

引用格式:刘辉,战薇芸,刘鑫,等.雷达图法在油气勘探成效综合评价中的应用[J].油气地质与采收率,2023,30(4):77-85.
LIU Hui, ZHAN Weiyun, LIU Xin, et al. Application of radar chart method in comprehensive evaluation on hydrocarbon exploration effectiveness[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(4): 77-85.

雷达图法在油气勘探成效综合评价中的应用

刘辉,战薇芸,刘鑫,吴雪峰,李龙,叶茂

(中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院,四川成都610041)

摘要:勘探成效综合评价是勘探管理与决策分析中的重要组成部分。目前常用的勘探成效评价指标和方式单一,不能真正反映勘探成效的实际情况。找出影响勘探成效综合评价的关键指标,创建合理的评价模型,为勘探成效综合评价提供一种行之有效的评价手段至关重要。为此,分析了影响勘探成效的关键因素,创建了由5大类9小类指标组成的油气勘探成效综合评价体系,形成了基于熵权法和改进雷达图法的勘探成效综合评价模型。指标体系和评价模型相结合,形成了以改进雷达图法为核心的油气勘探成效定量评价方法。运用该方法,对不同时间段、不同气藏类型、不同勘探领域的勘探成效进行综合评价。结果表明:①总体上具有随时间的推移勘探成效呈现变好的趋势。②气藏类型中,复合气藏勘探成效较优,纯岩性、构造气藏总体较差。③勘探领域中,震旦系一下古生界勘探成效最优,雷口坡组+嘉陵江组、石炭系勘探成效较差。评价结果与勘探实际情况较为一致,可对勘探成效作出客观的评价。

关键词:雷达图法;归一化;熵权法;综合评价;勘探成效

文章编号:1009-9603(2023)04-0077-09

DOI:10.13673/j.pgre.202204034

中图分类号:TE13

文献标识码:A

Application of radar chart method in comprehensive evaluation on hydrocarbon exploration effectiveness

LIU Hui, ZHAN Weiyun, LIU Xin, WU Xuefeng, LI Long, YE Mao

(Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu City, Sichuan Province, 610041, China)

Abstract: Comprehensive evaluation on exploration effectiveness is important in exploration management and decision-making analysis. However, the commonly used evaluation indicators and methods are dull and cannot fully reflect the actual exploration effectiveness. Thus, it is essential to find out the key indicators affecting the comprehensive evaluation, build a reasonable evaluation model, and provide some effective methods to comprehensively evaluate exploration effectiveness. In this study, the key factors affecting exploration effectiveness were analyzed, and a comprehensive evaluation system for hydrocarbon exploration effectiveness was established, containing five categories and nine sub-indicators. A comprehensive evaluation model based on the entropy weight method and improved radar chart method was hereby put forward. Moreover, the combination of the indicator system and the evaluation model constituted a quantitative approach to evaluating the hydrocarbon exploration effectiveness with the improved radar chart method as the core. This method can be used to evaluate the effectiveness at various exploration periods, in different exploration domains, as well as of different types of gas reservoirs in a comprehensive manner. The results show that ① the exploration effectiveness becomes higher as time goes on; ② for gas reservoir types, the exploration effectiveness of compound reservoirs is superior while that of pure lithological and structural reservoirs is poor; ③ for exploration domains, the exploration effectiveness in the Sinian-Lower Paleozoic registers the best, whereas it is relatively poor in Leikoupo and Jialingjiang Formations and the Carboniferous. In general, the evaluated results are consistent with the actual exploration, which means the proposed method can make an objective evaluation of the comprehensive exploration effectiveness.

Key words: radar chart method; normalization; entropy weight method; comprehensive evaluation; exploration effectiveness

收稿日期:2022-04-26。

作者简介:刘辉(1982—),男,四川资阳人,工程师,硕士,从事油气勘探规划和综合地质研究工作。E-mail:liuh2008@petrochina.com.cn。

近年来,油气勘探成本受多种因素的影响呈持续升高的趋势。西部某盆地作为天然气资源最丰富的地区,是国内天然气的主产地之一,正处于加快上产的新时期。在快速上产的发展过程中,如何解决高成本的困扰,提高勘探成效,降低勘探成本是关键环节,油气勘探成效综合评价的方式和手段显得尤为重要。

以往勘探成效评价指标单一,评价方法简单。一般用投资和储量,通过相关公式计算预探成本或发现成本来体现勘探成效的好坏^[1-4]。分析发现,油气勘探活动中储量是石油天然气生产企业的重要产出部分,但不能由此来完全体现勘探成效。如果仅用预探成本或者发现成本作为勘探成效评判的唯一标准,往往不能如实反映油气勘探成效的具体构成,不利于管理者做出正确的决策。笔者以西部某盆地2001—2020年的勘探成果作为基础,梳理归类影响勘探成效的关键指标,构建勘探成效综合评价指标体系;利用熵权法确定指标权重,根据改进雷达图法创建勘探成效综合评价模型。应用该模型对勘探成效进行合理评价,找到影响勘探成效的关键指标,通过合理匹配指标参数,进一步优化勘探部署方案和投资结构,最终实现勘探提质增效。

1 构建评价指标体系

1.1 指标选取

在综合评价中,指标选取是否合理对评价的科学性和结果的准确性极其重要。影响勘探成效的指标多而复杂。关键指标总结为储量、钻井、地震、投资和其他类共5大类20余项^[5-8]。其中与储量有关的指标为探明储量、控制储量、可采储量、储量丰度、单位进尺发现的储量、井控储量、井控面积、储量转换率、经济可采储量等;与钻井有关的指标为钻探井数、探井成功率、探井进尺、钻井成本、钻速、工业气井数等;与地震有关的指标为二、三维地震工作量、成本等;与投资有关的指标为发现成本、预探成本、总投资、单位探明储量投资等;其他类包括总资源量、圈闭钻探成功率等。

根据西部某盆地勘探投入和产出历史规律,分析影响勘探成效的关键因素,创建了油气勘探成效综合评价体系,包括工程技术、勘探工作量、勘探效益、勘探效率以及管理等5大类9小类指标(图1)。工程技术类中,平均单井测试产量指工业气井累积测试产量与工业气井数之比;钻井速度指所有井每

小时的平均钻井进尺。勘探工作量类评价指标在时间段、气藏类型和主要勘探领域3个方面评价中略有不同,时间段评价中以探明储量、三维地震、完钻井数的完成百分比来体现,同时增加了获气井数;在气藏类型和主要勘探领域评价中,无法统计完成百分比等,因此用探明储量的申报量和实际完钻井数来体现。探明储量的完成百分比以某一时间段、同一勘探领域或气藏类型中探明储量之和或完成百分比来体现;三维地震的完成百分比以三维地震采集完成的工作量或百分比来体现。勘探效益类中万米进尺获取的探明储量指探明储量与完钻进尺的比值。勘探效率类中单井控制面积指探明储量面积与完钻井数之比;单井控制储量指探明储量与完钻井数之比。管理类中探井成功率指工业气井与完钻井数之比。

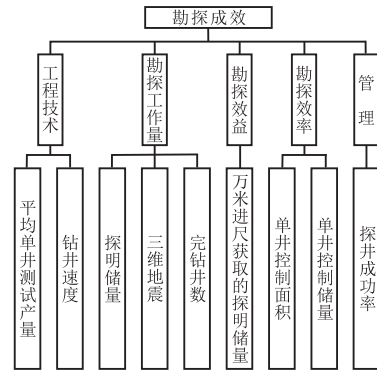


图1 油气勘探成效综合评价指标体系

Fig.1 Indicator system for comprehensive evaluation of hydrocarbon exploration effectiveness

1.2 指标归一化处理

所选取的5大类9小类指标的量纲各不相同。为便于指标之间的对比,需要将指标值进行归一化处理,统一为0~1的无量纲的指标值^[9-11]。正向指标值越大越好,1表示最好状态,0表示最差状态;负向指标值越大越差,1表示最差状态,0表示最好状态。本次油气勘探成效综合评价指标体系中的指标均为正向指标,归一化处理式为:

$$x = \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

1.3 指标权重的确定

各指标对上一级指标的影响程度存在差异,即各自占上一级指标的权重不同。权重的大小直接影响对上一级指标的重要程度。因此,如何科学、合理地确定各指标对应的权重尤为重要。熵权法是以评价数据的变异性为基础进行赋权,改善了现有赋权方法主观性过强的问题,实现对指标权重的客观赋值^[12-14]。根据熵的概念计算第j项指标的熵

值为:

$$H_j = -K \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (2)$$

其中:

$$K = \frac{1}{\ln m} \quad (3)$$

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4)$$

因 $K > 0, 0 \leq f_{ij} \leq 1$, 则 $0 \leq H_j \leq 1$ 。

第 j 项指标的权重 w_j 计算公式为:

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (5)$$

2 改进雷达图法评价模型

雷达图法是基于一种形似导航雷达显示屏上的图形而构建的一种多变量的对比分析方法,常被运用于多个指标系统的定性和定量综合评价。用雷达图的面积与周长进行定性评价,面积越大,评价对象的总体优势越大;面积越小,则反之。在面积一定的情况下,周长越短,越趋近于圆,各方面发展越均衡。利用根据面积与周长两个指标构建的评价函数 $f(v_1, v_2)$ 进行定量评价, f 值计算公式为:

$$f = \sqrt{v_1 v_2} \quad (6)$$

其中:

$$v_1 = \frac{S_i}{S_m} \quad (7)$$

$$v_2 = \frac{S_i L_m^2}{S_m L_i^2} \quad (8)$$

将(7)和(8)式代入(6)式得到:

$$f = \frac{S_i L_m}{S_m L_i} \quad (9)$$

将多个实测样本的计算结果 f 值进行排序,与单位样本值进行比较评价。多指标综合评估的典型雷达图如图2所示,基于雷达图法的勘探成效综合评价流程见图3。

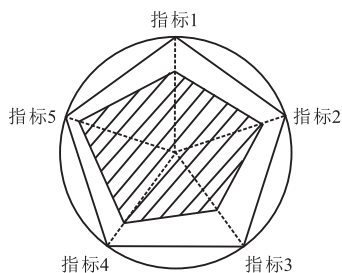


图2 典型雷达图

Fig.2 Typical radar chart

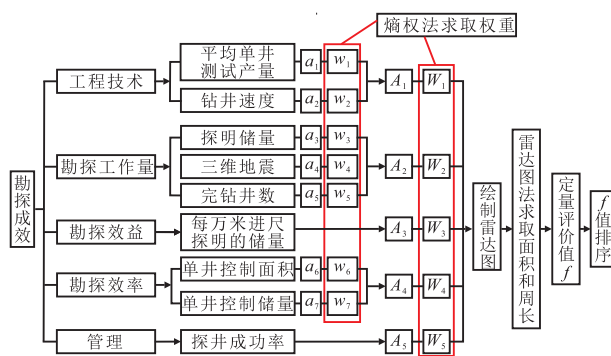


图3 油气勘探成效综合评价流程

Fig.3 Process of comprehensive evaluation of hydrocarbon exploration effectiveness

传统雷达图法方法较简单,结果较为直观,易于得出各方案优劣情况。但该方法的缺点是如果指标在雷达图中的排序发生改变,雷达图的面积和周长也会发生改变,定量计算的 f 值也随之发生改变,对评价结果会产生很大的影响^[15-18]。

较传统的雷达图法,改进的雷达图法保留了其优点且避免了缺点,绘制过程如下:①绘制以 O 为圆心的单位圆。②引出射线 OA , 根据指标权重 w_j 与角度 θ_j 间存在的定量关系 ($\theta_j = 360w_j$) 依次绘制 OB, OC, \dots 。③以每个扇形区域的角平分线为坐标轴,在其上标出各指标的评估值点(指标归一化值),顺序连接各点形成封闭多边形,即为改进的雷达图。绘制5个指标对应的改进的雷达图如图4所示。定性和定量评价的方式与前述一致。

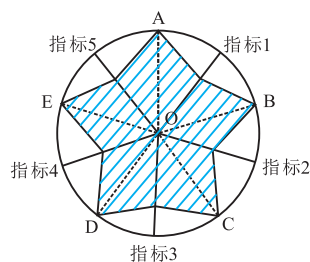


图4 改进的雷达图

Fig.4 Improved radar chart

3 实例分析

在2001—2020年勘探成果的基础上,利用改进的雷达图法按时间段、气藏类型和主要勘探领域3大类分别进行勘探成效综合评价。时间段以5 a为一个评价周期,分为“十五”“十一五”“十二五”和“十三五”4个时间段;气藏类型有构造、地层-构造、岩性-构造、构造-地层、岩性-地层、构造-岩性、岩性气藏7类;主要勘探领域为震旦系一下古生界、沙溪庙组+须家河组、二叠系—三叠系礁滩、下二叠

统、雷口坡组+嘉陵江组、石炭系6大领域。

将4个时间段、7类气藏类型、6大勘探领域指标数据分别构成实际样本集,开展数据归一化处理,计算权重和 θ_j 值,将单位样本数据作为参考样本集,分别编绘不同时间段、不同气藏类型、不同勘探领域的雷达图。

3.1 不同时间段的勘探成效综合评价

经计算,时间段中工程技术类的权重值和 θ_j 值

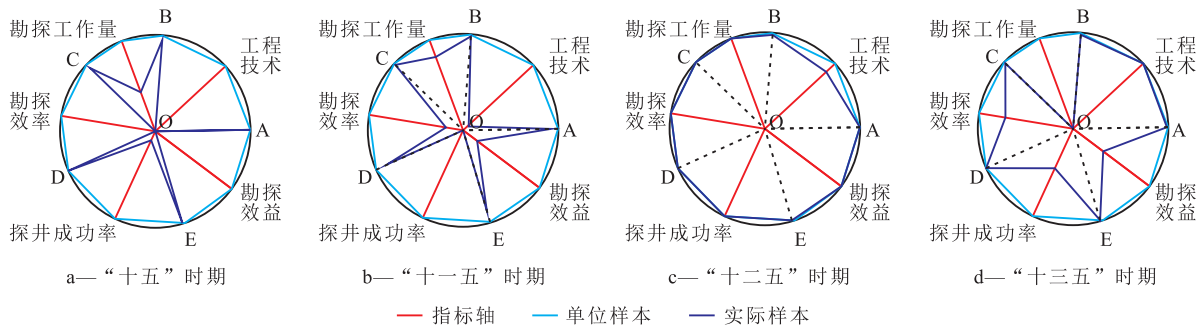


图5 不同时间段勘探成效改进的雷达图

Fig.5 Improved radar charts of exploration effectiveness in different exploration periods

面积最大,基本接近单位样本的雷达图面积,且周长最小,趋近于圆,勘探成效综合评价优,各方面的发展较均衡;其次为“十三五”时期,再次为“十一五”时期,“十五”时期的面积最小,勘探成效综合评价差。

利用(9)式分别对“十五”“十一五”“十二五”和“十三五”的勘探成效进行定量计算,并将结果进行排序(表1)。结果表明,“十二五”时期勘探成效最好,其次为“十三五”时期,再次为“十一五”时期,“十五”时期最差,与定性评价结果一致。评价结果表明,随着时间的推移,地质认识在不断深化,科学技术在进步,总体上勘探成效呈现变好的趋势。

表1 不同时间段改进雷达图法定量评价统计

Table1 Quantitative evaluation values from improved radar charts in different exploration periods

时间段	单位样本评价		实际评价		定量评价	定量评价排序
	S_m	L_m	S_i	L_i		
“十五”时期			0.25	9.14	0.06	4
“十一五”时期	2.92	6.17	0.62	8.21	0.16	3
“十二五”时期			2.86	6.111	0.99	1
“十三五”时期			1.63	7.441	0.46	2

3.2 不同气藏类型的勘探成效综合评价

气藏类型中工程技术类的权重值和 θ_j 值分别为0.180, 64.71°;勘探工作量类的权重值和 θ_j 值分别为0.194, 69.91°;勘探效益类的权重值和 θ_j 值分别为0.171, 61.53°;勘探效率类的权重值和 θ_j 值分别为

分别为0.235, 84.72°;勘探工作量类的权重值和 θ_j 值分别为0.143, 51.39°;勘探效益类的权重值和 θ_j 值分别为0.204, 73.61°;勘探效率类的权重值和 θ_j 值分别为0.189, 68.02°;管理类的权重值和 θ_j 值分别为0.229, 82.86°。基于以上数据,绘制不同时间段改进的雷达图(图5)。

根据“十五”—“十三五”时期的勘探成效雷达图进行定性判断,“十二五”时期的勘探成效雷达图

面积最大,基本接近单位样本的雷达图面积,且周长最小,趋近于圆,勘探成效综合评价优,各方面的发展较均衡;其次为“十三五”时期,再次为“十一五”时期,“十五”时期的面积最小,勘探成效综合评价差。

根据7类气藏类型勘探成效改进的雷达图进行定性判断,岩性-地层气藏的勘探成效雷达图面积最大,周长最小,趋近于圆,勘探成效综合评价优,各方面的发展相对较均衡;其次为构造-地层和构造-岩性气藏;再次为地层-构造、岩性、构造气藏。岩性-构造气藏的面积最小,勘探成效综合评价差。

利用(9)式对7类气藏类型的勘探成效进行定量计算,并将结果进行排序(表2)。结果表明,岩性-地层气藏勘探成效最好,其次为构造-地层气藏,再次为构造-岩性气藏,构造、岩性-构造气藏最差,与定性评价结果一致。总体上复合气藏勘探成效较优,其次是岩性气藏,构造气藏较差。

3.3 不同勘探领域的勘探成效综合评价

6大勘探领域中工程技术类的权重值和 θ_j 值分别为0.170, 61.13°;勘探工作量类的权重值和 θ_j 值分别为0.272, 97.81°;勘探效益类的权重值和 θ_j 值分别为0.186, 66.90°;勘探效率类的权重值和 θ_j 值分别为0.231, 82.98°;管理类的权重值和 θ_j 值分别为0.142, 51.18°。基于以上数据,绘制不同勘探领域改进的雷达图(图7)。

根据6大勘探领域的勘探成效雷达图进行定性判断,震旦系一下古生界领域的勘探成效雷达图面积最大,基本接近单位样本的雷达图面积,周长最

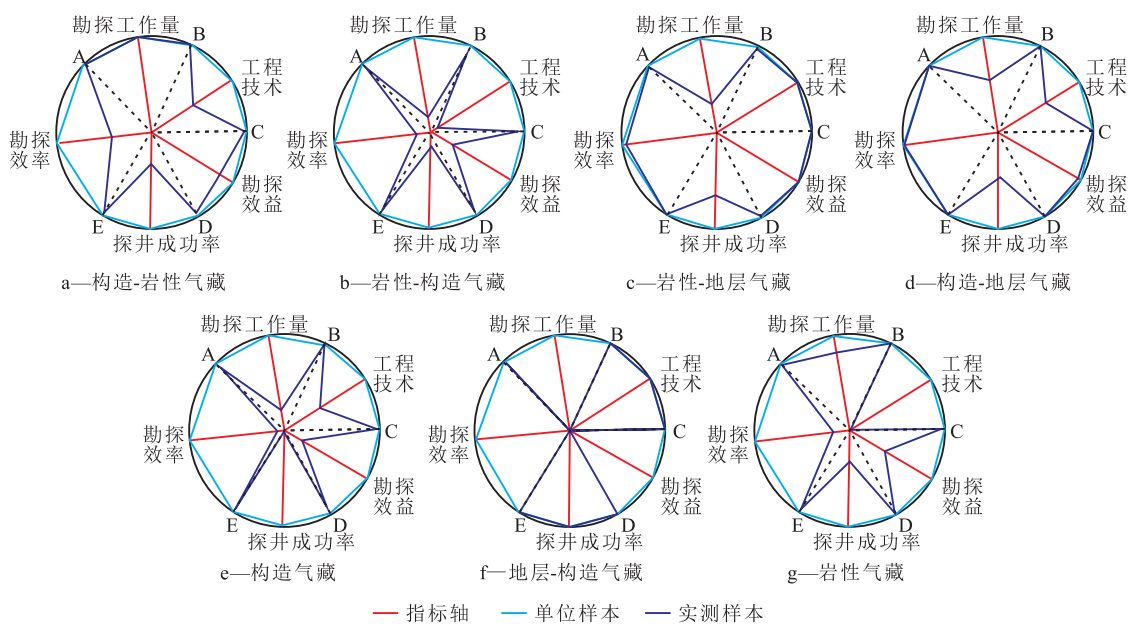


图6 不同气藏类型勘探成效改进的雷达图

Fig.6 Improved radar charts of exploration effectiveness in different types of gas reservoirs

表2 不同气藏类型改进雷达图法定量评价统计
Table2 Quantitative evaluation values from improved radar charts in different types of gas reservoirs

气藏类型	单位样本评价		实际评价		定量评价	定量评价排序
	S_m	L_m	S_i	L_i		
构造-岩性			6.55	1.81	0.58	3
岩性-构造			8.78	0.45	0.11	7
岩性-地层			6.50	2.30	0.75	1
构造-地层	6.161	2.91	6.54	2.12	0.69	2
构造			8.61	0.50	0.12	6
地层-构造			8.15	1.03	0.27	4
岩性			7.83	0.97	0.26	5

小,趋近于圆,勘探成效综合评价优,各方面的发展较均衡;其次为沙溪庙组+须家河组领域的勘探成效雷达图面积较大,再次为二叠系—三叠系礁滩领域和下二叠统领域。雷口坡组+嘉陵江组和石炭系领域的面积最小,勘探成效综合评价差。

利用(9)式对盆地6大主要勘探领域的勘探成效进行定量计算,并将结果进行排序(表3)。结果表明,震旦系一下古生界领域勘探成效最好,其次为沙溪庙组+须家河组领域,再次为二叠系—三叠系礁滩和下二叠统,雷口坡组+嘉陵江组与石炭系领域最差,与定性评价结果一致。

通过上述分析,认为在权重系数差别不大的情

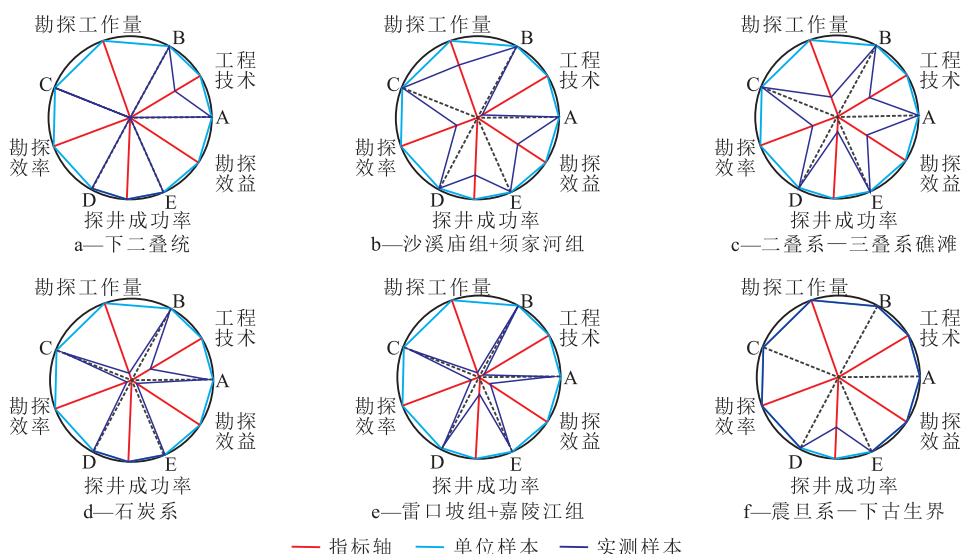


图7 不同勘探领域勘探成效改进的雷达图

Fig.7 Improved radar charts of exploration effectiveness in different exploration domains

表3 不同勘探领域改进雷达图法定量评价统计
Table3 Quantitative evaluation values from improved radar charts in different exploration domains

主要勘探领域	单位样本评价价值		实际评价价值		定量评价价值	定量评价排序
	S_m	L_m	S_i	L_i		
下二叠统			8.00	0.76	0.20	4
沙溪庙组+须家河组			7.21	1.34	0.39	2
二叠系—三叠系礁滩	2.91	6.16	7.68	0.93	0.26	3
石炭系			9.36	0.22	0.05	6
雷口坡组+嘉陵江组			9.18	0.28	0.07	5
震旦系—下古生界			6.31	2.74	0.92	1

况下,指标值是影响综合评价的关键(表4);时间段中5大类的一级指标的权重为0.14~0.24,权重最大值仅是最小值的1.7倍;除勘探工作量外,其余4项指标权重差别不大;二级指标中权重最大值与最小值的比值,平均单井测试产量达到4.2,单井控制面积达到3.3,获气井、单井控制储量和万米进尺获取的探明储量均超过2.5,为2.6~2.8。通过“十五”—“十四五”时期的数据分析,认为在“十二五”“十三五”期间获气井数不是最多情况下,优质规模储量的集中发现,使得其平均单井测试产量高、探井成功率高、单井控制面积大、万米进尺获取的探明储量大,勘探效益好。

盆地7类气藏类型中5大类的一级指标的权重为0.17~0.29,权重最大值仅是最小值的1.7倍;除勘探效率类权重系数较大外,其余4项指标权重差别不大;二级指标中最大值与最小值的比值,探明

储量达到238,完钻井数达到40,单井控制储量和万米进尺获取的探明储量均达到25。与大部分复合气藏相比,岩性、构造气藏其单个气藏储量规模较小,大部分为几十亿方,含气面积也一般为几十平方公里,但探井较多,一般是复合气藏的几倍,故勘探效益类和效率类指标值偏低。同时在探井成功率和钻速不占优的情况下,平均单井测试产量也偏低。以上因素共同导致复合气藏总体上较岩性、构造气藏勘探成效较好。

盆地主要勘探领域中5大类的一级指标的权重为0.14~0.27,权重最大值仅是最小值的1.9倍;二级指标中权重最大值与最小值的比值,探明储量达到113.2,平均单井测试产量、单井控制面积均超过20,完钻井数、单井控制储量和万米进尺获取的探明储量均超过10,为13.2~15.0。通过盆地6大领域的数据分析,认为震旦系—下古生界领域油气高产富集区带集中、储量规模大、平均单井测试产量高、优质规模储层发育、位于相对平坦的地区,便于较短时间内规模控制,集中探明,勘探成效显著;沙溪庙组+须家河组领域单井浅、工程事故少、大面积含气、勘探开发一体化作业,从而钻速快、储量规模大、探井成功率高,勘探成效较好。

4 成果验证

根据上述3种不同类型的勘探成效综合评价结果开展相互验证工作(表5—表7)。结果显示每一类评价结果都可靠,评价方法具有较好的适用价

表4 不同评价类型指标的比值与权重统计
Table4 Ratios and weights of different evaluation indicators

一级指标	二级指标	时 间 段		气 藏 类 型		勘 探 领 域				
		最大值与最小值的比值	权重	最大值与最小值的比值	权重	最大值与最小值的比值	权重			
工程技术	平均单井测试产量	4.2	0.6	0.24	4.8	0.37	0.18	22.2	0.54	0.17
	钻井速度	1.6	0.4		2	0.63		2.2	0.46	
勘探工作量	探明储量	1.5	0.36	0.14	238	0.41	0.19	113.2	0.53	0.27
	三维地震	1.2	0.24		40	0.59		13.2	0.47	
	完钻井数	1.3	0.17							
	获气井数	2.8	0.23							
勘探效益	万米进尺获取的探明储量	2.6	0.2		25	0.17		15	0.19	
勘探效率	单井控制面积	3.3	0.57	0.19	12	0.55	0.29	22.5	0.58	0.23
	单井控制储量	2.8	0.43		25	0.45		14.2	0.42	
管理	探井成功率	1.1	0.23		1.5	0.17		2.9	0.14	

表5 不同气藏类型对应的时间段和主要勘探领域统计
Table5 Exploration periods and major exploration domains corresponding to different types of gas reservoirs

气藏类型	时间段	主要勘探领域	定量评价排序
岩性-地层	“十二五”时期	均为震旦系一下古生界	1
构造-地层	“十三五”时期	均为震旦系一下古生界	2
构造-岩性	主要在“十一五”时期, 其次为“十二五”时期	主要为二叠系—三叠系礁滩, 其次为沙溪庙组+须家河组	3
地层-构造	“十三五”时期	石炭系	4
岩性	主要为“十一五”时期, 其次为“十二五”和“十三五”时期	主要为沙溪庙组+须家河组, 其次为二叠系—三叠系礁滩	5
构造	主要在“十五”时期	主要为嘉陵江组,其次为石炭系	6
岩性-构造	“十五”和“十三五”时期各一半	主要为二叠系—三叠系礁滩,其次为嘉陵江组	7

表6 不同时间段对应的气藏类型和主要勘探领域统计
Table6 Gas reservoir types and major exploration domains corresponding to different exploration periods

时间段	气藏类型	主要勘探领域	定量评价排序
“十二五”时期	岩性为主,其次为构造-岩性, 再次为岩性-地层	主要为沙溪庙组+须家河组, 其次为震旦系一下古生界	1
“十三五”时期	岩性为主,其次为构造-地层,	主要为震旦系一下古生界、 沙溪庙组+须家河组、二叠系—三叠系礁滩	2
“十一五”时期	岩性为主,其次为构造-岩性, 再次为岩性-构造	主要为沙溪庙组+须家河组, 其次为二叠系—三叠系礁滩,再次为石炭系	3
“十五”时期	构造为主,其次为岩性-构造	主要为嘉陵江组, 其次为二叠系—三叠系礁滩	4

表7 不同勘探领域对应的时间段和气藏类型统计
Table7 Exploration periods and gas reservoir types corresponding to different exploration domains

主要勘探领域	气藏类型	时间段	定量评价排序
震旦系一下古生界	主要为构造-地层, 其次为岩性-地层	主要为“十三五”时期, 其次为“十二五”时期	1
沙溪庙组+须家河组	主要为岩性, 其次为构造-岩性	主要为“十二五”—“十三五”时期, 其次为“十一五”时期	2
二叠系—三叠系礁滩	主要为构造-岩性, 其次为岩性	以“十五”“十一五”时期为主、 “十二五”—“十三五”时期为辅	3
下二叠统		主要为“十三五”时期, 其次为“十一五”时期	4
雷口坡组+嘉陵江组	主要为构造, 其次为岩性-构造	均为“十五”时期	5
石炭系	主要为构造, 其次为地层-构造	主要为“十五”“十三五”时期, 其次为“十一五”时期	6

值。如勘探成效排名靠前的岩性-地层、构造-地层气藏,在勘探时间段上正好位于“十二五”“十三五”时期,在主要勘探领域上均属于震旦系一下古生界,与时间段和主要勘探领域上均排名靠前的评价

结果一致;勘探成效排名靠后的岩性、构造气藏,在勘探时间段上处于“十一五”“十五”时期,在主要勘探领域上属于二叠系—三叠系礁滩、嘉陵江组、石炭系等,与时间段和主要勘探领域上均排名靠后的

评价结果一致。

5 结论

结合西部某盆地勘探投入产出历史规律,优选出包括工程技术、勘探工作量、勘探效益、勘探效率以及管理在内的影响勘探成效关键指标,利用熵权法确定指标权重,根据改进的雷达图法,形成了盆地油气勘探成效综合评价模型。利用该模型对2001—2020年各时间段、不同气藏类型、主要勘探领域开展勘探成效评价。评价结果与实际勘探情况吻合度高,具有较好的适用性。该评价方法能较为客观地反映勘探成效的具体构成及内部关系,使得勘探管理工作更加规范化、科学化和精准化。同时可以根据综合评价结果,对重点勘探领域的典型气藏开展勘探工作量投入与产出关系的深入分析,提出勘探成效最优化情况下的探井投入和配比关系,对勘探部署、规划计划等工作起到重要支撑作用。

符号解释

f ——雷达图法定量评价值;
 f_{ij} ——第*i*个样本值下第*j*项指标评价值的比重;
 H_j ——第*j*项指标的熵值;
 i ——第*i*组数据;
 j ——第*j*项指标;
 K ——熵值系数;
 L_i ——实测样本的雷达图周长;
 L_m ——单位样本的雷达图周长;
 m ——单位样本指标数;
 n ——指标数;
 S_i ——实测样本的雷达图面积;
 S_m ——单位样本的雷达图面积;
 v_1 ——实测样本的雷达图法面积与单位样本雷达图法面积之比;
 v_2 ——雷达图中单位样本周长的平方与实测样本面积之积,再与实测样本周长的平方与单位样本面积之积的比值;
 w_j ——第*j*项指标的权重;
 W_j ——指标对应的权重值;
 x ——归一化结果值;
 x_{ij} ——第*i*组数据中第*j*项指标值;
 x_j ——第*j*项指标值;
 x_{\max} ——实测指标值中最大值;
 x_{\min} ——实测指标值中最小值;

θ_j ——根据第*j*项指标的权重,计算其在圆中所占的度数, $(^\circ)$ 。

参考文献

- [1] MEGILL R E,胡朝元.油气发现的成本计算问题[J].国外油气勘探,1983,(3):10-16.
MEGILL R E, HU Chaoyuan. Cost calculation of oil and gas discovery[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 1983, (3): 10-16.
- [2] 郑德鹏.中外石油公司油气上游成本指标与成本变化对比分析[J].国际石油经济,2008,16(9):33-39.
ZHENG Depeng. Upstream oil and gas cost indicators and changing costs: Chinese and foreign oil companies compared[J]. International Petroleum Economics, 2008, 16(9): 33-39.
- [3] 刘忻蕾,王兆明,史卜庆,等.2018年全球油气勘探形势分析与启示[J].国际石油经济,2019,27(3):23-28.
LIU Xinlei, WANG Zhaoming, SHI Buqing, et al. Analysis and enlightenment of global oil and gas exploration in 2018[J]. International Petroleum Economics, 2019, 27(3): 23-28.
- [4] 刘鹏,张厚和,李春荣,等.中海油与国内外典型石油公司勘探关键指标对标分析[J].中外能源,2020,25(2):1-8.
LIU Peng, ZHANG Houhe, LI Chunrong, et al. Benchmarking of key exploration indicators between CNOOC and typical oil companies at home and abroad[J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(2): 1-8.
- [5] 李国欣,郭绪杰,杜金虎,等.勘探对标管理指标体系模型研究及应用[J].中国石油勘探,2019,24(1):7-15.
LI Guoxin, GUO Xujie, DU Jinhui, et al. Research and application of the index system model of exploration benchmarking management[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 7-15.
- [6] 张在旭,丁丹红,李磊.海外油气勘探项目综合后评价指标体系构建研究[J].石油科技论坛,2011,30(5):41-44,68.
ZHANG Zaixu, DING Danhong, LI Lei. Research on construction of comprehensive post-evaluation index system of overseas oil and gas exploration projects[J]. Oil Forum, 2011, 30(5): 41-44, 68.
- [7] 殷爱贞,赵世彩.基于主成分分析法的油气勘探项目效益研究[J].价值工程,2010,29(2):20-21.
YIN Aizhen, ZHAO Shicai. Study on the economic evaluation of oil-gas exploration based on principal component analysis[J]. Value Engineering, 2010, 29(2): 20-21.
- [8] 石油地质勘探专业标准化委员会.石油天然气勘探效益评价方法:SY/T 6041—1994[S].北京:石油工业出版社,1995.
Petroleum Geology Exploratory Standardization Technology Committee. Evaluation method of oil and gas exploration benefit: SY/T 6041-1994[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [9] 李芳林,李明地.长三角城市群高质量发展综合评价研究[J].西部经济理论论坛,2021,32(4):36-48.
LI Fanglin, LI Mingdi. Research on comprehensive evaluation of high-quality development of Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. West Forum on Economy and Management, 2021, 32

- (4):36-48.
- [10] 韩登利,曹同德,韩纪钊.物流外包合作伙伴综合评价模型研究[J].中小企业管理与科技,2021,27(9):108-110.
HAN Dengli, CAO Tongde, HAN Jizhao. Research on the comprehensive evaluation model of logistics outsourcing partners[J]. Management & Technology of SME, 2021, 27(9): 108-110.
- [11] 雷思友,刘洁,方信.煤与瓦斯突出影响因素综合评价研究——基于改进熵权法+灰色系统关联法的研究[J].煤,2021,30(7):21-24,56.
LEI Siyou, LIU Jie, FANG Xin. Comprehensive evaluation of influence factors of coal and gas outburst-based on the improved entropy weight method+grey system correlation method[J]. Coal, 2021, 30(7): 21-24, 56.
- [12] 郭晓凡,李林波,王艳丽,等.基于熵权法-云模型的公交服务满意度评价[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2018,37(9):101-106.
GUO Xiaofan, LI Linbo, WANG Yanli, et al. Satisfaction evaluation of public transit service based on entropy weight method and cloud model[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2018, 37(9): 101-106.
- [13] 张方,曹龙,智树丽.改进熵权法与AHP法在防波堤设计方案中的应用[J].江苏水利,2016,(9):24-28.
ZHANG Fang, CAO Long, ZHI Shuli. Application of improved entropy weight method and AHP method in the design of breakwater[J]. Jiangsu Water Resources, 2016, (9): 24-28.
- [14] 林永亮,赵磊.熵权和集对的耦合模型评价盾构隧道健康[J].地下空间与工程学报,2019,15(4):1 239-1 245.
LIN Yongliang, ZHAO Lei. Health evaluating for shield tunnel by entropy weight and set pair coupling model[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4): 1 239-1 245.
- [15] 米根锁,王彦快,王文波.雷达图法在轨道电路分路不良预警中的应用[J].铁道学报,2013,35(11):66-70.
MI Gensuo, WANG Yankuai, WANG Wenbo. Application of radar chart in poor shunting early warning for track circuit[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 66-70.
- [16] 杨润霞.雷达图法在复杂地质下岩溶隧道风险评估中的应用[J].现代隧道技术,2020,57(1):125-129.
YANG Runxia. Application of radar chart method to the Karst tunnel in complex geology[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(1): 125-129.
- [17] 王永瑜.雷达图定量综合评价方法中存在的问题及改进措施[J].统计教育,2007,14(1):18-20.
WANG Yongyu. The existing problems and improved measures in synthetic evaluation using radar chart[J]. Statistical Education, 2007, 14(1): 18-20.
- [18] 李国栋,庞文杰,葛磊蛟,等.基于改进雷达图法的光伏并网发电系统稳态电能质量综合评估[J].电工电能新技术,2016,35(5):8-12,35.
LI Guodong, PANG Wenjie, GE Leijiao, et al. Steady-state power quality synthetic evaluation of grid-connected photovoltaic system based on improved radar chart[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(5): 8-12, 35.

编辑 林 璐