

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.10001

羌塘盆地侏罗系曲色组油苗有机地球 化学特征及意义

肖睿¹, 张帅^{1*}, 祝有海¹, 王平康^{1,2}, 庞守吉¹

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质调查局, 北京 100037)

摘要:针对 QK-3 井取得的曲色组泥页岩、油页岩以及液态油苗进行了有机地球化学特征分析,探讨曲色组烃源岩与液态油苗的亲缘性。研究表明:QK-3 井曲色组泥岩及油页岩达一般—好烃源岩标准,有机质类型多为 I 及 II₁ 型,处于成熟阶段;油页岩、油苗样品生物标志物对比表明,二者形成环境及成熟度特征较为接近,具有很好的可比性,在曲色组中发现的油苗与该组烃源岩有着较好的亲缘关系,油苗源于曲色组油页岩等烃源岩。综合烃源岩有机地球化学特征及曲色组分布范围与沉积厚度认为,下侏罗统曲色组泥质烃源岩的生烃能力属于较好级别,是研究区内最主要的烃源岩,具有较好的勘探潜力。

关键词:羌塘盆地;曲色组;油苗;有机地球化学特征

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

0 引言

目前,全球的大型及特大型油气田主要分布于特提斯构造域,青藏高原是特提斯构造域东段的重要组成部分,由于所处位置的特殊,引起了广泛地关注(余光明等,1989;谭富文等,2002;赵文津等,2006)。自上世纪 50 年代开始的西藏石油地质研究,以羌塘盆地、措勤盆地、伦坡拉盆地为主,其中羌塘盆地是中国陆上面积最大的中生代海相残留盆地(张胜业等,1996),油气赋存条件与勘探前景一直备受关注(付修根等,2015)。前人研究资料显示,在羌塘盆地陆续发现 200 多处的油气显示点,表明羌塘盆地曾有过大量的生烃过程,也显示羌塘盆地有较大的油气资源潜力(李亚林等,2005;曾胜强等,2013;付修根等,2015;肖睿,2015)。

曲色组地层作为南羌塘坳陷侏罗纪时期最先沉积的地层,且被认为具有较好的勘探潜力(伍新和等,2004;汤晶等,2013;杜栢伟等,2014;金峰等,2016)。近十几年来,针对羌塘盆地毕洛错地区曲色组岩石与层序地层(王永胜等,2007,2008)、沉积环境(秦建中等,2006;伊帆等,2016;金峰等,2016;

Fu et al., 2016a,2016b,2017)、油气地质特征(汤晶等,2013;肖睿等,2014;杜栢伟等,2014;Fu et al., 2014;季长军等,2014,2020;Xia et al., 2017;唐友军等,2019;李高杰等,2020)等多方面已进行了多种内容、不同程度地研究,但研究主要依据地表露头开展。中国地质调查局在羌塘盆地组织实施了冻土区天然气水合物钻探试验井(QK-3 井),钻遇曲色组一段,且在该层段深灰—黑色泥岩中发现了三处液态油苗(张帅等,2013),这区别于以往羌塘盆地内发现的油气显示点(王忠伟等,2017;季长军等,2014;曾胜强等,2013;杜栢伟等,2003,2010;付修根等,2008;朱同兴等,2007),此前发现多为地表露头发现,样品易遭受氧化、风化淋滤,且含油岩多为灰岩,此次发现显示了该区泥页岩可能具有良好的油气勘探前景,也有利于探讨油气生成和运移过程等研究。故本研究针对 QK-3 井取得的曲色组泥页岩、油页岩以及液态油苗进行了有机地球化学特征分析与对比,进一步开展油—岩对比,旨在为羌塘盆地油气勘探及该区进一步油气地质研究提供依据。

收稿日期:2021-05-31;改回日期:2021-10-22

作者简介:肖睿(1990—),男,工程师,主要从事天然气水合物地质调查研究,E-mail:didaxr@163.com

通讯作者:张帅(1987—),男,工程师,主要从事天然气水合物地质调查研究,E-mail:zhangshuai870517@163.com

资助项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20190102)

1 区域地质背景

羌塘盆地位于青藏高原北部,面积 22 万平方千米,是在前古生界结晶基底和古生界褶皱基底之上发育起来的以中生界海相沉积为主的残留盆地,其南界为班公湖-怒江缝合带,北界为可可西里-金沙江缝合带。盆地内构造复杂,具有两坳一隆的构造格局,即北羌塘坳陷、南羌塘坳陷和中央隆起带(黄继钧,2001)。早侏罗世,羌塘盆地南部继承了前期的沉积格架,南羌塘坳陷总体呈“北浅南深”,为陆棚相沉积环境,沿中央隆起带南侧分布滨岸带沉积,沉积物砂质含量较高;向南至毕洛错地区过渡为滨浅海相潟湖亚相,岩性以深灰、黑色泥页岩为主,局部夹灰岩(杜栢伟等,2014)。

钻探区属南羌塘坳陷北部(图 1a),位于羌塘盆地毕洛错东南约 8 千米处,周缘地层分布明显受控于多条逆冲断层,图 1b 中的 B、C 两点为下侏罗统曲色组油页岩、黑色泥岩和膏岩,且在钻井东北部发现较厚油页岩、膏岩;D、E 两点为新近系中新统康托组地层。钻井中曲色组与康托组地层(紫红色砂泥岩层)为断层接触,见断层角砾,推断主逆冲断层将曲色组逆推到康托组之上,以致地层发生倒转

现象(图 1b)。其中,油页岩露头出露情况较好,产状较为清晰,厚度大且特征较为明显,常以多层产出,但每层厚度均较小,单层最大厚度不超过 2.0m,累计厚度大于 12m。

QK-3 井坐标为 N 32°49'50.9",E 88°54'56.5",海拔 4993m,终孔井深 441.14m,钻遇第四系、下侏罗统曲色组和中新统康托组地层(图 1c)。其中下侏罗统曲色组深度为 23.6~170.60m,岩性以深灰色—灰黑色泥岩、粉砂岩为主,夹厚约 6m 的灰褐色油页岩,底部薄层石膏盐岩与灰色粉砂岩互层,灰黑色泥岩层多处见被黄铁矿交代的双壳化石。在曲色组深灰—黑色泥岩中发现三处液态油苗,深度分别为 80.6m、91.78m 和 104.32m。液态油苗呈淡灰黄色,以似胶状物质分布于岩心溶孔、溶洞和裂缝中(图 2),为羌塘盆地首次于井中钻获液态油苗。

2 样品采集及实验条件

本文利用 QK-3 井 54.4~168.6m 区间内采集的 4 个烃源岩样品和 2 个液态油苗样品,系统地开展有机地球化学分析,其中岩心样品主要为灰色—灰黑色泥岩、油页岩,较为破碎,有汽油气味溢出,

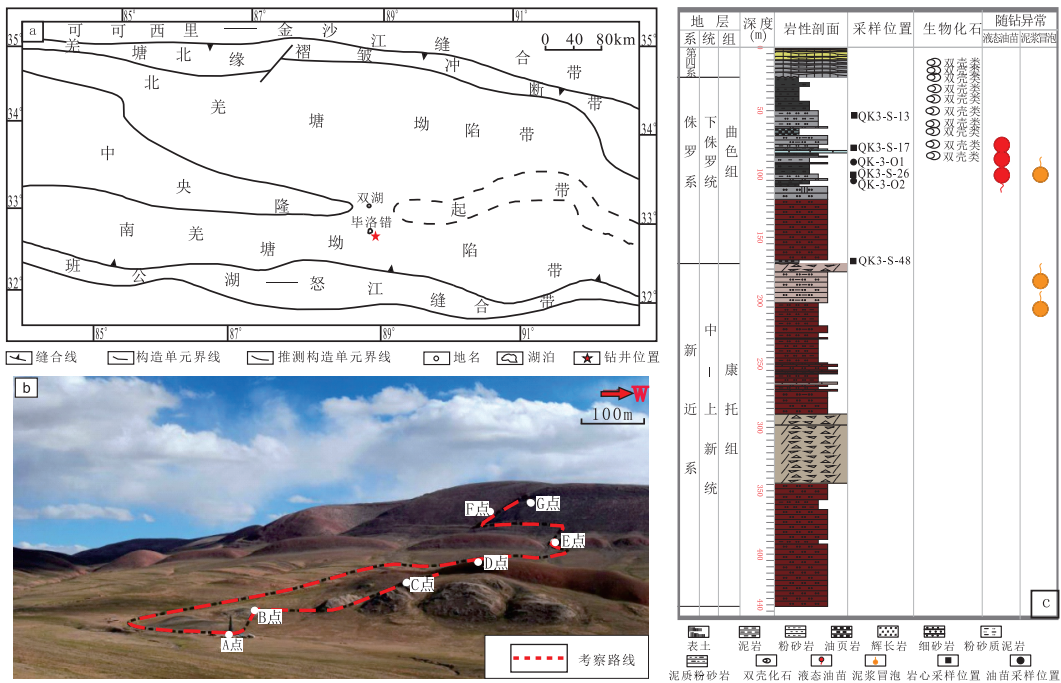


图 1 羌塘盆地构造略图(a)、钻孔周边地层出露(b)及 QK-3 孔岩性柱状图(c)

(图 b 中 A 点:QK-3 井位置;B 点:下侏罗统曲色组油页岩露头;C 点:下侏罗统曲色组石膏层露头;D 点、E 点:新近系康托组露头;F 点:中侏罗统莎巧组露头;G 点:中侏罗统布曲组露头)

Fig. 1 Tectonic map of the Qiangtang Basin (a), outcrops around drilling area (b) and lithologic column (c) of borehole QK-3

局部可见双壳类化石。所有实验均在中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心进行。实验分析条件如下:(1)有机碳分析使用 LECO CS-230 碳硫分析仪在常温常压下进行,分析执行标准为沉积岩中总有机碳的测定 GB/T 19145—2003;(2)热解分析使用油气评价工作站(中国),分析执行标准为岩石热解分析方法 GB/T 18602—2001;(3)抽提:在 70℃ 恒温下,以氯仿为溶剂,在索式抽提器中连续抽提;(4)有机岩石学分析在 Axiophot 型透光—荧光高级生物显微镜下测试;(5)岩石中碳同位素分析使用 Finnigan MAT-252,执行标准为《有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法 SY/T 5238—2008》;(6)镜质体反射率 R_o 在 MPV-SP 显微光度计测定,执行标准为 SY/T 5124—1995《沉积岩中镜质体反射率测定方法》。(7)岩石及原油中饱和烃气相色谱分析使用 Agilent 7890GC/ HP6890N 气相色谱仪,执行标准为 SY/T 5779—2008《石油和沉积有机质烃类气相色谱分析方法》;(8)岩石及原油生物标志物分析使用 Thermo-Trace GC Ultra-DSQ II 气相色谱—质谱联用仪,执行标准为气相色谱—质谱法测定沉积物和原油中生物标志物 GB/T 18606—2001。

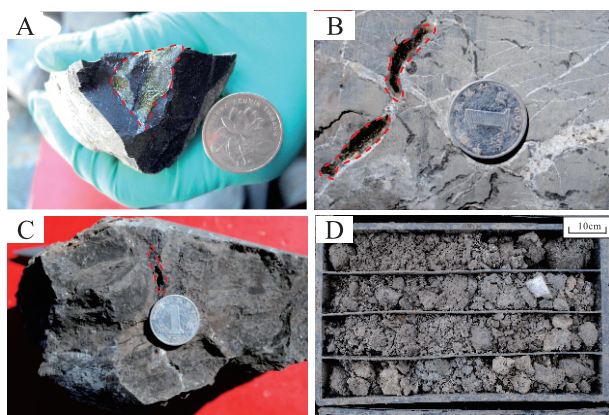


图2 QK-3 井岩心中发现的液态油苗

A. 灰黑色泥岩断面见油迹显示,井深 80.6m; B. 灰色粉砂质泥岩发育方解石脉并伴有油迹显示,井深 91.78m; C. 灰黑色粉砂质泥岩裂隙见油迹显示,井深 104.32m; D. 见油迹显示的曲色组岩性多为破碎的油页岩夹泥岩碎块,井深 65.36 ~ 68.36m。

Fig. 2 Liquid seepage in the rock core of QK-3

3 QK-3 井曲色组烃源岩特征

QK-3 井曲色组样品有机地球化学测试结果见表 1。结果显示样品 TOC 含量为 1.15% ~ 8.43%, 其中灰褐色油页岩样品中的 TOC 含量为 5.25%, 参

照烃源岩地球化学评价方法(SY/T 5735—2019), 达到了好烃源岩的标准,生烃潜量($S_1 + S_2$)为 3.34 ~ 41.31mg/g,达一般—好烃源岩,与 TOC 评价结果相吻合。

在曲色组样品的氯仿抽提物中,饱和烃含量介于 21.70% ~ 35.60%,饱和烃与芳烃比值介于 1.16 ~ 2.58,而非烃与沥青质总含量达到 46.96% ~ 68.16%,类型指数为 3.62 ~ 116.56,绝大多数高于 5,对照 SY/T 5735—2019,岩石样品有机质主要以 I 及 II₁ 型为主,少量烃源岩有机质为 II₂ 型。此外,烃源岩中有机质萘烷类及甾烷类化合物特征也可以反映出有机母质的来源(卢双舫等,2008;曹峻锋等,2014)。曲色组泥岩样品的萘类化合物中三环萘烷/五环三萘烷比值为 0.49,甾烷类化合物中 $\Sigma(C_{27} + C_{28}) > \Sigma C_{29}$,且 $\Sigma C_{27}/\Sigma C_{29}$ 值为 1.06,表明该烃源岩有机母质含水生生物的成分。综上指标,该地区曲色组有机质多为 I 及 II₁ 型,主要来源于海相水生生物。

QK-3 井曲色组样品镜质体反射率测试结果显示该组泥岩的 R_o 介于 0.73% ~ 0.76% (表 1),这表明该组烃源岩正处于成熟阶段(柳广弟,2009)。岩石热解测试中该组岩石样品的 T_{max} 分布范围为 433 ~ 445℃,且主要分布在 440℃ 之上(图 3),这表明该地区曲色组烃源岩中有机质已进入成熟阶段,局部热演化程度可能较低,最高峰温指标与镜质体反射率评价结果基本吻合。由此本文认为该区曲色组泥岩中有机质正处于成熟阶段,以产出成熟中质油为主。

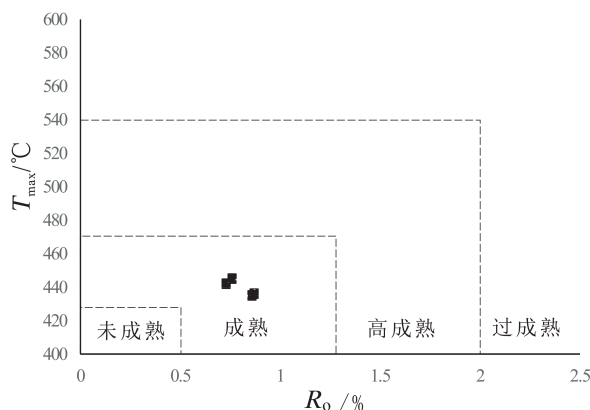


图3 QK-3 井烃源岩 R_o 与 T_{max} 相关图

Fig. 3 The related chart between R_o and T_{max} of the source rocks in QK-3

表 1 羌塘盆地 QK-3 井烃源岩有机地球化学测试结果

Table 1 Organic geochemical analysis data of source rocks in QK-3

样品编号	QK3-S-13	QK3-S-17	QK3-S-26	QK3-S-48	QK-3-01	QK-3-02
岩性	灰黑色泥岩	灰色泥岩	灰黑色泥岩	灰褐色油页岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩
深度(m)	54.4	69.16	101.15	168.6	91.79	104.32
层位	曲色组	曲色组	曲色组	曲色组	曲色组	曲色组
有机碳 TOC(%)	1.15	1.68	8.43	5.25	0.7	1.48
S ₁ (mg/g)	0.68	--	3.55	0.99	0.46	1.16
S ₂ (mg/g)	2.66	--	71.10	40.32	1.23	4.82
S ₃ (mg/g)	0.44	--	0.61	0.46	0.34	0.42
S ₁ + S ₂ (mg/g)	3.34	--	74.65	41.31	1.69	5.98
类型指数	6.05	--	116.56	87.65	3.62	11.48
氯仿沥青 A(%)	0.23	--	1.40	0.54	0.30	0.56
饱和烃(%)	28.50	--	21.70	35.60	21.09	13.92
芳烃(%)	24.55	--	10.14	13.81	44.92	46.13
非烃(%)	35.68	--	20.24	22.84	22.26	31.39
沥青质(%)	11.28	--	47.92	27.75	11.74	8.57
镜质体反射率 R ₀ (%)	最小值	0.7	--	/	0.69	0.77
	最大值	0.81	--	/	0.79	0.94
	均值	0.76	--	0.76	0.73	0.87
T _{max} (℃)	433	--	442	445	435	436

* “—”表示未测试,“/”表示未检出

4 QK-3 液态油苗生物标志物特征

4.1 正构烷烃

烃源岩的母质来源主要有藻类、低等的水生生物和陆源生物这三大类。在形成沉积有机质过程中,类脂化合物由于相对稳定的化学结构且含量丰富,通常会选择性地进入沉积体系中参与烃类的转

化,其中饱和直链烷烃常常出现在优质烃源岩中,因此烃源岩的母质来源也可以通过其抽提物的饱和烃分布特征来判断(卢双舫等,2008;柳广弟,2009;杨开丽,2013)。两个液态油苗样品检测出的正构烷烃分布特征有所差异,饱和烃气相色谱分析数据如表 2 所示。

表 2 液态油苗饱和烃分析数据

Table 2 The Saturated hydrocarbon analytic data of liquid oil seepages in drilling well QK3

样品 编号	深度(m)	MAX-PEAK	碳数 范围	C ₂₁ ⁻ /C ₂₂ ⁺	C ₂₁₊₂₂ /C ₂₈₊₂₉	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	CPI	OEP
QK3-O-01	91.79	C22	13~35	0.54	1.22	0.54	0.44	0.83	0.85	0.86
QK3-O-02	104.32	C19	13~33	1.23	3.52	0.54	0.56	1.05	1.05	1.13

饱和烃气相色谱分析结果显示,两个液态油苗样品碳数分布范围大致相同,都分布于 C₁₃—C₃₅(图 4)。QK3-O-01 样品主峰碳位置偏高,为 C₂₂,nC₁₃—nC₂₁之间的组分占 33.01%,nC₂₂—nC₃₇之间的组分占 60.82%,轻重烃比 $\sum C_{21}^- / \sum C_{21}^+$ 为 0.54,重碳优势较为明显。QK3-O-02 样品主峰碳位置偏低(nC₁₉),nC₁₃—nC₂₁之间的组分占 48.58%,nC₂₂—

nC₃₇之间的组分占 39.49%,轻重烃 $\sum C_{21}^- / \sum C_{21}^+$ 比值为 1.23,且大于 1.2,由于微生物对 C₂₁ 以下的低碳数正构烷烃的降解程度更大,从而会造成低碳数正构烷烃的相对丰度减少(窦启龙等,2005),因此,油苗样品正构烷烃显示其具有一定的低碳数优势,这种特征常被解释为水生生物为主的生物母质的贡献。

奇偶优势参数 OEP、CPI 值均近似为 1,无明显

的奇偶优势,显示了成熟阶段的基本特征(杜秋定等,2010)。研究表明,不具备明显奇偶优势的中等相对分子质量(nC_{15} - nC_{21})正构烷烃分布可能指示海相藻类等水生生物来源(卢双舫等,2008),因此,油苗样品正构烷烃分布特征反映了其有机质可能主要来源于海相。

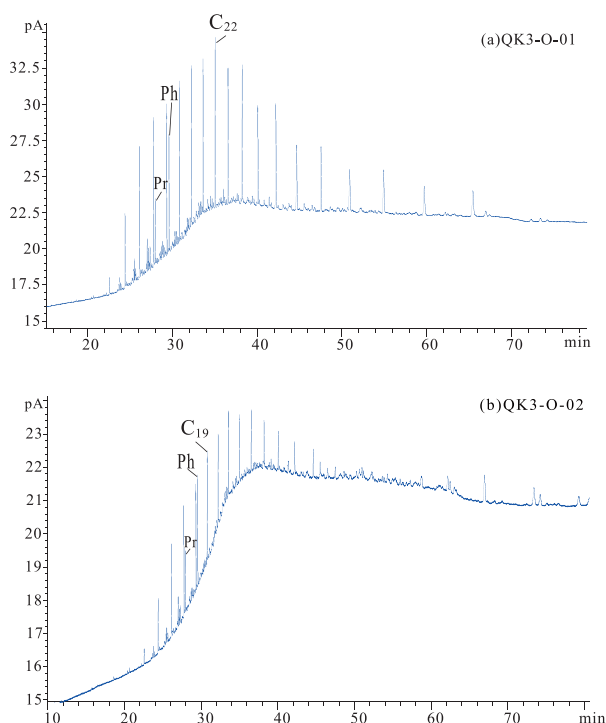


图4 油苗饱和烃气相色谱图

a. QK3-O-01 样品图谱; b. QK3-O-02 样品图谱

Fig. 4 The chromatogram of the saturated hydrocarbon in liquid seepage of QK-3

$\Sigma(C_{21} + C_{22}) / \Sigma(C_{28} + C_{29})$ 是可以被用来判别海相或者陆相生物成因的母质类型的指标, Philippi (1974) 研究认为, 陆相有机质具有较低的比值(0.6 ~ 1.2), 海相有机质具有较高的比值(1.5 ~ 5.0)。两个油苗样品 $\Sigma(C_{21} + C_{22}) / \Sigma(C_{28} + C_{29})$ 大于 1, 这反映了油苗有机质母质中低等水生生物相对高等植物输入的优势, 尤其是 QK3-O-02 样品达到了 3.52, 显示正构烷烃的轻烃组分占绝对优势, 说明油苗的生源主要是海相有机质。

4.2 类异戊二烯烃

类异戊二烯烃中的姥鲛烷、植烷及其比值(Pr/Ph)常被作为判断原始沉积环境的氧化-还原条件和介质盐度的重要指标。姥鲛烷形成于较氧化环境, 植烷形成于较还原环境, $Pr/Ph > 1$ 属于较氧化环境, $Pr/Ph < 1$ 属于较还原环境(Powell and

Mckirdy, 1973; Peters and Moldowan, 1993; 段开宾等, 2011)。研究区油苗的 Pr/Ph 值均为 0.54, 显示了植烷对姥鲛烷的优势, 这说明油苗的母质可能形成于较还原环境。

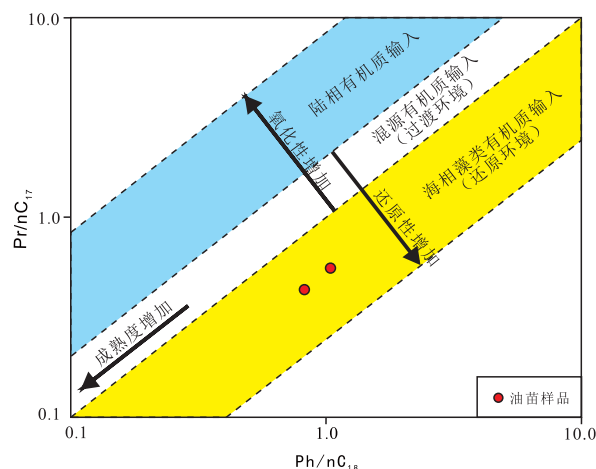


图5 油苗(Pr/nC_{17})-(Ph/nC_{18})相关图

Fig. 5 Cross plot of pristane/ nC_{17} and phytane/ nC_{18} of the oil seepages

一般认为, 高的 Pr/nC_{17} 比值及低的 Ph/nC_{18} 比值反映陆相有机质输入, 低的 Pr/nC_{17} 比值及高的 Ph/nC_{18} 比值指示沉积有机质以海相为主, 而 Pr/nC_{17} 比值与 Ph/nC_{18} 比值大小相当, 则反映过渡环境。如表 2 所示, 两个油苗样品 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值揭示了其沉积环境具有明显的还原性(图 5), 并反映了沉积有机质以海相输入为主(陈文彬等, 2011; 陈哲龙, 2017)。

4.3 萜类化合物

油苗样品检测出了相当丰富的五环三萜类化合物(藿烷系列)和三环萜烷, 含有少量四环萜烷、伽马蜡烷等萜类化合物(图 6)。检测到的化合物中未发现代表典型陆源输入的奥利烷和羽扇烷。

五环三萜烷碳数主要分布为 C_{27} — C_{35} , 其中以 C_{30} 藿烷的成分占绝对优势(图 6)。升藿烷系列中 C_{31} 至 C_{35} 均有检出, 这表明了其源岩有机质在沉积过程中曾有过细菌活动的参与(李忠雄等, 2010)。Ts/(Tm + Ts) 比值是最常用的成熟度指标, 由于 Tm 受热演化程度影响, 且随着成熟度的增加而使 Ts/(Tm + Ts) 比值变大(崔景伟等, 2013)。液态油苗样品 Ts/(Tm + Ts) 比值为 0.53 和 0.55, 这说明了源岩虽然热演化程度较高, 但未达到生油阶段晚期, 尚处于生油阶段, 与有机质成熟度评价结果相

吻合。三环萜烷碳数主要分布在 C_{19} — C_{29} (图 6), 三环萜烷/五环三萜烷比值为 0.49, 说明该烃源岩有机质来源于海相环境, 有机母质具有低等水生生物输入的特征(李忠雄等, 2010)。油苗中检测到了少量的四环萜烷, 有可能是低等生物所致。

伽马蜡烷是高盐度海相及非海相沉积的重要指标, 高的伽马蜡烷表征强还原、超盐度的沉积环境(卢双舫等, 2008), 一般认为, 伽马蜡烷/ $(C_{31}(20S + 20R)/2)$ 比值 ≤ 0.3 时, 为淡水环境; 比值为 $0.3 \sim 0.5$ 时, 为微咸水环境; 比值 > 0.5 时, 为咸水环境。油苗样品伽马蜡烷/ $(C_{31}(20S + 20R)/2)$ 比值介于 $0.3 \sim 0.5$, 反映了油苗源岩处于咸水环境,

但是水体的盐度较低(Sinninghe Damste et al., 1995)。

用于反映成熟度的另外两个参数: C_{29} 藿烷/莫烷和 $C_{32}22S/(22S + 22R)$ 也与页岩相似(表 3)。一般认为 $C_{32}22S/(22R + 22S)$ 在成熟阶段由 0 增加到 0.6 左右, 当比值为 $0.57 \sim 0.62$ 则表明达到或超过主要的生油阶段(Seifert and Moldowan, 1986; 付修根等, 2008); 而 C_{29} 莫烷/藿烷随成熟度增加而减小, 但易受源岩输入或沉积环境的影响。如表 3 所示, 液态油苗 $C_{32}22S/(22S + 22R)$ 比值均为 0.58, C_{29} 藿烷/莫烷比值达 $6.71 \sim 7.95$, 显示达到了较高的热演化程度。

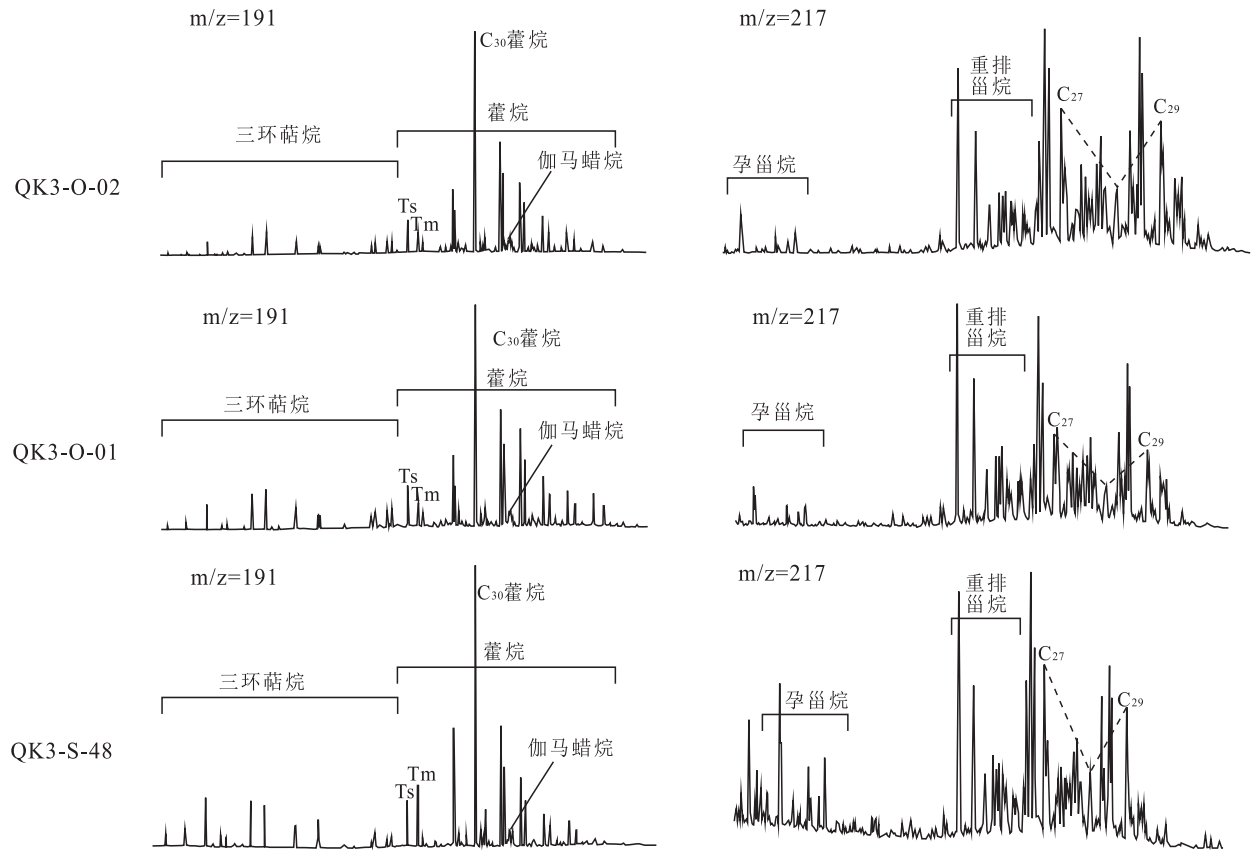


图 6 羌塘盆地 QK-3 井油页岩及液态油苗萜、甾烷质谱图

Fig. 6 Saturated hydrocarbon chromatograms and mass chromatograms of terpane and sterane for the source rocks and liquid seepage of well in Qiangtang Basin QK-3

表 3 液态油苗及烃源岩生物标志物特征参数

Table 3 Compositions of liquid seepage and source rocks in QK-3

样品编号	伽马蜡烷/ $(C_{31}(20S + 20R)/2)$	C_{29} 藿烷/莫烷	$C_{32}22S/(22S + 22R)$
QK3-S-48	0.32	6.69	0.56
QK3-O-01	0.41	7.95	0.58
QK3-O-02	0.35	6.71	0.58

4.4 甾类化合物

研究区油苗样品中检测出了大量的甾类化合物,主要为规则甾烷,其次为重排甾烷,还检出一定量的孕甾烷。一般认为 C_{27} 、 C_{28} 规则甾烷来自海相有机质和湖相的水生生物,而 C_{29} 规则甾烷来源于陆相高等植物有机质(卢双舫等,2008)。液态油苗样品的规则甾烷 C_{27} - C_{28} - C_{29} 均呈“V”字型分布(图6),且 $\Sigma(C_{27} + C_{28}) > \Sigma C_{29}$,液态油苗中该比值为 1.17 和 1.04,均显示出微弱的 C_{27} 甾烷优势,显示了油苗样品有机母质的相似性,来源于低等水生生物(Summons et al., 1987; 陈文彬等,2010; 蔡劲等,2014)。

此外, C_{27} - C_{29} 甾烷的 R、 $\alpha\alpha$ 构型随成熟度增加而分别向更稳定的 S、 $\beta\beta$ 构型转化,因此 $C_{29}20S/(S + R)$ 和 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 比值常被用来判别有机质成熟度(卢双舫等,2008)。液态油苗样品 $C_{29}20S/(20S + 20R)$ 值分布在 0.45 ~ 0.58 范围内,而 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha)$ 值为 0.41 ~ 0.58,均说明了样品有机质处于成熟阶段(图7)。

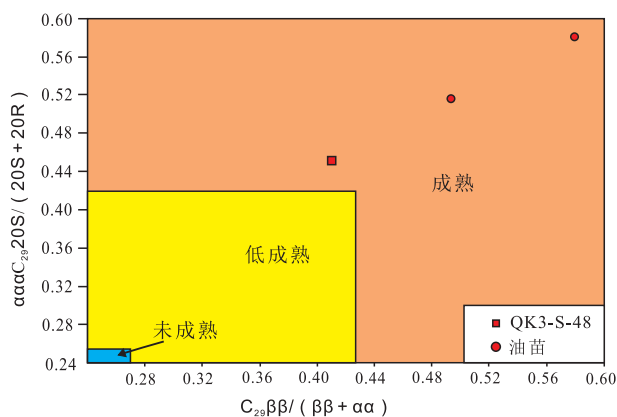


图7 油苗成熟度生标参数相关图

Fig. 7 Correlation diagram of the biomarker parameters for the maturity of the oil seepages

5 问题与讨论

5.1 QK-3 曲色组液态油苗油源对比

5.1.1 母质性质及形成环境

从液态油苗样品饱和烃分布特征可以看出,油苗样品正构烷烃分布特征、奇偶优势参数 OEP、CPI 值、 $\Sigma(C_{21} + C_{22})/\Sigma(C_{28} + C_{29})$ 指标,反映了油苗有机质母质中低等水生生物相对高等植物输入的优势,说明油苗的生源主要是海相有机质。姥鲛烷与植烷则说明油苗的母质可能形成于较还原环境,

也反映了沉积有机质以海相输入为主。

而从曲色组油页岩与液态油苗亲缘性对比也可看出,曲色组油页岩从碳数分布形态上与油苗样品具有一定的相似性,均检测出了五环三萜类化合物、三环萜烷,以及少量四环萜烷。萜烷化合物的相对丰度含量上与油苗样品类似,同时也检出一定量的伽马蜡烷,伽马蜡烷/ $(C_{31} + (20S + 20R)/2)$ 比值与油苗样品相近,反映了油页岩沉积时与油苗母质形成相似的盐度环境,说明该烃源岩有机质来源于海相环境,规则甾烷的分布可以提供原油母质信息。曲色组烃源岩与液态油苗在甾类化合物质量色谱图上也有较高的相似性(图6)。曲色组油页岩以及液态油苗的甾烷类化合物主要为规则甾烷,其次为重排甾烷,还检出一定量的孕甾烷。规则甾烷 C_{27} - C_{28} - C_{29} 分布及 $\Sigma C_{27}/\Sigma C_{29}$ 值均显示了烃源岩及油苗样品有机母质的相似性,来源于低等水生生物(Summons et al., 1987; 陈文彬等,2010)。

5.1.2 成熟度

油苗的成熟度是研究其成因的一个重要指标,许多生物标志化合物参数则是可以用来判断烃源岩的成熟度。 $Ts/(Tm + Ts)$ 比值是最常用的成熟度指标,油页岩样品中该比值较大,达到 0.47,与液态油苗样品中该比值相近, C_{29} 藿烷/莫烷和 $C_{32}22S/(22S + 22R)$ 也与油页岩相似,也与有机质成熟度评价结果相吻合。此外,烃源岩及液态油苗样品 $\alpha\alpha C_{29}20S/(20S + 20R)$ 值与 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha)$ 均说明了样品有机质具有相似的成熟度(图7)。综上所述,曲色组烃源岩与液态油苗在成熟度指标参数方面有着较高的相似性,均达到了较高的热演化程度。

5.1.3 油苗的生物降解程度

两个油苗样品同处于下侏罗统曲色组缺氧环境下,埋深相差 12.5m,测试结果具有一定差异,可能由于油苗是由原始母质等有机质经长期演化形成的,同时在有机质的演化过程中,温度和压力不断增大,促使高分子烃裂解成为低分子,所以主峰碳位置向低碳方向偏移,使得轻烃组分增加,重烃组分减少(彭清华等,2017)。此外,研究区油苗正构烷烃呈明显的“驼峰”分布,显示遭受到明显的生物降解作用,降解程度的不同也可能造成油苗测试的差异。饱和烃气相色谱分析表明,样品中尽管部分正构烷烃已被破坏,但普遍检测出一系列可清晰分辨的连续、完整、高丰度的 C_{13} - C_{31} 正构烷烃色谱

标参数方面有着较高的相似性,均达到了较高的热演化程度。

(4)油源对比显示在曲色组中发现的油苗与曲色组油页岩有着较好的亲缘关系,表明该油苗来源于曲色组油页岩等烃源岩,这也说明了曲色组烃源岩具有很好的勘探前景。综合烃源岩有机地球化学特征及曲色组分布范围与沉积厚度,认为下侏罗统曲色组泥质烃源岩的生烃能力属于较好级别,在研究区内可作为最主要的烃源岩,有为天然气水合物形成提供气源的潜力。

参考文献 (References):

- Fu X G, Tan F W, Feng X L, et al., 2014. Early Jurassic anoxic conditions and organic accumulation in the eastern Tethys [J]. *International Geology Review*, 56(12): 1450–1465.
- Fu X G, Wang J, Feng X L, et al., 2016a. Mineralogical composition of and trace-element accumulation in lower Toarcian anoxic sediments; a case study from the Bilong Co. oil shale, eastern Tethys [J]. *Geological Magazine*, 153(4): 618–634.
- Fu X G, Wang J, Chen W B, et al., 2016b. Elemental geochemistry of the early Jurassic black shales in the Qiangtang Basin, eastern Tethys: constraints for palaeoenvironment conditions [J]. *Geological Journal*, 51(3): 443–454.
- Fu X G, Wang J, Zeng S Q et al., 2017. Continental weathering and palaeoclimatic changes through the onset of the Early Toarcian oceanic anoxic event in the Qiangtang Basin, eastern Tethys [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 487: 241–250.
- Peters K E, Moldowan J M, 1993. *The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments* [J]. Englewood Cliffs, NJ (United States); Prentice Hall, 363.
- Philippi G T, 1974. The influence of marine and terrestrial source material on the composition of petroleum [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(6): 947–966.
- Powell T, Mckirdy D M, 1973. Relationship between ratio of pristane to phytane, crude oil composition and geological environments in Australia [J]. *Nature*, 243(124): 37–39.
- Seifert W K, Moldowan J M, 1986. Use of biological markers in petroleum exploration [C] // Johns R B, ed. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, 24: 261–290.
- Sinninghe Damste J S, Kenig F, Koopmans M P, et al., 1995. Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(9): 1895–1900(6).
- Summons R E, Volkman J K, Boreham C J, 1987. Dinosterane and other steroidal hydrocarbons of dinoflagellate origin in sediments and petroleum [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(87): 3075–3082.
- Xia G Q, Ji C J, Chen L et al. Biomarkers of the lower Jurassic black shale in the Shuanghu area of the Qiangtang Basin, northern Tibet, and their geological significance [J]. *Oil Shale*, 2017, 34(1): 55–69.
- 蔡劲,王桂成,张震,2014. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组长8油藏油源对比研究 [J]. *沉积与特提斯地质*, 34(4): 68–74.
- 曹峻峰,宋春彦,付修根,等,2018. 羌塘盆地二叠系展金组烃源岩生物标志化合物特征及意义 [J]. *沉积与特提斯地质*, 38(2): 64–73.
- 陈文彬,廖忠礼,张予杰,等,2007. 北羌塘盆地侏罗系布曲组烃源岩地球化学特征及意义 [J]. *中国地质*, 34(5): 927–933.
- 陈文彬,廖忠礼,刘建清,等,2010. 西藏南羌塘盆地侏罗系烃源岩地球化学特征 [J]. *现代地质*, 24(4): 654–661.
- 陈哲龙,柳广弟,卫延召,等,2017. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩三环萜烷分布样式及影响因素 [J]. *石油与天然气地质*, 38(2): 311–322.
- 崔景伟,王铁冠,胡健,等,2013. 塔里木盆地和田河气田轻质油成熟度判定及其油源意义 [J]. *石油与天然气地质*, 34(1): 27–36.
- 窦启龙,陈践发,薛燕芬,等,2005. 实验室条件下微生物降解原油的地球化学特征研究 [J]. *沉积学报*, 23(3): 542–547.
- 杜佰伟,谭富文,王剑,等,2003. 羌塘盆地最大规模沥青脉的发现及其意义 [J]. *沉积与特提斯地质*, 23(1): 69–74.
- 杜佰伟,刘贞才,彭清华,何江林,2010. 青藏高原羌塘盆地托纳木地区雪山组大规模沥青脉的发现 [J]. *地质通报*, 29(12): 1881–1883.
- 杜佰伟,彭清华,谢尚克,等,2014. 羌塘盆地南部下侏罗统曲色组页岩气资源潜力分析 [J]. *新疆石油地质*, 35(2): 144–148.
- 段开宾,李忠雄,汪正江,2011. 藏北羌塘盆地羌资1井中侏罗统沥青脉生物标志化合物分布特征及其意义 [J]. *沉积与特提斯地质*, 31(3): 71–77.
- 付修根,廖忠礼,王剑,等,2008. 藏北南羌塘盆地扎仁地区油苗地球化学特征及意义 [J]. *沉积学报*, (4): 697–704.
- 付修根,王剑,谭富文,等,2015. 藏北羌塘盆地油气地质勘探新进展 [J]. *沉积与特提斯地质*, 35(1): 16–24.
- 黄继钧,2001. 羌塘盆地基底构造特征 [J]. *地质学报*, 75(3): 333–337.
- 季长军,陈程,吴珍汉,等,2020. 羌塘盆地中侏罗统砂糖状白云岩流体包裹体碳—氧同位素分析及白云岩成因机制讨论 [J]. *地质论评*, 66(5): 1186–1198.
- 季长军,伊海生,夏国清,等,2014. 羌塘盆地隆鄂尼地区油苗芳烃分布特征及意义 [J]. *沉积学报*, 32(2): 391–398.
- 金峰,伊海生,李启来,2016. 南羌塘坳陷早侏罗系曲色组下部泥岩地球化学特征及意义 [J]. *科学技术与工程*, 16(25): 208–215.
- 李高杰,夏国清,伊海生,等,2020. 西藏南羌塘坳陷泥质烃源岩评价及有利生烃区预测 [J]. *地质论评*, 66(5): 1241–1260.
- 李亚林,黄继钧,王成善,等,2005. 羌塘盆地构造改造强度划分与油气远景区分析 [J]. *沉积与特提斯地质* (4): 11–16.
- 李忠雄,何江林,杜佰伟,等,2010. 羌塘盆地羌资2井布曲组碳酸盐岩生物标志物特征及意义 [J]. *石油实验地质*, 32(2): 175–180.
- 柳广弟,2009. *石油地质学* [M]. 北京:石油工业出版社: 153–165.
- 卢双舫,张敏,2008. *油气地球化学* [M]. 北京:石油工业出版社: 65–77.

- 罗建宁,谢渊,王小龙,等,2003. 羌塘盆地石油地质条件与初步评价[J]. 沉积与特提斯地质,23(1):1-15.
- 彭清华,杜佰伟,谢尚克,等,2017. 羌塘盆地昂达尔错地区油苗生物标志化合物特征及其指示意义[J]. 沉积与特提斯地质,37(3):59-65.
- 秦建中,2006. 青藏高原羌塘盆地海相烃源层的沉积形成环境[J]. 石油实验地质,28(1):8-14+20.
- 谭富文,王剑,王小龙,等,2002. 西藏羌塘盆地中国油气——资源战略选区的首选目标[J]. 沉积与特提斯地质,22(1):16-21.
- 汤晶,朱利东,杨文光,等,2013. 青藏高原羌南盆地侏罗系曲色组烃源岩评价[J]. 沉积与特提斯地质,33(1):86-92.
- 唐友军,杨易卓,孟宪新,等,2019. 火山活动对南羌塘盆地曲色组烃源岩地球化学特征影响探讨[J]. 天然气地球科学,30(5):721-728.
- 汪双清,沈斌,龚迎莉,等,2008. 羌塘盆地中生代古油藏油源问题探讨[J]. 海相油气地质,13(3):30-36.
- 王剑,丁俊,王成善,等,2009. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京:地质出版社,237-238.
- 王永胜,郑春子,2007. 藏北色哇地区索布查组、曲色组岩石地层、层序地层、生物地层特征及三叠系与侏罗系界线[J]. 地层学杂志(4):377-384.
- 王永胜,张树岐,谢元和,等. 中华人民共和国 1:25 万区域地质调查报告(昂达尔错幅)[M]. 北京:中国地质大学出版社,2012.
- 王忠伟,王剑,付修根,等,2017. 藏北羌塘盆地井下布曲组含油白云岩地球化学特征及其意义[J]. 地质通报,36(4):591-600.
- 伍新和,张丽,王成善,等,2008. 西藏羌塘盆地中生界海相烃源岩特征[J]. 石油与天然气地质,29(3):348-354.
- 肖睿,祝有海,王平康,等,2015. 藏北羌塘盆地 QK-1 井中侏罗统烃源岩地球化学特征[J]. 现代地质,29(1):163-170.
- 肖睿,2015. 西藏羌塘盆地天然气水合物气源研究[D]. 中国地质科学院.
- 杨桂芳,滕玉洪,卓胜广,等,2003. 藏北羌塘盆地双湖地区油气成藏条件[J]. 地质通报,(4):285-289.
- 杨开丽,祝有海,王平康,等,2013. 羌塘盆地 QK-1 孔烃类气体分布特征与成因来源[J]. 现代地质,27(2):405-412.
- 伊帆,朱利东,刘显凡,等,2016. 藏北羌塘盆地双湖地区下侏罗统油页岩的有机碳同位素异常和正构烷烃分布特征及大洋缺氧事件研究[J]. 矿物学报,36(3):413-422.
- 余光明,王成善,张哨楠,1989. 西藏地区特提斯中生代沉积特征及沉积盆地演化[J]. 中国科学(D 辑),(9):982-990.
- 曾胜强,王剑,付修根,等,2013. 北羌塘盆地长蛇山油页岩剖面烃源岩生烃潜力及沉积环境[J]. 中国地质,40(6):1861-1871.
- 张胜业,魏胜,王家映,等,1996. 西藏羌塘盆地大地电磁测深研究[J]. 地球科学,(2):198-202.
- 张帅,王平康,祝有海,等,2013. 羌塘盆地中生界地下液态油苗的发现[A]. 中国地质学会青年工作委员会. 第一届全国青年地质大会论文集[C]. 中国地质学会青年工作委员会:中国地质学会地质学报编辑部:2.
- 赵文津,赵逊,蒋忠惕,等,2006. 西藏羌塘盆地的深部结构特征与含油气远景评价[J]. 中国地质,33(1):1-13.
- 朱同兴,冯心涛,李宗亮,等,2007. 西藏双湖地区江爱达日那发现液态油苗[J]. 地质通报,26(1):114-116.

Organic geochemistry and significance of oil seepages in the Quse Formation in the Qiangtang Basin

XIAO Rui¹, ZHANG Shuai¹, ZHU Youhai¹, WANG Pingkang^{1,2}, PANG Shouji¹

(1. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: In this paper, samples from Quse Formation mudstone, oil shale and liquid oil seedlings obtained from well QK-3 have been analyzed and their organic geochemical characteristics and the relationship between source rocks and liquid oil seedlings have been discussed. The results show that the mudstone and oil shale of QK-3 hole have reached the standard of medium to good source rocks, most of which are I type or II₁ type and are in the mature stage. The comparison of biomarkers shows that both the oil shale and oil seepages samples are with similar formation environment and maturity characteristics. The oil seepages found in Quse Formation have a good genetic relationship with the source rock, indicating that the oil seepages are derived from the oil shale of Quse Formation. Based on the organic geochemical characteristics of the source rocks, the distribution range, and the sedimentary thickness of Quse Formation, it is considered that the argillaceous source rocks of the lower Jurassic Quse Formation are of good hydrocarbon generation capacity. It is the most important source rock with the potential to form natural gas hydrate in study area.

Key words: Qiangtang Basin; Quse Formation; oil seepages; organic geochemical characteristics