

# 塔里木盆地东北部侏罗系烃源岩特征及初步评价

党 犇, 赵 虹, 姜常义

(长安大学 地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 塔里木盆地是中国最大的含油气盆地, 其东北部的侏罗系分布面积广、厚度大, 主要发育一套煤系烃源岩。根据钻井及大量的实验测试等资料, 研究了侏罗系煤系烃源岩的发育特征及其有机地球化学、有机岩石学特征, 表明其有机质丰度较高, 达到中等—好级别; 有机质类型以Ⅲ型为主、Ⅱ型为辅; 有机质热演化程度处于未成熟—低成熟阶段, 部分地区可能达成熟阶段; 烃源岩主要生烃显微组分为基质镜质体, 少量孢子体、角质体和碎屑壳质体。综合分析表明, 塔里木盆地侏罗系烃源岩具备一定的生烃条件和油气勘探前景。

[关键词] 侏罗系; 烃源岩; 生烃条件; 东北部; 塔里木盆地; 新疆

[中图分类号] TE112.11; P618.11 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)01-0001-05

[作者简介] 党犇(1966—), 男, 陕西富平人, 讲师, 博士, 现从事油气地质与勘探研究工作。

侏罗系是我国西北地区重要的油气勘探目的层系之一, 主要发育一套煤系地层。早在上世纪50~60年代, 西北地区就发现了一些源于侏罗纪煤系地层的小油田, 如准噶尔盆地的齐古油田、吐哈盆地的七克台和胜金口油田、塔里木盆地库车坳陷的伊奇克里克油田和塔西南柯克亚油田<sup>[1]</sup>。上世纪80年代末以来又先后在吐哈、准噶尔、焉耆、三塘湖等盆地侏罗系煤系地层获重大勘探突破, 发现一系列侏罗系新油田, 油源对比表明属典型的煤系油气<sup>[2]</sup>。

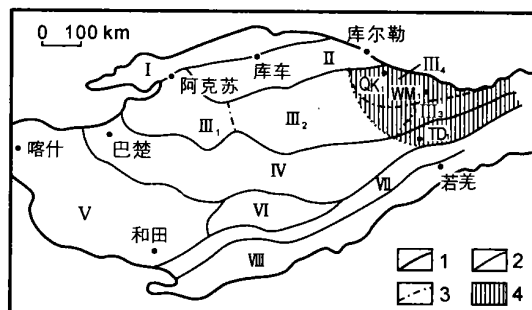
侏罗系是塔里木盆地最早发现含工业油流的一套层系, 主要分布在塔西南、库车和塔东北3个地区, 前两个地区已找到源于侏罗系的油气田, 塔东北地区侏罗系分布范围最广、厚度大, 但自上世纪60年代以来油气勘探尚未获重大突破。

笔者通过对侏罗系烃源岩的发育特征及其有机地球化学、有机岩石学特征等的研究, 认为塔里木盆地东北部侏罗系煤系烃源岩具备一定的生烃条件, 仍具有一定的油气勘探前景。

## 1 区域地质概况

研究区位于塔里木盆地东北部(图1), 包括孔雀

河斜坡、英吉苏凹陷、塔东低凸起东部及满加尔凹陷的东缘部分, 面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。区内及其周缘未有侏罗系出露, 仅有少量钻井揭示, 主要为一条河流—湖泊相含煤碎屑沉积。侏罗系残余厚度0~2200 m, 在英吉苏凹陷和满加尔坳陷东缘较大, 一般为800~1600 m, 最大厚度可达2200 m以上, 向南北两侧减薄并尖灭, 厚度0~800 m<sup>[3]</sup>。研究区侏罗系发育不全, 自下而上为下侏罗统沙里塔什组(推测)、康苏组和中侏罗统杨叶组、塔尔尔组, 缺失上侏罗统。



1—盆地边界; 2—一级单元界线; 3—二级单元界线; 4—研究区; I—库车坳陷; II—塔北隆起; III—北部坳陷; III<sub>1</sub>—阿瓦提凹陷; III<sub>2</sub>—满加尔凹陷; III<sub>3</sub>—英吉苏凹陷; III<sub>4</sub>—孔雀河斜坡; IV—中央隆起; V—西南坳陷; VI—唐古孜巴斯坳陷; VII—塔南隆起; VIII—东南坳陷

图1 研究区位置

Fig. 1 Sketch map of location of the study area

[收稿日期] 2003-04-01

[基金项目] 国家九五重点科技攻关项目(96-111 补1-3)

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 烃源岩发育特征

研究区侏罗系发育一套煤系烃源岩,由暗色泥岩、碳质泥岩和煤岩构成。据对区内钻井揭示的该烃源岩厚度资料统计,在孔雀河斜坡,烃源岩累厚 55~111 m,占地层厚度的 13.9%~24.3%,其中煤岩厚 13~24 m;在英吉苏凹陷,烃源岩累厚 258~370 m,占地层厚度的 27.7%~61%,其中煤岩厚 19.5~58 m。凹陷内 YN1 井区烃源岩厚度只有 90 m,占地层厚度的 10.9%,反映了该井可能处于当时沉积凹陷中的古构造高部位,而导致烃源岩不发育;研究区南部塔东低凸起东部 TD1 井区,为一套红色粗碎屑建造,属边缘相沉积,侏罗系自北而南逐渐超覆尖灭,烃源岩不发育。

结合地震资料进一步分析,英吉苏凹陷的东、西两个洼槽区侏罗系底界埋深达 4 000 m 以上,地层厚度至少在 2 400 m 以上,烃源岩累厚在 400 m 以上,主要发育半深湖暗色泥岩,煤层和碳质泥岩相对较薄;孔雀河斜坡北部和塔东低凸起,侏罗系埋深浅,地层厚度小,烃源岩也相对较薄,一般累厚 100 m 左右,主要为浅湖、沼泽相的暗色泥岩,但煤层和碳质泥岩相对较发育。

3 烃源岩有机地球化学特征

3.1 烃源岩有机质丰度

对煤系烃源岩有机质丰度的评价不能简单套用一般湖相泥岩的标准<sup>[4~5]</sup>。根据煤系烃源岩丰度评价标准<sup>[6]</sup>,区内的暗色泥岩属“中等”级别烃源岩,碳质泥岩和煤岩属“好”级别烃源岩。同邻区侏罗系相比,略好于库车坳陷,稍逊于吐哈盆地和焉耆盆地,故有较好的可比性。有机质丰度特征具体如下:

暗色泥岩:有机碳含量一般为 0.6%~4.1%,平均为 1.73%;氯仿沥青“A”含量一般为 0.016 5%~0.142%,平均为 0.063 8%;总烃含量一般为 60~300 mg/kg,平均为 138.6 mg/kg;热解生烃潜量一般为 1.6~5.0 mg/g,平均为 2.1 mg/g;氢指数一般为 100~200 mg/g,平均为 109.6 mg/g。

碳质泥岩:有机碳含量一般为 2.23%~18.24%,平均为 7.87%;氯仿沥青“A”含量一般为 0.053 1%~0.142 0%,平均为 0.095%;总烃含量一般为 96~403 mg/kg,平均为 270.6 mg/kg;热解生烃潜量一般为 14.86~54.98 mg/g,平均为 27.49%;氢指数一般为 244.0%~943.0%,平均为 487.9%。

煤岩:有机碳含量一般为 114.72%~73.82%,平均为 50.95%;氯仿沥青“A”含量一般为 0.984%~1.367 3%,平均为 1.205 6%;总烃含量一般为 3 907~5 862 mg/kg,平均为 4 702 mg/kg;热解生烃潜量一般为 14.62~99.85 mg/g,平均为 44.95 mg/g。

3.2 烃源岩有机质类型

烃源岩有机质类型采用我国陆相地层划分常采用的三类五分法,采用多方法分析如下:

3.2.1 干酪根镜检法

根据区内侏罗系 12 个干酪根镜检样分析(表 1),除 1 个暗色泥岩和 1 个碳质泥岩样品的类型指数分别为 1.5 和 6.5,反映为 II 型干酪根外,其余样品干酪根都以镜质组和惰质组占优势,二者含量之和>60%,其类型指数为-72~-8,属 III 型干酪根。镜检法结果表明区内有机质类型以 II 型为主,个别样品反映为 II 型。

3.2.2 热解烃指数和热解峰温图版法

在烃源岩热演化程度不是很高的情况下,可利用热解氢指数( $I_H$ )与热解峰温( $t_{max}$ )交绘法进行有机质类型的划分。

根据区内侏罗系烃源岩 63 个热解样品分析,

表 1 干酪根类型镜检结果

Table 1 Kerogen type from the microscope analysis

烃源岩	显微组分				类型 指数	干酪根 类型
	类脂组	壳质组	镜质组	惰质组		
暗色泥岩	0.15~0.43(6)	<0.01~0.03(6)	0.53~0.73(6)	0.08~0.20(6)	-50~-8, 1.5	III, II
碳质泥岩	0.48(1)	0.06~0.07(2)	0.42~0.85(3)	0.01~0.10(3)	-65~-43, 6.5	III, II
煤岩	—	0.02~0.07(3)	0.60~0.97(3)	0.01~0.08(3)	-72~-66	III

注:括弧内数字表示样品数

30 个泥岩样品( $\text{TOC} > 0.5\%$ )的氢指数范围为 14 ~ 330  $\text{mg/g}$ , 8 个碳质泥岩样品的氢指数范围较为分散, 为 77 ~ 943  $\text{mg/g}$ , 16 个煤岩样品氢指数范围为 30.9 ~ 330.5  $\text{mg/g}$ 。这些样品的热解氢指数( $I_{\text{H}}$ )与热解峰温( $t_{\text{max}}$ )关系表明, 除了碳质泥岩样点比较分散, 各有 2 个样点落在 I 型区和 II 型区外, 绝大多数样点都落在 II 型母质区(图 2)。

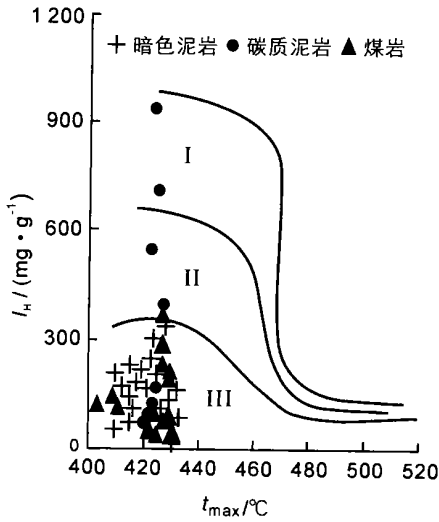


图 2 烃源岩  $I_{\text{H}}$  和  $T_{\text{max}}$  关系图

Fig. 2 Relationship between  $I_{\text{H}}$  and  $t_{\text{max}}$  of the hydrocarbon source rocks

3.2.3 氯仿沥青“A”红外光谱法

红外光谱各吸收峰的强度反映了其分子结构中各官能团的组成特征, 其中 1 460  $\text{cm}^{-1}$  等吸收峰代表脂族基团  $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2$  吸收, 而 1 600  $\text{cm}^{-1}$  吸收峰则代表了芳核  $\text{C}=\text{C}$  吸收<sup>[4]</sup>。因此, 氯仿沥青“ A ”红外光谱 1 460  $\text{cm}^{-1}$ /1 600  $\text{cm}^{-1}$  比值可近似为饱/芳比, 根据其比值不仅可以判断有机质热演化程度, 也可以判断其母质类型。区内侏罗系烃源岩 6 个样品的 1 460  $\text{cm}^{-1}$ /1 600  $\text{cm}^{-1}$  比值在 2.0 ~ 2.87 之间, 按红外光谱 1 460  $\text{cm}^{-1}$ /1 600  $\text{cm}^{-1}$  划分标准, 属 II 型有机质。

另外, 红外光谱 1 660  $\text{cm}^{-1}$  吸收峰是高等植物主要标志物—— 醌的  $\text{C}=\text{O}$  吸收峰, 上述样品的氯

仿沥青“ A ”红外光谱都有很强的 1 660  $\text{cm}^{-1}$  吸收峰, 亦反映了 II 型母质特征。

3.2.4 姥鲛烷/植烷比值法

姥鲛烷/植烷 ( $\text{Pr}/\text{Ph}$ ) 比值主要反映烃源岩的沉积环境, 但同时又同生物来源有关, 可以反映有机质类型。区内 4 口井 12 个样品中, 除 1 个泥岩样品的  $\text{Pr}/\text{Ph}$  值具有微弱的植烷优势, 反映为 II 型有机质外, 有 11 个样品的  $\text{Pr}/\text{Ph}$  值都表现出较强的姥鲛烷优势, 反映为 II 型有机质(表 2)。

表 2 烃源岩  $\text{Pr}/\text{Ph}$  比值分析数据统计

Table 2 Analysis data statistics of  $\text{Pr}/\text{Ph}$  ratio

烃源岩	样品数	$\text{Pr}/\text{Ph}$	有机质类型
暗色泥岩	10	1.38 ~ 4.24	III
暗色泥岩	1	0.93	II <sub>2</sub>
碳质泥岩	1	1.84	III

3.2.5 其他方法

分析有机质类型除上述方法外, 还有  $\text{H}/\text{C}$  原子比、饱/芳比值、干酪根和氯仿沥青“ A ”的碳同位素组成以及胆甾烷、麦角甾烷与豆甾烷的比值等方法。按相应的评价标准, 除参数饱/芳比值反映为 II 型外, 其余各方法均反映为 II 型有机质(表 3)。

综上所述, 不同方法所划分的有机质类型虽略有出入, 但总体上暗色泥岩和碳质泥岩以 II 型有机质为主, 少量的 II 型; 煤岩干酪根元素  $\text{H}/\text{C}$  原子比为 0.76 ~ 0.85<sup>[7]</sup>, 且其显微组分中镜质组占绝大多数, 平均含量达 89%, 都显示为 II 型有机质。

3.3 烃源岩有机质成熟度

区内 5 口井侏罗系烃源岩各种热演化指标分析数据统计表明, 三类样品的  $R_o$  值一般在 0.32% ~ 0.50% 之间, 但较深的 AN1 井和 TN2 井已有少数样品的  $R_o$  值达 0.60% ~ 0.75%;  $t_{\text{max}}$  值在 405  $^{\circ}\text{C}$  ~ 435  $^{\circ}\text{C}$  之间; OEP 值和 CPI 值分别在 3.46 ~ 1.20 和 2.51 ~ 1.20 之间; TAI 值在 1.8 ~ 2.3 之间。按相应的烃源岩成熟度划分标准, 本区目前所钻遇的侏罗系烃源岩处于未成熟—低成熟阶段。

表 3 烃源岩  $\text{H}/\text{C}$  原子比等参数分析数据统计

Table 3 Analysis data statistics of  $\text{H}/\text{C}$  ratio parameter etc

烃源岩	$\text{H}/\text{C}$	饱/芳	干酪根 $\delta^{13}\text{C}/10^{-3}$	氯仿“ A ” $\delta^{13}\text{C}/10^{-3}$	胆甾烷 / 豆甾烷	麦角甾烷 / 豆甾烷	有机质 类型
暗色泥岩	0.71 ~ 0.74 (4)	1.02 ~ 2.1 (4)	-23.29 ~ -21.67 (11)	-24.20 ~ -23.89 (9)	0.04 ~ 0.38 (4)	0.24 ~ 0.74 (4)	III
碳质泥岩	0.85(1)	1.67(1)	—	—	—	—	III

注: 括弧内数字表示样品数

## 4 烃源岩有机岩石学特征

作为煤系烃源岩中的煤岩和碳质泥岩,有机碳含量比较高。因此,从某种意义上讲,有机质丰度对烃源岩性质的影响并不是主要的,而主要取决于有机质显微组分尤其是富氢显微组分的差异,显微组分组成和含量对煤系烃源岩的评价至关重要。

区内侏罗系煤岩和碳质泥岩显微组分组成特征如下:

(1)主要显微组分是镜质组,一般含量 83.9%~96.8%,平均 89.2%;壳质组含量为 2.2%~6.8%,平均 5.4%;惰质组含量为 0.1%~8.4%,平均 3.2%;矿物质含量一般为 1.0%~3.9%,平均 2.1%。

(2)镜质组以基质镜质体为主,含量为 52.7%~83.1%;其次为均质镜质体,含量为 5.6%~8.6%;其余为少量的结构镜质体和半镜质体,二者之和小于 2.7%。

(3)壳质组中角质体、孢子体和碎屑壳质体含量分别为 0.6%~1.8%、0.6%~3.0%和 1%~3%,平均值分别为 1.16%、1.86%和 2.2%,偶见木栓质体(0.1%),未检测出树脂体。

(4)惰质组主要由丝质体、半丝质体和碎屑惰质体组成,矿物质则以粘土物为主。

## 5 侏罗系烃源岩生烃条件分析

上述分析表明,区内侏罗系烃源岩有机质丰度较高,属中一好的烃源岩,同邻区库车坳陷及焉耆盆地、吐哈盆地丰度特征相近,具有较好的生烃物质基础。烃源岩有机质类型以Ⅱ型为主,少数暗色泥岩具有Ⅱ型母质特征,同邻区侏罗系烃源岩类型基本相似。目前资料显示的烃源岩有机质热演化程度较低,基本上处于未成熟阶段。若按传统的干酪根晚期成烃理论和湖相泥岩成熟度标准分析,区内侏罗系烃源岩生烃条件有限,大量成烃的可能性似乎不大。

由于区内勘探程度低,且早期油气勘探多以构造油气藏为主要钻探目标,故探井所揭示的目的层段,多处于构造高部位,不仅可能钻遇烃源岩层的井少甚至未能钻达主要烃源岩,容易低估烃源岩的发育,且因埋藏浅,也容易低估烃源岩的成熟度。因

此,现有的几口钻井所获得的样品难以完全表征整个研究区侏罗系烃源岩的特征,特别是凹陷中心埋深较大部位烃源岩的热演化程度。较深的 AN1 井和 TN2 井已有少数样品的  $R_o$  值达 0.60%~0.75%,其样品埋深都在 3 000 m 以下,暗示着区内侏罗系可能有成熟烃源岩的存在。而据前文分析,在英吉苏凹陷东西两个洼槽区,侏罗系底界埋深达 4 000 m 或更深,有的甚至最大埋深可达 5 000 m<sup>[7]</sup>。因而,同样的地温梯度条件下,4 000 m 以下有机质成熟度相对要高,应有低成熟-成熟的烃源岩存在。

再者,国内外近十多年来煤成烃研究表明,煤系源岩成烃范围较宽。煤系源岩的显微组分中含有较多的像树脂体和木栓质体等早期生烃物质,其  $R_o$  在 0.35% 时已开始大量生烃,  $R_o$  为 0.65% 时生烃结束<sup>[8]</sup>。吐哈盆地煤系成烃的系统研究表明,煤系烃源岩具有多阶段生烃和早生早排的成烃模式,即从未成熟阶段到成熟阶段都可以生烃<sup>[4]</sup>。煤系多阶段生烃特点是由于其显微组分组成的差异性所致,不同的显微组分具有不同的生烃阶段,不同的热演化阶段有不同的主生烃贡献组分<sup>[4~5]</sup>。吐哈盆地侏罗系成烃显微组分有基质镜质体、木栓质体、角质体和小孢子体(煤岩为主)及少量的腐泥组(湖相泥岩中)<sup>[4,9]</sup>。而人们早就认识到,基质镜质体在低成熟阶段具有生成液态烃的能力<sup>[10~11]</sup>。且除了木栓质体外,基质镜质体亦具有早期生烃特征( $R_o$  为 0.4%~0.7%),是吐哈盆地侏罗系煤成烃的最主要贡献组分<sup>[4,12]</sup>。具有早期生烃特征的基质镜质体,虽然单位体积生成液态烃的能力不及壳质组的 50%,但其在煤系中的高含量则大大弥补了其单位生烃量低的不足<sup>[12]</sup>。由于西北侏罗系无论煤和煤系泥岩,树脂体和木栓质体的含量普遍较低(一般<0.5%),因此这两种早期生烃组分对西北地区侏罗系成油贡献极小<sup>[13]</sup>,早期成烃组分应该主要是基质镜质体。

研究区内侏罗系源岩具有成烃物质基础的显微组分主要为基质镜质体,含量达 52.7%~83.1%,约占镜质组总量的 60%~96%;少量的孢子体、角质体和碎屑壳质体。结合吐哈盆地侏罗系成烃特点,研究区具有早期成烃意义的组分主要是基质镜质体,其次是角质体。角质体也有两个明显的生烃阶段,具早期生烃特点( $R_o$  为 0.45%~0.75%)<sup>[4,12]</sup>。

基于以上分析,在分析本区侏罗系煤系烃源岩的生烃条件时,有必要持非常慎重的态度,除了要关

注未成熟-低成熟烃源岩中重要的早期生烃显微组分以外, 更要注意深部可能存在成熟的烃源岩。总之, 研究区侏罗系煤系烃源岩具备一定的生烃条件: 其一, 区内低熟烃类生成的可能性较大, 文献[7]也表明区内侏罗系具有生成低温化学反应成因气的条件, 是塔里木盆地煤成气勘探的潜在资源区; 其二, 限于现有资料, 不能轻易的否定本区侏罗系有成熟烃源岩的存在及其烃类生成。毕竟目前该区的勘探和研究程度还比较低, 有必要作深入的工作。

6  结论

侏罗系为一套煤系烃源岩, 由暗色泥岩、碳质泥岩和煤岩 3 种类型构成。烃源岩一般累厚 100 ~ 370 m, 最厚达 400 m 以上, 其中煤岩累厚一般 10 ~ 25 m, 厚者达 58 m; 有机质丰度较高, 属中等一好的烃源岩; 有机质类型以 III 型为主, II 型为辅; 烃源岩热演化程度低, 基本处于未成熟-低成熟阶段, 局部埋深较大部位如英东、英西洼槽区, 可能已进入成熟阶段。主要生烃显微组分为基质镜质体, 其次为壳质组中的孢子体、角质体和碎屑壳质体; 本区侏罗系具备一定的生烃条件和油气勘探前景。

[ 参 考 文 献 ]

[ 1 ]   新疆油气区石油天然气志编写组. 中国石油地质志(卷 15),

新疆油气区[ M ] . 北京: 石油工业出版社, 1995. 126.  
[ 2 ]   赵文智, 张研, 赵长毅, 等. 西北地区煤系油气田的形成条件与分布规律[ J ] . 石油学报, 1996, 17(2): 1 ~ 8.  
[ 3 ]   贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[ M ] . 北京: 石油工业出版社, 1997. 25   246.  
[ 4 ]   程克明. 吐哈盆地油气生成[ M ] . 北京: 石油工业出版社, 1994. 5 ~ 84.  
[ 5 ]   钟宁宁, 张枝焕. 石油地球化学进展[ M ] . 北京: 石油工业出版社, 1998. 1 ~ 17.  
[ 6 ]   黄第藩, 熊传武. 含煤地层中石油的生成、运移和生油潜力评价[ J ] . 勘探家, 1996, 1(2): 127 ~ 131.  
[ 7 ]   李先奇, 秦胜飞, 戴金星. 塔里木盆地英吉苏凹陷煤成气勘探前景分析[ J ] . 石油勘探与开发, 1996, 23(3): 6 ~ 10.  
[ 8 ]   钟宁宁. 显微组分荧光性变化——烃源岩有机质演化的一个重要方面[ J ] . 江汉石油学院学报, 1990, 13(1): 1 ~ 6.  
[ 9 ]   王飞宇, 何萍, 赵长毅. 中国西北地区侏罗系烃源岩中生油组分和成烃作用[ J ] . 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16(3): 150 ~ 154.  
[ 10 ]   Smith G C, Cook A C. Petroleum organic matter in the Gippsland basin and its relationship to rank and organic matter type[ J ] . APEA, 1984, 24(1): 196 ~ 221.  
[ 11 ]   Mukhopadhyay P K, Hagemann H W, Gornly J R. Characterization of kerogens as seen aspect of maturation and hydrocarbon generation [ J ] . Erdol and Kohle, 1985, 38: 7 ~ 18.  
[ 12 ]   赵长毅. 吐哈盆地煤中基质镜质体生烃潜力与特征[ J ] . 科学通报, 1994, 39(21): 1979 ~ 1981.  
[ 13 ]   陈建平, 赵长毅, 王兆云, 等. 西北地区侏罗纪煤系烃源岩和油气地球化学特征[ J ] . 地质论评, 1998, 44(2): 149 ~ 158.

Preliminary studies and characteristics of the Jurassic hydrocarbon source rocks in the northern Tarim basin

DANG Ben, ZHAO Hong, JIANG Chang-yi

(School of Earth Sciences and Resources Management, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The Jurassic System with large thickness is ubiquitous in the northeastern part of the Tanim Basin, one of the biggest oil and gas basins in China. The hydrocarbon source rocks of coal measures developed in this basin were studied on the basis of drill cores, which involved in many fields such as geology, organic geochemistry and petrology. As suggested by the results, the source rocks were confined to the middle-good level in the organic abundance sense and the organic substances were grouped into grades III (dominant) and II (less common), respectively. The thermal evolution of those organic substances was speculated to have primarily been at the immature-to-low mature stage though some could reach the mature level in certain areas. A small quantity of sporinite and cutinite were identified in addition to the majority of the hydrocarbon-forming micro-components that mainly occurred as matrix vitinites. Detailed synthetic analyses suggest that the Jurassic succession in the Northern Tanim Basin is a significant target of the oil and gas exploration due to its good hydrocarbon-forming conditions.

**Key words:** Jurassic; hydrocarbon source rock; coal measures; Tarim basin northeastern area; condition to generate hydrocarbon  
(英文审定: 周军)