

Thermal History and Source Rock Thermal Evolution History in the Qianliyuan Sub-Sag, Dongpu Sag

Shilin Tang^{1,2}, Yinhui Zuo^{1,2*}, Wenting Wu^{1,2}, Yunxian Zhang³, Junhe Chang³

¹State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

²College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

³Research Institute of Exploration and Development, Zhongyuan Oilfield, SINOPEC, Puyang Henan

Email: *zuoyinhui@tom.com

Received: Oct. 20th, 2016; accepted: Nov. 8th, 2016; published: Nov. 11th, 2016

Copyright © 2016 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

Abstract

The Dongpu sag is an important generation hydrocarbon area of tectonic units in the Linqing depression of the Bohai Bay Basin, which has the greatest potential for oil and gas exploration. The Qianliyuan sub-sag is the main area of increasing oil and gas reserves in the Dongpu sag. In order to reveal the thermal history and source rock thermal evolution history, the thermal history of the Qianliyuan sub-sag was reconstructed based on vitrinite reflectance data from 5 typical wells. The results show that Qianliyuan sub-sag has experienced two phases of rifting, and the geothermal gradient reached twice high peaks during the early stage of the Shahejie Formation depositional period (39°C/km - 48°C/km) and the late stage of the Dongying Formation depositional period (38°C/km - 40°C/km). Moreover, based on the thermal history results, combined with the sedimentary and tectonic histories and source rock geochemical data, six sets of source rocks maturity history of 5 typical wells were simulated in the Qianliyuan sag. The results reveal that source rock thermal evolution is controlled by the paleo geothermal fields of the Dongying Formation depositional period in the Qianliyuan sag. The maturity of 6 sets of source rocks reached a maximum at the late stage of the Dongying Formation depositional period. This work will provide reference for deep oil and gas exploration in the Qianliyuan area.

Keywords

Qianliyuan Sub-Sag, Thermal History, Geothermal Gradient, Source Rock Thermal Evolution, Basin Modeling

*通讯作者。

东濮凹陷前梨园洼陷热史及烃源岩热演化

唐世林^{1,2}, 左银辉^{1,2*}, 伍文婷^{1,2}, 张云献³, 常俊合³

¹成都理工大学, 油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川 成都

²成都理工大学能源学院, 四川 成都

³中国石化中原油田分公司勘探开发科学研究院, 河南 濮阳

Email: *zuoyinhui@tom.com

收稿日期: 2016年10月20日; 录用日期: 2016年11月8日; 发布日期: 2016年11月11日

摘要

东濮凹陷为临清坳陷重要的生油构造单元, 是渤海湾盆地最具有油气勘探潜力的凹陷之一。其中前梨园洼陷是整个东濮凹陷增储的主要地区, 为了揭示其热史及烃源岩热演化历史, 首先利用5口典型井的镜质体反射率数据恢复了前梨园洼陷的热历史, 结果表明前梨园洼陷在沙河街组沉积开始至东营组沉积末期, 经历了两期裂陷作用, 地温梯度出现两期峰值, 为 $39^{\circ}\text{C}/\text{km}\sim 48^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 和 $38^{\circ}\text{C}/\text{km}\sim 40^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。再以热史为基础, 结合沉积和构造发育史及烃源岩地球化学资料, 模拟了前梨园洼陷5口典型井6套烃源岩的成熟度演化历史, 揭示了前梨园洼陷烃源岩成熟度演化受东营组沉积时期古地温场控制, 6套烃源岩成熟度都在东营组沉积末期达到最高, 这将为前梨园地区深层油气勘探提供参考。

关键词

前梨园洼陷, 热历史, 地温梯度, 烃源岩热演化, 盆地模拟

1. 引言

研究沉积盆地古地温场的意义在于更全面地评价烃源岩的生烃能力。油气的成藏是在一定的温度和深度条件下, 经历了漫长地质时期的结果, 在地质作用过程中, 区域的地热可能随着地质作用发生变化, 从而影响油气富集、运聚空间分布等。因此, 盆地热史的研究与油气成藏有着密切的关系[1]。

东濮凹陷的石油勘探工作始于1955年, 1975年钻探的濮参1井获高产油流, 至今已发现19个油田, 已探明石油地质储量 $5.18 \times 10^8 \text{ t}$, 天然气地质储量 $515.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 揭示东濮凹陷的油气资源勘探潜力很大[2]。但是, 近几年来随着油气勘探开采的程度加大, 东濮凹陷油气产量逐年下降, 急需在深层(大于3500 m)寻找油气资源。因此, 为了评价深层油气资源, 热史作为基础研究工作必不可少。但是目前东濮凹陷的热史研究还比较薄弱, 基本处于定性的阶段[3]。为了定量地评价深层油气资源, 急需进行热史的研究。前人对东濮凹陷古生界和中生界烃源岩热演化进行了较多的研究, 对热演化过程及生烃史有了较为深入的认识, 但古近系的烃源岩热演化相对研究不足, 刘景东等认为东濮凹陷北部地区各洼陷古近系烃源岩热演化程度较高, 前梨园洼陷和海通集洼陷进入高、过成熟阶段[4]。刘丽等认为东濮凹陷东部次凹、西部次凹和中央隆起带的石炭二叠系热演化程度高, 而白庙地区、西部斜坡带热演化程度较低, 且东部次凹和西部次凹的古地温与现今地温接近, 地层现今温度是地层经历的最高温度[5]。前梨园洼陷是东濮凹陷主要的生烃洼陷, 具有丰富的地球化学参数。因此, 本文通过Basinmod 1D盆地模拟软件, 利用镜质体反射率数据对前梨园洼陷的热史进行恢复, 并以热史为基础模拟了前梨园洼陷典型井的烃源岩

热演化历史。

2. 地质概况

东濮凹陷位于中国东部渤海湾盆地南部,跨鲁西南和豫东北,呈 NNE 向延伸,夹持在内黄隆起和鲁西隆起之间。前梨园洼陷古近纪为深部壳-幔强烈拱张的断陷,内部断裂构造十分发育[6],面积约 400 km² (图 1),整个洼陷经历了沙四段-东营组沉积时期的断陷阶段和馆陶组沉积至今的热沉降阶段[7] (图 2)。

第一次大规模断陷阶段沉积了沙河街组和东营组,沙四段沉积了 0~600 m,岩性为灰色泥岩与砂岩互层。沙三段断陷发育强烈,又分为 4 个亚段,其中沙三段四亚段岩性为灰白色岩盐与灰黑色泥岩组合,泥岩与砂岩互层,厚度 50~1700 m;沙三段三亚段为石膏与暗色泥岩组合,灰色泥岩与灰色砂岩组合,沉积厚度约 100~700 m;沙三段二亚段以盐岩层为主,沉积厚度 80~1000 m 左右;沙三段一亚段以灰色、深灰色泥岩与粉砂岩互层为主,夹灰色页岩、钙质页岩、油页岩,厚度约 50~900 m。整个沙三段厚度占古近系厚度的 60%左右,为洼陷主要的构造活动时期。沙二段是洼陷前期强烈断陷与后期拗陷的过渡期,沉积物以砂岩、泥岩为主,厚度为 100~1200 m。沙一段沉积以砂质泥岩为主,厚度约为 60~450 m。东营组岩性为棕色、紫红、灰绿色泥岩与紫红、灰绿、灰白色粉砂岩、细砂岩、砾状砂岩互层,厚度 125~1100 m。新近纪至今,由于太平洋板块向欧亚大陆俯冲带后退,前梨园洼陷进入拗陷阶段(热沉降阶段),沉积了新近纪馆陶组、明化镇组和第四纪平原组[5] (图 2)。馆陶组主要为灰白、杂色砂砾岩间夹红棕、浅灰色粘土岩,厚度 100~1650 m。明化镇组岩性为红棕、棕黄色粘土岩与黄棕、浅灰色粉砂岩、细砂岩不等厚互层,厚度约 850~1350 m。平原组为土黄、浅棕黄色粘土岩、粉砂岩、砂砾岩,厚度 250~520 m [8]。前梨园洼陷为古近纪继承性的生油气洼陷,沉积了多套生油层系,沙四段和沙三段的有机碳含量为 0.8%~1.4%,有机质类型以 II_A 和 I 型干酪根为主,是主要的生烃岩层[9]。

3. 研究方法及参数

3.1. 研究方法

关于盆地热史恢复的方法主要有两类:一类是利用古温标恢复盆地热史[10]-[16];另一类是利用地球动力学模型恢复岩石圈热历史[17] [18]。本文采用镜质体反射率数据,利用 BasinMod 1D 盆地模拟软件对前梨园洼陷古近纪至今的热史进行恢复。Basinmod 1D 盆地模拟软件能够进行埋藏史、热史、生烃史等的模拟[15]。研究方法如下:首先利用单井分层数据、岩性资料、主要地质时期的剥蚀量及地层年龄建立地质模型,再利用回拨法恢复得到单井的埋藏史;并以凹陷的构造演化为依据,拟合关键地质时期的地温梯度,结合埋藏史,利用动力学生烃模型[19],采用正演的方法对单井的温度史及成熟度史进行模拟,模拟得到的镜质体反射率与实测的镜质体反射率进行对比,如果模拟值与实测值具有很好的拟合度,则认为拟合的地温梯度是可行的,该地温梯度则为该井经历的热史。

3.2. 基本参数

在热史模拟计算中需要的参数包括古温标数据和基础地质数据。

1) 古温标数据

本次共测试了 5 口井的 122 个镜质体反射率数据(表 1),其中镜质体反射率与深度具体明显的线性关系(图 3),即随着埋藏深度的增加镜质体反射率逐渐增加,暗示受同一地温梯度控制。本文利用镜质体反射率模拟热史采用 Easy%R_o 模型[19]。

2) 基础地质参数

模拟计算中的基础地质参数包括岩性参数、现今地表温度数据、现今地温梯度[20]、大地热流[20]、

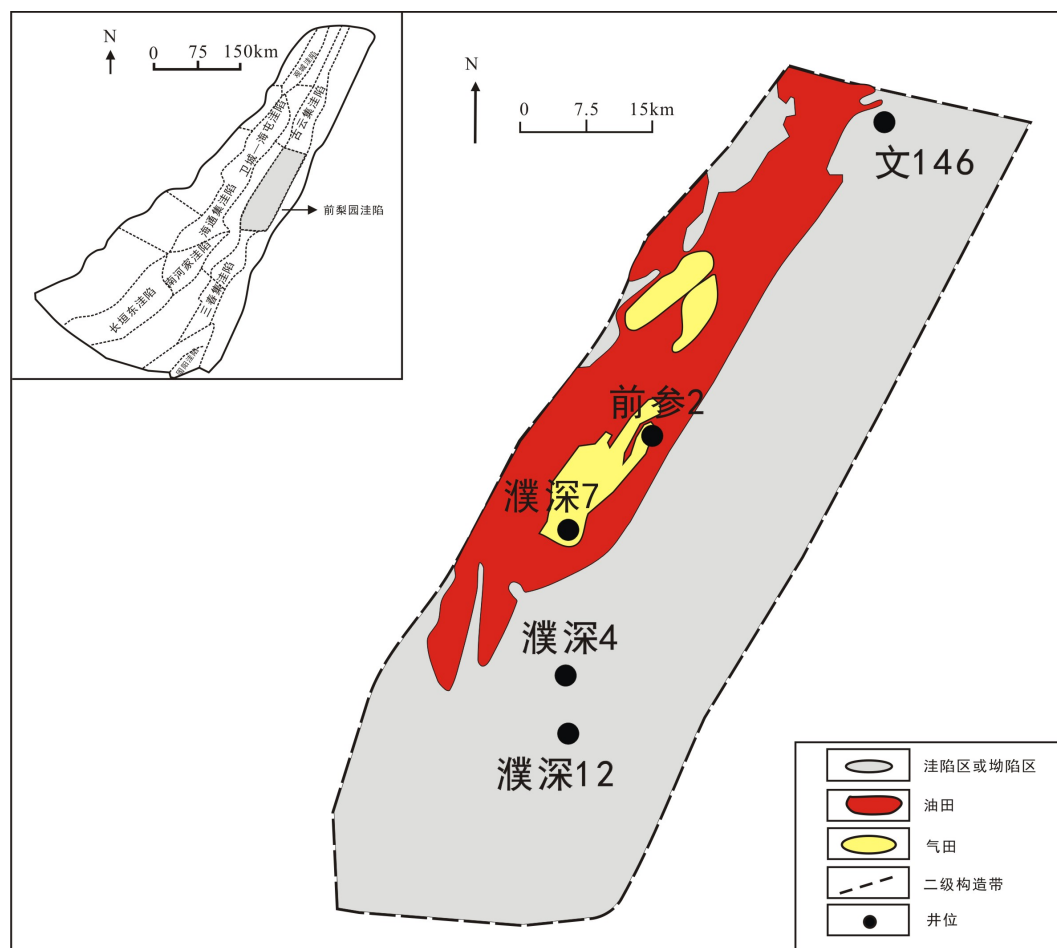


Figure 1. Tectonic division of the Qianliyuan sub-sag
图 1. 前梨园洼陷构造划分图

岩石热物性参数[20]、地层分层和年龄数据等。岩性参数主要包括岩石的孔隙度、渗透率、砂泥岩含量、压实曲线等，由中原油田提供；压实系数和初始孔隙度数据则采用东濮凹陷各井区的实测数据，利用 Sclater 和 Christie 的方法[21]进行回归得到初始孔隙度和压实系数；古地表温度取东濮凹陷年平均温度(15℃)，并假设其在地质历史时期不变；地层分层数据采用钻孔实际测量值，各地层底界年龄数据具体为：第四纪平原组(Qp)2 Ma，新近纪明化镇组(Nm)5.1 Ma，馆陶组(Ng)17 Ma，古近纪东营组(Ed)33 Ma，沙一段(Es1)35 Ma，沙二段(Es2)38 Ma，沙三段(Es3)45 Ma，沙四段(Es4)50.5 Ma。

4. 结果

4.1. 前梨园洼陷热史结果

利用镜质体反射率恢复了前参 2 井、濮深 4 井、濮深 12 井、濮深 7 井等 5 口典型井的埋藏史，热史及生烃史。前参 2 井热史的模拟结果显示，前参 2 井在沙四段沉积开始到东营组沉积中期经历了一次大的沉降过程，沙四段底界埋深到达 4700 m 左右，为断陷发育阶段。东营组沉积末期经历了一次较为明显的抬升剥蚀，抬升幅度达 800 m 左右，随后进入了缓慢的沉积时期，沉积了馆陶组，最后从馆陶组沉积末期至今又经历了一次快速沉降过程，沉积了明化镇组和平原组。热史恢复结果表明前梨园洼陷经历两次升温 and 一次降温阶段(图 4)，首先为古近纪沙四段 - 东营组沉积中期升温阶段，温度最高达到 200℃左右；

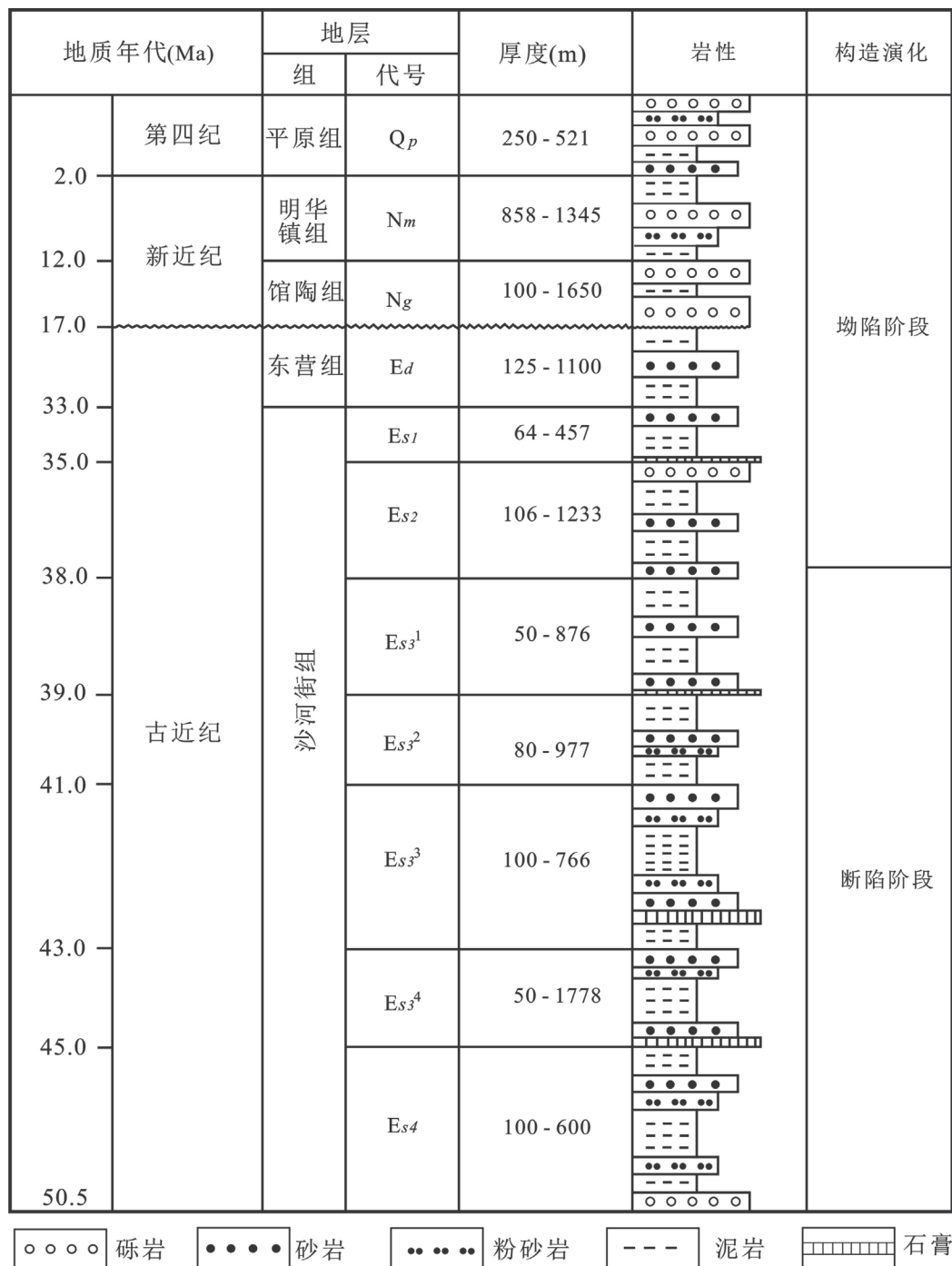


Figure 2. Stratigraphic column map of the Dongpu sag
图 2. 东濮凹陷综合柱状图

然后东营组沉积晚期温度逐渐降低至 160℃；最后馆陶组缓慢沉积，温度缓慢上升，从明化镇组至今，前梨园洼陷又再次进入了一段快速的沉降过程，温度仍在上升当中，但未到达 200℃，不再生烃。

从热史模拟结果看，前参 2 井在沙河街组沉积时期地温梯度在 39℃~46℃/km 之间，表现为中温型地温场。到沙三段沉积中期，地温梯度达到最高的 46℃/km，接着沙一段沉积末期地温梯度逐渐下降到 39℃/km，随后地温梯度继续下降。最后东营组沉积末期到馆陶组沉积时期再次发生一次升温过程，地温

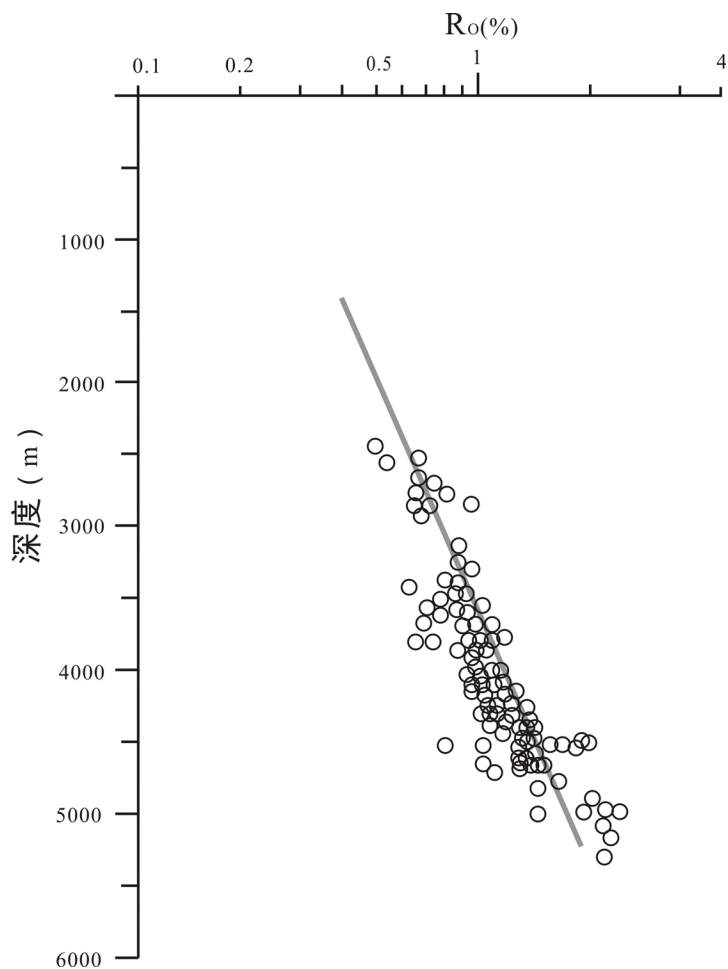


Figure 3. Vitrinite reflectance (R_o) data versus depth in the Qianliyuan sub-sag (R_o data shown in the **Table 1**)

图 3. 前梨园洼陷镜质体反射率与深度的关系(镜质体反射率数据见表 1)

梯度达到 $40^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，明化镇组沉积开始时，前梨园洼陷表现为热沉降阶段，地温梯度逐渐下降，现今仅为 $33^{\circ}\text{C}\sim 36^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

根据模拟得到的 5 口典型的地温梯度，结果显示前梨园洼陷现今地温梯度在 $31\sim 49^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 之间，具有典型的中温型地温场特征(表 2)。

4.2. 烃源岩成熟度演化

烃源岩成熟度演化阶段按照 $R_o < 0.5\%$ 为未成熟阶段， $0.5\% \leq R_o < 0.7\%$ 为低成熟阶段， $0.7\% \leq R_o < 1.0\%$ 为中成熟阶段， $1.0\% \leq R_o < 1.3\%$ 为高成熟阶段(生烃高峰期)， $R_o \geq 1.3\%$ 为过成熟阶段。生烃史模拟结果显示，东营组沉积中后期(25 Ma)沙四段和沙三段四亚段烃源岩成熟度达到过成熟阶段；沙三段烃源岩达到高成熟阶段，是最主要的生油时期；沙三段二亚段烃源岩和沙三段一亚段只达到中成熟阶段。东营组沉积末期(21 Ma)，6 套烃源岩均停止生烃，此后不再生烃(图 5)。

东营组沉积中期(26 Ma)，沙一段、沙二段的烃源岩进入了生油门限，并处于低成熟阶段。因为烃源岩成熟度受到时间与温度的控制，由于此阶段为快速沉积阶段，温度快速上升，烃源岩成熟度逐渐升高接近中等成熟阶段；东营组沉积早期(30 Ma)，沙三段一亚段、二亚段烃源岩进入生油门限，成熟度达到中等成熟阶段，沙三段二亚段底部达到高成熟阶段。与沙一段，沙二段相比，此阶段进入开始大量生油

Table 1. Vitrinite reflectance (R_o) data of the Qianliyuan sub-sag
表 1. 前梨园洼陷镜质体反射率统计表

序号	井号	深度(m)	R_o (%)	序号	井号	深度(m)	R_o (%)	序号	井号	深度(m)	R_o (%)
1	濮深 4	3569.1	1.06	41	文 146	3838.5	0.75	83	前参 2	4710	1.118
2	濮深 4	3570	0.89	42	前参 2	2460	0.505	84	前参 2	4764	1.756
3	濮深 4	3665	0.96	43	前参 2	2516	0.698	85	前参 2	4968	2.076
4	濮深 4	3668.75	0.94	44	前参 2	2750	0.787	86	前参 2	4990	1.493
5	濮深 4	3710	0.68	45	前参 2	2840	0.928	87	濮深 7	2450	0.49
6	濮深 4	3894.77	0.86	46	前参 2	3162	0.904	88	濮深 7	2540	0.58
7	濮深 4	3991.95	0.99	47	前参 2	3260	0.904	89	濮深 7	2705	0.74
8	濮深 4	4085.8	1	48	前参 2	3358	0.831	90	濮深 7	2920	0.79
9	濮深 4	4307.53	1.11	49	前参 2	3420	0.852	91	濮深 7	3069	0.72
10	濮深 4	4310.4	1.24	50	前参 2	3452	0.641	92	濮深 7	3325	0.9
11	濮深 4	4534.6	1.81	51	前参 2	3490	0.904	93	濮深 7	3511	1.14
12	濮深 4	4667	1.44	52	前参 2	3536	0.798	94	濮深 7	3515	1.01
13	濮深 4	4677	1.51	53	前参 2	3608	0.752	95	濮深 7	3546	0.58
14	濮深 4	4921.5	2.16	54	前参 2	3680	0.923	96	濮深 7	3556	0.68
15	濮深 4	4997.5	2.37	55	前参 2	3732	1.072	97	濮深 7	3560	1.08
16	濮深 4	5002.3	2.59	56	前参 2	3780	1.122	98	濮深 7	3561	0.96
17	濮深 4	5109	2.34	57	前参 2	3862	1.011	99	濮深 7	3570	0.96
18	濮深 4	5193.5	2.45	58	前参 2	3865.69	1.039	100	濮深 7	3573	0.9
19	濮深 4	5194.5	2.42	59	前参 2	3924	0.996	101	濮深 7	3575	0.8
20	濮深 4	5287	2.38	60	前参 2	3968.82	1.115	102	濮深 7	3587	0.74
21	濮深 12	3272	0.9	61	前参 2	4080.9	1.149	103	濮深 7	3587.3	1.64
22	濮深 12	3301	0.98	62	前参 2	4100	1.141	104	濮深 7	3594	1.14
23	濮深 12	3856	0.98	63	前参 2	4120.5	1.211	105	濮深 7	3603	1.11
24	濮深 12	4036	1.16	66	前参 2	4124	0.991	106	濮深 7	3681.7	1.43
25	濮深 12	4067	0.93	67	前参 2	4197	1.072	107	濮深 7	3708.1	1.54
26	濮深 12	4150	1.01	68	前参 2	4199.45	1.268	108	濮深 7	3711	1.06
27	濮深 12	4354.5	1.23	69	前参 2	4273.83	1.437	109	濮深 7	3715	1.11
28	濮深 12	4463.5	1.44	70	前参 2	4285	1.118	110	濮深 7	4011	1.81
29	濮深 12	4558	1.34	71	前参 2	4328	1.043	111	濮深 7	4019	1.75
30	濮深 12	4632	1.35	72	前参 2	4380	1.093	112	濮深 7	4046	1.86
31	濮深 12	4831	1.52	73	前参 2	4385.03	1.416	113	濮深 7	4047	1.86
32	文 146	2459	0.47	74	前参 2	4470	1.19	114	濮深 7	4147	1.7
33	文 146	2562	0.56	75	前参 2	4515	1.036	115	濮深 7	4148	1.64
34	文 146	2670	0.68	76	前参 2	4519.82	1.649	116	濮深 7	4153	1.68
35	文 146	2728	0.72	77	前参 2	4520	0.798	117	濮深 7	4156	1.17
36	文 146	2793.5	0.67	78	前参 2	4520.52	2.076	118	濮深 7	4158	1.86
37	文 146	2829.5	0.67	79	前参 2	4523.69	1.986	119	濮深 7	4159.3	1.43
38	文 146	2875	0.69	80	前参 2	4524.82	1.969	120	濮深 7	4165	1.92
39	文 146	2912	0.69	81	前参 2	4526.82	2.076	121	濮深 7	4166.1	1.65
40	文 146	3590	0.72	82	前参 2	4527.3	2.025	122	濮深 7	4183.4	1.86

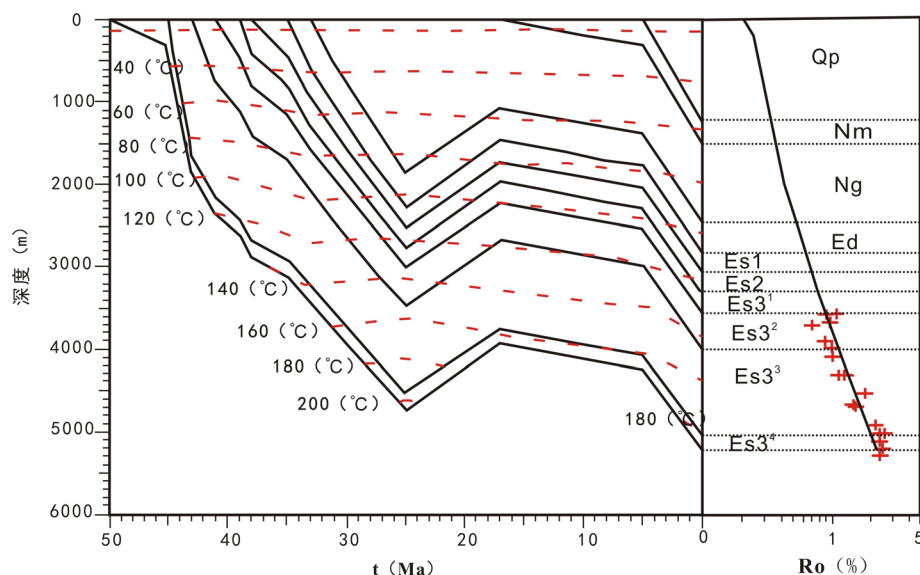


Figure 4. The burial and thermal histories of well Qiancan2

图 4. 前参 2 井埋藏史和热史模拟结果

Table 2. Simulation results of geothermal gradient of the typical well in the Qianliyuan sub-sag

表 2. 前梨园洼陷典型井地温梯度模拟结果

时间(Ma)	50	44	42	38	33	25	17	5.1	2	0
文 146	-	44	46	42	40	42	38	36	34	32
前参 2	42	44	46	43	39	40	38	36	34	33
地温梯度(°C/km)										
濮深 4	-	44	47	43	41	42	38	34	32	31
濮深 12	-	44	46	42	39	40	38	34	32	31
濮深 7	45	49	47	45	42	45	39	36	34	33

的时期，演化程度相对较高；沙河街组沉积后期(35 Ma)，沙三段三亚段烃源岩进入生油门限，到东营组末期烃源岩达到高成熟阶段，是整个洼陷生油的主力时期，是下一步勘探的有利区域；沙河街组沉积期(40 Ma)，沙三段四亚段，沙四段烃源岩进入生油门限，此阶段烃源岩埋深更大，成熟度达到过成熟阶段，至东营组沉积期(21 Ma)，烃源岩已经全部进入生气为主的演化阶段($R_o > 1.3\%$)，沙河街组四亚段以上烃源岩现今成熟度在洼陷中心达 2.0%以上，全部进入生干气阶段。大部分地区的生油岩处于主要生气期，凝析油-湿气阶段，同时有大量的天然气生成，具有丰富的天然气资源(图 5)。

5. 讨论

5.1. 热史与构造演化、岩浆活动的耦合关系

通过以上研究表明前梨园洼陷在古近纪具有较高的古地温梯度，这种地热状态与其经历的构造运动密切相关。前梨园洼陷是在古近系断裂基底上发展起来的裂谷盆地，盆地的构造演化经历了早古生代至三叠纪的克拉通盆地旋回和新生代的裂陷盆地旋回[22]。自古近纪以来发生了大规模断陷活动(图 6)，在这共同作用下引发了多期火山活动，此阶段岩石圈的大幅度拉伸减薄，地幔物质上涌，带来了大量地幔热量，导致古近纪具有高的地热背景。在沙三段沉积末期，前梨园洼陷经历了短期的构造抬升作用，导致地温梯度降低，随后由于裂陷作用，使得地温梯度增加。新近纪至今，前梨园洼陷表现为缓慢的热沉

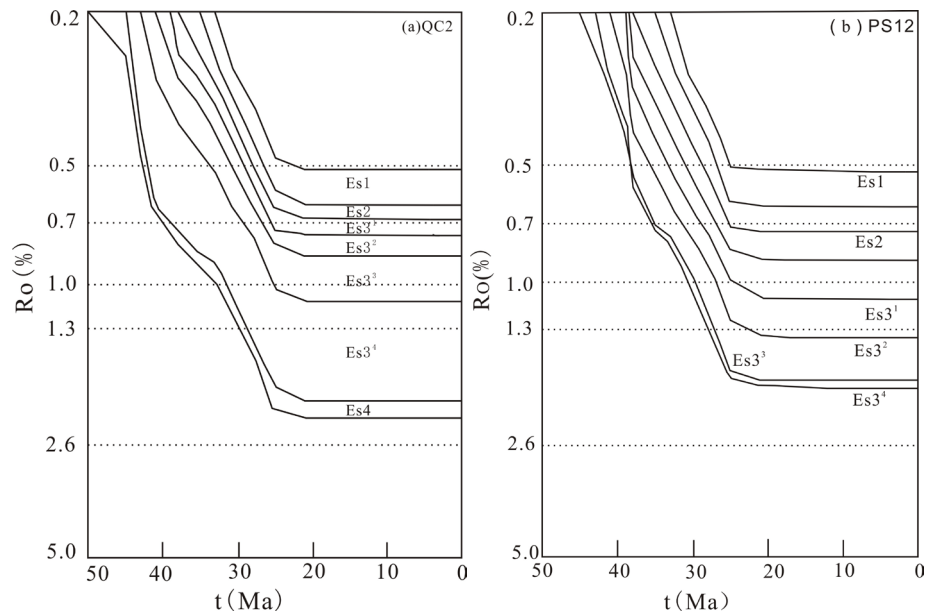


Figure 5. Source rock maturation history of the typical wells in the Qianliyu sub-sag
图 5. 前梨园洼陷典型井烃源岩成熟度演化历史

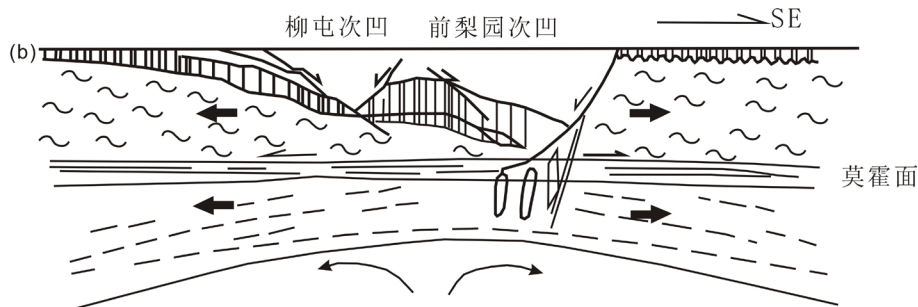


Figure 6. Qianliyu sub-sag in Cenozoic extensional tectonic pattern (According to Hui Su, *et al.*, 2006)
图 6. 前梨园洼陷新生代伸展构造模式(据苏慧等 2006)

降阶段，大部分断裂停止活动，地温梯度逐渐下降。因此，前梨园洼陷热史与其构造、岩浆岩活动密切相关。

5.2. 热史与烃源岩成熟度的关系

烃源岩热演化是受温度和时间控制的，但主要影响因素为温度，其中温度又主要由地温梯度与烃源岩埋藏深度控制。模拟结果揭示前梨园洼陷地层温度从沙四段逐渐升高，并在东营组沉积时期温度达到最高。烃源岩热演化史显示洼陷到东营组沉积末期，烃源岩成熟度不再变化，结束生烃(图 5)。因此，烃源岩热演化受东营组沉积时期的地温场控制。通过烃源岩成熟度模拟，我们可以进一步得出前梨园洼陷的生、排烃时期与成藏时期，结合其它储、盖、圈闭等研究，可以进一步指出油气有利聚集成藏区块。

6. 结论

1) 前梨园洼陷热演化历史总的趋势表现为自沙四段沉积开始(50 Ma)至沙三段沉积时期(45 Ma)，地温梯度逐渐增加，到沙三段达到最大，为 44℃~49℃/km；随后地温梯度逐渐降低，到沙一段沉积末期(33

Ma), 地温梯度降低到 39°C~42°C/km; 东营组沉积中期(25 Ma), 地温梯度再次升高, 地温梯度上升到 40°C~45°C/km; 随后地温梯度逐渐降低至现今的 31°C~33°C/km。

2) 前梨园洼陷的烃源岩热演化受古地温梯度控制, 6 套烃源岩都东营组沉积末期烃源岩成熟度达到最大; 同时 6 套烃源岩的演化程度存在差异, 其中沙三段三、四亚段烃源岩达到中-过成熟阶段, 几乎都经历了生烃高峰期, 生烃潜力大; 而沙一段烃源岩仅达到低-中成熟阶段, 几乎没有经历生烃高峰期, 生烃潜力较小。

基金项目

国家自然科学基金(编号 41402219, 41125010)。

参考文献 (References)

- [1] 左银辉, 马维民, 邓己寻, 等. 查干凹陷中、新生代热史及烃源岩演化[J]. 中国地质大学学报(地球科学版), 2013, 38(3): 553-560.
- [2] 李继东. 东濮凹陷构造特征与断块群成藏条件分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- [3] 左银辉, 张旺, 李兆影, 等. 查干凹陷中、新生代构造——热演化史[J]. 地球物理学报, 2015, 58(7): 2365-2379.
- [4] 刘景东, 蒋有录. 东濮凹陷北部地区古近系烃源岩热演化特征及其主控因素[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 498-507.
- [5] 刘丽, 任战利. 东濮凹陷热演化史研究[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 419-423.
- [6] 苏慧, 曲丽萍, 李桂霞, 等. 东濮凹陷平衡剖面与构造演化研究[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(4): 469-478.
- [7] 程秀申, 漆家福, 陈书平, 等. 关于东濮凹陷构造单位的探讨[J]. 断块油气田, 2009, 16(4): 15-18.
- [8] 熊良淦, 王胜利, 史淑芳, 等. 前梨园凹陷西坡深层低渗储层成岩相与孔隙演化研究[J]. 断块油气田, 2003, 10(5): 37-40.
- [9] 王秀林, 张洪波, 张孝义, 等. 前梨园洼陷深盆气藏[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 58-61.
- [10] Hu, S.B., Sullivan, O.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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9201\(01\)00257-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9201(01)00257-6)
- [11] Qiu, N.S., Chang, J., Zuo, Y.H., Wang, J. and Li, H. (2012) Thermal Evolution and Maturation of Lower Paleozoic Source Rocks in the Tarim Basin, Northwest China. *AAPG Bulletin*, **96**, 789-821. <http://dx.doi.org/10.1306/09071111029>
- [12] Qiu, N.S., Xu, W., Zuo, Y.H. and Chang, J. (2015) Meso-Cenozoic Thermal Regime in the Bohai Bay Basin, Eastern North China Craton. *International Geology Review*, **57**, 271-289. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2014.1002818>
- [13] Zuo, Y.H., Qiu, N.S., Hao, Q.Q., *et al.* (2015) Geothermal Regime and Source Rock Thermal Evolution History in the Chagan Sag, Inner Mongolia. *Marine and Petroleum Geology*, **59**, 245-267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.09.001>
- [14] Zuo, Y.H., Wang, C.C., Tang, S.L. and Hao, Q. (2016) Mesozoic and Cenozoic Thermal History and Source Rock Thermal Evolution of the Baiyinchagansag, Erlian Basin, Northern China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **139**, 171-184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2015.12.025>
- [15] Zuo, Y.H., Qiu, N.S. and Zhang, Y. (2011) Geothermal Regime and Hydrocarbon Kitchen Evolution of the Offshore Bohai Bay Basin, North China. *AAPG Bulletin*, **95**, 749-769. <http://dx.doi.org/10.1306/09271010079>
- [16] Zuo, Y.H., Qiu, N.S., Li, J.W., *et al.* (2015) Meso-Cenozoic Tectono-Thermal Evolution History in Bohai Bay Basin, North China. *Journal of Earth Science*, **26**, 352-360. <http://dx.doi.org/10.1007/s12583-014-0500-0>
- [17] 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. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2117.2004.00245.x>
- [18] Menzies, M., Xu, Y.G., Zhang, H. and Fan, W. (2007) Integration of Geology, Geophysics and Geochemistry: A Key to Understanding the North China Craton. *Lithos*, **96**, 1-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2006.09.008>
- [19] Sweeney, J.J. and Burnham, A.K. (1990) Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics. *AAPG Bulletin*, **74**, 1559-1570.
- [20] Zuo, Y.H., Qiu, N.S., Hao, Q.Q., *et al.* (2014) Present Geothermal Fields of the Dongpu Sag in the Bohai Bay Basin.

Acta Geologica Sinica, **88**, 915-930. <http://dx.doi.org/10.1111/1755-6724.12246>

- [21] 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.
<http://dx.doi.org/10.1029/JB085iB07p03711>
- [22] 苏惠, 曲丽萍, 张金川, 等. 裂陷盆地构造演化及盆地伸展模式——以东濮凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 70-71.

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