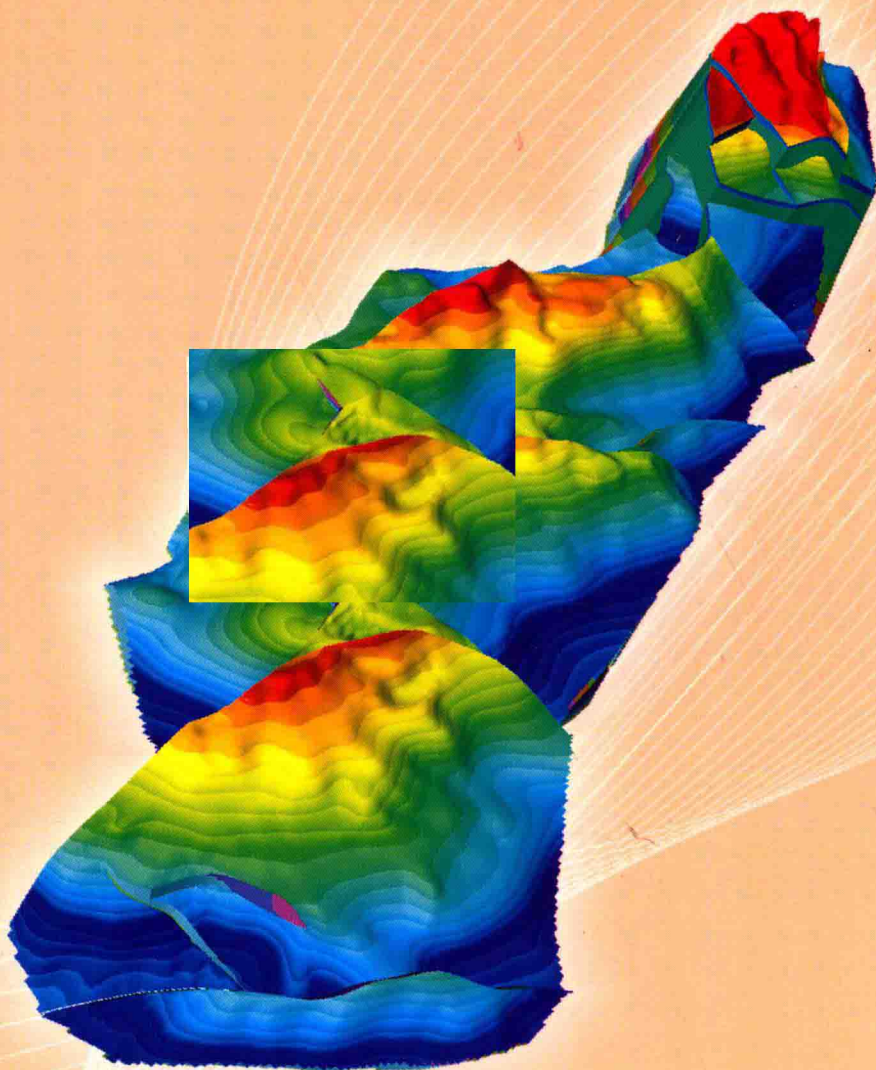




古潜山

勘探开发文集（2014年第二辑）

中国石油华北油田分公司 编



石油工业出版社

古潜山勘探开发文集

(2014 年第二辑)

中国石油华北油田分公司 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以勘探开发、工艺与技术为主题,重点介绍古潜山的勘探、开发。本书内容涵盖了复杂断块油气藏、岩性油气藏和隐蔽油气藏的勘探与开发,地热的勘探与开发,煤层气的勘探与开发等。另外,也对提高开发效果的工艺技术等进行了介绍。

本书可供科研及生产单位的专业技术人员、新能源研究人员、在校石油地质和油藏工程学生及勘探开发领域的相关人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

古潜山勘探开发文集(2014 年第二辑)

/中国石油华北油田分公司编. /-北京:石油工业出版社,2014.

ISBN 987-7-5183-0333-5

I. 古…

II. 中…

III. ①油气勘探—文集

②油田开发—文集

IV. ①P618.130.8-53②TE34-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 181868 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网址:www. petropub. com. cn

编辑部:(010)64523586

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:华北石油管理局华美综合服务处

2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:5.5

字数:141 千字

定价:30.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻版必究

《古潜山勘探开发文集》(2014 年第二辑)

编 委 会

主 编:卢学军

副主编:李晓泉

编 委:要春生 李 悦 王建国 李纪红 曹会卿

目次

古潜山

油气田勘探

- 华北油田勘探方向的思考 费宝生 高晓成 曾利军 毛 瑜(1)
- 霸县凹陷深层烃源岩地球化学特征及油气成因分析
..... 王 静 张世超 孙志华 孙菲菲 谢莲英 程艳敏(6)
- 怀仁凹陷地层划分与对比研究
..... 张金岩 张 闽 王 鑫 梁小娟 万 珊 张晓芳(12)
- 深县凹陷何庄—深西潜山带成藏条件与勘探潜力研究
..... 吴清雅 王永春 鱼占文 李 奔 焦亚先(17)
- 廊固凹陷固安背斜浅层天然气成因类型探讨
..... 朱张丽 王元杰 古 强 时 聪 崔庆庆(21)
- 二连盆地阿南凹陷致密油成藏条件与勘探潜力分析
..... 赵 爽 杜 岚 李宝帅 高正原(28)
- 鲕粒及鲕粒灰岩成因探讨 付 茜(33)
- 留楚地区油气成藏主控因素与勘探方向
..... 李熹微 刘井旺 边滢滢 王文英 李桂芝 王 涛(41)

油气田开发

- 樊庄区块固县井区煤层气产能影响因素分析
..... 魏 强 张永平 孙以健 刘 华 崔丽华(45)
- 某地区低孔渗砂岩地层裂缝特征及测井识别方法
..... 赵国瑞 李 辉 毛 瑜 殷 洁 何 涛(49)
- 确定储气库单井合理产能的一种新方法
..... 赵明千 张 辉 吴少爽 张 涵(54)
- 淀30断块高阻油层精细解释与评价
..... 任书莲 周明顺 赵国瑞 刘 萍(57)
- 大排量提液在雁翎潜山地热开发中的增油效果
..... 王家立 豆惠萍 王 虹 王 艺 林铁林(61)

工艺与技术

- 一种人工举升优化设计的新方法——遗传算法
..... 李 磊 蒋宏伟 姜立民 张 越 刘凯都 尹浚羽(66)
- 沁水盆地煤层气地面集输工艺分析与发展
..... 孟凡华 马文峰 陈巨标 杨 威 孟 浩 韩 东 朱 伟(71)

主办单位:中国石油华北油田分公司

承办单位:华北油田公司勘探开发

研究院

出版单位:石油工业出版社有限公司

图书在版编目(CIP)数据

古潜山勘探开发文集·2014年·
第二辑/中国石油天然气股份有限公司
华北油田分公司主编.—北京:石油
工业出版社,2014.9

ISBN 978-7-5183-0333-5

I.古…
II.中…
III.①油气勘探—文集
②油田开发—文集
IV.①P618.130.8-53②TE34-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字
(2014)第 181868 号

封面图片 张淑娟

英文翻译 戴猛强

邮 编 062552

电 话

(国网)(86317)2758968 2727948

(油网)(948)2758968 2727948

E-mail yjy_zhaoyh

@petrochina.com.cn

TABLE OF CONTENTS

Field Exploration

Reflection on the Exploration Targets of Huabei Oilfield

..... *Fei Baosheng, Gao Xiaocheng, Zeng Lijun, Mao Yu*(1)

Analysis of Source Rock Geochemical Features and Hydrocarbon Genesis in Baxian Sag

..... *Wang Jing, Zhang Shichao, Sun Zhihua, Sun Feifei, Xie Lianying, Cheng Yanmin*(6)

Stratigraphic Classification and Correlation of Huairan Sag

..... *Zhang Jinyan, Zhang Min, Wang Xin, Liang Xiaojuan, Wan Shan, Zhang Xiaofang*(12)

Study on Hydrocarbon Accumulation Conditions and Exploratory Potential for Hezhuang–Shenxi
Buried Hill Zone in Shenxian Sag

..... *Wu Qingya, Wang Yongchun, Yu Zhanwen, Li Ben, Jiao Yaxian*(17)

Study on Gas Genesis in Shallow Strata of Gu'an Anticline, Langgu Sag

..... *Zhu Zhangli, Wang Yuanjie, Gu Qiang, Shi Cong, Cui Qingqing*(21)

Analysis of Tight Oil Accumulation Conditions and Exploratory Potential of A'nan Sag in Erlan

Basin *Zhao Shuang, Du Lan, Li Baoshuai, Gao Zhengyuan*(28)

Discussion on the Genesis of Ooid and Ooidal Limestone..... *Fu Qian*(33)

Dominant Control Factors for Hydrocarbon Accumulation and Exploration Objectives in Liuchu

Area *Li Xiwei, Liu Jingwang, Bian Yingying, Wang Wenying, Li Guizhi, Wang Tao*(41)

Field Development

Analysis of Influential Factors for CBM Well Productivity in Guxian County, Fanzhuang Area

..... *Wei Qiang, Zhang Yongping, Sun Yijian, Liu Hua, Cui Lihua*(45)

Study on Fracture Characteristics and Their Identification for Low-Porosity, Low-Permeability

Sandstone Strata in a Certain Zone *Zhao Guorui, Li Hui, Mao Yu, Yin Jie, He Tao*(49)

A New Method to Determine Reasonable Productivity for Individual Well of Underground Gas

Storage *Zhao Mingqian, Zhang Hui, Wu Shaoshuang, Zhang Han*(54)

Accurate Interpretation and Evaluation of High Resistivity Oil and Water Beds in Fault Block

Dian 30 *Ren Shulian, Zhou Mingshun, Zhao Guorui, Liu Ping*(57)

Effect of Large Volume Fluid Extraction on Oil Production Increment in Geothermal Development

of Yanling Buried Hills..... *Wang Jiali, Dou Huiping, Wang Hong, Wang Yi, Lin Tielin*(61)

Technology

Genetic Algorithm—a New Method of Optimized Artificial Lift Design

..... *Li Lei, Jiang Hongwei, Jiang Limin, Zhang Yue, Liu Kaidu, Yin Junyu*(66)

Analysis of Qinshui Basin Surface CBM Gathering–Transportation Technology

..... *Meng Fanhua, Ma Wenfeng, Chen Jubiao, Yang Wei, Meng Hao, Han Dong, Zhu Wei*(71)

华北油田勘探方向的思考

费宝生¹ 高晓成² 曾利军² 毛 瑜¹

(1. 中国石油华北油田公司华美综合服务处 河北任丘 062552;

2. 中国石油华北油田公司勘探开发研究院 河北任丘 062552)

摘要:通过总结分析华北油田“十一五”以来,在二连盆地阿尔凹陷、冀中拗陷饶阳凹陷等储量规模油田(油藏)的勘探成果,证实了生油洼槽控制油气分布等客观规律,并提出一些新的认识:单断槽式凹陷和两条控凹边界断层交会处的断层下降盘有利于油气藏的形成;坡折带和沉积相带控砂是形成多种类型地层、岩性和复合型油气藏的主导因素;油气资源丰度和运移通道影响油气藏形成等。进而明确华北油田今后的勘探方向:精细老区生油洼槽勘探;强化煤层气勘探;“三新”突破求发展。

关键词:华北油田;勘探成果;勘探方向;远景评价

0 引言

“十一五”以来,随着华北探区勘探程度的不断提高,勘探难度越来越大。依靠科技进步,及时调整战略和部署,加大地震勘探的力度,进行精细勘探,取得了可喜的成果。

1 “十一五”以来勘探主要成果

1.1 隐蔽型潜山勘探领域形成了亿吨级储量规模

深化隐蔽型潜山成藏机理研究,采用配套技术,在冀中拗陷和二连盆地发现了长3、宁古8、牛东1、文古3、虎16x、晋古19、赛51等7个高产潜山及潜山内幕油藏,形成了亿吨级储量规模。

1.2 精细勘探,形成多个规模储量接替区

(1)蠡县斜坡带。

该区带面积为2000 km²,是冀中拗陷最大的斜坡带。蠡县斜坡带总体趋势呈西南抬、东北倾,北东走向。地层产状平缓、构造简单,斜坡上主要发育4个北西向大型宽缓鼻状构造,自南向北分别为大百尺鼻状构造、高阳鼻状构造、西柳10鼻状构造、雁翎东鼻状构造。上述北西向鼻状构造被北东向断层切割,在反向断层上升盘的构造高部位形成断鼻、断块圈闭,这是蠡县斜坡最主要的构造圈闭和相应的油藏类型。

另外,在斜坡北段潜山的围斜部位或断层坡折带下方发育地层超覆、地层不整合、岩性上倾尖灭和构造—岩性复合圈闭,在斜坡的中北段被北西向断层切割的堑垒相间的构造背景下,发育构造—岩

性复合圈闭和低幅度鼻状构造翼部的岩性圈闭,并形成相应的油藏。

(2)文安斜坡带。

该区带面积为1200 km²。“十一五”以来,在坡底和坡顶寻找地层岩性油气藏取得了突破。在坡顶文安城东地区浅层低幅度构造与岩性配合形成构造—岩性和岩性油气藏,发现5000×10⁴t规模储量。在坡底文安1、文安11地层岩性油藏也渐成规模。

(3)廊固凹陷大柳泉构造带。

2010—2012年主攻大柳泉构造带,共有13口井获得工业油气流,2012年共上交预测石油储量为5320×10⁴t,控制天然气储量为130.1×10⁸m³,凝析油为114×10⁴t,油气当量合计为6471×10⁴t。

(4)马西和河间洼槽。

马西洼槽先后有16口井获得工业油流,其中7口井日产油在20 m³以上。2012年上交控制储量2696×10⁴t,展现满洼含油态势。河间洼槽及其周边勘探面积约1000 km²。洼边正向构造的翼部是寻找构造岩性油藏的有利部位。2011—2013年钻探11口井,其中8口井获得工业油流,4口井获得高产油流,2口井待试。预测含油面积为40.3 km²,储量为3682×10⁴t,控制含油面积为21.1 km²,储量为1749×10⁴t。新增控制和预测储量为5432×10⁴t。

1.3 二连盆地阿尔凹陷发现亿吨级储量规模

用3年时间高效快速勘探形成亿吨级储量规模,建成年产油40×10⁴t生产能力。其中阿尔3

油藏探明储量超过 $3000 \times 10^4 \text{ t}$, 油层埋深小于 2000 m, 平均单井日产油为 12.9 t, 效益很好。

1.4 勘探新领域取得进展

致密岩油新领域有新进展。束鹿凹陷泥灰岩(砾岩)分布面积约为 300 km^2 , 厚度为 300~1500 m。2013 年钻风险探井——束探 1H 井, 水平段长 618 m(井段 4355~4973 m)。泥灰岩段厚度为 475 m, 底部砾岩段厚度为 143 m。见显示 2.43 m/3.9 层; 测井解释顺水平段 II 类储层 91.6 m/24 层、III 类储层 350.5 m/59 层。对井段 4620~4953 m 实施三段压裂改造, 油单 9 mm、孔板 41.275 mm 求产, 获日产油 243.59 m^3 , 日产气 $7.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。油压 18.20~16.38 MPa。

2013 年 3 月 12 日投入试采, 油压 1.0~3.2 MPa, 至 9 月 2 日 5 mm 油嘴放喷, 日产油 12 t, 日产气 1765 m^3 , 油压 2.7 MPa。累计产油 4267 m^3 , 累计产气 $63.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2 再实践再认识

2.1 生油洼槽控制了油气分布

精细勘探表明, 陆相断陷盆地生油洼槽控制了油气分布。凡是具备生油条件的洼槽, 精细勘探都能找到油气藏。生油条件越好, 找到的油气藏规模也越大。如冀中坳陷饶阳凹陷的油气主要分布在马西、肃宁、任西和饶南等几个洼槽。二连盆地阿尔凹陷的油气主要分布在北洼槽, 其次是中洼槽和南洼槽; 巴音都兰凹陷油气主要分布在中洼槽, 北洼槽具有一定的生油条件, 近期勘探也发现了新油藏。

2.2 单断槽式凹陷和两条控凹边界断层交会处的断层下降盘有利于油气成藏

二连盆地阿尔凹陷面积为 1500 km^2 , 发现了亿吨级储量规模油田, 这加深了对“小而肥”凹陷形成规律的认识。

一种情况是: 单断槽式凹陷, 如阿尔凹陷东边控凹边界阿尔塔拉断层, 走向北东, 倾向北西, 延伸长 80 km。在伸展过程中产生一条平衡断层——阿 6 断层。该断层位于凹陷中部, 走向北东, 倾向南东, 长约 10 km, 主要活动是在阿尔善组沉积时期的早、中期, 在阿三段沉积时与阿尔塔拉断层组成双断槽, 在地形上形成低洼地。在洼槽中发育了阿三段、阿四段生油层。后期阿尔塔拉断层持续活动, 控制的北部洼槽持续沉降, 基底最大埋

深达 3800 m。在洼槽中形成巨厚的阿尔善组和腾格尔组 2 套烃源层, 为阿尔凹陷提供了丰富的油源^[1]。吉尔嘎朗图凹陷情况也是如此。

另一种情况是: 两条控凹边界断层交会处的下降盘有利于形成“小而肥”的凹陷, 如渤海湾盆地大民屯凹陷的荣胜堡深洼槽, 北东向和北东东向控凹边界断层的下降盘基底最大埋深达 6600 m^[2]。南襄盆地泌阳凹陷北东向和北西向控凹边界断层的下降盘形成基底最大埋深达 8000 m, 从而在断层的下降盘形成楔状深凹陷。其中北西向断层是控凹的主断层。在核桃园组三段、二段时, 北西向断层活动剧烈, 沉积和沉降中心呈北西向展布, 且气候潮湿, 核三下亚段发育较深湖相沉积, 为油气生成创造了有利条件^[3]。

2.3 多元控砂造就了多种类型地层、岩性和复合油气藏

砂体的形成与分布受多种因素的影响, 主要有构造因素和沉积因素, 而构造因素又以坡折带和鼻状构造为主。

2.3.1 构造因素

(1) 坡折带。

如二连盆地乌里雅斯太凹陷东窄陡型沉积斜坡带发育有多种类型坡折带, 有断层坡折带、侵蚀坡折带、褶皱坡折带等。在斜坡带的北部发育有侵蚀坡折带和褶皱坡折带; 在斜坡带的南部发育有断层坡折带等。在木日格构造和苏布鼻状构造的南翼受断层坡折带控制的高位体系域湖底扇砂砾岩储层, 厚度大、分布广, 插入较深湖相生油泥岩中。其上被湖泛泥岩覆盖, 形成理想的生储盖组合。因此, 在斜坡中坡折带找到了下白垩统腾一段湖底扇砂砾岩上倾尖灭木日格岩性油藏。又如二连盆地中部吉尔嘎朗图凹陷东斜坡带低部位产生一条与边界断层相向而掉的平衡断层。沿断层的走向在地形上形成一条断层坡折带, 在其下方, 发育了腾一段下部湖底扇岩性油气藏^[4]。

(2) 鼻状构造。

在紧邻木日格构造的北部苏布鼻状构造南翼, 受褶皱坡折带的控制, 发现了腾一段湖底扇砂砾岩上倾尖灭岩性油藏; 在鼻状构造的北翼又找到了来自陡坡的物源扇三角洲前缘砂体上倾尖灭的岩性油藏。同时, 在北部侵蚀坡折带下面, 即下白垩统腾一段与阿尔善组之间的不整合面的下面, 由于阿尔善组遭受强烈的剥蚀、风化、淋滤, 使早期形成的

阿尔善组扇三角洲砂体储集性能得到了改善。从而又在侵蚀坡折带的下面找到了阿尔善组地层不整合面油气藏^[5]。

2.3.2 沉积相类型

一般河道相砂岩有利于形成岩性油气藏,如冀中坳陷饶阳凹陷大王庄东断层下降盘东营组河道砂岩性油藏。冀中坳陷霸县凹陷文安斜坡带长丰镇地区在宽缓的鼻状构造背景上,围绕王仙庄油源断层两侧发育了东营组透镜状河道砂体,多期河道砂体横向连片,纵向相互叠置,形成“串珠状”河道砂岩性油藏。

2.4 油气丰度和运移通道影响油气藏的形成

由于冀中坳陷饶南洼槽油气资源丰度相对较低,导致孙虎潜山构造带上的潜山油气灌满程度也较低,从而易形成大山峰潜山油藏,只在潜山顶部发育^[6]。

饶阳凹陷肃宁潜山构造带,以往认为顶部被厚薄不一的沙四段一孔店组红色地层所覆盖,俗称“红被子”,而沙三段烃源岩很难直接接触,缺乏供源窗口。经过重新采集三维地震资料,并进行连片处理,潜山形态、高点清晰,断层清楚,从而构建了“红盖低生侧运”的成藏模式,即:沙三段生油层在低部位与潜山接触,通过断层和不整合面向潜山供油,发现了高产潜山油藏。

另外,当油气运移通道不畅通时,油气才会进入致密储层,形成致密岩油气藏。

3 勘探方向的思考

华北油田目前辖有冀中坳陷、二连盆地和山西沁水盆地煤层气三大探区,地跨河北、内蒙古、山西、北京等4个省市自治区。区内地质构造较为复杂,勘探程度不均衡。

根据华北探区的实际,考虑将华北油田勘探方向分为3个层次:一是精细老区生油洼槽勘探;二是强化煤层气勘探;三是新区突破求发展。

3.1 精细老区生油洼槽勘探

勘探实践表明,一般在具有生油条件的洼槽都能找到油气藏。冀中坳陷和二连盆地石油资源探明率为36.7%,天然气资源探明率为6.7%,资源探明率较低,具有较大的资源潜力。近年来,围绕生油洼槽,不断有新的发现,是增储上产的目标。

3.2 强化煤层气勘探

华北探区发育有低阶煤到高阶煤多种煤岩

类型,具有丰富的煤层气资源。如山西沁水盆地石炭系一二叠系煤层气资源量为 $44434 \times 10^8 \text{ m}^3$,具有雄厚的物质基础。目前正在开发,同时为更大规模的煤层气开发储备技术、摸索方法、积累经验。

冀中坳陷大城凸起,区内煤层厚度一般为15~25 m,煤层中部埋深小于1500 m的面积为400 km²,估算煤层气资源量为 $1164 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。煤层中部埋深小于1800 m的面积为1000 km²,估算煤层气资源量为 $2969 \times 10^8 \text{ m}^3$,具有较好的勘探前景。其他地区尚未开展详细工作。

二连盆地是低阶煤的发育区,几乎各凹陷都钻遇煤层。埋深从8~1902 m均有煤层分布,一般为500 m左右。主要分布在下白垩统赛汉塔拉组,以褐煤为主。其次分布在中一下侏罗统阿拉坦合力群。零星地分布在下白垩统腾二段及阿尔善组,一般无工业价值。根据现有相对较多的9个凹陷资料统计,本区煤炭资源丰富,含煤面积为6521 km²,探明煤炭储量为 $698.5 \times 10^8 \text{ t}$,煤炭资源量为 $1382 \times 10^8 \text{ t}$ 。其中煤炭探明储量超过百亿吨的有胜利、霍林河和白音华3个煤田。随着勘探程度的提高,探明煤炭储量将会不断增加,为煤层气的形成提供了雄厚的物质基础。

根据现有资料,利用霍林河煤田实测数据,运用类比方法对二连盆地9个凹陷煤层气资源量进行估算,总资源量为 $(3933.9 \sim 4828.9) \times 10^8 \text{ m}^3$ (表1),说明本区煤层气资源丰富。

该区煤层气的有利条件是:①煤层气资源潜力大;②煤层的物性较好,孔隙度发育,一般在20%左右,属中、高孔隙度范围,这对煤层气的解吸和渗透十分有利;③属低阶煤,有利于微孔发育和对甲烷的吸附。煤岩的显微组分,以镜质组为主,达60%~90.5%,具有较好的吸附性能。煤岩的灰分和水分含量较低,有利于煤岩吸附甲烷。煤岩的灰分为11.9%~23.9%,大部分为低灰煤和中灰煤,个别为特低灰分煤和富灰分煤。煤岩的水分为12.2%~18.8%;④煤层分布集中、厚度大、埋藏浅,有利于勘探开发。煤层主要分布在盆地的东北部。煤层最大单层厚度为138.5 m,一般为3~5 m,煤层最大累计厚度为343 m,一般为20~30 m。煤层埋藏深度一般为500 m左右。

不利因素是:煤岩变质程度低,以褐煤为主,吨煤含气量低,影响煤层气的开发效益。建议如下:

表 1 二连盆地主要凹陷煤层气资源量估算表

凹陷名称	煤田名称	煤田面积/km ²	煤炭资源量/10 ⁸ t	煤层含气量/m ³ ·t ⁻¹	煤层气资源量/10 ⁸ m ³	资源丰度/10 ⁸ m ³ ·km ⁻²
霍林河	霍林河	540(?)	89.5	10~20	895~1790★	1.7~3.3
巴彦花	白音华	292.6	78	5.4	421.2★	1.4
布日敦	巴彦呼硕	285.2	41.8	5.4	225.7★	0.8
包尔果吉	乌尼特	670	70	3~4	250	0.4
洪浩尔舒特	吉林郭勒	450	77	2	154	0.3
吉尔嘎郎图	胜利	342	224	3.5	784	2.3
朝克乌拉	巴彦宝力格	400	94	3.5	329	0.8
阿南	额合宝力格	1500	192	3.5	672	0.4
塔北	白音乌拉	154	58	3.5	203	1.3
合计			924.3		3933.9~4828.9	

注:★只计算 500 m 以下煤层气资源量。

(1)加强煤层气系统研究。通过取得相应分析化验数据,掌握地下客观实际情况,指导煤层气勘探开发工作。

(2)加强煤层气钻采工艺技术攻关。二连盆地群下白垩统煤层大都为低阶褐煤,煤层含气量较低,但是煤层厚度大,可以借鉴世界上页岩气中钻水平井加分段压裂技术,来提高单井产量,降低成本,提高综合经济效益。建议组织有关人员进行煤层气钻采工艺技术攻关,形成中国煤层气钻采工艺技术系列。

(3)开辟低阶煤层气实验区。选择地质条件较好的地区,开辟低阶煤层气实验区,摸索方法,积累经验,再进行推广。

3.3 “三新”突破求发展

“三新”是指新区、新层系和新领域。

3.3.1 新区

根据勘探实践和认识,对新区而言,首先要分析断陷盆地的区域伸展方向,然后利用遥感、重、磁、电、地等资料,寻找垂直区域构造伸展方向的深洼槽。再进一步做二维地震,确定凹陷的结构,进行深洼槽研究、评价、决策。针对小型深凹陷特点,可以把参数井和预探井结合起来,加快勘探步伐。把第一口井布置在主体构造的翼部,靠近主洼槽和有利储盖组合的部位,可完成参数井和预探井的双重任务。在凹陷地质条件基本明确后,由二维地震普查后,直接整体部署三维地震,节约成本,加快节奏。在早期勘探工作获得突破后,开发评价部门及时介入,实现勘探开发一体化。有效减少探井中的评价井数,避免实物工作量的重复投入,缩短了由勘探到开发的建设历程,以期达到高效快速的勘探

效果。

二连盆地及其外围还有许多小凹陷,值得进一步分析,以期有新的发现。

3.3.2 新层系

二连盆地侏罗系是一个值得重视的新层系。侏罗系主要分布在盆地的北部乌里雅斯太—布日敦一带和南部阿其图乌拉—呼格吉勒图—格日勒敖都一带。主要烃源层发育在中一下侏罗统,具有较好的生烃条件(表 2)。如乌里雅斯太凹陷南洼槽中侏罗统暗色泥岩最大厚度超过 1000 m。烃源岩有机丰度高,且大部分地区都已成熟,资源量达 1.39×10^8 t。发育有扇三角洲砂体等多种类型储层,以及背斜和岩性多种圈闭,为油气聚集创造了有利条件。又如阿其图乌拉凹陷中一下侏罗统最大厚度为 1500 m。暗色泥岩发育,根据钻井资料推测凹陷的北部最发育,最大厚度可达 900~1000 m。烃源岩有机质丰度高,具有一定的资源潜力。根据图参 1 井资料,钻遇生油岩厚度为 556 m,暗色泥岩有机碳含量平均为 2.58%,生烃潜量平均为 3.14 mg/g,氯仿沥青“A”平均为 0.18%,总烃平均为 2594.22 mg/kg,达到了好—较好烃源岩标准。计算生油量为 1.9×10^8 t,资源量为 1527×10^4 t,具有一定的找油物质基础。图参 1 井钻探见到了直接油气显示,录井于 2290.0~2976.6 m,侏罗系见油斑砂砾岩 1.5 m/3 层,油迹粉砂岩 1.0 m/1 层,油迹砂砾岩 14.0 m/14 层,荧光粉砂岩 36.9 m/10 层,荧光砂砾岩 187.8 m/29 层;测井解释 2883.6~2976.6 m,可疑层 46.0 m/6 层。中途测试为干层,说明本区有油气生成和聚集过程。

表2 二连盆地主要凹陷中一下侏罗统烃源岩评价表

凹陷名称	岩性	TOC/%	生烃潜量/mg·g ⁻¹	氯仿沥青“A”/%	总烃/mg·kg ⁻¹	评价	资源量/10 ⁸ t
乌里雅斯太南洼	泥岩	2.27	3.46	0.16	529.5	好	1.3946
阿其图乌拉	泥岩	2.58	3.14	0.18	2594.2	较好—好	0.1527
吉尔嘎朗图	泥岩	6.42	9.15	0.53	2854.0	好	/

3.3.3 新领域

目前,国内外对致密岩油气勘探比较热门。美国是世界上开发致密岩油气最早的国家之一。

国内致密岩油气勘探开发相对较晚,现仍属于起步阶段。随着技术的进步,我国致密岩油气勘探开发取得了快速发展,先后发现了鄂尔多斯盆地苏里格、四川盆地川中须家河组和塔里木盆地库车凹陷等一批大型致密岩气区;发现了鄂尔多斯盆地长7段、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组、松辽盆地扶杨油层、渤海湾盆地济阳拗陷等致密油区。截至2011年底,全国致密岩气累计探明地质储量已达 $3.3\times10^{12}\text{m}^3$,约占全国天然气总探明储量的40%;2011年全国致密岩气产量约为 $168\times10^8\text{m}^3$ 。

华北油田致密岩油气勘探方向:根据前人研究成果,结合华北油田实际,廊固凹陷和饶阳凹陷是勘探致密岩油气的有利区域。

(1)廊固凹陷。

烃源岩面积为 $1285(\text{Es}_{2+3})\sim1541(\text{Es}_4+\text{Ek})\text{km}^2$,烃源岩厚度为592.7~195.6 m,达到了有利区的标准。资源丰度较低,为 $(17\sim34)\times10^4\text{t}/\text{km}^2$,属不利区。该凹陷钻井时曾在泥页岩中见到油气显示。

(2)饶阳凹陷。

沙三段烃源岩面积为 1742.3km^2 ,烃源岩厚度为261 m,达到了有利区的标准。资源丰度为 $(42\sim55)\times10^4\text{t}/\text{km}^2$,属于有利区。

这两个凹陷可以通过进一步研究,再评价、再决策。

参 考 文 献

[1] 赵贤正,史原鹏,张以明,等.富油新凹陷科学高效快速勘探方法与实践——以二连盆地阿尔凹陷为例[M].北京:科学出版社,2012.

[2] 姚继峰,郑容植.静安堡油田[M]//张文昭.中国陆相大油田.北京:石油工业出版社,1997.

[3] 王寿庆,徐世庸,孙秀斌,等.双河油田[M]//张文昭.中国陆相大油田.北京:石油工业出版社,1997.

[4] 杜金虎,赵贤正,张以明,等.中国东部裂谷盆地地层岩性油气藏.北京:地质出版社,2007.

[5] 赵贤正,金凤鸣,等.断陷斜坡油气藏形成分布与精细勘探一以冀中坳陷及二连盆地为例[M].北京:科学出版社,2012.

[6] 杜金虎,赵贤正,张以明,等.富油凹陷隐蔽型潜山油气藏精细勘探[M].北京:石油工业出版社,2010.

(收文日期 2014-06-13)
(编辑 李晓泉)

地震预警的意义

地震预警是指地震在震中发生时,破坏性地震波在到达预警目标前,利用电波比地震波快的原理,在灾难到来前几秒到几十秒给出警报的技术。其关键是利用地震波的前几秒的数据准确估计震级、震中位置以及快速估计地震对预警目标的影响等。其主要意义在于为人们避险提供更多时间。

地震发生后,房屋从开始晃动到倒塌的平均时间大约12秒。最新的预警科技提供逃生和避险的时间可以超过30秒。有了预警系统后,避险时间可以大大增加。但是避险时间的长短根据震中离用户的距离不同而不同。预警时间大概等于“震中离用户的距离(公里)/4”。

相关研究表明,地震预警时间为3秒,伤亡率可减少14%;预警时间为10秒,伤亡率可减少39%;预警时间为20秒,伤亡率可减少63%。从这个数据来看,增加预警时间是非常有意义的。

(摘自《中国剪报》总2993期)

霸县凹陷深层烃源岩地球化学特征及油气成因分析

王 静 张世超 孙志华 孙菲菲 谢莲英 程艳敏

(中国石油华北油田公司勘探开发研究院 河北任丘 062552)

摘要: 以近几年来新钻的兴隆 1 井、牛东 1 井和文安 1 井等深层风险探井为例,结合区域地质资料,重点研究了霸县凹陷深层烃源岩的分布、有机质丰度、类型、热演化程度等内容,并进行了油气源对比,分析了油气成因。指出:霸县凹陷深层沙四段一孔店组发育巨厚优质烃源岩,虽然目前已进入高成熟阶段,但油气资源仍很丰富,具有较大的勘探潜力;牛东 1 井深潜山原油属于挥发一轻质油,油气来源于成熟度相当于镜质组反射率为 1.8% 左右的沙河街组下部烃源岩;天然气是烃源岩热解而非裂解的成因。

关键词: 霸县凹陷; 深层勘探; 烃源岩; 地球化学特征; 油气成因

0 引言

由于地震技术及钻探条件的限制,对冀中坳陷乃至全国深层烃源岩研究基本处于探索阶段。对霸县凹陷沙四段一孔店组深层烃源岩的研究一直被“好的不熟、熟的不好”的观点所束缚,深层资源有没有? 能否成藏? 这些认识阻碍了勘探进程,给勘探决策带来困扰。如何解决深层烃源岩评价、油气来源及成因等问题成了当务之急。2009 年以来,在霸县凹陷相继钻探了 3 口风险探井兴隆 1 井、文安 1 井和牛东 1 井,揭开了霸县洼槽巨厚的暗色泥岩,显示霸县凹陷深层(埋深大于 4000 m,主要为沙四段一孔店组)地层厚度巨大,是冀中坳陷深层烃源岩最发育的地区。牛东 1 井蓟县系雾迷山组(井段 5641.5~6027.0 m)潜山特高产油气藏的发现,是渤海湾盆地乃至中国东部目前发现的埋藏最深、温度最高的油气藏。分析其地球化学特征及油气成因,对渤海湾盆地类似其他凹陷深潜山油气藏的勘探具有重要的指导意义和借鉴作用。

霸县凹陷是冀中坳陷中北部的一个新生代箕状断陷,北东走向,西断东超,西、北以牛驼镇凸起为界,东南以文安斜坡向大城凸起过渡,西南与饶

阳凹陷相接,面积约为 2400 km²,最大沉积厚度超过 10000 m。3 口风险探井兴隆 1 井、文安 1 井和牛东 1 井的钻探揭开了霸县洼槽巨厚的暗色泥岩^[1],显示霸县凹陷深层烃源岩发育。沙四段沉积时期,霸县凹陷沉积环境主要为滨浅湖相和三角洲前缘相沉积,为一套河流—沼泽—滨浅湖相沉积建造,以暗色砂泥岩层系为主。兴隆 1 井沙四段一孔店组 4429~5500 m,未穿(地震推测厚度可达 2500 m),全部为湖相沉积,暗色泥岩及碳质泥岩累计厚度为 574 m(其中碳质泥岩厚度为 43 m),暗色泥岩及碳质泥岩占地层厚度的 53.6%(表 1);文安 1 井沙四下亚段 4180~4500 m 暗色泥岩累计厚度为 195 m,占地层厚度的 31.3%;牛东 1 井沙四段一孔店组 4463~5639 m 地层厚度为 1176 m,暗色泥岩及碳质泥岩累计厚度为 483 m,占地层厚度的 41.07%,牛东 2 井 6293 m 进入潜山,4000 m 以下深层暗色泥岩及碳质泥岩累计厚度为 978 m,占地层厚度的 44.37%,其中碳质泥岩累计厚度达到 93 m。该地区是霸县凹陷沙四段段一孔店组烃源岩的主要发育区,牛东潜山下降盘暗色泥岩(沙四段一孔店组)埋深达到 7000 m 以下,供油窗口在 1000 m 以上,具备良好的油源条件。

表 1 霸县凹陷深层沙四段一孔店组暗色泥岩及碳质泥岩发育情况统计表

井号	顶界深度/m	底界深度/m	地层厚度/m	暗色泥岩厚度/m	碳质泥岩厚度/m	暗色泥岩及碳质泥岩占地层厚度/%
牛东 1 井	4463	5639	1176	483	2	41.07
兴隆 1 井	4429	5500(未穿)	1071	531	43	53.6
文安 1 井	3876	4500	624	195	0	31.3
牛东 2 井	4000	6293	2293	885	93	44.37

1 霸县凹陷深层烃源岩地球化学特征

霸县凹陷深层烃源岩沉积厚度巨大(深层主要是指埋深大于 4000 m 的地层,在霸县凹陷主要是沙四段—孔店组,可能还包含少量的沙三段底部),最厚可达 2293 m;有机质丰度较高,为中—好烃源岩;有机质类型较差,以Ⅱ₂型为主;霸县凹陷成熟门限一般为 3000 m 左右,深层烃源岩热演化已达成油高峰到凝析油湿气阶段。

1.1 有机质丰度较高

霸县凹陷深层烃源岩有机质丰度较高(表 2),牛东 1 井、兴隆 1 井和文安 1 井 3 口井有机碳含量为 0.09%~13.1%,主频众数值分布在 1%~2%之间,平均值为 1.62%;生烃潜力最高为 25.66 mg/g,主频众数值分布在 3%~4%之间,平均值为 3.75 mg/g;氯仿沥青“A”最高为 0.5909%,平均值为 0.1567%;总烃含量最高为 2349 mg/kg,平均值为 811 mg/kg。综合评价凹陷深层为一套中—好烃源岩,其中在牛东 1 井深层主要为好烃源岩(图 1)。

表 2 霸县凹陷深层有机质丰度统计表

井号	深度/m	有机碳/%	生烃潜量/mg·g ⁻¹	氯仿沥青“A”/%	总烃/mg·kg ⁻¹	综合评价
文安 1	4125~4500	0.09~6.29 0.79(21)	0.01~20.91 2.01(21)	0.0079~0.1085 0.0413(7)	35~666 224(7)	差—中等烃源岩
兴隆 1	4429~5500	0.48~13.1 2.05(63)	0.30~25.66 3.74(63)	0.016~0.3227 0.1389(17)	86~2021 867(17)	中等—好烃源岩
牛东 1	4463~5639	0.39~4.97 1.17(43)	1.07~18.31 3.05(43)	0.0718~0.5909 0.2578(11)	304~2349 1087(11)	好烃源岩

注: $\frac{0.09\sim6.29}{0.79(21)}$ 表示 $\frac{\text{最小值}\sim\text{最大值}}{\text{平均值(样品数)}}$ 。

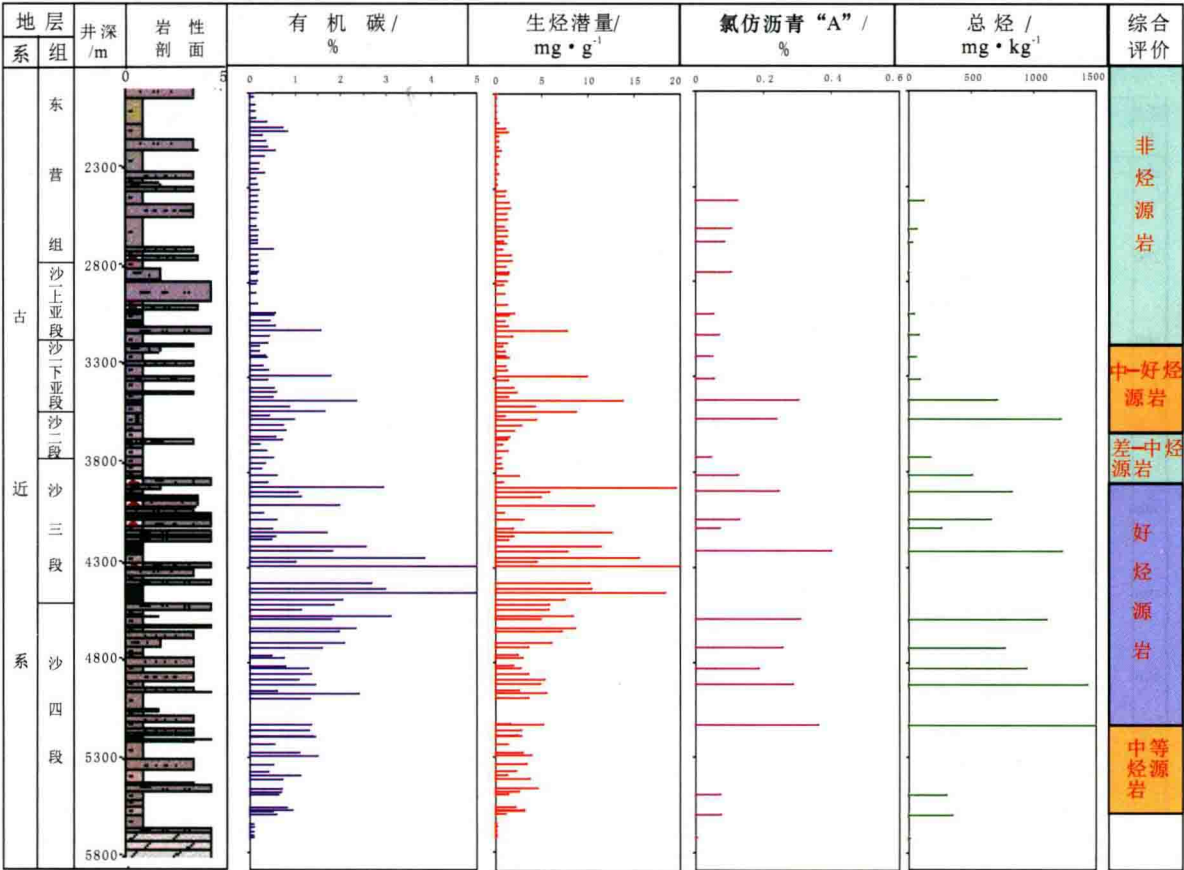


图 1 霸县凹陷牛东 1 井有机质丰度剖面

1.2 烃源岩有机质类型以Ⅱ₂型为主

霸县凹陷深层烃源岩有机质类型以Ⅱ₂型为主,牛东1井岩石热解氢指数平均值为245 mg/g,最高为472 mg/g;干酪根当中含有较多的腐泥组分,类型指数在20~70之间,基本属于Ⅱ₂型母质;H/C原子比平均为0.77,O/C原子比只有0.07(图2),较低的H/C原子比可能与烃源岩热演化程度较高有关;Pr/Ph比在4200 m以下,基本大于1.0,显示弱氧化—弱还原的沉积环境或者热演化程度较高。

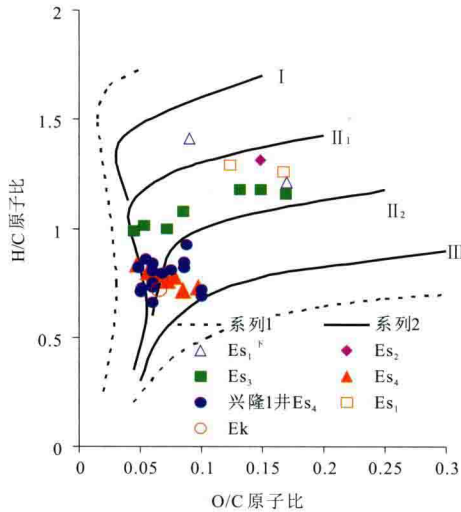


图2 霸县凹陷深层烃源岩H/C与O/C原子比关系图

1.3 烃源岩已达成油高峰到凝析油湿气阶段

牛东1井深度在3000 m以上R_o基本小于0.5%,HC/TOC小于3.0%,氯仿沥青“A”/TOC基本小于5%,表明有机质尚未成熟,处于未成熟阶段(图3);在此深度以下R_o基本大于0.5%;氯仿沥青“A”/TOC从10%增加到25%左右;HC/TOC从3%增加到20%,属于成熟阶段;深度一直到5500 m,氯仿沥青“A”/TOC和HC/TOC小于5%和10%,有的R_o值达到1.31%,有机质进入凝析油—湿气阶段。

霸县凹陷古近系烃源岩成熟度门限一般在3000 m左右,沙四段—孔店组深层烃源岩热演化已达成油高峰到凝析油湿气阶段。其中,牛东1井埋深5494~5505 m R_o达到1.31%,5720 m R_o达到1.44%,5500 m进入凝析油湿气阶段;兴隆1井埋深5100 m,进入凝析油湿气阶段。

1.4 深层油气资源丰富

通过成藏动力模拟,进行资源量计算,霸县凹陷沙四段—孔店组烃源岩生烃强度可达到油655×10⁴ t/km²、气17.7×10⁸ m³/km²,聚集强度达到油28.48×10⁴ t/km²、气9.56×10⁸ m³/km²,具备形成中大型油气田的资源条件。

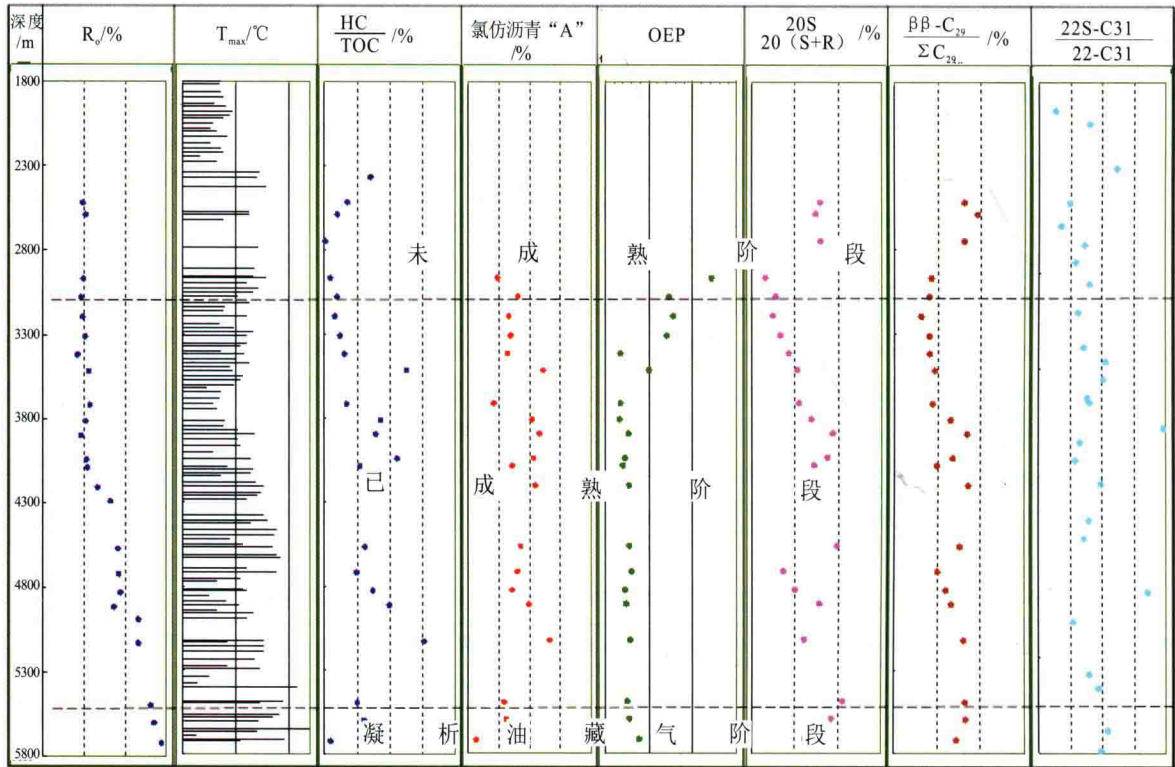


图3 牛东1井有机质热演化剖面

2 深层原油、天然气来源及成因

霸县凹陷深层油气来自于 4500 m 以下的沙四段烃源岩,牛东 1 井深层天然气是烃源岩热解成因,而非原油裂解成因;油气来源于成熟度相当于 R_o 为 1.8%左右的沙河街组下部烃源岩。

2.1 油气特征

从表 3 可以看出,牛东 1 井潜山原油常温下水

样呈褐色,密度、黏度相对较小,密度小于 0.78 g/cm³,黏度小于 5.0 mPa·s,含硫量、沥青质+胶质含量相对较低,含硫量小于 0.06%,胶质+沥青质含量小于 7.0%,显示陆相原油和成熟度较高的特点;含蜡为 7%~17%,显示不同深度、部位原油具有不均质性,300℃馏分为 70.0%~75.3%,甲烷碳同位素值较重,为-27.3‰,与文古 3 井潜山原油类似,属于挥发-轻质油。

表 3 霸县凹陷牛东地区深层原油物性数据表

井号	深度/m	层位	密度/g·cm ⁻³ 20℃	密度/g·cm ⁻³ 50℃	黏度/mPa·s	含硫/%	含蜡/%	胶质/%	凝固点/℃	300℃馏分/%
牛东 1	5641.5~5741	Jxw	0.7744	0.7513	1.11	0.028	7.41	6.86	14.5	70.2
牛东 1	5641.5~5741	Jxw	0.7793	0.7564	4.14	0.047			17.0	
牛东 1	5641.5~5741	Jxw	0.7784		1.49	0.02	11.39	1.73	25	70.0
牛东 1	5641.5~6027	Jxw	0.778	0.755	1.18	0.042			20	
牛东 1	5641.5~6027	Jxw	0.7792	0.7564	1.23	0.06	17.13	1.53	24	75.3
文古 3	4470~4489	Є _{1f}	0.7712		1.30	0.01	23.84	1.09	26	
兴隆	14607.4~4655.0	Es ₄	0.8257	0.804	2.58					
文安	14192.4~4224.2	Es ₄	0.8215	0.8003	6.3	0.05	35.5	6.5	38	

全油色谱含有较多的低碳数烃类(nC_9 以前)及轻烃组分,主峰碳为 nC_7 ;原油饱和烃色谱图中正、异构面显示烷烃峰型分布呈馒头状(图 4), Pr/Ph 为 1.21, Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 相对较小,分别为

0.10 和 0.07,一方面原油具有较高的成熟度,另一方面显示源岩的沉积环境水体咸度不大,原油当中长链烷烃(C_{20} 以后)明显多于短链烷烃, nC_{22}^-/nC_{22}^+ 只有 0.86。与文古 3 井、兴隆 1 井和文安 1

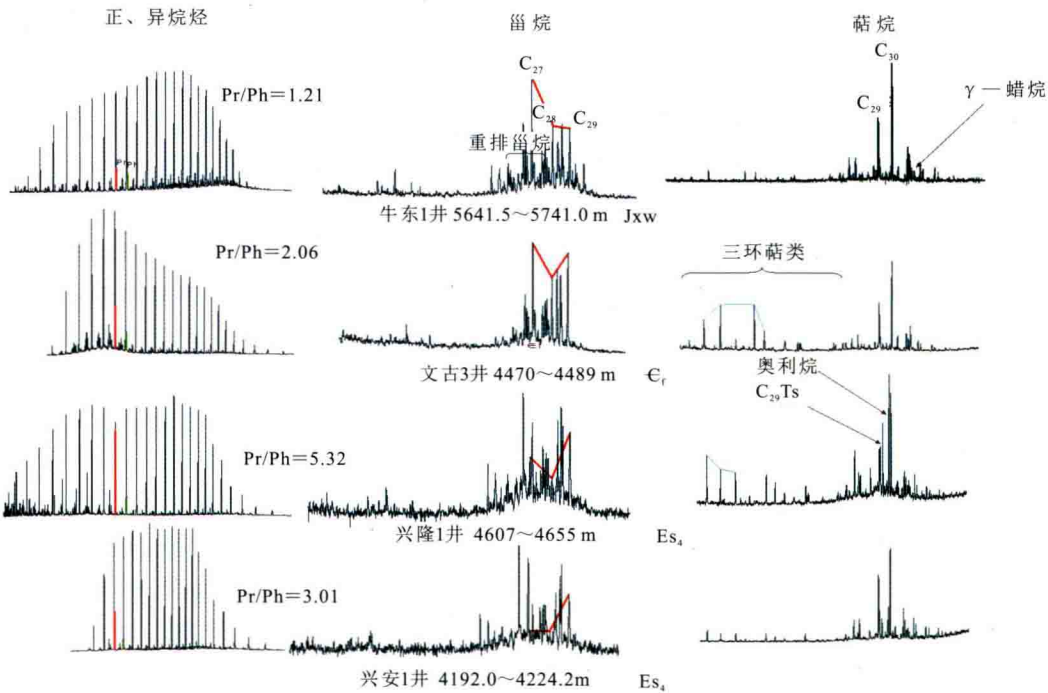


图 4 冀中拗陷霸县凹陷牛东地区深层原油饱和烃特征谱图

井原油具有明显的区别,其他原油的 Pr/Ph 介于 2.06~5.32 之间,显示其烃源岩沉积环境中的水比牛东 1 井烃源岩更淡一些,原油成熟度更高一些,特别是兴隆 1 井原油, Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 相对较大,分别为 0.08~0.76 和 0.04~0.14。对比显示牛东 1 井原油与文古 3 井潜山原油更加具有相似性,与其他两口井原油差别较大;牛东 1 井潜山原油 3 种规则甾烷中以 C_{27} 为主, $C_{27} > C_{28} > C_{29}$,这在华北地区比较少见(华北地区原油一般为 $C_{29} > C_{27} > C_{28}$ 或 $C_{27} > C_{29} > C_{28}$),分布呈近似 L 型, $5\alpha-C_{27}/5\alpha-C_{29}$ 为 1.84,显示原油低等水生生物输入较多, $5\alpha-C_{28}/5\alpha-C_{29}$ 为 1.03(研究表明 C_{28} 甾烷的高含量与多种多样的浮游植物群有关,这些植物群包括硅藻、颗石藻和沟鞭藻),显示牛东 1 井原油的母源输入以低等水生生物和浮游植物为主。原油的 $20S/20(S+R)C_{29}$ 和 $\beta\beta C_{29}/\Sigma C_{29}$ 分别为 43.56% 和 47.49%,并且含有较丰富的重排甾烷,显示原油的成熟度较高。

与其他原油相比,牛东 1 井原油母源输入以低等水生生物和浮游植物为主,文古 3 井原油以低等水生生物和高等植物为主,兴隆 1 井和文安 1 井原油母源输入以高等植物为主,原油成熟度以兴隆 1 井原油最高,文安 1 井原油次之,并可能经历了一定距离的运移,牛东 1 井和文古 3 井原油热演化程度相近;藜烷分布特征:牛东 1 井原油藜烷当中含有少量的三环藜烷,且 $C_{19} < C_{20} = C_{21}$ 分布, γ -蜡烷含量中等, γ -蜡烷/ C_{31} -Hop 为 0.54,显示源岩水体具有一定咸度,原油当中没有来源高等植物的奥利烷和显示热演化程度增高的 $C_{29}Ts$ 。与其他原油相比,牛东 1 井原油源岩沉积水体有一定咸度,高等植物输入较兴隆 1 井和文安 1 井少,文古 3 井原油源岩沉积水体咸度要高于牛东 1 井原油,牛东 1 井原油成熟度低于兴隆 1 井和文安 1 井。

牛东 1 井天然气组分中甲烷含量较高,一般为 81.77%~86.47%,含有一定量的重烃, C_2^+ 一般为 10.84%~12.45%, C_1/C_{1-5} 为 0.87~0.89,天然气甲烷同位素较重,为 -38.7‰~-38.8‰,与文古 3 井天然气类似,各组分碳同位素较重,天然气甲烷、乙烷、丙烷同位素分别为 -38.8‰、-24.5‰和 -23.5‰(图 5),表明:一是烃源岩母质类型差;二是演化程度高。兴隆 1 井天然气甲烷同位素轻一些,为 -48.3‰,乙烷稳定同位素为 -32.27‰,其成熟度比牛东 1 井、文古 3 井天然气要低。

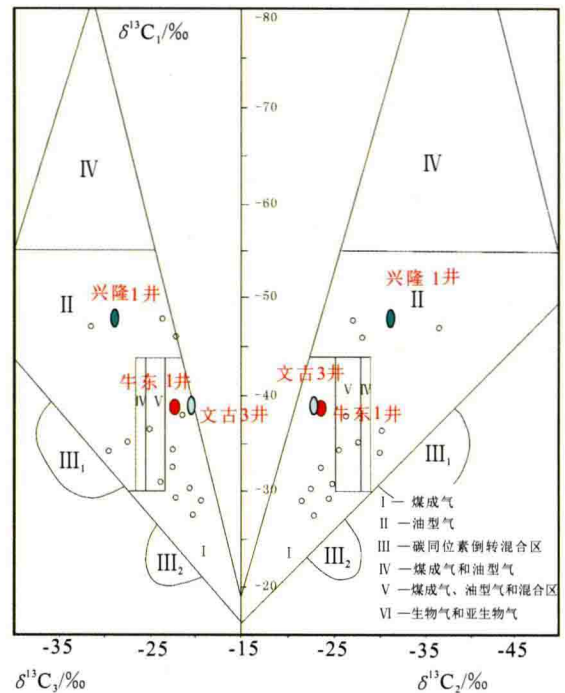


图 5 天然气 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$ 鉴别图版

2.2 油气来源

牛东 1 井原油与其 4900 m 以下烃源岩可比性较好,饱和烃色谱图谱相似。 Pr/Ph 都为 1.2~2.0; Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 相对较小,分别为 0.1~0.3 和 0.07~0.17。 $5\alpha-C_{27}/5\alpha-C_{29}$ 全部大于 1.0, $5\alpha-C_{28}/5\alpha-C_{29}$ 0.56~1.03,母源输入以低等水生生物为主;原油与烃源岩都含有较丰富的重排甾烷,两个甾烷异构化参数 $20S/20(S+R)C_{29}$ 和 $\beta\beta C_{29}/\Sigma C_{29}$ 原油分别达到 43.56% 和 47.49%,烃源岩分别为 31.18%~40.13% 和 33.2%~49.20%,演化程度烃源岩略低于原油,可能是由于运移造成;原油和烃源岩当中都含有三环藜烷和 γ -蜡烷。对比结果显示牛东 1 井原油来自于本井 4900 m 以下的 Es_4 中一下部烃源岩,属新生古储。其他深层文古 3 井 ϵ_1f 潜山原油与牛东 1 井原油具有可比性,基本同源,原油主要来自 Es_4 中一下部烃源岩;兴隆 1 原油主要来自于 Es_4 中部烃源岩(图 6)。

牛东 1 井、文古 3 井天然气同位素较重,湿气含量综合判断属于 III 型干酪根形成的煤成气^[2],推算源岩成熟度镜质组反射率为 1.6%~1.8%,天然气为凝析油伴生气;兴隆 1 井天然气甲烷同位素轻一些,为 -48.3‰,乙烷稳定同位素为 -32.27‰,其成熟度比牛东 1 井、文古 3 井天然气要低,综合

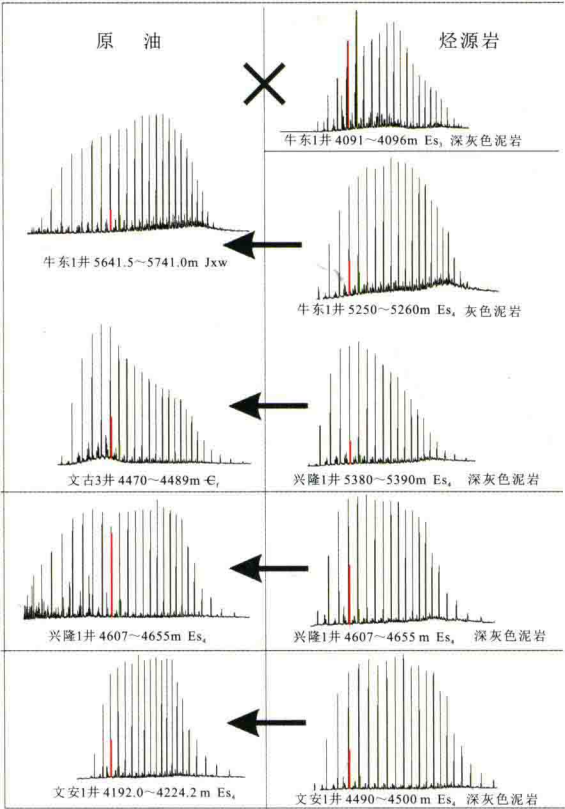


图6 霸县凹陷深层油-岩对比色谱图

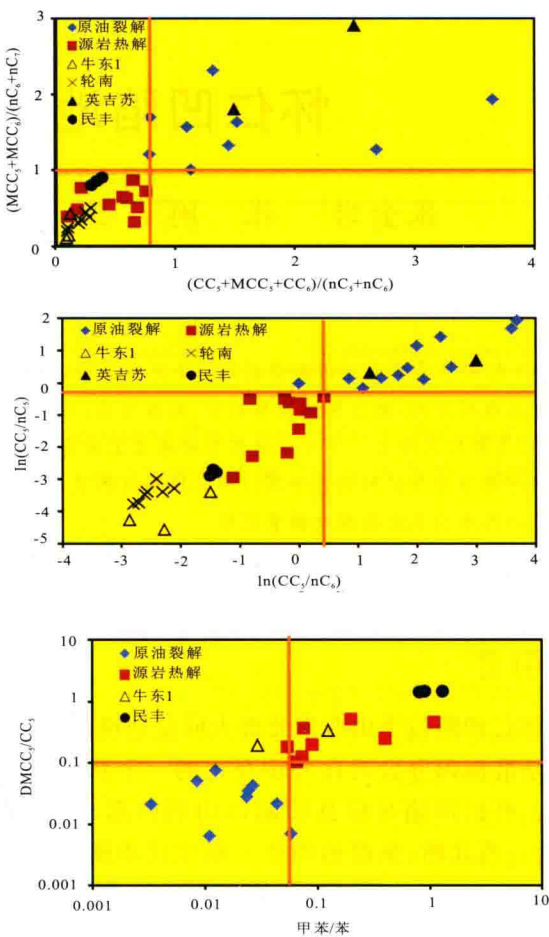


图7 不同成因天然气轻烃相对组成图

判断兴隆1井天然气属于油型气(湿气)。

2.3 油气成因

对于原油成因前文已经叙述,牛东潜山原油是沙四段一孔店组烃源岩在高成熟阶段干酪根热解所致。分析认为天然气成因有两种:一种是早期形成的油藏在后期受到高温裂解形成;另一种是高成熟沙四段一孔店组烃源岩直接裂解而成。不同的油气成因形成两种不同的勘探思路 and 理念,因此开展了油气成因研究。牛东1井深层油气通过 在高温高压条件下进行油气生成模拟实验,分析烃源岩和原油在高温高压(高成熟)条件下降解油气的组成和性质,与牛东1井现有油气进行对比,从而判别出油气成因。轻烃是石油和天然气中重要的组成部分,轻烃组分的地球化学特征能够反映油气的成熟度、母质特征和沉积环境等重要信息,因此,利用模拟实验当中烃源岩热解气和原油裂解气中的轻烃化合物的不同组成和构型,选取适当的指标,对不同来源、不同成熟度天然气进行区分。

分析认为潜山油气是烃源岩热解成因(图7),而非原油裂解成因;油气来源于成熟度相当于镜质组反射率在1.8%左右的沙河街组下部烃源岩。

3 结论

霸县凹陷深层(沙四段一孔店组)烃源层厚度大,有机质丰度中等一高,生烃潜力大,有机质类型为Ⅱ₂型母质,已进入高成熟阶段,是一套中等一好的烃源岩,油气资源丰富,具有较大的勘探潜力;霸县凹陷牛东1井深潜山原油为挥发轻质油;油气主要来源于沙河街组下部烃源岩;天然气是烃源岩热解成因,而非原油裂解成因。

参 考 文 献

[1] 赵贤正,金凤鸣,等. 渤海湾地区牛东1井超深潜山高 温油气藏的发现及其意义[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 915-925.
[2] 王涛,等. 中国天然气地质理论基础与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

(收文日期 2014-06-17)
(编辑 李 悦)