

文章编号: 1006-6616 (2015) 03-0446-07

祁连山木里地区侏罗系窑街组 烃源岩生烃潜力评价

徐久晟^{1,2}, 文志刚³, 胡道功⁴, 张耀玲⁴, 戚帮申⁴

(1. 湖北省地震局, 武汉 430071;

2. 中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室, 武汉 430071;

3. 长江大学地球环境与水资源学院, 武汉 430100;

4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 祁连山木里坳陷侏罗系窑街组煤系泥岩和煤有机质丰度、有机质类型和有机质成熟度分析结果表明, 窑街组煤系泥岩为好的烃源岩, 有机质类型为Ⅱ₁型, 处于成熟阶段, 以生油为主, 生气为辅; 煤为差等烃源岩, 有机质类型为Ⅲ型, 处于成熟阶段, 富氢基质镜质体含量高, 具有一定的生烃潜力。综合其它层位烃源岩分析结果, 认为窑街组煤系泥岩和晚三叠世尕勒得寺组湖相泥岩为祁连山木里地区天然气水合物的主要气源岩。

关键词: 窑街组; 生烃潜力; 天然气水合物; 祁连山

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

0 引言

祁连山木里地区是中国陆域冻土区天然气水合物发现地, 自2008年首次发现天然气水合物以来, 先后有多个钻孔钻获天然气水合物实物样品或发现天然气水合物异常显示, 并在钻获天然气水合物实物样品的木里地区开展了地质、地球物理、地球化学、遥感和综合测井等工作, 系统分析了水合物的气体来源^[1~5]、形成水合物的温压条件^[3]、气体运移和水合物的赋存状况等^[4], 为祁连山天然气水合物的研究积累了宝贵的资料。

目前虽然对祁连山天然气水合物的控矿因素开展了多学科的综合研究, 但对气体来源尚未取得共识, 主要观点有: 天然气水合物的形成与煤或煤系有关, 煤层气是其主要来源^[1~2]、或者认为天然气水合物的气体与原油裂解气和原油伴生气有关, 与煤型气关系不大^[5]、天然气水合物气体以煤层气为主, 不排除深部迁移上来的热解气^[3~4]。笔者在祁连山冻土区天然气水合物控矿因素研究过程中, 对南祁连盆地发育的晚古生代—中生代烃源岩进行了系统的野外调查和地球化学分析, 对天然气水合物气体来源取得了新认识。本文对已钻获天然气水合物的木里地区侏罗系窑街组烃源岩地球化学特征进行探讨, 为天然气水合物气

收稿日期: 2014-02-12

基金项目: 中国地质调查局天然气水合物资源勘查与试采工程国家专项“祁连山冻土区天然气水合物资源勘查(力学所)”(GZHL20120301)

作者简介: 徐久晟(1989-), 男, 硕士研究生, 地质工程专业。E-mail: xujiushengsws@126.com

体来源的认识提供依据。

1 区域地质背景

祁连山地处青藏高原东北部, 其大地构造单元包括由中祁连北缘断裂和疏勒南山—拉鸡山断裂所分隔的北祁连缝合带、中祁连陆块和南祁连陆块^[6]。该区志留纪晚期加里东运动使古洋盆封闭并开始隆升剥蚀, 晚古生代下降接受沉积, 形成南祁连晚古生代-中生代上叠盆地, 先后形成了石炭系暗色泥(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、侏罗系暗色泥页岩等4套套烃源岩系^[7]。

侏罗系窑街组为青海省主要含煤建造, 主要分布于中祁连陆块木里坳陷, 如聚乎更、江仓、冬库和弧山等煤矿(见图1)。中—下侏罗统窑街组由暗色泥岩、灰—灰黑色页岩夹油页岩、煤层和底部石英质砾岩等组成, 厚692~856 m。地表窑街组剖面测量和煤炭钻孔统计结果^[8~9]表明, 木里聚乎更矿区窑街组暗色泥岩和煤层厚约153 m, 其中煤层厚度30 m, 而暗色泥岩厚度为122 m左右; 江仓矿区煤层厚度50~60 m, 暗色泥岩厚度为80 m; 冬库煤矿窑街组缺失, 中—下侏罗统大西沟组厚102 m, 其中煤层厚度6 m, 而暗色泥岩厚度为22 m。本次所采集的133个煤样和暗色泥岩样品分布于聚乎更矿区一露天、二露天、三露天、四井田及冬库煤矿、弧山煤矿与江仓煤矿。

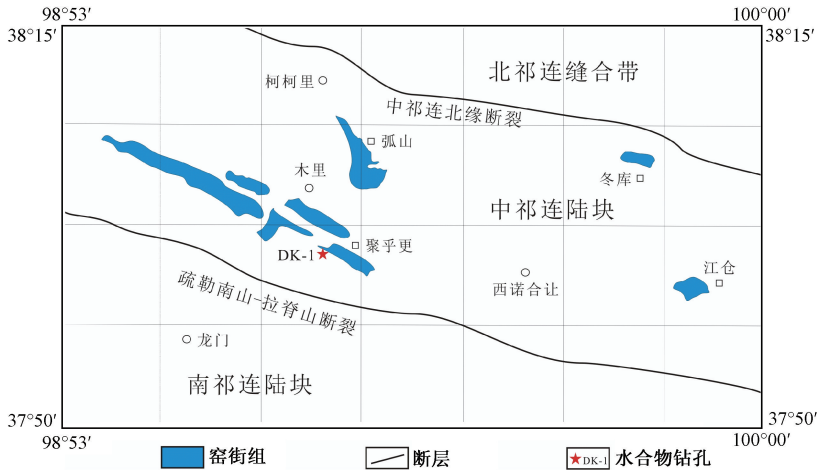


图1 祁连山木里坳陷侏罗系窑街组烃源岩分布图

Fig. 1 Distribution of source rocks of the Jurassic Yaojie formation in Muri depression of Qilian Mountain

2 烃源岩评价

2.1 有机质丰度

烃源岩有机质丰度评价通常采用总有机碳 (TOC)、生烃潜量 ($S_1 + S_2$)、氢指数 (I_H)、氯仿沥青“A”和总烃等指标。

木里坳陷窑街组12个煤系泥岩岩石热解分析结果表明, 煤系泥岩有机碳含量为1.28%~5.89%, 平均值3.22%。生烃潜量分布范围为1.23~12.27 mg/g, 平均值为5.18 mg/g (见表1), 按照陈建平等^[10]的煤系泥岩和煤的有机质丰度评价标准判断。窑街组煤系泥岩

有机碳含量和生烃潜量基本达到好的烃源岩标准，少量样品生烃潜力较低，整体评价为好烃源岩（见图2）。

121个煤样分布于聚乎更矿区一露天、二露天、三露天、四井田、冬库煤矿、弧山煤矿和江仓煤矿，样品采集过程中对一些厚层煤层每隔1 m取一个煤样。121件煤样的热解数据显示，氢指数分布范围为24~382 mg/g，平均值为191 mg/g；生烃潜量分布范围为9.14~187.43 mg/g，平均值为94.93 mg/g（见表1）。按煤氢指数和生烃潜量判断，属于非—中等烃源岩，主要处于差等烃源岩范围内（见图3）。

表1 窑街组烃源岩参数统计

采样点 岩性		TOC/%				(S ₁ +S ₂)/(mg·g ⁻¹)				I _H /(mg·g ⁻¹)				R _o /%				T _{max} /℃				D/%			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
聚一露天	泥岩	5	1.28	5.89	3.29	5	1.23	11.22	4.37	5	57	178	99	/	/	/	/	5	447	462	455	5	5.67	19.8	9.67
	煤	56	42.00	88.26	85.31	56	28.72	166.5	98.8	56	111	254	194	5	0.96	1.1	1.03	56	425	471	452	56	9.57	27.2	16.9
乎二露天	煤	8	44.84	78.21	62.28	8	11.84	84.37	33.54	8	88	168	125	4	0.51	0.83	0.71	8	429	438	433	8	7.47	14.5	10.9
更三露天	泥岩	3	2.17	4.45	3.01	3	3.11	7.23	4.68	3	147	160	156	/	/	/	/	3	448	449	448	3	14.3	14.9	14.7
区四井田	煤	13	38.59	87.71	69.56	13	9.14	187.43	111.62	13	70	382	240	4	0.48	0.85	0.67	13	424	447	437	13	5.97	32.0	20.3
	泥岩	4	1.93	4.58	3.3	4	2.32	12.27	6.49	3	99	408	211	1	0.83	0.83	0.83	4	448	460	454	3	8.78	35.4	18.4
冬库矿区	煤	14	68.64	87.03	80.9	14	63.86	171.47	131.38	14	171	298	237	3	0.89	0.95	0.91	14	439	454	448	14	14.7	25.8	20.6
弧山矿区	煤	5	80.53	85.24	82.76	5	40.1	53.7	44.58	5	131	170	150	2	0.74	0.87	0.8	5	433	438	436	5	11.8	15.5	13.4
江仓矿区	煤	8	39.33	90.28	72.55	8	11.21	27.95	17.88	8	24	58	39	5	1.53	2.06	1.86	8	516	531	524	8	2.05	4.94	3.27
全区	泥岩	12	1.28	5.89	3.22	12	1.23	12.27	5.18	11	57	408	149	1	0.83	0.83	0.83	12	447	462	453	11	5.67	35.4	13.4
平均值	煤	121	38.59	92.9	80.26	121	9.14	187.43	94.93	121	24	382	191	28	0.48	2.51	1.06	121	424	531	455	121	2.5	32	16.5

注：TOC—总有机碳；S₁+S₂—生烃潜量；I_H—氢指数；R_o—镜质体反射率；T_{max}—岩石热解峰温；D—降解率；
a—样品数；b—最小值；c—最大值；d—平均值

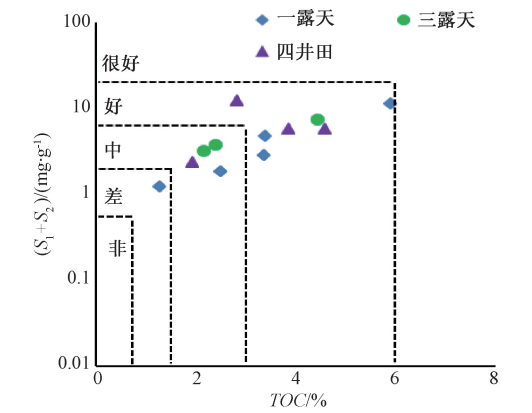


图2 窑街组煤系泥岩有机碳含量与生烃潜量关系

Fig. 2 Relationship between organic carbon content and hydrocarbon-generating potential of the mudstone of the Jurassic Yaojie coal-bearing formation

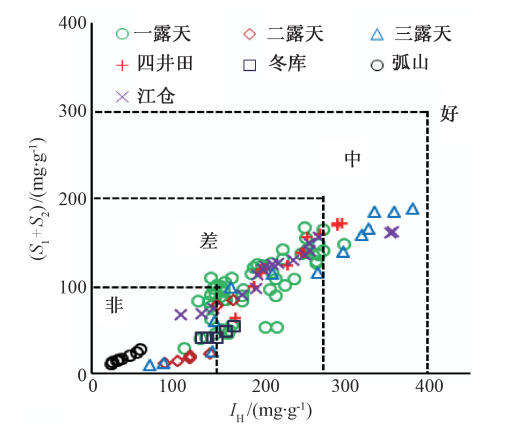


图3 窑街组煤氢指数与生烃潜量关系

Fig. 3 Relationship between hydrogen index and hydrocarbon-generating potential of the coal of the Jurassic Yaojie Formation

2.2 有机质类型

2.2.1 岩石热解

窑街组煤系泥岩岩石热解峰温（T_{max}）均介于447~462℃之间，氢指数（I_H）为

149 mg/g左右, 降解率 (D) 13.41%左右 (见表1)。在 $T_{\max}$ - I_H 关系图 (见图4) 和 $T_{\max}$ - D 关系图 (见图5) 上, 窑街组煤系泥岩样品基本落在Ⅱ型区域内, 并以Ⅱ₁型为主, 说明有机质类型较好, 以生油为主, 生气为辅。

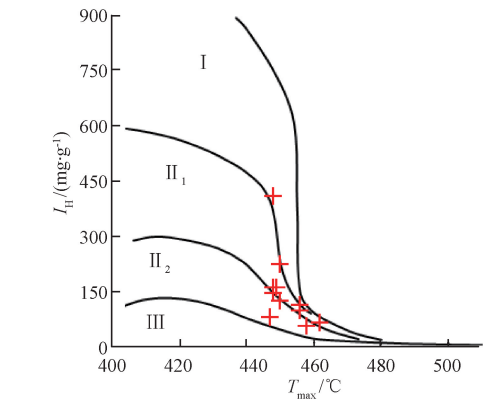


图4 窑街组煤系泥岩 $T_{\max}$ - I_H 关系
Fig. 4 Relationship of $T_{\max}$ - I_H of coal-bearing mudstone in Yaojie Formation

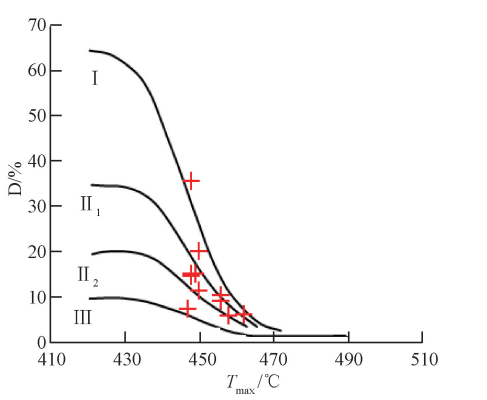


图5 窑街组煤系泥岩 $T_{\max}$ - D 关系
Fig. 5 Relationship of $T_{\max}$ - D of coal-bearing mudstone in Yaojie Formation

2.2.2 煤全岩显微组分

显微组分的组成直接反映了烃源岩有机质的生源构成, 其相对组成基本反映了烃源岩有机质类型^[11]。大多数学者都以壳质组分不低于15%或富氢组分不低于10%作为形成工业煤成油藏的下限^[12~14]。研究结果^[15]显示, 基质镜质体是一种富氢组分, 具有生液态烃的能力。根据野外样品采集地点, 从121件煤样中挑选一部分属于同一层位的相邻煤样混合均匀组成13件混合样, 另外挑选其它层位15件样品共计28个进行全岩显微组分鉴定。窑街组煤的显微组分主要以镜质体为主, 达到了87.9%左右, 且镜质体中基质镜质体 (富氢组分) 占绝大多数, 分布于21.43%~71.97%之间, 平均值为51.51% (见表2)。

表2 侏罗系窑街组煤显微组分组成				
Table 2 Coal macerals in the Jurassic Yaojie Formation				
显微组分	样品件数	最小值	最大值	平均值
镜质组/%	28	80.74	97.74	87.90
惰性组/%	28	1.75	16.84	10.43
壳质组/%	28	0	5.26	1.10
腐泥组/%	28	0	5.26	0.53
基质镜质体/%	28	21.43	71.97	51.51
类型指数 (T_i)	28	-79.21	-59.65	-75.27
类型	Ⅲ			

根据公式 $T_i = e + 0.5f - 0.75g - h$ (e, f, g, h 分别为腐泥组、壳质组、镜质组及惰质组的相对百分含量), 计算得出类型指数 (T_i) 介于-79.21~-59.65之间, 按照陈丽华^[16]的干酪根镜检分类表判断, 窑街组煤为Ⅲ型干酪根。

2.2.3 干酪根碳同位素

有机质的稳定碳同位素组成对母源有较强的继承性, 因此干酪根的碳同位素可以反映烃源岩有机质类型。有机质类型好, 其碳同位素轻; 反之则碳同位素值重。根据岩样在区域上

的分布特征，从样品中选取 10 个煤样进行干酪根碳同位素测定（见表 3）。陈丽华^[16]根据干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 划分有机质类型： $\delta^{13}\text{C}$ 值小于 -28‰ 为 I 型，介于 $-28\text{‰} \sim -26.5\text{‰}$ 之间为 II₁ 型，介于 $-26.5\text{‰} \sim -25\text{‰}$ 为 II₂ 型，大于 -25‰ 为 III 型。从表 3 可以看出，10 件煤样中仅有 1 个样品的干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -26.5‰ 与 -25‰ 之间，为 II₂ 型，其余 9 个样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均大于 -25‰ ，为 III 型，故整体评价为 III 型，与全岩显微组分鉴定得出的结果一致。

表 3 窑街组煤干酪根碳同位素
Table 3 The $\delta^{13}\text{C}$ analysis of kerogen in the coal of Yaojie Formation

样品	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	样品	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$
B038-1	-24.8	H344	-23.7
H040	-23.6	B349-1	-23.3
H073	-25.3	H361	-23.8
B302-2	-24.1	H683	-24.0
H342	-24.0	H379	-24.2

2.3 有机质成熟度

从所采集烃源岩样品中选取 1 件煤系泥岩样品和 28 件岩样进行镜质体反射率 (R_o) 的测定，结果表明，窑街组煤系泥岩镜质体反射率为 0.83%，煤的镜质体反射率介于 0.48%~2.51% 之间，平均值为 1.06%（见表 1）。根据陈丽华^[16]镜质体反射率划分标准，窑街组泥岩和煤均达到成熟阶段（见图 6）。

133 件烃源岩样品岩石热解分析数据（见表 1）显示，12 件煤系泥岩的 T_{max} 值分布于 447~462℃ 之间，平均值 453℃，121 件煤的 T_{max} 值分布于 424~531℃，平均值 455℃。按照陈丽华^[16]的生油岩 T_{max} 划分成熟度标准分析，窑街组 12 件煤系泥岩均达到成熟阶段，82 件煤处于成熟阶段。整体评价窑街组煤系泥岩和煤均处于成熟阶段（见图 7），与镜质体反射率分析结果基本一致。

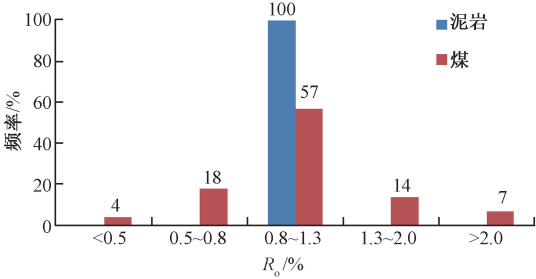


图 6 窑街组烃源岩 R_o 分布

Fig. 6 Distribution of R_o of source rocks in Yaojie Formation

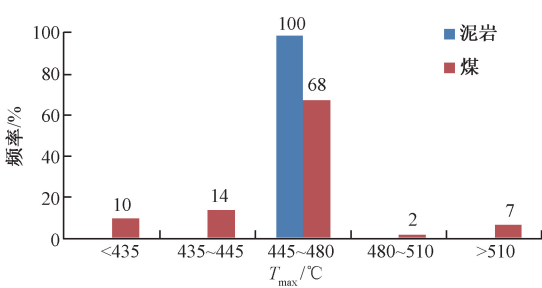


图 7 窑街组烃源岩 T_{max} 分布

Fig. 7 Distribution of T_{max} of source rocks in Yaojie Formation

3 讨论与结论

祁连山木里坳陷侏罗系窑街组煤系泥岩和煤有机质丰度、类型和成熟度分析结果表明，窑街组煤系泥岩有机质丰度达到好的烃源岩级别，有机质类型以 II₁ 型为主，已达到成熟阶段，具有较强的生油和生气潜力，为祁连山天然气水合物的重要气源岩；窑街组煤有机质丰度为差等，有机质类型为 III 型，但富含基质镜质体，达到成熟阶段，生油气潜力有限。

祁连山冻土区烃源岩生烃潜力评价结果^[17]表明,广泛分布于中祁连和南祁连北部的晚三叠世尕勒得寺组泥质烃源岩有机质丰度高,有机质类型以Ⅱ-Ⅲ型腐殖型有机质为主,热演化阶段达到成熟—高成熟,具有很强的生烃潜力,为区域上天然气水合物的主要气源岩。地质调查显示,尕勒得寺组暗色泥(页)岩和煤在木里地区平均厚度约201 m^[8],因此可以认为,上三叠统尕勒得寺组湖相泥岩和窑街组煤系泥岩为祁连山天然气水合物的主要气源岩。

参 考 文 献

- [1] 曹代勇,刘天绩,王丹,等. 青海木里地区天然气水合物形成条件分析 [J]. 中国煤炭地质, 2009, 21 (9): 3~6.
CAO Dai-yong, LIU Tian-ji, WANG Dan, et al. Analysis of formation conditions of natural gas hydrate in Muli coalfield, Qinghai Province [J]. Coal Geology of China, 2009, 21 (9): 3~6.
- [2] 王佟,刘天绩,邵龙义,等. 青海木里煤田天然气水合物特征与成因 [J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37 (6): 26~30.
WANG Tong, LIU Tian-ji, SHAO Long-yi, et al. Characteristics and origins of the gas hydrates in the Muli coalfield of Qinghai [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37 (6): 26~30.
- [3] 祝有海,刘亚玲,张永勤. 祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件 [J]. 地质通报, 2006, 25 (1/2): 58~63.
ZHU You-hai, LIU Ya-ling, ZHANG Yong-qin. Formation conditions of gas hydrates in permafrost of the Qilian Mountains, Northwest China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25 (1/2): 58~63.
- [4] 祝有海,张永勤,文怀军,等. 祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征 [J]. 地球学报, 2010, 31 (1): 7~16.
ZHU You-hai, ZHANG Yong-qin, WEN Huai-jun, et al. Gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost and their basic characteristics [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31 (1): 7~16.
- [5] 卢振权,祝有海,张永勤,等. 青海祁连山冻土区天然气水合物的气体成因研究 [J]. 现代地质, 2010, 24 (3): 581~588.
LU Zhen-quan, ZHU You-hai, ZHANG Yong-qin, et al. Study on genesis of gases from gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai [J]. Geoscience, 2010, 24 (3): 581~588.
- [6] 张雪亭,杨生德. 青海省区域地质概论 [M]. 北京:地质出版社, 2007.
ZHANG Xue-ting, YANG Sheng-de. Introduction to regional geology of Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [7] 符俊辉,周立发. 南祁连盆地石炭—侏罗纪地层区划及石油地质特征 [J]. 西北地质科学, 1998, 19 (2): 47~54.
FU Jun-hui, ZHOU Li-fa. Carboniferous-Jurassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and Their petrogeological features [J]. Northwest Geoscience, 1998, 19 (2): 47~54.
- [8] 白旭东,戚长美,张志青,等. 青海木里地区晚三叠世—早中侏罗世烃源岩特征初探 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 33 (15): 134~135.
BAI Xun-dong, XIAN Fa-mei, ZHANG Zhi-qing, et al. Features of hydrocarbon source rock of Late Triassic-Early Middle Jurassic in Muli depression in Qilian Mountains [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, 33 (15): 134~135.
- [9] 青海江仓能源发展有限责任公司. 青海省木里煤田江仓矿区四井田勘探报告 [R]. 西宁:青海江仓能源发展有限责任公司, 2006.
Qinghai Jiangcang Energy Development Limited Company. The exploration report on the No. 4 Well of Jiangcang mine area in Muli Coalfield, Qinghai Province [R]. Xining: Qinghai Jiangcang Energy Development Limited Company, 2006.
- [10] 陈建平,赵长毅,何忠华. 煤系有机质生烃潜力评价标准探讨 [J]. 石油勘探与开发, 1997, 24 (1): 1~5.
CHEN Jian-ping, ZHAO Chang-yi, HE Zhong-hua. Criteria for evaluating the hydrocarbon generating potential of organic matter in coal measures [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24 (1): 1~5.

[11] 汪生秀, 张枝焕, 张志平, 等. 二连盆地侏罗系烃源岩地球化学特征及油源贡献 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31 (4): 396 ~ 403.
WANG Sheng-xiu, ZHANG Zhi-huan, ZHANG Zhi-ping, et al. Geochemical characteristics and oil-source correlation of the Jurassic source rocks in the Erlian Basin [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31 (4): 396 ~ 403.

[12] Hunt J M. Generation of gas and oil from coal and other terrestrial organic matter [J]. Organic Geochemistry, 1991, 17 (6): 673 ~ 680.

[13] Snowdon L R. Oil from Type III organic matter: Resinite revisited [J]. Organic Geochemistry, 1991, 17 (6): 743 ~ 747.

[14] Mukhopadhyay P K, Hatcher P G. Composition of coal [C] //Law B E, Rice D D. Hydrocarbons from coal. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1993: 79 ~ 118.

[15] 程克明, 王铁冠. 天然气源岩地球化学特征 [J]. 天然气地球科学, 1993, (2): 49 ~ 94.
CHENG Ke-ming, WANG Tie-guan. The natural gas source rock geochemistry [J]. Natural Gas Geoscience, 1993, (2): 49 ~ 94.

[16] 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, 2007, 24 (2): 6 ~ 10.
CHENG Hai-yan, LI An-long, GONG Jian-ming. Evaluation parameters of source rock of continental facies [J]. Marine Geology Letters, 2007, 24 (2): 6 ~ 10.

[17] 宋焕新, 曾艳涛, 文志刚. 祁连山冻土区烃源岩生烃潜力评价 [R]. 北京: 中国地质科学院地质力学研究所, 2014.
SONG Huan-xin, ZENG Yan-tao, WEN Zhi-gang. Evaluation of hydrocarbon generating potential in permafrost of the Qilian Mountains [R]. Beijing: Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, 2014.

EVALUATION OF THE HYDROCARBON GENERATION
POTENTIAL OF SOURCE ROCKS OF THE JURASSIC
YAOJIE FORMATION IN MULI DEPRESSION OF
QILIAN MOUNTAINS

XU Jiu-sheng^{1,2}, WEN Zhi-gang³, HU Dao-gong⁴, ZHANG Yao-ling⁴, QI Bang-shen⁴

- (1. Earthquake Administration of Hubei Province, Wuhan 430071, China;
- 2. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China;
- 3. School of Earth Environmental and Water Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China;
- 4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The research results of the abundance, types and maturity of the organic matter of mudstone and coal seam of Yaojie coal-bearing formation in Muri depression of Qilian Mountains show that the mudstone of Yaojie coal-bearing formation is good hydrocarbon source rock and the organic matter type is sapropelic-humic (II₁) during the mature stage in which gas generation is predominant. While the coal seams are relatively poor hydrocarbon source rocks, with the organic matter of humic type (III) at the mature stage, which have a certain hydrocarbon generating potential. Based on the analysis of hydrocarbon source rocks in others formation, it is concluded that the mudstone of Yaojie coal-bearing formation and the lacustrine mudstone of Galedesi formation in late Triassic are the main source rocks of gas hydrates in Muri depression.

Key words: Yaojie Formation; hydrocarbon generation potential; Muli depression; Qilian Mountains