

# 青海南部乌丽—开心岭冻土区 天然气水合物气源条件研究

唐世琪<sup>1,2</sup>, 卢振权<sup>2</sup>, 罗晓林<sup>3</sup>, 王 婷<sup>2</sup>, 谭盼盼<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100029; 3. 中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100037)

**摘要:**以近两年天然气水合物资源勘查与试采工程国家专项在青海南部乌丽—开心岭冻土区开展的气源岩调查资料为基础,重点对上二叠统乌丽群那益雄组 and 上三叠统结扎群巴贡组烃源岩的有机地球化学指标进行分析。结果显示研究区上二叠统乌丽群那益雄组和上三叠统结扎群巴贡组烃源岩有机质含量中等,有机质类型主要为 III 型,且成熟度较高,大多数样品有机质达到高成熟或过成熟,处于生湿气和干气阶段,能够产生大量烃类气体来满足该区天然气水合物形成时所需的气源条件;上二叠统那益雄组泥岩和上三叠统巴贡组灰岩可成为该区天然气水合物的主要气源岩。

**关键词:**天然气水合物;冻土;烃源岩;乌丽—开心岭;青海南部

中图分类号:TE122.1<sup>+</sup>1

文献标识码:A

## Gas hydrate sources in Wuli-Kaixinling permafrost, southern Qinghai province

Tang Shiqi<sup>1,2</sup>, Lu Zhenquan<sup>2</sup>, Luo Xiaolin<sup>3</sup>, Wang Ting<sup>2</sup>, Tan Panpan<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;  
2. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China;  
3. Development and Study Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Based on the past two years' data on gas source survey in compliance with the National Thematic Project of Gas Hydrate Resources' Exploration and Test-Production Engineering in the Wuli-Kaixinling permafrost of the southern Qinghai province, organic geochemical indicators were analyzed on the hydrocarbon (gas) source rocks of the Nayixiong Formation in the Upper Permian Wuli Group and the Bagong Formation in the Upper Triassic Jiezha Group. Results showed that organic matter contents were at moderate levels in the hydrocarbon (gas) source rocks of the two formations. The main organic matter was type III with high maturity. For most samples, organic matter was mature or over-mature, at the wet to dry gas phase. The source rocks produced a large amount of hydrocarbon gases to meet the needs of gas hydrate formation. Mudstones in the Nayixiong Formation in the Upper Permian Wuli Group and limestones in the Bagong Formation in the Upper Triassic Jiezha Group worked as major gas source rocks for gas hydrate formation.

**Key words:** gas hydrate; permafrost; hydrocarbon (gas) source rock; Wuli-Kaixinling; southern Qinghai province

乌丽—开心岭冻土区位于青海省南部,为青藏高原腹地,主体构成沱沱河盆地<sup>[1]</sup>,是我国陆域冻土区天然气水合物远景区之一<sup>[2]</sup>。2011 年以来,中国地质调查局组织实施天然气水合物资源勘查与试采工程国家专项,持续在乌丽—开心岭冻土区开展地质、地球化学、地球物理调查。期间,青海省煤炭地质勘查院于 2012 年在青海省国土厅项目支

持下结合煤田地质资料在乌丽冻土区部署实施了一口天然气水合物钻井,激光拉曼光谱峰显示为二氧化碳水合物的特征<sup>[3]</sup>。

目前,乌丽—开心岭冻土区天然气水合物调查研究程度仍较低,还未实现天然气水合物勘查突破,气源问题是一个重要因素。多数观点认为其可能与二叠系煤系地层热解成因气有关<sup>[4]</sup>,那么其他

作者简介:唐世琪(1991—),女,硕士研究生,石油地质专业。E-mail:642191779@qq.com。

通讯作者:卢振权(1972—),男,研究员,从事天然气水合物地球化学勘查等研究。E-mail:luzhq@vip.sina.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41073040)和天然气水合物勘查与试采专项项目(GZHL20110310,GZHL20110311,GZHL20110314)资助。

© The Author(s) 2015. This article is published with open access by *Petroleum Geology & Experiment*.

层系气源岩的可能性如何还未述及;另一方面这些气源能否提供充足的烃类气体,是否满足天然气水合物形成的物质条件也不清楚。以近年天然气水合物资源勘查与试采工程国家专项在该区的气源岩调查为基础,补充采集部分煤田钻孔岩心泥岩样品,对采集的上二叠统泥岩和上三叠统灰岩等气源岩样品的有机地球化学指标进行分析,探讨不同层系气源岩是否具备天然气水合物形成的气源条件。

## 1 地质概况

乌丽—开心岭冻土区大地构造位置属于华南板块,研究区主体地处羌塘地体北部,位于以子曲断裂带、他念他翁北坡断裂为南北界的乌丽—囊谦华力西褶皱带二级构造单元内。研究区自北向南依次可划分为茶措断陷、乌丽—达哈断隆、沱沱河断陷、扎日根—诺日巴纳保断隆等 4 个三级构造单元(图 1)。区内断裂构造普遍发育,断裂主体为北西西向<sup>[5]</sup>。

乌丽—开心岭冻土研究区主要出露二叠系、三叠系、古近系、新近系、第四系等地层,冻土区地层属于唐古拉地层区,潜在气源岩主要有中一下二叠统开心岭群九十道班组(Pj)、上二叠统乌丽群那益雄组(Pn)、上三叠统结扎群巴贡组、新近系中一渐新统雅西措组等。中一下二叠统开心岭群九十道班组分布局限,仅在开心岭一带出露,与上二叠充那益雄组呈断层接触,其岩石组合为灰—深灰色块、层状含生物碎屑泥晶灰岩,为陆缘浅海台地相石灰岩建造。

根据腕足类生物组合<sup>[6]</sup>及双壳类和古植物化石组合<sup>[7]</sup>,研究区上二叠统乌丽群由 2 部分组成:下部为那益雄组,上部为拉卜查日组,两者呈平行不整合接触,与上覆地层呈不整合接触。其中,那

益雄组岩性主要为深灰色中—厚层状钙质泥岩、碳质页岩、泥质粉砂岩夹灰—深灰色薄—中层状含生物碎屑灰岩、粉晶灰岩、灰—灰绿色中细粒长石石英砂岩及煤(层)线,局部夹灰绿色安山岩、玄武岩,其腕足动物属种组合及生物相特征表明其为晚二叠世早期海陆交互相含煤岩系沉积建造<sup>[8]</sup>,其上多被上三叠统结扎群甲丕拉组、古近系渐新统一古新统沱沱河组角度不整合覆盖。

上三叠统结扎群从下至上依次包含甲丕拉组、波里拉组、巴贡组(Tbg)。其中,巴贡组主要为灰色薄—中层状中细粒岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩夹灰黑色薄层状碳质页岩、钙质泥岩及粉砂岩,为一套三角洲相砂岩建造、粉砂岩建造。

渐新统一古新统沱沱河组(Et)分布局限,角度不整合在二叠系、三叠系等地层之上,为一套湖泊三角洲相砾岩夹砂岩或砂岩夹砾岩建造。中—渐新统雅西措组(ENy)分布零星,为一套泥灰岩夹砂岩或砂岩夹泥灰岩建造,角度不整合在二叠系、三叠系地层之上,整合在沱沱河组砂岩段之上。

## 2 样品与分析

本次在乌丽—开心岭冻土区采集的样品包括露头样品和钻孔岩心样品。露头泥岩样品共采集 30 件,露头粉煤样品(前人施工的探槽处)共采集 6 件,钻孔泥岩或粉砂质泥岩样品(青海煤炭地质勘查院钻探施工的岩心)共采集 47 件,均系上二叠统乌丽群那益雄组;露头灰岩样品共采集 42 件,均系上三叠统结扎群巴贡组。由于中一下二叠统开心岭群九十道班组灰岩在研究区内分布局限,且有较多辉绿岩脉,致使该地层接触处常常出现不同程度蚀变作用,中—渐新统雅西措组灰岩主要分布在研究区之外的北面,本次对这 2 套地层未予采样。

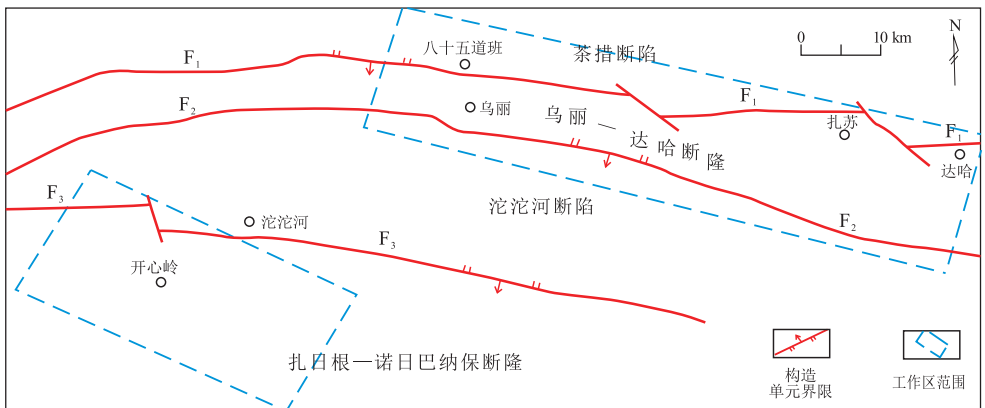


图 1 青海南部乌丽—开心岭冻土区构造单元区划

Fig.1 Tectonic units of Wuli-Kaixingling permafrost, southern Qinghai province

室内对泥岩、灰岩和部分煤样进行了 TOC 分析、生油岩热解分析,对部分煤样还进行了有机显微组分的镜质组反射率分析。在中国石油勘探开发研究院石油地质实验测试中心完成了样品的总有机碳含量 TOC、生油岩热解参数的测定;在国家煤炭质量监督检验中心完成了煤样有机显微组分及镜质组反射率的测定。其中,在样品总有机碳测定过程中,依据 GB/T19145-2003 标准,在样品热解参数的测定过程中,依据 GB/T18602-2001 标准。使用 LECO CS-400 碳硫分析仪进行有机碳分析,使用 Rock-Eval 2 Plus(法国)进行岩石热解分析。测试条件:(1)有机碳分析,常温常压;(2)热解分析<sup>[9]</sup>, $S_1$ 的分析条件为恒温 300 °C 下 3 min, $S_2$ 的分析条件为在 300~600 °C 温度范围 50 °C/min 程序升温,有机 CO<sub>2</sub>入阱温度 390 °C,热解氦气 100 mL/min,载气 He 35 mL/min, H<sub>2</sub> 28~30 mL/min,空气 400 mL/min。在煤的显微组分观察过程中,依据标准:GB/T 8899-1998;显微镜型号:LEICA DM 2500P;测试条件:油浸反光,单偏,10×,50×,点、行距 0.4 mm×0.6 mm。在煤的镜质组反射率测定过程中,依据标准:GB/T6948-2008;显微镜型号:LEICA DM 2500P;光度计型号:MSP200;浸油(Ne):1.518;物镜:50×;室温:20°C。

### 3 气源条件分析

在对气源岩的研究中,对其定性和定量的评价主要体现在 3 个方面,即有机质丰度、有机质类型和有机质成熟度。本文结合地表灰岩、地表泥岩、地表煤样和钻孔泥岩样品的有机质丰度、有机质类型和有机质成熟度等指标,对研究区气源岩进行评价,以初步判断乌丽—开心岭冻土区上二叠统那益雄组 and 上三叠统巴贡组为天然气水合物提供气源的潜力。

#### 3.1 有机质丰度

通常采用有机质丰度来代表岩石中有机质的相对含量,衡量和评价岩石的生烃潜力<sup>[10-14]</sup>。目

前常用的有机质丰度指标主要包括有机碳含量、生烃潜量( $S_1+S_2$ )、氯仿沥青“A”含量和总烃含量等<sup>[13]</sup>。但高演化条件下,氯仿沥青“A”基本失效,总有机碳含量成为评价烃源岩生烃潜力的最主要指标<sup>[15]</sup>。

#### 3.1.1 有机碳含量

根据本次样品分析测试结果的特点,主要以有机碳含量为指标来判断有机质丰度。目前,对于泥质烃源岩的评价标准国内外基本达成共识,但对于碳酸盐岩烃源岩的评价标准却不尽相同。结合岩石样品的特点,本次主要参考了陈建平等<sup>[11]</sup>、赵靖舟<sup>[16]</sup>、张渠等<sup>[17]</sup>的评价标准来评价研究区气源岩。其中泥岩主要以 0.4,0.6,1,2 有机碳含量值作为评价分界点;灰岩中以成熟度划分为 2 种类型,并有不同的评价标准,其中未成熟—成熟类型的灰岩以 0.1,0.3,0.7,1.5 有机碳含量值作为评价分界点,高成熟—过成熟类型灰岩以 0.05,0.15,0.3,0.6 有机碳含量值作为评价分界点;整体上将泥岩和灰岩的评价标准划分为非、差、中等、好、很好 5 个级别<sup>[18]</sup>。

根据分析得知,此次灰岩样品整体属于高成熟—过成熟,局部属于成熟,故采用 0.05,0.15,0.3,0.6 为评价分界点。研究区地表灰岩样品以非或差烃源岩为主,并有少量中等和好烃源岩(表 1)。地表泥岩样品则部分为非烃源岩,部分为中等和好烃源岩,很好烃源岩较少。钻孔泥岩绝大部分为中等烃源岩。可以看出,样品整体有机质丰度不高,可能与该区烃源岩有机质热演化程度高有关。当然,煤岩单从总有机碳含量看无疑是好烃源岩。

地表样品和岩心样品有机碳含量差别较大,分析其原因可能与风化作用密切相关。地表烃源岩长期遭受风化剥蚀,导致地表岩石样品中的氧元素增加和氢元素流失,使得有机质丰度降低,同时有机质类型也变差。其次,地表水的淋漓和气候的变化对烃源岩的有机质也具有一定的影响。

一般情况下,测得的烃源岩有机碳含量为残余有机碳含量,它是现今残留在烃源岩层中经过了运

表 1 青海南部乌丽—开心岭冻土区样品 TOC 含量分类统计

Table 1 TOC content classification of samples from Wuli-Kaixinling permafrost, southern Qinghai province

烃源岩 评价标准	露头灰岩		露头泥岩		钻孔泥岩	
	$\omega(\text{TOC})/\%$	统计百分比/%	$\omega(\text{TOC})/\%$	统计百分比/%	$\omega(\text{TOC})/\%$	统计百分比/%
非	<0.05	40.48	<0.4	36.67	<0.4	0.00
差	0.05~0.15	40.48	0.4~0.6	10.00	0.4~0.6	6.23
中等	0.15~0.3	7.14	0.6~1.0	23.33	0.6~1.0	88.76
好	0.3~0.6	9.52	1.0~2.0	26.67	1.0~2.0	2.51
很好	>0.6	2.38	>2.0	3.33	>2.0	2.51

移后的剩余物质,若烃源岩达到高一过成熟阶段,使用上述参数可能使烃源岩评价结果失真。因此,人们通常采用乘以一个大于 1 的系数来恢复原始的有机质丰度,但这种恢复有机质丰度的准确性目前尚难以评估,故高一过成熟烃源岩残余有机质丰度是否需要恢复一直存在较大争议。另外,一般来说, I 型干酪根的转化率高,而 III 型干酪根的转化率则较低,高成熟度时其有机碳含量与原始的有机碳含量几乎没有太大变化。且参照有机碳恢复曲线可以看出, III 型干酪根的恢复系数几乎等于 1。由后文分析得知,此次地表和钻孔样品的有机质类型几乎均为 III 型,故本次未进行有机碳的恢复。

### 3.1.2 生烃潜力

生烃潜力可以表示单位质量烃源岩的产油潜能,更加客观和直接地体现烃源岩的生烃能力,是衡量成油成气能力的重要指标之一<sup>[19]</sup>。研究区地表样品和钻孔样品的生烃潜力普遍较低,分布在 0.02~0.41 mg/g 之间,全部小于 0.5 mg/g 的有效烃源岩下限标准。造成这种矛盾现象的原因一方面可能是该区断裂发育,钻孔断层经淋滤作用及地表不同程度风化作用,本次样品受其影响可能较为明显,且相比之下,淋滤或风化作用对生烃潜力的影响比对 TOC 含量的影响要大<sup>[20]</sup>;另一方面,该区烃源岩样品处于成熟—高成熟阶段,整体生烃潜力较低表明目前其生烃潜力已经基本枯竭,也同时说明该区烃源岩已经基本上经历了生烃排烃阶段,在地质历史中曾产出过大量烃类气体,这对该区天然气水合物的形成无疑是有利的。

### 3.2 有机质类型

目前国内外确定有机质类型的方法较多,但考虑到我国陆相源岩有机质多样性的特征,依据三类四分法进行类型划分更为合理。根据对研究区样品的岩石热解参数生烃潜力( $S_1+S_2$ )、氢指数( $I_H$ )、类型指数( $S_2/S_3$ )、降解率( $D$ )等指标分类统计(表 2),地表灰岩大部分表现为 III 型(腐殖型)特征,少部分

表现为 II<sub>2</sub>型(腐泥腐殖型)特征,地表泥岩、煤及钻孔泥岩则均表现出 III 型(腐殖型)特征。地表灰岩、泥岩、煤及钻孔泥岩样品的氢指数与氧指数投点图(图 2)、类型指数与  $T_{max}$  投点图(图 3)、降解率

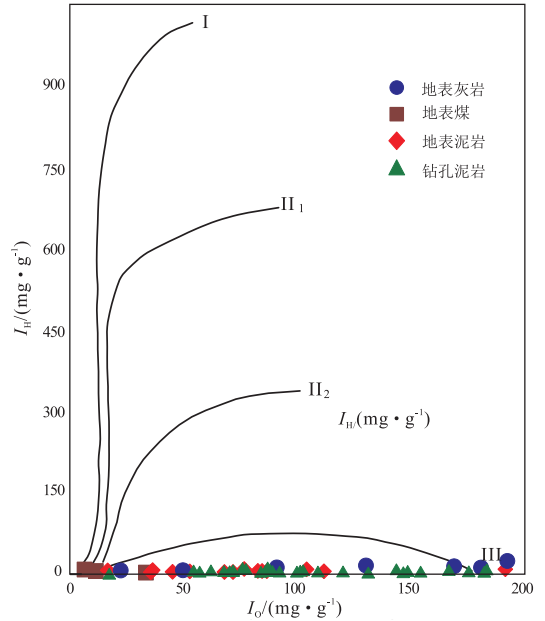


图 2 青海南部乌丽—开心岭冻土区样品热解氢指数与氧指数关系

Fig.2 Relationship between  $I_H$  and  $I_O$  of samples from Wuli-Kaixinling permafrost, southern Qinghai province

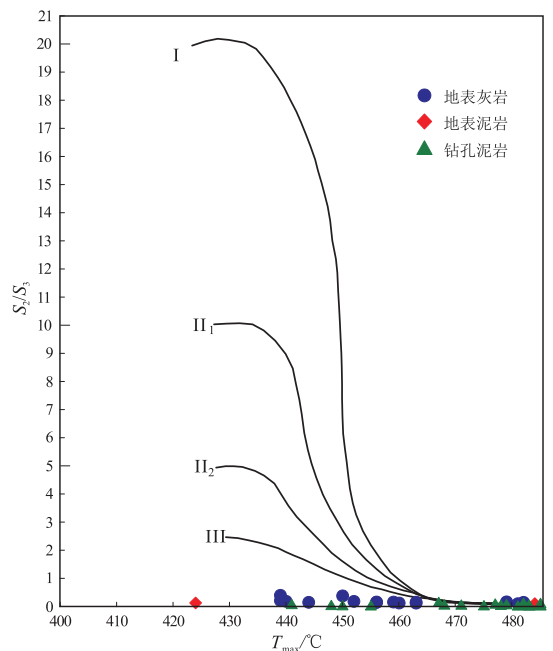


图 3 青海南部乌丽—开心岭冻土区样品热解类型指数与  $T_{max}$  关系

Fig.3 Relationship between  $S_2/S_3$  and  $T_{max}$  of samples from Wuli-Kaixinling permafrost, southern Qinghai province

表 2 青海南部乌丽—开心岭冻土区有机质类型的岩石热解参数分类

Table 2 Pyrolysis parameter classification of samples from Wuli-Kaixinling permafrost, southern Qinghai province

中国分类	$(S_1+S_2)/$ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$I_H/$ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$S_2/S_3$	$D/\%$
I(腐泥型)	>20	>700	>20	>70
II <sub>1</sub> (腐殖腐泥型)	6~20	350~700	5~20	30~70
II <sub>2</sub> (腐泥腐殖型)	2~6	150~350	2.5~5	10~30
III(腐殖型)	<2	<150	<2.5	<10



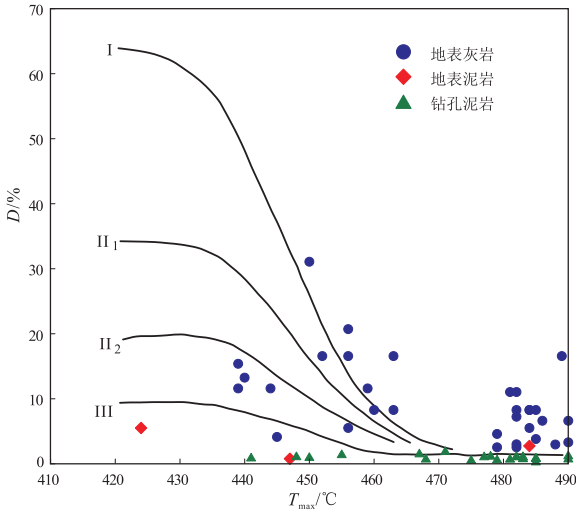


图 4 青海南部乌丽—开心岭冻土区样品热解降解率与  $T_{max}$  关系

Fig.4 Relationship between pyrolysis degradation rate and  $T_{max}$  of samples from Wuli-Kaixinling permafrost, southern Qinghai province

与  $T_{max}$  投点图(图 4)也清楚地显示出这种特征。当然,不同参数判定有机质类型的结果并非完全相同,降解率与  $T_{max}$  投点图(图 4)显示地表灰岩有机质类型较混乱,并不完全表现出 III 型特征,这与地表的风化作用有一定的关系。综合考虑到各种因素的影响,该区地表灰岩整体上归类于 III 型(腐殖型),或至少介于 II<sub>2</sub> 型(腐泥腐殖型)和 III 型(腐殖型)之间。

单从野外采集的 6 个煤样显微组分鉴定结果来看(表 3),它们均不含壳质组,主要由镜质组组成,其次为惰质组。陈荣书总结煤岩学分类,将烃源岩中显微组分的干酪根分为:壳质组、镜质组、惰质组<sup>[21]</sup>,其中,低等生源成因的藻类体和无定形物质为 I 型有机质,壳质组为典型的 II 型有机质,镜质组、惰质组则是典型的 III 型有机质。这样,可以判断煤样整体表现为 III 型(腐殖型)特征,这种判断与热解结果基本一致。

### 3.3 有机质热演化程度

根据本次样品数据,研究区地表灰岩、泥岩、煤

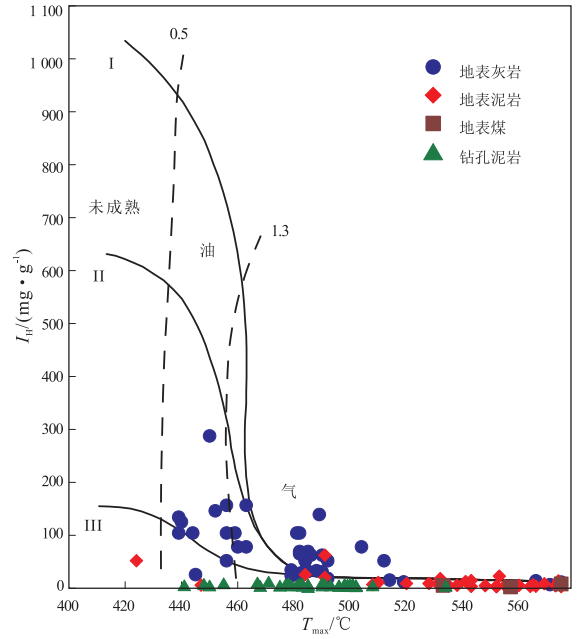


图 5 青海南部乌丽—开心岭冻土区样品热解  $I_H$  与  $T_{max}$  关系

Fig.5 Relationship between  $I_H$  and  $T_{max}$  of samples from Wuli-Kaixinling permafrost, southern Qinghai province

样和钻孔泥岩样的生油岩热解参数  $I_H$  与  $T_{max}$  投点关系图表明(图 5),样品有机质热演化成熟度大多数达到了高成熟或过成熟阶段,只有少数样品的热演化程度处于成熟阶段。

结合法国和中国的  $T_{max}$  指标,该区有机质绝大多数为 III 型(腐殖型),这样其对应的  $T_{max}$  判别结果显示(表 4),该区地表灰岩、泥岩、煤和钻孔泥岩的有机质整体上处于湿气 and 干气阶段,局部为凝析油和生油阶段,极少数处于未成熟阶段。

前人将不同类型有机质划分为 5 个阶段,即未成熟、生油、凝析油、湿气、干气阶段<sup>[21-27]</sup>。以上分析表明,该区地表灰岩、泥岩、煤和钻孔泥岩整体上已达到了足以产生大量烃类气体的湿气阶段和干气阶段,能够满足研究区天然气水合物形成时所需的气源条件。

单从露头煤样的镜质体反射率检测结果来看

表 3 青海南部乌丽—开心岭冻土区地表煤样的镜质组反射率及显微煤岩定量统计

Table 3 Statistics of vitrinite reflectance of surface coals and quantification of microscopy coals from Wuli-Kaixinling permafrost, southern Qinghai province

项目	煤样					
	TTH-HC06	TTH-HC08	TTH-HC23	TTH-HC37	TTH-HC47	TTH-HC07
显微组分						
含量/%						
镜质组	71.1	7.5	87.3	72.9	3.8	69.8
惰质组	22.2	3.6	6.4	9.8	2.8	0.0
壳质组	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
矿物质	6.8	88.9	6.4	17.3	93.4	30.2
$R_o$ /%	2.55	1.29	2.50	2.46	1.96	2.61

表 4 青海南部乌丽—开心岭冻土区地表灰岩、地表泥岩、地表煤样、钻孔泥岩热解  $T_{max}$  统计  
 Table 4 Pyrolysis  $T_{max}$  of surface limestones, surface mudstones, surface coals and drilling shales from Wuli-Kaixinling permafrost, southern Qinghai province

成熟度指标	未成熟	生油	凝析油	湿气	干气
法国生油岩(Ⅲ型)的 $T_{max}/^{\circ}C$	<430	430~465	455~475	465~540	>540
地表灰岩占比/%	0.00	33.33	16.67	57.14	11.90
地表泥岩占比/%	3.33	0.00	0.00	36.67	60.00
钻孔泥岩占比/%	0.00	8.51	10.64	85.11	8.51
地表煤样占比/%	0.00	0.00	0.00	33.3	66.7
我国生油岩(Ⅲ型)的 $T_{max}/^{\circ}C$	<432	432~460	455~470	460~505	>505
地表灰岩占比/%	0.00	33.33	16.67	57.14	19.05
地表泥岩占比/%	3.33	0.00	0.00	10.00	86.67
钻孔泥岩占比/%	0.00	8.51	6.38	80.85	12.77
地表煤样占比/%	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0

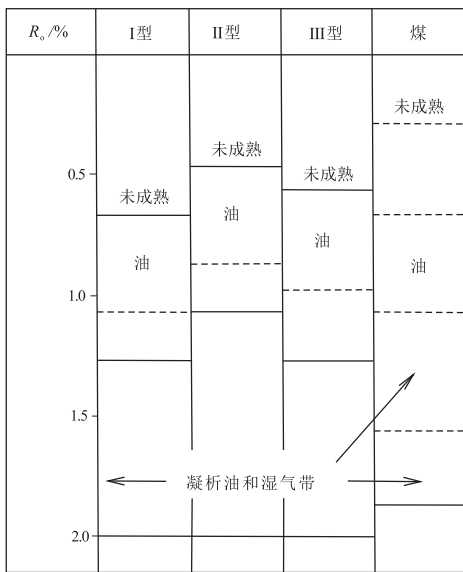


图 6 镜质体反射率  $R_o$  与油气分布带之间的关系  
 Fig.6 Relationship between vitrinite reflectance ( $R_o$ ) and hydrocarbon distribution

(表 3),其平均镜质组反射率除 1 个为 1.29%,1 个为 1.96%外,其余均大于 2.0%,且多数大于 2.5%。结合镜质组反射率  $R_o$  与油气分带关系(图 6),表明该区煤样已达到过成熟阶段,即该区煤样绝大多数处于干气带,只有少数煤样处于凝析油和湿气带。这一判断与热解结果基本一致。

### 4 结论

乌丽—开心岭冻土区上二叠统乌丽群那益雄组 and 上三叠统结扎群巴贡组烃源岩具有以下特征:

- (1) 钻孔样品整体有机质丰度不高,评价为中等烃源岩,地表样品则受风化作用影响较大,相对稍差。
- (2) 有机质类型主要为Ⅲ型,且成熟度较高,大多数样品有机质演化程度达到高成熟或过成熟阶段。
- (3) 整体上已达到了产生大量烃类气体的湿

气阶段和干气阶段,能够满足该区天然气水合物形成所需的气源条件。

### Open Access

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0) which permits any use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and the source are credited.

### 参考文献:

[1] 李国玉,吕鸣岗.中国含油气盆地图集[M].2版.北京:石油工业出版社,2002;265-268.  
 Li Guoyu,Lü Minggang. Atlas of China's petroliferous basins [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002; 265-268.

[2] 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.

[3] 杨德寿,龚建明,贺行良,等.青藏高原乌丽冻土区二氧化碳成因探讨[J].现代地质,2013,27(6):1392-1398.  
 Yang Deshou, Gong Jianming, He Xingliang, et al. Discussion about the CO<sub>2</sub> origins of Wuli permafrost zone in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Geoscience, 2013, 27(6): 1392-1398.

[4] 李小豫,龚建明,陈小慧,等.青藏高原乌丽冻土区二叠纪煤系烃源岩特征[J].现代地质,2013,27(6):1384-1391.  
 Li Xiaoyu, Gong Jianming, Chen Xiaohui, et al. Source rock potential of Permian in Wuli permafrost zone in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Geoscience, 2013, 27(6): 1384-1391.

[5] 吴军虎.青海乌丽—开心岭地区晚二叠世构造演化与聚煤规律作用分析[J].中国煤炭地质,2011,23(6):9-13.  
 Wu Junhu. Late Permian tectonic evolution and coal accumulation pattern analysis in Wuli-Kaixinling area, Qinghai [J]. Coal Geology of China, 2011, 23(6): 9-13.

[6] 牛志军,马丽艳,曾波夫.长江源各拉丹冬地区晚二叠世乌丽群的腕足类生物组合[J].地球学报,2003,24(4):343-348.  
 Niu Zhijun, Ma Yanli, Zeng Bofu. Late Permian brachiopod faunas from Wuli Group of Geladandong Mountain area in the source

- region of the Yangtze River[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2003, 24(4): 343-348.
- [7] 牛志军, 姚华舟, 曾波夫. 长江源各拉丹冬地区晚二叠世乌丽群类生物组合[J]. 地层学杂志, 2004, 28(3): 270-275.  
Niu Zhijun, Yao Huazhou, Zeng Bofu. Late Permian fusulinid assemblages from geladandong in the source region of Yangtze River, Qinghai[J]. Journal of Stratigraphy, 2004, 28(3): 270-275.
- [8] 廖卓庭, 徐均涛. 青海格尔木市乌丽晚二叠世乌丽群下部的腕足化石群及 *Waagenites* 的地理分布[J]. 古生物学报, 2002, 41(1): 130-136.  
Liao Zhuoting, Xu Juntao. Late Permian brachiopods from the lower part of the Wuli Group, southwestern Qinghai and the geographic distribution of *Waagenites* [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2002, 41(1): 130-136.
- [9] 邬立言, 顾信章. 热解技术在我国生油岩研究中的应用[J]. 石油学报, 1986, 7(2): 13-19.  
Wu Liyan, Gu Xinzhang. The application of pyrolysis technique in source rock research[J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(2): 13-19.
- [10] 刘云田, 杨少勇, 胡凯, 等. 柴达木盆地北缘中侏罗统大煤沟组七段烃源岩有机地球化学特征及生烃潜力[J]. 高校地质学报, 2007, 13(4): 703-713.  
Liu Yuntian, Yang Shaoyong, Hu Kai, et al. Organic geochemical features of mudstone source rock from Member 7 strata of middle Jurassic Age in the northern margin of Qaidam basin and its hydrocarbon-generation potential[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(4): 703-713.
- [11] 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 Jianping, Zhao Changyi, He Zhonghua. Criteria for evaluating the hydrocarbon generating potential of organic matter in coal measures [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(1): 1-5.
- [12] 黄杏珍, 邵宏舜, 顾树松. 柴达木盆地的油气形成与寻找油气田方向[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 20-65.  
Huang Xingzhen, Shao Hongshun, Gu Shusong. Oil and gas formation and prospecting direction in Qaidam Basin [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 20-65.
- [13] 方朝刚, 李凤杰, 孟立娜, 等. 柴达木盆地北缘红山断陷中侏罗统烃源岩评价[J]. 天然气地质学, 2012, 23(5): 856-861.  
Fang Chaogang, Li Fengjie, Meng Lina, et al. Evaluation of middle Jurassic hydrocarbon source rocks in Hongshan Sag, northern Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(5): 856-861.
- [14] 杨军, 王永刚, 季红军, 等. 韦德迈阿盆地 416a-417 区块石油勘探潜力[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(4): 516-520.  
Yang Jun, Wang Yonggang, Ji Hongjun, et al. Petroleum exploration potentials in 416a-417 block of Oued Mya Basin, Algeria[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(4): 516-520.
- [15] 付小东, 秦建中, 腾格尔, 等. 四川盆地北缘上二叠统大隆组烃源岩评价[J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 566-577.  
Fu Xiaodong, Qin Jianzhong, Tenger, et al. Evaluation on Dalong Formation source rock in the north Sichuan basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(6): 566-577.
- [16] 赵靖舟. 塔里木盆地北部寒武—奥陶系海相烃源岩重新认识[J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 117-124.  
Zhao Jingzhou. Evaluation on the Cambrian-Ordovician marine source rocks from the north Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(1): 117-124.
- [17] 张渠, 秦建中, 范明. 松潘—阿坝地区下古生界烃源岩评价[J]. 石油实验地质, 2003, 25(增刊): 582-584.  
Zhang Qu, Qin Jianzhong, Fan Ming. Hydrocarbon source rock evaluation of lower Paleozoic in Songpan-Aba area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(S): 582-584.
- [18] 杨超, 陈清华, 王冠民, 等. 柴达木地区上古生界石炭系烃源岩评价[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 913-919.  
Yang Chao, Chen Qinghua, Wang Guanmin, et al. Evaluation of Carboniferous source rocks in Qaidam area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 913-919.
- [19] 康立明, 任战利, 崔军平, 等. 松辽盆地北部宾参 1 井白垩系烃源岩的认识和评价及其意义[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 257-264.  
Kang Liming, Ren Zhanli, Cui Junping, et al. Recognition and evaluation of Cretaceous source rocks of Bincan 1 well in the north of Songliao Basin and its implications[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 257-266.
- [20] 魏建设, 卢进才, 魏仙祥, 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 Xianyang, 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.
- [21] 陈荣书. 石油及天然气地质学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1994: 1-262.  
Chen Rongshu. Geology of oil and gas [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1994: 1-262.
- [22] 梁世友, 李凤丽, 付洁, 等. 北黄海盆地中生界烃源岩评价[J]. 石油实验地质, 2009, 31(3): 249-252.  
Liang Shiyu, Li Fengli, Fu Jie, et al. Evaluation of Meso-Cenozoic hydrocarbon source rocks in north Yellow Sea Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(3): 249-252.
- [23] 胡见义, 黄第藩, 徐树宝, 等. 中国陆相石油地质理论基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 1-322.  
Hu Jianyi, Huang Difan, Xu Shubao, et al. Chinese continental petroleum geological theory [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 1-322.
- [24] Hunt J M. Generation of gas and oil from coal and other terrestrial organic matter[J]. Organic Geochemistry, 1991, 17(6): 673-680.
- [25] 蒂索, 威尔特. 石油形成与分布[M]. 徐永元, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1989: 1-469.  
Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and distribution [M]. Xu Yongyuan, et al, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 1-469.
- [26] Van Krevelen D W. Development of coal research—a review[J]. Fuel, 1982, 61(9): 786-790.
- [27] 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, 2(3): 18-32.  
Huang Difan, Li Jinchao, Zhang Dajiang. Kerogen types and study on effectiveness, limitation and interrelation of their identification parameters [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1984, 2(3): 18-32.