

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.236



川西坳陷新场气田须家河组五段 烃源岩分子地球化学特征

吴小奇^{1,2}, 陈迎宾^{1,2}, 刘全有^{3*}, 王 萍², 曾华盛², 王彦青^{1,2}, 胡 焯², 黎华继⁴

- 1. 中国石化石油勘探开发研究院四川地区勘探开发研究中心, 四川成都 610041
- 2. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126
- 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083
- 4. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041

摘要: 上三叠统须家河组五段是川西坳陷新场气田勘探的热点层系之一. 对新场须五段泥质烃源岩进行了分子地球化学分析, 结果表明: 新场须五段泥岩可溶抽提物姥植比介于 0.26~1.70 之间, $C_{27}-C_{29}$ 规则甾烷中 C_{27} 和 C_{29} 甾烷相对含量平均值分别为 31.2% 和 44.6%, 伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值介于 0.11~0.34, MPI_1 、 F_1 和 4-/1-MDBT 均与成熟度呈正相关. 新场须五段泥岩有机质生源中, 陆源高等植物略占优势, 但低等水生生物和藻类也具有一定的贡献; 泥岩主要沉积于湖泊环境, 部分沉积于缺氧的盐水环境. 成熟度对一些芳烃化合物指标具有明显影响, 成熟度超过 1.25% 的煤系烃源岩样品的三芴系列和成熟度超过 1.2% 的样品的 MDBTs/MDBFs 比值不能直接用于沉积环境的判别.

关键词: 须家河组五段; 烃源岩; 饱和烃; 芳烃; 成熟度; 三芴系列; 沉积环境; 石油地质.

中图分类号: P618.13 **文章编号:** 1000-2383(2019)03-0859-13 **收稿日期:** 2018-10-09

Molecular Geochemical Characteristics of Source Rocks in the 5th Member of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang Gas Field, West Sichuan Depression

Wu Xiaoqi^{1,2}, Chen Yingbin^{1,2}, Liu Quanyou^{3*}, Wang Ping², Zeng Huasheng², Wang Yanqing^{1,2}, Hu Ye², Li Huaji⁴

- 1. Research Center of Exploration and Development in Sichuan Basin, SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Chengdu 610041, China
- 2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Wuxi 214126, China
- 3. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China
- 4. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Southwest Branch Company, Chengdu 610041, China

Abstract: The 5th member of the Upper Triassic Xujiahe Formation (T_3x^5) is one of the important targets for terrigenous natural gas exploration in the Xinchang gas field in the West Sichuan Depression. The molecular geochemical characteristics have been analyzed in order to further determine the sedimentary environment of the T_3x source rocks. The studies indicate that the Pr/Ph ratio of soluble extract from the T_3x^5 mudstone in the Xinchang gas field ranges from 0.26 to 1.70, and the relative con-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41872122, 41625009, U1663201); 国家科技重大专项 (No. 2016ZX05002-006); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (No. XDA14010402).

作者简介: 吴小奇 (1982—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事天然气地质与地球化学研究. ORCID: 0000-0002-6935-3811.
E-mail: xqw@163.com

*** 通讯作者:** 刘全有, ORCID: 0000-0003-2334-2532. E-mail: liuqy.syky@sinopec.com

引用格式: 吴小奇, 陈迎宾, 刘全有, 等, 2019. 川西坳陷新场气田须家河组五段烃源岩分子地球化学特征. 地球科学, 44(3): 859-871.

tents of C_{27} and C_{29} in $C_{27}-C_{29}$ regular steranes are 31.2% and 44.6%, respectively. The gammacerane/ C_{30} hopane ratio ranges from 0.11 to 0.34, and the MPI_1 , F_1 and 4-/1-MDBT values of the $T_3.x^5$ mudstone are all positively correlated with thermal maturity. The organic source of the $T_3.x^5$ mudstone is dominated by terrigenous higher plant, and lower hydrobiont and algae have also made a certain contribution. The $T_3.x^5$ mudstone was mainly deposited in the lacustrine environment, with part of the samples in the anoxic saline environment. Thermal maturity can significantly affect several indexes of aromatic compounds in coal-measure source rocks, and the three fluorene series of samples with $R_o > 1.25\%$ and MDBTs/MDBFs ratios of samples with $R_o > 1.2\%$ can not be directly used to determine the sedimentary environment.

Key words: 5th member of Upper Triassic Xujiahe Formation ($T_3.x^5$); source rock; saturated hydrocarbon; aromatic hydrocarbon; maturity; three-fluorenes series; sedimentary environment; petroleum geology.

0 引言

川西坳陷是四川盆地重要的勘探阵地之一,勘探领域主要包括陆相层系上三叠统须家河组 and 上覆侏罗系以及海相层系中三叠统雷口坡组(Dai, 2016; Wu *et al.*, 2017). 位于川西坳陷中段的新场气田是该区迄今为止发现的规模最大的陆相气田,天然气探明储量达 $2\,045 \times 10^8\text{ m}^3$ (Dai, 2016). 作为四川盆地陆相天然气勘探最重要的层系,须家河组煤系烃源岩主要分布在须家河组一、三、五段中,既是须家河组自身致密砂岩气藏的气源,也是上覆侏罗系次生气藏的重要气源(Dai *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2010). 前人对须家河组烃源岩的展布和发育特征(Dai *et al.*, 2009)、有机地球化学特别是分子地球化学特征(黄世伟等, 2004; 沈忠民等, 2009; Zhang *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2015)、生排烃特征(陈冬霞等, 2010; 江兴歌等, 2012)等开展了广泛研究,但学者们往往重点关注须一、须三段,对须五段研究相对较少.

近年来,新场气田须五段成为勘探的热点层系,其气水关系复杂,试采时气水同产. 须五段泥岩构成了下伏须四段气藏的主力盖层,也曾被认为是侏罗系气藏的主力气源(沈忠民等, 2008). 然而,常规地化特征研究表明,新场须五段泥岩生气强度主体为 $3 \times 10^8 \sim 16 \times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$, 总生气量相对较低,因而生成的天然气不足以完全驱替须五段中的地层水,导致天然气充满度较低而气水同产(吴小奇等, 2017). 气源对比研究也表明,新场须五段烃源岩是须五段天然气的主力气源,但其成熟度明显低于上覆侏罗系天然气计算所得成熟度,因而并非侏罗系气藏的主力气源(吴小奇等, 2016).

烃源岩的形成受沉积环境的控制(李浩等, 丰度整体达到了中等烃源岩的标准;显微组分以镜质组为主,干酪根类型指数均小于 0,干酪根碳同位

2017; 殷杰等, 2017; 李秋芬等, 2018; 邢凤存等, 2018). 以往一般认为,须家河组除须一段局部发育海陆交互相沉积外,其余各段均属陆相沉积(朱如凯等, 2009); 近年来的一些研究表明,须家河组沉积于咸化环境,但究竟是受到了海侵事件的影响(Zhang *et al.*, 2012)还是源自中下三叠统盐分的长期输入尚存在争议(李伟, 2011), 且相关研究主要集中于川中和川北地区(Zhang *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2015), 对川西坳陷关注较少. 本文通过对新场气田须家河组五段烃源岩分子地球化学特征的研究,分析烃源岩生物标志化合物组成,为明确烃源岩的沉积环境提供有益的信息.

1 地质背景

川西坳陷位于四川盆地西部,夹持于西侧的龙门山构造带和东侧的龙泉山断裂之间,自印支运动以来,该区快速沉降并充填了巨厚的上三叠统须家河组含煤暗色砂泥岩和侏罗系一白垩系砂泥质红色岩系. 新场气田位于川西坳陷中段孝泉—丰谷北东东向隆起上,其整体为一南陡北缓、西高东低的背斜. 新场气田须家河组自下而上可以分为须二、须三、须四、须五段,顶部缺失须六段.

新场气田须家河组五段($T_3.x^5$)顶面现今埋深为 $2\,000 \sim 2\,500\text{ m}$, 除了在东侧的合兴场地区发育有部分逆冲断裂外,在中西部地区整体上断裂并不发育(图 1). 新场须五段砂泥岩频繁互层,天然气主要储集于致密砂岩中,泥岩中夹少量的碳质泥岩和煤线,被认为是一套滨浅湖—三角洲前缘沉积,地层厚度平均为 554.9 m , 其中泥岩厚度平均为 285.3 m , 整体具有北薄南厚、东薄西厚的特点(吴小奇等, 2017). 须五段泥岩 TOC 含量平均为 2.17% , 有机质素值介于 $-26.2\% \sim -24.1\%$ 之间,表现出偏腐殖型烃源岩的特征;镜质体反射率(R_o)平均为 1.17% .

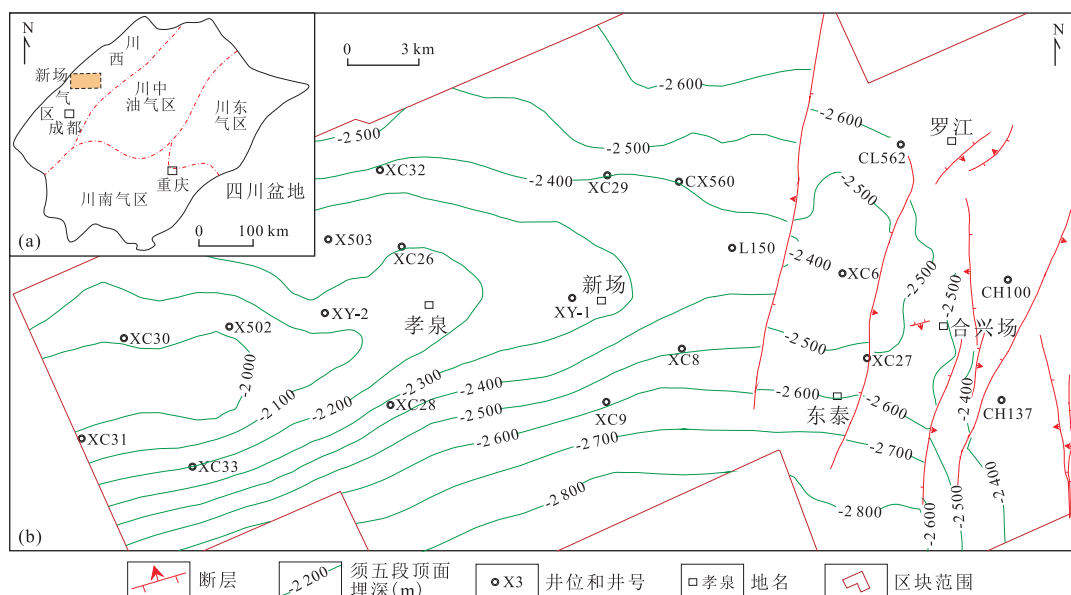


图 1 川西坳陷新场气田位置(a)及须五段顶面埋深图(b)

Fig.1 Location (a) and burial depth of the T_3x^5 top surface (b) of the Xinchang gas field in the West Sichuan Depression

据吴小奇等(2016)修改

主体处于成熟演化阶段(吴小奇等,2017)。

2 样品和分析方法

本次分析的样品取自川西坳陷新场气田 X503、XY-1、XY-2 和 XC28 井的须家河组五段岩心,除 1 个样品为碳质泥岩(TOC 为 8.1%)外,其余 13 个样品均为泥岩(TOC 为 0.36%~2.68%),成熟度为 0.91%~1.32%(吴小奇等,2017)。样品分析在中石化无锡石油地质研究所进行。首先通过索氏抽提器用氯仿对烃源岩进行抽提,并用石油醚沉淀去除沥青质,然后用硅胶/氧化铝层析柱分离分别得到饱和烃和芳烃组分。饱和烃色谱分析采用 Agilent 7890A 型气相色谱仪,初始温度为 60℃,恒温 2 min,然后以 7℃/min 的速率升至 310℃并保持 20 min。载气为氦气。饱和烃和芳烃组分的色谱-质谱分析采用 Agilent 6890/5973 型色谱/质谱联用仪,色谱柱分别为 DB-5MS(30 m×0.25 mm)和 HP-5MS(30 m×0.25 mm)石英毛细管柱。升温程序为 80℃,恒温 2 min 后以 3℃/min 的速率升至 230℃,再以 2℃/min 的速率升温到 310℃并保持 15 min。质谱条件为:EI 离子源,离子源温度为 230℃,电离电压为 70 eV,扫描范围 m/z 为 50~550。进样器温度为 290℃,载气为氦气。

3 饱和烃生物标志物特征

3.1 正构烷烃和类异戊二烯烷烃

新场须五段烃源岩正构烷烃系列化合物的碳数多数在 C_{14} — C_{35} 之间,成熟度相对较低($R_o < 1.0\%$)的样品主峰碳数一般为 C_{17} 或 C_{18} ,而成熟度相对较高($R_o > 1.0\%$)的样品主峰碳数则一般为 C_{22} ,个别样品表现出双峰型分布,主峰碳数为 C_{18} 和 C_{22} ,碳质泥岩样品与成熟度相近的泥岩没有区别。受烃源岩普遍达到成熟阶段影响,新场须五段泥岩不具有明显的奇偶优势,奇偶优势指数 OEP 为 0.91~1.06,碳优势指数 CPI 为 1.07~1.24(表 1)。

在类异戊二烯烷烃方面,新场须五段泥岩可溶抽提物 Pr/nC_{17} 比值为 0.28~0.69, Ph/nC_{18} 比值为 0.29~0.91,均小于 1(图 2)。新场须五段泥质烃源岩显微组分以镜质组为主,干酪根类型指数均小于 0,为Ⅲ型干酪根;干酪根碳同位素值介于 -26.2‰~-24.1‰之间,表现出偏腐殖型烃源岩的特征(吴小奇等,2017)。但这些样品在 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值相关图上整体并未表现出来自陆源(Ⅲ型)有机质的特征,而是普遍表现出混合型(Ⅱ型)和海相/盐湖相(I型)有机质的特征(图 2),与 Zhang *et al.* (2012) 对须家河组气源岩的研究认识一致。孙丽娜等(2015)对 T_{max} 为 437℃的碳质泥岩的热模拟实验研究表明,Ⅲ型烃源岩样品在 350~520℃范围内, Pr/nC_{17} 和

表 1 新场须五段泥岩分子地球化学参数

Table 1 Molecular geochemical parameters of the T₃x⁵ mudstone in the Xinchang gas field

井号	深度(m)	主峰碳	R _o	OEP	CPI	Pr/Ph	Ts/Tm	伽马蜡烷/ q9C ₃₀ /藿烷	$\alpha\alpha\alpha$ C ₂₇ (%)	$\alpha\alpha\alpha$ C ₂₈ (%)	$\alpha\alpha\alpha$ C ₂₉ (%)	MPI ₁	F ₁	DBT/P	MDBTs/ MDBFs	F(%)	OF(%)	SF(%)	4-MDBT/ 1-MDBT
X503	2 788.0	C ₁₈	0.91	1.01	1.13	1.22	0.97	0.11	22.0	17.7	60.3	0.726	0.525	0.08	0.21	25.5	58.2	16.4	6.27
X503	2 864.0	C ₁₈	0.93	0.97	1.12	1.57	0.63	0.14	23.1	20.0	56.9	0.750	0.529	0.08	0.30	35.8	45.3	18.9	5.98
X503	2 903.0	C ₂₂	1.11	0.94	1.17	0.75	0.87	0.15	28.2	21.7	50.1	0.771	0.534	0.08	0.21	32.6	52.6	14.8	6.90
X503	2 935.0	C ₁₉	1.10	1.02	1.09	1.69	0.80	0.32	27.9	23.2	48.8	0.821	0.542	0.08	0.21	30.8	54.2	15.0	6.83
X503	2 968.0	C ₂₂	1.07	0.91	1.16	0.41	0.98	0.19	32.0	25.6	42.3	0.887	0.534	0.07	0.65	52.1	25.5	22.4	8.79
X503	2 976.0	C ₁₈ , C ₂₂	1.18	0.95	1.24	1.33	0.82	0.15	28.5	22.6	48.9	0.835	0.532	0.09	0.38	40.1	40.0	19.8	7.56
X503	3 189.0	C ₂₂	1.23	0.91	1.12	0.48	1.01	0.16	35.3	26.2	38.5	1.033	0.586	0.09	1.40	53.3	16.7	30.0	11.52
X503	3 210.0	C ₂₂	1.25	0.91	1.11	0.43	0.73	0.30	33.0	27.0	40.0	0.943	0.599	0.10	0.76	43.8	26.6	29.6	13.28
X503	3 219.0	C ₂₂	1.26	0.94	1.15	1.32	1.05	0.21	33.7	25.8	40.5	1.193	0.599	0.06	2.49	45.7	13.3	41.0	11.28
XY-1	3 030.8	C ₂₅	1.30	1.06	1.13	1.19	1.14	0.14	34.1	26.2	39.7	1.065	0.580	0.10	2.03	32.9	18.3	48.8	11.33
XY-1	3 058.8	C ₂₅	1.32	1.04	1.11	0.26	1.05	0.14	39.7	25.6	34.7	1.036	0.585	0.07	2.64	44.2	13.0	42.8	11.80
XY-2	3 058.3	C ₁₈	1.25	0.92	1.07	1.70	1.04	0.34	30.6	25.4	44.0	1.018	0.571	0.08	0.86	45.7	25.7	28.6	11.61
XY-2	3 090.0	C ₁₉	1.20	1.00	1.17	0.93	0.71	0.25	32.6	26.5	40.9	0.999	0.576	0.10	2.18	36.5	16.3	47.1	10.50
XC28	3 288.0	C ₂₂	1.27	0.92	1.12	0.30	0.99	0.15	35.4	26.4	38.2	1.036	0.614	0.08	2.34	53.5	11.7	34.8	14.65

Ph/nC₁₈ 比值均随着温度升高表现出逐渐下降的趋势,且 Pr/nC₁₇ 比值比 Ph/nC₁₈ 比值降低得更快,即随着演化程度的增大,Ⅲ型烃源岩样品 Pr/nC₁₇ 比值快速降低,从而在 Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 相关图上落入Ⅱ型甚至Ⅰ型有机质范围.因此,相对较高的成熟度以及正构烷烃与类异戊二烯烷烃的热稳定性差异可能是导致须五段烃源岩在 Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 相关图上表现出Ⅱ型甚至Ⅰ型有机质特征的主要原因.

Peters and Moldowan(1993)研究认为,过高的姥植比(Pr/Ph>3.0)并不能完全反映沉积环境,而是反映氧化条件下陆源有机质输入;较低的姥植比(Pr/Ph<0.6)代表缺氧的盐水环境;其间通常属于一般的湖泊环境.新场须五段泥岩样品 Pr/Ph 比值介于 0.26~1.70 之间,除 5 个样品低于 0.6 以外,其余 9 个样品均高于 0.6,表明其主要沉积于一般湖泊环境,部分沉积于缺氧的盐水环境,与典型湖沼相的腐殖型煤形成于偏氧化环境有明显差异,且 Pr/Ph 比值与成熟度之间没有明显的相关性(表 1).在 Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈ 和 Pr/Ph 三角图上,新场须五段具有较高 Pr/Ph 比值(0.75~1.70)的 9 个泥岩样品表现出淡水湖相环境的特征;其余 5 个具有较低 Pr/Ph 比值(0.26~0.48)的样品则均表现为半咸水—咸水环境的特征(图 3).

3.2 甾烷类化合物

新场须五段泥岩甾烷类化合物特征表现出相对较低含量的重排甾烷和较高含量的规则甾烷,且随着成熟度的增大,低碳数的孕甾烷相对含量表现出逐渐升高的趋势(图 4).Huang and Meinschein(1979)认为,C₂₇ 规则甾烷(αααR)通常来自低等水生

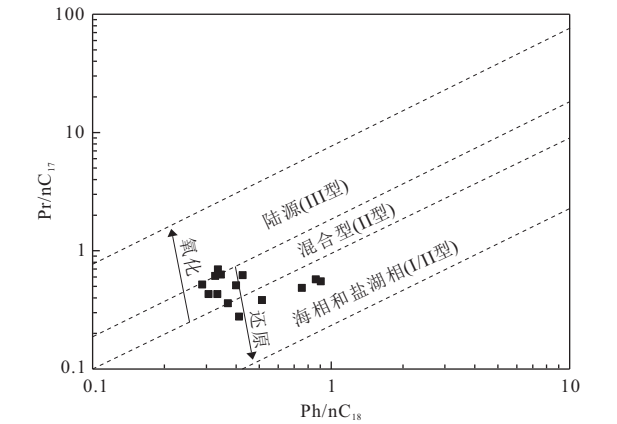


图 2 新场须五段泥质烃源岩 Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 相关图
Fig.2 Correlation between Pr/nC₁₇ and Ph/nC₁₈ of the T₃x⁵ argillaceous source rocks in the Xinchang gas field

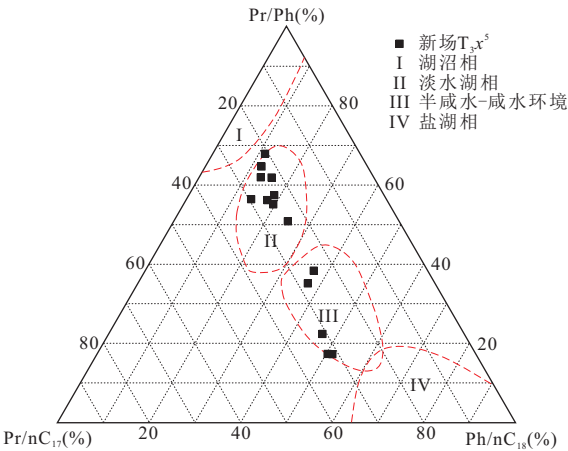


图 3 新场须五段泥质烃源岩 Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈ 和 Pr/Ph 三角图

Fig.3 Ternary diagram among Pr/nC₁₇, Ph/nC₁₈ and Pr/Ph of the T₃x⁵ argillaceous source rocks in the Xinchang gas field

底图据王铁冠等(1995)

生物和藻类,C₂₉ 规则甾烷(αααR)则主要是高等植物来源,因而 C₂₇—C₂₉ 规则甾烷的相对比例可以用来确定特定环境的生源输入.新场须五段泥岩中 C₂₉ 甾烷具有明显的优势分布,相对含量主体高于 38%,平均为 44.6%,而 C₂₇ 甾烷相对含量则普遍低于 36%,平均为 31.2%(表 1),表明须五段泥岩的有机质生源中陆源高等植物占优势,低等水生生物和藻类也具有一定的贡献.这与 Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 比值相关图(图 2)揭示的特征并不一致,反映出须五段烃源岩有机质来源的复杂性.值得注意的是,随着成熟度的增大,C₂₇—C₂₉ 规则甾烷分布模式从反“L”型逐渐过渡到不对称近“V”型,再过渡到“L”型(图 4),C₂₉/C₂₇ 比值表现出逐渐降低的趋势(图 5),表明 C₂₇ 和 C₂₉ 规则甾烷的相对含量受到热演化程度的控制.因此,成熟度较高阶段(R_o>1.2%)时,C₂₇—C₂₉ 规则甾烷分布模式并不能反映真实情况.

随着成熟度增加,甾烷异构化作用会呈现出规律性变化,直至达到平衡.新场须五段泥岩 C₂₉ ααα20S/(20S+20R) 为 0.45~0.53, C₂₉ αββ/(αββ+ααα) 为 0.35~0.47,均高于成熟阶段平衡值 0.3.这与新场须五段泥岩现今均处于成熟阶段相一致.

一般认为,海相成因沉积物中含有甲藻甾烷和 4-甲基,24-乙基胆甾烷,而陆相沉积物中则具有 4-甲基,24-乙基胆甾烷而缺失甲藻甾烷(Summons et al.,1987;Goodwin et al.,1988).新场须五段烃源岩部分样品检出了 4-甲基,24-乙基胆甾烷,Zhang

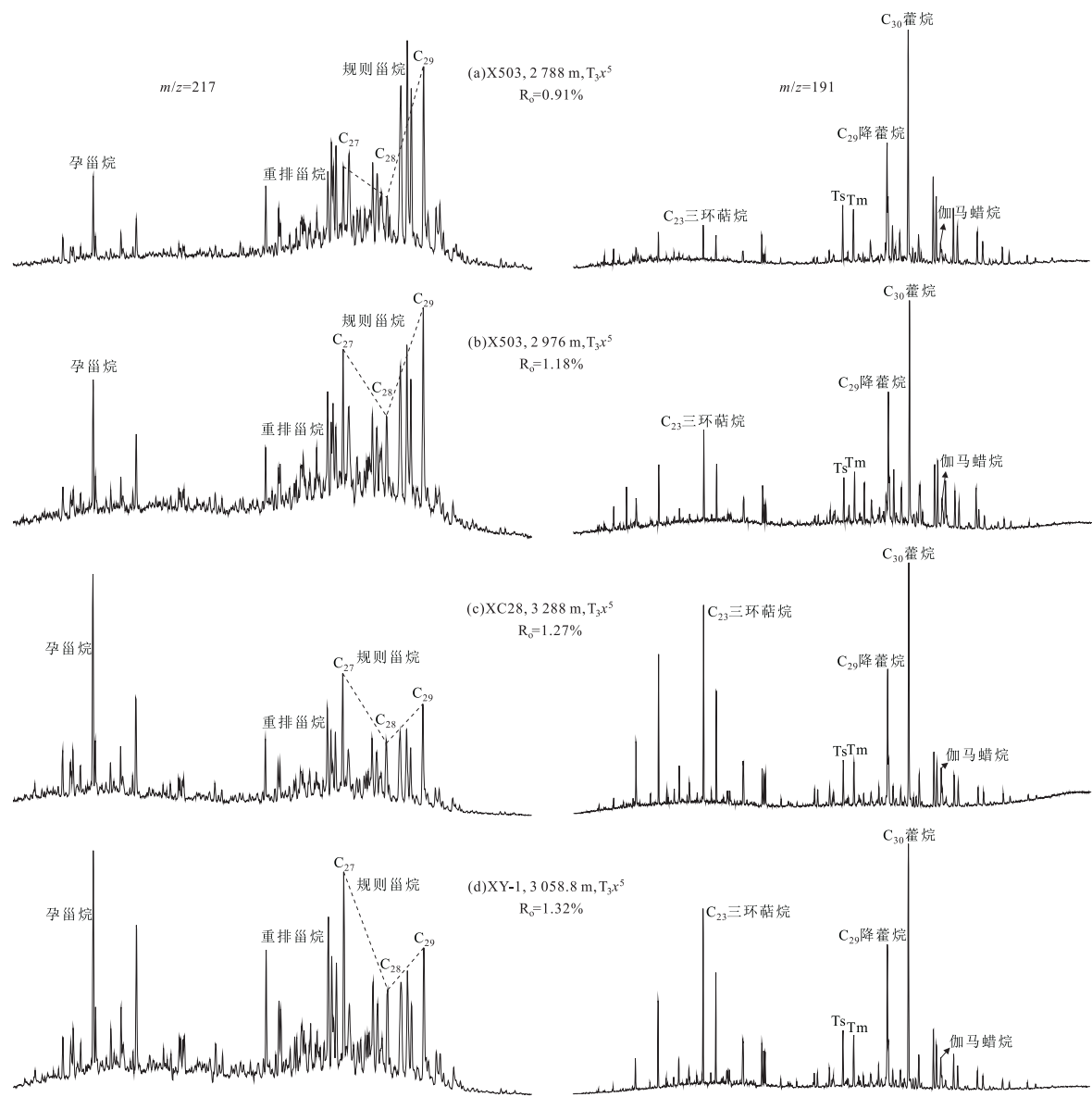


图 4 新场须五段泥岩甾烷($m/z=217$)和萜烷($m/z=191$)化合物分布

Fig.4 Distribution of sterane ($m/z=217$) and terpane ($m/z=191$) compounds of the T_3x^5 mudstone in the Xinchang gas field

et al.(2012)在川中广安等地区须家河组烃源岩中检测出了甲藻甾烷.由于甲藻甾烷不仅是海相环境的生物标志物,而且是湖相咸化、半咸化沉积环境的标志物(陈致林等,1994);因此,须家河组烃源岩表现出咸化水体沉积的特征,但究竟是受到了明显海侵事件的影响(Zhang *et al.*,2012)还是源自嘉陵江组一雷口坡组大量盐岩、膏岩的剥蚀及盐分的长期输入所导致(李伟,2011),目前仍存在争议.

3.3 萜烷类化合物

随着成熟度增大,新场须五段泥岩中三环萜烷相对含量表现出逐渐增大的趋势,而藿烷系列化合

物相对含量逐渐降低(图 4).一般认为,三环萜烷中陆源高等植物来源的 C_{19} 和 C_{20} 含量高,湖相源岩以 C_{23} 最高,其次为 C_{21} ,而煤系烃源岩中 C_{21} 以前的三环萜烷往往高于 C_{23} 以后的三环萜烷含量(宋振响和周卓明,2013).新场须五段泥岩三环萜烷整体表现出 C_{21} 和 C_{23} 优势分布,且 C_{23} 含量最高,显示出湖相烃源岩的典型特征.新场须五段泥岩 Ts/Tm 比值为 0.63~1.14(表 1), C_{29} 降藿烷含量明显低于 C_{30} 藿烷含量,高碳数($C_{30}-C_{35}$)藿烷化合物随着碳数增加含量迅速降低(图 4).

伽马蜡烷的形成与水体分层有关,由于高盐环

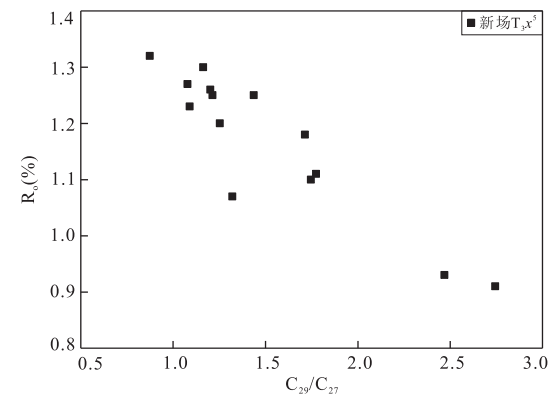


图 5 新场须五段泥质烃源岩 C_{29}/C_{27} 甾烷比值和成熟度关系

Fig.5 Correlation between C_{29}/C_{27} sterane ratio and thermal maturity of the T_3x^5 mudstone in the Xinchang gas field

境往往伴随着水体的密度分层,因此较高含量的伽马蜡烷常用于指示但不局限于高盐环境(Sinninghe Damsté *et al.*, 1995; 张立平等, 1999).煤层形成于水体较浅且不易发生分层的沼泽环境,因此伽马蜡烷含量很低(朱扬明等, 2012).新场须五段泥岩的伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值为 0.11~0.34,平均为 0.20,14 个样品中有 5 个大于 0.20,整体较高,反映出其水体可能受盐度较高影响而普遍发生了分层现象.

4 芳烃化合物特征

川西坳陷新场气田须家河组五段泥岩样品随着成熟度增大,其芳烃组成中萘系列化合物相对含量逐渐降低,而屈系列化合物相对含量逐渐增加,但整体仍以菲系列为主(图 6).Li *et al.* (2015)对川北地区须家河组烃源岩芳烃化合物组成特征变化趋势的研究表明,受持续的脱氢作用引起的聚合反应影响,在高演化阶段芳烃化合物以富集高碳环数为典型特征.

4.1 菲系列和甲基菲指数

菲及其烷基取代物是芳烃化合物里最重要、应用最广泛的组分.随着成熟度升高,甲基菲会发生甲基重排和脱甲基化等作用,甲基菲异构体的相对分布与沉积环境相关,包括海相在内的半咸水—咸水环境中富含菌类和藻类等低等生物,有利于 9-甲基菲(9-MP)的形成,而在弱氧化—弱还原环境且以高等植物为主要来源时,1-甲基菲(1-MP)比 9-甲基菲含量更高(宋长玉等, 2007).新场须五段不同成熟度

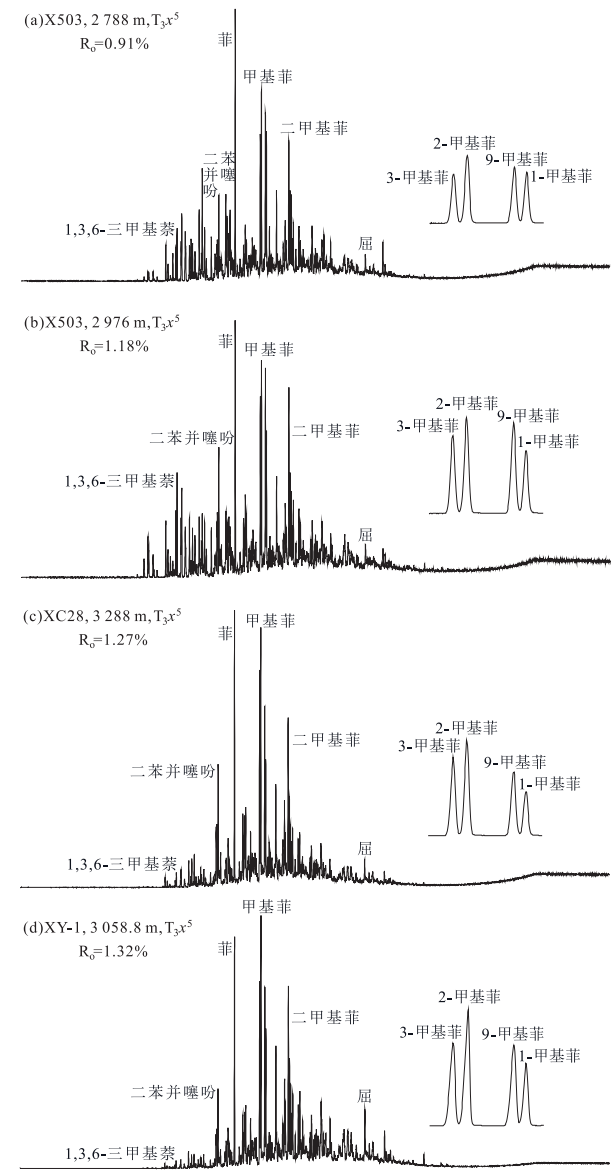


图 6 新场须五段泥岩芳烃化合物分布

Fig. 6 Distribution of aromatic compounds of the T_3x^5 mudstone in the Xinchang gas field

的泥岩样品的 9-MP 含量均高于 1-MP(图 6), 9-MP/1-MP 比值为 1.14~1.58,平均为 1.42,这与须五段泥岩中存在一定量的低等生物输入有关.

Radke *et al.* (1982)研究指出,菲与甲基菲的 4 个异构体的分布特征与成熟度紧密相关,并提出了甲基菲指数 $MPI_1 = 1.5 (2-MP + 3-MP) / (P + 1-MP + 9-MP)$,其在成熟度为 1.35%前后分别与成熟度呈正相关($R_o = 0.40 + 0.60 MPI_1$)和负相关($R_o = 2.30 - 0.60 MPI_1$).Li *et al.* (2015)对四川盆地北部须家河组煤系烃源岩的研究表明, MPI_1 随成熟度变化呈两段式线性变化,在成熟度 1.8%之前其 MPI_1 逐渐增大($R_o = 0.37 + 0.98 MPI_1$),之后逐

渐降低($R_o=3.02\sim0.90\text{ MPI}_1$).新场须五段泥岩成熟度介于 $0.91\%\sim1.32\%$ 之间,且与 MPI_1 呈正相关,与川北须家河组煤系烃源岩趋势线特征较为接近,但也有一定的差异(图 7a),反映出川北和川西地区须家河组烃源岩沉积环境可能存在细微的差异.受此影响,对不同层系烃源岩甚至是对于不同地区的同一套烃源岩,在引用相关成熟度换算经验公式时仍需谨慎.

此外,甲基菲分布分数 $F_1=(2\text{-MP}+3\text{-MP})/(1\text{-MP}+2\text{-MP}+3\text{-MP}+9\text{-MP})$ 也是常用的芳烃成熟度参数,煤的 F_1 在生油窗内与 R_o 呈线性相关($R_o=-0.166+2.242 F_1$)(Kvalheim *et al.*,1987).四川盆地北部须家河组煤系烃源岩 F_1 随 R_o 变化呈两段式线性变化趋势,在成熟度小于 1.8% 时, F_1 与 R_o 呈正相关($R_o=-0.33+2.46 F_1$),大于 1.8% 时二者呈负相关($R_o=5.05-3.76 F_1$)(Li *et al.*,2015).新场须五段泥岩 R_o 也与 F_1 呈正相关,与川北须家河组煤系烃源岩趋势一致,但也表现出一定的差异(图 7b).

4.2 三芴系列

芳烃中的芴(F)、氧芴(OF,即二苯并呋喃)、硫芴(SF,二苯并噻吩)被称为三芴系列,其相对分布与沉积环境有密切联系,被广泛用于烃源岩沉积环境研究;其中海相和盐湖相烃源岩具有明显的硫芴优势($>45\%$),而煤系烃源岩硫芴含量则低于 40% (Lin and Wang,1991;程克明等,1995).Zhang *et al.*(2012)研究发现,须家河组煤系烃源岩尽管表现出还原性较强的特征,但整体并未落在盐湖相烃源岩分布范围内,而是与典型煤系烃源岩特征相似,

其中川西地区须家河组氧芴含量明显偏低.由于川西地区须家河组成熟度明显高于川中、川北等地区(Dai *et al.*,2009),且二苯并呋喃类化合物与具有较高热稳定性的二苯并噻吩系列化合物不同,其在生油高峰期后的较高成熟度阶段会受热催化降解作用影响而含量降低(Radke *et al.*,2000),因此川西地区须家河组烃源岩中氧芴含量较低可能与其成熟度较高有关.由于二苯并呋喃类化合物热稳定性较低,因此三芴系列只适用于成熟阶段($0.6\%<R_o<1.35\%$)烃源岩,对高一过成熟煤系烃源岩并不适用;如川北地区须家河组成熟度超过 1.35% 的样品,其氧芴含量明显偏低,部分样品会出现明显的硫芴优势,从而落在盐湖相烃源岩区,与真实沉积环境不符(Li *et al.*,2015).

新场须五段泥岩成熟度在 $0.91\%\sim1.32\%$ 之间,在三芴系列分布图上主体表现出煤系烃源岩的特征;部分泥岩样品具有相对较高的硫芴含量($>40\%$)而没有落在典型煤系烃源岩分布区(图 8),这可能主要与这些样品具有相对较高的成熟度有关.新场须五段泥岩随着 R_o 增大,硫芴含量相对氧芴和芴含量都增大,表现出 OF/SF 和 F/SF 比值的降低(图 9),因而在三芴系列三角图上表现出向 SF 端元靠近的趋势.新场须五段泥岩样品成熟度均不超过 1.35% ,但其中 R_o 超过 1.25% 的样品在三芴系列三角图上已经落在了煤系烃源岩区域之外,与样品主体分布特征不一致(图 8),这表明三芴系列对煤系烃源岩可能仅适用于成熟度不超过 1.25% 的范围.

4.3 二苯并噻吩与二苯并呋喃类的分布

二苯并噻吩和二苯并呋喃系列是烃源岩中常见

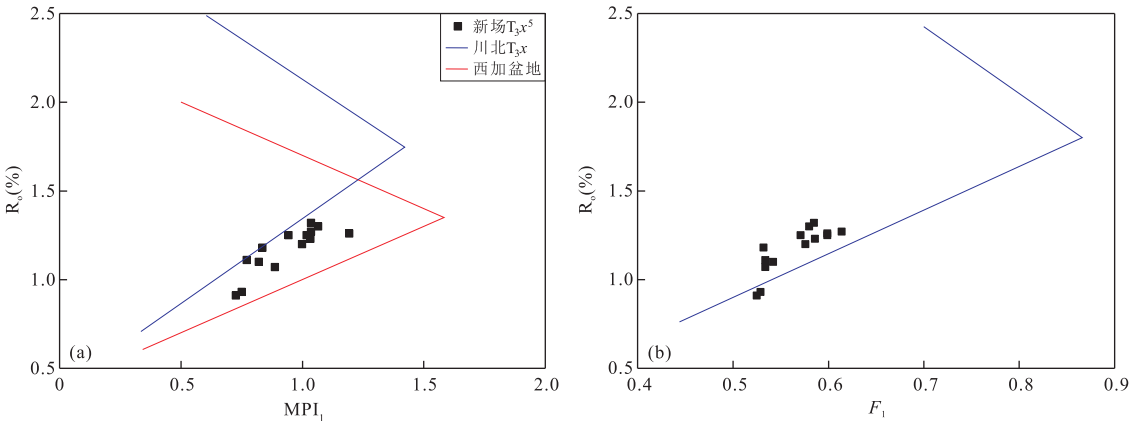


图 7 新场须五段泥岩 R_o 与 MPI_1 (a)和 F_1 (b)关系

Fig.7 Correlations between R_o and MPI_1 (a) and R_o and F_1 (b) of the T_3x^5 mudstone in the Xinchang gas field
川北 T_3x 据 Li *et al.*(2015);西加盆地据 Radke *et al.*(1982)

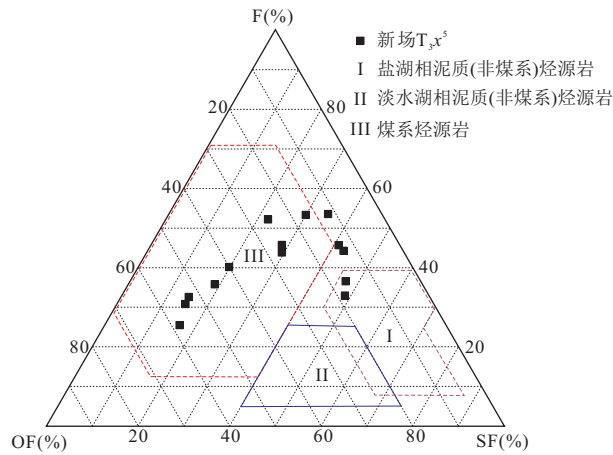


图 8 新场须五段泥岩三芴系列相对含量分布
Fig.8 Ternary diagram among three fluorene series of the T_3x^5 mudstone in the Xinchang gas field
底图据程克明等(1995)

的含杂原子芳烃化合物,其含量与沉积环境密切相关(朱扬明等,2012).二苯并噻吩与菲的比值(DBT/P)和 Pr/Ph 比值一起可以反映烃源岩的沉积背景(Hughes *et al.*, 1995).新场须五段泥岩的 DBT/P 比值普遍较低,介于 0.07~0.10 之间,其与 R_o 之间没有明显的相关性.从芳烃化合物组成看,二苯并噻吩和菲的相对分布随成熟度增大没有表现出明显的变化趋势(图 6),这些样品在 DBT/P 和 Pr/Ph 相关图上表现出贫硫湖相和一般湖相的特征(图 10a).Radke *et al.* (2000) 研究指出,甲基二苯并噻吩(MDBTs)与甲基二苯并呋喃(MDBFs)的比值同样可以和 Pr/Ph 比值相结合来反映烃源岩的沉积环境.值得注意的是,二苯并呋喃类化合物与二苯并噻吩系列化合物相比,其热稳定性相对较低,因此这两类化合物比值会随成熟度变化而发生变化(朱扬明

等,2012).

新场须五段泥岩 MDBTs/MDBFs 比值具有差异化特征,在 0.21 ~ 2.64 之间,多数样品 MDBTs/MDBFs 比值小于 1 而表现出贫硫湖相或一般湖相沉积特征,但也有部分样品由于具有相对较高的 MDBTs/MDBFs 比值(>1)而表现出海相/富硫湖相沉积或成熟的湖沼相煤的特征(图 10b).对新场须五段泥岩而言,当 $R_o < 1.2\%$ 时,随着 R_o 增大, MDBTs/MDBFs 比值变化不明显(图 11a);当 $R_o \geq 1.2\%$ 时, MDBTs/MDBFs 比值随着 R_o 增大而急剧增大,反映出成熟度对该比值具有明显的控制作用,表明 MDBFs 可能经历了热裂解.因此,新场须五段泥岩中具有较高 MDBTs/MDBFs 比值(>1)(图 10b)的样品反映其并非来自海相/富硫湖相沉积或为成熟的湖沼相煤,而是主要受较高的热演化程度($R_o \geq 1.2\%$)影响.这表明,对于 MDBTs/MDBFs 比值而言,只有当样品成熟度相对较低时($R_o < 1.2\%$)才能用于判识烃源岩的沉积环境,而当成熟度高于 1.2% 时,该比值会随着成熟度增大而显著增大,不能直接用于判断沉积环境.

此外,4-/1-甲基二苯并噻吩(4-/1-MDBT)也是一种较为常用的成熟度指标,其与成熟度具有正相关性(Radke *et al.*, 1986).Li *et al.* (2015) 研究发现,四川盆地北部须家河组烃源岩 4-MDBT/1-MDBT 比值随着成熟度升高,在 $R_o < 1.8\%$ 之前逐渐增大,在 $R_o > 1.8\%$ 之后可能受脱烷基作用影响而逐渐降低.川西新场须五段泥岩样品成熟度(0.91%~1.32%)均小于 1.8%,且与 4-MDBT/1-MDBT 比值之间具有明显的线性正相关关系 [$R_o = 0.783 + 0.0392 \times (4-/1-MDBT)$],表明该比值受成熟度影响较为显著(图 11b).

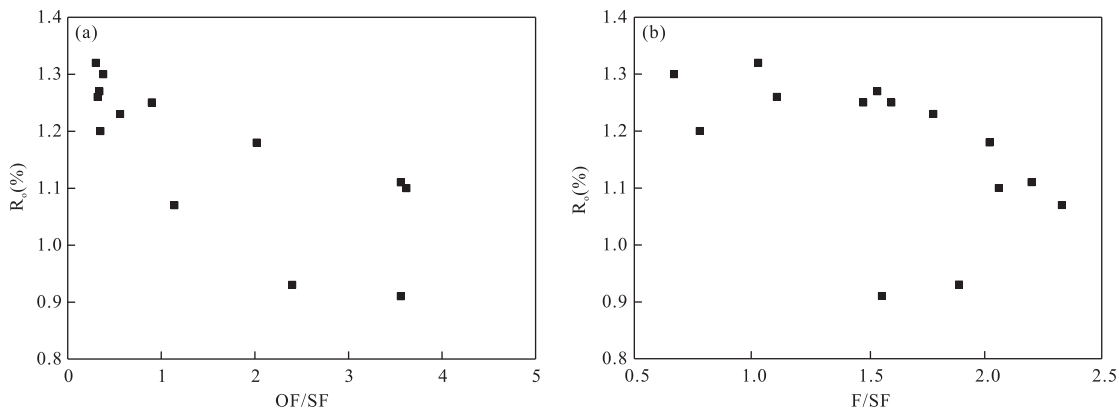


图 9 新场须五段泥岩氧芴/硫芴(a)和芴/硫芴(b)随成熟度的变化

Fig.9 Variations of OF/SF (a) and F/SF (b) with thermal maturity of the T_3x^5 mudstone in the Xinchang gas field

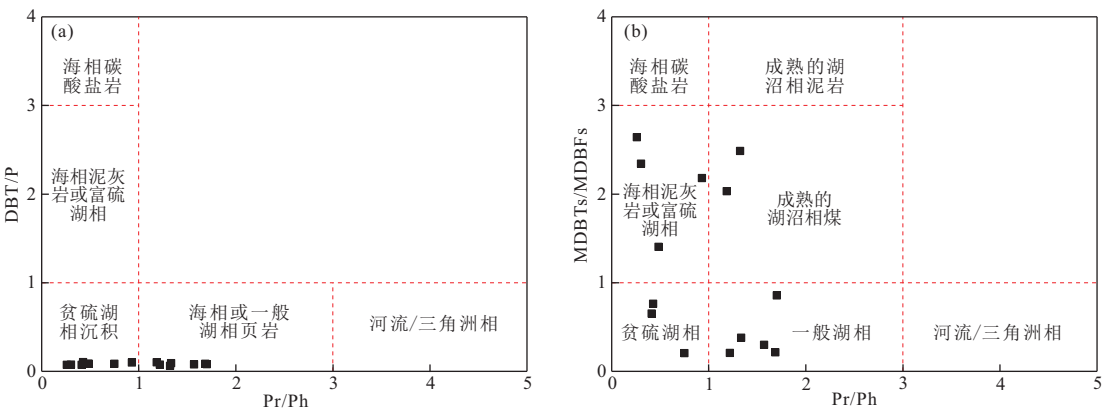


图 10 新场须五段泥岩 DBT/P(a)和 MDBTs/MDBFs(b)与 Pr/Ph 的关系

Fig.10 Correlations between DBT/P and Pr/Ph (a) and MDBTs/MDBFs and Pr/Ph (b) of the T₃x⁵ mudstone in the Xinchang gas field

底图 a 据 Hughes *et al.*(1995);底图 b 据 Radke *et al.*(2000)

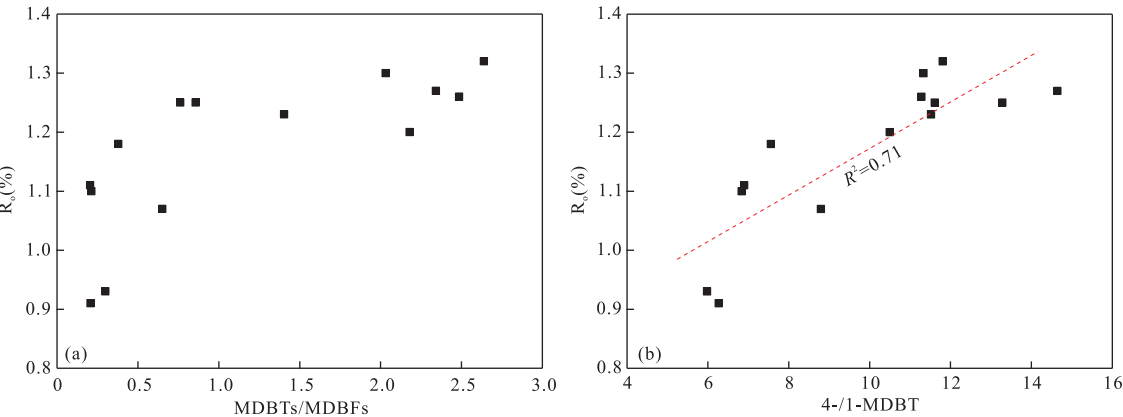


图 11 新场须五段泥岩 MDBTs/MDBFs(a)和 4-/1-MDBT(b)与 R_o 的关系

Fig.11 Correlations between MDBTs/MDBFs and R_o (a) and 4-/1-MDBT and R_o (b) of the T₃x⁵ mudstone in the Xinchang gas field

5 结论

(1)新场须五段泥岩 C₂₇—C₂₉ 规则甾烷中 C₂₉ 甾烷具有优势分布,C₂₇ 和 C₂₉ 甾烷相对含量平均分别为 31.2%和 44.6%,表明在有机质生源中,尽管陆源高等植物略占优势,但低等水生生物和藻类仍然具有一定的贡献.新场须五段不同成熟度的泥岩样品 9-MP/1-MP 比值介于 1.14~1.58,平均为 1.42,这与须五段泥岩中存在一定量的低等生物输入有关.

(2)新场须五段泥岩姥植比介于 0.26~1.70 之间,且主体高于 0.6,表明其主要沉积于一般湖泊环境,部分沉积于缺氧的盐水环境.伽马蜡烷/C₃₀ 藿烷比值介于 0.11~0.34,平均为 0.20,14 个样品中有 5 个大于 0.20,整体较高,反映出其水体可能受盐度较高影响而普遍发生了分层现象.须五段泥岩样品三

芴系列主体反映出煤系烃源岩的特征,DBT/P 和 MDBTs/MDBFs 比值主体表现出贫硫湖相和一般湖相沉积特征.

(3)须五段泥岩 MPI₁ 和 F₁ 均与成熟度呈正相关,与川北须家河组煤系烃源岩趋势线特征较为接近.新场须五段泥岩样品 4-/1-MDBT 比值也与成熟度之间具有明显的线性正相关关系[R_o = 0.783 + 0.039 2 × (4-/1-MDBT)].成熟度对一些芳烃化合物指标具有明显影响,如成熟度超过 1.25%的煤系烃源岩样品的三芴系列和成熟度超过 1.2%的样品的 MDBTs/MDBFs 比值不能直接用于沉积环境的判别.

致谢:刘光祥教授级高工对相关工作给予了悉心指导,样品采集与分析测试分别得到了中国石化西南油气分公司和无锡石油地质研究所的大力协助

与支持,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并深表谢意!

References

- Chen, D. X., Huang, X. H., Li, L. T., et al., 2010. Characteristics and History of Hydrocarbon Expulsion of the Upper Tertiary Source Rocks in the Western Sichuan Depression. *Natural Gas Industry*, 30(5): 41—45 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. L., Li, S. J., Alexander, R., 1994. Dinosterane as a Biomarker of Biogenic Origin and Sedimentary Environment. *Petroleum Exploration and Development*, 21(3): 60—64 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, K. M., Wang, T. G., Zhong, N. N., 1995. Geochemistry of Source Rocks. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Dai, J. X., 2016. Giant Coal-Derived Gas Fields and Their Gas Sources in China. Science Press, Beijing.
- Dai, J. X., Ni, Y. Y., Zou, C. N., et al., 2009. Stable Carbon Isotopes of Alkane Gases from the Xujiache Coal Measures and Implication for Gas-Source Correlation in the Sichuan Basin, SW China. *Organic Geochemistry*, 40(5): 638—646. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.01.012>
- Goodwin, N. S., Mann, A. L., Patience, R. L., 1988. Structure and Significance of C₃₀ 4-Methyl Steranes in Lacustrine Shales and Oils. *Organic Geochemistry*, 12(5): 495—506. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90159-3](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90159-3)
- Huang, S. W., Zhang, T. S., Wang, S. Y., et al., 2004. Research on Source Characteristics and Origin of Xujiache Formation, Upper Triassic in Chishui Area, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 15(6): 590—592 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W. Y., Meinschein, W. G., 1979. Sterols as Ecological Indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(5): 739—745. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90257-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90257-6)
- Hughes, W. B., Holba, A. G., Dzou, L. I. P., 1995. The Ratios of Dibenzothiophene to Phenanthrene and Pristane to Phytane as Indicators of Depositional Environment and Lithology of Petroleum Source Rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(17): 3581—3598. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00225-o](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00225-o)
- Jiang, X. G., Zeng, H. S., Zhu, J. H., et al., 2012. Dynamic Evolution Simulation of the Upper Triassic Source Rocks in Central Part of Western Sichuan Depression. *Oil & Gas Geology*, 33(4): 545—551 (in Chinese with English abstract).
- Kvalheim, O. M., Christy, A. A., Telnæs, N., et al., 1987. Maturity Determination of Organic Matter in Coals Using the Methylphenanthrene Distribution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(7): 1883—1888. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90179-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90179-7)
- Li, H., Lu, J. L., Li, R. L., et al., 2017. Generation Paleoenvironment and Its Controlling Factors of Lower Cretaceous Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks in Changling Depression, South Songliao Basin. *Earth Science*, 42(10): 1774—1786 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.539>
- Li, Q. F., Miao, S. D., Li, Y. X., et al., 2018. Reservoir Characteristics and Genesis of the Changxing Formation on the Margin of Yanting-Tongnan Trough, Central Sichuan Basin. *Earth Science*, 43(10): 3553—3567 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.313>
- Li, W., 2011. Formation of a Saline Environment and Evolution of a Sedimentary System in the Late Triassic Reservoirs of the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 31(9): 31—38 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Zhu, Y. M., Hao, F., et al., 2015. Thermal Evolution and Applications of Aromatic Hydrocarbons in Highly Mature Coal-Bearing Source Rocks of the Upper Triassic Xujiache Formation in the Northern Sichuan Basin. *Science China Earth Sciences*, 58(11): 1960—1969. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5084-8>
- Lin, R. Z., Wang, P. R., 1991. PAH in Fossil Fuels and Their Geochemical Significance. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 5(1-4): 257—262. [https://doi.org/10.1016/0743-9547\(91\)90034-u](https://doi.org/10.1016/0743-9547(91)90034-u)
- Peters, K. E., Moldowan, J. M., 1993. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossil in Petroleum and Ancient Sediments. Prentice Hall, New Jersey.
- Radke, M., Vriend, S. P., Ramanampisoa, L. R., 2000. Alkylidibenzofurans in Terrestrial Rocks: Influence of Organic Facies and Maturation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(2): 275—286. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00287-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00287-2)
- Radke, M., Welte, D. H., Willsch, H., 1982. Geochemical Study on a Well in the Western Canada Basin: Relation of the Aromatic Distribution Pattern to Maturity of Organic Matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(1): 1—10. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90285-x](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90285-x)
- Radke, M., Welte, D. H., Willsch, H., 1986. Maturity Parameters Based on Aromatic Hydrocarbons: Influence of the Organic Matter Type. *Organic Geochemistry*, 10(1—3): 51—63. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(86\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90008-2)
- Shen, Z. M., Liu, T., Lü, Z. X., et al., 2008. A Comparison

- Study on the Gas Source of Jurassic Natural Gas in the Western Sichuan Depression. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 577—582 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Z. M., Wei, J. H., Zhu, H. Q., et al., 2009. Comparative Research on Maturity Feature and Maturity Indicator of Coal Source Rock from West Sichuan Basin Depression. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 29(4): 83—88 (in Chinese with English abstract).
- Sinninghe Damsté, J. S., Kenig, F., Koopmans, M. P., et al., 1995. Evidence for Gammacerane as an Indicator of Water Column Stratification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(9): 1895—1900. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00073-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00073-9)
- Song, C. Y., Jin, H. R., Liu, X., et al., 2007. Distribution of Methyl Phenanthrene in Sediments and Its Impacting on Maturity Parameters. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(2): 183—187 (in Chinese with English abstract).
- Song, Z. X., Zhou, Z. M., 2013. Identification of Chief Hydrocarbon Source Rocks in Lishu Fault Depression and Their Geochemical Characteristics. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(4): 438—444 (in Chinese with English abstract).
- Summons, R. E., Volkman, J. K., Boreham, C. J., 1987. Dinosterane and Other Steroidal Hydrocarbons of Dinoflagellate Origin in Sediments and Petroleum. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(11): 3075—3082. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90381-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90381-4)
- Sun, L. N., Zhang, Z. N., Wu, Y. D., et al., 2015. Evolution Patterns and Their Significances of Biomarker Maturity Parameters—A Case Study on Liquid Hydrocarbons from Type III Source Rock under HTHP Hydrous Pyrolysis. *Oil & Gas Geology*, 36(4): 573—580 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T. G., Zhong, N. N., Hou, D. J., et al., 1995. Genetic Mechanism and Occurrence of Immature Hydrocarbon. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Wu, X. Q., Chen, Y. B., Liu, G. X., et al., 2017. Geochemical Characteristics and Origin of Natural Gas Reservoired in the 4th Member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin, China. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 2(2): 99—108. <https://doi.org/10.1016/j.jnggs.2017.05.001>
- Wu, X. Q., Chen, Y. B., Zhao, G. W., et al., 2017. Evaluation of Source Rocks in the 5th Member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang Gas field, the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28(11): 1714—1722 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X. Q., Huang, S. P., Liao, F. R., et al., 2010. Carbon Isotopic Characteristics of Jurassic Alkane Gases in the Sichuan Basin, China. *Energy Exploration & Exploitation*, 28(1): 25—36. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.28.1.25>
- Wu, X. Q., Wang, P., Liu, Q. Y., et al., 2016. The Source of Natural Gas Reservoired in the 5th Member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang Gas field, the Western Sichuan Depression and Its Implication. *Natural Gas Geoscience*, 27(8): 1409—1418 (in Chinese with English abstract).
- Xing, F. C., Hu, H. R., Hou, M. C., et al., 2018. Carbonate Reservoirs Cycles and Assemblages under the Tectonic and Palaeogeography Control: A Case Study from Sichuan Basin. *Earth Science*, 43(10): 3540—3552 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.310>
- Yin, J., Wang, Q., Hao, F., et al., 2017. Palaeolake Environment and Depositional Model of Source Rocks of the Lower Submember of Sha1 in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 42(7): 1209—1222 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.098>
- Zhang, L. P., Huang, D. F., Liao, Z. Q., 1999. Gammacerane—Geochemical Indicator of Water Column Stratification. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(1): 136—140 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M., Huang, G. H., Li, H. B., et al., 2012. Molecular Geochemical Characteristics of Gas Source Rocks from the Upper Triassic Xujiahe Formation Indicate Transgression Events in the Sichuan Basin. *Science China Earth Sciences*, 55(8): 1260—1268. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4408-1>
- Zhu, R. K., Zhao, X., Liu, L. H., et al., 2009. Depositional System and Favorable Reservoir Distribution of Xujiahe Formation in Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 36(1): 46—55 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. M., Gu, S. X., Li, Y., et al., 2012. Biological Organic Source and Depositional Environment of Over-Mature Source Rocks of Longtan Formation in Sichuan Basin. *Geochimica*, 41(1): 35—44 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈冬霞, 黄小惠, 李林涛, 等, 2010. 川西坳陷上三叠统烃源岩排烃特征与排烃史. *天然气工业*, 30(5): 41—45.

陈致林,李素娟,Alexander,R.,1994.甲藻甾烷——一种生源和沉积环境的生物标志物.石油勘探与开发,21(3):60—64.

程克明,王铁冠,钟宁宁,1995.烃源岩地球化学.北京:科学出版社.

黄世伟,张廷山,王顺玉,等,2004.四川盆地赤水地区上三叠统须家河组烃源岩特征及天然气成因探讨.天然气地球科学,15(6):590—592.

江兴歌,曾华盛,朱建辉,等,2012.川西坳陷中部上三叠统烃源岩动态演化模拟.石油与天然气地质,33(4):545—551.

李浩,陆建林,李瑞磊,等,2017.长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素.地球科学,42(10):1774—1786.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.539>

李秋芬,苗顺德,李永新,等,2018.四川盆地川中地区盐亭—潼南海槽台缘带二叠系长兴组储层特征及成因探讨.地球科学,43(10):3553—3567.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.313>

李伟,2011.四川盆地晚三叠世咸化环境的形成与沉积体系的演化特征.天然气工业,31(9):31—38.

沈忠民,刘涛,吕正祥,等,2008.川西坳陷侏罗系天然气气源对比研究.高校地质学报,14(4):577—582.

沈忠民,魏金花,朱宏权,等,2009.川西坳陷煤系烃源岩成熟度特征及成熟度指标对比研究.矿物岩石,29(4):83—88.

宋长玉,金洪蕊,刘璇,等,2007.烃源岩中甲基菲的分布及对成熟度参数的影响.石油实验地质,29(2):183—187.

宋振响,周卓明,2013.梨树断陷主力烃源岩判定及其地球化学特征.石油实验地质,35(4):438—444.

孙丽娜,张中宁,吴远东,等,2015.生物标志化合物热成熟度参数演化规律及意义——以 III 型烃源岩 HTHP 生排烃热模拟液态烃产物为例.石油与天然气地质,36(4):573—580.

王铁冠,钟宁宁,侯读杰,等,1995.低熟油气形成机理与分布.北京:石油工业出版社.

吴小奇,陈迎宾,赵国伟,等,2017.四川盆地川西坳陷新场气田上三叠统须家河组五段烃源岩评价.天然气地球科学,28(11):1714—1722.

吴小奇,王萍,刘全有,等,2016.川西坳陷新场气田上三叠统须五段天然气来源及启示.天然气地球科学,27(8):1409—1418.

邢凤存,胡华蕊,侯明才,等,2018.构造和古地理控制下的碳酸盐岩储集体旋回和集群性探讨:以四川盆地为例.地球科学,43(10):3540—3552.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.310>

殷杰,王权,郝芳,等,2017.渤海湾盆地饶阳凹陷沙一下亚段古湖泊环境与烃源岩发育模式.地球科学,42(7):1209—1222.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.098>

张立平,黄第藩,廖志勤,1999.伽马蜡烷——水体分层的地球化学标志.沉积学报,17(1):136—140.

朱如凯,赵霞,刘柳红,等,2009.四川盆地须家河组沉积体系与有利储集层分布.石油勘探与开发,36(1):46—55.

朱扬明,顾圣啸,李颖,等,2012.四川盆地龙潭组高热演化烃源岩有机质生源及沉积环境探讨.地球化学,41(1):35—44.