

涠西南A洼现今地温场恢复及有利勘探方向

胡晨晖

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057)

摘要:北部湾盆地涠西南A洼与B洼为已证实的富生烃洼陷, 烃源岩的热史及地温场研究程度差异明显。B洼钻井工作量大, 测温数据多, 热史研究程度高。A洼勘探程度低, 可靠的测温数据少。地温场的分布特征及烃源岩热演化的认识不清, 制约了目前的勘探。通过对涠西南A洼的钻井温度数据进行拟合, 建立涠西南A洼已钻井的BHT温度的校正经验公式, 重建了涠西南A洼的现今地温场, 恢复不同区带烃源岩热演化史。结果表明, A洼地温梯度分布在 $28.1 \sim 40.2$ $^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 呈现北低南高, 中段高东西段较低的特征; 近源及中源构造范围内烃源岩为有效烃源岩; 涠洲11-X构造位于油气运移路径上, 是A洼下步重点勘探方向。

关键词: BHT温度; 地温梯度; 烃源岩; 涠西南凹陷

中图分类号: TE132

文献标志码: A

Current geothermal field restoration and favorable exploration direction in the A Sag of the Weixinan Depression

HU Chenhui

(Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China)

Abstract: The A Sag and B Sag are proven hydrocarbon-rich depressions in the Weixinan of the Beibu Gulf Basin, and there are obvious differences in the degree of research on the thermal history and geothermal field of the hydrocarbon source rocks. The B Sag has a large drilling workload, a large number of temperature measurement data, and a high degree of thermal history research. The A Sag has a low degree of exploration and few reliable temperature measurement data. The distribution characteristics of the geothermal field and the thermal evolution of hydrocarbon source rocks are not well understood, which restricts the current exploration. By fitting the drilling temperature data in the A Sag of the Weixinan Depression, it was established an empirical formula for correcting the BHT temperature of wells drilled. The present geothermal field in the A Sag of the Weixinan Depression was reconstructed, and the thermal evolution history of source rocks in different zones was recovered. The results show that, the geothermal gradient distribution in A Sag ranges from 28.1 to 40.2 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$, showing a characteristic of low in the north and high in the south, with high in the middle section and low in the east-west section; the hydrocarbon source rocks within the near-source and middle-source structures are effective hydrocarbon source rocks; the Weizhou 11-X structure is located on the hydrocarbon transport path, which is the next key exploration direction in the A Sag.

Key words: BHT temperature; geothermal gradient; source rock; Weixinan Depression

引用格式: 胡晨晖. 涠西南A洼现今地温场恢复及有利勘探方向[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(2): 154–160.

HU Chenhui. Current geothermal field restoration and favorable exploration direction in the A Sag of the Weixinan Depression[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(2): 154–160.

涠西南凹陷隶属于北部湾盆地北部坳陷, 主体区及凸起区的面积约为 $3\ 800\ \text{km}^2$ 。纵向发育古近系长流组、流沙港组和涠洲组, 新近系下洋组、角尾组、灯楼角组及第四系地层; 其中流沙港组二段为主力烃源岩层系, 沉积了厚层的灰色泥页岩、油页岩夹少量灰色粉砂岩薄层; 涠洲组和流沙港组的砂岩段是本区主要勘探目的层(图1)。

根据构造演化情况和现今地层的埋深特征, 可细分为A洼、B洼和C洼3个次级构造单元, 其发育

主要受到控凹的一号断裂和控凹的二号断层控制。其中B洼的勘探程度最高, 探明率已超过50%, 与其烃源岩规模相当的A洼目前的探明程度仅达到20%, 因此A洼仍处在勘探的早期阶段, 剩余勘探潜

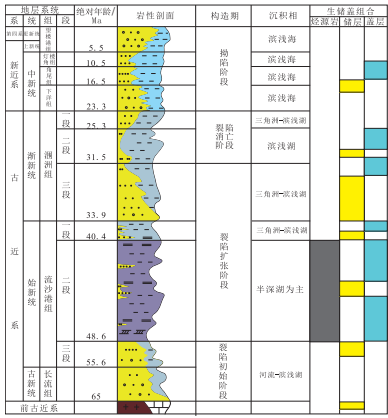
收稿日期: 2022-12-13; **改回日期:** 2023-03-21。

作者简介: 胡晨晖(1989—), 工程师, 主要从事油气地化与成藏研究。E-mail: huchh1@cnooc.com.cn。

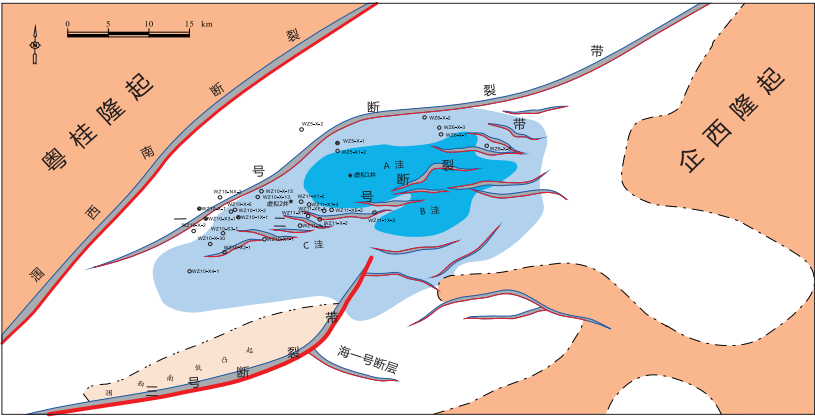
基金项目: 中海石油(中国)有限公司科技项目“中海油‘十三五’油气资源评价”(YXKY-2018-KT-01)。

力巨大。受钻井的工作量影响,涠西南A洼地温场的研究相对薄弱,准确恢复现今的地温场,有助于提高勘探效率,明确有利的勘探方向。本文基于已钻

井的温度差异分布特征,重建了涠西南A洼现今地温场,恢复涠西南A洼不同区域的生排烃史,结合已发现油气藏的分布规律,预测A洼的有利勘探方向。



a. 涠西南凹陷综合地层柱



b. 涠西南凹陷构造纲要

图1 涠西南凹陷地层与构造格架

1 地温场研究现状

国内外对地温场恢复的方法主要有两大类,其一是通过地球动力学方法进行岩石圈的正演刻画现今的地温场,其二则是通过古温标进行反演模拟。由于古温标方法可以通过古温标的实测数据来检验模拟结果,因而被认为是研究精度较高且切实可行的方法^[1]。地温梯度、大地热流、地层温度及矿物的古温标均是地温场的有效物理量,分别对应了盆地热演化史法、盆地热流史法、地温拟计算和地温热年代学这4种古温标恢复方法。事实上,地温梯度和大地热流的获取均是由地层温度变换得到,因此获得第一手准确的测温数据,有助于恢复盆地的现今地温场。

海上钻井能够获取的温度数据主要有三类,分别是地层测试温度(DST)、电缆孔底温度(BHT)及地层测压温度(MDT)等^[2-3]。在上述温度数据中,地层测试温度可靠性最高,但获得的成本较高,因此测点相对较少;地层测压温度测点较多,但受到泥浆循环时间影响,实际的温度较真实温度偏低;孔底温度测点最多,但受到温度计位置及循环时间影响,实际温度远低于真实温度,需要校正后才能使用。

北部湾盆地的地温场研究始于20世纪90年代,为了研究南海北部西区的热演化史,前人通过完井和试油报告获得了大量的井温数据,基于实际样品得到的热导率数据,加权计算获得了热流数

据。康西栋等^[4]首次研究了北部湾盆地的地热特征及其成因,并换算出全盆地的平均大地热流值为61.71 mW/m²,其中涠西南凹陷的大地热流值为64.55 mW/m²,地温梯度平均值为3.86 °C/100 m。郭飞飞等^[5]新增了4个大地热流数据,认为涠西南凹陷沿北西南东方向,热流值有逐渐增大的趋势。由于涠西南A洼的钻井工作量较低,可靠的DST温度数据相对较少,因此需要通过补充更多可靠的温度点恢复现今的地温场。本次研究筛选了钻遇烃源岩的凸起区及洼陷带15口钻井BHT数据,采用WAPLES等^[6-7]发表的方法,通过经验公式的校正,建立了符合A洼实际情况的经验公式,并根据校正后的数据重建了现今的地温场。

2 涠西南A洼BHT温度校正

2.1 BHT温度校正方法

涠西南A洼目前探井已钻60口,其中开展DST测试的井仅为14口(图1),且分布较为集中,温度数据的缺乏影响了对地温场分布的认知。WAPLES等^[6-7]根据马莱盆地的BHT数据校正过程总结出了经验公式,并在2004年对其进行了拓展。

对于深度小于3 500 m的数据,根据公式(1)对测井温度进行校正:

$$T_c = T_s + f \cdot (T_m - T_s) \quad (1)$$

式中, T_c 为校正温度,°C; T_s 为海底温度,°C; f 为校正因子, T_m 为测井BHT温度,°C。

校正因子 f 的计算公式:

$$f = (-0.146 \ln T_{sc} + 1.699) / (0.572 Z^{0.075}) \quad (2)$$

式中, T_{sc} 为泥浆循环时间, h ; Z 为测温深度, m 。

马莱盆地是一个新生代断陷盆地, 沉积物以碎屑岩为主。据已钻井揭示, 北部湾盆地同样为新生代断陷盆地, 两者之间相似程度较高。据此将上述经验公式引入涪西南 A 洼的 BHT 温度校正中, 并通过现有 DST 温度进行验证, 确定公式的准确性。

2.2 BHT 温度公式校正

将 A 洼 6 口测试井的 BHT 温度通过公式(2)校

正后与实测的 DST 温度对比可知(图 2), BHT 校正后的温度高于 DST 的测试温度, 以 WZ5-X-1、WZ11-X-3 及 WZ10-X-1 井为例, 通过原始的公式校正后, 各井的地温梯度分别为 $4.36\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 、 $3.72\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 及 $3.01\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 实际的 DST 的地温梯度分别为 $3.46\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 、 $3.35\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 及 $2.84\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。回归后的 BHT 数值有所增大且越接近洼陷的边缘, 两者的误差越大, 因此需要对 Waples 的公式进行修正。

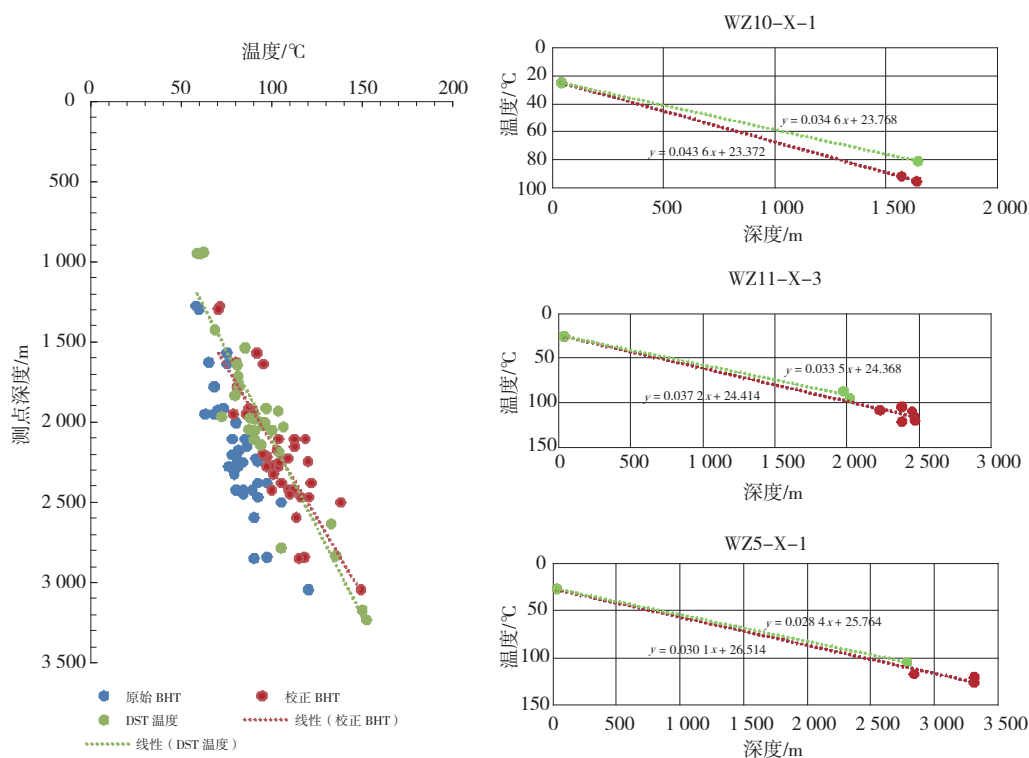


图2 Waples公式校正后的BHT温度与DST温度对比

通过多次最小二乘法迭代, 对校正因子进行微调后, 获得适用于本地区的校正因子 f 的计算公式:

$$f = (-0.1462 \ln T_{sc} + 1.699) / (0.576Z^{0.078}) \quad (3)$$

试算结果显示 BHT 数据非常接近 DST 数据(图 3), 说明修正后的公式适用于涪西南 A 洼的 BHT 数据的校正。拟合原始 BHT 温度得到 WZ5-X-1、WZ11-X-3 及 WZ10-X-1 地温梯度分别为 $4.07\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 、 $3.61\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 及 $2.94\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。将本方法推广至其他井, 共增加了 15 口井的地温梯度数据, 结果如图 4。

3 现今地温场特征及成因分析

将校正后的不同区域的 15 口 BHT 换算地温梯度(图 4)与已有的 DST 换算的数据结合, 绘制了涪西

南 A 洼现今地温梯度分布图(图 5)。从地温梯度的分布情况看, 涪西南 A 洼现今地温梯度值介于 $2.81 \sim 4.02\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 平均 $3.31\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。整体看来 A 洼北坡的地温梯度明显较低, 普遍低于 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 地温梯度的最高值出现在 A 洼的南部, 即二号断裂带的中段区域。A 洼西区的地温梯度略高于东区。

区域性的构造运动决定了现今的地温场分布特征, 受板块俯冲挤压及南海扩张的影响, 北部湾盆地经历了古近纪的多期幕式张裂, 直到新近纪, 断裂活动趋于平静, 盆地整体进入了热沉降阶段^[8-11]。

涪西南凹陷的断裂演化先后经历了 3 期, 分别为初始裂谷期(晚白垩世)、裂陷鼎盛期(始新世)和晚期裂谷期(渐新世)。由于板块之间的相互碰撞,

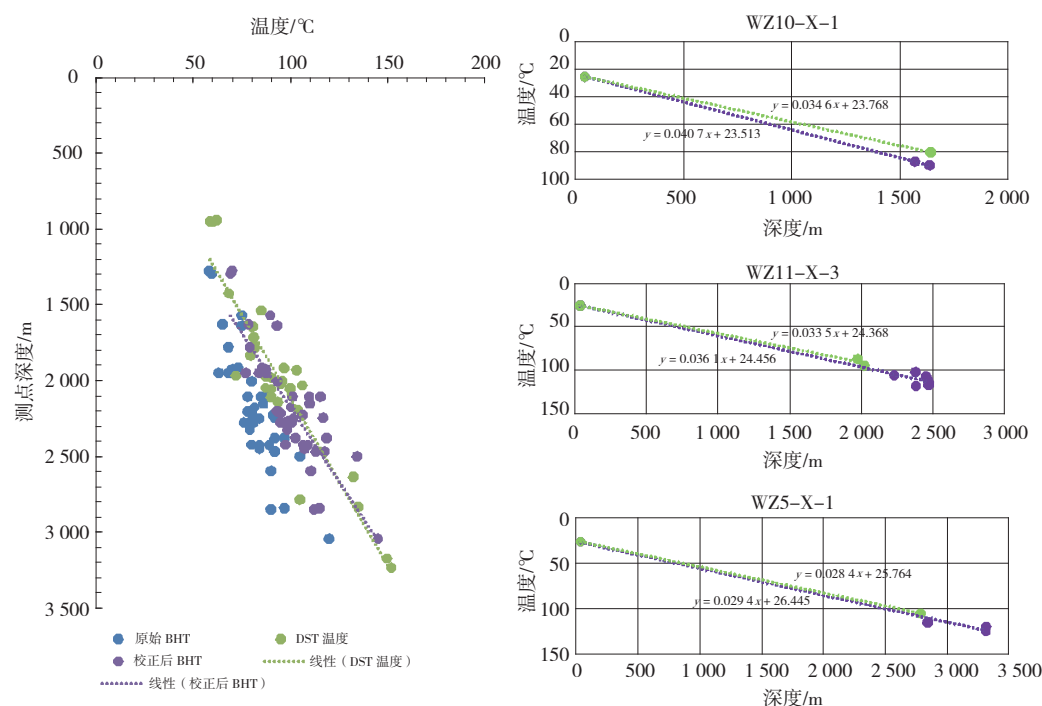


图3 修正公式校正后的BHT温度与DST温度对比

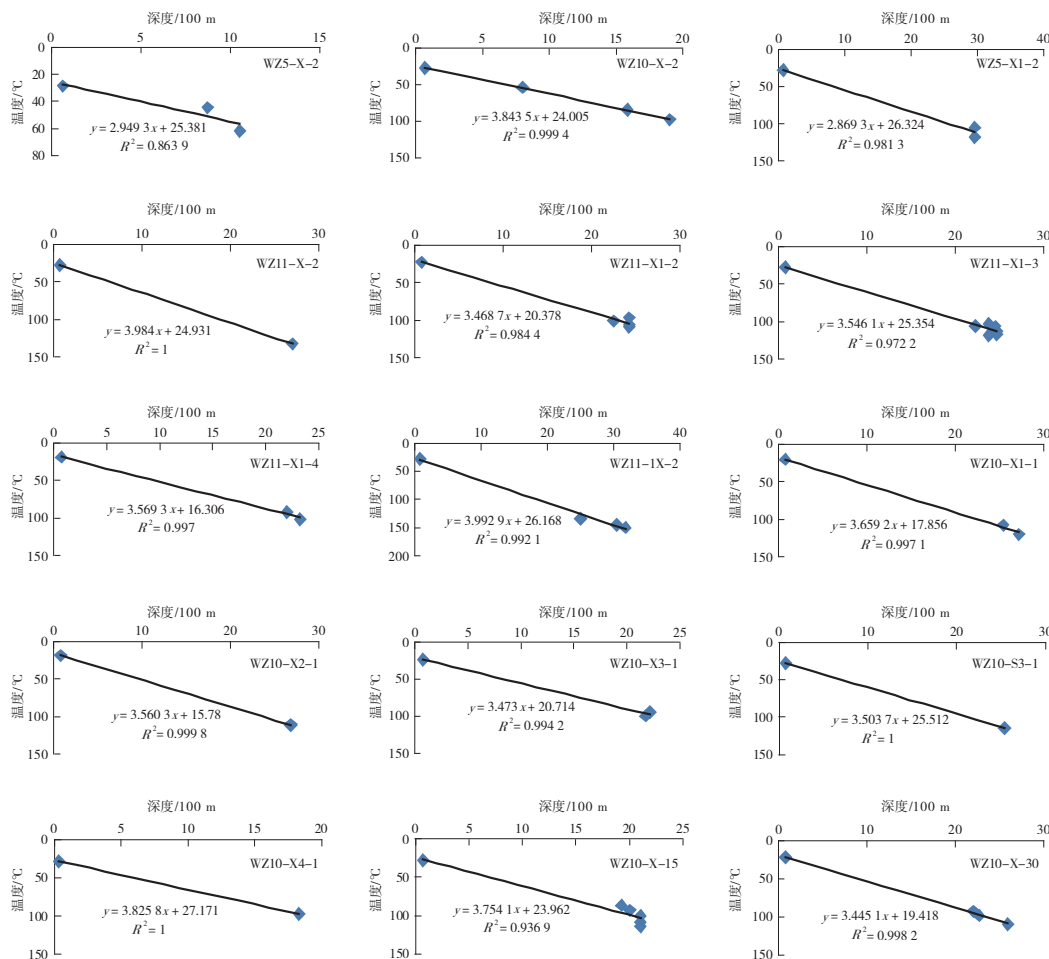


图4 校正后温度拟合的地温梯度

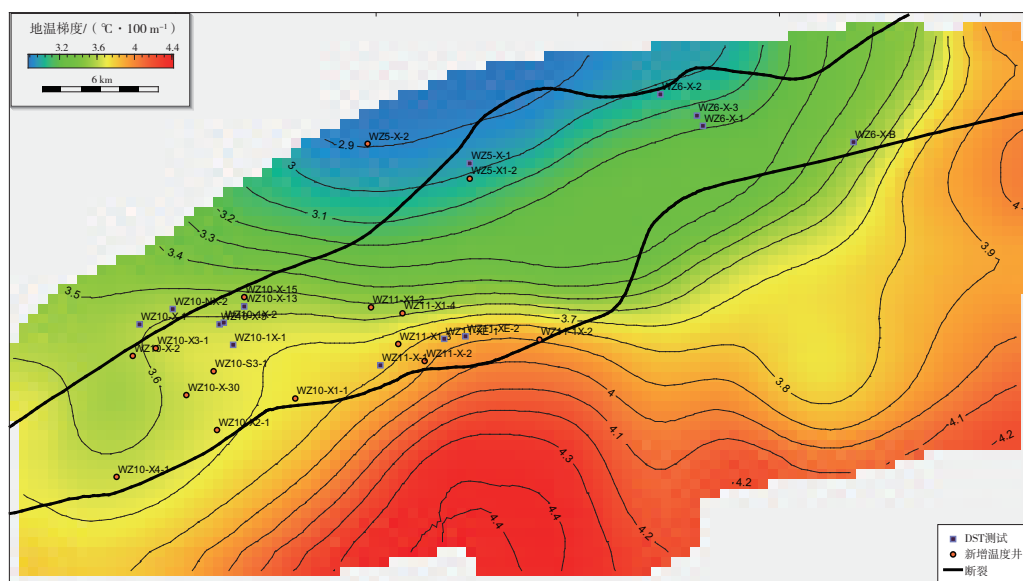


图5 涪西南A洼地温梯度平面分布

原本在深部的地幔不断上涌,岩石圈被拉伸减薄,盆地从断陷阶段转换为凹陷阶段。多次拉张与裂陷使涪西南凹陷地壳厚度向洋盆方向减薄,热流及深部温度分布总体上从陆架到陆坡区增大,形成由北向南逐渐升高的趋势。断裂活动形成的通道,有效沟通了深部流体与浅部地层,A洼南部受二号断裂带活动影响,深部热液不断活动与交换,因此在该区域形成了较高的地温场。

4 涪西南A洼烃源岩热演化研究

4.1 近洼带烃源岩热演化情况

近洼带的虚拟1井单点热演化模拟结果可知(图6),流沙港组二段底部油页岩在古新世晚期(37 Ma)进入生油门限,现今已处于大量生气阶段,整体

的成熟门限深度大约为3 000 m。从生烃模拟可知,流二段底部油页岩存在两期高峰,分别是渐新世末期(25 Ma)和中新世中期(16 Ma)一现今,其中后一期为主要生烃期,生烃速率在10 Ma时达到最大;流二段顶部泥页岩在中新世末(6 Ma)开始生烃,至今仍处于加速生烃阶段。

4.2 二号断裂中段烃源岩热演化情况

由二号断裂带中段虚拟2井单点热演化模拟结果可知(图7),流二段底部油页岩在中新世中期(15 Ma)进入生油门限,现今仍处于大量生油阶段,整体的成熟门限深度大约为2 200 m。从生烃模拟可知,流二段底部油页岩在中新世中后期(11 Ma)开始生烃,现今仍处于加速生烃阶段;流二段顶部泥页岩尚未开始大量生烃。

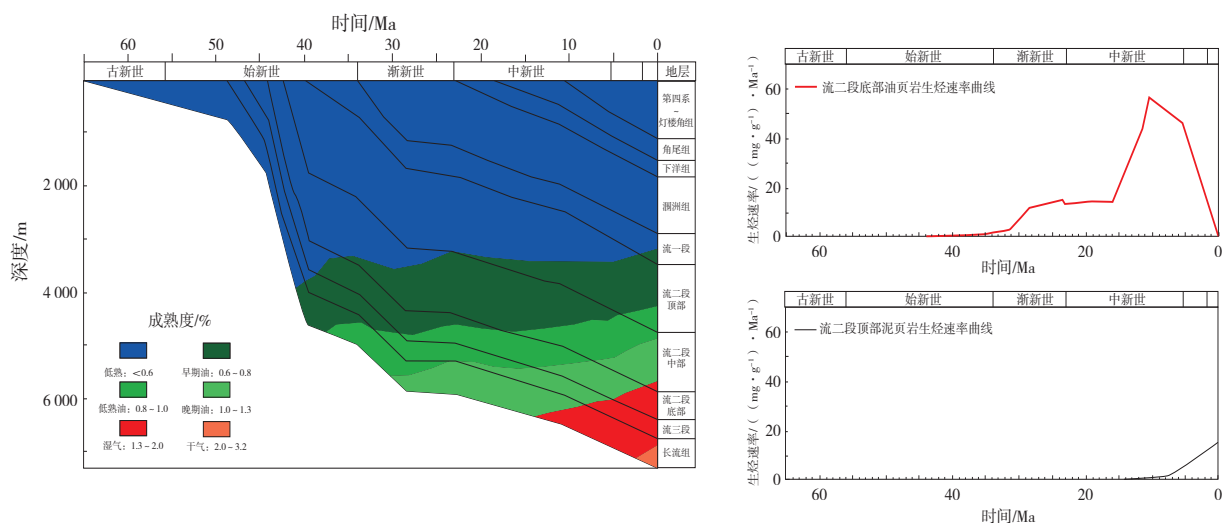


图6 虚拟1井单点埋藏史及生烃速率

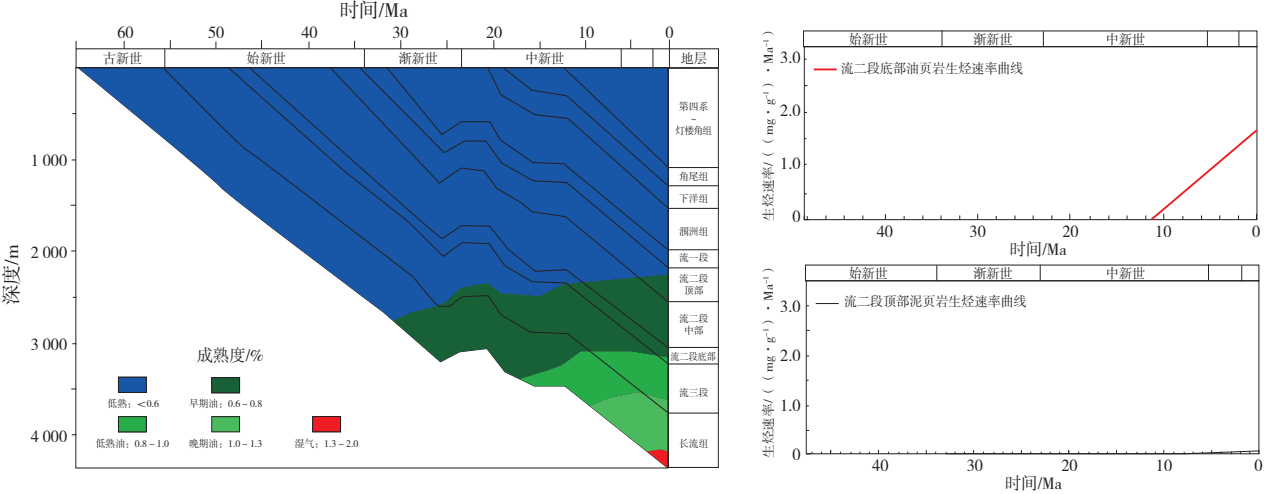


图7 虚拟2井单点埋藏史及生烃速率

4.3 A洼斜坡带烃源岩热演化情况

由斜坡带模拟结果可知(图8),流沙港组烃源岩并未进入生油门限,整体的成熟门限深度大约为2 400 m,研究区烃源岩尚未开始生烃。

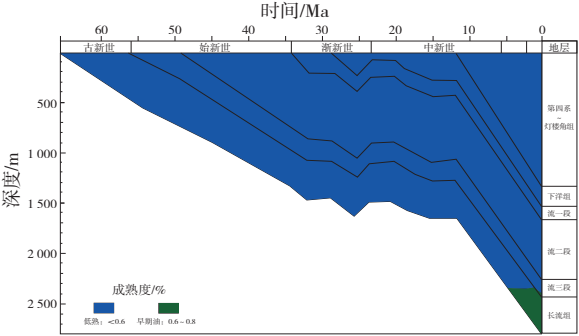


图8 WZ10-S3-1单点埋藏史

综上可知,近洼带尽管地温梯度较低,但由于烃源岩的埋深较大且厚度最大,流二段的顶部泥页岩和底部油页岩均可生烃;二号断裂带中段地温梯度最高,但源岩的埋深相对较浅,仅底部的源岩进入生烃阶段;斜坡带地区烃源岩埋深最浅,主力烃源岩均未进入生烃门限,因此近洼带及二号断裂带

中段区域为有效烃源岩的范围。

5 有利勘探方向

涪西南凹陷A洼流沙港组生、储、盖条件及其相互配置关系好,整体表现为近源成藏特征^[12-14]。从烃源岩的生排烃演化和已发现油藏的分布可知,近洼带的顶部泥页岩和底部油页岩生成的油气均已获得规模的发现,二号断裂带中段的底部油页岩已开始大量生排烃,但其对应的油气藏尚未获得大规模的发现。根据源下油藏的成藏特征可知,二号断裂带中段的底部油页岩生成的油气可直接进入流三段的砂体中,因此位于油气运移必经之路上的涪洲11-X构造将成为A洼未来的勘探方向。

生物标志物参数Ts/Tm可反映油品的成熟度,数值越大成熟度越高^[15]。通过对不同构造分油组的统计可知,无论是在近源到远源,流三段Ⅲ油组原油成熟度整体比Ⅰ、Ⅱ油组偏高,说明Ⅰ、Ⅱ油组紧贴油页岩,既有洼中成熟源岩的贡献,也有二号带本地源岩的贡献(图9)。

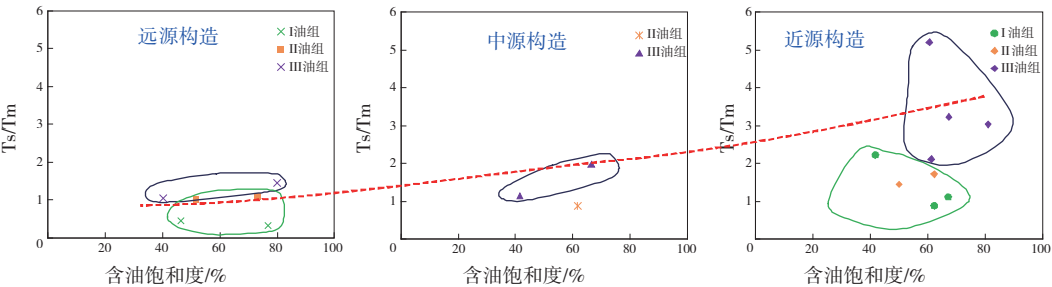


图9 涪洲11-X构造及周缘流三段含油饱和度与Ts/Tm相关性

据此,通过对流三段 I、II 油组砂体的连片追踪,落实总面积近 47 km² 的流三段断块圈闭群(图 10),虽单个圈闭油气储量少,但分布广泛,具有连片含油特征,勘探潜力大,一旦取得规模发现,即可获得新的储量增长点,为涪西南长期可持续勘探奠定良好的基础。

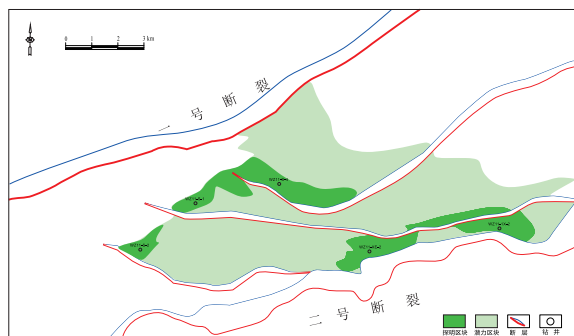


图 10 涪西南 A 洼构造纲要

6 结论

(1)修正后的 Waples 经验公式适用于北部湾盆地 BHT 温度的校正。

(2)涪西南 A 洼地温场整体呈现北低南高、中段高东西段较低的特征,近源及中源构造范围内烃源岩为有效烃源岩。

(3)A 洼油气表现为近源成藏特征,涪洲 11-X 构造位于流二段底部油页岩油气运移路径上,目标区与成熟源岩直接接触,具有连片含油特征,是下一步重点勘探方向。

参考文献:

- [1] 邱楠生,何丽娟,常健,等.沉积盆地热历史重建研究进展与挑战[J].石油实验地质,2020,42(5):790-802.
- [2] 唐晓音,黄少鹏,杨树春,等.南海珠江口盆地钻井 BHT 温度校正及现今地温场特征[J].地球物理学报,2016,59(8):2911-2921.
- [3] 汪集暘.地热学及其应用[M].北京:科学出版社,2015:143-145.
- [4] 康西栋,李思田,李雨梁,等.北部湾盆地今古地温场特征及热史演化[J].长春地质学院学报,1995(2):173-177.
- [5] 郭飞飞,郭小文,孙建峰,等.北部湾盆地涪西南凹陷 C 洼烃源岩热史及成熟史模拟[J].海洋地质与第四纪地质,2010,30(2):87-93.
- [6] WAPLES D W, RAMLY M. A statistical method for correcting log-derived temperatures [J]. Petroleum Geoscience, 2001, 7(3): 231-240.
- [7] WAPLES D W, PACHECO J, VERA A. A method for correcting log-derived temperatures in deep wells, calibrated in the Gulf of Mexico [J]. Petroleum Geoscience, 2004, 10(3): 239-245.
- [8] 颜世永,李月,吴智平,等.北部湾盆地海中凹陷与涪西南凹陷构造特征及成因机制[J].石油学报,2020,41(6):711-722.
- [9] 刘一鸣,吴智平,颜世永,等.中国近海裂陷盆地始新世构造变革的厘定及地质意义:以北部湾盆地涪西南凹陷为例[J].地球科学,2021,46(6):2145-2156.
- [10] 秦春雨,王华,姜平,等.断陷盆地轴向沉积体系空间展布及演化特征——以北部湾盆地涪西南凹陷为例[J].中国矿业大学学报,2020,49(3):542-551.
- [11] 童亨茂,范彩伟,孟令箭,等.中国东-南部裂陷盆地断裂系统复杂性的表现形式及成因机制——以南堡凹陷和涪西南凹陷为例[J].地质学报,2018,92(9):1753-1765.
- [12] 徐新德,王碧维,李旭红,等.北部湾盆地涪西南凹陷流沙港组隐蔽油气藏油源及成藏特征[J].天然气地球科学,2012,23(1):92-98.
- [13] 满勇,魏琳,邓勇,等.涪西南凹陷 A 洼及周缘含油构造油藏地球化学性质及成藏特征[J].石油科学通报,2022,7(2):155-173.
- [14] 姜敏,杨香华,姚光庆,等.涪西南凹陷流三段储层成岩相分析与甜点储层预测[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(3):171-184.
- [15] 路俊刚,陈世加,王绪龙,等.严重生物降解稠油成熟度判识——以准噶尔盆地三台一北三台地区为例[J].石油实验地质,2010,32(4):373-376,386.

(编辑 刘义梅)