

松辽盆地滨北西部上二叠统林西组烃源岩生物标志化合物的特征及意义

张 健¹, 孙 雷¹, 何大祥², 张海华¹, 郑月娟¹, 张德军¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100

摘 要: 应用气相色谱、气相色谱-质谱技术, 研究了滨北西部上二叠统林西组烃源岩的生物标志化合物特征, 对烃源岩有机质来源、沉积环境、热演化程度等进行了分析. 研究表明, 林西组烃源岩有机质丰度高, 有机质类型为 II 型, 处于高成熟—过成熟演化阶段; 烃源岩中 $(C_{20}+C_{21})/(C_{23}+C_{24})$ 三环萜烷为 0.12~0.86, 平均为 0.50, C_{24} 四环萜烷/ C_{26} 三环萜烷为 0.41~0.72, 平均为 0.54, 具有典型湖相烃源岩特征; Pr/Ph 主要介于 0.16~0.71 之间, 平均为 0.32, 指示沉积环境为强还原—还原环境; 伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷为 0.09~0.35, 平均为 0.21, 反映烃源岩为半咸水的沉积环境; Pr/nC₁₇ 与 Ph/nC₁₈ 的关系、 C_{27} - C_{28} - C_{29} 甾烷的相互关系均反映有机质为高等植物和细菌、藻类等低等水生生物的混合来源; Ts/Tm 为 0.18~1.03, 平均为 0.86, $C_{31}\alpha\beta 22S/(22S+22R)$ 比值为 0.53~0.62, 平均为 0.58, 均指示烃源岩成熟度较高. 综合认为林西组烃源岩形成于半咸水的还原—强还原环境, 有机质来源为混合来源, 有利于有机质的富集, 林西组具有油气勘探前景.

关键词: 松辽盆地; 滨北地区; 上二叠统林西组; 烃源岩; 生物标志化合物

BIOMARKER COMPOUNDS IN THE SOURCE ROCKS OF UPPER PERMIAN LINXI FORMATION IN WESTERN BINBEI AREA, SONGLIAO BASIN: Characteristics and Implications

ZHANG Jian¹, SUN Lei¹, HE Da-xiang², ZHANG Hai-hua¹, ZHENG Yue-juan¹, ZHANG De-jun¹

1. Shenyang Center of Geological Survey, CGS, Shenyang 110034, China;

2. Key Laboratory of Oil-Gas Resources and Exploration Technology of Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: The characteristics of biomarker compounds in the source rocks of Upper Permian Linxi Formation are studied, as well as the sources, sedimentary environment and thermal evolution degree of organic matter, based on the gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry. The results show that the source rocks, with organic matter Type II, have high organic abundance in the high mature-overmature evolution stage. The $(C_{20}+C_{21})/(C_{23}+C_{24})$ tricyclic terpane is 0.12~0.86 (averagely 0.50). The C_{24} tetracyclic terpene / C_{26} tricyclic terpene is 0.41~0.72 (averagely 0.54), with the characteristics of typical lacustrine source rocks. The Pr/Ph is mainly 0.16~0.71 (averagely 0.32), indicating a strong reduction-reduction sedimentary environment. The gammacerane/ C_{30} hopane is 0.09~0.35 (averagely 0.21), reflecting the brackish water sedimentary environment. The relation between Pr/nC₁₇ and Ph/nC₁₈, and

收稿日期: 2019-03-01; 修回日期: 2019-03-06. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“松辽盆地北部及外围石炭—二叠系油气地质调查”(编号 DD20190097)“松辽外围西部盆地油气基础地质调查”(编号 DD20160163).

作者简介: 张健(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 现主要从事沉积学研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//48487885@qq.com

interrelation of C_{27} - C_{28} - C_{29} steranes show that the organic matters are the mixed sources of higher plants with lower aquatic organisms like bacteria and algae. The Ts/Tm ratio of 0.18–1.03 (averagely 0.86) and $C_{31}\alpha\beta/22S/(22S+22R)$ ratio of 0.53–0.62 (averagely 0.58) both show the source rock maturity is high. From the above, it is concluded that the source rocks were formed in the reduction-strong reduction environment of brackish water, and the mixed sources are favorable for the enrichment of organic matters, thus the Linxi Formation has oil-gas exploration prospects.

Key words: Songliao Basin; Binbei area; Upper Permian Linxi Formation; source rock; biomarker compound

0 前言

松辽盆地外围地区上古生界发育4套潜在的烃源岩层位,因其未发生区域变质作用而被广泛关注^[1-3],其中上二叠统林西组分布范围广、沉积厚度大、暗色泥岩发育,烃源岩存在二次生烃,具有较高的油气勘探前景,是上古生界最有利的油气勘探层位^[4-6]。

松辽盆地滨北西部地区以往的油气地质调查研究工作主要针对中浅层,对于深层石炭—二叠系的研究鲜有报道,由于该地区上二叠统林西组埋藏深度大,被上覆沉积—火山地层所覆盖,物探资料品质较差,钻遇该套层位的钻孔极少,对于烃源岩分布特征、有机地球化学特征的研究薄弱,特别是生物标记化合物特征的研究更加有限。近年来,中国地质调查局沈阳地质调查中心为了调查该区二叠系沉积充填序列,分析烃源岩特征,进而评价该区深层油气资源前景,在滨北西部富裕地区部署实施了本地区第一口全井取心地质调查井——黑富地1井,获得了该区较为完整的上二叠统林西组岩心资料,为林西组烃源岩的研究奠定了基础。

本文拟采用气相色谱、气相色谱—质谱技术,对黑富地1井上二叠统林西组烃源岩进行系统分析,开展生物标志化合物特征的研究,揭示其蕴含的有机质来源、形成环境、有机质热演化程度等地质意义,为松辽盆地上二叠统林西组油气地质条件研究提供有利的支撑。

1 地质背景及地层概况

滨北地区指哈尔滨—满洲里(滨州)铁路线以北、嫩江以南的松辽盆地北部广大地区,主要由西部斜坡区(北部)、中央拗陷区、北部倾末区和东北隆起区组成。黑富地1井位于松辽盆地滨北地区西部,构造位置属于松辽盆地西部斜坡区北部(图1)。该井为全井取心的地质调查井,完钻深度2089.4 m。该井基本揭

示了滨北地区上二叠统林西组、白垩系及其上部地层的充填序列(图2)。其地层层序为第四系0~202.4 m,上白垩统明水组202.4~473.1 m,四方台组473.1~529.4 m,嫩江组四段529.4~614.08 m,嫩江组三段614.08~677.8 m,嫩江组二段677.8~780 m,嫩江组一段780~876 m,姚家组876~1083 m,青山口组1083~1181.8 m,下白垩统泉头组1181.8~1386.42 m,二叠系1386.42~2089.4 m(未钻穿)。

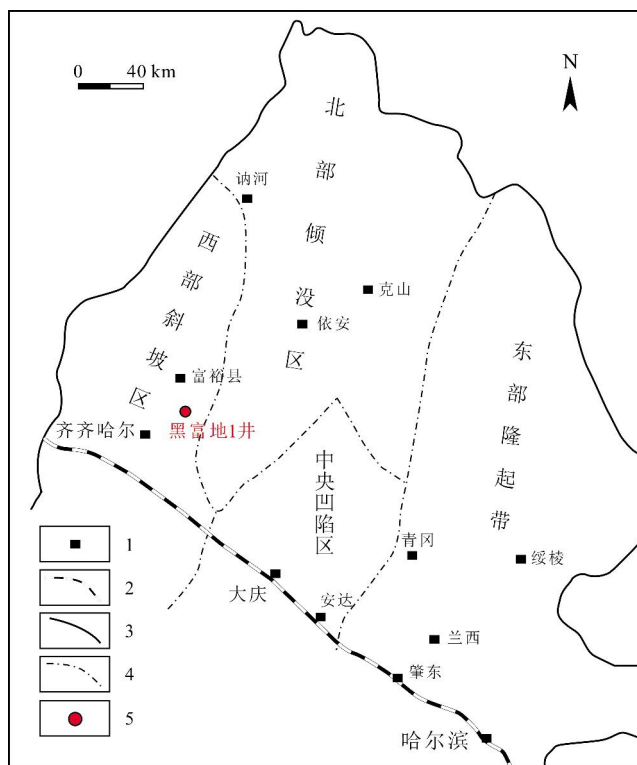


图1 松辽盆地滨北西部黑富地1井位置图

Fig. 1 Location of the HFD1 well in western Binbei area, Songliao Basin

1—城镇 (town); 2—铁路 (railway); 3—松辽盆地边界 (boundary of Songliao Basin); 4—一级构造分界线 (boundary of first-order tectonic unit); 5—地质调查井 (geological survey well)

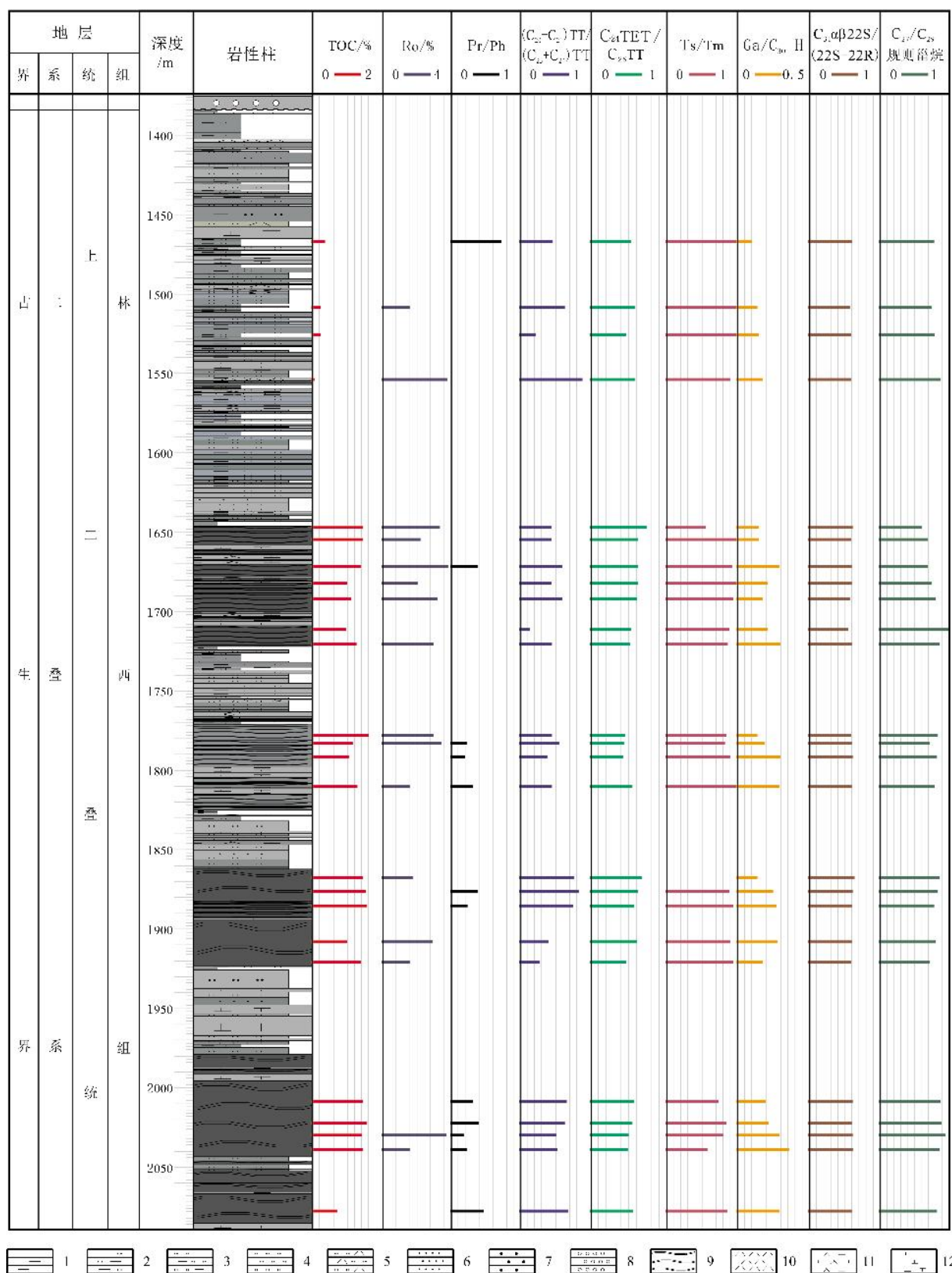


图 2 滨北西部黑富地 1 井上二叠统林西组烃源岩综合评价柱状图

Fig. 2 Comprehensive evaluation column of the source rocks from HFD1 well in Upper Permian Linxi Formation

1—泥岩 (mudstone); 2—粉砂质泥岩 (silty mudstone); 3—泥质粉砂岩 (argillaceous siltstone); 4—粉砂岩 (siltstone); 5—凝灰质粉砂岩 (tuffaceous siltstone); 6—细砂岩 (fine sandstone); 7—粗砂岩 (coarse sandstone); 8—细砾岩 (microconglomerate); 9—板岩 (slate); 10—凝灰岩 (tuff); 11—闪长玢岩 (diorite porphyrite); 12—斑岩 (porphyry)

二叠系目的层与上覆地层的岩性界线位于1386.42 m处,其上为下白垩统泉头组杂色砾岩,其下为上二叠统林西组灰黑色泥板岩、粉砂质泥岩、泥岩夹灰色细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、沉凝灰岩和石英正长斑岩脉(图2)。二叠系岩心样品同位素锆石U-Pb年龄数据表明,该套地层的沉积时间应为250~260 Ma^[7],为晚二叠世沉积,相当于松辽盆地外围的上二叠统林西组。

2 烃源岩基础地球化学特征

黑富地1井揭露的702.98 m二叠系岩层中,共发育暗色泥板岩61层,累计厚度为312.91 m,泥地比为44.51%,其中单层厚度大于10 m的泥板岩共计9层,单层最大厚度达47.9 m(图2)。本次共采集26件暗色泥岩样品,分别进行热解、氯仿抽提、族组成分离、饱和烃色谱、饱和烃色谱-质谱等分析,上述实验分析均在长江大学地球化学教育部重点实验室完成。

2.1 有机质丰度

本次取得的黑富地1井26件岩心样品TOC含量为0.03%~1.56%,平均为1.06%(表1、图3)。参照SY/T5735-1995烃源岩有机质丰度指标^[8],黑富地1井烃源岩有机质丰度较高,主要为中等—好烃源岩。

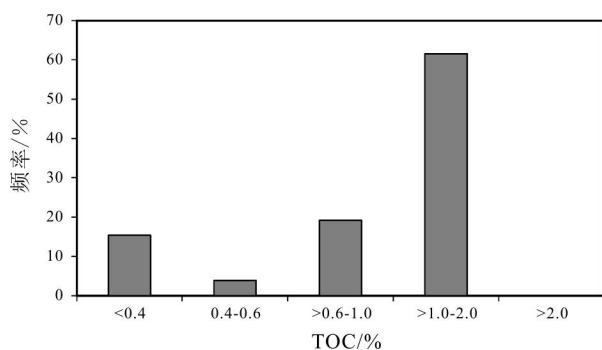


图3 滨北西部黑富地1井上二叠统林西组TOC频率分布直方图

Fig. 3 TOC frequency distribution histogram of Upper Permian Linxi Formation in HFD1 well

2.2 有机质成熟度

镜质组反射率(R_o)随热演化程度的升高而增大,具有相对广泛、稳定的可比性,是烃源岩评价应用最广泛、最权威的指标。

黑富地1井烃源岩镜质组反射率为1.50%~

3.56%,平均值为2.53%(表1),指示烃源岩处于高成熟—过成熟的热演化阶段。

3 生物标志化合物特征

3.1 类异戊二烯烷烃

类异戊二烯烷烃是一类能指示有机质生源和沉积成岩环境的生物标志化合物^[9],其中姥鲛烷(Pristane)和植烷(Phytane)含量最高、分布最广^[10]。一般而言,Pr/Ph小于0.5指示强还原性膏盐沉积环境,0.5~1.0指示还原环境,1.0~2.0指示弱还原—弱氧化环境,大于2.0者见于偏氧化性环境^[11]。黑富地1井烃源岩Pr/Ph主要介于0.16~0.71之间,平均为0.32(图4、表1),植烷优势较明显,指示强还原—还原的沉积环境,有利于有机质的保存。

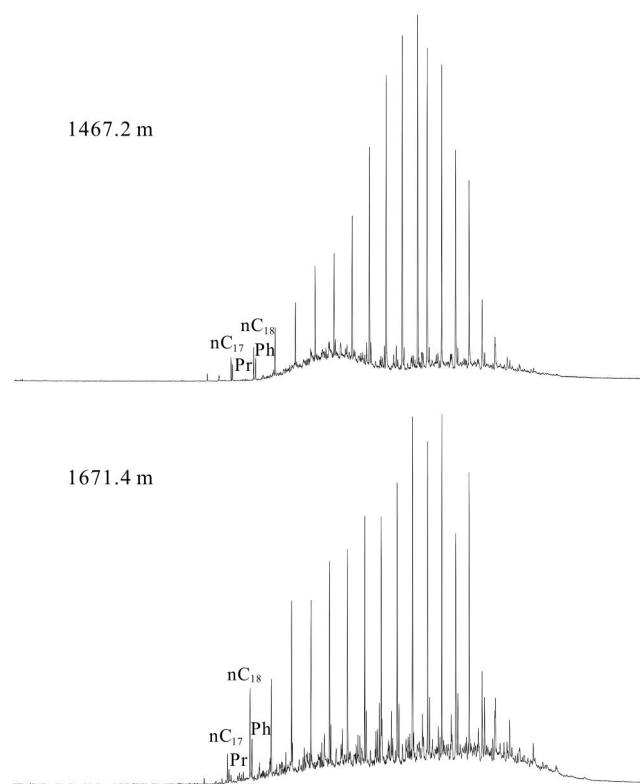


图4 滨北西部上黑富地1井二叠统林西组烃源岩饱和烃气相色谱图(m/z 85)

Fig. 4 Gas chromatogram of saturated hydrocarbon in the source rocks of Upper Permian Linxi Formation in HFD1 well (m/z 85)

烃源岩中Pr/nC₁₇与Ph/nC₁₈的相互关系可以用来判断生油母质的原始类型和沉积环境的氧化还原性^[12]。黑富地1井烃源岩Pr/nC₁₇值分布在0.53~1.32之

表 1 滨北西部黑富地 1 井上二叠统林西组烃源岩生物标志物化合物参数表

Table 1 Biomarker compound parameters of the source rocks in Upper Permian Linxi Formation, HFD1 well

井号	深度/m	层位	TOC/%	R _o /%	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	Pr/Ph	(C ₂₀ +C ₂₁)/TT/ (C ₂₃ +C ₂₄)/TT	C ₂₄ TET/C ₂₆ TT	Ts/Tm	Ga/C ₃₀ H	C ₃₁ αβ22S/ (22S+22R)	规则甾烷			C ₂₇ /C ₂₉ 规则甾烷
													C ₂₇ /%	C ₂₈ /%	C ₂₉ /%	
HFD1	1391.7	P3I	0.45	1.85				0.41	0.47	0.85	0.16	0.59	28	34	38	0.73
HFD1	1467.2	P3I	0.32		1.03	1.02	0.71	0.44	0.51	0.98	0.09	0.58	32	26	42	0.76
HFD1	1508.4	P3I	0.19	1.50				0.61	0.56	1.03	0.13	0.56	28	33	39	0.72
HFD1	1525.6	P3I	0.18					0.20	0.45	0.96	0.14	0.57	31	28	40	0.77
HFD1	1553.9	P3I	0.03	3.70				0.86	0.57	0.88	0.17	0.57	32	31	37	0.85
HFD1	1647	P3I	1.41	3.27				0.42	0.72	0.54	0.14	0.59	25	32	43	0.58
HFD1	1654.7	P3I	1.40	2.12				0.42	0.60	0.96	0.14	0.57	27	32	41	0.67
HFD1	1671.4	P3I	1.36	3.76	0.86	0.98	0.37	0.58	0.60	0.91	0.28	0.58	28	31	41	0.67
HFD1	1682.1	P3I	0.96	1.95				0.42	0.60	0.97	0.20	0.58	29	31	40	0.72
HFD1	1692.1	P3I	1.06	3.13				0.57	0.59	0.93	0.17	0.56	30	32	38	0.78
HFD1	1710.9	P3I	0.93					0.12	0.51	0.87	0.20	0.53	38	28	34	1.11
HFD1	1720.5	P3I	1.22	2.88				0.43	0.50	0.85	0.29	0.58	32	31	38	0.84
HFD1	1777.9	P3I	1.56	2.88				0.43	0.44	0.83	0.13	0.57	31	32	37	0.82
HFD1	1782.7	P3I	1.11	3.34	0.68	0.64	0.21	0.53	0.42	0.81	0.18	0.58	28	32	40	0.70
HFD1	1791.8	P3I	1.00		1.05	1.22	0.18	0.36	0.41	0.89	0.29	0.59	31	31	39	0.80
HFD1	1810	P3I	1.25	1.55	0.65	0.91	0.29	0.43	0.53	0.97	0.28	0.58	30	32	39	0.77
HFD1	1867.7	P3I	1.40	1.70				0.74	0.66	0.81	0.13	0.62	34	26	40	0.84
HFD1	1876.3	P3I	1.49		1.32	1.27	0.36	0.81	0.61	0.87	0.24	0.59	31	31	38	0.82
HFD1	1885.2	P3I	1.52		0.65	0.88	0.22	0.73	0.55	0.93	0.26	0.58	30	31	39	0.76
HFD1	1908	P3I	0.95	2.83				0.38	0.59	0.88	0.27	0.58	30	32	38	0.78
HFD1	1920.6	P3I	1.36	1.50				0.26	0.45	0.93	0.17	0.57	28	33	39	0.70
HFD1	2008.5	P3I	1.40		0.62	0.86	0.29	0.64	0.55	0.72	0.19	0.59	32	31	37	0.86
HFD1	2022.5	P3I	1.51		0.59	0.77	0.38	0.61	0.53	0.83	0.21	0.58	32	30	37	0.87
HFD1	2030	P3I	1.37	3.62	0.60	0.81	0.16	0.49	0.48	0.78	0.28	0.59	33	32	35	0.92
HFD1	2038.9	P3I	1.40	1.50	0.53	0.78	0.21	0.51	0.47	0.56	0.35	0.60	31	31	37	0.84
HFD1	2077.7	P3I	0.67		0.73	0.94	0.45	0.66	0.54	0.84	0.28	0.58	31	31	39	0.80

间, Ph/nC₁₈ 值分布在 0.64~1.27 之间(表 1). 由 Pr/nC₁₇ 与 Ph/nC₁₈ 关系可知(图 5), 黑富地 1 井烃源岩有机质类型为 II 型.

3.2 三环萜烷和四环萜烷

三环萜烷和四环萜烷系列是一类重要的生物标志化合物, 它们在不同性质烃源岩中分布和组成特征以及浓度变化存在显著差异. 如淡水湖沼环境形成的烃源岩和所生原油中, 其 C₁₉-C₂₆ 三环萜烷系列的相对丰度呈阶梯状依次降低现象, 此时 C₂₄ 四环萜烷的相对丰度远高于相邻的 C₂₆ 三环萜烷; 而在湖相或海相烃

源岩及其原油中, 其 C₁₉-C₂₆ 三环萜烷系列常呈现以 C₂₁ 或 C₂₃ 主峰的近正态分布, 此时 C₂₄ 四环萜烷的相对丰度变化较大, 这取决于沉积环境的还原程度及沉积水体古盐度的大小^[13].

黑富地 1 井烃源岩三环萜烷的分布特征基本相同, 呈以 C₂₃ 为主峰碳的似正态分布(图 6), (C₂₀+C₂₁)/(C₂₃+C₂₄)三环萜烷为 0.12~0.86, 平均为 0.50(表 1), 样品中还检测到 C₂₄ 四环萜烷, 其丰度较高略低于 C₂₆ 三环萜烷, C₂₄ 四环萜烷/C₂₆ 三环萜烷为 0.41~0.72, 平均为 0.54(表 1), 表现出烃源岩为湖相沉积环境.

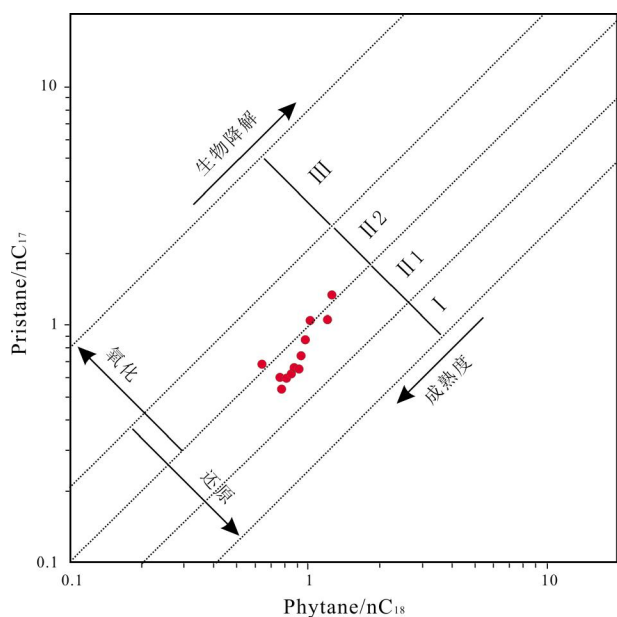


图5 滨北西部黑富地1井上二叠统林西组烃源岩Pr/nC₁₇与Ph/nC₁₈关系图

Fig. 5 The Pr/nC₁₇-Ph/nC₁₈ scattergram of the source rocks in Upper Permian Linxi Formation, HFD1 well

3.3 五环三萜烷

五环三萜烷系列分为藿烷系列与非藿烷系列两大类,藿烷类化合物主要来源于原核生物或细菌,细菌藿四醇是藿烷类化合物的前身,在原油和烃源岩中普遍存在,通常具完整系列,是一种分布广泛且对地球化学影响重大的生物标志化合物,其分布和组成特征不仅可指示烃源岩形成的沉积环境的性质,还可指示有机质的来源和成熟度;非藿烷系列以伽马蜡烷为主,伽马蜡烷是异常盐度或稳定水体分层的标志,也被认为是咸水还原环境的标志物^[12, 14-15]。

黑富地1井林西组烃源岩中的五环三萜类化合物分布特征大体相似,以C₃₀藿烷为主峰(图7)。伽马蜡烷常出现在高盐度的海相和非海相沉积物中,一般认为是高盐度的指标,同时也代表了沉积水体的分层现象。林西组烃源岩中伽马蜡烷含量较高,伽马蜡烷/C₃₀藿烷比值为0.09~0.35(表1),表明有机质沉积水体盐度较高,为半咸水的沉积环境。Ts/Tm(18αH-22,29,30-三降藿烷/17αH-22,29,30-三降藿烷)随成熟度增加而增加,Ts/Tm与生源有关,因而常用于相同沉积环境条件下成熟度的评判,林西组烃源岩Ts/Tm较高,为0.54~1.03,平均为0.86(表1),表明烃源岩成熟度较高。C₃₁αβ22S/(22S+22R)比值为藿烷中应

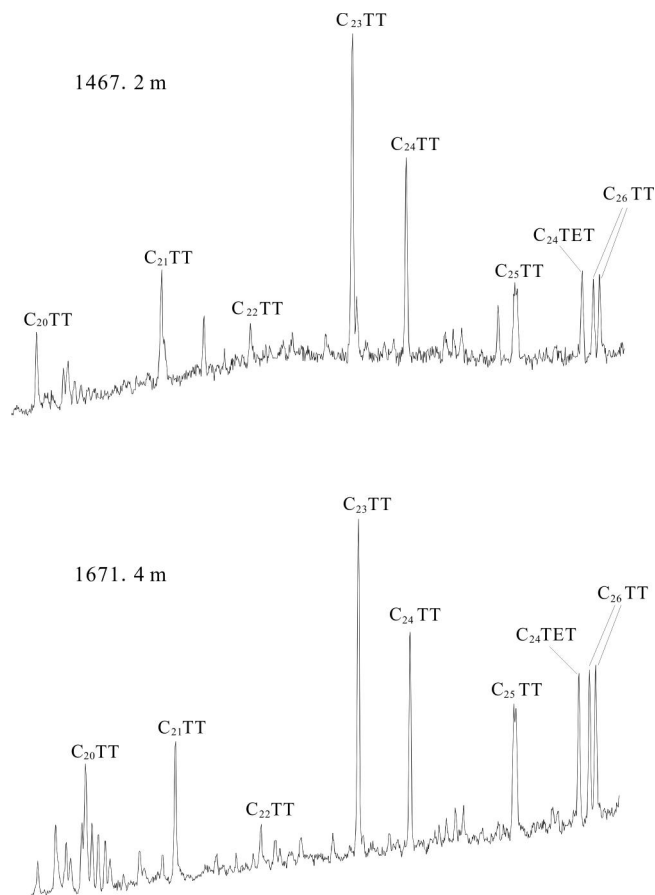


图6 滨北西部黑富地1井上二叠统林西组烃源岩萜烷系列分布图(m/z 191)

Fig. 6 Terpanes series distribution of the source rocks in Upper Permian Linxi Formation, HFD1 well (m/z 191)

用最广泛的评价成熟度的参数,林西组烃源岩中该比值为0.53~0.62,平均为0.58(表1),已经达到平衡值0.6,也指示烃源岩成熟度较高。

3.4 甾烷系列

甾烷是广泛分布于真核生物细胞壁中的甾醇、甾酮以及甾酸等前身物经过成岩作用形成的四环化合物,甾烷化合物结构稳定,且抗生物降解能力强,在沉积物中能较好地保存,蕴含较丰富的有机质来源、沉积环境以及成熟度等信息。一般认为,陆生高等植物富含C₂₉甾烷,低等水生生物富含C₂₇和C₂₈甾烷^[16]。

黑富地1井林西组烃源岩中甾烷类化合物分布模式大体相同(图8),C₂₉规则甾烷含量最高,为34%~43%;C₂₇和C₂₈规则甾烷含量相当,分别为25%~38%和26%~34%;C₂₇/C₂₉规则甾烷为0.58~1.11(表1)。根据C₂₇-C₂₈-C₂₉(ααα-20R)甾烷含量三角图(图9),判断

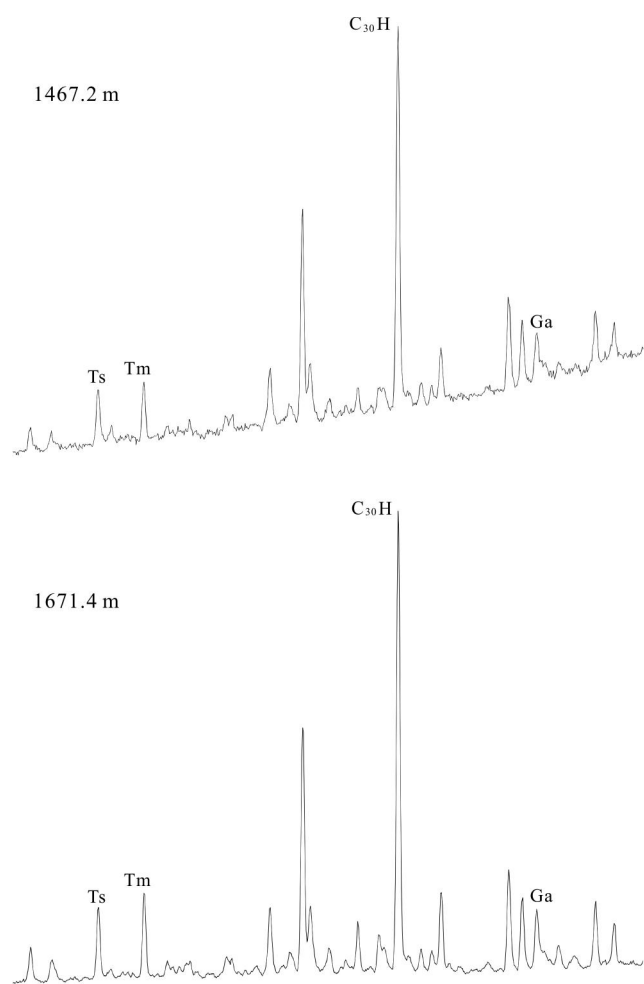


图7 滨北西部黑富地1井上二叠统林西组烃源岩五环三萜烷系列分布图(m/z 191)

Fig. 7 Pentacyclic triterpane series distribution of the source rocks in Upper Permian Linxi Formation, HFD1 well (m/z 191)

林西组烃源岩有机质来源应为低等水生生物和陆生高等植物的混合来源,对应有机质类型为II型。

4 讨论与结论

4.1 讨论

针对高成熟—过成熟演化阶段烃源岩评价的有效评价指标,许多学者都进行了有益的探讨^[10, 17-18],一般认为 TOC、 R_o 等指标受演化程度的影响较小,可作为高演化程度烃源岩有机质丰度和成熟度的评价指标。但对于有机质类型指标,由于高演化烃源岩随着 H、O 的消耗, H/C 和 O/C 的变化十分明显,因此用于酪根元素法和热解法不能有效反映有机质原始的类型,而生物标志化合物最初来自生物体,具有碳骨架的稳定

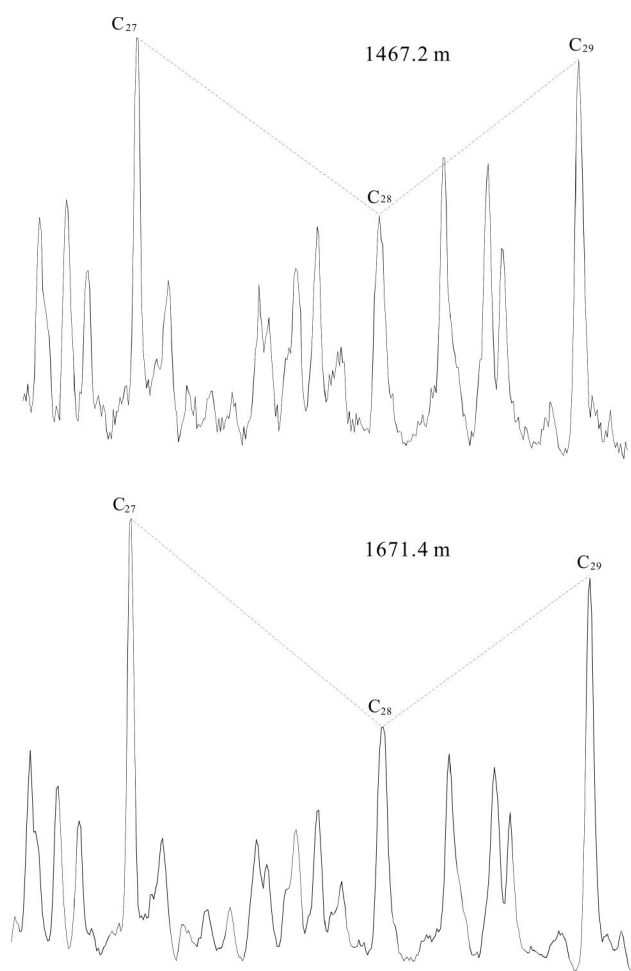


图8 滨北西部黑富地1井上二叠统林西组烃源岩甾烷系列分布图(m/z 217)

Fig. 8 Sterane series distribution of the source rocks in Upper Permian Linxi Formation, HFD1 well (m/z 217)

性和复杂的“指纹”特征,可以提供母质类型、热演化方面的信息^[14]。应用生物标记化合物中的类异戊二烯烷烃的比值 (Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18}) 和 C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷的相对含量等生物标记化合物指标能够较好地反映高演化阶段烃源岩的有机质类型。因此,在高演化烃源岩的评价中,传统的烃源岩评价方法和生物标记化合物方法相结合具有较好的效果。

经过前人的大量研究,受风化作用的影响,松辽盆地外围(露头区)的上二叠统林西组烃源岩有机质丰度整体上没有松辽盆地内(覆盖区)高,而烃源岩有机质类型与成熟度松辽盆地外围露头区和盆地内较一致,均表现为II型干酪根和高成熟—过成熟演化阶段^[4-6, 19]。松辽盆地内上二叠统林西组埋藏较深,保存条件相对较好,烃源岩发育,存在二次生烃^[20],有机质

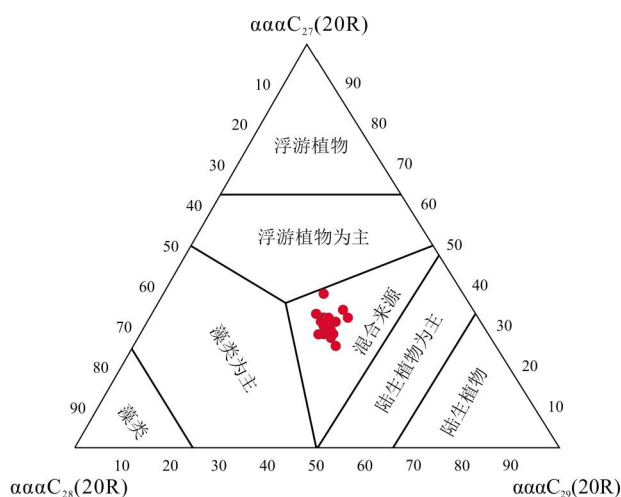


图9 滨北西部黑富地1井上二叠统林西组烃源岩C₂₇-C₂₈-C₂₉规则甾烷分布三角图

Fig. 9 The C₂₇-C₂₈-C₂₉ ternary diagram of the source rocks in Upper Permian Linxi Formation, HFD1 well

丰度高,有机质类型适中,有机质成熟度达到高成熟—过成熟,有利于生气,且黑富地1井中发现了二叠系气体显示^[7],综合认为松辽盆地内的上二叠统林西组可作为页岩气勘探层系,具有较高的勘探前景。

4.2 结论

(1)黑富地1井林西组烃源岩有机质丰度较高,主要为中等—好烃源岩,有机质类型为II型,处于高一过成熟演化阶段,具有较好的生气潜力。

(2)烃源岩中三环萜烷呈以C₂₃为主峰碳的似正态分布,藿烷以C₃₀藿烷为主峰,(C₂₀+C₂₁)/(C₂₃+C₂₄)三环萜烷为0.12~0.86,C₂₄四环萜烷/C₂₆三环萜烷为0.41~0.72,具有典型湖相烃源岩的分布特征;Pr/Ph主要介于0.16~0.71之间,指示沉积环境为强还原—还原环境;伽马蜡烷/C₃₀藿烷比值为0.09~0.35,烃源岩为半咸水的沉积环境。

(3)Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈表明有机质来源以混合有机质为主;C₂₇、C₂₈和C₂₉ααα20R规则甾烷关系反映有机质具有高等植物和细菌及藻类等低等水生生物的混合来源。Ts/Tm为0.18~1.03,C₃₁αβ22S/(22S+22R)为0.53~0.62,指示烃源岩有机质成熟度较高。

参考文献:

[1]张兴洲,周建波,迟晓国,等.东北地区晚古生代构造—沉积特征与油

气资源[J].吉林大学学报:地球科学版,2008,38(5):719-725.

[2]张永生,王延斌,卢振权,等.松辽盆地及外围地区石炭系—二叠系烃源岩的特征[J].地质通报,2011,30(2/3):214-220.

[3]陈树旺,丁秋红,郑月娟,等.松辽盆地外围新区新层系——油气基础地质调查进展与认识[J].地质通报,2013,32(8):1147-1158.

[4]张健,卞雄飞,陈树旺,等.大兴安岭中南部上二叠统林西组页岩气资源前景[J].地质通报,2013,32(8):1297-1306.

[5]朱志立,程宏岗,张敏,等.松辽盆地上二叠统林西组烃源岩地球化学特征[J].非常规油气,2017,4(4):55-63.

[6]苏飞,卞雄飞,王青海.内蒙古扎鲁特地区鲁D2井林西组烃源岩有机地球化学特征[J].地质通报,2013,32(8):1307-1314.

[7]陈树旺,张健,郑月娟,等.松辽盆地西部斜坡区油气地质调查进展与发现[J].中国地质调查,2019,6(1):1-9.

[8]中国石油天然气总公司.SY/T 5735—1995 陆相烃源岩地球化学评价方法[S].北京:石油工业出版社,1996.

[9]曾凡刚,程克明.华北地区下古生界海相烃源岩饱和烃生物标志物地球化学特征[J].地质地球化学,1998,26(3):25-32.

[10]魏建设,卢进才,陈高潮,等.内蒙古西部额济纳旗及邻区二叠系埋汗哈达组烃源岩生物标志化合物的特征及意义[J].地质通报,2011,30(6):904-910.

[11]Ten Haven H L, De Leeuw J W, Rullkotter J, et al. Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a paleoenvironmental indicator[J].Nature,1987,330(6149):641-643.

[12]唐友军,马忠梅,蒋兴超.内蒙古扎鲁特盆地陶海营子剖面林西组烃源岩生物标志化合物特征及意义[J].地质通报,2013,32(8):1315-1321.

[13]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.

[14]Peters K E, Moldovan J M. The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall Inc, 1993:1-363.

[15]卢双舫,张敏.油气地球化学[M].北京:石油工业出版社,2008:201-212.

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

[17]唐友军,张凯,苏飞,等.过成熟烃源岩评价指标探讨——以扎鲁特地区鲁D2井上二叠统林西组烃源岩为例[J].石油天然气学报,2013,35(12):35-40.

[18]钟宁宁,卢双航.烃源岩生烃演化过程TOC值的演变及其控制因素水[J].中国科学: D辑(地球科学),2004,34(增刊I):120-126.

[19]王杰,李伟,陈树旺,等.内蒙古扎鲁特盆地上二叠统林西组烃源岩有机地球化学特征[J].地质与资源,2013,22(5):367-370.

[20]余和中,蔡希源,韩守华,等.松辽盆地石炭—二叠系烃源岩研究[J].沉积与特提斯地质,2003,23(2):62-66.