

# Study on the Characteristics and Origin of the Oil Shale in the Chang 7 Member, Yanchang Formation in Ordos Basin\*

Qingchun Zhang<sup>1</sup>, Kaiming Wang<sup>2</sup>, Shunshu Luo<sup>3</sup>, Xiaozhi Wu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Petro China, Beijing

<sup>2</sup>Planning and Design Institute of East China Branch Company, Sinopec, Nanjing

<sup>3</sup>College of Geoscience, Yangtze University, Jingzhou

Email: zqc@petrochina.com.cn

Received: Apr. 1<sup>st</sup>, 2013; revised: Apr. 28<sup>th</sup>, 2013; accepted: May 11<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Qingchun Zhang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** In Ordos basin, which is rich in oil shale resource, oil shale is mainly found in the southern part of Chang 7 member of the Triassic Yanchang-3 Formation, with common thickness of 5 to 30 m and 40 m of maximum. In this paper, a statistic synthetic study on test data of both surface and borehole oil shale sample was conducted based on the field measures of oil shale sections. Research shows that oil content ranges from 4% to 9% with average of 7%, calorific value varies between 7 MJ/kg and 13 MJ/kg with average of 9.1 MJ/kg, ash content is between 45.6% and 90.1% with average of 69.5%, and total sulfur values are between 0.01% and 14.01% with the average of 2.82%. The oil shale in the mass is characterized as high ash, medium to high rich sulfur, and medium grade oil shale. The organic matters of oil shale, with high content and mainly of sapropelic and humic-sapropelic type, are dominantly in the mature stage and have good hydrocarbon generation potential. It is made clear by geological and geochemical study that the Chang 7 oil shale was formed in semi-deep and fresh-half salt lake with water depth more than 15 m under warm-humid climate, where it was a closed, stagnant, anoxic and strong reducing sedimentary environment. During Chang 7 deposition stage of Late Triassic, biological prosperity provided a source of organic matter for the formation of Chang 7 oil shale, the stable water stratification resulted in the strong reducing environment of the lake bottom, which was favorable for the accumulation of organic matter and its preservation and thereafter forming good type oil shale of high organic carbon content and high oil content.

**Keywords:** Oil Shale; Chang 7 Member; Yangchang Formation; Triassic; Ordos Basin

## 鄂尔多斯盆地长 7 油层组油页岩特征及成因分析\*

张庆春<sup>1</sup>, 汪凯明<sup>2</sup>, 罗顺社<sup>3</sup>, 吴晓智<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国石油勘探开发研究院, 北京

<sup>2</sup>中国石油化工股份有限公司华东分公司规划设计研究院, 南京

<sup>3</sup>长江大学地球科学学院, 荆州

Email: zqc@petrochina.com.cn

收稿日期: 2013 年 4 月 1 日; 修回日期: 2013 年 4 月 28 日; 录用日期: 2013 年 5 月 11 日

**摘要:** 鄂尔多斯盆地油页岩资源丰富, 主要发育于三叠系延长组三段长 7 油层组, 分布在盆地南部, 矿层厚度一般为 5~30 m, 最厚可达 40 m。在野外剖面实测基础上, 对大量地表和井下油页岩样品测试数据进行了地质学统计。结果表明: 油页岩含油率主要分布于 4%~9%, 平均为 7%; 发热量主要为 7~13 MJ/kg, 平均为 9.10 MJ/kg; 灰分分布于 45.6%~90.1%, 平均为 69.5%; 全硫含量为 0.01%~14.01%, 平均为 2.82%, 总体为高灰分、中-富

\*资助信息: 本文由国家油气重大专项(2008ZX05018-001)资助。

硫、中品级油页岩。油页岩有机质主要由腐泥型(I)和腐殖腐泥型(II1)组成,大部分进入成熟度较高的生油阶段,有机质丰度高,具有较高的产烃率。地质地球化学特征表明,长7油页岩形成于气候温暖潮湿,湖泊水深大于15 m的半深湖-深湖,淡水-半咸水,封闭、滞流,缺氧的强还原沉积环境。晚三叠世长7沉积期间,生物繁盛,湖泊自身的生产力为盆内长7油页岩的形成提供了最主要的有机物质来源,稳定的湖水分层形成的湖盆底部缺氧的强还原环境,有利于有机质的堆积和保存,从而形成了有机质类型较好、有机碳含量较高、含油率较高的油页岩。

**关键词:** 油页岩; 长7油层组; 延长组; 三叠系; 鄂尔多斯盆地

## 1. 引言

油页岩作为一种重要的非常规油气资源,以其巨大的资源量、丰富的综合利用价值,引起了世界各国的广泛关注,在全球能源结构中具有重要的战略地位。世界油页岩资源丰富,截止2005年底已发表的数据统计,全球已探明的油页岩资源量折算成页岩油约为 $4.110 \times 10^{11}$  t,数倍于世界石油探明可采储量 $1.600 \times 10^{11}$  t<sup>[1]</sup>。油页岩不仅可以提炼页岩油,而且在化工、医药、建材、农业、环保等多个领域具有广泛用途。近年来,油页岩综合开发利用技术也不断革新,代表性的有壳牌公司的原位转化技术(*in-situ conversion process*, ICP)、埃克森美孚公司的导电裂缝技术(Electrofrac)、斯伦贝谢公司的射频和临界流体开采技术(RF/CF)等,这些新技术的研发和应用将极大地提高开发效率,降低对环境的伤害,促进油页岩工业的绿色、健康发展。

中国油页岩资源十分丰富,2004~2006年开展的首次“全国油页岩资源评价”结果表明,我国油页岩资源储量达 $7.199 \times 10^{11}$  t,折合页岩油资源为 $4.76 \times 10^{10}$  t,与世界各国相比,仅次于美国而位居世界第二<sup>[2]</sup>。鄂尔多斯盆地是我国油页岩资源最丰富的盆地之一,纵向分布在二叠系山西组(P<sub>1s</sub>)、三叠系延长组(T<sub>3y</sub>)、侏罗系延安组(J<sub>1y</sub>)和安定组(J<sub>2a</sub>)等层位,其中三叠系延长组是盆内油页岩最主要的产出层位。截止2006年底,延长组油页岩1000 m以浅页岩油预测资源量超过 $1.00 \times 10^{10}$  t<sup>[3]</sup>,显示出良好的勘探前景。

作者在前人研究的基础上<sup>[3-6]</sup>,结合实地野外剖面勘查、样品采集,通过大量地表和井下油页岩样品测试数据,对鄂尔多斯盆地油页岩地质特征、工业品质特征和地球化学特征等进行研究,并初步探讨了油页岩的成因。

## 2. 区域地质背景

鄂尔多斯盆地北起阴山,南达秦岭,西抵腾格里沙漠,东至吕梁山,地跨中国北部的陕、甘、宁、蒙、晋五省区,主体面积约 $2.5 \times 10^5$  km<sup>2</sup>。其大地构造位置属华北地台西部,是一个在华北克拉通之上发育起来的沉降稳定、拗陷迁移、扭动明显的多旋回叠合含油气盆地。其现今构造总体上显示为一东翼宽缓、西翼陡窄的不对称单斜的南北向矩形盆地。盆地边缘断裂褶皱较发育,而内部构造相对简单,以鼻状构造为主,地层平缓,倾角一般不足1°。根据盆地基底性质、现今构造形态和盆地的演化历史,盆地内部可划分为伊盟斜坡、渭北隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环向斜及西缘逆冲带共6个一级构造单元<sup>[7,8]</sup>(图1)。

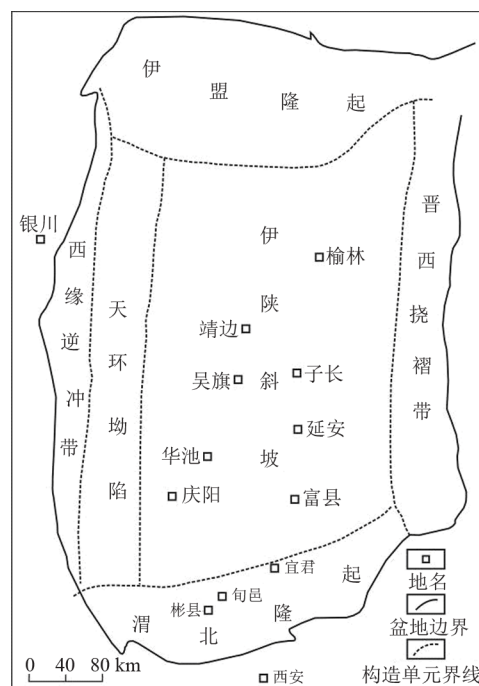


Figure 1. Tectonic units of Ordos basin  
图1. 鄂尔多斯盆地构造单元划分图

晚三叠世,受印支运动的影响,晚古生代-中三叠世的华北克拉通拗陷盆地逐渐向内陆转化<sup>[9]</sup>,在沉积上实现了由海相、过渡相向陆相的根本性转变,自晚三叠世以来发育完整和典型的陆相碎屑岩沉积体系,进入了大型内陆差异沉积盆地的形成和发展时期<sup>[10,11]</sup>。三叠统延长组是在鄂尔多斯盆地持续拗陷和稳

定沉降过程中堆积的河流—湖泊相陆源碎屑岩系,延长组的发展和演化客观记录了这个大型淡水湖盆从发生、发展到消亡的历史<sup>[12]</sup>,延长组是鄂尔多斯盆地内陆湖盆形成后的第一套生储油岩系,也是盆地最主要的勘探开发目的层系。据岩性、电性及含油性特征自下而上划分为10个油层组(长10~长1)(图2)<sup>[13]</sup>。

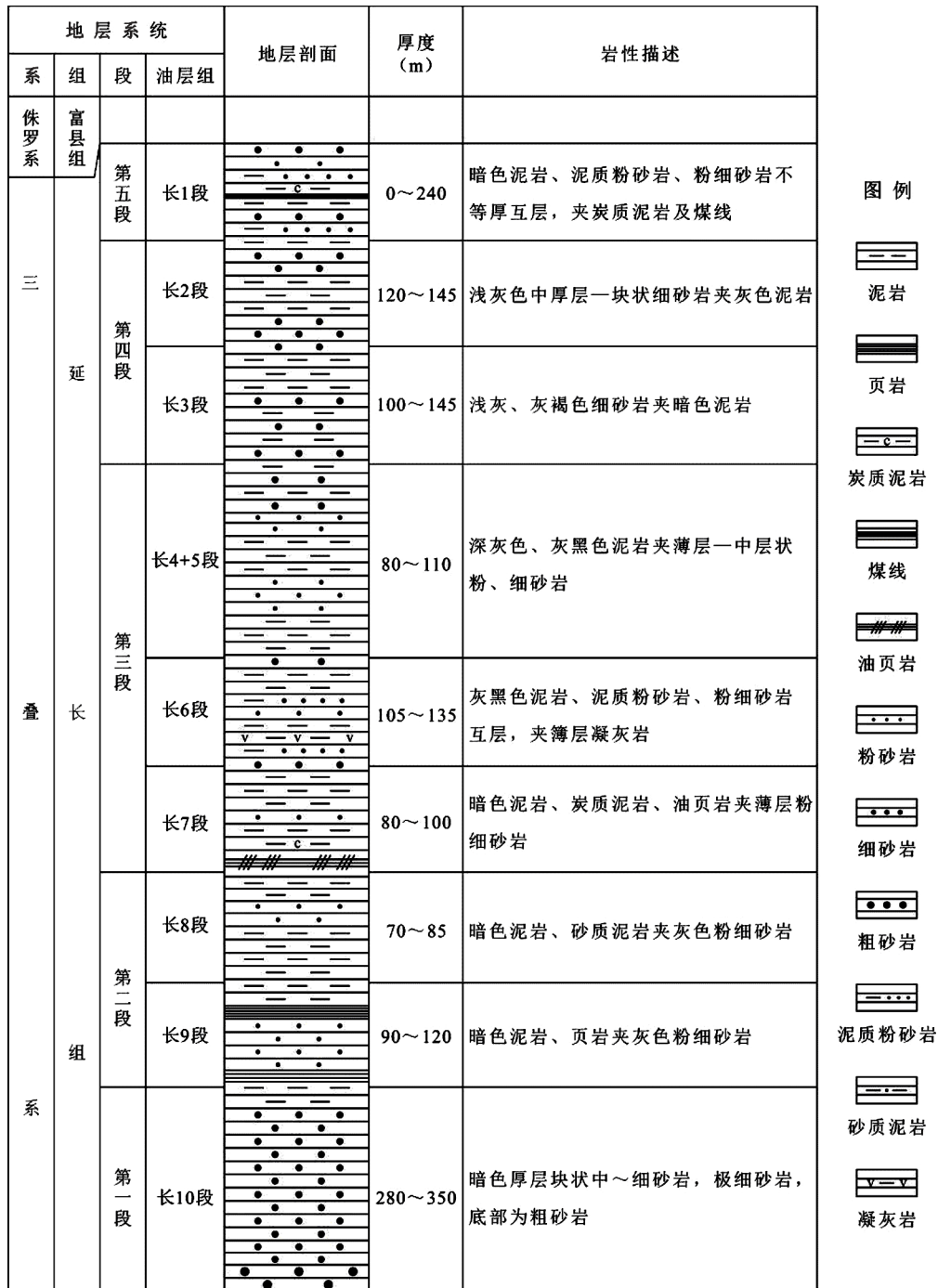


Figure 2. Comprehensive stratigraphic columnar section of the Triassic Yanchang Formation in Ordos basin  
图2. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组地层综合柱状图

### 3. 油页岩主要特征

#### 3.1. 油页岩地质特征

盆地油页岩主要发育于三叠系延长组三段长7油层组(图2)。长7期湖盆急剧下沉,为延长期最大湖侵期,湖盆面积几乎覆盖了整个鄂尔多斯盆地,沉积了一套厚度大、有机质丰度高的暗色泥岩和油页岩,俗称“张家滩页岩”。出露地表的油页岩颜色较深,呈深灰色、灰黑色-黑色“纸片”状,页理发育,风化面上常因自然硫或铁质氧化而成棕黄色和红色(图3),新鲜的油页岩断面具弱黑油脂光泽,细腻光滑,部分油页岩能点燃,烟浓,并具浓郁的沥青味,手感较轻,密度小于泥岩。总体反映出油页岩沉积时盆地水动力条件较弱,具深湖-半深湖厌氧环境的沉积条件。井下长7油页岩样品外观呈黑色,质纯,偶见介形虫及鱼鳞化石、星点状黄铁矿,并可见泥包砂等深水沉积构造,深湖-半深湖相沉积特征明显。

长7油页岩露头区主要分布于鄂尔多斯盆地南部,渭北隆起带的北部,地理上位于宜君-旬邑-彬县一带,大致呈弧形展布。露头区油页岩厚度一般为5~30 m,最厚地段在宜君县哭泉淌泥河-马庄一带,向西南变薄(图4)。井下以吴旗-庆阳-正宁一带最为

发育,厚度一般都大于30 m,最厚处可达40 m,整体向东北和西南两翼减薄。盆内油页岩层产状近水平,倾角较缓,一般在10°左右。

#### 3.2. 油页岩工业品质特征

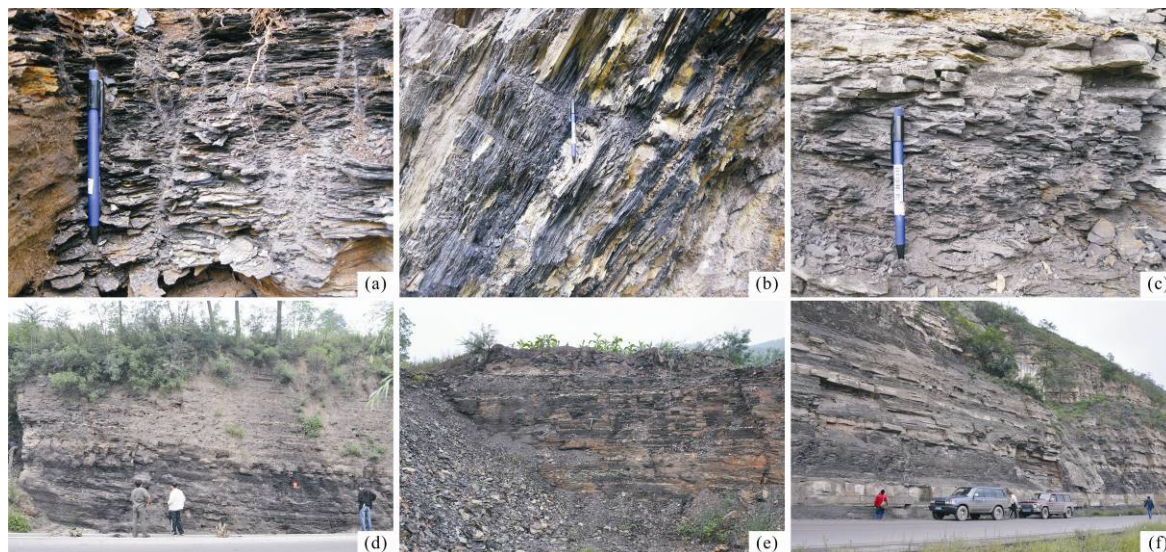
##### 3.2.1. 油页岩含油率

含油率是指油页岩中页岩油(焦油)所占的质量分数,是评价油页岩质量最重要的指标。根据含油率将油页岩划分为低(3.5%~5%)、中(5%~10%)、高(>10%)3个品级<sup>[14]</sup>。前人对鄂尔多斯盆地延长组长7油页岩含油率做过一些评价,但结论不一<sup>[3-6]</sup>。作者在前人研究的基础上,结合本次测定结果,认为鄂尔多斯盆地长7油页岩属中品级,含油率分布于3.5%~13.7%,平均为7.0%,4%~9%的主频段占样品总数的66%,大于10%的高品级油页岩占样品总数的13%(图5(a))。

##### 3.2.2. 油页岩发热量

发热量是指单位重量的油页岩完全燃烧后所放出的全部热量,是评价油页岩作为工业燃料价值的重要参数。一般认为,油页岩的低位发热量应大于4.18 MJ/kg,该值越大,其工业燃烧价值越高。

根据本次测定的数据和前人研究的成果,鄂尔多斯盆地长7油页岩发热量为4.41~16.10 MJ/kg,平均



(a) 宜君福地, N35°24'2.3", E109°14'19.7", 油页岩层厚度>6 m, 含油率 3.6%~5.0%, 平均 4.3%; (b) 宜君哭泉淌泥河, N35°16'26.1", E109°4'10.5", 油页岩层厚度>26 m, 含油率 5.8%~10.2%, 平均 7.2%; (c) 铜川金锁关何家坊, N35°13'55.9", E109°0'35.3", 油页岩层厚度>10 m, 含油率 3.6%~10.6%, 平均 7.5%; (d) 铜川瑶曲聂家河, N35°9'57.5", E108°51'29.8", 油页岩层厚度>5 m, 含油率 4.2%~6.0%, 平均 5.1%; (e) 铜川金锁关霸王庄油页岩采石场, N35°14'2.3", E109°2'11.3", 油页岩层厚度>20 m, 平均含油率 2.2%; (f) 旬邑至彬县公路侧, N35°1'9.1", E108°8'14.8", 油页岩层厚度>5 m, 含油率 2.4%~7.4%, 平均 3.9%。

Figure 3. Outcrop pictures showing the Chang 7 member oil shale of the Yanchang Formation in Ordos basin  
图3. 鄂尔多斯盆地延长组长7油页岩露头剖面照片

鄂尔多斯盆地长7油层组油页岩特征及成因分析

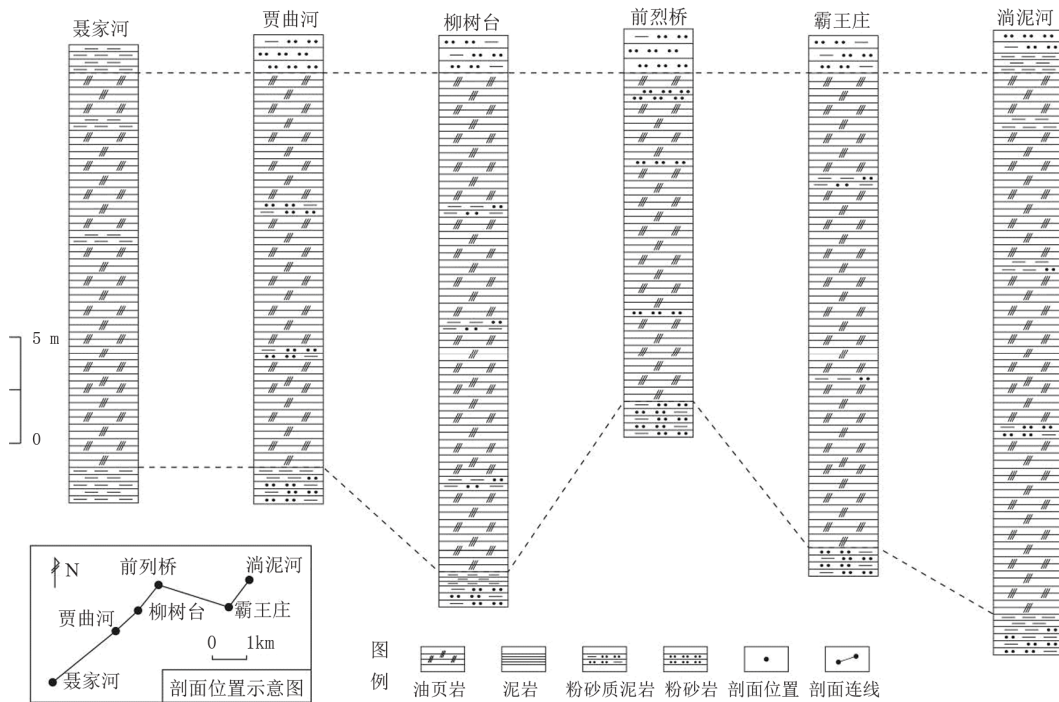


Figure 4. Stratigraphic correlation of the Chang 7 member oil shale outcrops of the Yanchang Formation in the Yijun area, southern Ordos basin

图 4. 鄂尔多斯盆地南部宜君地区延长组长7油页岩露头区地层对比



Figure 5. Histograms of industrial evaluation indicators of the Chang 7 member oil shale  
图 5. 长7油页岩工业评价分析指标分布直方图

为 9.10 MJ/kg, 主要分布在 7~13 MJ/kg, 占分析样品总数的 63%(图 5(b))。同时, 通过对鄂尔多斯盆地地表和井下大量样品的统计, 发现油页岩发热量与含油率之间存在较好的正相关性, 即含油率越高, 其发热量也越大(图 6(a))。

### 3.2.3. 油页岩灰分

灰分是指 1 g 油页岩分析样品在  $800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  条件下完全燃烧后剩余的残渣重量, 它既是区别高含碳油页岩与煤资源的关键指标, 又是衡量油页岩质量的参数<sup>[14]</sup>。

鄂尔多斯盆地长7油页岩灰分产率较高, 分布于 45.6%~90.1%, 平均为 69.5%, 主频段 55%~85%占分析样品总数的 91%(图 5(c))。

统计发现, 油页岩灰分与含油率关系密切, 灰分越低, 油页岩的含油率越高(图 6(b))。因此, 灰分可以作为判断油页岩含油率的一个辅助指标。

前人根据中国油页岩灰分、含油率分布特征, 划分两个级别<sup>[15]</sup>: 低灰分油页岩(灰分<65%, 含油率大于 10%), 高灰分油页岩(灰分: 65%~90%, 含油率 3.5%~10%)。因此, 鄂尔多斯盆地油页岩总体上属于高灰分油页岩。

### 3.2.4. 油页岩全硫含量

全硫含量是指油页岩中各种硫分的总和, 全硫含量越高, 油页岩利用时的潜在环境污染程度越大。根据全硫含量可将油页岩分为 5 级<sup>[14]</sup>: 特低硫油页岩( $\leq 1.0\%$ ), 低硫油页岩(1.0%~1.5%), 中硫油页岩(1.5%~2.5%), 富硫油页岩(2.5%~4.0%), 高硫油页岩( $> 4.0\%$ )。

统计表明, 鄂尔多斯盆地长7油页岩全硫含量为

0.01%~14.01%, 平均为 2.82%, 主要分布在 0%~2.0% 和 3.0%~7.0%两个区间段, 分别占分析样品总数的 88%(图 5(d)), 总体上属中-富硫油页岩。

### 3.2.5. 油页岩水分

本文所指的水分是指吸附、凝聚在油页岩的小毛细孔(直径约小于  $10\ \mu\text{m}$ )中的水分, 也称内在水分, 又叫吸附水<sup>[16]</sup>。水分含量与矿物质颗粒间的微孔结构有关, 油页岩页理越发育、微孔隙越多, 其含水量也越高。

鄂尔多斯盆地长7油页岩水分为 0.8%~10.0%, 平均为 3.5%, 主要分布在 2.0%~6.0%, 占分析样品总数的 79%(图 5(e))。

### 3.2.6. 油页岩挥发分

挥发分也是油页岩品质好坏的一个重要指标, 是指油页岩在高温、隔绝空气的情况下, 其有机质分解放出的气态物质。挥发分越高, 其含油率也越高, 但两者之间不存在简单的正比关系<sup>[16]</sup>。

鄂尔多斯盆地长7油页岩挥发分为 4.86%~28.21%, 平均为 15.05%, 分布在 15%~24%的主频段占分析样品总数的 47%(图 5(f))。

## 3.3. 油页岩有机地球化学特征

### 3.3.1. 油页岩有机质丰度和类型

有机质是油气形成的物质基础, 有机质丰度受盆地中生物发育程度及其保存条件等因素的控制, 通常根据有机碳含量(TOC)、氯仿沥青“A”、生烃潜力( $S_1 + S_2$ )和总烃(HC)含量等指标进行评价<sup>[17]</sup>。

根据作者采样完成的有机地球化学测试资料(表 1), 并结合前人的研究成果<sup>[3-6]</sup>, 认为长7油页岩有机

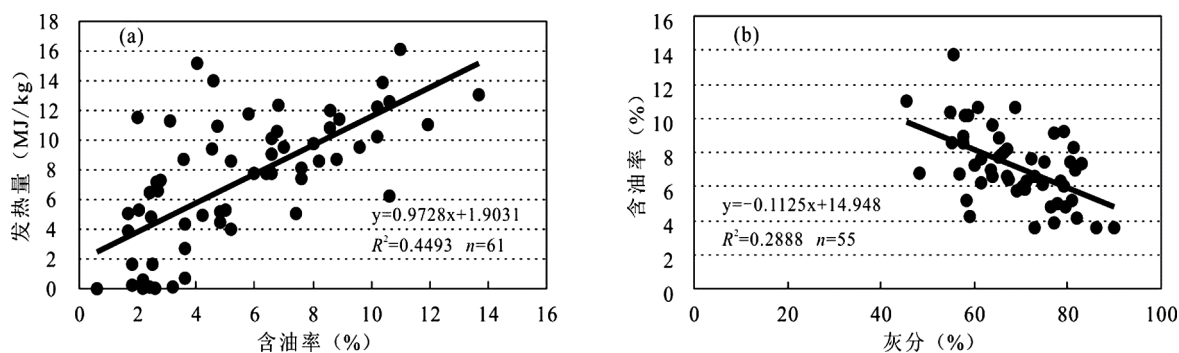


Figure 6. The relations between oil content and calorific value, oil content and ash content of the Chang 7 member oil shale  
图 6. 长7油页岩含油率与发热量、灰分含量关系图解

Table 1. Organic geochemical characteristics of the Chang 7 member oil shale samples (%)  
表 1. 长7油页岩样品有机地球化学特征

样品编号	最高热解峰温(°C)	S <sub>1</sub> (mg/g)	S <sub>2</sub> (mg/g)	S <sub>1</sub> + S <sub>2</sub> (mg/g)	S <sub>3</sub> (mg/g)	有机碳含量(%)
Y09-001	438	1.16	6.12	7.28	2.66	18.05
Y09-003	437	1.58	44	45.58	4.56	22.53
Y09-004	437	0.76	24.84	25.6	4.6	8.5
Y09-005	432	1.82	72.64	74.46	17.44	19.32
Y09-007-A	440	1.2	14.32	15.52	1.74	6.35
Y09-007-C	440	14.58	97.68	112.26	1.74	12.16
Y09-008	433	5.32	80.8	86.12	9.36	1.57
Y09-009	431	11.74	96.72	108.46	5.28	3.98
Y09-011	439	12.54	106.64	119.18	1.26	32.46
Y09-012	439	6.58	134.16	140.74	1.94	36.75
Y09-013	440	3.84	96.56	100.4	1.36	22.39
Y09-014	439	4.54	92.24	96.78	1.08	24.71
Y09-015	436	4.06	94.96	99.02	2.84	26.31
Y09-016	435	4.08	83.68	87.76	1.02	23.77
Y09-017	435	1.9	62.04	63.94	0.82	17.37
Y09-018	430	0.84	15.96	16.8	2.76	8.19
Y09-019	430	3.42	45.8	49.22	7.44	18.53
Y09-020	438	6.24	80.48	86.72	0.96	21.62
Y09-021	430	2.94	65.48	68.42	5.04	17.25
Y09-025	425	0.48	44.16	44.64	0.86	20.87
Y09-030	436	0.85	29.06	29.91	1.34	5.98

碳含量极高, 主要分布于 8%~26%, 最高可达 30%~40%, 平均为 19.5%; 氯仿沥青“A”主要分布于 0.6%~1.2%, 最高可达 2%, 平均为 0.9%; 生烃潜力主要分布于 20~90 mg/g, 最高可达 100 mg/g 以上; 总烃大都在 0.3%~0.6%之间, 参考陆相生油岩评价标准<sup>[18]</sup>, 总体上为优质油页岩。

统计数据表明, 油页岩有机碳(TOC)、生烃潜力(S<sub>1</sub> + S<sub>2</sub>)与含油率(T<sup>a</sup>)之间线性相关(图 7)。

有机质的类型决定着生油岩的质量, 而且很大程度上决定了生油潜能的高低。生油岩的有机质一般分为腐泥型(I)、混合型(II)和腐殖型(III), 混合型进一步可划分为腐殖腐泥型(II 1)和腐泥腐殖型(II 2)<sup>[19]</sup>。研究方法有显微组分定量分析、镜质体反射率测定、元素分析和岩石热解分析等<sup>[20]</sup>。

杨华和张文正(2005)<sup>[21]</sup>对长7油页岩段干酪根的

镜下观察发现, 干酪根以无定形类脂体为主, 难以找到镜质体等陆源有机质组分, 见有少量的刺球藻和孢子, 成分单一, 表明长7油页岩段干酪根的来源主要为湖生藻类等低等生物。作者利用岩石热解参数中的氢指数(I<sub>H</sub>)与氧指数(I<sub>O</sub>)交汇图对其分析(图 8), 结果也表明油页岩干酪根类型为 I - II 1 型。

### 3.3.2. 油页岩有机质成熟度

有机质成熟度表示有机质生烃转化的热演化程度, 是衡量油页岩实际产油能力的一个重要指标。

分析表明, 长7油页岩中镜质体反射率 R<sub>0</sub> 多介于 0.55%至 1.15%之间, 均值为 0.91%, 最高热解峰温 T<sub>max</sub> 介于 428°C至 451°C之间, 均值为 444°C(图 9)。根据前人对油页岩有机质演化模式和油气生成阶段的划分<sup>[22]</sup>, 长7油页岩有机质大部分处于成熟阶段,

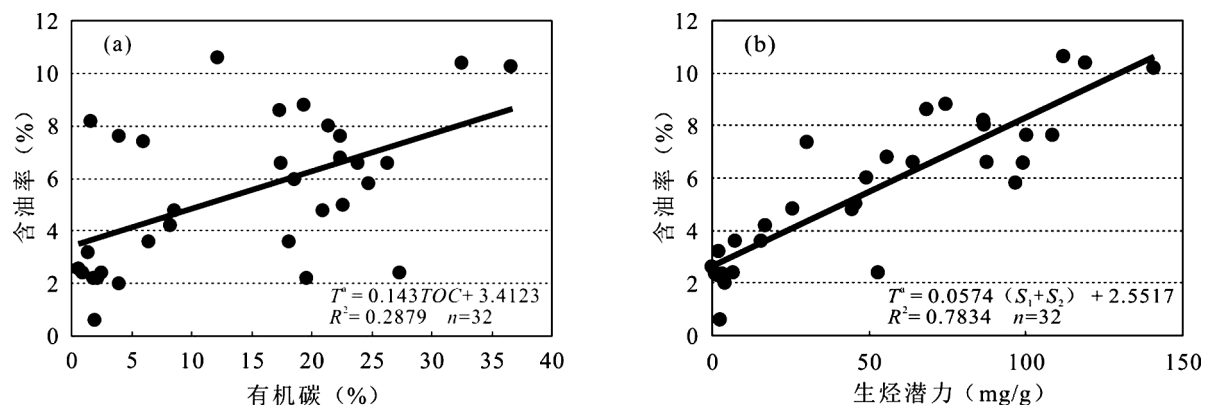


Figure 7. The relations between oil content and TOC, oil content and  $S_1 + S_2$  of the Chang 7 member oil shale of the Yanchang Formation  
图 7. 延长组长7油页岩含油率与有机碳、生烃潜力关系图解

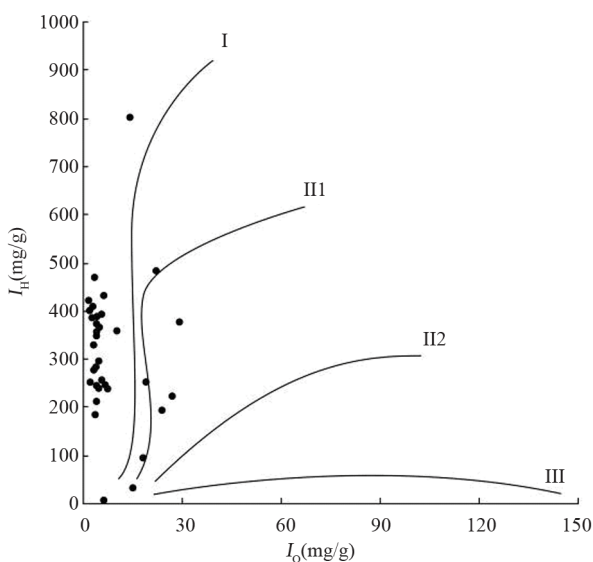


Figure 8. Cross plot of hydrogen index and oxygen index of the Chang 7 member oil shale  
图 8. 长7油页岩氢指数与氧指数交汇图

但其残余有机质丰度仍然较高，显示良好的含油性。

### 3.4. 油页岩无机地球化学特征

油页岩不仅富含 C、H、O、N 和 S 等有机元素，而且还含有大量的无机元素。无机元素主要赋存于油页岩的灰分中。油页岩无机地球化学特征的研究，一方面可以揭示其形成的古气候、古盐度等沉积环境条件，另一方面对油页岩的开发及综合利用、有毒有害元素的回收和环境保护等均具有重要意义。

作者选用 21 件样品进行常量、微量元素地球化学分析，所取样品均未经蚀变、矿化或次生风化作用，所有样品含油率均在 3.5% 以上。

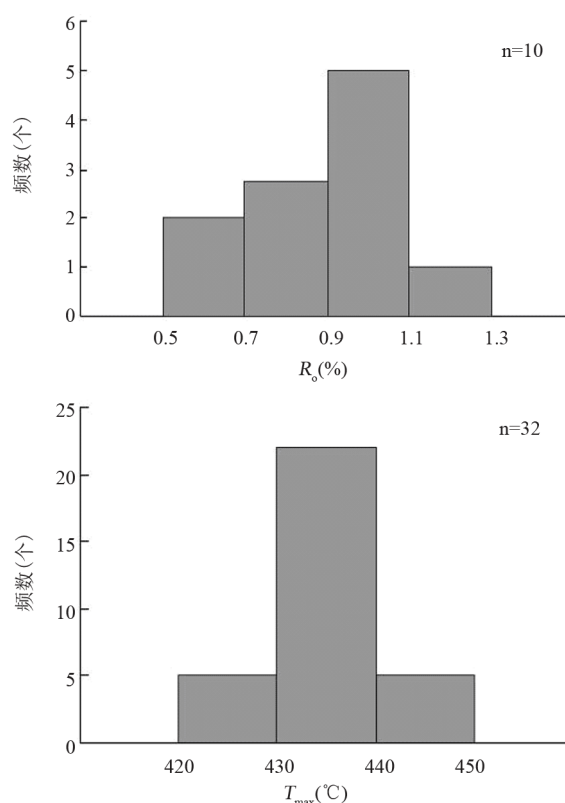


Figure 9. Histogram of  $R_o$  and  $T_{max}$  of the Chang 7 member oil shale samples  
图 9. 长7油页岩样品  $R_o$ 、 $T_{max}$  分布直方图

#### 3.4.1. 常量元素

油页岩的常量元素主要由  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $CaO$ 、 $Na_2O$  和  $K_2O$  等组成，其中  $SiO_2$  含量最高，平均 49.06%， $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$  次之，均值 13.76% 和 7.97%，其他元素的质量分数不足 10%(表 2)。油页岩的  $SiO_2$  和  $Fe_2O_3$  的含量为典型硅酸盐特征，其含量对于在工业利用中确定油页岩燃烧制建材的强度系



Table 2. Main elements contents of the Chang 7 member oil shale samples (%)  
表 2. 长7油页岩样品常量元素分析结果(%)

样品编号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O
Y09-001	49.11	14.59	11.55	3.17	2.23	2.10	0.66
Y09-003	54.97	15.93	5.83	3.11	0.98	0.66	0.67
Y09-004	58.62	16.63	5.92	3.45	1.07	1.14	0.80
Y09-005	40.64	8.14	11.93	2.22	0.26	2.32	0.45
Y09-007-A	59.66	17.81	4.97	3.47	2.08	0.71	0.95
Y09-007-C	46.04	11.84	9.49	2.68	0.72	1.48	0.87
Y09-008	53.39	12.43	5.76	2.96	0.68	0.86	0.70
Y09-009	46.85	12.14	8.39	2.93	0.64	1.19	0.51
Y09-011	31.67	7.19	16.21	1.24	0.38	0.69	0.37
Y09-012	34.52	9.78	13.37	1.55	0.85	1.17	0.52
Y09-013	46.04	13.92	9.41	2.50	0.82	0.96	0.72
Y09-014	48.23	13.36	9.01	1.57	0.88	0.80	1.08
Y09-015	43.83	12.78	7.19	2.43	0.59	1.44	0.76
Y09-016	49.37	13.38	6.09	2.72	0.71	1.24	0.63
Y09-017	54.59	14.93	6.07	2.84	0.86	0.86	0.63
Y09-018	56.58	17.29	5.46	3.78	0.69	0.46	0.53
Y09-019	45.31	10.66	7.00	2.07	0.59	0.75	0.90
Y09-020	44.29	13.10	11.06	2.64	0.90	1.16	0.55
Y09-021	54.51	14.60	5.89	3.45	0.77	0.52	0.94
Y09-025	51.03	19.39	3.46	2.54	1.22	0.76	0.60
Y09-030	61.11	19.11	3.40	2.38	1.32	0.81	1.56
平均值	49.06	13.76	7.97	2.65	0.92	1.05	0.73

数具有决定作用,按照赵隆业等(1991)<sup>[23]</sup>建立的我国油页岩灰成分分类型划分标准,长7油页岩灰分属于中熔和难熔的硅质灰分。

### 3.4.2. 微量元素

鄂尔多斯盆地长7油页岩微量元素平均地球化学组成见表3。微量元素主要有Mn、Sr、V、Zr、Rb、Cu、Zn、Cr、Pb、Ni和Co,其中Mn、Sr、V、Zr和Rb含量相对较高,均在 $1.00 \times 10^{-4}$ 以上。

为更详细地了解长7油页岩中微量元素的富集特征,作者将地质统计的页岩和粘土岩微量元素平均含量<sup>[24]</sup>进行了对比并求取其富集系数(表3)。微量元素的富集系数为样品微量元素含量与地质统计的页岩和粘土岩微量元素平均含量的比值。富集系数大于1,说明微量元素相对富集;富集系数小于1,表示微量

元素相对亏损<sup>[24,25]</sup>。

长7油页岩中微量元素富集系数大于或者接近于1的元素有V、Cu、Pb和Co,其它微量元素均有不同程度的亏损,其中强烈亏损的微量元素有Ni、Mn和Sr。其中,V、Zr、Rb、Cu、Cr、Pb、Ni、Co是一类代表陆源风化产物随河流进入湖盆沉积的外源元素,平均富集系数为1.05,而Mn和Sr是一类代表湖盆内化学沉积产物的内源元素,平均富集系数仅为0.48。这表明长7油页岩微量元素的组成既有陆源碎屑矿物的贡献,又有内源沉积的补充,为混合来源,且前者占优势。

## 4. 油页岩沉积环境及成因分析

随着沉积地球化学的发展,沉积岩的常量元素、

**Table 3. The content ( $\times 10^{-6}$ ) and element ratio of trace elements and enrichment coefficients of the Chang 7 member oil shale samples**  
**表 3. 长7油页岩样品微量元素含量( $\times 10^{-6}$ )、元素比值和富集系数**

样品编号	Mn	Sr	V	Zr	Rb	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni	Co	Sr/Cu
Y09-001	1132.1	157.4	212.6	163.4	141.0	28.8	99.8	128.1	39.7	56.3	42.3	5.5
Y09-003	61.8	524.9	167.2	192.1	181.1	118.1	47.5	85.9	47.5	-	14.0	4.4
Y09-004	81.2	377.6	144.8	144.3	180.7	91.7	40.6	76.7	44.1	-	13.5	4.1
Y09-005	1189.6	610.1	327.2	172.4	110.2	136.6	15.2	48.4	37.2	9.5	32.7	4.5
Y09-007-A	216.8	129.0	81.6	225.3	172.3	71.5	136.8	77.0	44.1	24.6	17.7	1.8
Y09-007-C	1532.6	231.8	177.3	93.5	123.4	101.5	83.9	44.1	26.7	25.7	31.2	2.3
Y09-008	72.2	359.0	191.2	162.1	142.4	104.6	26.4	83.3	43.9	4.1	13.3	3.4
Y09-009	51.8	263.7	218.5	138.8	137.7	64.0	19.7	82.1	46.8	-	37.4	4.1
Y09-011	155.8	75.5	258.4	41.0	50.3	105.4	42.5	41.5	27.5	22.5	50.5	0.7
Y09-012	320.0	120.7	262.7	69.2	69.0	189.8	73.5	54.1	28.9	36.9	44.0	0.6
Y09-013	212.0	178.1	210.2	108.9	117.9	139.6	91.7	60.1	33.9	21.3	27.1	1.3
Y09-014	349.2	125.1	185.3	133.1	68.7	123.8	78.8	39.8	46.5	32.7	26.5	1.0
Y09-015	116.0	243.8	195.6	125.9	128.8	69.4	33.7	72.2	39.4	-	17.7	3.5
Y09-016	86.7	132.3	189.2	117.0	141.5	86.5	41.0	69.6	46.8	-	16.7	1.5
Y09-017	127.9	183.5	153.0	135.1	143.7	72.4	26.1	77.8	41.4	-	14.8	2.5
Y09-018	20.1	206.7	131.8	134.9	164.7	118.2	20.8	62.0	20.3	-	11.8	1.7
Y09-019	186.3	170.4	160.1	128.6	95.4	145.0	28.5	58.7	37.6	5.1	18.5	1.2
Y09-020	198.4	118.4	161.0	80.8	112.0	121.8	78.7	62.4	29.0	15.0	34.9	1.0
Y09-021	42.7	204.5	154.4	154.2	166.6	97.5	24.8	75.3	58.0	-	13.3	2.1
Y09-025	158.3	147.4	120.6	196.9	182.3	64.5	243.5	105.1	35.3	19.7	14.2	2.3
Y09-030	78.2	144.8	81.6	186.2	106.7	113.8	89.3	46.9	41.8	35.9	8.5	1.3
平均值	304.3	224.0	180.2	138.3	130.3	103.1	63.9	69.1	38.9	23.8	23.8	2.4
粘土和页岩*	670	450	130	200	200	57	80	100	20	95	20	
富集系数	0.45	0.50	1.39	0.69	0.65	1.81	0.80	0.69	1.94	0.25	1.19	

注: \*数据引自文献[24]; “-”为未检测出数据。

微量元素组分含量和某些元素的比值以及同位素值常被作为标示沉积环境的有效指标<sup>[26]</sup>。元素在地层中迁移富集规律,一方面取决于元素自身的物理化学性质,另一方面又受到古气候、古环境等外界条件的极大影响。本文主要根据油页岩样品的地球化学特征对鄂尔多斯盆地长7油页岩的古气候、古沉积环境进行分析,进而论述油页岩成因。

#### 4.1. 古气候条件

Sr/Cu 比值可反映干湿气候。通常,该值介于 1.3~5.0 之间指示温湿气候,该值大于 5.0 则指示干热气候

<sup>[27]</sup>。长7油页岩样品的 Sr/Cu 比值差异不大(表 3)、分布稳定,其中仅 Y09-001 号样品值大于 5.0,71%的样品 Sr/Cu 比值介于 1.3~5.0 之间,平均比值为 2.4。由此可见,长7油页岩形成于气候持续稳定的温暖潮湿环境。

微量元素 V/(V + Ni)、U/Th 比值能有效的反映沉积环境的氧化还原条件<sup>[28-31]</sup>。Hatch 和 Leventhal (1993)<sup>[28]</sup>对北美堪萨斯州上宾夕法尼亚系黑色页岩的研究表明,微量元素 V/(V + Ni)高比值(0.84~0.89)反映水体分层及水体中出现 H<sub>2</sub>S 的厌氧环境,中比值(0.54~0.82)为水体分层不强的厌氧环境,低比值(0.46~

0.60)为水体分层弱的贫氧环境。Jones 和 Manning (1994)<sup>[30]</sup>指出,微量元素 U/Th 比值为判别古氧相最可靠的指标, U/Th 大于 1.25 对应厌氧—极贫氧环境, 1.25~0.75 对应贫氧环境, 小于 0.75 对应富氧环境。

综合张文正等(2008)<sup>[32]</sup>发表的数据和本次测试的样品(表 3), 鄂尔多斯盆地长7油页岩 V/(V + Ni)比值主要分布于 0.8~0.9, 平均比值为 0.88; U/Th 比值均大于 1, 最高达 10 以上(图 10), 这些均表明油页岩形成时湖盆为水体分层明显、厌氧的强还原沉积环境。

#### 4.2. 古盐度和古水深

Sr/Ba 比值是古盐度判断的灵敏标志, 一般认为海相沉积 Sr/Ba 比值大于 1.0, 陆相沉积小于 0.6, 过渡相沉积为 0.6~1.0<sup>[33,34]</sup>。B 也常作古盐度恢复的重要指标, 一般咸水环境 B 含量大于  $1.00 \times 10^{-4}$ , 半咸水环境 B 含量  $7.0 \times 10^{-5} \sim 1.00 \times 10^{-4}$ , 淡水环境 B 含量小于  $7.0 \times 10^{-5}$ <sup>[35-37]</sup>。长7油页岩的 Sr/Ba 比值普遍较低, 一般都小于 0.5, B 含量为  $1.11 \times 10^{-5} \sim 9.19 \times 10^{-5}$ <sup>[32]</sup>, 这说明长7油页岩沉积期湖盆水体盐度不高, 为淡水 - 半咸水的湖相沉积环境。

盆地古水深的判别, 可根据沉积物的分布规律、

沉积构造、古生物类型、古生态及自生矿物等多方面的标志来确定(图 11)。露头区油页岩多与中层-薄层状暗色泥岩、泥质粉砂岩互层产出, 粘土质含量高; 井下长7油页岩样品外观呈黑色, 水平层理发育, 偶见介形虫及鱼鳞化石、多含丰富的黄铁矿颗粒, 并可见泥包砂等深水沉积构造, 深湖-半深湖相沉积特征明显。吉利明(2006)<sup>[41]</sup>在鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组长8 - 长7段钻井岩心中发现了丰富光球型凝源类(Leiosphaeridia)和葡萄藻(Botrycoccusbraunii)为主的藻类化石, 它们常保存在缺氧环境下的暗色泥岩或者

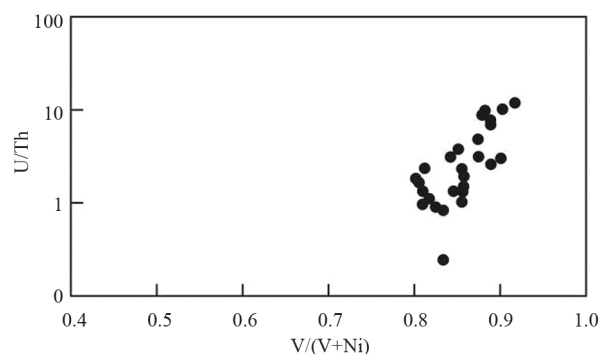


Figure 10. Correlation between V/(V + Ni) and U/Th of the Chang 7 member oil shale (modified from Ref. [32])

图 10. 长7油页岩 V/(V + Ni)、U/Th 相关图解(据文献[32]修改)

判断标志		水体深度									
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45m
岩性	砾岩、砂岩	[Red bar from 0 to 10m]									
	泥质粉砂岩	[Red bar from 5 to 20m]									
	暗色泥岩	[Red bar from 20 to 45m]									
	油页岩	[Red bar from 35 to 45m]									
沉积构造	雨痕、干裂	[Red dot at 0m]									
	大型交错层理	[Red bar from 0 to 5m]									
	波状层理、平行层理	[Red bar from 5 to 20m]									
	水平层理	[Red bar from 20 to 45m]									
生物化石	鲍马序列、槽模、丘状交错层理	[Red bar from 35 to 45m]									
	虫孔	[Red dot at 0m]									
	鱼、鱼鳞、鱼粪	[Red bar from 5 to 25m]									
	介形虫	[Red bar from 5 to 30m]									
遗迹化石	瓣鳃类	[Red bar from 5 to 20m]									
	石针管迹	[Red dot at 0m]									
	卷迹相	[Red bar from 5 to 10m]									
	伸展迹相	[Red bar from 10 to 15m]									
自生矿物	始网迹相	[Red bar from 15 to 20m]									
	古网迹相	[Red bar from 20 to 30m]									
	赤铁矿	[Red dot at 0m]									
	褐铁矿	[Red bar from 0 to 5m]									
	菱铁矿	[Red bar from 5 to 20m]									
	黄铁矿	[Red bar from 20 to 45m]									

Figure 11. Indicators of paleobathymetry of sedimentary basins (drawing from Ref. [38-40])

图 11. 沉积盆地古水深判断标志(据文献[38-40]改绘)

砂质泥岩中,代表着较深水的沉积环境。综合判断,长7油页岩主要形成于水体深度大于15 m的半深湖-深湖环境。

### 4.3. 油页岩成因分析

油页岩是构造背景、沉积环境、生物演化等共同作用的产物。油页岩大部分产于湖相、成煤沼泽及陆棚浅海环境,尤其是深湖或大型永久性湖泊之中。

从构造-沉积旋回分析,鄂尔多斯盆地三叠系延长组为一个完整的水进-水退沉积旋回(图2)。长10~长7为湖进阶段,湖盆逐渐扩大,水体逐渐加深,纵向上沉积物由粗变细,其中长7达到最大;长6~长1为水退阶段,虽有反复,但总体上水体逐渐变浅,湖盆逐渐缩小直至消亡。需要强调的是,受台内差异沉降作用影响,鄂尔多斯盆地长7期湖盆急剧下沉,为延长期最大湖侵期,湖盆面积达到最大,几乎覆盖整个盆地。长7油页岩正是形成于湖盆发育鼎盛时期的湖盆扩展体系域的欠补偿阶段,在陆相层序地层学中将其称为“密集段”,通常由半深湖-深湖相细粒沉积物组成,是湖水大范围扩大造成的陆源碎屑物供给速率远小于可容空间增长速率时形成的欠补偿性沉积物,往往以薄而连续的地层出现,一般位于层序中最大湖泛面附近。

油页岩作为一种重要的烃源岩,其形成的首要条件是要有大量丰富的原始有机物质。湖泊沉积物有机质主要由湖泊自生有机质和陆源有机质两部分组成。对于大型湖泊而言,其自身水生生物产生的有机质,即湖泊自身的生产力至关重要,已被许多研究所证实<sup>[42,43]</sup>。鄂尔多斯盆地延长组油页岩有机质主要为湖生低等生物,以藻类为主,底栖生物缺乏,因此湖泊自身的生产力为鄂尔多斯盆地长7油页岩的形成提供了最主要的有机物质来源。晚三叠世,本区气候温暖潮湿,降雨量丰富,藻类、低等生物和陆地植被繁盛,有机质来源丰富,油页岩干酪根类型主要为I-II型,生烃潜力大,为油页岩的形成提供了雄厚的物质基础。

油页岩的形成还必须有良好的保存条件。通常,闭塞滞流的还原环境是油页岩形成过程中有机质保存的最有利条件,而稳定的湖水分层是形成还原环境的关键,盐度差异能形成比较稳定的湖水分层。湖盆上部为密度较小的淡水,而下部为密度较高的半咸水

-咸水,这样的上下水体不易产生对流,上部富氧的淡水环境适合多门类的水生植物、鱼类、藻类、菌类及浮游生物的生长与繁殖,而下部缺氧的还原环境则有利于有机质的堆积和保存。油页岩沉积环境分析表明,长7油页岩形成时湖泊底层水具备缺氧的强还原条件,而这个条件的形成又是相应时期内湖水分层的结果。具分层特征的湖泊水体表层富氧,底层深水则由于水循环作用十分微弱或完全停滞而处于封闭缺氧状态,使藻类等有机物在沉积物中得以保存下来,形成有机碳含量高、含油率较高的油页岩。因此,湖水分层对油页岩的形成具有重要的控制作用。

## 5. 主要结论

1) 鄂尔多斯盆地油页岩主要发育于延长组第三段长7油层组,露头区主要分布在盆地南部,宜君-旬邑-彬县一带,大致呈弧形展布。矿层厚度一般为5~30 m,最厚可达40 m。油页岩颜色较深,呈深灰色、灰黑色-黑色“纸片”状,页理发育。

2) 长7油页岩为高灰分、中-富硫、中品级的油页岩。含油率平均为7.0%,发热量平均为9.10 MJ/kg,灰分平均为69.5%,全硫含量平均为2.82%;干酪根类型主要为腐泥型(I)和腐殖腐泥型(II1),有机质成熟度较高,大部分已经进入成熟的生油阶段,为有机质高度富集的优质油页岩。

3) 长7油页岩的常量、微量元素分析表明,其灰分属于中熔和难熔的硅质灰分,微量元素的组成既有陆源碎屑矿物的贡献,又有内源沉积的补充,为混合来源,且前者占优势。

4) 地质地球化学特征表明,长7油页岩形成于气候温暖潮湿,湖泊水深大于15 m的半深湖-深湖,淡水-半咸水,封闭、滞流、缺氧的强还原沉积环境。晚三叠世长7油页岩沉积期间,生物繁盛,湖泊自身的生产力为盆内长7油页岩的形成提供了最主要的有机物质来源,稳定的湖水分层形成的湖盆底部缺氧的强还原环境,有利于有机质的堆积和保存,从而形成了有机质类型较好、有机碳含量较高、含油率较高的油页岩。

## 参考文献 (References)

- [1] 钱家麟,王剑秋,李术元. 世界油页岩资源利用和发展趋势

- [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 877-887.
- [2] 刘招君, 董清水, 叶松青等. 中国油页岩资源现状[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 869-876.
- [3] 卢进才, 李玉宏, 魏仙样等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组油页岩沉积环境与资源潜力研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 928-932.
- [4] 张文正, 李善鹏, 徐正球. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油页岩工业利用前景分析[J]. 低渗透油气田, 2006, 11(1-2): 13-17.
- [5] 李玉宏, 李金超, 姜亨等. 鄂尔多斯盆地何家坊地区三叠系油页岩特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(1): 65-71.
- [6] 白云来, 马龙, 吴武军等. 鄂尔多斯盆地油页岩的主要地质特征及资源潜力[J]. 中国地质, 2009, 36(5): 1123-1137.
- [7] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 48-163.
- [8] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 3-4.
- [9] 刘少峰, 柯爱蓉, 吴丽云等. 鄂尔多斯西南缘前陆盆地沉积物物源分析及其构造意义[J]. 沉积学报, 1997, 5(1): 156-160.
- [10] 孙国凡, 刘景平, 柳克琪等. 华北中生代大型沉积盆地的发育及其地球动力学背景[J]. 石油与天然气地质, 1985, 6(3): 278-287.
- [11] 张抗. 鄂尔多斯断块构造和资源[M]. 西安: 陕西省科学技术出版社, 1989: 193-250.
- [12] 周鼎武, 李文厚, 张云翔等. 区域地质综合研究的方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 121-133.
- [13] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷 12): 长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 8-145.
- [14] 董清水, 王立贤, 于文斌等. 油页岩资源评价关键参数及其求取方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 899-903.
- [15] 刘招君, 杨虎林, 董清水等. 中国油页岩[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 27.
- [16] 钱家麟, 尹亮, 王剑秋等. 油页岩——石油的补充能源[M]. 北京: 中国石化出版社, 2008: 53-60.
- [17] 高志龙, 何生, 陈建渝. 合浦盆地生油岩有机地球化学特征[J]. 地球科学, 1995, 20(1): 101-106.
- [18] 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: 186-187.
- [19] 张厚福, 方朝亮, 高先志等. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 45-55.
- [20] 涂建琪, 王淑芝, 费轩冬. 干酪根有机质类型划分的若干问题的探讨[J]. 石油实验地质, 1998, 20(2): 187-191.
- [21] 杨华, 张文正. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147-154.
- [22] 关德师, 牛嘉玉, 郭丽娜. 中国非常规油气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 274.
- [23] 赵隆业, 陈基娘, 王天顺. 关于中国油页岩的工业成因分类[J]. 煤田地质与勘探, 1991, 19(5): 2-6.
- [24] 南京大学地质学系. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 345-346.
- [25] 刘俊海, 吴志轩, 于水等. 丽水凹陷古新统微量元素地球化学特征及其地质意义[J]. 中国海上油气, 2005, 17(1): 8-11.
- [26] 王随继, 黄杏珍, 妥进才等. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义[J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 65-70.
- [27] 莱尔曼. 湖泊的化学地质学和物理学[M]. 王苏民译, 北京: 地质出版社, 1989: 1-370.
- [28] J. R. Hatch, J. S. Leventhal. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA. *Chemical Geology*, 1992, 99(1-3): 65-82.
- [29] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 1-145.
- [30] B. J. Jones, A. C. Manning. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 1994, 111: 111-129.
- [31] 王争鸣. 缺氧沉积环境的地球化学标志[M]. 甘肃地质学报, 2003, 12(2): 55-58.
- [32] 张文正, 杨华, 杨奕华等. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59-64.
- [33] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地化标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1979, 7(2): 51-60.
- [34] 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20-25.
- [35] P. E. Potter, N. P. Shimp and J. Witters. Trace element in marine and fresh-water argillaceous sediment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, in facies analysis. *Sedimentary Geology*, 1963, 4(1): 153-175.
- [36] H. Hard. Boron Content of sediment as a tool in facies analysis. *Sedimentary Geology*, 1970, 4(1): 153-175.
- [37] E. L. Couch. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data. *AAPG Bull*, 1971, 55(10): 1829-1837.
- [38] 张世奇, 任延广. 松辽盆地中生代沉积基准面变化研究[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(2): 2-5.
- [39] 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 1-407.
- [40] 刘宝琛, 曾允孚. 岩相古地理基础和工作方法[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 85-96.
- [41] 吉利明, 吴涛, 李林涛. 陇东三叠系延长组主要油源岩发育时期的古气候特征[J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 424-431.
- [42] K. Kelts, K. J. Hsu. Freshwater carbonate sedimentation. In: A. Lerman, Ed., *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*. Berlin: Springer-Verlag, 1978: 290-350.
- [43] 汪品先, 刘传联. 含油盆地古湖泊学研究方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 1-230.