

A Study of Cenozoic Geothermal Recovery in Jinzhou 25 Area

Yao Gao, Jing Zheng, Bing Zeng, Xuemei Lin, Xu Wang

State Key Laboratory of Oil and Gas Geology and Development Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan
Email: 1823589868@qq.com

Received: Aug. 25th, 2017; accepted: Sep. 8th, 2017; published: Sep. 13th, 2017

Abstract

Located in the northeast of the Bohai Bay Basin, Liaodong Bay is the important oil producing area of China, with great exploration potential. Based on the present study of geothermal field, the Cenozoic thermal history in Jinzhou 25 area has been restored by apatite fission track and vitrinite reflectance. The results show that the geothermal gradient decreases from about 36°C/km - 38°C/km in 38 Ma to 29°C/km - 30°C/km nowadays, and the paleo geotemperature evolution curve is mainly related to the buried history and the ancient heat flow history. At the end of the east end of sedimentary period (24.6 Ma), the formation temperature reached a maximum of about 110 degrees, and the geothermal gradient had a great fluctuation from 24.6 Ma to 17 Ma, and the main reason is that the structural uplift in the end of the 1st Member of the Dongying Formation sedimentary period, the temperature decreased gradually to 67 degrees at the late stage of the Dongying formation sedimentary period, and the deposition of the Neogene Period has gradually increased the temperature. In addition, the study also reveals the burial history and thermal history of the area, which can lay a foundation for the evaluation of oil and gas resources in the future.

Keywords

Jinzhou 25 Area, Paleo Geotemperature, Thermal History, Vitrinite Reflectance, Apatite Fission Track

锦州25地区新生代古地温恢复研究

高耀, 郑晶, 曾兵, 林雪梅, 王旭

成都理工大学, 油气地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都
Email: 1823589868@qq.com

收稿日期: 2017年8月18日; 录用日期: 2017年9月1日; 发布日期: 2017年9月8日

摘要

辽东湾位于渤海湾盆地东北部,是中国重要的油气产区,具有巨大的勘探潜力。本文通过现今地温场的研究,利用磷灰石裂变径迹和镜质体反射率恢复了锦州25地区的新生代热历史。研究表明地温梯度从38 Ma的大约 $36^{\circ}\text{C}/\text{km}\sim 38^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 降低至现在的 $29^{\circ}\text{C}/\text{km}\sim 30^{\circ}\text{C}/\text{km}$,古地温演化曲线主要与所经历的埋藏史和古热流史有关。在东一段沉积末时(24.6 Ma),地层温度达到最大为 110°C 左右,地温梯度在24.6 Ma至17 Ma出现了较大的波动,主要因为东一段沉积期末的构造抬升所致,至东营组沉积晚期温度逐渐降低为 67°C ,新近纪时期的沉积使得地层逐渐升温。此外,研究成果还揭示了该区的埋藏史和热史,可以为今后的油气资源评价奠定基础。

关键词

锦州25地区,古地温,热史,镜质体反射率,磷灰石裂变径迹

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

渤海油田是中国东部一个重要的产油区,已在辽西低凸起及辽西凹陷中北段已发现锦州25-1南、锦州9-3等油气田。近年来发现的锦州25-1油田是渤海海域第一个亿吨级的大型轻质油气田,是首次在辽西凹陷发现的油气当量超过亿吨的优质油田[1][2][3]。

随着国内盆地热史恢复研究的不断发展,广大工作者对渤海湾盆地关于盆地热体质进行了许多研究,已经对渤海湾盆地的东濮凹陷、渤中凹陷、黄河口凹陷、莱州湾凹陷和歧口凹陷进行了热史恢复研究[4]-[9],张媛[4]认为整个渤海盆地平均地温梯度为 $31.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$,并且凸起区地温梯度高,一般为 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}\sim 40^{\circ}\text{C}/\text{km}$,凹陷地区地温梯度较低,一般为 $24^{\circ}\text{C}/\text{km}\sim 34^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。目前对于锦州25地区的热史恢复还缺乏深入的研究,此次利用现有钻井数据及 R_o 等数据,结合其他资料完成研究区热史的恢复研究,为该区的生烃演化及油气勘探提供热演化参数。

2. 区域地质背景

辽西低凸起位于渤海湾盆地东北部的辽东湾地区,长174 km,宽4~9 km,面积 1150 km^2 。辽西低凸起东邻辽中凹陷,西以辽西一号断层为界与辽西凹陷相邻,呈北北东向展布,具有“凹中隆”的特点,是油气聚集的有利区带。辽西低凸起被东、西相邻的辽西凹陷、辽中凹陷所夹持,辽西凹陷和辽中凹陷均为东断西超,各个凹陷由北向南又均可细分为北、中、南三个次洼(图1)[10][11][12]。

构造上辽东湾地区分为辽西凹陷、辽西凸起、辽中凹陷、辽东凸起、辽东凹陷共5个次级构造单元。这种凸起-凹陷相间的构造格局是与渤海湾盆地的构造背景密切联系。前人研究认为中生代至古近纪早期(42 Ma之前),由于扬子板块向北楔入,持续作用于华北板块,太平洋板块向北北西向俯冲,使北北东向的郯庐断裂带发生左旋走滑运动[13]。晚始新世沙三期(42 Ma以来),太平洋板块转为北西西向俯冲,使郯庐断裂带转为右旋走滑运动[14],同时由于印度板块对欧亚板块的俯冲,对华北板块施加北东向的挤压力,华北板块向东逃逸并发生右旋张剪运动,致使渤海湾盆地处于右旋剪切拉伸的应力场中[15]。

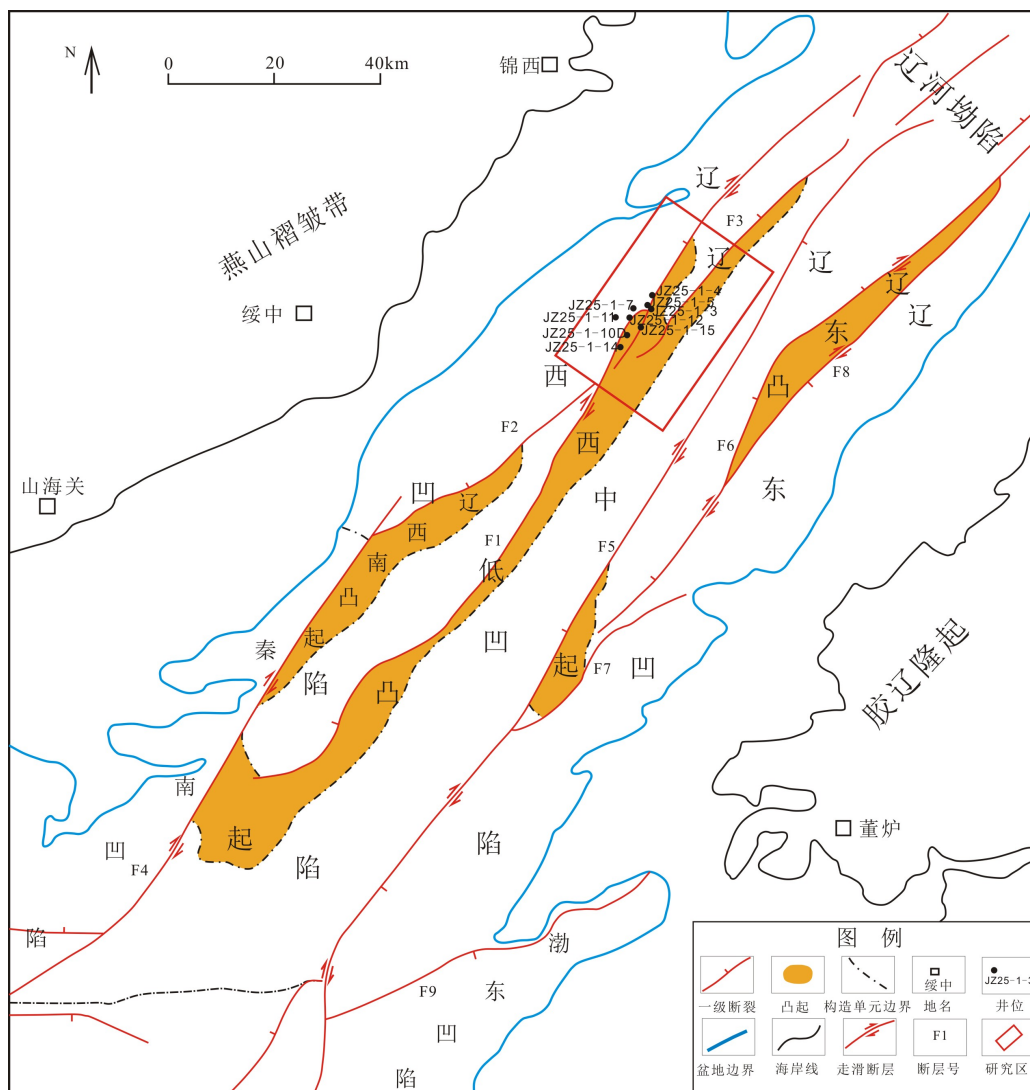


Figure 1. Geographical location and tectonic Zoning Map of Paleogene in Liaoxi low uplift
图 1. 辽西低凸起地区地理位置及古近纪构造区划图(修改自吕丁友, 2009)

渐新世东营期(32.8 Ma~24.6 Ma), 渤海湾盆地东西两侧的走滑构造系统加剧了走滑运动, 盆地局部派生挤压应力场, 伸展作用减弱, 而反转构造和花状构造在走滑构造带上比较发育。中新世馆陶期(24.6 Ma至今)开始, 盆地进入拗陷阶段[16]。

研究区主要发育前第三系、古近系和新近系地层。基底地层为前第三系, 主要包括太古界、中上元古界变质岩、花岗岩, 古生界碳酸盐岩和中生界火成岩地层, 且不同部位基底的时代和岩性不同。古近纪主要为断陷期, 沉积了孔店组、沙河街组和东营组。以泥岩与碳酸盐岩互层为主, 且均夹有红色岩层, 总体上为干旱环境下的小型湖泊沉积和冲积扇沉积。新近系为裂后拗陷期沉积, 自下而上为馆陶组和明化镇组, 在全区为一套辫状河到曲流河的陆源粗碎屑沉积[17] [18] [19]。

3. 锦州 25 地区现今地温场特征

盆地的现今地温场是指现今地温的分布情况, 其为该地区的地温场由古至今演化的最终结果, 即古地温演化的最后一幕, 是古地温恢复的基础。因此, 全面系统的研究某地区的现今地温场, 不仅可以了

解该地区现今地下温度的分布状态,同时也可以为该地区热演化史的研究提供依据[4] [9]。

对于锦州 25 地区现今地温主要借助于油层测温资料(表 1)。锦州 25 地区测温资料主要集中在太古界油层和 Es₁、Es₂ 和 Es₃ 段油层,其中以 Es₂ 段油层居多。太古界储层静温测试资料主要分布在 25-1-10D 井,其地温梯度为 25.9℃/km;Es₂ 段地温梯度主要分布在 29.65℃/km~32.4℃/km 之间,平均为 30.92℃/km;Es₃ 和 Es₁ 段的地温梯度主要集中在 31℃/km 左右。

表 1 中各井的温度和深度表现出了协同变化(图 2),图中回归线的斜率为 0.0325,反映出地温梯度为 32.5℃/km,与该区的平均地温梯度比较接近(该区平均地温梯度为 29.6℃/km);直线的截距为 16.825,反映出地表温度为 16.825℃,与计算所取的年平均地表温度比较接近(年平均温度 12℃),表明锦州 25-1 油田的地温场具有相似的特征。

Table 1. Data of static temperature test of oil reservoir in Jinzhou 25 area

表 1. 锦州 25 地区油层静温测试数据表

井号	层位	中部井深 (m)	地层温度 (°C)	地温梯度 (°C/km)	井号	层位	中部井深 (m)	地层温度 (°C)	地温梯度 (°C/km)
25-1-3	Es ₂	1954.5	78.9	30.82	25-1-10D	Es ₂	1844.3	78.5	32.1
25-1-3	Es ₃	2154	85.7	31.60	25-1-10D	Es ₂	1884.8	78.9	31.6
25-1-4	Es ₂	2128.0	82.7	29.81	25-1-11	Es ₂	1931.0	78.6	30.66
25-1-4	Es ₂	2153.0	83.1	29.65	25-1-11	Es ₂	1989.8	80	30.46
25-1-4	Es ₂	2158.0	85.5	30.70	25-1-12	Es ₂	2037.0	80.4	30.1
25-1-4	Es ₂	2168.5	86.9	31.2	25-1-12	Es ₂	2035.3	80.6	30.2
25-1-4	Es ₃	2348.9	94.3	31.9	25-1-12	Es ₂	2060.7	81.3	30.2
25-1-5	Es ₃	2362.0	92.1	30.9	25-1-14	Es ₂	1911.5	80	31.8
25-1-5	Es ₃	2371.4	93.4	31.3	25-1-14	Es ₁	1831.0	76.8	31.4
25-1-7	Es ₂	2043.2	80.7	30.44	25-1-15	Es ₂	1831.0	76.8	31.4
25-1-7	Es ₃	2224.5	87.7	30.83	25-1-15	Es ₂	1912.0	79.4	31.8
25-1-10D	Ar	2324.56	79.50	25.9	25-1-15	Es ₂	1958.0	81.5	32.0
25-1-10D	Es ₃	1884.35	78.90	31.6	25-1-15	Es ₂	1950.5	81.65	32.4
25-1-10D	Es ₂	1897.0	76.5	30.1					

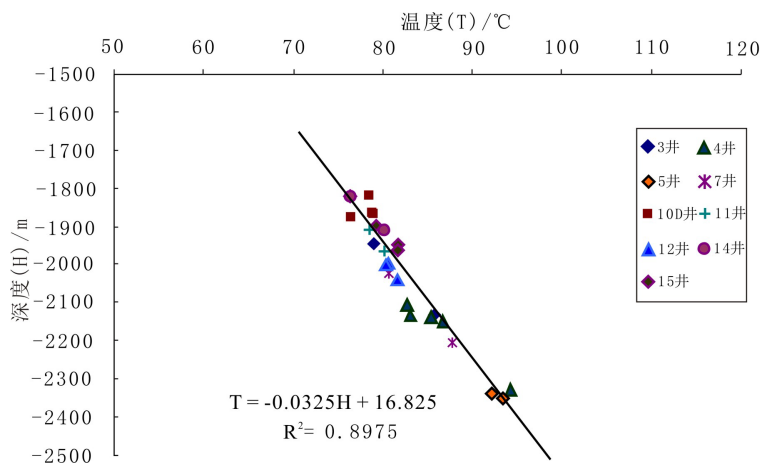


Figure 2. Relationship between formation temperature and depth in Jinzhou 25-1 oilfield

图 2. 锦州 25-1 油田地层温度与深度关系图

4. 古地温场的重建方法

盆地热史的研究方法较多,如地球热动力模型法,经验公式法,地质温度计法(如镜质体反射率法、裂变径迹法、包裹体测温法、热年代学方法等)[4][6][9]。这些方法归纳起来主要有两个方面:一是利用各种古温标来模拟盆地的热历史,这主要包括有机质成熟度指标、包裹体、磷灰石裂变径迹等;二是用盆地演化的地球物理模型来研究古温度[20][21]。这里主要利用镜质体反射率和磷灰石裂变径迹这两种常用的古温标来恢复研究区的古地温。

4.1. 磷灰石样品裂变径迹分析

分析的磷灰石样品为 JZ25-1-3 井 Es₃ 段灰色砂岩样品。对其年龄、径迹长度及其分布、径迹密度做了分析,分析结果如表 2 所示。

以实验退火模型为基础,应用颗粒年龄、围限径迹长度以及 Cl 含量或 Dpar 等测量参数,进行磷灰石裂变径迹(AFT)热史模拟[22]。在磷灰石裂变径迹(AFT)热史模拟前还须设定一些约束条件,例如热史下限(黑云母 Ar/Ar、K/Ar 或者锆石裂变径迹(U-Th)/He 等年龄)、中间插入点(磷灰石(U-Th)/He 等年龄)以及地表温度等参数。设定还包括 T-t 曲线模拟数目(如 10,000 条)和模拟搜寻法则(Monte-Carlo、CRS 法)等。在搜寻区间不明确的情况下,建议使用限制任意搜索法(CRS)模拟;当搜寻区间限制较好时,则适合采用 Monte-carlo 法。在设定条件的基础上,程序就可通过阶梯式近似法生成若干条 T-t 热史模拟曲线,最后给出 AFT 颗粒年龄与径迹长度的模拟值,以及 K-S(径迹长度模拟值与观测值的吻合程度)与 GOF(径迹年龄模拟值与观测值的吻合程度)检验值。当 GOF 与 K-S 检验值大于 5%时,表示模拟热史“可以接受的”;当检验值超过 50%时,表示模拟结果是“较好的”[23][24]。

根据上述方法得到模拟结果(图 3),模拟结果显示 JZ25-1-3 样品的 K-S 检验值为 65%,GOF 检验值为 65%,表明模拟结果可信。图中 25-1-3 井所模拟的 T-t 轨迹表明在约 24.6 Ma 时,样品的温度约为 94℃,此后由于构造运动,地层抬升,遭受剥蚀;至 19 Ma 时,样品所在点的地层温度约为 51℃,后由于上覆地层的沉积,反演到现今,样品所在位置的温度为 85.3℃。

4.2. JZ25-1-3 井镜质体反射率分析

通过锦州 25 地区实测的镜质体反射率,应用 Karweil 图版[25],基于平行反应模型(Easy%Ro 模型)的 Ro-T-t 图版[26],以及平均 Ro-最高古地温经验公式[27],来估算最高古地温(表 3)。

表 3 中计算的最高古地温结果看出,Karweil 图解法和经验公式方法计算出的古地温大致相同,Ro-T-t 方法计算出的古地温较之偏大。该井 Es₃ 段 2135.03 m~2139.83 m 所测得的盐水包裹体的均一温度为 83℃~106℃,主要集中在 83℃~99℃,根据图版或经验公式估算的与实测的包裹体均一温度具有较好的一致性。在 2139.88 m 处所取的包裹体样品所测得的包裹体均一温度为 87℃~100.2℃,所模拟的磷灰石裂变径迹样品在最大埋深时的温度范围为 84.37℃~103.44℃,最佳模拟温度为 94.12℃,包裹体均一温度、镜质体反射率与磷灰石裂变径迹模拟的结果具有较好的一致性。因此,JZ25-1-3 井 Es₃ 段 2135.03 m~2139.83 m 所经历的最高古地温约为 83℃~99℃。

5. 锦州 25 地区 Es₂ 和 Es₃ 段储层古地温场演变分析

磷灰石裂变径迹模拟结果、镜质体反射率所估算的最高古地温以及包裹体所测得的均一温度对古地温重建提供了约束条件,进而通过运用 Petrolmod 软件计算得到埋藏史,从而进行该区的古地温重建。其计算过程中的基本思想是:各地层在保持其骨架厚度不变(剥蚀层与断裂层除外)的条件下,从现今盆地分层现状出发,按地质年代逐层剥去,直至全部剥完为止[28]。

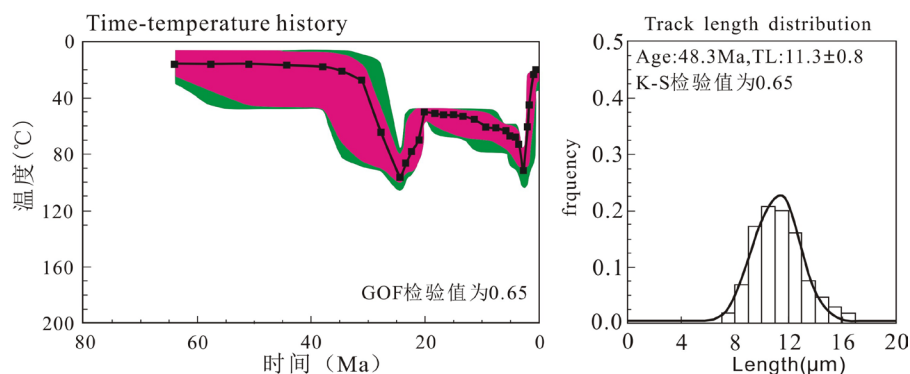
Table 2. Results of apatite fission track analysis**表 2.** 磷灰石裂变径迹分析结果

样号	井号	深度(m) /层位	颗粒数 (n)	ρ_s ($10^5/cm^2$) (Ns)	ρ_i ($10^5/cm^2$) (Ni)	ρ_d ($10^5/cm^2$) (N)	Central age (Ma) ($\pm 1\sigma$)	Pooled Age (Ma) ($\pm 1\sigma$)	L(μm) (N)
25-1-3AFT	JZ25-1-3	2139.88 /Es ³	28	3.298 (1818)	13,825 (7621)	10.177 (5488)	46 \pm 4	47 \pm 3	11.5 \pm 1.9 (105)

ρ_s : 自发径迹密度; Ns: 自发径迹数; ρ_i : 诱发径迹密度; Ni: 诱发径迹数; ρ_d : 玻璃径迹密度; Nd: U 玻璃径迹数; L: 径迹长度; N: 颗粒数。注: 样品在中科院高能物理研究所测试完成。

Table 3. Data of vitrinite reflectance measured and maximum paleo temperature estimated in Jinzhou 25 area**表 3.** 锦州 25 地区实测的镜质体反射率数据表及估算的最高古地温

井号	样品深度 (m)/层位	镜质体反射率 Ro (%)	有效受热时间 (Ma)	Tmax ($^{\circ}C$)		
				Karweil 图解法	平行反应图解法	经验公式法*
JZ25-1-3	1931/Es ₂	0.44	30 Ma	64.00	81.00	68.59
	2012.5/Es ₃	0.49	30 Ma	72.00	89.00	76.39
	2062.5/Es ₃	0.49	30 Ma	72.00	89.00	76.39
	2237.5/Es ₃	0.54	32 Ma	91.00	96.00	93.85
	2337.5/Es ₃	0.60	32 Ma	99.00	103.00	100.36

**Figure 3.** Inversion results of thermal history of apatite samples in JZ25-1-3 well**图 3.** JZ25-1-3 井磷灰石样品热史反演结果

5.1. 基础参数

在模拟计算中需要一些基础的地质数据, 包括岩石热性参数、岩性参数、现今地表温度、地温梯度、大地热流和地层分层数据等[29] [30] [31]。模拟计算中岩石热性参数主要包括岩石生热率和岩石热导率[31] (表 4); 岩性参数主要包括各岩性的密度、压实系数、初始孔隙度等; 地层分层采用钻孔实际测量值; 压实系数和初始孔隙度数据则采用钻井的实测数据, 利用 Sclater 和 Christie 的方法[32]进行回归得到初始孔隙度和压实系数。辽东湾地区现今地温梯度在 24.0 $^{\circ}C/km$ ~55.0 $^{\circ}C/km$ 之间, 平均地温梯度为 34.7 $^{\circ}C/km$, 大地热流在 52.9 mW/m^2 ~81.5 mW/m^2 之间, 平均为 65.8 mW/m^2 , 具有构造稳定区与构造活动区之间的中温型地温场特征[31] [33]。模拟过程中研究区地表温度采用该地区年平均温度(12 $^{\circ}C$), 并设地史上的地表温度不变。研究区水浅, 故水深不予考虑。据此通过使用 PetroMod 软件获得工区内单井的埋藏史、古地温史、及地温梯度等信息(图 4, 图 5)。

Table 4. Formation thermal conductivity column
表 4. 地层热导率柱(修改自龚育龄, 2003)

地层名称	地层代号	均值($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	标准偏差	样品数(泥岩/砂岩)
明化镇组	Nm	2.04	± 0.34	3(2/1)
馆陶组	Ng	1.97	± 0.26	7(4/3)
东营组	Ed	2.09	± 0.14	5(3/2)
沙一段	Es ₁	1.90	± 0.30	6(4/2)
沙二段	Es ₂	1.70	± 0.17	7(5/2)
沙三段	Es ₃	1.81	± 0.50	7(6/1)
沙四段	Es ₄	1.98	± 0.50	4(3/1)
孔店组	Ek	2.23	± 0.49	5(1/4)

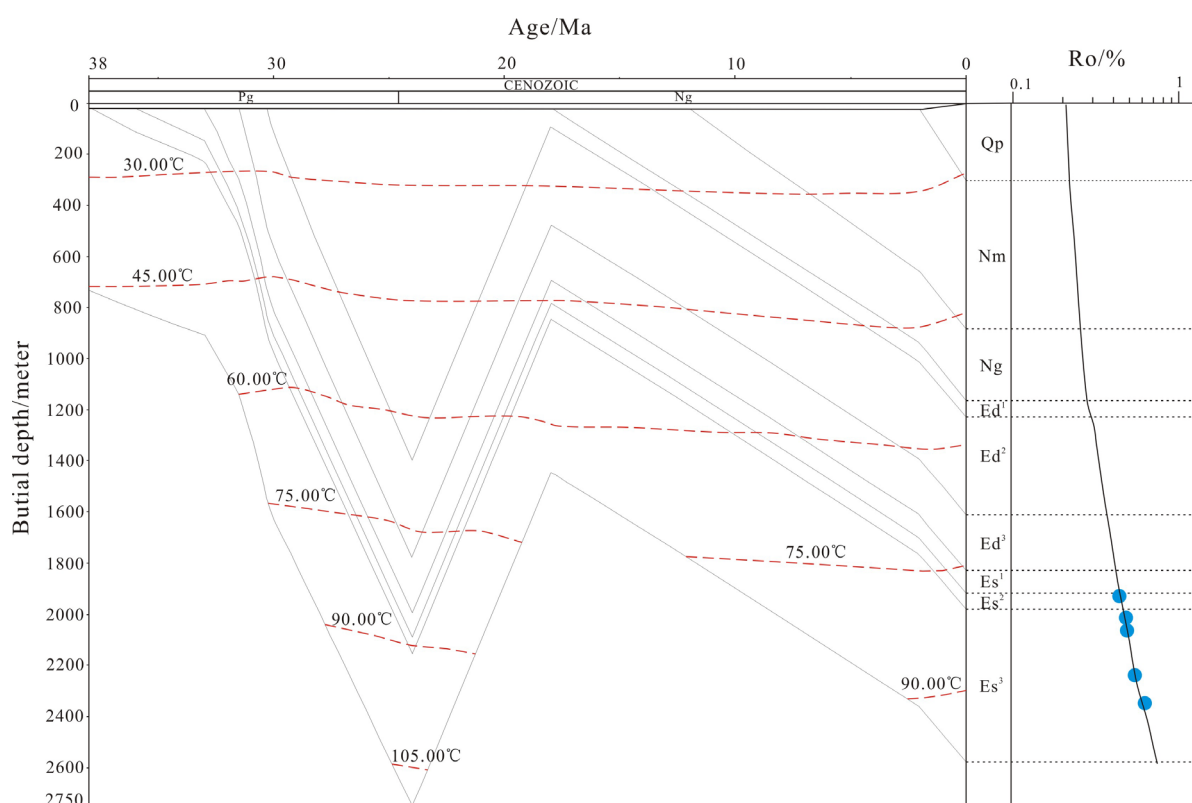


Figure 4. Burial history and thermal history in JZ25 area

图 4. JZ25 地区埋藏史和热史图(以 JZ25-1-3 为例, AFT 和 Ro 联合标定)

5.2. 埋藏史和热史分析

重建的埋藏史揭示, 古近纪工区主要表现为快速沉降, 到 24.6 Ma 时沙三段底埋深达到 2600 m, 此阶段沙三段已经逐渐进入生烃门限, 开始大量生烃。该时期为烃源岩的主要大规模生烃期, 油气充注也造成了该区沙二段和沙三段储层的超压。距今 24.6 Ma~17 Ma, 即到东营组沉积末期, 由于华北运动[34], 构造抬升使得该区地层遭受剥蚀。新近纪由于馆陶组和明化镇组的沉积, 沙三段地层又继续进入埋藏过程, 先前由于构造隆升而暂时停滞的生烃过程又继续生排烃, 该阶段分为馆陶组缓慢沉降阶段和明化镇组至今的快速沉降阶段。

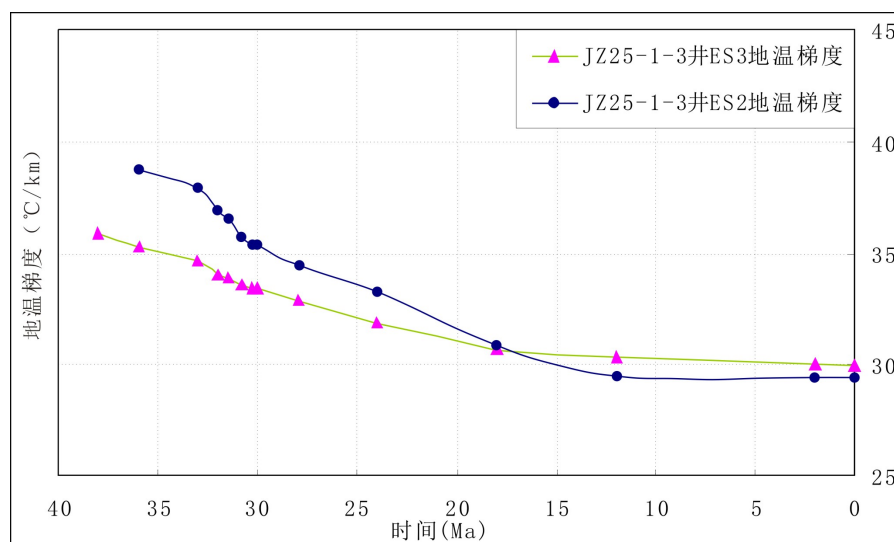


Figure 5. Paleo geothermal gradient evolution map of Es₂ and Es₃ in JZ25 area
图 5. JZ25 地区 Es₂ 段和 Es₃ 段古地温梯度演化图(JZ25-1-3 井为例)

热史恢复结果表明辽东低凸起经历两次升温 and 一次降温阶段，分别为古近纪沙三段 - 东营组沉积时期升温阶段，温度最高达到 110°C 左右；东营组沉积晚期温度逐渐降低至 67°C；新近纪经历了馆陶组沉积时期的缓慢升温 and 明华镇组至今的快速升温阶段。

5.3. 地温梯度演化分析

根据古地温梯度演化图的演化趋势可以看出，研究区的 Es₂ 和 Es₃ 段地层地史时期的古地温梯度表现出从 38 Ma 以来逐渐降低的趋势，其中 Es₃ 段的地温梯度从 38 Ma 的 36°C/km 降低至现今的 29°C/km，Es₂ 段的地温梯度从 38°C/km 演化至现今的 29.8°C/km，演化特征具体表现为 38 Ma~24.6 Ma 古地温梯度的快速降低，24.6 Ma 至今古地温梯度的缓慢降低。

6. 结论

1) 研究区经历两次升温 and 一次降温阶段，分别为古近纪沙三段 - 东营组沉积时期升温阶段，温度最高达到 110°C 左右；东营组沉积晚期温度逐渐降低至 67°C；新近纪经历了馆陶组沉积时期的缓慢升温 and 明华镇组至今的快速升温阶段。

2) 研究区 Es₂ 和 Es₃ 段地史时期的古地温梯度从 38 Ma 以来大致呈现出逐渐降低的趋势，古地温梯度从 38 Ma 的大约 36°C/km~38°C/km 降低至现今的 29°C/km~30°C/km。

基金项目

“十二五” 国家科技重大专项(2011ZX05023-001-014)。

参考文献 (References)

- [1] 徐长贵, 周心怀, 邓津辉, 等. 辽西凹陷锦州 25-1 大型轻质油田发现的地质意义[J]. 中国海上油气, 2010, 22(1): 7-11 + 16.
- [2] 祝春荣, 韦阿娟, 沈东义. 辽东湾地区锦州 25-1 油田油气成藏特点和运聚模拟研究[J]. 海洋石油, 2011, 31(3): 17-22.
- [3] 田立新, 徐长贵, 江尚昆. 辽东湾地区锦州 25-1 大型轻质油气田成藏条件与成藏过程[J]. 中国石油大学学报(自

- 然科学版), 2011, 35(4): 47-52 + 58.
- [4] 张媛. 渤海盆地构造热演化史恢复及烃源岩演化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2008.
- [5] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地热体制研究的理论和应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [6] Hu, S.B., Sullivan, P.B., Raza, A., *et al.* (2001) Thermal History and Tectonic Subsidence of the Bohai Basin, Northern China: A Cenozoic Rifted and Local Pull-apart Basin. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **126**, 221-235.
- [7] He, L.J. and Wang, J.Y. (2004) Tectono-Thermal Modelling of Sedimentary Basins with Episodic Extension and Inversion, a Case History of the Jiyang Basin, North China. *Basin Research*, **16**, 587-599. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2004.00245.x>
- [8] Qiu, N.S., Zuo, Y.H., Zhou, F.Y., *et al.* (2010) Geothermal Regime of the Bohai Offshore Area, Bohia Bay Basin, North China. *Energy Exploration & Exploitation*, **28**, 327-350. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.28.5.327>
- [9] 姚合法, 任玉林, 申本科. 渤海湾盆地中原地区古地温梯度恢复研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 135-140.
- [10] 吕丁友, 杨明慧, 周心怀, 等. 辽东湾坳陷辽西低凸起潜山构造特征与油气聚集[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 490-496.
- [11] 王永利, 加东辉, 李建平, 等. 辽西低凸起锦州地区古近系沙河街组三段砂体分布特征及物源分析[J]. 古地理学报, 2011, 13(2): 185-192.
- [12] 李潍莲, 刘震, 刘俊榜, 等. 辽东湾地区辽西低凸起油气田成藏地质条件的差异[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 664-670.
- [13] 侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民. 渤海湾盆地形成机制研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(4): 91-97.
- [14] 钱祥麟, 李江海. 华北克拉通新太古代不整合事件的确定及其大陆克拉通构造演化意义[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 1999, 29(1): 1-8.
- [15] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 845-850.
- [16] 贾楠, 刘池洋, 张功成, 等. 辽东湾坳陷新生代构造改造作用及演化[J]. 地质科学, 2015, 50(2): 377-390.
- [17] 冯有良, 周海民, 任建业, 等. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(10): 1356-1376.
- [18] 段亮, 徐国盛, 李建平, 等. 辽东湾地区古近系东营组二段沉积相特征[J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(5): 549-554 + 465.
- [19] 朱筱敏, 董艳蕾, 杨俊生, 等. 辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2008, 38(S1): 1-10.
- [20] 邱楠生. 沉积盆地热历史恢复方法及其在油气勘探中的应用[J]. 海相油气地质, 2005, 10(2): 45-51.
- [21] 汪集旻, 邱楠生. 含油气沉积盆地古地温研究方法[J]. 地球物理学进展, 1992, 7(4): 46-62.
- [22] 李善鹏, 邱楠生. 应用磷灰石裂变径迹分析(AFTA)方法研究沉积盆地古地温[J]. 新疆石油学院学报, 2003, 15(2): 13-17 + 4.
- [23] Himansu, S.S., Matthias, J.R., Barry, P.K., *et al.* (2013) Thermal History of the Krishna-Godavari Basin, India: Constraints from Apatite Fission Track Thermochronology and Organic Maturity Data. *Journal of Asian Earth Sciences*, **73**, 1-20.
- [24] Donelick, R.A., Ketcham, R.A. and Carlson, W.D. (2000) Variability of Apatite Fission-Track Annealing Kinetics: II. Crystallographic Orientation Effects. *American Mineralogist*, **85**, 1565.
- [25] Karweil, J. (1955) Die Metamorphose der Kohlen vom Standpunkt der physikalischen Chemie. *Zeitschrift Der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, **107**, 132-139.
- [26] 胡圣标, 汪集旻, 张容燕. 利用镜质体反射率数据估算地层剥蚀厚度[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(4): 42-45 + 6.
- [27] Barker, C.E. and Pawlewicz, M.J. (1986) The Correlation of Vitrinite Reflectance with Maximum Temperature in Humic Organic Matter. *Paleogeothermics*, **5**, 79-93. <https://doi.org/10.1007/BFb0012103>
- [28] 李善鹏, 邱楠生. 应用镜质体反射率方法研究东营凹陷古地温[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2003, 18(6): 9-11 + 25-88.
- [29] 邱楠生. 中国大陆地区沉积盆地热状况剖面[J]. 地球科学进展, 1998, 13(5): 34-38.
- [30] 邱楠生, 左银辉, 常健, 等. 中国东西部典型盆地中-新生代热体制对比[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 157-168.

- [31] 龚育龄. 中国东部渤海湾盆地热结构和热演化[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2003.
- [32] Sclater, J.G. and Christie, P. (1980) Continental Stretching: An Explanation of the Post-Mid-Cretaceous Subsidence of the Central North Sea Basin. *Journal of Geophysical Research*, **85**, 3711-3739.
<https://doi.org/10.1029/JB085iB07p03711>
- [33] 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编[J]. 地质科学, 1988, 2: 196-204.
- [34] 刘波, 钱祥麟, 王英华. 华北板块早古生代构造-沉积演化[J]. 地质科学, 1999, 34(3): 347-356.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojs@hanspub.org