

文章编号: 0253-2697(2017)01-0044-11 DOI:10.7623/syxb201701005

准噶尔盆地东部侏罗系烃源岩和天然气地球化学特征 及低熟气勘探前景

钱宇^{1,2} 王作栋¹ 张婷^{1,2} 妥进才¹ 王晓锋¹ 王志勇³ 徐永昌¹

(1. 甘肃省油气资源研究重点实验室 中国科学院油气资源研究重点实验室 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院 新疆哈密 839009)

摘要:对准噶尔盆地东部侏罗系烃源岩有机地球化学特征进行了研究,结果显示准噶尔盆地东部侏罗系烃源岩有机碳含量分布范围广泛,TOC为0.13%~81.06%,烃源岩评价为差—中等生油潜力,但生气潜力较大;镜质体反射率 R_o 分布和与热演化程度相关的生物标志化合物参数(OEP值、CPI值、甾烷和藿烷异构化参数、甲基菲指数等)表明大多数烃源岩处于未成熟—低成熟热演化阶段;有机质类型以III型为主,部分八道湾组和西山窑组烃源岩为II₂型。此外,对准噶尔盆地东部侏罗系天然气组分和碳同位素组成分析结果表明,侏罗系天然气以烃类气体为主,甲烷含量为65%~98%, C_1/C_{1-5} 为0.62~0.98,以湿气为主,碳同位素组成分布范围较广,其中甲烷同位素组成 $\delta^{13}C_1$ 值为-50.7‰~-28.2‰,乙烷 $\delta^{13}C_2$ 为-32.5‰~-23.7‰,丙烷 $\delta^{13}C_3$ 值为-30.6‰~-21.6‰,以煤型气为主,仅三台—北三台地区天然气显示为油型气-煤型气混合的特征。在对准噶尔盆地东部地区侏罗系煤系烃源岩和天然气样品分析的基础上,通过与吐哈盆地典型低熟气区烃源岩和天然气地球化学特征对比认为准噶尔盆地东部阜东和三台—北三台地区已形成一定规模的低熟气聚集,具有巨大的勘探潜力,是准噶尔盆地低熟气有望取得突破的重点地区。

关键词:准噶尔盆地东部地区;侏罗系;低熟气;煤型气;吐哈盆地

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

Geochemical characteristic of Jurassic source rocks and natural gas in the eastern Jungar Basin and exploration potential of low-mature gas

Qian Yu^{1,2} Wang Zuodong¹ Zhang Ting^{1,2} Tuo Jincan¹ Wang Xiaofeng¹ Wang Zhiyong³ Xu Yongchang¹

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province; Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tuha Oilfield Company, Xinjiang Hami 839009, China)

Abstract: Organic geochemical characteristics of Jurassic source rocks in the eastern Jungar Basin have been studied, showing that the Jurassic source rocks in the eastern Jungar Basin have a wide distribution of TOC ranging between 0.13% and 81.06% and was evaluated as having poor-moderate oil generation potential, but its gas generation potential is high. Distribution of vitrinite reflectance R_o and biomarker compound parameters associated with thermal evolution degree (OEP value, CPI value, sterane and hopane isomerization parameters, methylphenanthrene index, etc.) indicate that a majority of source rocks are situated in immature-low-mature stage of thermal evolution. Type-III organic matter is dominant in this area, though source rocks of Badaowan Formation and Xishanyao Formation partially have type II₂ organic matter. In addition, analysis of elemental composition and carbon isotopic composition of Jurassic natural gas in the eastern Jungar Basin demonstrate that the Jurassic natural gas is dominated by hydrocarbon gases, in which methane content is 65%–98%, C_1/C_{1-5} ratio is 0.62–0.98, and wet gas is predominant; carbon isotopic composition has a wide distribution, among which $\delta^{13}C_1$ values of methane range from -50.7‰ to -28.2‰, $\delta^{13}C_2$ values of ethane range from -32.5‰ to -23.7‰, and $\delta^{13}C_3$ values of propane between -30.6‰ and -21.6‰, suggesting the dominant coaliferous gas, except that natural gas of Santai-Beisantai area is characterized by petroliferous gas-coaliferous gas mixture. Based on analyses of Jurassic coal measure source rock and natural gas samples from the eastern Jungar Basin area, the study area was compared with typical low-mature gas zone of the Turpan-Hami Basin in terms of geochemical characteristics of source rock and natural gas, and it is be-

基金项目:中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-12)、国家自然科学基金项目(No. 41602151, No. 41672127)和甘肃省重点实验室专项(1309RTSA041)资助。

第一作者:钱宇,男,1988年5月生,2012年获成都理工大学学士学位,现为中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心博士研究生,主要从事油气地球化学和有机地球化学方面的研究。Email:qianyu1001@sina.com

通信作者:王作栋,男,1966年3月生,1986年获西北师范大学理学学士学位,2009年获中国科学院兰州地质研究所博士学位,现为中国科学院油气资源研究中心高级工程师、硕士生导师,主要从事油气地球化学方面的研究。Email:wangzuo_dong@163.com

lieved that a certain scale of low-mature gas accumulation has come into being in the eastern Jungar Basin, eastern Fukang sag and Santai-Beisantai area, which have huge exploration potential and thus are key areas of the Jungar Basin expected to make a breakthrough in low-mature gas exploration.

Key words: eastern Jungar Basin area; Jurassic; low-mature gas; coaliferous gas; Turpan-Hami Basin

引用:钱宇,王作栋,张婷,妥进才,王晓锋,王志勇,徐永昌.准噶尔盆地东部侏罗系烃源岩和天然气地球化学特征及低熟气勘探前景[J].石油学报,2017,38(1):44-54.

Cite: QIAN Yu, WANG Zuodong, ZHANG Ting, TUO Jincai, WANG Xiaofeng, WANG Zhiyong, XU Yongchang. Geochemical characteristic of Jurassic source rocks and natural gas in the eastern Jungar Basin and exploration potential of low-mature gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1): 44-54.

准噶尔盆地是中国陆相含油气盆地之一,位于中国西北部,是新疆三大沉积盆地之一。面积约为 $13.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,天然气资源丰富,探明天然气地质储量达 $1.091 \times 10^8 \text{ m}^3$,据国家部委新一轮油气资源量评价结果,准噶尔盆地气层气总资源量为 $2.0925 \times 10^{12} \text{ m}^3$,溶解气为 $5.256 \times 10^8 \text{ m}^3$,埋深小于 2000 m 的侏罗系煤层气资源量达 $(2.7 \sim 3.9) \times 10^{12} \text{ m}^3$ [1-4]。20 世纪 80 年代初,低熟气作为煤层气理念的延伸被提出并引起了较为广泛的关注,其气源岩有机质类型以腐植型干酪根为主(III 型),热演化程度介于生物成因气($R_o < 0.3\%$)和热催化气($R_o > 0.8\%$)之间,Galimov [5] 认为早期热成因天然气的气源岩 R_o 为 $0.4\% \sim 0.7\%$,徐永昌等 [6-8]、刘文汇等 [9] 将低熟气气源岩的成熟度标尺划定为 $0.4\% \sim 0.9\%$ 。目前,国内已在吐哈盆地和三塘湖盆地侏罗系勘探出工业气流的低熟气,而国外则有西西利亚乌连戈依超大煤系低熟气田。据徐永昌等 [7]、卢双舫等 [10-11] 估算吐哈盆地低熟气保守估计达到千亿立方米,而中国西北部地区侏罗系低熟气资源量高达 $(2.8 \sim 5.6) \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。前人对吐哈盆地低熟气做了大量工作并取得了丰富的成果和认识 [7, 10-16]。而与吐哈盆地相近,且具有相似构造发育的准噶尔盆地是否存在较大规模的低熟气聚集,引起了有关部门和学者的兴趣 [17-22]。准噶尔盆地侏罗系煤系地层与吐哈、三塘湖地区侏罗系具有相似的地质背景 [23-24],即烃源岩发育好、有机质丰度高、厚度大、热演化程度低 ($R_o < 0.8\%$) 等特征,具备生成低熟煤型气的地质基础。准噶尔盆地东部(简称准东)地区油气资源丰富,勘探程度很低,具有巨大的油气勘探潜力,被认为是准噶尔盆地下一步勘探的重要接替区 [25-26],部分学者对准东烃源岩和天然气进行较为精细的研究并取得了重要认识 [27-30],认为准东侏罗系烃源岩具有生成低熟气的物质基础和潜力 [31-32],是西北地区低熟气有望取得突破成果的探区。

笔者对采自准噶尔盆地东部地区(阜康凹陷、五彩湾凹陷、吉木萨尔凹陷、白家海凸起和北三台凸起)的烃源岩和天然气(陆东—五彩湾、阜东地区和三台—北

三台地区)进行了研究,分别从烃源岩和天然气两方面对准东地区低熟气的勘探前景进行了探讨,在已有资料基础上对准东地区低熟气的有利探区进行分析和预测。

1 地质背景

准东油气区带北临克拉克美丽山,南接博格达山,西伴中央坳陷一级构造单元;包括整个东部隆起和部分中央坳陷一级构造带,二级构造单元包括五彩湾凹陷、沙帐断褶带、石树沟凹陷、黄草湖凸起、石钱滩凹陷、黑山凸起、梧桐窝子凹陷、沙奇凸起、木垒凹陷、古东凸起、古城凹陷、古西凸起、吉木萨尔凹陷、北三台凸起、白家海凸起和阜康凹陷东斜坡。目前在石炭系、二叠系、三叠系和侏罗系等地层发现了油气聚集,以石炭系和侏罗系两套烃源岩为主。侏罗系自下而上为八道湾组(J_1b)、三工河组(J_1s)、西山窑组(J_2x)、头屯河组(J_2t)和齐古组(J_3q),埋藏深度自北向南有增加的趋势,是一套辫状河—三角洲—湖沼含煤沉积建造,沉积地层厚度在 $200 \sim 3800 \text{ m}$ 。中下侏罗统沉积,准噶尔盆地气候湿润,河流、沼泽和湖泊分布广泛,在八道湾组和西山窑组发育了较厚的煤系地层,而在两套煤系地层之间发生了大范围的湖侵,形成了一套以湖相为主的地层,发育有煤系泥岩、碳质泥岩和煤三类有机质丰度不同的烃源岩,为一套以灰绿色—灰黑色为主的碎屑岩沉积 [33-34]。

2 样品和实验分析

2.1 样品

本次研究共分析准噶尔盆地东部侏罗系样品 133 块,其中八道湾组 62 块、三工河组 40 块、西山窑组及其他层位 31 块。对部分烃源岩样品(包括五彩湾凹陷、白家海凸起、阜康凹陷、北三台凸起和吉木萨尔凹陷)进行了系统的地球化学分析,包括:岩石热解分析、元素分析、氯仿沥青“A”抽提、镜质体反射率的测定和干酪根镜检、饱和烃和芳烃 GC-MS 分析。天然气气体组分和烷烃气碳同位素组成分析实验在位于兰州的中国科学院油气资源研究重点实验室完成。

2.2 实验

2.2.1 岩石热解及 TOC 测定

岩石热解及 TOC 测定通过 Rock-Eval 6 型热解分析仪完成,获得的参数用于有机质类型和丰度的评价。

2.2.2 族组分分离

将块状样品用二氯甲烷清洗表层后研磨成大于 100 目粉末,样品用二氯甲烷索氏抽提样品 72 h,可溶有机质经正己烷沉淀沥青质后,经 Al_2O_3/SiO_2 柱色层分离为饱和烃、芳烃和非烃馏分。从族组成相对含量来看,非烃含量最高,饱和烃次之,芳烃最低(图 1)。

2.2.3 气相色谱-质谱分析(GC-MS)

气相色谱-质谱联用仪,美国安捷伦科技有限公司产 6890N-GC/5973N-MSD;色谱进样口温度为 280℃;载气为高纯氮,载气流量为 1.2 mL/min;美国 J&W.

HP-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm)弹性石英毛细管柱;程序升温:80℃起始以 4℃/min 升至 290℃,在 290℃恒温 30 min;质谱离子源为 EI 源,离子源温度为 230℃,四极杆温度为 150℃,离子源电离能为 70 eV;质谱与色谱接口温度为 280℃;谱库为美国 NIST02L。

2.2.4 天然气气体组分和碳同位素组成分析

天然气组分的碳同位素分析采用的是 Delta Plus XP 稳定同位素质谱计,碳同位素值为相对 PDB(碳同位素标准)的值,其标准偏差为 ±0.5‰,天然气气体组分使用 MAT-271 高分辨气体成分质谱测定。

3 结果与讨论

3.1 准东侏罗系烃源岩有机地球化学特征

3.1.1 烃源岩有机质丰度

烃源岩的有机质丰度及生烃潜力是衡量源岩优劣的直接标志,而烃源岩的有机质丰度与沉积环境、母源输入及生源构成密切相关。

准东地区侏罗系烃源岩中泥岩、碳质泥岩、煤的总有机碳含量(TOC)、生烃潜量($S_1 + S_2$)、氯仿沥青“A”含量及氢指数(HI)分布特征展示于表 1,其中对有机碳含量和生烃潜量进行了精细统计,烃源岩样品 TOC 以 0.6%~2.0%为主,占有样品的 40%[图 2(a)]。而生烃潜量小于 2 mg/g 的样品比重占了 57%,表明绝大多数样品具有较差的生油潜力[图 2(b)]。

(1) TOC 与氯仿沥青“A”的相关性

烃源岩有机碳与氯仿沥青“A”含量呈现正相关关系[图 3(a)],即随着有机碳含量的增加,氯仿沥青“A”有变大的趋势。按照陈建平等^[33]、王昌桂等^[35]提出的煤系地层烃源岩生烃评价标准,准东侏罗系泥岩主要为非一中的级别,为差一中的生油岩。同时注意到有机碳

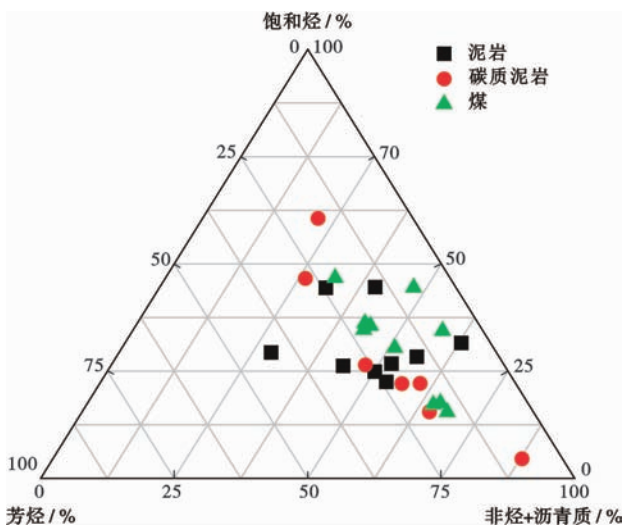


图 1 氯仿沥青“A”族组成

Fig. 1 Composition of bitumen of source rocks

表 1 准噶尔盆地东部地区侏罗系烃源岩有机质丰度统计

Table 1 Statistics of organic matter abundance of source rocks from Jurassic in the eastern Junggar Basin

层位	烃源岩类型	氯仿沥青“A”/%		TOC/%		$S_1 + S_2/(mg \cdot g^{-1})$		$HI/(mg \cdot g^{-1})$	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
西山窑组	泥岩	0.01~0.20	0.04(9)	0.36~2.31	1.09(12)	0.07~23.82	2.70(12)	14~149	72(12)
	碳质泥岩	0.05~6.60	1.79(4)	6.03~33.58	16.62(4)	43.75~135.88	74.71(3)	236~487	373(3)
	煤	0.66~2.72	1.56(4)	61.14~73.97	67.79(4)	38.60~190.7	124.06(4)	51~250	166(4)
三工河组	泥岩	0.01~1.30	0.16(18)	0.13~2.52	0.86(36)	0.08~11.07	1.70(22)	1~519	100(24)
	碳质泥岩								
	煤	3.53	3.53(1)	81.06	81.06(1)	282.50	282.5(1)	308	308(1)
八道湾组	泥岩	0.01~1.05	0.17(16)	0.26~5.40	1.93(30)	0.28~15.45	3.47(16)	6~519	131(19)
	碳质泥岩	0.11~0.70	0.30(3)	7.35~29.56	14.01(11)	0.48~79.50	26.12(10)	2~263	165(11)
	煤	0.70~4.12	1.82(6)	52.38~76.05	65.46(6)	134.40~233.10	191.37(5)	173~368	280(5)
准东中下侏罗统	泥岩	0.06~1.30	0.12(44)	0.13~5.40	1.30(79)	0.07~23.82	2.49(49)	1~519	101(54)
	碳质泥岩	0.05~6.60	1.33(7)	6.03~33.58	15.29(14)	0.48~135.88	39.06(13)	2~487	209(13)
	煤	0.66~4.12	1.85(11)	52.38~81.06	68.33(11)	38.60~282.50	170.20(10)	51~368	237(10)

注:()中表示样品数。

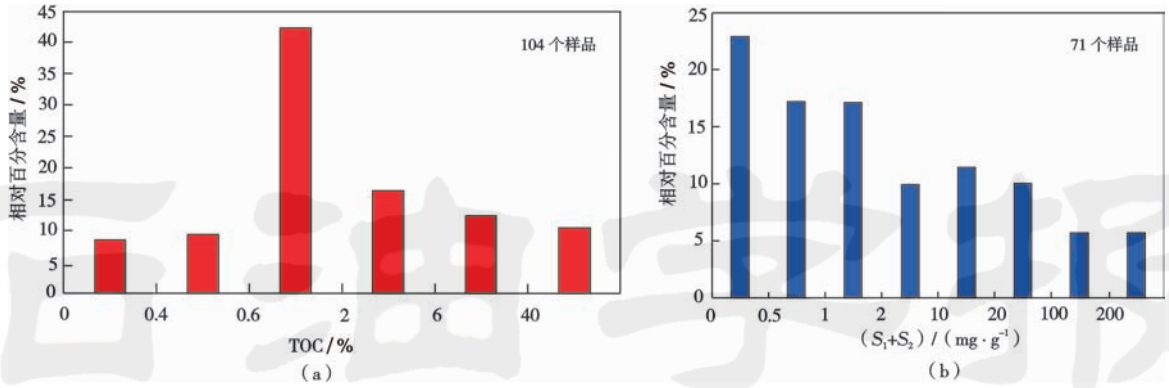


图 2 准噶尔盆地东部地区侏罗系烃源岩 TOC 和生烃潜量频数分布

Fig. 2 Frequency histogram of total organic carbon and potential of generating hydrocarbon of source rocks from Jurassic in the eastern Junggar Basin

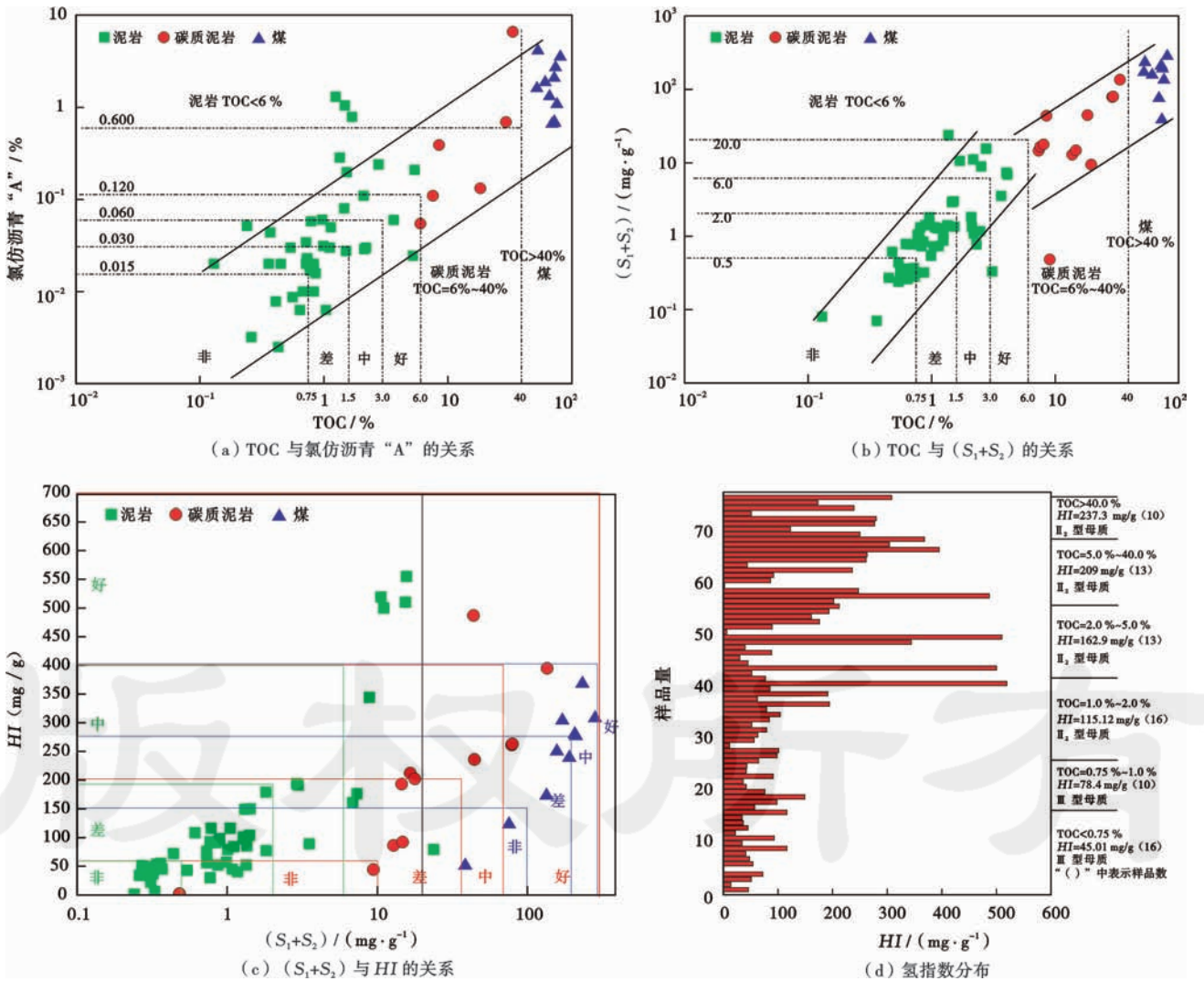


图 3 准噶尔盆地东部地区侏罗系烃源岩有机质丰度评价

Fig. 3 Evaluation of organic matter abundance of source rocks from Jurassic in the eastern Junggar Basin

的增幅明显高于可溶有机质(氯仿沥青“A”),出现这种变化趋势的原因可能与有机质来源以陆源高等植物为主、类脂含量较低有关,也与有机质演化程度较低有关^[35]。

(2) TOC 与生烃潜力的相关性

生烃潜力是衡量烃源岩生烃能力的直接标志,其与母质类型和性质密切相关。在陈建平等^[33]提出的煤系烃源岩评价标准中将生烃潜力的下限定为 0.5 mg/g,与之对应的 TOC 为 0.75%。图 3(b)显示生烃潜力与有机碳呈很好的正相关关系,按评价标准划分^[33,35],侏罗系泥岩以差一中等生油岩为主,整体来看,研究区样品生油潜力较差,但具有较大的生气潜力,可作为良好的气源岩。

(3) 生烃潜力与氢指数相关性

从生烃潜力和氢指数的关系[图 3(c)]可以看出,准噶尔盆地东部侏罗系煤系泥岩以非一差生油岩为主,部分为中一好生油岩(图中绿色部分),碳质泥岩以差烃源岩为主(图中红色部分),煤样参照王昌桂等^[35]的生烃评价标准划分主要为差一中等生油岩(图中蓝色部分)。

(4) 下侏罗统烃源岩氢指数分布规律

氢指数的大小与烃源岩有机质中类脂组分含量

呈正相关关系,因此该参数能指示母源及判识母源的好坏。对准东地区烃源岩氢指数按不同的有机碳含量范围进行分类[图 3(d)],参照 Tissot 等^[36]和程克明等^[37]对烃源岩干酪根有机质类型的划分标准,准噶尔盆地东部地区烃源岩以 II₂-III 型为主,含有较高的富氢组分,这为天然气的形成提供了重要的物质基础。

3.1.2 烃源岩有机质类型

准东侏罗系沉积环境存在较大差异,导致烃源岩有机质来源较为复杂,下侏罗统八道湾组主要是以高等植物来源为主;三工河组沉积于湖进期,水生藻类等较为发育,有机质以陆源植物与水生生物的混合为主,而中侏罗统西山窑组处于湖退初期,大量水生藻类被埋藏的同时微生物也非常发育,导致烃源岩出现明显的微生物降解特征,从而也出现有机质混源的特征。

本文通过元素组成为主的 H/C-O/C 原子法、岩石热解法并结合烃源岩抽提物有机地球化学特征[主要为 HI-OI 法、HI-T_{max} 法、HI-(S₁+S₂)法]、生物标志化合物来对有机质类型进行划分,结果展示于图 4 和图 5。无论从烃源岩热解参数、H/C 与 O/C 相关性还是

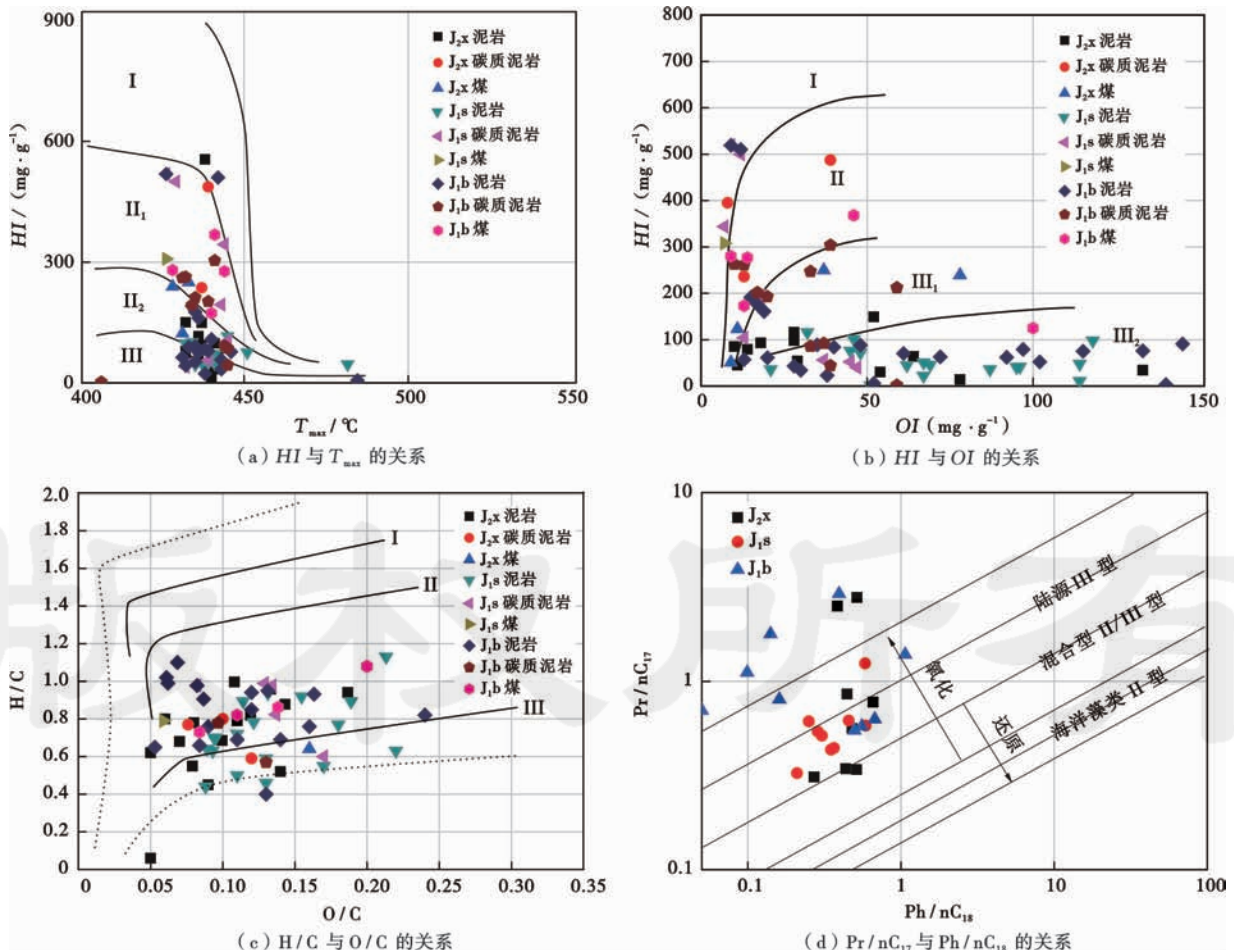


图 4 准噶尔盆地东部地区侏罗系有机质类型划分

Fig. 4 Organic type of source rock from Jurassic in the eastern Junggar Basin

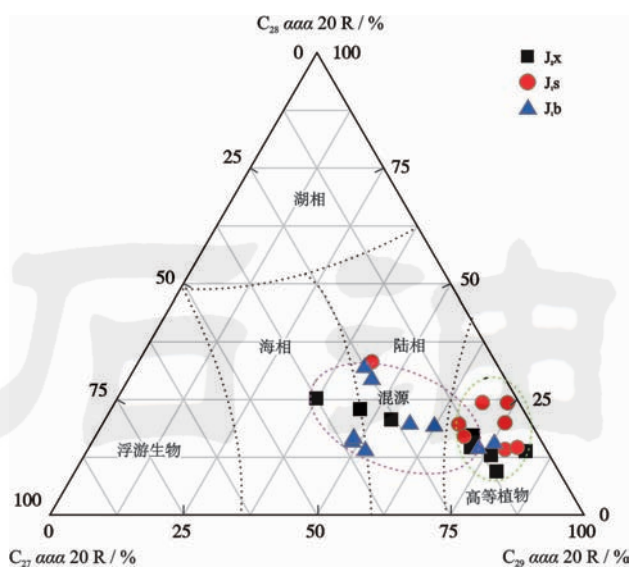
图 5 $C_{27} \alpha\alpha\alpha 20R$, $C_{28} \alpha\alpha\alpha 20R$, $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20R$ 三角图

Fig. 5 Distribution for regular steranes of source rocks

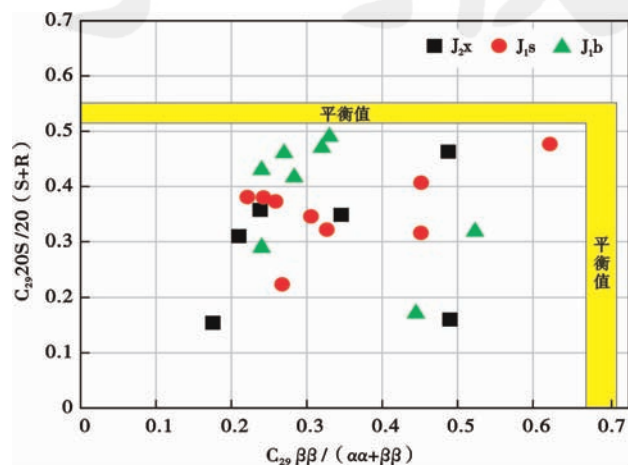
从生物标志化合物参数 (Pr/nC_{17} - Ph/nC_{18} 相关性和 C_{27} - $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20R$ 规则甾烷) 来看, 本文研究的烃源岩样品有机质类型均显示为 III 型, 仅部分烃源岩有机质类型为 II₂ 型。

3.1.3 有机质成熟度

用于表征烃源岩有机质成熟度的最佳参数是镜质体反射率 (R_o), 研究区样品 R_o 为 0.16%~0.94%, 主体位于 0.41%~0.80%, 占有所有样品的 88%, 均值为 0.61%, 其中八道湾组烃源岩 R_o 均值为 0.58% (46 块样品), 三工河组烃源岩 R_o 均值为 0.64% (32 块样品), 西山窑组烃源岩 R_o 均值 0.62% (23 块样品), 据此认为, 准东侏罗系烃源岩主要处于未成熟—低成熟热演化阶段。

同时, 生物标志化合物参数也指示准东侏罗系样品处于未成熟—低成熟的热演化阶段。包括: ① OEP 值 (奇碳优势指数), 有时也用 CPI 值 (碳优势指数)。研究样品 OEP₁₅₋₁₉ 值为 0.78~1.16, 均值为 1.0; OEP₂₅₋₂₉ 值为 1.03~2.50, 均值为 1.43; CPI₂₁₋₃₂ 值为 1.01~2.29, 均值为 1.49, 表明样品处于未成熟—低成熟阶段。② 藿烷参数。大多数样品检出 $17\beta(H)$ - C_{27} 三降藿烷, $17\beta(H)$ - C_{27} 三降藿烷为生物构型, 随着热演化程度的增加, $17\beta(H)$ - C_{27} 三降藿烷会向 $17\alpha(H)$ - C_{27} 三降藿烷 (过渡构型 Tm) 转变, 最终向地质构型 $18\alpha(H)$ - C_{27} 三降藿烷 (Ts) 转变^[38], 研究样品 $17\beta(H)/Tm$ 值在 0.04~1.47, 均值 0.29, 表明样品处于低演化阶段。③ MPI₁ 指数和计算 R_o 值。甲基菲指数能很好地反映研究样品的成熟度, 研究样品 MPI₁ 值为 0.23~0.92, 均值为 0.49, 通过 MPI₁ 值计算所

得的 R_o 值为 0.54%~0.95%, 均值为 0.69%, 表明样品主要处于未成熟—低成熟阶段。④ C_{31} 藿烷和 C_{29} 甾烷异构化参数。研究样品 $C_{31} 22S/22(S+R)$ 为 0.32~0.64, 均值为 0.55; $C_{29} 20S/20(S+R)$ 甾烷为 0.15~0.53, 均值为 0.34; $C_{29} \beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 值为 0.18~0.62, 均值为 0.33 (图 6), 表明研究样品处于未成熟—成熟范畴, 同时注意到 C_{29} 甾烷异构化参数远小于 C_{31} 藿烷, 表明样品遭受过一定程度的微生物降解作用, 因藿烷比甾烷更易遭受微生物降解, 该特征可作为该地区微生物降解的标志之一^[39]。

图 6 C_{29} 甾烷异构化参数分布Fig. 6 Isomerization parameters of C_{29} regular steranes

3.1.4 生物标志化合物特征

研究区样品饱和烃以正构烷烃和类异戊二烯烷烃为主, 但不同区块的正构烷烃分布差异较大, 整体表现为五彩湾、白家海地区烃源岩在 nC_{13} — nC_{35} , 单峰型分布, 主峰以 nC_{23} 和 nC_{25} 为主, 表现出高碳数正构烷烃占绝对优势; 阜康凹陷、北三台、吉木萨尔地区的烃源岩以低碳数正构烷烃为主, 多数为轻微双峰分布, 前峰丰度远大于后峰, 碳数分布为 nC_{13} — nC_{31+} , 以 nC_{17} 、 nC_{19} 、 nC_{21} 为主峰。从样品气相色谱 (图 7) 来看, 五彩湾凹陷、白家海凸起、阜康凹陷等区域部分样品遭受到微生物的改造, 但改造程度较轻, 而在北三台和吉木萨尔地区, 多数样品均呈现较高的“UCM”鼓包, 表现出遭受较强微生物改造的特征。Pr/Ph 值为 0.58~11.23, 均值为 2.66; 伽马蜡烷指数 ($G/C_{30}H$) 为 0~0.20 (除台 13 井伽马蜡烷值为 0.44), 均值为 0.06; 芳烃三芬 (OF、F 和 SF) 中 OF 相对含量为 55.6%~94.6%, 表明研究样品成烃古环境以氧化—亚氧化环境, 沉积水体较浅。三环萜烷和四环萜烷整体偏低, m/z191 图中以五环萜烷为主, C_{29} 藿烷相对丰度普遍偏高, 部分样品中 C_{29} 藿烷高于 C_{30} 藿烷, 这可能是煤系地层的特点之一, 吐哈盆地侏罗系烃源岩也显示出相似的五

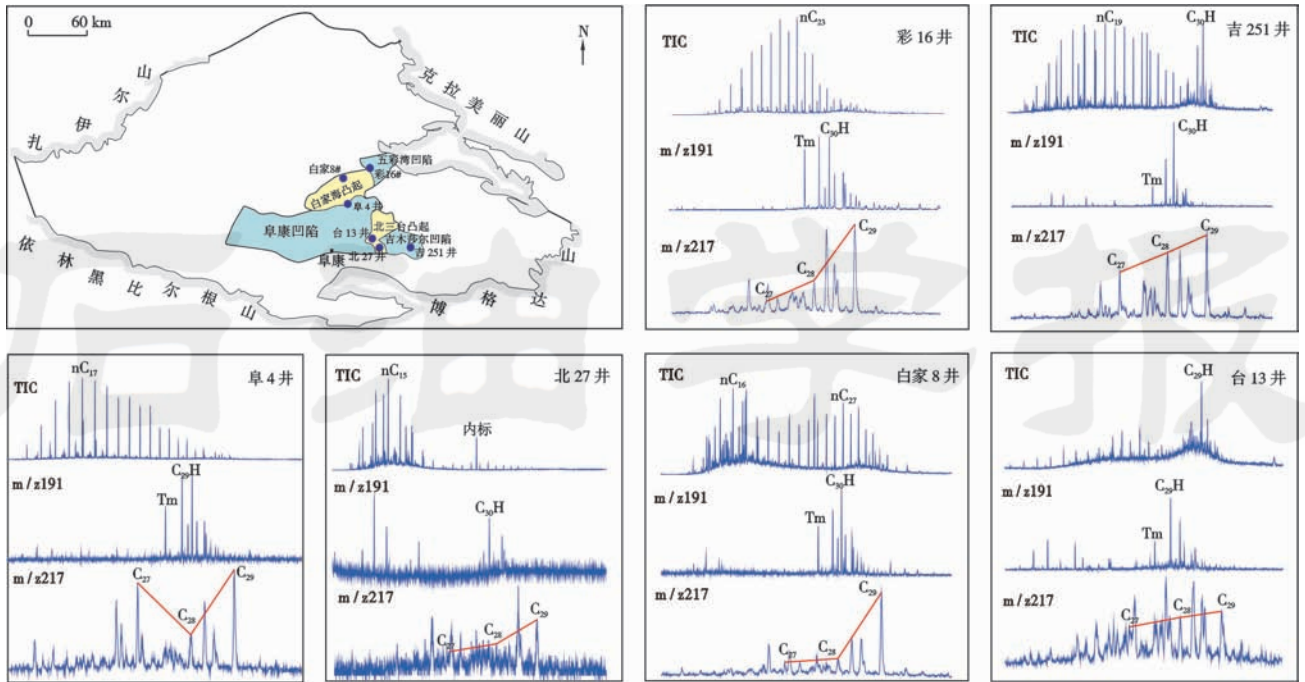


图7 准噶尔盆地东部地区侏罗系典型烃源岩气相色谱和质量色谱

Fig. 7 Gas chromatogram and mass chromatogram of typical source rocks from Jurassic in the eastern Junggar Basin

环萜烷分布特征^[40-42]。m/z217 质量色谱图中除检出规则甾烷外,还检出丰富的 C₂₉ 重排甾烷和一定丰度的 C₂₇、C₂₈ 重排甾烷,该特征表明研究区存在广泛的黏土催化作用^[43]。

3.2 准东地区天然气地球化学特征

准东地区天然气主要分布在陆东—五彩湾、三台—北三台及阜康凹陷等构造带,产气层主要为侏罗系,天然气地球化学特征研究表明,准东侏罗系天然气以烃类气体为主,烷烃气(C₁~C₅)含量为77%~99%,平均含量为95%。其中甲烷含量为65%~98%,平均含量为88.57%,C₂以上烃类气平均含量为6.37%。非烃气体以氮气和二氧化碳为主,平均含量分别为4.18%和0.35%^[44]。天然气干燥系数分布较广,为0.62~0.98,以湿气为主,而三台—北三台地区则以干气为主,含少量湿气(图8)。不同区域天然气碳同位素组成变化范围较大,甲烷碳同位素组成 $\delta^{13}C_1$ 为 -50.7‰~-28.2‰, $\delta^{13}C_2$ 为 -32.5‰~-23.7‰, $\delta^{13}C_3$ 值为 -30.6‰~-21.6‰,呈现正碳序列的分布特征,即 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$ 。其中陆东—五彩湾地区(滴西、三个泉、五彩湾)天然气碳同位素整体偏重,甲烷碳同位素组成 $\delta^{13}C_1$ 为 -39.0‰~-28.2‰,乙烷碳同位素组成 $\delta^{13}C_2$ 为 -27.7‰~-23.7‰,丙烷碳同位素组成 $\delta^{13}C_3$ 为 -26.9‰~-21.6‰,以煤型气为主,含部分混合气;三台—北三台及火烧山地区天然气甲烷碳同位素组成均非常轻, $\delta^{13}C_1$ 值为 -50.7‰~-42.9‰, $\delta^{13}C_2$

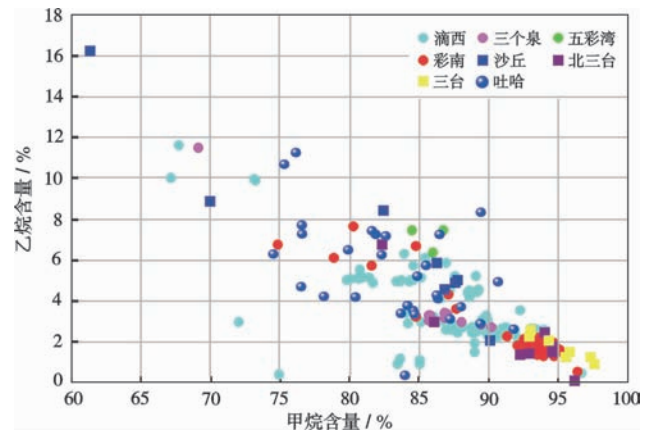


图8 准噶尔盆地东部地区侏罗系天然气甲烷与乙烷含量(部分数据引自文献[44])

Fig. 8 Gas content of methane and ethane from Jurassic in the eastern Junggar Basin

值为 -32.5‰~-24.9‰, $\delta^{13}C_3$ 值为 -30.7‰~-22.0‰,以混合型天然气为主;阜东地区甲烷碳同位素组成分布为 -43.8‰~-33.7‰,乙烷碳同位素组成分布为 -28.8‰~-26.8‰,丙烷碳同位素组成分布为 -27.9‰~-21.6‰,以煤型气为主。徐永昌等^[7]、袁明生等^[45]将低演化阶段煤系有机质形成的天然气乙烷碳同位素组成上限定为 -29‰,据此,本次研究的天然气整体以煤型气为主,部分三台—北三台地区样品显示为油型气特征(图9)。

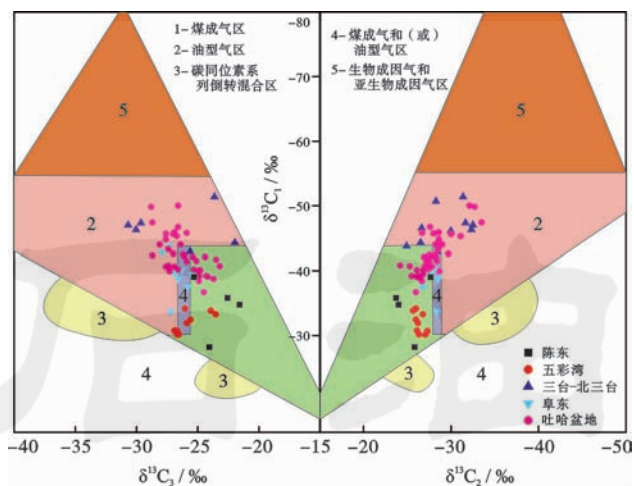


图 9 $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_2$ - $\delta^{13}\text{C}_3$ 有机成因烷烃气鉴别(图版引自文献[46])

Fig. 9 Natural gas genesis identification through relationship of $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_2$ - $\delta^{13}\text{C}_3$

3.3 准东地区低熟气勘探前景预测

准噶尔盆地油气资源丰富,但石油探明程度仅为 26.26%,天然气探明程度仅为 8.51%,第三次资源评价认为,准噶尔盆地天然气资源量侏罗系仅次于二叠系,就目前已探明的天然气储量来看,来自于侏罗系煤系地层的天然气探明储量最多,但其探明率也仅有 7%,预示着准噶尔盆地具有巨大的天然气勘探开发潜力^[1,2]。准噶尔盆地东部五彩湾凹陷、白家海凸起和阜康断裂带天然气地质储量占总储量的约 11%,约为 $2300 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1],其中侏罗系煤系烃源岩作为气源岩生成的天然气占总资源量约 37%^[2],据此计算,准东地区煤系烃源岩可生成的天然气地质储量约为 $851 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前,准东地区是盆地中发现天然气储量最多的地区,其中位于陆东一五彩湾地区的克拉美丽气田是盆地最主要的气田之一,并且在白家海凸起气南地区,阜康凹陷东部及三台一北三台地区均发现一定规模的天然气藏^[44,47]。但由于准东地区天然气藏成藏复杂,地质条件认识程度较低等原因,导致该区域天然气勘探程度还很低。

根据郑金海等^[48]及本文对侏罗系烃源岩的研究表明,陆东一五彩湾、白家海西北部、阜东地区和三台一北三台地区烃源岩热演化程度普遍较低, R_o 均值为 0.61%,未达干酪根生烃高峰阶段。王铁冠等^[49]指出有机质在生油门限以前(R_o 为 0.3%~0.8%),可以经过不同的生物化学反应或低温化学反应生成低熟油气,并总结了低熟油气的生烃机理。徐永昌等^[7]在对吐哈盆地烃源岩和天然气的研究基础上认为吐哈盆地天然气为低熟气。本研究中,准东侏罗系烃源岩

TOC、岩石热解、氯仿沥青“*A*”、元素分析、生物标志化合物等信息表明侏罗系烃源岩处于未成熟—低成熟阶段,部分达到成熟阶段;有机质类型为 III 型,富氢程度较高,具有较差的生油潜力但生气潜力巨大;三台一北三台、阜康凹陷东斜坡和吉木萨尔地区普遍存在微生物作用,并且广泛存在黏土矿物的催化作用,能降低有机质的生烃活化能^[43];部分学者^[32]也在准东侏罗系烃源岩中检出了大量树脂类化合物,该类化合物被证实具有较低的生烃潜力,可以在低演化阶段生烃^[50]。通过对比准东地区侏罗系烃源岩和吐哈盆地典型低熟气区气源岩的地球化学特征^[35,51-54],笔者认为准东侏罗系烃源岩具备生成低熟气的物质基础^[31-32]和地质基础^[46]。

从天然气地球化学性质来看,利用刘文汇和徐永昌等^[55]提出的腐植型有机质 R_o - $\delta^{13}\text{C}_1$ 的二阶模式计算陆东一五彩湾地区天然气处于镜质组反射率 0.65%~1.97%之间,三台一北三台地区天然气处于镜质组反射率为 0.47%~0.66%,阜东地区则为 0.62%~0.91%。由 $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_2$ - $\delta^{13}\text{C}_3$ 关系图(图 9)可以看出,陆东一五彩湾和阜东地区天然气以煤型气为主,但陆东一五彩湾地区天然气甲烷碳同位素组成明显较阜东地区天然气重,三台一北三台地区则主要以混合型为主。此外,由图 9 可见,吐哈盆地侏罗系天然气甲烷同位素组成主峰群为 $-44\text{‰} \sim -39\text{‰}$ (R_o 为 0.6%~0.8%),乙烷 $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 $-29\text{‰} \sim -26\text{‰}$ ^[6,7,12],徐永昌等^[7]结合吐哈盆地地质实际认为吐哈盆地探明的千亿立方米天然气气藏为煤型低熟气。对比吐哈盆地和准东地区天然气碳同位素组成特征发现,三台一北三台及阜东地区甲烷和乙烷同位素组成与吐哈盆地天然气样品具有很好的相似性,并与陆东一五彩湾地区天然气存在明显的差异。除此之外,准东地区早侏罗世,沿阜康凹陷—白家海凸起东北部低位体系域三角洲前缘水下分流河道砂岩储层发育,在中一晚侏罗世,阜康凹陷东部和五彩湾凹陷主要发育辫状河三角洲沉积,这为天然气的运聚成藏提供了很好储集空间,同时湖侵时期发育的滨浅湖泥岩为天然气藏提供了良好的保存条件^[34,44,56]。结合吐哈盆地和准噶尔盆地相似的构造背景及埋藏史,笔者认为准东三台一北三台及阜东地区天然气应该属于低熟气范畴,表明该地区已形成了一定规模的低熟气聚集,具备生成低熟气潜力,是准东地区低熟气有望取得突破的重点地区。

4 结 论

(1) 准东侏罗系烃源岩有机质类型以 III 型为主,含有少量的 II₂ 型,属于较差生油岩,但富氢组分丰

富,具有巨大的生气潜力;处于未成熟—低成熟热演化阶段,部分达到成熟阶段;从烃源岩气相色谱分布来看,阜东地区、三台—北三台地区、吉木萨尔地区存在一定程度的微生物降解作用,此外烃源岩样品中普遍存在因黏土矿物催化作用形成的高丰度重排甾烷,根据前人研究成果,微生物作用和黏土矿物的催化作用均能降低有机质的生烃活化能,能促使其在低演化阶段生烃。

(2) 准东侏罗系天然气以烃类气体为主,平均含量高达95%,其中甲烷的含量为65%~98%,干燥系数为0.62~0.98,以湿气为主,甲烷和乙烷碳同位素组成表明研究样品以煤型气为主,但三台—北三台地区部分显示为油型气-煤型气混合的特征。

(3) 准东侏罗系烃源岩有机地球化学特征与前人研究的吐哈盆地侏罗系低熟气区气源岩相似,同时两个盆地具有相似的构造背景和埋藏史,表明准东侏罗系已具备生成低熟气的物质基础和地质基础。此外,准东地区和吐哈盆地天然气碳同位素组成对比暗示了准东侏罗系天然气中已形成一定地质储量的低熟气聚集。综上分析,笔者认为准东地区具备生成低熟气的潜力,且资源潜力巨大,其中三台—北三台及阜东地区是准噶尔盆地低熟气有望取得突破的重点地区。

符号注释:HI—氢指数,mg/g;OI—氧指数,mg/g; R_c —计算热成熟度值,%。

参 考 文 献

- [1] 吴晓智,刘得光,阿不力米提,等. 准噶尔盆地天然气勘探潜力与勘探领域[J]. 中国石油勘探,2007,12(2):1-6.
WU Xiaozhi, LIU Deguang, ABULIMITI, et al. Potential and field of exploration for natural gas in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2007, 12(2): 1-6.
- [2] 蔚远江,张义杰,董大忠,等. 准噶尔盆地天然气勘探现状及勘探对策[J]. 石油勘探与开发,2006,33(3):267-273.
YU Yuanjiang, ZHANG Yijie, DONG Dazhong, et al. Current situation of natural gas exploration and its counter measures in Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 267-273.
- [3] 董大忠,蔚远江,张义杰,等. 准噶尔盆地加快天然气勘探有利条件及预探领域分析[J]. 中国石油勘探,2006,11(3):6-12.
DONG Dazhong, YU Yuanjiang, ZHANG Yijie, et al. Favorable conditions of expediting gas exploration and pre-prospecting targets analysis in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(3): 6-12.
- [4] 王屿涛,祝军,丁安娜. 准噶尔盆地天然气分布规律及勘探方向[J]. 天然气地球科学,1996,7(1):1-8.
WANG Yutao, ZHU Jun, Ding Anna. Distribution regularity and exploration direction of natural gas in Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 1996, 7(1): 1-8.
- [5] GALIMOV E M. Sources and mechanisms of formation of gaseous hydrocarbons in sedimentary rocks[J]. Chemical Geology, 1988, 71(1/3): 77-95.
- [6] 徐永昌,王晓锋,史宝光. 低熟气-煤成气理念的延伸[J]. 石油勘探与开发,2009,36(3):408-412.
XU Yongchang, WANG Xiaofeng, SHI Baoguang. Low-mature gas: an extension of the concept of coal-formed gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 408-412.
- [7] 徐永昌,王志勇,王晓锋,等. 低熟气及我国典型低熟气田[J]. 中国科学 D辑:地球科学,2008,38(1):87-93.
XU Yongchang, WANG Zhiyong, WANG Xiaofeng, et al. Low-mature gases and typical low-mature gas fields in China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(2): 312-320.
- [8] 徐永昌,沈平,刘文汇,等. 一种新的天然气成因类型——生物-热催化过渡带气[J]. 中国科学 B辑,1990,20(9):975-980.
XU Yongchang, SHEN Ping, LIU Wenhui, et al. Natural gas of new genetic type——bio-, thermo-catalytic transitional zone gas [J]. Science in China: Series B, 1991, 34(9): 1113-1119.
- [9] 刘文汇,徐永昌. 生物—热催化过渡带油气关系[J]. 沉积学报,1995,13(2):4-13.
LIU Wenhui, XU Yongchang. Relationship between oil and gas of bio-, thermo-catalytic transitional zone[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(2): 4-13.
- [10] 卢双舫,李占东,李吉君,等. 吐哈盆地低熟气评价的化学动力学方法及其在应用[J]. 地球化学,2009,38(1):68-74.
LU Shuangfang, LI Zhandong, LI Jijun, et al. Chemical kinetic method of evaluating low-mature gas and its application in Tuha Basin[J]. Geochimica, 2009, 38(1): 68-74.
- [11] 卢双舫,黄振凯,刘绍军,等. 吐哈盆地生物气—低熟气评价的元素平衡法及其在应用[J]. 沉积学报,2008,26(6):1063-1070.
LU Shuangfang, HUANG Zhenkai, LIU Shaojun, et al. Element balance method and application of appraising biogenic gas-low maturity gas in Tuha Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(6): 1063-1070.
- [12] 王晓锋,徐永昌,沈平,等. 低熟气地球化学特征与判别指标[J]. 天然气地球科学,2010,21(1):1-6.
WANG Xiaofeng, XU Yongchang, SHEN Ping, et al. Geochemical characteristics and identification indexes of low-mature gases [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(1): 1-6.
- [13] 张长春,陶伟,张馨,等. 吐哈盆地丘东次凹低熟气的生成与动力学研究[J]. 沉积学报,2008,26(5):857-863.
ZHANG Changchun, TAO Wei, ZHANG Xin, et al. Low mature gas generation and kinetics in Qiudong depression, Turpan-Hami Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 857-863.
- [14] 王作栋,孟祥祥,房嫒,等. 低演化烃源岩有机质微生物降解的指标组合特征[J]. 沉积学报,2010,28(6):1244-1249.
WANG Zuodong, MENG Qianxiang, FANG Xuan, et al. The combination characteristics of the biomarkers of microbial degradation of organic matter in low-evolution source-rock [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1244-1249.
- [15] 王志勇,孟祥祥,王作栋,等. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系煤系源岩地球化学分类及意义[J]. 沉积学报,2010,28(6):1238-1243.
WANG Zhiyong, MENG Qianxiang, WANG Zuodong, et al. Geochemical classification and significance of jurassic coal-bearing source rocks in Taibei depression, Turpan-Hami Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1238-1243.
- [16] 沈平,王晓锋,王志勇,等. 吐哈盆地天然气轻烃地球化学特征与

- 低熟气判识[J]. 科学通报, 2010, 55(23): 2307-2311.
- SHEN Ping, WANG Xiaofeng, WANG Zhiyong, et al. Geochemical characteristics of light hydrocarbons in natural gases from the Turpan-Hami Basin and identification of low-mature gas[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(29): 3323-3328.
- [17] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地南缘油气生成与分布规律——典型油藏油源解剖与原油分布规律[J]. 石油学报, 2016, 37(4): 415-429.
- CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Investigation of typical reservoirs and occurrence regularity of crude oils in the southern margin of Junggar Basin, Northwestern China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(4): 415-429.
- [18] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地南缘油气生成与分布规律——典型类型原油油源对比[J]. 石油学报, 2016, 37(2): 160-171.
- CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Oil-source correlation of typical crude oils in the southern margin, Junggar Basin, Northwestern China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(2): 160-171.
- [19] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地南缘油气生成与分布规律——烃源岩地球化学特征与生烃史[J]. 石油学报, 2015, 36(7): 767-780.
- CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Geochemical features of source rocks in the southern margin, Junggar Basin, Northwestern China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 767-780.
- [20] 宋明水, 赵乐强, 官亚军, 等. 准噶尔盆地西北缘超剥带圈闭含油性量化评价[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 64-72.
- SONG Mingshui, ZHAO Leqiang, GONG Yajun, et al. Quantitative assessment on trap oil-bearing property in ultra-denudation zones at the northwestern margin of Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 64-72.
- [21] 郭沫贞, 寿建峰, 徐洋, 等. 准噶尔盆地中拐-西北缘地区二叠系沸石胶结物分布与控制因素[J]. 石油学报, 2016, 37(6): 695-705.
- GUO Mozhen, SHOU Jiangfeng, XU Yang, et al. Distribution and controlling factors of Permian zeolite cements in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6): 695-705.
- [22] 陈轩, 杨振峰, 王振奇, 等. 大型斜坡区冲积-河流体系沉积特征与岩性油气藏形成条件——以准噶尔盆地春光区块沙湾组为例[J]. 石油学报, 2016, 37(9): 1090-1101.
- CHEN Xuan, YANG Zhenfeng, WANG Zhenqi, et al. Sedimentary characteristics of alluvial-fluvial systems and forming conditions of lithologic reservoirs in the large slope area: a case study of Neogene Shawan Formation in Chunguang block, Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9): 1090-1101.
- [23] 薛良清, 李文厚, 宋立珩. 西北地区侏罗纪原始沉积区恢复[J]. 沉积学报, 2000, 18(4): 539-543.
- XUE Liangqing, LI Wenhou, SONG Liheng. Reconstruction of original sedimentary province of the Jurassic in the northwestern China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 539-543.
- [24] 陈建平, 赵文智, 秦勇, 等. 中国西北地区侏罗纪煤系油气形成(之一)[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(3): 1-5.
- CHEN Jianping, ZHAO Wenzhi, QIN Yong, et al. Petroleum formation in Jurassic coal-bearing basins, Northwest China (Part 1) [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(3): 1-5.
- [25] 陈建平, 梁狄刚, 王绪龙, 等. 彩南油田多源混合原油的油源(一)——烃源岩基本地球化学特征与生物标志物特征[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 20-24.
- CHEN Jianping, LIANG Digang, WANG Xulong, et al. Oil-source identification for the mixed oils derived from multiple source rocks in the Cainan Oilfield, Junggar Basin, Northwest China. Part I: fundamental geochemical features of source rocks [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(4): 20-24.
- [26] 黄林军, 潘建国, 魏东涛, 等. 准东地区油气成藏条件及聚集规律[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(9): 42-48.
- HUANG Linjun, PAN Jianguo, WEI Dongtao, et al. Reservoir-forming condition and accumulation rules of the east Junggar area [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(9): 42-48.
- [27] 赵应成, 谭开俊, 王鹏, 等. 准东地区石炭系烃源岩特征及分布规律[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(5): 753-759.
- ZHAO Yingcheng, TAN Kaijun, WANG Peng, et al. Geochemical characteristics of carboniferous source rocks and distribution in the eastern part of Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(5): 753-759.
- [28] 贺凯, 庞瑶, 何治亮, 等. 准东地区石炭系烃源岩评价及重要意义[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(6): 41-45.
- HE Kai, PANG Yao, HE Zhiliang, et al. The evaluation and significance of the carboniferous source rocks in the East Junggar area [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2010, 32(6): 41-45.
- [29] 张义杰, 向书政. 准噶尔盆地含油气系统特点与油气成藏组合模式[J]. 中国石油勘探, 2002, 7(4): 25-35.
- ZHANG Yijie, XIANG Shuzheng. Characteristics of petroleum system and pattern of oil and gas formation reservoir assemblage in Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2002, 7(4): 25-35.
- [30] 薛新克, 李新兵, 王俊槐. 准噶尔盆地东部油气成藏模式及勘探目标[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(6): 462-464.
- XUE Xinke, LI Xinbing, WANG Junhuai. Reservoir formation mode and exploration target in the eastern Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(6): 462-464.
- [31] 张明峰, 熊德明, 吴陈君, 等. 准噶尔盆地东部地区侏罗系烃源岩及其低熟气形成条件[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 261-267.
- ZHANG Mingfeng, XIONG Deming, WU Chenjun, et al. Source rock condition and the formation of Jurassic low-maturity gases in the eastern Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 261-267.
- [32] 钱宇, 王作栋, 雷艳, 等. 准东中下侏罗统煤地球化学特征与低熟气形成[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(6): 1137-1146.
- QIAN Yu, WANG Zuodong, LEI Yan, et al. Geochemical characteristics of the coal from lower-middle Jurassic in eastern Junggar Basin and generation of low-maturity gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(6): 1137-1146.
- [33] 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.
- [34] 鲍志东, 刘凌, 张冬玲, 等. 准噶尔盆地侏罗系沉积体系纲要[J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 194-202.
- BAO Zhidong, LIU Ling, ZHANG Dongling, et al. Depositional system frameworks of the Jurassic in Junggar Basin [J]. Acta

- Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 194-202.
- [35] 王昌桂, 程克明, 徐永昌, 等. 吐哈盆地侏罗系煤成烃地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
WANG Changgui, CHEN Keming, XU Yongchang, et al. Geochemistry of coal-generated hydrocarbons in Jurassic system, Turpan-Hami Basin[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [36] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1984.
- [37] 程克明. 生油岩的定量评价[M]//石油勘探开发科学研究院地质研究所. 中国陆相油气生成. 北京: 石油工业出版社, 1982.
CHENG Keming. Quantitative evaluation of source rocks[M]//Continental Oil Generation in China. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982.
- [38] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide; volume 2, biomarkers and isotopes in Petroleum Systems and Earth History[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [39] WENGER L M, ISAKSEN G H. Control of hydrocarbon seepage intensity on level of biodegradation in sea bottom sediments[J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(12): 1277-1292.
- [40] 陈建平, 黄第藩, 李晋超, 等. 吐哈盆地侏罗纪煤系油气主力源岩探讨[J]. 地质学报, 1999, 73(2): 140-152.
CHEN Jianping, HUANG Difan, LI Jinchao, et al. Main source rocks of petroleum from Jurassic coal-bearing strata in the Turpan-Hami basin, northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(2): 140-152.
- [41] CHEN Jianping, LIANG Digang, WANG Xulong, et al. Mixed oils derived from multiple source rocks in the Cainan oilfield, Junggar Basin, Northwest China. Part I: genetic potential of source rocks, features of biomarkers and oil sources of typical crude oils[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(7): 889-909.
- [42] 王志勇, 卫延召, 赵长毅. 三塘湖盆地低熟油的发现及其地球化学特征[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 598-604.
WANG Zhiyong, WEI Yanzhao, ZHAO Changyi. The immature oils in Santanghu Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 598-604.
- [43] RUBINSTEIN I, SIESKIND O, ALBRECHT P. Rearranged steranes in a shale: occurrence and simulated formation[J]. Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 1, 1975(19): 1833-1836.
- [44] 王绪龙, 支东明, 王屿涛, 等. 准噶尔盆地地源岩与油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 1-565.
WANG Xulong, ZHI Dongming, WANG Yutao, et al. Source rocks and oil-gas geochemistry in Junggar Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013: 1-565.
- [45] 袁明生, 梁世君, 徐永昌. 低熟气及我国的低熟气区: 吐哈油气区[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 96-118.
YUAN Mingsheng, LIANG Shijun, XU Yongchang, et al. Low-mature gases and typical low-mature gas fields in China-Turpan-Ham Basin[M]. Beijing: Science Press, 2011: 96-118.
- [46] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 3(2): 1-40.
DAI Jinxing. Carbon and hydrocarbon isotope characteristics of natural gas and identification of various genetic gases[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 3(2): 1-40.
- [47] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地南缘油气生成与分布规律——原油地球化学特征与分类[J]. 石油学报, 2015, 36(11): 1315-1331.
CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Geochemical features and classification of crude oil in the southern margin of Junggar Basin, Northwestern China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(11): 1315-1331.
- [48] 郑金海, 向才富, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷侏罗系烃源岩特征与页岩气勘探潜力分析[J]. 地质论评, 2015, 61(1): 217-226.
ZHENG Jinhai, XIANG Caifu, WANG Xulong, et al. Characteristics of Jurassic source rocks and their shale gas exploration potential in the Fukang sag of the Junggar Basin[J]. Geological Review, 2015, 61(1): 217-226.
- [49] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰. 低熟油气形成机理与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
WANG Tieguan, ZHONG Ningning, HOU Dujie. Genetic mechanism and occurrence of immature hydrocarbon[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [50] 王铁冠. 树脂生源未成熟烃源岩的生物标志物组合及其地质意义[J]. 中国科学 B 辑, 1992, 22(7): 751-758.
WANG Tieguan. Biomarker assemblages of resin-genetic immature source rocks and their geological significance[J]. Science in China Series B, 1993, 36(6): 740-750.
- [51] 徐论勋, 李建民, 李景义. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系烃源岩特征[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(2): 13-14.
XU Lunxun, LI Jianmin, LI Jingyi. Characteristics of jurassic source rock in Taipei sag of Tuha Basin[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2004, 26(2): 13-14.
- [52] 王作栋, 陶明信, 孟仟祥, 等. 吐哈盆地地源岩研究进展与低演化油气的形成[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(6): 754-760.
WANG Zuodong, TAO Mingxin, MENG Qianxiang, et al. Research progress of source rocks and formation of low evolution oil and gas in Turpan-Hami Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(6): 754-760.
- [53] 赵兴齐, 陈践发, 赵红静, 等. 吐哈盆地台北凹陷天然气地球化学特征及成因分析[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3): 612-620.
ZHAO Xingqi, CHEN Jianfa, ZHAO Hongjing, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas in Taipei depression, Turpan-Hami Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3): 612-620.
- [54] 苏传国, 侯读杰, 包建平, 等. 吐哈盆地天然气成因的再认识[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(6): 165-170.
SU Chuanguo, HOU Dujie, BAO Jianping, et al. Re-discussion of natural gas genesis in Turpan-Hami Basin[J]. Journal of Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2008, 30(6): 165-170.
- [55] 刘文汇, 徐永昌. 煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理[J]. 地球化学, 1999, 28(4): 359-366.
LIU Wenhui, XU Yongchang. A two-stage model of carbon isotopic fractionation in coal-gas[J]. Geochimica, 1999, 28(4): 359-366.
- [56] 德勒恰提·加娜塔依, 张明玉, 陈春勇, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷东部二叠系梧桐沟组湖底扇沉积特征及展布[J]. 石油学报, 2015, 36(6): 688-698.
DELEQIAT Janney, ZHANG Mingyu, CHEN Chunyong, et al. Sedimentary characteristics and distribution of sublacustrine fan in Permian Wutonggou Formation, eastern Jimsar sag, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 688-698.