

文章编号:1673-9469(2015)04-0084-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.04.018

祁连山冻土区木里三叠系烃源岩地球化学特征

程青松¹, 龚建明², 张敏¹, 王伟超³, 李永红³, 李智高², 蒋玉波^{2,4}

(1. 长江大学 地球环境与水资源学院, 湖北 武汉 430100; 2. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 3. 青海煤炭地质 105 勘探队, 青海 西宁 810007; 4. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

摘要:为了查明祁连山冻土区木里天然气水合物的气源,开展冻土区三叠系烃源岩研究工作。按照深度顺序,对 JN 井 1 300 多米的岩心取芯,然后和露头样品一起进行实验测试。首先对采集到的 36 个样品进行常规的有机碳和岩石热解实验,分析其成熟度和生烃潜力;然后选出 9 个样品进行有机岩石学显微组分镜下鉴定;最后遴选出 4 个样品进行索氏抽提实验并进行色谱-质谱分析检测。研究结果表明,该区三叠系烃源岩基本处于高成熟阶段;有机质为 II 型和 III 型,有机质来源为混源输入,为陆表海-滨海三角洲相沉积;有机质丰度较高,为中等-好烃源岩。综合分析认为,冻土区三叠系烃源岩可能是该区天然气水合物的有利供气源岩。

关键词:三叠系;烃源岩;成熟度;丰度;类型;生物标志化合物;显微组分

中图分类号:P618.12

文献标识码:A

Geochemical Characteristics of Triassic source rocks from the Muli Qilian Mountain permafrost

CHENG Qing-song¹, GONG Jian-ming², ZHANG Min¹, WANG Wei-chao³,
LI Yong-hong³, LI Zhi-gao², JIANG Yu-bo⁴

(1. School of Earth Environment and Water Resources, Yangtze University, Hubei Wuhan 430100, China;
2. Qingdao Institute of Marine Geology, Shandong Qingdao 266071, China; 3. No. 105 Exploration Team, Qinghai Bureau of Coal Geological Exploration, Qinghai Xining 810007, China; 4. School of Marine Geosciences, Ocean University of China; Shandong Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to find out the gas source of gas hydrate in Muli coal field, Qilian Mountain permafrost, geochemical characteristics of Triassic source rocks are studied. According to the depth, 36 Triassic samples of JN well were collected. First, for analysis of the maturity and hydrocarbon potential, the normal geochemical experiments, for example, rock pyrolysis and analysis of organic carbon were completed. Then 9 samples were selected to carry out the microscopical maceral identification of organic petrology test. Finally, 4 samples were studied by Soxhlet extraction and GC-MS test. The results showed that research region Triassic source rocks mostly are in high maturity stage; Organic matters mainly belong to II-III type, which are mainly from higher plants and lower aquatic organisms mixed sources; the sedimentary environment is the epicontinental sea and shore-delta; Organic matter abundance is in relatively high, belonging to mid-good source rocks.

Key words: source rocks; maturity; abundance of organic matter; organic matter type; organic petrology; Triassic

天然气水合物广泛分布于海底沉积物和陆上冻土带中,其资源量是煤和石油总和的两倍,是一

种非常重要的潜在能源。各国先后都投入到了研究天然气水合物的潮流中^[1-2]。我国是世界第三

收稿日期:2015-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41273066)

作者简介:程青松(1990-),男,湖北崇阳人,硕士,从事油气地球化学研究。

大冻土国家,其主要分布在青藏高原地区^[3],祁连山冻土区是天然气水合物的重要潜在区^[4]。从2002年开始,野外地质和地球化学调查研究发现了一些异常现象^[5-8]。2008~2009年,中国地质调查局在祁连山南缘多年冻土区实施天然气水合物科学钻探试验,成功采集到天然气水合物实物样品^[9],实现我国陆上冻土区天然气水合物的勘查突破。钻探结果显示,我国陆域冻土区的天然气水合物有着低纬度、高海拔、埋藏浅、成因复杂、含烃重、易开发等特点。主要产在泥岩或粉砂岩裂隙中,其次产在砂岩孔隙中,其产状不稳定,在水平和垂直方向上产出均不连续,赋存规律不明显^[10]。要想弄清这些问题,需要查明该区天然气水合物的气体成因或来源,进而研究其成藏机理。该区天然气水合物产在煤系地层中,油页岩发育,可见油气显示现象,地质构造复杂。本文就以JN井和周围露头的三叠系烃源岩为例,对冻土区三叠系烃源岩的地球化学特征进行研究和分析,为以后的气源对比工作提供资料。

1 区域地质背景

祁连山冻土区位于青藏高原东北部,自震旦纪以来,先后经历了大陆裂谷、洋底扩张、沟弧盆体系、造山等演化阶段而形成了现今的构造格局。该区自下而上发育4套烃源岩:石炭系暗色泥(灰)岩,下二叠统草地沟组暗色灰岩,上三叠统尕勒得寺组暗色泥岩,侏罗系木里和江仓组暗色泥页岩,这些有机质处于成熟-过成熟阶段,具有良好的生油气潜力^[1-2]。

现今,祁连山冻土区以山地多年冻土为主,冻土面积约10 000 km²,连续冻土区内年平均气温为

-1.5℃~2.4℃,冻土层厚度50~139 m;岛状冻土区内年平均气温-1.5℃~0℃,冻土层几米、几十米不等^[1]。本次钻探的JN井位于青海省天峻县木里煤田聚乎更矿区三露天井田,紧邻2008年水合物发现井DK-2井。区域构造图如图1所示:

2 实验和样品

为了研究此次采集到的三叠系烃源岩地球化学特征,对采集到的36个样品按要求依次进行了常规的有机碳和岩石热解实验,有机岩石学显微组分镜下鉴定,索氏抽提实验和色谱-质谱分析检测。有机碳分析采用OGM-II型仪器,用5%的稀盐酸去掉碳酸盐矿物,然后在900℃高温下将有机质灼烧成CO₂,测得有机碳含量。岩石热解用Rock-Eval仪,载气为高纯N₂,在300℃下恒温3 min,检测游离烃S₁,然后以50℃/min的速率升温到500℃,恒温1 min,检测裂解烃S₂。可溶有机质族组分分离:样品粉碎至100目加铜片去硫索氏抽提72 h,正己烷沉淀沥青质,用氧化铝层柱进行族组分分离,正己烷、正己烷/二氯甲烷和三氯甲烷/无水乙醇为冲洗剂,分别得到饱和烃、芳烃和非烃。用GC-MS对饱和烃进行分析,GC-MS分析条件为:Agilent 6890N/5995MSD气相色谱-质谱联用仪,色谱柱为HP5-MS石英弹性毛细柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)。升温程序:初温50℃,恒温2 min,以20℃/min的速率升温至100℃,再以3℃/min的速率升温至310℃,恒温15 min。脉冲不分流方式进样,进样器温度300℃,载气为He,流速1 mL/min,电离能量70 eV,检测方式为全扫描(SCAN)/多离子检测(SIM)。

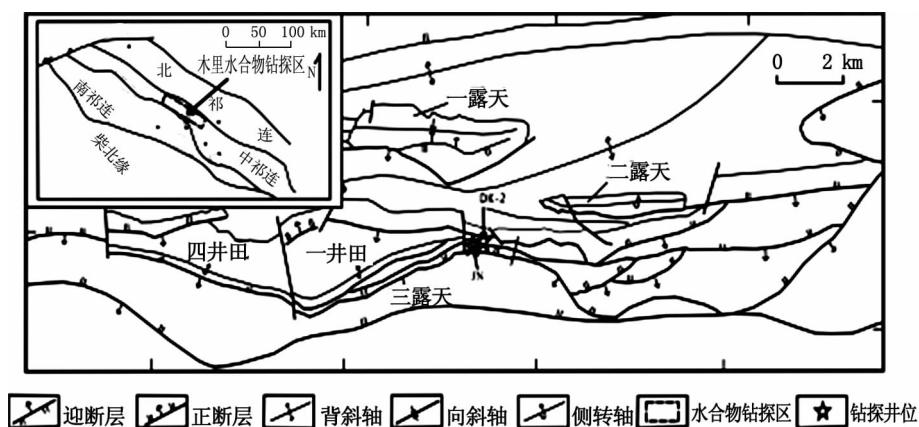


图1 研究区构造纲要图(据文献[3]有改动)

Fig.1 The Tectonic outline in the study area(improved according to reference 3)

3 烃源岩基本地球化学特征

3.1 有机质成熟度

30个井下和6个露头样品的测试结果见表1和表2。分析热解峰温 T_{\max} 介于 $319^{\circ}\text{C} \sim 565^{\circ}\text{C}$ 之间,均值为 465.92°C 。从图2可见,样品均已进入成熟-高过成熟,同时,在300 m和1 000 m左右,

成熟度偏低。研究表明,有树脂体存在的烃源岩 T_{\max} 值普遍偏低^[3]。推测300 m和1 000 m左右的烃源岩有机质类型较好。镜质体反射率(R_o)是目前研究干酪根热演化和成熟度的最佳参数^[4]。表2显示,泥岩的 R_o 值为 $0.805\% \sim 1.669\%$ 。根据国外石油工业界生油岩评价标准(Cassa & Peters, 1994),研究区三叠系烃源岩均已进入高成熟阶段。

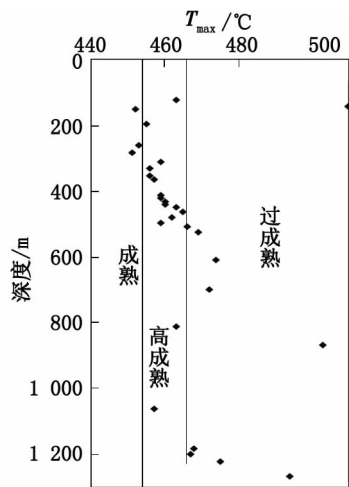
表1 木里三叠系烃源岩有机地球化学测试结果
Tab.1 Organic geochemical test of Triassic source rocks from Muli

井号	深度/m	岩性	可溶烃	热解烃	最高峰温	有机碳
			$S_1/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$S_2/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	TOC/%
D-07	露头	泥岩	0.10	0.73	530.00	1.93
D-08	露头	泥岩	0.09	1.23	512.00	3.47
D-11	露头	灰黑色泥岩	0.06	0.16	463.00	0.53
D-12	露头	灰黑色泥岩	0.02	0.08	366.00	2.64
D-18	露头	黑色泥岩	0.01	0.03	510.00	1.33
D-14	露头	黑色泥岩	0.06	0.19	452.00	0.90
JN	193.9	泥岩	0.16	0.59	455.00	0.59
JN	260.2	泥岩	0.21	0.55	453.00	0.59
JN	281.1	泥岩	0.20	0.99	451.00	0.91
JN	309.5	泥岩	0.18	0.57	459.00	0.69
JN	330.1	泥岩	0.17	0.85	456.00	0.87
JN	353	泥岩	0.21	0.82	456.00	0.97
JN	364.3	泥岩	0.11	0.64	457.00	0.68
JN	410.5	泥岩	0.11	0.58	459.00	0.70
JN	421.1	泥岩	0.23	0.63	459.00	0.80
JN	432.1	泥岩	0.30	0.82	460.00	0.96
JN	440.5	泥岩	0.17	0.48	460.00	0.47
JN	449.2	泥岩	0.22	0.81	463.00	0.90
JN	462.6	泥岩	0.65	1.99	465.00	1.95
JN	478.2	泥岩	0.25	0.63	462.00	0.78
JN	495.15	泥岩	0.24	0.73	459.00	0.81
JN	509	泥岩	0.40	1.19	466.00	1.24
JN	525	泥岩	0.36	1.05	469.00	1.20
JN	609	泥岩	0.25	1.11	474.00	1.45
JN	688	泥岩	0.03	0.10	557.00	0.64
JN	700	泥岩	0.01	0.04	472.00	0.75
JN	812	泥岩	0.06	0.18	463.00	1.18
JN	849.3	泥岩	0.08	0.12	417.00	0.63
JN	868.1	泥岩	0.09	0.24	503.00	1.19
JN	892	泥岩	0.01	0.04	565.00	0.58
JN	1064	泥岩	0.03	0.13	457.00	1.09
JN	1119	泥岩	0.07	0.17	319.00	0.81
JN	1185	泥岩	0.50	2.92	468.00	2.63
JN	1200	泥岩	0.24	0.81	467.00	1.99
JN	1225	碳质泥岩	3.28	14.72	475.00	6.17
JN	1269	泥岩	0.02	0.05	494.00	1.14

表2 木里三叠系烃源岩有机岩石学测试结果

Tab. 2 Organic petrology test of Triassic source rocks from Muli

井号	深度/m	岩性	Ro/%	腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组
D-08	露头	泥岩	1.669	7.4	0	4.4	0
D-12	露头	灰黑色泥岩	1.026	1	0.2	3.2	0
D-18	露头	黑色泥岩	1.434	0.6	0.2	4	0
D-14	露头	黑色泥岩	1.027	2.8	0.2	2	0.4
JN	193.9	泥岩	0.805	4.4	0.4	2.8	0
JN	260.2	泥岩	0.825	6.8	0.8	0.8	0.4
JN	330.1	泥岩	0.84	4.8	0.8	3.6	0.4
JN	410.5	泥岩	0.851	14	0.8	2	0
JN	495.15	泥岩	0.872	12	0.8	2.4	0.8

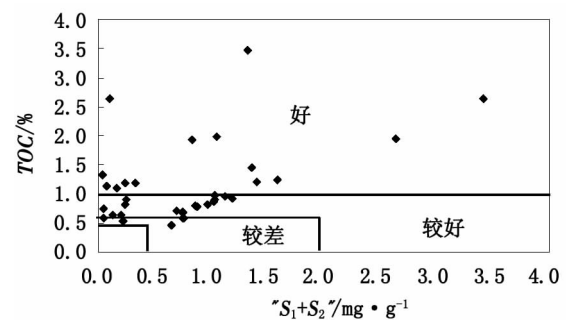
图2 样品深度与 T_{max} 的关系图Fig. 2 Diagram between depth and T_{max} from JN well

3.2 有机质丰度

JN井泥岩样品的有机碳含量(TOC)绝大多数大于0.5%,介于0.58%~2%之间,平均值为1.18%,达到中等-好烃源岩,在深度超过1000m之后,有机碳含量有增大的趋势;从烃指数来看,大部分样品在8~30 mg/g TOC之间,平均值为20.2 mg/g TOC,属于好烃源岩;而从岩石热解生烃潜力来看,其数值介于0.05~18 mg/g,平均值为1.45 mg/g,未达到好烃源岩的下限标准。生烃潜力与有机碳的评价结果差距较大,因为随着有机质热演化程度的增加,烃类大量排出导致生成的烃量急剧减少,所测的氯仿沥青“A”、总烃HC、“ $S_1 + S_2$ ”等参数的评价不可靠^[5]。

钟宁宁等人^[6]经过大量的实验发现:随烃源岩埋深增加,TOC并不会相应地降低。所以对于高-过成熟演化阶段的烃源岩,TOC对于有机质丰度的判别依然是可靠的。前已述及,木里JN井

三叠系烃源岩样品均处于高成熟阶段,因此主要依据TOC来判断其有机质丰度,其他指标作为参考。根据黄第藩(1992)提出的陆相烃源岩评价标准^[7]。通过TOC-“ $S_1 + S_2$ ”关系图分析可知(图3),研究区三叠系烃源岩均为较好-好的烃源岩,具有好的生烃潜力。

图3 研究区三叠系烃源岩“ $S_1 + S_2$ ”-TOC相关关系图
Fig. 3 Scatter diagram between “ $S_1 + S_2$ ” and TOC of Triassic source rocks

3.3 有机质类型

烃源岩全岩有机显微组分的组成特征及含量反映有机质的类型和生烃潜力(尤其是富氢显微组分)^[9]。根据图4(a),有机质类型以II₁型和II₂型为主。根据图4(b),有机质类型主要为II₂型和III型。综合分析认为,有机质类型主要为II₂-III型,具有良好的生烃潜力。

根据石油工业部标准(1986),I型干酪根, $TI \geq 80$;II₁型干酪根, $40 \leq TI < 80$;II₂型干酪根, $0 \leq TI < 40$;III型干酪根, $TI < 0$ 。根据表2计算得到TI的值为-2.3~12.9,表明有机质类型为II₂型和III型干酪根。

3.4 沉积环境

30个井下和6个露头烃源岩样品的生物标志

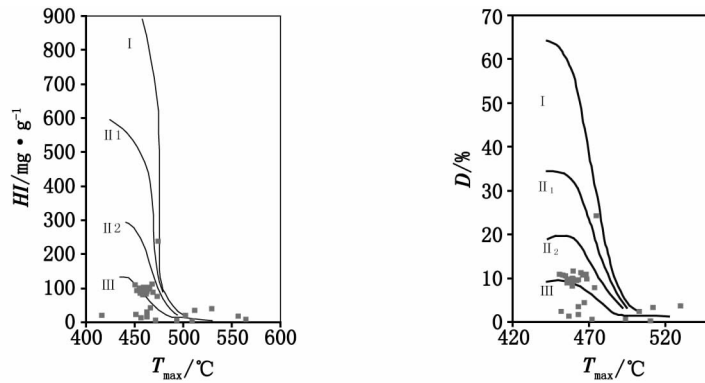


图4 研究区烃源岩 T_{max} 与 HI 及 T_{max} 与 D 的相关关系图

Fig. 4 Scatter diagrams between T_{max} - HI and T_{max} - D

表3 木里三叠系烃源岩生物标志化合物指标参数

Tab. 3 Biomarker data of Triassic source rocks from Muli

采样编号	岩性	1	2	3	4	5	6
D-08	泥岩	1.669	1.14	1.49	0.94	0.95	0.26
D-12	泥岩	1.026	1.3	1.65	0.96	0.42	0.75
D-18	泥岩	1.434	1.35	1.73	0.92	0.36	0.57
D-14	泥岩	1.027	1.31	1.65	0.88	0.14	0.5
采样编号	岩性	7	8	9	10	11	12
D-08	泥岩	0.21	1.28	0.09	26.58	25.28	48.13
D-12	泥岩	1.37	0.64	0.14	34.79	25.99	39.22
D-18	泥岩	1.01	0.61	0.15	31.1	27.97	40.94
D-14	泥岩	1.04	0.63	0.19	32.43	27.53	40.04

注:1: R_o ; 2: CPI ; 3: $(nC_{27} + nC_{29} + nC_{31} + nC_{33}) / (nC_{28} + nC_{30} + nC_{32} + nC_{34})$; 4: $(nC_{13} + nC_{15} + nC_{17} + nC_{19} + nC_{21} + nC_{23} + nC_{25}) / (nC_{14} + nC_{16} + nC_{18} + nC_{20} + nC_{22} + nC_{24} + nC_{26})$; 5: Pr/Ph ; 6: Pr/nC_{17} ; 7: Ph/nC_{18} ; 8: $C_{24}TeT/C_{26}TT$; 9: $G/C_{30}H$; 10: C_{27} 甾烷 / $(C_{27} + C_{28} + C_{29})$ 甾烷 $\times 100$; 11: C_{28} 甾烷 / $(C_{27} + C_{28} + C_{29})$ 甾烷 $\times 100$; 12: C_{29} 甾烷 / $(C_{27} + C_{28} + C_{29})$ 甾烷 $\times 100$

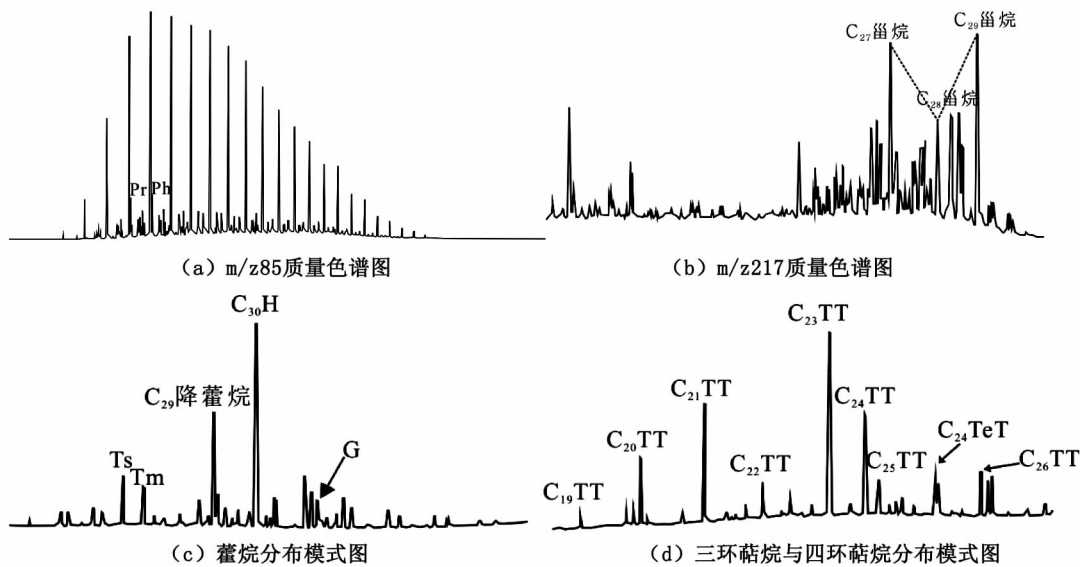


图5 研究区三叠系烃源岩样品部分生物标志化合物质谱图

Fig. 5 Part of biomarker compounds GC-MS chromatogram of Triassic source rocks

化合物指标参数见表3。

表3显示,样品的 R_o 值为 1.026% ~ 1.669%, 为成熟 - 高成熟烃源岩。 CPI 值为 1.14 ~ 1.35;

Pr/Ph 的值为 0.14 ~ 0.95, 表现出奇碳优势。表3中的3号指标普遍大于 1.4, 而4号指标的比值为 0.88 ~ 0.96, 这一现象表明高碳数正构烷烃 (nC_{13}

- nC_{26})奇偶优势不明显, ($nC_{27} - nC_{35}$)具有明显奇偶优势,如图5(a)。这说明木里三叠系烃源岩呈现的奇碳优势并非是有有机质成熟度低引起的,而是由有机质生源特征决定的^[10]。

根据梅博文提出的划分标准^[11],推断研究区为淡水-微咸水沉积环境。根据图5(c) $G/C_{30}H$ 的值普遍小于0.15,以及图5(d) $C_{24}Te/C_{26}TT$ 的值均小于1.5,表明为海相沉积环境^[12]。表3和图5(b)显示, C_{29} 甾烷 > C_{27} 甾烷 > C_{28} 甾烷,这说明研究区有机质的生源输入高等植物大于水生生物^[13]。通过 C_{29} 甾烷 - C_{27} 甾烷 - C_{28} 甾烷三角图(图6)可以看出,烃源岩有机质输入为混源输入。因此综合分析研究区三叠系主要为陆表海或滨浅海前三角洲相沉积环境。

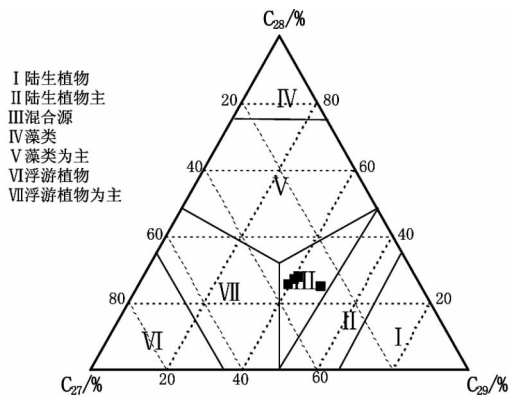


图6 研究区样品 C_{29} 甾烷- C_{27} 甾烷- C_{28} 甾烷三角图

Fig. 6 Triangular chart between C_{27} sterane- C_{28} sterane- C_{29} sterane

4 结论

1) 祁连山冻土区木里煤田三叠系烃源岩中泥岩的 R_o 值为 0.805% ~ 1.669%。 T_{max} 值介于 319°C ~ 565°C 之间,均值为 465.92°C。总体上,三叠系烃源岩处于高成熟阶段。

2) 通过对 TOC 、“ $S_1 + S_2$ ”、 IH 等指标及其相关图件的综合分析认为,研究区三叠系烃源岩有机质丰度总体较高,为中等-好烃源岩。

3) 研究区三叠系地层的有机质成熟度在 600 m 和 1300 m 左右出现峰值,这可能与有机质显微组分的组成有关,不同的显微组分在经历相同的热演化史之后会表现出不同的成熟度。

4) $T_{max} - IH$ 和 $T_{max} - D$ 的相关关系图以及有机显微组分三角图, TI 值都表明研究区烃源岩有

机质类型为 II 型和 III 型,说明有机质来源为混源输入。

5) 通过对生物标志化合物 CPI 、 Pr/Ph 、 $C_{24}Te/C_{26}TT$ 等指标以及 $G/C_{30}HPr/nC_{17} - Ph/nC_{18}$ 的相关关系图及 C_{29} 甾烷 - C_{27} 甾烷 - C_{28} 甾烷三角图的分析,可以判断沉积环境可能为还原环境的陆表海-滨海三角洲沉积。

参考文献:

- [1] 向鼎璞. 祁连山地质构造特征[J]. 地质科学, 1982(4): 364-370.
- [2] 符俊辉, 周立发. 南祁连盆地三叠纪地层及石油地质特征[J]. 西北地质科学, 2000, 21(2): 64-72.
- [3] 张振苓, 郭立言, 舒念祖. 烃源岩热解分析参数 T_{max} 异常的原因[J]. 石油勘探与开发, 2006(1): 72-75.
- [4] 柳广弟. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [5] 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.
- [6] 钟宁宁, 卢双舫, 黄志龙, 等. 烃源岩生烃演化过程 TOC 值的演变及其控制因素[J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(Z): 120-126.
- [7] 成海燕, 李安龙, 龚建明. 陆相烃源岩评价参数浅析[J]. 海洋地质动态, 2008(2): 6-10.
- [8] 王力, 周立发, 李珊. 南祁连盆地三叠系碎屑岩储层特征及综合评价[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2013, 30(2): 65-70.
- [9] 秦黎明, 张枝焕, 孟闲龙, 等. 新疆西北部和什托洛盖盆地侏罗系低熟煤系烃源岩地球化学特征及生烃条件分析[J]. 沉积学报, 2009, 27(8): 740-751.
- [10] 罗宪婴, 赵宗举, 孟元林. 正构烷烃奇偶优势在油源对比中的应用——以塔里木盆地地下古生界为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(1): 74-77.
- [11] 梅博文, 刘希江. 我国原油中异戊间二烯烷烃的分布及其与地质环境的关系[J]. 石油与天然气地质, 1980(2): 99-115.
- [12] 马安来, 金之钧, 张水昌, 等. 塔里木盆地寒武-奥陶系烃源岩的分子地球化学特征[J]. 地球化学, 2006(6): 593-601.
- [13] 龚建明, 张莉, 陈小慧, 等. 青藏高原乌丽冻土区过成熟烃源岩原始有机质类型讨论[J]. 西北地质, 2014, 47(2): 208-215.

(责任编辑 王利君)