

左银辉, 邱楠生, 庞雄奇等. 渤海海域沙三段烃源灶演化特征研究. 地球物理学报, 2010, **53**(10):2415~2426, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.015

Zuo Y H, Qiu N S, Pang X Q, et al. Hydrocarbon kitchen evolution of E₂S₃ source rock of the Bohai Offshore area, North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(10):2415~2426, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.015

渤海海域沙三段烃源灶演化特征研究

左银辉^{1,2}, 邱楠生^{1,2*}, 庞雄奇^{1,2}, 李建平³, 郭永华³, 姜福杰^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)盆地与油藏研究中心, 北京 102249

3 中国海油天津分公司勘探开发研究院, 塘沽 300452

摘 要 烃源灶是表征供烃中心的最合适的方法, 其迁移演化研究对油气勘探具有重要意义. 渤海海域为渤海湾盆地海域部分, 是中国主要富油气盆地之一. 沙河街组三段是古近系 4 套烃源岩中最重要烃源岩. 本文在沉积、构造发育和热史研究成果的基础上, 结合烃源岩地球化学参数模拟计算了沙三段烃源岩成熟生烃及生、排烃演化历史, 并以此研究渤海海域沙三段烃源灶的演化特征. 结果表明研究区具有早期的“双灶共存”和晚期“单灶为主, 多灶并存”的特征, 即早期(古近纪)为歧口和渤中凹陷烃源灶; 晚期(新近纪至今)以渤中凹陷烃源灶为主, 歧口、南堡、黄河口、辽中、辽西和秦南凹陷等烃源灶并存. 烃源灶为油气田的形成提供了物质基础, 渤海海域的大中型油气田分布在主要烃源灶周围的凸起区和斜坡带. 因而, 本文的研究可以为渤海海域油气的深入勘探决策提供基础.

关键词 渤海海域, 烃源岩, 沙三段, 成熟度, 烃源灶

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.015

中图分类号 P314

收稿日期 2010-01-28, 2010-08-11 收修定稿

Hydrocarbon kitchen evolution of E₂S₃ source rock of the Bohai Offshore area, North China

ZUO Yin-Hui^{1,2}, QIU Nan-Sheng^{1,2*}, PANG Xiong-Qi^{1,2},
LI Jian-Ping³, GUO Yong-Hua³, JIANG Fu-Jie^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 Research Center for Basin and Reservoir, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3 Institute of Petroleum Exploration and Development, Bohai Oil Company, CNOOC, Tanggu 300452, China

Abstract The hydrocarbon kitchen is appropriate for characterizing the center of providing hydrocarbon, and its evolution research has a great significance for petroleum exploration. The Bohai Offshore area is located in the offshore Bohai Bay basin, North China. It is one of the most petroliferous basins in China. There developed four sets of potential source rocks in the Paleocene. The third member of the Shahejie Formation (E₂S₃) is the most important source rock. In this paper, the evolution histories of the maturation and hydrocarbon generation & expulsion of E₂S₃ source rocks are modeled based on the depositional and tectonic development

基金项目 油气资源与探测国家重点实验室重点项目(PRPMC2008-1); 国家自然科学基金项目(U0633003); 中国海油天津分公司重大项目(SC06TJ-TQL-004)共同资助.

作者简介 左银辉, 男, 1980 年生, 地质学专业博士研究生, 主要从事沉积盆地构造-热演化和油气成藏机理方面的研究.

E-mail: zuoyinhui@Tom.com

* **通讯作者** 邱楠生, E-mail: qiunsh@cup.edu.cn

history in combination with geochemical and thermal parameters, etc. The hydrocarbon kitchen evolution of the E_2S_3 source rocks is analyzed using the amount of expelled hydrocarbon of the E_2S_3 source rocks in the main geological periods. The results show that there developed two hydrocarbon kitchens at early stage, which then transformed to one main hydrocarbon kitchen and co-existing multi-hydrocarbon kitchens with the geological evolution, e. g. two hydrocarbon kitchens in the Bozhong and Qikou sags in the Paleocene and one main hydrocarbon kitchen in the Bozhong sag and multi-kitchens in the Qikou, Nanpu, Huanghekou, Liaozhong, Liaoxi and Qinnan sags from the Neogene to the present day. Most oil and gas fields are located in the uplifts and slopes around the main hydrocarbon kitchens, thus the study may provide new insight for understanding the petroleum exploration potential of the Bohai Offshore area.

Keywords Bohai Offshore area, Source rock, The third member of the Shahejie Formation, Maturation, Hydrocarbon kitchen

1 引言

渤海海域东邻胶辽断隆区,西为黄骅坳陷的延伸,北与下辽河坳陷相连,南与济阳坳陷相接,是渤海湾含油气盆地的重要组成部分.海域水深一般在 20~40 m,勘探面积达 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1).油气勘探开始于 1965 年,在最近 10 年发现了 SZ36-1、QHD32-6、NP35-2、PL19-3、CFD11-1 和 BZ25-1 等超过亿吨的油气田.迄今为止,渤海海域累计产油已经超过 5000 万吨石油当量,已经找到了超过 20 亿吨的地质储量^[1~3],是目前中国海上油气勘探的重要探区.但目前的发现主要集中在浅部、个别凸起地区,深部及大部分凸起区仍未有大的发现.而这些地区的油气勘探依赖于对这些凹陷烃源岩的认识.烃源岩是油气田形成的物质基础,通过供烃中心的研究,可以为有利油气勘探区的决策提供重要的依据.

烃源灶(hydrocarbon kitchen)是表征盆地供烃中心的最合适的方法,它是指某个评价层段中集中分布的、已经达到生油门限的、并且证实为某些油气聚集提供了油气源的烃源岩体.一般来说,烃源灶即是研究区有机质丰度高、类型好、生烃潜力大、成熟的烃源岩.烃源灶的概念最早由 Demaison(1984)提出,被定义为评价成熟烃源岩单位体积的排烃量的指标^[4].Thomas 等对大西洋东北部的北海盆地维京地堑北部上侏罗统烃源灶、油气运移途径和方向做了系统总结,研究内容包括了烃源灶的位置和分布、烃源灶的生烃(油、气)强度、不同地质时期的生烃量和区带聚集量,利用烃源灶及其迁移演化规律已成功指导了北海盆地等地区的油气勘探^[5].识

别和圈定烃源灶已经是油气勘探研究中的关键性内容,是分析一个地区是否具备油气潜力的基础^[6~15].最近几年,随着计算机和地震勘探技术的发展,许多学者采用盆地模拟的方法恢复某一地区的埋藏史和热史,结合地球化学参数模拟烃源灶的演化,这为油气运移、聚集和成藏的研究提供基础^[8,9,11,16~20].

目前,对于渤海海域烃源灶还没有系统研究.近年来,由于渤海海域增加了大量的地震、钻探和有机地球化学等资料,为系统研究该地区烃源岩成熟及烃源灶演化提供了基础.本文依据热史和烃源岩发育分布的研究成果(将另文发表),研究渤海海域烃源灶及其演化特征,可以为渤海海域油气的深入勘探决策提供基础.

2 地质概况

渤海海域主要包括渤中、歧口、黄河口、莱州湾、秦南、南堡、辽中和辽西等 14 个凹陷和石臼坨、沙垒田、渤南、渤东和辽西等 16 个凸起(图 1).新生代地层包括孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组和平原组.由于受加里东、印支和燕山运动的影响,渤海海域前新生代经历了长时间的地质演化,即中晚元古代至古生代区域稳定沉积阶段和中生代隆起褶皱阶段^[21,22],使得渤海海域长期隆起、剥蚀区出露大量变质基岩.新生代时期,由于喜马拉雅构造幕式运动的影响,渤海海域的构造演化具有多幕式裂隙、多旋回叠加和多成因机制复合的特征.其新生代构造及沉积演化可分为 6 个阶段^[3,23~25],即:(1)孔店组—沙四段沉积期为裂隙 I 幕(55~42 Ma), (2)沙三段沉积期为裂隙 II 幕(42~38 Ma), (3)沙一段和沙二段沉积期为渤海海域第一重要裂后热沉

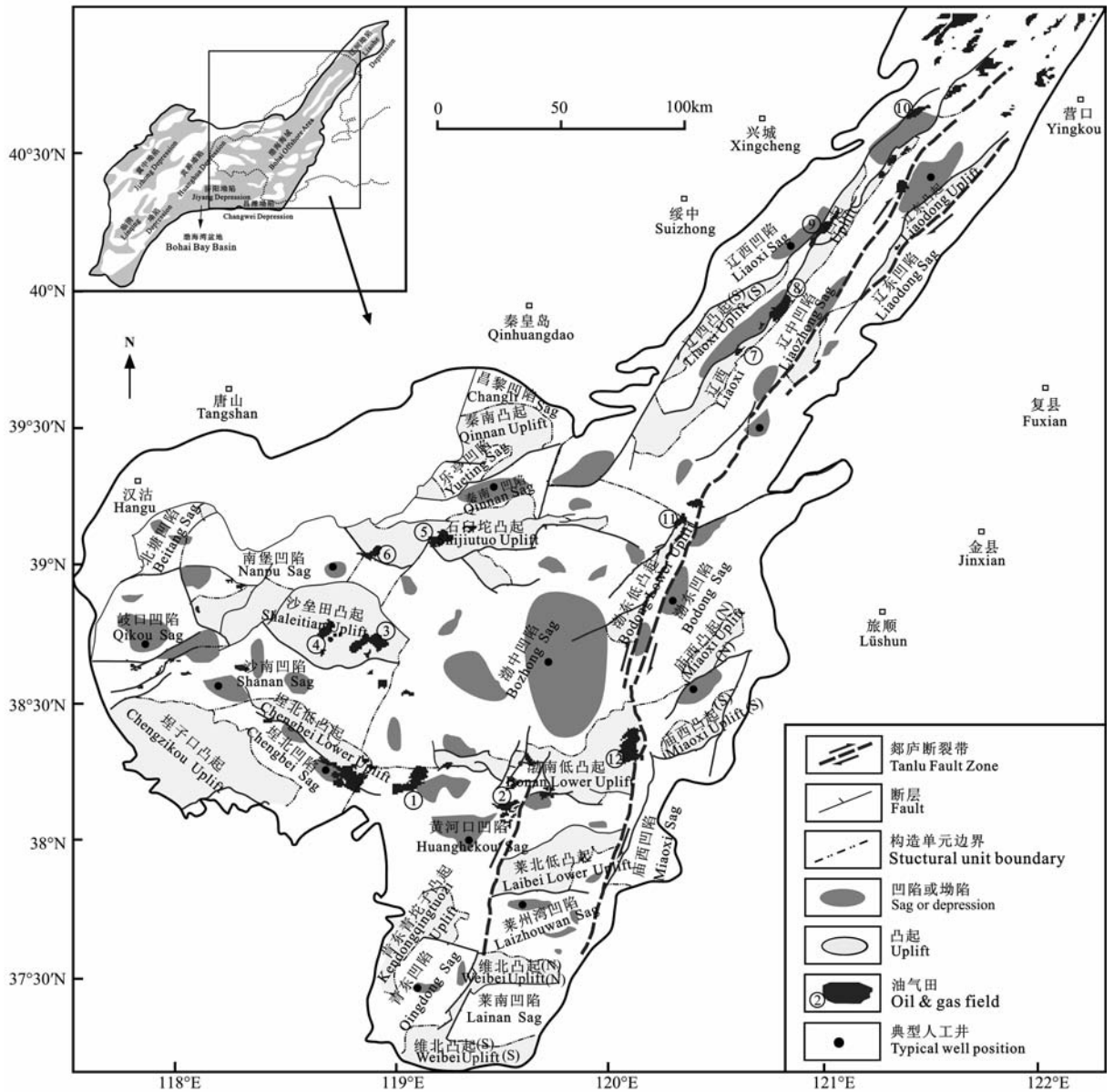


图 1 渤海海域构造单元划分图(据汤良杰等¹⁾, 修改)

①~⑫分布不同的油气田, ① BZ25-1; ② BZ28-2; ③ CFD12-1; ④ CFD11-1; ⑤ QHD32-6;
⑥ NP35-2; ⑦ LD10-1; ⑧ LD5-2; ⑨ JZ25-1s; ⑩ JZ29-3; ⑪ LD27-2; ⑫ PL19-3.

Fig. 1 Sketch map of structural unit division in the Bohai Offshore area (modified from Tang et al.¹⁾)

①~⑫ are the codes for oil & gas fields. ① Bozhong 25-1; ② Bozhong 28-2; ③ Caofeidian 12-1; ④ Caofeidian 11-1; ⑤ Qinhuangdao 32-6; ⑥ Nanpu 35-2; ⑦ Lüda 10-1; ⑧ Lüda 5-2; ⑨ Jinzhou 25-1s; ⑩ Jinzhou 29-3; ⑪ Lüda 27-2; ⑫ Penglai 19-3.

降拗陷阶段(38~32.8 Ma), (4)东营组沉积期为裂陷Ⅲ幕(32.8~24.6 Ma), (5)馆陶组至明下段沉积期为第二裂后热沉降阶段(24.6~5.1 Ma), (6)明上段至第四纪沉积期为新构造运动再活动旋回阶段(5.1~0 Ma). 在新生代沉积、沉降演化中, 渤海海

域的沉积、沉降中心由陆地向海域中心的渤中凹陷迁移, 在新近纪和第四纪渤中凹陷沉积厚度最大^[1,3,26].

渤海海域发育四套烃源岩: 沙四段(E_2s_4)—孔店组(E_1k)、沙三段(E_2s_3)、沙一、二段(E_2s_{1-2})和东营组(E_3d). 东营组烃源岩埋深浅, 仅在渤中、南堡和歧口等凹陷达到成熟; 沙一、二段烃源岩虽然分布较广, 但是厚度较小; 沙四段—孔店组仅在个别井钻遇, 分布范围不清, 只是与陆上拗陷相比可能

1) 汤良杰, 漆家福. 渤海湾地区构造成因演化与潜山分布. 中国石油大学(北京)与中国海油天津分公司科研报告, 2009

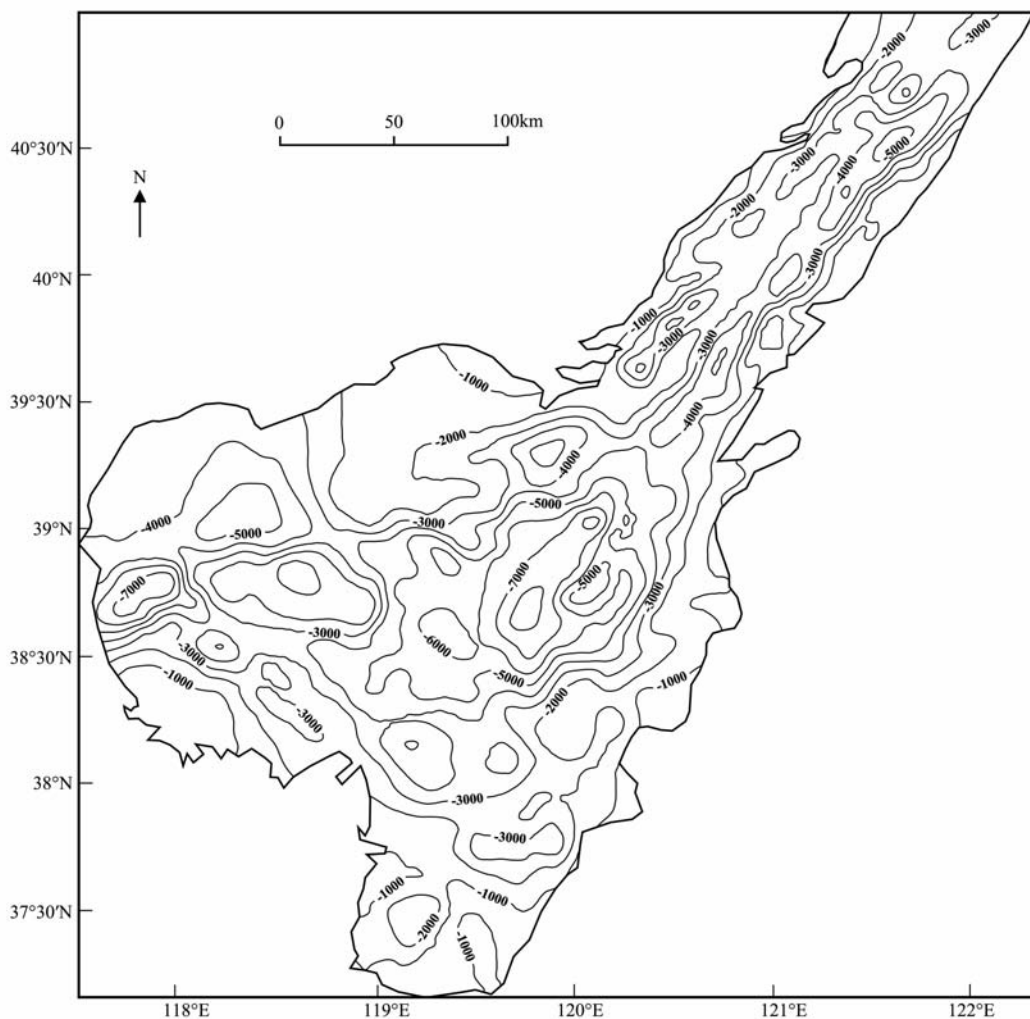


图2 渤海海域沙三段底面埋深图(m)

Fig. 2 Burial depth map for the bottom of the E_2s_3 in the Bohai Offshore area (m)

是一套烃源岩. 相比之下, 沙三段(E_2s_3)烃源岩为渤海海域最重要的烃源岩层段(与陆上各拗陷一致). 沙三段为扇三角洲、冲积扇、水下扇、湖泊及碳酸盐台地沉积, 其下部为灰色灰岩、云岩与膏岩互层, 中部为深灰、灰褐色泥岩夹中一粗砂岩, 上部为生物碎屑灰岩^[16,21,27,28], 其底界埋藏在渤中凹陷最深, 达到 8000 m, 且海域大部分地区超 3000 m (图 2). 本文依据大量钻孔实测数据得到了沙三段烃源岩有机质类型和 TOC 分布图, 从图中可以看出, 沙三段烃源岩的有机碳(TOC)含量相对较高, 介于 0.10%~3.75%之间, 平均为 1.64%(图 3); 岩石裂解分析显示沙三段烃源岩类型主要为 II 型(图 3); 氯仿沥青“A”含量介于 0.01%~0.29%之间, 平均为 0.10%. 生烃潜能($S_1 + S_2$)介于 0.63~18.93 mg/g之间, 平均为 6.88 mg/g, 氢指数普遍偏高, 介于 53.8~708.0 mg/g之间, 平均为 341.2 mg/g, 尤其是各凹陷的深洼地区, 氢指数基本上大于

300 mg/g, 最大可达到 700 mg/g. 这些地球化学指标均说明沙三段是一套优质烃源岩. 而且从目前已发现的油田看, 主要是沙三段烃源岩的贡献^[16,27,28], 因此, 本文重点对沙三段烃源岩进行研究.

3 方法与原理

3.1 烃源灶演化研究方法

本文结合各主要地质时期的生、排烃强度, 生、排烃量等参数来研究烃源灶演化. 而有机质成熟演化是影响烃源灶演化的关键参数之一. 从上述关于烃源灶的定义及国外学者的研究中可以看出, 对烃源灶的研究重点是确定地质历史时期为油气聚集提供了油气源的烃源岩体. 因而, 根据烃源岩的成熟、生烃及排烃演化历史, 计算各凹陷烃源岩体在地质历史期的排烃(量). 通过对比盆地内主要供烃凹陷(烃源岩体)的排烃量(即供烃量), 确定各地质时

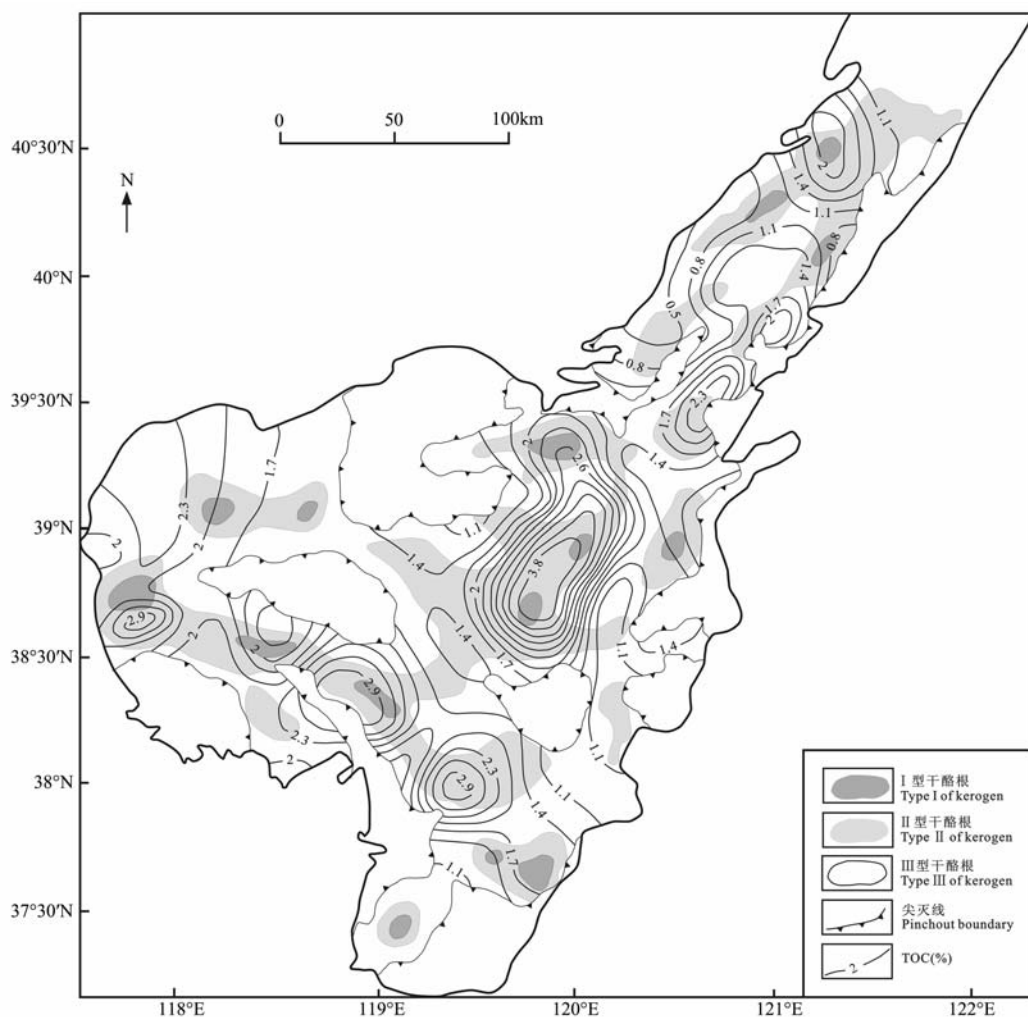


图3 渤海海域沙三段烃源岩 TOC 和有机质类型分布图

Fig. 3 TOC and organic matter type distribution for E_2S_3 source rock in the Bohai Offshore area

期对油气聚集起主导作用的供烃中心——烃源灶及其演化迁移特征。

通过对近年钻井和地层资料及相关样品的分析,获取了渤海海域沙三段烃源岩的发育分布图、烃源岩地球化学特征分布图,并依据镜质体反射率和裂变径迹恢复了研究区的热演化史^[2]。同时,最近根据地震解释成果获得了研究区各地层厚度数据和主要地质历史时期的剥蚀厚度^[1,3]。这些都是本文研究烃源灶及其演化的基础。在模拟中,生烃模型采用 Easy%Ro 模型^[29,30],排烃模型采用临界饱和度模型^[31]。

3.2 基本参数

基本参数包括地质参数和烃源岩地球化学参数。地质参数包括各层系的地层厚度数据、剥蚀量数据、热史参数、地层分层数据和岩性等。其中岩性参数主要包括各岩性的热导率、生热率、密度、压实系数、初始孔隙度等。岩性热物性数据采用前人的

数据^[32,33]。地层分层采用钻孔实际测量值,利用 Sclater 和 Christie(1980)的方法^[34]进行回归得到初始孔隙度和压实系数。地球化学参数包括 TOC、干酪根类型和镜质体反射率等采用现有研究成果^[2]。热史成果采用研究区主要凹陷的研究成果^[2],并参考以往对邻区的研究成果^[32,35,36]。

4 烃源灶演化

4.1 沙三段烃源岩成熟度演化

该套烃源岩底在沙河街组沉积末期(32.8 Ma),

2) 邱楠生,姜振学. 渤海盆地优质烃源岩分布预测与油气资源定量评价. 中国石油大学(北京)与中国海油天津分公司科研报告,2009

3) 辛仁臣. 渤海湾地区古近系层序地层及隐蔽圈闭分布预测. 中国石油大学(北京)与中国海油天津分公司科研报告,2009

除秦南、渤东凹陷外,大部分地区均已达到成熟门限($Ro=0.5\%$);至东营组沉积末期(24.6 Ma),在辽中、渤中、南堡凹陷达到中成熟($0.7\% < Ro < 1.0\%$);歧口凹陷达到了高成熟阶段($1.0\% < Ro < 1.3\%$)(图 4a).至馆陶组沉积末期(12 Ma),渤中凹陷烃源岩的成熟度增加较快,在其他凹陷增加缓慢(图 4b),此时,渤中凹陷的深洼区已经达到过成熟($1.3\% < Ro < 2.0\%$),歧口凹陷开始生干气($Ro > 2.0\%$);明化镇组沉积末期至现今(2~0 Ma),除青东、莱州湾、埕北及辽西等凹陷大体上处于中成熟阶段外,其他凹陷都已经处于高-过成熟阶段,且歧口凹陷达到生干气的范围扩大和渤中凹陷的深洼区已经处于生干气阶段(图 4c~4d).

4.2 沙三段烃源岩生、排烃演化

生、排烃强度是反映单位体积的烃源岩生、排烃

能力.沙三段烃源岩在沙河街组沉积时期,仅在歧口凹陷有些生烃和排烃.在东营组沉积时期,歧口凹陷生烃强度最大,达到 $350 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,其次为渤中、黄河口、南堡、秦南和辽中凹陷,此外,辽西和莱州湾凹陷也开始生烃,但生烃强度很小(图 5a).该时期,歧口凹陷排烃强度也是最大的,达到 $200 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,其次为渤中和南堡凹陷,都达到 $40 \times 10^4 \text{ t/km}^2$.此外,在辽中、黄河口和秦南凹陷的排烃强度较小(图 6a).

馆陶组沉积时期,整个海域开始大面积生、排烃.从生烃强度看,歧口凹陷最大,达到 $400 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,其次在黄河口和渤中凹陷,分别达到了 $300 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 和 $250 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,南堡、秦南、莱州湾、辽中和辽西凹陷的最大生烃强度也超过了 $150 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,此时,青东凹陷也开始生烃(图 5b).

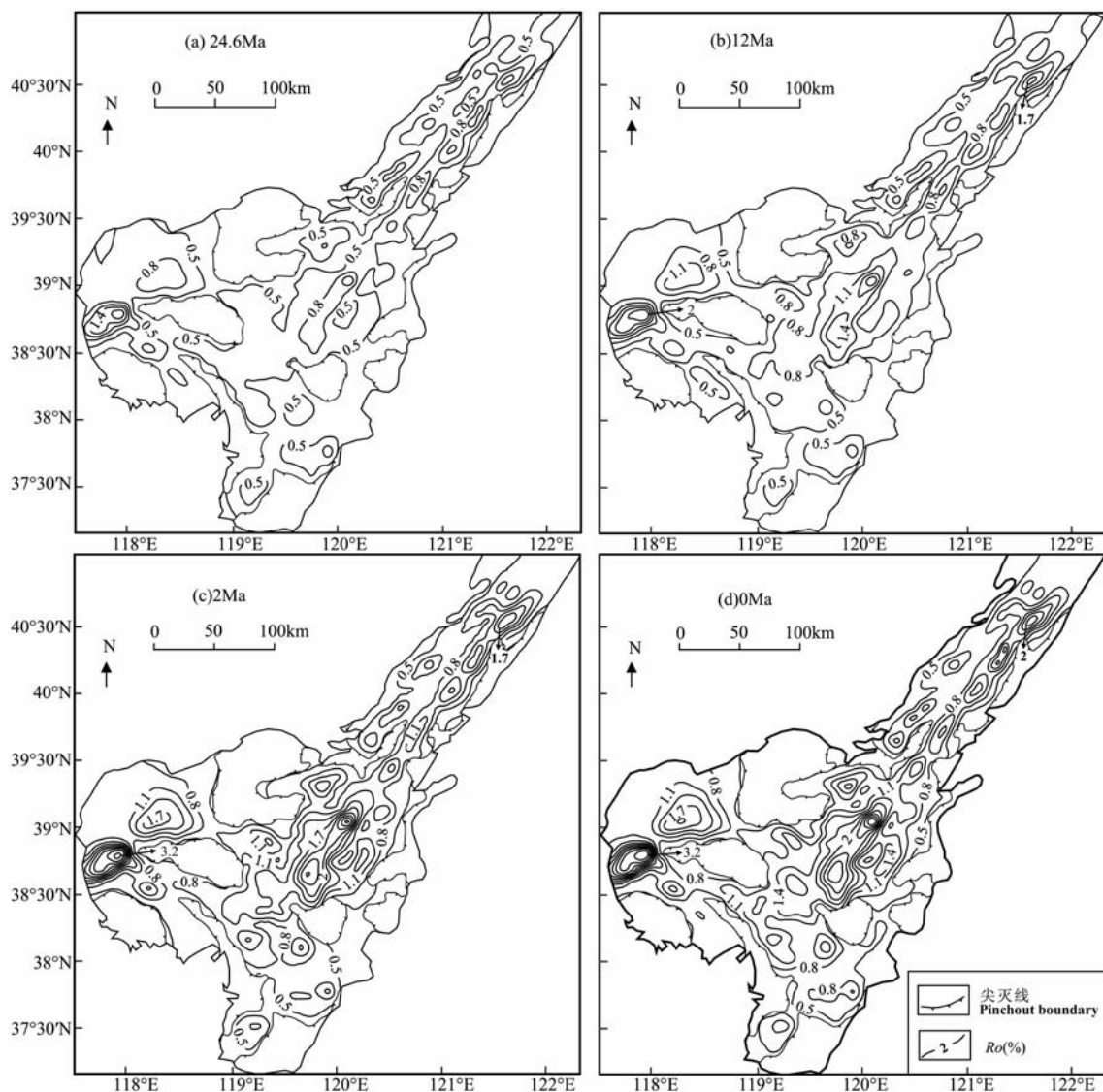


图 4 渤海海域沙三段底烃源岩成熟演化图

Fig. 4 The maturity evolution of the bottom of the E_2s_3 source rock in the Bohai Offshore area

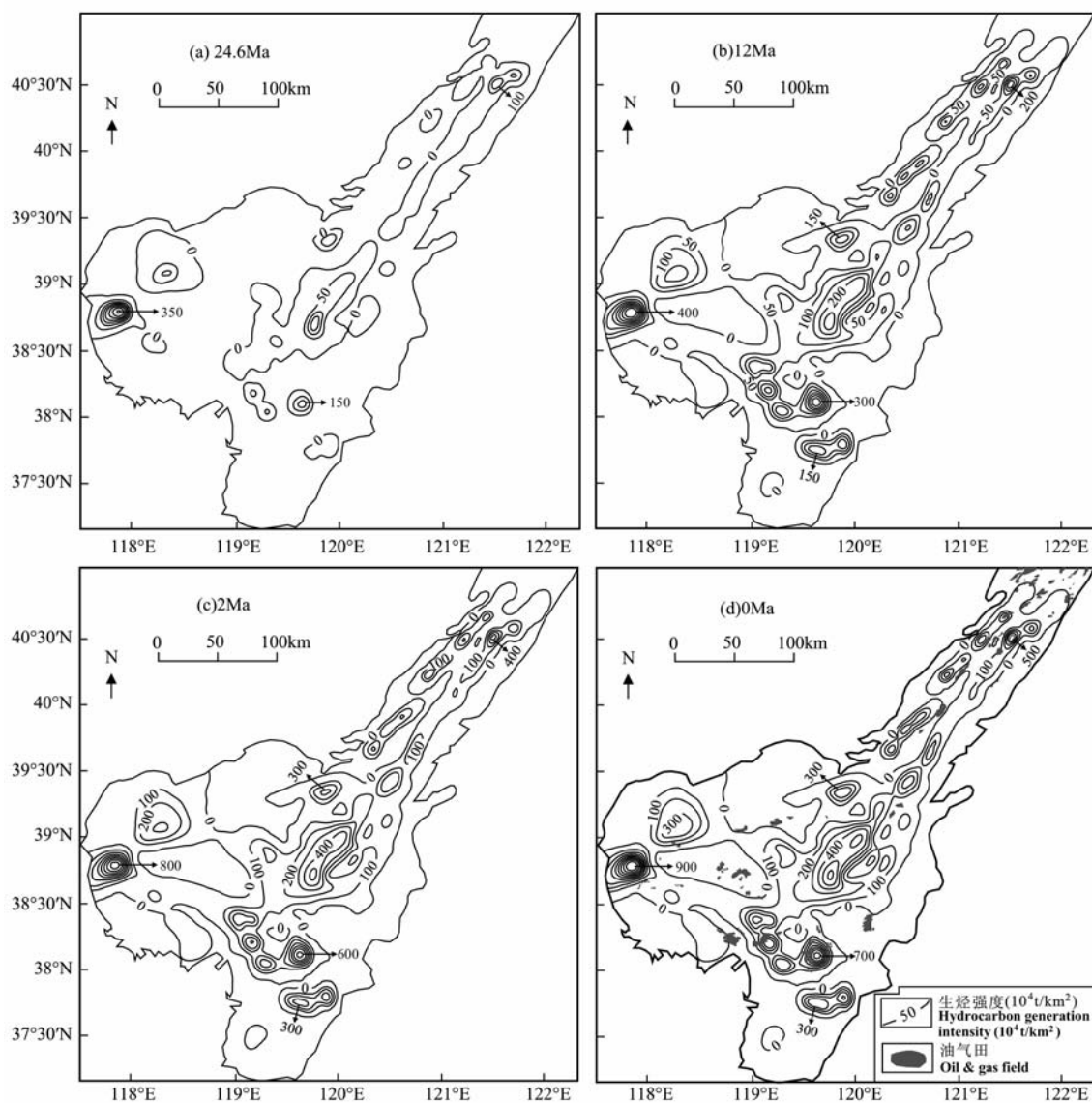


图5 渤海海域沙三段烃源岩生烃强度图

Fig. 5 The hydrocarbon generation intensity of E_2s_3 source rock in the Bohai Offshore area

从排烃强度看, 岐口凹陷最大, 达到 $280 \times 10^4 \text{ t/km}^2$, 其次为黄河口和渤中凹陷, 南堡、秦南、莱州湾、辽中和辽西凹陷也有一定的排烃强度(图 6b)。

明化镇组沉积时期, 各个凹陷的生、排烃强度进一步增大, 其中, 岐口凹陷的生、排烃强度仍为最大, 分别达到了 $800 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 和 $400 \times 10^4 \text{ t/km}^2$, 其次为渤中和黄河口凹陷, 生烃强度分别达到 $500 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 和 $600 \times 10^4 \text{ t/km}^2$, 排烃都达到了 $320 \times 10^4 \text{ t/km}^2$, 其他凹陷中, 辽中、南堡、秦南、莱州湾和辽西凹陷都具有较大的生、排烃强度, 即生烃强度超过 $300 \times 10^4 \text{ t/km}^2$, 排烃强度超过 $160 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ (图 5c, 图 6c)。

第四纪, 渤中凹陷的生、排烃强度增加较大, 分别达到 $600 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 和 $400 \times 10^4 \text{ t/km}^2$, 其他

凹陷增加不明显(图 5d, 图 6d)。

4.3 烃源灶演化

在评价烃源灶演化中, 排烃量是最可靠的指标, 它综合了排烃强度、排烃面积和烃源岩厚度等参数。因此, 本文利用排烃量来评价烃源灶的演化特征。根据上述研究成果, 计算了渤海海域主要凹陷沙三段烃源岩在主要地质时期(38~32.8 Ma, 32.8~24.6 Ma, 24.6~12 Ma, 12~2 Ma, 2~0 Ma)的排烃量(图 7)。沙河街组沉积时期(38~32.8 Ma), 岐口凹陷为主要的沉降和沉积中心^[1,3,26], 沉积厚度较大, 烃源岩开始成熟生烃, 在该时期仅岐口凹陷有少量的排烃量, 为烃源灶发育区(图 7a); 东营组沉积时期(32.8~24.6 Ma), 沉降和沉积中心向渤中凹陷迁移^[1,3,26], 渤中凹陷的烃源岩成熟度及

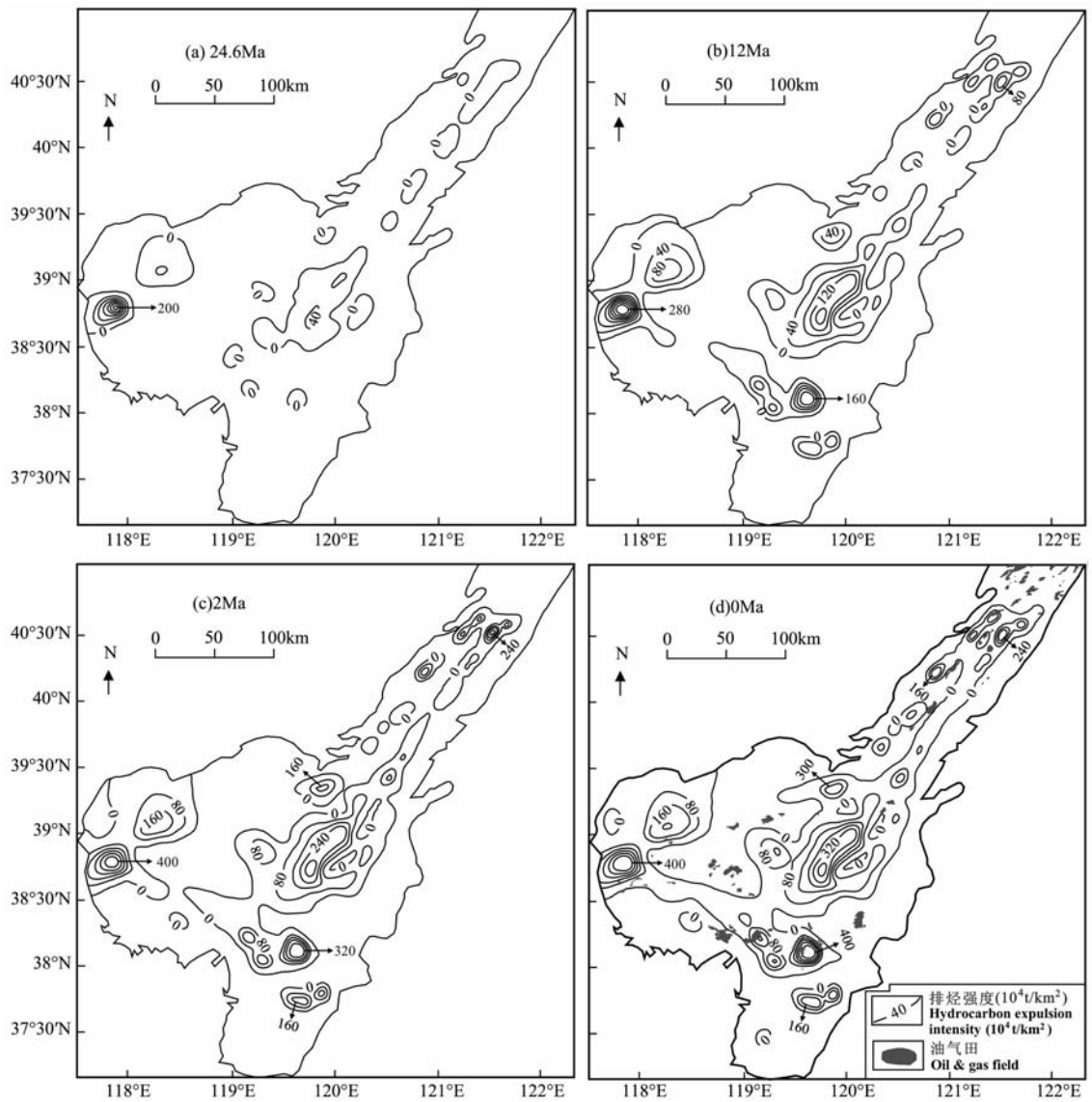


图6 渤海海域沙三段烃源岩排烃强度图

Fig. 6 The hydrocarbon expulsion intensity of E_2s_3 source rock in the Bohai Offshore area

生烃面积快速增加,导致排烃量明显增加,同时岐口凹陷的烃源岩已经达到高成熟阶段,具有较大的排烃量,故在该时期岐口和渤中凹陷为主要的烃源灶,在其他凹陷中,仅辽中、秦南、黄河口和南堡凹陷有少量的排烃量(图7b);从馆陶组沉积至今(24.6~0 Ma),渤中凹陷成为海域沉降和沉积中心^[1,3,26],且在馆陶组沉积时期(24.6~12 Ma),其生烃面积进一步扩大,排烃量首次超过岐口凹陷,且为岐口凹陷的两倍多,因此,该时期烃源灶主要发育在渤中凹陷,其次发育在岐口、南堡、辽中、辽西和黄河口凹陷(图7c);明化镇组沉积至今(12~0 Ma),渤中凹陷生、排烃强度进一步增加,排烃量也有明显的增加,渤中凹陷仍为最主要的烃源灶,总的来说,该时期烃源灶发育分布与前一时期相似

(图7d~7e).

5 结论与讨论

根据以上对渤海海域沙三段烃源岩的成熟演化及生、排烃史的模拟结果,可以得出渤海海域沙三段烃源岩成熟度演化程度较高,青东、莱州湾、埕北及辽西等凹陷大体上处于中成熟阶段,其他凹陷都已经处于高-过成熟阶段,且岐口凹陷和渤中凹陷已经达到生干气的阶段。同时,渤海海域烃源灶表现为早期“双灶共存”和晚期“单灶为主,多灶并存”的特征,即早期(古近纪)为岐口和渤中凹陷烃源灶;晚期(新近纪至今)以渤中凹陷烃源灶为主,岐口、南堡、黄河口、辽中、辽西、莱州湾和秦南凹陷等

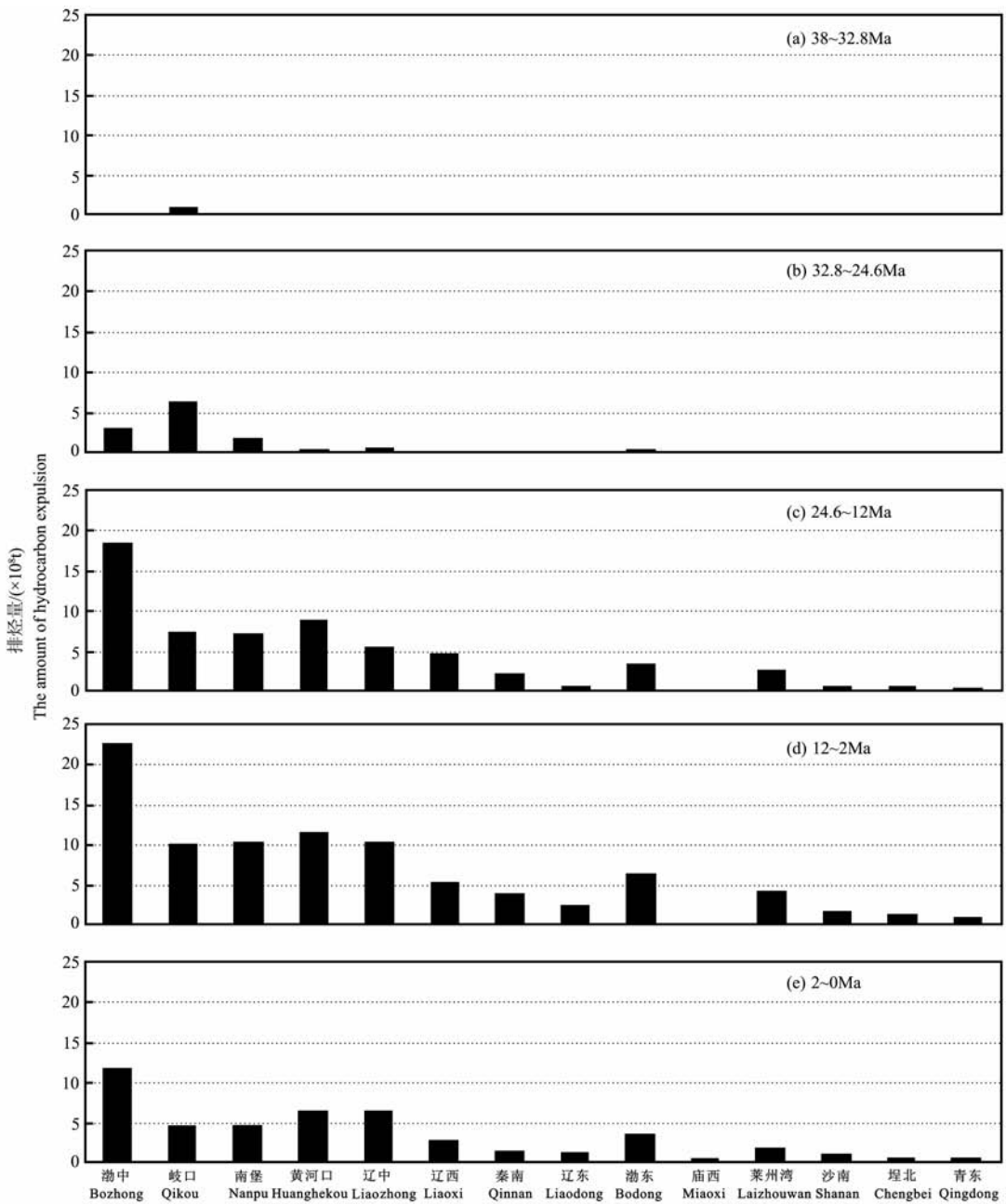


图7 渤海海域沙三段烃源岩各地质时期中各凹陷排烃量

Fig. 7 The amount of hydrocarbon expulsion of the E_2s_3 source rock during geological time of different sags in the Bohai Offshore area

烃源灶并存。

郯庐断裂带经过渤海海域(图1),这对其两边分布的烃源岩的成熟演化和烃源灶演化具有重要控制作用。深部地质特征研究表明,郯庐断裂带向下切入地幔使得岩浆上涌^[37],导致在古近纪晚期曾经历较高热流阶段($70\sim 90\text{ mW/m}^2$)^[35,36],这为烃源岩的演化提供了大量的热源,促进了烃源岩在东营组沉积时期及馆陶组沉积早期的快速演化(图8)。郯庐断裂带对烃源灶控制作用主要表现为渤海海域沿郯庐断裂带分布的辽中、渤中、黄河口和莱州湾等

凹陷是渤海海域的烃源灶主要发育地区(图7)。

从烃源岩成熟演化看,烃源灶的分布与烃源岩成熟演化具有较好的相关性,即主要烃源灶具有较高的成熟演化程度(图4,图8a),而烃源岩成熟演化程度较低者(图4,图8b),一般不能作为主要的烃源灶(排烃量较小)。虽然莱州湾和渤东凹陷具有较高的烃源岩成熟演化,但是它们具有较差的干酪根类型(主要为Ⅲ型),TOC含量低和烃源岩分布面积和厚度小等原因,导致它们不是主要的烃源灶。从渤海海域已发现的油气田,可得出渤海海域

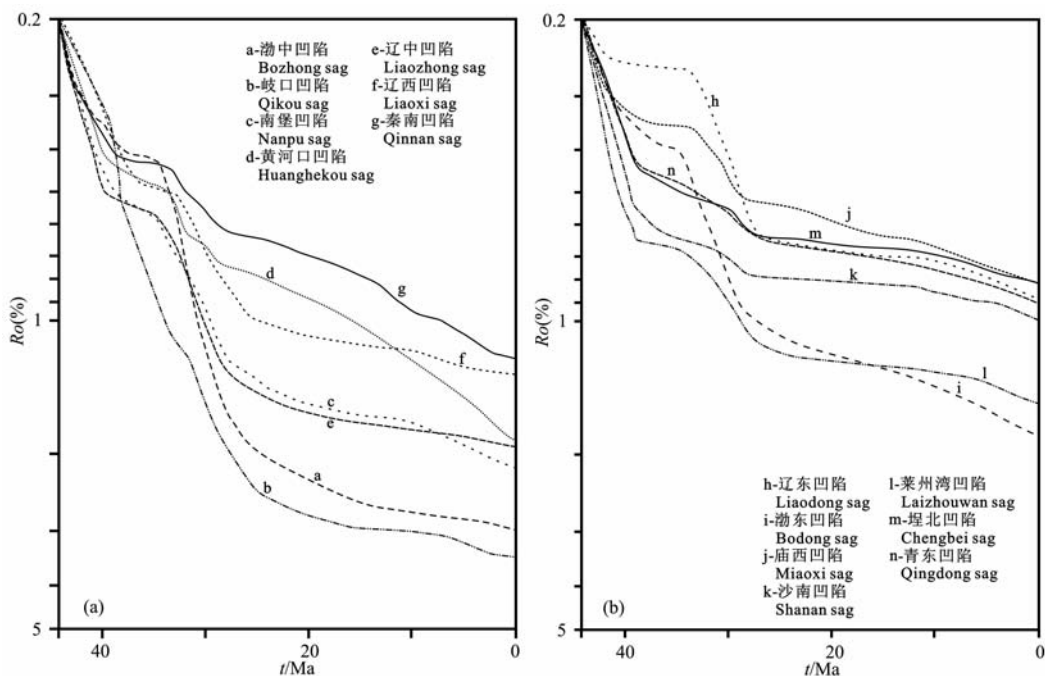


图 8 渤海海域典型凹陷烃源岩演化模拟结果(井位见图 1)

Fig. 8 The maturity evolutional modeling results of E_2s_3 source rock of the typical sags in the Bohai Offshore area (The well positions are shown in Fig. 1)

已发现的油气田主要分布在与主要烃源灶相邻的凸起和斜坡带上(图 5d, 图 6d)。渤中凹陷作为最主要的烃源灶之一,在其周边的渤南低凸起(BZ25-1 和 PL19-3 油田)、埕北低凸起、沙垒田凸起(CFD11-1 油田)、石臼坨凸起(QHD32-6 和 NP35-2 油田)和渤东低凸起(LD27-2 油田)都有油气田分布,其中渤南低凸起、埕北低凸起还与黄河口凹陷的烃源灶相邻,渤南低凸起、埕北低凸起的油气田可能是上述两个烃源灶共同提供油气。PL19-3 作为渤海海域最大的油气田,其油源可能来自于渤中、渤东和庙西凹陷的烃源灶^[16]。位于辽西凹陷和辽中凹陷烃源灶的辽西凸起也有较多的油气田分布(LD10-1、LD5-2、JZ25-1s 和 JZ29-3 等大中型油气田),可能由于辽西凸起可以同时接受辽西凹陷和辽中凹陷烃源灶排出的油气。总之,烃源灶为油气田的形成提供了物质基础,研究区的大中型油气田的分布与烃源灶密切相关。因而,本文的研究可以为渤海海域油气的深入勘探决策提供基础——主要烃源灶周边的凸起区、斜坡带、辽东湾地区的古潜山及庐庐断裂带附近是下一步油气勘探的有利地区?

参考文献(References)

[1] 姜培海, 杨波, 郑泽忠等. 渤海海域第三系油气成藏特征. 油气地质与采收率, 2003, **10**(4): 16~19

Jiang P H, Yang B, Zheng Z Z, et al. Characteristics on reservoir forming of Tertiary in Bohai Sea area. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency* (in Chinese), 2003, **10**(4): 16~19

[2] 肖卫勇, 王良书, 李华等. 渤海盆地地温场研究. 中国海上油气(地质), 2001, **15**(2): 105~110

Xiao W Y, Wang L S, Li H, et al. Geotemperature field in Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 2001, **15**(2): 105~110

[3] 徐长贵, 于水, 林杨松等. 渤海海域古近系湖盆边缘构造样式及其对沉积层序的控制作用. 古地理论, 2008, **10**(6): 627~635

Xu C G, Yu S, Lin C S, et al. Structural styles of the Paleogene lacustrine basin margin and their control on sedimentary sequences in Bohai Sea area. *Journal of Palaeogeography* (in Chinese), 2008, **10**(6): 627~635

[4] Demaison G. The generative basin concept. In: Demaison G, Murris R J eds. *Petroleum Geochemistry and Basin Evaluation*. AAPG Memoir, 1984, **35**: 1~14

[5] Thomas B M, Pedersen P M, Whitaker M F, et al. Organic facies and hydrocarbon distributions in the Norwegian North Sea. In: Thomas B M, Dore A G, Eggen S S eds. *Organic Geochemistry in Exploration of the Norwegian Shelf*. London, Graham and Trotman, 1985. 3~26

[6] Larue D K, Underwood M B. Source rock potential of Franciscan Complex; the galloping gourmet and the hydrocarbon kitchen. *AAPG Bulletin*, 1986, **70**(3): 471.

[7] Demaison G, Huizinga B J. Genetic classification of petroleum systems. *AAPG Bulletin*, 1991, **75**(10): 1626~

- 1643
- [8] Prinzhofer A, Mello M R, Takaki T. Geochemical characterization of natural gas: a physical multivariable approach and its applications in maturity and migration estimates. *AAPG Bulletin*, 2000, **84**(8): 1152~1172
- [9] Terken J M J, Frewin N L, Indrelied S L. Petroleum systems of Oman: charge timing and risks. *AAPG Bulletin*, 2001, **85**(10): 1817~1845
- [10] Brister B S, Stephens W C, Norman G A. Structure, stratigraphy, and hydrocarbon system of a Pennsylvanian pull-apart basin in north-central Texas. *AAPG Bulletin*, 2002, **86**(1): 1~20
- [11] Lewan M D, Henry M E, Higley D K, et al. Material-balance assessment of the new Albany-Chesterian petroleum system of the Illinois basin. *AAPG Bulletin*, 2002, **86**(5): 745~777
- [12] Hu L G, Fuhrmann A, Poelchau H S, et al. Numerical simulation of petroleum generation and migration in the Qingshui sag, western depression of the Liaohe basin, northeast China. *AAPG Bulletin*, 2005, **89**(12): 1629~1649
- [13] Ahmad S, Fayaz A, Khan A A, et al. Hydrocarbon prospectivity of the Bhattani and northern Sulaiman Ranges, north-west Himalayas, Pakistan. *Pakistan Journal of Hydrocarbon Research*, 2006, **16**: 1~10
- [14] Hanks C L, Parris T M, Wallace W K. Fracture paragenesis and microthermometry in Lisburne Group detachment folds: implications for the thermal and structural evolution of the northeastern Brooks Range, Alaska. *AAPG Bulletin*, 2006, **90**(1): 1~20
- [15] Connolly D L, Aminzadeh F. Detecting vertical hydrocarbon expulsion from source rock in seismic data. Annual Meeting-American Association of Petroleum Geologists, 2008. 563
- [16] Hao F, Zhou X H, Zhu Y M, et al. Charging of the Neogene Penglai 19-3 field, Bohai Bay Basin, China: oil accumulation in a young trap in an active fault zone. *AAPG Bulletin*, 2009, **93**(8): 155~179
- [17] Isaksen G H, Patience R, Graas G V, et al. Hydrocarbon system analysis in a rift basin with mixed marine and nonmarine source rocks: the South Viking Graben, North Sea. *AAPG Bulletin*, 2002, **86**(4): 557~591
- [18] Alsharhan A S. Petroleum geology and potential hydrocarbon plays in the Gulf of Suez rift basin, Egypt. *AAPG Bulletin*, 2003, **87**(1): 143~180
- [19] 赵文智, 王兆云, 王红军等. 不同赋存状态油裂解条件及油裂解型气源灶的正演和反演研究. *中国地质*, 2006, **33**(5): 952~965
- Zhao W Z, Wang Z Y, Wang H J, et al. Cracking conditions of oils existing in different modes of occurrence and forward and backward inference of gas source rock kitchen of oil cracking type. *Geology in China* (in Chinese), 2006, **33**(5): 952~965
- [20] 杜治利, 王飞宇, 张水昌等. 库车坳陷中生界气源灶生气强度演化特征. *地球化学*, 2006, **35**(4): 333~345
- Du Z L, Wang F Y, Zhang S C, et al. Gas generation history of Mesozoic hydrocarbon kitchen in Kuqa depression, Tarim basin. *Geochimica* (in Chinese), 2006, **35**(4): 333~345
- [21] 陈世悦, 刘焕杰. 华北晚古生代层序地层模式及其演化. *煤田地质与勘探*, 1995, **23**(5): 1~5
- Chen S Y, Liu H J. Sequence stratigraphic models and their evolution of late Palaeozoic in North China. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 1995, **23**(5): 1~5
- [22] 陆克政, 漆家福, 戴俊生等. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式. 北京: 地质出版社, 1997. 251
- Lu K Z, Qi J F, Dai J S, et al. Tectonic Model of Cenozoic Petroliferous Basin Bohai Bay Province (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1997. 251
- [23] 蔡东升, 罗毓晖, 武文来等. 渤海浅层构造变形特征、成因机理与渤中坳陷及其周围油气富集的关系. *中国海上油气(地质)*, 2001, **15**(1): 35~43
- Cai D S, Luo Y H, Wu W L, et al. Shallow tectonic deformation and its relationship to hydrocarbon enrichment in Bozhong depression and adjacent areas, Bohai bay basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 2001, **15**(1): 35~43
- [24] 肖国林, 陈建文. 渤海海域的上第三系油气研究. *海洋地质动态*, 2003, **19**(8): 1~6
- Xiao G L, Chen J W. Oil and gas in Neogene of the Bohai Sea area. *Marine Geology Letters* (in Chinese), 2003, **19**(8): 1~6
- [25] 漆家福. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释. *中国地质*, 2004, **31**(1): 15~22
- Qi J F. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation. *Geology in China* (in Chinese), 2004, **31**(1): 15~22
- [26] 龚再升, 王国纯, 贺清. 上第三系是渤中坳陷及其周围油气勘探的主要领域. *中国海上油气(地质)*, 2000, **14**(3): 145~156
- Gong Z S, Wang G C, He Q. The Neocene: a main realm of hydrocarbon exploration in Bozhong sag and its surrounding areas. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 2000, **14**(3): 145~156
- [27] 许红, 蔡瑛. 渤海海域油气勘探进展与前景展望. *海洋地质动态*, 2007, **23**(5): 26~29
- Xu H, Cai Y. Oil and gas exploration progress and prospects in Bohai Sea area. *Marine Geology Letters* (in Chinese), 2007, **23**(5): 26~29
- [28] 薛永安, 刘廷海, 王应斌等. 渤海海域天然气成藏主控因素与成藏模式. *石油勘探与开发*, 2007, **34**(5): 521~533
- Xue Y A, Liu T H, Wang Y B, et al. Main controlling factors and mode of natural gas accumulation in Bohai Bay area. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2007, **34**(5): 521~533
- [29] Burnham A K, Sweeney J J. A chemical kinetic model of

- vitrinite maturation and reflectance. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, **53**(10): 2649~2657
- [30] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bulletin*, 1990, **74**(10): 1559~1571
- [31] Pepper A S, Corvi P J. Simple kinetic models of petroleum formation, Part III: Modeling an open system. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, **12**(4): 417~452
- [32] 王良书, 刘绍文, 肖卫勇等. 渤海盆地大地热流分布特征. 科学通报, 2002, **47**(2): 151~155
Wang L S, Liu S W, Xiao W Y, et al. Heat flow distribution characteristics of Bohai Sea. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2002, **47**(2): 151~155
- [33] 龚育龄, 王良书, 刘绍文等. 济阳坳陷大地热流分布特征. 中国科学(D), 2003, **33**(4): 384~391
Gong Y L, Wang L S, Liu S W, et al. Heat flow distribution characteristics of Jiyang depression. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 2003, **33**(4): 384~391
- [34] Sclater J G, Christie P A F. Continental stretching: an explanation of the Post-Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea Basin. *Journal of Geophysical Research*, 1980, **85**(B7): 3711~3739
- [35] 邱楠生, 苏向光, 李兆影等. 郯庐断裂中段两侧坳陷的新生代构造-热演化特征. 地球物理学报, 2007, **50**(5): 1497~1507
Qiu N S, Su X G, Li Z Y, et al. The Cenozoic tectono-thermal evolution of Jiyang depression, Bohai bay basin, East China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(5): 1497~1507
- [36] Hu S B, Paul B O S, Asaf R, et al. 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*, 2001, **126**: 221~235
- [37] 薄景山, 陶夏新, 周宏. 渤海裂谷系的形成和演化. 东北地震研究, 1996, **12**(3): 7~14
Bo J S, Tao X X, Zhou H. Formation and evolution of Bohai rift system. *Seismological Research of Northeast China* (in Chinese), 1996, **12**(3): 7~14

(本文编辑 何 燕)