



燕辽裂陷带辽西拗陷中元古界高于庄组生物标志化合物特征及意义

孙守亮¹,李永飞¹,张 涛¹,陈树旺¹,唐友军²,郜晓勇¹,

孙求实¹,孙月成¹,周铁锁³,宗文明¹,石 蕾¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心,辽宁 沈阳 110034;

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

3. 中国石油 辽河油田分公司,辽宁 盘锦 124010

摘 要: 燕辽裂陷带辽西拗陷多口钻井钻遇油气显示,使得该地区中—新元古界的古老海相地层再次成为油气勘探及研究的焦点。采用气相色谱、气相色谱-质谱技术,对辽凌地 1 井中元古界高于庄组岩心样品开展烃源岩生物标志化合物研究,据此分析了其生源信息、沉积环境及生烃潜力。综合分析认为,辽凌地 1 井高于庄组属于差—中等烃源岩,有机质类型 II₁ 型,整体处于成熟—高成熟阶段,已大量生排烃。高于庄组烃源岩饱和烃的正构烷烃碳数分布呈前单峰型,主峰碳多为 nC₂₇,具有 C₂₇ 规则甾烷优势,指示其母质输入以低等生物为主。综合藿烷类化合物分布特征,推测高于庄组生源主要为低等菌藻类。另外,较高的伽马蜡烷含量、较低的 Pr/Ph 比值,反映出高于庄组烃源岩主体形成于咸水还原环境,个别层位可能为强还原环境。

关键词: 生物标志化合物;生烃潜力;高于庄组;烃源岩;辽西拗陷

BIOMARKER CHARACTERISTICS AND IMPLICATION OF THE MESOPROTEROZOIC GAOYUZHANG FORMATION IN LIAOXI DEPRESSION OF YANLIAO RIFT ZONE

SUN Shou-liang¹, LI Yong-fei¹, ZHANG Tao¹, CHEN Shu-wang¹, TANG You-jun², GAO Xiao-yong¹,

SUN Qiu-shi¹, SUN Yue-cheng¹, ZHOU Tie-suo³, ZONG Wen-ming¹, SHI Lei¹

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

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

3. Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124010, Liaoning Province, China

Abstract: The oil-gas shows found in several bore wells in Liaoxi Depression of Yanliao Rift Zone bring the Meso-Neoproterozoic marine strata in the area once again into the focus of oil-gas exploration and research. Both gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry are used to study the biomarkers of source rocks from

收稿日期:2021-03-12;修回日期:2021-03-23. 编辑:李兰英.

基金项目:国家自然科学基金项目“松辽盆地及邻区早白垩世陆相地层高精度年代格架”(编号 41790451);中国地质调查局项目“冀北—辽西中新元古界油气地质调查”(编号 DD20190098).

作者简介:孙守亮(1982—),男,高级工程师,主要从事石油与天然气地质及基础地质调查研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail://sunsolar@qq.com

通信作者:张涛(1989—),男,工程师,主要从事石油与天然气地质调查研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//857591987@qq.com

Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in LLD1 well, and analyze the organic matter source, sedimentary environment, and hydrocarbon generation potential. Through comprehensive analysis, it is considered that Gaoyuzhuang Formation belongs to poor-medium grade source rocks, as organic type of II₁, generally in mature-high mature stage with mass generation and expulsion of hydrocarbon. The carbon number distribution of n-alkanes in saturated hydrocarbon is pre-unimodal. The main peak carbon is mostly nC₁₇, with the advantage of C₂₇ regular sterane, indicating that the parent material input is dominated by lower organism. Combined with the distribution characteristics of terpanes, it is inferred that the main organic source is low bacteria algae. Moreover, the high gammacerane content and low Pr/Ph ratio reflect the main source rocks of Gaoyuzhuang Formation were formed in salt water reduction environment, with certain layers possibly in strongly reduced environment.

Key words: biomarker; hydrocarbon generation potential; Gaoyuzhuang Formation; source rock; Liaoxi Depression

0 前言

阿曼及东西伯利亚等大型油气田的发现证明了前寒武系地层具有巨大的生油气潜力^[1-2]。前寒武系地层作为中国中西部含油气盆地未来油气勘探的重要接替领域,亦备受关注^[3]。根据以往报道,位于华北地台北缘的燕辽裂陷带中—新元古代地层中发现了多处油苗或沥青点^[4-5]。近年来,中国地质调查局沈阳地质调查中心在燕辽裂陷带辽西拗陷实施的多口地质调查井钻遇良好油气显示,表明该地区中—新元古界地层具备形成规模性油气的潜力^[6]。尤其是部署在辽西拗陷牛营子地区的 ND1 井,在中元古界高于庄组钻遇 17 m 富含油级油气显示,是中国最古老的油气藏,使得高于庄组成为油气勘探及研究的焦点^[7]。

高于庄组属中元古代蓟县系底部,浅海相碳酸盐沉积,岩性主要为灰色、黑色泥质白云岩,为燕辽裂陷带 6 套潜在烃源岩系(串岭沟组、高于庄组、雾迷山组、洪水庄组、铁岭组和下马岭组)之一。相较于洪水庄组、下马岭组等海相暗色泥质烃源岩,高于庄组总有机碳含量相对较低,属于较差烃源岩。但已有研究表明,高于庄组处于成熟—高成熟阶段,已大量生排烃^[8-10]。本文通过对辽西拗陷辽凌地 1 井采集新鲜岩心样品,对高于庄组开展烃源岩生物标志化合物特征研究,以期查明区域上高于庄组的沉积特征及成因,进而准确评价其生烃潜力,为下一步油气基础地质调查工作提供依据。

1 地质背景

燕辽裂陷带位于华北克拉通北部,构造区划为两个隆起区(山海关隆起、密怀隆起)及 5 个拗陷区

(图 1)^[4-5]。其中,辽西拗陷位于燕辽裂陷带的东段,面积约为 2.9×10^4 km²。以往研究认为,该区中—新元古界地层属于裂陷槽沉积^[11-12],中元古代海盆的中、西段于 1 600 Ma 开始首先裂解,之后于 1 400~1 200 Ma 东段裂开,燕辽裂陷带最终形成,是中元古代海盆范围最广时期^[13]。中—新元古代至古生代,燕辽裂陷带为华北克拉通北缘的裂谷—拗陷带,构造活动基本以断裂和升降运动为主,区内沉积了一套巨厚且稳定的中—新元古界海相碳酸盐岩夹陆源碎屑岩地层。这套未经变质的沉积岩系出露良好,分布广泛,厚度一般为 4 000~8 000 m^[14-15]。

燕辽裂陷带的中—新元古界烃源岩为页岩和碳酸盐岩,页岩主要发育在串岭沟组、洪水庄组、铁岭组和下马岭组,碳酸盐岩主要发育在高于庄组、雾迷山组^[16]。燕辽裂陷带辽西拗陷中元古界盐岩盐地层的岩性、岩相较为单调,无明显的变化,但韵律性较强。在数千米的剖面中发育大量的泥粉晶白云岩,作为沉积构造,形态多样而数量丰富的叠层石非常发育,偶见波浪作用形成的交错层理。以上特征均说明燕辽裂陷带辽西拗陷中新元古界沉积环境受潮坪作用控制,古地理背景较为平坦,属于延伸范围广、坡度底、浅水的陆表海碳酸盐岩台地沉积环境。

2 样品与实验

2.1 样品特征

辽凌地 1 井位于辽西拗陷牛营子地区的北部,进尺 1 723 m,由上至下钻遇地层为中侏罗统海房沟组、中元古界杨庄组、高于庄组。其中 272~889 m 为中元古界蓟县系杨庄组(J_{xy}),岩性主要为灰色及灰红色白

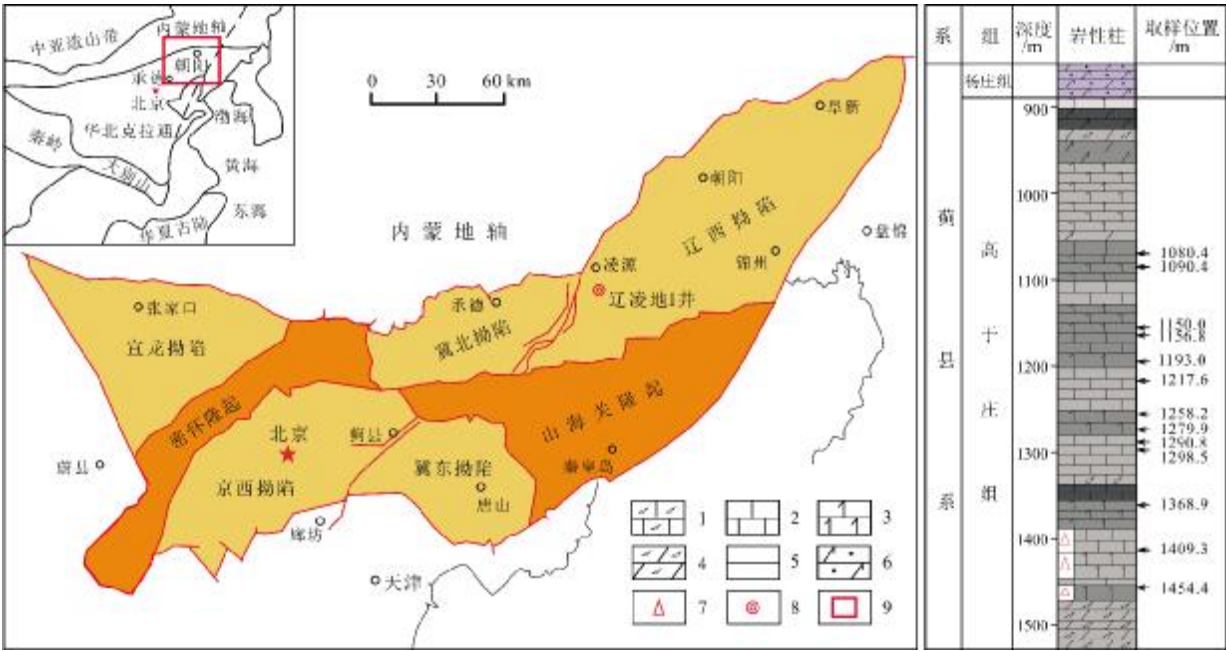


图 1 燕辽裂陷带构造分区及辽凌地 1 井取样位置

Fig. 1 Tectonic divisions of Yanliao rift zone and sampling location of LLD1 well

1—砾屑灰岩(gravelly limestone); 2—灰岩(limestone); 3—白云质灰岩(dolomite limestone); 4—砾屑白云岩(gravelly dolomite); 5—灰质白云岩(limy dolomite); 6—含砂灰质白云岩(sandy limy dolomite); 7—油气显示(oil-gas show); 8—钻井位置(drilling location); 9—研究区(study area)

云岩、灰岩、白云质灰岩;889~1 527 m 为中元古界蓟县系高于庄组(Jxg),岩性主要为灰色及灰黑色白云岩、灰岩、白云质灰岩,底部灰黑色白云质灰岩中发现多处油气显示.针对高于庄组暗色碳酸盐岩地层采集典型烃源岩样品 13 件,开展烃源岩有机地球化学及色谱-质谱测试工作,具体采样位置见图 1.

2.2 实验分析方法

将 200 g 岩样粉碎为粒径小于 0.09 mm 的粉末,装入滤纸筒并置于脂肪抽取器中,加入不超过 2/3 容积的氯仿,在 75~82 ℃ 的水浴中连续抽提 72 h,获得氯仿沥青“A”.用正己烷沉淀氯仿沥青“A”的沥青质后,将其可溶物通过中性氧化铝和硅胶层析柱,依次用正己烷、二氯甲烷+正己烷、无水乙醇+氯仿冲洗,分离出饱和烃、芳香烃和胶质(非烃).对分离出的饱和烃和芳烃分别进行了饱和烃色谱、饱和烃色谱-质谱和芳烃色谱-质谱分析.实验设备为 Agilent 6890N-5975i 质谱仪,试验分析条件及程序参见文献[17].样品实验测试工作在长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室完成.烃源岩地球化学分析数据及气相色谱参数见表 1、2.

3 结果与讨论

3.1 高于庄组烃源岩有机地球化学特征

长期以来,关于海相碳酸盐岩有机质丰度的下限标准,一直是困扰我国碳酸盐岩油气勘探的一个难题,对其研究一直没有停止过.梁狄刚等^[18]提出烃源岩不必很厚,但必须有高有机质丰度(总有机碳 TOC≥0.5%)的层段;张水昌等^[19]认为碳酸盐岩地层中评价烃源岩,沿用 0.5%TOC 作为有机质丰度下限比较合适;钟宁宁等^[20]提出了碳酸盐岩烃源岩丰度下限应与泥岩相同,TOC 含量大于 0.4%.本研究参考金之钧等^[21]的评价标准,将 TOC 值低于 0.5%的层段统一归为非烃源岩,其中差、中、好 3 个级别的 TOC 值域分别定为 0.5%~0.8%、0.8%~1.5%和大于 1.5%.

本次研究的 13 件高于庄组样品(表 1),TOC 分布范围为 0.29%~1.83%,平均值为 0.75%.其中低于 0.5%的非烃源岩样品 1 件,占 0.07%;介于 0.5%~0.8%之间共计 8 件,占 61.5%;介于 0.8%~1.5%之间的样品 3 件,占 23.1%;大于 1.5%的烃源岩样品 1 件.

13 件样品的生烃潜量(S_1+S_2)分布范围 0.26×10^{-3} ~ 2.00×10^{-3} ,平均为 0.61×10^{-3} .其中小于 0.5×10^{-3} 的样品

表 1 辽凌地 1 井高于庄组烃源岩地球化学分析数据表

Table 1 Geochemical data of the source rocks of Gaoyuzhuang Formation in LLD1 well

序号	样品编号	岩性	TOC/%	T _{max} /℃	(S ₁ +S ₂)/10 ⁻³	残余碳/10 ⁻³	产率指数	δ ¹³ C/‰	氯仿沥青“A”/%
1	LLD1-1080.4	灰岩	0.51	488	0.33	0.22	0.42	-31.0	0.016
2	LLD1-1090.4	灰质白云岩	0.53	494	0.44	1.44	0.41	-32.7	0.024
3	LLD1-1150.0	白云质灰岩	1.83	477	2.00	5.37	0.27	-31.1	0.037
4	LLD1-1156.8	灰岩	0.61	423	0.46	13.38	0.26	-32.5	0.021
5	LLD1-1193.0	灰质白云岩	1.00	475	0.81	16.40	0.37	-31.4	0.037
6	LLD1-1217.6	灰岩	0.58	439	0.58	13.69	0.28	-30.8	0.021
7	LLD1-1258.2	白云质灰岩	0.78	483	0.58	7.41	0.34	-30.9	0.031
8	LLD1-1279.9	白云质灰岩	0.88	457	0.52	9.12	0.25	-30.4	0.025
9	LLD1-1290.8	灰岩	0.55	481	0.42	5.68	0.36	-31.0	0.011
10	LLD1-1298.5	灰岩	0.83	490	0.28	3.83	0.39	-31.7	0.022
11	LLD1-1368.9	白云质灰岩	0.57	432	0.41	11.64	0.17	-32.0	0.027
12	LLD1-1409.3	灰岩	0.29	287	0.26	5.71	0.31	-32.2	0.024
13	LLD1-1454.4	白云质灰岩	0.77	482	0.83	14.34	0.27	-32.7	0.032

表 2 辽凌地 1 井高于庄组烃源岩生物标志物参数表

Table 2 Biomarker parameters of the source rocks of Gaoyuzhuang Formation in LLD1 well

样品编号	CPI	OEP	ΣnC ₂₁ /ΣnC ₂₂₊	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	Pr/Ph	Ts/Tm	Ga/C ₃₀ H	C ₂₄ TeT/C ₂₆ TT	(C ₂₀ +C ₂₁)/TT/(C ₂₃ +C ₂₄)/TT	C ₂₉ -αββ/(αββ+ααα)	主峰碳数
LLD1-1080.4	1.06	0.96	1.32	0.25	0.33	1.08	0.94	0.12	0.45	0.45	0.44	nC ₁₈
LLD1-1090.4	1.23	1.18	1.54	0.43	0.45	0.99	0.95	0.16	0.48	0.51	0.44	nC ₁₇
LLD1-1150.0	1.09	0.81	2.92	0.22	0.30	0.99	0.95	0.15	0.49	0.37	0.47	nC ₁₆
LLD1-1156.8	1.17	1.17	1.28	0.31	0.45	0.81	0.89	0.14	0.47	0.48	0.41	nC ₁₇
LLD1-1193.0	1.05	1.09	2.33	0.33	0.39	1.02	0.84	0.17	0.44	0.73	0.46	nC ₁₈
LLD1-1217.6	0.97	1.05	1.45	0.44	0.42	0.96	0.68	0.15	0.42	0.60	0.43	nC ₁₇
LLD1-1258.2	0.99	1.14	1.51	0.29	0.29	1.21	0.87	0.12	0.44	0.46	0.45	nC ₁₇
LLD1-1279.9	1.03	0.92	1.75	0.22	0.53	0.55	0.83	0.13	0.45	0.60	0.46	nC ₁₈
LLD1-1290.8	1.10	1.11	1.85	0.33	0.37	0.99	0.87	0.18	0.43	0.51	0.41	nC ₁₇
LLD1-1298.5	1.07	1.18	3.14	0.31	0.30	1.20	0.73	0.11	0.43	0.57	0.45	nC ₁₇
LLD1-1368.9	1.03	1.29	1.23	0.43	0.44	0.91	0.82	0.17	0.44	0.57	0.42	nC ₁₇
LLD1-1409.3	1.19	1.18	1.85	0.30	0.30	1.05	0.71	0.13	0.44	0.66	0.42	nC ₁₇
LLD1-1454.4	1.04	1.04	1.25	0.32	0.33	1.05	0.62	0.13	0.46	0.53	0.40	nC ₁₇

7 件,占 53.8%;在 0.5×10⁻³~2.0×10⁻³ 之间的有 5 件,占 38.5%;大于 2.0×10⁻³ 的仅 1 件。氯仿沥青“A”分布在 0.011%~0.037%之间,平均为 0.025%,所有样品中氯仿沥青“A”含量小于 0.015%的仅 1 件,其他 12 件均处

于 0.015%~0.05%之间(表 1),属于差—中等烃源岩。

另外,由于中新元古界高等植物不发育,有机质成熟度重要指标 R_o 难以测得,因而本次评价烃源岩演化指标主要依据最大热解峰温(T_{max})。辽凌地 1 井高于庄

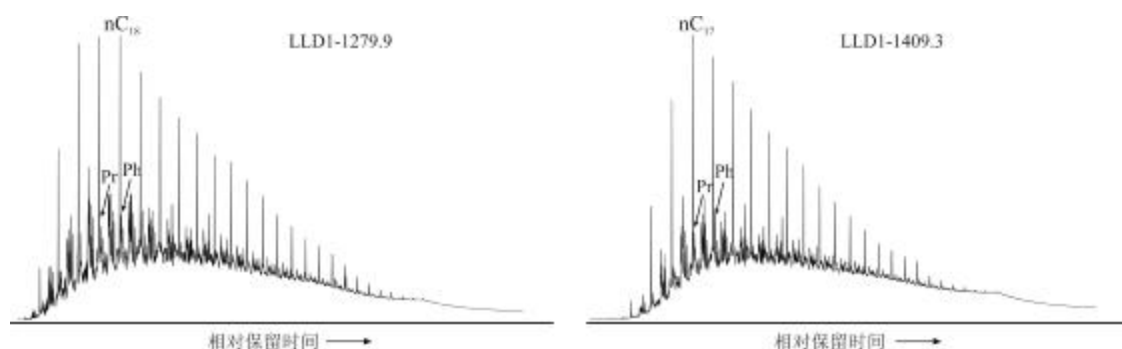


图2 高于庄组烃源岩抽提物饱和烃总离子流图

Fig. 2 The total ion chromatograms of saturated hydrocarbon from the source rock extracts in Gaoyuzhuang Formation

组烃源岩最大热解峰温(T_{max})主要集中在 423~494 °C, 大于 465 °C 的样品有 11 个, 整体处于成熟—高成熟阶段, 已大量生排烃。

3.2 正构烷烃及无环类异戊二烯烷烃

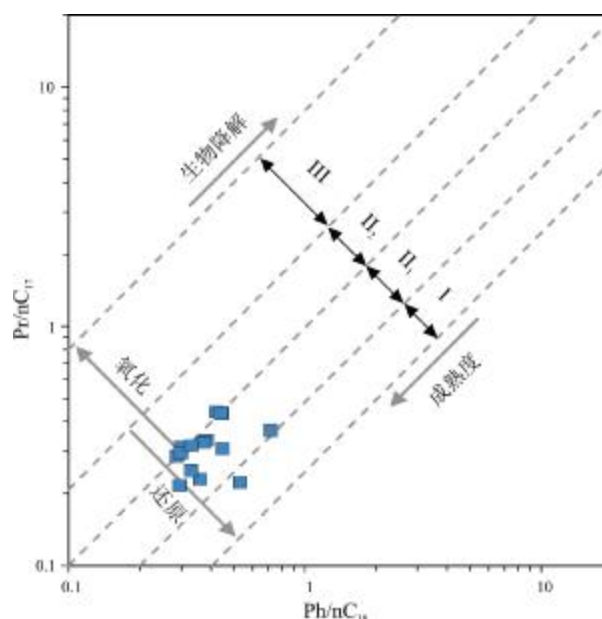
正构烷烃是烃源岩抽提物饱和烃馏分中的主要成份, 且广泛分布于菌类、藻类及高等植物等生物体中, 可反映生烃母质信息, 提供源岩沉积环境和演化特征等多种地质地球化学信息^[22]。正构烷烃的分布型态能指示有机质生源信息: 来自低等浮游生物和藻类脂肪酸的低碳数的正构烷烃碳数分布范围小于 C_{20} , 分布呈前单峰型; 而以高等植物为生源母质, 则表现为主峰碳靠近高碳数且较丰富, 一般呈后单峰型^[23]。

碳优势指数(CPI)为原油或烃源岩可溶有机质中奇数碳正构烷烃和偶数碳正构烷烃的比值, 奇偶优势指数(OEP)为色谱峰中正烷烃奇数碳的质量分数与偶数碳的质量分数之比。因为生物体内的正烷烃奇偶优势明显, 奇数碳高于偶数碳, 而随着有机质的演化, 大分子变成小分子, 结构由复杂变为简单, 这种优势会逐渐消失。故通常用 CPI 值或 OEP 值来表征正构烷烃有无奇偶优势, 进而反映有机质的演化程度^[24-25]。其值越接近于大于 1, 则说明其演化程度和成熟度越高, 反之越低。辽凌地 1 井高于庄组烃源岩中正构烷烃奇偶优势(OEP 值)主要介于 0.81~1.29 之间, 平均值为 1.09; 碳优势指数 CPI 值介于 0.97~1.23 之间, 平均为 1.08。轻重比 $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 变化很大, 主要分布在 1.23~3.14 之间, 平均值为 1.79(表 2)。另外, 高于庄组烃源岩饱和烃的正构烷烃碳数分布呈前单峰型(图 2), 主峰碳多为 nC_{17} , 部分为 nC_{18} , 无明显的碳优势及奇偶优势, 反映烃源岩成熟度较高, 且为低等生物贡

献。

规则的类异戊间二烯烷烃类广泛分布在现代沉积物、古代沉积岩及原油中。其中含量最多、分布最广的是 iC_{19} 的姥鲛烷(Pr)和 iC_{20} 的植烷(Ph), 常用做表征古沉积环境。一般认为, $Pr/Ph < 0.6$ 为强还原且超盐环境, $Pr/Ph = 0.6 \sim 1.0$ 为还原环境, $Pr/Ph > 2$ 者见于偏氧化性环境^[26-27]。辽凌地 1 井高于庄组烃源岩 Pr/Ph 比值分布在 0.55~1.21, 平均为 0.99, 指示主要形成于还原—弱还原环境, 部分为强还原环境。

另外, 通过 Pr/nC_{17} — Ph/nC_{18} 交汇图判识辽凌地 1 井高于庄组烃源岩有机质类型以 II_1 型为主, 且主要集中在偏还原的沉积环境中(图 3)。

图3 高于庄组烃源岩 Pr/nC_{17} — Ph/nC_{18} 关系图Fig. 3 The Pr/nC_{17} — Ph/nC_{18} diagram of source rocks in Gaoyuzhuang Formation

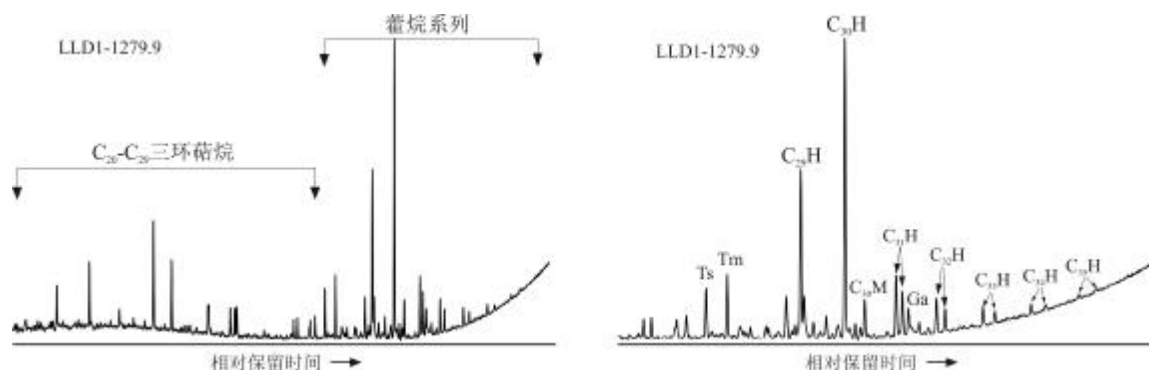


图4 高于庄组烃源岩抽提物三环萜烷和藿烷系列分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of tricyclic terpane and hopanes in the source rock extracts of Gaoyuzhuang Formation
(m/z=191, LLD1-1279.9 m)

3.3 萜类化合物

萜烷类化合物广泛分布于烃源岩抽提物和原油中,目前应用较多的主要是长侧链三环萜烷、四环萜烷、藿烷类、伽马蜡烷等。在不同性质烃源岩中,他们的分布和组成特征存在着显著差异。三环萜烷主要由微生物细胞膜中三环类异戊二烯醇形成,可能与某些菌藻类有一定的成因联系^[28];四环萜烷一般与陆源有机输入有关;藿烷来源与细菌中特定的细菌藿烷聚醇有关,如细菌藿烷四醇^[29]。

由图4可知,辽凌地1井不同深度的高于庄组烃源岩样品具有相似的三环萜烷、藿烷系列分布特征,其中三环萜烷呈C₂₀或C₂₃为主峰的正态分布,且含量较高。从C₂₄TeT/C₂₆TT与(C₂₀+C₂₁)/TT/(C₂₃+C₂₄)/TT关系图(图5)可以看出,高于庄组烃源岩中的C₂₄四环二萜/C₂₆三环萜烷值整体偏低,分布于0.42~0.49,平均值为0.45,表明高于庄组多为低等的菌藻类输入^[30]。

五环三萜烷是由6个异戊二烯结构单元组成的包含5个环、含有30个碳原子的环烷烃。其可分为藿烷系列和非藿烷系列两类。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。伽马蜡烷是一种C₃₀的三萜烷,可以反映沉积水介质条件,被认为主要来源于原生动物和光合作用的细菌的四膜虫醇,通过还原作用形成,其常作为沉积水体盐度引起的水体分层标志,含量高指示咸水沉积环境^[31]。高于庄组烃源岩五环三萜烷以C₃₀藿烷为主峰,且占绝对优势,升藿烷系列化合物逐渐降低,存在较高的伽马蜡烷含量。伽马蜡烷指数(Ga/C₃₀H)分布于0.11~0.18,平均值0.14,整体反映出咸水还原环境。

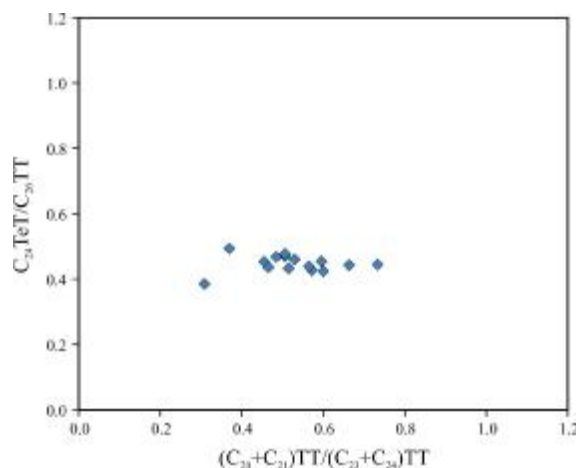


图5 高于庄组烃源岩三环萜烷和四环萜烷关系图

Fig. 5 Relation between tricyclic terpane and tetracyclic terpane in the source rocks of Gaoyuzhuang Formation

3.4 甾类化合物

甾烷类化合物不直接存在于生物体中,而是由甾醇转化成中间体甾烯,再由甾烯最终转化成甾烷或芳香甾烷类化合物。规则甾烷的分布常指示一定的生源信息,例如现代浮游生物中以C₂₇甾醇为主,而在高等植物中以C₂₉甾醇占优势^[32]。虽然在中元古代烃源岩中很少能检测到甾烷的存在,且存在一定的原生性问题,但本次分析中仍发现了较低丰度的甾烷存在。在m/z217质量色谱图(图6)中,辽凌地1井高于庄组烃源岩甾烷、重排甾烷、孕甾烷分布明显,呈现C₂₇甾烷占优势的“L”型,C₂₇重排甾烷/C₂₇—C₂₉规则甾烷的平均值为0.19,显示其母质输入以低等水生生物贡献为主。另外,图中孕甾烷和升孕甾烷含量均较高,可能指示高于庄组为高盐度的沉积环境^[33]。从ααα(R)构型

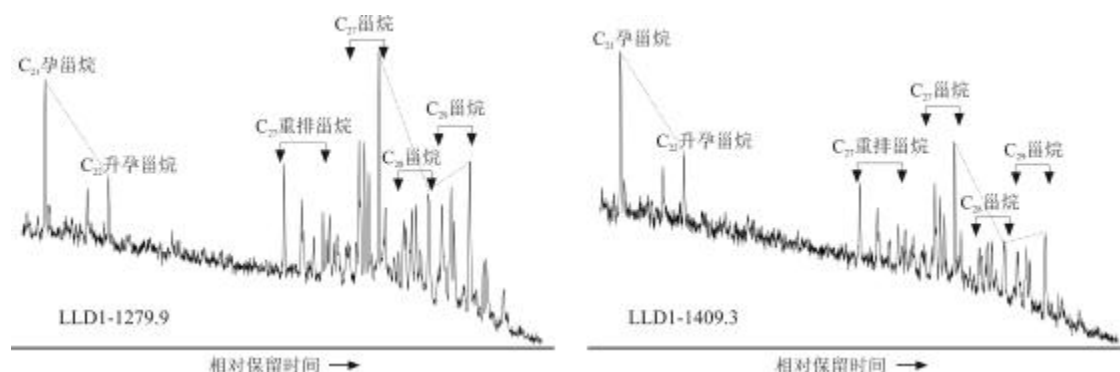
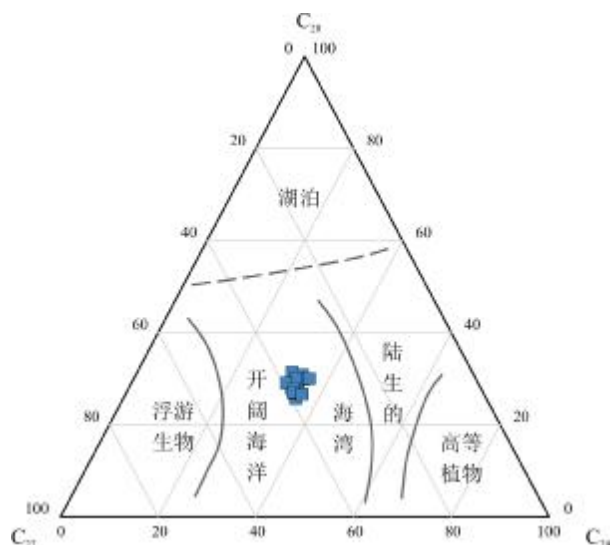


图6 高于庄组烃源岩抽提物甾烷系列分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of sterane in the source rock extracts of Gaoyuzhuang Formation
(m/z=217)

甾烷的 C_{27} - C_{28} - C_{29} 分布三角图(图7)可以看出,高于庄组烃源岩有机质主要形成于为开阔海环境。

图7 高于庄组烃源岩 C_{27} - C_{28} - C_{29} - $\alpha\alpha\alpha$ (R)甾烷分布三角图
Fig. 7 The ternary diagram of C_{27} - C_{28} - C_{29} - $\alpha\alpha\alpha$ (R) sterane in the source rocks of Gaoyuzhuang Formation

甾烷演化特征可以判断和划分有机质的热演化阶段,尤其是甾烷化合物的立体异构化比值是有效的成熟度指标。随着成熟度的增加,甾烷的 α 构型向 β 构型转化和生物构型 R 向地质构型 S 转化,表现为甾烷 C_{29} - $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 的比值逐渐增加。Peters 等^[34]将 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 比值为 0.25 和 0.42 分别定义为未成熟与低成熟以及低成熟和成熟的界限。辽凌地 1 井高于庄组烃源岩中甾烷 C_{29} - $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 分布于 0.40~0.47, 平均值 0.43, C_{29} - $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 分布于 0.39~0.58,

平均值 0.47,均已达到平衡状态,表明烃源岩已经达到成熟阶段(图8)。

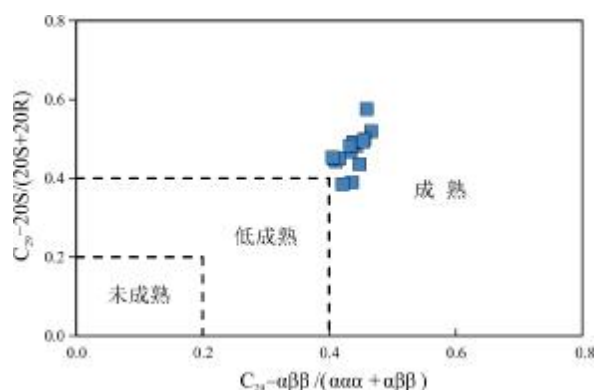


图8 高于庄组烃源岩甾烷成熟度参数相关图

Fig. 8 The correlation diagram for sterane maturity parameters of source rocks in Gaoyuzhuang Formation

4 结论

(1)辽凌地 1 井高于庄组烃源岩 TOC 分布范围在 0.29%~1.83%,生烃潜量分布范围 0.26×10^{-3} ~ 2.00×10^{-3} ,有机质类型为 II₁ 型,属于差一中等烃源岩,整体处于成熟—高成熟阶段,已大量生排烃。

(2)高于庄组烃源岩饱和烃的正构烷烃碳数分布呈前单峰型,甾烷、重排甾烷、孕甾烷分布明显,呈现 C_{27} 甾烷占优势的“L”型, C_{27} 重排甾烷/ C_{27} - C_{29} 规则甾烷的平均值为 0.19, 指示其母质输入以低等水生生物贡献为主,综合萜烷类化合物分布特征,推测高于庄组生源多来自于低等的菌藻类。

(3)较高的伽马蜡烷含量,及较低的 Pr/Ph 比值,

整体反映出高于庄组形成于咸水还原环境,个别层位可能为强还原环境。

参考文献(References):

- [1] Kelly A E, Love G D, Zumberge J E, et al. Hydrocarbon biomarkers of Neoproterozoic to lower Cambrian oils from eastern Siberia [J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(6): 640–654.
- [2] Millson J A, Quin J G, Idiz E, et al. The Khazzan gas accumulation, a giant combination trap in the Cambrian Barik sandstone member, sultanate of Oman: Implications for Cambrian petroleum systems and reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(7): 885–917.
- [3] 陈斐然, 张颖, 徐祖新, 等. 全球前寒武-寒武系含油气盆地石油地质特征及成藏主控因素 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(4): 974–989.
- Chen F R, Zhang Y, Xu Z X, et al. Petroleum geological characteristics and main control factors of oil and gas accumulations in the global Precambrian-Cambrian petroliferous basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(4): 974–989.
- [4] 孙枢, 王铁冠. 中国东部中-新元古界地质学与油气资源 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- Sun S, Wang T G. *Geology and hydrocarbon resources of Mesoproterozoic and Neoproterozoic in Eastern China* [M]. Beijing: China Science Publishing, 2016. (in Chinese)
- [5] 王铁冠, 韩克猷. 论中-新元古界的原生油气资源 [J]. *石油学报*, 2011, 32(1): 1–7.
- Wang T G, Han K Y. On Meso-Neoproterozoic primary petroleum resources [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1): 1–7.
- [6] Sun Q S, Xiao F, Gao X Y, et al. A new discovery of Mesoproterozoic Erathem oil, and oil-source correlation in the Niuyingzi area of western Liaoning Province, NE China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 110: 606–620.
- [7] Tang Y J, Li M J, Zhu Q G, et al. Geochemical characteristics and origin of hydrocarbons in the Mesoproterozoic reservoirs in the Liaoxi Depression, NE China [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2019, 38(2): 333–347.
- [8] 宗文明, 孙求实, 郜晓勇. 辽西牛营子凹陷中元古界铁岭组烃源岩地球化学特征 [J]. *地质论评*, 2019, 65(S1): 209–210.
- Zong W M, Sun Q S, Gao X Y. Geochemical characteristics of middle Proterozoic Tieling formation source rocks in Niuyingzi sag, Western Liaoning [J]. *Geological Review*, 2019, 65(S1): 209–210. (in Chinese)
- [9] 宗文明, 郜晓勇, 孙求实, 等. 华北北部凌源-宁城盆地蓟县系洪水庄组生烃潜力分析——以小庄户剖面为例 [J]. *地质与资源*, 2017, 26(4): 370–376.
- Zong W M, Gao X Y, Sun Q S, et al. Evaluation of the hydrocarbon generating potential of the Jixianian Hongshuizhuang Formation in Lingyuan-Ningcheng Basin, Northern China: A case study of Xiaozhuanghu geological profile [J]. *Geology and Resources*, 2017, 26(4): 370–376.
- [10] 郑磊, 唐友军, 李永飞, 等. 凌源-宁城盆地牛营子地区辽凌 D1 井高于庄组烃源岩地球化学特征 [J]. *石油天然气学报*, 2019, 41(1): 19–25.
- Zheng L, Tang Y J, Li Y F, et al. The geochemical characteristics of source rock of the Gaoyuzhuang Formation of well LLD1 in Niuyingzi area of Lingyuan-Ningcheng basin [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2019, 41(1): 19–25.
- [11] Hongzhen W, Qiao X F. Proterozoic stratigraphy and tectonic framework of China [J]. *Geological Magazine*, 1984, 121(6): 599–614.
- [12] 柳永清, 刘晓文, 李寅. 燕山中-新元古代裂陷槽构造旋回层序研究——兼论裂陷槽构造旋回概念及级序的划分 [J]. *地球学报*, 1997, 18(2): 142–149.
- Liu Y Q, Liu X W, Li Y. Tectonic cyclic sequences in the Mesoproterozoic and Neoproterozoic aulacogen of Yanshan—A concept of aulacogen tectonic cycle and its hierarchy [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 1997, 18(2): 142–149.
- [13] 乔秀夫, 高林志. 燕辽裂陷槽中元古代古地震与古地理 [J]. *古地理论*, 2007, 9(4): 337–352.
- Qiao X F, Gao L Z. Mesoproterozoic palaeoearthquake and palaeogeography in Yan-Liao Aulacogen [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(4): 337–352.
- [14] 郝石生, 高耀斌, 张有成, 等. 华北北部中-上元古界石油地质学 [M]. 北京: 石油大学出版社, 1990: 54–61.
- Hao S S, Gao Y B, Zhang Y C, et al. Middle upper Proterozoic petroleum geology in northern North China [M]. Beijing: China University of Petroleum Press, 1990: 54–61. (in Chinese)
- [15] 刘宝泉, 梁狄刚, 方杰, 等. 华北地区中上元古界、下古生界碳酸盐岩有机质成熟度与找油远景 [J]. *地球化学*, 1985(2): 150–162.
- Liu B Q, Liang D G, Fang J, et al. Organic matter maturity and oil-gas prospect in middle-upper Proterozoic and lower Paleozoic carbonate rocks in northern China [J]. *Geochimica*, 1985(2): 150–162.
- [16] 王浩, 任收麦, 周志, 等. 华北燕山地区中-新元古界油气勘查形势 [J]. *地质通报*, 2019, 38(2): 404–413.
- Wang H, Ren S M, Zhou Z, et al. Oil and gas exploration status analysis of the Meso-Neoproterozoic strata in Yanshan area, North China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(2): 404–413.
- [17] 李美俊, 王铁冠, 张卫彪. 塔河油田奥陶系原油 C_{26} 降胆甾烷分布特征及地质意义 [J]. *石油实验地质*, 2015, 37(1): 64–70, 79.
- Li M J, Wang T G, Zhang W B. Distribution of C_{26} norcholestanes in Ordovician crude oils from Tahe Oilfield and its geological significance [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2015, 37(1): 64–70, 79.
- [18] 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 534–547.

- Liang D G, Zhang S C, Zhang B M, et al. Understanding on marine oil generation in China based on Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 534-547.
- [19] 张水昌, 梁狄刚, 张大江. 关于古生界烃源岩有机质丰度的评价标准[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(2): 8-12.
- Zhang S C, Liang D G, Zhang D J. Evaluation criteria for Paleozoic effective hydrocarbon source rocks [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(2): 8-12.
- [20] 钟宁宁, 卢双舫, 黄志龙, 等. 烃源岩 TOC 值变化与其生排烃效率关系的探讨[J]. *沉积学报*, 2004, 22(S1): 73-78.
- Zhong N N, Lu S F, Huang Z L, et al. An approach to the evolution of TOC value for source rock and its relation to efficiencies of hydrocarbon generation and expulsion [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(S1): 73-78.
- [21] 金之钧, 王清晨. 中国典型叠合盆地油气形成富集与分布预测 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-381.
- Jin Z J, Wang Q C. Hydrocarbon accumulation and distribution prediction of typical superimposed basins in China [M]. Beijing: China Science Publishing, 2007: 1-381. (in Chinese)
- [22] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The biomarker guide: biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 612-613.
- [23] Bourbonniere R A, Meyers P A. Sedimentary geolipid records of historical changes in the watersheds and productivities of lakes Ontario and Erie [J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(2): 352-359.
- [24] Bray E E, Evans E D. Distribution of n-paraffins as a clue to recognition of source beds [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1961, 22(1): 2-15.
- [25] Scalan E S, Smith J E. An improved measure of the odd-even predominance in the normal alkanes of sediment extracts and petroleum [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1970, 34(5): 611-620.
- [26] 付修根, 王剑, 汪正江, 等. 藏北羌塘盆地晚侏罗世海相油页岩生物标志物特征、沉积环境分析及意义[J]. *地球化学*, 2007, 36(5): 486-496.
- Fu X G, Wang J, Wang Z J, et al. Biomarkers and sedimentary environment of Late Jurassic marine oil shale in Qiangtang basin, northern Xizang and its geological significance [J]. *Geochimica*, 2007, 36(5): 486-496.
- [27] 王铁冠. 试论我国某些原油与生油岩中的沉积环境生物标志物[J]. *地球化学*, 1990, 19(3): 256-263.
- Wang T G. A contribution to some sedimentary environmental biomarkers in crude oils and source rocks in China [J]. *Geochimica*, 1990, 19(3): 256-263.
- [28] Azevedo D A, Neto F R A, Simoneit B R T, et al. Novel series of tricyclic aromatic terpanes characterized in Tasmanian tasmanite [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 18(1): 9-16.
- [29] Ourisson G, Rohmer M, Poralla K. Prokaryotic hopanoids and other polyterpenoid sterol surrogates [J]. *Annual Review of Microbiology*, 1987, 41: 301-333.
- [30] 崔景伟. 冀北凹陷高于庄组与洪水庄组在岩芯、露头中多赋存态生物标志物的对比[J]. *沉积学报*, 2011, 29(3): 593-598.
- Cui J W. Comparison of multiple occurrence biomarkers of core and outcrop in Gaoyuzhuang and Hongshuizhuang fm, Jibei sag [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(3): 593-598.
- [31] Damsté J S 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.
- [32] Moldowan J M, Seifert W K, Gallegos E J. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks [J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(8): 1255-1268.
- [33] 傅家谟, 盛国英. 分子有机地球化学与古气候、古环境研究[J]. *第四纪研究*, 1992, 12(4): 306-320.
- Fu J M, Sheng G Y. Molecular organic geochemistry and its application to the study of paleoclimate and paleoenvironments [J]. *Quaternary Sciences*, 1992, 12(4): 306-320.
- [34] Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993: 1-347.