

勘探早—中期的沉积盆地有效烃源岩 综合预测方法探讨

——以北黄海某盆地为例

冯常茂, 白志琳, 涂广红, 王后金, 胡小强, 杜民

(广州海洋地质调查局)

摘要 针对勘探程度较低的地区,提出了一套有效烃源岩的综合预测方法。其基本思路是,从钻井出发,井震结合,按由点到面、由剖面到平面的顺序分五步进行:确定有利沉积相带;确定烃源岩平面分布;划分区域沉积相分布;确定平面热演化分布;有效烃源岩分布预测。利用该方法,对北黄海某盆地侏罗系 SQ_1 层序进行了有效烃源岩预测。

关键词 有效烃源岩; 烃源岩预测; 预测方法; 油气勘探; 侏罗系; 北黄海

中图分类号: TE112.115

文献标识码: A

有效烃源岩是指既有油气生成又有油气排出的岩石,而且排出的烃类应足以形成商业性油气藏^[1],否则这一概念将难以在生产实践中应用。例如在塔里木盆地满加尔坳陷的勘探中,利用有效烃源岩的概念分析油源条件,认为该坳陷的有效烃源岩是有机质丰度很高、分布在斜坡带、厚度只有几十米的暗色页岩,然后围绕着这套有效烃源岩找到了新的油气藏^[2]。由此可见,有效烃源岩的评价标准必须与勘探实践相结合。在油气地质演化过程中,有效烃源岩的分布直接控制着油气的成藏,因而它在实际勘探中具有举足轻重的意义。关于有效烃源岩分布的研究方法很多^[3-9],但大多针对的是勘探程度较高的地区,对处于勘探早—中期的区域而言,研究方法相对较少。本文旨在探讨一种尚处在油气勘探早—中期的盆地有效烃源岩综合预测方法,以填补此类缺陷。

1 有效烃源岩指标及其下限值分析

1.1 有机质丰度

有效烃源岩的识别,往往依据井点的地球化学参数,一般从有机质丰度、有机质类型和有机质成熟度三个方面进行评价,并且长期以来一直以有机质

丰度下限作为评价标准。有机碳含量(TOC)、氯仿沥青“A”、总烃含量,这是有机质丰度的三项基本指标,而其中的有机碳含量则又是控制后两者的最基本指标^[2],因而大多数研究者都以有机碳含量作为有效烃源岩的评价指标。有机碳是形成油气的必要基础,有机碳下限值是有效烃源岩的评价标准,这是因为现代运移学说认为生油岩中形成的烃类必须在满足了母岩本身吸附容量以后才能被排驱出去^[10]。

有效烃源岩评价中的焦点是采用什么样的有机质丰度下限,它关系到什么样的岩石是有效烃源岩,以及有效烃源岩的厚度、分布面积和体积有多大等。在理论上,不同盆地、不同沉积环境、不同有机质类型以及不同成熟度的源岩应具有不同的有机质丰度下限,但在实际工作中,为操作方便,常采用统一的下限值^[11]。

为了保证足够的生烃量和充分的排驱效率,有效烃源岩必须具备相应的有机质丰度,同时它还涉及到烃源岩的类型、成熟度和相关的物理、化学条件。对于有机碳含量的下限值,在国外, Jones^[12]认为是 2.5%,主要依据是世界上大多数重要油藏都产自总有机碳 $TOC \geq 2.5\%$ (重量)的母岩。而 Momper^[13]、McAuliffe^[14]、Barker^[15]等学者大多倾向于 $TOC \geq 1.0\%$ 这个有机碳下限值,他们指出含 0.5%~1.0%有机碳的

收稿日期: 2012-11-13; 改回日期: 2013-03-13

冯常茂: 1979年生,工程师,博士。2002年本科毕业于江汉石油学院,2008年博士毕业于中国地质大学(武汉),现从事海洋油气勘探。
通讯地址: 510760 广州市黄埔区广海路 188 号大院矿产所; 电话: (020)82250313

潜在母岩,虽然也可生成一定数量的烃类,但这样的母岩往往不能形成有效的“自我排驱机制”,潜在母岩中实际上只有其中一小部分才能被排驱出来。

就国内而言,在泥岩作为烃源岩的问题上,其评价标准目前在石油行业较为统一的是以有机碳含量 0.4% 作为生油岩与非生油岩的界线,而对于有效烃源岩的评价标准仍存在较大分歧,从 0.4%、0.5%、0.7% 到 1.0%,甚至更大,各家说法不一^[11,16-19]。根据饶丹等^[11]对我国东部辽河断陷、黄骅拗陷、冀中拗陷、济阳拗陷、东濮凹陷、泌阳凹陷及南阳凹陷等富生烃凹陷的统计结果,各凹陷下第三系 90% 以上的已知有效烃源岩有机碳含量平均值都大于 1.0%。

总之,国内外大量油气勘探实践证实,由于受盆地类型、沉积环境、有机质类型、热成熟度、运聚过程、保存条件等因素差异的影响,不同盆地(凹陷)有效烃源岩的有机质丰度、成熟度、厚度、展布面积等并不相同,但对于有机碳含量,大量统计数字表明,都存在一个共同的下限值,泥岩 $\text{TOC} \geq 1.0\%$,泥灰岩 $\text{TOC} \geq 0.5\%$ 。

笔者认为,对处于勘探早—中期的区域,有机质丰度下限值还需要按钻探井的实际情况来确定。如果定得过高,势必会影响该区的后期勘探,而如果定得过低,则起不到预测有效烃源岩的效果,具体问题

应该具体分析。但无论如何,对泥质烃源岩而言,其 TOC 必须要大于 0.5% 才有可能成为潜在的烃源岩。但在有效烃源岩的下限指标上,大量的国内统计结果均表明, $\text{TOC} \geq 1.0\%$ 应该是一个比较合适的标准。

1.2 有机质成熟度

评价有效烃源岩的另一个关键因素是有机质成熟度指标 R_o , 否则,未成熟的烃源岩也会被划入有效烃源岩之中,从而影响对一个地区有效烃源岩的客观评价。通常, $R_o < 0.5\%$ 时,为成岩作用阶段,生油岩未成熟; $0.5\% \leq R_o \leq 1.3\%$ 时,为生油窗; $1.3\% < R_o \leq 2.0\%$ 时,为凝析油和湿气带; $R_o > 2.0\%$ 则为干气带。因此,只有 $R_o \geq 0.5\%$, 烃源岩才开始产生烃类,才有可能成为有效烃源岩。

2 有效烃源岩综合预测的方法和流程

在有效烃源岩预测过程中,应该主要从钻井资料出发,由已知推求未知,采用钻井、地震结合的方法,遵循由点到面、由剖面到平面的原则,对目的层段有效烃源岩进行综合预测。本文提出的预测流程如图 1 所示,主要可以分为以下五个步骤,分别对应图 1 中的五个虚线框。

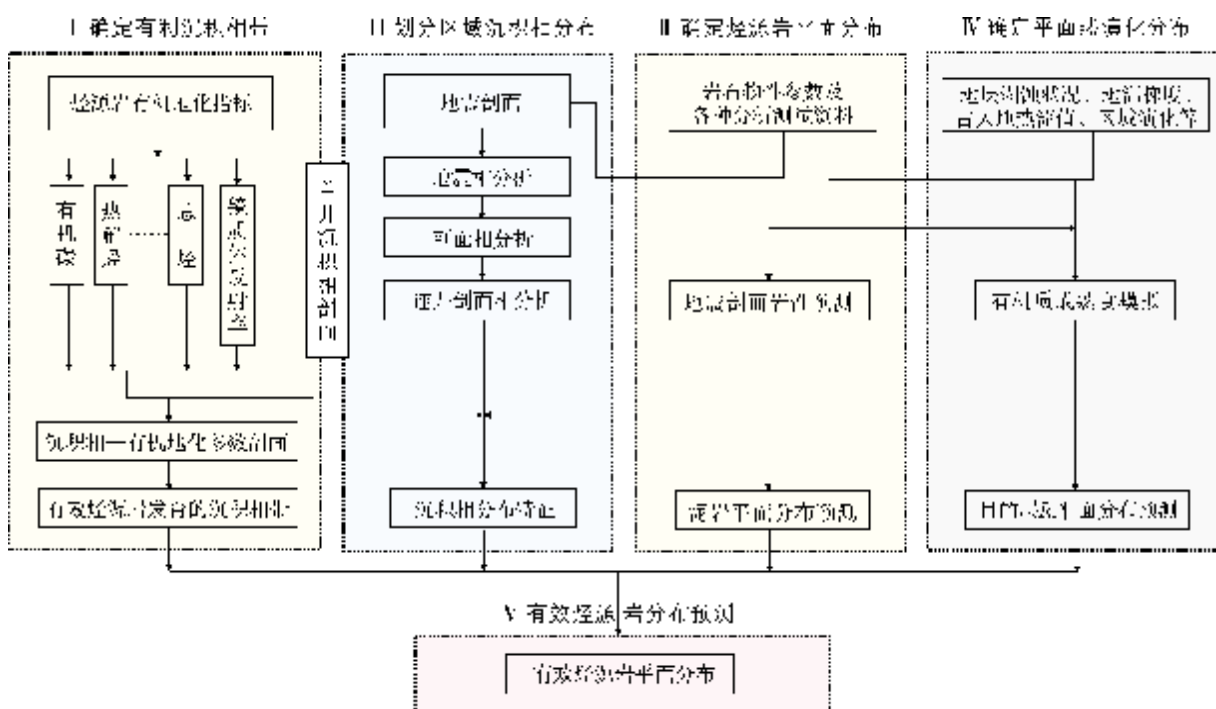


图 1 勘探早—中期有效烃源岩综合预测流程示意图

I, …… , V 等为各虚线框的编号,并分别表示流程的第一步、……第五步

第一步 确定有利沉积相带(框Ⅰ) 充分利用钻井岩心、岩屑的各种有机地化指标(主要是有机碳含量)和测井资料等,进行沉积相—地化指标综合分析,总结有效烃源岩发育的有利沉积相带,并利用过井地震剖面建立烃源岩的地震识别模式。如果地震资料较好,可以直接利用地震资料对目的层有效烃源岩进行追踪,否则,只能根据有效烃源岩发育的有利沉积相带对其可能的分布范围进行圈定。

第二步 确定烃源岩平面分布(框Ⅱ) 选择过井地震剖面,利用钻井的各种岩性参数和分析测试资料进行岩性反演,提取相关地震属性,通过与钻井所揭示的岩性对比,找出最能反应岩性的地震属性,利用其与地层泥地比的对应关系计算泥地比的平面分布状况,并通过泥地比以及地层厚度的分布状况,预测泥岩(烃源岩)的平面分布。

第三步 划分区域沉积相分布(框Ⅲ) 利用研究区的地震资料进行地震相分析,并结合在第一步骤中产生的单井沉积相剖面和在第二步骤中产生的地震剖面岩性预测成果,综合研究区域上的沉积相分布。

第四步 确定平面热演化分布(框Ⅳ) 综合区域背景资料如地层剥蚀状况、古地热场、区域演化,以及研究区的地震资料、钻井资料等,对目的层段烃源岩进行热演化模拟,最终得到目的层段的 R_o 平面分布图。

第五步 有效烃源岩分布预测(框Ⅴ) 综合前面四个步骤所得到的成果,包括有效烃源岩发育的有利沉积相带、泥岩平面分布预测图、沉积相带分布图以及目的层 R_o 平面分布预测图,进行有效烃源岩分布预测。只有位于有效烃源岩发育的有利沉积相带内,且热演化达到成熟阶段的区域,才能最终确定为有效烃源岩分布区。

3 应用实例

本文以北黄海某盆地作为实例,研究所涉及的井位及测线如图2所示。在研究区已有二维地震测线覆盖,测网密度达到 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$,但已有的地震资料对中生界(主要是白垩系和侏罗系)的反射效果不太理想(图3),难以直接进行烃源岩预测,因而只能利用沉积相与有效烃源岩发育层段的对应关系进行综合研究。已有的勘探成果表明,侏罗系为研究区的主要烃源层,自下而上依次可以分为 SQ_1 — SQ_4 四套三

级层序, SQ_1 层序是该区主要烃源层之一。

在下面的预测过程中,为表述方便,笔者将前述五个步骤合并为三个部分来进行。

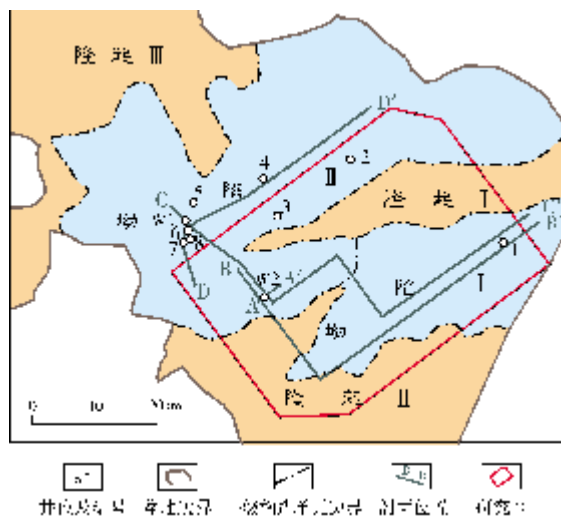


图2 北黄海某盆地构造特征示意图

3.1 沉积相带的确定

这包括两个方面的内容,一是有利于有效烃源岩发育的沉积相带的确定,二是研究区 SQ_1 层序的沉积分布确定,分别对应于前述预测流程图中的第一步和第三步。

根据流程步骤一,首先来确定有效烃源岩所对应的沉积相带。选择盆地内与研究区相邻的W1井(该井在全区所钻遇地层最全)进行沉积相—有机地化指标综合分析。考虑到统计沉积相带有机质丰度指标特征时,大测试样本可能更适合统计规律,所以,本文在研究中将W1井侏罗系烃源岩所测试的全部数据(共1031个)都进行了统计分析,而不仅仅是对于 SQ_1 层的样品进行统计。

W1井侏罗系主要发育半深湖—深湖相、滨浅湖相、三角洲相以及扇三角洲相等四种相类沉积(图4)^[20]。有机质丰度指标统计结果表明,该井不同相带的TOC具有一定差异(图5)。三角洲相共有测试数据202个,其TOC变化范围0.07%~3.6%,平均值0.96%;滨浅湖相共有测试数据645个,TOC变化范围0.1%~5.0%,平均值1.41%;半深湖—深湖相共有测试数据184个,TOC变化范围0.2%~4.4%,平均值1.42%。因此,按有效烃源岩丰度指标 $TOC \geq 1.0\%$ 来衡量,研究区的有效烃源岩主要发育在滨浅湖相、

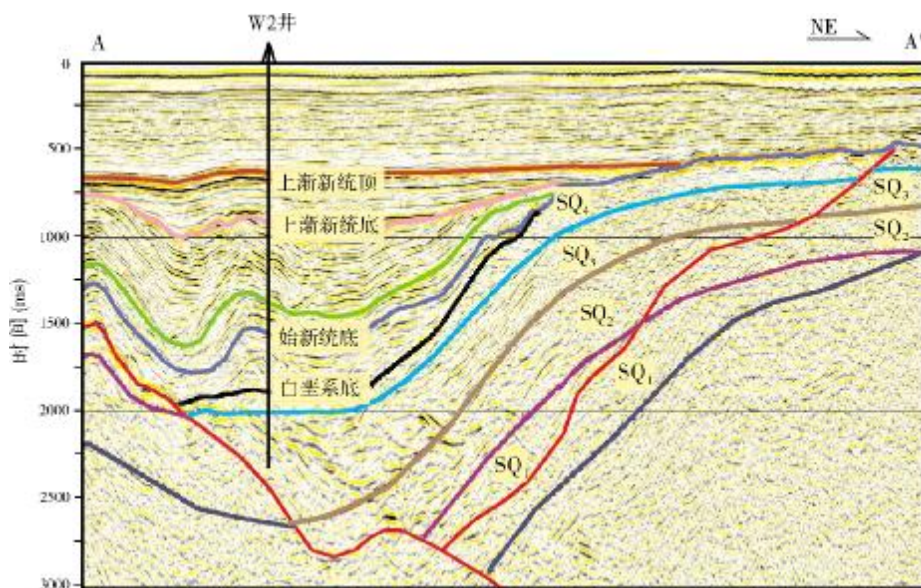


图3 北黄海某盆地过W2井的地震剖面

A—A'剖面位置见图2

该剖面对中生界,包括白垩系和侏罗系的反射特征比较模糊,无法直接进行有效烃源岩分析

半深湖—深湖相,而在三角洲相发育的烃源岩未能达到有效烃源岩标准。

下面研究沉积相的区域分布。

通过对研究区4口井(图2中1、2、3及W2井)及邻区1口井(W1井)的单井相分析,选择研究区及邻区的6口钻井(1、4、6、7、W1、W2井)做联井剖面(各联井剖面线位置如图2中的B—B'、C—C'、D—D')波阻抗反演等综合分析。

根据由线到面的原则,对上述各联井剖面的分析成果进行综合,结果表明,研究区SQ₁层序的沉积体系如图6所示,主要发育扇三角洲、辫状河三角洲、滨浅湖及半深湖—深湖相沉积。研究区大部分为半深湖—深湖相,三角洲主要分布在盆地的西南部及东北部。其中西南部由于受控盆断裂的影响,地形较陡,主要发育扇三角洲沉积,W2井钻遇了该扇三角洲的前缘,岩性以中细砂岩与暗色泥岩互层为主;东北部发育来自盆地东北侧隆起方向物源的辫状河三角洲沉积。

根据图5及其分析结果,研究区有效烃源岩发育的有利沉积相带为深湖—半深湖和滨浅湖两种相带,从图6上看,它们的分布范围相当广阔,覆盖了自西北到东南贯穿全盆地的广大区域,仅在盆地东北部和西南角的局部区域为不利于发育有效烃源岩的三角洲相带。

3.2 有效烃源岩厚度及成熟度平面分布特征

这部分对应于前述的步骤二和步骤四。

根据地震属性的原理,提取了均方根振幅、均方根频率、均方根层速度、均方根反射强度等属性,经与钻探结果及地层厚度模型对比,其中的均方根频率与均方根层速度这两种属性与岩性的相关性较高。通过统计1井、W1井的泥地比与均方根瞬时频率的关系,拟合了泥地比与瞬时频率的关系图(图7),并计算出SQ₁层序的泥质烃源岩厚度平面分布图(图8)。泥岩最厚的地方分布在中部位置,达500~800m,近东西向带状分布,东端最厚可达800m以上;北部较薄,甚至缺失,大部分地区厚度小于200m;南部的泥岩厚度范围为200~500m。

热演化模拟结果表明,SQ₁层序 $R_o \geq 0.5\%$ 的区域在平面上呈近E—W向和NE—SW向分布,研究区西部成熟度较高,最高可达1.8%(图9)。

3.3 有效烃源岩分布预测

这是本研究的最终步骤,对应于流程第五步,上面的所有工作都是为这一步打基础的。

结合研究区沉积相带分布(图6)、泥岩厚度分布(图8)以及 R_o 平面分布(图9),对研究区侏罗系SQ₁层

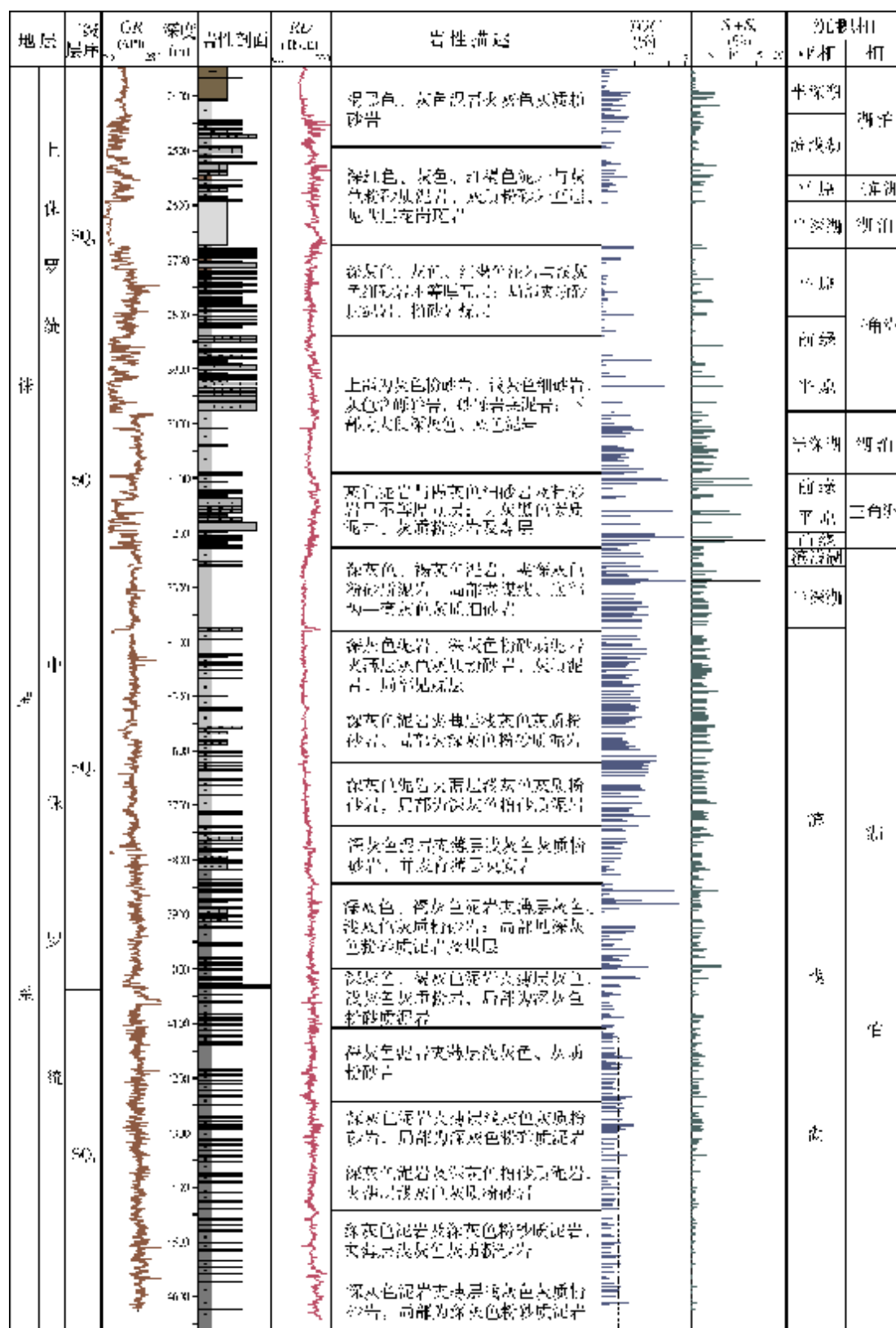


图4 北黄海某盆地W1井侏罗系地层综合柱状图

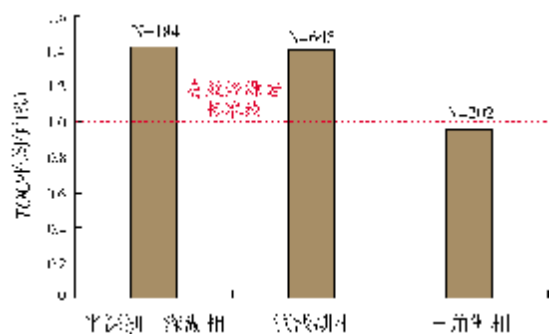


图5 研究区侏罗系不同相带烃源岩的TOC平均值直方图

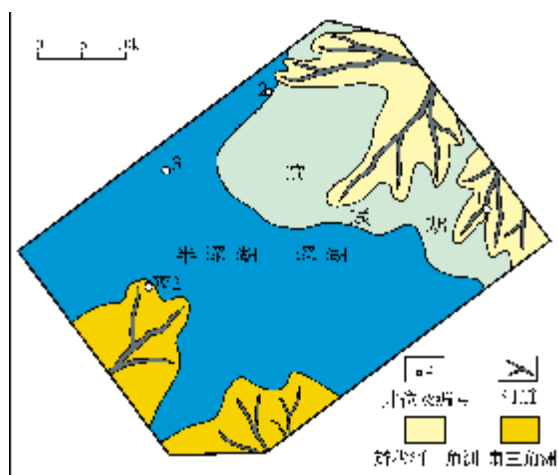
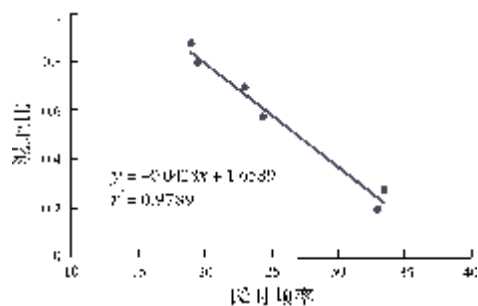
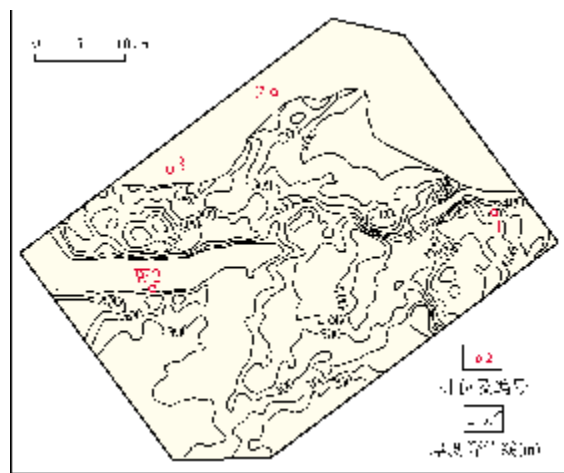
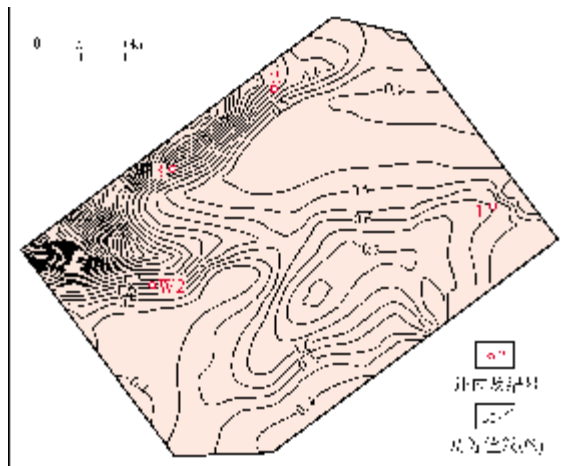
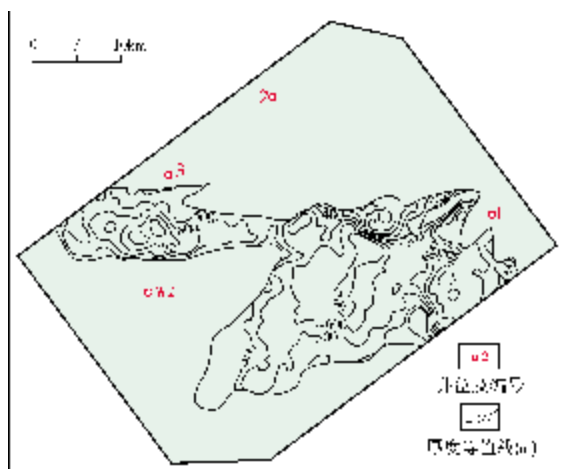
图6 研究区侏罗系SQ₁层序沉积相图

图7 研究区中生界均方根瞬时频率与泥岩百分比关系图

序的有效烃源岩进行了综合预测(图 10),结果表明, SQ₁ 层序的有效烃源岩主要分布于研究区近东西走向的中部带,最大厚度可达 800m 以上。从平面形态上看,可以分东、西两部分:西部的分布范围较窄,厚度变化也相对较小,为 400~800m;东部的分布范围较宽,并向南侧有所扩展,东部的厚度变化也较大,为 100~800m。

图8 研究区侏罗系SQ₁层序泥岩厚度分布预测图图9 研究区侏罗系SQ₁层序R₀平面分布图图10 研究区侏罗系SQ₁层序有效烃源岩分布预测图

4 结束语

有效烃源岩综合预测是一项多学科的系统研究,它必须结合各地区的实际地质情况,通过分析实验等方法来完成。对处于勘探早—中期的区域,通过有限的钻井获取各种烃源岩指标,有针对性地进行指标统计,找出有效烃源岩所对应的各种特点——如实测地化指标及相应层位的地震属性等,并结合沉积相、有机质成熟度等指标,最终预测出有效烃源岩的分布,这对进一步的(后期)勘探具有极为重要的参考意义。

致谢:研究中得到中国海洋石油研究中心杨甲明教授的帮助和支持,在此表示衷心的感谢!

参考文献

- [1] Hunt J M. Petroleum Geochemistry and Geology[M]. San Francisco: Freeman & Company, 1979.
- [2] 金强. 有效烃源岩的重要性及其研究[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(1):1-4.
- [3] 朱光有, 金强, 王锐. 有效烃源岩的识别方法[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2003, 27(2):6-10.
- [4] 金强, 查明, 赵雷. 柴达木盆地西部第三系盐湖相有效生油岩的识别[J]. 沉积学报, 2001, 19(1):125-129.
- [5] 周杰, 李娜. 有关烃源岩定量评价的几点意见[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2004, 19(1):15-18.
- [6] 张艳, 王璞, 陈文礼, 等. 有效烃源岩的识别与应用——以塔里木盆地为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6):9-12.
- [7] 刘若冰, 田景春, 魏志宏, 等. 川东南地区震旦系—志留系下组合有效烃源岩综合研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(2):824-828.
- [8] 辛也, 王伟峰. 东营凹陷民丰洼陷烃源岩评价[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(4):473-475.
- [9] 王永诗, 金强, 朱光有, 等. 济阳坳陷沙河街组有效烃源岩特征与评价[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3):53-55.
- [10] 王启军, 陈建渝. 油气地球化学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1988.
- [11] 饶丹, 章平澜, 邱蕴玉. 有效烃源岩下限指标初探[J]. 石油实验地质, 2003, 25(增刊), 578-581.
- [12] Jones R W. 运移机理上的某些质量平衡和地质条件[G]//琼斯, 等. 控制石油运移的物理及化学因素. 北京:石油工业出版社, 1984:1-22.
- [13] Momper J A. 根据地质和地球化学研究提出的石油运移的控制因素[G]//琼斯, 等. 控制石油运移的物理及化学因素. 北京:石油工业出版社, 1984:23-58.
- [14] McAuliffe C D. 控制石油运移的化学和物理因素:着重烃在水中的溶解度[G]//琼斯, 等. 控制石油运移的物理及化学因素. 北京:石油工业出版社, 1984:59-81.
- [15] Barker C. 初次运移:母岩中水-矿物-有机物相互作用的重要性[G]//琼斯, 等. 控制石油运移的物理及化学因素. 北京:石油工业出版社, 1984:82-94.
- [16] 梁狄刚. 塔里木盆地油气勘探若干地质问题[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3):184-188.
- [17] 夏新宇, 戴金星. 碳酸盐岩生烃指标及生烃量评价的新认识[J]. 石油学报, 2000, 21(4):36-41.
- [18] 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地学前缘, 2000, 7(4):534-547.
- [19] 张水昌, 梁狄刚, 张大江. 关于古生界烃源岩有机质丰度的评价标准[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2):8-12.
- [20] 王立飞, 王衍棠, 胡小强. 北黄海盆地西部坳陷地层与沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(3): 97-104.

编辑:吴厚松

Discussion on the Integrated Method of Predicting Distribution of Effective Source Rocks in Sedimentary Basin during Low to Middle Degree of Exploration: A Case of Jurassic Source Rock in a Basin, North Yellow Sea

Feng Changmao, Bai Zhilin, Tu Guanghong, Wang Houjin, Hu Xiaoqiang, Du Min

Abstract: An integrated method of predicting the distribution of effective source rocks is proposed for the sedimentary basin with low- to middle-degree exploration. The basic idea is that combining well data with seismic data, the method includes five procedures from site to area and from profile to plane as follows: a) ascertaining the favorable sedimentary facies zone; b) ascertaining the distribution of source rock in plane; c) zoning the distribution of the sedimentary facies in region; d) ascertaining the distribution of thermal evolution in plane; and e) predicting the distribution of efficient source rocks. This method is successfully applied to predict the distribution of efficient source rocks in the Jurassic SQ₁ sequence in a basin, North Yellow Sea, which is still during low- to middle-degree of exploration.

Key words: Effective source rock; Prediction method; Jurassic; North Yellow Sea

Feng Changmao; male, Dr., Geology Engineer. Add: Guangzhou Marine Geological Survey, 188 Guanghai Rd., Guangzhou, 510760, China