

# 塔里木盆地奥陶纪地层中 Kukersite 型生油岩的发现及其石油地质意义

孙永革<sup>①②\*</sup>, 茅晟懿<sup>①④</sup>, 王飞宇<sup>③</sup>, 彭平安<sup>①</sup>, 柴平霞<sup>①</sup>

① 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640;

② 浙江大学地球科学系, 杭州 310027;

③ 中国石油大学(北京)地球科学系, 北京 102200;

④ 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

\* 联系人, E-mail: ygsun@zju.edu.cn

2013-02-28 收稿, 2013-05-14 接受, 2013-09-26 网络版发表

国家油气专项(2011ZX05008-002-15)和国家自然科学基金(41172112)资助

**摘要** 下古生界奥陶系 *Gloeocapsomorpha prisca* (*G. prisca*)富集的 Kukersite 型烃源岩在全球范围内是一套重要的油气源岩, 所以塔里木盆地中-上奥陶统主力烃源层中是否发育 Kukersite 型烃源岩在油气勘探中备受关注. 研究通过中等成熟度灰泥丘相沉积源岩干酪根裂解-色谱-质谱分析, 揭示了塔里木盆地奥陶纪地层中存在典型 Kukersite 型烃源岩, 裂解产物表现为低含量  $>n-C_{19}$  链烃, 在  $n-C_{13}\sim n-C_{17}$  之间存在明显奇偶优势; 以正构长链烷基取代异构体为主的烷基苯系列和烷基噻吩系列; 以及特征性的 5-正烷基-1,3-苯二酚及其同系物分布等. 根据 *G. prisca* 繁育的地理环境特征, 并结合目前已经揭示的塔里木盆地古生界含油气系统原油特征和典型中-上奥陶统烃源岩干酪根裂解产物组成特征, 提出塔里木盆地中-上奥陶统主力烃源层中大规模发育 *G. prisca* 富集的 Kukersite 型烃源岩的可能性较小, 而主要发育以宏观底栖藻或浮游藻类为主的烃源岩.

## 关键词

塔里木盆地

Kukersite

型生油岩

奥陶系

干酪根

*Gloeocapsomorpha prisca*

国内外油气勘探揭示, 古生界奥陶纪海相沉积在全球范围内是一套重要的油气源岩, 其生烃母质可归为2类: 一类与黏球形藻 *Gloeocapsomorpha prisca* (*G. prisca*)有关, 属 I 型有机质, 被称之为 Kukersite 型烃源岩<sup>[1-3]</sup>; 另一类为 II 型的无定形有机质, 岩石中可见疑源类(Acritarchs)、几丁虫(Chitinozoans)、虫鄂(Scolecédonts)和笔石类(graphtolite)化石<sup>[3,4]</sup>. 以黏球形藻母质贡献所形成的原油往往具有特征性的分子地球化学指纹, 即低碳数正构烷烃中存在  $n-C_{15}$ ,  $n-C_{17}$ ,  $n-C_{19}$  等奇碳数优势, 且高碳数正构烷烃相对含量极微<sup>[1-13]</sup>. 从统计资料来看, 北美地台发现的下古生界海相油气田中, Kukersite 型烃源岩是油气的主要

贡献者, 包括 *G. prisca* 富集型和 *G. prisca* 稀释型<sup>[11]</sup>.

塔里木盆地自 1984 年雅克拉油气田发现以来, 经过近 30 年的大规模勘探, 发现了中国最大古生界海相油田——塔河-轮南亿吨级油田. 基于奥陶纪海相烃源岩在全球古生界油气资源勘探中的重要性, 以及盆地内生物标志化合物油源对比实验结果, 大部分地球化学家认为中-上奥陶统烃源岩是塔里木盆地海相原油的主力烃源岩<sup>[14-20]</sup>, 诚然, 有相当多的分子和同位素地球化学证据揭示寒武-下奥陶统源岩对现今所发现的下古生界含油气系统有过重要贡献<sup>[21-25]</sup>. 尽管在油源的认识上至今仍存在分歧, 然而奥陶纪海相沉积作为主力油源层的一个前提是源

**引用格式:** 孙永革, 茅晟懿, 王飞宇, 等. 塔里木盆地奥陶纪地层中 Kukersite 型生油岩的发现及其石油地质意义. 科学通报, 2014, 59: 72-79

**英文版见:** Sun Y G, Mao S Y, Wang F Y, et al. Identification of the Kukersite-type source rocks in the Ordovician Stratigraphy from the Tarim Basin, NW China. Chin Sci Bull, 2013, 58: 4450-4458, doi: 10.1007/s11434-013-5963-3

岩中必须富含富氢有机质。从国外的勘探经验来看,奥陶纪烃源岩被普遍认为生源单调,且以富氢的菌藻类生物为主,其中绝大部分与 Kukersite 型烃源岩发育有关。因此,塔里木盆地奥陶纪海相沉积是否发育 Kukersite 型烃源岩一直是中国石油地质地球化学工作者和勘探家所关心的问题,这一问题的探索对于塔里木盆地奥陶纪海相优质油源岩的寻找具有重要的指导意义。

过去的十几年,从沉积相和形态学的角度初步揭示了 Kukersite 型生油岩在塔里木盆地塔中地区存在的可能性<sup>[19]</sup>。本研究在国家“九五”塔里木油气勘探攻关基础上,从已有烃源岩样地球化学数据库中,挑选 11 块可能发育 Kukersite 型生油岩的丘间洼地相中-上奥陶统源岩,通过裂解-气相色谱-质谱技术的应用,对其干酪根裂解产物中能指示 *G. prisca* 生源的特征性生物标志化合物进行了详细检测,同时通过特征化合物在研究样品中的分布特征,对其可能的石油地质指示意义进行了探讨。

## 1 研究样品与实验条件

根据前人研究成果,选择塔中地区中-上奥陶统地层代表性样品,其中以良里塔格组沉积为主,源岩发育于灰泥丘相沉积,包括丘间洼地相和灰泥丘丘核相,同时对大湾沟萨干剖面下奥陶统欠补偿海湾沉积相源岩也进行了对比分析(表 1)。

样品分离富集后获得干酪根,并经苯-甲醇-丙酮三元溶剂抽提 1 个星期后进行在线裂解-色谱-质谱分析。约 1 mg 干酪根样品放入 Pyroprobe Model 2000 的 CDS (Chemical Data System, Oxford, PA) 系统,并使 CDS 系统升温至 250℃,在惰性气体保护下恒温 5 min,以除去干酪中残留的挥发性游离组分。然后以 5℃ min<sup>-1</sup> 的升温速率从 250℃ 升至 770℃,恒温 10 s。裂解产物通过氦气直接带入连接 Carlo Erba GC 8000 TOP 气相色谱仪的 Voyager 1000 质谱系统,色谱分离:采用 HP-1 弹性石英毛细管柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm),30℃ 始温,恒温 5 min,然后以 3℃ min<sup>-1</sup> 速率升温至 300℃,恒温 15 min,氦气为载气,1.0 mL min<sup>-1</sup>,恒速。质谱条件:离子源温度 200℃,EI 模式,70 eV。化合物谱图的鉴定根据以往文献的总结。

## 2 结果与讨论

研究揭示,塔里木盆地中-上奥陶统众多的沉积

相类型中,只有闭塞欠补偿陆源海湾、半闭塞欠补偿-补偿陆源海湾与台缘斜坡灰泥丘相含有高有机质丰度源岩,前两者局限分布于柯坪-阿瓦提凹陷,对目前所发现油气藏贡献有限<sup>[19]</sup>。塔中地区详细的烃源岩地球化学分析已经揭示,该地区中-上奥陶统高有机质丰度源岩主要为台缘斜坡灰泥丘相沉积,其中以丘间洼地相沉积有机质丰度最高,可以发育优质烃源岩<sup>[19]</sup>。由表 1 可见,与灰泥丘丘核相沉积相比,丘间洼地相沉积源岩明显富集有机质,从一个侧面反映灰泥丘相沉积有机质具有非均质性强的特点。源岩样品有机质的最大热解峰温普遍在 440℃ 左右,反映现今源岩热演化程度处于生油峰期,相当于镜质组反射率~1.0%*R*<sub>o</sub>,这与牙形石色级指数 CAI 和镜状体反射率所获得的结果是一致的<sup>[26]</sup>,因此,处于该热演化阶段的干酪根裂解产物能够代表沉积有机质中前身物的生物化学组成特征<sup>[27]</sup>。

### 2.1 中-上奥陶统源岩干酪根裂解产物中 *G. prisca* 生源标志化合物的确认

沉积有机质中是否存在 *G. prisca* 生源可以通过 2 种方式确定。一是通过其生成原油中正构烷烃的分布特征。普遍地,由 Kukersite 型生油岩生成的原油以低碳数正构烷烃的奇偶优势区别于其他有机母质生成的原油,并且高碳数正构烷烃含量相对较低<sup>[1-13]</sup>。然而,塔里木盆地地下古生界含油气系统原油中至今未发现这一特征<sup>[19]</sup>;二是通过源岩干酪根裂解产物的分子组成识别。Kukersite 型沉积源岩干酪根裂解产物普遍地表现为:低含量>*n*-C<sub>19</sub> 链烃;*n*-C<sub>9</sub>~*n*-C<sub>19</sub> 链烃之间存在奇偶优势;低含量无环类异戊二烯化合物;相对较高含量烷基环烷化合物;特征性的烷基苯、烷基噻吩系列化合物分布;以及烷基酮、苯酚、苯二酚等含氧化合物<sup>[8,10,11,28]</sup>。其中最为典型的是酚类化合物,这类化合物与起源于陆生植物丹宁类物质的酚类在结构上明显不同,可以认为是黏球形藻的特征性标志化合物<sup>[8]</sup>。本研究所采集的 11 块源岩干酪根裂解产物分析结果揭示,有 3 个源岩的干酪根裂解产物中检出特征性的 *G. prisca* 生源标志化合物组合特征(图 1)。相比之下,塔中 6 井,3960 m 井深良里塔格组源岩干酪根裂解产物最具代表性。由图可见,裂解产物中正构链烃分布主要集中在低碳数部分,反映正构烷烃和正构烯烃分布的 *m/z* 55+57 质量色谱图揭示,碳数范围从 *n*-C<sub>8</sub>~*n*-C<sub>19</sub>,

表1 样品背景及热解特征

井号	深度 (m)	层位	岩性	TOC (%)	S1 (mg g <sup>-1</sup> rock)	S2 (mg g <sup>-1</sup> rock)	HI (mg g <sup>-1</sup> TOC)	T <sub>max</sub> (°C)	沉积相	烃源岩分类 <sup>a)</sup>
塔中6井	3960	O <sub>3l</sub>	深灰色泥灰岩	1.17	0.29	2.30	197	453	丘间洼地	I
塔中6井	3875.4	O <sub>3l</sub>	泥质灰岩	0.14	0.01	0.13	93	446	灰泥丘丘核	II
塔中12井	4800~4816.63	O <sub>3l</sub>	深灰色泥灰岩	0.10	0.02	0.10	100	431	灰泥丘丘核	
塔中12井	4970.1	O <sub>3l</sub>	黑灰色泥灰岩	0.49	0.18	0.42	86	444	丘间洼地	
塔中37井	4847.6	O <sub>1</sub>	生物灰岩	0.28	0.01	0.22	79	435	灰泥丘丘核	
塔中43井	4090.8	O <sub>3l</sub>	深灰色灰岩	0.85	0.11	1.15	135	442	丘间洼地	
柯坪大湾沟露头		O <sub>1</sub>	黑色笔石泥岩	0.86	0.39	0.82	95	456	欠补偿海湾	
塔中12井	5056~5075.62	O <sub>3l</sub>	泥质灰岩	0.82	0.31	1.94	237	443	丘间洼地	III
塔中101井	3893.20	O <sub>2+3</sub>	泥晶灰岩	0.61	0.17	0.79	130	440	丘间洼地	
塔参1井	4029.70	O <sub>3l</sub>	黑色泥晶灰岩	1.77	0.26	2.03	147	438	丘间洼地	
塔中11井	5337.8	O <sub>3l</sub>	黑灰色泥灰岩	1.83	0.41	3.51	192	441	丘间洼地	

a) 烃源岩分类见文中描述

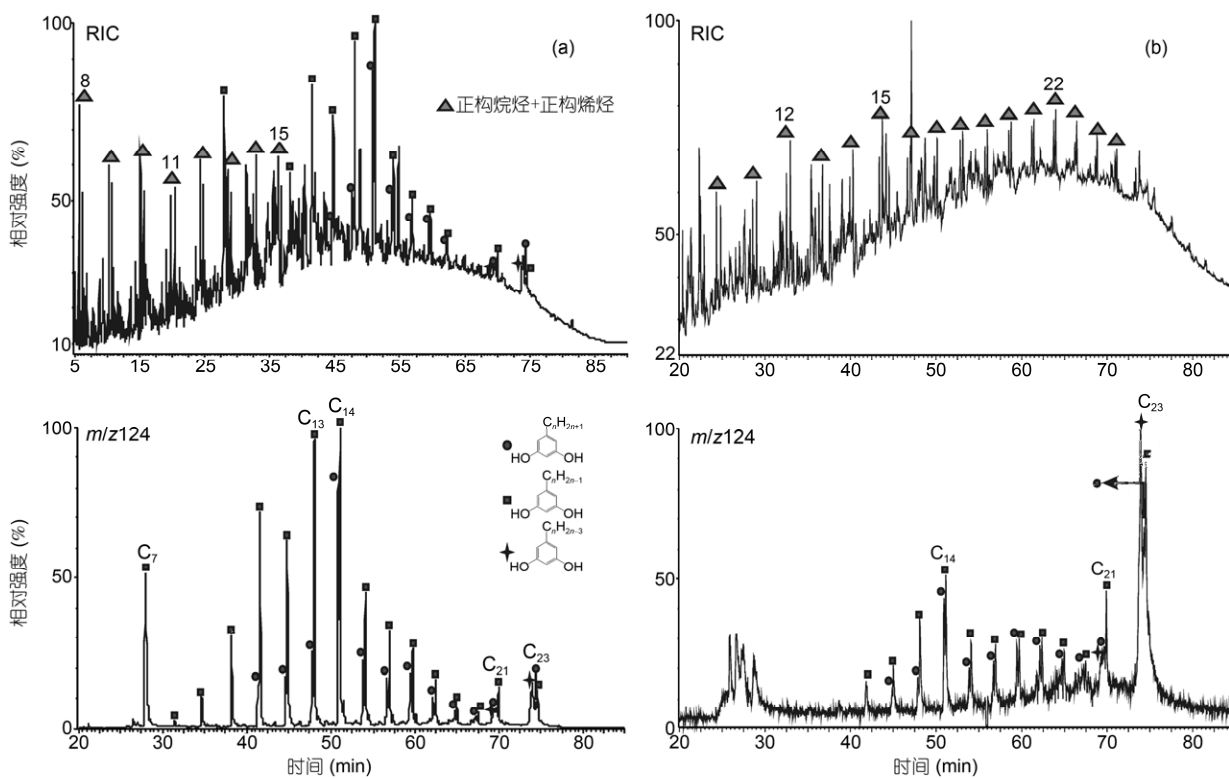


图1 塔中6井, 3960 m(a)和塔中12井, 4970.1 m(b)中-上奥陶统源岩干酪根裂解产物中 *G. prisca* 生源标志化合物——5-正烷基-1,3-苯二酚及其同系物  
数字代表碳数

高碳数部分几乎检测不到, 在  $n\text{-C}_{13}\sim n\text{-C}_{17}$  之间存在明显奇偶优势(图1). 裂解产物中存在一类高含量含氧化合物, 属于典型的 *G. prisca* 生源标志化合物——5-正烷基-1,3-苯二酚及其同系物. 这类化合物的特征性离子包括  $m/z$  124, 138 和 152, 取决于芳环上甲基取代数, 但到目前为止, 对于甲基直接桥接于芳环, 还

是与羟基连接, 仍存在争议<sup>[8]</sup>. 本研究中 5-正烷基-1,3-苯二酚是所有检出的含氧化合物中最丰富的一类 ( $m/z$  124), 包括带 1 个不饱和度和 2 个不饱和度的同系物, 碳数分布从  $C_7$  到  $C_{23}$ , 缺失  $C_{22}$ , 5-正烷基-1,3-苯二酚及其带 1 个不饱和度同系物均以  $C_{14}$  为主峰, 并且在  $C_{21}$  和  $C_{23}$  处存在 1 个次峰,  $C_{23}$  以后突然消

失;同时,裂解产物中烷基苯系列(图2)和烷基噻吩系列(图3)化合物分布表现为以正构长链烷基取代异构体为主,其他异构体相对含量低微的特点.这些特征与典型的爱沙尼亚 Kukersite 型沉积源岩干酪根裂解产物几乎一致<sup>[8,10,28]</sup>.与此相对应,干酪根镜检也观察到形态学上类似于黏球形藻的藻类体存在(图4).热解结果显示该源岩具有高有机质丰度(TOC=1.17%)与相对高的氢指数(HI=197 mg g<sup>-1</sup> TOC, T<sub>max</sub>=453℃).由此,从有机质总体特征、岩石中形态有机质特征、以及分子地球化学特征 3 个方面可以确认塔中 6 井,3960 m 井深良里塔格组沉积为典型 Kukersite 型生油岩.另外 2 个检出特征性的 *G. prisca* 生源标志化合物——5-正烷基-1,3-苯二酚及其同系物的源岩则并未显示上述其他典型分子地球化学特征,可能属于稀释型的 Kukersite 型生油岩<sup>[11]</sup>.

## 2.2 中-上奥陶统源岩干酪根裂解产物组成特征及其生烃母质指示意义

根据中-上奥陶统源岩干酪根裂解-气相色谱-质谱分析结果,裂解产物主要包括:正构烷烃和正构烯烃系列、苯系物和烷基苯系列、苯酚系列、烷基噻吩系列以及萘类化合物.根据源岩裂解产物的组成特征,从生烃母质角度,可以把中-上奥陶统源岩划分为 3 类(图 5).第一类可称之为 Kukersite 型烃源岩, *G.*

*prisca* 对沉积有机质有显著贡献,裂解产物中以特征性的 *G. prisca* 生源标志化合物分布为识别标志,同时,其链烃碳数分布具有低碳数优势特点, >*n*-C<sub>19</sub> 链烃含量极低(图 5(a)),这类源岩有机质丰度高,生烃潜力大.第二类可定义为稀释型的 Kukersite 型烃源岩,裂解产物的典型特征是富含苯系物(甲苯、二甲苯、三甲苯)和 3-正烷基苯酚系列化合物.与 Kukersite 型烃源岩相比,正构烷烃和正构烯烃化合物碳数分布明显扩大,最高碳数可达 C<sub>29</sub>,但高碳数部分整体相对丰度较低(图 5(b));5-正烷基-1,3-苯二酚及其同系物相对含量明显降低,有时检测不出(图 1(b)),干酪根形态有机质中偶见似黏球形藻类体,镜状体相对较丰富.尽管苯系物可从多烯脂肪酸、植酸或干酪根中的烯键等缩合脱氢形成<sup>[29]</sup>,但异常丰富的苯系物和 3-正烷基苯酚系列化合物通常认为与陆生植物木质素、丹宁类物质输入有关,是煤系有机质裂解产物的典型特征<sup>[30-32]</sup>.然而,奥陶纪时地球上不可能有陆生植物,沉积有机质的贡献主要以海洋浮游生物和底栖生物为主.现代宏观褐藻中存在聚酚类大分子结构,在热解过程中可生成酚类化合物<sup>[33,34]</sup>.现代底栖褐藻、红藻和绿藻的化学成分(特别是其中的碳水化合物、色素、脂类化合物和酚类化合物)系统研究也表明,现代底栖褐藻有机质主要成分是碳水化合物和酚类<sup>[35]</sup>.塔里木盆地中上奥陶统灰泥丘相

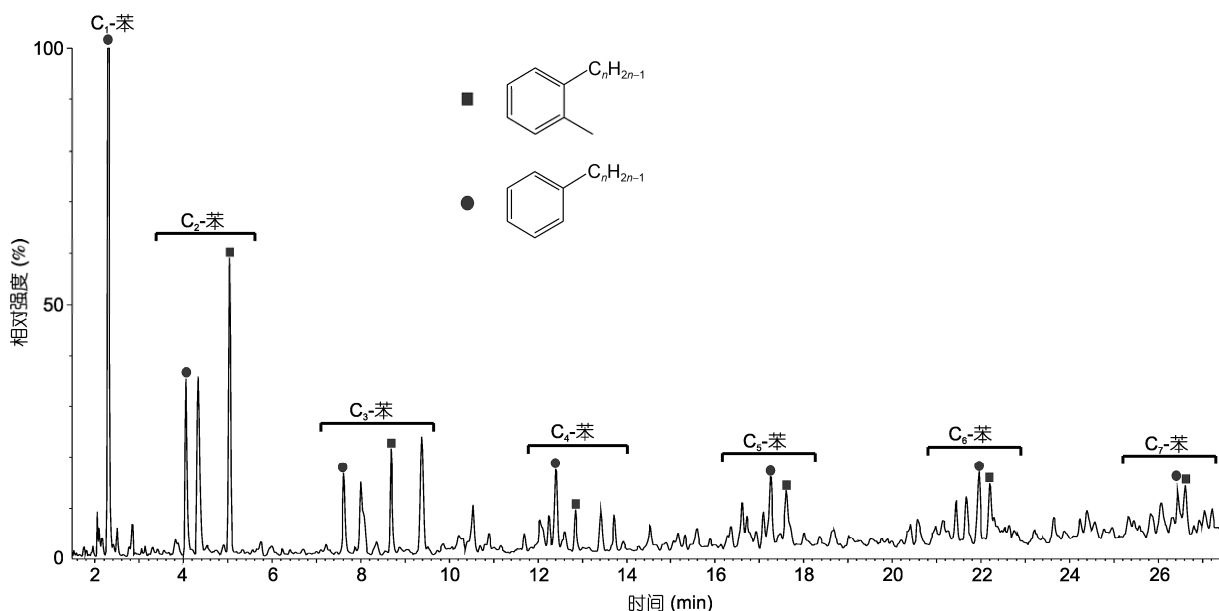


图 2 塔中 6 井,3960 m 井深丘间洼地相源岩有机质裂解产物中烷基苯系列分布特征

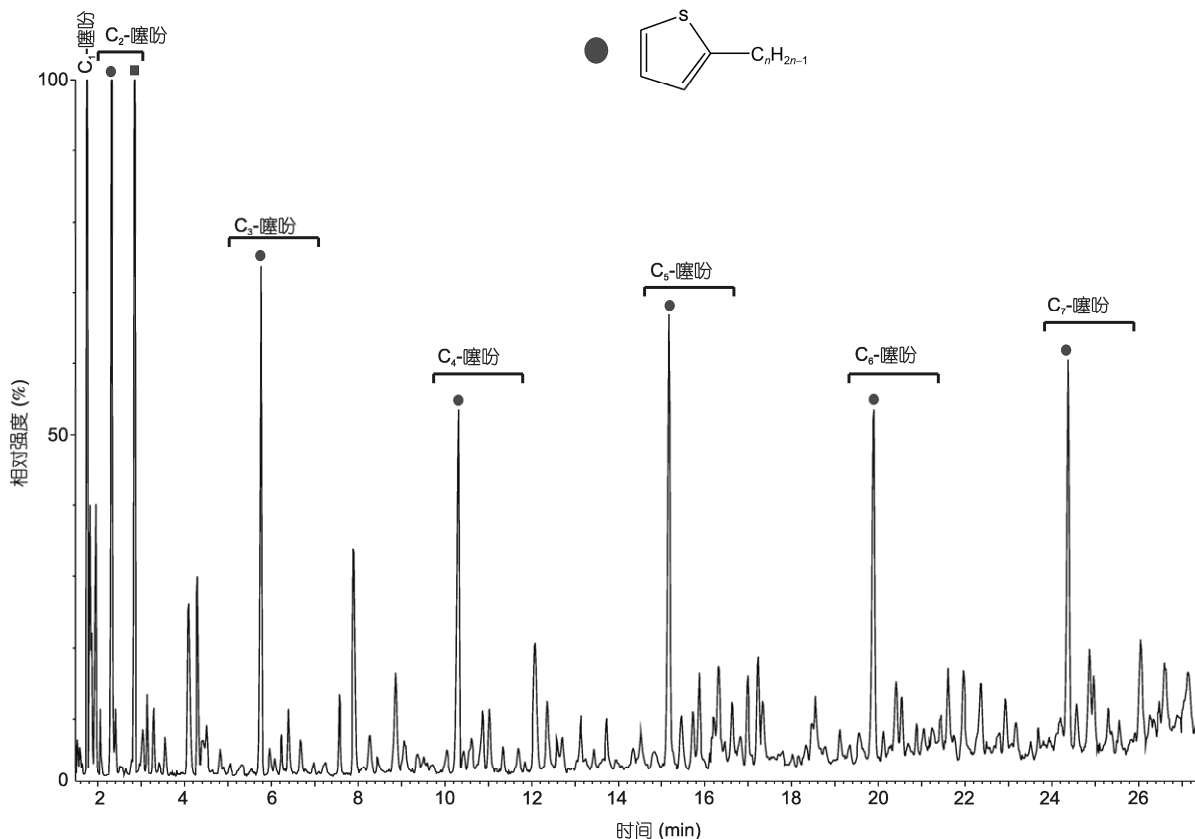


图3 塔中6井, 3960 m 井深丘间洼地相源岩有机质裂解产物中烷基噻吩系列化合物特征

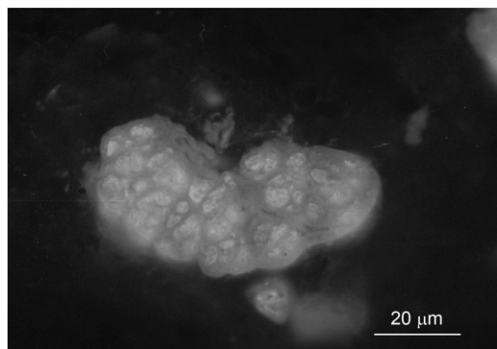


图4 检出于塔中6井, 3960 m 井深丘间洼地相源岩黏球形藻

沉积岩样品详细的古生物记录显示, 沉积地层中赋存有叶藻 (*Thallophyca*)、小丛藻属 (*Fascicul-ella*)、塔乌藻属 (*Tawuia*)、等称叶藻 (*Isophyllum*)、古海葵藻 (*Paleolaverilla*)、原紫杉藻 (?) (*Prototaxites* (?))、朱丽叶藻 (*Juriaphyllum*) 等宏观藻类<sup>[36]</sup>, 因此, 推测古老宏观藻类有机质输入是裂解产物中苯系物和苯酚类化合物的重要生源, 底栖宏观藻类可能是该类源岩的主要成烃母质. 由于宏观藻是一种初始相对

贫氢的底栖藻类, 从而决定了有机质贫氢、生气为主的特点. 第三类源岩干酪根裂解产物以富含正构烷烃和正构烯烃为特征, 碳数分布可达 C<sub>29</sub>, 且无奇偶优势; 富含苯系物, 烷基苯、烷基噻吩、苯酚类化合物相对含量低(图5(c)), 反映了典型以浮游藻类等富氢有机质输入为主的沉积特征, 该类源岩有机质丰度高且富氢, 是优质生油岩. 事实上, 后两类烃源岩可以对应于王飞宇等人<sup>[36]</sup>根据岩石有机质光性特征所界定的塔里木盆地中-上奥陶统两类成烃有机质.

由3类烃源岩裂解产物可以清晰地看出, 其主要差别在于生物输入源的不同, 其中第一类烃源岩系黏球形藻贡献为主; 第二类烃源岩在很大程度上形成于宏观藻和底栖藻发育环境; 第三类烃源岩由于浮游藻类输入的增加, 表现出显著富氢特征. 尽管仍有争议, 但大部分学者倾向于 *G. prisca* 属于一种营光合的蓝藻席<sup>[7,28,37-39]</sup>. Foster 等人<sup>[6,40]</sup>基于对爱沙尼亚富 *G. prisca* 奥陶纪沉积发育环境的详细研究, 认为 *G. prisca* 主要发育于潮间带. 同时, 现代海洋生态指示宏观藻和底栖藻主要繁育于水深 30~60 m 环境,

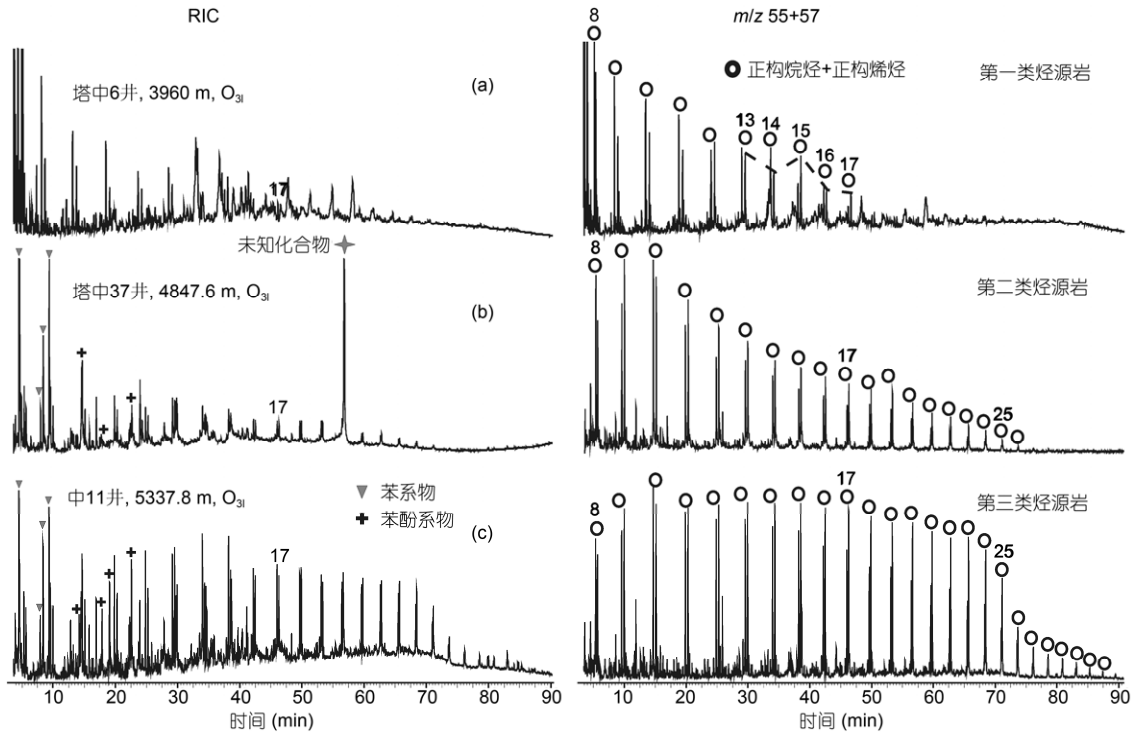


图5 中-上奥陶统3类代表性灰泥丘相源岩有机质裂解产物特征  
数字代表碳数

而浮游藻类由于对光的有效利用, 显然对水体深度并不敏感, 这一点从3类源岩的岩性上也可以得到很好体现, 从第一、第二类源岩以生物灰岩为主, 逐渐过渡到第三类源岩中泥晶灰岩的出现, 代表了一个水体变深的过程(表 1). 因此, 塔里木盆地中-上奥陶统源岩沉积环境的水体深度严格控制了生物的发育特征, 最终控制了3类烃源岩有机质特性、分布、及其产烃潜能.

### 2.3 *G. prisca* 的发育环境及其对塔里木盆地奥陶纪地层中寻找 Kukersite 型生油岩的启示

世界范围内的勘探实践揭示, 高有机质丰度, 以 *G. prisca* 生源贡献为主的奥陶纪烃源岩广泛分布于现今的北美、澳大利亚和北欧沉积盆地, 反映了 *G. prisca* 在奥陶纪热带边缘海环境的大量繁育<sup>[12]</sup>. 古地磁研究结果揭示, 奥陶纪时期塔里木盆地与北美地台、北欧处在同一纬度带上, 因此, 具备 *G. prisca* 繁育的地理背景<sup>[41]</sup>. 同时, 大量的勘探和地质地球化学研究表明, 塔里木盆地中-上奥陶统台缘斜坡灰泥丘相沉积是目前所发现的下古生界含油气系统的主力烃源. 然而, 本文从已有良好研究基础的几百块中-上奥陶统烃源岩中挑选 11 块代表性样品进行详细分

析<sup>[19]</sup>, 样品选择主要依据是源岩有机质丰度、氢指数、以及形态有机质特征. 如前所述, 结果只发现塔中 6 井, 3960 m 井深良里塔格组沉积为典型的 Kukersite 型生油岩, 一方面说明塔里木盆地奥陶纪沉积中可以发育 *G. prisca* 富集的 Kukersite 型烃源岩; 另一方面也反映 *G. prisca* 富集的 Kukersite 型烃源岩可能受沉积环境水体深度和水动力条件影响, 只在局部层位发育.

众所周知, 灰泥丘可发育于台地内部(台内凹陷)、台地边缘等能量较低的环境中, 但尤以水动力条件较弱的较深水缓斜坡环境最为多见. 在经典的碳酸盐沉积相模式中, 灰泥丘发育于台地边缘斜坡上, 水深可从浅于 120 m 到超过 300 m 的光照带内. 塔中 I 号带礁滩体内侧所反映的具块状、层状灰泥丘建造丘顶中具细密藻纹层、层状鸟眼孔或帐篷砾岩来看, 灰泥丘发育的最小水深为潮间带, 并偶尔为潮上带; 从区内丘间洼地泥质泥晶灰岩所含丰富营底栖生活的宏观藻(为褐藻)的生态来看, 灰泥丘发育的最大水深为 60 m. 因为现代海洋中水深 20~30 m 处的藻类以褐藻为主. 同时, 褐藻含藻褐素多、光合作用的有效光线是黄色和橙色光线, 因而在 30~60 m 深的

水层中生长得最为茂盛<sup>[42]</sup>。因此,对于大部分塔里木盆地中-上奥陶统灰泥丘相沉积烃源岩而言,其生烃母质可能主要为底栖宏观藻和浮游藻类,并伴有少量的 *G. prisca*,与前述第二、第三类烃源岩相对应,*G. prisca*富集的 Kukersite 型烃源岩只能是零星分布。如果认为塔里木盆地地下古生界含油气系统原油主要来自于中-上奥陶统沉积于台缘斜坡灰泥丘相的烃源岩,那么原油的分子地球化学特征自然不可能显示 *G. prisca* 生源特征。

### 3 结语

(1) 通过中等成熟度源岩干酪根裂解-色谱-质谱分析,在塔里木盆地中-上奥陶统灰泥丘相沉积中确认了 *G. prisca* 富集的 Kukersite 型烃源岩的存在。其裂解产物表现为:低含量  $>n-C_{19}$  链烃,且在  $n-C_{13} \sim n-C_{17}$  之间存在明显奇偶优势;以正构长链烷基取代异构体为主的烷基苯系列和烷基噻吩系列化合物;特征性的 5-正烷基-1,3-苯二酚及其同系物分布等。

(2) 根据源岩干酪根裂解产物的组成特征,可以把塔里木盆地中-上奥陶统灰泥丘相沉积烃源岩划分为 3 类。第一类为典型 *G. prisca* 富集的 Kukersite 型烃源岩;第二类为稀释型的 Kukersite 型烃源岩,裂解产物的典型特征是富含苯系物(甲苯、二甲苯、三甲苯)和 3-正烷基苯酚系列化合物,生源以底栖宏观藻为主,有机质贫氢,生气为主;第三类源岩干酪根裂解产物以富含正构烷烃和正构烯烃为特征,浮游藻类等富氢有机质是其主要生源,该类源岩有机质丰度高且富氢,是优质生油岩。这 3 类源岩的发育主要受控于其沉积环境的水体深度。

(3) 根据 *G. prisca* 繁育的地理环境特征,并结合塔里木盆地地下古含油气系统原油特征、中-上奥陶统主力烃源岩发育环境灰泥丘相的沉积特点及其干酪根裂解产物组成特征,提出塔里木盆地中-上奥陶统大规模发育 *G. prisca* 富集的 Kukersite 型烃源岩的可能性有限,而主要发育以宏观底栖藻或浮游藻类为主的烃源岩。

致谢 感谢中国石油勘探开发研究院张宝民教授提供了研究样品的沉积环境解释。

### 参考文献

- 1 Fowler M G, Douglas A G. Distribution and structure of hydrocarbon in four organic-rich Ordovician rocks. *Org Geochem*, 1984, 6: 105-114
- 2 Reed J D, Illich H A, Horsfield B. Biochemical evolutionary significance of Ordovician oils and their sources. *Org Geochem*, 1986, 10: 347-358
- 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 Bull*, 1988, 72: 1090-1100
- 4 Longman M W, Palmer S E. Organic geochemistry of Mid-Continent Middle and Late Ordovician oils. *AAPG Bull*, 1987, 71: 938-950
- 5 Foster C B, O'Brien G W, Waston S T. Hydrocarbon source potential of the Goldwyer Formation, Barbwire Terrace, Canning Basin, Western Australia. *Aust Pet Expl Assoc J*, 1986, 26: 142-155
- 6 Foster C B, Reed J D, Wicander R. *Gloeocapsomorpha prisca* Zalesky, 1917: A new study. Part I: Taxonomy geochemistry and paleoecology. *Geobios*, 1989, 22: 735-760
- 7 Hoffmann C F, Foster C B, Powell T G, et al. Hydrocarbon biomarkers from Ordovician sediments and the fossil alga *Gloeocapsomorpha prisca* Zalesky 1917. *Geochim Cosmochim Acta*, 1987, 51: 2681-2697
- 8 Derenne S, Largeau C, Casadevall E, et al. Characterization of Estonian Kukersite by spectroscopy and pyrolysis: Evidence for abundant alkyl phenolic moieties in an Ordovician, marine, type II/I kerogen. *Org Geochem*, 1990, 16: 873-888
- 9 Macauley G, Fowler M G, Goodarzi F, et al. Ordovician oil shale-source rock sediments in the central and eastern Canada mainland and eastern Arctic areas, and their significance for frontier exploration. *Geol Surv Can Pap*, 1990, 90: 14-51
- 10 Douglas A G, Sinninghe Damsté J S, Fowler M G, et al. Unique distributions of hydrocarbons and sulphur compounds release by flash pyrolysis from the fossilised alga *Gloeocapsomorpha prisca*, a major constituent in one of four Ordovician kerogens. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 275-291
- 11 Douglas A G, Sinninghe Damsté J S, de Leeuw J W, et al. Distribution and structure of hydrocarbons and heterocyclic sulfur compounds released from four kerogens of Ordovician age by means of flash pyrolysis. In: Schidlowski M, Golubic S, Kimberley M M, et al., eds. *Early Organic Evolution: Implications for Mineral and Energy Resources*. Berlin: Springer, 1992. 267-278

- 12 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, Golubic S, Kimberley M M, et al., eds. *Early Organic Evolution: Implications for Mineral and Energy Resources*. Berlin: Springer, 1992. 336–356
- 13 Guthrie J M, Pratt L M. Geochemical character and origin of oils in Ordovician reservoir rock, Illinois and Indiana, USA. *AAPG Bull*, 1995, 79: 1631–1649
- 14 Hanson A D, Zhang S C, Moldowan J M, et al. Molecular organic geochemistry of the Tarim Basin, Northwest China. *AAPG Bull*, 2000, 84: 1109–1128
- 15 Zhang S C, Hanson A D, Moldowan J M, et al. Paleozoic oil-source rock correlations in the Tarim Basin, NW China. *Org Geochem*, 2000, 31: 273–286
- 16 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题. *地学前缘*, 2000, 7: 534–547
- 17 张水昌, 张宝民, 王飞宇, 等. 中-上奥陶统: 塔里木盆地的主要油源层. *海相油气地质*, 2000, 5: 16–22
- 18 张水昌, 梁狄刚, 黎茂稳, 等. 分子化石与塔里木盆地油源对比. *科学通报*, 2002, 47: 20–27
- 19 张水昌, 梁狄刚, 张宝民, 等. 塔里木盆地海相油气的生成. 北京: 石油工业出版社, 2004. 1–433
- 20 Wang T G, He F, Wang C J, et al. Oil filling history of the Ordovician oil reservoir in the major part of the Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China. *Org Geochem*, 2008, 39: 1637–1646
- 21 Huang D, Liu B, Wang T, et al. Genetic type and maturity of Lower Paleozoic marine hydrocarbon gases in the eastern Tarim Basin. *Chem Geol*, 1999, 162: 65–77
- 22 Sun Y, Xu S, Lu H, et al. Source facies of the Paleozoic petroleum systems in the Tabei uplift, Tarim Basin, NW China: Implications from aryl isoprenoids in crude oils. *Org Geochem*, 2003, 34: 629–634
- 23 Pan C C, Liu D Y. Molecular correlation of free oil, adsorbed oil and inclusion oil of reservoir rocks in the Tazhong Uplift of the Tarim Basin, China. *Org Geochem*, 2009, 40: 387–399
- 24 Cai C F, Li K K, Anlai M, et al. Distinguishing Cambrian from Upper Ordovician source rocks: Evidence from sulfur isotopes and biomarkers in the Tarim Basin. *Org Geochem*, 2009, 40: 755–768
- 25 Li S M, Pang X Q, Jin Z J, et al. Petroleum source in the Tazhong Uplift, Tarim Basin: New insights from geochemical and fluid inclusion data. *Org Geochem*, 2010, 41: 531–553
- 26 王飞宇, 陈敬轶, 高岗, 等. 源于宏观藻类的镜状体反射率——前泥盆纪海相地层成熟度标尺. *石油勘探与开发*, 2010, 2: 250–256
- 27 Muscio G P A, Horsfield B, Welte D H. Compositional changes in the macromolecular organic matter (kerogen, asphaltenes and resins) of a naturally matured source rock sequence from Northern Germany as revealed by pyrolysis methods. In: *Abstract of 15th International meeting of organic geochemistry*. Manchester: Manchester University Press, 1992. 447–449
- 28 Blokker P, van Bergen P, Pancost R, et al. The chemical structure of *Gloeocapsomorpha prisca* microfossils: Implications for their origin. *Geochim Cosmochim Acta*, 2001, 65: 885–900
- 29 Larter S R, Horsfield B. Determination of structural compositions of kerogens using analytical pyrolysis methods. In: Engel M H, Macko S A, eds. *Organic Geochemistry*. New York: Plenum Press, 1990
- 30 Saiz-Jimenez C, De Leeuw J W. Lignin pyrolysis products: Their structures and significance as biomarkers. *Org Geochem*, 1986, 10: 869–876
- 31 Saiz-Jimenez C, Boon J J, Hedge J I, et al. Chemical characterization of recent and buried woods by analytical pyrolysis: Comparison of pyrolysis data with <sup>13</sup>C-NMR and wet chemical data. *J Anal Appl Pyrol*, 1987, 11: 437–450
- 32 Hatcher P G, Spiker E C. *Selective Degradation of Plant Biomolecules. Humic Substances and Their Roles in the Environments*. New York: Wiley, 1988. 59–74
- 33 Ragan M A, Smidsrød O, Larsen B. Chelation of divalent metal ions by brown algal polyphenols. *Mar Chem*, 1979, 7: 265–271
- 34 Ragan M A, Glombitza K W. Phlorotannins, brown algal polyphenols. In: Round F E, Chapman D J, eds. *Progress in Phycology Research*. Bristol: Biopress, 1986. 129–241
- 35 纪明候. *藻类化学*. 北京: 科学出版社, 1997. 1–777
- 36 王飞宇, 边立曾, 张水昌, 等. 塔里木盆地奥陶系海相源岩中两类生烃母质. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31: 96–102
- 37 Zalessky M D. On marine sapropelite of Silurian age formed by a blue-green alga. *Izv Imp Akad Nauk IV Ser*, 1917, 1: 3–8
- 38 Stasiuk L D, Osadetz K G. The life cycle and phyletic affinity of *Gloeocapsomorpha prisca* Zalessky 1917 from Prdovician rocks in the Canadian Williston basin. *Curr Res Part D: Geol Surv Can*, 1990, 89: 123–137
- 39 Stasiuk L D. *Organic petrology and petroleum formation in Paleozoic rock of northern Williston basin*. Doctor Dissertation. Regina: University of Regina, 1991
- 40 Foster C B, Wicander R, Reed J D. *Gloeocapsomorpha prisca* Zalessky, 1917: A new study. Part II: Origin of Kukersite, a new interpretation. *Geobios*, 1989, 23: 133–140
- 41 方大均, 沈忠悦, 谈晓冬, 等. 塔里木盆地显生宙古地磁与板块运动学. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 1–364
- 42 刘改有. *海洋地理*. 北京: 北京师范大学出版社, 1989. 1–238