

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.130>



苏北盆地溱潼凹陷全油气系统油源对比

薛 冈¹, 陈红汉^{2*}, 马晓东¹, 臧素华¹, 咎 灵¹, 白鸾羲¹, 郇 浩¹, 苏 鹏²,
程 吉², 苏丹梅², 黄天娇², 江嘉怡²

1. 中国石油化工股份有限公司华东油气分公司, 江苏南京 210000

2. 中国地质大学(武汉)资源学院石油地质系, 湖北武汉 430074

摘 要: 随着湖相页岩油勘探开发不断深入, 苏北盆地溱潼凹陷已进入全油气系统评价阶段。前人开展的油源对比研究侧重烃源岩发育时期湖水盐度变化对生物标志化化合物的影响, 难以满足“同时异相”烃源岩的全油气系统油源对比要求。本文在古气候驱动旋回地层及其对烃源岩发育控制作用分析的基础上, 分析了溱潼凹陷 11 件页岩油和常规原油样品中反映硫化生境的芳基类异戊二烯烃生标, 并进行全油气系统油源对比; 同时, 运用 2,3,6-芳基类异戊二烯烃(2,3,6-AIPs)和 2,3,4-芳基类异戊二烯烃(2,3,4-AIPs)构造的 $C_3 = \Sigma(2,3,6\text{-AIPs})/\Sigma(2,3,4\text{-AIPs})$ 和 $C_4 = \Sigma(2,3,6\text{-AIPs})/\Sigma(2,3,4\text{-AIPs}) + \Sigma(2,3,6\text{-AIPs})$ 指标, 分别计算了页岩油和常规原油烃源岩的相对硫化强度和相对古水深。结果表明: (1) 溱潼凹陷阜宁组二段发育早期湖扩→晚期湖扩→高位体系域低频旋回, 且由 9 个四级准层序组和 32.5 个五级准层高频旋回构成; 总体上呈现着寒冷干旱→温暖潮湿、(半)咸化→淡水介质演变趋势。(2) 阜宁组二段残留总有机碳丰度(TOC)相对高值对应于体系域旋回的温暖潮湿和淡化介质最大湖泛面, 相对低值对应于寒冷干燥和咸化介质初始湖泛面。温暖潮湿的半深湖—深湖相淡水介质环境更有利于有机质的富集。(3) 阜二段发育水体较浅+硫化较弱咸化环境、水体较深+硫化中等咸化环境、水体最深+硫化最强咸化环境和非硫化+淡水环境等 4 种类型的烃源岩。该研究不仅为“同时异相”烃源岩评价提供了一种新的工具, 而且为全油气系统分布序列建立提供依据。

关键词: 油源对比; 全油气系统; 芳基类异戊二烯烃; 生物标志化合物; 高分辨层序地层; 溱潼凹陷; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2025)12-4652-19

收稿日期: 2025-02-09

Oil Correlation for Whole Petroleum System in Qintong Sag, Subei Basin

Xue Gang¹, Chen Honghan^{2*}, Ma Xiaodong¹, Zang Suhua¹, Zan Ling¹, Bai Luanxi¹, Tai Hao¹, Su Peng²,
Cheng Ji², Su Danmei², Huang Tianjiao², Jiang Jiayi²

1. SINOPEC East China Oil & Gas Company, Nanjing 210000, China

2. Department of Petroleum Geology, School of Earth Resources, China University of Geoscience (Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: With the continual progressing of shale oil exploration and development in lacustrine facies, the investigation in Qintong sag of Subei basin steps into the stage of whole petroleum system evaluation. The previous oil correlation researches focused on the influence of salinity of lake water during source rock development onto biomarkers, which is hard to satisfy the requirement of oil

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技部项目“东部断陷盆地页岩油目标评价与先导试验”(No.P20049-3); “苏北盆地页岩油地质工程一体化关键技术”(No.P21112); “溱潼凹陷低 TOC 陆相页岩油勘探开发关键技术”(No.P23190)联合资助。

作者简介: 薛冈(1971—), 男, 博士, 高级工程师, 现主要从事油气勘探技术研究及科技管理工作。E-mail: xueg.hdsj@sinopec.com

*** 通讯作者:** 陈红汉, 教授, 主要从事常规和非常油气成藏过程研究。ORCID: 0000-0001-6968-412X。E-mail: hhchen@cug.edu.cn

引用格式: 薛冈, 陈红汉, 马晓东, 臧素华, 咎灵, 白鸾羲, 郇浩, 苏鹏, 程吉, 苏丹梅, 黄天娇, 江嘉怡, 2025. 苏北盆地溱潼凹陷全油气系统油源对比. 地球科学, 50(12): 4652-4670.

Citation: Xue Gang, Chen Honghan, Ma Xiaodong, Zang Suhua, Zan Ling, Bai Luanxi, Tai Hao, Su Peng, Cheng Ji, Su Danmei, Huang Tianjiao, Jiang Jiayi, 2025. Oil Correlation for Whole Petroleum System in Qintong Sag, Subei Basin. *Earth Science*, 50(12): 4652-4670.

correlation with the source rocks of “contemporaneous heterotopic facies” for whole petroleum system. This study is on the basis of analysis of controlling of high-resolution sequence stratigraphy driven by paleoclimate on source rock development and distribution, totally 11 shale oil and conventional crude oil samples in Qintong sag have been employed to measure the aryl isoprenoid biomarkers which can reflect sulfuration habitat and be used to correlate the whole petroleum system with source rocks. Meanwhile, the 2, 3, 6- aryl isoprenoids (2, 3, 6-AIPs) and 2, 3, 4- aryl isoprenoids (2, 3, 4-AIPs) have been applied to build two parameters: $C_3 = \Sigma(2, 3, 6\text{-AIPs}) / \Sigma(2, 3, 4\text{-AIPs})$ and $C_4 = \Sigma(2, 3, 6\text{-AIPs}) / \Sigma(2, 3, 4\text{-AIPs}) + \Sigma(2, 3, 6\text{-AIPs})$, which are utilized to calculate the relative sulfuration intensity and relative paleo-depth of lake water for the source rocks of shale oils and conventional crude oils, respectively. And then, several research results have been obtained as following. (1) The second member of Funing Formation in Qintong sag underwent the low frequency cycle of earlier lake expansion system tract (EEST)→later lake expansion system tract (LEST)→high level system tract (HST), which can be divided into high frequency cycle of 9-fourth level quasi-sequence group (P1—P9), and 32.5-fifth level subsequences, which indicates the total tendency from the (semi-) haline water during the earlier cold and dry paleoclimate evolving into the fresh water during the later warm and humid paleoclimate. (2) The relative higher values of residual total organic carbon (TOC) in the second member of Funing Formation are always corresponding to the maximum lake flooding surface of system tract cycles with warm and humid paleo-climate and fresh water; and the relative lower values of residual TOC being always corresponding to the initial lake flooding surface with cold and dry paleo-climate and (semi-) haline water. This leads to a conclusion that bathyal-deep lake environments with warm, humid paleoclimate and fresh water are more beneficial to organic enrichment. (3) Four types of source rocks in the second member of Funing Formation can be recognized: the first is relatively shallower water column and weaker sulfuration facies; the second being relatively deeper water column and moderate sulfuration facies; the third being deeper water column and intensive sulfuration facies; and the fourth being deeper and fresh water column facies. This research is not only providing a new tool for “contemporaneous heterotopic facies” source rock evolution, but also giving the evidence to establish the distribution sequence of whole petroleum system.

Key words: correlation of oil with source rock; whole petroleum system; aryl isoprenoid; biomarker; high-resolution sequence stratigraphy; Qintong sag; petroleum geology.

0 引言

溱潼凹陷构造上属于苏北新生代盆地东台坳陷的一个三级构造单元,东北毗连海安凹陷,西北与吴堡低凸起相接,东南与泰州低凸起以泰州大断裂为界,面积近 1 200 km²(图 1).溱潼凹陷为一个南断北超的箕状断陷,新生界沉积厚度达 6 000 m,古近系发育泰州组(E_1t)、阜宁组(E_1f)、戴南组(E_2d)和三垛组(E_2s)等多套地层(图 2),自下而上发育泰州组二段(E_{1t2})、阜宁组阜一段(E_{1f1})、阜二段(E_{1f2})和阜四段(E_{1f4})等 4 套半深湖—深湖相烃源岩层系.其中, E_{1f2} 为主力烃源岩,既是常规油藏的主要油源,也是页岩油勘探的重点层段(陈红汉,2023;云露等,2023).

溱潼凹陷早期勘探主要以寻找常规油气藏为主,先后发现了草舍、红庄、边城、茅山等 14 个构造油气藏.随着勘探的不断深入,先后发现西部斜坡带帅垛—陈家舍地区戴一段(E_2d_1)超覆尖灭型岩性油藏,俞垛—华庄、帅垛地区阜三段(E_{1f3})两个千万吨级构造—岩性油藏以及与火山岩相关的岩性油藏(吴群等,2016).然而,溱潼凹陷常规油资源量仅

为 1.32×10^8 t,探明率较高,常规油藏发现难度越来越大;而页岩油资源量为 2.95×10^8 t,目前处于初步阶段(胥灵等,2021a)(图 1b).

苏北盆地页岩油勘探起步较晚.20 世纪 70 年代,苏北盆地有多口钻井在古近系 E_{1f2} 的页岩中钻遇油气显示,但由于当时普遍认为阜二段为生油层而非产层,并未引起广泛关注.2012 年,中国石油化工股份有限公司华东油气分公司加大了页岩油选区评价的力度,部署实施了 BG1 井,测试的最高产油量为 22 t/d,但由于递减快、累积产量低,未获商业突破;2020 年,优选苏北盆地溱潼凹陷的深凹带部署实施了 SD1 井在阜二段页岩中获得高产工业油流,测试最高产油量为 50.9 t/d,目前已自喷生产 20 多个月,累积原油产量超过 1.5×10^4 t;QY1 井测试获得最高产油量 66 t/d,实现了苏北盆地陆相页岩油勘探的重大突破(姚红生等,2021,2023;云露等,2023).目前已经在凹陷及其周边完成了各类钻井 75 口钻遇阜二段泥页岩,其中 34 口井有油气显示,在储家楼次凹、时堰次凹和港口次凹三大生烃洼陷之间的地层的油源十分优越,已经发现了多个页岩油田,资源储量占溱潼凹陷页岩油资源储量的

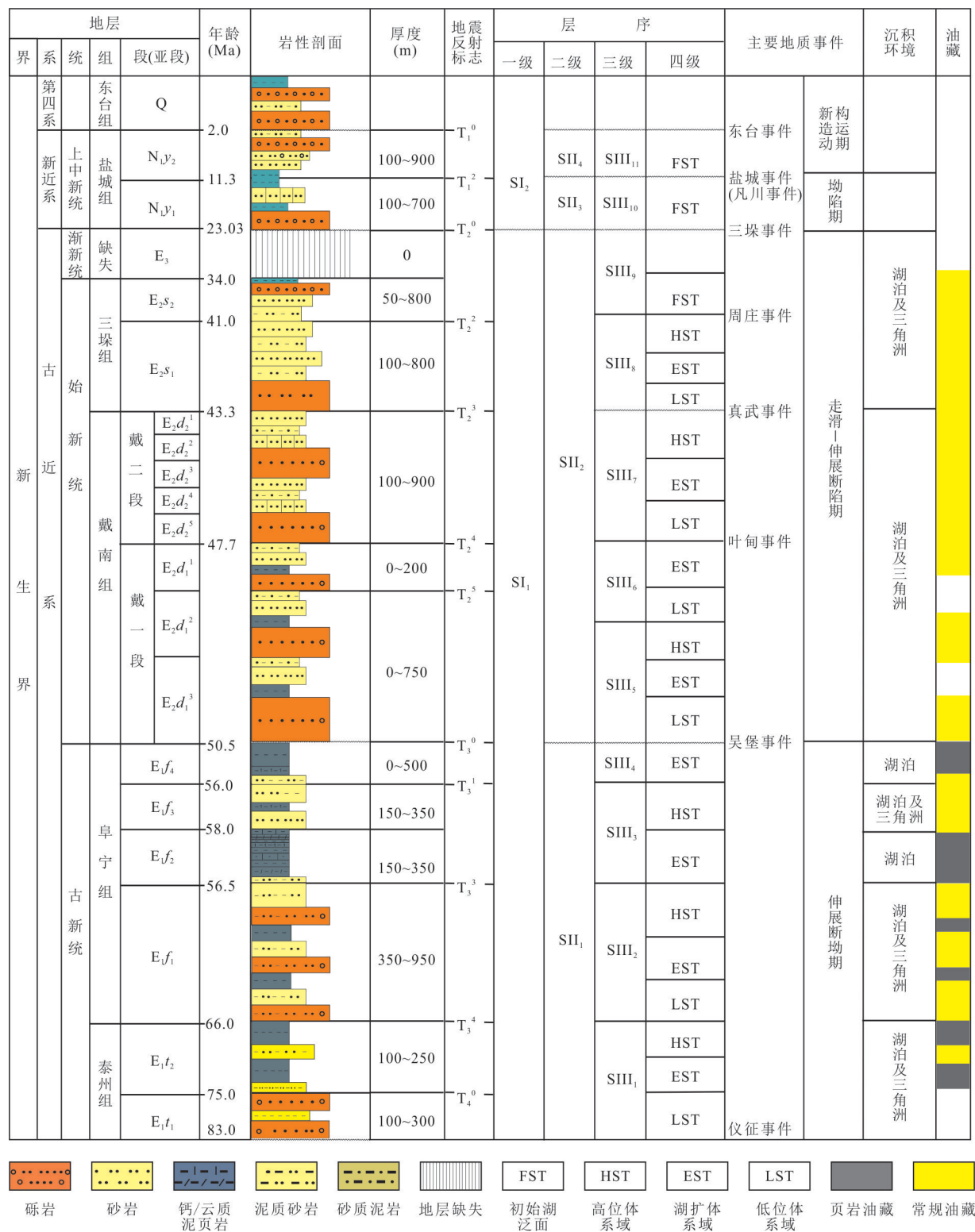


表 1 溱潼凹陷 QY1 井阜二段烃源岩热解地化参数统计

样品编号	深度(m)	小层	TOC(%)		有机质 类型	Ro(%)		S ₁ (mg/g)		S ₂ (mg/g)		OSI(mg·g ⁻¹ /TOC)	
			范围	平均值		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
			范围	平均值		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
QY1-1~QY1-4	3 680.53~3 702.24	E ₁ f ₂ -V-1	1.25~1.76	1.52	II ₁	0.87~0.95	0.91	0.91~1.55	1.21	3.72~5.21	4.65	69.41~88.06	79.26
QY1-5~QY1-9	3 705.85~3 738.90	E ₁ f ₂ -IV-1	1.98~2.82	2.35	II ₁	0.98	0.98	1.40~2.11	1.75	5.61~10.38	7.59	59.83~96.78	75.81
QY10-1~QY1-16	3 744.86~3 760.93	E ₁ f ₂ -III-2	0.60~2.89	1.73	II ₁	0.89~1.07	0.99	0.55~2.50	1.48	1.37~14.69	6.75	52.02~133.08	91.59
QY10-17~QY1-24	3 766.51~3 796.98	E ₁ f ₂ -III-1	0.27~2.60	1.22	II ₂	0.95	0.95	0.10~6.21	1.97	0.14~11.50	3.37	37.04~326.84	136.95
QY10-25~QY1-28	3 799.91~3 809.03	E ₁ f ₂ -II-8	0.95~1.86	1.30	II ₂	1.06~1.11	1.09	1.46~3.72	2.68	1.16~5.33	2.80	136.45~347.34	213.51
QY10-29~QY1-32	3 810.72~3 819.02	E ₁ f ₂ -II-7	0.69~1.60	1.16	II ₂	0.97	0.97	0.75~2.91	2.12	1.51~4.05	2.63	108.70~216.15	174.78
QY10-33~QY1-36	3 823.31~3 834.19	E ₁ f ₂ -II-6	1.11~1.56	1.43	II ₂	0.96~1.09	1.03	1.77~3.65	2.32	1.94~3.57	2.90	113.46~243.33	163.65
QY10-37~QY1-41	3 837.40~3 849.15	E ₁ f ₂ -II-5	0.93~1.76	1.28	III	1.07	1.07	1.76~3.61	2.67	0.85~4.75	2.33	120.55~269.44	215.81
QY10-42~QY1-44	3 852.95~3 860.13	E ₁ f ₂ -II-4	1.74~2.65	2.25	II ₁	1.00~1.01	1.01	1.38~6.63	3.56	4.97~10.57	8.28	58.47~250.19	154.04
QY10-45~QY1-49	3 864.69~3 874.99	E ₁ f ₂ -II-3	0.95~1.88	1.23	II ₂	1.01	1.01	1.92~4.03	2.82	1.20~4.20	2.20	202.11~266.10	230.16
QY10-50~QY1-53	3 880.74~3 891.65	E ₁ f ₂ -II-2	0.39~1.61	1.10	—	—	—	0.39~2.25	1.38	0.27~2.66	1.51	54.66~181.65	127.35
QY10-54~QY1-60	3 893.28~3 908.27	E ₁ f ₂ -II-1	0.32~1.35	0.69	III-II ₂	1.08~1.09	1.09	0.11~1.53	0.69	0.21~2.75	0.90	30.00~150.00	85.53
QY10-61~QY1-64	3 912.96~3 922.23	E ₁ f ₂ -I-10	0.21~0.74	0.42	III-II ₂	1.00~1.11	1.06	0.06~0.73	0.35	0.10~0.70	0.39	26.09~112.24	66.39
QY10-65~QY1-67	3 926.13~3 931.52	E ₁ f ₂ -I-9	0.34~0.60	0.50	II ₂	0.91	0.91	0.17~0.71	0.38	0.22~1.04	0.60	49.09~118.33	72.47
QY10-68~QY1-71	3 933.40~3 942.80	E ₁ f ₂ -I-8	0.52~1.11	0.77	III	0.94	0.94	0.91~2.35	1.56	0.41~1.66	1.07	175.00~236.84	201.11
QY10-72~QY1-77	3 946.33~3 962.04	E ₁ f ₂ -I-7	0.44~1.73	0.86	III-II ₂	1.00~1.24	1.12	0.47~2.20	1.06	0.39~5.15	1.58	106.82~155.17	124.27
QY10-78~QY1-82	3 965.31~3 974.71	E ₁ f ₂ -I-6	0.33~1.35	0.78	III	1.06	1.06	0.12~2.83	1.48	0.12~2.39	0.95	36.36~336.90	173.05
QY10-83~QY1-92	3 978.38~3 992.57	E ₁ f ₂ -I-5	0.76~1.86	1.25	II ₂	0.88	0.88	1.60~9.80	4.07	0.54~4.15	1.84	136.75~673.12	327.06
QY10-93~QY1-101	3 997.51~4 017.22	E ₁ f ₂ -I-4	0.75~1.73	1.34	II ₂	0.88~1.04	0.96	1.29~3.67	2.35	0.67~3.20	2.06	113.29~293.60	179.23
QY10-102~QY1-103	4 021.55~4 024.40	E ₁ f ₂ -I-3	1.15~1.23	1.19	—	—	—	1.62~1.90	1.76	1.43~2.21	1.82	131.71~165.22	148.47
QY10-104~QY1-106	4 028.07~4 033.53	E ₁ f ₂ -I-2	0.60~0.76	0.68	III	1.19	1.19	0.64~1.09	0.82	0.36~0.60	0.50	104.35~143.42	118.15

注:—为未检测;TOC为总有机碳含量;Ro为镜质体反射率;S₁为可溶烃含量;S₂为热解烃含量;OSI为含油饱和度指数。

对比,旨在为溱潼凹陷全油气系统油气分布序列的建立提供依据.

1 古气候驱动下的湖相烃源岩旋回性变化特征

根据孢粉、动物和植物化石组合以及煤层与蒸发岩的分布等研究,古新世—始新世,苏北盆地处于中国副热带高压控制的中部干旱带与潮湿带交替的古气候(Quan and Liu, 2012).古新世,溱潼凹陷进入强烈拉张沉降期,沉积了泰州组至阜宁组,为一套广湖、三角洲及河流相沉积,自下而上由早期湖扩(EEST)、晚期湖扩(LEST)和高位体系域(HST)构成,总体上经历了从干旱湖盆到潮湿湖盆,从滨浅湖盆、浅湖—半深湖盆、深水湖盆,到浅湖—半深湖盆,最后为冲积平原、浅湖的充填演化

过程,且烃源岩发育于拉张期湖扩体系域的半深湖—深湖相(图 2).

泰一段(E_{1t_1})由三个次级正旋回组成的水进式沉积组成,底部常见厚度不等的暗棕色砾岩或块状砂岩.泰二段(E_{1t_2})下部以深灰、灰黑色泥岩为主,中下部夹数层泥灰岩或灰质泥岩;泰二段上部以灰黑色泥岩为主,间夹暗棕红色泥岩,夹几层灰白色粉砂岩,为溱潼凹陷第一套烃源岩.

阜宁组具下红上黑、下粗上细的沉积特征,最大厚度可达 2 000 m 以上,一般在 1 200~1 600 m.自下而上分为 4 段:阜一段(E_{1f_1})以暗棕色砂、泥岩不等厚互层为特征,中下部夹较多的灰黑色泥岩,厚度 400~650 m,为溱潼凹陷第二套烃源岩;阜二段(E_{1f_2})为一套灰黑色泥岩夹薄层泥灰岩、油页岩夹鲕状灰岩,厚度 100~400 m,为溱潼凹陷第三套烃源岩,也是主力烃源岩;阜三段(E_{1f_3})纵向上可分

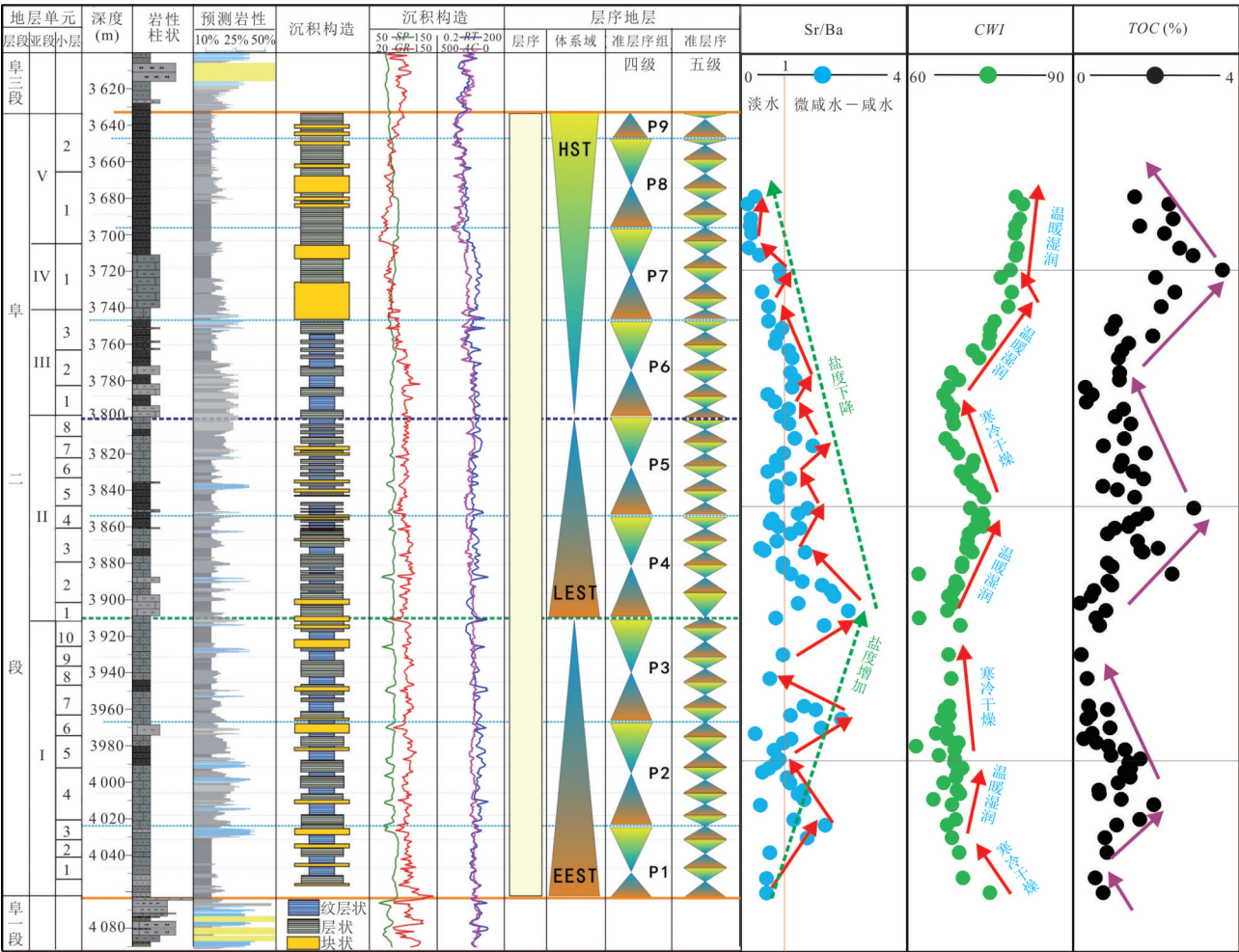


图 4 溱潼凹陷 QY1 井阜二段旋回性地层与有机/无机地化指标关系

Fig.4 The cyclic stratigraphic column and relative organic-inorganic geochemical of well QY1 in Qintong sag

化学风化指数 $CWI=[Al_2O_3/(Al_2O_3+Na_2O+K_2O)] \times 100$

上、下两个砂岩组,中间夹一组较稳定的泥岩段,厚度 250~340 m;阜四段(E_{f4})下部为灰、灰黑色泥页岩与泥岩互层,夹薄层砂岩,最厚可达 220 m,一般在 100~150 m;上部灰、灰黑色泥岩、页岩夹少量薄层泥灰岩、白云岩,分布稳定,凹陷中地层保存齐全,厚度一般为 0~250 m,为溱潼凹陷第四套烃源岩。

烃源岩发育受控于区域性古气候变化、降水强度、水介质条件和陆源物质供给以及沉积环境等多种因素的控制(咎灵等,2016)。咸化沉积环境发育高含硫的纹层状灰云质泥页岩烃源岩和碳酸盐/蒸发岩等(Quan and Liu, 2012;李志明等,2023)。

QY1 井 369 m 连续取心资料为进一步揭示烃源岩发育的控制因素和分布特征提供了十分有利条件(图 3)。高分辨旋回层序划分表明,QY1 井阜二段分为 5 个亚段: E_{f2} -I 为早期湖扩(EEST)体系域,可划分为 P1~P3 等 3 个四级准层序组和 10 个半五级准层序; E_{f2} -II 为晚期湖扩(LEST)体系域,可划分为 P4~P5 等 2 个四级准层序组和 7 个半五级准层序; E_{f2} -III+IV+V 构成高位体系域(HST),可划分为 P6~P9 等 4 个四级准层序组和 11 个半五级准层序。

化学风化指数(CWI)显示阜二段从 EEST→LEST→HST 总体上对应于寒冷干燥→温暖潮湿旋回性气候演变;由此导致古气候替代指标 Sr/Ba 比值指示的湖水盐度相应地(半)咸水→淡水演变, E_{f2} -II 底部达到咸化顶峰。同时,还可以看到盐度次级旋回性演变对应于 9 个四级准层序组,即每个次级旋回的初始湖扩对应于(半)咸化湖水,到湖扩顶峰(凝聚段)对应于淡化湖水(咎灵等,2021a)。

随着古气候由寒冷干燥和咸化湖水→温暖潮湿和淡化湖水演变,有机碳(TOC)总体上也是由低到高变化,即温暖潮湿的半深湖—深湖相淡水介质环境更有利于有机质的富集。表 1 给出 QY1 井阜二段各小层烃源岩热解地化参数及其统计结果表明,尽管除了古气候之外,TOC 还受到陆源物质补给和沉积环境的影响,但其旋回性变化与体系域层序旋回具有很好的响应关系,即 TOC 相对高值对应于体系域旋回的温暖潮湿和淡化介质最大湖泛面,相对低值对应于寒冷干燥和咸化介质初始湖泛面。

阜二段 E_{f2}^5 、 E_{f2}^4 烃源岩岩性以泥岩为主,沉积于弱氧化—弱还原的淡水环境,TOC 最高,平均值介于 1.52%~2.35%,主要以低等水生生物为主的

II₁型干酪根母质为主; E_{f2}^3 、 E_{f2}^2 烃源岩岩性以钙质泥页岩为主,TOC 较高,平均值介于 0.69%~2.25%,沉积于强还原的咸水与弱还原淡水交替的环境,以 II₂型为主、含少量 II₁型与 III 型干酪根母质; E_{f2}^1 烃源岩岩性主要为钙质页岩与钙质泥岩,TOC 低—中等,平均值介于 0.42%~1.34%,沉积于半咸水—咸水的还原环境,主要为 II₂型、部分为 III 型干酪根母质(表 1)。总体来看,QY1 井阜二段 TOC 与 CWI 指示的古气候演变和湖水盐度之间具有很好的旋回性响应关系(图 4)。

2 油源对比

2.1 实验方法

本研究收集了中石化华东油气公司烃源岩和原油 GC-MS 分析资料(表 2)用于岩—岩生标对。同时采集了溱潼凹陷 18 件原油样品在长江大学教育部重点实验室完成 GC-MS 芳基类异戊二烯烃(AIPs)检测(表 3)。具体步骤:(1)取~25 mg 原油,向原油中添加 10 mL 正己烷并超声 5 min,静置 12 h 后进行沥青质沉淀;(2)采用硅胶/氧化铝(3:2)柱色层分离法对其滤液进行族组分分离;(3)分别依次用正己烷、二氯甲烷/正己烷(1:2)及二氯甲烷/

表 2 溱页 1 井阜二段烃源岩 GC-MS 测试样品信息
Table 2 The GC-MS analysis sample information of source rocks for the second member of Funing Formation in well QY1

序号	样品编号	岩性	均深(m)	层位
1	QY1-8	泥岩	3 687.58	E_{f2} -V
2	QY1-18	泥岩	3 697.82	E_{f2} -V
3	QY1-18RE(重复样品)	泥岩	3 697.82	E_{f2} -V
4	QY1-39	灰质泥岩	3 717.80	E_{f2} -IV
5	QY1-49	灰质泥岩	2 727.28	E_{f2} -IV
6	QY1-61	含灰泥岩	3 738.98	E_{f2} -IV
7	QY1-61RE(重复样品)	含灰泥岩	3 738.98	E_{f2} -IV
8	QY1-67	灰云质泥岩	3 744.48	E_{f2} -III
9	QY1-98	灰云质泥岩	3 770.56	E_{f2} -III
10	QY1-117	灰云质泥岩	3 787.68	E_{f2} -II
11	QY1-142	纹层状泥灰岩	3 809.27	E_{f2} -II
12	QY1-213	灰云质泥岩	3 875.04	E_{f2} -II
13	QY1-268	含灰云泥岩	3 925.54	E_{f2} -I
14	QY1-280	灰云质泥岩	3 935.41	E_{f2} -I
15	QY1-301	灰云质泥岩	3 952.77	E_{f2} -I
16	QY1-409	含灰云泥岩	4 043.03	E_{f2} -I
17	QY1-422	含灰云泥岩	4 055.48	E_{f2} -I

甲醇(93:7)冲洗,分别得到饱和烃、芳烃和非烃组分;(4)采用色谱—质谱(GC-MS)联用仪对芳烃组分进行分析。

芳烃分析仪器条件:色谱柱为 HP-5MS (60 m×0.25 mm×0.25 μm),程序升温,初温为 50 ℃,恒温 1 min,然后以 20 ℃/min 升温至 120 ℃,再以 3 ℃/min 升温至 310 ℃,恒温 25 min.质谱部分:EI 离子源,电离电压为 70 ev.

上述分析的采集方式为选择离子扫描($m/z=133/134$),所用载气均为 99.999% 高纯 He(流速 1 mL/min)。

2.2 各亚段烃源岩岩—岩生标对比

溱页 1 井在垂向上连续取心为溱潼凹陷阜二段各亚段泥页岩的岩—岩对比研究提供了有利条件(表 2)。

前文述及,阜二段各亚段的生物标志物存在明显差异,各亚段泥页岩分子指纹图谱对比显示各亚

段的姥植比、伽马蜡烷含量、 Σ 三环萜烷/ Σ 五环三萜、 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 、 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 、 C_{27}/C_{29} 规则甾烷等指标存在明显变化.这些指标反映了岩石沉积期间古环境的差异,其本质上是气候驱动下湖泊演化在古生物群落上的响应,不同沉积环境下造成的指标差异为各亚段的岩—岩对比和油—岩对比提供了可用的参数.值得注意的是,溱页 1 井阜二段泥页岩的成熟度范围 R_o 主要在 0.9%~1.1% (表 1),各亚段的成熟度较为接近,成熟度仅在小范围内波动,因此,在对比参数的选择上不必考虑成熟度对某些生标参数的影响。

溱页 1 井阜二段泥页岩饱和烃总离子流图(图 5)表明, E_{1f_2} -V 的整体峰型比较完整,高碳数和低碳数正构烷烃基本呈正态分布,有比较明显的奇偶优势. E_{1f_2} -IV 的整体峰型不够完整,高碳数和低碳数正构烷烃分布波动较大,有较为明显的奇偶优势. E_{1f_2} -III 的整体峰型相对完整,低碳数正构烷烃含量相对

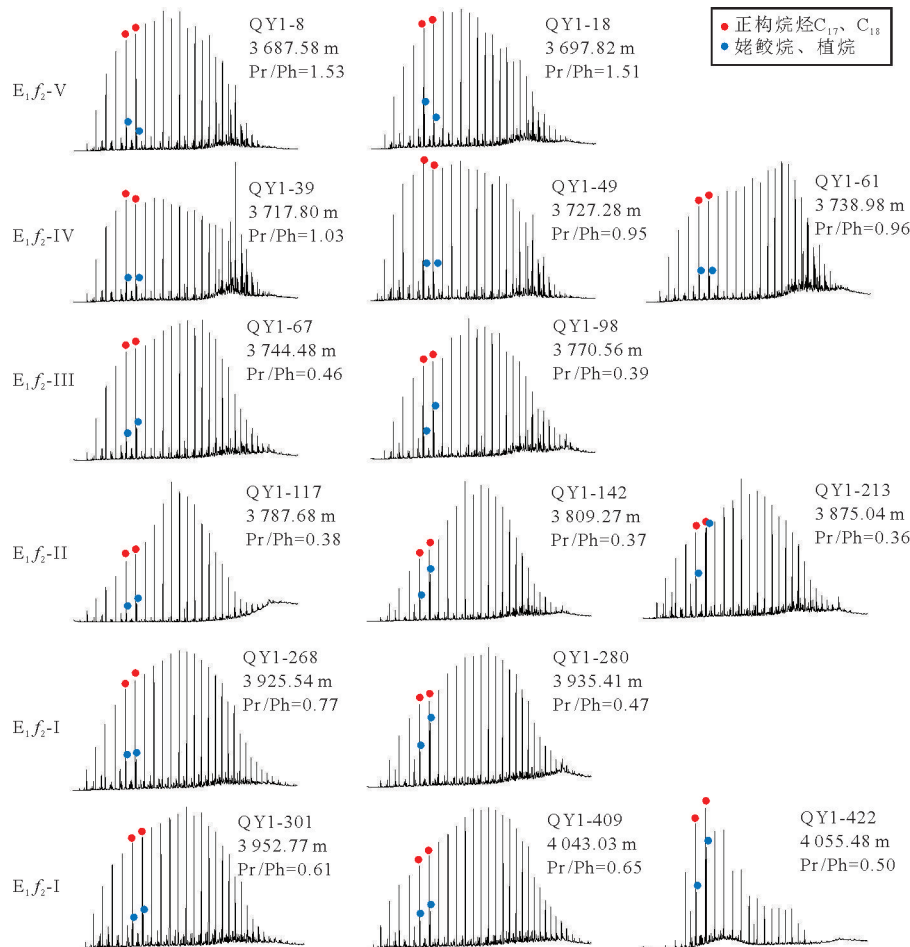


图 5 溱潼凹陷溱页 1 井阜二段泥页岩总离子流图(TIC)

Fig.5 The total ion current diagrams of mudstones and shales of the second member of Funing Formation in well QY1 in Qintong sag

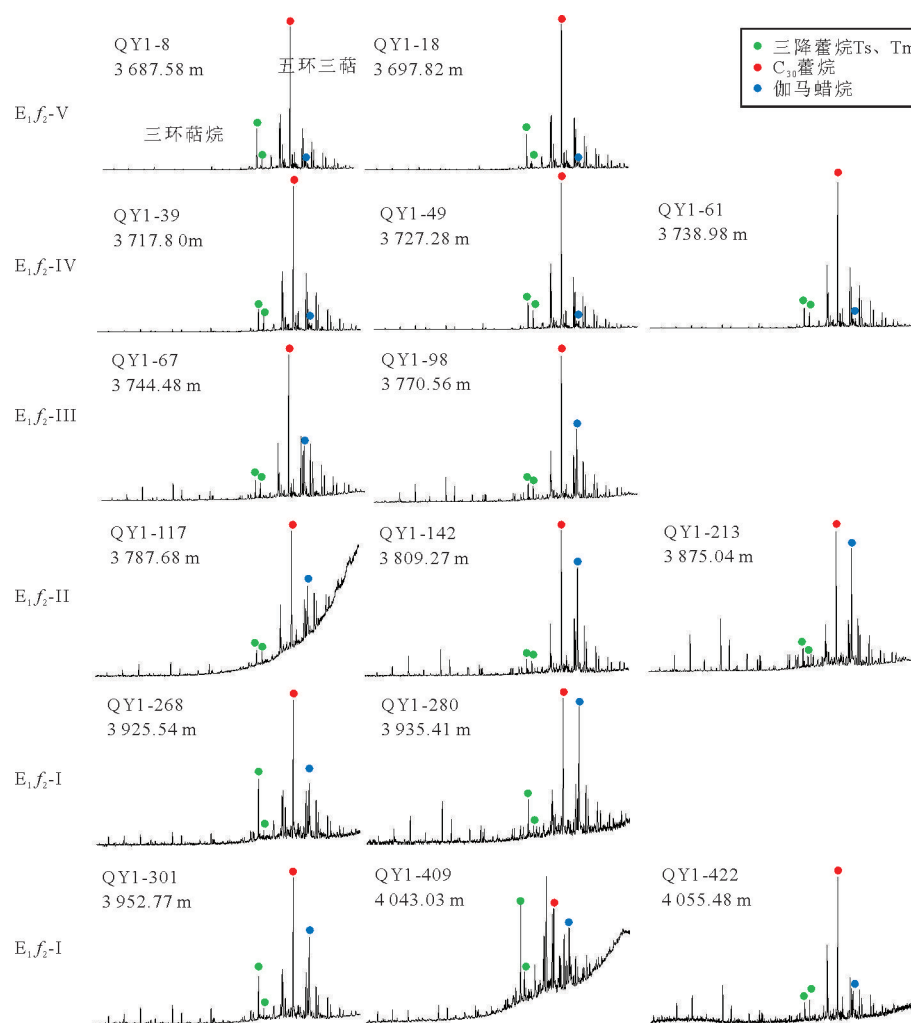
图 6 溱潼凹陷溱页 1 井阜二段泥页岩质量色谱图($m/z=191$)

Fig.6 The mass chromatograms ($m/z=191$) of mudstones and shales of the second member of Funing Formation in well QY1 in Qintong sag

前者略有降低,有轻微奇偶优势。 E_{1f_2} -II 的整体峰型明显不完整,低碳数正构烷烃含量明显偏低,奇偶优势不明显。 E_{1f_2} -I 的整体峰型比较完整,大多数样品显示碳数和低碳数正构烷烃基本呈正态分布,奇偶优势不明显。

姥植比(Pr/Ph)显示, E_{1f_2} -V 亚段的姥植比大于 1, E_{1f_2} -IV 接近 1, E_{1f_2} -III、 E_{1f_2} -II 和 E_{1f_2} -I 的姥植比明显小于 1,其中 E_{1f_2} -II (包括邻近 E_{1f_2} -II 的 E_{1f_2} -I 和 E_{1f_2} -III)样品的姥植比明显更低,反映了 E_{1f_2} -II 古水体还原性更强的特征(图 5)。

溱页 1 井阜二段泥页岩 GI 值、三环萘烷/五环三萘烷以及 Ts/Tm 在垂向上呈现了规律性的变化(图 6)。例如,伽马蜡烷在 E_{1f_2} -V 和 E_{1f_2} -IV 含量极低,而在 E_{1f_2} -III、 E_{1f_2} -II 和 E_{1f_2} -I 明显变高,且在 E_{1f_2} -II 及其附近达到很高的值,三环萘烷/五环三萘烷也

存在类似特征,在 E_{1f_2} -V ~ E_{1f_2} -IV 比值明显小于 E_{1f_2} -III ~ E_{1f_2} -I, Ts/Tm 在 E_{1f_2} -IV、 E_{1f_2} -III、 E_{1f_2} -II 比较接近 1.0,在 E_{1f_2} -V 和 E_{1f_2} -I 明显远大于 1.0。这意味着阜二段沉积时古环境曾发生了明显的转变,这个转化界面很可能在 E_{1f_2} -IV、 E_{1f_2} -III 之间和 E_{1f_2} -II、 E_{1f_2} -I 之间。

溱页 1 井阜二段从下到上泥页岩的 C_{27}/C_{29} 规则甾烷比值经历了从较大(E_{1f_2} -II、 E_{1f_2} -I,反“L”型)→大(E_{1f_2} -IV、 E_{1f_2} -III,明显反“L”型)→偏小的过程(E_{1f_2} -V,“V”型)的过程(图 7)。甾烷异构化参数显示深度越大,成熟度越高。由此表明,溱潼凹陷阜二段泥页岩沉积环境变化趋势为:陆源输入先略微增强后减弱,陆源水体先咸化后淡化,先还原后氧化的演化过程(图 8)。

本研究发现,阜二段泥页岩的咸化一半咸化层

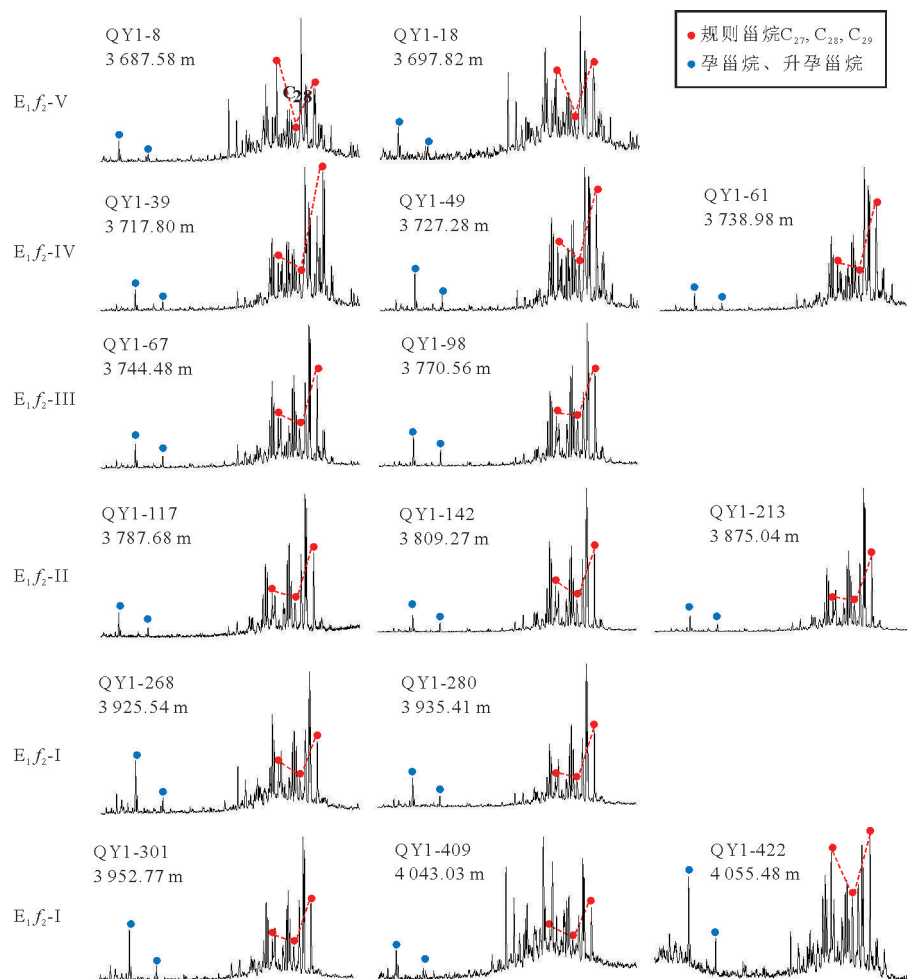
图7 溱潼凹陷溱页1井阜二段泥页岩质量色谱图($m/z=217$)

Fig.7 The mass chromatograms ($m/z=217$) of mudstones and shales of the second member of Funing Formation in well QY1 in Qintong sag

段(E_{1f_2} -I ~ E_{1f_2} -III)中 β -胡萝卜素、伽马蜡烷的丰度与2,3,6-芳基类异戊二烯能否检出有很好的相关性,即溱页1井阜二段泥页岩中的 E_{1f_2} -IV、 E_{1f_2} -V和 E_{1f_2} -I底部样品中的 β -胡萝卜素和伽马蜡烷丰度低且检测不到芳基类异戊二烯;而在 E_{1f_2} -II、 E_{1f_2} -III以及 E_{1f_2} -I中上部具有较高的 β -胡萝卜素和伽马蜡烷丰度,且能够检测到2,3,6-芳基类异戊二烯系列生物标志化合物(图9)。

2.3 芳基类异戊二烯生标油源对比

溱潼凹陷页岩油的勘探开发,极大地推动了油源对比研究。溱潼凹陷的原油可划分为超重油、重质油、中质油3类。平面上,相同层系的原油从深凹带向外斜坡带物性逐渐变差、成熟度降低,含硫量增加。纵向上,从深层向浅层原油物性逐渐变差(咎灵等,2021a)。阜二段页岩油三环萜烷、 β -胡萝卜素、伽马蜡烷含量高, $\alpha\alpha\alpha$ - C_{29} 甾烷(20R)含量高于 $\alpha\alpha\alpha$ -

C_{27} 甾烷(20R),形成于咸水还原环境,与阜二段I亚段(E_{1f_2} -I)泥页岩生物标志化合物特征一致(咎灵等,2021b,2023)。然而,正如前文所述,溱潼凹陷阜二段烃源岩具有与五级准层序相对应的旋回性变化特征,不同组、同一组不同亚段和不同岩性烃源岩地球化学特征及形成环境具有明显的差异性。根据Pr/Ph、Ga/ $C_{30}H$ 、 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 以及 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}$ 甾烷/ $\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ 甾烷等参数的分布特征可以把阜二段 $E_{1f_2}^4+E_{1f_2}^5$ 、 $E_{1f_2}^2+E_{1f_2}^3$ 和 $E_{1f_2}^1$ 三类不同岩性的烃源岩区分开来(李志鹏等,2023),其本质上是反映水介质咸化和淡化对生标的影响,但没有体现透光带+静水+硫化+咸化+强还原环境的生标特征。

芳基类异戊二烯系列化合物不仅在许多原油和/或烃源岩中检测到(孙永革等,2004;霍秋立等,2010;吕超等,2015;张冬琳等,2020),而且作为生物标志化合物具有指示高含碳酸盐—硫酸盐的强

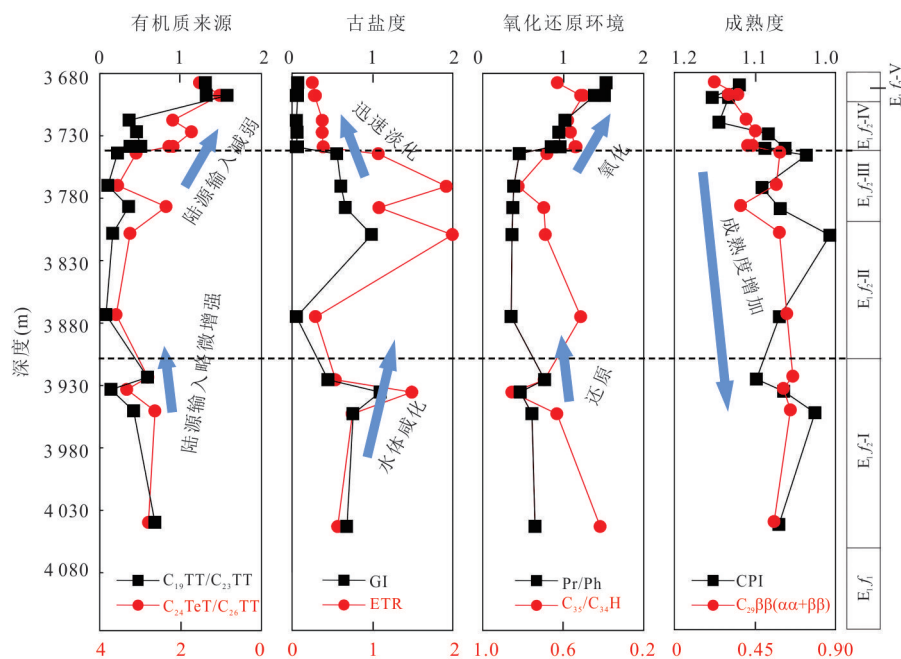


图8 溱潼凹陷溱页1井阜二段泥页岩分子地球化学特征剖面

Fig.8 The molecular geochemical characteristic profile of mudstones and shales of the second member of Funing Formation in well QY1 in Qintong sag

TT.三环萜, $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 四环萜, GI.伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷; $ETR = C_{28}TT / (C_{28}TT + C_{29}TT)$; $C_{35}/C_{34}H: C_{35}/C_{34}$.升藿烷比值, CPI.碳优势指数 = $\Sigma(\text{奇数碳正构烷烃}) / \Sigma(\text{偶数碳正构烷烃})$

还原沉积环境(于心科等,1990;李振西等,1998;张春明和杨禄,2013)。

静水、厌氧、硫化和强还原环境的透光带依次是紫硫细菌→绿硫细菌→棕硫细菌发生光合作用和生长繁殖区域。其中,紫硫细菌主要生活水深在2~16 m,一般在6 m之上;绿硫细菌主要生活在1.5~24.0 m,一般在12 m之上,两者生活水深是存在一定的重叠空间的,只不过绿硫细菌对水体要求更严苛(水体偏浅);棕硫菌生活水深可达80 m,且能产生异海绵烷(张春明和杨禄,2013)。生活在水体偏浅的硫化透光带水柱中的紫硫细菌主要产生2,3,4-芳基类异戊二烯系列生物标志化合物;而生活在硫化透光带水柱偏深的绿硫细菌和棕硫细菌主要产生2,3,6-芳基类异戊二烯系列生物标志化合物(Brocks and Schaeffer, 2008; 马健等, 2020)。这些具有生源意义的芳基类异戊二烯化合物生标不仅具有较高的抗生物降解能力、较强的抗热蚀变和抗TSR改造的能力(He *et al.*, 2022; 李梦勤等, 2025),而且其构型的差异性为比较“同时异相”油源精细对比提供了可能。

基于来自于紫硫细菌的2,3,4-芳基类异戊二烯(2,3,4-AIPs)和源自紫硫细菌以及棕硫细菌的

2,3,6-芳基类异戊二烯化合物(2,3,6-AIPs)作为指示透光带+静水+硫化+咸化+强还原环境烃源独特生标,以是否检测到2,3,4-AIPs和2,3,6-AIPs与否为判识标准,并构造出两个参数:

$$F_1 = \Sigma(C_{13} \sim C_{17}) \text{AIPs} / \Sigma(C_{18} \sim C_{22}) \text{AIPs}, \quad (1)$$

$$F_2 = \Sigma 2,3,6\text{-AIPs} / (\Sigma 2,3,6\text{-AIPs} + \Sigma 2,3,4\text{-AIPs}), \quad (2)$$

来指示其烃源岩生境演化的差异性。当 $F_1 < 3.0$ 时,代表持久静止水体硫化厌氧+透光带环境,且 F_1 越小,指示着更强的硫化厌氧+透光带环境;而 $F_1 > 3.0$ 时,表明水体具有间歇性硫化厌氧+透光带环境出现(Schwark and Frimmel, 2004)。 F_2 越大,表明烃源岩形成时期透光、厌氧、强还原和硫化的生境水柱更深,据此可进行这类“同时异相”烃源比较(Júnior *et al.*, 2013)。

本研究采集了溱潼凹陷18件页岩油和常规原油样品,在长江大学教育部重点实验室完成原油芳基类异戊二烯烃分析(表3、图10和图11)。

通过对检测到芳基类异戊二烯烃油样 $m/z=133$ 和 $m/z=134$ 的GC-MS图谱中 $C_{13} \sim C_{23}$ 芳基类异戊二烯化合物的2,3,6-AIPs和2,3,4-AIPs分别进行面积积分,从而获得这两种构型的相关参数相

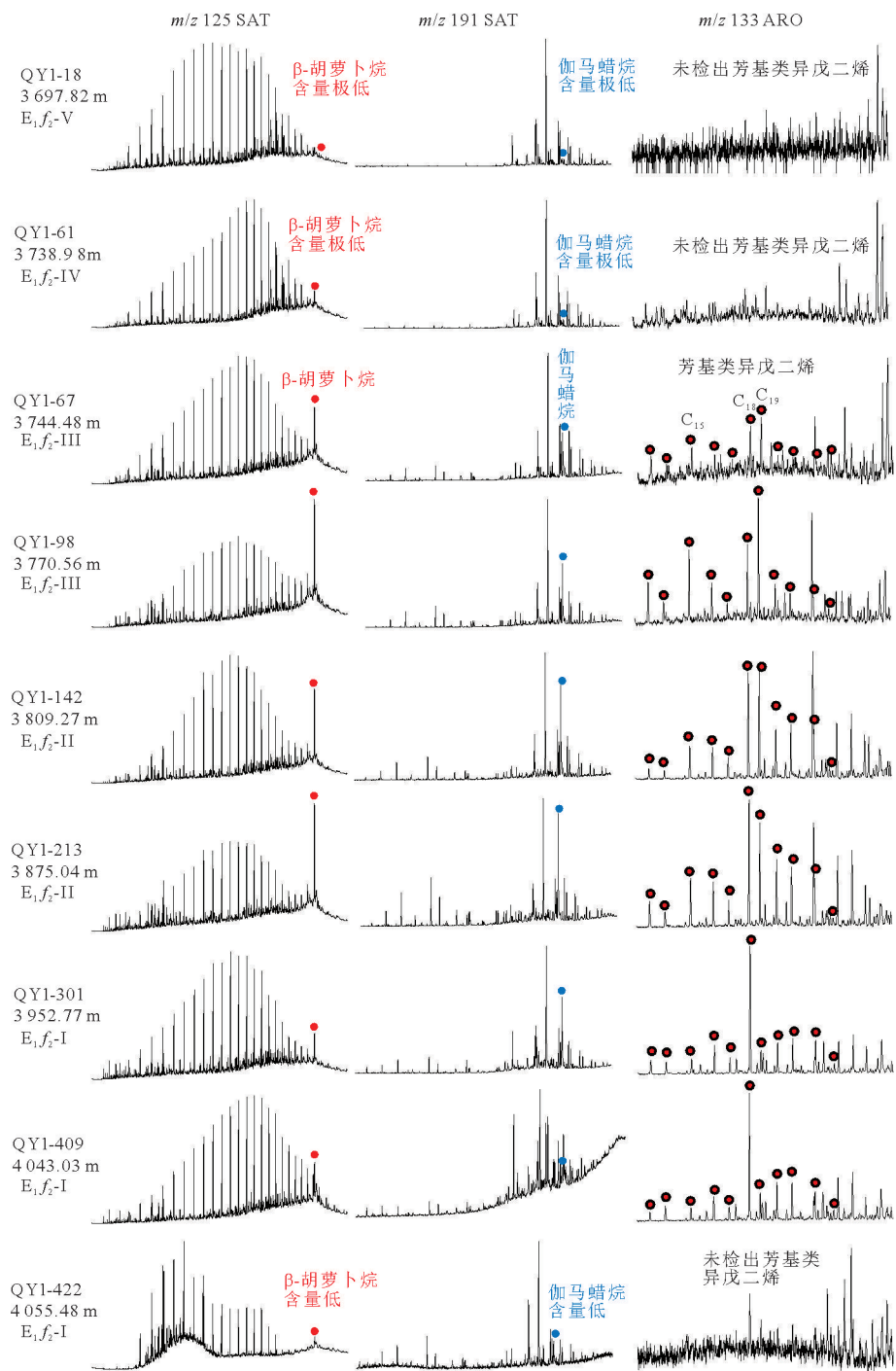


图9 溱页1井泥页岩中β-胡萝卜素、伽马蜡烷和芳基类异戊二烯发育的相关性

Fig.9 The relationship among β-daucanes, gammaceranes and aryl isoprenoids of mudstones and shales of the second member of Funing Formation of well QY1 in Qintong sag

对含量(未进行定量标定)(表2): $C_1=\sum 2,3,4\text{-AIPs}$,为2,3,4-AIPs之和; $C_2=\sum 2,3,6\text{-AIPs}$ 之和; F_1 为AIPs比值,如公式(1)所定义; F_2 表示2,3,6-AIPs在2,3,6-AIPs和2,3,4-AIPs两种构型芳基类异戊二烯烃化合物中的相对百分比. F_2 越大,表明烃源岩形成时期透光、厌氧、强还原和硫化的生境水

柱更深,据此可进行“同时异相”烃源比较(张春明和杨禄,2013).
由此可见,溱页1井($E_{f_2}\text{-I}$)页岩油和陈8-18井(E_{f_3})、红101井(E_{s_2})常规原油均未检测到芳基类异戊二烯烃(表3),表明二者可能同源,且来自于 $E_{f_2}\text{-I}$ 非硫化的淡水环境沉积的烃源岩.而其余15

表 3 溱潼凹陷页岩油和常规原油芳基类异戊二烯化合物参数

Table 3 The parameters of aryl isoprenoid of shale oils and conventional crude oils in Qintong sag

样品 编号	油藏 类型	井号	层位	深度(m)	是否检测 到 AIPs	F_1	F_2
QY1-103X	深凹带页岩油	溱页 1	E_{if_2} -I	5 230.8~5 272.5	×	—	—
QY2HFFC	深凹带页岩油	溱页 2HF	E_{if_2} -II	5 403~5 420.5	✓	1.58	77.94
LY1-1	深凹带页岩油	鲁页 1-1	E_{if_2} -I	4 024~4 085.8	✓	1.49	89.33
SY3-7	深凹带页岩油	帅页 3-7	E_{if_2} -I	3 771~5 118	✓	1.14	89.05
H201X	深凹带页岩油	红 201 斜	E_{if_2} -I ~ II	4 182~4 218	✓	1.78	86.71
SD201X	深凹带页岩油 (侵入岩蚀变)	沙垛 201 斜	E_{if_2} -I ~ III	3 374~3 686.8	✓	0.78	95.11
J2-2-5	西斜坡常规油藏	吉 2-2-5	E_{if_3}	1 505.1~1 666.4	✓	0.87	91.23
NH2-24	西斜坡常规油藏	南华 2-24	E_{if_3}	1 732.8~1 745.6	✓	0.84	90.61
C8-18	西斜坡常规油藏	陈 8-18	E_{if_3}	1 693.8~1 695.4	×	—	—
S1-16	内斜坡常规油藏	帅 1-16	E_{2d_1}	2 599.3~2 663.3	✓	0.89	95.8
Z1-10	深凹带常规油藏	赵 1-10	E_{2d_1}	2 754.3~2 757.6	✓	1.20	95.3
Cang1	西斜坡常规油藏	仓 1	E_{if_3}	2 210.6~2 310	✓	0.85	97.1
Zhu1	断阶带常规油藏	祝 1	E_{if_3}	2 698~2 703	✓	0.68	94.8
CZ1	断阶带常规油藏	草中 1	E_{if_3}	3 087.4~3 132	✓	0.63	95.5
H1	断阶带常规油藏	红 1	E_{2s_1}	2 137.3~2 303.6	✓	0.80	92.3
H101	断阶带常规油藏	红 101	E_{2s_2}	1 845.3~1 859.6	×	—	—
XB2	北斜坡常规油藏	兴北 2	E_{if_3}	2 378.2~2 391.4	✓	0.86	93.2
G1-2	北斜坡常规油藏	广 1-2	E_{if_3}	2 111~2 176	✓	0.83	93.5

注:“✓”表示检测到 AIPs;“×”表示未检测到 AIPs.

口井无论是页岩油、还是常规原油均检测到芳基类异戊二烯烃(表 3). 鉴于溱页 2HF(E_{if_2} -II)、鲁页 1-1(E_{if_2} -I)、帅页 3-7(E_{if_2} -I)、红 201 斜(E_{if_2} -I ~ II)和沙垛 201 斜(E_{if_2} -I ~ III)均为页岩油且检测到芳基类异戊二烯烃,说明这些井的烃源岩形成透光带+静水+硫化+咸化+强还原的沉积环境. 因为通常认为页岩油即使发生了微运移,也是源内生成(郭旭升等,2023,2025),其生标反映的是其本身烃源岩特征. 正如前文所述, E_{if_2} -II ~ III 总体上出现咸化和硫化性旋回性增强,其烃源岩生成的原油中检测到芳基类异戊二烯烃是情理之中的. 但部分 E_{if_2} -I 中的页岩油也检测到此生标,而溱页 1 井(E_{if_2} -I)页岩油检测不到,说明 E_{if_2} -I 存在“同时异相”.

从 AIPs 比值分布特征(图 11、表 3)来看,其值均小于 3.0,充分证明了阜二段烃源岩发育于持久静止硫化厌氧透光带环境. 相比而言,西斜坡和内斜坡常规油的 AIPs 比值(F_1 =0.84~0.89)低于深凹的页岩油(F_1 =1.14~1.78);同时,西斜坡和内斜坡常规油来源于绿硫细菌和棕硫细菌的 2,3,6-AIPs 占比(F_2 =91.23%~95.80%)却高于深凹的页岩油(F_2 =77.94%~89.33%). 这充分表明西斜坡和内斜

坡常规油来自于沉积环境水体硫化性更强、更深的烃源岩.

但沙垛 201 斜井 E_{if_2} -I ~ III 页岩油例外, F_1 =0.78,为最小值; F_2 =95.11%,具有西斜坡和内斜坡常规油相似的特征. 这是否意味着其来源于水体更硫化、更深的烃源岩,还是受到侵入岩蚀变或穿层运移的影响有待于下一步更多样品的分析结果加以落实.

位于深凹带的赵 1-10 井戴南组常规油的 F_1 =1.20, F_2 =95.30%,表现出常规油与页岩油之间的特征,表明其烃源岩沉积于硫化强度有所减弱,但水体相对较深的环境.

溱页 1 井(E_{if_2} -I)页岩油和陈 8-18 井(E_{if_3})常规油未检测任何芳基类异戊二烯烃化合物,表明其烃源岩应该最大湖扩面凝聚段淡水、非硫化的泥质烃源岩.

在火山活动的沉积盆地中,伴随着湖水盐度的增加,硫化强度也是增加的. 由此可见,溱潼凹陷阜宁组二段发育 4 种类型的烃源岩(图 12):

I. 水体较浅、硫化较弱咸化环境的烃源岩,如,溱页 2HF 井(E_{if_2} -II);

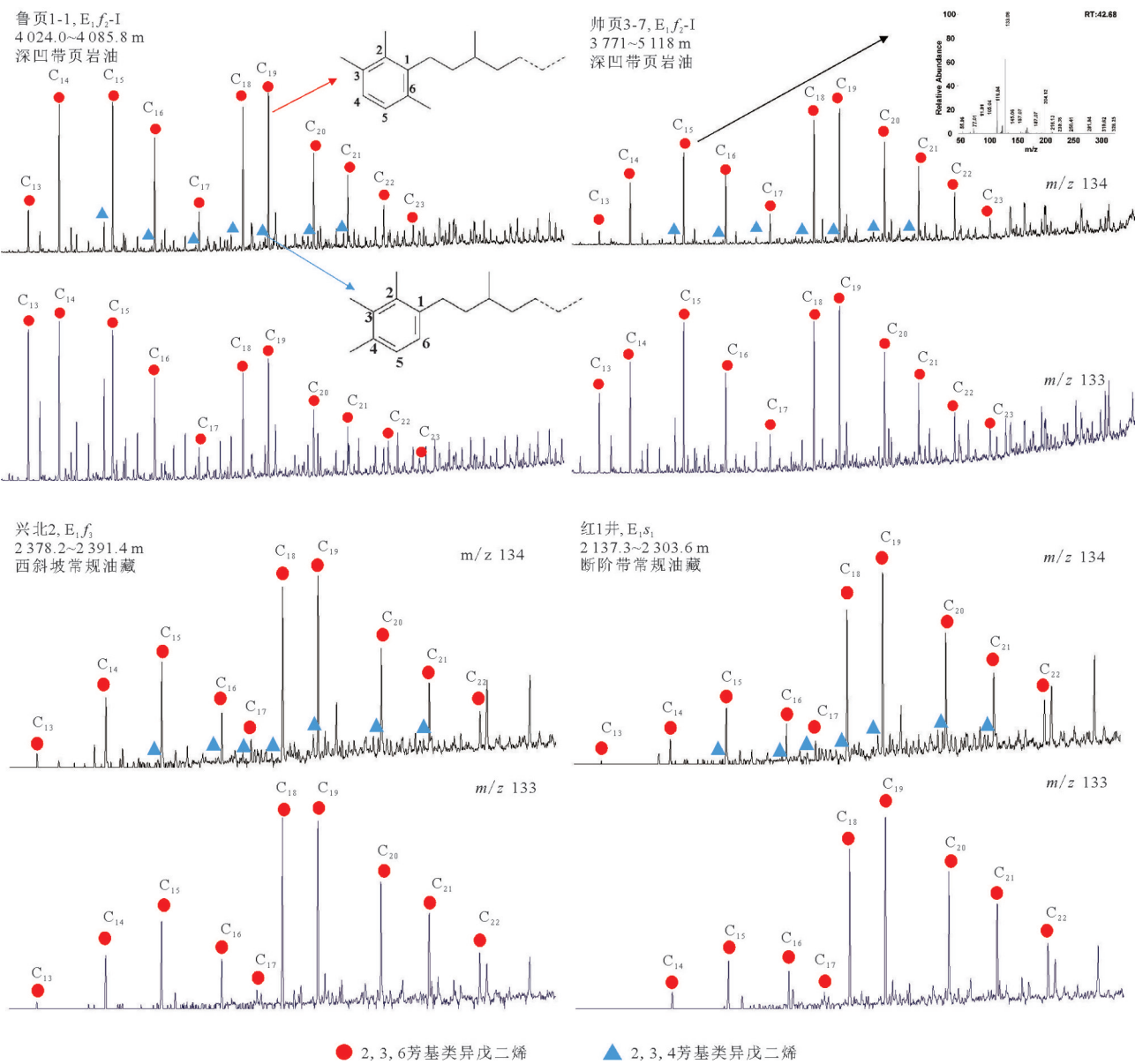


图 10 漆潼凹陷页岩油和常规原油检测到芳基类异戊二烯烃 GC-MS 图谱

Fig.10 The GC-MS spectra of detected aryl isoprenoids of shale oils and conventional crude oils in Qintong sag

II. 水体较深、硫化中等咸化环境的烃源岩,如,鲁页 1-1 井(E_{f_2} -I)、帅页 3-7 井(E_{f_2} -I)和红 201 斜井(E_{f_2} -I ~ II);

III. 水体最深、硫化最强咸化环境的烃源岩,譬如,沙埭 201 斜井(E_{f_2} -I ~ III);

IV. 非硫化+淡水环境的烃源岩(检测不到芳基类异戊二烯化合物)(表 3),譬如,漆页 1 井(E_{f_2} -I). 由此不仅证明了阜二段存在“同时异相”烃源岩,而且还表明西斜坡和内斜坡常规油更倾向来源于水体最深、硫化最强的烃源岩(类似于沙埭 201 斜井).

从未检测到芳基类异戊二烯的红 101 井原油的生标来看,其 Pr/Ph 为 0.31,伽马蜡烷含量 GI 为 29.3, $C_{(19+20)}TT/C_{23}TT$ 为 2.75、 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 为 1.51, β -胡萝卜素/ nC_{17} 仅为 0.3. 反映了一定程度的还原、咸化水体,但与高 β -胡萝卜素含量的阜二段中下段硫化透光带环境明显不同. 结合芳烃中菲系列化合物参数甲基菲指数 MPI1 和 MPI2 计算其等效 R_o . 结果分别为 0.66% 和 0.69%, 表明其成熟度较低, 推测该原油可能来自 E_{f_2} -IV 非硫化+淡水环境的烃源岩.

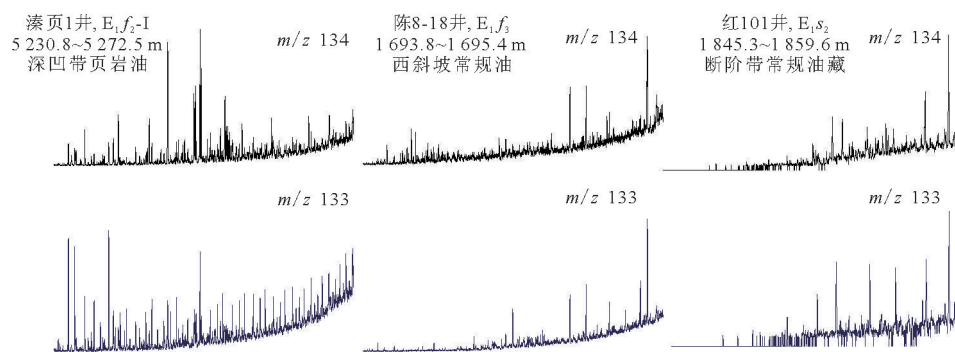
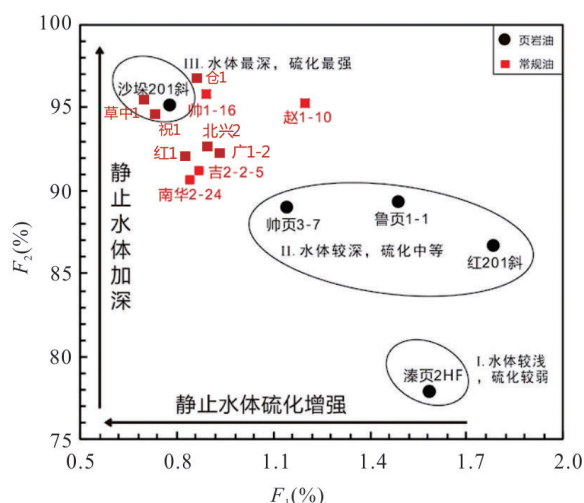


图 11 溱潼凹陷页岩油和常规原油未检测到芳基类异戊二烯烃 GC-MS 图谱

Fig.11 The GC-MS spectrums of undetected aryl isoprenoids of shale oils and conventional crude oils in Qintong sag

图 12 溱潼凹陷页岩油和常规油 F_1 与 F_2 关系Fig.12 The plot of F_1 vs. F_2 of shale oils and conventional oils in Qintong sag

3 结论

(1) 在古气候由寒冷干燥→温暖潮湿周期性演变驱动下,溱潼凹陷古新世阜宁组二段发育早期湖扩→晚期湖扩→高位体系域低频旋回,可划分为9个四级准层序组和32.5个五级准层序高频旋回;总体上呈现着寒冷干旱→温暖潮湿、(半)咸化→淡水演变趋势,并控制着有机质的富集和烃源岩的发育与分布。

(2) 有机/无机指标对比揭示了阜宁组二段温暖潮湿的半深湖—深湖相淡水介质环境更有利于有机质的富集;尽管除了古气候之外,TOC还受到陆源物质补给和沉积环境的影响,但其旋回性变化与体系域层序旋回具有很好的响应关系,即 TOC 相对高值对应于体系域旋回的温暖潮湿和淡化介质最大湖泛面,相对低值对应于寒冷干燥和咸化介质

初始湖泛面。

(3) 传统地化生标主要反映湖水咸化和还原性生境,而芳基类异戊二烯烃生标指示了透光带硫化和还原性,从而弥补了湖相全油气系统油源对比的不足。本文运用页岩油和常规原油芳基类异戊二烯烃生标油源对比,认为溱潼凹陷阜二段存在4种类型的烃源岩,并具有“同时异相”特征。

References

- Brocks, J. J., Schaeffer, P., 2008. Okenane, a Biomarker for Purple Sulfur Bacteria (Chromatiaceae), and Other New Carotenoid Derivatives from the 1 640 Ma Barney Creek Formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(5): 1396—1414. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.12.006>
- Chen, H. H., 2023. Advances on Relationship between Strike-Slip Structures and Hydrocarbon Accumulations in Large Superimposed Craton Basins, China. *Earth Science*, 48(6): 2039—2066(in Chinese with English abstract).
- Fang, C. H., Zhang, Z. H., Wang, Y. F., et al., 2008. Geochemical Characteristics of the Lower Tertiary Source Rock in Qintong Sag, Subei Basin. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 23(6): 1—5, 117(in Chinese with English abstract).
- Gao, Y. Q., He, X. P., Cheng, X., et al., 2024. Discussion on High Hydrocarbon Generation Efficiency of Saline Lacustrine Source Rocks with Low TOC: A Case Study of the Second Member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 14(5): 678—687(in Chinese with English abstract).
- Guo, X. S., Li, W. P., Shen, B. J., et al., 2025. Selection Evaluation of Oil Shale In-Situ Mining in China Petrochemical Exploration Area and Its Adjacent Areas. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 15(1): 1—10(in Chinese with English abstract).

- nese with English abstract).
- Guo, X.S., Ma, X.X., Li, M.W., et al., 2023. Mechanisms for Lacustrine Shale Oil Enrichment in Chinese Sedimentary Basins. *Oil & Gas Geology*, 44(6): 1333–1349 (in Chinese with English abstract).
- He, T.H., Li, W.H., Lu, S.F., et al., 2022. Distribution and Isotopic Signature of 2-Alkyl-1,3,4-Trimethylbenzenes in the Lower Paleozoic Source Rocks and Oils of Tarim Basin: Implications for the Oil-Source Correlation. *Petroleum Science*, 19(6): 2572–2582. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.07.014>
- Hu, Y., Zhang, Z.H., Fang, C.H., 2005. Biomarker Features of Low-Mature Oil in Qintong Sag and Maturity Analysis. *Oil & Gas Geology*, 26(4): 512–517 (in Chinese with English abstract).
- Huo, Q.L., Li, Z.G., Zeng, H.S., et al., 2010. Aryl Isoprenoids Found in Late Cretaceous Qn1 Source Rocks in Songliao Basin and Its Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(4): 815–820 (in Chinese with English abstract).
- Júnior, G.R.S., Santos, A.L.S., de Lima S.G., et al., 2013. Evidence for Euphotic Zone Anoxia during the Deposition of Aptian Source Rocks Based on Aryl Isoprenoids in Petroleum, Sergipe-Alagoas Basin, Northeastern Brazil. *Organic Geochemistry*, 63: 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2013.07.009>
- Li, M.Q., Yao, C., Chen, F.F., et al., 2025. Biomarker Classifications of Lower Paleozoic Deep Source Rocks and Crude Oils from the Tarim Basin and Oil Sources. *Natural Gas Geoscience*, 36(1): 166–182 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.X., Fan, P., Li, J.G., et al., 1998. An Application of Aryl Isoprenoids in Indicating Sedimentary Environments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(2): 9–13 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.M., Liu, Y.H., He, J.Y., et al., 2023. Limits of Critical Parameters for Sweet-Spot Interval Evaluation of Lacustrine Shale Oil. *Oil & Gas Geology*, 44(6): 1453–1467 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.P., Yu, Q.L., Zan, L., et al., 2023. Geochemical Characteristics and Hydrocarbon Generation Potential of Different Lithologic Source Rocks in the Second Member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin. *Geoscience*, 37(5): 1345–1357 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H.S., Qin, L.M., Liu, J., et al., 2009. Petroleum Migration and Accumulation in Qintong Sag, North Jiangsu Basin. *Geological Review*, 55(3): 395–405 (in Chinese with English abstract).
- Lyu, C., Zhang, C.M., Wu, Y.F., 2015. Qualitative Analysis of Trimethylaryl Isoprenoids Using GC-MS Combined with Retention Indices. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 12(5): 15–18, 27 (in Chinese with English abstract).
- Ma, J., Wu, C.D., Wang, Y.Z., et al., 2020. Discovery of Carotenoids and Its Paleolake Significance in the Oligocene Anjihaihe Formation, Southern Junggar Basin, China. *Acta Geologica Sinica*, 94(6): 1853–1868 (in Chinese with English abstract).
- Quan, C., Liu, Y.S., Utescher, T., 2012. Eocene Monsoon Prevalence over China: A Paleobotanical Perspective. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 365: 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.09.035>.
- Schwark, L., Frimmel, A., 2004. Chemostratigraphy of the Posidonia Black Shale, SW-Germany II. Assessment of Extent and Persistence of Photic-Zone Anoxia Using Aryl Isoprenoid Distributions. *Chemical Geology*, 206(3–4): 231–248. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.12.008>
- Song, Y., Jia, C.Z., Jiang, L., et al., 2024. Connotation and Research Strategy of the Whole Petroleum System. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y.G., Xiao, Z.Y., Xu, S.P., et al., 2004. Aryl-Isoprenoids in Crude Oil and Its Implication in Geological Exploration. *Xinjiang Petroleum Geology*, 25(2): 215–218 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Q., Yu, W.D., Luo, W.F., et al., 2016. Achievements and Recognitions of Exploration in Lithologic Reservoirs in Qintong Sag, North Jiangsu Basin. *China Petroleum Exploration*, 21(3): 99–107 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.C., Zhang, Z.H., Fang, C.H., et al., 2006. Feature of Crude Oil Triaromatic Steroid and Oil Correlation in Qintong Sag of Subei Basin. *Memoir of the Fourth International Conference of Hydrocarbon Reservoiring Mechanism and Reserve Evaluation*, 26(3): 531–539 (in Chinese).
- Yao, H.S., Yun, L., Zan, L., et al., 2023. Development Mode and Practice of Fault-Block Oriented Shale Oil Well in the Second Member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 13(2): 141–151 (in Chinese with English abstract).
- Yao, H.S., Zan, L., Gao, Y.Q., et al., 2021. Main Controlling

- Factors for the Enrichment of Shale Oil and Significant Discovery in Second Member of Paleogene Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 43(5):776—783(in Chinese with English abstract).
- Yu, X.K., Fan, P., 1990. Discovery of New Biomarker Compounds of South Florid Basin in America. *Science in China (Series B)*, (5):539—544(in Chinese with English abstract).
- Yun, L., He, X.P., Hua, C.X., et al., 2023. Accumulation Characteristics and Resource Potential of Paleogene Continental Shale Oil in Qintong Sag of Subei Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1):176—187(in Chinese with English abstract).
- Zan, L., Bai, L.X., Yin, Y.L., et al., 2023. Basic Characteristics and Genesis Analysis of Shale Oil in the Second Member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(2):356—365(in Chinese with English abstract).
- Zan, L., Chai, F.Y., Yin, Y.L., 2021a. Physical Properties, Geochemical Characteristics and Origins of Crude Oils in the Qintong Sag Slope. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(5):1068—1077(in Chinese with English abstract).
- Zan, L., Luo, W.F., Yin, Y.L., et al., 2021b. Formation Conditions of Shale Oil and Favorable Targets in the Second Member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 43(2):233—241(in Chinese with English abstract).
- Zan, L., Luo, W.F., Ma, X.D., 2016. Hydrocarbon Generation Potential and Genetic Environments of Second Member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin. *Unconventional Oil & Gas*, 3(3):1—8(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.M., Yang, L., 2013. Nomenclature of Aryl Isoprenoid Hydrocarbons. *Geochimica*, 42(4): 379—384(in Chinese with English abstract).
- Zhang, D.L., Zhang, K.Q., Xu, T.W., et al., 2020. Research on a Potential Indicator of High-Quality Source Rocks in Saline Lacustrine Basin: A Case Study of the Dongpu Depression. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 17(1): 1—8(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.H., Wang, Y., Wu, Y.Y., et al., 2006. Geochemical Behaviors of Condensates in Honghuang Structure in Qintong Sag. *Natural Gas Industry*, 26(9):8—11(in Chinese with English abstract).
- Zhong, Z.G., Yu, W.Q., Duan, H.L., et al., 2025. Progress and Research Direction of Shale Oil Exploration in Complex Fault Blocks with Low to Medium TOC in Subei Basin. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 15(1):11—18(in Chinese with English abstract).
- Zhu, L., Qin, L.M., Zhang, Z.H., et al., 2009. Geochemical Characteristics and Accumulation Process of Beihanzhuang Oilfield of Qintong Depression, Northern Jiangsu Basin. *Natural Gas Geoscience*, 20(1):36—43(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈红汉, 2023. 我国大型克拉通叠合盆地的走滑构造与油气聚集研究进展. *地球科学*, 48(6): 2039—2066.
- 方朝合, 张枝焕, 王义凤, 等, 2008. 苏北盆地溱潼凹陷第三系烃源岩地球化学特征. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 23(6):1—5, 117.
- 高玉巧, 何希鹏, 程熊, 等, 2024. 陆相咸化湖盆“低 TOC”烃源岩高生烃效率探讨:以苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段泥页岩为例. *油气藏评价与开发*, 14(5):678—687.
- 郭旭升, 李王鹏, 申宝剑, 等, 2025. 中国石化探区和邻区油页岩原位开采选区评价. *油气藏评价与开发*, 15(1):1—10.
- 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 等, 2023. 陆相页岩油富集机理探讨. *石油与天然气地质*, 44(6):1333—1349.
- 胡瑛, 张枝焕, 方朝合, 2005. 溱潼凹陷低熟油生物标志物特征及成熟度浅析. *石油与天然气地质*, 26(4):512—517.
- 霍秋立, 李振广, 曾花森, 等, 2010. 松辽盆地北部晚白垩系青一段源岩中芳基类异戊二烯烃的检出及意义. *沉积学报*, 28(4):815—820.
- 李梦勤, 姚超, 陈方方, 等, 2025. 塔里木盆地地下古生界深层烃源岩和原油生物标志物类型划分及油源. *天然气地球科学*, 36(1):166—182.
- 李振西, 范璞, 李景贵, 等, 1998. 芳基类异戊二烯生标在指相上的应用. *沉积学报*, 16(2):9—13.
- 李志明, 刘雅慧, 何晋译, 等, 2023. 陆相页岩油“甜点”段评价关键参数界限探讨. *石油与天然气地质*, 44(6):1453—1467.
- 李志鹏, 余麒麟, 咎灵, 等, 2023. 苏北盆地溱潼凹陷阜二段不同岩性烃源岩的地球化学特征及生烃潜力对比. *现代地质*, 37(5):1345—1357.
- 陆黄生, 秦黎明, 刘军, 等, 2009. 苏北盆地溱潼凹陷油气运聚模式. *地质论评*, 55(3):395—405.
- 吕超, 张春明, 吴育飞, 2015. GC-MS 结合保留指数对三甲基芳基类异戊二烯的定性. *长江大学学报(自然科学版)*, 12(5):15—18, 27.
- 马健, 吴朝东, 王熠哲, 等, 2020. 准噶尔盆地渐新世安集海河组类胡萝卜素的发现及古环境意义. *地质学报*, 94(6):1853—1868.
- 宋岩, 贾承造, 姜林, 等, 2024. 全油气系统内涵与研究思路. *石油勘探与开发*, 51(6):1—13.

- 孙永革,肖中尧,徐世平,等,2004.塔里木盆地原油中芳基类异戊二烯烃的检出及其地质意义.新疆石油地质,25(2):215—218.
- 吴群,余文端,骆卫峰,等,2016.苏北盆地溱潼凹陷岩性油藏勘探成果及启示.中国石油勘探,21(3):99—107.
- 杨永才,张枝焕,方朝合,等,2006.苏北盆地溱潼凹陷原油三芳甾烷特征及油源对比.第四届油气成藏机理与资源评价国际学术研讨会论文集,26(3):531—539.
- 姚红生,云露,笱灵,等,2023.苏北盆地溱潼凹陷阜二段断块型页岩油定向井开发模式及实践.油气藏评价与开发,13(2):141—151.
- 姚红生,笱灵,高玉巧,等,2021.苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集高产主控因素与勘探重大突破.石油实验地质,43(5):776—783.
- 于心科,范璞,1990.发现于美国 South Florida 盆地的新生物标志化合物.中国科学(B辑),(5):539—544.
- 云露,何希鹏,花彩霞,等,2023.苏北盆地溱潼凹陷古近系陆相页岩油成藏地质特征及资源潜力.石油学报,44(1):176—187.
- 笱灵,白鸾羲,印燕铃,等,2023.苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油基本特征及成因分析.石油实验地质,45(2):356—365.
- 笱灵,柴方园,印燕铃,2021a.溱潼凹陷斜坡带原油物性和地化特征及成因.沉积学报,39(5):1068—1077.
- 笱灵,骆卫峰,印燕铃,等,2021b.苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油形成条件及有利区评价.石油实验地质,43(2):233—241.
- 笱灵,骆卫峰,马晓东,2016.苏北盆地溱潼凹陷阜二段烃源岩生烃潜力及形成环境.非常规油气,3(3):1—8.
- 张春明,杨禄,2013.芳基类异戊二烯烃类化合物的命名.地球化学,42(4):379—384.
- 张冬琳,张蔻乔,徐田武,等,2020.一种潜在的咸化湖盆优质烃源岩指相标志物研究:以东濮凹陷为例.长江大学学报(自然科学版),17(1):1—8.
- 张枝焕,王瑶,吴聿元,等,2006.溱潼凹陷红庄构造凝析油气地化特征研究.天然气工业,26(9):8—11,160.
- 钟志国,于雯泉,段宏亮,等,2025.苏北盆地中低 TOC 复杂断块页岩油勘探进展与攻关方向.油气藏评价与开发,15(1):11—18.
- 朱雷,秦黎明,张枝焕,等,2009.苏北盆地溱潼凹陷北汉庄油田油气成藏地球化学特征.天然气地球科学,20(1):36—43.