

基于岩石热解参数图版的 烃源岩内部排烃效率计算方法

张冬梅¹, 张延延¹, 郭隽菁², 胡守志¹, 李水福¹

(1. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 武汉 430074; 2. 中国石油集团 测井有限公司 新疆分公司, 乌鲁木齐 831511)

摘要: 排烃效率是研究排烃作用的关键地质参数, 准确计算烃源岩排烃效率对常规和非常规油气资源评价都有重要意义。在原始生烃潜力恢复法基础上, 介绍了一种热解图版法。该方法是利用氢指数与最大热解峰温关系划分有机质类型的经典图版, 将有机质类型分界线和成熟度趋势线均匀插值网格化, 然后将样品的氢指数和最大热解峰温数据投点于图版中, 沿着类型线向左追踪至与 R_o 为 0.2% 的成熟度线交点作为生烃指数的原始值, 从而计算出排烃效率。通过南襄盆地泌阳凹陷泌页 1 井 66 个烃源岩实测数据, 研究了排烃效率与烃源岩有机质丰度、类型、成熟度 (ATM) 特性以及页岩油富集程度的关系。结果表明, 与人为赋值法相比, 热解图版法获得的排烃效率与有机质 ATM 特性更具规律性, 与页岩油富集程度的吻合度较高, 而且计算过程与结果不会出现负值和排烃效率大于 100% 的现象。该方法计算的烃源岩内部排烃效率合理可行, 可作为原始生烃潜力恢复法计算排烃效率的补充。

关键词: 排烃效率; 原始生烃潜力; 人为赋值法; 热解图版法; 烃源岩; 泌阳凹陷; 南襄盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

A calculation method for the efficiency of hydrocarbon expulsion based on parameter-diagram of source rock pyrolysis

ZHANG Dongmei¹, ZHANG Yanyan¹, GUO Junjing², HU Shouzhi¹, LI Shuifu¹

(1. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Xinjiang Branch of CNPC Logging Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 831511, China)

Abstract: The efficiency of hydrocarbon expulsion acts as a key geological factor for the study of hydrocarbon expulsion of conventional oil and gas, also, it indicates the enrichment degree of unconventional oil and/or gas. Based on the method of recovering the original hydrocarbon generation potential, a method according to pyrolysis chart was proposed in this paper. A classic diagram for classifying organic matter types based on hydrogen index (I_H) and maximum pyrolysis peak temperature (T_{max}) was introduced in this study. The dividing line of organic matter type and the maturity trend line were evenly interpolated and gridded. The I_H and T_{max} data were plotted into the chart, and then traced to the left along the type line to the intersection point of maturity line $R_o = 0.2\%$ as the original value of hydrocarbon generation index, thus, the hydrocarbon expulsion efficiency can be calculated. Based on the results of 66 source rock samples from the well BYHF1 of Biyang Sag, the relationship between hydrocarbon expulsion efficiency and characteristics of organic matter (ATM) was studied. In addition, the correlation between hydrocarbon expulsion efficiency and shale oil enrichment degree was studied. The results indicated that the hydrocarbon expulsion efficiency and ATM characteristics of organic matter obtained by the pyrolysis chart method were more regular than those obtained by the artificial assignment method, and it had a higher consistency with the enrichment degree of shale oil (OSI). The calculation process and results will not to be negative value or hydrocarbon expulsion efficiency greater than 100%. Therefore, it is reasonable and feasible to calculate hydrocarbon expulsion efficiency by the pyrolysis chart method, which is a complement to the original hydrocarbon generation potential recovery method.

Key words: hydrocarbon expulsion efficiency; original hydrocarbon generation potential; artificial assignment method; pyrolysis diagram method; source rock; Biyang Sag; Nanxiang Basin

收稿日期: 2020-11-26; 修订日期: 2021-03-29。

作者简介: 张冬梅 (1968—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事石油工程和油气地球化学实验教学与研究。E-mail: zdm2007@cug.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41672136, 42073067) 资助。

排烃作用是指油气的初次运移,即烃类从烃源岩运移到储集岩的过程,它是油气成藏过程中的重要地质作用之一^[1],也是连接生烃与成藏的重要纽带^[2-6]。排烃效率是排烃研究中的一个关键地质参数,倍受人们关注^[7-11]。排烃效率的高低不仅影响常规油气聚集量,也影响着非常规油气的富集程度^[12-13],是常规与非常规油气资源评价的关键^[14-16]。因此,如何准确计算烃源岩排烃效率,对油气聚集成藏具有重要的理论意义和实际价值。目前排烃效率的计算有很多种方法,而这些方法或是与实际地质条件有偏差,或是地质参数获取比较困难,或是计算过程比较复杂^[7]。其中,原始生烃潜力恢复法是一种比较通用的方法,它是通过选择典型的含不同有机质类型的未熟烃源岩进行热解法模拟,以获得不同成熟度下的热降解率曲线图版。其优点是热解数据和有机碳含量容易获得,避免了复杂的排烃过程模拟;但也正因为是选择为数有限的典型有机质类型样品,所以一种类型有机质的原始生烃潜量(指数)仅采用同一个值^[17-19]。

然而,烃源岩地球化学精细研究表明,陆相烃源岩具有较强的非均质性,即使同一类型有机质,其生烃潜量(指数)跨度较大,仅仅用几个数值显然很难代表/反映一个地区所有烃源岩的原始生烃潜量(指数)。尽管 CHEN 等^[20-21]和郭秋麟等^[22]采用数学公式拟合,但也是将众多参差不齐的数据拟合为一个原始氢指数,显然也代表不了非均质性很强的每个烃源岩样品特征。为了使不同特性的烃源岩样品具有独立的原始生烃量值(指数),本文在原始生烃潜力恢复法基础上,介绍一种利用热解参数的氢指数(I_H)与最大热解峰温(T_{max})划分有机质类型图版来恢复烃源岩原始生烃潜量(指数)的方法,它是原始生烃潜力恢复法研究排烃效率的一个补充。

1 排烃效率概念与计算方法

烃源岩的排烃效率有3个不同的概念:即相对排烃效率、绝对排烃效率和累计排烃效率^[17]。它们相应的计算公式如下^[7,23]:

$$\text{相对排烃效率} = \frac{(\text{泥岩层中部残留烃} - \text{泥岩层边缘残留烃})}{\text{泥岩中部残留烃}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{绝对排烃效率} = \frac{\text{已排出烃}}{\text{已生成烃}} \times 100\% = \left(1 - \frac{\text{残留烃}}{\text{已生成烃}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{累计排烃效率} = \frac{\text{已排出烃}}{\text{原始生烃潜量}} \times 100\% = \left(1 - \frac{\text{残留烃} + \text{残余生烃量}}{\text{原始生烃潜量}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

生烃潜力恢复法计算的排烃效率为累积排烃效率。

2 热解图版法恢复烃源岩原始生烃潜量

热解图版法是指利用岩石热解分析获得的参数—— I_H 与 T_{max} 关系图,在已有的有机质类型分界线(称类型线)和成熟度趋势线(成熟度线)基础上进一步细分,将 I_H 和 T_{max} 绘图区域网格化(图1),并定义 $R_0=0.2\%$ 的成熟度线与类型线交点为每个样品的原始值。需要说明的是,图版可在具有缩放功能的软件中制作,如 Surfer12.0 版软件,既可将样品数据投点,又可画出趋势线,并放大追踪其原始值。

具体做法:(1)将现今样品热解分析获得的 I_H 和 T_{max} 数据投点到图版中,再沿着类型线向左侧追踪,找到 $R_0=0.2\%$ 的成熟度线,读出该交点的氢指数,即为原始氢指数;(2)将原始氢指数减去现今氢指数获得生烃指数,再减去残烃指数,即可得到排烃指数,生烃指数与排烃指数相除的百分数为排烃效率。

具体计算公式如下:

$$\text{生烃指数} = \text{原始氢指数} - \text{现今氢指数} \quad (4)$$

$$\text{排烃指数} = \text{生烃指数} - \text{残烃指数} \quad (5)$$

$$\text{排烃效率} = \frac{\text{排烃指数}}{\text{生烃指数}} \times 100\% \quad (6)$$

图版说明:(1)图版类型线的形成。经典的 I_H-T_{max} 有机质类型划分图版^[24]只有I型、II型和III型3条类型分界线,国内学者通过对我国不同沉积盆地大量热解资料统计,提出了四分法图版,即在经典图版的II型和III型分界线之间增加一条新的分界线,并将原来II型命名为II₁型,新加的为II₂型^[25-26]。本图版的类型线是在此基础上按照I型、II₁型、II₂型和III型变化趋势均匀插入多条趋势线而成的。(2)图版成熟度线的形成。同理,图版成熟度线是在经典的 I_H-T_{max} 有机质类型划分图版^[24]中成熟度趋势线基础上,按照它们变化趋势均匀插入多条趋势线而成的。(3)图版原始成熟度线的确定。根据地表镜质体反射率值(一般为 $R_0=0.2\%$)确定图版原始成熟度线,与类型趋势线交点的纵坐标值即为某样品点(I_H 和 T_{max} 决定)的原始氢指数值。DOW^[27]提出用 $\log R_0-H$ (深度)关系推到地表的值与 0.2% 比较来判断剥蚀量,他将地表处的 R_0 值定为 $0.18\% \sim 0.2\%$ ^[27-30]。

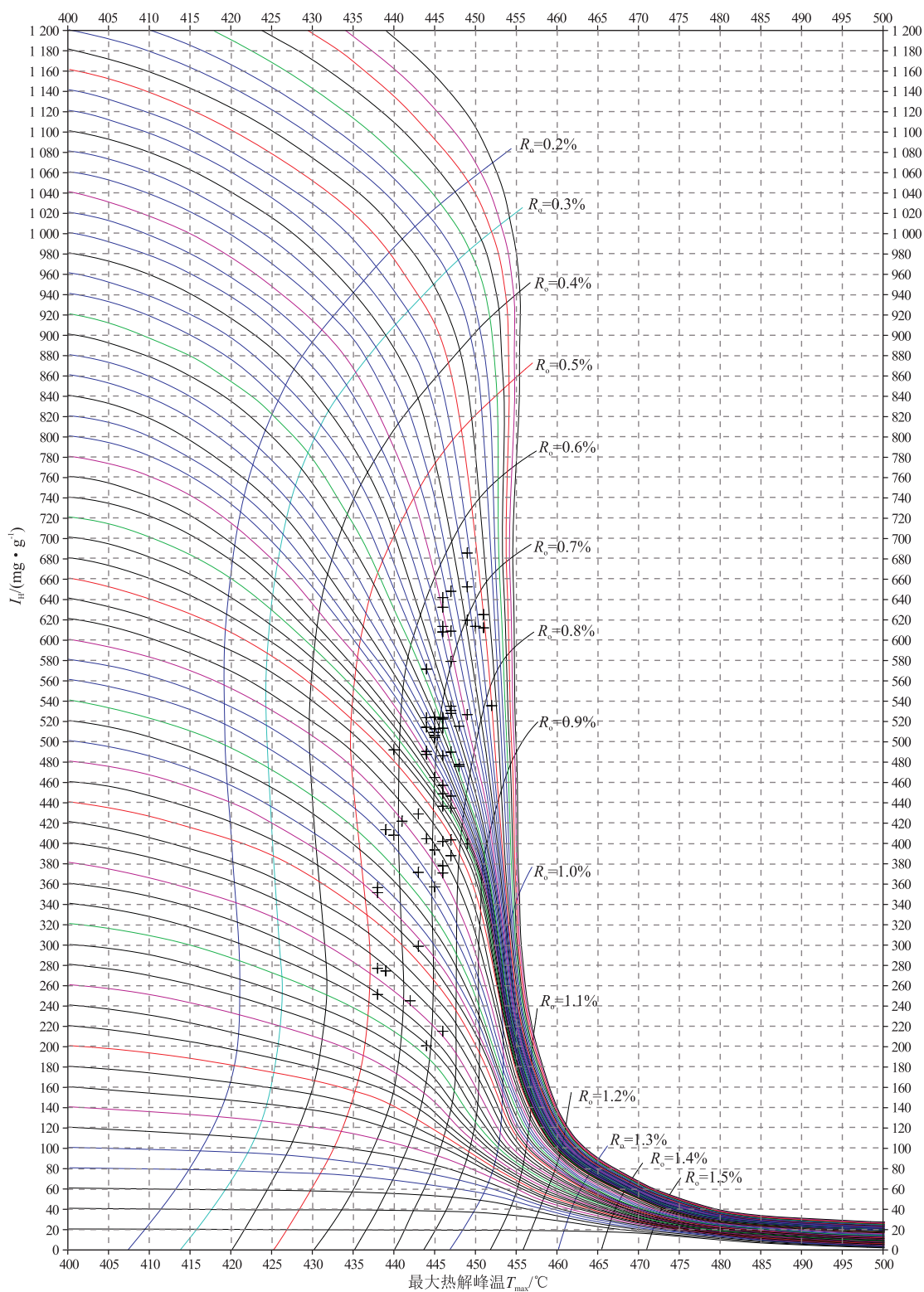


图 1 岩石热解分析参数图版

图中数据点为南襄盆地泌阳凹陷泌页 1 井样品的数据点。

Fig.1 Parameter chart of Rock-Eval pyrolysis analysis

3 热解图版法与人为赋值法对比

JARVIE 等^[18]通过数据分析认为, I 型、II 型、III 型和 IV 型干酪根的原始氢指数值分别为 750,

450, 125, 50 mg/g。陈建平^[19]按照烃源岩在未成熟—临界成熟时热解氢指数划分有机质类型, 即 $I_H < 200$ mg/g 为 III 型, $200 \leq I_H < 400$ mg/g 为 II₂ 型, $400 \leq I_H < 600$ mg/g 为 II₁ 型, $I_H \geq 600$ mg/g 为 I 型,

并以 150,350,550,750 mg/g 代表 III 型、II₂ 型、II₁ 型和 I 型烃源岩的平均最大生烃量。本文的人为赋值法均采用文献[19]的赋值计算。

对泌阳凹陷泌页 1 井的 66 个烃源岩热解分析数据,分别用热解图版法和人为赋值法计算出它们的排烃效率(PEE),并将其分别与代表有机质丰度的 TOC、代表有机质类型的 I_H 和代表有机质成熟度的 T_{max} 作图(图 2),重点研究排烃效率与有机质 ATM 特性(有机质丰度 Abundance、有机质类型 Type、有机质成熟度 Maturity)的关系。

从图 2 可以看出,热解图版法计算结果与有机质 ATM 特性的相关性(图 2 中 A-C)均优于人为赋值法(图 2 中 a-c)。其中,人为赋值法的计算过程和结果可能出现负值,导致排烃效率出现负值,也可能使排烃效率出现大于 100% 的现象,但热解图版法则不会出现这种情况(表 1)。可见,利用热

解图版法计算排烃效率更合理一些。

4 与页岩油富集程度相关性

在常规油气地质理论中,排烃效率一般是指一套烃源岩层段,或一个洼陷,甚至整个凹陷的总体排烃效率,因此,检验排烃效率的可靠性,可以用常规的油气资源量来反推验证。但是,在本文如果仍用这种方法验证,则就失去了本方法的意义,而又回到原来的原始生烃潜力恢复法的状况,即一种类型干酪根只用一个原始生烃潜力指数,而获得的排烃效率也可能是一套烃源岩层,甚至一个凹陷只有一个或仅有几个排烃效率值。

因此,验证热解图版法计算的烃源岩内部排烃效率可靠性,最好的方法是用经过排烃作用后残留在烃源岩中的滞留烃量。但是,滞留烃量不等于页岩油资源量,只有其中的游离油才对页岩油资源有

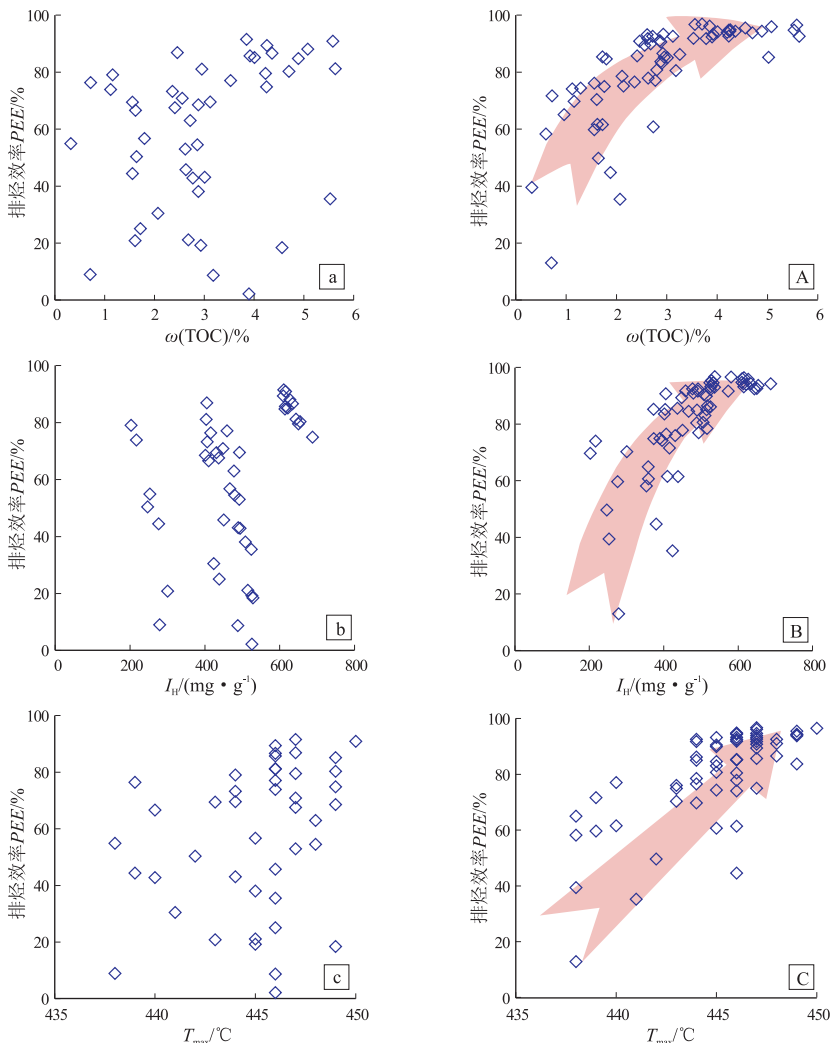


图 2 南襄盆地泌阳凹陷泌页 1 井烃源岩排烃效率与有机质特性(ATM)的关系(两种排烃效率计算方法对比)
图 a-c 为人为赋值法计算结果,A-C 为热解图版法计算结果。

Fig.2 Correlation between hydrocarbon expulsion efficiency and organic matter characteristics (ATM) of well BYHF 1, Biyang Sag, Nanxiang Basin

表 1 南襄盆地泌阳凹陷泌页 1 井烃源岩内部排烃效率

Table 1 Internal expulsion efficiency of source rock of well BYHF 1, Biyang Sag, Nanxiang Basin

样品 序号	$T_{\max}/$ $^{\circ}\text{C}$	现今 $I_{\text{H}}/$ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	残烃指数/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	干酪根 类型	人为赋值法				热解图版法			
					原始 $I_{\text{H}}/$ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	生烃指数/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	排烃指数/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	排烃 效率/%	原始 $I_{\text{H}}/$ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	排烃指数/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	生烃指数/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	排烃 效率/%
BY01	451	613.91	20.86	I	750	136.09	115.24	84.67	980.21	345.45	366.30	94.31
BY02	447	649.88	20.57	I	750	100.12	79.55	79.46	928.43	257.98	278.55	92.62
BY03	446	634.17	15.60	I	750	115.83	100.23	86.53	908.79	259.02	274.62	94.32
BY04	447	610.65	11.95	I	750	139.35	127.40	91.43	914.70	292.10	304.05	96.07
BY05	450	615.41	12.37	I	750	134.59	122.22	90.81	962.27	334.49	346.86	96.43
BY06	451	626.97	14.76	I	750	123.03	108.27	88.00	983.38	341.65	356.41	95.86
BY07	449	654.26	18.94	I	750	95.74	76.81	80.22	955.80	282.61	301.54	93.72
BY08	449	687.53	15.76	I	750	62.47	46.71	74.76	965.55	262.26	278.02	94.33
BY09	446	609.86	15.02	I	750	140.14	125.12	89.28	898.58	273.70	288.72	94.80
BY10	446	643.69	20.07	I	750	106.31	86.23	81.12	911.45	247.68	267.76	92.50
BY11	446	615.31	19.39	I	750	134.69	115.31	85.61	901.06	266.37	285.75	93.22
BY12	449	621.45	19.20	I	750	128.55	109.35	85.06	947.08	306.43	325.63	94.10
BY13	439	415.28	31.94	II ₁	550	134.72	102.78	76.29	527.82	80.60	112.54	71.62
BY14	446	488.05	56.60	II ₁	550	61.95	5.35	8.63	778.31	233.66	290.26	80.50
BY15	444	489.37	34.55	II ₁	550	60.63	26.08	43.01	719.99	196.07	230.62	85.02
BY16	443	430.77	36.54	II ₁	550	119.23	82.69	69.35	583.09	115.78	152.32	76.01
BY17	447	536.78	23.37	II ₁	550	13.22	-10.15	-76.81	874.95	314.80	338.17	93.09
BY18	445	514.55	27.99	II ₁	550	35.45	7.46	21.05	791.38	248.84	276.83	89.89
BY19	441	423.67	87.92	II ₁	550	126.33	38.41	30.40	559.61	48.02	135.94	35.32
BY20	445	506.07	52.50	II ₁	550	43.93	-8.57	-19.51	777.98	219.41	271.91	80.69
BY21	444	516.11	54.03	II ₁	550	33.89	-20.14	-59.44	767.53	197.39	251.42	78.51
BY22	445	511.03	46.90	II ₁	550	38.97	-7.93	-20.35	787.47	229.54	276.44	83.04
BY23	444	406.36	38.56	II ₁	550	143.64	105.08	73.16	570.51	125.59	164.15	76.51
BY24	447	491.60	27.48	II ₁	550	58.40	30.92	52.94	823.78	304.70	332.18	91.73
BY25	446	525.64	23.85	II ₁	550	24.36	0.51	2.11	835.27	285.78	309.63	92.30
BY26	446	403.73	27.80	II ₁	550	146.27	118.47	81.00	591.73	160.20	188.00	85.21
BY27	445	525.94	19.45	II ₁	550	24.06	4.61	19.15	812.16	266.77	286.22	93.20
BY28	440	409.88	46.91	II ₁	550	140.12	93.21	66.52	532.09	75.30	122.21	61.61
BY29	440	493.86	32.13	II ₁	550	56.14	24.01	42.77	633.71	107.72	139.85	77.02
BY30	447	405.28	19.11	II ₁	550	144.72	125.61	86.80	612.26	187.87	206.98	90.77
BY31	448	477.57	26.84	II ₁	550	72.43	45.59	62.94	835.32	330.91	357.75	92.50
BY32	449	528.51	17.54	II ₁	550	21.49	3.95	18.37	911.99	365.94	383.48	95.43
BY33	444	525.46	35.28	II ₁	550	24.54	-10.74	-43.75	780.43	219.69	254.97	86.16
BY34	448	517.12	44.18	II ₁	550	32.88	-11.30	-34.37	844.55	283.25	327.43	86.51
BY35	444	573.28	22.22	II ₁	550	-23.28	-45.50	195.45	841.38	245.88	268.10	91.71
BY36	446	515.14	46.02	II ₁	550	34.86	-11.16	-32.00	824.53	263.37	309.39	85.13
BY37	446	450.57	53.99	II ₁	550	99.43	45.44	45.70	694.33	189.77	243.76	77.85
BY38	448	479.37	32.17	II ₁	550	70.63	38.46	54.46	836.78	325.24	357.41	91.00
BY39	447	532.62	18.20	II ₁	550	17.38	-0.83	-4.76	873.20	322.37	340.58	94.66
BY40	452	537.30	14.32	II ₁	550	12.70	-1.62	-12.77	984.84	433.22	447.54	96.80
BY41	447	436.51	36.93	II ₁	550	113.49	76.56	67.46	693.93	220.49	257.42	85.65
BY42	447	448.44	29.69	II ₁	550	101.56	71.88	70.77	728.26	250.14	279.82	89.39
BY43	446	524.23	16.64	II ₁	550	25.77	9.13	35.44	834.67	293.80	310.44	94.64
BY44	445	466.67	36.11	II ₁	550	83.33	47.22	56.67	700.39	197.61	233.72	84.55
BY45	449	401.39	46.88	II ₁	550	148.61	101.74	68.46	688.17	239.91	286.78	83.65
BY46	447	529.76	20.95	II ₁	550	20.24	-0.71	-3.53	869.78	319.07	340.02	93.84
BY47	446	458.92	20.96	II ₁	550	91.08	70.11	76.98	714.95	235.06	256.03	91.81
BY48	446	438.37	83.72	II ₁	550	111.63	27.91	25.00	655.83	133.74	217.46	61.50
BY49	445	507.99	26.04	II ₁	550	42.01	15.97	38.02	781.52	247.49	273.53	90.48
BY50	444	492.31	17.63	II ₁	550	57.69	40.06	69.44	726.79	216.85	234.48	92.48

续表 1

样品 序号	$T_{max}/$ $^{\circ}C$	现今 $I_H/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	残烃指数/ ($mg \cdot g^{-1}$)	干酪根 类型	人为赋值法				热解图版法			
					原始 $I_H/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	生烃指数/ ($mg \cdot g^{-1}$)	排烃指数/ ($mg \cdot g^{-1}$)	排烃 效率/%	原始 $I_H/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	排烃指数/ ($mg \cdot g^{-1}$)	生烃指数/ ($mg \cdot g^{-1}$)	排烃 效率/%
BY51	447	580.90	10.67	II ₁	550	-30.90	-41.57	134.55	902.47	310.90	321.57	96.68
BY52	438	353.33	40.00	II ₂	350	-3.33	-43.33	300.00	449.11	55.78	95.78	58.24
BY53	438	253.13	43.75	II ₂	350	96.88	53.13	54.84	325.40	28.53	72.28	39.47
BY54	438	278.87	64.79	II ₂	350	71.13	6.34	8.91	353.35	9.69	74.48	13.01
BY55	445	395.35	44.96	II ₂	350	-45.35	-90.31	199.15	570.27	129.96	174.92	74.30
BY56	444	202.59	31.03	II ₂	350	147.41	116.38	78.95	305.04	71.42	102.45	69.71
BY57	443	373.30	38.64	II ₂	350	-23.30	-61.93	265.85	527.28	115.35	153.98	74.91
BY58	439	276.28	41.03	II ₂	350	73.72	32.69	44.35	378.16	60.85	101.88	59.73
BY59	438	358.33	33.33	II ₂	350	-8.33	-41.67	500.00	453.55	61.88	95.22	64.99
BY60	446	216.96	34.82	II ₂	350	133.04	98.21	73.83	351.03	99.24	134.07	74.03
BY61	447	389.72	50.47	II ₂	350	-39.72	-90.19	227.06	591.69	151.50	201.97	75.01
BY62	443	300.62	39.13	II ₂	350	49.38	10.25	20.75	432.36	92.61	131.74	70.30
BY63	442	246.95	51.22	II ₂	350	103.05	51.83	50.30	348.83	50.66	101.88	49.73
BY64	445	358.97	70.33	II ₂	350	-8.97	-79.30	883.67	538.17	108.87	179.20	60.75
BY65	446	372.67	27.91	II ₂	350	-22.67	-50.58	223.08	562.00	161.42	189.33	85.26
BY66	446	379.79	104.26	II ₂	350	-29.79	-134.04	450.00	568.35	84.31	188.56	44.71

注:人为赋值法中的原始 I_H 为人为赋值数据,参考文献[19]获得;热解图版法中的原始 I_H 为图版赋值数据,由图版(图1)查得。

贡献。所以,不能用滞留烃量来衡量页岩油资源量,目前判断页岩油资源的有效指标之一是含油饱和指数(OSI)^[31-33],它是单位质量有机碳所含的游离烃量,即 $OSI = S_1/\omega(TOC)$ 。因此,我们对泌

页1井5号页岩层(2 415~2 451 m)的样品分析,通过研究两种计算方法获得的排烃效率与页岩含油饱和指数的关系,可以发现,热解图版法的排烃效率与OSI具有较好的对应性(图3a)。这说明用

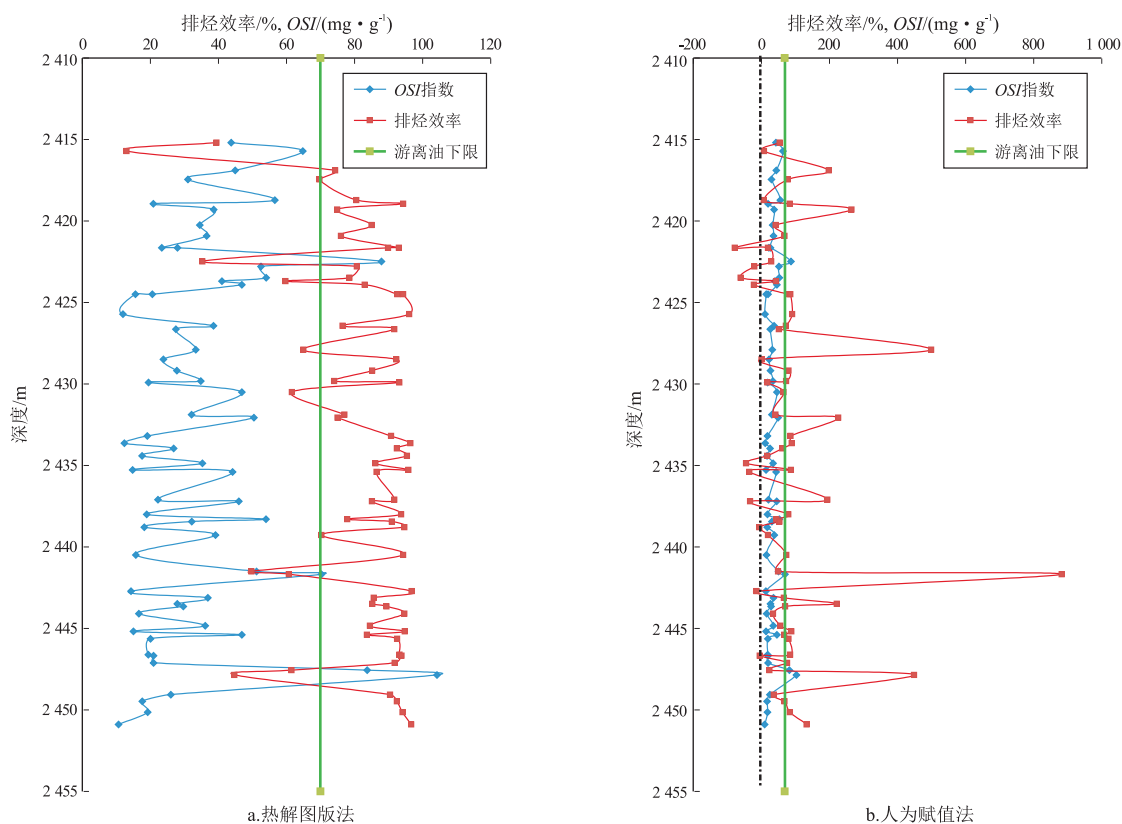


图3 南襄盆地泌阳凹陷泌页1井5号页岩层不同方法计算的排烃效率与页岩油富集程度吻合性

Fig.3 Correlation between hydrocarbon expulsion efficiency calculated by different methods and shale oil enrichment degree for No.5 shale layer, well BYHF1, Biyang Sag, Nanxiang Basin

热解图版法计算的排烃效率,在一定程度上可以反映烃源岩内部的页岩油富集情况。而人为赋值法的排烃效率与 *OSI* 的变化几乎无规律,而且很多排烃效率为负值,更有超过 100% 者(图 3b),这显然很不合理。

5 结论

(1) 准确计算烃源岩排烃效率,对常规和非常规油气聚集都非常重要,但现行计算方法中,或是地质参数获取比较困难,或是计算过程比较复杂。其中,原始生烃潜力恢复法虽有参数易于获取的优点,但也有一种类型有机质的原始生烃潜力仅有一个且是人为赋值的不足。在氢指数与最大热解峰温关系划分有机质类型的经典图版基础上,将有机质类型分界线和成熟度趋势线均匀插值网格化的图版法,其参数获取相对合理,计算过程较为简单,是原始生烃潜力恢复法的修正和补充。

(2) 通过泌阳凹陷泌页 1 井 66 个烃源岩的实测数据,重点研究了排烃效率与有机质 ATM 特性以及页岩油富集程度的关系。结果表明,与人为赋值法相比,热解图版法获得的排烃效率与有机质 ATM 特性更具规律性,与页岩油富集程度(*OSI*)的吻合度较高,而且计算结果不会出现负值和排烃效率大于 100% 的现象。由此可见,热解图版法计算烃源岩内部排烃效率比较合理可行。

参考文献:

- [1] 马卫,李剑,王东良,等.烃源岩排烃效率及其影响因素[J].天然气地球科学,2016,27(9):1742-1751.
MA Wei, LI Jian, WANG Dongliang, et al. Hydrocarbon expulsion efficiency of source rocks and its influencing factors[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1742-1751.
- [2] 张世华.川西坳陷须三一须四段含油气系统生排烃过程与主要成藏期关系[J].成都理工大学学报(自然科学版),2006,33(3):252-255.
ZHANG Shihua. Relation between the main accumulation stage and the process of generation and expulsion of hydrocarbon in $T_3x^3-T_3x^4$ petroleum system of Upper Triassic in the West Sichuan Depression, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2006, 33(3): 252-255.
- [3] 马行陟,庞雄奇,孟庆洋,等.辽东湾地区深层烃源岩排烃特征及资源潜力[J].石油与天然气地质,2011,32(2):251-258.
MA Xingzhi, PANG Xiongqi, MENG Qingyang, et al. Hydrocarbon expulsion characteristics and resource potential of deep source rocks in the Liaodong Bay[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 251-258.
- [4] 郭继刚,庞雄奇,刘丹丹,等.库车坳陷中、下侏罗统煤系烃源岩排烃特征及资源潜力评价[J].天然气地球科学,2012,

23(2):327-334.

GUO Jigang, PANG Xiongqi, LIU Dandan, et al. Hydrocarbon expulsion for Middle-Lower Jurassic coal measures and evaluation of potential resource in Kuqa Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(2): 327-334.

- [5] 胡朝伟,胡广,张玺华,等.川西北地区茅口组上部黑色岩系的层位、沉积环境及生烃潜力评价[J].石油实验地质,2020,42(2):202-214.
HU Chaowei, HU Guang, ZHANG Xihua, et al. Sedimentary environment, hydrocarbon potential and development of black rocks in Upper Maokou Formation, northwestern Sichuan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2): 202-214.
- [6] 赵雪娇,王震亮,范昌育,等.鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段烃源岩排烃机制及成藏意义[J].油气地质与采收率,2012,19(1):35-38.
ZHAO Xuejiao, WANG Zhenliang, FAN Changyu, et al. Hydrocarbon expulsion dynamic conditions and accumulation significance of petroleum of source rocks in Longdong area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(1): 35-38.
- [7] 田善思.排烃效率研究方法及其松辽盆地烃源岩排烃效率[D].大庆:东北石油大学,2013.
TIAN Shansi. The expulsion efficiency research methods and the Songliao Basin hydrocarbon source rock expulsion efficiency[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [8] 李吉君,吴慧,卢双舫,等.鄂尔多斯盆地长 9 烃源岩发育与排烃效率[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(S1):26-32.
LI Jijun, WU Hui, LU Shuangfang, et al. Development and hydrocarbon expulsion efficiency of source rock in 9th member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(S1): 26-32.
- [9] 郭继刚,李建华,庞雄奇,等.准噶尔盆地南缘侏罗系烃源岩排烃效率研究[J].现代地质,2013,27(5):1081-1088.
GUO Jigang, LI Jianhua, PANG Xiongqi, et al. Study on expulsion efficiency of hydrocarbon for the Jurassic source rock in the southern margin of Junggar Basin[J]. Geoscience, 2013, 27(5): 1081-1088.
- [10] 陈瑞银,王汇彤,陈建平,等.实验方法评价松辽盆地烃源岩的生排烃效率[J].天然气地球科学,2015,26(5):915-921.
CHEN Ruiyin, WANG Huitong, CHEN Jianping, et al. An experimental method to evaluate the hydrocarbon generation and expulsion efficiency in the Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 915-921.
- [11] 王媛,汪少勇,李建忠,等.辽西雷家地区沙四段中—低熟烃源岩排烃效率与致密油—页岩油勘探前景[J].石油与天然气地质,2019,40(4):810-821.
WANG Yuan, WANG Shaoyong, LI Jianzhong, et al. The hydrocarbon expulsion efficiency of medium-low mature source rocks and tight-shale oil potential in the Es⁴, Leijia area in West Depression, Liaohe Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 810-821.
- [12] 黄振凯,刘全有,黎茂稳,等.鄂尔多斯盆地长 7 段泥页岩层系排烃效率及其含油性[J].石油与天然气地质,2018,

- 39(3):513-521.
- HUANG Zhenkai, LIU Quanyou, LI Maowen, et al. Hydrocarbon expulsion efficiency and oil-bearing property of the shale system in Chang 7 Member, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3):513-521.
- [13] 腾格尔,陶成,胡广,等.排烃效率对页岩气形成与富集的影响[J].*石油实验地质*,2020,42(3):325-334.
- BORJIGIN Tenger,TAO Cheng,HU Guang,et al.Effect of hydrocarbon expulsion efficiency on shale gas formation and enrichment[J]. *Petroleum Geology & Experiment*,2020,42(3):325-334.
- [14] 薛海涛,田善思,卢双舫,等.页岩油资源定量评价中关键参数的选取与校正:以松辽盆地北部青山口组为例[J].*矿物岩石地球化学通报*,2015,34(1):70-78.
- XUE Haitao,TIAN Shansi,LU Shuangfang,et al.Selection and verification of key parameters in the quantitative evaluation of shale oil:a case study at the Qingshankou Formation,northern Songliao Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*,2015,34(1):70-78.
- [15] 刘庆,张林晔,王茹,等.湖相烃源岩原始有机质恢复与生排烃效率定量研究:以东营凹陷古近系沙河街组四段优质烃源岩为例[J].*地质论评*,2014,60(4):877-883.
- LIU Qing,ZHANG Linye,WANG Ru,et al.Recovery of original organic matter content and quantitatively study of generation and expulsion efficiency for lacustrine hydrocarbon source rocks:a case study of the excellent source rocks of the Palaeocene E₂₋₃S⁴, Dongying Sag[J]. *Geological Review*,2014,60(4):877-883.
- [16] 陈冬霞,黄小惠,李林涛,等.川西坳陷上三叠统烃源岩排烃特征与排烃史[J].*天然气工业*,2010,30(5):41-45.
- CHEN Dongxia,HUANG Xiaohui,LI Lintao,et al.Characteristics and history of hydrocarbon expulsion of the Upper Tertiary source rocks in the Western Sichuan Depression[J]. *Natural Gas Industry*,2010,30(5):41-45.
- [17] 郭立言.生油岩热解快速定量评价[M].北京:科学出版社,1986.
- WU Liyan.Rapid quantitative evaluation of source rock pyrolysis[M]. Beijing:Science Press,1986.
- [18] JARVIE D M,HILL R J,RUBLE T E,et al.Unconventional shale-gas systems;the Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. *AAPG Bulletin*,2007,91(4):475-499.
- [19] 陈建平,孙永革,钟宁宁,等.地质条件下湖相烃源岩生排烃效率与模式[J].*地质学报*,2014,88(11):2005-2032.
- CHEN Jianping,SUN Yongge,ZHONG Ningning,et al.The efficiency and model of petroleum expulsion from the lacustrine source rocks within geological frame[J]. *Acta Geologica Sinica*,2014,88(11):2005-2032.
- [20] CHEN Zhuoheng,JIANG Chunqing.A data driven model for studying kerogen kinetics with application examples from Canadian sedimentary basins [J]. *Marine and Petroleum Geology*,2015,67:795-803.
- [21] CHEN Zhuoheng,JIANG Chunqing,LAVOIE D,et al.Model-assisted Rock-Eval data interpretation for source rock evaluation:examples from producing and potential shale gas resource plays[J]. *International Journal of Coal Geology*,2016,165:290-302.
- [22] 郭秋麟,米敬奎,王建,等.改进的烃源岩生烃潜力模型及关键参数模板[J].*中国石油勘探*,2019,24(5):661-669.
- GUO Qiulin,MI Jingkui,WANG Jian,et al.An improved hydrocarbon generation model of source rocks and key parameter templates [J]. *China Petroleum Exploration*,2019,24(5):661-669.
- [23] LEYTHAEUSER D,SCHAEFER R G,RADKE M.On the primary migration of petroleum [C]//*Proceedings of the 12th World Petroleum Congress*.Houston,Texas;Wiley,1987:227-236.
- [24] ESPITALIÉ J,MARQUIS F,BARSONY I.Geochemical logging [M]//VOORHEES K J. *Analytical pyrolysis: techniques and applications*.Boston;Butterworth-Heinemann,1984:276-304.
- [25] 侯读杰,冯子辉.油气地球化学[M].北京:石油工业出版社,2011:176-177.
- HOU Dujie,FENG Zihui. *Petroleum organic geochemistry* [M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2011:176-177.
- [26] 郎东升,金成志,郭冀义,等.储层流体的热解及气相色谱评价技术[M].北京:石油工业出版社,1999:169-171.
- LANG Dongsheng,JIN Chengzhi,GUO Jiayi,et al. *Pyrolysis and gas chromatographic evaluation of reservoir fluids* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press,1999:169-171.
- [27] DOW W G. *Kerogen studies and geological interpretation* [J]. *Journal of Geochemical Exploration*,1977,7:79-99.
- [28] 何生,王青玲.关于用镜质体反射率恢复地层剥蚀厚度的问题讨论[J].*地质论评*,1989,35(2):119-126.
- HE Sheng,WANG Qingling. *The eroded thickness reconstructed by vitrinite reflectance* [J]. *Geological Review*,1989,35(2):119-126.
- [29] 李伟.恢复地层剥蚀厚度方法综述[J].*中国海上油气(地质)*,1996,10(3):167-171.
- LI Wei. *Summary of reconstruction of strata denudation thickness* [J]. *China Offshore Oil and Gas(Geology)*,1996,10(3):167-171.
- [30] 孔伟思,方石,袁魏,等.镜质体反射率的研究现状[J].*当代化工*,2015,44(5):1020-1028.
- KONG Weisi,FANG Shi,YUAN Wei,et al. *Research status of vitrinite reflectivity* [J]. *Contemporary Chemical Industry*,2015,44(5):1020-1028.
- [31] JARVIE D M. *Extended abstract—shale resource systems for oil and gas* [M]//BREYER J A. *Shale reservoirs—Giant resources for the 21st century*.Tulsa,USA:AAPG,2012:1-3.
- [32] JARVIE D M. *Shale resource systems for oil and gas:Part 2—Shale-oil resource systems* [M]//BREYER J A. *Shale reservoirs—Giant resources for the 21st century*. Tulsa, USA: AAPG,2012:89-119.
- [33] 林会喜,宋明水,王圣柱,等.叠合盆地复杂构造带页岩油资源评价:以准噶尔盆地东南缘博格达地区中二叠统芦草沟组为例[J].*油气地质与采收率*,2020,27(2):7-17.
- LIN Huixi,SONG Mingshui,WANG Shengzhu,et al. *Shale oil resource evaluation in complex structural belt of superimposed basin;a case study of Middle Permian Lucaogou Formation in Bogda area,southeast margin of Junggar Basin* [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*,2020,27(2):7-17.