

文章编号: 0253-2697(2013)02-0225-07 DOI: 10. 7623/syxb201302003

塔北地区奥陶系碳酸盐岩中的储层沥青

张 甯¹ 王招明² 鞠凤萍³ 肖中尧² 房启飞³ 张宝收² 卢玉红² 余小庆¹

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083;

2. 中国石油塔里木油田勘探开发研究院 新疆库尔勒 841000; 3. 中国地质大学科学研究院 北京 100083)

摘要:利用沥青质拉曼 D 峰相对强度、G 峰相对强度、两峰间距宽窄与沥青演化成熟度关系,推出 Dh/Gh 和 G-D 与沥青成熟度成正比关系图。塔北奥陶系储层中发育 3 期储层沥青,通过 3 期储层沥青拉曼 Dh/Gh 和 G-D 认为:第 I 期为高热成熟炭质储层沥青,第 II 期为成熟沥青质储层沥青,第 III 期为过成熟油质储层沥青和沥青质储层沥青共存。前两期储层沥青是由于热变质而成,第 III 期两种储层沥青共存主要是岩石选择性吸附导致。3 期储层沥青的分布及性质决定塔北奥陶系成藏北部老、南部新,北部重质油、南部凝析油的特点。在哈拉哈塘—英买力地区南边发现油质储层沥青为在这一区域找喜马拉雅期凝析油藏提供了证据。

关键词:储层沥青;荧光;拉曼;奥陶系;塔北地区

中图分类号:TE112. 113 **文献标识码:**A

Diagenetic bitumen in Ordovician carbonate reservoirs of the northern Tarim Basin

ZHANG Nai¹ WANG Zhaoming² JU Fengping³

XIAO Zhongyao² FANG Qifei³ ZHANG Baoshou² LU Yuhong² YU Xiaoqing¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Tarim Oilfield Company,

Korla 841000, China; 3. Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the relationship between the relative intensity of D-peak, G-peak and G-D peak spacing of bitumens and the maturity of bitumen evolution, we deduced that the Dh/Gh ratio and G-D peak spacing are positively proportional to bitumen maturity. Bitumens in Ordovician reservoir in the northern Tarim Basin are thought to have evolved in three stages and the Dh/Gh ratio and G-D peak spacing of Raman measurements on these bitumens indicated that the first-stage bitumen is highly-mature carbonaceous reservoir bitumen, the second-stage one is mature asphaltene reservoir bitumen, and the third-stage one is a combination of overmature oily reservoir bitumen and asphaltene reservoir bitumen. The formation of the first- and second-stage bitumens is attributed to thermal metamorphism, while the co-existence of two different bitumens for the third-stage bitumen is mainly due to selective adsorption of rocks. The distribution and property of these three-stages bitumens in Ordovician reservoirs of the northern Tarim Basin may determine the nature of Ordovician reservoirs, which is characterized by the southern condensate oil later than the northern heavy oil. The observation of oily reservoir bitumen in the northern Halahatang-Yingmaili region can provide evidence and targets for exploring Himalayan condensate oil reservoirs in this area.

Key words: reservoir bitumen; fluorescence; Raman; Ordovician; northern Tarim Basin

塔北隆起位于塔里木盆地北部,介于库车坳陷与北部坳陷之间,是塔里木盆地最为重要的油气勘探开发区之一,含油气层位多,其中奥陶系石油储量最大,成藏问题也最复杂。目前多认为轮南低凸起地区存在 3 期成藏^[1],但对哈拉哈塘—英买力地区有 1 期成藏^[2]、2 期成藏^[3]和 3 期成藏^[4]观点之争。对塔里木地区储层沥青研究较多,多从沥青成因分析沥青组分变化^[5],也有利用沥青荧光性说明其特征的^[6],但利用

储层沥青的拉曼特征峰来探讨成藏期次的很少^[7]。

1 储层沥青拉曼研究理论基础

Rogers^[8]最早定义了储层沥青(reservoir bitumen):由油衍生而来,现今存在于晶洞或粒间孔隙中,是石油热变质过程中天然裂解的产物,随着埋藏深度增加,固体沥青不断发生聚合或增碳缩合作用,沥青的物理化学性质发生有规律的变化。石油组分可以分为

基金项目:中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司科研项目(041010120148)资助。

第一作者及通讯作者:张 甯,女,1963 年 10 月生,1986 年获成都理工大学学士学位,现为中国石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事包裹体研究。Email:zn@petrochina.com.cn

烷烃和芳香烃等非极性组分与沥青质和非烃类物质等极性组分。在油-岩相互作用中原油中的极性组分(如胶质、沥青质、含有氮硫氧的化合物、金属络合卟啉等极性有机物)在岩石矿物表面被富集,成岩过程中这些极性有机物分子大又易被岩石吸附,多被较好地保留于岩石孔隙中,故储层沥青应是石油中的极性组分或成岩阶段经成熟作用和变质作用演变后产物,如演变浅的可能保存有较轻质组分,演化深的可能以极性高分子沥青质、碳化有机质为主。因荧光发光性质可反映有机组分基本特征^[9],笔者按在紫外荧光显微镜下发光特征将储层沥青分成4类:油质储层沥青(白-蓝-黄色荧光);胶质储层沥青(橙色荧光);沥青质储层沥青(褐色荧光);炭质储层沥青(不发光或黑色光)。从油质储层沥青到炭质储层沥青轻质组分依次变少,石油族组分中的“沥青质”等高分子组分依次变多。

Zerda等^[10]研究天然石墨和碳质物的拉曼光谱发现,它们常有2个拉曼特征峰:①1580~1600 cm^{-1} 的“G”峰,是芳香构型层平面上碳-碳间的振动;②1350~1380 cm^{-1} 的“D”峰,与非晶质石墨无序结构和结构单元间的缺陷有关。近年来,Kelemen等^[11]和Zeng Yishan, Wu Chaodong^[12]用拉曼光谱研究了烟煤和干酪根的热演化产物。结果表明,样品的拉曼碳谱中“D”峰和“G”峰形态和比值与热演化实验温度有关,可以反应有机质高热演化阶段的热变程度。William Schopfa等^[13]研究了前寒武纪地层中微体化石的拉曼碳谱中“D峰-G峰”特征,提供了保存指数(RIP)与微体化石地质年代和微体化石的“Mapping”图,受到了广泛关注。胡凯等^[14-16]研究发现,有机碳质物的拉曼光谱受古地温热蚀变作用的影响具有十分敏感的变化特征。胡凯^[16]、段菁春^[17]、刘德汉^[18]等分别对不同镜质体反射率的石墨、煤、沥青进行拉曼分析,将他们所测数据作 R_o 和 G 峰拉曼波数与 D 峰拉曼波数差值(G-D)关系图(图1),结合刘德汉^[18] R_o 和 D 峰拉曼强度与 D 峰拉曼强度比值(Dh/Gh)关系图(图2)证明,随着 R_o 值变大,G-D 差值、Dh/Gh 比值数也增大,一般将 R_o 为 0.8%、1.3%、2% 分别作为低成熟、中成熟、高成熟、过成熟分界点,将 R_o 的分界点分别投在图1、图2中,找到对应的 G-D 差值、Dh/Gh 比值数,分别约为 220 cm^{-1} 、227.5 cm^{-1} 、237.5 cm^{-1} 和 0.55、0.59、0.66,用 G-D 差值的 220 cm^{-1} 、226 cm^{-1} 、235 cm^{-1} 和 Dh/Gh 比值的 0.558、0.596、0.654 数值可画出相应的低成熟、中成熟、高成熟、过成熟区域(图3)。

等效镜质体反射率对于估测固体沥青就位储层后的成熟度和成熟史研究已比较成熟^[16-19]。与油气充注结合起来的沥青的多成因、多形成过程限制了沥青与

热成熟度的直接相关性^[20]。张甯^[7]发现,石油中的储层沥青在拉曼谱图上虽然也有荧光宽缓拉曼峰,但总有2个成对的1379 cm^{-1} D 峰和1605 cm^{-1} G 峰,这两个拉曼峰值非常稳定,尤以 G 峰更为突出。这是由于储层沥青是经过成岩热演化的高碳化合物,内含有大量芳香构型层面的双碳原子键,因此“G”峰会突出。由于“D”峰是非晶质石墨无序结构的缺陷,而储层沥青多为液相烃,不像煤、石墨具有非晶质石墨无序结构的缺陷,故“D”峰不发育,如果储层沥青已碳化或已

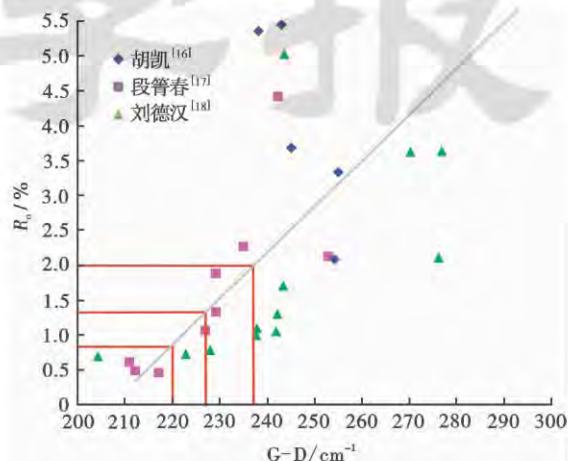


图1 石墨、煤、沥青的 R_o 与 G-D 关系

Fig. 1 The relationship between R_o and G-D of graphite, coal, and bitumen

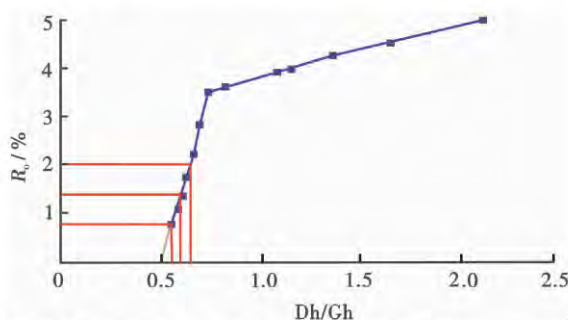


图2 石墨、煤、沥青的 R_o 与 Dh/Gh 关系(据文献^[18]修改)

Fig. 2 The relationship between R_o and Dh/Gh of graphite, coal, and bitumen

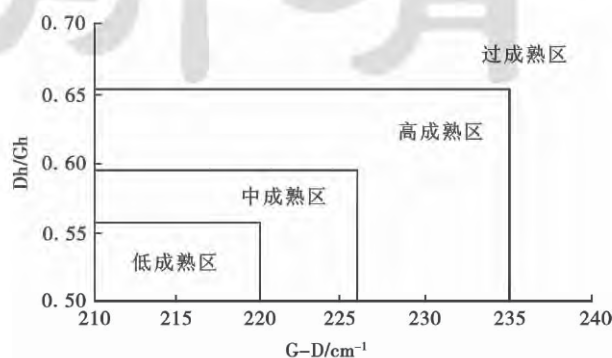


图3 沥青成熟度分布

Fig. 3 Distribution of bitumen maturity

热变质到最终产物石墨,那么“D”峰会出现。所以可以依据沥青两个成对的D峰和G峰特征推测储层沥青的演化特征,对于未知沥青测到了拉曼的G峰和D峰,可投影在G-D与Dh/Gh关系图中,从而确定对应的热演化成熟度。

2 塔北奥陶系储层沥青荧光特征及期次划分

通过对塔北39口井储层沥青显微观察,在轮南低凸起地区常发现有3期储层沥青:第I期多赋存在早期愈合缝中,在单偏光下为黑色[图4(a)、图4(b)、图4(d)],在紫外荧光下不发光[图4(c)],有碳化现象,故为炭质储层沥青。第II期赋存在愈合缝[图4(b)]、溶孔[图4(d)]、裂缝[图4(e)]中,在单偏光下为黑褐色、褐色[图4(b)]、图4(d)],在紫外荧光下发黄褐色光[图4(c)]或褐色光[图4(e)],伴生有发黄色荧光的烃包裹体[图4(e)],因烃包裹体是原油充注时被包裹在矿物中,其组分未发生分异,由此可见这期储层沥青是原油充注后又遭受破坏,轻质组分分异、变质成以胶质、沥青质为主的有机物,故为沥青质储层沥青。第III期多赋存在半充填的晚期裂缝中,在单偏光下为灰色、褐色,在紫外荧光下发蓝色光储层沥青[图4(c)]和褐色光储层沥青[图4(f)]共生,伴生有蓝色荧光的烃包裹体[图4(f)],储层沥青和烃包裹体都发蓝色荧光,可见这期储层沥青形成较晚,未发生成岩变质作用。由于岩石选择性吸附原油中极性有机质,使这一期储层沥青组分分异,形成了以非极性轻质烃类为主的油质储层沥青与以极性沥青质为主的沥青质储层沥青共存现象。

哈拉哈塘—英买力地区储层沥青与轮南低凸起地区有很好对比性,也发育相同特征的3期储层沥青:第I期多为炭质储层沥青[图4(g)—(i)];第II期也为沥青质储层沥青[图4(j)—(k)、图4(m)],伴生有发黄色荧光的烃包裹体[图4(j)、图4(m)];第III期同样是油质储层沥青和沥青质储层沥青共存[图4(l)、图4(n)—(o)],伴生有发蓝色荧光的烃包裹体[图4(o)]。

在解放127井5649.88m处见第III期发蓝白色荧光的储层沥青切割前两期储层沥青[图4(b)—(c)]。在英买201井6015.08m处见第II期沥青质储层沥青切割第I期储层沥青[图4(g)],可见3期储层沥青形成于先后不同的地质时期。据荧光发光特征三期沥青显示,早期沥青碳化明显,中期轻组分分异,晚期沥青轻质油保存较好。

大量薄片观察发现,塔北不是每一井区都发育3期储层沥青,除了第II期储层沥青普遍分布外,第I期

储层沥青在轮南低凸起地区较普遍,哈拉哈塘—英买力地区主要在北部英买4井、新垦1井、新垦4井、哈801井、哈6井等靠北的井中较常发现;第III期储层沥青主要在塔北南部地区发现,如轮南低凸起地区南边的轮古东地区(轮古36井、轮东2井、轮古351井、轮古39井)、桑南西地区(轮南54井、轮南39井、轮古102井)、桑南东地区(解放126井、解放127井、轮南23井),以及哈拉哈塘—英买力地区南边的英买2井区、哈902井、热普1井、哈12-3井、热普4井等,在塔北北部如轮南低凸起地区的中平台地区、哈拉哈塘地区北边的井如哈801井未见第III期储层沥青。从而形成了塔北北边见第I期储层沥青、全区见第II期储层沥青、南边见第III期储层沥青的格局。

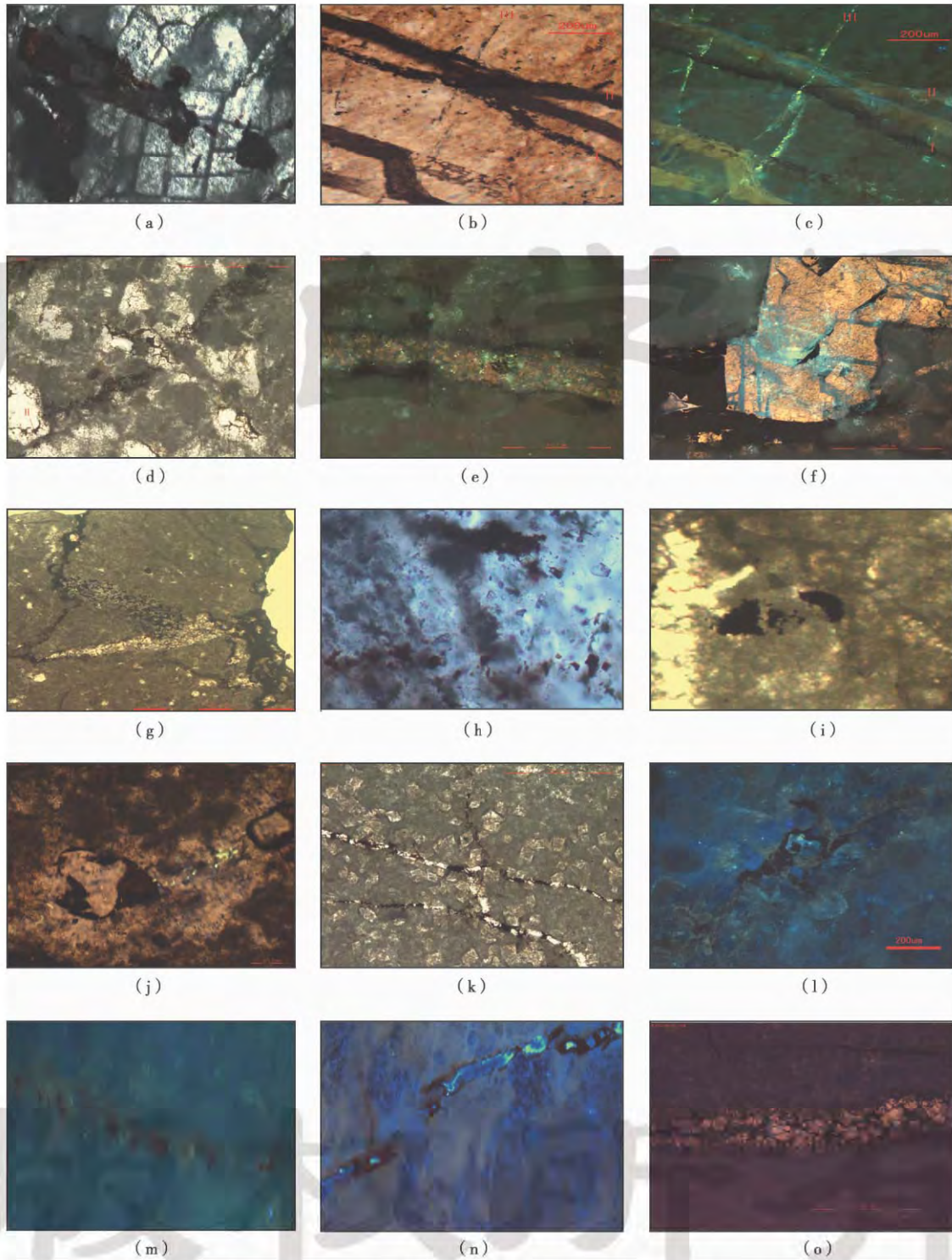
3 塔北奥陶系储层沥青拉曼特征及热成熟度

哈拉哈塘—英买力地区的3期储层沥青与轮南低凸起地区的3期储层沥青不仅在显微荧光特征上有相同之处,在拉曼谱图形态上也特别一致。图5(a)是第I期储层沥青拉曼谱图,都表现出G峰发育而尖锐,显示出高碳组分为主。D峰较突起,有碳化趋势,可见这一期储层沥青碳化热变较强。在 3000 cm^{-1} 处宽大凸起不高,是烃类组分甲基、亚甲基等的荧光表现。

图5(b)是第II期储层沥青拉曼谱图,G峰相对没有第I期储层沥青的尖锐,个别的还表现较低[如图5(b)中的哈902井的第II期储层沥青拉曼谱图],显示第II期储层沥青高碳组分没有第I期储层沥青的多。D峰微突出,在 3000 cm^{-1} 处也有宽大凸起,说明第II期储层沥青也有一定的成岩热变作用。

第III期储层沥青中蓝白色荧光的轻组分保存较好,拉曼分析中常有荧光效应,本次选靠近围岩的深色极性组分部分进行拉曼分析。图5(c)是第III期储层沥青拉曼谱图,G峰也有一定突出,说明靠近围岩的深色极性组分以高碳沥青质为主,在 3000 cm^{-1} 处宽大凸起较高,说明第III期储层沥青保存有大量的甲基、亚甲基轻质烃类,D峰基本没有,可见无成岩热变碳化趋势。

将塔北奥陶系3期储层沥青的拉曼特征峰G-D差值与Dh/Gh比值作相关图(图6),在前面已论证G-D与Dh/Gh关系图由左下方向右上方显示热成熟度变高,第I期储层沥青分布的区域(图6中棕色框部分)高于第II期储层沥青分布的区域(图6中黄色框部分)。一般油气运移特点:从早期成熟度低到晚期成熟度变高演化。为什么塔北奥陶系储层中早期形成的第I期储层沥青热成熟度高于第II期储层沥青?紫外荧光显微镜下第I期储层沥青多为黑色炭质沥青说明,



(a) 第 I 期储层沥青, 解放 127 井, 5 498.66 m, 单偏光; (b) 3 期储层沥青, 解放 127 井, 5 649.88 m, 单偏光; (c) 3 期储层沥青, 解放 127 井, 5 649.88 m, 紫外荧光; (d) 第 I 期储层沥青, 轮古 39 井, 5 694.82 m, 单偏光; (e) 第 II 期储层沥青, 轮古 39 井, 5 817.53 m, 单偏光 + 紫外荧光; (f) 第 III 期储层沥青, 轮古 39 井, 5 817.53 m, 单偏光 + 紫外荧光; (g) 第 I 期储层沥青, 英买 201 井, 6 015.08 m, 单偏光; (h) 第 I 期储层沥青, 哈 902 井, 6 638.8 m, 单偏光; (i) 第 I 期储层沥青, 英买 4 井, 5 132.2 m, 单偏光; (j) 第 II 期储层沥青, 英买 201 井, 6 015.08 m, 单偏光 + 紫外荧光; (k) 第 II 期储层沥青, 哈 6 井, 7 047 m, 单偏光; (l) 第 III 期储层沥青, 热普 1 井, 6 845.48 m, 紫外荧光; (m) 第 II 期储层沥青, 英买 201 井, 6 086.05 m, 紫外荧光; (n) 第 III 期储层沥青, 英买 202 井, 5 867.47 m, 紫外荧光; (o) 第 III 期储层沥青, 英买 201 井, 6 110.52 m, 单偏光 + 紫外荧光。

图 4 塔北地区奥陶系储层沥青显微特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of Ordovician reservoir bitumen in northern Tarim Basin

形成后经历序列化成熟作用和变质作用,已形成了热稳定性更高的残余物——碳化高分子有机物,即第 I 期储层沥青的高热成熟度主要是后期成熟作用和变质作用的原因。

用远没有第 I 期储层沥青强,没到碳化阶段。但 G-D 多分布在大于 230 cm^{-1} ,这主要是保持原油高成熟度特征。

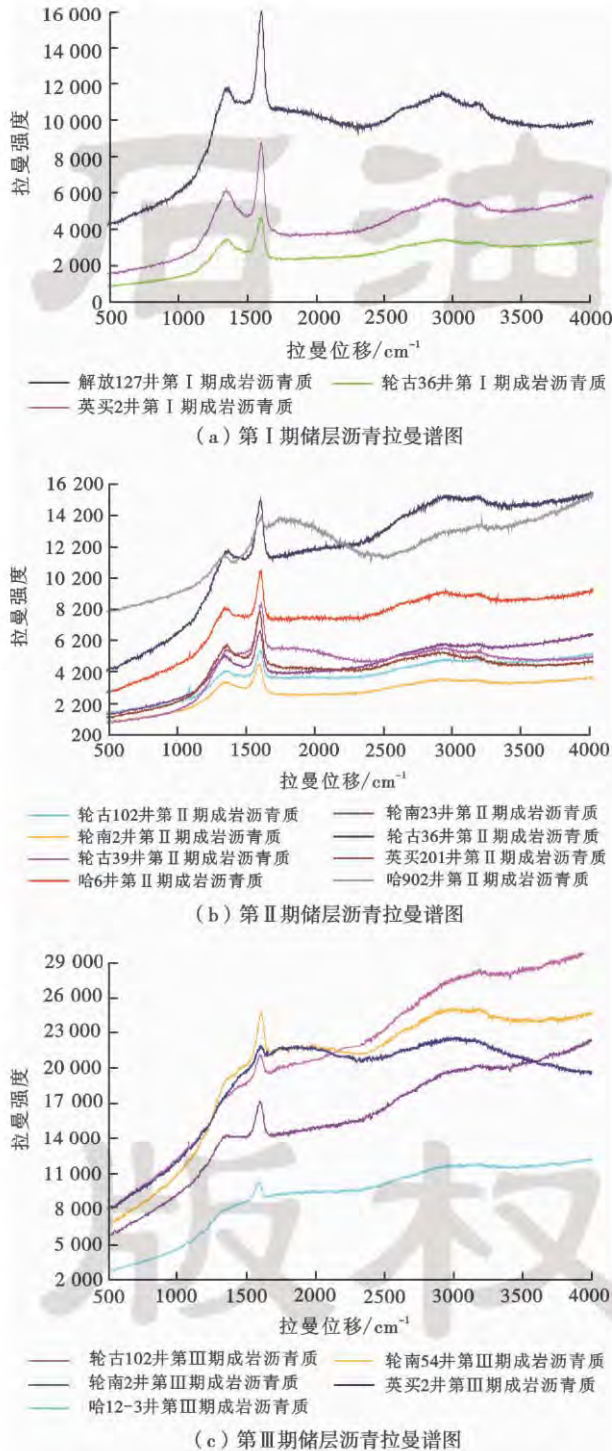


图 5 塔北地区奥陶系 3 期储层沥青拉曼谱图

Fig. 5 The Raman spectrogram for three stages reservoir bitumen in Ordovician of northern Tarim Basin

紫外荧光显微镜下第 II 期储层沥青多发黄褐色光,其组分中有一定的沥青质,说明热成熟度及变质作

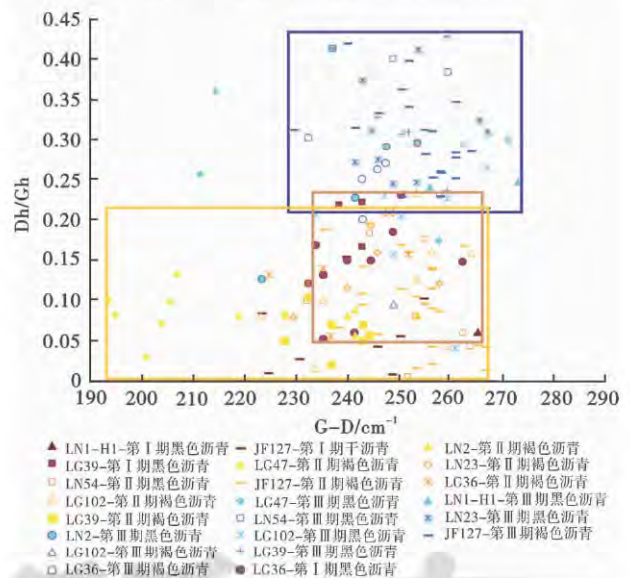
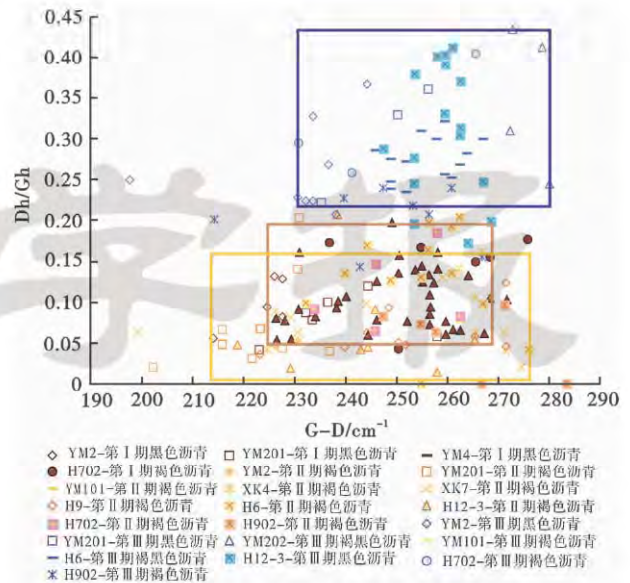


图 6 塔北地区奥陶系储层沥青 G-D 与 Dh/Gh 关系

Fig. 6 G-D and Dh/Gh relationship of reservoir bitumen in Ordovician of northern Tarim Basin

第 III 期储层沥青分布在最上面并明显向右偏,G-D 多分布在大于 $240\sim 270\text{ cm}^{-1}$ 过成熟区范围内,在紫外荧光下是发蓝白色油质储层沥青的重质部分[图 4 (c)],所以是一期成熟度高但未发生热沥青化的储层沥青,由于储层岩石选择性吸附原油沥青质等极性有机质,使这一期储层沥青组分分异,形成了以非极性轻质烷烃类为主的油质储层沥青与以极性沥青为主的沥青质储层沥青共存现象。

塔北西部哈拉哈塘—英买力地区3期储层沥青的G-D与Dh/Gh关系[图6(a)]与塔北东部轮南低凸起地区[图6(b)]一致,可见整个塔北地区自东向西所经历的成藏期次是相同的。

4 讨论与结论

结合前人对塔北地区成藏演化分析成果,认为第I期储层沥青其沥青化形成于早海西运动期,其相关油气藏形成于早古生代,由于上覆盖层不发育和构造裂缝使轻质组分多已移出,残余的重质组分由于序列化成熟作用和变质作用,产生了热稳定性更高的残余物—高碳化合物,并已向碳化转变。第II期储层沥青相关油气藏应与晚海西期大规模成油有关,是一次成熟油的注入,成岩作用热演化使组分分异,但未见碳化成固体炭质沥青,说明这一期古油藏得到较好的保存。赋存在晚期半充填裂缝中的第III期储层沥青应与喜马拉雅期过成熟凝析油气注入有关,因形成较晚而未经大的构造热事件改造,未变质的蓝白色荧光的油质储层沥青得以保存,由于岩石选择性吸收了原油中的极性组分(如胶质、沥青质等极性有机物),使这一期储层沥青组分分异,形成了以非极性轻质烷烃类为主的油质储层沥青和以极性沥青类为主的沥青质储层沥青共存于裂缝中的现象。因这一期储层沥青主要分布于塔北的南部,说明这期过成熟凝析油气充注由南向北,并只注入到塔北南边地区,多数北部地区未注入。尤其是在哈拉哈塘—英买力地区南边发现油质储层沥青,为在本区寻找喜马拉雅期凝析油藏提供了证据。

综上所述,塔北奥陶系储层中发育3期储层沥青:第I期高热成熟度炭质储层沥青;第II期成熟沥青质储层沥青;第III期过成熟油质储层沥青和沥青质储层沥青。3期储层沥青的分布及性质决定塔北奥陶系成藏北部老、南部新,北部重质油、南部凝析油的特点。

参 考 文 献

- [1] 王清华,肖贤明,肖中尧,等.塔里木盆地轮南低隆起储层石油包裹体GOR特征及其地质意义[J].科学通报,2004,49(增刊1):25-29.
Wang Qinghua, Xiao Xianming, Xiao Zhongyao, et al. Reservoir petroleum inclusion GOR characteristics and geological significance from the Lunan Low Uplift of the Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(Supplement 1): 27-32.
- [2] 朱光有,杨海军,朱永峰,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J].岩石学报,2011,27(3):827-844.
Zhu Guangyou, Yang Haijun, Zhu Yongfeng, et al. Study on petroleum geological characteristics and accumulation of carbonate reservoirs in Hanlicatam area, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 827-844.
- [3] 卢玉红,肖中尧,顾乔元,等.塔里木盆地环哈拉哈塘海相油气地球化学特征与成藏[J].中国科学D辑:地球科学,2007,37(增刊2):167-176.
Lu Yuhong, Xiao Zhongyao, Gu Qiaoyuan, et al. Geochemical characteristics and accumulation of marine oil and gas around Halahatang depression, Tarim Basin, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(Supplement 2): 195-206.
- [4] 赵靖舟,庞雯,吴少波,等.塔里木盆地海相油气成藏年代与成藏特征[J].地质科学,2002,37(增刊1):81-90.
Zhao Jingzhou, Pang Wen, Wu Shaobo, et al. Geochronology and characteristics of marine hydrocarbon accumulation in the Tarim Basin[J]. Scientia Geologica Sinica, 2002, 37(S. 1): 81-90.
- [5] 刘洛夫,赵建章,张水昌,等.塔里木盆地志留系沥青砂岩的成因类型及特征[J].石油学报,2000,21(6):12-17.
Liu Luofu, Zhao Jianzhang, Zhang Shuichang, et al. Genetic types and characteristic of the Silurian asphaltic sandstones in Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 21(6): 12-17.
- [6] 陈强路,范明,尤东华.塔里木盆地志留系沥青砂岩储集性非常规评价[J].石油学报,2006,27(1):30-33.
Chen Qianglu, Fan Ming, You Donghua. Non-traditional method for evaluating physical property of Silurian bitumen sandstone reservoirs in Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 27(1): 30-33.
- [7] 张鼎,田作基,毛光剑,等.沥青包裹体的拉曼光谱特征[J].地球化学,2009,38(2):174-178.
Zhang Nai, Tian Zuoji, Mao Guangjian, et al. Raman spectroscopic characteristics of bitumen inclusions[J]. Geochimica, 2009, 38(2): 174-178.
- [8] Rogers M A. Significance of reservoir bitumens to thermal-maturation studies Western, Canada Basin[J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(9): 1806-1824.
- [9] 陈丽华,郭舜玲,王衍琦.中国油气储层研究图集(卷五)——自生矿物显微荧光阴极发光[M].北京:石油工业出版社,1994:170-171.
Chen Lihua, Guo Shunling, Wang Yanqi. Atlas of Chinese petroleum reservoir micro-fluorescence and cathodoluminescence of the authigenic mineral[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 170-171.
- [10] Zerda T W, Jobn A, Chmura K. Raman studies of coals[J]. Fuel, 1981, 60(5): 375-378.
- [11] Kelemen S R, Fang H L. Maturity trends in raman spectra from kerogen and coal[J]. Energy Fuels, 2001, 15(3): 653-658.
- [12] Zeng Yishan, Wu Chaodong. Raman and infrared spectroscopic study of kerogen treated at elevated temperatures and pressures[J]. Fuel, 2007, 86(7/8): 1192-1200.
- [13] William Schopf J, Kudryavtsev A B. Confocal laser scanning mi-

- crosscopy and Raman imagery of ancient microscopic fossils[J]. Precambrian Research, 2009, 173(1/4):39-49.
- [14] 胡凯, Wilkins R W T. 激光拉曼光谱碳质地温计——一种新的古地温测试方法[J]. 科学通报, 1992, 37(14):1302-1305.
Hu Kai, Wilkins R W T. Laser raman carbon geothermometer; a new Paleogeotemperature[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(14):1302-1305.
- [15] 胡凯, 刘英俊, Wilkins R W T. 激光喇曼光谱碳质地温计及其地质应用[J]. 地质科学, 1993, 28(3):235-245.
Hu Kai, Liu Yingjun, Wilkins R W T. Laser raman carbon geothermometer and its application to mineral exploration[J]. Chinese Journal of Geology, 1993, 28(3):235-245.
- [16] 胡凯, 刘英俊, Wilkins R W T. 沉积有机质的喇曼光谱研究[J]. 沉积学报, 1993, 11(3):64-71.
Hu Kai, Liu Yingjun, Wilkins R W T. Raman spectral studies of sedimentary organic matter [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1993, 11(3):64-71.
- [17] 段菁春, 庄新国, 何谋春. 不同变质程度煤的激光拉曼光谱特征[J]. 地质科技情报, 2002, 21(2):65-68.
- Duan Jingchun, Zhuang Xinguo, He Mouchun. Characteristics in laser raman spectrum of different ranks of coal[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(2):65-68.
- [18] 刘德汉, 肖贤明, 田辉, 等. 固体有机质拉曼光谱中 D-G 峰的热演化模式与镜质组反射率的关系[G]//第十三届全国有机地球化学学术会论文摘要汇编. 中国南宁, 2012:66-67.
Liu Dehan, Xiao Xianming, Tian Hui, et al. Relationship between heat-flow evolution and vitrinite reflectance of Raman D-G peak of the solid sedimentary organic matter[G]//The 13th national meeting on organic geochemistry in China. Symposium. Nanning China, 2012:66-67.
- [19] Jacob H. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen("Migrabitumen") [J]. International Journal of Coal Geology, 1989, 11(1):65-79.
- [20] Hwang R J, Teerman S C, Carlson R M. Geochemical comparison of reservoir solid bitumen with diverse origins[J]. Organic Geochemistry, 1998, 29:505-517.

(收稿日期 2012-08-31 改回日期 2012-12-19 责任编辑 张 怡)

《石油学报》2013年第3期部分文章预告(II)

- | | |
|--------------------------------------|-------|
| 聚合物驱阶段提高采收率预测模型的建立与应用 | 王渝明等 |
| 页岩气储层可压裂性评价技术 | 袁俊亮等 |
| 射孔完井参数对试井理论曲线的影响 | 欧阳伟平等 |
| 油井套管对地磁场的影响实验 | 管志川等 |
| 控压钻井条件下井身结构优化设计 | 王 果等 |
| 超临界 CO ₂ 喷射压裂孔内增压机理 | 程宇雄等 |
| 各向异性地层中斜井井壁失稳机理 | 卢运虎等 |
| 海洋浮式钻井平台绞车升沉补偿系统设计 | 黄鲁蒙等 |
| 石油地震地质学新进展 | 袁秉衡等 |