

# 桦甸盆地桦甸组油页岩 成烃生物组成及生烃潜力

王勤<sup>1,2,3</sup>, 谢小敏<sup>1,2,3</sup>, 腾格尔<sup>1,2,3</sup>, 芮晓庆<sup>1,2,3</sup>, 许锦<sup>1,2,3</sup>

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 江苏 无锡 214126; 2. 中国石油化工集团公司油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126; 3. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

**摘要:**桦甸盆地始新统桦甸组中发育一套优质油页岩。利用显微镜及扫描电镜对该盆地光榔头矿区 22 个样品进行分析, 并对 2 个含不同藻类的样品进行生烃热模拟实验, 研究其成烃生物特征及生烃潜力。桦甸油页岩有机碳含量很高(10.6%~39.6%), 氢指数含量高达 887 mg/g, 显示该套油页岩具有很好的生烃潜力。生物来源主要是蓝细菌组成的层状藻类体, 其次结构藻类体较发育(以硅藻和葡萄球藻为主, 底栖宏观藻类在部分样品中较多), 高等植物主要包括碎屑镜质体、碎屑壳质体、孢子体等。生烃模拟实验结果显示, 含较多底栖藻类的 HD-20 号样品在 400 °C ( $R_o = 1.02\%$ ) 时生烃量达到最大值(427 mg/g); 而以浮游藻类为主的 HD-21 号样品, 在 425 °C 时( $R_o = 1.18\%$ ) 达到最大生烃量(909 mg/g)。虽然 HD-20 号样品具有很高的有机碳含量(39.6%), 但其生烃量较浮游藻类为主的 HD-21 号样品(有机碳含量 29.8%) 差, 指示底栖藻类具有较低的生烃潜力特征。

**关键词:**浮游藻类; 底栖藻类; 成烃生物; 生烃潜力; 始新统; 桦甸盆地

中图分类号: TE122.11

文献标识码: A

## Bio-precursor characterization and hydrocarbon generation potential of shale in Eocene Huadian Formation, Huadian Basin

WANG Qin<sup>1,2,3</sup>, XIE Xiaomin<sup>1,2,3</sup>, TENGGER Boltsjin<sup>1,2,3</sup>, RUI Xiaoqing<sup>1,2,3</sup>, XU Jin<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;  
2. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China;  
3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

**Abstract:** A set of high-quality oil shales developed in the Eocene Huadian Formation in the Huadian Basin, Jinlin Province. Twenty-two rock samples were collected from the Guanglangtou district for bio-precursor and hydrocarbon generation potential analyses. Two samples containing different types of algae were chosen for thermal simulation. The Huadian shale has a high TOC content (10.6%–39.6%) and a high Rock-Eval hydrogen index (HI) value (887 mg/g), suggesting a good hydrocarbon generation potential. Detailed bio-precursor analyses demonstrated that the organic matter was dominated by phytoplankton, such as lamalginite and telalginite (including botryococcus and diatom), and fragments from benthic macroalgal rhodophyte were found in some thin layers. Higher plants mainly include detrital vitrinoids, fungi and detrital plastids, and sporophytes. The sample HD-20 with more benthic algae produced the maximum amount of hydrocarbon (427 mg/g) at 400 °C ( $R_o = 1.02\%$ ), while the sample HD-21 dominated by planktonic algae produced the maximum amount of hydrocarbon (909 mg/g) at 425 °C ( $R_o = 1.18\%$ ). Thermal simulation experiments showed that the sample HD-21 had a much higher hydrocarbon generation potential than the sample HD-20, even though the TOC content of HD-20 was much higher, indicating that the benthic macroalgal macerals have a much lower capacity to generate oil when thermally mature.

**Key words:** phytoplankton; benthic macroalgae; bio-precursor; hydrocarbon generation potential; Eocene; Huadian Basin

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2018-04-10。

作者简介: 王勤(1971—), 女, 工程师, 从事油气地球化学的实验和研究。E-mail: wangqin.syky@sinopec.com。

通信作者: 谢小敏(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事有机岩石学和油气地球化学研究。E-mail: xiexm.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB239101)、国家自然科学基金项目(41603047, U1663202)和中石化科技部青年创新计划项目(P14132)资助。

成烃生物是油气的原始物质来源,并能为沉积环境分析提供重要信息<sup>[1]</sup>。不同类型成烃生物生烃潜力差异较大,对烃源岩中成烃生物的分析,可为烃源岩生烃潜力、生油气性质等<sup>[2-4]</sup>提供基础数据。因此,成烃生物的研究已广泛应用于烃源岩和干酪根类型评价及沉积环境的重建<sup>[1,5-7]</sup>。

吉林省桦甸盆地发育一套始新统油页岩,赋存浅(0~500 m),含油率高(一般为 8%~13%),灰分产率较低(52.97%~62.10%),为优质矿床,在工业上属低灰分、高含油率油页岩类型<sup>[8]</sup>。前人对该套油页岩的有机质组成进行过研究,其富含藻类体,并见有壳质体、镜质体及少量惰性组等<sup>[9-12]</sup>,但是深入的成烃生物分析还未见报道。本文通过显微镜及扫描电镜下样品的精细分析,结合热解 Rock-Eval 地球化学及生烃热模拟实验研究,揭示该套油页岩的成烃生物组成及其生烃潜力特征。

### 1 样品与地质背景

桦甸盆地位于吉林省桦甸县境内,出露面积约 800 km<sup>2</sup>,是敦密断裂带上的新生代断陷盆地,也是我国东北地区含油页岩盆地之一<sup>[13]</sup>。盆地形成于始新世,基底为白垩系小孤山组,盆地演化初期沉积了一套冲积扇和浅湖相沉积层,继而发育了桦甸组( $E_2h$ )的黄铁矿段;盆地发育中期,断裂活动加强,沉积了数层油页岩层;晚期盆地抬升、收缩,充填了含煤(碳质页岩)段沉积。

桦甸油页岩含矿区古近系桦甸组自下而上分为三段<sup>[8]</sup>:下部黄铁矿段( $E_2h^1$ )、中部油页岩段( $E_2h^2$ )和上部含煤段( $E_2h^3$ ) (图 1)。 $E_2h^1$ 的上部以砖红色、紫色和绿色泥岩为主,夹薄层石膏;下部

为灰色泥岩夹薄层砂岩,含黄铁矿层(局部可采),沉积厚度为 240~350 m。 $E_2h^2$ 自下而上分为 13~1 层(可采层)油页岩,为扩张超覆沉积;第 13~9 层油页岩仅发育在大城子—公郎头区,第 8~1 层油页岩全区发育。本次研究样品采自  $E_2h^2$  中部,第 4~6 层油页岩及其夹层(图 1)。 $E_2h^3$ 为晚期盆地抬升收缩期沉积的含煤(碳质页岩)段,上部为灰—浅灰色泥岩、灰白色中细粒砂岩互层;中部为厚层状泥岩;下部为灰色泥岩、砂岩互层。

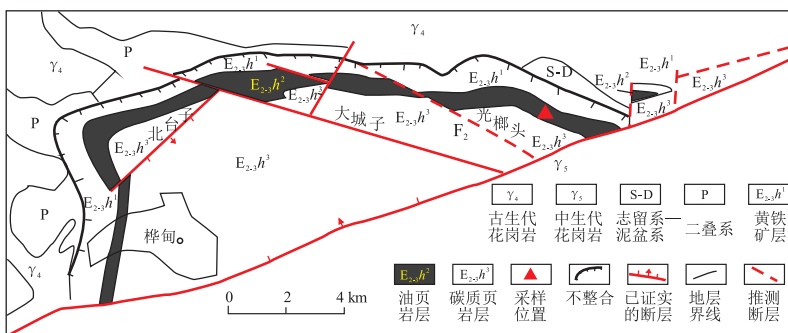
### 2 分析方法

岩石热解分析利用从法国引进的岩石热解色谱质谱分析仪 Rock-Eval 6 进行分析。取样品 30~40 mg 磨成粉末,加热至 300 °C,保持 3 min;然后以 25 °C/min 的加温速率加热至 650 °C。

成烃生物组成分析在 Leica DM4500P 型显微镜下和扫描电镜 Quarter200 下进行鉴定。取样品新鲜部分,垂直层面制成光薄片,在 Leica DM4500P 型显微镜下放大 500 倍,对有机质生物组成进行统计分析;干酪根样品是经酸处理后制备干酪根水样,再制成干酪根涂片,在显微镜下鉴定。在此基础上,再利用扫描电镜对岩石样品中的生物形貌进行精细分析。

镜质体反射率分析,是将样品粉碎至 20~40 目,用树脂胶粘制成光片,在配置 J&M 200 显微光度计的 Leica DM4500P 型显微镜下,选用 50×0.85 的油浸物镜,反射白光下对随机镜质体反射率进行测定。反射率标样选择蓝宝石(反射率为 0.59%)和钇铝榴石(反射率为 0.90%)。

生烃模拟实验分析在高压反应釜内进行。岩



岩性	油页岩层序	剖面	厚度/m	样号
泥岩			2.01	▲ HD-1 ▲ HD-2
油页岩	4		2.44	▲ HD-3 ▲ HD-19,20 ▲ HD-4 ▲ HD-21,22 ▲ HD-5
泥岩			2.43	▲ HD-6 ▲ HD-7
油页岩	5		2.71	▲ HD-8 ▲ HD-9 ▲ HD-10
砂岩			1.02	▲ HD-11
泥岩			5.58	▲ HD-12 ▲ HD-13
油页岩	6		1.48	▲ HD-14,15 ▲ HD-16 ▲ HD-17 ▲ HD-18
砂岩			2.27	

图 1 桦甸盆地桦甸组油页岩分布及采样位置

修改自参考文献[13]。

Fig.1 Distribution and sampling location of Huadian shale, Huadian Basin

石装入 500 mL 反应釜中, 在低流体压力(一般低于 20 MPa)、无静岩压力的反应体系及封闭条件下进行加水热解生烃实验, 流体压力主要靠生烃增压产生。实验起始温度为 250 °C, 最高温度都设为 550 °C, 温度点间隔 25 °C 或 50 °C, 所有温度点按 1 °C/min 的升温速率升至设定温度, 恒温 48 h 或 96 h 后再降温 150 °C 后收集烃类气体(含 C<sub>5+</sub>)与无机气体产物; 冷阱收集随气体排出的凝析油, 反应系统冷却至室温后用二氯甲烷洗涤反应釜及管道内壁收集轻质油, 二者合并称为排出油(相对于模拟样品)。取出岩样经氯仿抽提所得到的可溶有机质为残留油, 排出油和残留油之和为模拟实验的总油, 总油与燃气为总烃产物。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 桦甸组油页岩基础地球化学特征

Rock-Eval 和 TOC 数据(表 1)显示, 该烃源岩具有较高的 TOC (1.6%~39.6%), 且 TOC 含量与岩性具有较好的相关性。油页岩 TOC 含量很高, 而夹层中样品的 TOC 含量较低。第 4 层油页岩样品具有最高的 TOC (24.9%~39.6%), 这层也被认为是桦甸地区页岩油品质最好的层段<sup>[13]</sup>。

除去一个粉砂岩样品(HD-11)具有很低的 S<sub>1</sub>、

S<sub>2</sub>和氢指数(I<sub>H</sub>)、较高的氧指数(I<sub>0</sub>=400 mg/g)外, 其他样品普遍具有高的 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、I<sub>H</sub>和较低的 I<sub>0</sub>。这些样品中 S<sub>2</sub>含量明显高于 S<sub>1</sub>, 主要是由于该套烃源岩成熟度较低, 镜质体反射率仅为 0.4%左右。氢指数含量较高, 分布于 230~887 mg/g 之间。由氢指数和氧指数关系图(图 2)可以看出, 该盆地大部分烃源岩有机质属于 I 型干酪根, 少量属于 II 型干酪根<sup>[14-16]</sup>。有机碳含量与氢指数不存在线性正相关性, 有的样品(如 HD-20)具有很高的 TOC 含

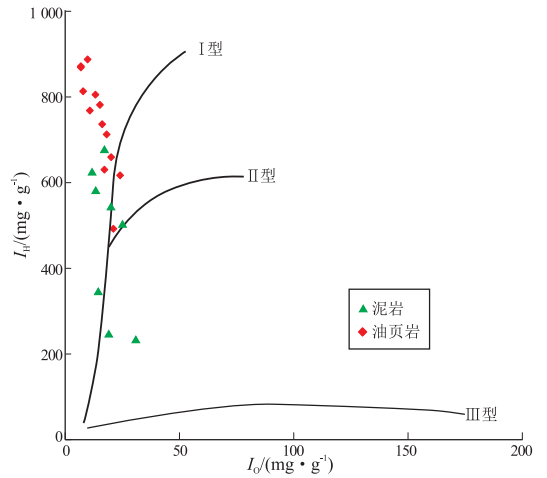


图 2 桦甸盆地桦甸组烃源岩氢指数与氧指数的关系  
Fig.2 HI vs. OI of Huadian source rocks, Huadian Basin

表 1 桦甸盆地桦甸组烃源岩 Rock-Eval 热解参数特征

Table 1 TOC content and Rock-Eval parameter for Huadian source rocks, Huadian Basin

样号	岩性	层号	w(TOC)/%	S <sub>1</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> )	S <sub>2</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> )	T <sub>max</sub> /°C	I <sub>H</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> )	I <sub>0</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> )	R <sub>o</sub> /%
HD-1	黑色泥岩		5.20	0.08	28.1	439	540	20	
HD-2	碳质泥岩		9.20	0.23	67.5	441	734	16	0.39
HD-3	油页岩	4	29.4	0.65	185.0	440	629	17	
HD-19	油页岩	4	27.3	0.96	209.0	443	766	11	
HD-20	油页岩	4	39.6	0.95	194.0	436	490	21	
HD-21	油页岩	4	29.8	1.28	259.0	446	869	7	
HD-22	油页岩	4	33.8	0.81	222.0	443	657	20	
HD-4	油页岩	4	24.9	1.04	216.0	448	867	7	
HD-5	油页岩	4	29.2	0.73	146.0	438	500	25	0.43
HD-6	粉砂质泥岩		2.40	0.01	8.2	440	342	14	
HD-7	含粉砂泥岩		4.40	0.04	25.4	439	577	13	
HD-8	油页岩	5	16.6	0.35	118.0	442	711	18	
HD-9	油页岩	5	10.6	0.29	85.3	443	805	13	
HD-10	油页岩	5	16.8	0.49	149.0	443	887	10	
HD-11	泥质粉砂岩		4.90	-	0.01	-	-	400	
HD-12	含粉砂泥岩		3.30	0.09	22.2	442	673	17	
HD-13	粉砂质泥岩		6.60	0.11	15.2	437	230	31	
HD-14	粉砂质泥岩		1.60	0.01	3.9	440	245	19	
HD-15	泥岩		7.30	0.11	45.3	441	621	12	0.43
HD-16	油页岩	6	19.8	0.43	122.0	443	616	24	
HD-17	油页岩	6	21.7	0.45	176.0	444	811	8	
HD-18	油页岩	6	16.0	0.35	125.0	444	781	15	0.39

量,但氢指数含量并不高(表1),可能缘于生物组成不同,从而导致其生烃潜力差异性。

### 3.2 桦甸组油页岩成烃生物组合特征

显微镜下统计分析发现,桦甸组烃源岩成烃生物以层状藻类体、结构藻类体和陆源高等植物组分为主(表2)。层状藻类体被认为主要来源于蓝藻,且一般常作为湖相或相对闭塞的海相沉积环境的指示<sup>[17]</sup>。桦甸组烃源岩样品富含层状藻类体,该组分具有较强的黄色荧光,在泥岩样品中其分布较分散(3a),而在油页岩样品中呈密集产出(图3b)。干酪根富集后为不具特定形态的海绵状无定形体,具有强黄色荧光(图3c)。

结构藻类体来源于葡萄球藻(图4a)和硅藻(图4d),少量光面球藻 *Leiosphaeridia* sp.(图4b)和

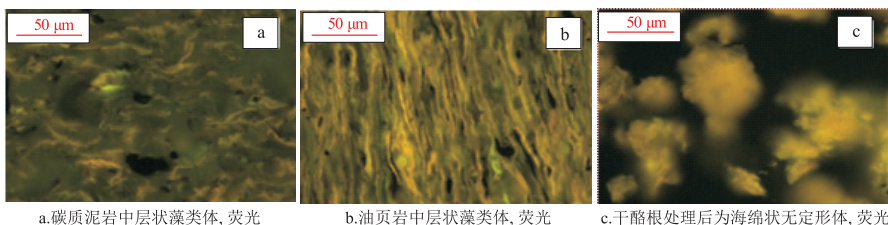
具刺疑源类 *Michystridium* sp.(图4c),这些结构藻类体具有黄色荧光,呈分散状分布于样品中。硅藻大量分布于油页岩中,由于硅藻个体较小,只能通过扫描电镜来进行仔细分析(图4d),这些硅藻与层状藻类体交织在一起,扫描电镜能谱特征显示这些硅藻已泥化,硅质成分较少(图4e)。

此外,该组样品中也见底栖宏观藻类残片,包括多细胞叶状体(图5a,b)、红藻囊果(图5c,d)等。多细胞叶状体组织部分可见清晰的双层细胞壁结构(图5b),细胞壁直接还能见到胞间连丝(pit connection),这是红藻所特有的结构<sup>[18]</sup>。红藻囊果是红藻的典型特征<sup>[19]</sup>,图5c和d显示的红藻囊果组成特征,与边立曾等<sup>[20]</sup>发现的“红藻石”具有类似结构。

表2 桦甸盆地古近系桦甸组成烃生物组分相对含量

Table 2 Relative amounts of different bio-precursor macerals in Huadian source rocks, Huadian Basin

样号	腐泥组/%			镜质组/%	壳质组/%		惰质组/%
	结构藻类体(浮游)	层状藻类体	底栖宏观藻类体	碎屑镜质体	孢子体	碎屑壳质体	菌类体
HD-1	2.0	-	8.0	30.9	-	59.1	-
HD-2	-	73.3	-	26.7	-	-	-
HD-3	20.5	43.2	36.3	-	-	-	-
HD-19	-	87.7	-	12.3	-	-	-
HD-20	5.6	50.9	43.0	-	-	-	0.5
HD-21	30.0	67.6	-	2.4	-	-	-
HD-22	10.0	76.3	-	13.7	-	-	-
HD-5	-	20.8	-	66.2	5.0	8.0	-
HD-6	-	-	-	61.5	10.0	28.5	-
HD-7	-	-	-	19.6	4.0	76.4	-
HD-8	-	97.0	-	3.0	-	-	-
HD-9	-	98.0	-	2.0	-	-	-
HD-10	-	95.0	5.0	-	-	-	-
HD-12	-	70.0	-	30.0	-	-	-
HD-14	-	-	-	35.5	-	64.5	-
HD-15	-	86.2	-	13.8	-	-	-
HD-16	-	36.5	63.5	-	-	-	-
HD-17	-	86.5	-	13.5	-	-	-
HD-18	-	91.8	-	8.2	-	-	-
HD-1	2.0	-	8.0	30.9	-	59.1	-
HD-2	-	73.3	-	26.7	-	-	-
HD-3	20.5	43.2	36.3	-	-	-	-



a.碳质泥岩中层状藻类体, 荧光

b.油页岩中层状藻类体, 荧光

c.干酪根处理后为海绵状无定形体, 荧光

图3 桦甸盆地古近系桦甸组层状藻类体显微组分特征

Fig.3 Microphotographs of lamalginite maceral in the Huadian samples, Huadian Basin

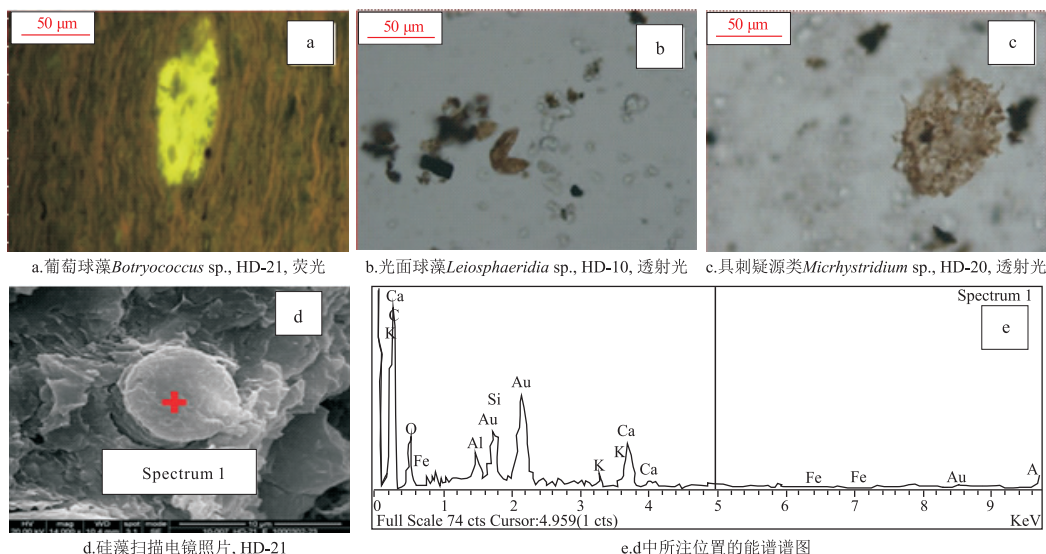


图4 桦甸盆地古近系桦甸组结构藻类体显微-扫描电镜照片

Fig.4 Microscopic and SEM photos of macerals in the Huadian samples, Huadian Basin

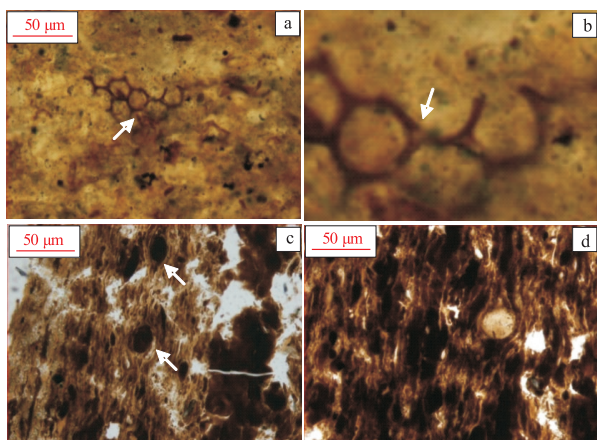


图5 桦甸盆地古近系桦甸组底栖宏观藻类显微照片  
光片,油浸。a-b.底栖红藻多细胞叶状体结构;c-d.红藻囊果

Fig.5 Microphotographs of rhodophyte in the Huadian shale, Huadian Basin

陆源高等植物残片,主要包括碎屑镜质体、碎屑壳质体、孢子体等组分(图6)。这些高等植物残片呈分散状分布于烃源岩中,其中在油页岩中含量较少,在碳质泥岩、粉砂质泥岩中含量相对较高。

### 3.3 2种含不同藻类油页岩生烃潜力对比

在桦甸组油页岩中,发现2个生物组合具有明显差异的样品。一个是以层状藻类体(67.6%)与结构藻类体(30.0%)为主的油页岩(样品HD-21),其富含硅藻和葡萄球藻;另外一个富含底栖藻类(43.0%)与层状藻类体(50.9%)为主的油页岩(样品HD-20)。这2个样品手标本上,富含浮游藻类的HD-21号呈黄色,而富含底栖藻类的HD-20号呈深灰色(图7)。TOC特征显示,HD-20号样品TOC高达39.6%,而HD-21号样品TOC相对较低

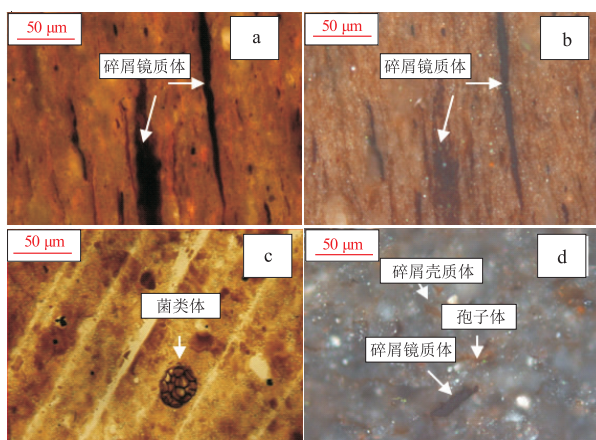


图6 桦甸盆地古近系桦甸组高等植物残片显微照片

a-b.碎屑镜质体在透射光(a)和反射光(b)的结构特征;c.菌类体,透射光;d.壳质组(包括孢子体、碎屑壳质体和碎屑镜质体,反射光

Fig.6 Microphotographs of plant-derived macerals in the Huadian shale, Huadian Basin

(29.8%)。然而,2个样品具有相反的氢指数特征,HD-21号样品氢指数(869 mg/g)明显高于HD-20号样品(490 mg/g)(表1)。

将这2个样品进行生烃热模拟实验分析,结果(图8)显示,2个样品生烃模式相似,一开始随着温度增加,生成的总油量都增加,达到最大生烃量后,随着温度增加,由于油裂解生气,因此总油量不断减少。HD-20号样品在400℃( $R_o = 1.02\%$ )时生烃量达到最大值(427 mg/g);而HD-21号样品在425℃时( $R_o = 1.18\%$ )达到最大生烃量(909 mg/g)。因此,富含浮游藻类的HD-21号样品生烃潜力明显高于富含底栖藻类的HD-20号样品,暗示底栖藻类可为烃源岩提供较高的有机碳,但其生烃潜力较



图 7 桦甸盆地桦甸组样品  
HD-20(a)和 HD-21(b) 手标本

Fig.7 Photos of samples HD-20 (a) and HD-21 (b) from the Huadian Formation, Huadian Basin

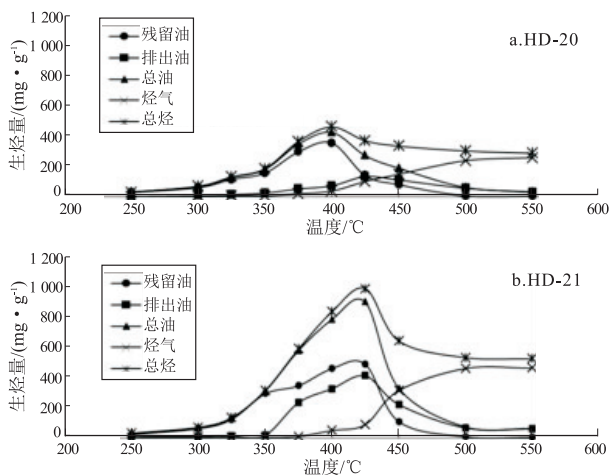


图 8 桦甸盆地桦甸组油页岩样品  
HD-20(a)和 HD-21(b)生排烃热模拟实验对比

Fig.8 Yields from thermal simulation experiments to test the hydrocarbon generation potential of oil shale samples HD-20 (a) and HD-21 (b) from the Huadian Formation, Huadian Basin

浮游藻类差,该结果与孟庆强等<sup>[21]</sup>对现代红藻进行生烃模拟的结果一致。这主要是由于底栖宏观藻类细胞结构中脂类含量很少,重量一般不超过 3%<sup>[22]</sup>。NELSON 等<sup>[23]</sup>对几类宏观藻类中脂类含量检测发现,红藻(Chondracanthus)具有最低的脂类物质含量,仅为 0.2%~0.3%,明显低于浮游藻类中脂类物质含量。

## 4 结论

桦甸盆地桦甸组油页岩是一套优质的烃源岩,有机碳含量较高(10.6%~39.6%),氢指数在 500~

887 mg/g 之间,处于未成熟阶段(镜质体反射率为 0.41%)。成烃生物主要来源于蓝细菌类组成的层状藻类体和浮游的结构藻类体,主要是葡萄球藻和硅藻;一些陆地植物碎屑(镜质组、惰质组和壳质组),表明其为典型的湖泊环境。在显微镜下,局部样品中底栖红藻碎屑较多,典型的特征是叶状体及红藻囊果。对 2 个不同藻类组成的样品进行了模拟实验分析,富含浮游藻类的样品生烃量很高,而富含底栖藻类的样品有机碳含量较高,说明浮游藻类具有较高的生烃潜力。

## 参考文献:

- [1] BOUCSEIN B,STEIN R.Black shale formation in the Late Paleocene/early Eocene Arctic Ocean and paleoenvironmental conditions;New results from a detailed organic petrological study[J]. Marine and Petroleum Geology,2009,26(3):416-426.
- [2] PETERSEN H I,NYTOFT H P.Oil generation capacity of coals as a function of coal age and aliphatic structure[J]. Organic Geochemistry,2006,37(5):558-583.
- [3] DEMAISON G J,MOORE G T.Anoxic environments and oil source bed genesis[J].Organic Geochemistry,1980,2(1):9-31.
- [4] DOW W G.Kerogen studies and geological interpretation[J]. Journal of Geochemical Exploration,1977,7(2):79-99.
- [5] DUTTA S,MATHEWS R P,SINGH B D,et al.Petrology,palynology and organic geochemistry of Eocene lignite of Matanomadh,Kutch Basin,western India:Implications to depositional environment and hydrocarbon source potential[J]. International Journal of Coal Geology,2011,85(1):91-102.
- [6] MULLER J.Palynology of Recent Orinoco delta and shelf sediments[J].Micropaleontology,1959,5(1):1-32.
- [7] PUTTMANN W,SUN Y Z,KALKREUTH W.Variation of petrological and geochemical compositions in a sequence of humic coals,cannel coals,and oil shales[J].Energy & Fuels,1994,8(6):1460-1468.
- [8] 王永莉,刘招君,荆惠林,等.桦甸盆地古近系桦甸组油页岩矿床沉积特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2005,35(6):720-724.  
WANG Yongli,LIU Zhaojun,JING Huilin,et al.Sedimentary characteristics of oil shale deposit of the Huadian Formation of Paleogene in Huadian Basin[J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2005,35(6):720-724.
- [9] 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.  
ZHAO Longye,CHEN Jiniang,WANG Tianshun.Industrial-original classification of Chinese oil shales[J].Coal Geology and Exploration,1991,19(5):2-6.
- [10] 赵隆业,陈基娘,王天顺.我国油页岩成分和品级划分[J].现代地质,1991,5(4):423-429.  
ZHAO Longye,CHEN Jiniang,WANG Tianshun.Grade dividing and composition of oil shale in China[J].Geoscience,1991,5(4):423-429.

- [11] 赵隆业,陈基娘,王天顺.油页岩定义和煤、油页岩界线和讨论[J].煤田地质与勘探,1991(1):15-16.  
ZHAO Longye, CHEN Jiniang, WANG Tianshun. The definition of oil shales and the borderline of oil and coal[J]. Coal Geology and Exploration, 1991(1):15-16.
- [12] 吴冲龙,袁艳斌,李绍虎.抚顺盆地同沉积构造及其对煤和油页岩厚度的控制[J].煤田地质与勘探,1998(6):2-7.  
WU Chonglong, YUAN Yanbin, LI Shaohu. The symsedimentary structure framework and its controls on the thickness of extra-thick coal bed & oil thale, Fushun Basin, China[J]. Coal Geology & Exploration, 1998(6):2-7.
- [13] SUN Pingchang, SACHSENHOFER R F, LIU Zhaojun, et al. Organic matter accumulation in the oil shale- and coal-bearing Huadian Basin (Eocene; NE China) [J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 105:1-15.
- [14] PETERS K E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis [J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(3):318-329
- [15] DAMSTÉ J S S, DE LAS HERAS F X C, VAN BERGEN P F, et al. Characterization of Tertiary Catalan lacustrine oil shales; Discovery of extremely organicsulfur-rich Type I kerogens [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57(2):389-415.
- [16] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence [M]. 2nd ed. Heidelberg: Springer, 1984:1-699.
- [17] PENIGUEL G, COUDERC R, SEYVE C. Les microalgues actuelles et fossiles - Interêts stratigraphique et pétrolier [J]. Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production elf aquitaine, 1989, 13(2):455-482.
- [18] DAWES C J, SCOTT F M, BOWLER E. A light- and electron-microscopic survey of algal cell walls. I. Phaeophyta and Rhodophyta [J]. American Journal of Botany, 1961, 48(10):925-934.
- [19] BOLD H C, WYNNE M J. Introduction to the algae: Structure and reproduction [M]. Englewood Cliffs, New Jersey USA: Prentice Hall, 1978:55.
- [20] 边立曾,张水昌,张宝明,等.河北张家口下花园地区新元古代下马岭组油页岩中的红藻化石[J].微生物学报, 2005, 22(3):209-216.  
BIAN Lizeng, ZHANG Shuichuang, Zhang Baoming, et al. Red algal fossils discovered from the Neoproterozoic Xiamaling oil shales, Xihuayuan town of Hebei province [J]. Acta Micro-palaeontologica Sinica, 2005, 22(3):209-216.
- [21] 孟庆强,秦建中,刘文斌,等.多细胞宏观底栖藻类生烃特点实验研究[J].石油学报, 2008, 29(6):822-826.  
MENG Qingqiang, QIN Jianzhong, LIU Wenbin, et al. Experimental study on hydrocarbon generation of multi-cellular benthic macroalga [J]. Acta Petrolei Sinica, 29(6):822-826.
- [22] HARWOOD J L, JONES A L. Lipid metabolism in algae [J]. Advances in Botanical Research, 1989, 16:1-53.
- [23] NELSON M M, PHLEGER C F, NICHOLS P D. Seasonal lipid composition in macroalgae of the northeastern Pacific Ocean [J]. Botanica Marina, 2005, 45(1):58-65.

(编辑 徐文明)

~~~~~

(上接第402页)

- [11] 吴亚生,钟大康,邱楠生,等.松南地区断陷层烃源岩生烃能力及主控因素分析[J].断块油气田,2012,19(1):39-43.  
WU Yasheng, ZHONG Dakang, QIU Nansheng, et al. Hydrocarbon generation potential of source rock and main controlling factors for faulted strata in Songnan Area [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2012, 19(1):39-43.
- [12] 秦建中.中国烃源岩[M].北京:科学出版社,2005:19.  
QIN Jianzhong. Sourcerock of China [M]. Beijing: Science Press, 2005:19.
- [13] 黄第藩,李晋超,周翕红,等.陆相有机质演化 and 成烃机理[M].北京:石油工业出版社,1984:17-152.  
HUANG Difan, LI Jinchao, ZHOU Xihong, et al. Terrestrial organic matter evolution and hydrocarbon generation mechanism [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984:17-152.
- [14] 梅博文,刘希江.我国原油中异戊间二烯烷烃的分布及其与地质环境的关系[J].石油与天然气地质,1980,1(2):99-115.  
MEI Bowen, LIU Xijiang. The distribution of isoprenoid alkanes in china's crude oil and its relation with the geologic environment [J]. Oil & Gas Geology, 1980, 1(2):99-115.
- [15] 赵兴齐,陈践发,郭望,等.开鲁盆地奈曼凹陷奈1区块原油及烃源岩芳烃地球化学特征[J].地球化学,2013,42(3):262-273.  
ZHAO Xingqi, CHEN Jianfa, GUO Wang, et al. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbon in crude oil and source rocks from Nai 1 block of Naiman depression, Kailu Basin [J]. Geochimica, 2013, 42(3):262-273.
- [16] 孙宜朴,陈霞,徐士林,等.昌图断陷石油地质特征及区带优选[J].石油实验地质,2014,36(3):310-315.  
SUN Yipu, CHEN Xia, XU Shilin, et al. Petroleum geologic characteristics and profitable exploration zone selection of Changtu sag [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3):310-315.
- [17] PETERS K E, MOLDOWAN J M. 生物标记化合物指南 [M]. 姜乃煌,译.北京:石油工业出版社,1995.  
PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarker guide [M]. JIANG Naihuang, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [18] 傅家谟,盛国英,许家友,等.应用生物标志化合物参数判识古沉积环境[J].地球化学,1991(1):1-12.  
FU Jiamo, SHENG Guoying, XU Jiayou, et al. Application of biomarker compounds in assessment of paleoenvironments of Chinese terrestrial sediments [J]. Geochimica, 1991(1):1-12.
- [19] 梁文华,昌参2井九佛堂组原油的地球化学特征及油源对比[J].新疆石油学院学报,2003,15(4):22-25.  
LIANG Wenhua. Geochemical characteristics and oil-source rock correlation of Jiufotang formation oil in well Cangan 2 [J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2003, 15(4):22-25.

(编辑 黄娟)