 为单因素影响值函数， x,y,z 为空间地理坐标； p 为影响因素数量。

由富水性模型得出含水层不同层段富水性指数并进行分区，其分区阈值需综合考虑不同层段的富水性指数进行综合确定，从而形成统一含水层的空间富水性分区。

2.2.4 模型拟合

含水层单位涌水量是反应含水层富水性的综合指标。通过对巨厚基岩含水层同一平面位置不同垂向深度、同一垂向层位不同平面位置含水层单位涌水量进行分析，拟合分析富水性评价模型对其进行校验，最终得出科学合理的富水性评价模型。

3 实例应用

研究区为陕西省彬长矿区亭南煤矿，矿井主采侏罗系延安组 4 号煤层。根据井田地质条件分析可知，井田地层由新到老主要有：第四系、新近系、白垩系华池组、白垩系洛河组、白垩系宜君组、侏罗系安定组、侏罗系直罗组、侏罗系延安组、侏罗系富县组和三叠系胡家村组，其中影响矿井生产的主要含水层为洛河组含水层。含水层发育与空间位置见表 1。洛河组砂岩含水层属于典型的巨厚含水层，煤层回采后导水裂隙带无法完全波及含水层全段，因此该含水层空间

富水性评价对矿井涌水量的预测有重要意义。

表 1 亭南煤矿水文地质结构

Table 1 Hydrogeology structure of Tingnan coal mine			
地层	岩性	厚度/m	水文地质性质
Q	黄土、黏土	0~210	含(隔)水层
N	黏土	0~80	隔水层
K _h	泥岩、粉砂岩	0~40	隔水层
K _l	砾岩、中砂岩	220~340	含水层
			单位涌水量 0.14~0.27 L/(s·m)
			渗透系数 0.05~0.52 m/d
K _y	砾岩	10~39	隔水层
J _a 、J _z	泥岩、粉砂岩、	80~170	含(隔)水层
J _y	中砂岩		单位涌水量：
			0.000 5~0.003 0 L/(s·m)
			渗透系数：0.000 5~0.016 0 m/d
	煤	0~22	—
J _f	泥岩	14~40	相对隔水层
T	泥岩、细砂岩	不详	隔水层

3.1 主控因素专题图绘制

亭南井田范围内可利用的抽水试验仅将洛河组分为 2 段，通过井田范围内以往地质及水文地质勘探资料，按照沉积结构和已有资料情况，将洛河组含水层垂向划分为 2 段，分别建立各层段主要评价指标专题图(图 3、图 4)。

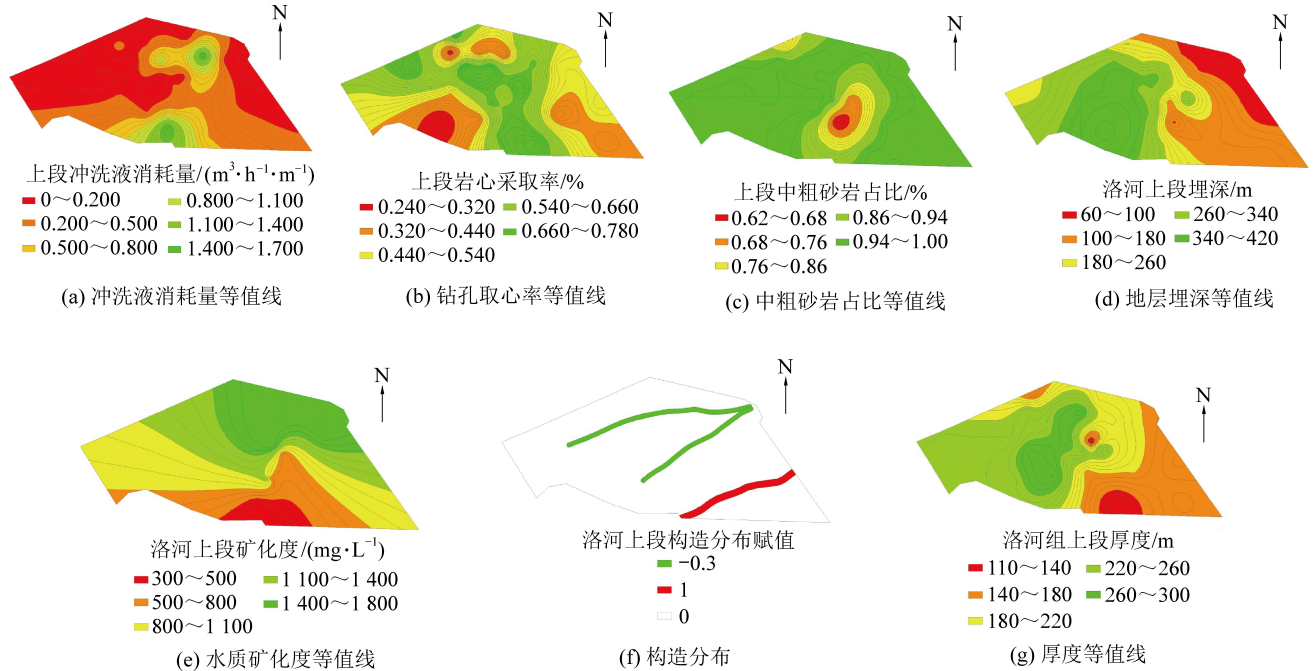


图 3 洛河组上段主控因素专题图

Fig.3 Thematic map of main control factors in upper section of Luohe Formation

3.2 富水性评价模型建立

采用式(7)对含水层厚度、冲洗液消耗量、中粗砂岩占比和褶皱构造 4 组主控因素专题图进行归一

化处理；式(8)对岩性采取率、地层埋深和水化学指标 3 个主控因素进行归一化，消除各因素单位差异。结合富水性评价模型(式(9))和各指标权重确定成

果,确定亭南煤矿洛河组含水层富水性各影响因素权重分别为: $W_1 = 0.282\ 6$ 、 $W_2 = 0.069\ 4$ 、 $W_3 = 0.091\ 8$ 、 $W_4 = 0.149\ 8$ 、 $W_5 = 0.104\ 7$ 、 $W_6 = 0.052\ 4$ 、 $W_7 = 0.249\ 3$ 。由此得出富水性评价模型为

$$S = \sum_{k=1}^7 W_k f_k(x,y,z) = 0.282\ 6 f_1(x,y,z) + 0.069\ 4 f_2(x,y,z) + 0.091\ 8 f_3(x,y,z) +$$

$$0.149\ 8 f_4(x,y,z) + 0.104\ 7 f_5(x,y,z) + 0.052\ 4 f_6(x,y,z) + 0.249\ 3 f_7(x,y,z)$$

3.3 富水性评价分区

通过计算机空间信息处理叠加方法,将各主控因素归一化值按空间平面坐标对应位置进行融合,采用富水性评价模型综合计算各点富水性指数,分别形成洛河组含水层上、下段富水性指数分布值。

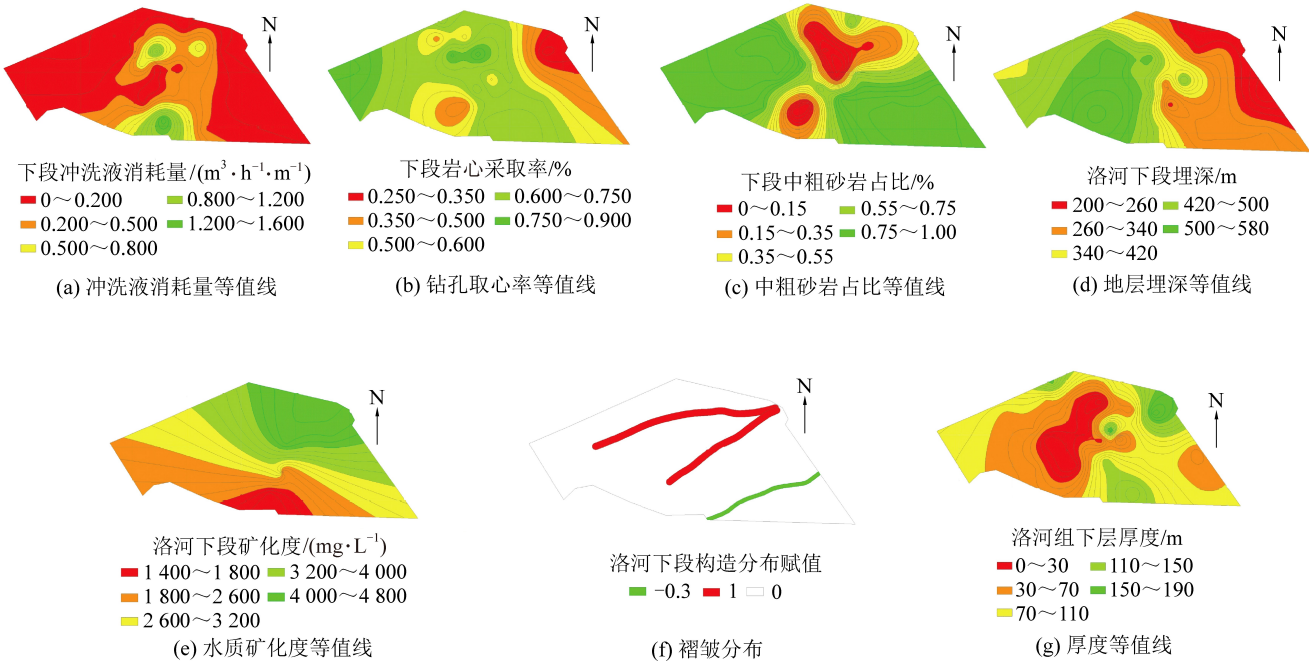


图 4 洛河组下段主控因素专题图

Fig.4 Thematic map of main control factors in lower section of Luohe Formation

将各层位富水性指数统一考虑,借助 GIS 自然断点分级法对所有值进行分区,得出富水性分区阈值分别为 0.294、0.384、0.522、0.614。根据分级阈值将研究区域划分为 5 个区域:

- $S > 0.614$ 含水层富水性强
- $0.522 < S \leq 0.614$ 含水层富水性较强
- $0.384 < S \leq 0.522$ 含水层富水性中等
- $0.294 < S \leq 0.384$ 含水层富水性较弱
- $S \leq 0.294$ 含水层富水性弱

由此得到洛河组含水层富水性分区如图 5 所示。

3.4 结果拟合与验证

亭南井田共有 3 个钻孔对洛河组含水层不同层段开展了专项抽水试验,得出了其单位涌水量(表 2)。

利用现有抽水试验成果对洛河组含水层富水性评价模型进行识别验证,对比不同富水性分区位置单位涌水量,通过富水性拟合率 S_f 进行评价,拟合如下

$$S_f = \frac{D_f}{D_s} \times 100\% \tag{10}$$

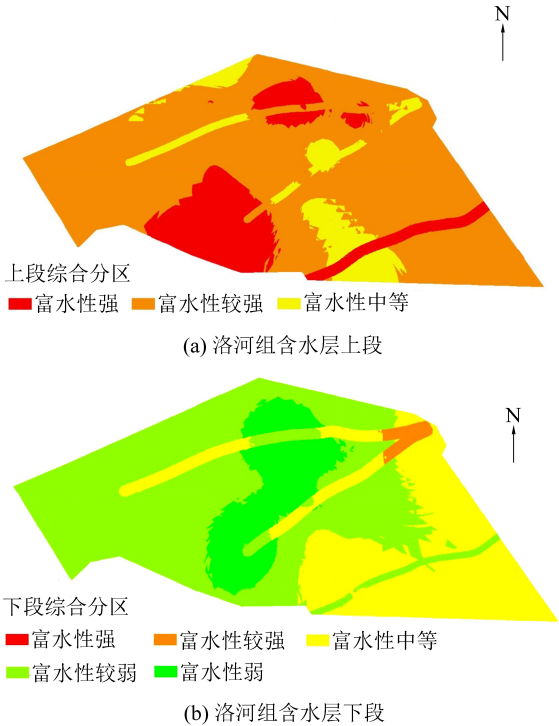


图 5 洛河组含水层富水性分区

Fig.5 Water yield property map of Luohe Formation aquifer

表 2 井田洛河组分层抽水试验成果

Table 2 Results of stratified pumping test of Luohe Formation aquifer in minefield

抽水层位	孔号	单位涌水量 $q/(L \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$
洛河上段	TC2	0.022 38
	TC3	0.054 86
	TC4	0.049 08
洛河下段	TC3	0.029 42
	TC4	0.023 15

式中: S_F 为富水性拟合率, %; D_F 为评价结果与实际情况相吻合点数量; D_S 为本层抽水试验总数。

将各层位抽水试验得出的单位涌水量与富水性分区图叠加拟合, 如图 6 所示。

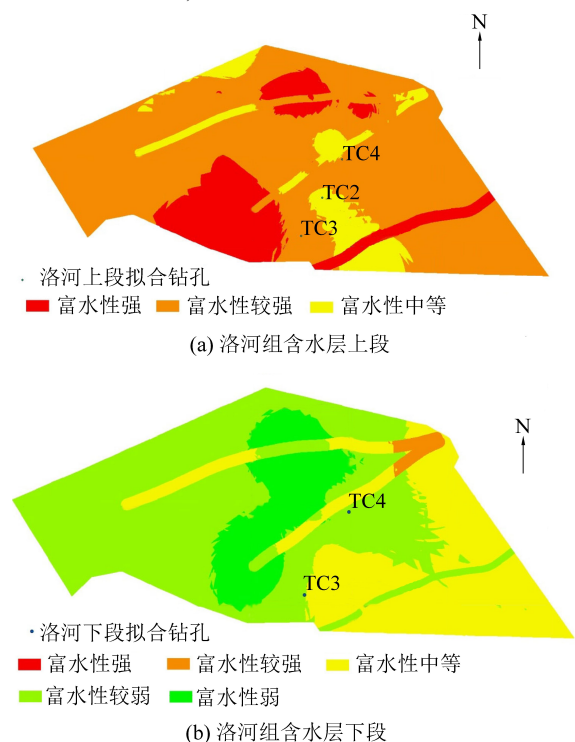


图 6 洛河组含水层富水性分区拟合示意

Fig.6 Fitting map of water yield property in the lower part of Luohe Formation aquifer

由图 6a 可知, TC2 钻孔富水性明显小于 TC3 和 TC4 钻孔, 其 TC2 钻孔位于富水性中等区, TC3 和 TC4 钻孔位于富水性较强区。同时, TC3 富水性略大于 TC4 钻孔富水性。由此表明, 洛河组上段富水性分区与钻孔抽水试验成果较为一致。由图 6b 可知, TC3 和 TC4 钻孔均位于富水性较弱区, 由抽水试验成果表明, TC3 和 TC4 钻孔富水性值较为接近。同时, TC3 钻孔接近富水性较弱与富水性中等区交界处, 其富水性略大于 TC4 钻孔富水性。由此表明, 洛河组下段抽水试验成果与富水性分区拟合较好。综合图 6, TC3 钻孔上段富水性强于下段, 其单位涌水量也反映了该处空间上的富水性差异特

征。同时 TC4 钻孔也反映了该处空间上的富水性差异特征。表明本次得出的富水性评价模型可进行同一平面位置的空间对比, 具有较强的适用性。

3.5 评价模型讨论

根据含水层充水强度指数表达式 (式 (1)) 可知, 空间富水性评价模型可根据地层沉积规律特征, 将具有类似水文地质结构的沉积地层划分为 1 层综合考虑。同时, 对于层段划分也可参考矿井现有抽水试验资料, 根据抽水层位进行评价和拟合。因此, 空间富水性评价模型的垂向划分层段并非统一划分方法, 而是依据各矿井实际情况进行划分, 且划分层位越多其评价结果越准确。

4 结 论

1) 通过巨厚非均质基岩含水层充水条件进行分析, 得出非均质含水层充水强度是空间富水性积分函数, 在导水裂隙带无法全部波及含水层时, 平面和垂向富水性差异均会影响含水层对矿井的充水强度。

2) 从含水介质、流动系统和地质构造 3 个方面, 确定出含水层厚度、冲洗液消耗量、岩心采取率、中粗砂岩占比、地层埋深、水化学矿化度、褶皱构造 7 个主控因素, 通过 AHP 层次分析法确定权重, 形成分段空间富水性评价模型。

3) 构建了彬长矿区亭南煤矿洛河组含水层富水性评价模型, 将含水层上段划分出“强、较强、中等”3 个富水区, 下段划分出“强、较强、中等、较弱、弱”5 个富水区, 对比表明上段富水性整体好于下段。

参考文献 (References):

- [1] 武 强, 黄晓玲, 董东林, 等. 评价煤层顶板涌 (突) 水条件的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 62-67.
WU Qiang, HUANG Xiaoling, DONG Donglin, et al. “Three maps-two predictions” method to evaluate water bursting conditions on roof coal [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 62-67.
- [2] 武 强, 许 珂, 张 维. 再论煤层顶板涌 (突) 水危险性预测评价的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1341-1347.
WU Qiang, XU Ke, ZHANG Wei. Further research on “three maps-two predictions” method for prediction on coal seam roof water bursting risk [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1341-1347.
- [3] 马莲净, 赵宝峰. 顶板含水层放水试验的钻孔单位涌水量计算方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(3): 49-54.
MA Lianjing, ZHAO Baofeng. Calculation method of borehole spe-

- cific capacity based on dewatering tests of roof aquifer [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(3):49-54.
- [4] 范涛,李文刚,王鹏,等.瞬变电磁拟MT深度反演方法精细解释煤矿岩层富水性研究[J].煤炭学报,2013,38(S1):129-135.
- FAN Tao, LI Wengang, WANG Peng, *et al.* A Research on fine interpretation for water containment of coal mine rock strata by MT imitated TEM depth inversion method [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1):129-135.
- [5] 吕玉广,李宏杰,夏宇君,等.基于多类型四双法的煤层顶板突水预测评价研究[J].煤炭科学技术,2019,47(9):219-228.
- LYU Yuguang, LI Hongjie, XIA Yujun, *et al.* Prediction and evaluation study on coal seam roof water inrush based on multi-type four-double method [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9):219-228.
- [6] 侯恩科,龙天文,刘庆利,等.基于ArcGIS的洛河组含水层富水性评价[J].煤田地质与勘探,2019,47(2):151-156.
- HOU Enke, LONG Tianwen, LIU Qingli, *et al.* Analysis of water abundance characteristics of sandstone aquifer in Luohe Formation on the basis of ArcGIS [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2):151-156.
- [7] 武强,王洋,赵德康,等.基于沉积特征的松散含水层富水性评价方法与应用[J].中国矿业大学学报,2017,46(3):460-466.
- WU Qiang, WANG Yang, ZHAO Dekang, *et al.* Water abundance assessment method and application of loose aquifer based on sedimentary characteristics [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3):460-466.
- [8] 方刚,蔡玥.基于沉积控水分析的巴拉素井田富水性分区研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(3):105-111.
- FANG Gang, CAI Yue. Study on water yield property zoning in Balasu well field based on sedimentary water control analysis [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3):105-111.
- [9] 闫国才,鲜鹏辉,仇念广.深井低阻体电性源短偏移距瞬变电磁探测技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(6):171-176.
- YAN Guocai, XIAN Penghui, QIU Nianguang. Study on short offset transient electromagnetic detection technology for low-resistance electrical sources in deep mine [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6):171-176.
- [10] 李东,刘生优,张光德,等.鄂尔多斯盆地北部典型顶板水害特征及其防治技术[J].煤炭学报,2017,42(12):3249-3254.
- LI Dong, LIU Shengyou, ZHANG Guangde, *et al.* Typical roof water disasters and its prevention & control technology in the north of Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12):3249-3254.
- [11] 缪宗利,朱莉娟,侯明才,等.鄂尔多斯盆地演武地区中侏罗统直罗组沉积相[J].成都理工大学学报(自然科学版),2018,45(2):166-176.
- MIAO Zongli, ZHU Lijuan, HOU Mingcai, *et al.* Sedimentary facies of Middle Jurassic Zhiluo Formation in Yanwu area, Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(2):166-176.
- [12] 李超峰,虎维岳,刘英锋.洛河组含水层垂向差异性研究及保水采煤意义[J].煤炭学报,2019,44(3):847-856.
- LI Chaofeng, HU Weiyue, LIU Yingfeng. Vertical hydrogeological characteristics of Luohe aquifer and its significance of water-preserved coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3):847-856.
- [13] 薛禹群,吴吉春.地下水动力学[M].3版.北京:地质出版社,2010:5-8.
- [14] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1995:15-17.
- [15] 蒋小伟.盆地含水系统与地下水流动系统特征[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
- [16] 马亚杰,左文喆,刘伯,等.隐伏向斜扬起端构造控水规律分析:以开滦东欢坨矿为例[J].煤炭学报,2012,37(S1):157-160.
- MA Yajie, ZUO Wenzhe, LIU Bo, *et al.* Analysis on law of geological structures controlling groundwater in buried syncline nose: a case in the Donghuantuo Coal Mine, Kailuan [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1):157-160.
- [17] 顾宏星,傅雪海,季明,等.褶皱中和面位置确定及其在六盘水涝河向斜中的应用[J].煤田地质与勘探,2011,39(5):11-14.
- GU Hongxing, FU Xuehai, JI Ming, *et al.* Locating neutral surface of fold and its application in Laohe syncline in Liupanshui Area [J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(5):11-14.
- [18] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.
- GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyun. Study and applications of Analytic Hierarchy Process [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5):148-153.
- [19] 武强,樊振丽,刘守强,等.基于GIS的信息融合型含水层富水性评价方法—富水性指数法[J].煤炭学报,2011,36(7):1124-1128.
- WU Qiang, FAN Zhenli, LIU Shouqiang, *et al.* Water-richness evaluation method of water-filled aquifer based on the principle of information fusion with GIS: Water-richness index method [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7):1124-1128.