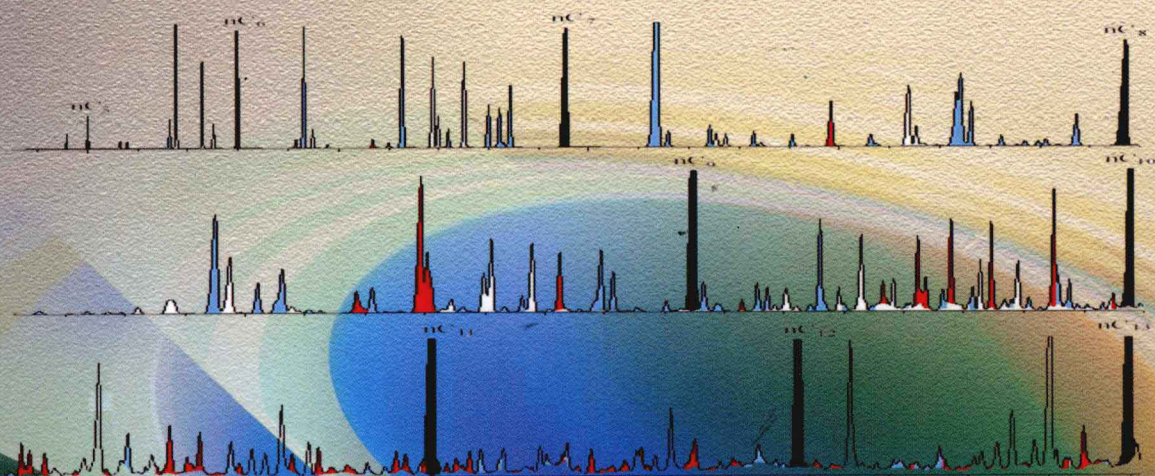




中国石油天然气集团公司 油气地球化学重点实验室文集

第五集 ● 2007—2008 年

油气地球化学重点实验室学术委员会 编



石油工业出版社

中国石油天然气集团公司

油气地球化学重点实验室文集

第五集·2007—2008 年

油气地球化学重点实验室学术委员会 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本论文集共收录中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室在 2007—2008 年期间公开发表的优秀论文 36 篇,主要包括实验室近两年在海相盆地生成藏研究以及天然气勘探两大方面的最新研究成果和进展。

本书可供从事油气地球化学研究的科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室文集.
第五集·2007—2008 年./油气地球化学重点实验室学术委员会编.
北京:石油工业出版社,2012.3
ISBN 978-7-5021-7583-2

I. 中…

II. 油…

III. 油气勘探:地球化学勘探-文集

IV. P618.130.8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 236572 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523543 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:20.75

字数:525 千字 印数:1—1000 册

定价:86.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

中国石油天然气集团公司

油气地球化学重点实验室学术委员会

主 任：戴金星

副主任：梁狄刚 王铁冠

委 员：陈建平 冯子辉 黄海平 彭平安 孙永革

张水昌 钟宁宁 Maowen Li Keyu Liu

Yongchun Tang Simon George Andrew Pepper

前 言

中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室文集,每两年出版一集,至今出到第五集,它记录了重点实验室成立 10 年来的成长足迹。

本册收录了油气地球化学重点实验室 2007—2008 两年来公开发表的学术论文 36 篇,其中海相盆地地质—地球化学研究论文有 10 篇;天然气地球化学论文有 11 篇,共占约 60%,反映出重点实验室近两年应用基础研究的两个重点方向;分析化验新方法、新技术的研究成果有 8 篇,这是作为一个重点实验室出技术、出水平的基础;此外,石油、油页岩和运移地球化学的论文有 5 篇,反映出重点实验室的研究领域不断扩大。

近年来,海相盆地生烃成藏研究成为油气地球化学重点实验室的主攻方向,并形成了特色。10 篇文章的内容涵盖了海相干酪根地球化学、成烃演化模式、过成熟烃源岩产烃率、硫化氢形成机理以及生烃成藏研究新进展等方面。研究区域包括塔里木、四川、鄂尔多斯等我国三大古生界克拉通盆地,进而扩展到我国南方中、下扬子区。这就为重点实验室在我国海相油气勘探领域的应用基础研究形成特色、取得发言权奠定了基础。

天然气勘探为中国能源结构的低碳化作出了很大贡献,自然成为油气地球化学重点实验室的又一个主攻方向和研究热点。论文集中的 11 篇文章,涵盖了天然气成因、类型划分、煤成气、生物气、浅层气、CO₂ 气、TSR 反应等各个方面。论文中的许多观点,已在我国天然气勘探实践中得到应用,并为广大同行所接受。

随着油气地球化学重点实验室成为国家重点实验室的一部分,实验室设备不断更新,实验室新方法、新技术的攻关取得了可喜的进展。论文集中收录的 8 篇文章,反映出近两年来实验室在轻烃、单萜烷、含硫化合物、金刚烷等分析技术上的创新成果,这是重点实验室狠抓实验室建设和技术储备,增强发展后劲,为地球化学研究提供先进手段、不断深入的重要保证。

本文集中收录的论文,发表在全国高层次期刊上,例如《中国科学》、《科学通报》、《地质学报》、《石油学报》、《地学前缘》等,部分论文在全国性的大会上宣读过,反映出相当的质量和水平。

我们期盼:论文集连续的公开出版,能够引起国内外同行的注意,起到广泛交流学术成果的作用;我们希望:第五集论文集能够成为油气地球化学重点实验室10年发展历史的里程碑。

中国石油天然气集团公司
油气地球化学重点实验室学术委员会

目 录

8 亿多年前由红藻堆积而成的下马岭组油页岩	张水昌	张宝民	边立曾等(1)
四川盆地川东北部飞仙关组高含硫化氢大型气田群气源探讨	张水昌	朱光有	陈建平等(10)
中国海相油气田形成的地质基础	张水昌	梁狄刚	朱光有等(21)
中国沉积盆地大中型气田分布与天然气成因	张水昌	朱光有	(37)
用生物标志物定量计算混合原油油源的数学模型	陈建平	邓春萍	宋孚庆等(50)
海相干酪根天然气生成成熟度上限与生气潜力极限探讨	陈建平	赵文智	王招明等(63)
——以塔里木盆地研究为例	葛和平	陈建平	陈晓东等(72)
东海盆地丽水凹陷天然气类型及其成因探讨	葛和平	陈建平	陈晓东等(72)
中国海相碳酸盐岩气藏硫化氢形成的控制因素和分布预测	朱光有	张水昌	梁英波(82)
中国海相沉积盆地富气机理与天然气的成因探讨	朱光有	赵文智	梁英波等(97)
中国稠油区浅层天然气地球化学特征与成因机制	朱光有	张水昌	赵文智等(113)
轮南地区寒武系原油的分布特征	米敬奎	张水昌	陈建平等(124)
煤在两种不同体系的生气能力研究	米敬奎	戴金星	张水昌等(132)
鄂尔多斯盆地上古生界天然气藏储层包裹体中气体成分及同位素研究	米敬奎	戴金星	张水昌等(138)
陆相生物气纵向分布特征及形成机理研究	帅燕华	张水昌	赵文智等(147)
——以柴达木盆地涪北一号为例	帅燕华	张水昌	赵文智等(155)
古菌细胞膜类脂化合物分析与初步应用	帅燕华	张水昌	赵文智等(155)
——柴达木盆地沉积地层盐度与产甲烷菌分布	张 斌	赵 喆	张水昌等(163)
塔里木盆地和四川盆地海相烃源岩成烃演化模式探讨	张 斌	陈建平	张水昌等(172)
用元素守恒法估算塔里木盆地台盆区寒武系高过成熟烃源岩产烃率	张 斌	陈建平	张水昌等(172)
油气二次运移地球化学常用参数变化规律的新认识	王汇彤	张大江	张水昌等(178)
——石油二次运移模拟实验的启示和思考	王培荣	徐冠军	赵 红等(187)
松节油加氢热解产物中单萜烷类化合物的初步研究	王培荣	徐冠军	肖廷荣等(191)
用 C_7 轻烃参数判别烃源岩沉积环境的探索	王培荣	徐冠军	肖廷荣等(191)
采用气相色谱“反吹、微流控”技术分析原油 C_5 — C_{13} 轻馏分及其地球化学意义初探	王培荣	赵 红	肖廷荣等(197)
原油 C_5 — C_{13} 轻馏分族组成的环境指相意义探索	王培荣	徐冠军	肖廷荣等(204)
塔里木盆地塔中 83 井原油中检测出 2-硫代金刚烷及其地质意义	姜乃煌	朱光有	张水昌等(214)

南方四套区域性海相烃源岩的分布	梁狄刚	郭彤楼	陈建平等	(220)
塔里木盆地轮南—塔河奥陶系油田发现史的回顾与展望	梁狄刚			(238)
川西北矿山梁地区沥青脉地球化学特征及其意义	黄第藩	王兰生		(245)
TSR 促进原油裂解成气:模拟实验证据	张水昌	帅燕华	朱光有	(253)
松辽盆地南部长岭断陷 CO ₂ 成因与成藏期研究	米敬奎	张水昌	陶士振等	(259)
哈得逊与轮南地区原油碳同位素特征及影响因素	米敬奎	张水昌	陈建平等	(266)
海相成熟干酪根生气潜力评价方法研究	帅燕华	张水昌	陈建平等	(273)
轮南地区天然气分布特征及成因	王晓梅	张水昌		(280)
轮南地区奥陶系原油特征及其控制因素	王晓梅	张水昌		(287)
中国南方含油气区构造—沉积类型及其勘探潜力	赵 喆	钟宁宁	梁狄刚等	(293)
全二维气相色谱/飞行时间质谱在石油地质实验中应用初探	王汇彤	魏彩云	张水昌等	(298)
烃源岩中 C ₅ —C ₁₃ 分析新方法及其在油源对比中的应用	徐冠军	王培荣	刘建宪等	(303)
原油似甲基二苯并噻吩含量与沉积环境及次生变化的关系	姜乃煌	朱光有	张水昌等	(311)

8 亿多年前由红藻堆积而成的下马岭组油页岩^①

张水昌^{1,2} 张宝民¹ 边立曾³ 金之钧⁴ 王大锐^{1,2} 陈践发⁵

(1. 中国石油勘探开发研究院; 2. 中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室; 3. 南京大学地球科学系; 4. 中国石化石油勘探开发研究院; 5. 中国石油大学(北京)资源与信息学院)

摘 要 在河北下花园新元古界青白口系(距今 900—873 Ma)下马岭组第三段厚约 350 m 的碳-硅泥岩建造中,发现一套主要由黑色含泥硅质岩和黑棕色纸片状页岩构成的油页岩。油页岩中的有机碳含量介于 21.41% ~ 22.91%,氯仿沥青“A”介于 0.5776% ~ 0.8787%,含油率介于 5.29% ~ 10.57%;对黑棕色纸片状油页岩进行超薄切片观察及干酪根鉴定,发现其生烃母质主要是底栖红藻,红藻特有的四分孢子囊清晰可见,且相当丰富。这种主要由红藻构成的生烃母质具有如此高的 TOC 和氯仿沥青“A”含量从而成为优质烃源岩的实例鲜见报道。油页岩抽提物中富含 17 α (H) - 重排藿烷和正烷基三环萜烷系列化合物;甾烷含量较少。这些特征明显有别于该区元古代海相碳酸盐岩抽提物中的生物标志化合物分布。由于该套沉积岩中的生物构成简单,因此,这些分子标志物可能在一定程度上反映的是底栖红藻生物分子组成特征。根据岩石类型组合和沉积层序分析,这套含油页岩的碳-硅泥岩建造发育在下马岭组第三段最大海泛面时期的深水海湾环境中,并受到了海底热水流体活动的影响。

油页岩是一类富含有机质、蒸馏或干馏时可产生具有商业价值石油的细粒沉积岩石,其中的有机质一般处于未熟—低熟阶段,油页岩的研究已经见诸很多报道^[1]。例如,在澳大利亚二叠系、法国侏罗系和美国阿拉斯加侏罗—白垩系,为主要由海相单细胞塔斯马尼亚藻(*Tasmanaceae*)构成的塔斯曼型油页岩;前苏联爱沙尼亚奥陶系,是由丰富黏球形藻(*Gloeocarpomorpha*)构成的著名库克型油页岩;在苏格兰石炭系、南非石炭—二叠系和澳大利亚二叠系,为由淡水或微咸水环境的丛粒藻(*Botryococcus*)构成的托班型油页岩,等等^[2,3]。美国约有 20% 的国土面积被高有机质丰度油页岩所覆盖,时代从奥陶纪至新近纪^[4]。其中,最著名的古近—新近系绿河油页岩分布面积达 42700 km²,是世界上最大的油页岩资源^[5]。在我国,油页岩主要形成于近海湖泊环境,如准噶尔盆地南部上二叠统油页岩^[6],松辽盆地白垩系油页岩^[7],以及茂名古近—新近系油页岩等,其生物母质主要是浮游藻类。

长期以来,河北北部中元古—新元古界海相烃源岩受到人们的广泛关注^[8~16]。由于下花园的下马岭组有机质的 R_o 值仅为 0.6% ~ 0.7%,处于低成熟阶段,所以该区下马岭组烃源岩经常作为热模拟研究的对象^[17]。本文所研究的下马岭组油页岩,早在 1960—1970 年,前人在下花园侏罗系煤矿的采掘活动中,就曾对其进行过简单的化验,但当时并不清楚它的确切层位。后来,张长根和黄醒汉等^[18,19]根据黑色页岩的有机质丰度和沉积相分析,认为该套页岩可作为良好的生油层系,并在下花园夏家沟的下马岭组第四段的灰绿色页岩中首次发现并命

① 原载《中国科学 D 辑:地球科学》,2007 年,37(5):636 ~ 643。国家重点基础研究发展计划(编号:G19990433)资助。

名了沥青饼。再后来,杜汝霖等^[20]在下花园的野外工作中发现,下马岭组第三段“黑色页岩”的一部分可作为油页岩,但由于当时化验分析所得到的含油率低(1.31%~3%)而没有引起人们的重视。

近年来,笔者对河北下花园的新元古界青白口系下马岭组进行了系统的沉积学、生物学和地球化学等的研究,在下马岭组第三段的碳—硅泥岩中发现了主要由红藻堆积而成的油页岩,边立曾等将其命名为下马岭组油页岩^[21],其形成时间距今900—873Ma^[22],显然属于地史时期最古老的烃源岩之一,也是迄今所发现的最古老的油页岩,同时也是由宏观底栖藻类堆积而成的油页岩的首次发现。这一发现,对于认识海相烃源岩的生烃母质构成及发育环境具有重要意义,同时对于研究和评价燕辽沉降带的石油勘探前景也具有重要的科学价值。

1 油页岩产地和下马岭组的岩性特征

下马岭组油页岩产于北京NW方向120km处的河北下花园,主要出露于夏家沟和古城梁穹隆(图1),赋存在新元古界青白口系下马岭组第三段(Qbx₃)中(图2)。

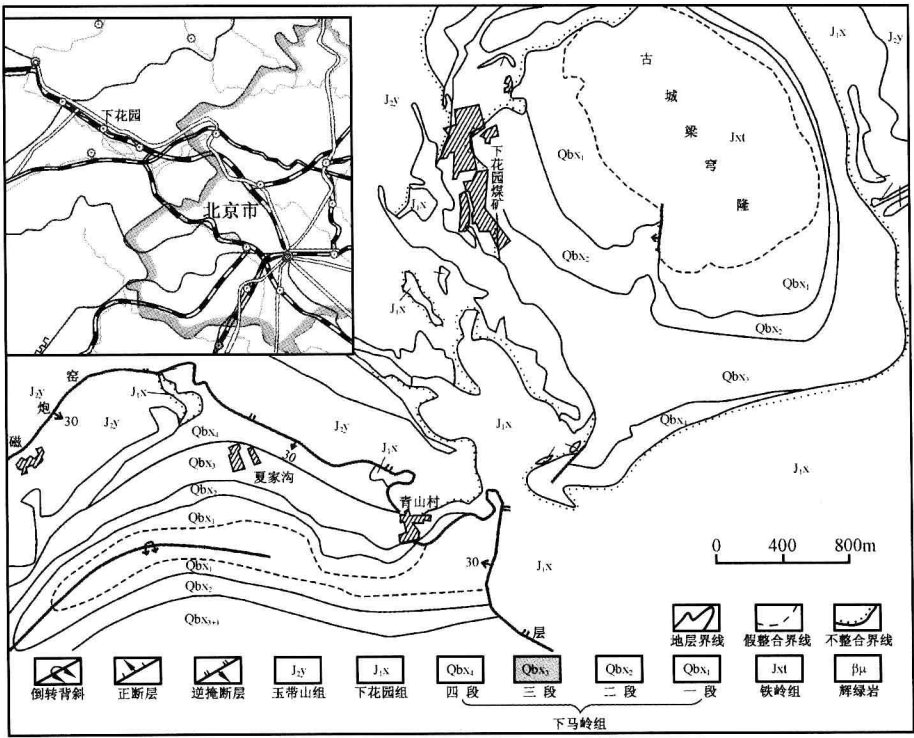


图1 下马岭油页岩产地地质图

在河北北部地区,青白口系自下而上划分为下马岭组、长龙山组和景儿峪组。其岩性分别以页岩、砂岩和灰岩为特征,故又有下马岭页岩、长龙山砂岩、景儿峪灰岩之称。其中,下马岭组与下伏中元古界铁岭组碳酸盐岩假整合接触,与上覆长龙山组砂岩呈假整合甚至微角度不整合接触。在研究区,由于继承性古隆起之上缺失三叠系、古生界和新元古界青白口系长龙山组、景儿峪组,使得下侏罗统下花园组煤系地层角度不整合于下马岭组之上。

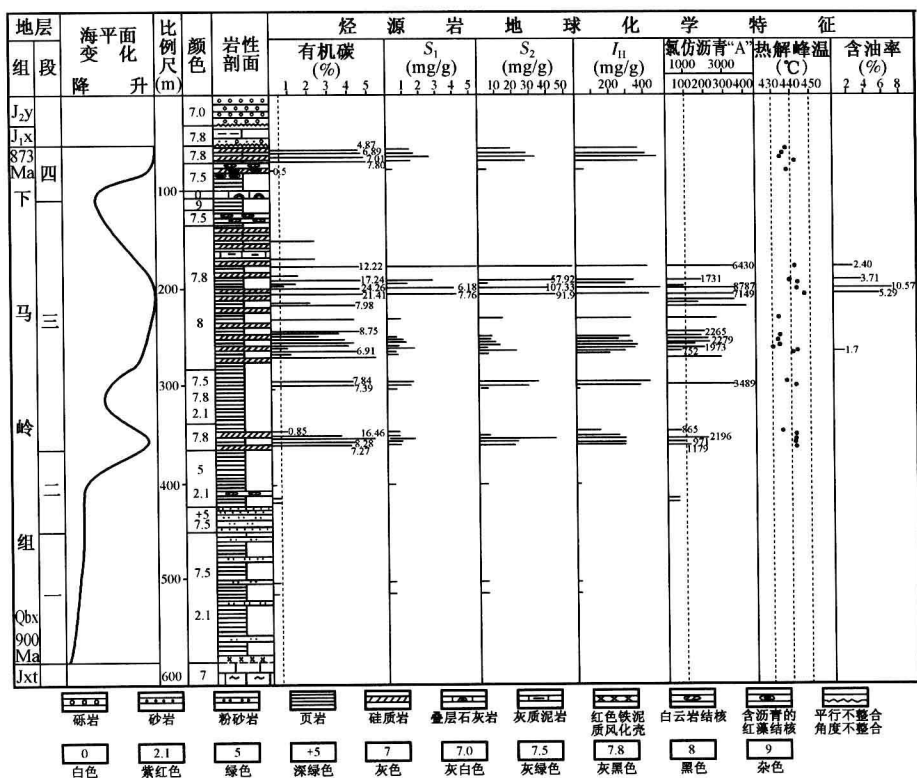


图2 河北下花园夏家沟新元古界青白口系下马岭组有机地球化学剖面图

下马岭组在研究区分布广泛,厚度很大(最厚达587m),自下而上分为四个岩性段:第一和第二段厚约160m,主要为紫红、灰绿色纸片状页岩和褐色、鲜绿色海绿石砂岩;第三段厚达350m,其下部为灰绿色、灰色页岩夹灰黑色页岩、硅质页岩、硅质岩,中部发育大套的灰黑色页岩、硅质页岩和硅质岩,顶部为灰绿色、杂色页岩;第四段厚约50m,其下部为叠层石藻灰岩,中部为灰绿色纸片状页岩夹硅质岩和灰色白云岩结核,上部为灰黑色页岩与硅质岩间互。笔者在该段中部的灰绿色页岩、硅质岩中,发现了大量的红藻石(*Rhodoids*) (或称红藻结核,即前人所谓的“沥青饼”)^[23]。这些红藻石由珊瑚藻科红藻构成,沥青充填于红藻的髓腔和藻丝体间,类似于生物体腔中的原油。这一发现对于认识红藻作为一种重要的生烃母质以及古地理环境的复原具有十分重大的科学意义。

2 油页岩的岩石学特征、有机质丰度及含油性

下花园地区下马岭组第三段暗色层沉积总体上为黑灰色硅质岩、灰黑色含泥硅质岩与黑色硅质泥岩、泥岩和黑棕色纸片状页岩的不等厚间互,有2个主要特点:一是SiO₂含量高(大多高于泥岩的平均值46%~60%),多介于62%~78%之间(表1);二是有机质丰度高。从表1可以看出,除G₁和G₉号样品TOC较低外,其余样品均大于6.91%,最高达24.26%,热解S₂多在20~113mg/g之间,氯仿沥青“A”含量高者可达0.58%~0.88%。因此,我们称该类烃源岩称为碳-硅泥岩型烃源岩。

表 1 下马岭组第三段暗色层的有机质丰度和含油率

样品号	岩性特征	SiO ₂ (%)	TOC (%)	S ₁ (mg/g)	S ₂ (mg/g)	I _H (mg/g)	氯仿沥青“A” (%)	含油率 (%)
G ₁	黑灰色硅质泥岩	62.92	0.85	0.49	1.21	142	0.09	—
G ₉	黑灰色硅质岩	78.38	1.00	2.68	1.67	167	—	—
G ₂₁	黑棕色纸片状含泥硅质岩	73.23	6.91	0.67	20.48	296	0.08	1.70
G ₁₀	黑色硅质泥岩(风化样)	66.34	17.24	2.78	57.92	336	0.17	3.71
G ₁₃	黑色泥岩、页岩混合样(风化样)	56.22	10.83	4.01	45.11	417	—	2.04
G ₇	黑色含泥硅质岩	70.43	21.41	7.76	91.90	429	0.58	5.29
G ₈	黑棕色纸片状页岩	41.57	22.91	9.42	113.02	493	0.88	10.57
I ₉	黑色泥岩	52.80	24.26	6.18	107.33	442	0.71	—

注:除 G₂₁ 样品采自古城梁剖面外,其余均采自夏家沟剖面;“—”表示未分析。

由于高有机质含量,这些岩石大多烧之可燃,如黑色泥岩(样品 I₉)烧之发出爆裂声和滋滋声,嗅之具浓烈沥青味;黑棕色纸片状页岩(样品 G₈)可剥离成极富弹性的页片,烧之发出红色火焰。对 20 个岩石样品的 TOC(介于 0.85% ~ 24.26%)与烧失量(LOI)的关系进行分析,发现两者之间具有很好的正相关性,表明岩石样品中控制烧失量大小的因素只是有机质的含量,也从另一个侧面证实下马岭组第三段碳—硅泥岩高度富含有机质。

据表 1 中的含油率和物理性质,并与国内外典型油页岩对比(表 2),以美国标准 42L/t(约为 4.2%,笔者注)含油率作为油页岩的下限^[24],则该套碳—硅泥岩中含有油页岩当属无疑。黑色含泥硅质岩(如样品 G₇)和黑棕色纸片状页岩(如样品 G₈)构成了油页岩的主要岩石类型,在夏家沟剖面出露的约 50m 厚的碳—硅泥岩中,它们累计厚约 10m。

表 2 下花园油页岩与世界其他地区油页岩的对比 (单位:%)

油页岩类型(产地)	湿度	水	油	残渣	气 + 散失
下花园油页岩(中国河北)		2.6 ~ 2.8	5.3 ~ 10.6	84.7 ~ 90.2	1.7 ~ 2.1
茂名油页岩(中国广东)	5.0	3.2	7.3	80.6	3.9
Kvarntrop 油页岩(瑞典)	2.0		5.7	87.2	5.1
Kukersite 油页岩(爱沙尼亚)	干	1.9	22.0	70.5	5.6
GreenRiver 油页岩(美国)	干	1.4	10.4	85.7	2.5
Irati 油页岩(巴西)	4.6	1.2	6.9	83.6	3.7
El Lajjun 油页岩(约旦)	4.0	1.4	10.1	80.8	3.7

注:国外资料据文献^[25]。

3 油页岩的生物母质——红藻

在垂直层理的薄片上,黑棕色页岩中可见极为发育的水平微细层理。该微细层理由两类基本纹层构成,一类在透射光下呈棕黄色,为有机质;另一类在透射光下呈灰色,正交偏光显微镜下还可见密集的顺层排列的黏土矿物,并含有少量细小而磨圆度不好的石英颗粒。在荧光显微镜下,有机质纹层具两类荧光,一类呈暗黄褐色,另一类呈亮黄色,其中以发暗黄褐色荧光的有机组分占优势(图 3)。

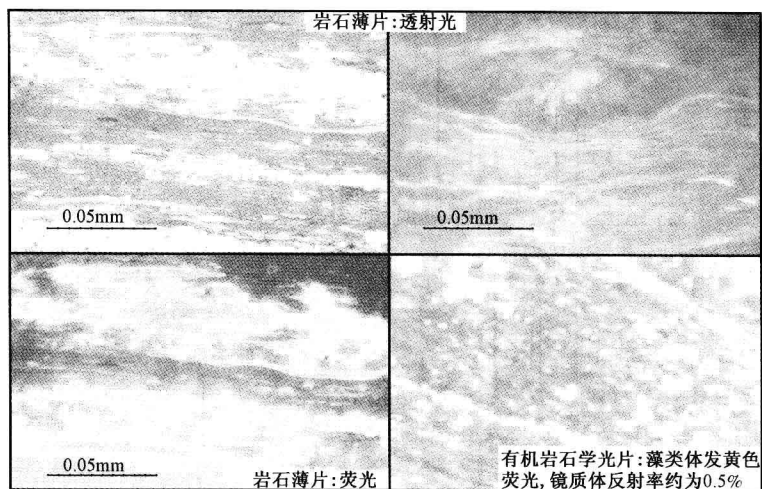


图3 下马岭组黑棕色页岩(样品 G₈)显微特征^[21]

为了进一步了解这些页岩中有机质的生物构成,边立曾等^[21]对其进行了垂直层面与平行层面的两类超微切片研究。根据囊果构造特征,认为构成有机质的生物主要是底栖红藻类,可能是红藻门,并将其命名为富油下花园藻(*Xiahuayuania oleosusa*)^[21]。

应用 HCl—HF 浸解技术,获得了黑棕色页岩干酪根。干酪根的主要组分可分为两类,一类是底栖宏观藻类残片,另一类是丰富的果孢子囊。果孢子囊是红藻类生物常见的生殖细胞,在透光镜下呈黄色,属于富氢组分。笔者认为,红藻的囊果是主要的生油母质,而营养细胞多以似镜质组形式存在,也许主要是生气母质。

4 油页岩的分子标志化合物特征

下马岭组三段和四段各种类型的岩石抽提物中的生物标志化合物组成与其他地区海相沉积物中的相比,具有明显不同的特征。表现在:(1)甾烷含量低,萜烷却十分丰富;(2)在m/z191 质量色谱图上,具有高丰度的 C₁₉未知萜烷、C₂₀和 C₂₁三环萜烷、C₂₄四环萜烷;同时,Ts 与 Tm 之间的 C₃₀—未知萜烷、17 α (H)—C₂₉和 C₃₀重排藿烷以较高的浓度相伴出现(图 4a)。这些特征在中国西部盆地陆相侏罗系烃源岩及其衍生的原油中非常普遍。高丰度的重排藿烷等化合物在下马岭组岩石中的出现说明,这些化合物可能不像过去人们所认为的那样只是陆相地层所专属^[26~30],也不是在适度咸化的碱性湖泊环境下由黏土矿物的催化作用所形成^[31]。Peters 和 Moldowan^[32]认为,重排藿烷是与细菌藿烷类先质在弱氧化条件下黏土矿物的酸性催化作用有关的化合物。在这里,我们尚没有充分的证据排除细菌对该区高浓度重排藿烷等化合物的存在有重要贡献,假如有的话,那么一个重要的事实是,无处不在的细菌为什么并没有导致这些化合物在相邻的京西下马岭地区埋深较浅的同一层位相同类型(页岩和泥岩以及硅质泥岩)岩石抽提物中的大量出现?因此我们推测,这些化合物有可能是某种特殊生物(如红藻)的特征标志。对此我们还要进一步工作。

另一类特征的标志物是长链正烷基三环萜烷,它们在第三段的黑色泥岩、黑棕色页岩、硅质泥岩以及第四段的红藻石中的沥青抽提物中都很丰富。这类化合物曾由王铁冠首次在新元古界下马岭组底砂岩古油藏储层沥青中检出^[15],并确定为是 13 α (正烷基)—三环萜烷。由于 13 α (正烷基)—三环萜烷与 17 α (H)—重排藿烷共生,所以它们可能具有相同的成因。

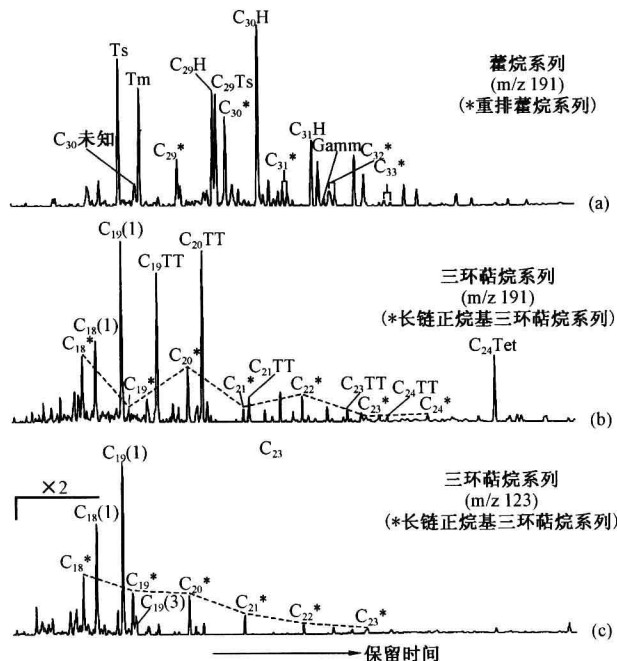


图4 下花园(a)和京西(b)地区下马岭组页岩抽提物中生物标志化合物分布

H—藿烷; Gamm—伽马蜡烷; TT—三环藿烷; Tet—四环藿烷

我们注意到,下马岭组无论是第三段的黑色泥岩、黑棕色纸片状页岩、硅质泥岩,还是第四段的红藻石中沥青,其抽提物中的这些化合物均非常丰富,且分布惊人的一致,这说明:(1)三、四段的生物构成相同,无论是三段的层状富有机质岩石还是四段的“沥青饼”,它们其实是红藻生物两种表现形式,前者为压缩化石,后者为硅化结核;(2)红藻不但可以形成高有机质丰度的烃源岩/油页岩,而且更有意思的是,单体红藻可以形成饼状的沥青体,可见红藻的生烃能力比我们预期的要大得多。

5 油页岩发育环境

一般说来,现代海藻中除浮游植物外,大多数种类的褐藻、红藻和绿藻等宏观藻类都是底栖的。其生活环境,除蓝藻、绿藻既可见于海洋、又可见于陆相湖泊环境,极少数红藻可生活于高山溪流中外,褐藻和绝大多数红藻为底栖海藻;其生活水深一般不超过70m。绿藻由于含叶绿素多,其光合作用的有效光线是红光,它分布在海洋的最上层,故绿藻一般生活在5~6m深的水层中;褐藻含藻褐素多,其光合作用的有效光线是黄色和橙色光,它分布在海洋的中层,故褐藻一般生活在30~60m深的水层中;红藻含藻红素多,其光合作用的有效光线是蓝绿光,它分布在海洋的最下层,即使是200m左右的水层中也能生长^[33]。

从燕辽沉降带当时的古地理环境看,青白口纪的构造—沉积古地理格局为一背靠(已准平原化的)华北古陆剥蚀区、面向蒙古洋的被动陆缘,特别是河北滦水—京西下马岭—河北下花园等地下马岭组的碳—硅泥岩沉积,就是被动陆缘的典型沉积建造组合;燕辽滨—浅海的古地貌为一典型的克拉通边缘拗陷,它与内蒙(地轴)广海直接相连通,古地势总体上缓缓向北倾斜。所以,从对京西下马岭和下花园地区下马岭组生物组合特征看,生物分布随水深的变化

十分明显。在南部的京西下马岭剖面,水体较浅,故主要发育蓝藻和绿藻生物,生物标志物的组合表现出典型的海相浮游生物特征;向北到较深水区,即本文讨论的下花园地区,生物类型则主要是红藻,生物标志物的组合也明显不同于京西下马岭(图 4b),虽然它们同属一个层位,且岩性组合也十分相似。

在富含有机质岩层中,层状硅质岩中的 SiO_2 属典型的海底火山热水成因;TOC 与 P、Cu、Ni、V、W 和 Mo 等微量元素之间的正相关关系(图 5),表明赋存油页岩的地层在沉积时显然受到了海底热水流体活动的影响^[34]。这些富含胶体 SiO_2 和微量元素的热流体的上涌,不断为生物繁衍提供营养物质,同时热流体还可以为生物提供能量,导致底栖生物的大量繁殖;同时,由于高有机质产率带来的生物体的呼吸和分解对海底游离氧的消耗,又使得海底形成缺氧环境,从而有利于死亡生物的保存。下花园剖面下马岭组第三段的黑色碳—硅泥岩及其中的油页岩便是这一底栖宏观藻类繁盛、沉积和保存之优越环境的典型沉积记录。

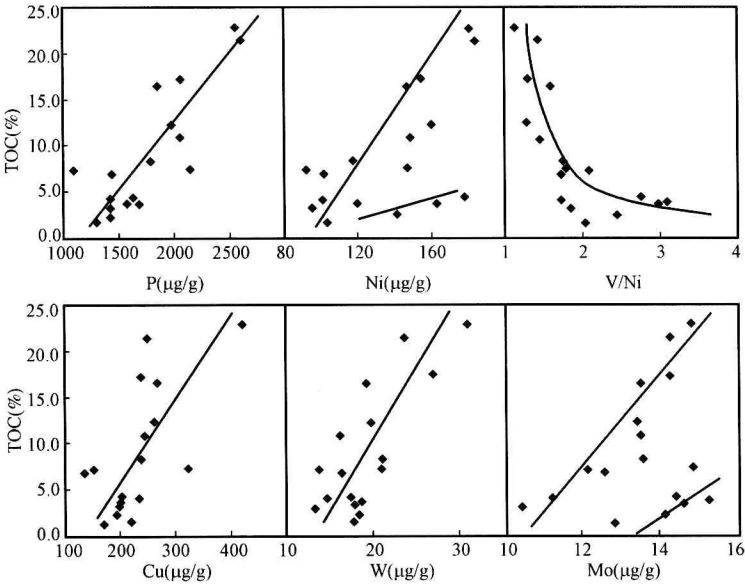


图 5 下马岭组沉积岩石中的 TOC 与 P、Ni、V/Ni、Cu、W、Mo 元素的相关关系图

6 结论

通过对河北下花园地区新元古界青白口系下马岭组第三段碳—硅泥岩的地质地球化学及生物学研究,发现了一套有机碳丰度和含油率均比较高的油页岩沉积。其岩石类型主要为黑色含泥硅质岩和黑棕色纸片状页岩,油页岩主要由底栖红藻堆积而成,并见有丰富的红藻果孢子囊;其抽提物中的生物标志化合物分布以富含 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷系列和 C_{18} — C_{29} 正烷基三环萜烷为特征。由于该油页岩的生物母质构成简单,这些化合物可能是富油下花园藻类生物的特征标志。由此提出,红藻的生烃能力比我们预期的要大,底栖藻类可以作为重要生烃母质并构成优质烃源岩。下花园地区下马岭组油页岩主要发育在最大海侵期的第三段深水海湾环境中,海底的热水流体活动为生物的繁衍提供了营养物质和能量,导致底栖生物的大量繁殖和保存。

参考文献

- [1] North F K. 1985. 高纪清,等译,石油地质学. 北京:石油工业出版社. 1994,95~102
- [2] Cook A C, Hutton A C, Shelrwood N R. Classification of oil shales. Bull Cent Rech Explor Prod. Elf Aquitaine, 1981,5:353~381
- [3] Cook A C, Shelrwood N R. Classification of oil shales, coals and other organic-rich rocks. Org Geochem, 1991, 17:211~222
- [4] Miknis F P, Smith J W. An NMR survey of United States oil shales. Org Geochem, 1984,5(4):193~201
- [5] Smith J W. Oil shale resources of the United States. Mineral and Energy Resources. Colorado: Colorado School of Mines Press, 1981,23(6):20
- [6] Carroll A R, Brassell S C, Graham S A. Upper Permian lacustrine oil shales, Southern Jungar Basin, Northwest China. AAPG Bull, 1992,76(12):1874~1902
- [7] 王东坡,刘立,张立平,等. 松辽盆地的古气候、沉积旋回与层序地层. 长春:吉林大学出版社,1995
- [8] 郝石生. 冀辽拗陷中、上元古界原生油气远景. 石油与天然气地质, 1984,5(4):342~348
- [9] 郝石生. 碳酸盐岩生油岩热演化模拟实验. 石油学报, 1987,(增刊):25~31
- [10] 郝石生,高耀武,等. 华北北部中—上元古界石油地质学. 东营:石油大学出版社,1990
- [11] 华阿新,黄第藩. 华北中、上元古界有机质成烃作用及生物标志化合物特征. 中国科学院兰州地质研究所生物、气体地球化学开放实验室年报(1988~1989), 1989:10~43
- [12] 刘宝泉,方杰. 冀北宽城地区中、上元古界、寒武系有机质热演化特征及油源探讨. 石油实验地质, 1990,11(1):2~8
- [13] 刘宝泉,秦建中. 冀北拗陷中、上元界烃源特征及油苗、油源分析. 海相油气地质, 2000,5(1~2):35~45
- [14] Liu B Q, Liang D G, Fang J, et al. Organic matter maturity and oil/gas prospects in Middle – Upper Proterozoic and Lower Paleozoic carbonate rocks in northern China. Geochem, 1986,5(1):58~68
- [15] 王铁冠. 一种新发现的三环萜烷生物标志物系列. 见:王铁冠,等著. 生物标志物地球化学. 武汉:中国地质大学出版社,1990,5~11
- [16] 赵澄林,李儒峰,周劲松,等. 华北中新元古界油气地质与沉积学. 北京:地质出版社,1997
- [17] 方杰,刘宝泉,等. 华北北部中、上元古界生烃潜力与勘探前景分析. 石油学报, 2002,23(4):18~24
- [18] 张长根,熊继辉. 燕山西段震旦界油气生成问题探讨. 华东石油学院学报, 1979,(1):88~102
- [19] 黄醒汉,张一伟. 燕山西段震旦界、下古生界含油性. 华东石油学院学报, 1979(1):103~114
- [20] 杜汝霖. 下花园地区区域地质及教学实习指导书. 1986
- [21] 边立曾,张水昌,张宝民,等. 河北张家口地区下花园下马岭组所发现的油页岩中的红藻化石. 微体古生物学报, 2005,22(3):209~216
- [22] 王鸿祯,史晓颖,王训练,等. 中国层序地层研究. 广州:广州科技出版社,2000
- [23] 张水昌,张宝民,边立曾,等. 河北张家口下花园青白口系下马岭组“红藻石”的发现. 微体古生物学报, 2005,22(2):121~126
- [24] 晏德福. 有机地球化学文集. 兰州:甘肃科学技术出版社,1986
- [25] Mihkel K. Estonina oil shale. Oil Shale Extra, 1999,1~22
- [26] Volkman J K, Alexander R, Kagi R I, et al. A geochemical reconstruction of oil generation in the Barrow Sub-basin of Western Australia. Geochim Cosmochim, 1983,47:2091~2106
- [27] Philp R P, Gilbert T D. Biomarker distributions in oils predominantly derived from terrigenous source material. In: Moldowan J M, Albrecht P, Philp R P, eds. Biological Markers in Sediments and Petroleum, Prentice Hall, Englewood Cliffs N J, 1986,106~123
- [28] 张水昌,邓攀,彭燕,等. 塔里木盆地轮台断隆带中新生代陆相原油成因及其源岩潜力评价. 新疆石油地质, 1995,16(4):307~311
- [29] 赵孟军,张水昌. $17\alpha(H)$ -重排藿烷在塔里木盆地中的指相意义. 石油勘探与开发, 2001,28

(1):36~38

- [30] 肖中尧,唐友军,侯读杰,等. 柯克亚凝析油藏的油源研究. 沉积学报,2002,20(4):716~720
- [31] 肖中尧,黄光辉,卢玉红,等. 却勒1井原油中的重排藿烷系列及其与油源岩. 石油勘探与开发,2004,31(2):35~37
- [32] Peters K E, Moldowan J M. The biomarker Guide, interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N J, 1993. 160~164
- [33] 刘改有. 海洋地理. 北京:北京师范大学出版社,1989
- [34] 陈践发,孙省利. 华北新元古界下马岭组富有机质层段的地球化学特征及成因初探. 天然气地球化学, 2004,15(2):110~114