

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.04.014

基于改进 AHP 法和 CRITIC 法耦合赋权的 松散承压含水层富水性评价

葛如涛, 陈陆望, 王迎新, 张 杰, 李蕊瑞

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:文章通过分析华北型煤田——淮北煤田 60 个第四系松散承压含水层有效抽水试验钻孔数据,选择隔水系数 R 、水头系数 G 、含水层厚度 S 、最厚砂层厚度 M 、级配系数 D 、砂泥互层系数 P 共 6 个影响因素作为评价指标,基于博弈论将层次分析 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 法和基于指标相关性的指标权重确定 (CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation, CRITIC) 法进行耦合,建立多因素复合的松散承压含水层富水性评价模型,避免 AHP 法与 CRITIC 法单独赋权时偏主观或偏客观问题;采用 11 个抽水试验钻孔数据对该耦合赋权模型进行验证,该模型评价结果的正确率高达 90.91%,所选评价指标均可通过普通地质勘探孔数据得到,无需过多开展现场抽水试验与物探工作;将该模型应用于受采动影响的具体工程实例,评价松散承压含水层富水性的时空动态变化,结果较为精准。

关键词:层次分析(AHP);基于指标相关性的指标权重确定(CRITIC);松散承压含水层;富水性;评价模型

中图分类号:P641.136

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)04-0519-10

Water abundance assessment on unconsolidated confined aquifer based on the coupling of improved AHP and CRITIC

GE Rutao, CHEN Luwang, WANG Yingxin, ZHANG Jie, LI Ruirui

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In this paper, according to the analysis of the data of 60 effective pumping test boreholes collected from the Quaternary unconsolidated confined aquifer of Huaibei Coalfield, which is a typical North China type coalfield, the multi-factor complex model of water abundance assessment on unconsolidated confined aquifer was established. In the model, six factors were selected as the assessing indexes, which included water resistance coefficient (R), head coefficient (G), aquifer thickness (S), thickness of the thickest sand layer (M), gradation coefficient (D) and interbedded sand and mud coefficient (P). The weight values of six factors were assigned based on the coupling of improved Analytic Hierarchy Process (AHP) and CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) to avoid the subjective or objective characteristic when weights were separately determined by AHP or CRITIC. The coupling weighting model was verified by eleven pumping test boreholes data, and the accuracy of the assessment results of the model was as high as 90.91%. Moreover, these selected factors could be obtained from the data of ordinary geological exploration boreholes, so there was no need to carry out too many field pumping tests and geophysical explorations. The model was applied to a specific engineering case affected by mining to assess the temporal and spatial dynamic change of water abundance of unconsolidated confined aquifer, and the results were relatively accurate.

收稿日期:2020-11-16;修回日期:2021-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41972256)

作者简介:葛如涛(1995—),男,江苏泰州人,合肥工业大学硕士生;

陈陆望(1973—),男,湖北黄冈人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: luwangchen8888@163.com.

Key words: Analytic Hierarchy Process(AHP); CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC); unconsolidated confined aquifer; water abundance; assessment model

我国华北隐伏型煤田第四系松散承压含水层覆盖于煤系地层之上,是煤矿顶板水害防治、地下水资源管理与生态环境保护等研究的热点。该类含水层以非胶结砂土、砂砾为骨架,砂泥互层明显,具有承压性,富水性空间展布差异性较大;此外,受煤矿区长期采动影响,含水层富水性的动态变化明显^[1-2]。目前,对于松散承压含水层富水性评价与分区,研究方法可分为以下 2 类:①以《煤矿防治水细则》为代表,根据水文地质勘探成果,采用抽水试验得到的单位涌水量作为标准评价指标进行含水层富水性评价与分区^[3];②通过物探手段进行探测,包括直流电法、瞬变电磁法、高密度电法等^[4]。物探手段的解译成果受研究人员经验和技术水平影响,存在多解性;采用单位涌水量进行富水性分区,由于抽水试验成本高、过程复杂,抽水试验钻孔数量与抽水试验次数有限,无法反映采动影响下含水层富水性的时空动态变化。

为了提高松散承压含水层富水性评价与分区的准确性与普适性,文献[5-6]借助地理信息系统(geographic information system, GIS)的空间信息融合功能,运用沉积控水规律建立多因素复合评价模型;文献[7]基于层次分析(Analytic Hierarchy Process, AHP)法,借助 GIS 空间分析功能,开展多元信息融合,对松散承压含水层的富水性进行分析与评价。采用多因素复合法,关键在于如何合理确定各影响因素的权重。采用 AHP 法或者改进 AHP 法对主控因素进行赋权^[8-9],属于主观赋权法,主观性较强,存在局限性。文献[10]在研究含水层非均质性问题时采用熵权法对主控因素进行赋权,但该方法在赋权时未考虑专家意见;文献[11]在研究风化基岩富水性评价方法时,分别使用 AHP 法、熵权法及耦合两者的方法来确定影响因素权重,结果表明,耦合 AHP 法和熵权法确定权重进而预测的富水性类别,与实测数据吻合度明显高于单独使用某一赋权法。而熵权法仅根据各影响因素本身变异大小确定其权重,未考虑影响因素之间的冲突性;基于指标相关性的指标权重确定(CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation, CRITIC)法兼顾影响因素变异大小和冲突性,在赋权准确程度方面优于熵权法^[12]。因此,耦合改进 AHP 法与 CRITIC 法的赋权方法会使评价结果更为合理。

本文以淮北煤田松散承压含水层为研究区,将改进 AHP 法和 CRITIC 法进行耦合,来确定第四系松散承压含水层富水性影响因素的权重,提出一种更科学的、多因素复合的松散承压含水层富水性评价模型。该模型所需参数均可通过普通地质勘探孔数据获得,无需进行更多的抽水试验,降低了抽水钻孔的施工成本和时间投入;相比于仅使用矿区为数不多的抽水试验孔数据进行含水层富水性评价与分区,该模型评价准确度更高。此外,由于含水层水位受采动影响,发生永久性或半永久性变化,以致含水层富水性产生相应变化,该富水性评价模型能够较准确地对研究区富水性进行时空动态评价。

1 研究区地质背景

淮北煤田地处华北板块,位于华北平原南部、郟庐断裂带西侧;区内除灵璧、泗县、濉溪、涡阳等地有新元古界和下古生界基岩出露外,其余绝大部分地区为厚度 180~400 m 的第四系松散层所覆盖^[13-14];煤田所在区域属于暖温带半湿润性气候,年均降水量为 700~950 mm,年降雨量最大为 1 107 mm;第四系松散层除直接接受大气降水补给外,还受到地表水体的渗流补给;煤田地表水系发育,沱河、淝河、新汴河、浍河、濉河等河流呈不对称羽状展布于淮河北岸,对浅部松散层起到丰蓄枯补的作用^[15]。淮北煤田松散层自上而下可划分为 4 个含水层(组)及 3 个隔水层(组),第一含水层(简称“一含”)为近地表的潜水孔隙含水层,第二、三、四含水层(简称“二含”、“三含”、“四含”)为孔隙承压含水层^[16]。其中,四含直接覆盖在煤系地层之上,是矿井开采的直接充水水源。含水层多为黏土质砂、粉细砂和中砂交替沉积,一般单层厚度较小,多为 0.3~3.5 m。含水层内含有黏土夹层。隔水层多由钙质黏土与砂质黏土组成,第一、二隔水层厚度较小,普遍小于 25 m,隔水性能一般;第三隔水层厚度大,平均厚度达 80 m,隔水性能强。

2 富水性评价模型的建立

2.1 影响因素确定

影响松散承压含水层富水性的因素是多元的。本文通过收集淮北煤田青东煤矿、朱仙庄煤

矿、祁南煤矿、祁东煤矿相关水文地质资料,分析上述 4 个煤矿松散承压含水层抽水试验 60 个有效钻孔的数据,发现其富水性主要受补给情况、含水层厚度、岩性及砂泥分布情况控制。其中,岩性为定性指标,故先按类别对其量化,然后用级配系数来定量表示岩性特征。最终选取隔水系数 R 、水头系数 G 、含水层厚度 S 、最厚砂层厚度 M 、级配系数 D 、砂泥互层系数 P 共 6 个影响因素。

(1) 隔水系数 R 。松散承压含水层富水性与地表水体、大气降水直接或间接补给有关,含水层埋深越浅,接受的补给越充分。隔水层的存在使得隔水层下伏含水层接受的补给受到抑制,其抑制程度与上覆隔水层厚度相关。将松散层某一层位含水层的上覆隔水层累加厚度与该层位含水层底板埋深的比值定义为隔水系数 R ,即

$$R = \frac{r}{H} \quad (1)$$

其中: r 为上覆隔水层总厚度; H 为该含水层底板埋深。 R 越大,该含水层接受补给越困难。

(2) 水头系数 G 。承压水头的变化能够反映含水层承压水位的变化,将某一层位含水层承压水头 T 与该含水层顶板埋深 H_0 的比值定义为水头系数 G ,即

$$G = \frac{T}{H_0} \quad (2)$$

G 越大,说明单位厚度的含水层给水能力越强,与地表的水力联系越强。

(3) 含水层厚度 S 。 S 是影响含水层富水性强弱的重要因素,地下水赋存情况与 S 密切相关,在其他影响因素相差不大的情况下, S 越大,含水层富水性越强。

(4) 最厚砂层厚度 M 。 M 是指某一含水层内厚度最大的一层砂砾层的厚度,只要没有黏土夹层,可以是不同粒径砂砾层累加厚度。在 S 一定的条件下, M 越大,说明层内黏土层越薄、层数越少,则含水层储水空间越大,层内水力联系越强,富水性越强。在 S 及其他影响因素相差不大的情况下, M 与富水性强弱相关。

(5) 级配系数 D 。在其他影响因素一定的情况下,松散含水层土体粒径组合不同,其富水性不同。根据抽水试验成果可知,卵砾石层较砂砾层富水性强,粒径大的砂砾层较粒径小的富水性强。将土体粒径组合对含水层富水性的贡献大小进行量化,见表 1 所列,进而构建表征含水层富水性强弱的粒径组合系数,即级配系数 D , D 值越大,富

水性越强。

D 计算公式为:

$$D = \sum d_{\gamma} c_{\gamma} / S \quad (3)$$

其中: d_{γ} 为粒径类别的量化值; c_{γ} 为不同粒径土层的厚度; γ 为土体粒径类别。

表 1 松散层按土体粒径级别赋值结果

粒径类别	黏土	黏土质砂	粉砂	细砂	中砂	粗砂	砾石
d_{γ}	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0

(6) 砂泥互层系数 P 。 P 是在砂泥比基础上进行改进的评价指标。以往研究采用的砂泥比仅简单计算含水层内砂砾层与黏土层累计厚度的比值,而未考虑垂向砂泥互层分布对含水层富水性的影响。钻探成果显示,淮北煤田内各级松散承压含水层在垂向上一般都多层结构,具体表现为砂砾层与黏土层交互沉积,故将这样的一组上覆砂砾层及其下伏黏土层定义为一个砂泥互层。在含水层厚度相近时,互层层数越多,单个互层内黏土比率越大,意味着层内砂砾层之间的水力联系越差,富水性相应较弱;反之,富水性较强。

朱仙庄煤矿 8105-四含检 2 孔与青东煤矿 2015-水 1 孔 2 个抽水钻孔揭露的四含厚度与砂泥比均相差无几。前者有 2 个互层,作为隔水层的黏土层将砂层分割开,砂层之间水力联系受阻;而后者仅有 1 个互层,为单一砂层含水层。2 个钻孔抽水试验得到的单位涌水量 q 分别为 2.8×10^{-5} 、 $0.01 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$,验证了上述观点。依据各个互层中黏土厚度比率对富水效果的贡献大小将其量化,构建表征砂泥互层影响富水性强弱的砂泥互层系数 P , P 值越大,层内水力联系越弱,富水性越弱。 P 计算公式为:

$$P = \sum p_{\epsilon} l_{\epsilon} / S \quad (4)$$

其中: p_{ϵ} 为互层内黏土厚度所占比率的赋值; l_{ϵ} 为各个互层的厚度; ϵ 为各互层序号。

p_{ϵ} 赋值见表 2 所列。

表 2 单个互层内黏土厚度比率级别赋值结果

黏土厚度/ 互层层厚	<0.10	0.10~	0.25~	0.50~	0.75~
		0.25	0.50	0.75	1.00
p_{ϵ}	1	2	3	4	5

淮北煤田青东、朱仙庄、祁南、祁东 4 个煤矿松散承压含水层 60 个抽水试验有效钻孔及其层位见表 3 所列,对应 60 个钻孔的 6 个影响因素取值见表 4 所列。

表 3 淮北煤田抽水试验 60 个钻孔名称及其层位

序号	钻孔名称	抽水层位	抽水日期	单位涌水量 $q/$ ($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)	序号	钻孔名称	抽水层位	抽水日期	单位涌水量 $q/$ ($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)
1	朱仙庄 水 10	四含	1959-11	0.157 700	31	青东 2015-观 1	四含	2015-12	0.010 000
2	朱仙庄 补 12-孔 7	四含	1963-12	0.020 800	32	青东 2017 观 1	四含	2017-07	0.029 300
3	朱仙庄 补 12-孔 7	二含	1964-03	1.959 000	33	祁南 15 ₉	二含	1979-04	0.205 000
4	朱仙庄 补 12-孔 7 检	三含	1964-03	1.049 000	34	祁南 补 14-8	四含	1979-07	2.389 000
5	朱仙庄 补 7-5	四含	1964-06	0.029 050	35	祁南 18 ₇	四含	1981-01	0.000 450
6	朱仙庄 I-7	四含	1964-06	0.078 900	36	祁南 15-16 ₁₀	二含	1981-09	0.856 000
7	朱仙庄 I-I-6	四含	1964-07	0.136 390	37	祁南 15-16 ₁₂	二含	1982-10	1.403 000
8	朱仙庄 83-07	四含	1983-09	0.190 700	38	祁南 2002 观 5	三含	2002-12	1.060 000
9	朱仙庄 83-03	四含	1983-11	0.147 400	39	祁南 09-水 1	四含	2009-09	0.005 790
10	朱仙庄 83-01	四含	1983-12	0.148 300	40	祁南 09-水 2	四含	2009-11	0.003 100
11	朱仙庄 84-15	四含	1984-06	0.040 900	41	祁南 2012 观 1	三含	2013-01	0.011 000
12	朱仙庄 84-04	四含	1984-06	0.068 000	42	祁南 2013-观 2	二含	2013-12	0.083 000
13	朱仙庄 84-05	四含	1984-06	0.131 100	43	祁南 16-水 1	四含	2016-04	0.000 572
14	朱仙庄 05-水 4	四含	2005-06	0.000 885	44	祁南 2017-观 1	四含	2017-05	0.006 000
15	朱仙庄 S4	四含	2015-05	0.004 520	45	祁南 2018-观 1	四含	2018-08	0.026 000
16	朱仙庄 S3	四含	2015-08	0.085 200	46	祁东 29 ₁	四含	1974-06	0.095 000
17	朱仙庄 17-22	四含	2017-10	0.048 300	47	祁东 24-25 ₈	四含	1974-09	0.036 000
18	朱仙庄 2017-20	四含	2017-11	0.032 730	48	祁东 水 2	三含	1983-04	0.212 000
19	朱仙庄 2017-19	四含	2018-01	0.039 400	49	祁东 水 3	三含	1983-05	1.050 000
20	朱仙庄 2017-18	四含	2018-01	0.045 620	50	祁东 26-27 ₁₁	三含	1983-08	1.020 000
21	朱仙庄 2018 四含	四含	2018-06	0.031 600	51	祁东 补 30 ₆	四含	1983-11	0.250 000
22	朱仙庄 2018-四含观 3	四含	2019-01	0.000 006	52	祁东 补 30 ₃	四含	1983-12	0.270 000
23	朱仙庄 2018-四含观 1	四含	2019-01	0.000 007	53	祁东 26-27 ₅	四含	1984-05	0.410 000
24	朱仙庄 8105-四含检 2	四含	2019-01	0.000 028	54	祁东 SQ1	四含	2000-11	0.385 000
25	朱仙庄 2018-四含观 2	四含	2019-02	0.002 290	55	祁东 SQ8	四含	2007-05	0.050 000
26	朱仙庄 2018-四含观 4	四含	2019-02	0.003 480	56	祁东 采前三号孔	四含	2007-06	0.051 900
27	朱仙庄 8105-四含检 1	四含	2019-04	0.000 083	57	祁东 SQ9	四含	2009-08	0.330 000
28	朱仙庄 2019-水 3	四含	2019-04	0.008 000	58	祁东 22-23B1	四含	2010-06	0.330 000
29	青东 09-观 1	四含	2009-12	0.000 318	59	祁东 2011-1	四含	2011-11	0.305 100
30	青东 2013-水 2	四含	2013-07	0.003 100	60	祁东 SQ13	四含	2014-03	0.263 800

表 4 淮北煤田抽水试验 60 个钻孔影响因素取值

序号	G	R	S/m	M/m	D	P	序号	G	R	S/m	M/m	D	P
1	0.984	0.533	13.56	13.56	6.000	0	31	0.848	0.746	10.22	5.22	1.255	3.000
2	0.986	0.069	13.53	5.86	3.630	2.946	32	0.830	0.761	0.81	0.81	3.000	0
3	0.976	0.930	35.45	15.18	2.587	1.622	33	0.945	0.098	52.48	10.47	1.944	3.442
4	0.970	0.080	49.98	24.35	3.002	0.951	34	0.912	0.373	25.90	25.90	6.000	0
5	0.986	0.522	18.68	6.31	1.949	4.000	35	0.983	0.682	26.15	12.75	1.411	1.537
6	0.981	0.515	32.84	16.02	2.603	3.588	36	0.972	0.252	77.05	11.65	2.097	2.972
7	0.986	0.533	38.09	23.55	3.527	1.145	37	0.959	0.058	39.10	13.50	2.209	0.848
8	0.823	0.473	45.86	26.16	3.488	0.859	38	0.814	0.223	54.00	7.70	2.583	3.138
9	0.856	0.498	35.39	17.90	3.993	0.988	39	0.935	0.725	9.20	3.15	2.339	3.445
10	0.845	0.560	40.37	16.60	3.763	1.565	40	0.869	0.773	10.28	2.10	1.592	2.529
11	0.794	0.475	38.27	9.08	1.341	4.162	41	0.869	0.680	14.92	4.32	2.067	3.552
12	0.750	0.468	39.11	11.98	3.134	2.282	42	0.692	0.174	42.02	2.82	1.385	4.926
13	0.789	0.509	38.65	17.65	4.063	3.064	43	0.874	0.769	15.02	0.40	1.331	2.530
14	0.661	0.574	8.00	0.70	1.262	5.000	44	0.880	0.763	6.53	2.57	2.323	2.196
15	0.874	0.781	6.76	1.81	1.964	3.142	45	0.980	0.622	15.45	0	1.500	0
16	0.781	0.594	33.48	7.20	1.926	4.139	46	0.999	0.488	21.31	5.90	1.490	4.000
17	0.696	0.506	33.59	8.47	1.987	3.588	47	0.997	0.617	32.65	3.97	1.567	5.000
18	0.774	0.542	24.25	12.85	2.427	1.736	48	0.993	0.459	35.90	12.60	2.696	1.883
19	0.970	0.666	22.65	7.05	1.844	3.377	49	0.989	0.222	46.90	32.40	2.504	0.300
20	0.921	0.558	24.70	14.75	2.228	1.208	50	0.985	0.208	56.10	13.40	2.241	1.067
21	0.671	0.575	14.50	1.08	1.558	5.000	51	0.995	0.498	44.60	23.16	3.068	2.391

续表

序号	G	R	S/m	M/m	D	P	序号	G	R	S/m	M/m	D	P
22	0.869	0.732	6.44	4.20	2.304	3.000	52	0.989	0.545	49.10	13.30	3.881	3.018
23	0.671	0.629	13.81	1.26	1.256	4.816	53	0.996	0.431	59.90	22.30	3.500	3.457
24	0.437	0.664	10.67	2.76	2.806	4.288	54	0.971	0.554	44.30	7.30	4.300	3.072
25	0.012	0.675	3.22	2.26	2.403	3.000	55	0.966	0.653	16.75	4.35	3.244	3.000
26	0.862	0.650	7.67	2.97	1.957	2.900	56	0.963	0.489	46.05	17.05	2.576	3.841
27	0.436	0.613	20.00	6.90	1.800	4.252	57	0.966	0.415	67.50	20.35	3.946	4.705
28	0.797	0.545	24.95	5.06	1.485	4.254	58	0.920	0.638	51.23	19.14	2.641	2.855
29	0.787	0.545	24.95	5.06	1.485	4.254	59	0.891	0.604	54.70	15.60	3.758	3.675
30	0.460	0.767	3.97	2.16	2.672	1.367	60	0.867	0.462	46.10	14.30	5.222	1.243

2.2 权重确定

2.2.1 改进 AHP 法的赋权方法

传统的 AHP 法在构造判断矩阵时,各指标之间相对重要程度的判断会受到该领域专家研究方向、工作经验等影响,具有一定的主观性;此外,该方法固化了标度,不具有扩展性和传递性,导致矩阵表述与实际情况相差很大^[17]。改进 AHP 法的赋权方法如下:

(1) 采用极大值法和极小值法对影响因素进行归一化处理,消除影响因素单位不同对数据比较造成的影响。极大值法适用于与评价结果成正比的影响因素数据归一化,极小值法适用于与评价结果成反比的影响因素数据归一化。极大与极小值法计算公式分别为:

$$X_i = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (5)$$

$$X_i = \frac{\max x_i - x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (6)$$

其中: X_i 为第 i 个影响因素数据归一化后的量化值; i 为影响因素序号; $\max x_i$ 、 $\min x_i$ 分别为第 i 个影响因素数据归一化前的最大值和最小值。

(2) 运用 SPSS 软件中的 CORREL 函数分别对各影响因素和评价标准值(钻孔的单位涌水量 q)进行相关性分析^[18],计算出各影响因素与评价标准值的相关系数,相关系数越大,表明该因素与评价标准值拟合得越好,则该因素相对重要程度越高。采用期望标度法,根据重要程度的传递性法则将各因素两两比较排序,依次可以计算出判断矩阵未知元素的值。

期望标度取值见表 5 所列。

表 5 期望标度取值

重要程度	比例标度
相同	1.00
略重要	1.30
明显重要	1.77
绝对重要	3.63

如果该矩阵中 $a_{12}=c_1, a_{23}=c_2, \dots, a_{(n-1)n}=c_{(n-1)}$, 那么 $a_{mm} = \prod_{i=m}^{n-1} c_i (m=1, 2, \dots, n-1; m$ 为小于 n 的随机整数; n 为影响因素数), 从而可以构建完整的判断矩阵 B_{1-1} 。

(3) 计算各影响因素的样本标准差 $s(i) (i=1, 2, \dots, n)$ 。样本标准差越大,说明该因素内部变化形式越丰富,其对于综合评价的影响越大。因此,可采用各影响因素的样本标准差来表征各影响因素对富水性的影响程度,从而构建判断矩阵 B_{1-2} 。 B_{1-2} 中元素计算公式为:

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{s(i) - s(j)}{s_{\max} - s_{\min}} (b_{\min} - 1) + 1, & s(i) \geq s(j); \\ \left[\frac{s(i) - s(j)}{s_{\max} - s_{\min}} (b_{\min} - 1) + 1 \right]^{-1}, & s(i) < s(j) \end{cases} \quad (7)$$

其中: $s(i)$ 、 $s(j)$ 分别为影响因素 i 和影响因素 j 的样本标准差; s_{\max} 、 s_{\min} 分别为影响因素样本标准差的最大值和最小值; b_{\min} 为相对重要程度参数, $b_{\min} = \min \{9, \text{int} [s_{\max}/s_{\min} + 0.5]\}$, int 为取整函数。

(4) 由于多阶判断矩阵较为复杂,矩阵中会出现某些元素前后矛盾的现象,有必要检验判断矩阵的一致性,保证输出结果及最终权重向量的准确性。一致性指标 (consistency index, CI) I_C 检验公式为:

$$I_C = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad (8)$$

$$I_R = I_C/R_C \quad (9)$$

其中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值; R_C 为随机一致性比率 (consistency rate, CR); I_R 为随机一致性指标 (random index, RI)。当 CR 小于 0.1 时,可认为判断矩阵满足一致性要求,反之,需要调整判断矩阵。对于六阶矩阵,对应的随机一致性指标 $RI^{[19]}$ 为 1.24。

(5) 求出各个判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量,标准化处理后可得所求的权重向

量 W_{1-1} 、 W_{1-2} 。若各判断矩阵符合一致性检验要求,则综合评价矩阵是可行的。故可取各权重向量组成元素 e_i 的平均值,构建结合矩阵 B_{1-1} 、 B_{1-2} 的权重向量 W_1 为:

$$W_1 = \frac{1}{2}(W_{1-1} + W_{1-2}) \quad (10)$$

改进 AHP 法具体实现过程如下:

(1) 由 2.1 节可知, R 、 P 与富水性近似呈负相关性, G 、 S 、 M 、 D 与富水性近似呈正相关性。采用对应的归一化方法((5)式、(6)式)对表 4 影响因素数据进行归一化处理。

(2) 分别对各影响因素和评价标准值进行相关性分析,得出各影响因素与评价标准值之间的相关系数,6 个影响因素按相关系数从大到小排序依次为: R (0.645)、 M (0.492)、 P (0.386)、 S (0.374)、 D (0.344)、 G (0.271)。采用期望标度法构建判断矩阵 B_{1-1} 为:

$$B_{1-1} = \begin{bmatrix} 1.000 & 1.700 & 2.210 & 2.873 & 3.735 & 4.855 \\ 0.588 & 1.000 & 1.300 & 1.690 & 2.197 & 2.856 \\ 0.452 & 0.769 & 1.000 & 1.300 & 1.690 & 2.197 \\ 0.348 & 0.592 & 0.769 & 1.000 & 1.300 & 1.690 \\ 0.268 & 0.455 & 0.592 & 0.769 & 1.000 & 1.300 \\ 0.206 & 0.350 & 0.455 & 0.592 & 0.769 & 1.000 \end{bmatrix}$$

(3) 计算得到影响因素样本标准差,6 个影响因素按其样本标准差从大到小排序依次为: P (0.283)、 M (0.253)、 S (0.236)、 D (0.216)、 R (0.188)、 G (0.174)。经计算, $b_{\min} = \min\{9, \text{int}[2.118]\} = 2$ 。根据(7)式构建判断矩阵 B_{1-2} 为:

$$B_{1-2} = \begin{bmatrix} 1.000 & 1.272 & 1.428 & 1.609 & 1.873 & 2.000 \\ 0.786 & 1.000 & 1.156 & 1.337 & 1.600 & 1.728 \\ 0.700 & 0.865 & 1.000 & 1.181 & 1.444 & 1.572 \\ 0.622 & 0.748 & 0.847 & 1.000 & 1.263 & 1.390 \\ 0.534 & 0.625 & 0.692 & 0.792 & 1.000 & 1.128 \\ 0.500 & 0.579 & 0.636 & 0.719 & 0.887 & 1.000 \end{bmatrix}$$

(4) 判断矩阵 B_{1-1} 、 B_{1-2} 均为六阶矩阵,经计算其最大特征值 λ_{\max} 分别为 6.000 1、6.002 2;通过(8)式、(9)式可得 CR_{1-1} 为 2.0×10^{-5} ,小于 0.1; CR_{1-2} 为 3.8×10^{-4} ,小于 0.1。因此,判断矩阵 B_{1-1} 、 B_{1-2} 均满足一致性检验要求。

(5) 求出各判断矩阵对应最大特征值的特征向量,标准化处理后得到所求权重向量。 B_{1-1} 对应的影响因素权重 W_{1-1} 中 6 个影响因素的权重分

别为: R , 0.349 4; G , 0.071 9; S , 0.121 6; M , 0.205 5; D , 0.093 5; P , 0.158 1。 B_{1-2} 对应的影响因素权重 W_{1-2} 中 6 个影响因素的权重分别为: R , 0.168 2; G , 0.111 7; S , 0.227 6; M , 0.214 9; D , 0.161 3; P , 0.116 2。

B_{1-1} 、 B_{1-2} 均满足一致性检验要求,故可用(10)式求得最终 R 、 G 、 S 、 M 、 D 、 P 6 个影响因素权重,进而得到权重向量 W_1 ,即 $W_1 = [0.258 8$
0.091 8 0.174 6 0.210 2 0.127 4 0.137 2]。

2.2.2 CRITIC 赋权方法

CRITIC 法是文献[20]提出的一种基于客观条件的赋权方法。该方法主要根据各指标的信息量和相关性对其赋权,分别用对比强度和指标冲突性来反映各指标的信息量和相关性。对比强度以各指标内部变异大小来衡量,可以通过标准差来反映变异大小;标准差越大,该指标反映的信息量越大,其权重相应较大。指标冲突性反映指标之间的相关性特征,通过计算各指标相互之间的相关系数来表示;两个指标的相关系数越大,其正相关性越强,则这两个指标冲突性较低。CRITIC 法不仅考虑影响因素变异程度对权重的影响,还考虑各因素之间的冲突性特征,而熵权法仅考虑到前者,因此 CRITIC 法在综合评价效果上要优于熵权法^[12]。因素两两之间的 Pearson 相关系数 ρ 、各因素的标准差 σ 计算公式分别为:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{\tau=1}^{\delta} (x_{\tau} - \bar{x})(y_{\tau} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{\tau=1}^{\delta} (x_{\tau} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{\tau=1}^{\delta} (y_{\tau} - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\delta} \sum_{\tau=1}^{\delta} (x_{\tau} - \bar{x})^2} \quad (12)$$

其中: x_{τ} 、 y_{τ} 分别为影响因素 x 、 y 的第 τ 个数据的数值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为影响因素 x 、 y 取值的平均值; δ 为各个影响因素的数据数。

设 E_j 为第 j 个影响因素所包含的信息量, E_j 越大,该因素相对重要程度越高,由此可以计算出第 j 个因素的客观权重 w_j ,进而可求出权重向量 $W_2 = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n]$ 。 E_j 、 w_j 计算公式为:

$$E_j = \sigma_i \sum_{i=1}^{\delta} (1 - \rho_{ij}) \quad (13)$$

$$w_j = E_j / \sum_{j=1}^n E_j \quad (14)$$

CRITIC 法具体实现过程如下:

(1) 与改进 AHP 法相同,首先用(5)式、(6)式对影响因素的数据进行归一化处理,消除由

于影响因素单位不同造成的影响,然后用(12)式计算得到 6 个影响因素内部的标准差分别为:
 $P, 0.283 2; M, 0.253 3; S, 0.236 2; D, 0.216 4;$
 $G, 0.187 6; R, 0.173 6。$

(2) 利用 SPSS 软件,通过(11)式计算得到影

响因素两两之间的 Pearson 相关系数,见表 6 所列。

(3) 根据(13)式、(14)式可得 R, G, S, M, D, P 6 个影响因素权重,进而得到权重向量 W_2 ,即

$$W_2 = [0.171 3 \quad 0.187 2 \quad 0.157 3 \quad 0.125 9 \quad 0.171 7 \quad 0.186 5]。$$

表 6 影响因素之间的 Pearson 相关系数

影响因素	砂泥互层系数 P	最厚砂层厚度 S	含水层厚度 M	级配系数 D	水头系数 G	隔水系数 R
砂泥互层系数 P	1.000	0.274	0.699	0.531	0.132	0.104
最厚砂层厚度 S	0.274	1.000	0.396	0.393	0.178	0.234
含水层厚度 M	0.699	0.396	1.000	0.683	0.261	-0.037
级配系数 D	0.531	0.393	0.683	1.000	0.503	0.361
水头系数 G	0.132	0.178	0.261	0.503	1.000	0.460
隔水系数 R	0.104	0.234	-0.037	0.361	0.460	1.000

2.2.3 耦合赋权

为使建立的耦合赋权模型兼顾该领域专家的经验 and 实测数据的客观性特征,在改进 AHP 法赋权与 CRITIC 法赋权求出主、客观权重向量的基础上,基于总偏差最小化的原则,采用博弈论对改进 AHP 法和 CRITIC 法进行耦合,从而得到耦合赋权模型。

(1) 采用 2 种方法对各影响因素进行赋权,得到 2 组不同的权重数据。2 个评价结果的随机性组合为:

$$W = \alpha_1 W_1^T + \alpha_2 W_2^T \quad (15)$$

其中: W 为所有可能出现的权重数据组合向量; α_1, α_2 为线性组合系数; W_1, W_2 为采用某种赋权方法所获得的权重数据组合向量。

(2) 基于博弈论的权重集结本质,对线性组合系数 α_1, α_2 优化处理,据此建立决策模型。

(3) 根据矩阵的微分性质,计算求得(15)式的最优化一阶导数条件矩阵,即

$$\tilde{\epsilon} = \min \| \alpha_1 W_1^T + \alpha_2 W_2^T - W_1^T - W_2^T \|_2 \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} W_1 W_1^T & W_1 W_2^T \\ W_2 W_1^T & W_2 W_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 W_1^T \\ W_2 W_2^T \end{bmatrix} \quad (17)$$

(4) 对 (α_1, α_2) 进行标准化处理,求得最优化权重系数 α_1^*, α_2^* ,即

$$\alpha_1^* = \frac{|\alpha_1|}{|\alpha_1 + \alpha_2|}, \quad \alpha_2^* = \frac{|\alpha_2|}{|\alpha_1 + \alpha_2|} \quad (18)$$

(5) 获取最优化系数后,建立最优化权重耦合模型为:

$$W^* = \alpha_1^* W_1^T + \alpha_2^* W_2^T \quad (19)$$

采用博弈论将改进 AHP 法和 CRITIC 法耦合,通过(17)式、(18)式可求得最优化权重系数为 $\alpha_1^* = 0.761 7, \alpha_2^* = 0.238 3。$ 由(19)式可得最终

R, G, S, M, D, P 6 个影响因素的权重,耦合得到最终权重向量 W^* ,即 $W^* = [0.237 9 \quad 0.114 5 \quad 0.170 5 \quad 0.190 1 \quad 0.138 0 \quad 0.148 9]。$

2.2.4 含水层富水性评价模型的建立

多因素复合的松散承压含水层富水性评价流程如图 1 所示。

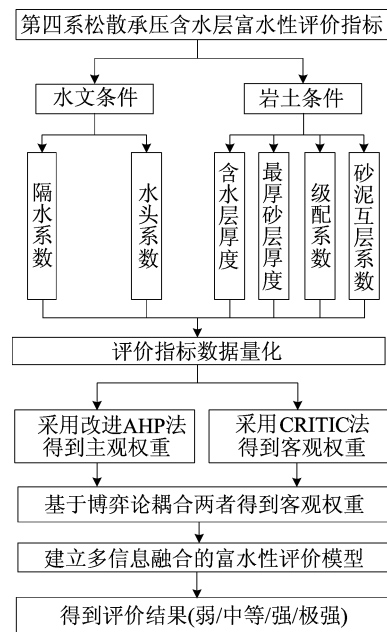


图 1 松散承压含水层富水性评价流程图

基于改进 AHP 法和 CRITIC 法耦合得到最终的权重向量 W^* ,根据线性加权的方法建立淮北煤田多因素复合的松散承压含水层富水性评价模型为:

$$V = \sum_{i=1}^n w_i A_i = 0.237 9 f(R) + 0.114 5 f(G) + 0.170 5 f(S) + 0.190 1 f(M) + 0.138 0 f(D) + 0.148 9 f(P) \quad (20)$$

其中: V 为富水性综合指数,取值范围为 $0 \sim 1; A_i$

为各影响因素数据归一化后的数值; $f(R)$ 、 $f(G)$ 、 $f(S)$ 、 $f(M)$ 、 $f(D)$ 、 $f(P)$ 分别为 R 、 G 、 S 、 M 、 D 、 P 6 个影响因素数据归一化后的数值。

聚类分析法能够从样本数据入手,在保证组间差异最大化、组内差异最小化的基础上恰当地进行分类。利用 SPSS 软件中的系统聚类分析法,对 60 个钻孔的富水性综合指数分级分类。由于淮北煤田松散层未发现极强富水性的抽水钻孔资料,将计算得到的富水性综合指数进行 3 级划分,结果如图 2 所示。

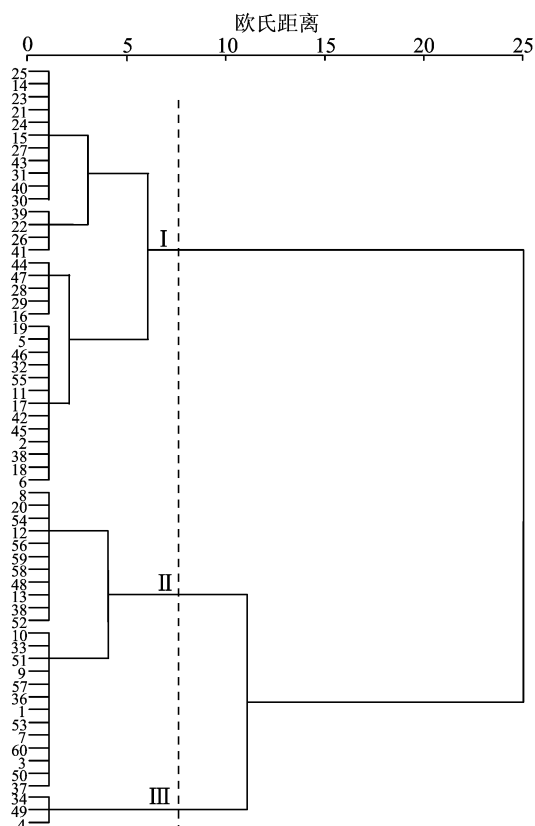


图 2 淮北煤田松散承压含水层富水性综合指数聚类分析结果

通过欧氏距离 7.5 的点纵穿树状图画同型线, I 区对应弱富水性, II 区对应中等富水性, III 区对应强富水性。I 区、II 区与 III 区之间的中断值见表 7 所列。

表 7 淮北煤田松散承压含水层富水性评价分区中断值

预测分区	含水层富水性	富水性综合指数中断值
I	弱	<0.49
II	中等	0.49~0.70
III	强	0.70~0.76
IV	极强	0.76~1.00

表 7 中,遵循《煤矿防治水细则》^[3] 中的含水层富水性 4 级划分原则,选取研究区松散承压含水层抽水试验钻孔对应的富水性综合指数最大值作为划分强富水(III 区)和极强富水(IV 区)的中断值。

3 富水性评价模型的验证

为了验证本文建立的多因素复合的松散承压含水层富水性评价模型的准确性,收集淮北煤田钱营孜煤矿、任楼煤矿、孙疃煤矿及卧龙湖煤矿相关数据,整理得到松散层有效抽水试验钻孔 11 个,采用 11 个钻孔的数据进行模型验证。首先根据(20)式计算 11 个钻孔数据的富水性综合指数,并根据中断值的大小进行分类,然后将该模型得到的含水层富水性与由钻孔抽水试验得到的富水性进行对比,验证结果见表 8 所列。11 个钻孔数据中,8 个弱富水层位均评价正确;对于 3 个中等富水层位,2 个评价正确;评价不正确的钻孔为一含抽水试验孔。由于一含为近地表潜水或半承压含水层,其性质与承压含水层有所差别,因此,本文模型验证正确率达 90.91%。表 8 中,单位涌水量 q 的单位为 $L/(s \cdot m)$ 。

表 8 单位涌水量 q 富水性与模型评价结果对照

钻孔名称	抽水层位	单位涌水量 q (富水性等级)	富水性 综合指数 V	预测分区 (是否准确)
钱营孜 水 1	四含	0.002 873(弱)	0.18	I (是)
钱营孜 水 2	三含	0.058 290(弱)	0.42	I (是)
钱营孜 水 3	四含	0.009 916(弱)	0.26	I (是)
钱营孜 水 4	四含	0.001 437(弱)	0.26	I (是)
钱营孜 水 5	四含	0.004 761(弱)	0.39	I (是)
钱营孜 DB1	四含	0.002 626(弱)	0.27	I (是)
任楼 45-4	一含	0.4748 00(中等)	0.48	I (否)
任楼 52-5	三含	0.3913 00(中等)	0.56	II (是)
任楼水 2	三含	0.3856 00(中等)	0.69	II (是)
孙疃 2019-观 1	四含	0.000 300(弱)	0.43	I (是)
孙疃 2019-观 2	四含	0.002 900(弱)	0.32	I (是)

4 工程应用

4.1 资料收集与处理

选择朱仙庄煤矿北部采区,对其松散承压含水层四含进行富水性评价与分区。将 63 个普通地质钻孔柱状图与相关水文资料,按照不同影响因素整理出各自数据并归一化处理后,通过多因素复合的淮北煤田松散承压含水层富水性评价模型,计算出对应各个钻孔的富水性综合指数 V 。

4.2 富水性评价与动态预测

朱仙庄煤矿北部采区受采动影响,四含水位明显降低,其水位埋深及变动情况见表 9 所列。由表 9 可知,从 2017 年 12 月至 2020 年 7 月,四含水位平均下降 36.75 m。

依据该含水层富水性综合指数 V 与中断值,得到朱仙庄煤矿北部采区四含富水性分区,如

图 3 所示。对比图 3a、图 3b 可以看出,朱仙庄煤矿北部采区受采动影响,中等富水区明显减小。根据抽水钻孔 I-I-6 在 1964 年 7 月的抽水试验,单位涌水量 q 为 $0.136 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$,该数据显示该区域为中等富水,根据 2017 年水位进行评价,该区域仍为中等富水,但根据 2020 年水位进行评价,该区域已变为弱富水。

表 9 朱仙庄煤矿北部采区四含水位埋深及变动情况

钻孔名称	水位埋深/m		水位变化量/m
	2017-12	2020-07	
S4	18.36	54.39	-36.03
J2	89.28	137.56	-48.28
2017-19	7.98	57.53	-49.55
2017-20	47.79	84.66	-36.87
2017-22	67.51	80.52	-13.01

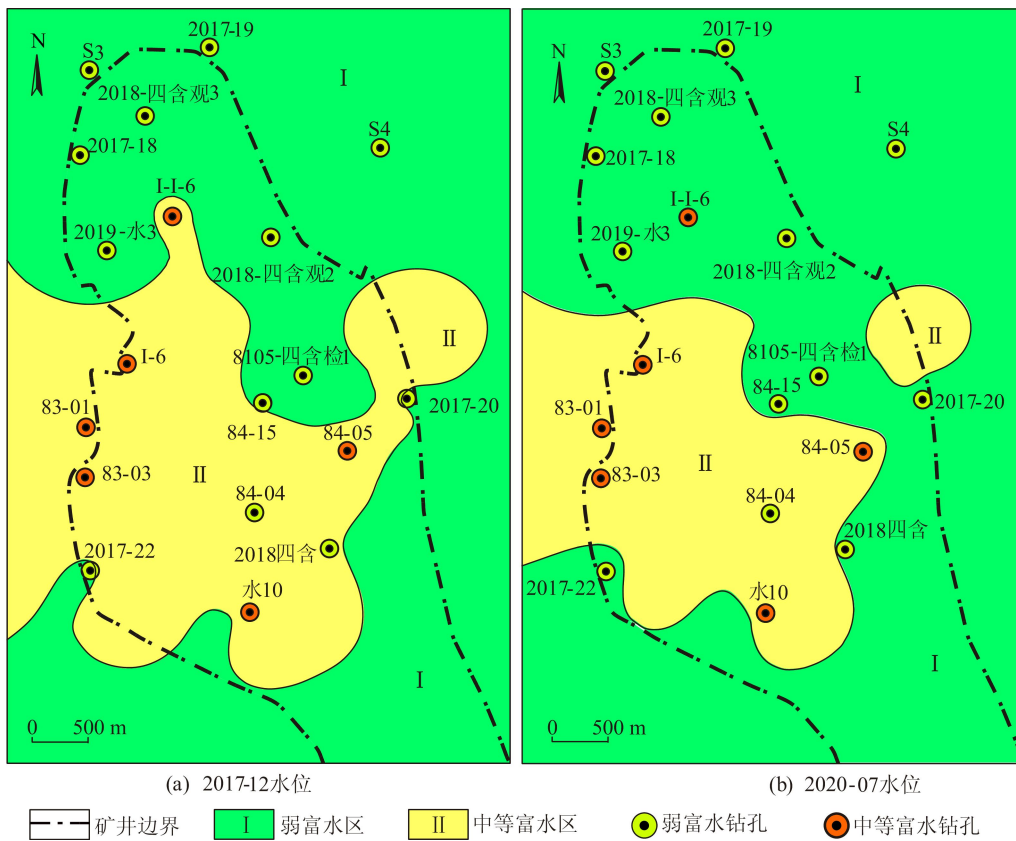


图 3 朱仙庄煤矿北部采区不同水位埋深下的四含富水性分区结果

5 结论

(1) 选取隔水系数 R 、水头系数 G 、含水层厚度 S 、最厚砂层厚度 M 、级配系数 D 、砂泥互层系数 P 共 6 个影响因素作为评价指标,基于博弈论对改进 AHP 法和 CRITIC 法进行耦合,建立多

因素复合的松散承压含水层富水性评价模型,建立的耦合赋权模型具有兼顾该领域专家经验和实测数据的客观性特征。

(2) 对该多因素复合的松散承压含水层富水性评价模型进行验证,评价结果正确率高达 90.91%,所选评价指标均可通过普通地质勘探孔

数据得到,无需过多开展现场抽水试验与相关物探工作,解决了由于抽水孔数量少导致分区结果不理想的问题,也降低了抽水孔的施工成本,避免了运用物探手段进行富水性评价时,解译成果受研究人员的经验和技术水平影响、有主观局限性、存在多解性等问题。

(3) 松散承压含水层的水位等水文地质条件受采动影响,会发生永久性或半永久性变化,以致含水层富水性也相应发生改变。通过该多因素复合的松散承压含水层富水性评价模型,可以对研究区富水性开展时空动态评价与预测。

[参 考 文 献]

- [1] 靳德武. 我国煤矿水害防治技术新进展及其方法论思考[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 141-147.
- [2] 陈江峰,熊法政,李猛,等. 松散层富水性评价及水体采动等级划分[J]. 煤矿安全, 2016, 47(5): 49-51, 56.
- [3] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2018: 54.
- [4] 于师建. 三软煤层上覆含水层富水性瞬变电磁法探测技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 104-107, 73.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 孙尚云,张开弦,陈陆望. 基于 GIS 的含水层富水性评价及分区[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2018, 38(6): 65-71.
- [8] 宫厚健,曾一凡,刘守强,等. 基于改进模糊层次分析法的含水层富水性评价[J]. 煤炭技术, 2018, 37(1): 158-159.
- [9] 韩超,泮晓华,李国梁,等. 基于 GIS 多源信息集成的含水层富水性模糊层次分析法[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 19-25.
- [10] 马荣,石建省,刘继朝. 熵权耦合随机理论在含水层非均质综合指数研究中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1520-1528.
- [11] 侯恩科,纪卓辰,车晓阳,等. 基于改进 AHP 和熵权法耦合的风化基岩富水性预测方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3164-3173.
- [12] 王昆,宋海洲. 三种客观权重赋权法的比较分析[J]. 技术经济与管理研究, 2003(6): 48-49.
- [13] 方婷,解国爱,王博,等. 淮北煤田构造特征和形成机制[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(3): 1-6, 12.
- [14] ZHANG K Z, WANG L, CHENG Y P, et al. Geological control of fold structure on gas occurrence and its implication for coalbed gas outburst: case study in the Qinan Coal Mine, Huaibei Coalfield, China[J]. Nature Resources Research, 2020, 29(2): 1375-1395.
- [15] 王祯伟. 淮北煤田松散层底部含水层特性初析[J]. 煤田地质与勘探, 1990(4): 36-39.
- [16] 邵传林. 朱仙庄煤矿厚松散含水层下采煤[J]. 煤炭科学技术, 1988(10): 9-15.
- [17] 潘寒尽,张多林. AHP 方法存在的问题及改进方法[J]. 航空兵器, 2003(6): 16-17.
- [18] 屠莉,陈峻,邹凌君. 基于相关分析的多数据流聚类[J]. 软件学报, 2009, 20(7): 1756-1767.
- [19] 邓雪,李家铭,曾浩健. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [20] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.

(责任编辑 张淑艳)

· 信息与动态 ·

《合肥工业大学学报(自然科学版)》欢迎投稿

合肥工业大学学报(自然科学版)》是以基础理论、应用科学和工程技术为主的综合性学术刊物,主要刊登机械与汽车工程、仪器科学与光电工程、材料科学与工程、电气与自动化工程、计算机与信息工程、电子科学与工程、土木与水利工程、资源与环境工程、交通工程、化学工程、生物与食品工程、医药工程、管理科学与工程、数理科学以及新兴科学技术等领域的研究论文、科研成果、学术讨论、专题综述及动态报道,将优先刊发基金资助项目的论文。本刊自 2020 年 1 期改为彩色印刷,欢迎高等院校师生、科研院所和企事业单位的广大科技工作者向本刊投稿,在线投稿网址: <http://xbzss.hfut.edu.cn/xbzk.html>。