

辽河盆地东部凹陷构造—热历史分析

邱楠生* 冯石 廖兴明 李忠飞

(石油大学 北京)

(辽河油田研究院)

摘要 利用磷灰石裂变径迹封闭长度分布作为地质温度计对辽河盆地东部凹陷的构造热历史进行了分析和研究,分析了凹陷内由南到北4口井的单井热演化历史并模拟了东营组顶部的剥蚀量。研究表明,热流演化随地质历史的发展是逐渐减小的,但在凹陷的不同部位减小的程度不同;新生代早第三纪的热流值很高,表明当时的地壳构造运动活动强烈;从东营组地层的剥蚀情况看则凹陷南北差异明显,凹陷南端构造抬升引起的地层剥蚀量比北端大得多。

主题词 磷灰石裂变径迹 热历史 地温梯度 剥蚀量 辽河盆地

1 概况

辽河盆地东部凹陷属于渤海湾中、新生代形成的裂谷盆地,面积3300km²。由于凹陷发育相对较晚,石油地质条件不如西部、大民屯凹陷优越。目前探明的石油地质储量仅占盆地探明储量的很小部分^[1]。凹陷形态狭长与西部凹陷平行展布,自北而南发育牛居、沙岭、驾掌寺、二界沟等四个次级注陷(图1),由于辽河盆地是在古隆起背景上发育的新生代沉积盆地,前新生代地层均是盆地基底,它们经历了漫长的地史演变,构成盆地复杂的基底结构。从构造体制与地热特征明显不同可将辽河盆地分为两个发育时期,即前中生代槽台发育时期和中、新生代断陷发育时期。目前对于盆地的热史已进行了不少研究^[1~4],本次主要利用磷灰石裂变径迹分析技术对东部凹陷的构造热历史进行探讨。

2 磷灰石裂变径迹的构造—热历史分析

为了研究辽河盆地东部凹陷的构造热历史、计算东营末期的构造抬升幅度和地层剥蚀量,在黄100、牛22、大15和荣16井取砂岩、粉砂质泥岩及泥质粉砂岩等岩心样品分离磷灰石进行裂变径迹分析(图1),磷灰石样品的封闭径迹长度测试结果见表1。本研究采用埋藏史—热流地温史的模拟方法,热流模型采用线性模型: $q=q_0(1+\beta t)$, β 为热流因子。磷灰石裂变径迹演化模拟我们采用的是澳大利亚的扇形模型^[5],并应用了等价时间原理来处理裂变径迹的变温退火过程^[6]。用封闭径迹长度分布作为地温计进行模拟计算,模拟径迹长度分布时考虑了物源区径迹记录。研究区地表平均气温取10℃,并设地史上的地表平均气温不变,均取10℃。岩石骨架热导率取2.6W/m·K(其中砂岩3.4W/m·K,泥岩2.0W/m·K),孔隙流体热导率取0.67W/m·K。表2是4口井的分层数据、实测地温梯度值和计算的热流值。



图1 研究取样井的分布图

Fig. 1 Distribution map of studied wells in eastern depression

* 邱楠生,1994年毕业于中国科学院地质研究所,获构造地质学博士学位。现为石油大学(北京)盆地与油藏研究中心副教授。通讯处:北京昌平水库路。邮政编码:102200。

表 1 4 口研究井的磷灰石裂变径迹长度数据

Table 1 The length of apatite fission track in the four studied wells

样品号	样品深度 (m)	实测径迹长度 (μm)	样品号	样品深度 (m)	实测径迹长度 (μm)
黄 100-1	2296.1	10.9±1.8(173)*	荣 16-43	1678.5	9.90±2.0(118)
-2	2376.8	10.6±1.8(156)	-44	1783	10.60±1.9(64)
-3	2384.6	10.6±1.8(160)	-45	1974	12.00±1.8(158)
-4	2469.4	10.3±1.7(189)	-47	2089	12.00±1.3(154)
-5	2758.8	9.3±1.9(172)	-48	2191.4	9.80±2.2(69)
-6	2849.8	8.5±1.8(18)	-49	2285.6	9.50±2.4(58)
-8	3087.5	8.6±2.0(73)	大 15-51	1825	9.95±1.6(41)
-9	3170.5	7.0±2.1(21)	-52	2263.4	10.69±1.75(89)
牛 22-30	2093.3	11.2±1.9(102)	-53	2465	9.84±1.75(144)
-32	2239.3	10.8±1.6(65)	-54	2800	9.58±1.85(147)
-33	2312.4	10.6±1.7(170)	-56	2966.4	9.10±2.1(13)
-34	2476.7	10.3±1.9(200)	-57	3117.4	8.75±1.9(68)
-35	2653.7	9.7±2.1(114)	-59	3235.1	8.40±1.8(100)
-37	2853.0	8.7±2.2(114)	-61	3289.9	6.40±1.3(26)
-38	2945.7	9.1±2.3(84)	-62	3595.3	6.40±1.8(17)
-40	3264.8	7.8±2.5(114)	-64	3793	6.60±2.5(32)
			-65	4109.2	5.77±2.3(20)
			-66	4213.7	5.04±1.52(25)

注:括号内为测量的径迹条数。

2.1 大 15 井构造—热历史分析

大 15 井的样品数最多,从 52 号样品开始径迹长度有规律地减小,直到 66 号样品(4213.7m)径迹长度为 5.04μm。根据裂变径迹退火规律^[7],当径迹长度小于 5.0μm 时,径迹年龄为零,认为径迹完全退火。因此,本井的磷灰石裂变径迹退火带应在

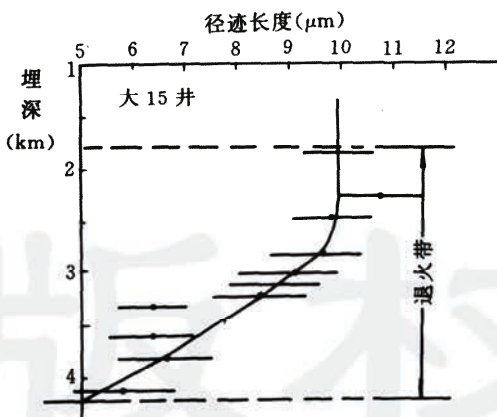


图 2 大 15 磷灰石裂变径迹退火带图
Fig. 2 Annealing intervals of apatite fission track in Well Da-15

表 2 取样井的有关数据(据辽河油田研究院)

Table 2 Data of studied wells(from Institute of Liaohe Oil Company)

底界深度(m)	荣 16	大 15	黄 100	牛 22	底界年龄(Ma)
馆陶组(Ng)	1150	1125	1010	826	24.6
东营组(Ed)	1737	3081	2100	2608	36
沙一、二段(Es ₁₊₂)	1975	3592	2680	2931	38
沙三段(Es ₃)	2474*	4397*	3610.1*	3502*	43
今地温梯度(C/100m)	3.50	2.87	2.87	3.43	
今热流值(mW/m ²)	62.1	56.0	53.0	62.7	

*表示未钻穿。

1800~4200m 之间(图 2)。其中 61 号样品可能由于样品本身的影响或受老地层的混合使径迹长度变短。52 号样品井深 2263.4m,平均径迹长度为 10.69μm,按扇形模型有效加热时间 5Ma 计算,其经历的最高温度为 96℃,比该深度下的今地温 75℃高 21℃,且当时馆陶组以上的地层还未沉积。表明当时其埋藏深度较大,在东营末期有一次急速的抬升运动使其埋深变小。

选择封闭径迹条数大于 70 条的 52、53、54、57、59 号样品,用其封闭径迹长度分布作为温度计进行模拟计算,计算大 15 井自沙三段沉积以来的埋藏历史、东营组末期的抬升剥蚀量及古热流和古地温梯度演化。模拟得到的古热流均高于今热流,由各个样品模拟的结果得到热流线性变化的因子(β)平均为 0.022,即热流随地史的演化逐渐减小。从 43Ma 前的 109.0mW/m² 逐渐减小至现今的 56.0mW/m²。古地温梯度也是逐渐减小的,沙一段末的古地温梯度为 5.4℃/100m,东营组末为 4.25℃/100m,现今为 2.87℃/100m。同时,模拟得到在约 26.8Ma 前有一次构造抬升运动,使东营组顶部地层被剥蚀了 654m,本组现今残余厚度为

是逐渐减小的,沙一段末的古地温梯度为 5.4℃/100m,东营组末为 4.25℃/100m,现今为 2.87℃/100m。同时,模拟得到在约 26.8Ma 前有一次构造抬升运动,使东营组顶部地层被剥蚀了 654m,本组现今残余厚度为

1956m,根据压实校正可得到东营组在剥蚀前的最大埋藏深度为2740m。

2.2 黄100井构造—热历史分析

同样,根据实测封闭径迹长度随样品埋深的变化,得出本井的磷灰石裂变径迹退火带在1800~3600m之间(图3)。选择封闭径迹条数大于150条的1~5号样品来进行模拟计算,得到的古热流均高于今热流。该井热流变化因子为0.03,也即本井的热流自沙三以来随地史演化的变化是按如下方式逐渐减小的: $q=q_0(1+0.03t)$,其中的 t 为距今年龄(Ma), q_0 为 53.0mW/m^2 。模拟得到的平均古地温梯度为: E_{s_1} 末 $6.2^\circ\text{C}/100\text{m}$, E_d 末 $5.2^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。同时,根据这5个样品模拟得到的东营组在26.8Ma左右有一次抬升运动使其顶部被剥蚀了774m。考虑压实作用的影响,东营组的最大沉积厚度在本井曾达到1914.8m,在它沉积的末期受地壳运动构造抬升的影响,顶部遭受剥蚀,现残余厚度仅为1090m。

2.3 牛22井构造—热历史分析

根据实测径迹长度推算出本井磷灰石裂变径迹退火带在1600~4000m之间(图4)。选择径迹条数大于65条的30、32、33、34、35、37号样品进行模拟计算,得到自沙三以来热流演化是随地史的演化逐渐减小的。根据30号样品的模拟结果,东营组末期的古热流值为 78.2mW/m^2 ,随后逐渐减小至现今的 62.7mW/m^2 ,若根据我们的线性模型可推得沙三段沉积时的古热流为 86.9mW/m^2 。而模拟的古地温状况为: $E_{s_{1+2}}$ 末的古地温梯度为 $5.6^\circ\text{C}/100\text{m}$, E_d 末为 $4.52^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。同时,由32号样品模拟得到东营组在26.8Ma时有一次抬升运动,造成东营组顶部遭受剥蚀,剥蚀厚度为611m。考虑压实作用则得到东营组在剥蚀前的最大沉积埋藏深度为2458m。

2.4 荣16井构造—热历史分析

荣16井位于东部凹陷南端靠近二界沟洼陷处,由于样品较小,测得的封闭径迹长度随埋藏深度的变化不太明显。根据模拟结果,本井在东营末期构造运动最为强烈。45号样品的模拟结果表明东营组被剥蚀了1567m(现残余厚度仅为587m)。热流在沙三段以来的地质历史中逐渐变小,但变化比较平缓,至现今仅减小了几 mW/m^2 。

3 辽河盆地东部凹陷构造热演化

综合以上对凹陷内不同构造部位的大15、牛22、荣16和黄100井的磷灰石裂变径迹构造热史分析(表3),可看出热流随地质历史的演化是渐渐减小的,但这几口井由于处于不同的构造部位,热流减小的程度也不一致。其中黄100井在沙三段开始沉积时古热流最高,由线性模型得到当时的热流值可达 121.4mW/m^2 ,沙三末为 113.4mW/m^2 ,逐渐降低至现今的 53.0mW/m^2 。而荣16井的热流则自43Ma以来无太大的变化。另一方面,古地温梯度也是随盆地的演化逐渐减小的,但各井又有小的差别。在盆地断陷拉张发育阶段(沙三时期)最高的古地温梯度可达 $7^\circ\text{C}/100\text{m}$ (黄100井),一般也在 $5.5\sim 6.5^\circ\text{C}/100\text{m}$ 之间,沙一末仍可达 $5.3\sim 5.6^\circ\text{C}/100\text{m}$ (黄100井为 $6.2^\circ\text{C}/100\text{m}$),在东营末期(24.6Ma)平均地

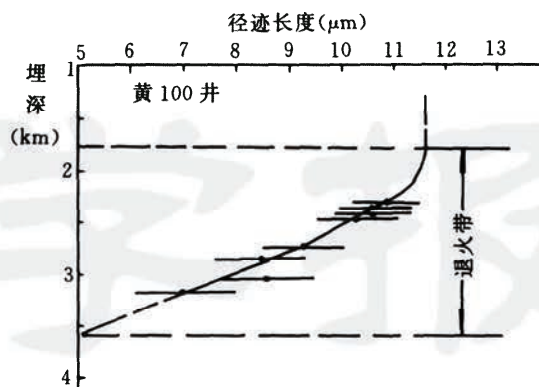


图3 黄100井磷灰石裂变径迹退火带图
Fig. 3 Annealing intervals of apatite fission track in Well Huang-100

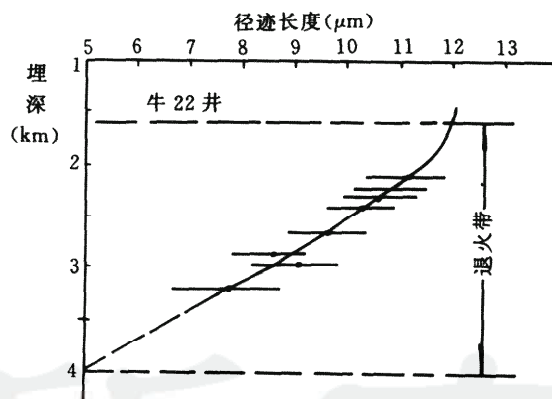


图4 牛22井磷灰石裂变径迹退火带分布图
Fig. 4 Annealing intervals of apatite fission track in Well Niu-22

温梯度仍达 $4\sim 5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。总之,在整个东部凹陷的不同构造部位,在不同时期其古热流和古地温梯度都表现了明显的差异,具体为凹陷内南北之间的差异。在驾掌寺洼陷北部的黄金带地区,始终是整个东部凹陷古热流、古地温梯度最高区。表现在黄 100 井的磷灰石裂变径迹退火带的范围比牛居、大平房地区的窄,为 1800m ($1800\sim 3600\text{m}$)。这可能与该处 Es_{1+2} 时期的火山活动有关。相对而言,牛居及大平房地区的古热流、古地温梯度则较低,牛 22 井沙一末期仅为 $85.7\text{mW}/\text{m}^2$ 。因此,表现在磷灰石裂变径迹退火带上,牛 22、大 15 井大致相同,为 2400m ,但牛 22 井的今地温梯度较高,因此其裂变径迹进入退火带的深度也较浅(表 3)。二界沟洼陷东边的荣 16 井热流值变化最小。总的来说本区的古地温梯度是相对较大的,这一相对高温史对本区油气的生成有利,它使得沙三段生油岩早成熟,同时这也是生油岩在中等历史埋藏深度下得以生油的重要条件。

同时,本区数口井的径迹长度分布对东营组末期的地层抬升、剥蚀等事件反映清楚。在东营组末期(约 26.8Ma)本区有一普遍的地壳抬升事件,使东营组顶部不同程度遭受抬升剥蚀。根据磷灰石裂变径迹分析的结果研究了东营组的剥蚀情况,表明凹陷南端的荣 16 井剥蚀量最大,为 1567m 。说明该运动在此表现最为强烈;而北部的牛 22 井剥蚀量仅为 611m 。以上说明了凹陷内不同部位的热演化有明显的差异,东营组末抬升运动南北差异明显。

表 3 热史研究综合对比结果表

Table 3. Comparison data of thermal-history studies in four wells.

热 史	荣 16 井	大 15 井	黄 100 井	牛 22 井
Es_3 末古热流 (mW/m^2)	63.1	102.4	113.4	86.9
Es_{1+2} 末古热流 (mW/m^2)	63.0	100.3	110.2	85.7
Es_{1+2} 古地温梯度 ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)	5.3	5.4	6.2	5.6
Ed 末古热流 (mW/m^2)	62.7	86.1	92.1	78.2
古地温梯度 ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)	3.97	4.25	5.2	4.52
现今热流 (mW/m^2)	62.1	56.0	53.0	62.7
今地温梯度 ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)	3.50	2.87	2.87	3.43
东营组剥蚀量 (m)	1567	654	774	611
裂变径迹退火带 (m)	-	1800~4200	1800~3600	1600~4000

4 结 论

1. 辽河盆地东部凹陷自沙三段沉积以来,大地热流和地温梯度随地史的演化由高到低,与本区的构造发展相一致。这种热现象反映了新生代早第三纪的地壳拉张构造运动活动强烈。而热流由大到小的演化趋势与本区拉张强度由大到小相一致。

2. 本区数口井的径迹长度分布对东营末期的地层抬升、剥蚀等热事件反映清楚;由裂变径迹长度分布形态反演了东营组末期普遍的一次地壳抬升事件。根据模拟得到了不同构造部位的剥蚀量的差异:荣 16 井剥蚀量最大,达 1567m ;牛 22 井最小,仅为 611m 。说明东营组后期构造运动引起的抬升量南部比北部高 950m 以上。

致谢 感谢周礼成博士在磷灰石裂变径迹模拟中的运算及辽河油田研究院的有关同志在研究中的帮助。中国科学院高能物理研究所翟鹏济研究员测试了磷灰石裂变径迹封闭长度。

参 考 文 献

- 1 廖兴明等. 辽河盆地构造热演化与油气. 北京:石油工业出版社,1996:19~28.
- 2 汪维安等. 辽河断陷地热特征与油气远景. 中国科学院地质研究所集刊. 北京:科学出版社,1992:1~77.
- 3 汪集旻等. 下辽河盆地大地热流. 地质科学,1986(1).
- 4 何丽娟. 拉张盆地的热演化模拟研究——以南海盆地和辽河盆地为例. 中国科学院地质研究所博士论文,1996.
- 5 Laslett G M., P F Green, I R Duddy and A J W. Gleadow. Thermal annealing of fission tracks in apatite. 2. A quantitative analysis. Chemical Geology (Isotope Geoscience Section), 1987, 65: 1~13.
- 6 Goswami J N., Jha R and Lal D Quantitative treatment of annealing of charged particle tracks in common rock minerals. Earth Plant. Sci. Lett. 1984, 71: 120~128.
- 7 Gleadow A J W, Duddy I R. A natural long-term track annealing experiment for apatite. Nucl. Tracks, 1981, 5: 169~174.

(本文收到日期 1997-03-14 编辑 张 怡)

and the major geological factors are also different. Under general geological conditions for nonmarine shale source rocks in China, the relative amounts of natural gas expelled in separate-phase, in oil solution, in water solution and by diffusion are about 49%, 11%, 18% and 22%, respectively; the relative amounts of liquid oil expelled in separate phase, in water solution and by diffusion are about 92%, 2% and 0%, respectively.

Key words basin modeling uncertainty analysis hydrocarbon expulsion source rock evaluation geological factor evaluation

THE FORMING MECHANISM AND PETROLEUM GEOLOGY OF TERTIARY LUNPOLA BASIN, TIBET ACTA 1998, 19(2)

Ai Huaguo et al. (*Comprehensive Research Institute of Petroleum Geology, MGMR*)

The right-handed strike-slip pull apart of Zan-Zi fault in the Ban-Nu main fault zone is the dynamic mechanism for the formation of Lunpola Basin. Features of petroleum geology in the Basin are as follows: (1) The tectonic framework today is constituted by south-north divided belts, east west divided blocks. (2) The Niubao formation is thick and widely distributed and the grain size and color from bottom to top are coarses-fine-coarse and red-black-red. The Dingqinghu formation is a series of fine-grained black and elastic rocks, limited in distribution. (3) The source rocks are black, fine-grained and thick, extensive in distribution. The organic matter is in good type, matured and high in transformation ratio. (4) The reservoir sand bodies are extensively distributed, and good in porosity and permeability. (5) Various types of oil and gas shows are widely distributed. The crude oil is heavy in specific gravity, low in viscosity, high in wax and low in sulfur, and with intensive changes after its generation.

Key words Lunpola Zan-Zi fault strike-slip-pull-apart

SEALING ABILITY OF MUDSTONE CAPROCK OF QINGSHANKOU FORMATION AND THE CONTROL TO OIL ACCUMULATION IN TWO RIVERS AREA ACTA 1998, 19(2)

Bai Xinhua et al. (*Daqing Petroleum Institute*)

The sealing ability of mudstone caprock of Qingshankou formation in the area between Nenjiang River and Songhuajiang Rivers is comprehensively studied based on the macroscopic and microscopic sealing ability, and so is the T_2 fault. It is considered that its sealing ability is good to better in the area, and the period of forming the ability is earlier than that of the oil expulsion by itself. Its sealing ability for the Fu-Yang oil reservoirs is effective. It is favorable for the accumulation and preservation of oil in the Fu-Yang reservoir is large scale, and is one of the important factor, which made many oil fields still could be found in the Fu-Yang reservoir in the area.

Key words Qingshankou formation mudstone caprock control closed reservoir

AN ANALYSIS ON THE THERMAL HISTORY OF EASTERN DEPRESSION IN LIAOHE BASIN ACTA 1998, (2)

Qiu Nansheng et al. (*Petroleum University*)

Apatite samples from four wells in the eastern depression of Liaohe Basin were analyzed by fission track method. The lengths of confined fission track were used as a geothermometer to analyze the thermal history of each of the four single well and the erosion thickness of Dongying formation. Thus, the thermal-tectonic evolution of the depression understood by interpretation of the results. It points out in this paper that paleoheat flow decreases with the evolution of the basin, but inconsistent in different part of the depression. The studies showed that the heat flow in the Paleogene period was very high ($\sim 113.4 \text{ mW/m}^2$), which was consistent with the intensive tectonic movements. The erosional thickness of Dongying formation is larger in the southern part of the depression (1567m) than that of the northern (611m).

Key words apatite fission track thermal history thermal gradient erosion thickness Liaohe Basin

NEW METHODS FOR SUPPORTING DECISION-MAKING IN PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT