高阳东,龙祖烈,陈聪,等. 珠江口盆地开平凹陷南部区域中深层原油地球化学特征及成因.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1883-1896. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240248.
Gao Yangdong,Long Zulie,Chen Cong,et al. Geochemical Characteristics and Genesis of Middle and Deep Oil in Southern Region of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(6):1883-1895. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240248.

珠江口盆地开平凹陷南部区域中深层原油地球化学特征及成因

高阳东[1],龙祖烈[2,3],陈 聪[2,3],姜大朋[2,3],马 宁[2,3]
1.中海石油(中国)有限公司勘探开发部,北京 100010
2.中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518054
3.中海石油深海开发有限公司,广东 深圳 518054

摘要:为了分析珠江口盆地开平凹陷原油地球化学特征,明确该区域的油气来源与分布规律,本研究基于开平凹陷南部区域中深层原油及烃源岩的地球化学实验分析测试资料,开展了地球化学特征、原油成因与来源,以及烃源岩评价及分子地球化学特征分析。结果表明:开平凹陷南部区域原油为高含蜡量、轻—中质原油。开平凹陷南部K18-1和K11-4含油气构造原油的地球化学特征较为类似,均具有C_{21}TT或C_{23}TT优势,较低的奥利烷含量,以及C_{27}、C_{29}规则甾烷优势,并有4-甲基C_{30}甾烷的分布,表明该区域原油具有藻类水生生物和陆源高等植物贡献,但K18-1和K11-4含油气构造的原油生烃母质不甚相同。K18-1含油气构造的原油较为特殊,与K11-4和其他区域原油均具有一定差异,奥利烷含量较低,C_{21}TT/C_{19+20}TT指数较高,为较为典型的湖相原油;K11-4含油气构造的原油则与开平凹陷等其他区域的原油相类似,奥利烷含量较高,C_{21}TT/C_{19+20}TT较低,为偏河流-三角洲相原油。开平凹陷南部区域不同层段烃源岩的地球化学特征差异较大,文昌组下段为Ⅰ—Ⅱ$_2$型有机质湖相烃源岩,文昌组上段—恩平组为Ⅱ$_1$—Ⅲ型三角洲煤系烃源岩,前者的有机质丰度及生烃潜力均优于后者。基于上述研究,结合油-源生物标志化合物参数对比及烃源岩的生烃潜力评价,综合认为开平凹陷南部区域原油主要来源于各自含油气构造下伏的文昌组下段烃源岩。开平凹陷南部区域具有较为优质的烃源条件,勘探前景较好。

关键词:开平凹陷;地球化学;油源对比;原油成因;烃源岩;珠江口盆地
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240248 **中图分类号**:TE122 **文献标志码**:A

Geochemical Characteristics and Genesis of Middle and Deep Oil in Southern Region of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin

Gao Yangdong[1],Long Zulie[2,3],Chen Cong[2,3],Jiang Dapeng[2,3],Ma Ning[2,3]

收稿日期:2024-10-13
作者简介:高阳东(1975—),男,教授级高工,主要从事油气地质与油气勘探综合方面的研究,E-mail:gaoyd@cnooc.com.cn
通信作者:陈聪(1987—),男,高级工程师,主要从事油气地化与成藏综合方面的研究,E-mail:chencong8@cnooc.com.cn
基金项目:中国海洋石油有限公司"十四五"重大科技项目(KJGG2021-0100)
Supported by the Major Science and Technology Project of CNOOC During the 14th Five-Year Plan Period (KJGG2021-0100)

1. *Exploration and Development Department*, *CNOOC China Limited*, *Beijing* 100010, *China*
2. *CNOOC China Limited*, *Shenzhen Branch*, *Shenzhen* 518054, *Guangdong*, *China*
3. *CNOOC Deepwater Development Limited*, *Shenzhen* 518054, *Guangdong*, *China*

Abstract: To analyze the geochemical characteristics of crude oil in the Kaiping sag of the Pearl River Mouth basin and to ascertain the hydrocarbon sources for more scientific and rational exploration and development strategies, this study conducted an analysis of geochemical features, crude oil genesis, and sourcing based on geochemical experimental analysis and testing data of crude oil and source rocks from the middle-deep layers in the southern region of the Kaiping sag. The results indicate that the crude oil in the southern Kaiping sag is characterized by high wax content and light-to-medium density. The crude oil from the K18－1 and K11－4 hydrocarbon-bearing structures in the southern Kaiping sag exhibits similar geochemical features, including a dominance of C_{21} TT or C_{23} TT, low oleanane content, a preference for C_{27} and C_{29} regular steranes, and the presence of 4－methyl C_{30} sterane, suggesting a contribution from both algal aquatic organisms and terrestrial higher plants. However, there are still certain differences in organic matter input and depositional environments between the hydrocarbon-generating precursors of the crude oil from the two hydrocarbon-bearing structures. The crude oil from the K18－1 hydrocarbon-bearing structure is relatively unique, differing from that of K11－4 and other regions. It has low oleanane content and a high C_{21} TT/C_{19+20} TT index, indicating it is a typical lacustrine crude oil. In contrast, the crude oil from the K11－4 hydrocarbon-bearing structure is similar to that from other regions in the Kaiping sag, with relatively high oleanane content and a lower C_{21} TT/C_{19+20} TT index, suggesting it is more fluvial-deltaic in nature. An evaluation of source rocks and an analysis of molecular geochemical characteristics indicate that there are significant differences in the geochemical features of source rocks from different intervals in the southern Kaiping sag. The lower member of the Wenchang Formation consists of Type Ⅰ－Ⅱ$_2$ organic matter lacustrine source rocks, while the upper member of the Wenchang Formation to the Enping Formation comprises Type Ⅱ$_1$－Ⅲ deltaic coal-measure source rocks. The former exhibits superior organic matter abundance and hydrocarbon generation potential compared to the latter. Based on an analysis of the depositional environments, organic matter sources, and maturity levels of crude oil and source rocks, combined with a comparison of oil-source biomarker compound parameters and an analysis of the hydrocarbon generation potential of source rocks, it is believed that the crude oil in the southern Kaiping sag primarily originates from the lower member of the Wenchang Formation underlying the respective hydrocarbon-bearing structures. The southern Kaiping sag possesses relatively high-quality hydrocarbon source conditions and exhibits favorable exploration prospects.

Key words: Kaiping sag; geochemistry; oil-source rock correlation; origin of crude oil; source rock; Pearl River Mouth basin

0 引言

珠江口盆地油气资源丰富,近年来在珠江口盆地珠一坳陷和珠二坳陷相继发现了大型海上油气田,其中珠一坳陷惠州“双古领域”、阳江凹陷新区等勘探成果证明了该区域具有极大的勘探潜力[1-4]。

随着勘探思路的转变,勘探层位由浅层逐渐转变为深层。珠江口盆地开平凹陷地质条件复杂,勘探主要受该区域后期改造复杂、构造控烃机制不明、断块破碎等相关因素的制约,长期处于“有油无田”的境地[5-6]。随着相关问题的解决与难关的攻克,我国在开平凹陷南部斜坡带 KP18－1 和 KP11－4 井区获得了重大的勘探突破,发现了中国首个深水深层亿吨级大油田——开平南油田,极大地拓展了珠江口盆地油气勘探的领域和层系,展示出珠江口盆地深水区巨大的勘探前景[7-9]。

本次研究基于最新开平凹陷南部高产亿吨级油田 KP18－1 与 KP11－4 含油气构造的原油及烃源岩地球化学分析测试资料，开展了精细的分子地球化学特征分析，并参考前人对开平凹陷总结的石油地质-地球化学研究成果，在明确该区域原油生烃母质的沉积环境、有机质输入及成熟度特征等地化特征的基础上，辅以该区域烃源岩评价及分子地球化学特征分析，明确开平凹陷不同区带原油成因与来源差异，对比南部区域原油与早期其他勘探区域原油的物理、地球化学性质特征，总结开平凹陷南部油田原油地球化学特征并分析其成因来源，以期为油气勘探方向提供依据，确定主力烃源岩并探索该区域的油气富集规律。

1　区域地质概况

珠江口盆地呈近北东走向，具有南北分带、东西分块的特征，整体可分为“三隆两坳”：北部断阶带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带和南部隆起带。开平凹陷位于南部坳陷带的珠二坳陷中部（图 1），为深水区凹陷（图 1a，水深＞300 m[10]），现今水深 200～1 000 m，面积约为 6 200 km²。开平凹陷属于裂陷型凹陷，洼内主控洼断层规模较小，但沉降幅度大，主要由多个半地堑组合组成，洼陷近似北东向展布，总体上具有南北分带的构造特征[6, 8, 11-12]。

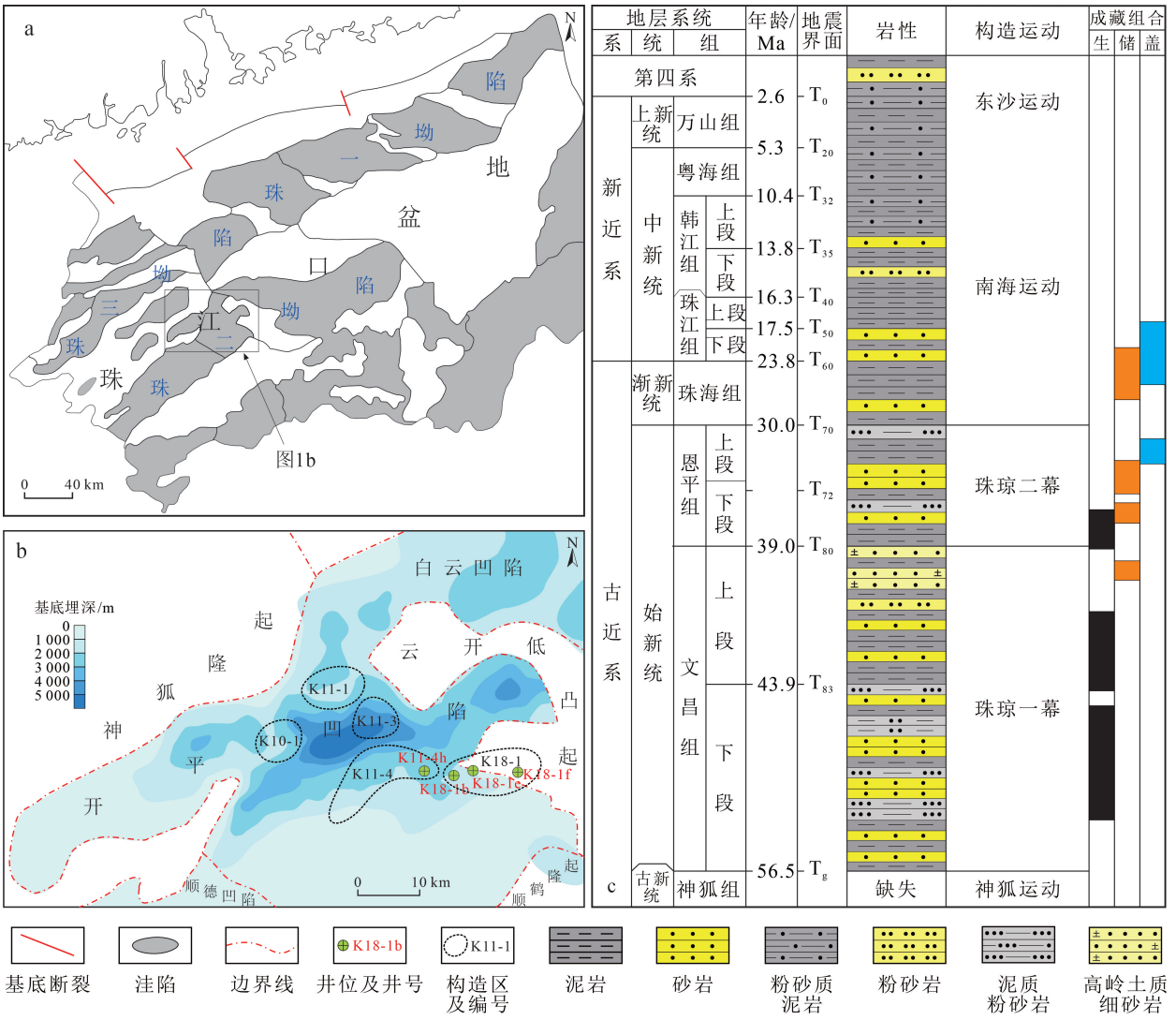


图 1　开平凹陷地理位置（a）、构造单元划分（b）及地层分布柱状图（c）

Fig.1　Geographicallocation（a）, structural unit division（b）, and stratigraphic distribution histogram（c）characteristics of Kaiping sag

勘探及相关研究[5, 13-15]表明:开平凹陷主要发育文昌组及恩平组两套烃源岩,其中文昌组是该区域的主力烃源岩;开平凹陷最大沉积厚度>5 200 m(图1b),共分为六个层段,发育辫状河三角洲、扇三角洲、滨浅湖、半深湖相沉积等,其中文昌组下段半深湖相泥岩是开平凹陷的优质烃源岩。

开平凹陷油气藏主要分布于恩平—珠海组,少部分油气藏分布于珠江组(图1c)[5, 13, 16]。根据彭光荣等[13]的研究,该区域油气藏类型分布存在一定的区带性差异:西部K10-1及北部K11-1断裂带原油为中—重质油,密度大(0.89 ~ 0.98 g/cm^3),黏度大(25.90 ~ 207.60 mPa·s),为遭受了一定生物降解作用的原油[15];南部斜坡带原油则为轻质油(黑油),密度和黏度普遍小于北部和西部区域原油。不同区域的油气藏成藏过程和储层保存条件存在一定的差异[13]。

2 样品分布及实验

研究重点选取了开平凹陷南部K18-1与K11-4含油气构造不同钻井不同层段收集的30件原油样品(表1),样品覆盖了文昌组、恩平组、珠海组及珠江组,并对开平凹陷的4口关键井(K18-1b、K18-1e、K18-1f、K11-4h)所采集的文昌组下段、文昌组上段及恩平组的泥岩样品展开了相关的地化特征分析测试。样品的实验分析测试项目包括原油及岩石抽提物饱和烃气相色谱-质谱、烃源岩有机碳(TOC)质量分数及烃源岩热解分析,以上实验均在中海油实验中心完成。此外,重点引用了开平南部区域K11-4含油气构造的原油及烃源岩地化数据与其他区域原油地球化学数据作为对比研究[13-15]。

岩石中的可溶性有机质、原油与岩石中可溶性有机质的族组分分离均参照《岩石中可溶有机物及原油族组分分析》(SY/T 5119—2016)[17]行业标准进行规范化操作;原油及岩石中可溶性有机质组分的饱和烃气相色谱-质谱分析则全程依照气相《色谱-质谱法测定沉积物和原油中生物标志物》(GB/T 18606—2017)[18]国家标准,采用Agilent 6890GC/5975iMS色谱质谱联用仪开展;烃源岩有机碳测定主要参照《沉积岩中总有机碳测定》(GB/T 19145—2022)[19]的操作规范,采用LECO CS-230硫碳分析仪进行标准化有机碳质量分数分析;生油岩热解采用Rock-Eval Ⅱ型检测仪按照《岩石热解分析》(GB/T 18602—2012)[20]标准化操作测定生油岩中S_1(残留烃)和S_2(裂解烃)质量分数。

表1 开平凹陷原油分子地球化学指标参数

Table 1 Molecular geochemical index parameters of crude oil in Kaiping sag

区域	层段	样品数量	类型	CPI	OEP	Pr/Ph	Pr/nC$_{17}$	Ph/nC$_{18}$	OL/C$_{30}$H	C$_{21}$/C$_{19+20}$TT	C$_{29}$-ST(ββ/ββ+αα)	C$_{29}$-ST 20S/(20S+20R)
K18-1	珠江组	2	原油	1.03~1.06	1.04~1.04	2.24~2.36	0.48~0.50	0.21~0.22	0.12~0.12	1.28~1.37	0.40~0.44	0.47~0.55
	珠海组	4	原油	1.05~1.09	1.04~1.07	2.44~3.23	0.44~0.93	0.18~0.31	0.08~0.13	1.32~1.51	0.41~0.65	0.28~0.54
	恩平组	6	原油	1.04~1.07	1.04~1.07	2.36~3.29	0.40~0.94	0.17~0.29	0.07~0.13	1.16~1.57	0.42~0.63	0.34~0.54
	文昌组	1	原油	1.07	1.08	2.45	0.95	0.42	0.07	1.43	0.42	0.52
K11-4	恩平组	15	原油	1.06~1.12	1.03~1.10	2.07~2.56	0.34~0.64	0.16~0.28	0.12~0.65	0.55~1.06	0.30~0.55	0.40~0.55
	文昌组	2	原油	1.05~1.07	1.05~1.07	2.70~2.87	0.46~0.48	0.19~0.19	0.49~0.51	1.24~1.45	0.49~0.50	0.50~0.60

注:CPI为碳优势指数;OEP为奇偶优势指数;Pr/Ph为姥植比;Pr/nC$_{17}$与Ph/nC$_{18}$为正构烷烃系列综合判识参数;OL/C$_{30}$H为被子植物输入指数;C$_{21}$/C$_{19+20}$TT为三环萜烷沉积环境判识参数;C$_{29}$-ST(ββ/ββ+αα)与C$_{29}$-ST 20S/(20S+20R)为规则甾烷异构化参数。

3　原油地球化学特征

结合开平凹陷南部区域原油物性、饱和烃气相色谱和气相色谱-质谱实验分析数据，本次研究分别针对原油物理性质分布、生烃母质沉积环境、有机质输入类型及热成熟度四个方面，开展了原油的性质类型、饱和烃组分的正构烷烃、三环萜烷、藿烷和甾烷系列及特殊区域性有机质贡献的化合物的区域性地球化学意义分析。

3.1　原油物性

原油受烃源岩有机质性质、沉积演化环境以及各种次生作用的影响会具有不同的物理性质。开平凹陷原油物性特征较为多样，北部（K11－1）、西部（K10－1）区域原油 API（American petroleum institute）值较低，而本次研究的重点区带开平凹陷南部（K18－1、K11－4）区域原油 API 值范围介于 29.79～31.82 之间，密度介于 0.84～0.87 g/cm^3 之间，为轻—中质原油。饱和烃、芳烃、非烃及沥青质的质量分数对判识原油的成因、判断原油成熟度以及油气藏所遭受的次生作用都有重要的意义。开平凹陷南部区域斜坡原油样品饱和烃质量分数＞60%，并具有较高的含蜡量（25.96%～49.36%），为高蜡油（图 2）。

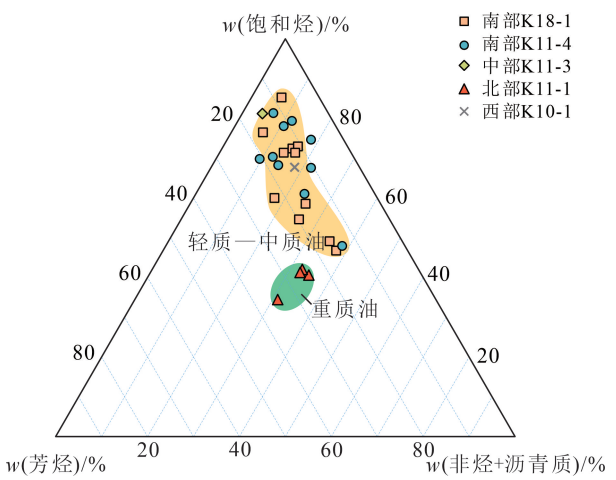


图 2　开平凹陷原油族组分质量分数分布

Fig.2　Distribution of crude oil group composition in Kaiping sag

3.2　沉积环境

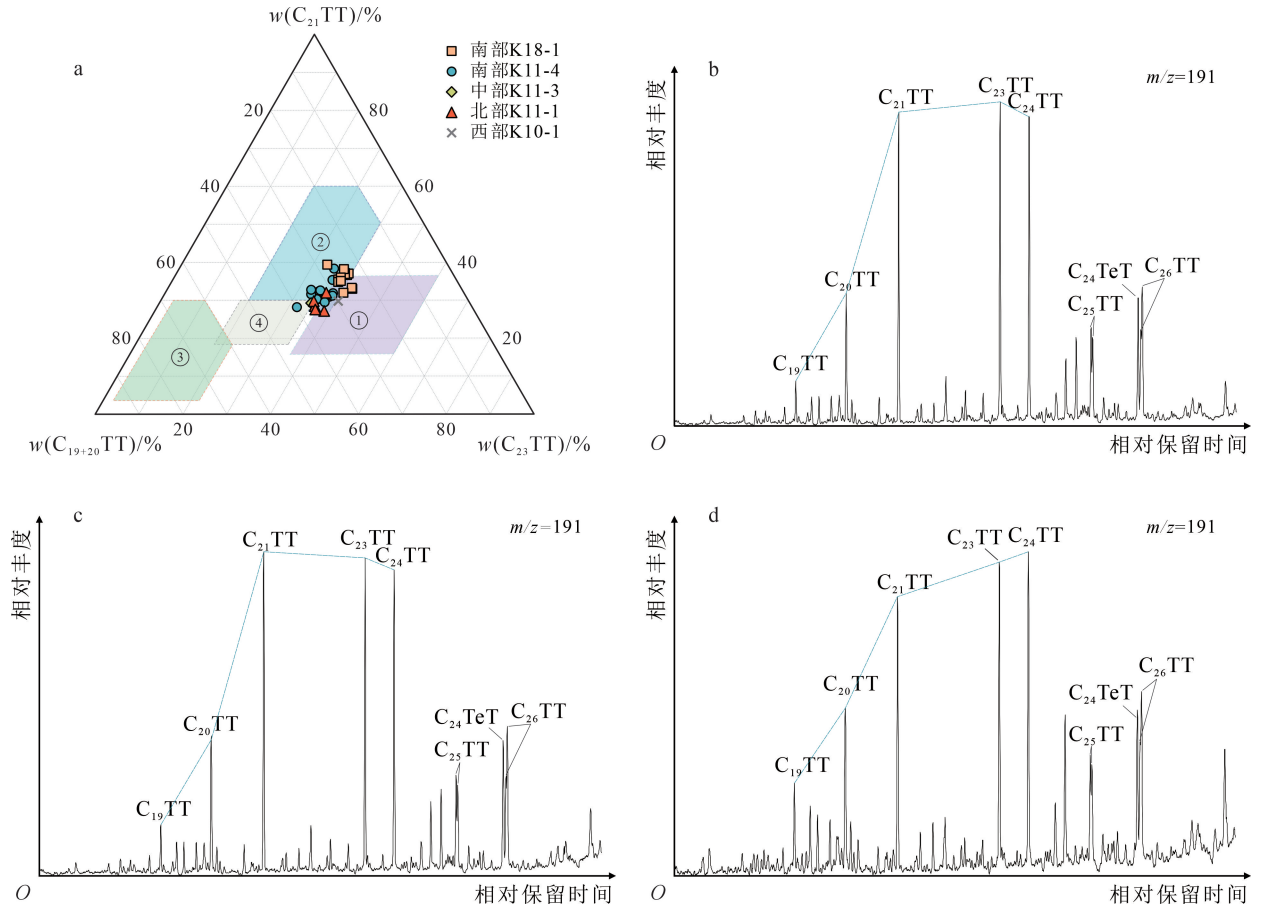
姥植比（Pr/Ph）是指示沉积环境氧化还原性的良好指标，通常姥植比＞3.0 反映偏氧化的沉积环境，姥植比＜0.8 反映典型的缺氧、还原环境，姥植比介于 0.8～3.0 之间时表明该参数在受沉积时期氧化还原条件控制的同时还受到其他因素影响[21]。研究区原油样品 Pr/Ph 介于 2.07～3.29 之间（表 1），指示其生烃母质主要沉积于偏氧化的沉积环境，同时也可能受到其他沉积作用的影响。

三环萜烷系列化合物的分布受沉积环境、水体盐度等因素控制，海相及咸水湖相烃源岩与其相关原油中往往具有 C_{23}TT（C_{23} 三环萜烷）优势，淡水湖相烃源岩及其原油则常以 C_{21}TT（C_{21} 三环萜烷）为主，典型的煤及煤成油则往往富含 C_{19}TT（C_{19} 三环萜烷）和 C_{20}TT（C_{20} 三环萜烷）（图 3a）[22-23]。研究区的原油三环萜烷系列化合物分布具有较为明显的 C_{21}TT 或 C_{23}TT 优势（图 3b、c、d），且未检出伽马蜡烷（图 4），指示其原油的生烃母质沉积于偏淡水—微咸水的环境。开平凹陷南部 K18－1 与K11－4 含油气构造的原油的生烃母质沉积环境有所不同：K18－1 较为特殊，三环萜烷系列具有显著的 C_{21}TT 优势，生烃母质沉积于偏湖相环境（图 3a）；K11－4 则与开平凹陷其他区域（中部 K11－3、北部 K11－1、西部 K10－1）的原油特征相类似，在图版中的分布位置较 K18－1 原油更偏向河流-三角洲相指示区（图 3a），表明 K11－4 原油的生烃母质的沉积环境更偏向河流-三角洲相沉积[21, 24-25]。

3.3　有机质来源

正构烷烃的碳数分布和组成可以反映烃源岩与原油的母质类型[21]，Ph/nC$_{17}$－Pr/nC$_{18}$ 交会图[26]显示整个开平凹陷的原油生烃母质均主要沉积于陆相有机质与混合生物有机质来源过渡环境（图 4a），正构烷烃分布则具有较为明显的双峰型特征（图 4b、c、d）。

奥利烷作为一种典型的指示沉积物陆源母质贡献的生物标志化合物，在尼日尔三角洲新生代原油中被首次发现，并经证实是来源于桦木醇、蒲公英烯及被子植物生成的五环三萜类化合物[27]。珠江口盆地多个凹陷的原油及烃源岩中均检测到了一定丰度的该化合物[26, 28]，其中：K18－1 原油中检出了低丰度的奥利烷（图 5a、b），OL/C_{30}H 值较低，仅为 0.07～0.13（表 1）；K11－4 原油中的奥利烷丰度则相对较高（图 5c），奥利烷介于 0.12～0.65 之间（表 1）。说明开平凹陷南部区域两个含油气构造原油生



a. 三环萜烷沉积环境判识图版;b. K18-1b井,恩平组2 895 m,原油化合物分布;c. K18-1e井,恩平组3 071 m,原油化合物分布;d. K11-4f井,恩平组3 636 m,原油化合物分布。①海相-咸水湖相;②淡水-微咸水湖相;③沼泽相烃源岩;④河流-三角洲相。C_{24}TT.C_{24}三环萜烷;C_{24}TeT.C_{24}四环萜烷;C_{25}TT.C_{25}三环萜烷;C_{26}TT.C_{26}三环萜烷;m/z.质荷比。

图3 开平凹陷原油三环萜烷系列化合物沉积环境判识(a)及开平凹陷南部K18-1构造区原油三环萜烷系列化合物分布(b、c、d)

Fig.3 Identification of sedimentary environment of crude oil tricyclic terpenes in Kaiping sag (a) and distribution of tricyclic terpenes in crude oil from K18-1 tectonic area in southern Kaiping sag (b, c, d)

烃母质的被子植物有机质的贡献存在一定差异。

$C_{27}-C_{28}-C_{29}$规则甾烷的分布特征常用于指示沉积有机质的生物贡献种类,通常情况下,C_{27}规则甾烷优势指示以藻类水生生物贡献为主,C_{29}规则甾烷优势则反映出陆源高等植物贡献[29]。$C_{27}-C_{28}-C_{29}$规则甾烷生源判识图版(图6a)显示,开平凹陷原油的生烃母质均具有浮游植物与陆源植物的贡献;规则甾烷分布呈现出C_{27}、C_{29}的"V"字形分布(图6b、c、d),指示其有机质主要有藻类水生生物和陆源高等植物贡献特征。

研究区原油样品中普遍检测出了4-甲基C_{30}甾烷(图5b、c、d),这种化合物在淡水湖泊相被认为是沟鞭藻类产生,在海相和咸水湖相则可能是由某些细菌产生[21, 24-25];结合沉积环境分析认为,该区域有机质来源存在淡水藻类的贡献。

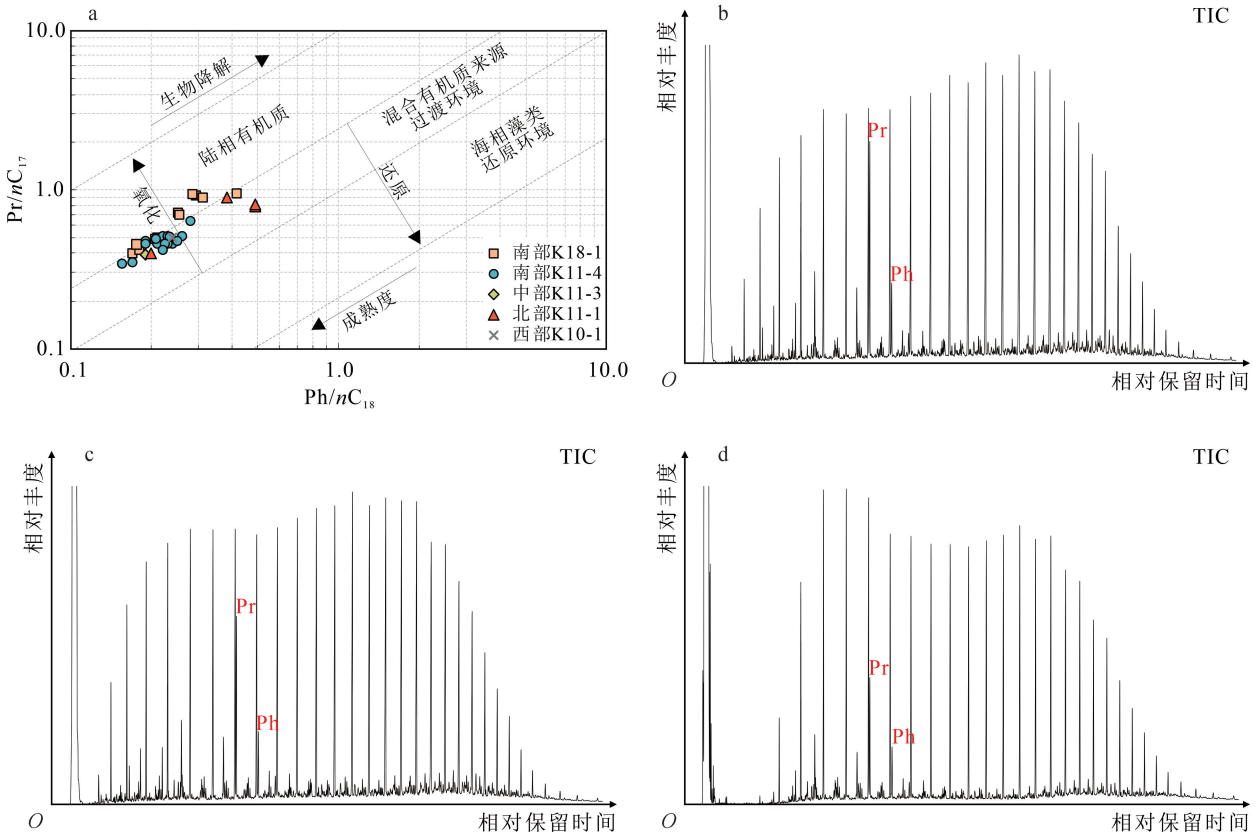
3.4 成熟度

生物标志化合物参数是评价原油成熟度的常用手段,随着热演化程度的增加,规则甾烷R构型会向S构型转化,与之相似的是热稳定性较差的α构型规则甾烷会向β构型转化[21, 30]。开平凹陷南部区域原油样品不具有明显的奇偶优势特征(表1),加之规则甾烷异构化参数表明该区域原油基本未超过平衡值且处于成熟区间,判断其来源于成熟阶段烃源岩(图7)。

4 烃源岩地球化学特征

4.1 烃源岩生烃潜力评价

已钻井开平凹陷岩性录井数据显示,开平凹陷



a. K18－1b 井恩平组 2 895 m 原油；b. K18－1e 井恩平组 3 071 m 原油；c. K11－4f 井恩平组 3 636 m 原油。TIC.总离子色谱图。

图 4　开平凹陷原油 Ph/nC$_{18}$－Pr/nC$_{17}$综合判识(a)及开平凹陷南部 K18－1 构造区原油正构烷烃系列化合物分布(b、c、d)

Fig.4　Ph/nC18－Pr/nC17 comprehensive identification in crude oil of Kaiping sag (a) and distribution of normal-alkane series compounds in crude oil from K18－1 tectonic area of southern Kaiping sag (b, c, d)

南部区域文昌组—恩平组岩性组合主要为砂泥互层，并在两个层段发育煤层，结合沉积相揭示该区域在文昌组—恩平组时期主要为煤系三角洲—湖相体系[15]。w(TOC)与 w(S_1+S_2)常被应用于评价烃源岩的生烃潜力[31]。本文研究主要分析了开平凹陷南部区域的文昌组—恩平组泥岩的岩石热解和 w(TOC)实验数据。开平南部 K18－1 与 K11－4 含油气构造区域的泥岩有机质类型与生烃潜力在同一层段内的差异不大，但是其存在较大的纵向差异(图 8)：文昌组下段烃源岩为Ⅰ—Ⅱ$_2$型偏腐泥型泥岩，有机质丰度较高(均值 5.31%)；文昌组上段烃源岩为Ⅱ$_1$—Ⅱ$_2$型，有机质丰度中等—高(均值 1.78%)；恩平组烃源岩主体为Ⅱ$_2$—Ⅲ型偏腐植型泥岩，受煤系三角洲发育的沉积影响，有机质丰度及生烃潜力的非均质性较强(图 8b)。K18－1 和 K11－4 含油气构造钻井所揭示的泥岩基本达到了烃源岩标准(w(TOC)＞0.50%)，文昌组下段的烃源岩有机质类型、生烃潜力和有机质丰度显著优于其他层段(图 8)。

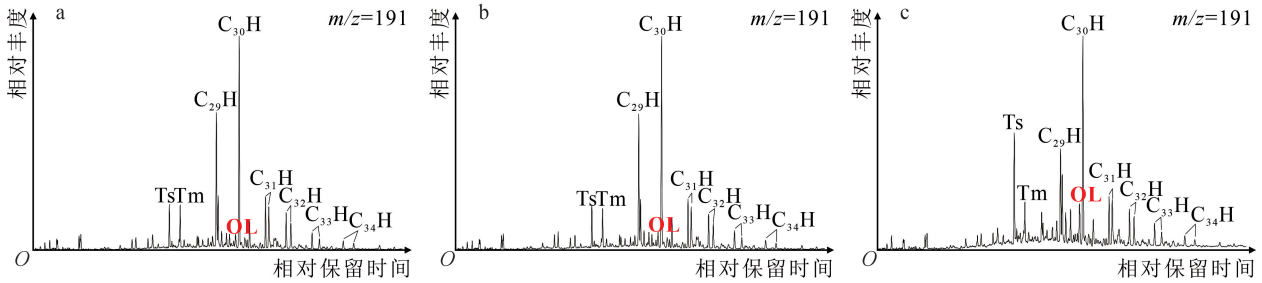
4.2　烃源岩分子地球化学特征

结合开平凹陷南部区域文昌组—恩平组沉积相分布[15]及分子地化特征分析认为，开平凹陷南部区域主要发育两种类型烃源岩，即以 C_{21}TT 或 C_{23}TT 为优势，低奥利烷、藻类水生生物与陆源高等植物有机质贡献占主导，主要分布于文昌组下段的湖相烃源岩(图 9a、b)和具有三环萜烷系列 C_{19+20}TT 优势、低—中等奥利烷、陆源高等植物有机质贡献占主导，主要分布于文昌组上段—恩平组的三角洲煤系烃源岩(图 9c、d)。

5　油气成因及来源

5.1　原油成因差异

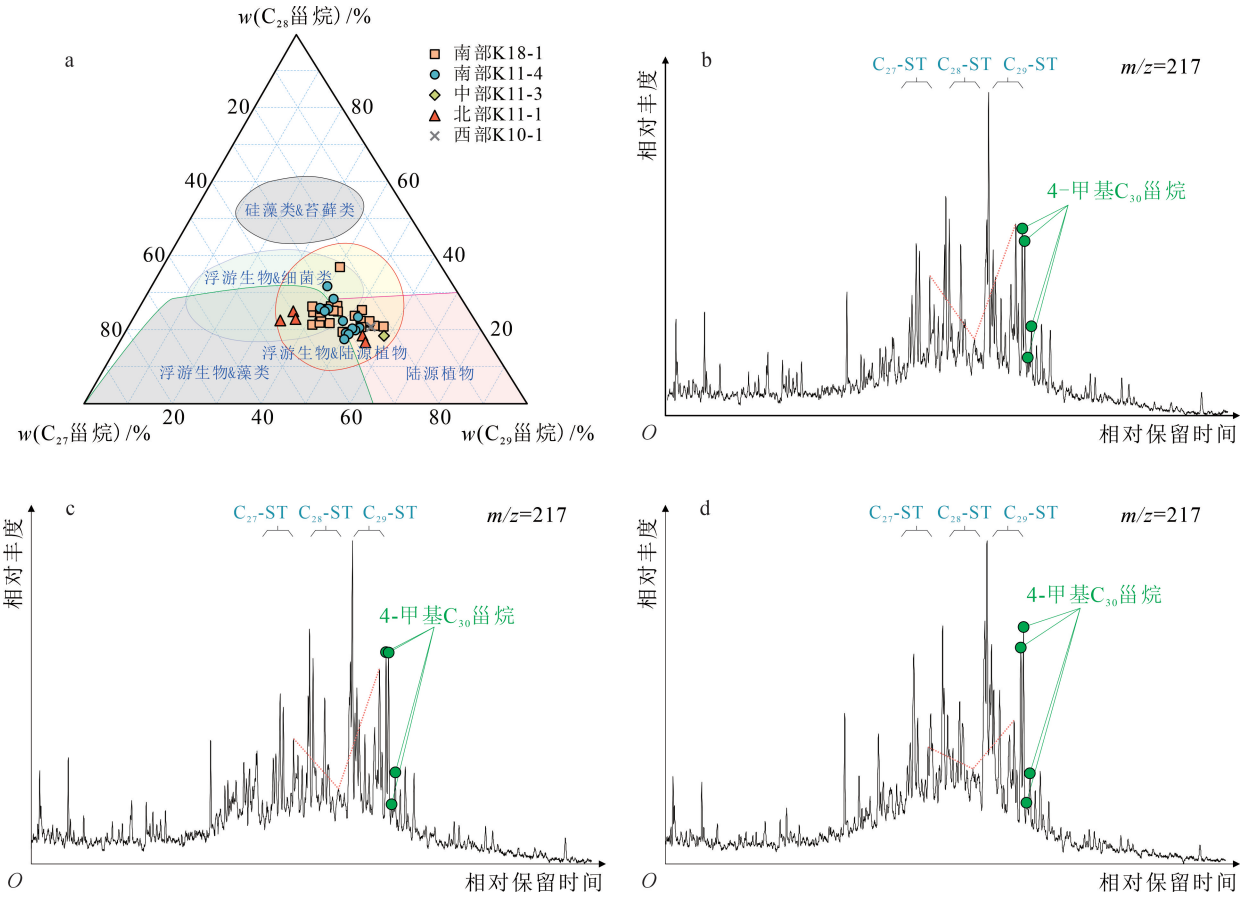
结合上文及前人对开平凹陷原油的地球化学特征分析[16]认为，南部区域K18-1含油气构造的原



a. K18－1b井，恩平组2 895 m原油；b. K18－1e井，恩平组3 071 m原油；c. K11－4f井，恩平组3 636 m原油。Ts、Tm. 三降藿烷；C_{29}H. C_{29}降藿烷；C_{30}H. C_{30}藿烷；C_{31}H. C_{31}升藿烷；C_{32}H. C_{32}升藿烷；C_{33}H. C_{33}升藿烷；C_{34}H. C_{34}升藿烷；OL. 奥利烷。

图5 开平凹陷南部K18－1构造区原油藿烷系列化合物分布

Fig.5 Distribution of hopanes in crude oil in K18－1 tectonic area of southern Kaiping sag



a. C_{27}－C_{28}－C_{29}规则甾烷生源判识图版；b. K18－1b井，恩平组2 895 m原油；c. K18－1e井，恩平组3 071 m原油；d. K11－4f井，恩平组3 636 m原油。C_{27}－ST. C_{27}规则甾烷系列化合物；C_{28}－ST. C_{28}规则甾烷系列化合物；C_{29}－ST. C_{29}规则甾烷系列化合物。

图6 开平凹陷原油甾烷系列有机质输入类型判识(a)及开平凹陷南部K18－1构造区原油甾烷系列化合物分布(b、c、d)

Fig.6 Identification of sterane series organic matter input types in crude oil of Kaiping sag (a) and distribution of sterane series compounds in crude oil from K18－1 tectonic area of southern Kaiping sag (b, c, d)

油较为特殊，在生烃母质的有机质输入组成及沉积环境特征与先前勘探的南部K11－4和主洼及西、北部原油具有较为显著的不同。

三环萜烷系列中C_{19}TT＋C_{20}TT优势代表成煤的陆相沉积环境，C_{21}TT优势指示淡水湖相沉积环境，富含C_{23}TT则反映了海相、咸湖环境。开平

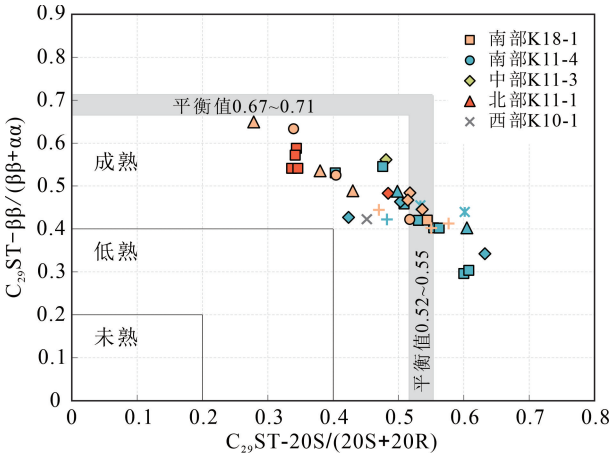


图 7　开平凹陷原油 C_{29} 规则甾烷异构化参数成熟度特征

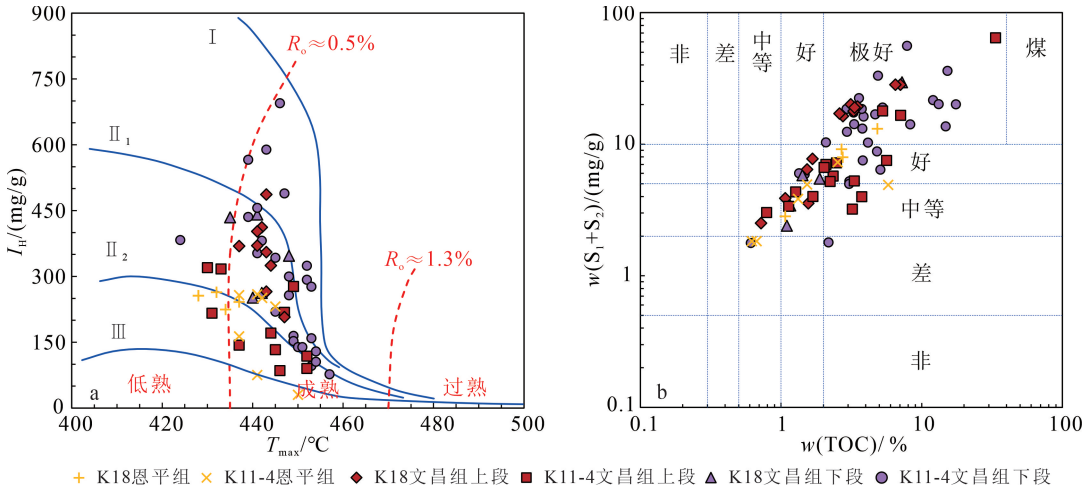
Fig.7　Correlation of C_{29} sterane 20S/(20S + 20R) and ββ/(ββ+αα) of crude oil in Kaiping sag

凹陷南部区域的原油三环萜烷系列普遍具有 C_{21} TT 或 C_{23} TT 优势（图 3b—d），利用 C_{21} TT/C_{19+20} TT 指数可以将该区域的原油划分为两类（图 10a）：K18－1含油气构造原油的 C_{21} TT/C_{19+20} TT 指数普遍较高，生烃母质沉积于湖相环境；K11－4 含油气构造的原油则与其他区域的原油相类似，C_{21} TT/C_{19+20} TT 指数较低，生烃母质可能沉积于偏河流－三角洲相环境（图 3a）。

前人[26, 28]在珠江口盆地的原油及烃源岩中均检测到一定丰度的奥利烷分布，与开平凹陷北部相接的白云凹陷更是存在有 OL/C_{30} H＞1.0 的原油；因此该区域奥利烷分布的含量差异，对其有机质输入方向及沉积环境演化具有较好的指示意义。OL/C_{30} H－Pr/Ph 交会图（图 10b）显示：开平凹陷 K18－1 含油气构造原油的 OL/C_{30} H 值显著低于其他区域，指示该区域的被子植物有机质的贡献相较其余区域偏低；K11－4 含油气构造的原油则与其他区域原油的特征类似，OL/C_{30} H 值较高，指示较高的陆源被子植物贡献。

5.2　油源对比与油气成因

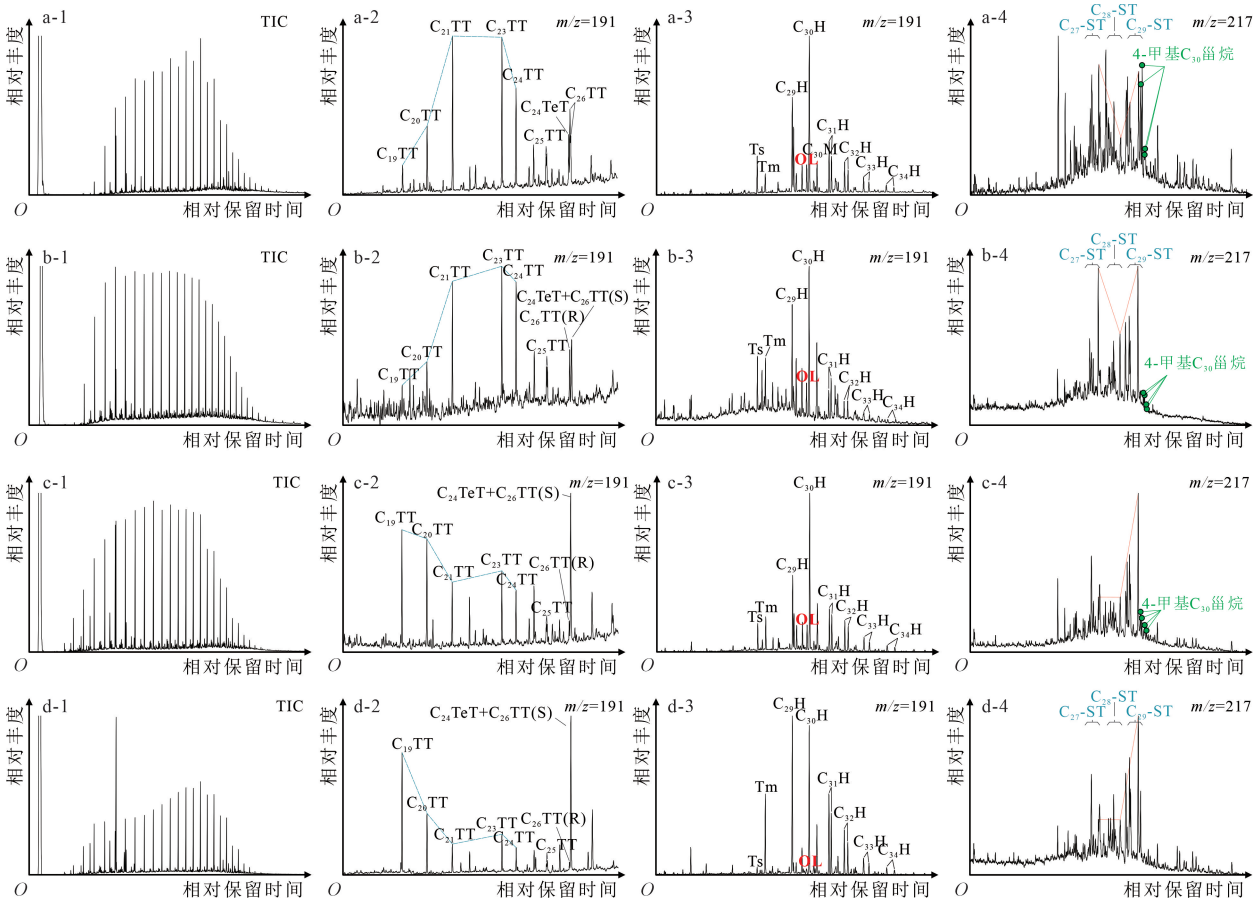
综合开平凹陷南部区域原油的生物标志化合物分析，结合开平凹陷南部不同层段烃源岩的生烃潜力评价与烃源岩生物标志化合物分析可知，开平凹陷南部 K18－1 与 K11－4 含油气构造下覆的文昌组下段烃源岩的有机质类型、生烃潜力和有机质丰度显著优于同区域的其他层段，且其生物标志化合物指纹与相对应的含油气构造原油的生物标志化合物指纹具有较好的对应性（图 3b—d，图 4，图 5b—d，图 6b—d，图 9），在沉积环境、有机质生源组成及有机质热成熟度三个方面均有较好的吻合度，可能为该区域的主力烃源岩层段。



T_{max}. 最高热解温度；I_H. 氢指数；R_o. 镜质体反射率。b 图版据文献[31]。

图 8　开平凹陷南部区域烃源岩类型、成熟度（a）及生烃潜力评价（b）

Fig.8　Evaluation of source rock types, maturity (a), and hydrocarbon generation potential (b) in southern Kaiping sag



a-1，2，3，4. K18-1a井，文昌组下段 3 370～3 385 m；b-1，2，3，4. K11-4h井，文昌组下段 4 567～4 576 m；c-1，2，3，4. K18-1f井，文昌组上段 3 615～3 624 m；d-1，2，3，4. K18-1b井，恩平组 3 712～3 721 m。图号中1、2、3、4，分别代表TIC总离子流图、三环萜烷化合物分布图、藿烷系列化合物分布图和甾烷系列化合物分布图。Ga. 伽马蜡烷。

图9 开平凹陷烃源岩关键特征离子饱和烃质量色谱图

Fig.9 Characteristic ion saturated hydrocarbon mass chromatogram of source rocks in Kaiping sag

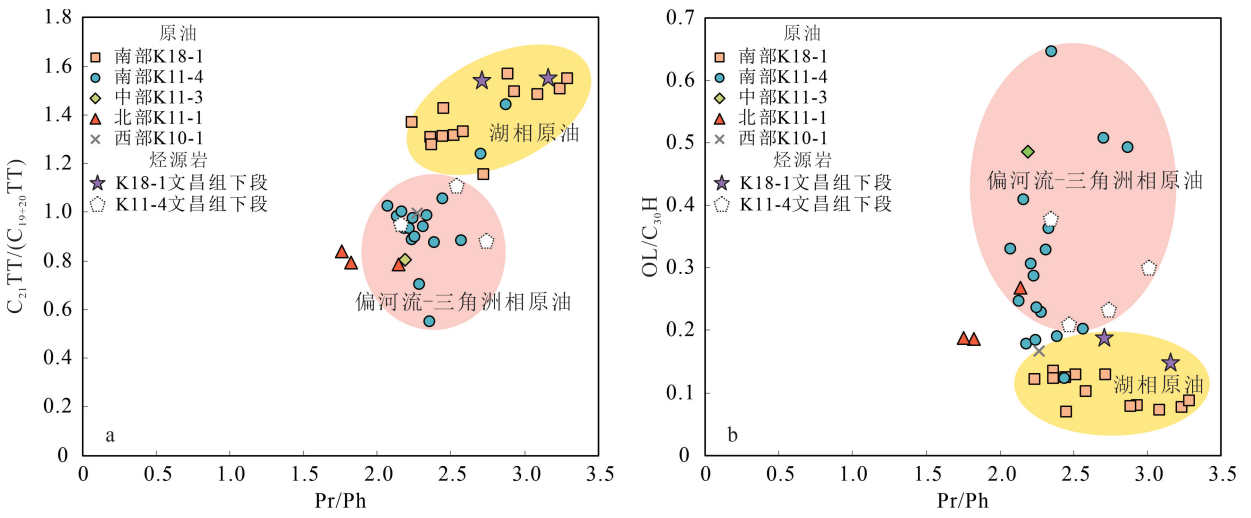


图10 开平凹陷原油与烃源岩关键指标油-源对比交会图

Fig.10 Crossplot of oil source correlation between key indicators of crude oil and source rocks in Kaiping sag

6　结论

1）开平凹陷南部区域原油为高含蜡量、轻—中质原油，三环萜烷系列普遍具有 C_{21}TT 或 C_{23}TT 优势，C_{27}、C_{29}规则甾烷优势，并有低含量的奥利烷和 4-甲基 C_{30}甾烷的分布，生烃母质沉积于具有混合有机质贡献、淡水环境的烃源岩。

2）开平凹陷南部不同层段烃源岩的地球化学差异较大：文昌组下段泥岩的有机质类型为Ⅰ—$Ⅱ_2$型，丰度高，具有 C_{21}TT 优势及低奥利烷丰度的特征，综合分析认为其属于典型的湖相烃源岩，具有较高的生烃潜力；文昌组上段及恩平组泥岩均具有 C_{19+20}TT 优势与中等奥利烷丰度，为三角洲煤系烃源岩，其中文昌组上段泥岩有机质类型为$Ⅱ_1$—$Ⅱ_2$型，恩平组下段泥岩有机质类型介于$Ⅱ_2$—Ⅲ之间，文昌组上段烃源岩的生烃潜力和有机质丰度优于恩平组烃源岩。

3）根据分子地球化学特征油-源对比及区域地质情况综合分析认为，开平凹陷南部区域两个含油气构造 K18-1 和 K11-4 原油与其各自下覆的文昌组下段泥岩具有较好的对应性（K18-1 为湖相原油，来源于低 OL/C_{30}H 指数、高 C_{21}TT/C_{19+20}TT 指数的湖相烃源岩；K11-4 为偏河流-三角洲相原油，来源于高 OL/C_{30}H 指数、低 C_{21}TT/C_{19+20}TT 指数的偏河流三角洲相烃源岩），指示该区域两个含油气构造的原油均来源于各自下伏的文昌组下段烃源岩。

参考文献（References）：

[1] 徐乐意，徐昉昊，牛胜利，等. 珠江口盆地 HZ26-6 构造“双古”领域油气成藏特点与富集规律[J].成都理工大学学报（自然科学版），2023，50(2)：138-147.
Xu Leyi，Xu Fanghao，Niu Shengli，et al. Oil and Gas Accumulation Characteristics and Enrichment Regularity in the Prepaleogene-Paleogene Field of HZ26-6 Structure in Pearl River Mouth Basin，China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)，2023，50(2)：138-147.

[2] 姜衍，张向涛，龙祖烈，等. 南海北部珠江口盆地烃源岩成因：阳江凹陷的资源潜力[J].大地构造与成矿学，2021，45(1)：90-107.
Jiang Yan，Zhang Xiangtao，Long Zulie，et al. Formation of Source Rocks in the Pearl River Mouth Basin，Northern South China Sea：Resource Potential of the Yangjiang Sag[J]. Geotectonica et Metallogenia，2021，45(1)：90-107.

[3] 彭光荣，朱定伟，吴静，等. 珠江口盆地阳江凹陷油气重大发现与成藏启示[J].大地构造与成矿学，2021，45(1)：179-187.
Peng Guangrong，Zhu Dingwei，Wu Jing，et al. Discoveries of Hydrocarbon Accumulation in the Yangjiang Sag of the Pearl River Mouth Basin and Implications[J]. Geotectonica et Metallogenia，2021，45(1)：179-187.

[4] 徐长贵，高阳东，刘军，等. 南海东部富砂砾型大中型油气田发现与启示：以珠江口盆地惠州 26 洼古近系恩平组为例[J]. 石油勘探与开发，2024，51(1)：14-27.
Xu Changgui，Gao Yangdong，Liu Jun，et al. Discovery and Inspiration of Large- and Medium-Sized Glutenite-Rich Oil and Gas Fields in the Eastern South China Sea：An Example from Paleogene Enping Formation in Huizhou 26 Subsag，Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Exploration and Development，2024，51(1)：14-27.

[5] 张宇琦. 开平凹陷油气成藏体系划分与评价[D].北京：中国石油大学（北京），2023.
Zhang Yuqi. Division and Evaluation of Hydrocarbon Accumulation Systems in the Kaiping Depression[D]. Beijing：China University of Petroleum (Beijing)，2023.

[6] 聂国权，何登发，李小盼，等. 珠江口盆地开平凹陷构造-地层层序与盆地演化[J].地质科学，2020，55(1)：145-162.
Nie Guoquan，He Dengfa，Li Xiaopan，et al. Tectono-Stratigraphic Sequence and Basin Evolution of Kaiping Sag in the Pearl River Mouth Basin[J]. Chinese Journal of Geology，2020，55(1)：145-162.

[7] 徐长贵，高阳东，刘军，等. 珠江口盆地开平南大型深水深层油田发现与认识创新[J].中国海上油气，2024，36(1)：1-13.
Xu Changgui，Gao Yangdong，Liu Jun，et al. Discovery of Large Deep-Water and Deep-Formation Oilfield in South Kaiping Sag of Pearl River Mouth Basin and New Geological Understandings[J]. China Offshore Oil and Gas，2024，36(1)：1-13.

[8] 杨海长，曾清波，纪沫，等. 珠江口盆地深水区开平凹陷拆离型裂陷石油形成条件与勘探方向[J].石油学报，2023，44(6)：933-947.
Yang Haizhang，Zeng Qingbo，Ji Mo，et al. Accumulation Conditions and Exploration Direction of

Crude Oil in Detachment Rift of Kaiping Sag in Deep Water Area of Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(6): 933-947.

[9] 高阳东，彭光荣，陈兆明，等. 珠江口盆地开平凹陷深水古近系勘探重大发现及意义[J].石油学报，2023，44(7)：1029-1040.
Gao Yangdong, Peng Guangrong, Chen Zhaoming, et al. Breakthrough and Significance of Deep-Water Paleogene Exploration in Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(7): 1029-1040.

[10] 朱伟林. 南海北部深水区油气地质特征[J].石油学报，2010，31(4)：521-527.
Zhu Weilin. Petroleum Geology in Deepwater Area of Northern Continental Margin in South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 521-527.

[11] 彭光荣，张丽丽，许新明，等. 珠江口盆地开平凹陷核杂岩拆离结构及其动力学成因[J].地球科学，2024，49(9)：3306-3317.
Peng Guangrong, Zhang Lili, Xu Xinming, et al. Core Complex and Detachment Structure in the Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin and a Discussion on the Dynamics[J]. Earth Science, 2024, 49(9): 3306-3317.

[12] 李智，张志业，何登发，等. 珠江口盆地开平凹陷构造单元划分与平面复原[J].海洋地质前沿，2023，39(7)：70-78.
Li Zhi, Zhang Zhiye, He Dengfa, et al. Tectonic Division and Plane Restoration of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(7): 70-78.

[13] 彭光荣，郭婧，姜福杰，等. 珠江口盆地开平凹陷烃源岩地球化学特征与油源对比[J].石油学报，2023，44(10)：1624-1636.
Peng Guangrong, Guo Jing, Jiang Fujie, et al. Geochemical Characteristics of Source Rocks and Oil-Source Correlation in Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(10): 1624-1636.

[14] 郭婧. 珠江口盆地开平凹陷烃源岩生排烃特征及资源评价[D].北京:中国石油大学(北京)，2023.
Guo Jing. Hydrocarbon Generation and Expulsion Characteristics and Resource Potential Analysis of Source Rocks in Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.

[15] 熊连桥. 开平凹陷文昌组沉积特征及半深湖空间分布[J].中国海上油气，2021，33(5)：51-61.
Xiong Lianqiao. Sedimentary Characteristics and Semi-Deep Lacustrine Facies Spatial Distribution of Wenchang Formation in Kaiping Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(5): 51-61.

[16] 朱俊章，施洋，熊万林，等. 开平凹陷古近系稠油和砂岩储层沥青质成因分析[J].中国海上油气，2020，32(2)：34-43.
Zhu Junzhang, Shi Yang, Xiong Wanlin, et al. Genesis Analysis of Paleogene Heavy Oil and Asphaltene in Sandstone Reservoir in Kaiping Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(2): 34-43.

[17] 岩石中可溶有机物及原油族组分分析：SY/T 5119—2016[S].北京：中国标准出版社，2016.
Determination of Total Organic Carbon in Sedimentary Rocks: SY/T 5119—2016[S]. Beijing: Standard Press of China, 2016.

[18] 气相色谱-质谱法测定沉积物和原油中生物标志物：GB/T 18606—2017[S].北京：中国标准出版社，2017.
Determination of Biomarkers in Sediments and Crude Oil by Gas Chromatography Mass Spectrometry: GB/T 18606—2017[S]. Beijing: Standard Press of China, 2017.

[19] 沉积岩中总有机碳测定：GB/T 19145—2022[S].北京：中国标准出版社，2022.
Determination of Total Organic Carbon in Sedimentary Rocks: GB/T 19145—2022[S]. Beijing: Standard Press of China, 2022.

[20] 岩石热解分析：GB/T 18602—2012[S].北京：中国标准出版社，2012.
Rock Pyrolysis Analysis: GB/T 18602—2012[S]. Beijing: Standard Press of China, 2012.

[21] Peters K E, Walters C C, Moldwan J M. The Biomarker Guide[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

[22] 肖洪，李美俊，杨哲，等.不同环境烃源岩和原油中C19—C23三环萜烷的分布特征及地球化学意义[J].地球化学,2019,48(2):161-170.
Xiao Hong, Li Meijun, Yang Zhe, et al. Distribution Patterns and Geochemical Implications of C19 - C23 Tricyclic Terpanes in Source Rocks and Crude Oils Occurring in Various Depositional Environments[J]. Geochimica ,2019, 48(2):161-170.

[23] Xiao H, Li M J, Nettersheim B J, et al. Short Chain Tricyclic Terpanes as Organic Proxies for Paleo-Deposition Conditions[J]. Chemical Geology, 2024,

652：122023.

[24] 傅宁. 论 4 -甲基 C30 甾烷丰度与烃源岩质量的关系：基于北部湾盆地勘探实践[J].中国海上油气，2018，30(5)：11 - 20.
Fu Ning. On Relationship Between Abundance of 4 Methyl C30 Sterane and Source Rock Quality：A Case Study of Exploration Practices in Beibuwan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas，2018，30(5)：11 - 20.

[25] 昝灵，张枝焕，王顺华，等. 4 -甲基甾烷在油源对比中的应用：以渤南洼陷北部陡坡带为例[J].沉积学报，2012，30(4)：770 - 778.
Zan Ling，Zhang Zhihuan，Wang Shunhua，et al. Application of 4 - Methyl Steranes in Oil-Source Correlation：A Case Study from Northern Steep Slope Zone of Bonan Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica，2012，30(4)：770 - 778.

[26] 冉子超，李美俊，李友川，等. 珠江口盆地白云凹陷原油中典型生物标志化合物组合及其地球化学意义[J].石油实验地质，2022，44(6)：1059 - 1069.
Ran Zichao，Li Meijun，Li Youchuan，et al. Biomarker Compositions and Geochemical Significance of Crude Oils of Baiyun Sag，Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment，2022，44(6)：1059 - 1069.

[27] Tissot B，Bienner F. Advances in Organic Geochemistry 1973[M]. Pairs：Editions Technip，1974.

[28] 卢晓林. 珠江口盆地白云凹陷恩平组烃源岩有机质富集机理及成藏贡献[D].北京：中国石油大学(北京)，2023.
Lu Xiaolin. Organic Matter Enrichment Mechanism for the Source Rock of the Enping Formation and Its Contribution to Hydrocarbon Accumulation in the Baiyun Sag，Pearl River Mouth Basin[D]. Beijing：China University of Petroleum (Beijing)，2023.

[29] Huang W Y，Meinschein W G. Sterols as Ecological Indicators[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，1979，43(5)：739 - 745.

[30] Moldowan J M，Seifert W K，Gallegos E J. Relationship Between Petroleum Composition and Depositional Environment of Petroleum Source Rocks[J]. AAPG Bulletin，1985，69(8)：1255 - 1268.

[31] 陆相烃源岩地球化学评价方法：SY/T 5735—1995[S].北京：中国标准出版社，1995.
Geochemical Evaluation Methods of Continental Source Rocks：SY/T 5735—1995[S]. Beijing：Standard Press of China，1995.