

南祁连盆地木里坳陷石炭系-侏罗系天然气水合物 气源岩有机地球化学特征

范东稳^{1,2}, 卢振权², 李广之³, 肖睿²

[1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029;
3. 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 214151]

摘要:通过开展南祁连盆地木里坳陷天然气水合物基础地质剖面调查工作,对石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系共四套层系5条剖面的炭质泥岩、泥岩等样品进行了系统采样与分析,在此基础上深入研究四套层系的有机质丰度、有机质类型和有机质成熟度等地球化学特征,分析及对比各层系的有机地球化学指标,以探讨不同层系烃(气)源岩为天然气水合物提供的气源条件。结果表明:石炭系-二叠系有机质丰度偏低,TOC(总有机碳含量)普遍小于0.4%,为非和差烃源岩,有机质类型主要为Ⅱ型和Ⅲ型,有机质成熟度为过成熟,生烃能力较差,难以成为天然气水合物潜在气源岩。三叠系样品TOC值普遍大于1%,氯仿沥青“A”平均为0.89%,以很好和好烃源岩为主,并含少量差和非烃源岩,有机质类型以Ⅲ型为主,含少量Ⅱ₂型,镜质体反射率 R_o 值为0.74%~0.98%,整体上处于成熟阶段,生气能力较强,可作为天然气水合物主要潜在气源岩。侏罗系以很好、好和中等烃源岩为主,并含部分差烃源岩,有机质类型主要为Ⅱ型和Ⅲ型, R_o 值为0.62%~0.97%,整体上处于成熟阶段,可作为天然气水合物次要潜在气源岩。

关键词:有机地球化学;天然气水合物;气源岩;木里坳陷;南祁连盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Organic geochemical characteristics of the Carboniferous-Jurassic potential source rocks for natural gas hydrates in the Muli Depression, Southern Qilian Basin

Fan Dongwen^{1,2}, Lu Zhenquan², Li Guangzhi³, Xiao Rui²

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Oil & Gas Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100029, China; 3. Wuxi Research Institute of
Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China]

Abstract: During the investigation of the basic geological profile of natural gas hydrates in the Muli Depression, Southern Qilian Basin, we analyzed the carbon-rich mudstone and mudstone sampled from 5 sections of the Carboniferous, Permian, Triassic and Jurassic sequences. The geochemical characteristics such as organic matter abundance, organic matter type and organic matter maturity of four sequences were accordingly studied in detail. The organic geochemical indexes of each sequence were analyzed and compared in order to explore the gas source rock qualities for different sequences of (gas) source rocks for natural gas hydrates. The results show that the Carboniferous-Permian organic matter abundance is relatively low, the TOC (total organic carbon) content is generally less than 0.4%, both of which indicate the source rocks are very lean. The kerogen are mainly over-matured Types II and III organic matters, resulting in poor hydrocarbon generation capacity. Thus, the source rocks could not be the potential gas source rocks for natural gas hydrate generation. The samples collected from the Triassic strata have TOC value of generally greater than 1% and an average chloroform bitumen “A” of 0.89, which are mostly good and very good source rock samples, with a small number of samples with poor or non-hydrocarbon source rock quality. The organic materials are mainly matured Type III as a whole with a small number of Type II₂, with a vitrinite reflectance (R_o) value of 0.74%–0.98%. These strata can be viewed as the main potential gas source rocks for natural gas hydrate generation. The Jurassic strata are dominated by source rocks of very

收稿日期:2018-12-05;修订日期:2020-02-01。

第一作者简介:范东稳(1992—),男,博士研究生,矿产普查与勘探专业。E-mail:458704798@qq.com。

通讯作者简介:卢振权(1972—),男,博士,研究员,天然气水合物地质地球化学勘查。E-mail:luzhq@vip.sina.com。

基金项目:祁连山冻土区天然气水合物调查二级项目(DD20160223)。

good, good, and medium qualities with limited number of poor source rocks. Their organic materials are mainly matured Type II and III with a R_o value of 0.62%–0.97%, and thus can be regarded as the secondary potential gas source rocks for the generation of natural gas hydrates.

Key words: organic geochemistry, natural gas hydrate, gas source rock, Muli Depression, Southern Qilian Basin

天然气水合物作为一种在地球上自然产出的清洁能源,它是以甲烷为主的烃类气体与水分子在低温高压条件下所形成的白色冰雪状晶体化合物,俗称“可燃冰”^[1]。它是一种属于笼状包合物的特殊化合物,由水分子组成的多面体晶腔包笼着烃类气体分子,在海底(大陆架、大陆坡、水下高地与边缘海等地)和陆上永久冻土带中分布较为广泛^[2-3]。

中国的冻土面积仅次于俄罗斯和加拿大居世界第三位,占总的国土面积的22.4%,青藏高原以及黑龙江省北部地区是中国永久冻土带广泛分布的地区^[4]。针对陆域冻土区天然气水合物的研究,前人已经做了大量工作。自2000年以来,结合地球物理和地球化学等手段科研人员对该区天然气水合物的成藏特征及资源潜力的研究上取得了一定进展^[5-12]。2008—2019年,中国地质调查局在南祁连盆地(中低纬度高山冻土区)部署实施的天然气水合物科学钻探试验工程首次钻获陆域天然气水合物岩心样品,世界范围内在中低纬度高海拔多年冻土区钻获天然气水合物实物样品尚属首次^[13-17]。

近年来,部分学者多在南祁连盆地木里坳陷三露天及其附近地区开展天然气水合物调查研究工作^[18-23]。据前人研究,南祁连盆地木里坳陷该区共发育了4套烃源岩系,从老到新分别为石炭系深褐色泥岩、下二叠统深灰色灰岩、上三叠统黑色泥岩和侏罗系灰黑色泥页岩,除石炭系烃源岩成熟度过高外,其他3套烃源岩系均具有较强的生烃能力^[24-25]。通过对该区各钻孔所采集的气源岩样品进行有机地球化学测试认为中侏罗统和上三叠统只为该区天然气水合物提供一定的气源条件,推测主力气源岩可能来自更深部层系^[26-27]。同时,前人为研究天然气水合物的气源性质也做了大量工作并存在两种观点,一种观点认为天然气水合物的气源岩主要为侏罗系含煤层段和上三叠统尕勒得寺组、中二叠统草地沟组和石炭系深褐色泥岩,为煤成气和油型气都有的混合型气源^[27-30];一种认为天然气水合物气源主要来自中侏罗统含煤层段及其周围的炭质泥岩,气源类型为煤成气^[31-32]。

过去对南祁连盆地木里坳陷天然气水合物气源岩的研究主要集中在点上,而对整个木里坳陷特别是石炭-侏罗系气源岩发育特征研究较少,并且哪一层系

可以为天然气水合物提供良好气源条件还存在不同的认识,为进一步了解该区天然气水合物气源岩发育情况,本次通过开展南祁连盆地木里坳陷天然气水合物基础地质剖面调查工作,对石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系共四套层系5条剖面的炭质泥岩、泥岩等样品进行了系统采样与分析。在此基础上深入研究分析木里坳陷四套层系的有机质的丰度、类型及成熟度等地球化学特征,分析及对比各层系的有机地球化学指标,进一步探讨不同层系烃(气)源岩为天然气水合物提供的气源条件。

1 地质背景

祁连山地区位于青藏高原东北部,其可划分为北祁连构造带、中祁连陆块、南祁连构造带三个构造单元,本次研究区位于南祁连构造带。早古生代,祁连山地区为一个位于柴达木地块与华北地块之间的小型洋盆,志留纪晚期受到加里东运动的影响,洋盆闭合抬升。之后到了石炭纪时期该区地层发生沉降,沉积相为浅海陆棚相。二叠纪由于祁连山地区地层发生差异升降导致北部地区地层抬升而南部地区继续发育浅海陆棚相沉积。在三叠世晚期,该区整体受印支运动影响被抬升成陆,由砂泥岩互层局部夹碳酸盐岩的海相沉积转变为陆相沉积。祁连山地区后期受燕山运动的影响局部拉张产生一系列带状断陷盆地,并沉积了一套侏罗纪的三角洲沼泽相含煤碎屑岩地层^[33-36]。即木里坳陷、天峻坳陷、哈拉湖坳陷、下日哈坳陷和疏勒坳陷。

本次所测剖面位于南祁连盆地木里坳陷(图1),出露的地层主要为石炭系、二叠系、三叠系和侏罗系。为研究该区石炭系和二叠系发育特征,在青海省海北州门源县多隆乡共实测剖面两条(DL1、DL2),石炭系以灰褐色细砂岩、深褐色泥岩为主,局部夹泥质粉砂岩,见交错层理和水平层理,沉积相类型为浅海陆棚相。二叠系以紫红色、暗紫色细粒砂岩和灰色泥灰岩为主,局部夹粉砂质泥岩、炭质泥岩和泥岩,见交错层理和平行层理,沉积相类型为滨岸相和三角洲相。JC1剖面位于江仓矿区日干山一带,出露的三叠系以浅灰色、褐灰色细粒砂岩、粉砂岩和

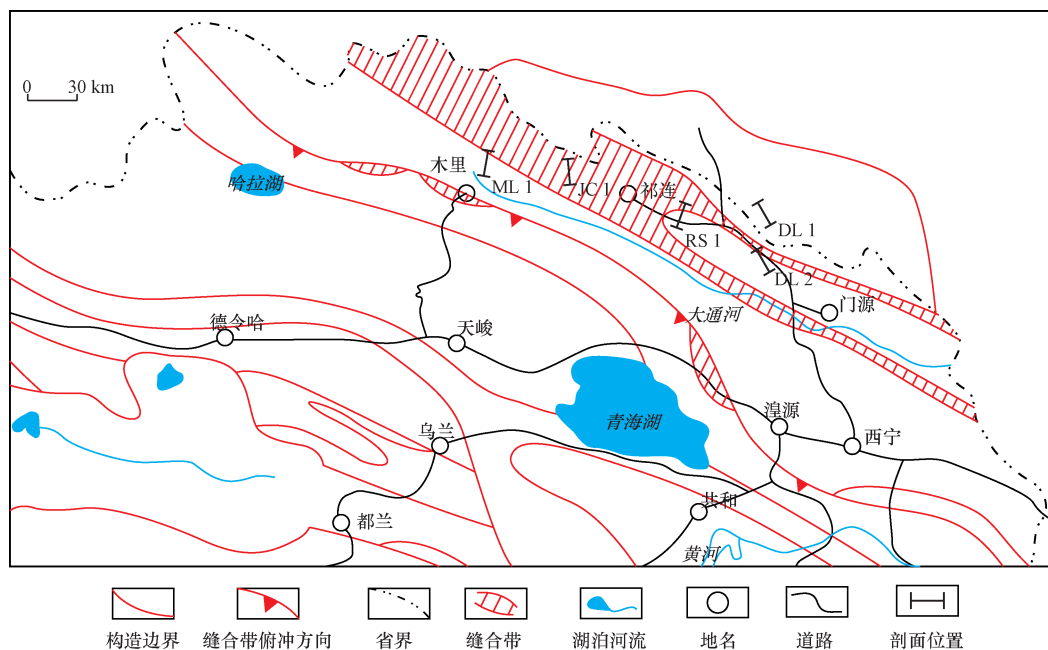


图1 南祁连盆地木里坳陷剖面位置

Fig.1 A map of the profile location of the Muli Depression, Southern Qilian Basin

泥岩为主,局部见薄煤层、炭质泥岩,发育板状交错层理,沉积相类型为潮坪相、湖泊相和河流相。ML1、RS1剖面分别位于青海省海西州天峻县木里镇和海北州刚察县热水镇,出露的侏罗系以灰白色、灰色细-中粒砂岩、深褐色泥岩和炭质泥岩为主,局部见厚煤层,发育水平层理,沉积相类型为辫状河相、三角洲相和湖泊相。

2 样品采集与分析

本次在南祁连盆地木里坳陷系统采集了石炭系-侏罗系四套层系5条剖面共124件烃(气)源岩样品,分别为DL1剖面、DL2剖面、JC1剖面、ML1剖面和RS1剖面,详细样品采集信息及描述详见表1。其中,DL1剖面共采集烃(气)源岩样品15件;DL2剖面共采集烃(气)源岩样品10件;JC1剖面共采集烃(气)源岩样品37件;ML1剖面共采集烃(气)源岩样品23件;RS1剖面共采集烃(气)源岩样品39件。本次所采集的烃(气)源岩样品的总有机碳含量(TOC)、热解(Rock-Eval)、氯仿沥青“A”、镜质体反射率、干酪根镜检、干酪根元素分析、干酪根碳同位素和族组分的测定是在中石化合肥培训测试中心进行的。其中,将每个剖面的烃源岩样品进行TOC和热解的测试,将三叠系、侏罗系的部分泥岩、炭质泥岩和煤岩样品进行氯仿沥青“A”、镜质体反射率、族组分、干酪根显微组分、干酪根元素和干酪根碳同位

素分析与鉴定。

其中,TOC的测试执行GB/T19145—2003标准,测试设备为CS744HCR碳硫分析仪,测试环境为常温常压;生油岩热解测试执行GB/T18602—2012标准,测试设备为ROCK-EVAL6型热解仪,测试温度20℃,湿度40%;氯仿沥青“A”的测试执行SY/T 5118—2005标准,测试设备为全自动多功能抽提仪;镜质体反射率的测试依据SY/T5124—201标准,测试仪器为Zeiss MPM400显微光度计,测试条件为温度23℃,湿度50%;族组分分析依据SY/T 5119—2008标准,使用仪器为AE240天平;干酪根显微组分的鉴定依据SY/T5125—2014标准,鉴定仪器为ZEISS生物显微镜;干酪根元素分析依据GB/T 19143—2003标准,使用仪器为Vario EL CUBE元素分析仪;干酪根碳同位素的鉴定执行GB/T18340.2—2010标准,测试设备为DELTA plus XL同位素质谱仪。

3 气源岩有机地球化学特征

本文通过分析木里坳陷四套层系5个剖面烃(气)源岩样品的检测结果,从有机质丰度、类型及成熟度3个方面讨论及对比四套层系的有机地球化学特征,初步认为,该区侏罗系和三叠系可作为天然气水合物潜在气源岩,石炭系-二叠系烃源岩生气能力较弱,对天然气水合物成藏作用意义不大,可能难以成为天然气水合物潜在气源岩。

表 1 南祁连盆地木里坳陷各剖面及层系所采集样品

Table 1 Statistics of samples taken from each cross section and sequence of the Muli Depression, Southern Qilian Basin

采样 层系	岩性	采样剖面号				
		DL1	DL2	JC1	ML1	RS1
石炭系	泥岩	7	0	0	0	0
	泥岩	5	5	0	0	0
二叠系	泥灰岩	3	2	0	0	0
	炭质泥岩	0	2	0	0	0
	灰岩	0	1	0	0	0
三叠系	泥岩	0	0	33	0	0
	煤	0	0	1	0	0
	炭质泥岩	0	0	3	0	0
	泥岩	0	0	0	9	31
侏罗系	煤	0	0	0	8	5
	炭质泥岩	0	0	0	6	3

注:表中数字为样品数量。

3.1 有机质丰度

3.1.1 有机碳含量

本文依据有机碳含量 0.4%、0.6%、1%、2% 为评价分界点^[37-38], 将所采集剖面样品分成非烃源岩、差烃源岩、中等烃源岩、好烃源岩和很好烃源岩共五个类别。本次总有机碳含量测试共 125 样次, 石炭系样品 7 样次, 二叠系样品 18 样次, 三叠系样品 37 样次, 侏罗系样品 62 样次。根据本次实验测试结果, 将不同剖面泥岩、炭质泥岩、泥灰岩、灰岩和煤岩等样品有机碳含量在各层系中所占比重记录在表 2 中, 结果表明: DL1 剖面中石炭系泥岩样品为非和差烃(气)源岩; 二叠系泥岩和泥灰岩样品均为非烃(气)源岩。DL2 剖面中二叠系泥岩、泥灰岩、灰岩和炭质泥岩的 TOC 数据分布较为离散, 但总体以中等和非烃(气)源岩为主, 总有机碳含量大于 0.6% 的样品占总数的 60%, 并含部分好和很好烃(气)源岩。JC1 剖面三叠系泥岩、炭质泥岩和煤岩样品 5 种类型烃源岩均有分布, 以很好和好烃(气)源岩为主, 总有机碳含量大于 1% 的样品占总数的 84.22%, 大于 2% 的占总数的 73.69%, 并含少量差和非烃(气)源岩, 总之, 三叠系烃(气)源岩为很好和好烃(气)源岩。ML1 剖面侏罗系泥岩、炭质泥岩和煤岩以很好烃(气)源岩为主, 并含部分中等和好烃(气)源岩, 所有样品的 TOC 都大于 0.6%, 无非烃(气)源岩样品。RS1 剖面侏罗系泥岩、炭质泥岩和煤岩样品这 5 种类型烃源岩均有分布, 但仍以很好和中等烃(气)源岩为主, TOC 大于 0.6% 的样品占总数的 76.92%, 并含部分非、差和好烃(气)源岩。

表 2 南祁连盆地木里坳陷岩石样品 TOC 含量

(分布比例/%)

Table 2 The classification of rock samples by TOC content in the Muli Depression, Southern Qilian Basin (distribution proportion/%)

剖面号	层系	TOC 含量				
		<0.4%	0.4% ~ 0.6%	0.6% ~ 1.0%	1.0% ~ 2.0%	>2.0%
DL1	石炭系	85.71	14.29	0	0	0
DL1	二叠系	100.00	0	0	0	0
DL2	二叠系	40.00	0	30.00	10.00	20.00
JC1	三叠系	2.63	5.26	7.89	10.53	73.69
ML1	侏罗系	0	0	8.70	8.69	82.61
RS1	侏罗系	17.95	5.13	30.77	5.13	41.02

整体来看, 四套层系中侏罗系和三叠系样品均以很好、好和中等烃(气)源岩为主, 并含部分非和差烃(气)源岩; 而石炭系和二叠系的岩石样品则以非和差烃(气)源岩为主。

3.1.2 生烃潜量

生烃潜量($S_1 + S_2$) 是评价烃(气)源岩生烃潜力的重要参数之一, 用来表示单位质量烃源岩的产油潜能, 可以更加直接和客观地反映烃(气)源岩的生烃能力^[38]。

根据本次实验测试结果, 依据 $S_1 + S_2$ 的值, 以 2、6、20 mg/g 为划分标准, 将所采集气源岩样品分为差、中等、好、最好 4 个类别^[37]。再将各剖面气源岩样品的生烃潜量在各层系中所占的比重记录在表 3 中, 结果表明: DL1 剖面石炭系泥岩样品均为非烃(气)源岩; 二叠系泥岩、泥灰岩样品也均为非烃(气)源岩。DL2 剖面二叠系泥岩、泥灰岩、炭质泥岩和灰岩的生烃潜量值显示为非烃(气)源岩。JC1 剖面三叠系泥岩、

表 3 南祁连盆地木里坳陷岩石样品 $S_1 + S_2$ 分类统计

(分布比例/%)

Table 3 $S_1 + S_2$ classification of rock samples taken from the Muli Depression, Southern Qilian Basin (distribution proportion/%)

剖面号	层位	$S_1 + S_2$			
		<2 mg/g	2 ~ 6 mg/g	6 ~ 20 mg/g	>20 mg/g
DL1	石炭系	100.00	0	0	0
DL1	二叠系	100.00	0	0	0
DL2	二叠系	100.00	0	0	0
JC1	三叠系	57.89	34.21	2.63	5.27
ML1	侏罗系	21.74	13.04	17.39	47.83
RS1	侏罗系	66.67	10.26	10.25	12.82

炭质泥岩和煤岩样品 4 种类型烃源岩均有分布,以中等和差烃(气)源岩为主,并含部分好和最好烃(气)源岩。ML1 剖面侏罗系泥岩、炭质泥岩和煤岩以最好和好烃(气)源岩为主,其中生烃潜量大于 6 mg/g 的样品占总数的 65.22%,并含部分中等和差烃(气)源岩。RS1 剖面侏罗系泥岩、炭质泥岩和煤岩样品则 4 种类型烃源岩均有分布,但以差烃(气)源岩为主,并含部分好和最好烃(气)源岩。

从以上数据可以看出,以生烃潜量为指标的评价结果较以总有机碳含量为指标的评价结果要明显差一些,推测由于该区构造作用强烈且断层发育,所采集的野外剖面露头样品受淋滤和风化作用影响,从而导致评价结果的差异性。结合前人研究,淋滤和风化作用对生烃潜量测试结果的影响要强于对总有机碳的^[39]。

生烃潜量在有机质丰度的评价中还可结合总有机碳含量和氢指数来评价烃源岩的质量。将四套层系 5 条剖面岩石样品的生烃潜量($S_1 + S_2$)分别与总有机碳含量(TOC)、氢指数(HI)投图显示(图 2, 图 3), DL1 剖面石炭系泥岩样品均为非烃(气)源岩; DL2 剖面二叠系泥岩、泥灰岩、灰岩和炭质泥岩样品显示为非、很差和一般烃(气)源岩; JC1 剖面三叠系泥岩和炭质泥岩样品及 ML1、RS1 剖面侏罗系泥岩、炭质泥岩 4 种类型烃源岩均有分布,三叠系以中等和好烃(气)源岩为主,侏罗系以中等、好、很好烃(气)源岩为主,并含部分差烃源岩。该结果与 TOC 判断结果基本一致。

3.2 有机质类型

本文有机质类型的划分依据三类四分法^[38]。现将 5 个剖面泥岩、炭质泥岩、泥灰岩、灰岩和煤岩样品的生烃潜量($S_1 + S_2$)、氢指数、降解率(D)等参数统计如下(表 4),并将其热解结果中的氢指数与热解峰温($T_{\max}$)投图(图 4)。从图 4 和表 4 可以看出, DL1 剖面石炭系泥岩样品有机质类型从表 4 中看出主要为 II₂ 型和 III 型,由于其氢指数较低,遂未在图中投点表示; DL1、DL2 剖面中二叠系泥岩、炭质泥岩、泥灰岩和灰岩样品的有机质类型主要为 III 型和 II 型(II₁ 型和 II₂ 型),其中 III 型占主要优势; JC1 剖面三叠系泥岩、炭质泥岩和煤岩样品有机质类型主要为 III 型,并含少量的 II 型(II₁ 型和 II₂ 型); ML1 剖面侏罗系泥岩、炭质泥岩和煤岩样品有机质类型主要为 I 型和 III 型,并含部分 II 型(II₁ 型和 II₂ 型); RS1 剖面侏罗系泥岩、炭质泥岩和煤岩样品有机质类型以 III 型占主要优势,含少量 I 型和 II 型(II₁ 型和 II₂ 型)。

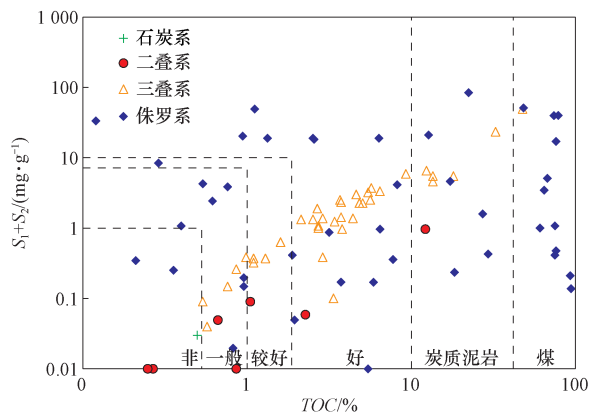


图2 南祁连盆地木里拗陷实测剖面样品 TOC 与 $S_1 + S_2$ 投点图
Fig. 2 Correlation of the measured TOC and $S_1 + S_2$ in sampled sections taken from the Muli Depression, Southern Qilian Basin

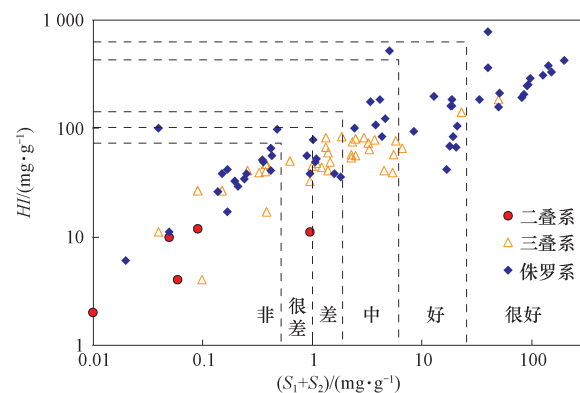


图3 南祁连盆地木里拗陷实测剖面样品 $S_1 + S_2$ 与氢指数投点图

Fig. 3 Correlation of the measured $S_1 + S_2$ and I_H in sampled sections taken from the Muli Depression, Southern Qilian Basin

同时,对 JC1 剖面、ML1 剖面和 RS1 剖面部分泥岩、炭质泥岩和煤岩样品进行了干酪根显微组分的鉴定、干酪根元素分析、干酪根碳同位素和族组分分析(表 5),由于石炭系和二叠系样品总体以非和差烃(气)源岩为主,遂没有进行相关测试分析。干酪根的类型主要由腐泥组、壳质组、镜质组和惰质组 4 种组分决定,依据各组分的含量计算出类型指数 TI 以指示有机质类型,其中 $TI = 100A + 50B - 75C - 100D$, A 代表腐泥质含量、 B 代表壳质组含量、 C 代表镜质组含量、 D 代表惰质组含量。同时,通过统计干酪根 H/C 原子比和 O/C 原子比也可以确定干酪根类型,干酪根 C 同位素和族组分中饱和烃与芳香烃的比值同样可以指示干酪根的类型^[40]。结果显示, JC1 剖面三叠系泥岩样品主要以 III 型为主, ML1 和 RS1 剖面侏罗系泥岩样品以 III 型 II₂ 型为主。总体来看,干酪根显微组分鉴定与岩石热解参数判断基本一致。

表 4 南祁连盆地木里坳陷各剖面及层系有机质类型参数统计
(分布比例/%)

三类四分		$S_1 + S_2$ 分布占比/%	I_H 分布占比/%	D /%
I 型(腐泥型)		> 20mg/g	> 700mg/g	> 70mg/g
DL1	石炭系	0	0	0
DL1	二叠系	0	0	0
DL2	二叠系	0	0	0
JC1	三叠系	5.27	0	0
ML1	侏罗系	47.83	4.35	0
RS1	侏罗系	12.82	0	0
II ₁ 型(腐殖腐泥型)		6 ~ 20	350 ~ 700	30 ~ 70
DL1	石炭系	0	0	0
DL1	二叠系	0	0	25.00
DL2	二叠系	0	0	0
JC1	三叠系	2.63	0	2.63
ML1	侏罗系	17.39	17.39	21.74
RS1	侏罗系	10.25	0	0
II ₂ 型(腐泥腐殖型)		2 ~ 6	150 ~ 350	10 ~ 30
DL1	石炭系	0	0	42.86
DL1	二叠系	0	0	12.50
DL2	二叠系	0	0	10.00
JC1	三叠系	34.21	2.63	5.26
ML1	侏罗系	13.04	47.83	52.17
RS1	侏罗系	10.26	12.82	25.64
III 型(腐殖型)		< 2	< 150	< 10
DL1	石炭系	100.00	100.00	57.14
DL1	二叠系	100.00	100.00	62.50
DL2	二叠系	100.00	100.00	90.00
JC1	三叠系	57.89	97.37	92.11
ML1	侏罗系	21.74	30.43	26.09
RS1	侏罗系	66.67	87.18	74.36

综合以上分析,南祁连盆地木里坳陷石炭系、二叠系剖面样品有机质类型多为 II 型和 III 型,三叠系剖面样品多为 III 型,含个别 II₂ 型,侏罗系剖面样品多为 II 型和 III 型,且最具有生油潜量的 I 型干酪根较少出现,整体上四套层系烃源岩单从干酪根类型来看对生气较为有利。

3.3 有机质热演化程度

有机质热演化程度作为评价烃(气)源岩的基本参数之一,是指有机质向石油转化的热力学反应程度,即有机质成熟度。其中,镜质体反射率(R_o)为常用的有机质热演化程度的判定指标^[37-38]。

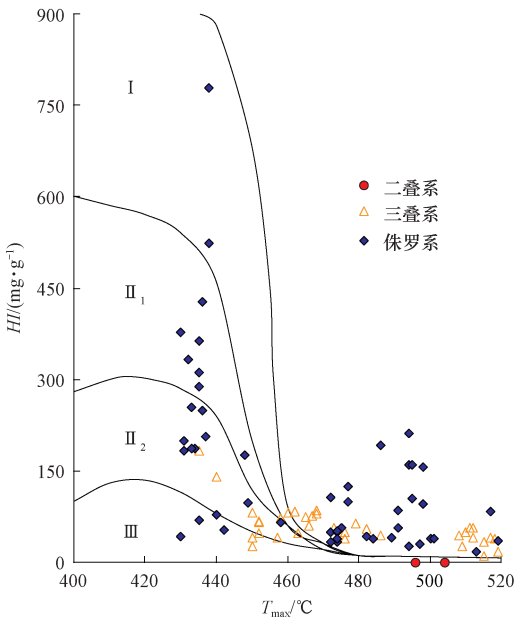


图 4 南祁连盆地木里坳陷样品热解 HI 与 T_{max} 投点图
Fig. 4 Correlation of HI to T_{max} in the samples taken from the Muli Depression, Southern Qilian Basin

表 5 南祁连盆地木里坳陷泥岩样品有机质类型
Table 5 Organic matter types of the mudstone samples taken from the Muli Depression, Southern Qilian Basin

样品编号	显微组分	化学元素			族组分	干酪根类型
	TI 指数	H/C	O/C	$\delta^{13}C$ /‰	饱/芳	
JC1 - M - 3	-71.50	0.70	0.13	-25.5	0.61	III
JC1 - M - 15	16.50	0.72	0.12	-25.5	1.05	III
JC1 - M - 30	-69.17	0.80	0.23	-25.1	0.56	III
JC1 - M - 7	4.25	0.71	0.13	-26.0	1.44	II ₂
ML1 - CM - 04	-94.33	0.73	0.17	-23.5	0.75	III
ML1 - M1 - 06	67.78	0.93	0.18	-26.1	2.41	II ₂
ML1 - 煤 - 05	-76.17	0.74	0.13	-23.1	0.97	III
RS1 - CM - 03	7.17	0.59	0.04	-23.2	0.13	III
RS1 - M - 05	3.00	0.68	0.06	-23.4	0.45	III
RS1 - M - 12	15.17	0.69	0.08	-22.3	0.21	III
RS1 - M - 15	0.58	0.55	0.04	-23.1	0.20	III
RS1 - M - 18	5.42	0.56	0.04	-22.2	0.19	III

JC1 剖面、ML1 剖面和 RS1 剖面部分泥岩、炭质泥岩和煤岩样品的镜质体反射率测定结果表明,JC1 剖面三叠系泥岩样品的 R_o 介于 0.742% ~ 0.98%; ML1 剖面侏罗系炭质泥岩、泥岩样品的 R_o 介于 0.615% ~ 0.715%; RS1 剖面侏罗系炭质泥岩、泥岩和煤岩样品的 R_o 介于 0.798% ~ 1.115%。其中,镜质体反射率(R_o) < 0.5%, 0.5% ~ 0.7%, 0.7% ~ 1.2%, 1.2% ~ 2.0%, > 2.0% 分别指示有机质热演化程度的 5 个阶

段,即未熟、低熟、成熟、高成熟及过成熟。现将三个剖面泥岩、炭质泥岩和煤岩样品的镜质体反射率投点(图5),并结合有机质演化程度的5个阶段,整体上来说三叠系泥岩样品处于成熟阶段,侏罗系泥岩、炭质泥岩和煤岩样品主要处于成熟阶段,少部分为低成熟阶段。

另外,从氢指数与 $T_{\max}$ 投点图中可以看出(图6),整体上,三叠系和侏罗系气源岩样品有机质热演化阶段处于成熟和过成熟阶段,少部分为未成熟阶段。其结果与 R_o 投点图所示结果基本一致。总体来说,三叠系和侏罗系的泥岩、泥页岩和煤岩样品主要处于成熟阶段。

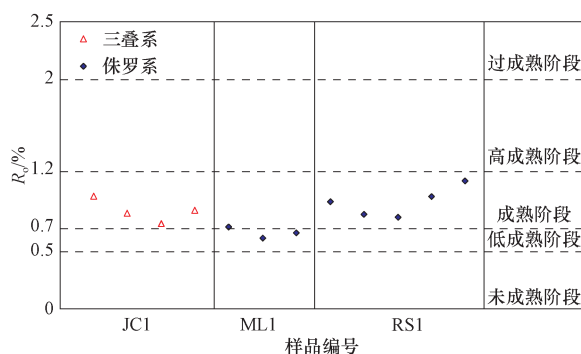


图5 南祁连盆地木里坳陷实测剖面样品镜质体反射率

Fig. 5 Vitrinite reflectance of the measured samples taken from the Muli Depression, Southern Qilian Basin

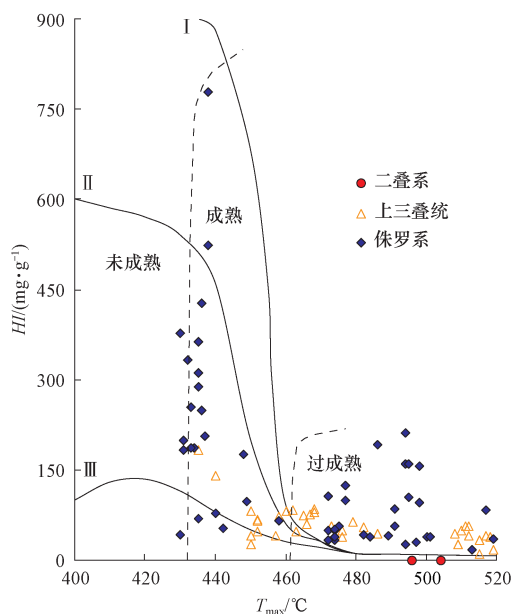


图6 南祁连盆地木里坳陷样品热解HI与 $T_{\max}$

Fig. 6 Correlation of the pyrolysis HI and $T_{\max}$ for the samples taken from the Muli Depression, Southern Qilian Basin

4 讨论

本次所测剖面位于南祁连盆地木里坳陷,该区共发育了4套烃源岩系,从老到新分别为石炭系深褐色泥岩、下二叠统深灰色灰岩、上三叠统黑色泥岩和侏罗系灰黑色泥页岩^[24-25]。之前研究表明该区天然气水合物中的烃类气体主要为油伴生气且与下伏伴生的烃源岩密切相关^[41-42],通过采集木里坳陷4套层系的泥岩、泥灰岩、炭质泥岩和煤岩样品进行地球化学实验分析,以研究石炭-侏罗系四套层系烃(气)源岩的有机质丰度、有机质类型和有机质成熟度等地球化学特征,进一步探讨不同层系烃(气)源岩为天然气水合物提供的气源条件。

4.1 石炭系-二叠系烃(气)源岩

之前研究认为该区石炭系-二叠系泥岩累计厚度值较低,认为受构造作用影响且断层发育,导致局部地层减薄,泥岩层大部分被剥蚀,难以作为天然气水合物潜在气源岩^[43]。本次实测DL1剖面中石炭系泥岩样品TOC均小于0.6%,二叠系泥岩、泥灰岩样品TOC均小于0.4%。DL2剖面中二叠系泥岩、泥灰岩、炭质泥岩和灰岩TOC数据分布较为离散,TOC大于0.6%的样品占总数的60%,石炭、二叠系样品热解生烃潜量均小于2 mg/g,从有机碳和热解生烃潜量来看,DL1、DL2剖面中石炭、二叠系烃(气)源岩样品主要为非和差烃源岩。从图4和表4可以看出,石炭系泥岩样品有机质类型主要为II₂型和III型;二叠系泥岩、泥灰岩、炭质泥岩和灰岩样品有机质类型主要为III型和II型(II₁型和II₂型),其中III型占主要优势。从氢指数与 $T_{\max}$ 投点图中可以看出(图6),石炭、二叠系泥岩处于过成熟阶段。结果表明,石炭、二叠系整体生烃能力较差,难以成为天然气水合物潜在气源岩。

4.2 三叠系烃(气)源岩

有研究表明木里坳陷上三叠统尕勒得寺组具有良好的生烃潜力,总体以发育泥岩为主,是最为有利生烃层位^[44-47],可作为天然气水合物气源岩^[27-30,43]。本次实验结果表明,三叠系泥岩、炭质泥岩和煤岩烃(气)源岩样品TOC大于1%的占总数的84.22%,大于2%的样品占总数的73.69%,37个样品热解生烃潜量平均为3.76 mg/g,其中,热解生烃潜量在2~6 mg/g占样品总数的34.21%,氯仿沥青“A”平均为0.89%,总体来看,JC1剖面三叠系烃(气)源岩以很好和为好

主,并含少量差烃源岩和非烃源岩。

按照 JC1 剖面泥岩、炭质泥岩和煤岩共 37 个样品统计,氢指数低于 150 mg/g 的Ⅲ型有机质占 97.37%,150~350 mg/g 的Ⅱ₂型有机质占 2.63%。干酪根组分鉴定显示,上三叠统泥岩有机质中腐泥组的含量分布在 7%~55%,镜质组的含量在 8%~15%,壳质组平均含量在 0%~18%,惰质组平均含量在 30%~80%,干酪根 H/C 原子比普遍小于 1.2,大多数样品在 0.7~1.0,表明三叠系有机质类型以Ⅲ型为主,含少量Ⅱ₂型。三叠系样品的镜质体反射率 R_o 值为 0.74%~0.98%,整体上处于成熟阶段。从有机地球化学特征来看,三叠系生气能力较强,可作为天然气水合物主要潜在气源岩。

4.3 侏罗系烃(气)源岩

该区侏罗纪时期受燕山作用早期影响,发生局部拉张,形成一些山间条带状断陷盆地,并沉积了一套中侏罗统厚层泥岩和煤层^[22,48-49]。通过对木里坳陷三露天井田和聚乎更矿区钻孔所采集的侏罗系样品进行测试表明,其有机质含量高,好和较好烃源岩居多^[26,50]。其中,中侏罗统含煤层段及其周围的炭质泥岩可为天然气水合物提供气源条件^[27-32]。

本次实测 ML1 剖面侏罗系泥岩、炭质泥岩和煤岩样品 TOC 都大于 0.6%,大于 2.0% 的占样品总数的 82.61%,无非烃源岩样品,23 个样品热解生烃潜在量在 0.42~202.12 mg/g,平均热解生烃潜量为 52.08 mg/g,其中大于 2.0 mg/g 的烃源岩占 78.26%,6 mg/g 以上的好烃源岩占 65.22%,氯仿沥青“A”平均为 5.66%。RS1 剖面侏罗系泥岩、炭质泥岩和煤岩样品 TOC 大于 0.6% 的样品占总数的 76.92%,39 个样品热解生烃潜在量在 0~82.78 mg/g,平均热解生烃潜量为 8.05 mg/g,其中大于 2.0 mg/g 的烃源岩占 33.33%,氯仿沥青“A”平均为 0.64%。总体来看,侏罗系以很好、好、中等烃(气)源岩为主,并含部分差烃源岩。

按照 ML1 剖面泥岩、炭质泥岩和煤岩共 23 个样品统计,氢指数低于 150 mg/g 的Ⅲ型有机质占 30.43%,150~350 mg/g 的Ⅱ₂型有机质占 47.83%,大于 350 mg/g Ⅱ₁型或Ⅰ型有机质占 21.74%,干酪根组分鉴定显示,ML1 剖面样品有机质中腐泥组的含量分布在 1%~75%,镜质组的含量在 3%~10%,壳质组平均含量在 0%~16%,惰质组平均含量在 9%~90%,干酪根 H/C 原子比普遍小于 1.2,大多数样品在 0.7~1.0。RS1 剖面按照泥岩、炭质泥岩和煤岩共 39 个样品统计,氢指数低于 150 mg/g 的Ⅲ型有机质占 87.18%,

150~350 mg/g 的Ⅱ₂型有机质占 12.82%,无大于 350 mg/g Ⅱ₁型或Ⅰ型有机质,干酪根组分鉴定显示,RS1 剖面样品有机质中腐泥组的含量分布在 48%~57%,镜质组的含量在 2%~6%,壳质组平均含量在 0.5%~1.5%,惰质组平均含量在 37%~46%,干酪根 H/C 原子比整体小于 1.2,大多数样品在 0.5~0.7。综合两个剖面的测试结果,侏罗系有机质类型主要为Ⅱ型和Ⅲ型。ML1 剖面烃(气)源岩样品的镜质体反射率 R_o 值为 0.62%~0.72%,RS1 剖面烃(气)源岩样品的镜质体反射率 R_o 值为 0.80%~1.12%,整体上侏罗系处于成熟阶段。整体上,侏罗系从有机地球化学特征来看,对天然气水合物的气源条件有一定贡献意义,可作为天然气水合物次要潜在气源岩。

5 结论

1) 石炭系-二叠系有机质丰度偏低,TOC 普遍小于 0.4%,为非和差烃源岩,有机质类型多为Ⅱ型和Ⅲ型,有机质成熟度为过成熟,生烃能力较差,难以成为天然气水合物潜在气源岩。

2) 三叠系 TOC 大于 1% 的样品占总数的 84.22%,大于 2% 的占总数的 73.69%,氯仿沥青“A”平均为 0.89%,以很好和好烃源岩为主,并含少量差和非烃源岩,有机质类型以Ⅲ型为主,含少量Ⅱ₂型,镜质体反射率 R_o 值为 0.74%~0.98%,整体上处于成熟阶段,生气能力较强,可作为天然气水合物主要潜在气源岩。

3) 侏罗系以很好、好和中等烃源岩为主,并含部分差烃源岩,有机质类型主要为Ⅱ型和Ⅲ型, R_o 值为 0.62%~0.97%,整体上处于成熟阶段,可作为天然气水合物次要潜在气源岩。

参 考 文 献

- [1] Sloan E D, Koh C A. Clathrate hydrates of natural gases, Third edition [M]. New York: CRC Press of Taylor & Francis Group, 2008: 1-721.
- [2] Kvenvolden K A. Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere[J]. Chemical Geology, 1988, 71: 41-51.
- [3] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas hydrates—A potential energy source for the 21st Century[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56: 14-31.
- [4] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 40-42.
Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China [M]. Beijing: Science Press, 2000: 40-42.
- [5] 张立薪, 徐学祖, 马巍. 青藏高原多年冻土与天然气水合物[J]. 天然气地球科学, 2001, 12(1): 22-26.
Zhang Lixin, Xu Xuezu, Ma Wei. Permafrost and gas hydrate in Qing-

- hai-Tibet Plateau[J]. Natural Gas Geoscience, 2001, 12(1): 22 - 26.
- [6] 黄朋, 潘桂棠, 王立全, 等. 青藏高原天然气水合物资源预测[J]. 地质通报, 2002, 21(11): 794 - 798.
Huang Peng, Pan Guitang, Wang Liquan, et al. Prospect evaluation of natural gas hydrate resources on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(11): 794 - 798.
- [7] 石思思, 陈星州, 马健, 等. 南海北部神狐海域 W19 井天然气水合物储层类型与特征[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 24 - 29.
Shi Sisi, Chen Xingzhou, Ma Jian, et al. Natural Gas Hydrate Reservoir Classification and Characterization in the Well W19 of Shenhu Sea Area, northern South China Sea[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 24 - 29.
- [8] 孙可明, 王婷婷, 翟诚, 等. 不同饱和度天然气水合物加热分解界面变化规律[J]. 特种油气藏, 2018, 25(5): 129 - 134.
Sun Keming, Wang Tingting, Yu Cheng, et al. Heating Decomposition Interface of Natural Gas Hydrate with Different Saturations[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(5): 129 - 134.
- [9] 陈多福, 王茂春, 夏斌. 青藏高原冻土带天然气水合物的形成条件与分布预测[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 165 - 172.
Chen Duofu, Wang Maochun, Xia Bin. Formation condition and distribution prediction of gas hydrate in Qinghai-Tibet Plateau permafrost[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 165 - 172.
- [10] 吴青柏, 蒋观利, 蒲毅彬, 等. 青藏高原天然气水合物的形成与多年冻土的关系[J]. 地质通报, 2006, 25(1/2): 29 - 33.
Wu Qingbai, Jiang Guanli, Pu Yibin, et al. Relationship between permafrost and gas hydrates on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(1-2): 29 - 33.
- [11] 卢振权, Sultan N, 金春爽, 等. 青藏高原多年冻土区天然气水合物形成条件模拟研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 157 - 168.
Lu Zhenquan, Sultan N, Jin Chunshuang, et al. Modeling on gas hydrate formation conditions in the Qinghai-Tibet plateau permafrost[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1): 157 - 168.
- [12] 坚润堂, 李峰, 王造成. 青藏高原冻土区活动带天然气水合物异常特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(2): 13 - 17.
Jian Runtang, Li Feng, Wang Zaocheng. The gas hydrate abnormality in the movable zone of the Qinghai-Tibet plateau permafrost[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(2): 13 - 17.
- [13] 祝有海, 赵省民, 卢振权. 中国冻土区天然气水合物的找矿选区及其资源潜力[J]. 天然气工业, 2011, 31(1): 13 - 19.
Zhu Youhai, Zhao Shengmin, Lu Zhenquan. Resource potential and reservoir distribution of natural gas hydrate in permafrost areas of China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(1): 13 - 19.
- [14] 卢振权, 祝有海, 张永勤, 等. 青海省祁连山冻土区天然气水合物存在的主要依据[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 329 - 336.
Lu Zhenquan, Zhu Youhai, Zhang Yongqin, et al. Major evidence for gas hydrate existence in the Qilian Permafrost Qinghai[J]. Geoscience, 2010, 24(2): 329 - 336.
- [15] 祝有海, 张永勤, 文怀军. 祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程概况[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1816 - 1822.
Zhu Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun. An overview of the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost, northwestern China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1816 - 1822.
- [16] 祝有海, 卢振权, 谢锡林. 青藏高原天然气水合物潜在分布区预测[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1918 - 1926.
Zhu Youhai, Lu Zhenquan, Xie Xilin. Potential distribution of gas hydrate in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1918 - 1926.
- [17] 张敏, 何瑜, 陈祖林, 等. 祁连山冻土区天然气水合物中轻烃分析方法及应用[J]. 石油实验地质, 2018, 40(3): 418 - 423.
Zhang Min, He Yu, Chen Zulin, et al. Analysis method and geological significance of C5 - C7 light hydrocarbons in natural gas hydrate in permafrost, Qilian Mountain[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(3): 418 - 423.
- [18] 唐世琪, 卢振权, 王伟超, 等. 青海木里三露天冻土区天然气水合物钻孔岩心顶空气组成及指示意义[J]. 现代地质, 2015(5): 1201 - 1213.
Tang Shiqi, Lu Zhenquan, Wang Weichao, et al. The indicative significance of gas composition of headspace gases from the gas hydrate drilling holes in the Sanlutian mine of the Muli mining area, Qinghai[J]. Geoscience, 2015(5): 1201 - 1213.
- [19] 卢振权, 翟刚毅, 文怀军, 等. 青海木里三露天冻土区天然气水合物形成与分布地质控制因素[J]. 现代地质, 2015(5): 1002 - 1013.
Lu Zhenquan, Zhai Gangyi, Wen Huaijun, et al. Geological constraints on gas hydrate formation and distribution in Sanlutian permafrost of Muli, Qinghai[J]. Geoscience, 2015(5): 1002 - 1013.
- [20] 卢振权, 李永红, 王伟超, 等. 青海木里三露天冻土天然气水合物成藏模式研究[J]. 现代地质, 2015(5): 1014 - 1023.
Lu Zhenquan, Li Yonghong, Wang Weichao, et al. Study on the accumulation pattern for permafrost-associated gas hydrate in Sanlutian of Muli, Qinghai[J]. Geoscience, 2015(5): 1014 - 1023.
- [21] 文怀军, 卢振权, 李永红, 等. 青海木里三露天井田天然气水合物调查研究新进展[J]. 现代地质, 2015(5): 983 - 994.
Wen Huaijun, Lu Zhenquan, Li Yonghong, et al. New advance on gas hydrate survey and research in Sanlutian of Muli, Qinghai[J]. Geoscience, 2015(5): 983 - 994.
- [22] 孙林, 杨万有, 李旭光, 等. 天然气水合物酸化 - 自生热气开采技术研究[J]. 特种油气藏, 2018, 25(3): 149 - 153.
Sun Lin, Yang Wanyou, Li Xuguang, et al. Natural Gas Hydrate Acidizing-Self-Generated Hot - Gas Recovery[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 149 - 153.
- [23] 吕景高, 邵龙义, 张文龙, 等. 青海木里聚乎更矿区木里组煤层发育特征及煤层对比[J]. 中国煤炭地质, 2016, 28(5): 14 - 19.
Lv Jinggao, Shao Longyi, Zhang Wenlong, et al. Development features and correlation of Muli Formation coal seams in Juhugeng mine area, Muli coalfield, Qinghai[J]. Coal Geology of China, 2016, 28(5): 14 - 19.
- [24] 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(2): 47 - 54.
Fu Junhui, Zhou Lifa. Carboniferous-Jurassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and their petro-geological features[J]. Northwest Geoscience, 1998(2): 47 - 54.
- [25] 郝爱胜, 李剑, 王东良, 等. 南祁连盆地石炭系与上三叠统杂勒得寺组烃源岩地球化学特征[J]. 非常规油气, 2016, 3(1): 7 - 13.
Hao Aisheng, Li Jian, Wang Dongliang, et al. Biomarker characteris-

- tics of source rock of carboniferous and upper Triassic Galedesi formation in Southern Qilian Basin [J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(1): 7-13.
- [26] 唐世琪,卢振权,王伟超,等.青海木里三露天天然气水合物气源岩有机地球化学特征[J].现代地质,2015(5):1214-1222.
Tang Shiqi, Lu Zhenquan, Wang Weichao, et al. Organic geochemical characteristics of gas source rocks in the Sanlutian mine of the Muli mining area, Qinghai [J]. Geoscience, 2015(5): 1214-1222.
- [27] 卢振权,唐世琪,王伟超,等.青海木里三露天冻土天然气水合物气源性质研究[J].现代地质,2015(5):000995-1001.
Lu Zhenquan, Tang Shiqi, Wang Weichao, et al. Study on the nature of gas source for permafrost-associated gas hydrate in Sanlutian of Muli, Qinghai [J]. Geoscience, 2015(5): 000995-1001.
- [28] 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 Zhenquan, Zhu Youhai, Zhang Yongqin, et al. Study on genesis of gases from gas hydrate in the Qilian mountain permafrost, Qinghai [J]. Geoscience, 2010, 24(3): 581-588.
- [29] 黄霞,祝有海,王平康,等.祁连山冻土区天然气水合物烃类气体组分的特征和成因[J].地质通报,2011,30(12):1851-1856.
Huang Xia, Zhu Youhai, Wang Pingkang, et al. Hydrocarbon gas composition and origin of core gas from the gas hydrate reservoir in Qilian Mountain permafrost [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1851-1856.
- [30] 翟刚毅,卢振权,卢海龙,等.祁连山冻土区天然气水合物成矿系统[J].矿物岩石,2014,34(4):79-92.
Zhai Gangyi, Lu Zhenquan, Lu Hailong, et al. Gas hydrate geological system in the Qilian mountain permafrost [J]. Mineral Petrol, 2014, 34(4): 79-92.
- [31] 曹代勇,王丹,李靖,等.青海祁连山冻土区木里煤田天然气水合物气源分析[J].煤炭学报,2012,37(8):1364-1368.
Cao Daiyong, Wang Dan, Li Jing, et al. Gas source analysis of natural gas hydrate of Muli coalfield in Qilian mountain permafrost, Qinghai Province, China [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1364-1368.
- [32] 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 Dong, Liu Tianji, Shao Longyi, et al. Characteristics and origins of the gas hydrates in the Muli coalfield of Qinghai [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(6): 26-30.
- [33] 白生海.青海省侏罗纪含煤盆地及含煤地层[J].中国煤炭地质,1993(3):20-23.
Bai Shenhai. Jurassic Coal-bearing basins and coal-bearing strata in Qinghai province [J]. Coal Geology of China, 1993(3): 20-23.
- [34] 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.
Fu Junhui, Zhou Lifa. Triassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and their petro-geological features [J]. Northwest Geoscience, 2000, 21(2): 64-72.
- [35] 邵龙义,杨致宇,李永红,等.青海木里聚乎更天然气水合物潜在区中侏罗世岩相古地理特征[J].现代地质,2015(5):1061-1072.
Shao Longyi, Yang Zhiyu, Li Yonghong, et al. Lithofacies palaeogeography of the Middle Jurassic in the Juhugeng gas hydrate potential area in Muli, Qinghai province [J]. Geoscience, 2015(5): 1061-1072.
- [36] 冯益民.祁连造山带研究概况—历史、现状及展望[J].地球科学进展,1997,12(4):307-314.
Feng Yimin. Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, China history, presence and prospect [J]. Advance in Earth Science, 1997, 12(4): 307-314.
- [37] 胡见义.中国陆相石油地质理论基础[M].北京:石油工业出版社,1991.
Hu Jianyi. Theoretical basis of continental petroleum geology in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [38] 陈荣书.石油及天然气地质学[M].武汉:中国地质大学出版社,1994:1-262.
Chen Rongshu. Petroleum & natural gas geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994: 1-262.
- [39] 魏建设,卢进才,魏仙样,等.强烈风化作用对烃源岩评价指标的影响——以额济纳旗及邻区石炭系—二叠系为例[J].地质通报,2012,31(10):1715-1723.
Wei Jianshe, Lu Jincai, Wei Xianxiang, et al. The influence of intense weathering on the evaluation indexes of hydrocarbon source rocks: A case study of Carboniferous-Permian Strata of Ejin Banner and its neighboring areas [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(10): 1715-1723.
- [40] 黄第藩,李晋超,张大江.干酪根的类型及其分类参数的有效性、局限性和相关性[J].沉积学报,1984(3):21-36+138-139.
Huang Difan, Li Jinchao, Zhang Daijiang. The type of kerogen and the validity, limitation and correlation of its classification parameters [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1984(3): 21-36+138-139.
- [41] 卢振权,祝有海,张永勤,等.青海省祁连山冻土区天然气水合物基本地质特征[J].矿床地质,2010,29(1):182-191.
Lu Zhenquan, Zhu Youhai, Zhang Yongqin, et al. Basic geological characteristics of gas hydrates in Qilian mountain permafrost area [J]. Qinghai Province. Mineral Deposits, 2010, 29(1): 182-191.
- [42] 卢振权,祝有海,刘晖,等.祁连山冻土区含天然气水合物层段的油气显示现象[J].现代地质,2013,27(1):231-238.
Lu Zhenquan, Zhu Youhai, Liu Hui, et al. Oil and gas indications at gas hydrate-bearing intervals in the Qilian mountain permafrost [J]. Geoscience, 2013, 27(1): 231-238.
- [43] 范东稳,卢振权,肖睿,等.南祁连盆地木里坳陷石炭系-侏罗系天然气水合物潜在气源岩地质特征[J].现代地质,2018,32(5):985-994.
Fan Dongwen, Lu Zhenquan, Xiao Rui, et al. Geological characteristics of Carboniferous-Jurassic potential source rocks for natural gas hydrates in Muli depression, south Qilian basin [J]. Geoscience, 2018, 32(5): 985-994.
- [44] 任拥军,纪友亮,李瑞雪.南祁连盆地热水-默勒地区上三叠统可能烃源岩地球化学特征[J].西北地质,2001,34(2):75-81.
Reng Yongjun, Ji Youliang, Li Ruixue. The geochemical characters of the Upper Triassic potential hydrocarbon source rock in Reshui-Muole area of South Qilian basin [J]. Northwestern Geology, 2001, 34(2): 75-81.
- [45] 谢其锋,周立发,马国福,等.南祁连盆地三叠系烃源岩有机地球化学特征[J].北京大学学报(自然科学版),2011,47(6):1034-1040.
Xie Qifeng, Zhou Lifa, Ma Guofu, et al. Organic geochemistry of Triassic source rocks in the southern Qilian Basin [J]. Acta Scientiarum

- Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(6): 1034–1040.
- [46] 任冠龙, 孟文波, 张崇, 等. 深水气井测试中天然气水合物的抑制和调控方法[J]. 断块油气田, 2018, 25(1): 107–110.
Ren Guanlong, Meng Wenbo, Zhang Chong, et al. Hydrate inhibition and control method for deep water gas well testing[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(1): 107–110.
- [47] 程青松, 龚建明, 张敏, 等. 祁连山冻土区木里三叠系烃源岩地球化学特征[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, 32(4): 84–89.
Cheng Qingsong, Gong Jianming, Zhang Min, et al. Geochemical characteristics of Triassic source rocks from the Muli Qilian Mountain permafrost[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2015, 32(4): 84–89.
- [48] 邵龙义, 吕景高, 张文龙, 等. 青海哆嗦公马矿区中侏罗统沉积环境及聚煤规律[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 180–188.
Shao Longyi, Lv Jinggao, Zhang Wenlong, et al. Sedimentary environments and coal accumulation law of middle Jurassic in Duosugongma mining area of Qinghai[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 180–188.
- [49] 邵龙义, 文怀军, 李永红, 等. 青海省天峻县木里煤田煤层气有利区块的多层次模糊数学评判[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1896–1903.
Shao Longyi, Wen Huaijun, Li Yonghong, et al. Assessment of favorable areas for coalbed methane resources exploration in the Muli coalfield of Qinghai province based on multi-layered fuzzy mathematics[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1896–1903.
- [50] 龚文强, 张永生, 宋天锐, 等. 南祁连盆地木里坳陷侏罗系烃源岩生烃潜力评价[J]. 石油天然气学报, 2013(3X): 177–179.
Gong Wenqiang, Zhang Yongsheng, Song Tianrui, et al. Evaluation of hydrocarbon generation potential of Jurassic source rocks in Muli Depression, South Qilian Basin[J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2013(3X): 177–179.

(编辑 董立)

(上接第338页)

- [15] 任国选, 侯读杰, 史玉玲, 等. 准噶尔盆地西北缘红山嘴油田地层水特征与油气藏聚集关系[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 179–184.
Ren Guoxuan, Hou Dujie, Shi Yuling, et al. Relationship between formation water characteristics and hydrocarbon accumulation in Hongshanzui oilfield in the northwestern margin of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 179–184.
- [16] 赵志平, 官大勇, 韦阿娟, 等. 渤海海域新生界地层水化学特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(9): 1396–1405.
Zhao Zhiping, Guan Dayong, Wei Ajuan, et al. Chemical characteristics of Neogene Formation water and the research of their key controlling factors in Bohai sea area[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(9): 1396–1405.
- [17] Li Qingguang, Ju Yiwen, Lu Weiqi, et al. Water-rock interaction and methanogenesis in formation water in the southeast Huaibei coalfield, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 77: 435–447.
- [18] 胡绪龙, 李瑾, 张敏, 等. 地层水化学特征参数判断气藏保存条件——以呼图壁、霍尔果斯油气田为例[J]. 天然气勘探与开发, 2008, 31(4): 23–26.
Hu Xulong, Li Jin, Zhang Min, et al. Judge gas reservoir preservation by chemical characteristic parameters of formation water examples from Hutubi and Huo'gruosi oil-gasfields[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2008, 31(4): 23–26.
- [19] 张汪明, 曾澍辉, 李飞, 等. 柴西地区古近系和新近系地层水化学特征及其成因[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(4): 558–568.
Zhang Wangming, Zeng Jianhui, Li Fei, et al. Hydrochemistry characteristics and origin of formation water of Paleogene and Neogene in the western Qaidam Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(4): 558–568.
- [20] 李伟, 杨金利, 姜均伟, 等. 四川盆地中部上三叠统地层水成因与天然气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(4): 428–435.
Li Wei, Yang Jinli, Jiang Junwei, et al. Origin of Upper Triassic formation water in middle Sichuan Basin and its natural gas significance[J]. Petroleum Exploration & Development, 2009, 36(4): 428–435.
- [21] 史婷婷, 成建梅, 解习农, 等. 松辽盆地北部地层水同位素特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2012, 30(2): 399–404.
Shi Tingting, Cheng Jianmei, Xie Xinong, et al. Isotopic characteristics of formation waters in the north of Songliao Basin and its geological significances[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(2): 399–404.
- [22] 李伟, 秦胜飞. 四川盆地须家河组地层水微量元素与氢氧同位素特征[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 55–63.
Li Wei, Qin Shengfei. Characteristics of trace elements and hydrogen and formation water of the Xujiahe Formation oxygen isotopes in the Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 55–63.
- [23] 王晓梅, 赵靖舟, 刘新社, 等. 苏里格气田西区致密砂岩储层地层水分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 802–810.
Wang Xiaomei, Zhao Jingzhou, Liu Xinshe, et al. Distribution of formation water in tight sandstone reservoirs of western Sulige gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 802–810.
- [24] Bozau E, Sattler C, Van B W. Hydrogeochemical classification of deep formation waters[J]. Applied Geochemistry, 2015, 52: 23–30.
- [25] 楼章华, 李梅, 金爱民, 等. 松辽盆地油田水化学的垂直分带性[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2): 195–202.
Lou Zhanghua, Li Mei, Jin Aimin, et al. Vertical zonation of oilfield groundwater chemistry fields in the Songliao Basin, China[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 195–202.
- [26] Peter B, Bernardo M G, Carlos M, et al. Origin and evolution of formation water at the Jujo-Tecominoacan oil reservoir, Gulf of Mexico. Part 1: Chemical evolution and water-rock interaction[J]. Applied Geochemistry, 2009, 30(2): 543–554.

(编辑 张亚雄)