

文章编号:1001—6112(2004)03—0281—06

关于碳酸盐烃源岩的评价标准

秦建中¹, 刘宝泉², 国建英², 刘井旺², 于国营², 郭树芝²

(1. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡实验地质研究所, 江苏 无锡 214151;
2. 中国石油 华北油田勘探开发研究院, 河北 任丘 062552)

摘要:通过模拟实验测得碳酸盐岩排烃下限值为 0.06%~0.12%, 并提出碳酸盐岩排烃下限值与碳酸盐烃源岩有机碳下限值应是两个概念。排烃下限值是烃源岩所固有的特性, 不是人们自己设定的标准, 而烃源岩有机碳下限值是一个评价标准, 大小可以等于或大于排烃下限值, 而不能小于排烃下限值。通过对碳酸盐岩有机质丰度、有机质类型、有机相和成熟度的研究, 修正了过去碳酸盐岩只按 I 类有机质的评价方法, 而将碳酸盐岩有机质分为 I、II₁、II₂ 3 类, 将碳酸盐烃源岩划分为 4 类, 即很好烃源岩、好烃源岩、中等烃源岩、差烃源岩。未熟—成熟碳酸盐烃源岩有机碳下限值为 0.2%~0.4%; 高成熟—过成熟碳酸盐烃源岩有机碳下限值为 0.1%~0.25%。

关键词: 模拟实验; 碳酸盐岩; 烃源岩; 评价标准
中图分类号: 622.1 **文献标识码:** B

有机质丰度是评价烃源岩的最基础指标。对于泥质烃源岩的评价标准, 国内外比较一致, 大都采用 0.3%~0.5% 作为下限值。但对海相碳酸盐岩烃源岩有机碳下限值众说纷纭, 国内外不同研究者和单位提出了极不同的评价标准(表 1)^[1]。总的来看, 国外学者和单位提出的下限值高, 我国学者提出的下限值比较低, 前者多在 0.20%~0.50%。后者在 0.05%~0.12%。这主要是因为国内外学者所研究的地区、烃源岩的时代及其成熟度不同引起的。国外学者研究的地区大都已找到了油气田, 烃源岩大都是中、新生界的, 成熟度多处于生油阶段, 有机质丰度比较高; 而我国的海相碳酸盐岩大都属于高成熟—过成熟阶段。海相碳酸盐岩除青藏高原为中生界外, 其余地区多为古生界—中、上元古界, 时代老、有机质丰度比较低, 目前只有长庆、威远等气田和塔里木油气田的烃源岩可能是碳酸盐岩。

也就是说所有上述评价标准的提出都有各自的地质和历史背景。由于对塔里木油气田烃源岩的深入研究, 近年来发现了一些好的烃源层, 因此梁狄刚、戴金星等又提出了碳酸盐烃源岩新的评价标准。“碳酸盐岩烃源岩有机碳的下限不是 0.1%~0.2%, 而应是 0.5%”^[2]。下面笔者根据碳酸盐岩排烃模拟实验结果及我国碳酸盐岩的实际状况来讨论碳酸盐岩烃源岩有机碳的下限值及评价标准问题。

表 1 不同单位及学者提出的碳酸盐岩有机质丰度下限值

机构或学者	有机质丰度/%	机构或学者	有机质丰度/%
美国地化公司	0.12	陈丕济等	0.10
法国石油研究所	0.24	付家谟等	0.08, 0.10
罗诺夫等	0.20	郝石生	0.30
挪威大陆架研究所	0.20	大港石油管理局研究院	0.07, 0.12
庞加实验室	0.25	田口一雄	0.20
亨特	0.29, 0.33	帕拉卡斯	0.30, 0.50
蒂索	0.30	埃勃	0.30
刘宝泉	0.05, 0.10	梁狄刚等	0.50

1 关于烃源岩有机质丰度下限值的讨论

1.1 烃源岩排烃下限值与有机碳下限值的关系

笔者认为首先应将碳酸盐岩排烃下限值与碳酸盐烃源岩评价中的有机碳下限值区分开来。我们所说的烃源岩排烃下限值是指烃源岩生烃量刚好超过岩石对烃的吸附量而能排烃时最小有机质丰度。烃源岩的排烃下限值受多种因素的影响, 因有机质类型、岩性, 有机质成熟度的不同, 排烃下限值高低可以相差很多。即便是同一个烃源岩其排烃下限值在热演化过程中也是在不断变化的, 成熟度越高, 生烃量越大, 排烃下限值就越低。所以说, 某一类特定的

岩石在某一特定的演化阶段就有一个排烃下限值,它是某类岩石所固有的,不是人们自己设定的标准。我们在模拟实验中所测得的碳酸盐岩排烃下限值为 $\text{排烃值}=0.06\% \sim 0.12\%$ ^[3,4],这是有机质为 I - II₁类碳酸盐岩在生烃高峰时的排烃下限值。排烃下限值不等于烃源岩评价中的有机碳下限值,烃源岩有机碳下限值大小可以等于或大于排烃下限值,而不能小于排烃下限值。

1.2 碳酸盐岩与泥页岩烃源岩有机碳下限值的对比讨论

烃源岩评价中的有机碳下限值是指能够形成具有经济价值油气藏(不一定是大型油气藏)的烃源岩有机碳最低值。它是一个为了指导油气勘探工作而提出的一个评价标准。能否形成一个具有工业价值的油气藏,取决于生、储、盖、运、聚、保诸多因素。仅就生油岩(或烃源岩)体系来说也是一个非常复杂的问题。一个具有工业价值的油气藏的烃源岩不是一个岩石样品或一个岩性、一个层位的烃源岩问题,应当说是一个烃源岩体系。它可能包括了几个层位的几种岩性的烃源岩,仅就一个层位一种岩性的烃源岩的有机质丰度来说,可能有有机碳很高的,可能也有有机碳比较低的。比如某地区烃源岩 排烃值 含量为 $0.1\% \sim 1.0\%$, $\text{排烃值}=1.0\%$ 和 0.5% 的烃源岩可以提供油气,那么 $\text{排烃值}=0.4\%, 0.3\%$ 和 0.2% 的岩层有没有提供油气呢,按道理说应当也可以提供一些油气,只是提供的数量少一些。如果有机碳再低,提供的油气更少,就可以忽略不计了,也可以说没有提供油气源。在这种情况下你可以说有机碳下限值是 $\text{排烃值}=0.5\%$,他也可说有机碳下限值是 $\text{排烃值}=0.2\%$ 。但谁也无法用实验或具体事例来证实谁的说法正确。

我们可以通过对泥页岩和碳酸盐岩烃源岩的特点及评价标准的比较加以判定。目前有机质为 I - II₁类的泥页岩烃源岩的有机碳下限值 $\text{排烃值}=0.3\% \sim 0.5\%$ 已是大家的共识。碳酸盐岩对烃的吸附作用比泥页岩小得多这也是大家的共识。模拟实验和自然剖面的系统样品热解分析已证明有机质为 I - II₁类碳酸盐岩排烃下限值为 $\text{排烃值}=0.06\% \sim 0.12\%$,而泥页岩为 $\text{排烃值}=0.27\% \sim 0.48\%$ ^[3,4],仅就这一点来说,碳酸盐烃源岩的有机碳下限值也应比泥页岩低一些。另外实验已证明碳酸盐岩的生烃效率也比泥页岩高,而且碳酸盐岩既是烃源岩,又可以是好的储集层,油气的运移距离很近,这又可以使碳酸盐烃源岩的有机碳下限值比泥页岩更低一些。碳酸盐岩的上述特点均表明,碳酸

盐烃源岩的有机碳下限值应当比泥页岩低。按目前 I - II₁类泥页岩烃源岩的有机碳下限值为 $\text{排烃值}=0.3\% \sim 0.5\%$ 来比较的话,具有 I - II₁类有机质的碳酸盐岩烃源岩的有机碳下限值定为 $\text{排烃值}=0.2\% \sim 0.3\%$ 应当说是比较合理的。再说,上述评价标准是指烃源岩处于生油阶段时生油岩的有机碳下限值,它和原始有机碳相差不多。我国碳酸盐岩大都处于高成熟—过成熟阶段,这时是残余有机碳,其下限值比生油阶段应当低一些,另外气源岩的下限值理应比生油岩下限值低一些,因此如按同一尺度来衡量的话,我国高成熟—过成熟碳酸盐岩烃源岩原定的残余有机碳下限值 $\text{排烃值}=0.1\%$ 应当说也是合理的。如果说不考虑我国碳酸盐岩的上述特点,也不区分是生油岩还是气源岩,统统把碳酸盐岩烃源岩的有机碳下限值定为 $\text{排烃值}=0.5\%$,是否有点以偏盖全? 是否对碳酸盐岩烃源岩有点不公平? 确定碳酸盐岩烃源岩的有机碳下限值应当和泥页岩同样对待,但这里说的同样指的是排烃量应当相同,而不是有机碳相同。

1.3 碳酸盐岩烃源岩排烃量与有机碳含量的关系

为了了解不同有机碳含量的碳酸盐岩能生成多少数量的油气,我们根据方解石及碳酸盐岩油气生成和排烃下限值模拟实验研究及根据上述研究得出的烃源岩排烃量、排油量计算公式,计算了碳酸盐烃源岩不同有机碳的排烃量和面积为 $10\text{ 万}\text{km}^2$ 、总厚度为 $500\text{ 万}\text{m}$ 岩体的油气排出数量(表2)。

由表可见: 排烃值 为 0.1% 时,排烃量为 $(271 \sim 405) \times 10^8\text{ m}^3$, 排烃值 为 0.2% 时,排烃量为 $(894 \sim 1\,585) \times 10^8\text{ m}^3$ 有机碳增加1倍,排烃量增加 $2.3 \sim 2.9$ 倍。 排烃值 为 0.5% 时,有机碳增加4倍,排烃量为 $(2\,764 \sim 5\,125) \times 10^8\text{ m}^3$ 排烃量增加 $9.2 \sim 11.6$ 倍。 排烃值 为 1.0% 时,排烃量高达 $(5\,880 \sim 11\,026) \times 10^8\text{ m}^3$ 有机碳增加9倍,排烃量增加 $20.7 \sim 26.2$ 倍,即排烃量随有机碳的增加,大约成2倍以上的数量增加。这表明有机质丰度越高,排烃量急剧增加,越有利于形成大油气田。当有机质丰度很高时,很薄的烃源岩也能形成大量的油气。例如烃源岩有机碳为 5% ,厚度为 $10\text{ 万}\text{m}$ 时,按表中的计算结果,每平方千米排烃量可达 $(62 \sim 116) \times 10^8\text{ m}^3$ 。

我国下古生界—中上元古界海相碳酸盐岩有机质丰度大都比较低,残余有机碳平均值大都在 $0.1\% \sim 0.20\%$,恢复成原始有机碳为 $0.2\% \sim 0.5\%$ 左右,总地层厚度多在 $500\text{ 万}\text{m}$ 以上。如表2计算结果所示,有机碳为 0.2% (相当于残余有机碳 $=0.1\%$), $500\text{ 万}\text{m}$ 厚的烃源岩,其排烃强度达 $(89.4 \sim$

表 2 不同有机质丰度碳酸盐烃源岩的排烃量

表 2 不同有机质丰度碳酸盐烃源岩的排烃量														
有机碳/ %	泥灰岩						灰岩						恢复系数 恢复系数	
	排烃量/(10 ⁴ 标 ¹)			10×0.5排 ¹ 排烃量/10 ⁴ 标			排烃量/(10 ⁴ 标 ¹)			10×0.5排 ¹ 排烃量/10 ⁴ 标			泥灰岩	灰岩
	烃气	油	油+气	烃气	油	油+气	烃气	油	油+气	烃气	油	油+气		
0.1	0.10	0.10	0.20	142	130	271	0.11	0.19	0.30	151	254	405	1.20	1.33
0.2	0.27	0.39	0.66	361	533	894	0.38	0.80	1.17	508	1 077	1 585	1.38	1.95
0.3	0.43	0.69	1.12	581	937	1 518	0.64	1.41	2.05	864	1 901	2 765	1.45	2.31
0.4	0.59	0.99	1.59	801	1 340	2 141	0.90	2.02	2.92	1 221	2 725	3 945	1.49	2.54
0.5	0.76	1.29	2.05	1 021	1 743	2 764	1.17	2.63	3.80	1 577	3 548	5 125	1.51	2.70
0.6	0.92	1.59	2.51	1 240	2 147	3 387	1.43	3.24	4.67	1 934	4 372	6 305	1.53	2.83
0.7	1.08	1.89	2.97	1 460	2 550	4 011	1.70	3.85	5.54	2 290	5 196	7 486	1.54	2.92
0.8	1.24	2.19	3.43	1 680	2 954	4 634	1.96	4.46	6.42	2 646	6 019	8 666	1.55	2.99
0.9	1.41	2.49	3.89	1 900	3 357	5 257	2.22	5.07	7.29	3 003	6 843	9 846	1.56	3.05
1	1.57	2.79	4.36	2 120	3 761	5 880	2.49	5.68	8.17	3 359	7 667	11 026	1.57	3.10
1.2	1.90	3.38	5.28	2 559	4 568	7 127	3.02	6.90	9.92	4 072	9 314	13 386	1.58	3.18
1.4	2.22	3.98	6.20	2 999	5 374	8 373	3.54	8.12	11.66	4 785	10 961	15 746	1.58	3.24
1.6	2.55	4.58	7.13	3 438	6 181	9 619	4.07	9.34	13.41	5 498	12 608	18 106	1.59	3.29
1.8	2.87	5.18	8.05	3 878	6 988	10 866	4.60	10.56	15.16	6 211	14 256	20 467	1.59	3.32
2	3.20	5.77	8.97	4 317	7 795	12 112	5.13	11.78	16.91	6 924	15 903	22 827	1.59	3.35
2.5	4.01	7.27	11.28	5 416	9 812	15 228	6.45	14.83	21.28	8 706	20 021	28 727	1.60	3.41
3	4.83	8.76	13.59	6 515	11 830	18 344	7.77	17.88	25.65	10 488	24 140	34 628	1.60	3.44
3.5	5.64	10.26	15.90	7 614	13 847	21 461	9.09	20.93	30.02	12 270	28 258	40 528	1.61	3.47
4	6.45	11.75	18.20	8 712	15 864	24 577	10.41	23.98	34.39	4 052	32 376	46 429	1.61	3.49
4.5	7.27	13.25	20.51	9 811	17 881	27 693	11.73	27.03	38.76	15 834	36 495	52 329	1.61	3.51
5	8.08	14.74	22.82	10 910	19 899	30 809	13.05	30.08	43.13	17 616	40 613	58 229	1.61	3.52
6	9.71	17.73	27.44	13 108	23 933	37 041	15.69	36.18	51.87	21 181	48 850	70 030	1.61	3.54

158.5) × 10⁴标¹ 10⁴标² 排烃量可达 (894 ~ 1 585) × 10⁴标¹ 如排聚系数按 0.2 计算,在此范围内,如有一个圈闭,有可能形成 (178.8 ~ 317) × 10⁴标的聚集量。这样的油气藏应具有经济开采价值。这就是说残余有机碳为 0.1% (原始有机碳为 0.2%) 的碳酸盐岩有可成为有效的 (或能够形成油气藏的) 烃源岩。即碳酸盐烃源岩有机质丰度下限值可确定为残余有机碳 = 0.1% (原始有机碳 = 0.2%)。

如果认为有机碳 = 0.2% 生成的油气量还不够,那么有机碳为 0.5% (相当于残余有机碳 = 0.2%), 500 芥厚的烃源岩,其排烃强度可达 (276.4 ~ 512.5) × 10⁴标¹ 10⁴标² 排烃量可达 (2 764 ~ 5 125) × 10⁴标¹ 如排聚系数按 0.2 计算,有可能形成 (552.8 ~ 1 025) × 10⁴标的聚集量。这样的油气藏储量不算太小了,应当说有工业价值。也就是说残余有机碳为 0.2% (原始有机碳为 0.5%) 的碳酸盐岩从其油气生成量和油气聚集量来说,都应当说是有效的 (或能够形成油气藏的) 烃源岩。

1.4 富烃源岩有利于形成大型油气田

烃源岩有机碳达到了下限值只是说有可能形成油气藏,如上所述油气藏的形成受多种因素制约,有机质丰度只是因素之一。有机质丰度是物质基础,

是形成油气藏的前提,有机质丰度达到了标准,甚至很高,其他 5 种条件有一种不合要求,也不能形成油气藏。对于我国古老的碳酸盐岩来说,盖层和保存条件尤其重要。因时代古老,生烃期早,经历的构造运动多,需要很好的盖层和保存条件。如果保存条件不好,油气就很容易散失,烃源岩的有机质丰度很高,也不一定就能找到油气田。所以说没找到油气田,不全是有机质丰度低,可能还有其他原因。当然,没有一定有机质丰度作为物质基础,也是不可能形成油气田的。

烃源岩的有机碳下限值,一层意思是说,形成油气藏的其他条件同时具备时,有可能形成有工业价值的油气藏。另外一个意思是,形成油气藏的烃源岩是一个体系,有机质丰度必然有高有低,有机碳高的烃源岩能提供更多油气,而有机碳达到下限值的烃源岩也可以提供油气。

形成油气田的几率和大小首先取决于烃源岩的规模和有机质丰度,烃源岩的有机质丰度越高,形成油气藏的可能性就越大。低丰度的烃源岩只可能形成小的油气藏而不能形成大的油气田,要形成大的油气田必须有雄厚的物质基础,必须有大规模的富含有机质的优质烃源岩或富烃源岩。所以在油气勘

探实际工作中总是千方百计的去寻找有机质丰度高的或富烃源岩有利地区。

2 海相碳酸盐烃源岩的评价标准

2.1 碳酸盐烃源岩的划分标准

如前所述,国内外学者对烃源岩的评价各有划分标准^[1~12]。这次对烃源岩的划分标准,一是综合上述烃源岩排烃模拟实验结果,二是参考国内外分类标准,并与国内外按生烃潜力划分烃源岩类别接轨,提出了碳酸盐烃源岩的划分标准(表 3)。本标准将烃源岩划分为 4 类,即很好烃源岩、好烃源岩、中等烃源岩、差烃源岩。

为消除成熟度对评价标准的影响,又分为未熟—成熟烃源岩,高成熟—过成熟烃源岩两种评价标准。通过对碳酸盐岩有机质丰度、有机质类型、沉积相、有机相的研究,说明碳酸盐岩有机质并非都是Ⅰ类和Ⅱ₁类,在无障壁的浅水陆表海沉积环境下形成的碳酸盐岩具有Ⅱ₂类有机质的较多,所以修正了过去碳酸盐岩只按Ⅰ类有机质的评价方法,而将碳酸盐岩按Ⅰ,Ⅱ₁,Ⅱ₂类有机质分别进行评价。

碳酸盐岩和泥岩的评价标准应按生烃潜力相等(或相近)统一标准来划分。但碳酸盐岩有机碳的下限值应比泥页岩低一些,这主要是基于碳酸盐烃源岩的以下特点(优点):**a)**碳酸盐岩的有机质类型多属于偏腐泥型;**b)**碳酸盐岩对干酪根的催化生烃效率比泥岩高;**c)**碳酸盐岩对有机质的吸附能力比泥岩低,排烃效率比泥岩高;**d)**碳酸盐岩沉积体系趋向于形成生—储—盖三位一体的联合系统,油气运移距离近;**e)**碳酸盐岩常常伴有石膏等好的盖层;**f)**我国碳酸盐岩多处于高成熟—过成熟阶段,多以生气为主,所以这里也包括气源岩。

3.2 碳酸盐烃源岩评价标准的讨论

过去人们对碳酸盐岩有机碳下限值各执己见,其中有一个原因就是大家所指的对象不同,有的把碳酸盐岩全看作一类有机质,而且指的是残余有机质,其中还包括气源岩,并认为碳酸盐岩有机碳下限值应比泥岩低,所以有机碳下限值也就定得比较低。有的未区分碳酸盐岩的成熟度,认为碳酸盐岩有机碳下限值应当和泥岩一样,所以有机碳下限值也就定得高一些。现在的评价标准即考虑了有机质类型,又考虑了有机质成熟度,所以碳酸盐岩的有机碳下限值就不是一个,而是几个,其中有高的,也有低的。以后再讨论就有了一个共同的基础。由表 3 可以看出,对于具有Ⅰ类有机质,处于高成熟—过成熟的碳酸盐岩来说,其有机碳下限值为 0.1%,这和国内大多数人的评价标准基本一致。如果是未成熟—成熟的碳酸盐岩,有机质是Ⅰ类的,其有机碳下限值为 0.2%;如果有机质是Ⅱ₁类的,其有机碳下限值为 0.3%;如果有机质是Ⅱ₂类的,其有机碳下限值为 0.4%。这和评价标准定得高的学者所定的数值也比较接近。这里也必须指出,不分有机质类型和成熟度,不管是生油岩还是气源岩,而且不考虑碳酸盐岩的吸附性比较小,笼统的把碳酸盐岩的有机碳下限值定为 0.5%,应当说并不完全合适。因为我国碳酸盐岩有机碳大于 0.5%的很少。在油气勘探初期是很难一下就找到有机碳>0.5%的烃源层。塔里木盆地很长一段时间在中—上奥陶统未发现有机碳>0.5%烃源层,近几年由于钻井数量越来越多,研究工作越来越深入,才在中—上奥陶统找到了有机碳>0.5%的好烃源层。如果把有机碳下限值定的过高,有机碳<0.5%的认为是非烃源岩,当勘探早期未找到有机碳>0.5%的烃源岩时,就有可能过早地否定或漏掉了某些烃源层,从而对该区块的

表 3 碳酸盐岩烃源岩的划分标准

演化阶段	有机质类型	指标	烃源岩类别				
			很好烃源岩	好烃源岩	中等烃源岩	差烃源岩	非烃源岩
未成熟 ↓ 成熟	Ⅰ	有机碳/%	>1.4	0.7~1.4	0.4~0.7	0.2~0.4	<0.2
		蜡+沥青/(g/g _岩) ⁻¹	>10	5~10	2~5	1~2	<1
	Ⅱ ₁	有机碳/%	>1.8	1~1.8	0.5~1	0.3~0.5	<0.3
		蜡+沥青/(g/g _岩) ⁻¹	>10	5~10	2~5	1~2	<1
高成熟 ↓ 过成熟	Ⅱ ₂	有机碳/%	>2.8	1.4~2.8	0.7~1.4	0.4~0.7	<0.4
		蜡+沥青/(g/g _岩) ⁻¹	>10	5~10	2~5	1~2	<1
	Ⅱ ₁	有机碳/%	0.9	0.5~0.9	0.25~0.5	0.15~0.25	<0.15
		有机碳/%	1.6	0.8~1.6	0.4~0.8	0.25~0.4	<0.25

