

文章编号: 1671- 1505 (2009) 01- 0105- 10

# 中国陆相油页岩特征及成因类型<sup>\*</sup>

刘招君<sup>1, 2</sup> 孟庆涛<sup>1, 2</sup> 柳 蓉<sup>1, 2</sup>

1 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2 东北亚生物演化与环境教育部重点实验室, 吉林长春 130026

**摘 要** 中国油页岩资源丰富, 以陆相沉积为主, 主要赋存于中新世, 颜色通常为黑色—深灰色和灰褐色—棕褐色, 且富矿油页岩一般比贫矿油页岩的颜色深。油页岩中矿物成分以石英、长石和黏土矿物为主, 黏土矿物中高岭石含量相对较高。中国陆相油页岩总体质量特征为中等偏好, 含油率大于 5% 的页岩油资源占 67. 64%, 灰分产率一般为 53. 27% ~ 84. 35%, 多属高灰分油页岩。发热量各地区差别较大, 最小值为 4. 19 MJ/kg, 最大值可达 34. 60 MJ/kg, 而且同一地区不同层位的油页岩发热量也不相同。就伴生元素而言, 油页岩中富含大量的稀土元素和微量元素, 使油页岩具有巨大的综合利用潜力。从有机成因角度, 中国陆相油页岩可以分为腐泥型油页岩、腐殖腐泥型油页岩和腐泥腐殖型油页岩; 从油页岩的沉积环境成因角度, 可以划分为拗陷湖成油页岩、断陷湖成油页岩和断陷湖泊—沼泽油页岩; 从油页岩形成的水体性质角度, 可以划分为淡水油页岩和半咸水油页岩。中国陆相油页岩中湖泊—沼泽油页岩一般与煤伴生, 多为腐殖腐泥型油页岩和腐泥腐殖型油页岩; 而湖成油页岩一般单独存在或为煤层顶板, 多为腐泥型油页岩和腐殖腐泥型油页岩。

**关键词** 陆相油页岩 赋存特征 物理性质 矿物成分 地球化学 成因类型

**第一作者简介** 刘招君, 男, 1951 年生, 吉林大学教授, 博士生导师, 油气与盆地研究所所长, 东北亚生物演化与环境教育部重点实验室副主任。主要从事层序地层学、含油气盆地分析、油页岩成矿理论、油页岩资源评价与综合利用研究。通讯地址: 吉林省长春市建设街 2199 号吉林大学油气与盆地研究所; 邮编: 130061; E-mail: liuzj@jlu.edu.cn

中图分类号: P618. 12 文献标识码: A

## Characteristics and genetic types of continental oil shales in China

Liu Zhaojun<sup>1, 2</sup> Meng Qingtao<sup>1, 2</sup> Liu Rong<sup>1, 2</sup>

1 College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin

2 Key-Lab for Evolution of Past Life and Environment in Northeast Asia, Ministry of Education, Changchun 130026, Jilin

**Abstract** China is rich in oil shale resource with the oil shale being dominated by the continental deposition. Oil shale is mainly deposited in the Mesozoic-Cenozoic times and it has black gray-dark gray, grayish brown-brown colors. In most cases, the color of rich oil shale is darker than that of poor oil shale. The mineral compositions of oil shale mainly include quartz, feldspar and clay minerals, and the content of kaolinite in clay minerals is relatively high. The quality of oil shale in China are generally good and the oil shale resource, whose oil yield is more than 5%, makes up 67. 64% of the whole oil shale resource. The

\* 863 国家高技术研究发展计划项目 (编号: 2007AA06Z202)、国土资源部“十一五”重大创新项目 (编号: 20080106-1) 和国土资源部公益性行业科研专项 (编号: 200811013) 资助

收稿日期: 2008-07-03 改回日期: 2008-08-25

content of ash is usually between 53.27% and 84.35%, so oil shale belongs to high-ash oil shale. The calorific values of oil shale in each area are different. The minimum calorific value is 4.19 MJ/kg and the maximum calorific value is 34.60 MJ/kg. Even in the same area, the calorific values of oil shale in different formations are different. As far as associated elements are concerned, oil shale is rich in a lot of rare-earth and trace elements, which makes oil shale having great comprehensive utilization potential. From the perspective of organic genesis, continental oil shale in China can be divided into sapropelic, humosapropelic and saprohumolic oil shale. As for sedimentary environment of oil shale, it can be divided into depression-lacustrine, rift lacustrine and fault limnic oil shale. According to the characteristics of waters where oil shale was deposited, it can be divided into fresh water and brackish water oil shale. Generally, in continental oil shale in China, limnic oil shale usually coexists with coal and is mostly humosapropelic and saprohumolic oil shale, while lacustrine oil shale usually exists alone or as the top layer of coal measure and is mostly sapropelic and humosapropelic oil shale.

**Key words** continental oil shale; occurrence features; physical property; mineral composition; geochemistry; genetic types

**About the first author** Liu Zhaojun was born in 1951. He is a professor and supervisor for Ph.D students of Jilin University. He is also the director of Petroleum & Basin Institute and a vice director of Key-Lab for Environment of Past Life and Environment in Northeast Asia Ministry of Education of Jilin University. His research interests are sequence stratigraphy, oil and gas-bearing basin analysis, oil shale mineralization theory, oil shale resource evaluation and utilization. Address: Petroleum and Basin Institute of Jilin University, No. 2199, Jianshe Street, Changchun City of Jilin Province, Postcode 130061. E-mail: liuzj@jlu.edu.cn

能源问题关系到国家经济发展、社会稳定和国家安全,而中国油气资源总体形势比较严峻。面对当前国际油价持续升高、对外进口程度逐年增加的现状,提高中国油气资源保障能力的任务十分艰巨,加强油气资源勘探工作压力大,急需寻找新的后备资源。油页岩等非常规油气资源的勘探开发逐步进入国家的能源战略视野。中国是一个油页岩资源大国,2004—2006年开展的首次“全国油页岩资源评价”结果表明,中国油页岩资源储量  $7199 \times 10^8$  t,折合成页岩油资源为  $476 \times 10^8$  t,仅次于美国。然而在油页岩的研究方面,中国尚处于起步阶段,基础地质研究比较薄弱,尤其是在油页岩成因及成矿理论方面,而油页岩特征及成因类型的研究是开展此类工作的基础,也是油页岩开发和综合利用方案的主要依据。

有关油页岩特征及分类,国内外学者开展过一些工作(Yen and Chilingarion, 1974; 姚军, 1975; Smith, 1980; 李金和, 1983; 侯祥麟, 1984; Hutton, 1987, 1988, 1991; 赵隆业等, 1990; Dyni, 2003等),如 Hutton (1987,

1988, 1991)提出了油页岩的有机成因分类方案; O'Leary<sup>3</sup> (1973)提出了油页岩的工业成因分类; 赵隆业等(1990)、侯祥麟(1984)等也对油页岩的工业成因分类进行了研究。但总的来说,这些分类方案都较侧重于油页岩的工艺性质方面,对油页岩的地质特征及成因方面涉猎尚少。

笔者试图在首次“全国油页岩资源评价”工作的基础上,系统研究中国陆相油页岩的赋存特征、物理性质、矿物成分、地球化学特征及质量特征,从油页岩有机成因、沉积环境等角度探讨中国陆相油页岩的成因类型。

## 1 油页岩概念

早在100多年前,油页岩就被冠有多种不同的名称,如烛煤、藻煤、明矾页岩、沥青煤、黑沥青、托班藻煤、气煤、乌龙岗页岩、库克页岩等。很多国家学者也讨论了“油页岩”这一术语,但至今仍未有一个被广为接受的定义。

Плутин等(1983)认为,油页岩是固体

可燃矿产中的一种岩石类型, 它富含腐泥质或腐殖腐泥质, 有机质含量占 20% ~ 80%, 为化学成因或碎屑成因的沉积岩 (转引自赵隆业等, 1990)。Avery (1968) 认为, 油页岩是黏土质、石灰质或硅质的沉积岩, 含有腐泥质或腐殖腐泥质, 有机质含量占 15% ~ 50%, 并均匀地分布在矿物质中, 加热到 500 °C (无空气进入) 和 1000 °C (有空气进入) 时, 能产出页岩油和可燃气体 (转引自赵隆业等, 1990); Dyni 等 (2003) 认为, 油页岩是一种细粒沉积岩, 其中包含大量有机物, 通过粉碎、蒸馏工艺可以提炼出大量的石油和可燃气体。侯祥麟 (1984) 认为, 油页岩是可燃性矿产之一, 由矿物质和有机质组成, 有机质中氢含量较高, 低温干馏可得碳氢比类似天然石油的页岩油。

Wang 和 O'Brien (1983) 认为, 油页岩是可燃有机岩干酪根型综合的有机-无机能源化学矿产, 为海洋、湖泊、三角洲或河流条件下沉积成因形成的, 这种矿产是固体可燃的, 含腐泥成分、腐泥腐殖成分或腐殖腐泥成分, 干酪根含量介于 10% ~ 60%, 均匀分布在硅酸盐、铝硅酸盐或碳酸盐成分的矿物质中, 热加工时产生焦油、气体和灰渣 (半焦), 发热量不小于 6.28 kJ/g 在综合无废料利用中可保证有经济效益。赵隆业等 (1990) 认为, 油页岩是高灰分的固体可燃有机体, 若作为工业矿产要求含油率大于 5%, 发热量超过 7.5 kJ/g 它可以是腐泥型、腐殖型或混合成因的, 和煤的主要区别是灰分超过 40%, 和碳质页岩的主要区别是含油率大于 5% 以上。

上述各个研究者都是从自身研究方向出发或侧重对油页岩的某一特征或性质进行定义, 但由于大多数作者未对油页岩含油率给出界线, 从而含糊了油页岩与非油页岩的界线。目前, 国际上把含油率不小于 0.25 桶页岩油/吨 (相当于含油率 3.5% 以上) 的页岩称为油页岩 (全国矿产储量委员会办公室, 1987)。

综合各家观点, 笔者将油页岩定义为: 油页岩 (又称油母页岩) 是一种高灰分的固体可燃有机矿产, 低温干馏可获得页岩油, 含油率大于 3.5%, 一般灰分含量大于 40%, 有机质含量较高, 主要为腐泥型、腐殖腐泥型和腐泥腐殖型, 其发热量一般不小于 4.18 MJ/kg。

## 2 中国陆相油页岩特征

### 2.1 赋存特征

中国陆相油页岩资源分布范围广泛, 覆盖了 20 个省和自治区、47 个盆地, 共 80 个油页岩含矿区。油页岩赋存层系从新生界到上古生界, 但主要见于中生界; 且受古亚洲洋、特提斯-古太平洋和印度洋-太平洋三大动力学体系控制, 油页岩形成时代从西北到东南方向逐渐变新, 即上古生界油页岩资源主要分布在中部地区, 中生界油页岩主要分布在东部、中部和青藏地区, 新生界油页岩资源主要分布在南方和东部地区 (刘招君等, 2006)。油页岩赋存盆地既有大型拗陷盆地, 也有小型断陷盆地; 油页岩赋存的沉积环境既有淡水环境, 也有半咸水环境。油页岩赋存地区的现今地理环境主要为平原、黄土塬和高原, 部分分布于低山丘陵地区; 油页岩赋存深度差别较大, 主要位于 500 m 以浅 (表 1), 具有较有利的开发利用前景。

### 2.2 物理性质

中国陆相油页岩颜色为黑色-灰黑色、褐黑色、黑褐色、灰褐色、棕褐色、褐黄色或灰色-深灰色, 一般富矿油页岩比贫矿油页岩颜色深, 且光泽也相对较强。就地域分布而言, 中国南方地区油页岩的颜色比西部、东部和中部地区相对较浅, 前者呈深灰色-棕褐色, 后者多为黑色-灰黑色和灰褐色 (表 1)。油页岩一般为暗淡光泽、油脂光泽或沥青光泽, 参差状或贝壳状断口, 致密块状构造。油页岩质地细腻, 密度较碳质页岩轻, 干燥的油页岩密度只有 1.3 ~ 1.8 g/cm<sup>3</sup>, 具有弹性, 坚韧而不易破碎, 用指甲刻划呈光滑条痕, 火烧冒烟, 并带有浓烈的沥青味。

### 2.3 矿物成分

油页岩中矿物主要来源于同沉积的陆源碎屑物和生物化学作用形成的沉积物。中国陆相油页岩中的主要矿物以石英、长石、黏土矿物、方解石、菱铁矿和黄铁矿最为常见, 其中, 石英多为陆源碎屑石英, 偶见有化学沉积成因石英, 石英和长石平均含量达 46%, 黏土矿物平均含量为 24%, 碳酸盐矿物平均含量为 11.5% (表 2)。根据 X 射线衍射光谱和红外光谱分析, 油页岩的黏土矿物中高岭石的

表 1 中国主要油页岩含矿区的油页岩特征

Table 1 Characteristics of oil shale of main oil shale mines in China

大区	东部区						中部区		南方区		西部区	
含矿区名称	吉林 桦甸	辽宁 抚顺	山东 黄县	黑龙江 达连河	吉林 罗子沟	吉林 农安	陕西 彬县	陕西 铜川	广东 茂名	海南 儋州长坡	甘肃 窑街	新疆 妖魔山
赋存层系	新生界	新生界	新生界	新生界	中生界	中生界	中生界	中生界	新生界	新生界	中生界	上古生界
盆地构造样式	断陷	断陷	断陷	断陷	断陷	拗陷	拗陷	拗陷	断陷	断陷	断陷	拗陷
沉积环境	半深湖— 深湖相	半深湖— 深湖相	湖泊— 沼泽相	湖泊— 沼泽相	半深湖— 深湖相	半深湖— 深湖相	半深湖相	半深湖相	半深湖相	湖泊— 沼泽相	湖泊— 沼泽相	半深湖— 深湖相
油页岩与其他 矿产伴生关系	单独存在	为煤层 顶板	与煤伴生	与煤伴生	单独存在	单独存在	单独存在	单独存在	单独存在	与煤伴生	与煤伴生	单独存在
颜色	灰褐色	褐色	褐黑色、 棕黑色	灰色— 灰褐色	黑色— 灰黑色	灰色— 灰褐色	黑色	褐黑色	黑褐色、 棕褐色	灰色— 深灰色	灰黑色、 黑色	黑色、 褐黄色
埋深 /m	0~ 1000	0~ 750	60~ 1000	0~ 1000	0~ 800	6~ 258	0~ 500	0~ 250	0~ 722	30~ 357	0~ 1000	0~ 590
矿层累积厚度 /m	12	49	6	6	50	12	7	14	22	53	19	53
矿层面积 /km <sup>2</sup>	32	35	75	16	12	1174	48	35	37	31	11	2
平均含油率 /%	8.59	5.86	13.82	6.85	6.04	4.85	6.20	6.53	6.47	4.87	5.55	7.00
最高含油率 /%	24.80	12.00	18.49	9.12	14.37	12.10	7.00	9.25	13.00	—	17.72	14.92
平均灰分 /%	69.37	76.10	58.45	84.35	76.39	82.55	79.04	74.05	74.20	70.74	69.87	77.35
平均发热量 MJ· kg <sup>-1</sup>	9.99	4.75	11.66	7.59	9.65	4.19	—	—	6.90	5.68	6.93	7.85

含量相对较大，伊利石和伊蒙混层矿物次之，其中黑龙江达连河地区油页岩中高岭石含量最高，可达 57%，其次为广东茂名、甘肃窑街和内蒙东胜含矿区的油页岩；蒙脱石含量分布不均匀，偶见少量的方沸石。

同世界其他地区油页岩矿物成分（表 2）对比发现，不同地区、不同沉积环境形成的油页岩具有不同的矿物组合特征，如爱沙尼亚奥陶纪的库克油页岩为海相碳酸盐沉积，油页岩中石英和长石的含量为 15.8%，黏土矿物含量为 13.9%，而碳酸盐矿物含量很高，达到了 56.1%。南非、塔斯马尼亚以及苏格兰地区的油页岩同为湖相沉积，但前两者的石英和长石含量很高，分别达到 55% 和 62%，碳酸盐矿物含量很低，而后者的石英、长石矿物含量为 28%，黏土矿物含量较高，达 46%。由此看来，中国陆相油页岩中陆源碎屑矿物含量较高，其次为黏土矿物含量，碳酸盐矿物含量较低，这与南非和塔斯马尼亚油页岩在矿物组合特征上存在一定相似性。

2.4 有机地球化学特征

油页岩是一种富含有机质的岩石，主要由藻类及一部分低等生物遗骸或高等植物残体演化而成，干酪根是组成有机质的主体，主要由 C、H、O、N

和 S 等元素组成。通过对中国 9 个产地的 16 个油页岩样品进行孢粉鉴定分类、透射光—荧光干酪根显微组分鉴定分析、化学元素分析及油页岩热解参数分析（邬立言等，1986；张厚福等，1999），结果表明，中国陆相油页岩中腐泥组主要为腐泥无定形，荧光弱或无；壳质组含量很少，偶见壳质碎屑体及孢粉体；镜质组中不含结构镜质体，只含有少量的无结构镜质体；惰质组含量也很少，主要为微量的丝质体。油页岩 H/C 原子比介于 0.95~ 1.48 之间，O/C 原子比介于 0.06~ 0.21 之间。油页岩热解参数中氢指数（ $I_H$ ）介于 128~ 681 之间，氧指数（ $I_O$ ）介于 4~ 117 之间（表 3）。

油页岩镜质体反射率  $R_o$  的变化范围一般为 0.41%~ 0.60%，最大热解峰顶温度  $T_{max}$  的变化范围一般为 423~ 446℃（表 3），因此，中国绝大多数陆相油页岩处于未成熟—低成熟演化阶段。

2.5 元素地球化学特征

页岩常常是多金属元素的富集层，如中欧曼斯菲尔德的含铜页岩（二叠纪）、澳大利亚的富铅锌矿的蒙特页岩、美国印第安纳州的富铜、钼的新奥尔巴尼页岩以及中国南方黑色页岩钒矿床（张爱云和翁成敏，1989）和南方富 NiMo 的多金属黑色页岩（范德廉等，2004）等。对中国陆

表 2 中国主要油页岩含矿区的油页岩 X 衍射分析结果  
Table 2 X-ray analysis results of oil shale of main oil shale mines in China

样品编号	采样地点	矿物相对含量 %														
		黏土矿物						陆源碎屑矿物				碳酸盐矿物		其他矿物		
		高岭石	蒙脱石	伊蒙混层	伊利石	绿泥石	合计	石英	碱性长石	斜长石	合计	方解石	菱铁矿	黄铁矿	沸石	石膏
YYY- 3	黑龙江达连河	57	—	3	4	—	64	33	2	1	36	—	—	—	—	—
YYY- 4	黑龙江达连河	33	—	2	6	—	41	38	4	3	45	—	14	—	—	—
YYY- 6	吉林桦甸	2	57	—	—	—	59	14	1	1	16	22	—	3	—	—
YYY- 7	吉林安图	2	—	12	11	—	25	50	7	13	70	3	—	1	—	1
YYY- 8	吉林罗子沟	6	—	4	5	—	15	51	19	15	85	—	—	—	—	—
YYY- 12	辽宁抚顺	13	—	8	8	—	29	55	7	6	68	—	3	—	—	—
YYY- 13	辽宁抚顺	19	—	3	8	—	30	54	—	—	54	—	16	—	—	—
YYY- 14	广东茂名	46	—	3	9	—	58	31	5	2	38	—	—	4	—	—
YYY- 15	广东茂名	45	—	3	12	—	60	32	2	1	35	—	—	5	—	—
YYY- 16	广东茂名	44	—	5	12	—	61	28	4	3	35	—	—	4	—	—
YYY- 17	广东茂名	38	—	3	10	—	51	35	5	4	44	—	3	2	—	—
YYY- 34	陕西铜川	3	—	8	24	—	35	46	10	9	65	—	—	—	—	—
YYY- 37	内蒙东胜	37	—	—	9	—	46	53	—	—	53	—	—	—	—	1
YYY- 39	吉林长岭	5	—	5	23	—	33	37	7	11	55	8	—	4	—	—
YYY- 42	甘肃窑街	41	—	3	14	—	58	35	—	—	35	—	7	—	—	—
YYY- 48	辽宁抚顺	20	—	2	5	—	27	46	5	5	56	—	17	—	—	—
YYY- 49	山东黄县	2	—	15	5	—	22	38	3	3	44	13	7	—	14	—
YYY- 51	河北围场	5	—	7	9	—	21	56	14	9	79	—	—	—	—	—
YYY- 55	河南义马	13	—	—	33	9	55	30	3	2	35	—	10	—	—	—
YYY- 57	河南义马	15	—	—	23	8	46	38	4	3	45	—	9	—	—	—
爱沙尼亚 (海相)*							13.9	9	6.8	15.8	56.1					
南非 (湖相)*							30	50	5.1	55.0	1.7					
塔斯马尼亚 (湖相)*							24	56	6.0	62.0	—					
苏格兰 (湖相)*							46	17	11.3	28.0	2.9					

注：样品由吉林大学测试科学实验中心测试；\* 数据引自 Walker 1982

表 3 中国主要油页岩含矿区的油页岩有机地球化学特征  
Table 3 Organic geochemical characteristics of oil shale of main oil shale mines in China

采样地点	镜质体 反射率 $R_o$ %	有机碳 $f\%$	最大热解 峰顶温度 $T_{max}$ /℃	产油 潜力 ( $S_1 + S_2$ ) /mg•g <sup>-1</sup>	类型 指数 $I_i$ ( $S_2/S_3$ )	氢指数 $I_H$ ( $S_2$ /有机碳 含量) /mg•g <sup>-1</sup>	氧指数 $I_o$ ( $S_3$ /有机碳 含量) /mg•g <sup>-1</sup>	降解 潜率 D %	热解 分类 类型	H/C	O/C	化学 分类 类型
黑龙江达连河	0.46	7.481	436	37.59	41.02	488.04	4.07	41.71	I-II <sub>1</sub>	1.14	0.13	II <sub>1</sub>
黑龙江达连河	0.46	27.450	423	72.40	28.22	257.05	9.11	21.89	II <sub>2</sub>	0.95	0.21	II <sub>2</sub>
黑龙江达连河	0.50	19.660	444	117.02	144.71	588.86	11.90	49.40	I	1.33	0.08	I
吉林桦甸	未测	33.305	443	230.21	135.75	680.71	5.01	57.37	I	1.47	0.10	I
吉林罗子沟	0.48	17.960	437	105.97	96.50	542.71	5.62	48.97	I-II <sub>1</sub>	1.35	0.09	II <sub>1</sub>
辽宁抚顺	0.49	11.720	443	67.73	63.55	563.91	8.87	47.97	I	1.33	0.09	I
辽宁抚顺	未测	19.430	446	120.00	143.05	603.71	4.22	51.26	I	1.48	0.06	I
内蒙东胜	0.41	38.020	439	208.21	12.78	535.32	41.87	45.45	I-II <sub>1</sub>	1.28	0.14	II <sub>1</sub>
广东茂名	0.51	15.880	428	82.15	40.39	493.39	12.22	42.94	I-II <sub>1</sub>	1.32	0.17	II <sub>1</sub>
广东茂名	0.51	24.460	429	128.25	46.24	500.94	10.83	43.52	I-II <sub>1</sub>	1.34	0.15	II <sub>1</sub>
广东茂名	0.56	29.820	429	153.28	91.31	496.08	5.43	42.66	I-II <sub>1</sub>	1.3	0.13	II <sub>1</sub>
广东茂名	0.58	24.340	433	129.31	97.38	512.08	5.26	44.10	I-II <sub>1</sub>	1.31	0.12	II <sub>1</sub>
陕西铜川	0.51	25.40	432	71.26	12.07	256.54	21.26	23.29	II <sub>2</sub>	1.05	0.2	II <sub>2</sub>
新疆三工河	0.51	18.910	435	24.73	14.19	128.29	9.04	10.85	II <sub>1</sub>	1.25	0.15	II <sub>1</sub>
新疆妖魔山	0.59	9.251	439	43.30	3.94	462.54	117.28	38.85	I-II <sub>1</sub>	1.24	0.16	II <sub>1</sub>
新疆妖魔山	0.60	20.265	442	109.75	29.68	527.26	17.76	44.95	I-II <sub>1</sub>	1.41	0.13	II <sub>1</sub>

注：样品由大庆油田有限责任公司勘探开发研究院有机地球化学实验室测试

表 4 典型油页岩含矿区的油页岩稀土元素特征

Table 4 Rare-earth element characteristics of oil shale in typical oil shale mines

单位: 10<sup>-6</sup>

样品号	JHDY-1	JHDY-2	YYY6	YYY7	YYY39	YYY40	YYY104	YYY105	YYY108	NASC <sup>®</sup>
采样地点	吉林桦甸	吉林桦甸	吉林桦甸	吉林农安	吉林农安	吉林农安	吉林农安	吉林农安	吉林农安	北美页岩
La	10.800	2.870	16.30	14.00	15.60	37.42	28.05	10.04	36.30	32.00
Ce	27.300	7.730	46.20	40.50	34.70	101.34	61.08	22.69	82.29	73.00
Pr	2.850	0.940	3.67	4.50	4.13	12.39	8.76	3.20	11.21	7.90
Nd	10.100	3.430	10.30	13.80	12.30	48.00	32.43	11.99	42.30	3.30
Sm	2.700	0.910	2.29	2.89	3.00	12.59	7.08	2.67	8.99	5.70
Eu	5.110	5.080	9.34	4.64	5.11	2.81	1.72	0.76	2.06	1.24
Dy	4.580	1.810	5.98	6.56	6.05	8.59	4.65	3.99	5.45	5.80
Ho	0.300	0.150	0.39	0.40	0.34	1.71	0.96	0.55	1.11	1.04
Er	1.990	1.020	2.70	3.05	2.67	3.96	2.21	1.45	2.55	3.40
Tm	0.125	0.087	0.11	0.18	0.22	0.66	0.38	0.27	0.42	0.50
Yb	0.762	0.522	0.90	1.19	1.43	4.47	2.44	1.96	2.81	3.10
Lu	0.200	0.137	0.07	0.22	0.23	0.61	0.33	0.27	0.38	0.48
Y	4.190	1.800	6.46	10.30	10.60	46.72	20.32	13.13	23.28	

注: 样品由中国科学院长春应用化学研究所测试部测试; \* 数据引自 Haskin和 Haskin, 1966

表 5 典型油页岩含矿区的油页岩微量元素特征

Table 5 Trace element characteristics of oil shale in typical oil shale mines

单位: 10<sup>-6</sup>

元素	JHDY-1	JHDY-2	平均值	YYY40	YYY104	YYY105	YYY108	平均值	地壳 <sup>①</sup>	页岩 <sup>②</sup>
采样地点	吉林桦甸	吉林桦甸		吉林农安	吉林农安	吉林农安	吉林农安			
Nb	30.50	25.30	27.90	11.75	12.52	11.19	11.70	11.79	13.00	11.00
Zr	97.30	43.30	70.30	236.72	195.23	308.66	223.96	241.14	165.00	160.00
Hf	5.35	2.09	3.72	6.98	5.18	7.65	6.93	6.69	4.50	2.80
Rb	46.60	3.11	24.86	57.86	88.88	60.91	70.39	69.51	90.00	140.00
Cs	5.23	1.59	3.41	9.55	6.22	7.12	6.90	7.45	1.26	5.00
Co	16.00	15.40	15.70	—	—	—	—	—	25.00	19.00
Ni	25.30	41.30	33.30	—	—	—	—	—	75.00	95.00
Zn	164.00	203.00	183.50	—	—	—	—	—	70.00	80.00
Pb	—	15.30	7.65	—	—	—	—	—	12.50	20.00
Tl	0.45	0.55	0.50	2.37	0.6	0.77	0.54	1.07	—	—
Bi	—	0.91	0.45	—	—	—	—	—	0.17	0.01
In	0.01	0.04	0.02	0.08	0.06	0.08	0.07	0.07	—	—
Mo	1.33	2.36	1.85	—	—	—	—	—	1.50	2.00
W	2.79	3.14	2.97	—	—	—	—	—	0.16	2.00
Sb	5.38	6.09	5.74	—	—	—	—	—	0.20	2.00
V	43.40	44.50	43.95	—	—	—	—	—	135.00	130.00
Sr	80.50	97.80	89.15	250.00	140.00	180.00	340.00	227.50	75.00	300.00
Ba	472.00	265.00	368.50	—	—	—	—	—	425.00	580.00
Cr	89.20	68.00	78.60	—	—	—	—	—	100.00	100.00

注: 样品由中国科学院长春应用化学研究所测试部测试; ①数据引自王泽中, 1997; ②数据引自李双应等, 2003

相油页岩进行元素地球化学分析测试结果 (表 4 表 5) 表明, 中国油页岩中富含大量的稀土元素和微量元素。以吉林桦甸和农安油页岩含矿区为例, 桦甸油页岩中 La Ce Pr Nd Sm 和 Eu 等轻稀土元素相对富集, 稀土元素含量低于北美页岩 (NASC) 中的平均含量, Sb Nb Cs Zn

B 和 W 等微量元素的平均含量较地壳中同类岩石明显富集; 而农安油页岩中 La Ce Pr Nd Sm 和 Pm 等轻稀土元素相对富集, Nd Sm、Eu 和 Dy 元素平均含量超过了北美页岩的平均含量, 微量元素 Zr Hf Cs 和 Sr 平均含量较地壳中同类岩石富集。

## 2.6 质量特征

### 2.6.1 含油率

含油率是指油页岩中页岩油（焦油）所占的质量分数，是油页岩最重要的评价指标，可以用来评价油页岩的炼油适用性，以及在低温干馏工业中鉴定油页岩性质，并预测各种产品产率（董清水等，2006）。综合国内外多数学者的观点和目前以及将来油页岩开发利用状况，2006 年“全国油页岩资源评价”工作将油页岩含油率边界品位定为  $\omega$  大于 3.5%，并将其分为低、中、高 3 个品级，依次是：3.5% <  $\omega$  ≤ 5%、5% <  $\omega$  ≤ 10%、 $\omega$  > 10%，分别占全国油页岩总资源的 45.39%、37% 和 17.6%。如果按页岩油资源统计，含油率大于 5% 的页岩油资源占 67.64%，表明中国油页岩品质中等偏好。其中，高含油率油页岩主要分布在新生代小型聚煤断陷盆地，而低含油率油页岩主要分布在晚白垩纪大型含油气拗陷盆地。

本次研究分析了中国 4 个典型油页岩含矿区油页岩含油率与有机碳含量之间的相关关系，结果表明：二者之间存在明显的线性正相关性（图 1），即随着有机碳含量的增加，油页岩含油率逐渐增大。从图 1 中可以看出，当油页岩含油率大于 3.5% 时，其有机碳含量一般大于 6%，故有机碳含量可以作为判断油页岩含油率的辅助指标之一。

### 2.6.2 灰分

灰分是指 1 g 油页岩分析样品在 800 ± 10℃ 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（董清水等，2006）。通常该参数越低，油页岩的有机质含量越高、质量越好。中国主要油页岩含矿区油页岩灰分产率为 53.27% ~ 84.35%（表 1）。通过统计中国 54 个油页岩含矿区油页岩含油率与灰分含量数据结果，笔者将中国油页岩按灰分产率划分为两个级别，即低灰分油页岩和高灰分油页岩。总体上，低灰分油页岩一般灰分产率小于 65%、含油率大于 10%，而高灰分油页岩一般灰分产率介于 65% ~ 90%，含油率介于 3.5% ~ 10%。因此，中国陆相油页岩多为高灰分油页岩。

### 2.6.3 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（董清水等，2006）。中国陆相油页岩的发热量各地区差别很大，吉林农安地区油页岩发热量最小，为 4.19 MJ/kg，江西敖城地区油页岩发热量最大，可达 34.60 MJ/kg。同一地区不同层位的油页岩发热量也不相同，例如抚顺的西露天矿富矿和东露天矿富矿的发热量分别为 5.7 MJ/kg 和 5.07 MJ/kg，变化很小，而依兰富矿的发热量为 13.2 MJ/kg，两者都为富矿但发热量差别很大。油

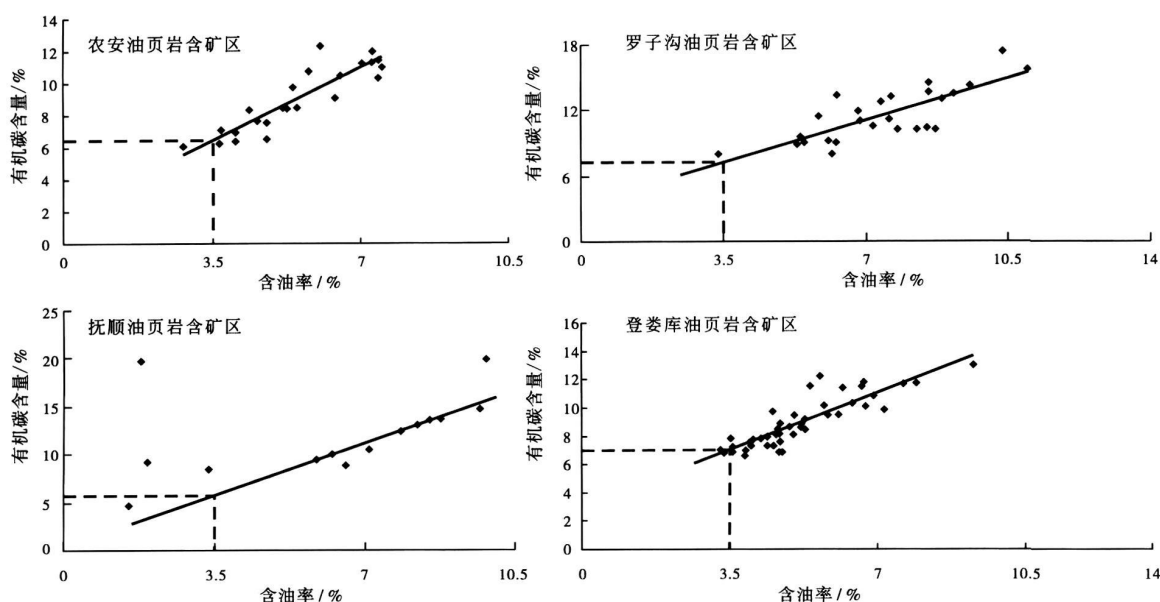


图 1 中国主要油页岩含矿区的油页岩含油率与有机碳含量关系图解

Fig. 1 Relation between oil yield and organic carbon content of oil shale in main oil shale mines in China

页岩发热量与灰分产率的相关性十分密切，相关系数可达 - 0.96 (赵隆业等，1999)。油页岩发热量与含油率的相关性不如与灰分产率密切，发热量较高的油页岩主要分布于东部黄县含矿区、罗子沟含矿区，发热量中等的油页岩分布于东部桦甸含矿区、达连河含矿区，南方茂名含矿区，西部妖魔山含矿区、窑街含矿区，发热量较低的油页岩分布于东部抚顺含矿区、农安含矿区和南方儋州长坡含矿区 (表 1)。

3 中国陆相油页岩成因类型

过去 100 年来，油页岩的名称多种多样，如烛煤、藻煤、明矾页岩、沥青煤、黑沥青、托班藻煤、气煤、乌龙岗页岩和库克页岩等。近年来，人们尝试着将多种类型的油页岩进行合理成因分类，其中被广为接受的是 Hutton (1987, 1988, 1991) 提出的分类方法，即油页岩是一种富含有机质的沉积岩，根据不同的沉积环境可以划分为陆相油页岩、湖相油页岩和海相油页岩，其中陆相油页岩主要为烛煤，湖相油页岩可以进一步划分为湖成油页岩和托班藻煤，海相油页岩可以进一步划分为库克油页岩、塔斯马尼亚页岩和海成油页岩。这种分类

方案主要是从油页岩的沉积环境角度考虑，缺点在于混淆了油页岩与煤和页岩的概念。笔者根据中国陆相油页岩特征，从油页岩有机母质来源、沉积环境等角度讨论油页岩成因类型。

3.1 有机成因类型

生油岩有机质一般分为 3 类，即腐泥型 (I)、混合型 (II) 和腐殖型 (III) (张厚福等，1999)，油页岩实际上也属于生油岩，因此也可以据此进行有机质成因分类。根据测试结果 (表 3)，把混合型进一步划分为腐殖腐泥型 (II<sub>1</sub>) 和腐泥腐殖型 (II<sub>2</sub>)。

中国 9 个产地的 16 个陆相油页岩样品的有机地球化学特征分析结果 (表 3) 表明，中国陆相油页岩有机质类型以腐泥型 (I) 和腐殖腐泥型 (II<sub>1</sub>) 为主，腐泥腐殖型 (II<sub>2</sub>) 次之 (图 2)。因此，从有机成因角度来看，中国陆相油页岩可以分为腐泥型油页岩、腐殖腐泥型油页岩和腐泥腐殖型油页岩 3 种。在分布上，腐泥型油页岩主要分布于辽宁抚顺，吉林桦甸、梅河和青海小峡等地区；腐殖腐泥型油页岩主要分布于新疆妖魔山、黑龙江达连河、吉林罗子沟、吉林农安、广东茂名、新疆三工河以及内蒙东胜等地区；腐泥腐殖型油页岩分

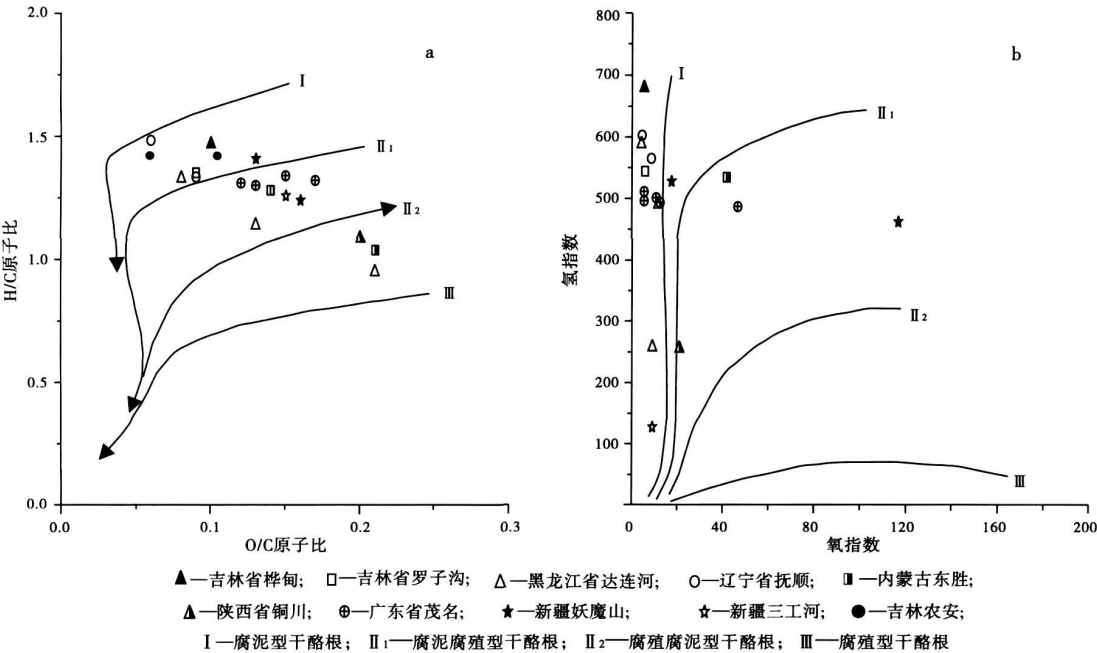


图 2 中国主要油页岩含矿区的油页岩有机质类型分布

Fig. 2 Distribution of organic matter types of oil shale of main oil shale mines in China

a—油页岩 H/C 和 O/C 原子比分布图; b—油页岩氢指数和氧指数分布图



布较少，主要分布在青海大煤沟、陕西铜川和云南维西等地区。

3.2 环境成因类型

沉积物的元素地球化学特征是对沉积盆地水体环境的响应。通常， $Sr/Ba$  值大于 1 指示海相沉积， $Sr/Ba$  值小于 1 指示淡水沉积， $Sr/Ba$  值为 0.5~1 指示半咸水相（王敏芳等，2005）。而在无海水入侵的湖相沉积中， $Sr/Ba$  值大于 1 指示干旱气候条件下的湖水咸化（刘春莲等，2005）。以抚顺、桦甸盆地为例，抚顺盆地含煤段  $Sr/Ba$  平均比值为 0.177，碳质页岩段  $Sr/Ba$  平均比值为 0.212，油页岩段  $Sr/Ba$  平均比值为 0.362，这种比值变化指示煤、碳质页岩及油页岩均沉积于淡水环境，但油页岩  $Sr/Ba$  平均比值明显高于煤和碳质页岩；而桦甸盆地油页岩  $Sr/Ba$  比值介于 0.6~0.8 表明油页岩沉积在半咸水环境（图 3）。另外， $V/(V+N i)$  大于 0.50 代表厌氧环境， $V/(V+N i)$  比值介于 0.45~0.60 之间表示贫氧的沉积环境， $V/(V+N i)$  小于 0.45 指示富氧的沉积环境（腾格尔等，2005）。抚顺盆地含煤段  $V/(V+N i)$  的平均比值为 0.54 代表贫氧的沉积环境；油页岩段  $V/(V+N i)$  的平均比值均大于 0.60 说明其处于厌氧的沉积环境（图 3）。所以，利用油页岩中微量元素比值特征来判断油页岩形成的水体环境发现，中国陆相油页岩既可以形成于淡水厌氧环境，也可以形成于半咸水厌氧环境。

因此，从油页岩形成的水体性质角度，中国陆相油页岩可以划分为淡水油页岩和半咸水油页岩 2 种类型。根据目前的研究程度，中国大多数陆相油页岩均为淡水油页岩，少数为半咸水油页岩，如吉林桦甸油页岩、内蒙巴额毛德油页岩等。

从油页岩的沉积环境成因角度，中国陆相油页岩

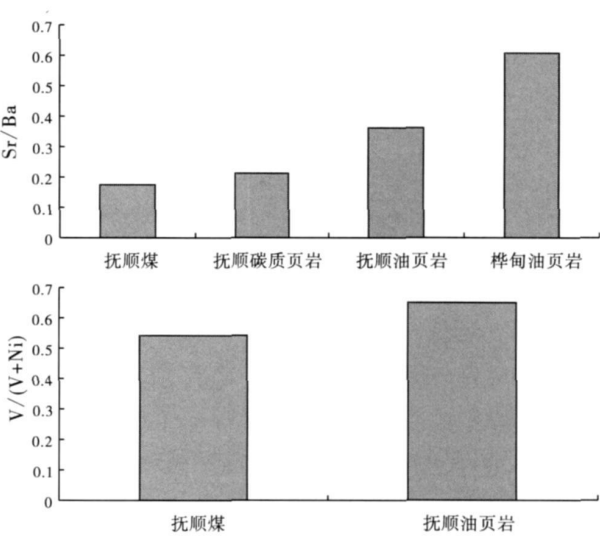


图 3 抚顺和桦甸盆地微量元素比值图  
Fig. 3 Trace element ratios of Fushun and Hudian basins

岩可以划分为拗陷湖成油页岩、断陷湖成油页岩和断陷湖泊—沼泽油页岩 3 种类型，其中断陷湖泊—沼泽油页岩相当于 Hutton (1987, 1988, 1991) 所提出的陆相油页岩。拗陷湖成油页岩典型代表为中生代松辽、准噶尔、鄂尔多斯盆地等；断陷湖成油页岩典型代表为新生代桦甸、抚顺、茂名盆地等；断陷湖泊—沼泽油页岩典型代表为新生代依兰伊通、黄县盆地等。

从油页岩赋存形式角度，中国陆相油页岩可以划分为与煤伴生油页岩、煤层顶板油页岩和单一赋存油页岩 3 种类型。与煤伴生油页岩和煤层顶板油页岩多沉积在新生代小型断陷湖盆，中生代拗陷湖盆中油页岩多为单一赋存油页岩。

综合上述分类意见，可以看出油页岩的有机成因与环境成因是密切相关、互相制约的。因此，只有将二者综合考虑，才能更好地说明油页岩的成因类型（表 6）。从表 6 中可以看出，中国陆相油页岩

表 6 中国陆相油页岩成因类型

Table 6 Genetic types of continental oil shale in China

环境成因类型	盆地构造样式	赋存形式	水体性质		颜色	沉积环境	有机质成因类型	典型地区
湖泊—沼泽油页岩	断陷	与煤伴生	淡水	弱氧化—弱还原	黑色、灰黑色	湖泊—沼泽相	腐殖腐泥型、腐泥腐殖型为主	黑龙江达连河、山东黄县、甘肃窑街、海南儋州长坡等
湖成油页岩	断陷	单独存在或为煤层顶板	淡水、半咸水	还原—强还原	褐色、棕褐色、灰褐色	半深湖—深湖相	腐泥型、腐殖腐泥型为主	辽宁抚顺、吉林罗子沟、吉林桦甸等
	拗陷	单独存在	淡水					吉林农安、陕西彬县、新疆妖魔山等

