

海拉尔盆地呼伦湖凹陷热演化史恢复

崔军平,任战利,李金翔,阴玲玲,王文青

(西北大学 地质学系 大陆动力学国家重点实验室,陕西 西安 710069)

摘要:呼伦湖凹陷是海拉尔盆地油气勘探的重要接替区。该凹陷沉积厚度大,地层发育全,主要烃源岩层是南屯组,其次是铜钵庙组和大磨拐河组,生油条件十分优越,然而至今尚未对其热演化史进行系统研究。呼伦湖凹陷现今地温梯度为 $30.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,属于中温型地温场。根据镜质体反射率、包裹体测温和磷灰石裂变径迹法恢复呼伦湖凹陷的古地温梯度为 $42\sim 56\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,大于现今地温梯度值,古地温高于今地温。古地温恢复及热史模拟表明,呼伦湖凹陷在伊敏组沉积晚期(约 90 Ma)达到最高古地温,古近纪-新近纪以来是一个降温过程,下白垩统烃源岩热演化程度主要受古地温场控制。古地温演化史结合含油储层自生伊利石测年结果表明,伊敏组沉积晚期应该是呼伦湖凹陷一次非常重要的油气成藏期。伊敏组沉积晚期凹陷发生抬升剥蚀,地层温度降低,烃源岩埋深变浅,生烃强度减弱。

关键词:磷灰石裂变径迹;地温梯度;热演化史;呼伦湖凹陷;海拉尔盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Reconstruction of geothermal history in Hulunhu Depression, Hailaer Basin

Cui Junping, Ren Zhanli, Li Jinxiang, Yin Lingling, Wang Wenqing

(National Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: The Hulunhu Depression with thick deposits and well-developed strata is an important replacement exploration area in the Hailaer Basin. The Nantun Formation is its primary hydrocarbon source rock and the Tongbomiaoyao and Damoguaihe Fms are the secondary source rocks. These source rocks have supreme oil-generating conditions, but no systematic study has been performed on its geothermal evolutionary history so far. The present geothermal gradient is $30.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ in the Hulunhu Depression, belonging to the moderate temperature field. The average paleogeothermal gradient recovered by the vitrinite reflectance, homogenization temperature of fluid inclusions and apatite fission track method is about $42\sim 56\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, obviously higher than the present geothermal gradient. That is to say, the paleogeotemperature is higher than the present geotemperature. The paleogeotemperature reconstruction and geothermal history simulation showed that the Hulunhu Depression reached the maximum paleogeotemperature in the Late Yimin period (90 Ma), and entered a cooling process since the Paleogene and Neogene. The maturity of the Lower Cretaceous hydrocarbon source rocks was mainly controlled by the paleogeothermal field. The results from the studies of the paleogeothermal evolutionary history and the authigenic illite dating of reservoirs showed that the Late Yimin period was a very important stage for hydrocarbon accumulation in the Hulunhu Depression. In this period, the depression uplifted and got denudated, the temperature of strata reduced, the burial depth of source rocks decreased, and the intensity of hydrocarbon generation weakened.

Key words: apatite fission track, geothermal gradient, geothermal evolutionary history, Hulunhu Depression, Hailaer Basin

沉积盆地热演化史与油气生成和分布有密切的关系,也是油气资源评价的基础。热演化史恢复的精度对油气藏形成期次的确定有限定作用,可以提高油气藏形成期次研究的精度^[1-8]。海拉尔盆地在乌尔逊凹陷、贝尔凹陷和呼和湖凹陷热演化史方面作了大量的研究工作,也已经在这3个凹陷取得了油气突破,年产量超过 $50\times 10^4\text{ t}$,而在其他凹陷热演化史研究则较为

薄弱。海拉尔盆地是具有走滑性质的中、新生代拉张型盆地,在盆地的不同构造单元热演化史明显不同。热演化史的不同必然导致其生烃史及成藏史的差异,这也是制约其他凹陷实现油气突破的重要因素。呼伦湖凹陷是海拉尔下一步勘探的重要接替区。该凹陷现在已有7口钻井,在伦2井见到一定油气显示,在海参3井已获工业气流,压裂产气量 $25\,433\text{ m}^3/\text{d}$,产油

收稿日期:2014-07-27;修订日期:2014-08-22。

第一作者简介:崔军平(1978—),男,博士、讲师,盆地热演化史与油气成藏研究。E-mail: cuijp@nwnu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41002040);大陆动力学国家重点实验室课题资助项目(BJ11055)。

0.072 t/d,表明呼伦湖凹陷具较好的油气勘探前景,然而至今尚未对呼伦湖凹陷热演化史进行过系统的分析研究。本文通过系统地补充新资料,采集的新样品分析,对呼伦湖凹陷热演化史进行了恢复,并对热演化史与油气的关系进行了深入研究。

1 区域地质概况

海拉尔盆地属于中亚-蒙古地槽的一部分,以德尔布干断裂为界。西面属于额尔古纳褶皱系,其下部为早加里东期的兴凯运动褶皱,镶嵌在西伯利亚地台边缘,古生代地槽向南迁移,额尔古纳处于长期隆起状态,晚古生代经海侵形成上部地层,经海西运动强烈影响,被海西期花岗岩所吞没,破坏了前期构造面貌,晚古生代地层轻度变质,构造走向略呈北东向;东面属于内蒙-大兴安岭褶皱系,海西运动为其主旋回,区内主要出露中、晚古生界,走向呈弧形褶皱面貌。海拉尔盆地即处在两个褶皱系的接壤部位,西伯利亚板块与塔里木-中朝板块近南北向的相向运动,使其间的地槽缩小至封闭形成了盆地基底。基底岩性西部主要为前古生界深变质岩,东部主要为古生界轻变质岩。晚侏罗世以后,东北地区进入地壳拉张背景和断陷盆地地形成为主的时期。海拉尔盆地是在上述大地构造背景上发育起来的,可称其为叠置在海西褶皱基底上的中、新生代断陷盆地。

海拉尔盆地主要经历了地壳隆起、断陷阶段、坳陷阶段和萎缩阶段4个演化阶段^[9-10]。呼伦湖凹陷位于海拉尔盆地西北部(图1),呈北东向展布,面积为3 560 km²,是受扎赉诺尔断裂和阿尔公断裂控制的一个典型双断型凹陷。从地震和重磁资料看,整体上为2个洼陷、3个凸起的构造格局,沉积厚度均在4 000 m以上。本区发育的地层有兴安岭群、铜钵庙组、南屯组、大磨拐河组和伊敏组。主要烃源岩层是南屯组,其次是铜钵庙组和大磨拐河组。

2 现今地温场

盆地现今地温场是古地温恢复的基础^[11-13]。用于地温场研究的井温资料一般有系统测温和试油温度两类。钻井过程中,由于地层打开、泥浆注入等因素的影响,地层原始地温的分布遭到破坏。完井后,地下温度的分布逐渐趋于平衡,这时,在井孔中温度达到平衡的条件下,沿井身由上而下系统测得的温度资料为系统测温资料。由于系统测温所获得的井温数据和实际地温接近,能客观地反映地层的真实温度,因此它对于盆地原始地温场的评定非常重要。

本次利用呼伦湖凹陷重要一口参数井海参3井的地层系统测温资料,对呼伦湖凹陷现今地温场作了进一步的深入研究。从呼伦湖凹陷温度-深度关系图

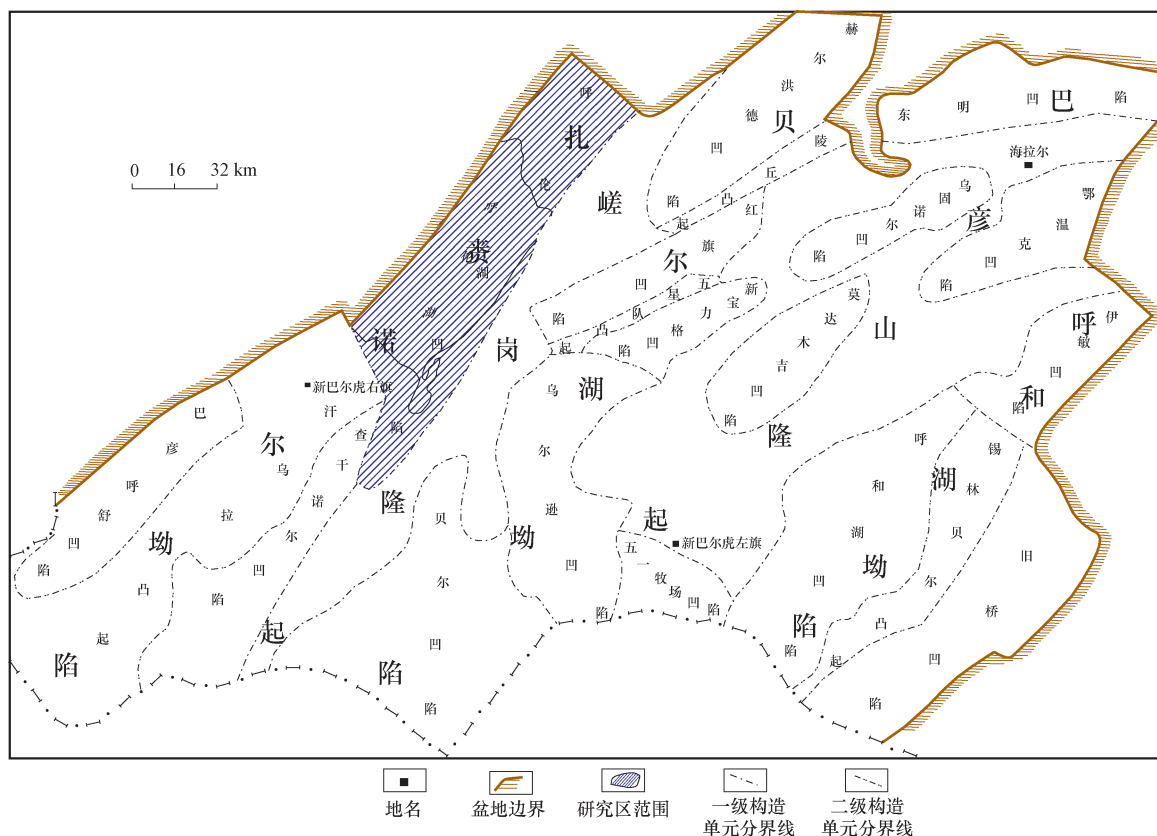


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

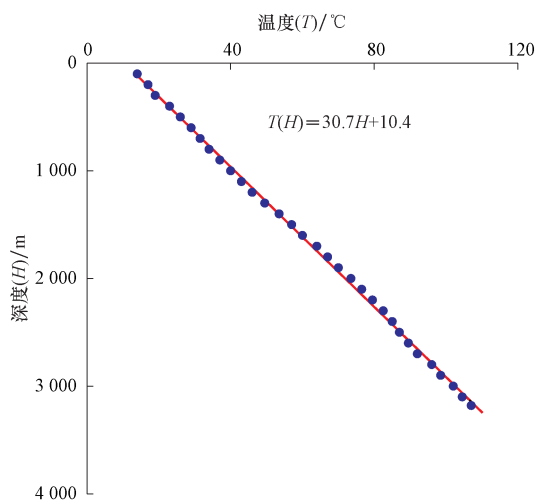


图2 呼伦湖凹陷地层测温与深度关系

Fig. 2 Measured geotemperature vs. depth in the Hulunhu Depression

(图2)可以看出,测温数据的总趋势是温度随深度的增加而线性升高,表现出典型的传导型地温场特征。

通过对地层温度(T)与深度(H)关系作回归分析可知,呼伦湖凹陷代表性地温梯度为 $30.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,接近全球沉积盆地平均地温梯度($30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$),小于松辽盆地现今平均地温梯度($37\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$),接近鄂尔多斯盆地($30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$)。与全国各含油气盆地的地温梯度相比,呼伦湖凹陷的地温梯度值处于高温值与低温值之间,属于中温型地温场^[14-18]。

3 热演化史研究

3.1 镜质体反射率剖面解释与古地温梯度计算

利用镜质体反射率(R_o)来研究古地温场,这在国内外许多中、新生代盆地都取得了良好的应用效果^[19-29]。在系统收集了呼伦湖凹陷伦D1井、伦D2井、秃1井和海参3井镜质体反射率数据的基础上,对镜质体反射率与深度的关系进行了分析。结果表明:镜质体反射率值随深度的增大而增加,呈明显的线性变化趋势(图3)。海参3井位于凹陷的较深部位,相同深度的 R_o 值最低,代表该井区剥蚀厚度也小。剥蚀厚度是根据 R_o 外推法求取的, R_o 最低值取 0.2% ,计算的早白垩世伊敏组沉积之后的剥蚀厚度总体较小,一般不超过 $1\text{ }000\text{ m}$ (图3)。

本次利用Barker和Pawlewicz建立的最大埋藏温度($T_{\max}$)与平均镜质体反射率(R_m)之间的关系式 $\ln R_m = 0.009\ 6T_{\max} - 1.4$,求得区内地层经历的最大古地温^[30]。古地温与深度基本上为线性关系,古地温随深度增加而增大,古地温高于今地温(图4)。

将根据镜质体反射率计算的最大埋藏温度与深度

进行回归计算,求得海参3井古地温梯度为 $56\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,伦D1井古地温梯度为 $42\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,伦D2井计算的古地温值偏大为 $112\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (图5)。

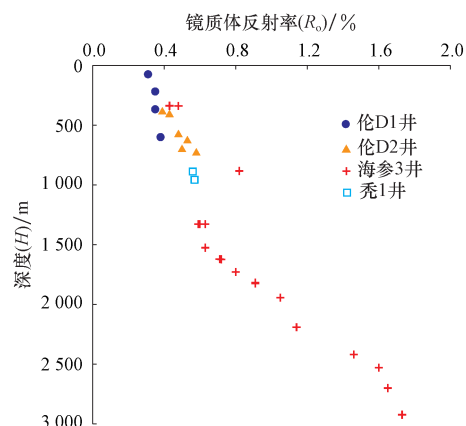
图3 呼伦湖凹陷镜质体反射率 R_o 与深度关系

Fig. 3 Vitrinite reflectance (R_o) vs. depth in the Hulunhu Depression

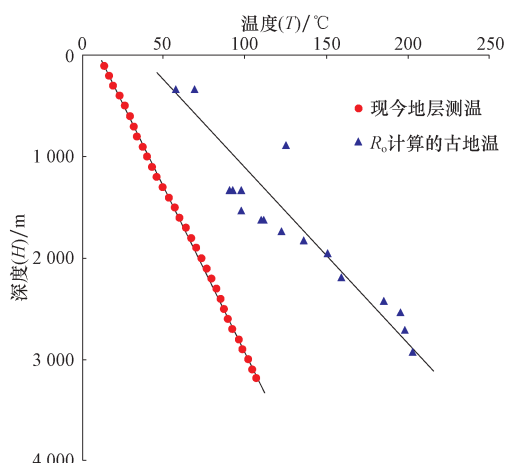


图4 呼伦湖凹陷海参3井古今地温对比

Fig. 4 Comparison between present geotemperature and paleogeotemperature in the Well Haicun 3 in the Hulunhu Depression

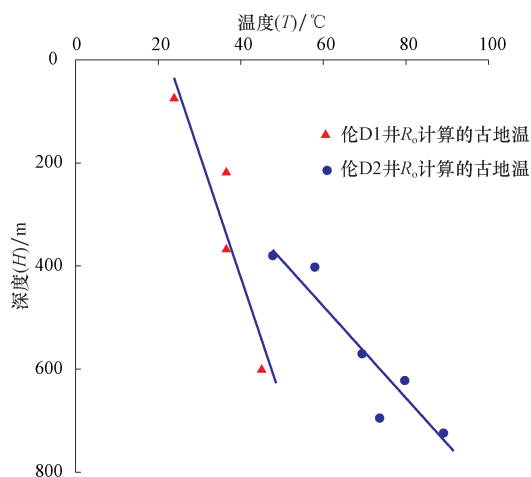


图5 呼伦湖凹陷伦D1井和伦D2井古地温对比

Fig. 5 Comparison of paleogeotemperature between the Well Lun D1 and Well Lun D2 in the Hulunhu Depression

表1 呼伦湖凹陷包裹体测温结果

Table 1 Results of temperature measurement of fluid inclusions in the Hulunhu Depression

井号	深度/m	层位	岩性	均一温度/℃			含盐度/%	形成压力/ MPa
				分布范围	平均值	测点个数		
海参3	858.43~965.10	大磨拐河组	粗砂岩	70~95	82.3	14	1.8~2.8	28.5~31.0
海参3	1 522.48~1 530.00	南屯组	砂岩	92~106	99.4	8	4.4~7.1	49.0~58.0
海参3	1 817.49~1 828.49	南屯组	中-粗砂岩	80~95	89.3	7	5.2~7.6	40.0~42.5

3.2 包裹体测温结果反映的古地温信息

利用包裹体均一温度来研究古地温场,这在国内外许多盆地都取得了良好的效果^[31-34]。在对呼伦湖凹陷重要的参数井海参3井选取3块包裹体发育较好的含油砂岩样品,对其中与烃类包裹体同期形成的盐水包裹体进行了均一温度测定。包裹体主要分布于石英微裂隙、石英脉和胶结物方解石中,以线性分布为主要特征,镜下为无色或浅黄色,可见椭圆形、三角形和不规则形,气液比为0.5%~15%,主要为液烃、气液烃及气烃包裹体,大小在1~4 μm。

呼伦湖凹陷海参3井800~1 000 m井段现今温度为34~40℃,其大磨拐河组856.43~965.10 m井段包裹体均一温度为70~95℃(表1);海参3井1 500~1 900 m井段现今温度为57~70℃,其南屯组1 522.48~1 828.49 m井段包裹体均一温度为92~106℃。海参3井古今地温对比表明,古地温高于现今地温。海参3井剥蚀厚度为254 m,用求出的剥蚀厚度恢复了最大古埋深,结合包裹体均一温度估算海参3井的平均古地温梯度约为47℃/km。

3.3 磷灰石裂变径迹恢复古地温

磷灰石中所含的^U²³⁸裂变时产生的碎片在磷灰石中会形成裂变径迹,在地质时间内随温度升高,径迹长度减小,密度降低。在1~100 Ma的时间内,磷灰石裂变径迹的退火温度大约为60~150℃,此温度正好与生油窗(60~130℃)比较接近,故其被广泛地用于盆地古地温场研究^[35-39]。Naeser(1979)划分了在连续沉积,且目前正处在最大埋藏地温状况下磷灰石裂变径迹年龄-深度(或温度)图上3个不同的带,从浅到深依次为:①未退火带,地层尚未受到退火作用,年龄反映物源的时代,大于或等于地层年龄;②部分退火带,地层已受到退火作用,年龄逐渐减小,小于地层年龄;③完全退火

带,年龄等于零,地层达到完全退火^[40]。在呼伦湖凹陷采集海参3井裂变径迹分析样品3块,样品经粉碎研磨至60~150目(0.10~0.25 mm),清洗烘干,用磁选、浮选等方法初选,在双目镜下挑选出磷灰石单矿物,利用环氧树脂将其制成光薄片,在恒温25℃的6.6% HNO₃溶液中蚀刻30 s,揭发出自发径迹;然后采用外探测器法,将低铀白云母片贴在光薄片上,与SRM612标准铀玻璃一起置入反应堆照射;最后将白云母外探测器置于25℃的HF溶液中蚀刻30 min,揭示诱发径迹。径迹统计采用Autoscan裂变径迹测试系统完成,最后根据Zeta公式计算年龄。测量结果见表2。

呼伦湖凹陷裂变径迹年龄及裂变径迹长度随深度增加而减小。海参3井这3个样品裂变径迹年龄为29.9~86.0 Ma,远小于其地层年龄140.7~125.0 Ma,已受到退火作用。在深度2 200 m左右,裂变径迹年龄减小到零。因此,深度小于900 m为未退火带,深度900~2 200 m为部分退火带,深度大于2 200 m为完全退火带,估算的退火温度约为70~125℃(图6)。海参3井1 817.49~1 828.49 m井段样品裂变径迹长度分布为典型的双峰型,代表发生了一次热事件。结合海参3井岩性剖面分析,海参3井在深度2 000 m左右发育火成岩层,双峰型应代表发生了一次岩浆喷发热事件。呼伦湖凹陷海参3井900~2 100 m井段现今地温为37~76.5℃,古地温明显高于现今地温。根据裂变径迹资料估算的古地温梯度约为42℃/km,明显高于现今地温梯度值。

3.4 古地温梯度确定

镜质体反射率法计算的古地温梯度值为42~56℃/km,包裹体测温确定的古地温梯度值为47℃/km,磷灰石裂变径迹法恢复的古地温梯度值为42℃/km。以上3种方法恢复的古地温梯度值

表2 呼伦湖凹陷磷灰石裂变径迹数据

Table 2 Data of apatite fission track dating in the Hulunhu Depression

井号	深度/m	层位	颗粒数	径迹年龄/Ma	径迹长度/μm
海参3-1	2 073.16~2 079.46	铜钵庙组	27	29.9±1.8	6.7±2.1
海参3-2	958.43~965.10	大磨拐河组	19	86.0±3.0	10.4±3.2
海参3-3	1 817.49~1 828.49	南屯组	22	57.0±3.5	9.5±2.5

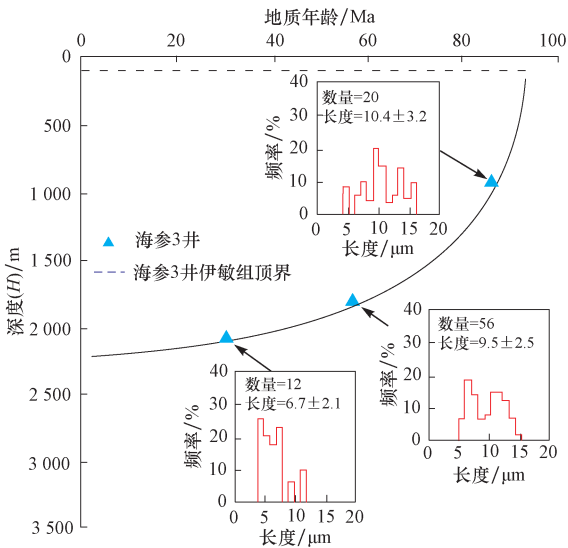


图 6 呼伦湖凹陷磷灰石裂变径迹年龄与深度关系
Fig. 6 Apatite fission track dating vs. depth in the Hulunhu Depression

都高于凹陷的现今地温梯度值。其中,包裹体测温和磷灰石裂变径迹法恢复的古地温梯度值较为接近;而镜质体反射率法恢复的古地温梯度值较高,可作为呼伦湖凹陷古地温梯度的上限值。因此,呼伦湖凹陷早白垩世古地温梯度值在 42 ~ 56 °C/km,明显大于现今值,与早白垩世东北地区岩石圈处于伸展拉张减薄的构造背景相一致。早白垩世海拉尔盆地处于断陷发育时期,主要表现为强烈的断陷拉张作用,伴随有火山岩喷发,形成了很高的地温场背景^[41]。

3.5 热史模拟

由镜质体反射率、包裹体测温和磷灰石裂变径迹法恢复呼伦湖凹陷的古地温梯度约为 42 ~ 56 °C/km,大于现今地温梯度值,古地温高于现今地温,因此中生代以来是一降温过程。以上热演化过程及基本地质事实是盆地热史模拟的基础。

根据裂变径迹动力学模型可以模拟古地温。Green 和 Duddy 等人用 Durango 磷灰石做了大量的诱发径迹退火实验,测定和研究了退火后的径迹长度资料,先后提出了活化能不随退火程度而变的平行线模型和活化能随退火程度而增加的扇形线模型。经统计检验和退火数据分析,扇形线模型被认为是较好的模型^[42-44]。其数学表达式为:

$$g(r) = \{ [(1 - r^{2.7})/2.7]^{0.35} - 1 \} / 0.35 \\ = -4.87 + 0.000\ 168T(\ln t + 28.12) \quad (1)$$

表 3 呼伦湖凹陷磷灰石裂变径迹长度模拟数据

Table 3 Simulation data of apatite fission track length in the Hulunhu Depression

样品编号	井号	深度/m	层位	裂变径迹测量值		裂变径迹模拟值	
				年龄/Ma	长度/μm	年龄/Ma	长度/μm
11208	海参 3	1 817.49 ~ 1 828.49	南屯组	57.0 ± 3.5	9.5 ± 2.5	61.6	10.6 ± 2.2

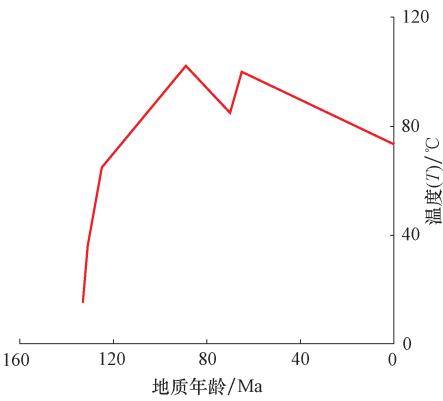


图 7 呼伦湖凹陷海参 3 井热史模型
Fig. 7 Geothermal history model of the Well Haican 3 in the Hulunhu Depression

式中: $g(r)$ ——长度转化函数;
 r ——径迹长度 l 与初始径迹长度 l_0 之比,小数;
 t ——时间,s;
 T ——温度,K。

根据扇形线模型对呼伦湖凹陷进行了古地温正演模拟,模拟结果见表 3。

呼伦湖凹陷古地温普遍高于今地温。海参 3 井井深 1 817.49 ~ 1 828.49 m 样品时间 - 温度模型对应关系如下:

时间 (Ma) 132—131—125—89—70—65—0
温度 (°C) 15—36—65—102—85—100—70

实测年龄与长度和模拟年龄与长度一致性很好,表明上述模型代表了海参 3 井真实的热演化史过程。海参 3 井位于呼伦湖凹陷的北部。海参 3 井井深 1 817.49 ~ 1 828.49 m 样品模拟结果表明,呼伦湖凹陷在早白垩世温度较低,在早白垩世晚期约 90 Ma 达到最大古地温,之后由于盆地整体抬升开始降温,古近纪 - 新近纪以来是一个降温过程(图 7)。裂变径迹长度分布图和古地温演化史显示,在晚白垩世 70 ~ 65 Ma 有一期热事件,造成地温有所升高,有助于烃源岩热演化程度的提高。岩性剖面显示,这次热事件应该是燕山期岩浆喷发事件。海拉尔盆地基底断裂非常发育,呼伦湖凹陷夹于扎赉诺尔断裂和阿尔公断裂这两条大断裂之间,为岩浆喷发提供了有利通道。

4 热演化史与油气关系

根据 3 种方法恢复的呼伦湖凹陷古地温梯度高于

今地温梯度,烃源岩的热演化程度主要受古地温场控制。热史模拟结果表明,最大古地温是在伊敏组沉积晚期(90 Ma)达到的。伊敏组沉积末期盆地经历抬升剥蚀降温的过程,目的层温度逐渐降低,烃源岩埋深变浅,生烃强度减弱。

从热演化程度来看,南屯组烃源岩热演化程度高,成熟面积大,为呼伦湖凹陷主要的油气来源;大磨拐河组烃源岩热演化程度相对较低,成熟面积小,生油规模较小。从古地温恢复结果来看,呼伦湖凹陷早白垩世古地温梯度较高,为42~56 °C/km,古近纪-新近纪以来地温梯度逐渐降低到30.7 °C/km。呼伦湖凹陷现今生油门限在1 220 m,其生油高峰在2 100 m。

呼伦湖凹陷热演化史表明,南屯组烃源层在大磨拐河组沉积晚期进入生油门限,在伊敏组沉积晚期进入生油高峰;大磨拐河组烃源层在伊敏组沉积晚期进入生油门限,在古近纪以来未进入生油高峰期(图8)。海拉尔盆地在伊敏组沉积之后发生抬升剥蚀,目的层温度开始降低;青元岗组沉积以来,呼伦湖凹陷处于欠补偿状态;南屯组烃源岩由于埋藏深,仍然处于高成熟阶段,但生烃强度较第一次减小。大磨拐河组烃源岩成熟度较低,古近纪以来未进入生油高峰期。古近纪以来,南屯组和铜钵庙组烃源岩进入第二次生油高峰期。

热演化史与油气关系表明,早白垩世晚期是呼伦湖凹陷主要成藏时期,此时期为烃源岩大量生排烃高峰期,油气运移动力充足,油气主要为短距离侧向运移并聚集成藏,与海拉尔盆地含油储层自生伊利石年龄为92.52~98.74 Ma、油气成藏时期相当于伊敏组二段和三段沉积时期一致(表4)^[45]。伊敏组沉积末期,由于发生构造抬升,目的层温度开始降低,生烃强度减弱,古近纪以来主要为早期形成油气藏的重新调整和二次生成的油气继续注入成藏。

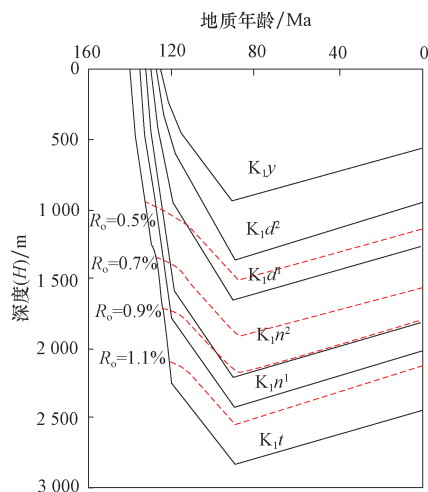


图8 呼伦湖凹陷热演化史与油气关系

Fig. 8 Relationship between geothermal evolutionary history and hydrocarbon generation in the Hulunhu Depression

表4 海拉尔盆地伊利石测年结果

Table 4 Results of authigenic illite dating of hydrocarbon reservoirs in the Hailaer Basin

凹陷	井号	深度/m	层位	年龄/Ma
贝尔凹陷	霍3	2 023	铜钵庙组	93.73
	霍3	2 023	铜钵庙组	98.74
乌尔逊凹陷	乌11	1 895	铜钵庙组	93.28
	乌11	1 895	铜钵庙组	93.07
	苏6	1 520	大磨拐组	94.87
	苏6	1 520	大磨拐组	92.52
呼伦湖凹陷	海参3	2 076	铜钵庙组	96.71
	海参3	2 076	铜钵庙组	95.30
	海参3	1 526	南屯组	92.71
	海参3	1 526	南屯组	94.50
呼和湖凹陷	和2	1 646	南屯组	96.67
	和2	1 646	南屯组	96.14

注:通过实验确定小于0.1 μm 粒级的丝发状的自生伊利石为同位素测年的对象,测年结果在中国石油勘探开发研究院完成。

5 结论

1) 海拉尔盆地是具有走滑性质的中、新生代拉张型盆地。在盆地的不同构造单元热演化史明显不同,造成其地温场的特征具有很大的差异性,也是制约凹陷油气突破的重要因素。根据地层系统测温数据确定了呼伦湖凹陷现今地温梯度为30.7 °C/km,具有中温型地温场的特征。

2) 利用多种古地温方法恢复了呼伦湖凹陷的古地温梯度。古地温梯度值约为42~56 °C/km,大于现今地温梯度值,古地温高于现今地温。古地温恢复及热史模拟结果表明,在伊敏组沉积晚期(约90 Ma)达到最高古地温,古近纪-新近纪以来是一个降温过程,凹陷中烃源岩热演化程度主要受古地温场控制。

3) 古地温演化史结合含油储层自生伊利石测年结果表明,伊敏组沉积晚期应该是呼伦湖凹陷最重要的油气成藏期,此时期烃源岩达到最大热演化程度,处于生、排烃高峰期,产生的油气主要为短距离侧向运移并聚集成藏。伊敏组沉积末期凹陷发生抬升剥蚀,地层温度降低,烃源岩埋深变浅,生烃强度减弱。

参 考 文 献

- [1] 任战利,刘丽,崔军平,等.盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用[J].石油与天然气地质,2008,29(4):502-506.
Ren Zhanli, Liu Li, Cui Junping, et al. Application of tectonic-thermal evolution history to hydrocarbon accumulation timing in sedimentary basins[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4): 502-506.
- [2] 任战利.鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J].石油学报,1996,17(1):17-24.
Ren Zhanli. Research on the relations between geothermal history and

- oil-gas accumulation in the Ordos basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, 17(1): 17–24.
- [3] 任战利, 刘池阳, 张小会, 等. 酒东盆地热演化史与油气关系研究[J]. *沉积学报*, 2000, 18(4): 619–623.
- Ren Zhanli, Liu Chiyang, Zhang Xiaohui, et al. Research on the relations between geothermal history and oil-gas generation in Jiudong basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(4): 619–623.
- [4] 崔军平, 任战利, 肖晖. 海拉尔盆地呼和湖凹陷热演化史与油气关系研究[J]. *中国地质*, 2007, 34(3): 522–527.
- Cui Junping, Ren Zhanli, Xiao Hui. Research on the relations between geothermal history and oil-gas generation in Huhehu depression of Hailaer Basin[J]. *Geology in China*, 2007, 34(3): 522–527.
- [5] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 伊盟隆起东胜地区热演化史与多种能源矿产的关系[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(2): 187–193.
- Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Relationship between thermal history and various energy mineral deposits in Dongsheng area, Yimeng uplift[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(2): 187–193.
- [6] 吴群, 彭金宁. 川东北地区埋藏史及热史分析——以普光2井为例[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(2): 133–138.
- Wu Qun, Peng Jinning. Burial and thermal histories of northeastern Sichuan Basin: A case study of well Puguang 2[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(2): 133–138.
- [7] 王东. 阆中地区须家河组烃源岩动态演化模拟[J]. *断块油气田*, 2014, 21(1): 18–23.
- Wang Dong. Dynamic evolution simulation of Xujiahe Formation source rocks in Langzhong Area[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2014, 21(1): 18–23.
- [8] 王杰, 秦建中, 刘文汇, 等. 川东北元坝地区中生代构造与动态热演化史——磷灰石、锆石(U–Th)/He定年分析[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(1): 19–24.
- Wang Jie, Qin Jianzhong, Liu Wenhui, et al. Mesozoic tectonic and dynamic thermal history in Yuanba area of northeastern Sichuan Basin: Application of (U–Th)/He dating of apatite and zircon[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(1): 19–24.
- [9] 刘树根. 内蒙古海拉尔盆地演化研究[J]. *成都地质学院学报*, 1993, 13(4): 80–87.
- Liu Shugen. Research on geothermal history of Hailaer basin in Neimenggu[J]. *Chengdou Geological Institute Transaction*, 1993, 13(4): 80–87.
- [10] 陈均亮, 吴河勇, 朱德丰, 等. 海拉尔盆地构造演化及油气勘探前景[J]. *地质科学*, 2007, 42(1): 147–159.
- Chen Junliang, Wu Heyong, Zhu Defeng, et al. Tectonic evolution of the Hailar basin and its potentials of oil-gas exploration[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42(1): 147–159.
- [11] 袁彩萍, 徐思煌. 西藏伦坡拉盆地地温场特征及烃源岩热演化史[J]. *石油实验地质*, 2000, 22(2): 156–160.
- Yuan Caiping, Xu Sihuang. Geothermal field and geothermal history of hydrocarbon source rocks in Xizang Lunpola basin[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 2000, 22(2): 156–160.
- [12] 崔军平, 任战利, 苏勇, 等. 海拉尔盆地现今地温与油气关系研究[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(4): 445–449.
- Cui Junping, Ren Zhanli, Su Yong, et al. Research on the relations between present temperature and oil-gas generation in Hailaer basin[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2007, 34(4): 445–449.
- [13] 周江羽, 吴冲龙, 韩志军. 鄂尔多斯盆地的地热场特征与有机质成熟史[J]. *石油实验地质*, 1998, 20(1): 20–24.
- Zhou Jiangyu, Wu Chonglong, Han Zhijun. Geothermal field and maturing history of organic matter in Ordos basin[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1998, 20(1): 20–24.
- [14] 王永新, 冯殿生, 汪集旸. 辽河盆地东部凹陷现今地温场及热历史的研究[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(2): 197–202.
- Wang Yongxin, Feng Diansheng, Wang Jiyang. Research on geothermal field and geothermal history in east depression of Liaohe basin[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 2003, 46(2): 197–202.
- [15] 吴乾蕃, 谢毅真. 松辽盆地大地热流[J]. *地震地质*, 1985, 7(2): 59–64.
- Wu Qianfan, Xie Yizhen. The geothermal flux of Songliao basin[J]. *Seismic Geology*, 1985, 7(2): 59–64.
- [16] 任战利. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究[M]. 石油工业出版社, 1999: 144–153.
- Ren Zhanli. Research on geothermal history in sedimentary basins of North China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 144–153.
- [17] 王钧, 黄尚瑶, 黄歌山, 等. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京: 地震出版社, 1990: 1–30.
- Wang Jun, Huang Shangyao, Huang Geshan, et al. Basic characters of geothermal distribution in China[M]. Beijing: Seismic Press, 1990: 1–30.
- [18] 王良书, 李成, 刘绍文, 等. 库车前陆盆地大地热流分布特征[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(4): 79–83.
- Wang Liangshu, Li Cheng, Liu Shaowen et al. Terrestrial heatflow distribution in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China[J]. *Oil Exploration & Development*, 2005, 32(4): 79–83.
- [19] 周中毅, 潘长春. 沉积盆地古地温测定方法及其应用[M]. 广州: 广东科技出版社, 1992: 5–20.
- Zhou Zhongyi, Pan Changchun. Sedimentary basin paleotemperature determination method and its applications[M]. Guang Zhou: Guangdong Science and Technology Press, 1992: 5–20.
- [20] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(10): 1559–1570.
- [21] Petersen H I, Sherwood N, Mathiesen A, et al. Application of integrated vitrinite reflectance and FAMM analyses for thermal maturity assessment of the northeastern Malay Basin, offshore Vietnam: Implications for petroleum prospectivity evaluation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(3): 319–332.
- [22] 胡圣标, 汪集旸. 沉积盆地地热体制的研究方法原理和进展[J]. *地学前缘*, 1995, 2(4): 171–180.
- Hu Shengbiao, Wang Jiyang. Principles and progresses on thermal regime of sedimentary basin—an overview[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(4): 171–180.
- [23] 付明希, 胡圣标, 汪集旸. 华北东部中生代热体制转换及其构造意义[J]. *中国科学*, 2004, 34(6): 514–520.
- Fu Mingxi, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. The Mesozoic thermal conversion system in eastern part of North China and its tectonic significance[J]. *Science in China*, 2004, 34(6): 514–520.
- [24] 蒋国豪, 胡瑞忠, 方维萱. 镜质体反射率(R_o)推算古地温研究进展[J]. *地质地球化学*, 2001, 29(4): 40–45.
- Jiang Guohao, Hu Ruizhong, Fang Weixuan. Progress in deduction of paleotemperature from vitrinite reflectance data[J]. *Geology-Geo-*

- chemistry, 2001, 29(4): 40–45.
- [25] 邹华耀, 吴智勇. 镜质体反射率在重建盆地古地温中的应用——中国东部、西部中、新生代沉积盆地古地温特征[J]. 沉积学报, 1998, 16(1): 112–119.
- Zou Huayao, Wu Zhiyong. Application of vitrinite reflectance in reconstruction of paleotemperature: evolution of paleotemperature in the eastern and western Mesozoic-Cenozoic sedimentary basins, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(1): 112–119.
- [26] 汤达祯. 镜质组反射率与沉积盆地古地温分析[J]. 地学前缘, 1995, 2(3): 181–188.
- Tang Dazhen. Paleotemperature determination of sedimentary basin from vitrinite reflectance [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3): 181–188.
- [27] 周波, 云金表. 考虑压力作用的镜质体反射率动力学模型[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 661–669.
- Zhou Bo, Yun Jinbiao. A vitrinite reflectance kinetic model with the effect of pressure integrated [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 661–669.
- [28] 韩淑乔, 张堃, 赵天强. 南堡凹陷沙三段烃源岩特征研究[J]. 石油地质与工程, 2014, 28(1): 8–10.
- Han Shuqiao, Zhang Kun, Zhao Tianqiang. Characteristics of hydrocarbon source rocks in the third member of Shahejie Formation in the Nanpu Sag [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2014, 28(1): 8–10.
- [29] 董田, 何生, 林社卿. 泌阳凹陷核桃园组烃源岩有机地化特征及热演化成熟史[J]. 石油实验地质, 2013, 35(2): 187–194.
- Dong Tian, He Sheng, Lin Sheqing. Organic geochemical characteristics and thermal evolution maturity history modeling of source rocks in Eocene Hetaoyuan Formation of Biyang Sag, Nanxiang Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(2): 187–194.
- [30] Barker C E, Pawlewicz M J. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter [J]. Paleogeothermics (Lecture Notes in Earth Sciences), 1986, 5: 79–93.
- [31] 严永新, 李亚玉, 胡峻卿, 等. 应用流体包裹体研究内蒙古巴彦浩特盆地热演化史[J]. 现代地质, 2002, 16(3): 288–291.
- Yan Yongxin, Li Yayu, Hu Junqing, et al. The application of the liquid enclosure to thermal history in the Bayahaote Basin in Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2002, 16(3): 288–291.
- [32] 任战利, 赵重院, 张军, 等. 鄂尔多斯盆地古地温[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 56–65.
- Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan, Zhang Jun, et al. Research on paleotemperature in the Ordos basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(1): 56–65.
- [33] 陶士振, 刘德良, 魏大卫, 等. 叶城凹陷白垩纪至晚第三纪成岩作用与古地温研究[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(3): 26–30.
- Tao Shizheng, Liu Deliang, Wei Dawei, et al. A study on paleo-geotemperature between Cretaceous and Neogene in Yecheng depression [J]. Petroleum Exploration & Development, 1998, 25(3): 26–30.
- [34] 姚亚明, 张育民, 付代国, 等. 焉耆盆地博湖凹陷古地温与油气形成关系[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 24–27.
- Yao Yaming, Zhang Yumin, Fu Daiguo, et al. Relationship between paleogeothermal and hydrocarbon formation in the Yanqi Basin, Northwest China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2004, 31(1): 24–27.
- [35] Gleadow A J W, Duddy I R, Lovering J F. Fission track analysis: a new tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential [J]. Australian Petroleum Exploration Association, 1983, 23: 93–100.
- [36] Green P F, Duddy I R, Gleadow A J W, et al. Apatite fission track analysis as a paleotemperature indicator for hydrocarbon exploration [C]//Naeser N D, McCulloch T H. Thermal history of sedimentary basin—methods and case histories. New York: Springer-Verlag, 1989: 191–196.
- [37] 赵伟卫, 金强, 王伟峰. 华北盆地济源凹陷古地温梯度的研究——磷灰石裂变径迹的应用[J]. 石油实验地质, 2002, 24(6): 555–560.
- Zhao Weiwei, Jin Qiang, Wang Weifeng. Estimation of ancient subsurface temperatures with the apatite fission track in Jiyuan depression of North China basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 2002, 24(6): 555–560.
- [38] 康铁笙, 王世成. 地质热历史研究的裂变径迹法[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 25–37.
- Kang Tiesheng, Wang Shicheng. Fission track—a method in geothermal history research [M]. Beijing: Science Press, 1991: 25–37.
- [39] 李天义, 周雁, 方石, 等. 磷灰石裂变径迹年龄测试分析新方法——激光剥蚀-ICPMS法[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 550–557.
- Li Tianyi, Zhou Yan, Fang Shi, et al. A new method for apatite fission track dating—the Laser-ICPMS method [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 550–557.
- [40] 任战利. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史[J]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 339–349.
- Ren Zhanli. Thermal history of Ordos basin assessed by apatite fission track analysis [J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38(3): 339–349.
- [41] 任战利. 中国北方沉积盆地热演化史的对比[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 33–36.
- Ren Zhanli. Comparison of thermal evolution history in sedimentary basins, North China [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(1): 33–36.
- [42] Duddy I R, Green P F, Hegarty K A. Reconstruction of thermal history in basin modeling using apatite fission track analysis [R]. Offshore Australia Conference Process, 1991: 49–61.
- [43] Green P F, Duddy I R, Gleadow A J W, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite (1): A qualitative description [J]. Chemical Geology, 1986, 59(4): 237–253.
- [44] Green P F, Duddy I R, Laseta G M. Thermal annealing of fission tracks in apatite (4): Quantitative modelling techniques and extension to geological time-scale [J]. Chemical Geology, 1989, 79(2): 155–182.
- [45] 陈刚, 徐黎明, 丁超, 等. 用自生伊利石定年确定鄂尔多斯盆地东北部二叠系油气成藏期次[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 713–719.
- Chen Gang, Xu Liming, Ding Chao, et al. Authigenic illite dating for the timing of oil-gas accumulation of the Permian reservoirs in north-eastern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 713–719.