

北部湾盆地福山凹陷异常地温特征及其对油气藏的影响

赵迎冬¹,甘华军²,时阳³,陈善斌²,王观宏²

(1. 中国石油冀东油田分公司 勘探开发研究院,河北 唐山 063004; 2. 中国地质大学(武汉) 资源学院,湖北 武汉 430074; 3. 中国石油南方石油勘探开发公司,广东 广州 510240)

摘要:福山凹陷存在与基底构造格局不一致的异常地温特征。通过钻井测温数据与古地温模拟对该区异常地温的特征与形成机制进行了分析,结果表明:上、下地温梯度分层现象为岩性差异造成。基底构造格局不一致的异常地温与福山凹陷东侧全新世以来强烈的火山活动密切相关。福山凹陷深部存在的岩浆囊以及典型的背斜构造、烃类聚集等综合因素形成了福山凹陷异常地温。异常地温形成的时间较短,对有机质成熟度影响较小,但是异常地温中心区域大量古油藏受其影响发生热裂解形成了凝析气藏,地温异常对福山凹陷古油藏产生了较大的影响。

关键词:异常地温 火山活动 古地温 油藏热裂解 福山凹陷

中图分类号:TE112.113

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)03-0040-07

Characteristics of geothermal anomaly and its effect on oil and gas reservoir in Fushan sag of Beibuwan Basin

Zhao Yingdong¹, Gan Huajun², Shi Yang³, Chen Shanbin², Wang Guan hong²

(1. *Exploration and Development Research Institute, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan City, Hebei Province, 063004, China*; 2. *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan City, Hubei Province, 430074, China*; 3. *South Exploration and Development Corporation, PetroChina, Guangzhou City, Guangdong Province, 510240, China*)

Abstract: There is a phenomenon of geothermal anomaly which is inconsistent with the basement structure of Fushan sag. The characteristics and forming mechanism of geothermal anomaly were discussed through geothermal data analyses and palaeogeothermal simulation of the basin. The results indicate that the geothermal gradient stratification between the upper and lower formations is caused by the difference of lithology. The geothermal anomaly, inconsistent with the basement structure, was related to the strong volcanic activity in the east of Fushan sag since Holocene. The deep magma pocket, the typical anticline structure and the accumulation of hydrocarbon are the reasons for the geothermal anomaly in Fushan sag. The formation time of the geothermal anomaly, happened 10 000 years ago, was relatively short and had little effect on organic matter maturity. However, a large number of palaeo-oil reservoirs were thermally pyrolyzed into condensate gas reservoirs at the center of geothermal abnormal area, which had huge effect on palaeo-oil reservoir in Fushan sag.

Key words: geothermal anomaly; volcanic activity; palaeotemperature; reservoir fluid pyrolysis; Fushan sag

地温场是地球内部热能通过导热率不同的岩石在地壳中的表现。油气藏领域中的地温是有机质向石油转化的主要媒介^[1]。中外油气勘探实践证明,世界上许多大油田同高地温梯度带有关^[2]。在

不同的构造单元和不同的地质时期,地温场变化将直接影响油气成藏,因此区域地温场的研究一直是油气盆地研究中的热点^[3-5]。地温场的形成受各种复杂的地质、火山运动、大地构造背景等因素控制,

收稿日期:2016-02-23。

作者简介:赵迎冬(1985—),男,湖北荆州人,工程师,博士,从事盆地分析方面的研究。联系电话:(0315)8766248, E-mail:9li_0123@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“歧口、南堡富油凹陷东营组堆积期构造活动的‘双强效应’、驱动机制及油气意义研究”(41272122)。

在某几个因素相叠加的情况下就会出现地温异常现象,异常高温对有机质向油气转化有着非常大的促进作用。分析地温异常与有机质成熟度异常及两者之间的关联性,就可以进一步揭示盆地的热结构,为盆地的构造演化、热演化过程和油气成藏分析提供依据^[6]。福山凹陷地热背景受北部湾盆地整体形态控制。前人研究认为北部湾盆地平均地温梯度为3.72 °C/hm,其中涠西南凹陷、海中凹陷、乌石凹陷和迈陈—海头北凹陷分别为3.86,3.35,3.50和3.25 °C/hm^[7-8]。有关福山凹陷地温梯度和地温分布特征的研究较少。因此,笔者利用静温与镜质组反射率资料,采用盆地模拟方法发现福山凹陷存在异常地温,并分析异常地温与油气成藏的关系。

1 区域地质背景

福山凹陷位于北部湾盆地东南角,南侧为海南隆起,北入琼州海峡,东临云龙凸起,西与临高凸起相接,是一个新生代形成的箕状凹陷,以古近系分布范围计算,凹陷总面积为2 920 km²,分南部斜坡带、中部构造带、中北断槽带、北部断阶带4个二级构造单元。古近纪的裂陷作用是包括福山凹陷在内的南海诸盆形成的主因,形成了北东向、东西向、北西向的主断裂系^[9]。据钻井资料(图1)显示,盆地长流组、流沙港组、涠洲组。主力烃源岩为流沙港前古近系基底岩性有下古生界陀烈群变质岩、上古

生界石炭系灰岩、中生界燕山期花岗岩、晚白垩系红色砂砾岩安山玢岩,沉积盖层为古近系陆相碎屑岩与新近系海相碎屑岩。古近系由老到新依次为长流组、流沙港组、涠洲组。主力烃源岩为流沙港组二段(流二段)和三段(流三段)暗色泥岩,其中流二段泥岩厚度平均为500 m。福山凹陷火山活动异常活跃,从白垩纪末期到第四纪均有喷发,共有4期、9个旋回、33次喷发^[10]。

2 地温场分布特征

采集福山凹陷15口钻井的测温数据,基本反映了凹陷内地温场的变化。受岩性与构造环境等因素影响,地温在垂向与平面上都表现出异常特征。

2.1 地温梯度的垂向变化特征与成因机理

根据钻井测温数据,福山凹陷不同地区各井的地温梯度均出现分层现象。HD1X, L15X, Y1和M5X井的地温特征显示(图2),4口井均表现出地温分层的现象,即上层地温梯度低,为2.4~3.1 °C/hm,而下层地温梯度较高,为4.0~5.6 °C/hm。不同地区地温分层界线的深度不同,约为2 300~3 000 m。

地温梯度的分层主要与岩性有关^[11]。不同岩性的导热率不同,而地温梯度又与岩层导热率成反比。在热流为定值的条件下,导热率越大,地温梯度越小,而导热率越小,地温梯度越大,因此地层的岩性会影响地温场的变化。福山凹陷涠洲组以上至新近系岩性主体为辫状河与滨浅海相砂岩,砂岩含量高(砂地比大于70%),且砂岩内的流体流通性好,这样会使上层热传导率升高,地温梯度变低,导致福山凹陷上层地温梯度平均小于2.6 °C/hm。而流沙港组主要为湖相—三角洲相沉积,地层中发育大量的泥岩,尤其流二段中的泥岩发育更是占地层的80%以上。且通过对流二段泥岩的声波时差研究发现,部分地区流二段泥岩中存在欠压实现象,因此以流沙港组为主的下层地温梯度基本大于4.0 °C/hm,有些地区甚至达到5.5 °C/hm。地温分层界线一般为流一段的砂泥界限(图2),而Y1井因流沙港组整体砂岩含量较高,且无明显的大套泥岩段,所在地区地温分层不明显。

2.2 地温梯度的平面分布特征

从福山凹陷上、下层地温梯度等值线分布(图3)可以看出,上、下层的地温场分布特征与构造格局并不一致,如东部白莲洼陷地区为深凹带,是全凹陷地温梯度最高的区域,该特征在上、下层地温梯度平面图中表现明显。一般来讲,基底构造格局

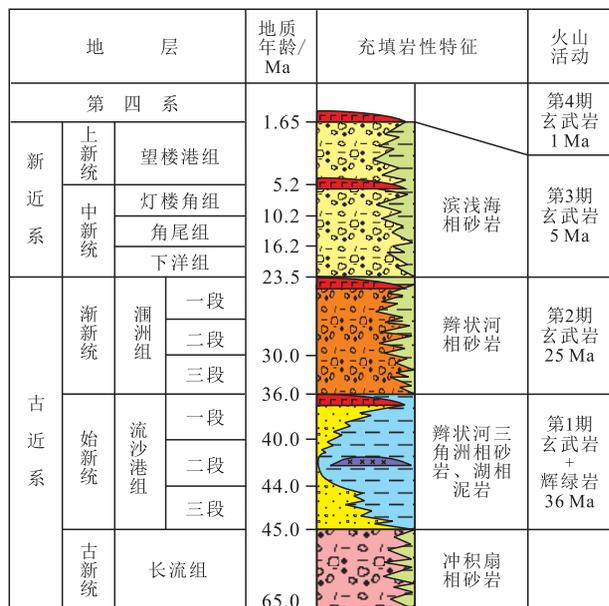


图1 福山凹陷地层综合柱状图

Fig.1 Comprehensive stratigraphic column of Fushan sag

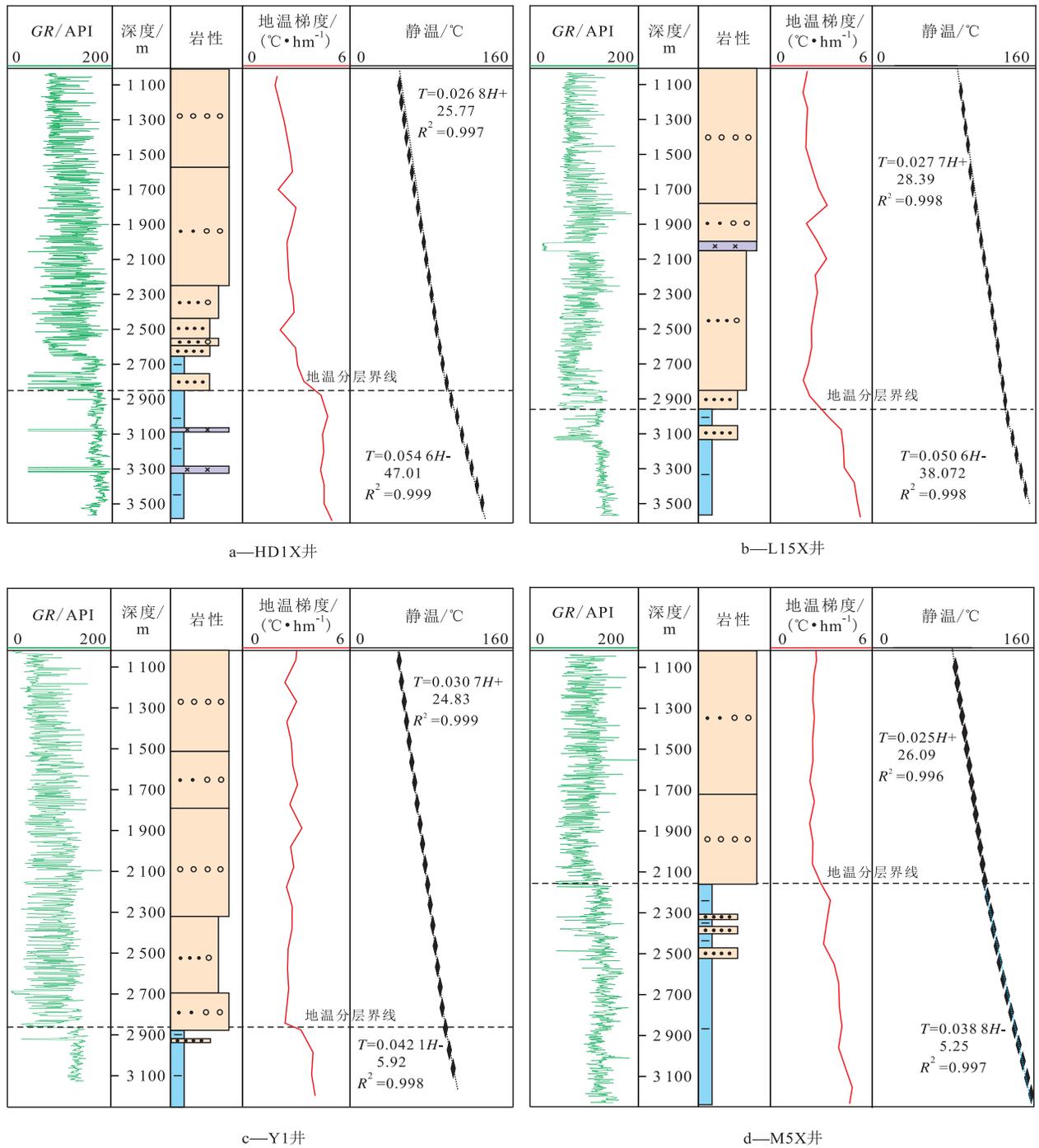


图2 福山凹陷地温梯度垂向分布特征

Fig.2 Vertical distributional characteristics of geothermal gradient in Fushan sag

可以从整体上影响着盆地的地温场分布。以变质岩系为主的基底,其时代老、变质程度高、热导率高、地温梯度低;而盆地沉积岩系,时代新、变质程度低、热导率低、地温梯度相对较高。因此在盆地沉降中心,基底形态呈凹型,地热会向四周散失而不易聚集,加上其上覆的地层厚度较大,会导致盆地深凹区地温梯度为全区最小。因此可以判断福山凹陷现今的地温场分布已不受基底构造控制,存在异常地温。

2.3 古地温梯度分布特征

研究古地温所采用方法为古温标法中的镜质组反射率(R_o)法,古地温恢复采用Sweeney等提出的Easy%R_o法^[12],热流计算采用地温梯度法。结果表明(表1),现今地温梯度模拟出的R_o值要大于实际测量的R_o值,因此现今地温要比古地温高,且升温时间较短,有机质未完全转化。由于古地温梯度分布特征符合正常情况下盆地地温的分布特征^[13-15],说明烃源岩成熟期的古地温属于正常地温。白莲

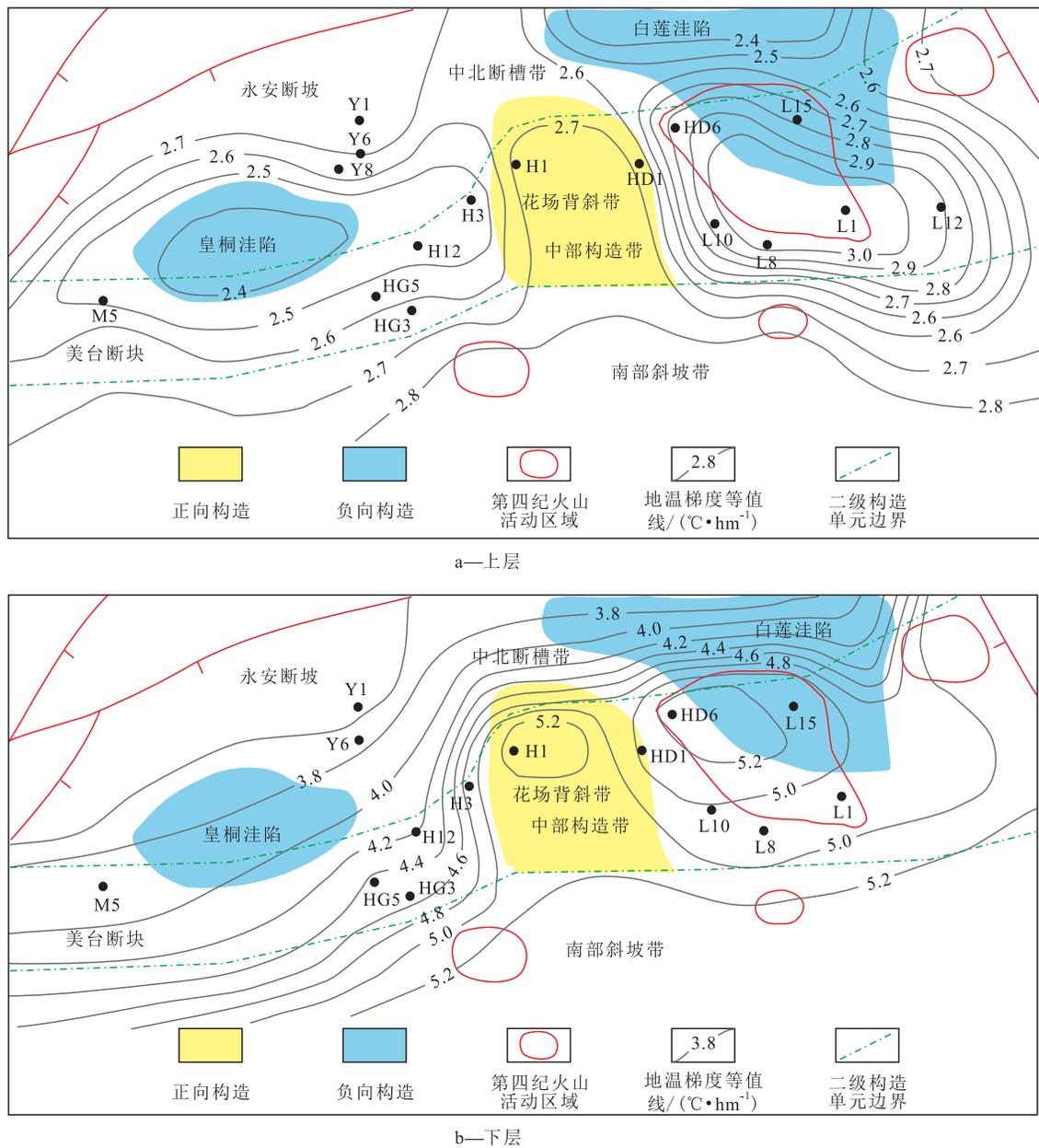


图3 福山凹陷上、下层地温梯度平面分布特征

Fig.3 Plane distributive characteristics of the upper and lower geothermal gradients in Fushan sag

表1 福山凹陷地温梯度分布与演化

Table1 Distribution and evolution of geothermal gradient in Fushan sag

地区	井号	古地温梯度		现今地温梯度	
		上层	下层	上层	下层
白莲洼陷	L15	2.3	3.1	2.77	5.06
花场背斜带	HD1	2.6	3.5	2.68	5.46
美台断块	M5	2.4	3.2	2.50	3.88
永安断坡	Y1	2.9	4.1	3.07	4.21

洼陷古地温梯度最小,但后期地温梯度升高的幅度最大,永安断坡古地温梯度最高,但后期升高的幅度最小,这种升温幅度的差异对应于第四纪火山岩的分布(图3)。由此可以看出,福山凹陷地温场的

演化表现为整体上受近期火山活动的影响而升高。

3 异常地温的影响因素

根据琼北地区地热水的成因研究^[16],发现其地层水主要来源于地层浅部,为大气降水,属于中低温对流型活动。因此福山凹陷异常地温的成因应该首先排除热流体上涌,通过区域地质对比研究,异常地温的控制因素包括岩浆活动、背斜构造、烃类聚集等3个方面。

3.1 岩浆活动

岩浆侵入的年代越新,岩浆保留的余热越多,

对现今地温的影响就越强烈,有可能形成地热异常区。岩浆体规模、几何形态及围岩的产状和热性质对岩浆侵入携带的热量、对地层侵蚀传热、后期热量散失等都有较大的影响。

北部湾盆地,尤其是琼北地区,有大量第四系玄武岩。根据地表第四纪火山的活动时间,其最近1期的喷发时间为距今10 000 a左右的第四纪全新世,且喷发最为强烈^[17]。通过分析火山活动区的钻井资料发现,沉积地层内有相应的辉绿岩侵入,锆石测年显示其侵入时期为36 Ma^[18],因此该区现今地温场不会受火山侵入岩的影响。而琼北地区地震动力学特征研究表明^[19],第四纪频繁而强烈的火山活动可能造成该区深部地壳内存在岩浆囊,是形成该区异常地温的主因。从古今地温梯度的变化(表1)可以得出,离岩浆囊较近的白莲洼陷地温梯度升高幅度较大,而离岩浆囊较远的永安断坡地温梯度的升高幅度较小,并且下层地温梯度升高的幅度远大于上层。这些地热分布特征表明凹陷深部岩浆囊发育对深部地层有更明显加热幅度。

3.2 背斜构造

基底的起伏对地温场有较大影响。一般情况下基底凸起区地温较高,低凹区地温偏低。存在背斜的地区会聚集油气和热量,在存在良好盖层的情况下热量不易散失而形成异常高温,基底的卷入还会加剧这种热聚集。因为平行层面方向上的热导率要比垂直方向的高,在褶皱情况下,热流会向热阻最小(热导最大)的方向移动,使热流流向背斜区,形成异常高温带。福山凹陷就存在这种基底背斜带——花场背斜带,其为低凸起带,能使大量热流在该处聚集形成高温带。加上该区处于火山活动点附近,受到岩浆囊加热作用影响明显,使该区产生了异常高地温(图3)。

3.3 烃类聚集

背斜构造并不是导致花场背斜带异常高温的全部因素,烃类的聚集作用也不容忽视。有机质裂解为烃类的过程和烃类发生氧化的过程都是放热过程,因此在古油藏中会发生烃类氧化热解作用而产生热量。福山凹陷花场油气田为凹陷内最大的油气田,位于花场背斜带中,且流沙港组为主要储层。花场油气田早期形成的古油藏发生热裂解会产生大量热量,使该地区地温持续上升。

4 异常地温对有机质成熟度的影响

有机质成熟度平面分布特征可采用门限深度

($R_o > 0.5\%$)的方式来表现。研究表明白莲洼陷L15井的生烃门限深度为2 650 m,而永安断坡Y1井的门限深度为2 180 m,这种分布特征与基底构造背景符合,同时也与古地温梯度分布一致,因此古地温场才是影响整个福山凹陷有机质演化的主控因素。而后期(10 000 a前)火山活动形成的异常地温,由于相对于有机质向成熟转化所需的时间较短^[20],对有机质成熟演化影响有限,因此形成的有机质成熟度平面分布特征依然保持原始样式。通过前文所得的古地温梯度数据计算出各井烃源岩段平均古温度(表2),并与现今地温梯度对比,发现异常地温造成温度升高幅度最高可达35.9℃。说明在10 000 a的时间里该程度的升温幅度并不能使有机质成熟度完全转化。

表2 福山凹陷烃源岩古今地温变化
Table2 Change in geotemperature of source rock from ancient to modern in Fushan sag

地区	井号	烃源岩平均埋深/m	古地温/℃	现今地温/℃	升温幅度/℃
白莲洼陷	L15	3 600	102.6	138.5	35.9
花场低凸	HD1	3 150	100.1	119.2	19.1
美台断块	M5	2 800	87.0	103.3	16.3
永安断坡	Y1	3 800	137.2	153.1	15.9

5 异常地温对油气藏的影响

异常高地温会对古油藏产生加热作用而使其热裂解,形成原油裂解气。一般认为原油在温度达到150℃后开始表现出不稳定^[21],由高分子的烃类化合物与杂环类混合物逐渐转化为低分子化合物和热解沥青质。花场背斜带为福山凹陷主要油气聚集带之一,流三段更是以凝析气藏为主。然而对比花场地区流三段的烃源岩条件,发现该区烃源岩的成熟度 R_o 仅为1.1%~1.28%^[22],明显没有达到湿气阶段($1.3\% < R_o < 2.0\%$)。即使在凹陷最深洼地区, R_o 也只能达到1.68%,虽然能达到湿气阶段,但是其范围以及整体成熟度太小不能形成花场与白莲地区大量的凝析气藏。因此花场与白莲地区凝析气藏的形成还受到了其他外部因素的影响,也说明该地区凝析气藏的成因实际上有干酪根热裂解与原油热裂解2种。

根据花场背斜带现今地温梯度计算出该地区流三段储层温度为133~160℃,该温度虽然不是很高,但达到了影响原油裂解的温度,而且从第四纪以来持续的火山活动,也会使原油大量热裂解成气。此外,花场背斜带储层中发现大量沥青质,说

明该处在早期为古油藏,后期受异常热地温影响而裂解,形成凝析气藏。根据天然气碳同位素值特征、甲烷—正丁烷的碳同位素分布序列研究,也表明福山凹陷天然气主要为干酪根生烃高峰阶段产物,并与原油的热成熟度相吻合,主要为热降解成因^[23]。并且根据福山凹陷大量流体包裹体测试资料,凝析气藏中的烃类包裹体依然以液态烃为主,基本不含气态烃。而在晚期成藏(中新世末期—上新世早期)的裂纹内依然可以发现荧光色显示为黄色的油包裹体,说明即使是在最高成熟度的晚期成藏过程中,依然以油充注为主,凝析气在更晚的时期形成。由于北部湾盆地区域构造运动早于主要油气成藏期^[24],也早于异常地热形成时期,因此形成的凝析气藏能够保存下来。故笔者认为花场—白莲地区凝析气藏的形成是受到岩浆囊产生的异常地温作用,由原始油藏热裂解产生。

根据异常地温带的分布特征,推测出福山凹陷深部岩浆囊的发育位置(图4)。岩浆囊的分布位置与第四纪玄武岩主要分布区一致,证明该推测位置较为可靠。因异常地温的分布具有离岩浆囊近升温幅度大,离岩浆囊远升温幅度小的特征,其造成的油热裂解型凝析气藏位于岩浆囊附近。而离岩浆囊较远的地区因升温幅度太小,油藏热裂解特征不明显。

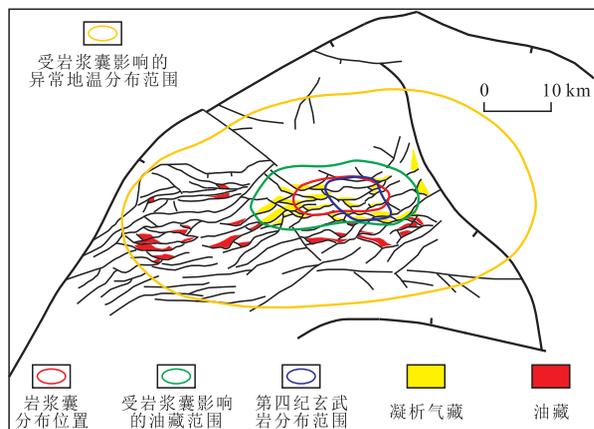


图4 福山凹陷岩浆囊的分布特征及其影响范围

Fig.4 Distribution of magma pocket and its effect in Fushan sag

6 结论

频繁的第四纪火山活动造成福山凹陷花场—白莲地区深部形成岩浆囊,加上背斜构造等因素的影响,使该区域形成异常地温,也造成福山凹陷现今整体地温场高于古地温场;而异常地温形成的时间较晚,对有机质成熟度的影响有限,但对福山凹

陷油藏产生了影响,使岩浆囊附近的古油藏热裂解为凝析气藏。

参考文献:

- [1] 谢鸣谦. 地热流对石油生成的控制作用[J]. 石油学报, 1981, 2(1): 41-48.
Xie Mingqian. The controlling role of terrestrial heat flow in the genesis of petroleum[J]. Acta Petrolei Sinica, 1981, 2(1): 41-48.
- [2] 张厚福. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
Zhang Houfu. Petroleum geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [3] 王良书, 施央申. 油气盆地地热研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 1989: 20-42.
Wang Liangshu, Shi Yangshen. Geothermal study on the oil and gas basin [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1989: 20-42.
- [4] Majorowicz J A, Jones F W, Lam H L. Terrestrial heat flow and geothermal gradients in relation to hydrodynamics in the Alberta Basin, Canada [J]. Journal of Geodynamics, 1985, 4(1-4): 265-283.
- [5] Woodbury A D, Smith L. On the thermal effects of three-dimensional ground water flow [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(B1): 759-767.
- [6] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 2007, 50(增刊): 23-32.
Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Tectonic thermal history and its significance on the formation of oil and gas accumulation and mineral deposit in Ordos Basin [J]. Science China: Series D Earth Sciences, 2007, 50(supplement): 23-32.
- [7] 康西栋, 李思田, 李雨梁, 等. 北部湾盆地今古地温场特征及热演化史[J]. 长春地质学院学报, 1995, 25(2): 173-177.
Kang Xidong, Li Sitian, Li Yuliang, et al. Study on the geothermal characteristics and thermal history of Beibuwan Basin [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1995, 25(2): 173-177.
- [8] 张健, 宋海斌. 南海北部大陆架盆地热结构[J]. 地质力学学报, 2001, 7(3): 238-244.
Zhang Jian, Song Haibin. The thermal structure of main sedimentary basins in the northern margin of the South China Sea [J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7(3): 238-244.
- [9] 李春荣, 张功成, 梁建设, 等. 北部湾盆地断裂构造特征及其对油气的控制作用[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 195-203.
Li Chunrong, Zhang Gongcheng, Liang Jianshe, et al. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbons in the Beibuwan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 195-203.
- [10] 孙谦. 琼北第四纪火山活动与岩浆演化[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2003: 9.
Sun Qian. Quaternary volcanic activity and magma evolution in north Hainan Island [D]. Beijing: Institute of Geology, China Seismological Bureau, 2003: 9.
- [11] 胡济世. 异常高压、流体压裂与油气运移(上)[J]. 石油勘探与开发, 1989, 16(2): 16-22.

- Hu Jishi. Abnormal pressure, fluid fracturing and migration of oil and gas [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1989, 16(2): 16-22.
- [12] 胡圣标, 汪集旸. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展[J]. *地质前缘*, 1995, 2(3-4): 171-180.
Hu Shengbiao, Wang Jiyang. Principles and progresses on thermal regime of sedimentary basins—an overview [J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(3-4): 171-180.
- [13] 王良书, 李成, 刘绍文, 等. 塔里木盆地北缘库车前陆盆地地温梯度分布特征[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(3): 403-407.
Wang Liangshu, Li Cheng, Liu Shaowen, et al. Geotemperature gradient distribution of Kuqa foreland basin, north of Tarim, China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(3): 403-407.
- [14] 熊亮萍, 张菊明. 华北平原区地温梯度与基底构造形态的关系[J]. *地球物理学报*, 1988, 31(2): 146-155.
Xiong Liangping, Zhang Juming. Relationship between geothermal gradient and the relief of basement rock in North China Plain [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1988, 31(2): 146-155.
- [15] 陈墨香, 汪集旸, 汪缙安, 等. 华北断陷盆地热场特征及其形成机制[J]. *地质学报*, 1990, 64(1): 239-252.
Chen Moxiang, Wang Jiyang, Wang Ji'an, et al. The characteristics of the geothermal field and its formation mechanism in the north China down-faulted basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1990, 64(1): 239-252.
- [16] 高芳蕾, 杨小强, 吴国爱, 等. 海南岛温泉特征与地下水成因[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(2): 281-287.
Gao Fanglei, Yang Xiaoqiang, Wu Guoai, et al. Characteristics of thermal springs and genesis of thermal underground waters in Hainan island [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2009, 39(2): 281-287.
- [17] 樊棋诚, 孙谦, 李霓, 等. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 533-544.
Fan Qicheng, Sun Qian, Li Ni, et al. Periods of volcanic activity and magma evolution of Holocene in North Hainan Island [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 533-544.
- [18] 王华, 廖远涛, 林正良, 等. 北部湾盆地福山凹陷古近系构造古地貌、层序地层与沉积充填演化研究[R]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2011.
Wang Hua, Liao Yuantao, Lin Zhengliang, et al. Paleogene study of the tectonic geomorphology, sequence stratigraphy and sedimentary evolution in Fushan sag, Beibuwan basin [R]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2011.
- [19] 刘辉, 洪汉净, 冉洪流, 等. 琼北火山群形成的动力学机制及地震现象的新认识[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 1 804-1 809.
Liu Hui, Hong Hanjing, Ran Hongliu, et al. Dynamic mechanism of volcanic belt and new understanding from earthquake evidence in Northern Hainan Island, China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(6): 1 804-1 809.
- [20] Barker C E. Influence of time on metamorphism of sedimentary organic matter in liquid-dominated geothermal systems, western North America [J]. *Geology*, 1983, 11(7): 384-388.
- [21] Hunt J M. *Petroleum geochemistry and geology* [M]. San Francisco: Freeman W H, 1979.
- [22] 陈善斌, 甘华军, 时阳, 等. 北部湾盆地福山凹陷烃源岩地球化学特征及地质意义[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(1): 14-19, 25.
Chen Shanbin, Gan Huajun, Shi Yang, et al. Geochemical features and geologic significance of source rocks in Fushan sag, Beibuwan basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(1): 14-19, 25.
- [23] 李美俊, 王铁冠, 刘菊, 等. 北部湾盆地福山凹陷天然气成因与来源[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(2): 260-265.
Li Meijun, Wang Tieguan, Liu Ju, et al. Genesis and source of natural gas in the Fushan depression, Beibuwan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(2): 260-265.
- [24] 徐政语, 俞广, 吴炜强, 等. 北部湾盆地东南部构造特征及控油作用分析[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(2): 144-152.
Xu Zhengyu, Yu Guang, Wu Weiqiang, et al. Structural features and controlling on oils in southeastern Beibu Gulf Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(2): 144-152.