

四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组

烃源岩分子地球化学特征

吴小奇^{1,2}, 周小进^{1,2}, 陈迎宾^{1,2}, 王萍^{1,2}, 王彦青^{2,3}, 杨俊^{2,3}, 曾华盛^{1,2}

1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 江苏无锡 214126;
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 四川地区勘探开发研究中心, 成都 610041

摘要: 上三叠统须家河组是川西坳陷最重要的陆相烃源层系, 目前对其烃源岩分子地球化学特征的研究和认识较为薄弱。通过对川西坳陷须家河组不同层段烃源岩饱和烃和芳烃化合物组成的分析, 揭示了分子地球化学特征对烃源岩沉积环境和热演化特征的指示意义。须家河组二段至四段泥质烃源岩三环萜烷分布和二苯并噻吩/菲比值主体表现出湖相烃源岩的特征, 相对较高的伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值(0.16~0.23)和9-/1-甲基菲比值(1.16~1.41)表明水体盐度相对较高。甲基菲指数(MPI_1)、甲基菲分布分数(F_1)、甲基二苯并噻吩分布指数($MDBI$)等参数是有效的成熟度标尺, 其在 $R_o = 1.35\%$ 前后分别与成熟度表现出线性正相关和负相关。高一过成熟阶段须家河组烃源岩的 C_{27} - C_{29} 规则甾烷分布模式、“三芳”系列相对组成和甲基二苯并噻吩/甲基二苯并咪唑比值受成熟度影响较大而失真。

关键词: 分子地球化学; 生物标志物; 成熟度; 沉积环境; 须家河组; 上三叠统; 川西坳陷; 四川盆地

中图分类号: TE122.113

文献标识码: A

Molecular characteristics of source rocks in Upper Triassic Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

WU Xiaoqi^{1,2}, ZHOU Xiaojin^{1,2}, CHEN Yingbin^{1,2}, WANG Ping^{1,2},

WANG Yanqing^{2,3}, YANG Jun^{2,3}, ZENG Huasheng^{1,2}

1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
3. Research Center of Exploration and Development in Sichuan Basin, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract: The Upper Triassic Xujiahe Formation (T_{3x}) is the most important terrigenous stratum in the Western Sichuan Depression; however, it is still insufficient for the understanding of molecular compositional characteristics of its source rocks. Based on the analysis of both saturated and aromatic fractions of extracts of source rocks from different members of the Xujiahe Formation, the indication is then discussed for sedimentary environment and thermal evolution of source rocks. The distribution of tricyclic terpanes (TTs) and dibenzothiophene/phenanthrene (DBT/P) ratio of the argillaceous source rocks in 2nd to 4th members of the Xujiahe Formation mainly display the signatures of typical lacustrine source rocks, and the relatively high gammacerane/ C_{30} hopane (0.16–0.23), as well as 9-/1-methylphenanthrene (1.16–1.41) ratios suggest relatively high salinity of water body. The parameters such as methylphenanthrene index (MPI_1), methylphenanthrene distribution fraction (F_1), and methyl dibenzothiophene distribution index ($MDBI$) are effective for the evaluation of thermal maturity, and they show positively and negatively linear correlation with maturity degree before and after $R_o = 1.35\%$. The distribution pattern of C_{27} - C_{29} regular steranes, relative composition of three fluorine series, and methyl dibenzothiophene/methyl dibenzofuran ratios for high to over-maturity T_{3x} source rocks are distorted due to the effect of thermal maturation.

收稿日期: 2022-01-14; 修订日期: 2022-08-09。

作者简介: 吴小奇 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事油气地质与地球化学研究。E-mail: xqwu@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42172149 和 41872122) 资助。

Key words: molecular geochemistry; biomarker; maturity; sedimentary environment; Xujiahe Formation; Upper Triassic; Western Sichuan Depression; Sichuan Basin

上三叠统须家河组是四川盆地最重要的陆相层系,须家河组煤系烃源岩一方面与自身致密砂岩构成了良好的生储配置关系,另一方面也是上覆侏罗系气藏的主力气源^[1-3]。川西坳陷陆相层系勘探取得了丰硕的成果,在须家河组和侏罗系先后发现了新场、成都和中江这 3 个天然气探明储量超过 1 000×10⁸ m³ 的大气田,须家河组煤系是其主力烃源岩^[4-5]。前人在川西坳陷须家河组天然气成藏特征^[6-7]、流体地球化学特征和赋存状态^[8-10]、储层形成机理^[11]等方面开展了广泛的研究并取得了丰硕的成果,对烃源岩的研究主要侧重基本地球化学特征和生排烃评价^[12-14],而在分子地球化学特征方面研究较为薄弱。

分子地球化学研究在油源对比和揭示成藏机制等方面发挥了重要作用^[15]。以往对四川盆地须家河组分子地球化学特征的研究主要针对海侵事件的影响和芳烃热演化特征^[16-18]。沈忠民等^[19]和吴小奇等^[20]分别对川西坳陷 LS1 井须家河组芳烃成熟度指标和新场气田须家河组五段沉积环境开展了初步研究。相关研究主要针对单井或单一层系,样品主体为中低演化阶段($R_o < 1.4\%$),缺乏对整个川西坳陷须家河组不同层段沉积环境的综

合研究,以及生标参数对成熟度响应特征分析。因此,本文基于对川西坳陷须家河组不同钻井、不同层段烃源岩分子地球化学特征的分析,探讨饱和烃与芳烃特征对烃源岩沉积环境的指示意义,揭示成熟度对化合物热稳定性及相关指标适用性的影响,为更加全面深入认识须家河组烃源岩地球化学特征提供基础信息。

1 地质背景

川西坳陷位于四川盆地西部,其东侧与川中隆起以龙泉山断裂为界,西侧为龙门山造山带。研究区位于川西坳陷中部,可以划分为大邑—安县构造带、新场构造带、梓潼凹陷、成都凹陷、知新场构造、中江—回龙构造带等 6 个次级构造单元(图 1a)。受印支期华北板块与扬子板块碰撞以及龙门山逆冲推覆的影响,四川盆地中、上三叠统呈不整合接触(图 1b),四川盆地从海相克拉通沉积逐渐过渡为陆相沉积。川西坳陷在晚三叠世开始发生快速沉降,沉积了厚度巨大的上三叠统须家河组和侏罗系。四川盆地须家河组(T_3x)自下而上被划分为一至六段,其中顶部的须六段在川西坳陷须家河组中不发育,而底部的须一段为海陆过渡相沉积,常

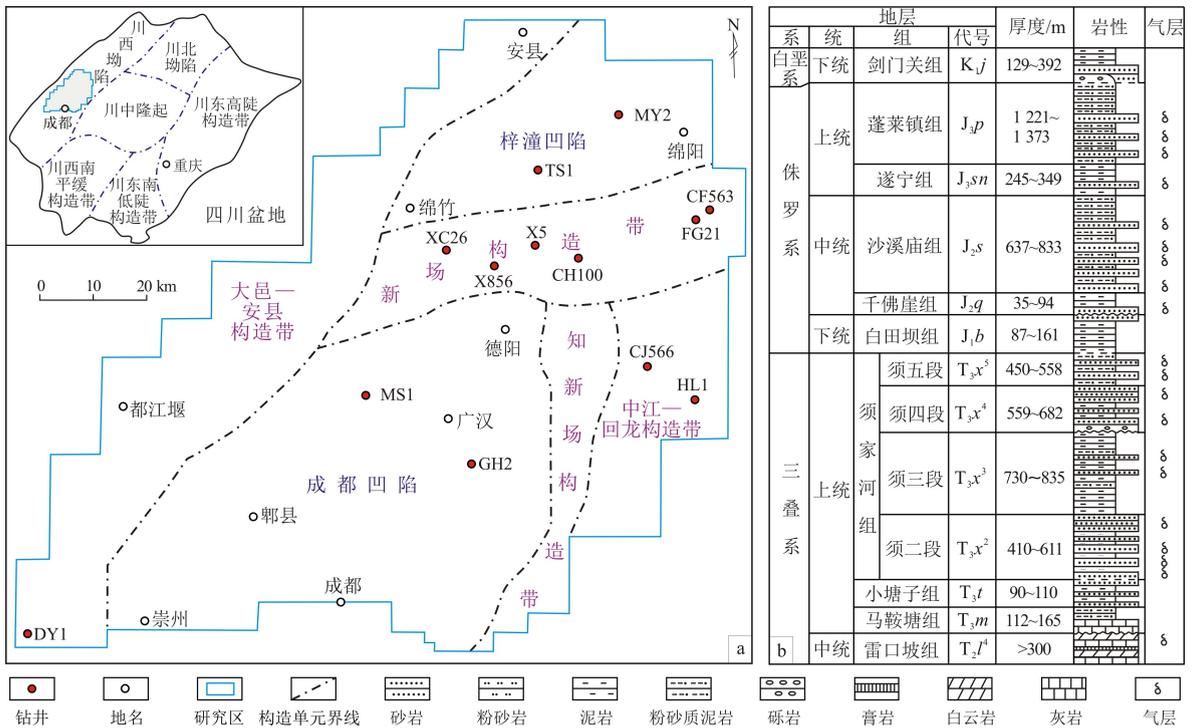


图 1 四川盆地川西坳陷中部构造单元和井位分布(a)与地层柱状图(b)
Fig.1 Distribution of tectonic units and wells (a) as well as stratigraphic column (b) in central part of Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

被称为马鞍塘组 (T_3m) 和小塘子组 (T_3t), 因此陆相层系仅发育须二—须五段 ($T_3x^2-T_3x^5$) (图 1b), 总厚度介于 1 800~2 500 m。须家河组整体为砂岩与煤系烃源岩不等厚互层, 其中烃源岩主要为暗色泥岩夹煤线, 在川西坳陷内厚度主体介于 400~1 000 m, 且自西向东逐渐减薄^[2]。

川西坳陷须家河组不同层段均发育有效烃源岩, 整体有机质丰度较高, 平均有机碳 (TOC) 含量均高于 1.0%; 干酪根碳同位素值普遍高于 -26‰, 显微组分中镜质组平均含量为 76.3%, 整体表现出腐殖型特征; 不同层段烃源岩镜质体反射率 (R_o) 具有一定的差异, 但整体处于成熟—过成熟演化阶段^[12,14]。须家河组烃源岩具有较好的生烃能力, 生气强度在川西坳陷普遍超过 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[13]。

2 样品分析

本次工作针对川西坳陷不同构造带须家河组须二—须四段, 分别采集了 10 个泥岩样品开展岩石热解分析, 14 个泥岩样品开展 TOC 含量、镜质体

反射率和分子地球化学分析。样品的分析测试均在中国石化油气成藏重点实验室进行。岩石热解分析采用 Rock-Eval 6 热解仪, TOC 含量和镜质体反射率测定分别采用 CS-200 碳硫分析仪和 MPV-III 型显微光度计, 利用 Agilent 7890A 型气相色谱仪进行饱和烃色谱分析, 利用 Agilent 6890/5973 型色谱—质谱联用仪进行饱和烃和芳烃组分的色谱—质谱分析, 测试结果见表 1—表 3。

本次分析的泥岩样品常规 TOC 含量为 0.64%~2.97% (表 2), 平均 TOC 为 1.51%, 均为有效烃源岩。镜质体反射率 (R_o) 表现出从须四—须二段逐渐增大的趋势, 其中须四段泥岩 R_o 为 1.09%~1.66%, 平均为 1.44%, 明显低于须二、三段烃源岩的 R_o 值 (2.25%~2.57%) (表 2), 较高的成熟度也与热解样品 T_{max} 值 [482~540 °C, 平均 501 °C (表 1)] 特征一致。受成熟度较高影响, 泥岩样品 S_1 (0.01~0.86 mg/g, 平均 0.17 mg/g) 和 I_H (22~90 mg/g, 平均 45 mg/g) 均较低 (表 1)。结合前期对新场须五段相对低演化烃源岩 (R_o 平均为 1.17%) 的研究^[20],

表 1 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组泥岩热解参数

Table 1 Rock-Eval parameters of T_3x mudstones from Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

构造单元	井号	深度/m	层位	$S_1/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$S_2/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$S_3/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$T_{\text{max}}/$ °C	$\omega(\text{TOC})/$ %	$I_H/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$I_0/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
新场构造带	X856	3 454.81	T_3x^4	0.12	0.50	0.15	492	1.06	47	14
	X856	3 460.66	T_3x^4	0.11	0.92	0.10	484	1.66	55	6
	X856	4 722.13	T_3x^2	0.06	1.78	0.26	540	8.13	22	3
成都凹陷	MS1	4 584.62	T_3x^4	0.05	0.37	0.26	511	1.15	32	23
	MS1	4 706.00	T_3x^3	0.04	0.64	0.25	514	1.96	33	13
	MS1	4 745.00	T_3x^3	0.04	0.61	0.28	517	2.00	30	14
中江—回龙构造带	HL1	4 172.00	T_3x^2	0.12	0.76	0.32	490	1.61	47	20
大邑—安县构造带	DY1	3 882.87	T_3x^4	0.25	2.70	0.10	482	3.88	70	3
梓潼凹陷	MY2	3 530.00	T_3x^4	0.01	0.13	0.94	492	0.53	25	177
	MY2	3 801.90	T_3x^4	0.86	18.39	0.20	484	20.53	90	1

表 2 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组泥岩饱和烃地球化学参数

Table 2 Geochemical parameters of saturated hydrocarbons in T_3x mudstones from Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

构造单元	井号	深度/m	层位	$\omega(\text{TOC})/$ %	$R_o/$ %	OEP	CPI	Pr/ nC ₁₇	Ph/ nC ₁₈	Pr/ Ph	$C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/$ (20S+20R)	$C_{29}\alpha\beta\beta/$ ($\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha$)	$C_{24}\text{TeT}/$ $C_{26}\text{TT}$	$T_s/$ T _m	伽马蜡烷/ $\alpha\beta C_{30}$ 藿烷	$\alpha\alpha\alpha C_{27}/$ %	$\alpha\alpha\alpha C_{28}/$ %	$\alpha\alpha\alpha C_{29}/$ %	$C_{29}/$ C_{27}
新场构造带	CF563	3 509.7	T_3x^4	1.18	1.09	0.54	1.29	0.68	1.06	0.73	0.52	0.41	0.44	0.81	0.19	31.5	36.3	32.2	1.02
	CF563	3 894.1	T_3x^4	2.97	1.35	0.89	1.21	0.47	0.77	0.74	0.47	0.38	0.51	0.86	0.20	36.6	30.2	33.2	0.91
	FG21	3 730	T_3x^4	0.79	1.37	0.92	1.39	0.71	1.20	0.47	0.52	0.43	0.44	0.43	0.23	24.7	40.7	34.7	1.40
	CH100	4 096	T_3x^4	0.71	1.66	0.42	0.84	0.79	1.38	0.55	0.53	0.45	0.46	0.84	0.18	31.0	36.0	33.0	1.06
	X5	3 736	T_3x^4	0.74	1.38	0.94	1.08	0.89	1.42	0.59	0.48	0.41	0.48	0.75	0.20	30.9	34.3	34.8	1.13
	XC26	3 666	T_3x^4	1.65	1.32	0.72	0.84	0.50	0.85	0.80	0.51	0.41	0.46	0.74	0.21	30.1	36.4	33.6	1.12
成都凹陷	MS1	4 312.75	T_3x^4	2.46	1.48	0.92	1.00	0.77	1.25	0.52	0.48	0.43	0.50	0.90	0.16	31.2	34.4	34.4	1.10
	MS1	5 120	T_3x^3	2.28	2.25	1.04	1.24	0.52	0.79	0.41	0.51	0.41	0.46	0.93	0.19	34.4	33.4	32.2	0.94
	GH2	3 924	T_3x^4	1.37	1.59	0.76	1.07	0.66	1.19	0.61	0.47	0.38	0.50	0.95	0.16	38.6	30.0	31.4	0.81
梓潼凹陷	MY2	3 802	T_3x^4	2.11	1.52	0.68	1.54	0.84	1.79	0.62	0.48	0.40	0.48	0.93	0.17	39.0	30.4	30.6	0.78
	MY2	3 919	T_3x^4	1.94	1.55	0.90	1.47	0.61	1.29	0.44	0.51	0.41	0.49	0.93	0.19	34.9	32.5	32.6	0.93
	MY2	3 528	T_3x^4	0.64	1.50	1.21	1.32	0.75	1.40	0.37	0.47	0.39	0.47	0.91	0.18	36.7	30.8	32.4	0.88
	TS1	4 715	T_3x^3	1.74	2.26	1.08	0.68	0.90	0.81	0.54	0.54	0.42	0.57	0.96	0.17	33.0	33.3	33.7	1.02
	TS1	5 387	T_3x^2	0.60	2.57	0.98	1.49	0.66	0.88	0.71	0.53	0.38	0.55	0.87	0.19	35.6	31.7	32.7	0.92

表3 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组泥岩芳烃分子地球化学特征
Table 3 Molecular geochemical characteristics of aromatic hydrocarbons in T_3x mudstones from Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

构造单元	井号	深度/m	层位	MPI_1	F_1	DBT/Phen	MDBTs/MDBFs	F/%	OF/%	SF/%	F/SF	OF/SF	4-MDBT/1-MDBT	MDBI	3-MCH/1-MCH	9-MP/1-MP
新场构造带	CF563	3 509.7	T_{3x}^4	1.436	0.787	0.10	4.66	58.5	6.8	34.7	1.68	0.20	30.39	0.42	6.67	1.41
	CF563	3 894.1	T_{3x}^4	1.611	0.857	0.08	10.81	39.0	6.5	54.6	0.71	0.12	52.04	0.44	9.31	1.21
	FG21	3 730	T_{3x}^4	1.470	0.797	0.10	10.52	42.8	5.9	51.3	0.84	0.12	19.45	0.44	7.58	1.28
	CH100	4 096	T_{3x}^4	1.196	0.789	0.13	16.94	22.5	4.4	73.1	0.31	0.06	22.80	0.40	8.21	1.30
	X5	3 736	T_{3x}^4	1.477	0.788	0.10	8.35	46.8	6.0	47.2	0.99	0.13	27.05	0.44	8.30	1.40
成都凹陷	MS1	4 312.75	T_{3x}^4	1.438	0.810	0.10	15.95	31.5	4.5	64.0	0.49	0.07	32.51	0.43	8.02	1.32
	MS1	5 120	T_{3x}^3	1.070	0.784	0.21	39.11	18.5	1.8	79.7	0.23	0.02	21.84	0.36	6.23	1.26
梓潼凹陷	MY2	3 802	T_{3x}^4	1.459	0.791	0.09	6.13	59.1	5.0	35.9	1.65	0.14	35.96	0.42	6.94	1.35
	TS1	4 715	T_{3x}^3	0.453	0.721	0.07	2.53	43.7	18.5	37.8	1.16	0.49	13.50	0.27	4.98	1.16

注: $MPI_1=1.5(2-MP+3-MP)/(P+1-MP+9-MP)$; $F_1=(2-MP+3-MP)/(1-MP+2-MP+3-MP+9-MP)$; $MDBI=4-MDBT/(DBT+1-MDBT+2-MDBT+3-MDBT+4-MDBT)$ 。

对川西坳陷须家河组烃源岩分子地球化学特征开展综合分析。

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

川西坳陷须家河组正构烷烃系列的碳数主要分布在 $C_{15}-C_{30}$ 之间,均表现为单峰式,主峰碳数多数介于 $C_{16}-C_{18}$,少量样品主峰碳数超过 C_{20} (图2)。OEP 介于 0.42~1.21, CPI 介于 0.84~1.54 (表2)。在饱和烃气相色谱图上, C_{25} 以上的正构烷烃含量很低(图2),因此计算所得 CPI 仅具有参考意义。

在类异戊二烯烷烃组成方面,川西坳陷须二—

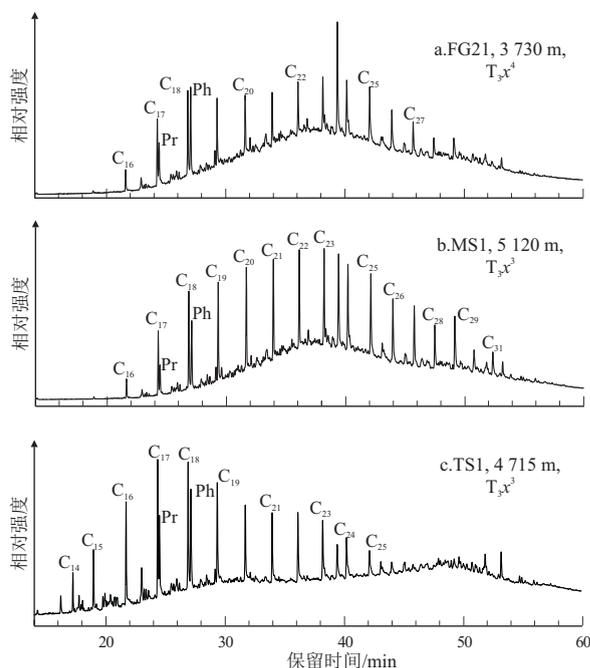


图2 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩饱和烃气相色谱图

Fig.2 Gas chromatograph of saturated hydrocarbons in T_3x source rocks from Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

须四段泥岩 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值分别为 0.47~0.89 和 0.77~1.79; Pr/Ph 比值介于 0.37~0.81, 平均为 0.60, 且与 R_o 没有明显的相关性(表2), 整体略低于须五段泥岩的值(0.26~1.57, 平均为 0.97) [20]。相对较低的 Pr/Ph 比值反映了须家河组烃源岩主要沉积于一般湖泊环境和缺氧盐水环境 [21]。

对 III 型烃源岩开展的半开放体系下高温高压热模拟实验研究表明, Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值随着模拟温度升高表现出先逐渐降低后突然上升的特征, 这与高碳数烃类在不同温度下的裂解差异性有关 [22]。川西坳陷须家河组煤系烃源岩有机质主体为 III 型, 部分为 II₂ 型 [2, 14], 但其在 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 相关图(图3)上主体并没有表现出典型 III 型有机质特征, 这可能主要源自 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值随成熟度升高的变化差异 [20]。与演化程度较低的须五段烃源岩相比, 须二—四段烃源岩主

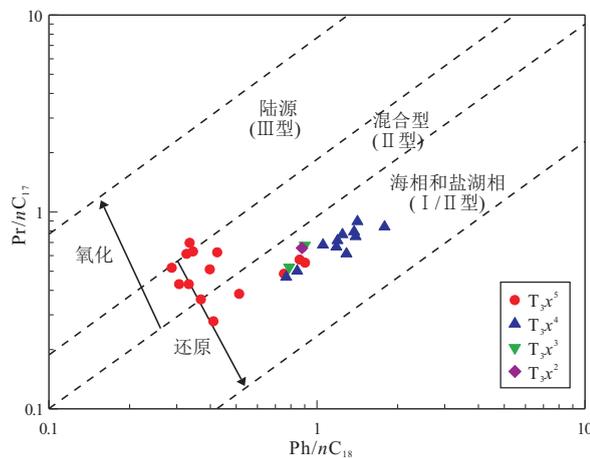


图3 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 相关图
 T_3x^5 据参考文献 [20], 下同。

Fig.3 Diagram of Pr/nC_{17} vs. Ph/nC_{18} for T_3x source rocks in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

体具有更高的 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值(图 3), 与高温热模拟实验结果^[22]一致, 反映出成熟度的影响。然而, 成熟度更高的须二、三段烃源岩 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值主体低于须四段烃源岩, 表明类异戊二烯烷烃组成受到了成熟度之外其他因素的影响。ZHANG 等^[16]研究认为, 镜质体反射率普遍高于 1.2% 的须家河组烃源岩其较高的 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值与柴达木盆地石炭系海陆交互相含煤烃源岩一致, 反映了须家河组烃源岩可能受到海水的作用。

在 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值相关图上, 须二—须四段烃源岩均表现出海相或盐湖相的特征, 与须五段烃源岩主体表现出混合型的特征有明显的差异(图 3)。沉积水体盐度差异对类异戊二烯烷烃组成特别是 Ph/nC_{18} 和 Pr/Ph 比值的相对大小具有显著的影响^[23]。在 Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18} 和 Pr/Ph 相对组成方面, 与须五段烃源岩相比, 须二—须四段烃源岩 Ph/nC_{18} 所占比例相对较高, Pr/Ph 所占比例相对较低, 表现出半咸水—咸水沉积环境的特征, 与须五段主体表现出淡水湖相环境有一定的差异(图 4)。

3.2 甾烷类化合物

在甾烷类化合物组成方面, 川西坳陷须家河组泥岩中重排甾烷含量较低、规则甾烷含量相对较高(图 5)。 C_{27} 和 C_{29} 规则甾烷($\alpha\alpha R$) 主体分别来自低等水生生物、藻类和高等植物, 因而可以根据二

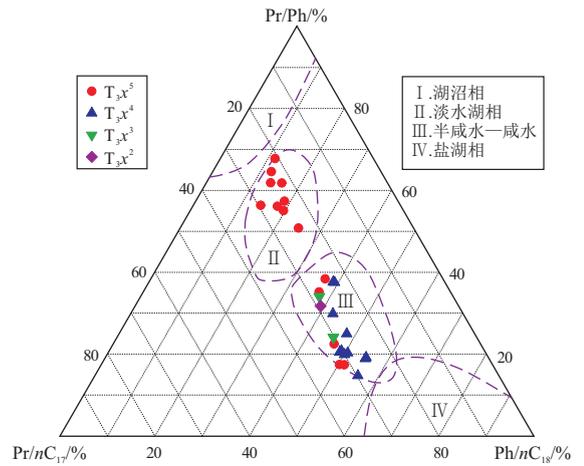


图 4 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩 Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18} 和 Pr/Ph 三角图
底图据参考文献^[23]。

者相对比例或 C_{27} — C_{29} 规则甾烷分布模式来判定生源输入^[24]。尽管须家河组泥岩沉积水体环境的差异(图 4)会导致生源输入存在一定的差异, 但 C_{29}/C_{27} 规则甾烷比值也明显受到了成熟度的影响^[20]。

须五段烃源岩沉积环境整体较为一致, 以淡水湖相为主(图 4), R_0 整体较低($<1.3\%$)^[20], 且 C_{29}/C_{27} 规则甾烷比值随 R_0 升高从大于 2.5 快速降低到 1 左右(图 6)。这表明在中低演化程度($R_0 < 1.3\%$)下, 须家河组烃源岩 C_{29}/C_{27} 规则甾烷比值变化明显受

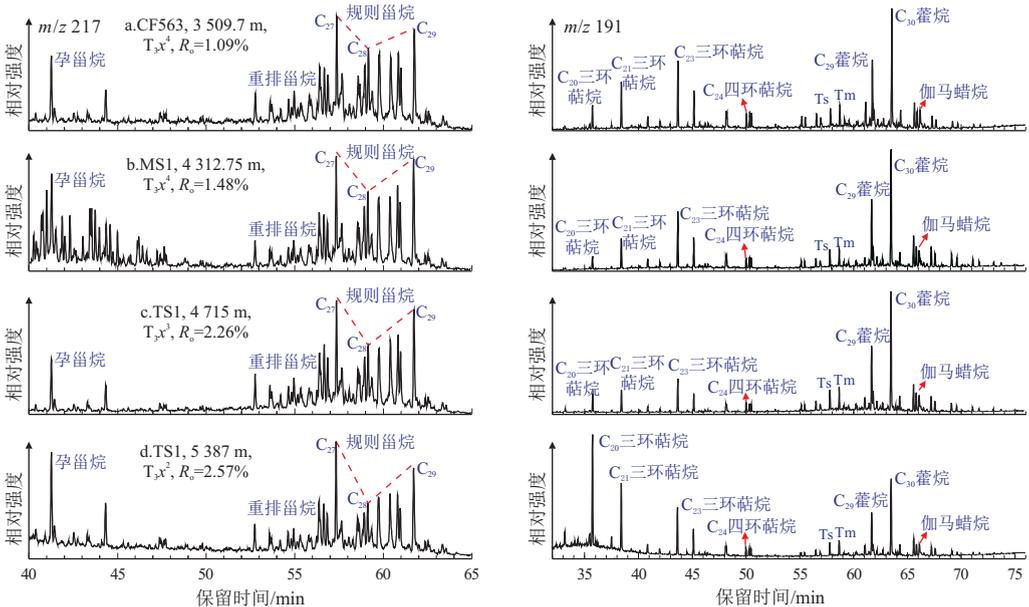


图 5 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩甾烷(m/z 217)和萜烷(m/z 191)质量色谱图

Fig.5 Mass chromatograms of sterane (m/z 217) and terpane (m/z 191) for T_3x source rocks in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

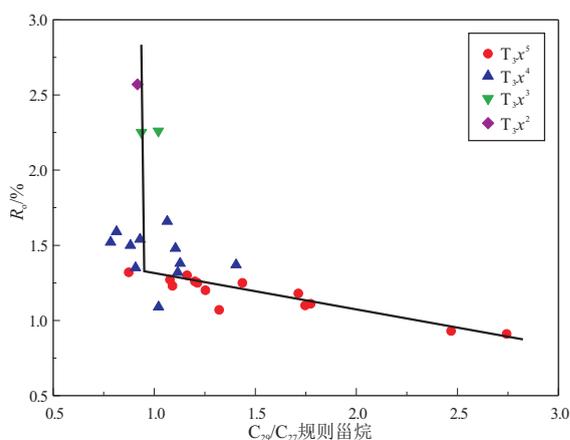


图6 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩 R_o 和 C_{29}/C_{27} 规则甾烷比值相关图

Fig.6 Diagram of R_o vs. C_{29}/C_{27} regular sterane ratio for T_{3x} source rocks in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

到了成熟度的控制。须二—须四段烃源岩整体形成于半咸水—咸水环境(图4),除个别样品外, R_o 整体较高且变化范围较广(主体为1.32%~2.57%),但其 C_{29}/C_{27} 规则甾烷变化明显收窄(主体为0.78~1.13),二者不具有明显的相关性(图6),且纵向(如梓潼凹陷须二—须四段烃源岩)和横向(如新场构造带、成都凹陷和梓潼凹陷须四段烃源岩)对比均显示出一致的 C_{29}/C_{27} 规则甾烷比值。这表明在相对高演化阶段($R_o \geq 1.3\%$), C_{29}/C_{27} 规则甾烷比值变化对成熟度变化不敏感。因此,须二—须四段与须五段烃源岩 C_{29}/C_{27} 规则甾烷比值的差异主要缘自沉积环境和生源差异(图3-4)的影响。

此外,川西须二—须四段烃源岩 $C_{29} \alpha\alpha\alpha/20S/(20S+20R)$ 比值为0.47~0.54, $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 比值为0.38~0.45(表2),表明甾烷异构化作用均达到了成熟阶段的平衡,与须五段烃源岩^[20]特征一致。

3.3 萜烷类化合物

C_{19} — C_{26} 三环萜烷(TT)系列在烃源岩中普遍存在,其中煤系烃源岩中 C_{19} TT— C_{26} TT其相对丰度随碳数增大逐渐降低,且 C_{24} 四环萜烷(C_{24} TeT)相对丰度远高于相邻的 C_{26} TT;而湖相烃源岩中 C_{19} TT— C_{26} TT系列常以 C_{21} TT或 C_{23} TT为主峰呈近似正态分布^[25]。川西须家河组泥岩三环萜烷多数具有 C_{23} TT优势分布(图5),表现出典型湖相烃源岩的特征。TS1井须二段样品具有 C_{20} TT优势分布,且随碳数增大丰度逐渐降低(图5d),与煤系烃源岩具有一定的类似特征。不同地区须二—须四段烃源岩 C_{24} TeT/ C_{26} TT比值基本一致,介于0.44~

0.57(表2),与湖相烃源岩特征一致。须家河组泥岩Ts/ T_m 比值介于0.43~0.96(表2), C_{30} 藿烷含量明显高于 C_{29} 藿烷含量,且随着碳数的增加,高碳数(C_{30} — C_{35})藿烷化合物的含量逐渐降低(图5)。

由于伽马蜡烷的形成与水体分层紧密相关^[26],而盐度较高会导致水体发生分层现象,因而伽马蜡烷含量较高往往指示了沉积水体盐度较高。川西须家河组泥岩伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值介于0.16~0.23(表2),平均为0.19,相对较高的该比值表明须家河组沉积期水体盐度相对较高。目前对该期较高水体盐度的原因仍存在一定争议,如饱和烃与芳烃化合物地球化学特征反映了其可能是受到了海侵事件的影响^[16-17],而基于沉积体系演化特征分析则认为须家河组沉积水体长期盐度较高可能缘自中下三叠统雷口坡组—嘉陵江组膏岩与盐岩的溶蚀与输入^[27]。

4 芳烃化合物组成

川西坳陷须家河组泥岩中的芳烃化合物主要组分为菲、蒽、萘、联苯、三茚等系列化合物,其中菲系列化合物占优势分布(图7)。在高演化阶段,持续脱氢导致聚合反应的发生,因而须家河组烃源岩芳烃化合物中相对富集高碳环数组分^[18]。

4.1 菲系列

菲及其烷基取代物的分布和组成往往受沉积环境、成熟度等影响。对甲基菲(MP)异构体而言,富含菌类和藻类的半咸水—咸水环境有利于形成9-甲基菲(9-MP),而以高等植物为主要生源的弱氧化—弱还原环境中1-甲基菲(1-MP)比9-MP丰富^[28]。川西须三、四段泥岩9-MP/1-MP分别介于1.16~1.26和1.21~1.41(表3,图7),分布范围略窄于新场须五段泥岩的范围(1.14~1.58^[20])。9-MP/1-MP与 R_o 没有明显的相关性(图8),9-MP/1-MP低于1.3的样品在须三、四、五段均有分布。这表明川西须家河组泥岩菲的烷基取代物除了受成熟度的一定影响外,沉积环境也发挥了重要作用。整体较高的9-MP/1-MP比值反映其沉积于半咸水—咸水环境,富含菌类和藻类等低等生物,与类异戊二烯烷烃组成指示结果(图3-4)一致。

甲基菲指数 $MPI_1 [1.5(2-MP+3-MP)/(P+1-MP+9-MP)]$ 受热演化程度的控制,在成熟度为1.35%前后表现出两阶段线性变化特征^[29]。前人对川西坳陷成熟阶段须家河组烃源岩的研究发现,其 MPI_1 值与深度和成熟度均呈正相关^[19-20]。综

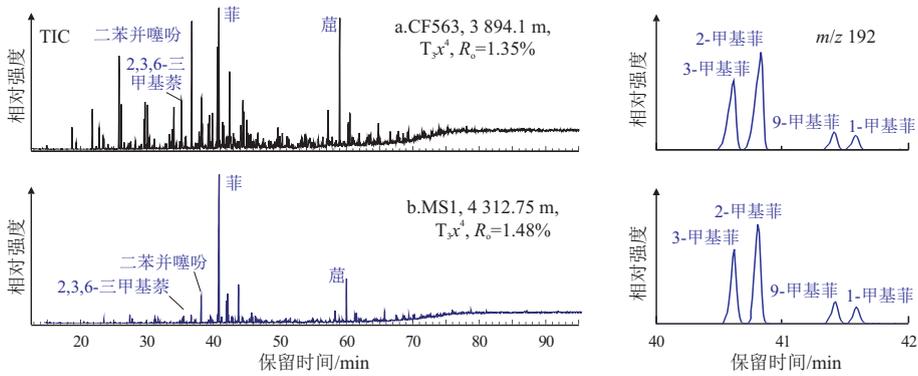


图 7 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩芳烃总离子流(TIC)与甲基菲(m/z 192)质量色谱图

Fig.7 Total ion current (TIC) of aromatic hydrocarbons and mass chromatograms of methylphenanthrene in T_3x source rocks in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

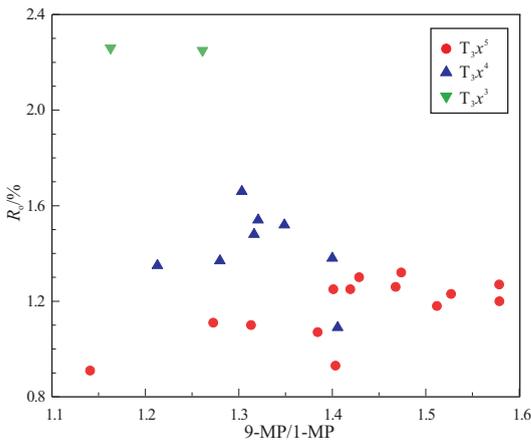


图 8 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩 R_o 与 9-MP/1-MP 相关图

Fig.8 Diagrams of R_o vs. 9-MP/1-MP for T_3x source rocks in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

合成熟与高一过成熟阶段样品的分析发现,川西须家河组烃源岩 MPI_1 与成熟度之间同样表现出两阶段线性变化特征:当 R_o 低于 1.35% 时, $R_o = 0.39 \times MPI_1 + 0.79$; 当 R_o 达到 1.35% 之后, $R_o = -0.91MPI_1 + 2.81$ (图 9a)。

甲基菲分布分数 F_1 [(2-MP+3-MP)/(1-MP+

2-MP+3-MP+9-MP)] 也是表征成熟度的常用参数^[30]。新场地区须五段成熟阶段的烃源岩样品其 F_1 与 R_o 也表现出明显的正相关^[20]。川西须家河组烃源岩 F_1 整体也表现出两阶段线性变化的特征:当 R_o 低于 1.35% 时, $R_o = 0.83F_1 + 0.69$; 当 R_o 达到 1.35% 之后, $R_o = -8.44F_1 + 8.40$ (图 9b)。

4.2 “三芬”系列

芳烃的“三芬”系列即芬(F)、氧芬(OF)和硫芬(SF)系列的分布受沉积环境的控制,因而其相对组成常被用来指示沉积环境^[31-32]。四川盆地须家河组烃源岩“三芬”系列具有高硫芬与芬、低氧芬的特征,尽管有学者认为可能与曾经遭受过海侵作用有关^[17],但成熟度较高的川西坳陷须家河组烃源岩具有明显较低的氧芬含量^[16],也可能与氧芬的热稳定性相对较低^[33]有关。川西新场气田须家河组五段烃源岩 F/SF 和 OF/SF 比值随成熟度增大而逐渐降低,反映出“三芬”系列的相对含量受成熟度控制较为明显^[20]。

川西坳陷须家河组烃源岩在“三芬”系列分布图(图 10)上表现出不同的特征,其中须五段烃源岩主体表现出煤系烃源岩的特征,而须三和须四段

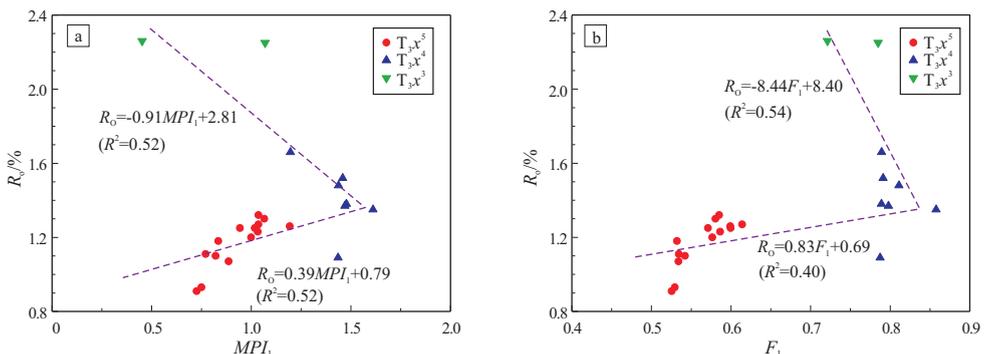


图 9 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩 R_o 和 MPI_1 (a) 及 F_1 (b) 相关图

Fig.9 Diagrams of R_o vs. MPI_1 (a) and F_1 (b) for T_3x source rocks in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

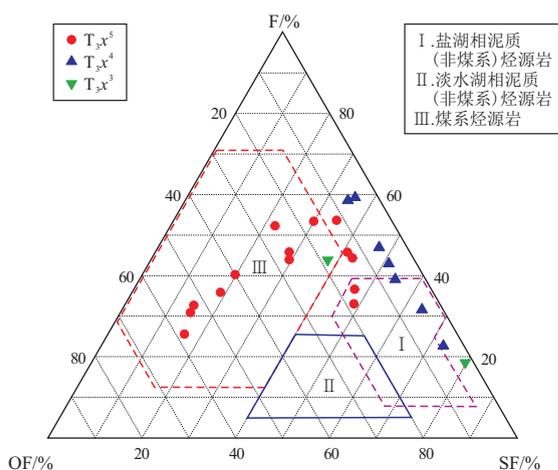
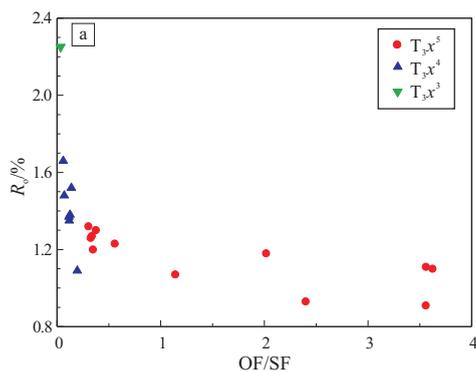


图 10 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩“三芴”系列三角图
底图据参考文献[32]。

Fig.10 Ternary diagram of three-fluorene series for T_{3x} source rocks in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

样品则多数具有明显偏低的氧芴相对含量,与典型煤系烃源岩有明显差异,甚至部分样品硫芴相对含量较高,表现出盐湖相泥质烃源岩的特征(图10)。川西须三、四段烃源岩主体沉积于半咸水—咸水环境,与典型盐湖相烃源岩有明显不同(图4),因此较高的硫芴相对含量可能主要缘自较高的成熟度。

须家河组烃源岩 OF/SF 和 F/SF 比值均与 R_o 表现出明显的负相关性(图11)。当 $R_o < 1.3\%$ 时, OF/SF 比值随 R_o 增大而逐渐降低;当 $R_o \geq 1.3\%$ 时, OF/SF 比值基本小于 0.2,即氧芴相对含量明显较低(图11a)。F/SF 比值同样随着 R_o 增大而逐渐降低,当 $R_o \geq 1.3\%$ 时, F/SF 比值普遍小于 1,即硫芴相对含量高于芴的相对含量(图11b)。由此可见,部分样品“三芴”系列中硫芴相对含量较高,甚至在三角图上落在盐湖相泥质烃源岩区域(图10),主要是受成熟度较高的影响。因此,对高一



过成熟阶段 ($R_o \geq 1.3\%$) 的烃源岩而言,利用“三芴”系列分布三角图进行沉积环境判识容易失真。

尽管硫酸盐热化学还原 (TSR) 作用可能导致较高的硫芴相对含量,但考虑到川西坳陷须家河组整体以陆相为主,地层中膏岩不发育,地层水均为 $CaCl_2$ 型, SO_4^{2-} 含量很低^[10],且天然气中也均不含有 H_2S ^[5],因此不具备 TSR 反应发生的条件。

4.3 二苯并噻吩和二苯并呋喃类

二苯并噻吩和二苯并呋喃类化合物的含量往往与沉积环境相关^[34], DBT/Phen (二苯并噻吩/菲) 和 MDBTs/MDBFs (甲基二苯并噻吩/甲基二苯并呋喃) 常与 Pr/Ph 比值一起被用于揭示烃源岩沉积环境^[33,35]。DBT/Phen 受成熟度影响不明显^[20],但 MDBTs/MDBFs 受成熟度控制,主要是由于二苯并呋喃类化合物的热稳定性相对较低^[34]。

川西坳陷须家河组烃源岩 DBT/Phen 比值介于 0.07~0.21,主体介于 0.07~0.11,且不同层段不同成熟度烃源岩的 DBT/Phen 比值基本一致,均表现出贫硫湖相或一般湖相的特征(图12a),且与成熟度没有明显的相关性。须家河组烃源岩 MDBTs/MDBFs 比值介于 0.21~39.11,指示的沉积环境类型较为广泛(图12b);该比值与 R_o 具有明显的正相关性(图13a),反映出成熟度的明显影响,这可能与 MDBFs 受热发生裂解有关。由此可见,对于 $R_o \geq 1.3\%$ 的样品如川西须三、四段烃源岩,其 MDBTs/MDBFs 比值受成熟度影响明显增大,甚至表现出海相碳酸盐岩的特征(图12b),与实际不符,因而不能直接用于反映沉积环境。

4-/1-MDBT (甲基二苯并噻吩) 比值受到有机相和成熟度的双重控制^[36],如川北须家河组烃源岩 4-/1-MDBT 比值在 $R_o = 1.8\%$ 前后分别表现出增大和降低的趋势,且在 R_o 值接近的条件下,煤的 4-/1-MDBT 比值明显高于泥岩^[18]。川西须家河

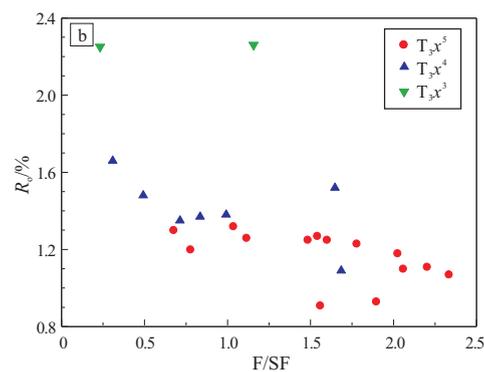


图 11 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩 R_o 与 OF/SF (a) 和 F/SF (b) 比值相关图

Fig.11 Diagrams of R_o vs. OF/SF (a) and F/SF (b) for T_{3x} source rocks in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

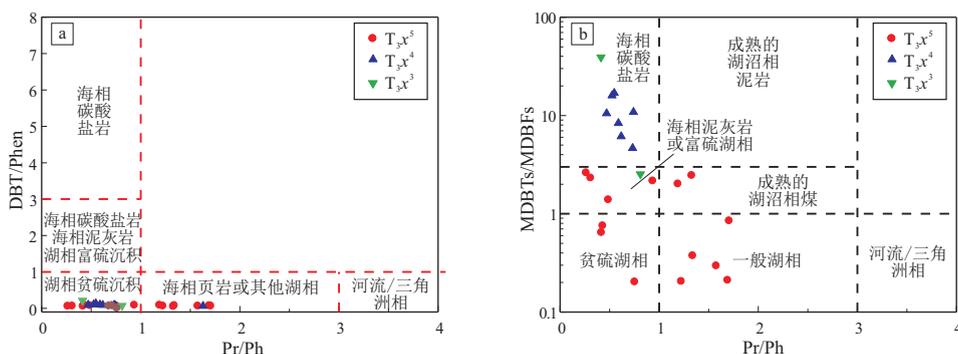


图 12 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩 DBT/Phen 与 Pr/Ph(a) 和 MDBTs/MDBFs 与 Pr/Ph(b) 相关图
 底图分别据参考文献[35]和[33]。

Fig.12 Diagrams of DBT/Phen vs. Pr/Ph (a) and MDBTs/MDBFs vs. Pr/Ph (b) for T_3x source rocks in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

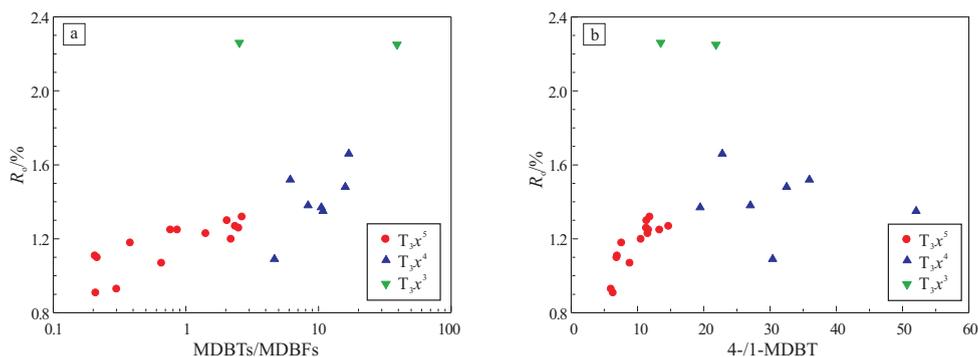


图 13 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩 R_0 与 MDBTs/MDBFs (a) 和 4-/1-MDBT (b) 相关图

Fig.13 Diagrams of R_0 vs. MDBTs/MDBFs (a) and 4-/1-MDBT (b) for T_3x source rocks in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

组泥岩 4-/1-MDBT 比值随 R_0 增大同样表现出两阶段变化的特征,在 $R_0 = 1.6\%$ 前后,二者分别表现出正相关和负相关关系(图 13b),表明 4-/1-MDBT 比值受到了成熟度的明显影响。

甲基二苯并噻吩分布指数 $MDBI$ [4-MDBT/(DBT+1-MDBT+2-MDBT+3-MDBT+4-MDBT)] 受有机质类型和沉积环境影响较小,其主要受热力作用控制,在 R_0 为 0.67%~1.22% 内是可靠的成熟度定量标尺($R_0 = 1.33MDBI + 0.48$),且尤其适合 II₂

和 III 型有机质^[37]。对川西坳陷须家河组泥质烃源岩而言, $MDBI$ 与 R_0 的相关性表现出明显的两阶段差异演化特征:在 $R_0 < 1.35\%$ 范围内, $MDBI$ 随着 R_0 升高而逐渐增大($R_0 = 1.75MDBI + 0.52, R^2 = 0.60$);当 $R_0 \geq 1.35\%$ 时, $MDBI$ 随着 R_0 升高而逐渐降低,二者表现出负相关($R_0 = -6.08MDBI + 4.08, R^2 = 0.83$)(图 14a)。由此可见, $MDBI$ 与 R_0 尽管具有较好的相关性,可以作为有效的成熟度标尺,但具有明显的两阶段演化特征。

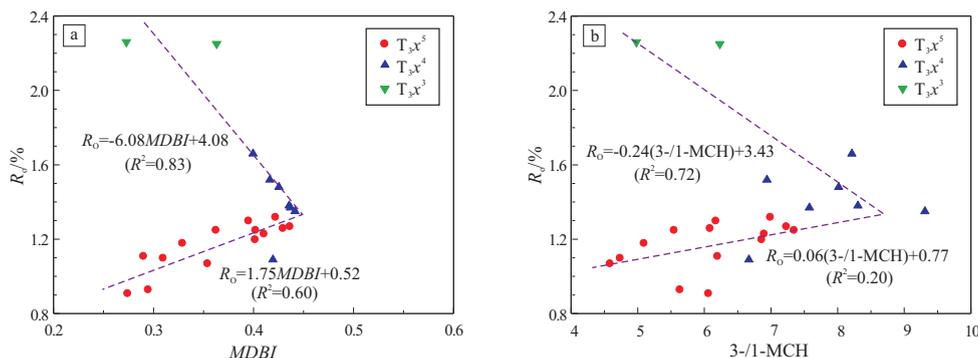


图 14 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩 R_0 与 $MDBI$ (a) 及 3-/1-MCH (b) 相关图

Fig.14 Diagrams of R_0 vs. $MDBI$ (a) and 3-/1-MCH (b) for T_3x source rocks in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

4.4 甲基蒾系列

甲基蒾(MCH)是蒾的甲基衍生物,其取代基重排过程对有机质成熟作用较为敏感,与非系列具有一定的相似性,可以利用 $3-/1-MCH$ 来指示有机质成熟度。如川西LS1井须家河组煤系烃源岩 $3-/1-MCH$ 与 R_o (1.05%~1.57%)呈明显的线性正相关, $R_o = 0.115(3-/1-MCH) + 0.6(R^2 = 0.813)^{[19]}$ 。本次工作中,须家河组泥岩 $3-/1-MCH$ 比值和 R_o 之间表现出两阶段线性相关特征,与 MPI_1 、 $MDBI$ 等类似,当 $R_o < 1.35\%$ 时,二者呈正相关, $R_o = 0.06 \times (3-/1-MCH) + 0.77(R^2 = 0.20)$;当 $R_o \geq 1.35\%$ 时,二者表现出负相关, $R_o = -0.24(3-/1-MCH) + 3.43(R^2 = 0.72)$ (图14b)。与 MPI_1 、 $MDBI$ 与 R_o 相关性(图9a,图14a)相比,中低演化阶段($R_o < 1.35\%$)样品在 $3-/1-MCH$ 比值和 R_o 相关图(图14b)上具有一定的数据离散性,即 $3-/1-MCH$ 比值对成熟度的指征不如 MPI_1 、 $MDBI$ 敏感。

5 结论

(1)川西坳陷须家河组泥质烃源岩三环萜烷主体具有 C_{23} 优势分布,二苯并噻吩/菲比值主体介于0.07~0.11,整体表现出湖相烃源岩的特征。相对较高的伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值(0.16~0.23)和9-/1-甲基菲比值(1.16~1.41)表明须家河组沉积时水体盐度相对较高。类异戊二烯烷烃组成反映了须二—须四段泥质烃源岩整体沉积于半咸水—咸水环境,与须五段主体表现出淡水湖相环境有一定差异。

(2)川西须家河组烃源岩甲基菲指数(MPI_1)、甲基菲分布分数(F_1)、甲基二苯并噻吩分布指数($MDBI$)、3-/1-甲基蒾比值等参数随成熟度变化表现出两阶段变化的特征,在 $R_o = 1.35\%$ 前后,这些参数与成熟度分别表现出线性正相关和负相关,可以作为有效的成熟度标尺。4-/1-甲基二苯并噻吩同样随成熟度表现出两阶段变化的特征,但拐点 R_o 值为1.6%。

(3)受化合物热稳定性差异的影响, $C_{29}\alpha\alpha\alpha R/C_{27}\alpha\alpha\alpha R$ 、氧芴/硫芴、芴/硫芴、甲基二苯并噻吩/甲基二苯并呋喃等比值受成熟度影响较为明显,当 $R_o \geq 1.3\%$ 时相关指标会失真。因此,对川西坳陷须家河组高一过成熟阶段($R_o \geq 1.3\%$)的烃源岩样品,应谨慎使用 C_{27} — C_{29} 规则甾烷分布模式、“三芴”系列相对组成和甲基二苯并噻吩/甲基二苯并呋喃比值来判识沉积环境或有机质输入。

致谢:感谢刘光祥教授和黎华继高级工程师对相关工作的悉心指导!感谢审稿专家对初稿提出的宝贵修改意见!样品采集得到了中国石化西南油气分公司的大力协助,实验分析得到了中国石化油气成藏重点实验室的支持,在此深表谢意!

参考文献:

- [1] DAI Jinxing, NI Yunyan, ZOU Caineng. Stable carbon and hydrogen isotopes of natural gases sourced from the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 43: 103-111.
- [2] DAI Jinxing, NI Yunyan, ZOU Caineng, et al. Stable carbon isotopes of alkane gases from the Xujiahe coal measures and implication for gas-source correlation in the Sichuan Basin, SW China[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(5): 638-646.
- [3] 邹才能, 陶士振, 朱如凯, 等. “连续型”气藏及其大气区形成机制与分布: 以四川盆地上三叠统须家河组煤系大气区为例[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(3): 307-319. ZOU Caineng, TAO Shizhen, ZHU Rukai, et al. Formation and distribution of “continuous” gas reservoirs and their giant gas province: a case from the Upper Triassic Xujiahe Formation giant gas province, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(3): 307-319.
- [4] DAI Jinxing. Giant coal-derived gas fields and their gas sources in China[M]. Beijing: Science Press, 2016: 1-564.
- [5] WU Xiaoqi, LIU Quanyou, LIU Guangxiang, et al. Geochemical characteristics and genetic types of natural gas in the Xinchang gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, 91(6): 2200-2213.
- [6] 杨克明, 朱宏权. 川西叠覆型致密砂岩气区地质特征[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(1): 1-8. YANG Keming, ZHU Hongquan. Geological characteristics of superposed tight sandstone gas-bearing areas in western Sichuan[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(1): 1-8.
- [7] 秦胜飞, 陶士振, 涂涛, 等. 川西坳陷天然气地球化学及成藏特征[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(1): 34-38. QIN Shengfei, TAO Shizhen, TU Tao, et al. Characteristics of natural gas geochemistry and accumulation in Western Sichuan Depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(1): 34-38.
- [8] 王玮, 沈忠民, 裴森奇, 等. 致密砂岩气藏油气轻烃特征及其地质意义: 以四川盆地西北部须家河组气藏为例[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(6): 818-827. WANG Wei, SHEN Zhongmin, PEI Senqi, et al. Light hydrocarbon characteristics of petroleum in a tight sandstone gas reservoir and its geological significance: a case study of the Upper Triassic Xujiahe Formation gas reservoir in the northwestern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(6): 818-827.
- [9] 吴小奇, 罗开平, 王萍, 等. 川西坳陷新场气田须家河组五段流体赋存状态[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1068-1078. WU Xiaoqi, LUO Kaiping, WANG Ping, et al. Fluid state in the 5th member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang gas field, Western Sichuan Depression in Sichuan Basin[J]. *Oil &*

- Gas Geology, 2017, 38(6): 1068-1078.
- [10] 吴小奇, 王萍, 潘文蕾, 等. 川西坳陷新场构造须五段地层水地球化学特征及其成因[J]. 天然气工业, 2016, 36(3): 22-29.
WU Xiaoqi, WANG Ping, PAN Wenlei, et al. Geochemical characteristics and origin of formation water in the 5th member of the Upper Triassic Xujiahe Fm in Xinchang structure, West Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(3): 22-29.
- [11] 林小兵, 田景春, 刘莉萍, 等. 四川盆地川西坳陷须家河组硅质碎屑颗粒溶蚀作用及机理[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 404-410.
LIN Xiaobing, TIAN Jingchun, LIU Liping, et al. Dissolution mechanism of siliceous particles in Xujiahe Formation, West Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 404-410.
- [12] 王东燕, 曾华盛, 王津义. 四川盆地川西坳陷中段上三叠统烃源岩评价[J]. 石油实验地质, 2010, 32(2): 192-195.
WANG Dongyan, ZENG Huasheng, WANG Jinyi. Evaluation on Upper Triassic hydrocarbon source rocks of Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(2): 192-195.
- [13] 江兴歌, 曾华盛, 朱建辉, 等. 川西坳陷中部上三叠统烃源岩动态演化模拟[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 545-551.
JIANG Xingge, ZENG Huasheng, ZHU Jianhui, et al. Dynamic evolution simulation of the Upper Triassic source rocks in central part of Western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 545-551.
- [14] 吴小奇, 陈迎宾, 赵国伟, 等. 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[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(11): 1714-1722.
WU Xiaoqi, CHEN Yingbin, ZHAO Guowei, et al. Evaluation of source rocks in the 5th member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang Gasfield, the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(11): 1714-1722.
- [15] 马晓潇, 黎茂稳, 刘鹏, 等. 江汉盆地盐间页岩中芳基类异戊间二烯烷烃特征及对页岩油勘探的意义[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 575-585.
MA Xiaoxiao, LI Maowen, LIU Peng, et al. Aryl isoprenoids and their significance for inter-salt shale oil exploration in the Jianghan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 575-585.
- [16] ZHANG Min, HUANG Guanghui, LI Hongbo, et al. Molecular geochemical characteristics of gas source rocks from the Upper Triassic Xujiahe Formation indicate transgression events in the Sichuan Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(8): 1260-1268.
- [17] 蔡杰, 张敏. 四川盆地上三叠统须家河组煤系气源岩芳烃地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2013, 35(3): 325-330.
CAI Jie, ZHANG Min. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbons of coal-bearing gas source rocks from Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(3): 325-330.
- [18] LI Ying, ZHU Yangming, HAO Fang, et al. Thermal evolution and applications of aromatic hydrocarbons in highly mature coal-bearing source rocks of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the northern Sichuan Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(11): 1960-1969.
- [19] 沈忠民, 魏金花, 朱宏权, 等. 川西坳陷煤系烃源岩成熟度特征及成熟度指标对比研究[J]. 矿物岩石, 2009, 29(4): 83-88.
SHEN Zhongmin, WEI Jinhua, ZHU Hongquan, et al. Comparative research on maturity feature and maturity indicator of coal source rock from West Sichuan Basin Depression[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(4): 83-88.
- [20] 吴小奇, 陈迎宾, 刘全有, 等. 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[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 859-871.
WU Xiaoqi, CHEN Yingbin, LIU Quanyou, et al. Molecular geochemical characteristics of source rocks in the 5th member of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang gas field, West Sichuan Depression[J]. Earth Science, 2019, 44(3): 859-871.
- [21] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1993.
- [22] 孙丽娜, 张中宁, 吴远东, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 573-580.
SUN Li'na, ZHANG Zhongning, WU Yuandong, et al. Evolution patterns and their significances of biomarker maturity parameters: a case study on liquid hydrocarbons from type III source rock under HTHP hydrous pyrolysis[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 573-580.
- [23] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等. 低熟油气形成机理与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
WANG Tieguan, ZHONG Ningning, HOU Dujie, et al. Genetic mechanism and occurrence of immature hydrocarbon[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [24] HUANG W Y, MEINSCHEN W G. Sterols as ecological indicators[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43(5): 739-745.
- [25] 包建平, 何丹, 朱翠山, 等. 北部湾盆地迈陈凹陷徐闻 X3 井原油地球化学特征及其成因[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(5): 665-676.
BAO Jianping, HE Dan, ZHU Cuishan, et al. Geochemical characteristics and origin of a crude oil from well Xuwen X3 in the Maichen Sag, Beibuwan Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5): 665-676.
- [26] SINNINGHE DAMSTÉ J S, KENIG F, KOOPMANS M P, et al. Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(9): 1895-1900.
- [27] 李伟. 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[J]. 天然气工业, 2011, 31(9): 31-38.
LI Wei. Formation of a saline environment and evolution of a sedimentary system in the Late Triassic reservoirs of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(9): 31-38.
- [28] 宋长玉, 金洪蕊, 刘璇, 等. 烃源岩中甲基菲的分布及对成熟度参数的影响[J]. 石油实验地质, 2007, 29(2): 183-187.

- SONG Changyu, JIN Hongrui, LIU Xuan, et al. Distribution of methyl phenanthrene in sediments and its impacting on maturity parameters[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(2): 183-187.
- [29] RADKE M, WELTE D H, WILLSCH H. Geochemical study on a well in the Western Canada Basin; relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46(1): 1-10.
- [30] KVALHEIM O M, CHRISTY A A, TELNÆS N, et al. Maturity determination of organic matter in coals using the methylphenanthrene distribution [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(7): 1883-1888.
- [31] LIN Renzi, WANG Peirong. PAH in fossil fuels and their geochemical significance[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1991, 5(1/4): 257-262.
- [32] 程克明, 王铁冠, 钟宁宁. 烃源岩地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
CHENG Keming, WANG Tieguan, ZHONG Ningning. *Geochemistry of source rocks*[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [33] RADKE M, VRIEND S P, RAMANAMPISOA L R. Alkyldibenzofurans in terrestrial rocks; influence of organic facies and maturation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(2): 275-286.
- [34] 朱扬明, 顾圣啸, 李颖, 等. 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[J]. *地球化学*, 2012, 41(1): 35-44.
ZHU Yangming, GU Shengxiao, LI Ying, et al. Biological organic source and depositional environment of over-mature source rocks of Longtan Formation in Sichuan Basin [J]. *Geochimica*, 2012, 41(1): 35-44.
- [35] HUGHES W B, HOLBA A G, DZOU L I P. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(17): 3581-3598.
- [36] RADKE M, WELTE D H, WILLSCH H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons; influence of the organic matter type [J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10(1/3): 51-63.
- [37] 魏志彬, 张大江, 张传禄, 等. 甲基二苯并噻吩分布指数(MDBI)作为烃源岩成熟度标尺的探讨[J]. *地球化学*, 2001, 30(3): 242-247.
WEI Zhibin, ZHANG Dajiang, ZHANG Chuanlu, et al. Methyl-dibenzothiophenes distribution index as a tool for maturity assessments of source rocks [J]. *Geochimica*, 2001, 30(3): 242-247.

(编辑 徐文明)

(上接第 853 页)

- [49] 蒋廷学, 卞晓冰, 苏瑗, 等. 页岩可压性指数评价新方法及应用[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(5): 16-20.
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, SU Yuan, et al. A new method for evaluating shale fracability index and its application [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(5): 16-20.
- [50] 何治亮, 聂海宽, 蒋廷学. 四川盆地深层页岩气规模有效开发面临的挑战与对策[J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(2): 135-145.
HE Zhiliang, NIE Haikuan, JIANG Tingxue. Challenges and countermeasures of effective development with large scale of deep shale gas in Sichuan Basin [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(2): 135-145.
- [51] 胡海燕. 富有机质 Woodford 页岩孔隙演化的热模拟实验[J]. *石油学报*, 2013, 34(5): 820-825.
HU Haiyan. Porosity evolution of the organic-rich shale with thermal maturity increasing [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(5): 820-825.
- [52] 何陈诚, 何生, 郭旭升, 等. 焦石坝区块五峰组与龙马溪组一段页岩有机孔隙结构差异性[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(3): 472-484.
HE Chencheng, HE Sheng, GUO Xusheng, et al. Structural differences in organic pores between shales of the Wufeng Formation and of the Longmaxi Formation's first member, Jiaoshiba block, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3): 472-484.
- [53] 李双建, 袁玉松, 孙炜, 等. 四川盆地志留系页岩气超压形成与破坏机理及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(5): 924-931.
LI Shuangjian, YUAN Yusong, SUN Wei, et al. The formation and destruction mechanism of shale gas overpressure and its main controlling factors in Silurian of Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(5): 924-931.
- [54] 刘洪林, 王红岩, 方朝合, 等. 中国南方海相页岩气超压机理及选区指标研究[J]. *地学前缘*, 2016, 23(2): 48-54.
LIU Honglin, WANG Hongyan, FANG Chaohe, et al. The formation mechanism of over-pressure reservoir and target screening index of the marine shale in the South China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 48-54.
- [55] 王金铎, 曾治平, 宫亚军, 等. 深部超压储层发育机制及控制因素: 以准噶尔盆地永进油田为例[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(3): 13-19.
WANG Jinduo, ZENG Zhiping, GONG Yajun, et al. Development mechanism and controlling factors of deep overpressured reservoir: a case study of Yongjin Oilfield in Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(3): 13-19.
- [56] 焦堃. 煤和泥页岩纳米孔隙的成因、演化机制与定量表征[D]. 南京: 南京大学, 2015.
JIAO Kun. The characterization, genesis and evolution of nanopores in coals and shales [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.

(编辑 黄娟)