

引用格式:于倩男,张涵,李宁,等.天然气水合物藏开发品质评价研究[J].油气藏评价与开发,2023,13(3):385-392.

YU Qiannan, ZHANG Han, LI Ning, et al. Development quality evaluation of natural gas hydrate reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(3): 385-392.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.03.014

天然气水合物藏开发品质评价研究

于倩男¹,张涵¹,李宁¹,唐慧敏²,李承龙³,吴卓霖¹,彭威¹

(1.广东石油化工学院机电工程学院,广东 茂名 525000;2.中海石油(中国)有限公司海南分公司,海南 海口 570311;
3.中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,黑龙江 大庆 163712)

摘要:天然气水合物藏的开发具有高风险、高难度和高投入的典型特征,正确评价开发品质是天然气水合物藏开发的前提和关键性问题。针对天然气水合物藏开发评价指标的广泛性和评价结果的模糊性特征,选择天然气水合物藏开发品质的主控因素为因素集,建立主控因素的评分准则,利用层次分析法确定主控因素的综合权重并建立权重集,进而完成天然气水合物藏开发品质的模糊综合评价。利用该方法对麦索亚哈(Messoyakha)天然气水合物藏和其他典型天然气水合物藏的开发品质进行评价,验证方法的适用性和可行性,以期为天然气水合物藏的高效开发提供理论基础和技术支撑。

关键词:天然气水合物;开发品质;模糊综合评价;定性评价;层次分析

中图分类号:TE37

文献标识码:A

Development quality evaluation of natural gas hydrate reservoir

YU Qiannan¹, ZHANG Han¹, LI Ning¹, TANG Huimin², LI Chenglong³, WU Zhuolin¹, PENG Wei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong 525000, China; 2. Hainan Branch CNOOC(China) Co., Ltd., Haikou, Hainan 570311, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712, China)

Abstract: The development of the natural gas hydrate reservoirs has the typical characteristics of high risk, high difficulty and high investment, so the correct evaluation of development quality is a prerequisite and the key to the issue. In order to solve the problems that the evaluation index has limitations and the evaluation results has ambiguity for the development of the natural gas hydrate reservoirs, the factor set is chosen based on the main controlling factors, and the scoring criteria of main controlling factors are defined. The weight set is established by the comprehensive weight calculated by analytic hierarchy process, and then fuzzy comprehensive evaluation of development quality of natural gas hydrate reservoir is further completed. This method is used to evaluate the development quality of Messoyakha and other typical natural gas hydrate reservoirs, and the applicability and feasibility of the method are verified, so as to provide theoretical basis and technical support for the efficient development of the natural gas hydrate reservoirs.

Keywords: natural gas hydrate; development quality; fuzzy comprehensive evaluation; qualitative evaluation; analytic hierarchy process

天然气水合物是一种燃烧值高、清洁无污染的新型化石能源,广泛分布于海底沉积物及陆上永久冻土中,储量巨大,被认为是最具潜力的油气替代能

源^[1-2]。天然气水合物开发具有高风险、高难度和高投入的典型特征^[3-4],正确评价开发品质是天然气水合物藏开发的前提和关键性问题。天然气水合物藏

收稿日期:2021-12-20。

第一作者简介:于倩男(1987—),男,博士,副教授,从事天然气水合物开采与利用的基础研究工作。地址:广东省茂名市官渡二路139号,邮政编码:525000。E-mail: canaan184@163.com

基金项目:广东省普通高校毕业生创新创业人才类项目“人造水合物岩心研制与应用研究”(2019KQNCX084);茂名市科技计划项目“水合物开发实验用人造岩心的研制”(2020513)。

的开发品质代表了天然气水合物藏在技术和经济方面开发动用的可行性。受埋藏情况、开发技术和工程设施的限制,天然气水合物开发方案设计风险非常大,需在开发前完成天然气水合物藏的开发品质评价^[5-6],全面梳理其品质及不确定性,确定技术指标,规避开发风险。

目前,天然气水合物藏开发品质的相关研究仍处于初级阶段,大量研究工作集中在产气潜力评价方面^[7-9]。基于天然气水合物藏在基础性质测试、实验室模拟和资源勘察评价等方面取得的一系列颇具指导意义的研究成果^[10-12],建立水合物藏开采潜力的地质评价指标。天然气水合物藏开发品质的优劣程度是一个相对模糊的概念,受多种因素影响,评价指标具广泛性,评价方法多元化。模糊综合评价法基于模糊数学的隶属度理论将定性评价转变成定量评价,可对多影响因素综合研究进而评价。模糊综合评价能较好地解决多指标、不确定及难以量化的问题,广泛应用于各领域不确定性问题的解决,在油气资源评价方面具有广泛的应用^[13-15]。利用模糊综合评价法进行天然气水合物藏开发品质的评价,在明确天然气水合物藏开发品质的主控因素及评分准则的基础上,利用层次分析法确定因素集的综合权重并建立权重集,进而完成天然气水合物藏开发品质的模糊综合评价。

1 天然气水合物藏开发品质的主控因素

天然气水合物藏开发品质的影响因素众多且影响程度差异很大,模糊综合评价过程中因素集的建立过于复杂,致使天然气水合物藏开发品质评价结果准确度有限^[16-17],故需对天然气水合物藏开发过程中涉及的所有参数进行敏感性分析,明确天然气水合物藏开发品质的主控因素。

1.1 天然气水合物藏的基础性质参数

天然气水合物藏的开发品质评价模型中的影响因素应包括宏观、微观不同层次,从矿藏资源量、产气潜力、工程实施难度和安全技术要求等不同角度进行评价。但产气潜力中的储层展布模式、水合物类型等因素和安全技术要求中的储层强度、力学稳定性、出砂难易等因素存在难以量化表征等问题。

因此,将目前技术手段可获取并量化表征的天然气水合物藏的基础性质参数作为开发品质的影响因素。

将天然气水合物藏开发品质的影响因素分为工程地质参数、储层物性参数和流体性质参数3类。其中,工程地质参数包括储层埋深、上覆水深、储层倾角、距海岸距离和储层资源量5个参数;储层物性参数包括原始地层温度、地层与井底温差、原始地层压力、地层与井底压差、原始含水饱和度、原始水合物饱和度、地层岩石比热、地层岩石导热系数、地层渗透率和地层岩石孔隙度10个参数;流体性质参数包括气水毛管力、甲烷比热、水比热、水合物比热、水密度、水合物密度、水黏度、甲烷黏度、甲烷导热系数、水导热系数、水合物导热系数、水合物相平衡压力和水合物分解速率常数13个参数。陆上冻土和海域天然气水合物藏开发品质的影响因素有所差异,二者的储层物性参数和流体性质参数相同,工程地质参数方面,海域天然气水合物藏需明确储层埋深、上覆水深、储层倾角和距海岸距离,陆上冻土中需明确储层埋深和储层倾角对开发品质的影响。

1.2 天然气水合物藏开发主控因素的确定

敏感度分析法可定量评价在目标函数中某个相关变量的影响程度大小,表征为相关变量改变导致的目标函数的畸变程度。利用敏感度分析方法确定天然气水合物藏开发主控因素,天然气水合物藏开发中某一基础性质参数的敏感度 S_i 为:

$$S_i = \frac{\Delta F_i / F_o}{|w_i|} \quad (1)$$

$$F_o = \int_0^T R_o(V_1, V_2, \dots, V_n, t) dt \quad (2)$$

$$\Delta F_i = \int_0^T [R_i(V_1, V_2, \dots, V_n, t) - R_o(V_1, V_2, \dots, V_n, t)] dt \quad (3)$$

$$w_i = \frac{V_i - V_{io}}{V_i} \quad (4)$$

式(1)~式(4)中: S_i 为敏感度; F 为变量 V 的函数; R 为关联系数; V 为开发过程中所涉及所有变量;下标 n 为变量 V 的数量;下标 i 为畸变模型;下标 o 为原型; t 为时间,单位d; T 为开发时长,单位d; w_i 为偏移因子。

利用典型海域天然气水合物藏的储层物性参数和流体性质参数开展天然气水合物藏开发的数值模拟,以该天然气水合物藏在一段开采时间内累计产

气量为生产评价指标。工程地质参数影响经济评价指标,利用生产评价指标和计算经济净现值,进而开展天然气水合物藏开发的经济评价。依据数值模拟结果和经济评价结果进行参数敏感性分析。保持其他基础性参数不变,计算偏移因子 w_i 取0.01时天然气水合物藏在一定开采时间内累计产气量和对应的经济净现值的畸变率。

根据敏感度大小对天然气水合物藏开发品质的影响因素进行排序(表1),选取储层埋深 D_r 、原始地层温度 T_i 、原始水合物饱和度 S_{hi} 、地层岩石导热系数 K_r 、原始地层压力 p_i 、地层岩石孔隙度 φ_0 、水合物相平衡压力 p_{eq} 、水合物比热 C_h 和水合物分解速率常数 k_d

共9项敏感度最大的参数作为天然气水合物藏开发品质的主控因素。

1.3 主控因素的评分准则

根据试采数据和室内试验研究成果对不同因素进行赋分^[18],确定主控因素的评分准则(表2)。

天然气水合物藏开发品质的主控因素中原始地层温度 T_i 、原始地层压力 p_i 、原始水合物饱和度 S_{hi} 、地层岩石导热系数 K_r 、地层岩石孔隙度 φ_0 和水合物分解速率常数 k_d 为越大越好型影响因素,储层埋深 D_r 、水合物比热 C_h 和水合物相平衡压力 p_{eq} 为越小越好型影响因素。

表1 天然气水合物藏开发品质影响因素敏感性分析结果
Table 1 Sensitivity analysis results of factors of development of natural gas hydrate reservoir

分类	参数	符号	典型值	敏感度
工程地质参数	储层埋深/m	D_r	600	1.73
	储层资源量/ m^3	R_r	2.0×10^{10}	9.79×10^{-2}
	上覆水深/m	D_w	1 000	6.12×10^{-2}
	距海岸距离/m	L_r	1 000	8.91×10^{-3}
	储层倾角/ $^\circ$	A_r	10	7.85×10^{-4}
储层物性参数	原始地层温度/K	T_i	283	10.35
	原始水合物饱和度	S_{hi}	0.5	5.31
	地层岩石导热系数/[W/(m·K)]	K_r	1	2.55
	原始地层压力/MPa	p_i	20	1.03
	地层岩石孔隙度	φ_0	0.45	0.97
	地层渗透率/ μm^2	K	2.0	9.01×10^{-2}
	地层与井底压差/MPa	P_{gp}	2.0	5.08×10^{-2}
	原始含水饱和度	S_{wi}	0.5	4.65×10^{-2}
	地层与井底温差/K	T_{gp}	10	3.09×10^{-2}
	地层岩石比热容/[J/(kg·K)]	C_r	1 000	7.63×10^{-3}
流体性质参数	水合物相平衡压力/MPa	p_{eq}	8	7.24
	水合物比热容/[J/(kg·K)]	C_h	1 900	3.88
	水合物分解速率常数/[kg/(m ² ·Pa·s)]	k_d	3×10^{-14}	1.08
	甲烷比热容/[J/(kg·K)]	C_{vg}	2.227×10^3	5.12×10^{-2}
	水密度/(kg/m ³)	ρ_w	0.997×10^3	4.07×10^{-2}
	甲烷黏度/(mPa·s)	μ_g	11×10^{-3}	2.75×10^{-2}
	气水毛管力/Pa	p_c	2.0×10^4	2.72×10^{-2}
	水黏度/(mPa·s)	μ_w	2.98	1.29×10^{-2}
	水比热容/[J/(kg·K)]	C_w	4.2×10^3	9.65×10^{-3}
	水合物密度/(kg/m ³)	ρ_h	0.9×10^3	1.56×10^{-3}
	水合物导热系数/[W/(m·K)]	K_h	2.3	2.24×10^{-4}
	水导热系数/[W/(m·K)]	K_w	0.59	9.68×10^{-5}
	甲烷导热系数/[W/(m·K)]	K_g	0.025	3.23×10^{-5}

2 天然气水合物藏开发品质主控因素的权重计算

利用层次分析法明确天然气水合物藏开发主控因素权重,首先建立因素间相对重要性判断矩阵,求解判断矩阵特征向量,进而计算层次内各因素相对重要性的权重,加权计算得到综合权重。

2.1 主控因素的层次结构

天然气水合物藏开发品质的主控因素较多且具有明显层次结构(图1),符合层次分析法中多层次分析结构模型的设定要求^[19]。

天然气水合物藏开发品质主控因素层次结构的第一层次中有工程地质参数、储层物性参数和流体

性质参数3个因素。工程地质参数第二层次中有储层埋深 D_r 这1个因素;储层物性参数第二层次中有原始地层温度 T_i 、原始地层压力 p_i 、原始水合物饱和度 S_{hi} 、地层岩石导热系数 K_r 、地层岩石孔隙度 φ_0 共5个因素;流体性质参数第二层次中有水合物比热 C_h 、水合物相平衡压力 p_{eq} 和水合物分解速率常数 k_d 共3个因素。

2.2 主控因素权重的计算方法

根据1~9标度法,建立判断矩阵,采用特征赋值法对天然气水合物藏开发品质主控因素进行赋分,并计算各参数的权重值。1~9标度法利用不同标度值比较不同要素间的重要程度(表3),标度值越大,则两要素间相比重要程度更显著。

通过计算判断矩阵 W 的最大特征根和判断矩阵

表2 天然气水合物藏开发主控因素评分

Table 2 Score of main control factors for development of natural gas hydrate reservoir

评分	工程地质参数 D_r/m	储层物性参数					流体性质参数		
		T_i/K	p_i/MPa	S_{hi}	$K_r/[W/(m \cdot K)]$	φ_0	$C_h/[J/(kg \cdot K)]$	p_{eq}/MPa	$k_d/[kg/(m^2 \cdot Pa \cdot s)]$
60	> 900	< 274	< 5	< 0.1	< 0.2	< 0.25	> 2 100	> 10	< 10 ⁻¹⁶
70	600~900	274~278	5~10	0.1~0.3	0.2~0.4	0.25~0.35	1 900~2 000	8~10	10 ⁻¹⁶ ~10 ⁻¹⁵
80	300~600	278~283	10~20	0.3~0.5	0.4~1.0	0.35~0.45	1 800~1 900	6~8	10 ⁻¹⁵ ~10 ⁻¹⁴
90	150~300	283~288	20~30	0.5~0.7	1~2	0.45~0.55	1 700~1 800	4~6	10 ⁻¹⁴ ~10 ⁻¹³
100	< 150	> 288	> 30	> 0.7	> 2	> 0.55	< 1 700	< 4	> 10 ⁻¹³

表3 1~9标度法比例标度

Table 3 Scale of 1~9 scale method

标度	1	2	3	4	5	6	7	8	9
重要程度	同等重要	重要性位于1~3	稍微重要	重要性位于3~5	比较重要	重要性位于5~7	强烈重要	重要性位于7~9	极端重要

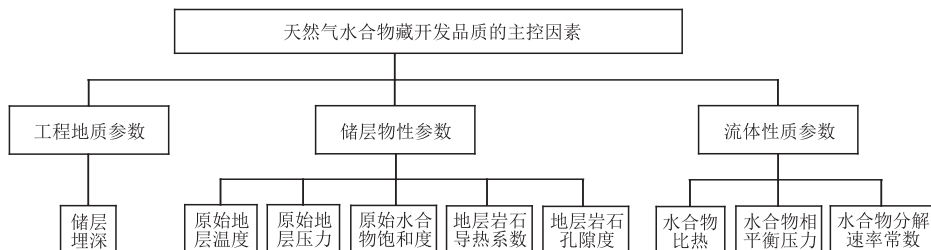


图1 天然气水合物藏开发品质主控因素层次结构

Fig. 1 Hierarchical structure chart of main controlling factors in development quality evaluation of natural gas hydrate reservoirs

对应的特征向量得到权重系数。

$$W = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: C 为标度值; C_{ij} 指第*i*个因素对第*j*个因素的比较标度值,下标*i,j*为因素序号; n 为因素数量。

判断矩阵中第*i*个因素对第*j*个因素的比较标度值与第*j*个因素与第*i*个因素的比较标度值互为倒数。检验判断矩阵一致性时,将一致性指标*CI*和随机一致性指标*RI*的比值称为检验系数*CR*,*CR*小于0.1时判断矩阵通过一致性检验,否则重新调整判断矩阵直至通过一致性检验。

2.3 主控因素的权重计算

天然气水合物藏开发品质主控因素的第一层次

表4 天然气水合物藏开发品质主控因素
第一层次判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of fluid property parameters of natural gas hydrate reservoir

参数	工程地质参数	储层物性参数	流体性质参数	权重
工程地质参数	1	0.2	0.2	0.090 9
储层物性参数	5	1	1	0.454 5
流体性质参数	5	1	1	0.454 5

表5 天然气水合物藏物储层物性参数的
第二层次判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of physical parameters of natural gas hydrate reservoir

参数	T_i	p_i	S_{hi}	K_r	φ_0	权重
T_i	1	7	2	5	7	0.506 5
p_i	0.143	1	0.333	2	1	0.019 7
S_{hi}	0.5	3	1	3	3	0.247 0
K_r	0.2	0.5	0.333	1	2	0.085 4
φ_0	0.143	1	0.333	0.5	1	0.069 5

中,3类参数的影响程度在开发过程中不断变化,工程地质参数影响开发经济评价指标,开发初期储层物性参数对生产评价指标影响较大,开发中后期流体性质参数对生产评价指标的影响相较更大^[18]。建立天然气水合物藏开发品质主控因素第一层次判断矩阵(表4),计算第一层次权重。

天然气水合物藏开发品质主控因素的第二层次中,工程地质参数仅有储层埋深 D_r ,无须计算权重,建立天然气水合物藏储层物性参数的第二层次参数判断矩阵(表5)和流体性质参数的第二层次参数判断矩阵(表6),计算第二层次权重。

根据评价结果和各主控因素权重校验计算结果,满足一致性要求。

根据第一层次权重和第二层次权重集计算得到天然气水合物藏开发主控因素的权重(表7)。

3 典型天然气水合物藏的开发品质评价

麦索亚哈(Messoyakha)气田区域的冻土天然气水合物是世界唯一商业化开发的天然气水合物藏,基础性质参数及开发数据资料详实。加拿大Mallik、美国Alaska、日本Nankai Trough、中国神狐海域也在不同时间分别进行了油气勘查和开采试验工作,获取了部分重要的基础数据和试采产气资料^[20-21]。利用该文的评价方法对Messoyakha天然气水合物藏进行开发品质评价研究,验证此评价方法的科学性及其

表6 天然气水合物藏流体性质参数的
第二层次判断矩阵

Table 6 Judgment matrix of fluid property parameters of natural gas hydrate reservoir

参数	C_h	p_{eq}	k_d	权重
C_h	1	0.5	3	0.309 0
p_{eq}	2	1	5	0.581 6
k_d	0.333 3	0.2	1	0.109 5

表7 天然气水合物藏开发主控因素的综合权重

Table 7 Comprehensive weight of main control factors for development of natural gas hydrate reservoir

参数	工程地质参数	储层物性参数				流体性质参数			
	D_r	T_i	p_i	S_{hi}	K_r	φ_0	C_h	p_{eq}	k_d
权重	0.090 9	0.230 2	0.041 7	0.112 2	0.038 8	0.031 6	0.140 4	0.264 3	0.049 8

表8 典型天然气水合物藏开发品质评价主控因素
Table 8 Main control factors for development quality evaluation of typical natural gas hydrate reservoir

天然气水合物藏	工程地质参数 D_e/m	储层物性参数					流体性质参数		
		T_f/K	p_f/MPa	S_{hi}	$K_f/[W/(m \cdot K)]$	φ_0	$C_h/[J/(kg \cdot K)]$	p_{eq}/MPa	$k_d/[kg/(m^2 \cdot Pa \cdot s)]$
Messoyakha	750	282.25	7.8	0.45	0.56	0.25	1 800	6.8	2.9×10^{-14}
Mallik	950	282.95	11.2	0.40	0.89	0.35	2 000	10.2	3.7×10^{-14}
Alaska	650	282.65	7.5	0.40	0.72	0.27	1 800	6.6	2.5×10^{-14}
Nankai Trough	300	283.75	13.5	0.35	1.37	0.35	2 000	10.0	1.2×10^{-13}
神狐	150	283.15	8.9	0.30	1.58	0.38	2 000	8.5	9.8×10^{-12}

合理性,同时开展 Mallik、Alaska、Nankai Trough 和神狐等其他典型天然气水合物藏的开发品质评价,进一步探讨此方法的适用性。

3.1 建立因素集

建立影响天然气水合物藏开发品质的主控因素的集合为因素集,因素集 X 定义为:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (6)$$

式中: X 为因素集; x_i 为主控因素;下标 i 为主控因素序号, $i=1, 2, \dots, n$; n 为主控因素数量,此处 $n=9$ 。

Messoyakha 天然气水合物藏的因素集 $X=[750, 9.1, 7.8, 0.45, 0.56, 0.25, 1\ 800, 6.8, 2.9 \times 10^{-14}]$ (表8)。

3.2 建立权重集

权重集 Y 中 y_i 表征不同开发品质影响因素 x_i 的影响权重,各因素权重的分配是因素集上的一个模糊子集。

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \quad (7)$$

根据前文中天然气水合物藏开发品质主控因素的权重计算结果,权重集 $Y=[0.090\ 9, 0.230\ 2, 0.041\ 7, 0.112\ 2, 0.038\ 8, 0.031\ 6, 0.140\ 4, 0.264\ 3, 0.049\ 8]$ 。

3.3 建立评价集

根据天然气水合物藏开发品质由差到好的定性评价,设定开发品质评分的 m 个数值区间,对应不同的评价结果。评价集定义为:

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\} \quad (8)$$

式中: Z 为评价集; z_i 为各评价因素;下标 i 为因素序号对应的评价结果序号, $i=1, 2, \dots, m$; m 为评价结果数量,此处 $m=4$ 。

设定天然气水合物藏开发品质评价结果分为优

表9 天然气水合物藏开发品质评价等级划分
Table 9 Classification of development quality evaluation of natural gas hydrate reservoir

开发品质等级	定性评价评语	开发品质评分
I 级	开发品质优秀	>80
II 级	开发品质良好	75~80
III 级	开发品质中等	70~75
IV 级	开发品质较差	<70

秀、良好、中等和较差 4 个等级,对应评价结果为 I 级、II 级、III 级、IV 级(表9)。

评价等级划分区间的分数值为参照常规油气田开发的等级划分情况初步设定,可随天然气水合物藏基础数据的完善和开发实践的反馈做进一步调整。

3.4 计算评价结果

因素集中的某一因素的单因素评价结果为 X 上的模糊子集,建立因素集的单因素评价向量:

$$R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}\} \quad (9)$$

式中: R_i 为因素集 x_i 上的单因素评价向量; r_{im} 为单因素评价向量分量;下标 i 为因素序号, $i=1, 2, \dots, n$; n 为主控因素数量,此处 $n=9$; m 为评价结果数量,此处 $m=4$ 。

通过敏感性参数划分区间上的隶属度来表征多个单因素评价综合起来构成单因素评价矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据因素集中主控因素的评分依据表对主控因素进行单因素评价,构成单因素集评价矩阵。

表10 典型天然气水合物藏单因素评价及开发品质综合评价结果
Table 10 Evaluation results of single factor of typical natural gas hydrate reservoirs

天然气水合物藏	工程地质参数 D_r	储层物性参数					流体性质参数			评价结果 Q	开发品质等级
		T_i	p_i	S_{hi}	K_r	φ_0	C_h	p_{eq}	k_d		
Messoyakha	70	80	80	80	80	70	80	80	80	78.77	Ⅱ级
Mallik	60	80	70	80	80	80	70	60	80	70.61	Ⅲ级
Alaska	70	80	70	80	80	70	80	80	80	76.95	Ⅱ级
Nankai Trough	90	90	80	80	90	80	70	70	90	80.04	Ⅰ级
神狐	90	90	70	80	90	80	70	70	100	81.63	Ⅰ级

Messoyakha天然气水合物藏的单因素评价矩阵 $R=[70, 80, 80, 80, 80, 70, 80, 80, 80]^T$ 。

在此基础上,根据权重集 Y 和单因素评价矩阵 R 计算得到对某一特定评价对象的综合评价结果为评价集:

$$Q=Y \cdot R \quad (11)$$

采用加权平均型的综合评价模型,选取算子对 $(\cdot, +)$,求得评价结果 q_j 值即为综合评价结果:

$$q_j = \sum_{i=1}^n y_i r_{ij} \quad (12)$$

式中:下标 i 为因素序号, $i=1, 2, \dots, n, n=9$; j 为评价结果序号, $j=1, 2, \dots, m, m=4$ 。

采用加权平均型的综合评价模型,对该评价对象的综合评价结果计算得到品质评价结果。将综合评价结果对照天然气水合物藏开发品质评价等级划分的划分区间(表9),可确定当前天然气水合物藏的开发品质等级(表10)。

根据天然气水合物藏开发品质评价等级划分, Messoyakha天然气水合物藏的开发品质等级为Ⅱ级。MORIDIS等^[22]在研究中评价 Messoyakha天然气水合物藏的开发效果较好但经济性一般,评价结果处于典型天然气水合物藏的中上等水平。根据该文评价方法对 Messoyakha天然气水合物藏进行开发品质等级评价所得出的结果与 Moridis 评价结果大致相同,验证了该文建立的天然气水合物藏开发品质评价方法的可行性和合理性。

加拿大 Mallik、美国 Alaska、日本 Nankai Trough 和中国神狐海域天然气水合物藏的开发品质评级分别为Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅰ级和Ⅰ级,利用(基于)该文评价方法的开发品质评价结果与相关研究及报道中的试采情况大致相符^[23-24],则该文建立的天然气水合物藏开发品质评价方法是基本适用的、可推广的。整体

上,海域天然气水合物藏的开发品质优于陆上冻土天然气水合物藏,随着天然气水合物藏基础理论和开采技术的完善,历经勘查、试采和开采产业化进程,海域天然气水合物藏具备更好的开发前景。

4 结论

1) 针对天然气水合物藏开发评价指标的广泛性和评价结果的模糊性特征,提出基于层次分析法的模糊综合评价方法,建立因素集、权重集和评价集,进而计算评价结果,开展天然气水合物藏的开发品质评价。

2) 对天然气水合物藏的基础性质参数进行敏感性分析,选取储层埋深 D_r 、原始地层温度 T_i 、原始地层压力 p_i 、原始水合物饱和度 S_{hi} 、地层岩石导热系数 K_r 、地层岩石孔隙度 φ_0 、水合物比热 C_h 、水合物相平衡压力 p_{eq} 和水合物分解速率常数 k_d 共9项敏感度最大的参数作为主控因素,明确主控因素的评分准则。利用层次分析法求取主控因素的综合权重值,建立得到综合权重集。

3) 利用麦索亚哈(Messoyakha)气田和其他典型天然气水合物藏的基础性质参数及开发数据资料建立模糊综合评价模型进而开展开发品质评价,验证了提出的开发品质评价方法的适用性和可行性。

参考文献

- [1] 魏纳,白睿玲,周守为,等.碳达峰目标下中国深海天然气水合物开发战略[J].天然气工业,2022,42(2):156-165.
WEI Na, BAI Ruiling, ZHOU Shouwei, et al. China's deepwater gas hydrate development strategies under the goal of carbon peak[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 156-165.
- [2] SAHU C, KUMAR R, SANGWAI J S. Comprehensive review on exploration and drilling techniques for natural gas hydrate reservoirs[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(10): 11813-11839.
- [3] 黄满,吴亮虹,宁伏龙,等.天然气水合物储层改造研究进展

- [J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 160-174.
- HUANG Man, WU Lianghong, NING Fulong, et al. Research progress in natural gas hydrate reservoir stimulation[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(7): 160-174.
- [4] ZHAO J F, LIU Y L, GUO X W, et al. Gas production behavior from hydrate-bearing fine natural sediments through optimized step-wise depressurization[J]. *Applied Energy*, 2020, 260(2): 114275.
- [5] ZHAO J F, ZHU Z H, SONG Y C, et al. Analyzing the process of gas production for natural gas hydrate using depressurization [J]. *Applied Energy*, 2015, 142: 125-134.
- [6] LI X S, XU C G, ZHANG Y, et al. Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review[J]. *Applied Energy*, 2016, 172: 286-322.
- [7] LI G, MORIDIS G J, KENI Z, et al. Evaluation of gas production potential from marine gas hydrate deposits in Shenhu area of South China Sea[J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(11): 6018-6033.
- [8] 吴能友, 黄丽, 苏正, 等. 海洋天然气水合物开采潜力地质评价指标研究: 理论与方法[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 11-17.
- WU Nengyou, HUANG Li, SU Zheng, et al. A study of geological evaluation indicators for the exploitation potential of marine natural gas hydrates: Theory and methodology[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(7): 11-17.
- [9] ZATSEPINA O, POOLADI-DARVISH M, HONG H. Behavior of gas production from type III hydrate reservoirs[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2011, 3(3): 496-504.
- [10] 业渝光. 天然气水合物实验探测和测试技术[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(6): 37-43.
- YE Yuguang. Detection and testing techniques in gas hydrate experiments[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(6): 37-43.
- [11] 王英梅, 张梦迪, 吴青柏, 等. 水合物一次分解压力对记忆效应的影响[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(4): 66-72.
- WANG Yingmei, ZHANG Mengdi, WU Qingbai, et al. Influence of primary decomposition pressure of hydrate on memory effect [J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2021, 50(4): 66-72.
- [12] 刘昌岭, 孙运宝. 海洋天然气水合物储层特性及其资源量评价方法[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(5): 44-57.
- LIU Changling, SUN Yunbao. Characteristics of marine gas hydrate reservoir and its resource evaluation methods[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(5): 44-57.
- [13] 罗东坤, 汪华. 运用模糊综合评价法评估油气开发投资风险[J]. 国际石油经济, 2004, 12(2): 38-40.
- LUO Dongkun, WANG Hua. Assessment of investment risk in oil and gas development using fuzzy integrated evaluation method[J]. *International Petroleum Economics*, 2004, 12(2): 38-40.
- [14] 于倩男, 刘义坤, 于洋. 基于层次分析的精控压裂井层模糊评价研究[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(3): 107-114.
- YU Qiannan, LIU Yikun, YU Yang. Research on fuzzy comprehensive evaluation of fine controlled fracturing wells and layers based on analytical hierarchy process[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2018, 48(3): 107-114.
- [15] 袁永真, 裴发根, 张鹏辉, 等. 利用模糊统计法进行天然气水合物靶区预测—以青海木里地区为例[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1281-1286.
- YUAN Yongzhen, PEI Fagen, ZHANG Penghui, et al. Fuzzy statistic method used to prediction of gas hydrate target area: A case study of Muli area in Qinghai Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(6): 1281-1286.
- [16] 魏纳, 周守为, 崔振军, 等. 南海北部天然气水合物物性参数评价与分类体系构建[J]. 天然气工业, 2020, 40(8): 59-67.
- WEI Na, ZHOU Shouwei, CUI Zhenjun, et al. Evaluation of physical parameters and construction of a parameter classification system for natural gas hydrate in the northern South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8): 59-67.
- [17] 刘振坤, 王晖, 王盘根, 等. 加拿大油砂SAGD开发储量品质评价关键参数研究[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(12): 55-61.
- LIU Zhenkun, WANG Hui, WANG Pangen, et al. Key parameters of reserve quality evaluation for oil sand SAGD development in Canada[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(12): 55-61.
- [18] 李淑霞, 刘亚平, 陈月明, 等. 天然气水合物藏品质评价的多级模糊综合评价[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 463-466.
- LI Shuxia, LIU Yaping, CHEN Yueming, et al. Evaluating the quality of natural gas hydrate reservoir by hierarchy fuzzy assessment[J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 463-466.
- [19] 徐立涛, 何玉林, 石万忠, 等. 琼东南盆地深水天然气水合物成藏主控因素及模式[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 598-610.
- XU Litao, HE Yulin, SHI Wanzhong, et al. Main controlling factors and patterns of gas hydrate accumulation in the deep water area of Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(5): 598-610.
- [20] 史斗, 郑军卫. 世界天然气水合物研究开发现状和前景[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 330-339.
- SHI Dou, ZHENG Junwei. The status and prospects of research and exploitation of natural gas hydrate in the world[J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(4): 330-339.
- [21] COLLETT T S. Energy resource potential of natural gas hydrates [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1971-1992.
- [22] MORIDIS G J, COLLETT T S, BOSWELL R, et al. Toward production from gas hydrates: Current status, assessment of resources, and simulation-based evaluation of technology and potential[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2009, 12(5): 745-771.
- [23] 刘建辉, 李占东, 赵佳彬. 神狐海域天然气水合物研究新进展[J]. 矿产与地质, 2021, 35(3): 596-602.
- LIU Jianhui, LI Zhandong, ZHAO Jiabin. New progress in the study of natural gas hydrate in Shenhu area[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2021, 35(3): 596-602.
- [24] 付强, 周守为, 李清平. 天然气水合物资源勘探与试采技术研究现状与发展战略[J]. 中国工程科学, 2015, 17(9): 123-132.
- FU Qiang, ZHOU Shouwei, LI Qingping. Research status and development strategy of gas hydrate resource exploration and development technologies[J]. *Engineering Science*, 2015, 17(9): 123-132.

(编辑 李青)