

# 塔里木盆地奥陶系海相源岩中两类生烃母质\*

王飞宇<sup>①</sup> 边立曾<sup>②</sup> 张水昌<sup>③</sup> 张宝民<sup>③</sup> 梁狄刚<sup>③</sup>

(<sup>①</sup> 石油大学, 北京 102200; <sup>②</sup> 南京大学, 南京 210000; <sup>③</sup> 石油勘探开发科学研究院, 北京 100083)

**摘要** 中上奥陶统海相源岩是塔里木盆地的主要油源岩, 高有机质丰度生油岩发育在台缘斜坡灰泥丘相之中. 中等成熟的(等效镜质体反射率 0.8%~1.3%)这类油源岩中明显存在两类生烃母质, 表现为两类不同光性有机显微组分. 一是具明显黄色和褐黄色荧光的富氢组分, 主要为结构藻类体、层状藻类体、碎屑类脂体, 主要来源于浮游藻类和疑源类; 二是不具荧光的, 光性上类似于镜质体的相对贫氢组分, 显微镜下其形态多呈条带状. 宏观化石和显微有机组分对比分析表明, 镜状体来源于底栖叶状体植物(如较贫氢的褐藻类). 对更多的元古界和下古生界宏观藻化石的有机岩石学分析揭示原始贫氢的有机质在前泥盆系海相源岩中广泛存在, 这是一些浅水碳酸盐岩有机质类型较差(II B 型和 III 型)的主要原因.

**关键词** 生烃母质 奥陶系 烃源岩 浮游藻类 底栖叶状体植物 塔里木盆地

对奥陶系海相烃源岩生烃母质的已有认识, 一方面, 普遍认为奥陶系烃源岩生源单调, 均为富氢的菌藻类; 另一方面, 国外许多学者认识到全球范围内奥陶系烃源岩及生成原油特征上的相似性, 他们认为这与粘球形藻(*Gloeocapsamorpha prisca*)作为主要生油母质有关<sup>[1~4]</sup>. Fowler<sup>[4]</sup>将奥陶系烃源岩分为三类, 一是库克油页岩(Kukersite)型, 其有机质主要由粘球形藻组成; 二是稀释的 Kukersite 型, 有机质中粘球形藻有明显贡献; 三是非 Kukersite 型, 有机质中基本没有粘球形藻贡献. 从 Fowler 统计资料来看, 北美地台下古生界海相油气田形成过程中, Kukersite 型和稀释 Kukersite 型烃源岩是烃类主要贡献者, 此类烃源岩在整个下古生界均存在, 在奥陶系中尤为丰富<sup>[4]</sup>. 奥陶系源岩是塔里木盆地的主要油源岩, 近年来我们对塔里木盆地奥陶系有机相和生油岩特征进行了沉积学、有机岩石学、有机地球化学和古生物学综合分析, 认识到奥陶系海相源岩中存在两类具不同光性和化学性质的有机质, 它们的生烃潜力和成烃作用存在明显差异, 在不同地区两者的丰度存在差异, 塔里木奥陶系烃源岩有机质生源的复杂性的新认识有助于解释不同区域油气的多样性和差异性.

## 1 地质背景和样品

在“九五”研究项目实施前, 普遍认为塔里木盆地寒武-奥陶系主力生油坳陷位于满加尔坳陷, 其中广泛分布的巨厚奥陶系(特别是中上奥陶统)暗色泥岩是塔里木盆地主力油源岩, 据此, 许靖华在 1993 年提出了塔里木盆地地下古生界源岩埋藏静海形成展布模式<sup>[5]</sup>. 近年来, 我们对塔里木盆地古生界源岩进行了沉积学、有机岩石学、有机地球化学和古生物学综合研究<sup>[1]</sup>, 认

1999-12-09 收稿, 2000-07-14 收修改稿

\* 国家“九五”重点攻关项目(96-111-01-03)和国家自然科学基金(批准号: 49972041)资助课题

1) 王飞宇, 张宝民, 边立曾, 等. 塔里木盆地古生界有效烃源岩分布和生烃潜力评价(研究报告). 1998

识到仅下中寒武统源岩呈埋藏静海形成展布模式(或黑海模式), 中上奥陶统地层中高有机质丰度生油岩( $\text{TOC} > 0.5\%$ )发育在塔中隆起带或塔北隆起带向满加尔坳陷过渡的台缘斜坡灰泥丘相中, 受上升洋流引起的高有机质生产力带控制, 而满加尔坳陷中的超补偿盆地相暗色泥岩有机质丰度很低( $\text{TOC}$  普遍低于  $0.2\%$ ), 并非是有效生油岩。如图 1, 在塔中隆起-满加尔坳陷-塔北隆起中上奥陶统地层中, 高有机质丰度优质油源岩分布在高有机质产率的台缘斜坡灰泥丘相之中, 并非是在满加尔坳陷沉降和沉积中心区。

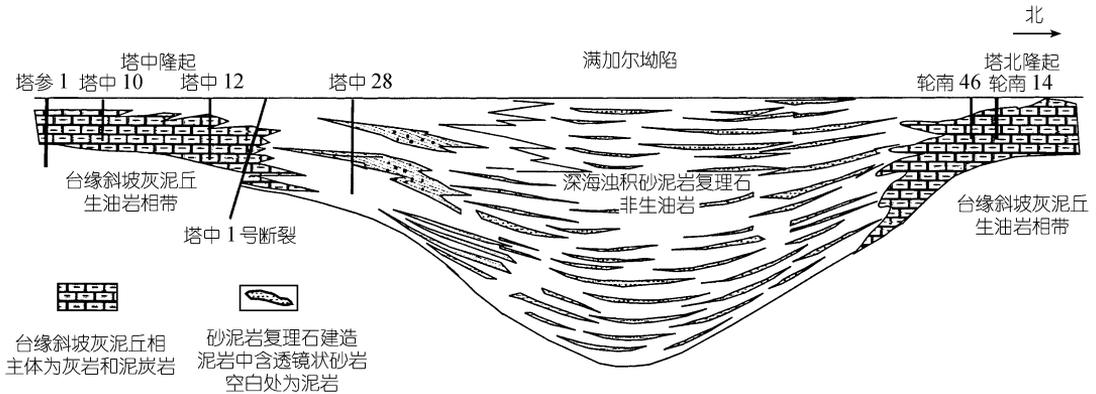


图 1 塔里木盆地塔中隆起-满加尔坳陷-塔北隆起奥陶系有机相剖面示意图

分析样品主要采自塔中隆起的南、北斜坡、塔北隆起的南斜坡 21 口探井中上奥陶统灰泥丘有机相生油岩, 其中重点分析了塔中 12 井、塔中 10 井、塔参 1 井、轮南 46 井和轮南 14 井中上奥陶统海相源岩样品。

## 2 结果和讨论

### 2.1 两类有机组分的岩石学特征

利用镜状体反射率、藻类体荧光参数、笔石体反射率等显微光度学参数, 对塔里木盆地中上奥陶统烃源岩, 特别是塔中北斜坡灰泥丘有机相源岩的现今有机成熟度进行了系统分析, 塔中地区中上奥陶统灰泥丘相生油岩目前仍处于生油高峰和生油窗后期阶段, 等效镜质体反射率(VRE)在  $0.8\% \sim 1.3\%$  之间, 牙形石色级指数 CAI 值均在  $1.5 \sim 2$  之间, 塔北中上奥陶统海相源岩等效镜质体反射率在  $1.15\% \sim 1.53\%$  之间。

镜检分析表明, 中等成熟(VRE 为  $0.8\% \sim 1.3\%$ )的塔里木奥陶系烃源岩, 特别是有机质丰度较高的丘间洼地亚相泥晶灰岩、泥灰岩中明显共存着两类不同光性的有机组分。一是具明显黄色和褐黄色荧光的有机显微组分, 主要为结构藻类体、层状藻类体、碎屑类脂体(图 2(a)), 主要来源于浮游藻类或疑源类; 二是不具荧光的, 光性上类似于镜质体的有机显微组分, 镜状体(Vitrinite-like maceral)多呈条带状、透镜体(图 2(b)), 镜状体反射率多介于  $0.4\% \sim 0.8\%$ 。

塔里木盆地奥陶系台缘斜坡灰泥丘相烃源岩岩心中常见有宏体多细胞原叶体植物化石, 即宏观藻类。化石体多呈单体产出, 大都以碳质薄膜的方式保存在岩层面上, 它们具规则的形态轮廓, 化石原植体为细条带体、丝状体或叶状体, 个体肉眼可见, 保存完好的宏体藻化石宽度多在  $1 \sim 15 \text{ mm}$ , 长度最大可达成  $150 \text{ mm}$ (图 3), 但大多数情况下保存下来的主要是大小在

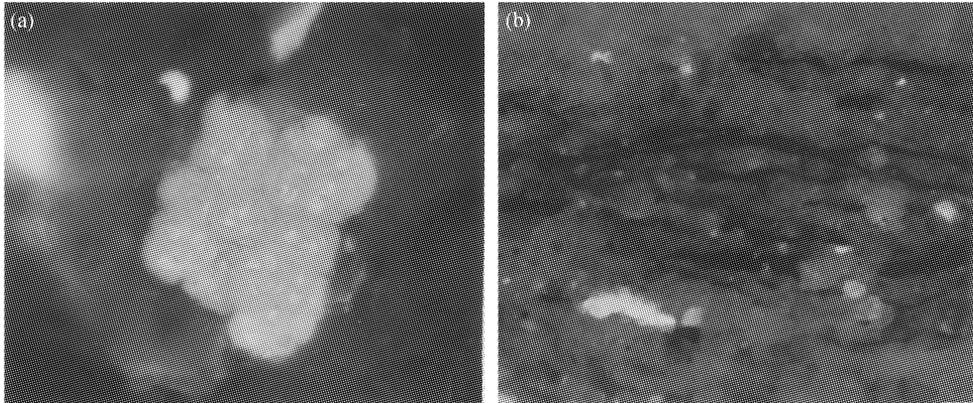


图 2 塔里木盆地中上奥陶统生油岩两类不同光性的有机组分

(a) 结构藻类体, 粘球形藻(*Gloeocapsamorpha prisca*), 反射荧光,  $\times 500$ , TZ12 井, 4970 m(O3), 泥晶灰岩, VRE = 0.99%, (b) 镜状体, 反射荧光,  $\times 200$ , TZ12 井, 4742 m(O3), 泥灰岩, VRE = 0.98%

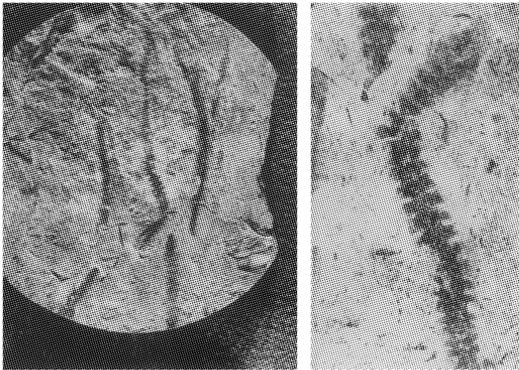


图 3 塔里木盆地中上奥陶统生油岩中宏观体藻类化石

样品取自塔中 43 井 4089 m(O3), 宏观体藻表现为碳质压膜, 左.  $\times 0.8$  右.  $\times 2.4$ , 同一标本

1~10 mm 的破碎宏藻叶片. 对宏体藻已有的研究表明, 它主要营底栖生长<sup>[6-9]</sup>. 对宏体藻化石的镜检分析表明, 显微镜下它均呈镜状体光性, 不具荧光, 宏体藻来源的镜状体似经历过凝胶化作用而呈均一状, 类似于均质镜质体, 其中罕见细胞组织或假薄壁组织. 宏观化石和显微有机组分对比分析表明, 塔里木盆地中等成熟度奥陶系烃源岩中镜状体来源于宏体多细胞原叶体植物. 根据宏化石和有机显微组分形态, 可确定一部分有机显微组分的生物来源(表 1).

对塔里木盆地 6 口典型探井上奥陶统灰泥丘相生油岩有机显微组分定量统计表明, 镜状体在有机显微组分中所占比例(统计平均值)各井有明显差异, 塔中 201 井最高, 可达 33%, 轮南 46 井最低, 仅为 6%. 另一方面, 镜状体数量

表 1 两类有机显微组分的生物来源

荧光性富氢有机显微组分: 结构藻类体		非荧光性贫氢有机显微有机组分: 镜状体	
塔斯玛尼亚藻	<i>Tasmanaceae</i>	叶藻	<i>Thallophyca</i>
粘球形藻	<i>Gloeocapsamorpha prisca</i>	小丛藻属	<i>Fasciculella</i>
光面球藻	<i>Leiosphaeridia</i>	塔乌藻属	<i>Tawuia</i>
念珠藻	<i>Nostocaceae</i>	等称叶藻	<i>Isophylum</i>
波罗的球藻属	<i>Baltisphaeridium</i>	古海藻属	<i>Paleolaveilla</i>
指梭藻	<i>Dactylofusa</i>	原紫杉藻(?)	<i>Prototaxites(?)</i>
角球藻属	<i>Goniosphaeridium</i>	朱丽叶藻	<i>Juriaphyllum</i>
瘤面球藻	<i>Lophosphaeridium</i>		
舟梭藻属	<i>Navifusa</i>		
奥陶藻属	<i>Ordovicidium</i>		
来源于浮游藻类或疑源类		来源于底栖岩藻类, 表现为碳压膜	

在同一探井垂向上不同层位或埋深亦存在显著变化, 最高可达 75%, 低者仅在 5% 以下. 在塔里木盆地奥陶系海相地层中, 有机质丰度较高( $TOC > 0.5\%$ )的主要是下列 4 种微相岩石:

微相 A: 丘间洼地泥晶灰岩、泥灰岩、灰质泥岩, 单层厚度一般  $> 10\text{ cm}$  ~ 几米;

微相 B: 泥质、泥灰质、灰泥质条带, 单层厚度一般  $3 \sim 10\text{ cm}$ ;

微相 C: 泥质、泥灰质、灰泥质纹层, 单层厚度一般  $0.5 \sim 3\text{ cm}$ ;

微相 D: 压溶层和缝合线, 单层厚度一般  $0.2 \sim 2\text{ cm}$ .

富镜状体层主要位于微相 A 之中, 微相 B, C, D 中镜状体含量一般在 15% 以下.

表 2 塔里木盆地上奥陶统灰泥丘有机相生油岩有机显微组分组成<sup>a)</sup>

有机组分	井号					
	塔中 12 井	塔中 10 井	塔中 201 井	塔参 1 井	轮南 46 井	轮南 16 井
藻类组	25	31	15	25	21	9
无定形有机质组	56	42	39	60	60	66
镜状有机质组	12	18	33	10	6	14
次生有机质组	3	4	7	3	9	4
动物有机质组	4	5	6	2	4	7
分析样品数	16	8	9	3	7	5

a) 有机显微组分源岩样品  $TOC > 0.5\%$ . 表中列出的是统计平均值, 单位为%

## 2.2 两类有机组分的地球化学特征

根据干酪根  $H/C-O/C$  原子比类型图, 塔里木盆地塔中北斜坡有机碳大于 0.5% 的中上奥陶统源岩有机质类型多为 II-III 型(图 4), 荧光有机组分(主要是藻类体和无定形体)和非荧光性组分(主体为镜状体)相对富集物( $> 70\%$ )有机质类型则分别位于 II 型与 III 型演化线附近, 反映它们为奥陶系海相源岩中富氢与贫氢的两种端元类型. 作为对比, 图 4 中还列出两种典型的海相生油岩库克油页岩(有机组分主体为粘球形藻)和塔斯玛尼亚油页岩(有机组分主体为塔斯玛尼亚藻)样品有机质类型位置. 统计分析表明, 相似成熟度下, 塔里木盆地奥陶系干酪根  $H/C$  原子比或源岩氢指数与荧光有机组分数量呈正相关, 而与镜状体数量呈负相关.

选择荧光有机组分和非荧光有机组分相对富集源岩样品, 处理成干酪根作固体核磁共振( $^{13}C-NMR$ )谱分析, 荧光有机组分相对富集的干酪根  $^{13}C-NMR$  谱(图 5B)中, 脂碳峰明显高于芳构碳峰, 位于化学位移 30 附近的亚甲基碳是全谱中最强峰, 说明它的结构中含有大量聚甲基链, 相反, 镜状体相对富集的干酪根  $^{13}C-NMR$  谱(图 5A)中, 脂碳峰明显低于芳构碳峰, 反映它为贫氢有机组分, 有

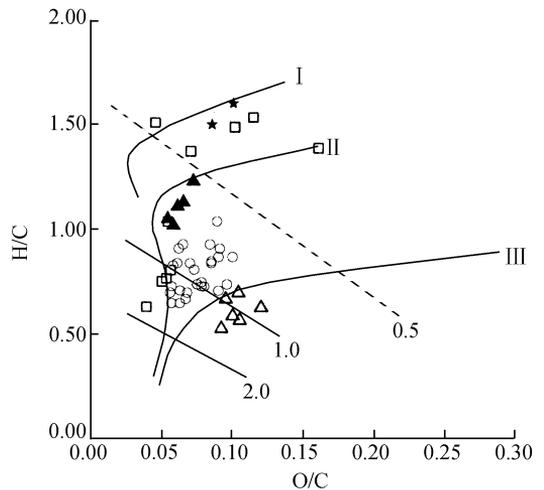


图 4 塔里木盆地塔中北斜坡中上奥陶统烃源岩干酪根元素分析

○ 塔中北斜坡 23 个中上奥陶统海相源岩样品( $TOC > 0.5\%$ ),  
▲ 荧光有机组分相对富集样品( $> 70\%$ , 主要是藻类体和无定形体),  
△ 非荧光性组分相对富集的样品, ( $> 70\%$ , 主体为镜状体),  
□ 奥陶系库克油页岩样品(主体为粘球形藻)演化系列, ★ 塔斯玛尼亚油页岩样品(主体为塔斯玛尼亚藻)

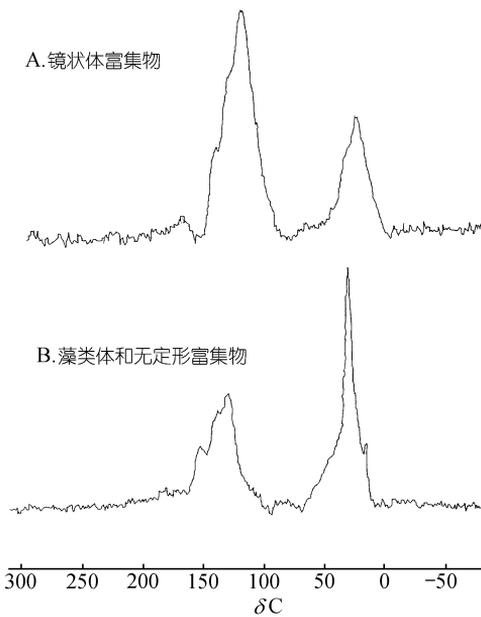


图 5 塔里木盆地中上奥陶统源岩中两类生烃母质的  $^{13}\text{C}$ -NMR 谱

A. TZ10 井 5243 m(O3)丘间洼地泥晶灰岩干酪根, 非荧光有机组分数量 82%(主体是镜状体) VRE=1.12%, B. TZ12 井 4805 m 泥灰岩干酪根, 荧光有机组分数量 92%(主体为藻类体和不定形体), VRE=0.95%

相对贫氢的特点。

塔里木盆地中上奥陶统生油岩主要位于台缘斜坡灰泥丘相中, 高有机质丰度沉积物主要受上升洋流引起的高生产力带控制。在成熟阶段, 富氢和贫氢的两类有机显微组分共生在相对还原的沉积环境形成的海相源岩中, 这排除了富氢藻类氧化作用或腐植化作用转变为相对贫氢镜状体的可能性, 我们认为, 浮游植物和浅海底栖的叶状体植物是当时生态系统中两类主要初级生产者, 营浮游的藻类和疑源类形成了目前源岩中荧光性富氢有机组分, 另一方面, 底栖的叶状体植物形成了源岩中的镜状体(图 6)。

70 年代末, 人们就认识到下古生界海相地层中存在光性上类似镜质体的有机显微组分, 镜状体一般指的是前泥盆纪地层中光性类似于镜质体的有机显微组分, 类似的术语还包括了海相镜质体。Kisch<sup>[11]</sup>和 Buchardt 等人<sup>[12]</sup>分析讨论了北欧寒武-奥陶系 Alum 页岩中的镜状体的光性和形态特征。对镜状体成因仍未有明确认识, 主要存在三种观点: 一是认为它属沥青成因, 仅是在光性上类似于镜质体<sup>[13]</sup>; 二是认为它是原始相对贫氢富多糖类(如纤维类、藻酸、果胶和几丁质等)有机质形成<sup>[12]</sup>; 三是高过成熟阶段藻类体(特别是粘球形藻)热解残留物<sup>[14]</sup>。由于固体沥青成因上特点, 它仅在光性上类似于镜质体, 在全岩光片中据产状和形态易于鉴别固体沥青。实际上关于镜状体成因争论焦点在于它来源于原始较贫氢的藻类(如褐藻类)等有机质, 抑或它是原始富氢藻类(如粘球形藻)降解生烃后残留物。通过对塔里木盆地下古生界海相源岩有机岩石学分析, 我们认识到镜状体可能原生成因, 来源于原始贫氢的底栖型藻群或叶

机碳主体为芳构碳和短链脂肪碳。

### 2.3 前泥盆纪海相源岩中两类有机显微组分成因和意义

冀北蓟县层型剖面长城系团山子组薄层状或页片状泥质白云岩中赋存有大量的碳质薄膜状化石——宏观藻类, 它们是地球上迄今发现的最古老( $17 \times 10^8$  a 前)的宏观多细胞化石, 宏观藻类化石来源于局限海浪基面以下较平静清水碳酸盐环境下的底栖型藻群(如褐藻类)<sup>[6-8]</sup>。我们对团山子组中宏观藻类化石镜检揭示它们均表现为镜状体, 与其共生的有荧光性细小藻类体。张昀对多细胞化和后生动植物的起源研究表明, 从新元古代晚期开始, 浮游植物和浅海底栖的叶状体植物(表现为宏观藻化石)成为当时生态系统中的主要初级生产者<sup>[9,10]</sup>, 我们推测这一生态系统盛行于早古生代的浅水环境。对 24 块不同地区元古代或古生代宏观藻类手标本的显微有机石学分析表明, 宏观藻类有机质均表现为镜状体, 反映叶状体植物(或宏观藻类)是前泥盆纪海相源岩中镜状体的重要母质, 具有原始

状体植物, 另一方面, 高过成熟阶段也存在藻类热演化形成的“次生”镜状体.

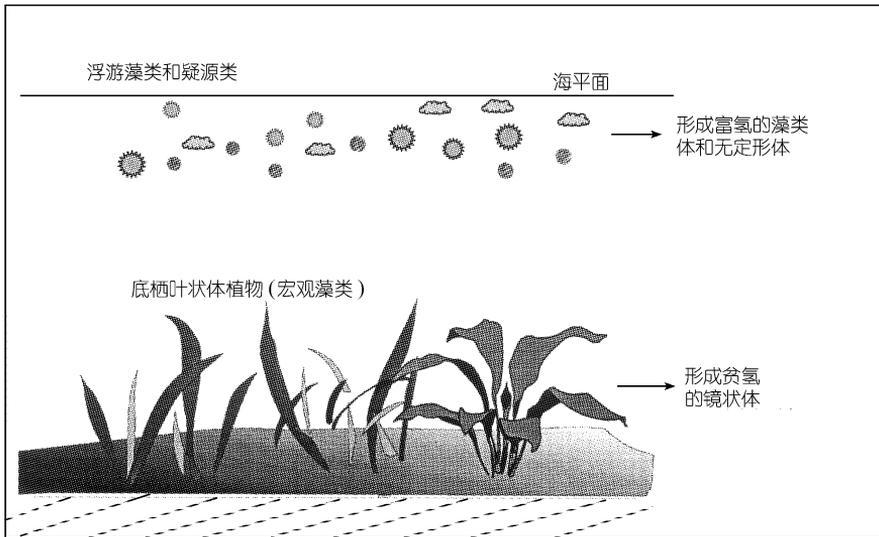


图 6 奥陶系台缘斜坡灰泥丘生物群落构成和两类有机质成因模式

由于前泥盆系海相地层中不存在陆源高等植物的贡献, 普遍认为前泥盆纪海相源岩有机质来源单调, 均为富氢的藻菌类, 前泥盆系海相源岩原始有机质类型为腐泥型或 I 型与 II 型干酪根, 不存在原始“腐殖型”有机质或 III 型干酪根, 高过成熟阶段偏“腐殖型”有机质是原腐泥型有机质成烃后衍生物. 在评价和恢复前泥盆系高过成熟海相源岩有机质类型和生烃潜力, 确定恢复系数时, 上述认识是基本出发点<sup>[15,16]</sup>. 但是, 已有大量的岩石热解(Rock-Eval)和干酪根元素分析表明, 大多数前泥盆系海相源岩层有机质类型为 II 型、II-III 型, 甚至一部分属于 III 型; 特别是浅水-极浅水台地相碳酸盐岩在我国分布十分广泛, 典型的如华北地台大部分下古生界碳酸岩地层, 它们具有有机质类型差, 主体为 IIB 和 III 型的特点<sup>[17]</sup>. 前面的分析揭示前泥盆系海相源岩层中存在大量来源于底栖叶状体植物(宏观藻)的原始贫氢有机组分, 说明有些海相源岩(主要是浅水碳酸盐岩)有机质类型较差, 其主要原因是原始有机质贫氢, 而不是富氢有机质热演化衍生或浅水氧化降解.

总之, 在前泥盆系海相源岩中存在两类不同光性、富氢程度和成因的有机显微组分, 它们分别来源于浮游植物和浅海底栖的叶状体植物(宏观藻类), 前泥盆系海相源岩中存在原始贫氢的有机质类型. 这一新认识有助于解释前泥盆系海相源岩有机质类型和烃类衍生物的多样性, 正确评价烃源岩生烃潜力. 塔里木台盆地中等成熟度的石油和天然气分别来源于中上奥陶统源岩富氢和贫氢有机质. 另一方面, 对来源于叶状体植物(宏观藻类)镜状体光性演化的系统分析, 可建立起前泥盆系海相源岩有机成熟度标尺.

**致谢** 北京大学生命学院张昀教授和天津地矿所阎玉忠教授提供了大量含宏观藻类岩石标本, 并指导了化石藻类方面的研究, 塔指勘探研究中心赵孟军高级工程师和肖中尧工程师协助采集了样品, 加拿大沉积和石油地质研究所 Sastiuk 博士提供了北美地台下古生界烃源岩特征和形成条件资料, 为我们对比研究提供了基础, 作者均致谢意.

## 参 考 文 献

- 1 Reed J D, Illich H A, Horsfield B. Biochemical evolutionary significance of Ordovician oils and their sources. *Org Geochem*, 1986, 10: 347~358
- 2 Hoffmann C F, Foster C B, Powell T G, et al. Hydrocarbon biomarkers from Ordovician sediments and the fossil alga *Gloeocapsomorpha prisca* Zalesky 1917. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 2681~2687
- 3 Jacobson S R, Hatch J R, Teerman S C, et al. Middle Ordovician organic matter assemblages and their effect on ordovician-derived oils. *AAPG Bulletin*, 1988, 72: 1090~1100
- 4 Fowler M G. The influence of *Gloeocapsomorpha prisca* on the organic geochemistry of oils and organic rich rocks of late Ordovician age from Canada. In: Schidlowski M, et al eds. *Early Organic Evolution: Implications for Mineral and Energy Resources*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 336~356
- 5 Hsu K J. Buried-euxenic-basin model sets Tarim Basin potential. *Oil and Gas Journal*, 1994, 28: 51~60.
- 6 杜汝霖, 田立富, 李汉棒. 蓟县长城系高于庄组宏观化石的发现. *地质学报*, 1986, 60: 115~120
- 7 阎玉忠. 中国蓟县团山子组(17 亿年)宏观藻类的发现和初步研究. *微体古生物学报*, 1995, 12(2): 107~126
- 8 Zhu Shixing, Chen Huineng. Megascopic multicellular organisms from the 1700-million-years old Tuanshanzi Formation in the Jixian area, North China. *Science*, 1995, 270: 620~622
- 9 张 昉. *生物进化*. 北京: 北京大学出版社, 1998. 266
- 10 Xiao S, Zhang Y, Knoll A H. Three-dimensional preservation of algae and animal embryos in Neoproterozoic phosphorite. *Nature*, 1998, 291: 553~558
- 11 Kisch H J. Incipient matamorphism of Cambro-Silurian clastic rocks from the Jamtland Supergroup, central Scandinavian Caledonides, Western Sweden: illite crystallinity and vitrinite. *Journal of the Geological Society of London*, 1980, 137: 271~288
- 12 Buchardt B, Lewan M D. Reflectance of vitrinite-like macerals as a thermal maturity index for Cambrian-Ordovician Alum Shale, Southern Scandinavia. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(4): 394~406
- 13 Goodarzi F, Fowler M G, Bustin M, et al. Thermal maturity of early Paleozoic sediments as determined by the optical properties of marine-derived organic matter, a review. In: Schidlowski M, et al. eds. *Early Organic Evolution: Implications for Mineral and Energy Resources*. New York: Springer-Verlag, 1992. 279~295
- 14 王飞宇, 何 萍, 刘德汉. 下古生界高过成熟烃源岩中的镜状体. *石油大学学报*, 1995, 19(4): 25~30
- 15 郝石生, 贾振远. *碳酸盐油气形成和分布*. 北京: 石油工业出版社, 1989. 401
- 16 郝石生, 高 岗, 王飞宇, 等. *高过成熟海相烃源岩*. 北京: 石油工业出版社, 1996
- 17 郜建军, 李明宅. 我国海相碳酸盐岩的有机相及其生油气潜力. 见: *石油与天然气地质: 第四集, 中国天然气地质研究*. 北京: 地质出版社, 1995. 65~77