

南黄海盆地中-新生界湖相烃源岩地球化学特征及生烃史

李志强, 杨波, 王军, 韩自军, 吴庆勋

[中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459]

摘要:南黄海盆地迄今未获商业性油气突破,或与对其中-新生界3套湖相烃源岩的发育模式和生烃史研究薄弱有关。对来自3套烃源岩的41块样本进行岩石热解、微量元素、X衍射和色谱-质谱分析后发现,泰州组二段腐泥组含量高,为Ⅱ₁型干酪根,以水生有机质输入为主,C₂₇甾烷占优,受海侵影响碳酸盐矿物剪含量高,古水体还原性强且剪剪度高,利于有机质保存;阜宁组二段和泰州组二段古水体环境相似,但C₂₈甾烷剪剪显著增高,为藻类为主和陆源为辅的双重有机质输入,是典型的湖相烃源岩;阜四段的C₂₉甾烷剪剪占绝对优势,TAR剪剪高,为单一的陆源有机质输入,古水体偏氧化性且剪剪低,不利于有机质的保存。烃源岩复杂的母质输入类型和沉积环境不利于对其热成熟度的评价,对以甾烷20S/(20S+20R)或Ts/(Ts+Tm)参数表达的“未熟”特征应剪剪。基于断陷型-拗陷型的构造背景转换分析,建立了潜力生油层的生烃过程,认为活跃的火山活动对烃源岩生烃有促进作用,且北部拗陷以早期生烃为主,南部拗陷存在早、晚两期生烃,以三垛组沉积时期生烃为主。研究对南黄海盆地下一步的油气勘探部署具有重要指导意义。

关键词:生物标志化合物;热成熟度;湖相烃源岩;泰州组;阜宁组;中-新生界;苏北盆地;

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Geochemical characteristics and hydrocarbon generation history of Mesozoic-Cenozoic lacustrine source rocks in the South Yellow Sea Basin, offshore eastern China

Li Zhiqiang, Yang Bo, Wang Jun, Han Zijun, Wu Qingxun

[Tianjin Branch, CNOOC (China) Ltd., Tianjin 300459, China]

Abstract: No commercial oil or gas discovery has ever been made in the South Yellow Sea Basin (SYSB), offshore eastern China so far. This is probably due to the lack of study on the development and hydrocarbon generation history of the three sets of Mesozoic-Cenozoic lacustrine source rocks in the basin. Rock pyrolysis, trace elements, X-ray diffraction and chromatography-mass spectrometry analyses on 41 samples collected from the source rocks show that the second member of the Taizhou Formation (K_2t_2) (one of the three sets) is rich in sapropel of Type II₁ kerogen, mainly the result of aquatic organic matter (OM) input as indicated by a dominant C₂₇ regular sterane. The member has high content of carbonate minerals, suggesting a transgression influence that caused an anoxic and saline paleoenvironment, favorable for OM preservation. The second member of Funing Formation (E_1f_2) shares the paleoenvironment with K_2t_2 but has dramatically higher content of C₂₈ regular sterane and a dual OM input of dominant algae with a small amount of terrestrial material, suggesting typical lacustrine source rocks. The fourth member of Funing Formation (E_1f_4) contains mostly C₂₉ regular sterane and has high terrestrial/aquatic ratio (TAR), indicating terrestrial OM input and oxic ancient water body with low salinity that is not favorable for OM preservation. The complex OM input mix and paleoenvironment conditions make it difficult to evaluate the thermal maturity of the source rocks. It is recommended to treat with caution the “immature” characteristic expressed by the ratios such as sterane 20S/(20S+20R) or Ts/(Ts+Tm). The hydrocarbon generation process of potential source beds is established base on analysis of structural background transformation from fault-depression period to depression period. It suggests that volcanic activities facilitated the generation process and that the depressions in the north experienced an early hydrocarbon generation and those in the south went through both early and late hydrocarbon generation but with a major generation period occurring during the deposition of the Sanduo

收稿日期:2020-07-30;修订日期:2022-01-11。

第一作者简介:李志强(1992-),男,工程师,油气地球化学与成藏机理。E-mail: zhiqiangligeo@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024-002)。

Formation. The study may serve to guide the next step of oil and gas exploration in the basin. .

Key words: biomarker compound, thermal maturity, lacustrine source rocks, Taizhou Formation, Funing Formation, Mesozoic-Cenozoic, Subei Basin

引用格式:李志强,杨波,王军,等. 南黄海盆地中-新生界湖相烃源岩地球化学特征及生烃史[J]. 石油与天然气地质,2022,43(2):419-431. DOI: 10. 11743/ogg20220214.

Li Zhiqiang, Yang Bo, Wang Jun, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation history of Mesozoic-Cenozoic lacustrine source rocks in the South Yellow Sea Basin, offshore eastern China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 419-431. DOI: 10. 11743/ogg20220214.

“南黄海-苏北”中-新生代盆地是受中国东部岩石圈演化影响而发育的典型陆相断陷盆地^[1-2]。中国东部的陆相盆地整体勘探程度高,局部相继开展了页岩油勘探^[3]。位于陆上的苏北盆地经过四十余年的勘探累计获得了约 2.7×10^8 t探明储量^[4],而地处海域的南黄海盆地至今未获任何商业性发现。已钻遇地层的资料和苏北盆地的勘探成果表明,上白垩统泰州组二段(K_2t^2)、古新统阜宁组二段(E_1f^2)和阜宁组四段(E_1f^4)都是优质湖相烃源岩^[5]。南黄海盆地的早期勘探以寻找凹陷边缘的构造圈闭为主,尚未开展系统的烃源岩评价。早日开展南黄海盆地的烃源岩评估,不仅可以借鉴中国东部断陷盆地勘探的成功经验,落实盆地的勘探潜力;还有助于认识整个盆地的中-新生代构造运动和评估中部隆起的保存条件,也是尽快实现油气突破的先决条件。

湖相烃源岩的研究难点在于,断陷湖盆发育早期的沉积环境可能受到海侵活动的影响,母质类型以水生有机质为主,生烃潜力与典型的湖相烃源岩存在明显差异^[6-7]。近年来提出的烃源岩“保存型模式”又强调,沉积时期的水体盐度和氧化还原性影响有机质的保存^[8]。由于极大地受控于沉积环境差异,湖相烃源岩的热成熟度评价一直比较困难^[9]。苏北盆地早期的研究利用热成熟度参数标定了大量“未熟油”油藏^[10-14]。近年来有学者针对“未熟油”油藏与实际勘探情况不符的现象进行了讨论,否定了苏北盆地存在大规模“未熟油”油藏^[15-16],但尚未对一些热成熟度参数表达的“未熟”特征进行深入讨论。苏北盆地发育了多期火山,南黄海盆地也可见大量残余火山机构。火山活动与烃源岩成熟度特征和生烃史之间存在紧密联系^[17-21]。此前的研究均未在沥青或油与生烃史和火山活动之间建立时空上的联系。与渤海湾盆地广泛发育且深切多套生油层位的走滑断裂不同,南黄海-苏北盆地不具备“伸展-走滑”的构造背景。在渐新世经历过强构造反转且北部拗陷和南部拗陷反转强度差异大,新近纪断层的活动强度低,使得苏北盆地具有典型的“多期成藏”和“近源成藏”特点^[22],多

数发现的油藏也都源自单一生油层;因此,详细地比较南黄海盆地不同生油层的潜力和生烃史显得尤为重要。

本文筛选了在南黄海盆地钻遇的黑色潜力烃源岩样品,进行了岩石热解、微量元素、X衍射和色谱-质谱分析,梳理了3套烃源岩在母质输入和沉积环境上的巨大差异,再结合苏北盆地的勘探成果,讨论了南黄海盆地在成熟度研究上面临的潜在问题;基于断陷型-拗陷型构造背景转换分析,重建了潜力生油层的生烃史。

1 地质背景

“南黄海-苏北盆地”是由黄海南部海域的南黄海盆地和陆上的苏北盆地构成的一个大型叠合盆地,整体位于下扬子构造区(图1a),在中、古生代是以晋宁期变质岩为基底的海相克拉通盆地,中三叠世末印支-早燕山运动后进入改造阶段,在晚中生代又受太平洋板块俯冲影响,叠加发育了中、新生代陆相断陷盆地。南黄海盆地面积约 15×10^4 km²,平均水深为46 m。盆地主要分为4个一级构造带:北部拗陷、中部隆起、南部拗陷和勿南沙隆起。各拗陷又发育了一系列低凸起(图1b,c),整体上各构造单元以近EW走向为主,与主干断裂的走向一致。中-古生界在盆地内均有发育,新生界主要发育在盆地的拗陷区^[23]。

古新世至始新世,下扬子地区整体处于伸展构造背景的断陷期,火山活动非常活跃。如在高邮凹陷瓦庄地区和永安地区,发现了大量沿着早期地层侵入戴南组和阜宁组的辉绿岩侵入体^[24],金湖凹陷闵桥地区多井钻遇了玄武质火山岩^[25],溱潼凹陷阜宁组钻遇了超过150 m厚的基性辉绿岩^[26]。研究的主要对象南五凹和北凹均有火山活动发生,北凹东北部靠近千里岩断裂和西部凸起一侧都观察到了残余的火山机构(图1b)。在南五凹的西侧和北侧靠近南二凸起部位均发育有呈岩株状的残余火山机构,在南二凸起钻遇了约100 m厚的溢流相玄武岩(图1c)。这些残余的火山机

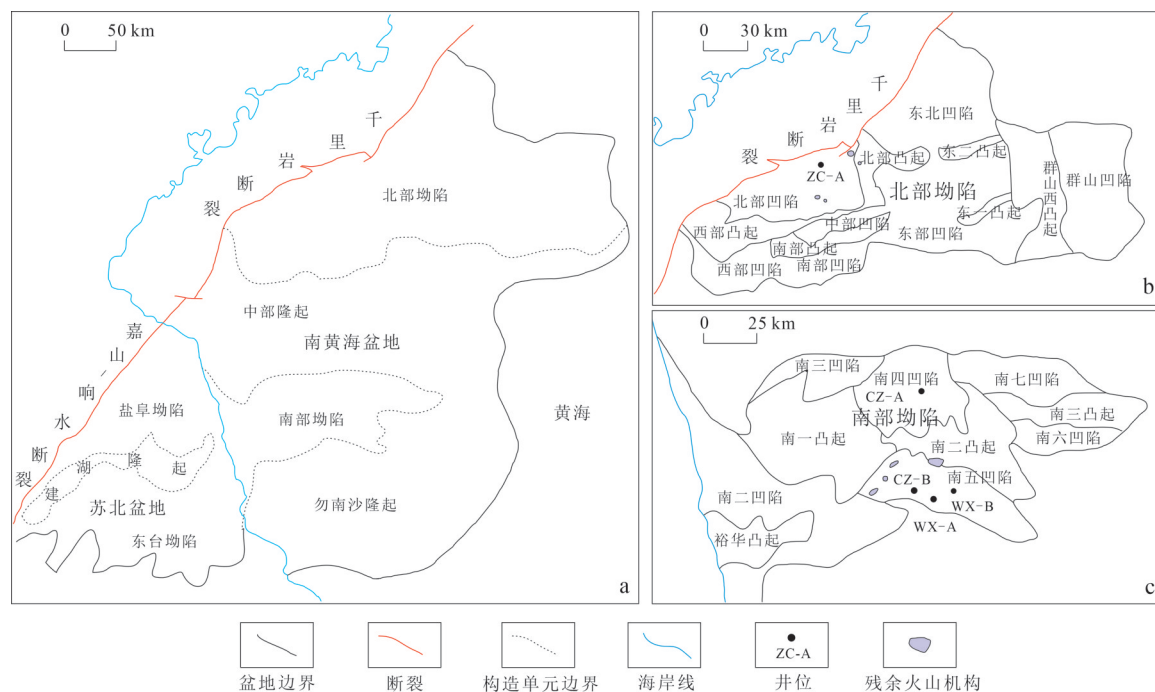


图1 南黄海盆地构造位置及构造单元划分

Fig. 1 Structural location and units in the South Yellow Sea Basin

a. 盆地构造位置和构造单元; b. 北部坳陷次级凹陷划分和井位; c. 南部坳陷次级凹陷划分和井位

构顶部与上覆新近系为沉积不整合,表明三垛组沉积时期存在活跃的火山活动。

自晚中生代以来,南黄海-苏北盆地受到西太平洋板块俯冲影响,开始进入伸展裂陷阶段,南、北部坳陷最大埋深超过6 km。裂陷期自下而上发育白垩系赤山-浦口组和泰州组、古新统阜宁组、始新统戴南组和三垛组^[27]。目前南黄海盆地多口井钻遇上白垩统泰州组。泰州组分为两段,泰一段(K_2t^1)主要为砂岩加少量灰色泥岩,泰二段(K_2t^2)沉积时期存在区域性湖侵事件,发育大套黑色泥岩,钻井揭示北部坳陷北凹发育泰二段烃源岩。古新统阜宁组分为四段,阜一段(E_1f^1)和阜三段(E_1f^3)以砂岩夹少量灰色泥岩为主,是重要的储集层发育层位,阜二段(E_1f^2)和阜四段(E_1f^4)沉积时期同样存在区域性湖侵事件,发育大套黑色泥岩,钻井揭示南部坳陷阜二段和阜四段烃源岩广泛发育。盆地进入始新世后湖盆发育规模变小,戴南组和三垛组时期主要为三角洲和河流相沉积。盆地在渐新世受太平洋板块俯冲速率和角度变化的影响,发生过强烈的构造反转,盆地伸展裂陷终止。该构造运动亦称“三垛运动”。盆地自新近纪再次接受沉积,发育新近系盐城组和第四系东台组。多期湖侵事件形成的生油层也是重要的盖层,纵向上形成了多套储-盖组合(图2)。

2 样品处理和实验方法

实验采用Rock-Eval岩石热解分析仪器。将样品粉碎放入热解坩埚,用90℃的氮气吹吸2 min去除气态烃,300℃恒温3 min,测得游离烃(S_1),再从300℃升温到600℃,测得热解烃(S_2)。

矿物定量分析采用D/max-2500衍射仪,X射线线管选用铜靶,管压40 kV,管流100 mA,扫描范围 $4^\circ \sim 45^\circ$,发散狭缝和防散狭缝为1.0 mm,接受狭缝为0.3 mm,步进长为 $0.02^\circ/\text{步}$,扫描频率1.0 s/步。

微量元素分析采用ZSX Primus II全自动扫描X射线荧光光谱仪。样品用无水四硼酸锂熔融,以硝酸铵为氧化剂,加氟化锂和少量溴化锂作助溶剂和脱模剂。样品与熔剂质量比为1:8,在熔样机上以1 150~1 250℃熔融并制成玻片,根据荧光强度计算主、次成分量。

饱和烃色谱质谱分析采用Thermo-Fisher Trace-DSQ II气相色谱质谱联用仪。色谱柱为HP-5 ms弹性石英毛细柱($60 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$)。升温程序:初温50℃恒温1 min,从50~100℃的升温速率15℃/min,100~200℃的升温速率为2℃/min,200~315℃的升温速率为1℃/min,保持315℃恒温20 min。进样口温度300℃,载气为氦气,载气流速为1 mL/min,电离能量为70 eV。

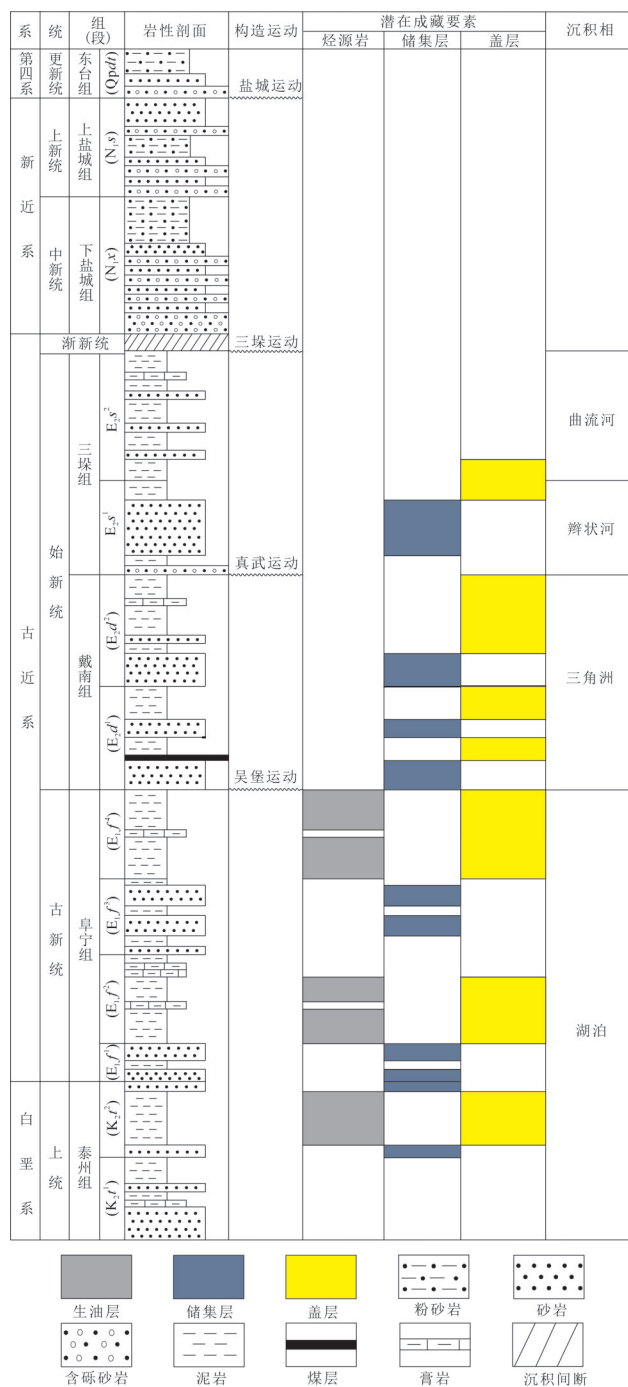


图2 南黄海盆地地层综合柱状图
Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of the South Yellow Sea Basin

3 烃源岩地球化学特征

3.1 岩石热解

3.1.1 有机质丰度

泰二段有机碳(TOC)含量为0.22%~2.02%,平均

为0.85%,生烃潜量(S_1+S_2)为0.34~10.63 mg/g,平均为3.13 mg/g,丰度差异大。阜二段 TOC 含量为0.76%~2.07%,平均达1.59%, S_1+S_2 为1.35~2.22 mg/g,平均为1.62 mg/g,整体为好烃源岩。阜四段 TOC 含量为1.12%~9.12%,平均达2.67%, S_1+S_2 为0.96~18.84 mg/g,平均为5.18 mg/g,整体为好~优质烃源岩(图3)。

3.1.2 有机质类型

利用相关图版判别南黄海盆地烃源岩的有机质类型得出的结论相差甚远:范氏图表明整体以 II_1-II_2 型为主(图4a);氢指数与岩石裂解峰值温度($HI-T_{max}$)关系则表明阜二段以 III 型为主,阜四段和泰二段以 II_1-II_2 型为主(图4b)。范氏图的原子比 H/C 和 O/C 值主要受有机质类型的影响。当存在有机质的混合输入或者烃源岩在低熟阶段就开始排烃, C,H 和 O 的相对比值的指示性将下降。以 $HI-T_{max}$ 关系进行判断也存在局限。另外,研究的样品全部来自边缘沉积相带,此处的保存条件对样本的生烃潜力亦有影响,对于排过烃的样本,氢指数仅能表征剩余生烃潜力。因此,利用这些图版判别烃源岩样本的有机质类型并不可靠^[28]。

有机显微组分数据显示泰二段的腐泥组含量为75%~85%,干酪根类型指数平均为79.98,显然以偏腐泥型(I 型)为主(表1)。鉴于该套烃源岩有机碳含量丰度差异大,推测以 II_1 型为主。阜四段和阜二段以镜质组和壳质组为主,基本不含腐泥组。其中,阜二段的类型指数明显偏低,平均为28.30,整体上应以 II_2 型为主;阜四段以 II_1-II_2 型为主。

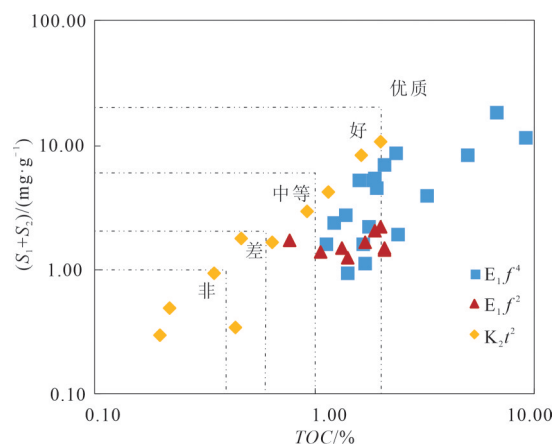


图3 南黄海盆地烃源岩有机碳含量与生烃潜量关系
Fig. 3 Total organic carbon content vs. hydrocarbon generation potential of source rocks in the South Yellow Sea Basin

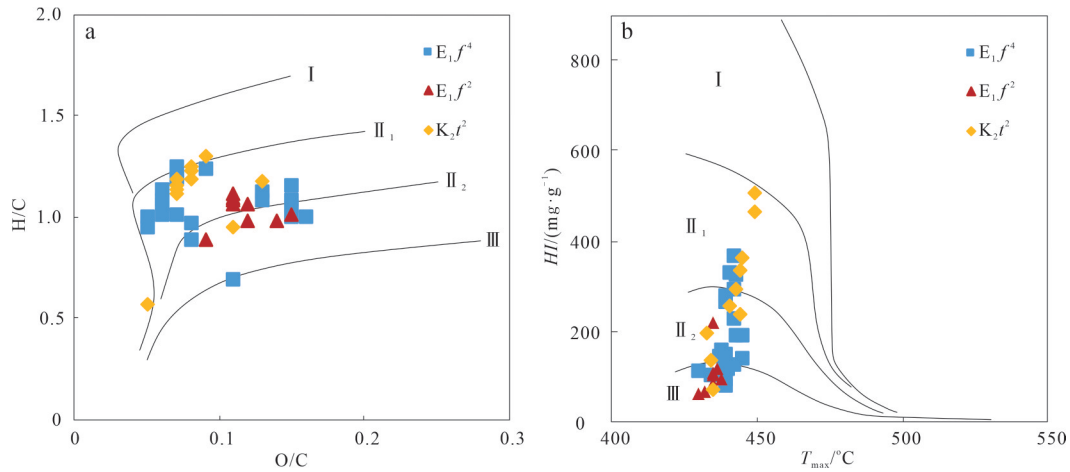


图4 南黄海盆地烃源岩有机质类型判识图版

Fig. 4 Chart boards for identifying organic matter types of source rocks from the South Yellow Sea Basin

a. 烃源岩元素原子比值关系;b. 氢指数与岩石热解峰温关系

3.1.3 有机质成熟度

$T_{\max}$ 表示烃源岩中残余有机质生烃达到最大速率时对应的温度。泰二段的 $T_{\max}$ 为433~449℃,阜二段的 $T_{\max}$ 为432~439℃,阜四段的 $T_{\max}$ 为433~445℃。 $S_1/(S_1+S_2)$ 表示烃源岩中滞留的游离烃与热解烃之比。当样品成熟度较低时,其 S_2 值较大;当样品成熟度高或过熟时,其 S_1 值较小;样品处于生烃门限时,源岩内存在大量的游离烃, $S_1/(S_1+S_2)$ 达到最大值,其所处的深度即生烃门限。全部样品的 $T_{\max}$ 和 $S_1/(S_1+S_2)$ 值均较低,因此推测不存在高-过熟样品(图5)。由于采样点分布受限,不建议根据当前的数据推测整个盆地的烃源岩有机质丰度。

3.2 矿物和元素组成

烃源岩中陆源碎屑矿物和碳酸盐矿物的相对含量

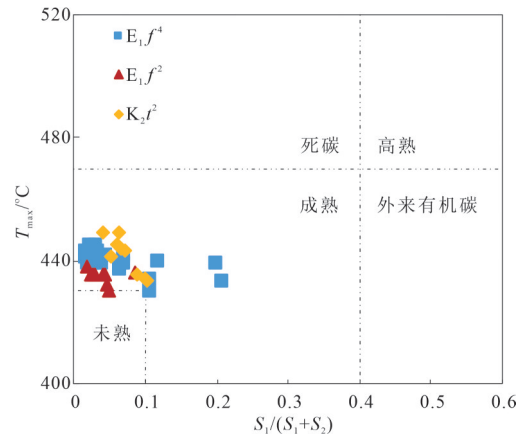


图5 南黄海盆地烃源岩 $S_1/(S_1+S_2)$ 与 $T_{\max}$ 关系

Fig. 5 $S_1/(S_1+S_2)$ vs. $T_{\max}$ of source rocks in the South Yellow Sea Basin

是评价沉积环境的重要指标^[29]。不同层位的石英含量和粘土矿物含量具有相关性(图6a)。泰二段的石英和粘土矿物含量低,分别为30%~40%和17%~

表1 南黄海盆地烃源岩干酪根显微组分含量

Table 1 Maceral contents of kerogen in source rocks, South Yellow Sea Basin

井号	层位	样品总数/个	显微组分含量/%				类型指数
			腐泥组	镜质组	壳质组	惰质组	
CZ-A	阜四段	9	0~5.00	29.00~41.00	46.00~61.00	6.00~15.00	32.10
			(2.30)	(33.00)	(54.80)	(9.80)	
WX-B	阜四段	6	0~4.00	28.00~37.00	56.00~64.00	6.00~14.00	37.35
			(0.80)	(30.80)	(59.00)	(9.30)	
CZ-B	阜二段	9	2.00~6.00	29.00~36.00	52.00~69.00	2.00~12.00	28.30
			(3.70)	(33.40)	(56.00)	(6.70)	
ZC-A	泰二段	9	75.00~85.00	4.00~12.00	5.00~14.00	2.00~7.00	79.98
			(78.40)	(8.00)	(8.70)	(4.90)	

注:表中数据为最小值~最大值(平均值)。

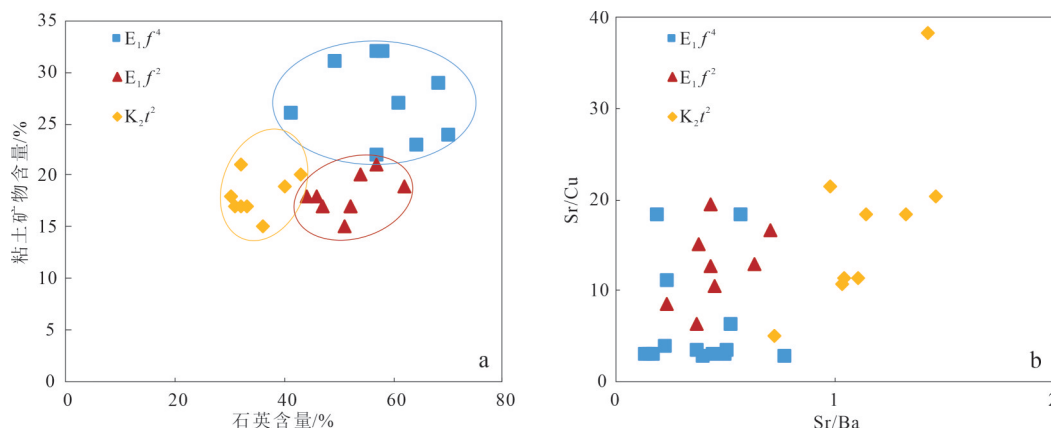


图6 南黄海盆地烃源岩矿物与元素组成关系

Fig. 6 Relationship between minerals and elemental compositions of source rocks, South Yellow Sea Basin

a. 石英矿物含量与黏土矿物含量关系; b. 微量元素Sr/Ba与Sr/Cu关系

20%, 平均分别为34.1%和18.0%。碳酸盐矿物含量高, 铁白云石与方解石总和为12%~30%, 平均为23.67%。黄铁矿含量高, 平均为2.22%, 指示泰二段整体缺乏陆源碎屑物输入, 可能伴有海侵条件下的大量碳酸盐矿物输入, 沉积时水体还原性强。阜四段的石英和粘土含量较高, 分别为41%~70%和23%~31%, 平均为58.30%和24.78%, 基本不含碳酸盐矿物和黄铁矿, 主要以陆源碎屑物输入为主, 是比较典型的湖相沉积。阜二段的石英含量为44%~62%, 平均为51.67%; 粘土含量为22%~30%, 平均为24.78%; 铁白云石与方解石总和为4%~22%, 平均为15.33%; 基本不含黄铁矿, 存在少量的碳酸盐物源输入。

在淡水湖盆中, 水体呈酸性, Ba和Sr多以碳酸盐的形式存在。伴随着湖盆演化和水体的不断咸化, 由于溶解度的差异, Ba²⁺首先会形成BaSO₄沉淀, 只有当湖盆的水体达到一定盐度时, Sr²⁺才会形成SrSO₄, 因此利用Sr/Ba的比值指示水体的盐度非常灵敏, 类似的比值还有Sr/Cu和Sr/Ca等^[30]。通常比值越高, 水体的盐度越高, 越有利于有机质的保存。在古盐度上, 泰二段>阜二段>阜四段(图6b)。由于前述3套烃源岩存在碳酸盐矿物输入的差异, 用在碳酸盐(岩)中相对富集的Sr, Ba和Ca表征水体的古盐度时, 可能需要其他地球化学参数的佐证。

3.3 生物标志化合物特征

生物标志化合物在地质过程中由生物构型转变为地质构型, 蕴含着丰富的地球化学信息, 是研究烃源岩母质类型和沉积环境、评价成熟度的重要手段^[31]。

从总离子流图(TIC)上可见, 阜四段的正构烷烃分

布完整(图7a), 但同时包含丰富的甾、萜烷, 样品成熟度不高, C₂₉藿烷含量极高, 伽马蜡烷(G)含量低, T_m相比T_s显示出异常高的含量; 阜二段正构烷烃分布不完整, 同样包含丰富的甾、萜烷, 成熟度很低(图7b); 泰二段的正构烷烃分布显示明显的“前锋型”, 观察不到甾烷和萜烷, C₂₁₋₂₂孕甾烷含量高, 表明已经进入生油窗(图7c)。全部样品的m/z191质量色谱图均以17α(H)-C₃₀藿烷(C₃₀H)为主峰, 伽马蜡烷(G)含量存在差异, m/z217质量色谱图显示规则甾烷20RαααC₂₇₋₂₉同样存在明显的差异。

$TAR = (nC_{27} + nC_{28} + nC_{29}) / (nC_{15} + nC_{17} + nC_{19})$ 是用于表征陆源母质和水生母质的参数, 以陆源高等植物输入为主的有机质具有奇数优势, 尤其含有较多的nC₂₇, nC₂₈和nC₂₉。阜四段TAR为0.59~2.05, 平均为1.41, C₂₉甾烷占优势, C₂₇/C₂₉甾烷为0.13~0.67, 平均为0.40, 指示陆源有机质输入为主(图8a); 泰二段TAR为0.15~0.82, 平均为0.46, 远低于阜四段, C₂₇甾烷和C₂₈甾烷含量较阜四段含量高, C₂₇/C₂₉甾烷为0.13~0.67, 平均为0.56, C₂₈/C₂₉甾烷为0.11~0.57, 平均为0.30, 母质以水生生物有机质为主; 阜二段TAR为0.24~0.77, 平均为0.52, C₂₈甾烷含量较泰二段显示出明显优势(图8b), 以藻类有机质输入为主。类似的Pr/nC₁₇-Ph/nC₁₈也常用于有机质输入的评价^[32], 同时由于热稳定性的差异也可以评价成熟度的差异。泰二段以水生有机质为主, 样品成熟度稍高; 阜二段可能为混合有机质输入; 阜四段以陆源有机质输入为主(图8c)。

伽马蜡烷指数(G/C₃₀H)能够指示烃源岩发育时期是否存在不同盐度的分层水体^[33], 高盐度的水体环境能够抑制产甲烷菌的发育, 保留烃源岩的富氢官能团,

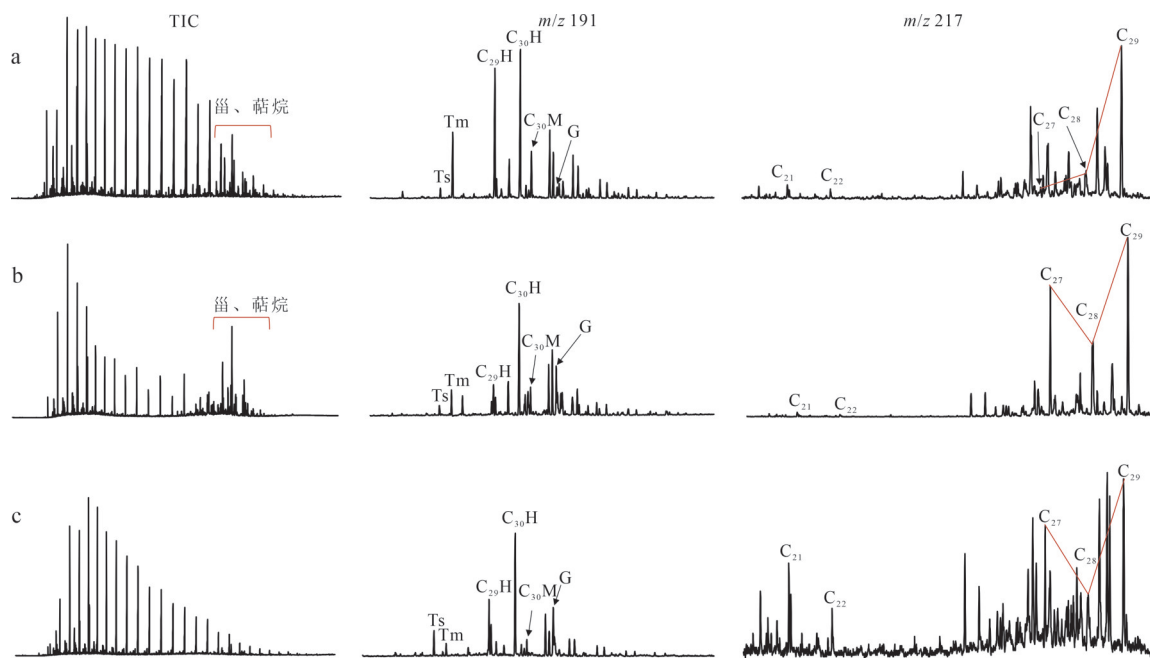


图7 南黄海盆地烃源岩饱和烃总离子流图和质量色谱图

Fig. 7 Total ion chromatograms (TIC) and mass chromatograms of saturated hydrocarbons from source rocks in the South Yellow Sea Basin
 a. 南部坳陷南四凹 CZ-A 井, E_1f^4 , 埋深 3 417.5 m; b. 南部坳陷南五凹 CZ-B 井, E_1f^2 , 埋深 2 875.0 m; c. 北部坳陷北四凹 ZC-A 井, K_2f^2 , 埋深 3 418.8 m
 Ts. 18 α , -22, 29, 30-三降藿烷; Tm. 17 α , -22, 29, 30-三降藿烷; $C_{29}H$. C_{29} 藿烷; $C_{30}H$. C_{30} 藿烷; $C_{30}M$. C_{30} 莫烷; G. 伽马蜡烷指; C_{21} , C_{22} , C_{21} 孕甾烷; C_{27} , C_{28} , C_{29} , C_{27} , C_{28} , C_{29} 规则甾烷

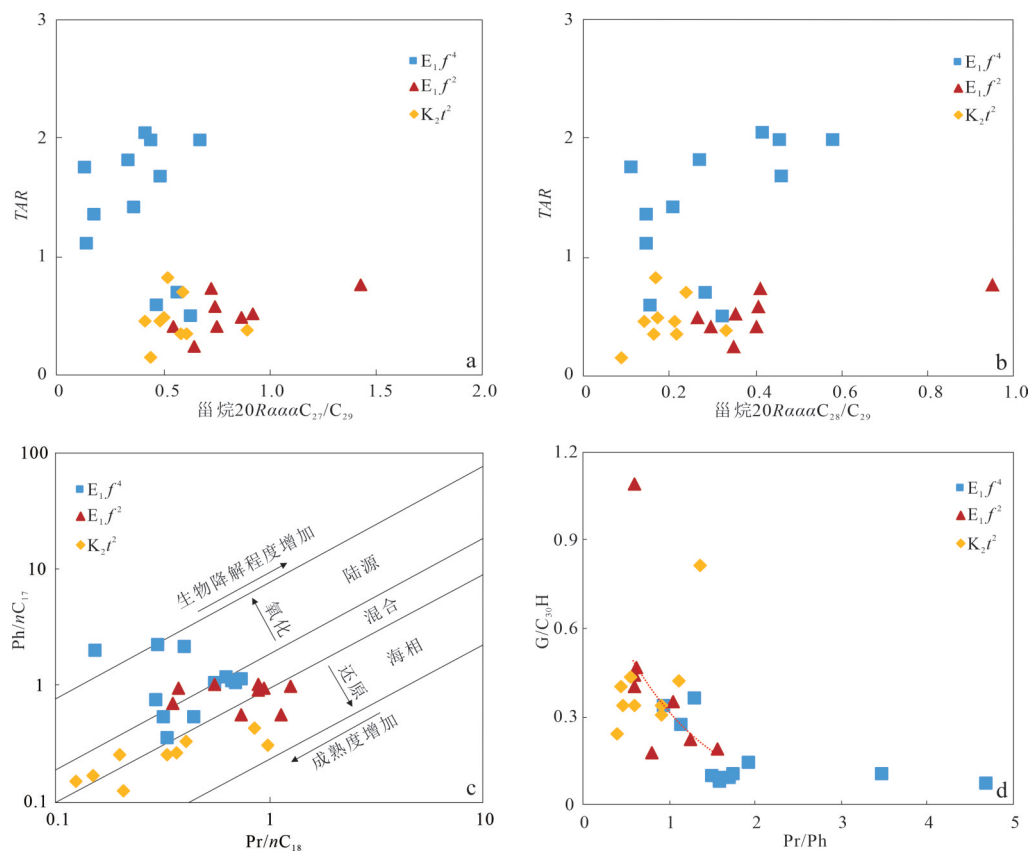


图8 南黄海盆地烃源岩生物标志化合物特征关系图版

Fig. 8 Charts showing the relationship between biomarkers of source rocks from the South Yellow Sea Basin
 a. TAR 与甾烷 20R/22S/C₂₇/C₂₉ 相关性; b. TAR 与甾烷 20R/22S/C₂₈/C₂₉ 相关性; c. Pr/nC₁₈ 与 Ph/nC₁₇ 相关性; d. Pr/Ph 与 G/C₃₀H 相关性

而烃源岩中存在大量的氢组分将使其拥有较强的生油能力。泰二段 Pr/Ph 为 0.44 ~ 1.36, 平均为 0.76, G/C₃₀H 为 0.33 ~ 0.82, 平均为 0.40, 为明显具有还原性质的咸水环境。阜二段 G/C₃₀H 主要为 0.19 ~ 0.46, 平均为 0.32, 与 Pr/Ph 存在良好的趋势关系, 即当 G/C₃₀H 增大时, Pr/Ph 比值减小(图 8d)。在 CZ-B 井阜二段顶部 2 700 ~ 2 750 m 范围内采集的样品 G/C₃₀H 偏低且 Pr/Ph 超过 1.0, 表明阜二段可能存古水体从初期盐度较高偏还原性向淡水环境和偏氧化性质的转换, 但由于厚度较小, 推测阜二段整体依然为咸水环境。阜四段 G/C₃₀H 较低, 与高 Pr/Ph 对应, 保存条件稍差。阜二段与泰二段古水体盐度差异并不大, 因此利用 Sr, Ba 和 Ca 等评价古水体盐度时应当考虑碳酸盐岩为物源输入的影响。

3.4 热成熟度评价

热成熟度反映的是将有机质转化为原油的热驱动反应的程度, 热成熟度判识是烃源岩评价和勘探目标优选的重要研究内容。采用热成熟度参数进行烃源岩评价时应先区分有机质的类型并考虑沉积环境差异, 不能简单地比较地球化学指标的数值大小。利用生物标志化合物特征评价烃源岩热成熟度的风险在于母质类型、粘土矿物、碳酸盐矿物和盐度差异均可能对热成熟度评价产生诸多影响^[31]。

常见的热成熟度参数包括 Ts/(Ts+Tm), C₃₁22S/(22S+22R), 甾烷 20S/(20S+20R) 和甾烷 ββ/(αα+ββ)。这些基于异构体热力学稳定性差异而设计的参数被广泛地用于未熟-中等成熟阶段研究, 例如 Tm 的热稳定性比 Ts 要差^[34], 这一观察已经通过对不同藿烷(包括 Ts 和 Tm)形成的分子机理计算而得到证实^[35]。生物标志化合物热成熟度参数表明样品热成熟度存在差异: ZC-A 井泰二段 Ts/(Ts+Tm) 值为 0.61 ~ 0.83, 平均为 0.74, C₃₁22S/(22S+22R) 值达到了 0.6 的平衡值(图 9a), 甾烷 20S/(20S+20R) 和甾烷 ββ/(αα+ββ) 值均约为 0.5(图 9b), 上述热成熟度参数指示该套烃源岩进入了生油窗^[31]。CZ-B 井阜二段与 CZ-A 井和 WX-A 井阜四段的热成熟度参数大小显示出复杂关系: C₃₁22S/(22S+22R) 指示 CZ-B 井阜二段明显比 CZ-A 井和 WX-A 井阜四段的热成熟度低, 但相近深度的阜四段 Ts/(Ts+Tm) 值则在一个很大的区间内变化, 阜四段部分 Ts/(Ts+Tm) 数值甚至小于 CZ-B 井阜二段的数值(图 9a)。阜四段样品的甾烷 20S/(20S+20R)-甾烷 ββ/(αα+ββ) 也未观察到正相关性, CZ-A 与 WX-A 井阜四段的甾烷 ββ/(αα+ββ) 数值相近, 但甾烷 20R/(20S+

20R) 数值相差较大(图 9b), CZ-B 井阜二段的甾烷 ββ/(αα+ββ) 值也在很宽的范围内变化。前文已述, CZ-B 井阜二段不完整的正构烷烃系列表明其尚处于未熟阶段, 而阜四段完整分布的正构烷烃和高丰度的甾、萜烷表明其尚处于低熟阶段(R_o 为 0.5% ~ 0.7%), 这显然不是一个成熟度区间。

17β, 21α(H)-莫烷和 17α, 21β(H)-藿烷的相对比值随着成熟度的增加而降低, 从未熟阶段的约 0.8 减小到成熟阶段的约 0.15^[36]。莫烷/藿烷的比值可用 29 或 30 个碳数的化合物表示^[37], 即 C₂₉M/C₂₉H 或 C₃₀M/C₃₀H。虽然阜四段的 C₂₉H 含量高, 但在表征同一套烃源岩热成熟度时, 可以依据 29 和 30 个碳数的莫烷/藿烷比值的变化趋势评价成熟度, 为了便于观察选择取倒数的形式。阜四段 C₃₀H/C₃₀M-C₂₉H/C₂₉M 参数之间的线性关系良好(图 9c), CZ-A 井阜四段莫烷/藿烷拟合程度为 0.93, WX-A 井阜四段莫烷/藿烷比值拟合程度为 0.95, 这说明两口井的阜四段烃源岩已经开始出现明显的热驱动反应, 而 CZ-B 井阜二段的莫烷/藿烷基本不存在线性关系, CZ-A 井和 WX-A 井阜四段样品的成熟度明显大于 CZ-B 井阜二段样品。WX-A 井阜四段 C₃₀M/C₃₀H 为 0.25 ~ 0.38, 平均 0.31, C₂₉M/C₂₉H 为 0.27 ~ 0.38, 平均 0.33; CZ-A 井阜四段 C₃₀M/C₃₀H 为 0.20 ~ 0.43, 平均 0.30, C₂₉M/C₂₉H 为 0.21 ~ 0.45, 平均 0.31, 两口井的阜四段都处于低熟阶段, 且没有表现出明显的成熟度差异。

尽管芳香烃的来源尚不明确, 但却是最为可靠的表征热成熟度的一类化合物。以含有两个苯环的蔡系列化合物为例, 依据 β-位甲基取代的异构体热稳定性高于 α-位甲基取代的异构体而设计的相关参数, 随着热成熟度增高, 在低熟-过熟区间呈现趋势变化, 是良好的评估热成熟度的指标^[38]。趋势变化关系可用于不同烃源岩成熟度评价, 但不同烃源岩的芳香烃热成熟度参数的大小还没有合理的解释。利用三甲基蔡参数 TMNr=1, 3, 7-(1, 2, 5+1, 3, 7)-TMN 和四甲基蔡参数 TeMNr=1, 3, 6, 7-(1, 3, 6, 7+1, 2, 5, 6+1, 2, 3, 5)-TeMN^[39] 表征烃源岩的热成熟度可见(图 9d), CZ-A 井和 WX-A 井阜四段样品的 TMNr-TeMNr 拟合程度分别高达 0.99 和 0.95, 而 CZ-B 井的阜二段不存在线性关系, 同样表明 CZ-A 井和 WX-A 井的阜四段样品发生了明显的热驱动反应, 成熟度明显高于 CZ-B 井阜二段。

用镜质体反射率指示烃源岩成熟度也很可靠。CZ-B 井阜二段实测 R_o 为 0.39% ~ 0.53%, CZ-A 井和 WX-A 阜四段实测 R_o 为 0.52% ~ 0.67%, 但是利用甾

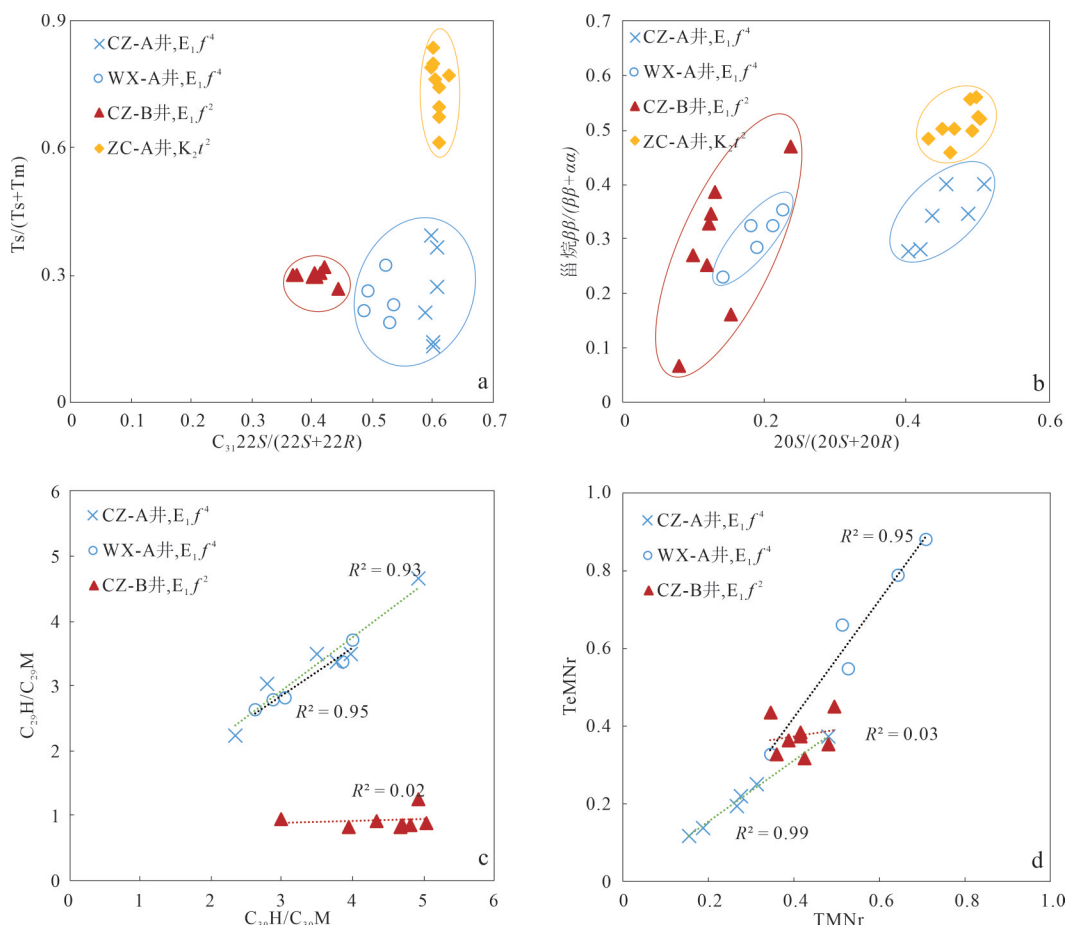


图9 南黄海盆地饱和烃和芳香烃的热成熟度参数关系

Fig. 9 Relationship between thermal maturity parameters of saturated hydrocarbons and aromatic hydrocarbons in the South Yellow Sea Basin

- a. 甾烷热成熟度参数 $C_{31}22S/(22S+22R)$ 与 $Ts/(Ts+Tm)$ 相关性; b. 甾烷热成熟度参数 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 与 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 相关性;
c. 藿烷热成熟度参数 $C_{30}H/C_{30}M$ 与 $C_{29}H/C_{29}M$ 相关性; d. 芳香烃热成熟度参数 $TMNR$ 与 $TeMNR$ 相关性

烷和藿烷的异构化热成熟度参数却得出了CZ-B井阜二段部分样品成熟度大于CZ-A井和WX-A阜四段样品成熟度的错误结论,这可能与甾烷和藿烷的异构化参数容易受到母质输入、粘土矿物、古水体盐度或碳酸盐含量差异影响有关^[9,31,40],或至少在本次研究中,观察到了上述差异。如果上述案例出现在原油的成熟度评价研究中,很容易错误地认为阜四段部分“未熟”。早期苏北盆地的勘探成果以热成熟度参数标定了大量的“未熟油”藏,这些油藏的甾烷 $20S/(20S+20R)$ 和 $Ts/(Ts+Tm)$ 比值均较低,主要来源于阜二段和阜四段^[10-14]。近年来有学者针对苏北盆地“未熟油”理论盛行的情况进行了深入探讨,通过大量地球化学参数互相佐证并结合实际的勘探成果,否认了苏北盆地存在大规模“未熟油”的观点^[15-16]。这可能与本文讨论的甾烷和藿烷热成熟度参数表达出的错误信息相类似。同时需要注意,苏北盆地发育多期火山活动^[23-25],当生油

层在宏观上被认为是“未熟”时,局部的火山活动可以促进烃源岩中有机质的热演化,使有机质提前向烃类转化,进而形成规模性的火山岩油藏^[17-21,25]。这类情况会使烃源岩的热成熟度指标全部异常,比如镜质体反射率异常高,奇偶优势比值(OEP)接近于1,甾烷的异构化参数接近于平衡值^[17,20]。而本次研究的连续镜质体反射率数据和测温无异常,基本排除火山活动对小范围(层位)烃源岩快速熟化的作用。热成熟度参数表达的CZ-B井阜二段部分样品成熟和阜四段部分样品未熟的错误信息,应与母质输入类型的多样性和沉积环境的复杂性有关。

4 烃源岩生烃史

处于下扬子构造区的南黄海-苏北盆地和处于华北板块的渤海湾盆地都呈现出从古近纪断陷型向新近

纪拗陷型转换的特征,但渤海湾盆地所处位置自新生代以来具有岩石圈减薄的构造背景^[41-42],新近纪之后地温场变化不大^[43],现今地温也较高,且以晚期成藏为主,恒定的地温梯度模式比较适用于渤海湾盆地这类生烃期间地温场无较大变化的盆地;而南黄海-苏北盆地自进入新近纪以来地温明显降低^[43-45],需要考虑断陷型向拗陷型转换的地温场变化。南黄海盆地在渐新世经历过强构造反转,在构造反转较强的北部拗陷约3 400 m深度钻遇的烃源岩已经达到成熟阶段,而在南部拗陷约3 400 m深度钻遇的烃源岩依然处于低熟阶段,确定盆地的生烃史非常关键。以位于南五凹WX-B井阜二段(E_1f^2)、阜四段(E_1f^4)和北凹ZC-A井的泰二段(K_2t^2)为潜力生油层,使用PetroMod软件对盆地的生烃史进行了模拟。利用探井VSP数据获取下伏未钻遇地层及基底深度,参考前人关于大地热流值、岩石物理数据和岩石圈结构的研究^[43-46],利用McKenzie heat flow 模块实现断陷期和拗陷期计算沉降趋势与理论沉降趋势的拟合,考虑探井实测温度与镜质体反射率联合约束,利用Easy% R_o 模型建立了两口探井的生烃史(图10)。

北部拗陷北凹ZC-A井泰二段在约40.5 Ma达到排烃门限($R_o=0.7\%$),深度约2 970 m,三垛运动前(32 Ma) R_o 最大,为0.93%,接近生油高峰($R_o=1.0\%$),以早期生烃为主(图10a)。南部拗陷南五凹WX-B井阜二段烃源岩在约41.5 Ma达到排烃门限,深度约为3 100 m,三垛运动前,底部成熟度达到约0.85%,随即发生构造反转,生烃终止,后期接受沉积发育的新近系加第四系厚度远大于三垛运动的剥蚀量,现今阜二段底部 R_o 约为1.0%,达到了生油高峰(图10b);阜四段

在三垛运动前尚未达到排烃门限,现今底部 R_o 约为0.75%,推测靠近深凹区的烃源岩在三垛运动前的成熟度更高。

目前观察到的残余火山机构,多数顶部被三垛运动削蚀,与上覆新近系成沉积不整合,说明火山活动主要发育于三垛组沉积时期,与当时的盆地伸展构造背景相符,而三垛组沉积时期又是南黄海盆地的早生烃期。之前的研究认为岩浆侵入体带来的异常高温对生油层的影响范围小^[47],但近期的研究表明火山活动的时期与成岩阶段存在明显联系,并间接影响到烃源岩的生烃^[48]。当烃源岩处于早成岩阶段时(烃源岩为未熟-低熟),岩石热导率低,比热容高,导致岩浆侵入体对烃源岩成熟度的影响范围小;当烃源岩处于中成岩晚期-晚期成岩阶段时(烃源岩为成熟-高成熟),岩石的热导率高、比热容低,此时岩浆侵入体对烃源岩的成熟度影响范围很大。考虑到潜力生油层在三垛组沉积时期的普遍埋深超过3 000 m,已经接近或达到中成岩作用晚期,火山活动对生油层的成熟度影响较大,并与潜力生油层的早生烃期耦合,对烃源岩生烃起促进作用。

综上所述,北凹和南五凹分别为北部拗陷和南部拗陷代表性的潜力凹陷,北部拗陷以早期生烃为主;南部拗陷虽存在两期生烃,但仍以三垛组沉积时期为主生烃期,这与苏北盆地的东台拗陷相似。考虑到北凹构造反转强烈,先期有油源断层沟通,后期保存条件较好的圈闭是实现油气突破的首选目标;南五凹经历三垛构造运动时,先存的油藏可能被调整和破坏,斜坡带的烃源岩可能在晚期进入生烃门限,但盆地自新近纪后进入拗陷期,断层活动强度低,斜坡带砂岩输导层的

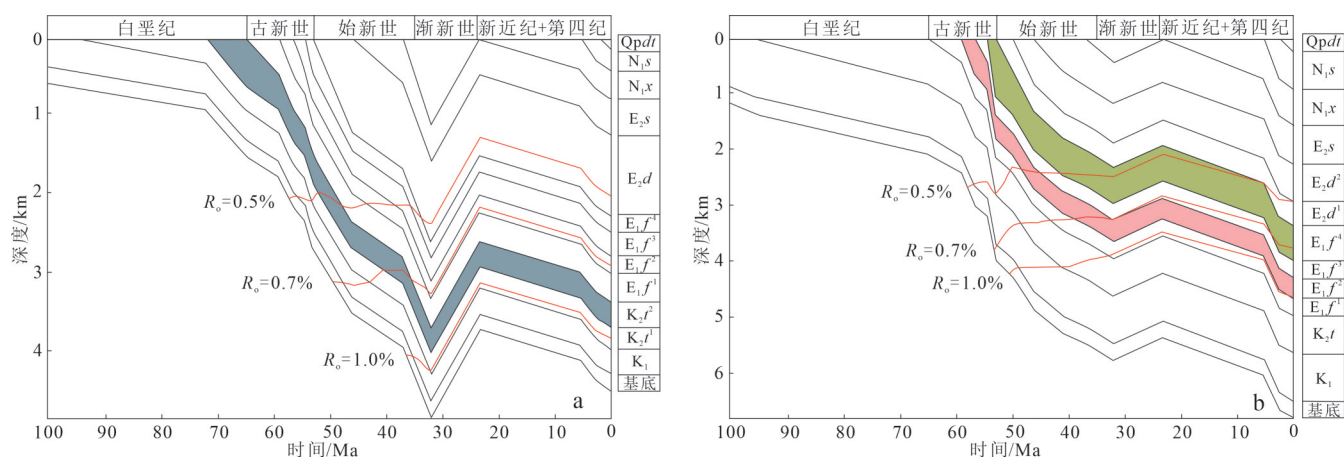


图10 南黄海盆地ZC-A井和WX-B井生烃史分析

Fig. 10 Charts of hydrocarbon generation history for Wells ZC-A and WX-B in the South Yellow Sea Basin

a. 北部拗陷北凹ZC-A井埋藏史及生烃史; b. 南部拗陷南五凹WX-B井埋藏史及生烃史

质量尚不明确,因此三垛运动时形成的远离凹陷中心的晚期构造圈闭具有较大勘探风险,应关注输导体系的研究。

5 结论及展望

1) 泰二段烃源岩整体为Ⅱ₁型干酪根,受海侵影响,碳酸盐矿物含量高,水生有机质输入,沉积时期水体还原性强,盐度高,利于有机质的保存,构造反转较强的北凹泰二段整体已经进入生油窗;阜二段烃源岩以藻类有机质贡献为主,混有陆源有机质输入,是比较典型的湖相烃源岩,沉积时期水体还原性强且盐度高;阜四段烃源岩整体源自陆源有机质贡献,沉积时水体偏氧化性,盐度低,有机质丰度虽好,但保存条件较差。

2) 复杂的母质输入和沉积环境差异对成熟度评价形成了挑战,由甾烷 20S/(20S+20R) 或者 Ts/(Ts+Tm) 参数表达的“未熟”特征需要其他热成熟度参数佐证。

3) 基于断陷型-拗陷型的构造背景转换分析,结合活跃的火山活动对烃源岩生烃的促进作用,认为北部拗陷以早期生烃为主;南部拗陷存在早、晚两期生烃,三垛组沉积时期为主生烃期。

4) 本文使用的排烃门限仍以 $R_o = 0.7\%$ 标定,威化烃源岩早生早排的研究案例已经被广泛报道,泰二段和阜二段的源岩生烃动力学参数值得深入研究。类比苏北盆地研究南黄海盆地烃源岩的分布,将是下一步攻关重点。

致谢:研究过程中与中石化江苏油田的专家进行了有益的讨论,审稿专家为本文提供了建设性的修订意见。

参 考 文 献

- [1] 葛肖虹,刘俊来,任收麦,等. 中国东部中-新生代大陆构造的形成与演化[J]. 中国地质, 2014, 41(1):19-38.
Ge Xiaohong, Liu Junlai, Ren Shoumai, et al. The formation and evolution of the Mesozoic-Cenozoic continental tectonics in eastern China [J]. Chinese Geology, 2014, 41(1):19-38.
- [2] 邓运华. 试论中国近海两个拗陷带油气地质差异性[J]. 石油学报, 2009, 30(1):1-8.
Deng Yunhua. Analysis on differences of petroleum type and geological conditions between two depression belts in China offshore [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 1-8.
- [3] 武晓玲,高波,叶欣,等. 中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4):455-462.
Wu Xiaoling, Gao Bo, Ye Xin, et al. Shale oil accumulation conditions and exploration potential of faulted basins in the east of China[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 455-462.
- [4] 唐焰. 高邮凹陷储量增长趋势及油气勘探潜力研究[D]. 山东: 中国石油大学(华东), 2014.
Tang Yan. Study on petroleum reserves growth trend and exploration potential in Gaoyou Depression[D]. Shandong: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [5] 刘玉瑞. 苏北盆地与南黄海盆地中-新生界成烃对比浅析[J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 541-546.
Liu Yurui. Comparison analysis of Meso-Cenozoic hydrocarbon generation between the North Jiangsu Basin and the South Yellow Sea Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(6): 541-546.
- [6] 张玉宾. 事件性海侵与烃源岩的形成[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(6):78-80.
Zhang Yubin. Incidental transgression and formation of source rocks [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(6): 78-80.
- [7] 陈笑夜,曹剑,施春华,等. 陆相湖盆海侵地质事件识别及其对烃源岩形成影响[J]. 地质论评, 2012, 58(5):103-112.
Chen Xiaoye, Cao Jian, Shi Chunhua, et al. A Review on the Distinguishing of Marine Transgression in Continental Basins and Its Impacts on the Formation of Hydrocarbon Source Rocks [J]. Geological Review, 2012, 58(5): 103-112.
- [8] 林俊峰,郝芳,胡海燕,等. 廊固凹陷沙河街组烃源岩沉积环境与控制因素[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 163-173.
Lin Junfeng, Hao Fang, Hu Haiyan, et al. Depositional environment and controlling factors of source rock in the Shahejie Formation of Langgu sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 163-173.
- [9] Moldowan J M, Sundararaman P, Schoell M. Sensitivity of biomarker properties to depositional environment and/or source input in the Lower Toarcian of SW-Germany[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(4-6):915-926.
- [10] 史继扬,汪本善,范善发,等. 苏北盆地生油岩中甾、萜的地球化学特征和我国东部低成熟的生油岩与原油[J]. 地球化学, 1985(1): 80-89.
Shi Jiyang, Wang Benshan, Fan Shanfa, et al. Geochemical characteristics of steroids and terpenes in oil-generating rocks in the Subei Basin and low-mature oil-generating rocks and crude oil in eastern China[J]. Geochemistry, 1985(1): 80-89.
- [11] 胡瑛,张枝焕,方朝合. 溱潼凹陷低熟油生物标志物特征及成熟度浅析[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 512-517.
Hu Ying, Zhang Zhihuan, Fang Chaohe. Biomarker features of low-mature oil in Qintong sag and maturity analysis [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(4): 512-517.
- [12] 胡瑛,张枝焕,骆卫峰. 溱潼凹陷低熟油的生烃母质特征及油源分析[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(1): 25-28.
Hu Ying, Zhang Zhihuan, Luo Weifeng. Immature crude oil in Qintong Sag: Kerogen characteristics and oil sources analysis [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(1): 25-28.
- [13] 龚永杰,何胜,鲁雪松. 金湖凹陷烃源岩“浅熟”原因探讨[J]. 特种油气藏, 2008, 15(1): 36-39.

- Gong Yongjie, He Sheng, Lu Xuesong. Study on "Shallow Maturation" of source rocks in Jinhu Depression[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2008, 15(1): 36-39.
- [14] 杨斌, 梁兴, 马孝祥, 等. 苏北管镇次凹低成熟原油的地球化学特征[J]. *新疆石油地质*, 2008, 28(5): 553-556.
- Yang Bin, Liang Xing, Ma Xiaoxiang, et al. Geochemical Feature of Low-Mature Crude Oil in Sub-Sag of Guanzhen in Subei Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 28(5): 553-556.
- [15] 刘玉瑞. 苏北后生-同生断陷盆地油气成藏规律研究[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(6): 721-731.
- Liu Yurui. Petroleum accumulation rules in hystero-genetic reconstructive-syngenetic rift basins, North Jiangsu Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(6): 721-731.
- [16] 刘玉瑞. 苏北盆地源岩无双峰生烃和未低熟油[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(4): 461-474.
- Liu Yurui. Bimodal hydrocarbon generation and immature oil do not exist in the North Jiangsu Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(4): 461-474.
- [17] 孙永革, 傅家漠, 刘德汉, 等. 火山活动对沉积有机质演化的影响及其油气地质意义——以辽河盆地东部凹陷为例[J]. *科学通报*, 1995, 40(11): 1019-1022.
- Sun Yongge, Fu Jiamu, Liu Dehan, et al. Influence of volcanic activities on the evolution of sedimentary organic matter and its hydrocarbon Geological significance—A Case study of the Eastern Sag of Liaohe Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(11): 1019-1022.
- [18] 金强. 裂谷盆地生油层中火山岩及其矿物与有机质的相互作用——油气生成的催化和加氢作用研究进展及展望[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(6): 542-546.
- Jin Qiang. Hydrocarbon generation in rift basins, Eastern China: Catalysis and hydrogenation—interaction between volcanic minerals and organic matter[J]. *Advances in Earth Science*, 1998, 13(6): 542-546.
- [19] 金强, 翟庆龙, 万从礼. 裂谷盆地烃源岩中的火成岩及其活动模式——以东营凹陷为例[J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(3): 231-237.
- Jin Qiang, Zhai Qinglong, Wan Congli. Igneous rocks and its activity model in source rocks of rift basins: Dongying Depression an example of Dongying Sag[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(3): 231-237.
- [20] Chen Zenyan, Yan Huo, Li Junsheng, et al. Relationship between Tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohe basin, People's Republic of China[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(6): 1004-1014.
- [21] 李建忠, 单玄龙, 吴晓智, 等. 火山作用的成烃与成藏效应[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- Li Jianzhong, Shan Xuanlong, Wu Xiaozhi, et al. Hydrocarbon Generation and Accumulation Effects of Volcanism[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [22] 钱基. 苏北盆地油气田形成与分布——与渤海湾盆地比较研究[J]. *石油学报*, 2001, 22(3): 12-16.
- Qian Ji. Formation and distribution of oil and gas fields in the North Jiangsu Basin: a comparative study with the Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2001, 22(3): 12-16.
- [23] 姚永坚, 夏斌, 冯志强, 等. 南黄海古生代以来构造演化[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(2): 124-128.
- Yao Yongjian, Xia Bin, Feng Zhiqiang, et al. Tectonic evolution of the South Yellow Sea since the Paleozoic[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(2): 124-128.
- [24] 胡晓春. 苏北盆地高邮凹陷侵入岩形成时期及成因机制探讨[J]. *地层学杂志*, 2010, 34(3): 293-297.
- Hu Xiaochun. On the age and origin of the intrusive rocks in Gaoyou Depression of North Jiangsu Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2010, 34(3): 293-297.
- [25] 金强, 熊寿生, 卢培德. 中国断陷盆地主要生油岩中的火山活动及其意义[J]. *地质论评*, 1998, 44(2): 136-142.
- Jin Qiang, Xiong Shousheng, Lu Peide. Volcanic activity in major source rocks in faulted basins of China and its significance[J]. *Geological Review*, 1998, 44(2): 136-142.
- [26] 姚洪生, 张勇, 蒋永平, 等. 苏北盆地溱潼凹陷新生代侵入岩蚀变带油藏地质特征[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(2): 153-159.
- Yao Hongsheng, Zhang Yong, Jiang Yongping, et al. Geologic features of reservoirs in Cenozoic intrusive rockmetamorphic zone, Qintong Sag, Northern Jiangsu Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(2): 153-159.
- [27] 姚永坚, 冯志强, 郝天珧, 等. 对南黄海盆地构造层特征及含油气性的新认识[J]. *地学前缘*, 2008, 15(6): 232-240.
- Yao Yongjian, Feng Zhiqiang, Hao Tianjun, et al. A new understanding of the structural layers in the South Yellow Sea Basin and their hydrocarbon-bearing characteristics[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6): 232-240.
- [28] Dembicki H. Three common source rock evaluation errors made by geologists during prospect or play appraisals[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(3): 341-356.
- [29] 张志杰, 袁选俊, 汪梦诗, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱湖沉积特征与古环境演化[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 972-984.
- Zhang Zhijie, Yuan Xuanjun, Wang Mengshi, et al. Alkaline-lacustrine deposition and Paleoenvironmental evolution in Permian Fengcheng Formation at the Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 972-984.
- [30] 李成凤, 肖继凤. 用微量元素研究胜利油田东营盆地沙河街组的古盐度[J]. *沉积学报*, 1988, 6(4): 100-107.
- Li Chengfeng, Xiao Jifeng. The application of trace element to the study on paleosalinities in Shehejie Formation of Dongying Basin, Shengli Oilfield[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1988, 6(4): 100-107.
- [31] Peters K E, Moldowan J M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments[M]. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- [32] Shanmugam G. Significance of coniferous rain forests and related organic matter in generating commercial quantities of oil, Gipps-

- land Basin, Australia[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(8): 1241-1254.
- [33] Jaap S. Sinninghe Damsté, Kenig F, et al. Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(9):1895-1900.
- [34] Seifert W K, Moldowan J M. Applications of steranes, terpanes and monoaromatics to the maturation, migration and source of crude oils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(1): 77-95.
- [35] Kolaczowska E. Thermodynamic stability of various alkylated, dealkylated and rearranged 17 α - and 17 β -hopane isomers using molecular mechanics calculations[J]. *Organic geochemistry*, 1990, 16(4):1033-1038.
- [36] Mackenzie A S, Hoffmann C F, Maxwell J R. Molecular parameters of maturation in the Toarcian shales, Paris Basin, France—I. Changes in the configurations of acyclic isoprenoid alkanes, steranes and triterpanes[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(11):1709-1721.
- [37] Seifert W K, Moldowan J M. The effect of thermal stress on source-rock quality as measured by hopane stereochemistry[J]. *Physics & Chemistry of The Earth*, 1980, 12:229-237.
- [38] Alexander R, Kagi R I, Rowland S J. The effects of thermal maturity on distributions of dimethylnaphthalenes and trimethylnaphthalenes in some ancient sediments and petroleum[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(2):385-395.
- [39] Aarssen B G K V, Bastow T P, Alexander R, et al. Distributions of methylated naphthalenes in crude oils: Indicators of maturity, biodegradation and mixing[J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(10):1213-1227.
- [40] Berthonneau J, Grauby O, Abuhaikal M. Evolution of organo-clay composites with respect to thermal maturity in type II organic-rich source rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 195: 68-83.
- [41] 吴福元,葛文春,孙德有,等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3):51-60.
- Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou, et al. Several issues in the study of lithospheric thinning in eastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 51-60.
- [42] 邱楠生,魏刚,李翠翠,等. 渤海海域现今地温场分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(4):412-419.
- Qiu Nansheng, Wei Gang, Li Cuicui, et al. Distribution of the current geothermal field in the Bohai Sea waters[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(4):412-419.
- [43] 邱楠生,胡圣标,何丽娟. 沉积盆地热体制研究的理论与应用[M]. 北京:石油工业出版社, 2004.
- Qiu Nansheng, Hu Shengbiao, He Lijuan. Theory and application of thermal system research in sedimentary basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [44] 庞玉茂,张训华,郭兴伟,等. 南黄海北部盆地中-新生代构造热演化史模拟研究[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(8):3177-3190.
- Pang Yumao, Zhang Xunhua, Guo Xingwei, et al. Mesozoic and Cenozoic tectono-thermal evolution modeling in the Northern South Yellow Sea Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(8):3177-3190.
- [45] 杨树春,胡圣标,蔡东升,等. 南黄海南部盆地地温场特征及热-构造演化[J]. *科学通报*, 2003, 48(14):1564-1569.
- Yang Shuchun, Hu Shengbiao, Cai Dongsheng, et al. Geothermal field characteristics and thermal-tectonic evolution of the southern basin of the South Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(14): 1564-1569.
- [46] Kim H J, Hao T, Kim C H. Crustal structure of the Gunsan Basin in the SE Yellow Sea from ocean bottom seismometer (OBS) data and its linkage to the South China Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 180:103881.
- [47] Dow, Wallace G. Kerogen studies and geological interpretations[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 7(2):79-99.
- [48] 冯禄,曾花森,王洪伟. 岩浆侵入作用对不同成熟度烃源岩热演化的影响——以方正断陷和绥滨坳陷为例[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(5):124-129.
- Feng Lu, Zeng Huasen, Wang Hongwei. Impact of igneous intrusion on the thermal evolution of source rocks with different maturities: a case study of Fangzheng Fault Depression and Suibin Sag in north-eastern China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(5):725-729.

(编辑 卢雪梅)