

文章编号:0253-9985(2010)06-0826-12

# 中国南方海相优质烃源岩超显微有机岩石学与生排烃潜力

秦建中, 申宝剑, 付小东, 陶国亮, 腾格尔

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151)

**摘要:**通过选取中国南方不同层系优质烃源岩样品,综合运用全岩X-衍射、扫描电镜+能谱及生排烃模拟实验方法,对南方海相优质烃源岩矿物组成特征、有机质与矿物组成关系、有机质赋存形式、成烃生物及生排烃特征进行了研究。结果表明,海相优质烃源岩中石英、方解石、白云石等矿物主要是生物成因或与生物成因有关,烃源岩残余有机碳含量与石英含量具有正相关性,而与粘土矿物含量呈负相关。分析认为,南方海相优质烃源岩有机质主要有3种赋存状态:①有机质多与硅质相伴生,是南方海相优质烃源岩中最重要的赋存形式;②有机质与钙质相伴生,是部分二叠系优质钙质烃源岩的主要赋存形式;③有机质与粘土相伴生或被片状粘土颗粒包裹与硅质及钙质生屑一起共生,有机质赋存主要受沉积环境、沉积相控制。海相优质烃源岩成烃生物主要有藻类、底栖生物和菌类3种,同一烃源岩层位样品中往往含有“多重母质”分布。模拟实验表明,浮游藻类的生烃潜力与Ⅰ型干酪根生烃潜力相当,底栖藻类生烃潜力与Ⅱ型干酪根生烃潜力相当。富有机质硅质或钙质超微薄层容易使早期重质油排出,可以形成巨型重质油藏;而片状粘土之间包裹的有机质很难使早期生成的稠油排出,则形成轻质油气藏。

**关键词:**赋存形式;成烃生物;生排烃;有机岩石学;海相烃源岩;中国南方

**中图分类号:**TE122.1 **文献标识码:**A

## Ultramicroscopic organic petrology and potential of hydrocarbon generation and expulsion of quality marine source rocks in South China

Qin Jianzhong, Shen Baojian, Fu Xiaodong, Tao Guoliang and Teng Ge'er

(Wuxi Institute of Petroleum Geology, SINOPEC Exploration and Production Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

**Abstract:** Choosing samples of quality marine source rocks in various strata in South China, we make a study of mineral composition, correlation between organic matter and mineral composition, occurrences of organic matter, hydrocarbon-generating organism and features of hydrocarbon generation and expulsion by ways such as whole rock X-ray diffraction, combined scanning electron microscope and energy spectrum, and simulated experiment of hydrocarbon generation and expulsion. The results show that minerals such as quartz, calcite and dolomite in these source rocks are mainly biogenetic or related to biogenetic origin. The total organic carbon content has a positive correlation with the quartz content but a negative correlation with clay minerals content. We believe that organic matter in these source rocks have three main occurrences: 1) organic matter associated with siliceous matter. It is the major occurrence in the quality marine source rocks in South China; 2) organic matter associated with calcareous matter. It is the main occurrence in some quality calcareous source rocks in the Permian; 3) organic matter associated with clay, or coated by flaky clay particles and associated with siliceous and calcareous bioclastics. In this case, the occurrence of organic matter is mainly controlled by depositional setting and sedimentary facies. There are mainly three kinds of hydrocarbon-generating organisms: algae, benthos and fungus. Samples from the same layer of source rocks commonly contain multiple parent materials. According to the simulated experiments, the hydrocarbon-generating potential of floating algae is the same as Type I kerogen, while that of benthos is the

收稿日期:2010-11-02。

第一作者简介:秦建中(1957—),男,教授级高级工程师,油气地球化学与石油地质。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2005CB422102);国家科技重大专项(2008ZX05005-01-02)。

same as Type II kerogen. Super thin siliceous or calcareous layers rich in organic matters are easy to expel early-generated heavy oil, and thus a giant heavy oil pool may be formed. In contrast, organic matter coated by flaky clay particles are hard to expel early-generated heavy oil, and thus a light oil pool may be formed.

**Key words:** occurrence, hydrocarbon-generating organism, hydrocarbon generation and expulsion, organic petrology, marine source rock, South China

中国南方海相碳酸盐岩层系中发育下寒武统、上奥陶统-下志留统、下二叠统和上二叠统4套区域性烃源岩<sup>[1,2]</sup>。海相优质烃源岩主要是指有机质丰度高、有机质类型好的烃源岩<sup>[3]</sup>。许多学者对海相优质烃源岩沉积环境、原始生产力、沉积速率等角度对优质烃源岩进行了评价<sup>[3~6]</sup>、研究了有机质形成的控制因素<sup>[7,8]</sup>、热演化史<sup>[9]</sup>以及对页岩气藏的影响<sup>[10]</sup>。但将有机质与矿物之间作为一个整体进行研究却相对较为薄弱,尤其是对南方海相优质烃源岩有机质赋存方式、优质烃源岩成因研究较为薄弱。同时中国南方海相烃源岩层普遍具有高-过成熟的特点,常规地球化学参数难以准确评价烃源岩品质。本次研究重点选取南方海相地区上二叠

统龙潭组( $P_2l$ )及大隆组( $P_2d$ )、下志留统龙马溪组( $S_1l$ )、下寒武统牛蹄塘组( $\epsilon_1n$ )优质烃源岩(页岩),对烃源岩的成因、有机质赋存方式进行了研究。通过模拟实验分析了不同类型烃源岩生排烃特征,为油气勘探提供重要依据。

## 1 样品来源与测试分析

### 1.1 样品来源

在过去几年对南方海相 2 000 多块烃源岩样品研究的基础上,重点选取南方重庆、贵州、云南以及四川等地区 7 个剖面(图 1),具有代表性泥页岩样品,主要包括下寒武统牛蹄塘组( $\epsilon_1n$ )、下志留统

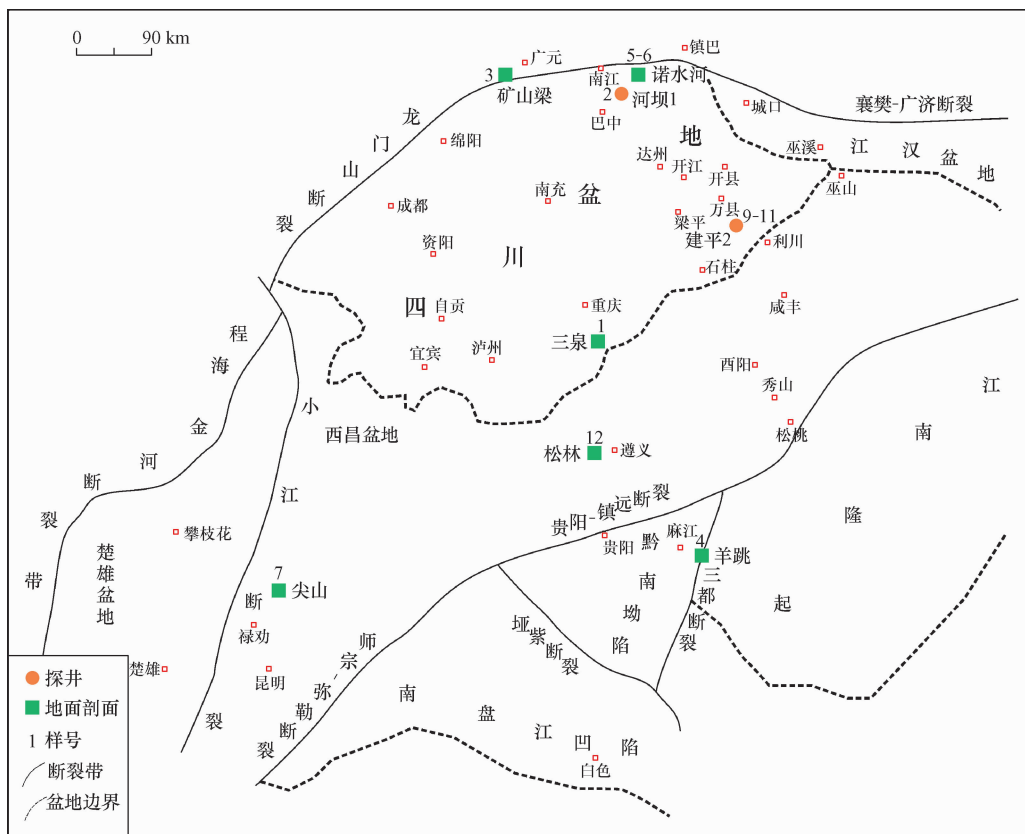


图1 中国南方海相优质烃源岩典型样品采样位置及剖面

Fig. 1 Locations and cross sections for typical samples of quality marine source rocks in South China

表 1 中国南方海相优质烃源岩基本地球化学特征

Table 1 Geochemistry of quality marine source rocks in South China

| 取样位置   | 层位                        | 深度/m     | 岩性    | 总有机碳含量, % | BR <sub>o</sub> , % |
|--------|---------------------------|----------|-------|-----------|---------------------|
| 广元矿山梁  | 二叠系大隆组(P <sub>2</sub> d)  |          | 钙质泥页岩 | 5.95      | 0.65                |
| 重庆南川   | 二叠系龙潭组(P <sub>2</sub> l)  |          | 黑色泥页岩 | 5.79      | 2.09                |
| 河坝 1 井 | 二叠系大隆组(P <sub>2</sub> d)  | 5 643.21 | 硅质页岩  | 4.71      | 4.59                |
| 通江剖面   | 志留系龙马溪组(S <sub>1</sub> l) |          | 黑色页岩  | 3.93      | 2.89                |
| 通江剖面   | 寒武系牛蹄塘组(Є <sub>1</sub> n) |          | 黑色页岩  | 6.34      | 4.34                |
| 贵州麻江   | 寒武系牛蹄塘组(Є <sub>1</sub> n) |          | 黑色泥页岩 | 6.44      | 3.24                |
| 贵州遵义   | 寒武系牛蹄塘组(Є <sub>1</sub> n) |          | 硅质页岩  | 14.95     |                     |

龙马溪组(S<sub>1</sub>l)和上二叠统龙潭组及大隆组(P<sub>2</sub>l-P<sub>2</sub>d)等区域性优质烃源岩进行了扫描电子显微镜(SEM)结合能谱元素与全岩X-衍射分析。选取样品的常规地球化学特征见表1。

1.2 测试分析方法

本次测试方法主要有全岩X-衍射分析、扫描电子显微镜+能谱仪、地层热压生排烃模拟实验。X-衍射广泛应用于矿物的定性、定量分析。X射线衍射提供的丰富信息对于了解矿物成因,探讨成矿、造岩作用以及矿物岩石的应用研究都具有重要意义,烃源岩的全岩X-衍射分析由Bruker.D8.AXS型仪器完成。利用Quanta200型环境扫描电镜观察其微观结构,放大倍数一般在500~10 000倍之间,最高可达80 000倍以上,可以很好的应用于成烃生物微观、微米级微观矿物颗粒结构形状观察,同时结合能谱元素测定还可以确定矿物成分。地层热压生排烃模拟实验在充分考虑各种地质影响因素如:温度、时间、上覆静岩压力、地层流体压力、生烃空间、初次排烃、围压、孔隙流体以及无机矿物介质等的条件下,运用地层孔隙热压生烃模拟仪对人工配比不同类型烃源岩样品进行了实验,分析不同类型烃源岩生排烃特征。

2 测试结果及讨论

2.1 超显微矿物组成特征

2.1.1 优质烃源岩中SiO<sub>2</sub>含量较高,粘土含量不高

对南方海相各时代优质烃源岩进行的全岩X-衍射分析表明(表2),矿物化学成份主要以石英及碳酸盐岩为主,石英含量一般在60%~95%之间,粘土含量低,大多在20%以下,平均只有5.08%。南方海相优质烃源岩残余总有机碳含量(TOC)与矿物含量的相关性表明有机质含量与粘土含量成负相关性(图2),而与SiO<sub>2</sub>呈正相关性,这与通常认为烃源岩中粘土矿物含量高有机质含量就高的观点不一致<sup>[10~14]</sup>,主要是由于中国南方地区沉积环境是控制优质烃源岩有机质的主要因素。优质烃源岩中常见硬石膏、重晶石、石膏和黄铁矿等矿物,反映了沉积稳定水体为正常海水偏咸、偏碱性和分层水体下部及沉积界面以下呈强还原环境,有利于浮游生物有机质及硅质或钙质碎屑的保存。海相优质烃源岩形成的台盆、台地凹陷潟湖相稳定沉积环境,不利于大量陆源碎屑粘土随水体搬运沉积。

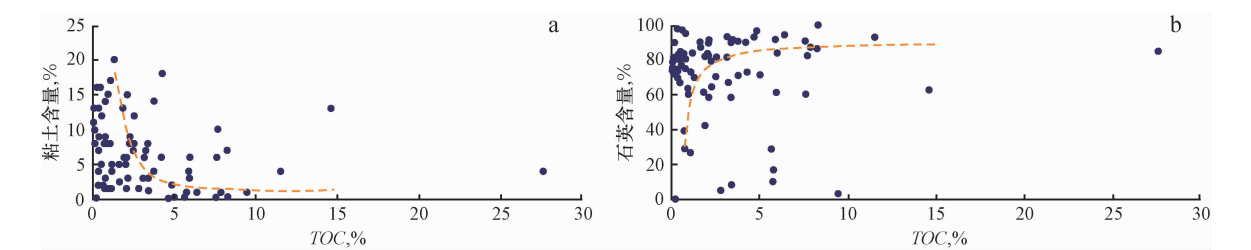


图 2 中国南方海相优质烃源岩中粘土、石英含量与有机碳含量关系

Fig. 2 Clay content and quartz content vs. TOC content in quality marine source rocks in South China

表 2 中国南方海相优质烃源岩 X-衍射分析数据

Table 2 The X-ray diffraction analysis results of quality marine source rocks in South China

| 剖面位置      | 样品名称         | 层位               | 矿物成分含量,% |      |      |     |     |      |      |     |     |     |      |     |      |
|-----------|--------------|------------------|----------|------|------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|------|-----|------|
|           |              |                  | TOC      | 粘土   | 石英   | 钾长石 | 斜长石 | 方解石  | 白云石  | 菱铁矿 | 硬石膏 | 重晶石 | 黄铁矿  | 石膏  | 无水芒硝 |
| 广元<br>上寺  | 黑色钙质泥页岩      | P <sub>2</sub> d | 5.95     | 3.0  | 61.5 |     |     | 30.0 | 4.0  | 0.5 |     |     | 1.0  |     |      |
|           | 黑色泥灰岩        | P <sub>2</sub> d | 5.67     | 0.3  | 30.0 |     |     | 67.2 | 1.5  |     | 1.0 |     |      |     |      |
|           | 黑色钙质页岩       | P <sub>2</sub> d | 5.03     | 0.3  | 71.5 |     |     | 28.0 |      |     | 0.2 |     |      |     |      |
| 河坝<br>1井  | 黑色泥页岩        | P <sub>2</sub> d | 4.71     | 0.1  | 92.8 |     | 0.1 | 7.0  |      |     |     |     |      |     |      |
| 重庆<br>南川  | 黑色泥页岩        | P <sub>2</sub> l | 5.79     | 60.0 | 18.5 | 1.0 | 0.7 | 1.0  | 0.8  |     |     | 5.0 | 12.0 | 1.0 |      |
|           | 炭质页岩         | P <sub>2</sub> w | 8.73     | 2.7  | 81.5 | 6.7 | 7.7 | 1.2  | 0.2  |     |     |     |      |     |      |
| 南江        | 泥灰岩          | P <sub>2</sub> w | 4.36     | 0.1  | 57.7 |     | 1.5 | 39.5 | 0.2  | 0.2 |     |     | 0.5  | 0.1 |      |
|           | 炭质页岩         | P <sub>1</sub> m | 5.56     | 7.6  | 43.8 | 8.6 | 2.0 | 32.0 | 5.5  | 0.5 |     |     |      | 1.0 |      |
| 陆家桥       | 黑色页岩         | P                | 8.31     | 0.4  | 99.6 |     |     |      |      |     |     |     |      |     |      |
| 云南<br>禄劝  | 泥灰岩          | D <sub>2</sub> d | 3.44     | 1.2  | 10.0 |     | 0.3 | 87.2 |      |     | 1.0 |     | 0.3  |     |      |
|           | 灰质页岩         | D <sub>2</sub> d | 5.80     | 1.0  | 12.0 |     | 0.5 | 85.5 |      |     | 1.0 |     |      |     |      |
|           | 黑色页岩         | O <sub>3</sub> w | 8.24     | 7.0  | 86.1 | 0.5 | 2.5 | 1.0  | 1.5  | 0.4 |     |     | 1.0  |     |      |
|           | 黑色页岩         | O <sub>3</sub> w | 2.55     | 12.0 | 81.0 |     | 4.0 |      |      | 1.0 | 2.0 |     |      |     |      |
| 中上<br>扬子  | 黑色页岩         | O <sub>3</sub> w | 3.78     | 4.0  | 90.2 | 2.0 | 1.5 |      | 0.5  | 0.5 |     | 0.5 | 0.3  | 0.5 |      |
|           | 黑色页岩         | O <sub>3</sub> w | 4.86     | 2.0  | 96.0 |     | 1.0 | 1.0  |      |     |     |     |      |     |      |
|           | 黑色页岩         | O <sub>3</sub> w | 4.22     | 6.0  | 89.8 | 0.5 | 1.0 |      | 0.5  | 0.5 | 1.0 | 0.5 |      | 0.2 |      |
|           | 黑色页岩         | S <sub>1</sub> l | 2.30     | 9.0  | 79.0 |     | 2.0 | 4.0  | 1.0  |     | 2.0 | 1.0 | 2.0  |     |      |
|           | 黑色含钙页岩       | S <sub>1</sub> l | 3.25     | 7.0  | 67.5 |     | 6.0 | 14.0 | 2.0  | 0.5 |     | 1.0 | 2.0  |     |      |
| 旺苍        | 黑色页岩         | S <sub>1</sub> l | 2.06     | 5.0  | 83.5 | 1.0 | 6.0 | 1.0  |      |     | 3.0 |     |      | 0.5 |      |
|           | 含硅质页岩        | S <sub>1</sub> l | 4.29     | 18.0 | 73.0 | 6.0 |     |      |      |     | 2.0 |     |      | 1.0 |      |
|           | 炭质页岩         | S <sub>1</sub>   | 2.10     | 6.0  | 89.1 |     | 4.5 |      |      |     | 0.4 |     |      |     |      |
|           | 黑色页岩         | S <sub>1</sub>   | 6.42     | 1.0  | 93.7 |     | 4.0 | 0.3  |      |     |     |     | 1.0  |     |      |
| 城口<br>庙坝  | 黑色页岩         | S <sub>1</sub> l | 3.64     | 15.0 | 75.0 |     | 4.0 |      | 2.0  |     |     |     | 4.0  |     |      |
|           | 黑色页岩         | Є <sub>1</sub>   | 7.73     | 10.0 | 82.2 | 0.2 | 6.0 |      |      |     | 0.1 |     | 1.5  |     |      |
| 城口<br>大巴山 | 黑色页岩         | Є <sub>1</sub>   | 5.92     | 4.0  | 91.2 | 1.0 | 3.0 | 0.3  | 0.2  |     | 0.3 |     |      |     |      |
| 南江<br>桥亭  | 黑色粉砂云<br>质泥岩 | Є <sub>1</sub>   | 3.38     | 8.0  | 58.8 | 2.0 | 4.0 |      | 25.0 | 0.5 | 1.2 |     |      | 0.5 |      |
| 旺苍        | 黑色泥岩         | Є <sub>1</sub>   | 2.56     | 8.0  | 81.5 | 1.5 | 7.0 |      |      |     | 1.0 |     |      | 1.0 |      |
| 洪雅<br>张村  | 黑色页岩         | Є <sub>1</sub>   | 2.16     | 3.0  | 91.0 |     | 3.0 | 2.0  | 0.5  | 0.5 |     |     |      |     |      |
|           | 深灰色钙质页岩      | Є <sub>1</sub>   | 1.94     | 6.0  | 43.0 | 8.0 | 1.5 | 6.0  | 29.0 |     | 0.3 | 1.2 | 2.0  |     | 3.0  |
| 大庸<br>剖面  | 灰黑色粉沙<br>质泥岩 | Є <sub>1</sub>   | 3.12     | 3.0  | 93.0 |     | 3.0 |      |      |     | 0.5 |     |      |     | 0.5  |
|           | 炭质泥页岩        | Є <sub>1</sub>   | 11.54    | 4.0  | 92.8 | 1.0 | 1.0 | 0.5  |      |     | 0.2 | 0.1 |      |     | 0.4  |
| 威丰        | 炭质页岩         | Є <sub>1</sub>   | 3.45     | 3.0  | 91.0 |     | 3.0 | 0.5  |      |     | 1.0 | 0.7 |      |     | 0.8  |

2.1.2 优质烃源岩多为富有机质硅质生屑页岩

通过选取表 1 中样品进行扫描电子显微镜与能谱仪分析,结果表明南方优质烃源岩主要以硅质生屑页岩为主,矿山梁 P<sub>2</sub>d 钙质泥页岩和通江剖面 S<sub>1</sub>l 黑色泥页岩以硅质、钙质、有机质片状粘

土为主。通江Є<sub>1</sub>n 和 S<sub>1</sub>l 剖面及贵州麻江Є<sub>1</sub>n 剖面黑色页岩为富含有机质超显微硅质生物碎屑夹片状粘土。

川西北广元矿山梁 P<sub>2</sub>d 黑色泥页岩垂直页理自然面扫描电镜典型照片中的 19 个能谱元素分析(图 3a,b;表 3)数据表明:矿物成分均以 SiO<sub>2</sub> 或

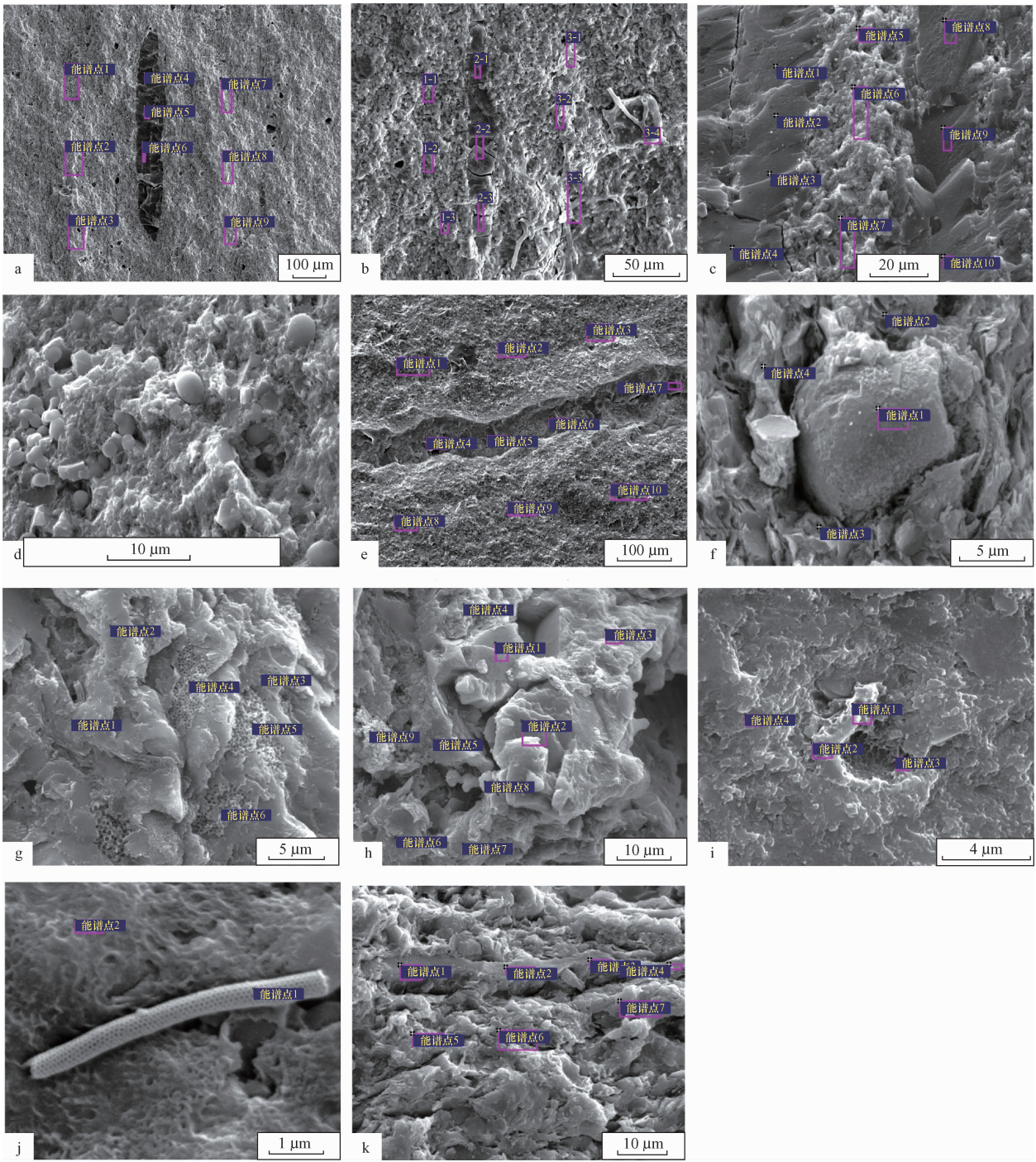


图 3 中国南方海相优质烃源岩微观显微结构照片及能谱元素数据点位置

Fig. 3 Microphotographs of quality marine source rocks in South China with energy-dispersive X-ray spectroscopy data points overlaid

a, b. 广元矿山梁,  $P_2d$ , 钙质泥页岩; c, d. 重庆南川,  $P_2l$  黑色泥页岩; e. 河坝 1 井,  $P_2d$ , 硅质页岩; f. 通江剖面,  $S_1l$ ,

黑色页岩; g, h. 通江剖面,  $\epsilon_1n$ , 黑色页岩; i, j. 贵州遵义  $\epsilon_1n$ , 硅质页岩; k. 贵州麻江,  $\epsilon_1n$ , 硅质页岩

钙质硅化物或硅质碳酸盐为主, 有机碳含量随硅质含量降低而降低, 钙质含量有所增高(表 3); 粘土或 Al 元素含量较低(小于 10%), 粘土为伊/蒙混层(约占粘土的 77%)、伊利石(约占粘土的

20%)及绿泥石(约占粘土的 3%), 与表 2 中分析的石英、方解石及粘土含量基本一致。有机质条带有机碳含量最高达 74.6%(3 个能谱元素分析数据); S 元素含量随着有机碳含量的降低而降

表3 中国南方海相优质烃源岩典型样品能谱元素分析结果

Table 3 Energy-dispersive X-ray spectroscopy results of quality marine source rocks in South China

| 位置  | 能谱点          | 元素含量,% |                 |       |      |      |       |       |       |      |      |       |      |      | 描述                |
|-----|--------------|--------|-----------------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|-------------------|
|     |              | C      | C <sub>有机</sub> | O     | Na   | Mg   | Al    | Si    | S     | K    | Cl   | Ca    | Ti   | Fe   |                   |
| 图3a | 4~6          | 74.60  | 74.60           | 11.90 | —    | —    | —     | 0.60  | 6.90  | —    | 0.43 | 0.30  | 1.62 | 0.34 | 含硫有机质,生物残屑        |
|     | 1~3,<br>7~9  | 28.37  | 26.90           | 41.93 | —    | 0.26 | 2.40  | 19.27 | 0.52  | 1.19 | 0.06 | 4.89  | 0.13 | 0.85 | 硅质+有机质,生物残质,含钙及粘土 |
| 图3b | 2~1~3        | 68.06  | 67.35           | 25.64 | —    | 0.13 | 0.22  | 0.65  | 2.49  | —    | —    | 2.35  | 0.13 | 0.33 | 有机质,生物有机残屑        |
|     | 1~1~3        | 18.16  | 14.56           | 51.66 | 0.29 | 0.26 | 1.53  | 15.09 | 0.17  | 0.63 |      | 12.02 | —    | 0.18 | 硅质+钙质+有机质,        |
|     | 3~1~4        | 33.83  | 31.06           | 46.58 | 0.05 | 0.45 | 1.11  | 7.79  | 0.21  | 0.48 |      | 9.26  | 0.04 | 0.21 | 生物残屑,微含粘土         |
| 图3c | 1~4,<br>8~10 | 84.70  | 82.14           | 7.20  | —    | —    | 0.50  | 0.30  | 4.80  | —    | —    | 0.20  | 1.40 | 0.90 | 有机质体薄层,含硫化物       |
|     | 5~7          | 18.60  | 18.20           | 43.40 | —    | —    | 14.30 | 16.80 | —     | —    | —    | —     | 6.30 | 0.50 | 高岭石薄层             |
| 图3d | 10           | —      | —               | 52.90 | 2.80 | 0.20 | 9.10  | 8.60  | 14.10 | —    | —    | 7.50  | —    | 1.80 | 硫细菌               |
| 图3e | 4~7          | 48.50  | 48.30           | 26.60 | —    | —    | 0.06  | 20.80 | 3.30  | —    | —    | 0.80  | 0.05 | 0.34 | 硅质+有机质,略含硫,浮游藻残屑  |
|     | 1~3,<br>8~10 | 12.20  | 12.20           | 48.90 | —    | —    | 0.27  | 37.10 | 0.70  | —    | —    | 0.20  | 0.02 | 0.60 | 硅质含有有机质,生物碎屑      |
| 图3f | 1            | 42.60  | 40.70           | 35.30 | —    | 1.00 | 2.10  | 2.70  | —     | 1.70 | —    | 6.40  | 5.10 | 3.20 | 含钙有机质(生物残骸)       |
|     | 2~4          | —      | —               | 35.60 | —    | 0.60 | 6.00  | 52.80 | —     | 3.50 | —    | 0.40  | 0.60 | 0.60 | 粘土,不含有机质          |
| 图3g | 1~3          | 21.90  | 21.90           | 46.50 | 1.30 | 0.40 | 5.70  | 21.60 | —     | 1.80 | —    | —     | —    | 0.70 | 片状粘土矿物,含有机质       |
|     | 4~6          | 38.60  | 38.60           | 38.40 |      | 0.50 | 2.90  | 17.50 | —     | 1.00 | —    | —     | —    | 1.10 | 硅质有机质(鱼鳞藻类残片)     |
| 图3h | 4            | 15.00  | 15.00           | 57.60 | 0.80 | —    | 2.60  | 22.80 | —     | 0.90 | —    | —     | —    | 0.30 | 片状粘土矿物,含有机质       |
|     | 1            | —      | —               | 62.40 | —    | —    | 6.80  | 23.30 | —     | 7.50 | —    | —     | —    | —    | 钾长石不规则颗粒,不含有机质    |
|     | 2            | 3.60   | 3.60            | 58.70 | —    | —    | 6.80  | 23.20 | —     | 7.50 | —    | —     | —    | 0.20 | 钾长石不规则颗粒,略含有机质    |
|     | 3,5~9        | 18.60  | 18.60           | 48.00 | —    | 0.30 | 3.80  | 20.90 | —     | 2.70 | —    | —     | 0.10 | 5.50 | 硅酸盐不规则颗粒,含有机质     |
| 图3i | 1,3          | 14.70  | 14.70           | 47.00 | —    | —    | 0.60  | 36.10 | 1.60  | —    | —    | —     | —    | —    | 硅质+有机质,原始硅藻       |
|     | 2,4          | 15.00  | 15.00           | 50.60 | —    | —    | 1.70  | 29.50 | 0.70  | —    | —    | —     | —    | 2.60 | 硅质+有机质,藻孢子囊       |
| 图3j | 1            | 17.20  | 17.20           | 50.30 | —    | —    | —     | 31.80 | —     | —    | —    | —     | —    | 0.70 | 硅质+有机质,海绵         |
|     | 2            | 12.20  | 12.20           | 57.30 | —    | —    | —     | 30.00 | —     | —    | —    | —     | —    | 0.50 | 硅质+有机质,藻席         |
| 图3k | 1~4          | 45.90  | 45.80           | 18.10 | 0.20 | 1.00 | 5.80  | 19.80 | 0.60  | 2.10 | —    | 0.30  | 0.20 | 6.10 | 硅质有机质条带,生物残余物     |
|     | 5~7          | —      | —               | 34.80 | 1.00 | 1.00 | 10.10 | 46.00 | —     | 3.50 | —    | 0.50  | —    | 3.00 | 粘土,不含有机质          |

低。通江剖面 S<sub>1</sub>l 黑色页岩垂直页理自然面照片中4个能谱元素分析中片状粘土矿物颗粒或超微薄层均不含有机质(图3f;表3),但是,照片中含钙生物残骸有机质体(直径约10 μm)或硅质有

机质生物残余物条带(3~5 μm),有机碳含量大于42%,并含有钙质或硅质及铁质等化合物,它们并无相对固定的化合物分子式及元素组成。

川东北河坝1井 P<sub>2</sub>d 页岩垂直页理自然面

扫描电镜典型照片中10个点元能谱元素分析结果可看出:矿物化学成分均以 $\text{SiO}_2$ 为主,一般约占到无机矿物或无机元素的90%以上,碳酸盐或钙含量小于5%,粘土或Al元素含量很低(平均小于3%)(图3e)。几乎不含粘土或Al元素(表3)。均含有机成因的C元素,有机质条带有机碳最高含量平均达48.3%(4个能谱元素分析数据),S元素平均含量也达3.3%,有机碳含量最低为12.2%,S元素含量随有机碳含量降低而减少。

通江剖面 $\epsilon_{1n}$ 黑色页岩的垂直页理自然面照片中片状粘土矿物颗粒或超微薄层15个点能谱元素分析,有机碳变化在3.6%~38.6%之间(图3e,h)。照片中常见到鱼鳞藻类残片的硅质有机质体,主要由有机C、O、Si、Al等元素组成,硅质含量大于55%。照片中还见到主要由O、Si、Al、K等元素组成的不规则状类似钾长石(图3h),颗粒直径约10~30  $\mu\text{m}$ ,两个颗粒中一个不含有机质,另一个为稍含有机质。

贵州遵义松林剖面 $\epsilon_{1n}$ 黑色硅质页岩扫描电镜照片及超显微能谱元素分析表明有机碳含量平均为14.7%,矿物成分以硅质为主,微含粘土(Al平均为0.6%),为典型的硅质藻屑(图3i;表3)。图3j照片及表3中超显微能谱元素分析点2为硅质藻席,点1为硅质海绵,主要由Si和O(Si+O平均为84.7%)组成,微含铁元素,几乎不含粘土,有机碳含量平均为14.7%。

贵州麻江 $\epsilon_{1n}$ 黑色页岩扫描电镜典型照片中除少部分超显微粘土、钾长石及石英颗粒不含有机质外,生屑及复合体颗粒均含有机碳,最高生物体碎屑有机碳含量平均为45.8%(图3;表3)。

所分析样品中只有重庆南川 $P_2l$ 黑色泥页岩样品粘土以高岭石为主,呈层状,并见大量硫细菌(图3c,d)。通过扫描电镜照片+能谱元素分析及X-衍射分析可知:南方海相优质烃源岩中粘土矿物主要有两类:1)以高岭石为主的粘土矿物,以 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值较低、硅铝含量几乎相当为特征;2)以伊利石及伊蒙混层为特征,在扫描电镜下多呈片状颗粒。

不同层位烃源岩中硫元素含量相差较大,通江、贵州麻江、遵义松林 $\epsilon_{1n}$ 和 $S_1l$ 黑色页岩超显微颗粒中有机S元素含量均不高,而二叠系优质烃源岩有机质高含有机S元素。从南方海相优

质烃源岩扫描电镜所有能谱元素分析数据有机碳含量与S元素含量关系可以总结出如下规律:1) $\epsilon_{1n}$ 及 $S_1l$ 优质烃源岩中有机S元素含量均不高,一般均小于1%(表3),而二叠系优质烃源岩中有机S元素含量均很高;2) $\epsilon_{1n}$ 及 $S_1l$ 层位优质烃源岩中随有机碳含量的增加有机S元素含量增加不明显,而二叠系优质烃源岩中随有机碳含量增加有机S元素含量也相应增加,认为超显微生屑颗粒有机S元素也是生物或有机成因的产物。优质烃源岩有机S元素含量高低与地层时代及沉积环境有关,以地层时代二叠系烃源岩为中心有机S元素含量最高,主要原因是石膏层相对最发育,沉积水体及沉积有机物中有机S元素也相对含量最高也可能是造成优质烃源岩有机质中S元素含量也高的主要原因。

### 2.1.3 优质烃源岩成因特征

南方海相优质烃源岩样品扫描电镜微观结构观察表明其中的硅质、钙质类矿物主要为各种浮游生物、底栖生物或细菌等成烃生物的遗骸和残片经各种成岩作用后演化而来;硅质生物从海水中直接分解和吸收 $\text{SiO}_2$ 后形成生物机体,当它们死亡后使 $\text{SiO}_2$ 再次进入水溶液中或直接发生沉淀。海相优质烃源岩全岩X衍射表明海相优质烃源岩中的硅质、钙质类矿物多含一定量的有机质,形状不规则,有些具有明显生物屑特征,烃源岩中的石英几乎均为集合体,形状不规则,常呈它形致密块状,表面相对光滑细腻,常具贝壳状断口(图3)。这表明优质烃源岩中的硅质、钙质矿物并非从陆源搬运而来。

优质烃源岩主体矿物的来源主要是底栖生物的硅质或钙质格架埋藏后形成,南方海相优质烃源岩应该以生物成因为主。这与一些学者研究结果相一致<sup>[15~18]</sup>。

## 2.2 优质烃源岩有机质的三种赋存状态

### 2.2.1 有机质多与硅质生屑相伴生

本次南方海相分析的7个样品中,有5个样品为硅质(生屑)页岩,几乎不含或微含粘土(表3),占样品数的70%以上,而其他2个样品(矿山梁及通江龙马溪组)均含硅质或钙质生屑及片状粘土,只有1个样品重庆南川富含粘土及

硅质生屑。

川东北通江剖面 $\epsilon_{1n}$ 黑色页岩、 $S_1l$ 黑色页岩及河坝1井 $P_2l$ 黑色页岩垂直页理自然面照片中均见到顺页理面(层)分布的硅质富有机质带或薄层,其厚度一般在 $20\sim100\mu\text{m}$ 之间,能谱元素分析有机碳含量一般大于30%,常见藻或浮游生物残余化石。

2.2.2 有机质与钙质或硅钙质相伴生

南方海相优质烃源岩部分样品超显微颗粒为钙质或硅钙质生屑,四川盆地广元上寺剖面 $P_2d$ 钙质泥页岩垂直页理自然面(图4a)照片中5个点能谱元素分析除有机质条带外,均以Ca与O含量为主,大于45%,加上Si含量大于65%,有机碳含量变化较大,在4%~31%之间;有机质条带也以Ca、Si与O元素为主。云南禄劝剖面 $D_2$ 钙质泥页岩垂直页理自然面照片中的能谱元素分析显示有机质条带(微薄层)中除有机质外,以Ca、Fe和O含量为主(图4b),而另一条带可能为方解石,由Ca、O、C及Fe元素组成,按 $\text{CaCO}_3$ 计算不含有机质。南方海相 $P_2d$ 、 $D_2$ 优质钙质页岩及 $P_2l$ 、 $\epsilon_{1n}$ 、 $O_3w-S_1l$ 优质钙质页岩扫描电镜照片中的能谱元素分析多以Ca与O或Ca、Si与O元素为主,一般在65%以上,有机质含量变化较大,在能谱元素分析归一化有机碳含

量大于30%的生物残余带,格架组成也以Ca与O或Ca、Si和O为主,这与全岩X-衍射分析数据 $\text{SiO}_2$ 含量是一致的。南方海相 $P_2d$ 、 $D_2$ 海侵优质钙质烃源岩中的富有机质钙质或硅钙质生物碎屑常常顺页理面(层)分布,其厚度一般在 $20\sim90\mu\text{m}$ 之间(图4),能谱元素分析有机碳含量一般大于50%,常见藻膜或浮游生物残余化石。

2.2.3 有机质与超显微粘土颗粒相伴生

在已经分析的南方海相优质烃源岩典型样品中,只有重庆南川 $P_2l$ 黑色泥页岩样品粘土以高岭石为主,呈层状,并见大量硫细菌(图3c,d),其成烃生物可能与高等植物或底栖藻类的细菌腐泥化有关。贵州麻江及通江剖面 $\epsilon_{1n}$ 、 $S_1l$ 扫描电镜照片及能谱元素分析中明显见到粘土超微薄层或片状粘土矿物颗粒(图3g,h)。片状粘土矿物一般直径约在 $3\sim100\mu\text{m}$ 之间,厚度小于 $1\mu\text{m}$ ,约在 $10\sim100\text{nm}$ 之间。粘土本身不含有机质,由于能谱电子束作用范围远大于片状粘土矿物颗粒的厚度,因此能谱元素分析点可以大于或穿透片状粘土矿物厚度,把颗粒之间包裹的蜂窝状藻类或浮游生物等硅质有机物也囊括在内,因此片状粘土矿物的能谱元素分析也可以含有机质,在对85个片状粘土矿物颗粒质的能谱元素分析

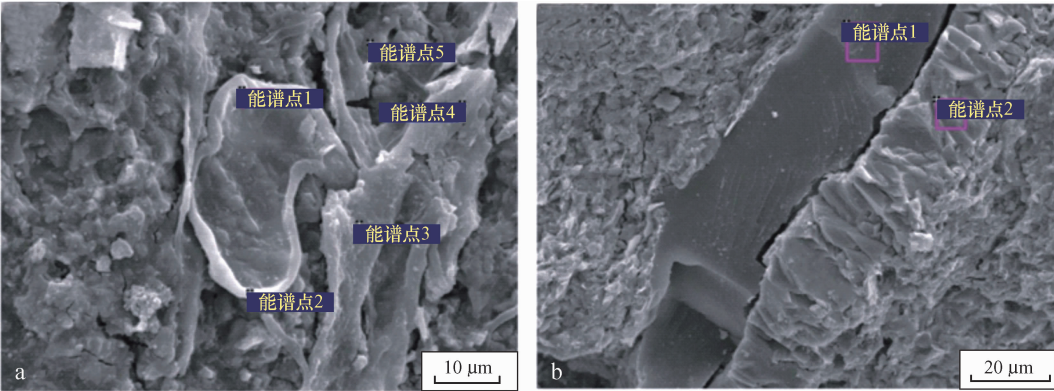


图4 中国南方海相优质烃源岩扫描电镜微观显微结构照片

Fig. 4 Scanning electron microscopy images of quality marine source rocks in South China

a. 广元上寺, $P_2d$ ,泥页岩,垂直页理自然面:能谱点1—4(C:30.90%, $C_{\text{有机}}$ :25.53%,O:45.74%,Mg:0.40%,Al:0.63%,Si:3.95%,Cl:0.12%,Ca:17.89%,Fe:0.36%),能谱点5(C:15.31%, $C_{\text{有机}}$ :4.15%,O:45.62%,Mg:0.67%,Al:0.16%,Si:0.79%,Cl:0.07%,Ca:37.20%,Fe:0.18%);b. 云南禄劝剖面, $D_2$ ,泥页岩,垂直页理自然面:能谱点1(C:62.83%, $C_{\text{有机}}$ :60.06%,O:21.13%,Ca:9.24%,Fe:6.80%),能谱点2(C:5.22%,O:41.03%,Ca:51.38%,Fe:2.37%)

中,有约70%的点(十字)或面(方块)含有一定量的有机质,但有机碳含量一般不超过30%,在14%左右。纯粘土或硅酸盐颗粒一般不含有有机质(表3)。

### 2.3 三种成烃生物

南方海相优质页岩主要有3种类型的成烃生物,分别是:浮游成烃生物(图5a<sub>1</sub>—a<sub>8</sub>)、底栖生物(图5b<sub>1</sub>—b<sub>11</sub>)和菌类(图5c<sub>1</sub>—c<sub>9</sub>)成烃生物。成烃生物分布的高丰度层位恰好是本地区的主要烃源岩层,是优质烃源岩形成的重要母质。中国南方海相优质烃源岩往往具有“多重母质”组合的特点,即各层位烃源岩往往都同时具有浮游生物、底栖生物和菌类中一类以上的多重母质分布,其组合的不同反映了沉积环境的差异。例如大隆组具有浮游藻类、底栖生物和菌类“三重母质”组合,而龙潭组以底栖藻和菌类为主,这反应了这两套层位沉积时水体环境的差异。大隆组浮游藻类和底栖藻都发育,说明沉积时水体较深,一般在60~200 m之间、水体底部环境比较稳定,利于有机质保存。而重庆南川龙潭组仅发育底栖藻类和菌类,未发现浮游藻类,说明其水体较浅<sup>[19~24]</sup>。

### 2.4 不同类型优质烃源岩生排烃潜力对比

#### 2.4.1 不同类型烃源岩生烃潜力

相同条件下不同成烃生物其生烃潜力及生烃量也不同<sup>[25]</sup>,单一成烃浮游藻和底栖藻的进行热压模拟实验结果表明:浮游藻具有极强的生成重质油能力(图6),最高生油量约相当于底栖藻的2~3倍,大部分成烃物质在较低温度下( $R_o \approx 0.66\%$ )就可以直接热降解生成大量重质油,有机碳转化率可达90%以上。随着热演化程度加深,生成的重质油一部分热裂解生成大量烃气和小分子的无机气体,另外一部分稠环芳烃杂原子基团进一步缩聚成更复杂、更稳定的含杂原子化合物即“固体沥青”。而海相底栖藻也可以生成原油、烃气和固体沥青,其数量要比浮游藻低,油相对要“轻”,生油高峰也相对靠后,表明成烃生物为浮游藻类的有机质生烃潜力更大,有机质类型为I型,而成烃生物为底栖藻类的有机质生烃潜力相对较小,有机质为II型。

#### 2.4.2 不同类型烃源岩排烃效率

海相干酪根(从云南禄劝D<sub>2</sub>富有机质灰岩中分离制备)+硅质(石英颗粒小于100目)与粘土(南京P<sub>2</sub>泥岩-蒙脱石为主)互薄层压配制成的烃源岩样品和海相干酪根(从云南禄劝D<sub>2</sub>富有机质灰岩中分离制备)+粘土(南京P<sub>2</sub>泥岩-蒙脱石为主)与硅质(石英颗粒小于100目)互薄层压配制成的烃源岩样品、云南禄劝D<sub>2</sub>富有机质泥灰岩、灰岩和四川广元矿山梁P<sub>2</sub>d泥页岩的地层流体异常压力热模拟实验,将海相硅质(或薄层)、粘土质、钙质烃源岩生排油气效率的进行对比,均以II型有机质类型为例。

研究表明海相硅质(或硅质生屑薄层)烃源岩在成熟早中期排油效率最高,钙质次之,粘土质最低,但在成熟晚期排油效率均迅速增高到60%以上(图7),因此,海相优质烃源岩中只有硅质生屑(或薄层)或钙质生屑(或薄层)烃源岩在成熟早期才能大量排出重质油或稠油,而粘土质烃源岩几乎不能排出重质油。它们在成熟晚期(相当于 $R_o$ 变化在1%~1.3%之间)排油效率均迅速增加到60%以上。

针对以上研究,对南方优质烃源岩来说,海相台内盆地(凹陷或潟湖)稳定且分层沉积水体中浮游生物(硅藻、甲藻等)沉积的优质烃源岩( $TOC \geq 2\%$ )在成熟早期( $R_o = 0.45\% \sim 0.70\%$ )往往就可以形成大量重质油(约占50%以上),它可以沿富有机质硅质或钙质超微薄层连续不断地排出页岩,排出量或排出比例可能与硅质或钙质还是粘土包裹等对重质油的吸附性有关:硅质富有机质超微薄层(生物格架为硅藻、硅质放射虫、硅质海绵、牙形刺等生物化石,可能与上升流有关)对原油尤其是重质油吸附能力相对较小,最容易排出特重质油( $API$ 小于10或密度大于1);碳酸盐富有机质超微薄层(生物格架为钙质生物化石)对原油或重质油吸附能力也相对较小,但是比硅质大一些,也较容易排出重质油( $API$ 介于10~20或密度介于0.94~1.00 g/cm<sup>3</sup>);而粘土矿物对原油或重质油的吸附能力相对最大,重质油很难排出,一般大量排出的是正常原油或轻质油( $API$ 介于25~40或密度介于0.82~0.90 g/cm<sup>3</sup>)。因此,海相富有机质硅质或钙质超微薄层的优质烃源岩在

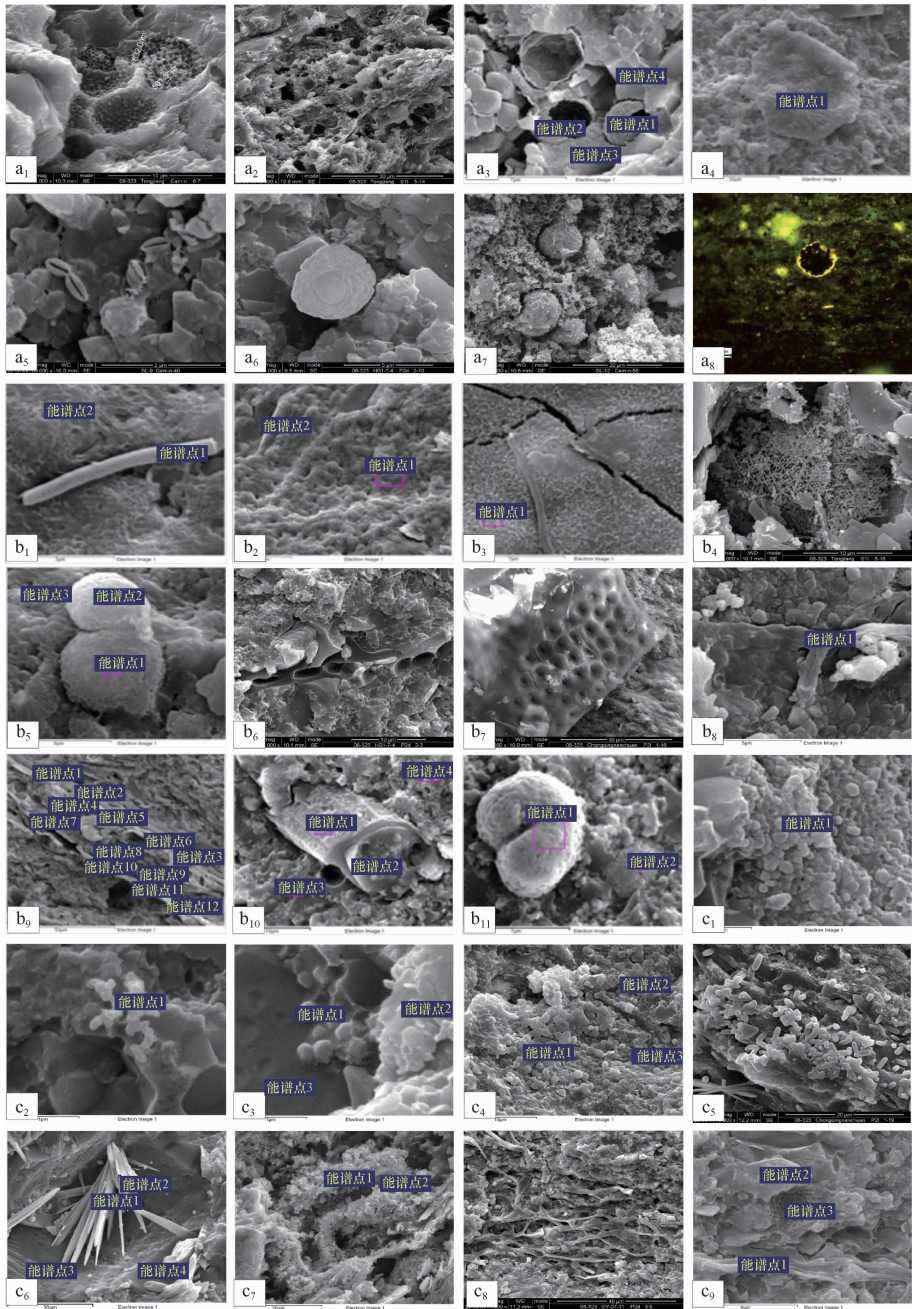


图5 中国南方海相优质烃源岩成烃生物

Fig. 5 Photographs of typical hydrocarbon-forming organisms of quality marine source rocks in South China

a<sub>1</sub>. 通江,  $\epsilon_1n$ , 硅质鱼鳞薄片; a<sub>2</sub>. 通江,  $S_1l$ , 硅质鱼鳞薄片; a<sub>3</sub>. 贵州遵义,  $\epsilon_1n$ , 硅质光面球藻(具瘤面的疑源类); a<sub>4</sub>. 通江,  $\epsilon_1n$ , 硅(氮)质光面球藻; a<sub>5</sub>. 贵州遵义,  $\epsilon_1n$ , 原始硅质硅藻; a<sub>6</sub>. 河坝1井,  $P_2d$ , 可能为硅钙质蓝藻光合片层; a<sub>7</sub>. 贵州遵义,  $\epsilon_1n$ , 小刺藻; a<sub>8</sub>. 广元上寺,  $P_2d$ , 全岩反射显微荧光照片, 塔斯马尼亚藻。 b<sub>1</sub>. 贵州遵义,  $\epsilon_1n$ , 硅质藻席和孢子囊, 硅质海绵; b<sub>2</sub>. 贵州遵义,  $\epsilon_1n$ , 富钼藻席, 示网眼和丝; b<sub>3</sub>. 贵州遵义,  $\epsilon_1n$ , 富铁藻席; b<sub>4</sub>. 通江,  $S_1l$ , 硅质海绵; b<sub>5</sub>. 贵州遵义,  $\epsilon_1n$ , 硅质等藻孢子囊, 宏观底栖硅质藻; b<sub>6</sub>. 河坝1井,  $P_2d$  藻丝体残片(宏观底栖藻); b<sub>7</sub>. 重庆南川,  $P_2l$ , 底栖红藻, 见纹孔; b<sub>8</sub>. 贵州遵义,  $\epsilon_1n$ , 具中肋底栖藻硅质残片; b<sub>9</sub>. 通江,  $S_1l$ , 藻丝体细胞壁, 藻丝体中间充填硅质粘土有机质; b<sub>10</sub>. 河坝1井,  $P_2d$ , 藻丝体细胞壁, 藻丝体中间硅化; b<sub>11</sub>. 河坝1井,  $P_2d$ , 黄铁矿化孢子囊; c<sub>1</sub>. 贵州遵义,  $\epsilon_1n$ , 硅质细菌(细菌对藻席的改造); c<sub>2</sub>. 河坝1井,  $P_2d$ , 硅质岩面上的微生物(硅质细菌); c<sub>3</sub>. 河坝1井,  $P_2d$ , 硅质铁硫细菌, 不含有机质硅质铁硫细菌; c<sub>4</sub>. 重庆南川,  $P_2l$ , 粘土质硫细菌, 不含有机质粘土质硫细菌; c<sub>5</sub>. 重庆南川,  $P_2l$ , 杆状硫细菌; c<sub>6</sub>. 重庆南川,  $P_2l$ , 硫细菌; c<sub>7</sub>. 通江,  $S_1l$ , 铁细菌(弯曲状, 中空); c<sub>8</sub>. 广元矿山梁,  $P_2d$ , 钙硅粘土质真菌菌丝; c<sub>9</sub>. 广元上寺,  $P_2d$ , 钙质真菌菌丝, 硅质黄铁矿印痕或硅质鱼鳞藻

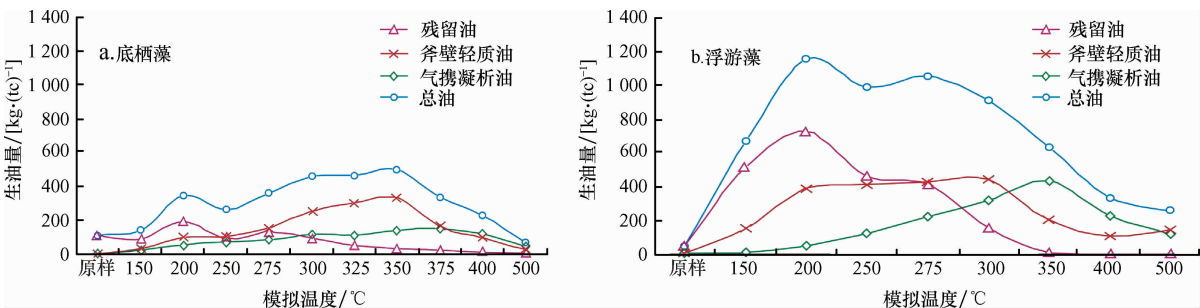


图 6 中国南方海相浮游藻和底栖藻油产率随模拟温度的变化

Fig. 6 Changes of oil yields of the marine pelagic algae and benthic algae over simulated temperature

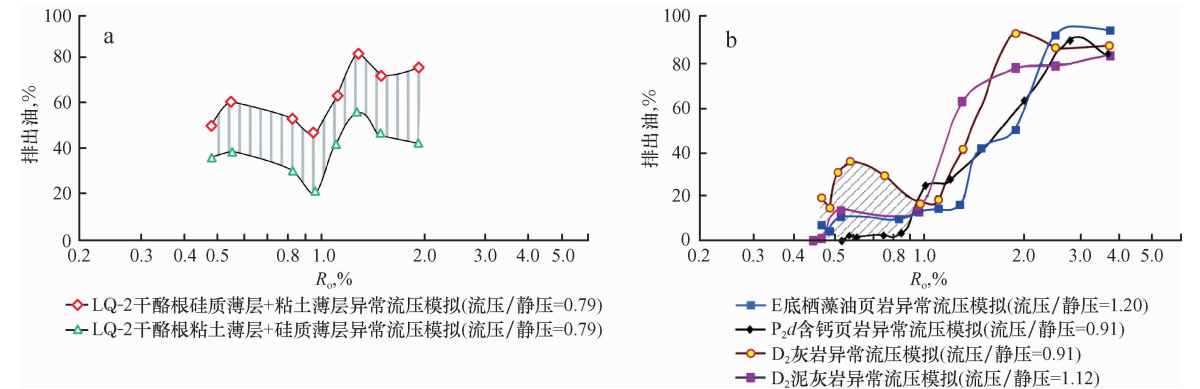


图 7 中国南方海相不同类型烃源岩排油效率对比

Fig. 7 Hydrocarbon-expulsion efficiency of different types of quality marine source rocks in South China

低成熟-成熟阶段较容易排出重质油或原油并形成巨型重质油藏,在高过成熟阶段,则以排除轻质油或者气藏为主。

微薄层容易使早期重质油排出,可以形成巨型重质油藏,而片状粘土之间包裹的有机质很难使早期生成的稠油排出,可以形成轻质油气藏。

3 结论

- 1) 海相优质烃源岩有机质主要与硅质相伴生,是南方海相优质烃源岩中最重要的赋存形式;南方海相 P<sub>2</sub> 优质烃源岩中有机质与钙质相伴生;重庆南川优质烃源岩中有机质与粘土相伴生或被片状粘土颗粒包裹与硅质及钙质生屑一起共生,硅质岩主要以生物成因为主。
- 2) 海相优质烃源岩主要由浮游藻类、底栖藻类和菌类三种类型成烃生物组成,同一烃源岩层位、甚至同一样品中往往含有“多重母质”分布的特征。在高、过成熟的条件下成烃生物可以很好的指示烃源岩的品质。
- 3) 模拟实验表明浮游藻类的生烃潜力与 I 型干酪根生烃潜力相当,底栖藻类生烃潜力与 II 型干酪根生烃潜力相当;富有机质硅质或钙质超

参 考 文 献

1 金之钧,蔡立国. 中国海相油气勘探前景、主要问题与对策 [J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):722~730

2 马力,陈焕疆,甘克文,等. 中国南方大地构造和海相油气地质 [M]. 北京:地质出版社,2004. 3~19

3 秦建中,腾格尔,付小东. 海相优质烃源层评价与形成条件研究 [J]. 石油实验地质,2009,31(4):366~372

4 秦建中,付小东,腾格尔. 川东北宣汉-达县地区三叠-志留系海相优质烃源层评价 [J]. 石油实验地质,2008,30(4):368~374

5 秦建中,付小东,刘效曾. 四川盆地东北部气田海相碳酸盐岩储层固体沥青研究 [J]. 地质学报,2007,81(8):1065~1070

6 付小东,秦建中,腾格尔. 四川盆地东南部海相层系优质烃源层评价——以丁山 1 井为例 [J]. 石油实验地质,2008,30(6):621~628

7 Coppedge M L, Balsam W L. Organic carbon distribution in the North Atlantic Ocean during the last glacial maximum [J]. Marine Geology, 1992, 105(1-4): 27-50

8 Bock M J, Mayer L M. Mesodensity organo-calay associations in a

near shore sediment[J]. *Marine Geology*,2000,163(1-4):65-75

9 秦建中,王杰,邱楠生,等. 反演南方海相层系热史动态演化的新温标——磷灰石、锆石(U-Th)/He 年龄和封闭温度[J]. *石油与天然气地质*,2010,31(3):277~287

10 董大忠,程克明,王玉满,等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. *石油与天然气地质*,2010,31(3):288~299,308

11 蔡进功,包于进,杨守业. 泥质沉积物和泥岩中有机质的赋存形式与富集机制[J]. *中国科学(D辑)*,2007,37(2):244~253

12 蔡进功,徐金鲤,杨守业. 泥质沉积物颗粒分级及其有机质富集的差异性[J]. *高校地质学报*,2006,12(2):234~241

13 李善营,于炳松,Dong Hailiang,等. 青海湖底沉积物的矿物物相及有机质保存研究[J]. *岩石矿物学杂志*,2006,25(6):493~498

14 陆现彰,胡文暄,符琦,等. 烃源岩中可溶有机质与粘土矿物结合关系——以东营凹陷沙四段低熟烃源岩为例[J]. *地质科学*,1999,34(1):69~77

15 余和中,谢锦龙,王行信,等. 有机粘土复合体与油气生成[J]. *地质前缘*,2006,13(4):254~280

16 李红敬,解习农,周炼,等. 扬子地区二叠系硅质岩成因分析及沉积环境研究[J]. *石油实验地质*,2009,31(6):564~575

17 杨水源,姚静. 安徽巢湖平頂山中二叠统孤峰组硅质岩的地球化学特征及成因[J]. *高校地质学报*,2008,14(1):39~48

18 Masao K,Masamichi T,Hiroimi N,et al. Sedimentary environments of the Middle Permian phosphorite chert complex from the north-eastern Yangtze plat form, China; the Gufeng Formation; a continental shelf radiolarian chert[J]. *Sedimentary Geology*,2005,174(1-4):197~222

19 Sally M,Alice A,Chris G. Accumulation of marine snow at density discontinuities in the water column[J]. *Limnology and Oceanography*,1995,40(3):449~468

20 Thomas K,George J. Marine snow, organic solute plumes, and optimal chemosensory behavior of bacteria[J]. *Limnology and Oceanography*,2001,46(6):1309~1318

21 Laetitia P,Philippe B,Mohammed B,et al. Organic matter accumulation and preservation controls in a deep sea modern environment: an example from Namibian slope sediments [J]. *Organic Geochemistry*,2004,35(5):543~559

22 Vandenbroucke M, Largeau C. Kerogen origin, evolution and structure[J]. *Organic Geochemistry*,2007,38:719~833

23 孙永革,肖中尧,徐世平,等. 塔里木盆地原油中芳基类异戊二烯烃的检出及其地质意义[J]. *新疆石油地质*,2004,25(2):215~218

24 贾望鲁,彭平安,肖中尧. 塔里木盆地典型海相原油沥青质中1,2,3,4-四甲基苯的碳同位素组成——母源形成于强还原环境的证据[J]. *中国科学(D辑)*,2008,38(1):94~98

25 Harold C H,Laurent R,William F M,et al. A chemical and thermodynamic model of oil generation in hydrocarbon source rocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,2009,73(3):594~695

(编辑 张亚雄)

(上接第778页)

29 朱家俊. 低孔低渗油藏具高含油饱和度现象的地质成因分析——以胜利油区东营凹陷油藏为例[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*,2008,30(3):64~67

30 史基安,王金鹏,毛明陆,等. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组长6~8段储层砂岩成岩作用研究[J]. *沉积学报*,2003,21(3):373~380

31 李红,柳益群,刘林玉. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长81低渗透储层成岩作用[J]. *石油与天然气地质*,2006,27(2):209~217

32 Luo X R,Yu J,Zhang L P,et al. Numerical Modeling of Secondary Migration and its Applications to Chang-6 Member of Yanchang Formation (Upper Triassic), Longdong Area, Ordos Basin, China [J]. *Science in China (Ser D: Earth Sci)*,2007,50 (Supp II):91~102

33 李荣西,席胜利,邸领军. 用储层油气包裹体岩相学确定油气成藏期次——以鄂尔多斯盆地陇东油田为例[J]. *石油与天然气地质*,2006,27(2):194~199

34 陈瑞银,罗晓容,吴亚生. 利用成岩序列建立油气输导格架[J]. *石油学报*,2007,28(6):43~46

35 邓秀芹,刘新社,李士祥. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组超低渗透储层致密性与油藏成藏史[J]. *石油与天然气地质*,2009,30(2):156~160

36 Barclay S A, Worden R H. Effect of reservoir wettability on quartz cementation in oil fiels [A]. In: Worden R H, Morad S, ed. *Quartz Cementation in Sandstones* [C]. *Spec Publs Int Ass Sediment*,2000,29:103~117

37 Anderson W G. Wettability literature survey: Part 1 Rock/oil/brine interactions and the effects of core handling on wettability [J]. *Journal of Petroleum Technology*,1986,38:1125~1149

38 李元昊,刘建平,梁艳,等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组低渗透岩性油藏物理模拟[J]. *石油与天然气地质*,2009,30(6):706~713

39 冷先刚,孙卫,解伟,等. 西峰油田庄58井区长81储层出水原因[J]. *断块油气田*,2009,16(2):89~91

(编辑 董立)