应用沥青反射率推算油气生成与运移的地质时间

肖贤明 刘德汉 傅家谟 刘祖发 申家贵

(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. Email: xmxiao@gig.ac.cn)

摘要 基于有机成熟作用理论, 应用改进的 Karweil 方法, 以塔里木盆地塔中地区某些钻孔为实例, 提出了应用沥青反射率推算油气生成与运移地质时代的原理与方法. 应用该方法推算出塔中地区古生代地层中 3 组沥青形成地质时代分别是中-晚奥陶世、晚白垩世～早第三纪及晚第三纪, 反映该区在这 3 个地质时期存在油气生成与运移. 为沥青的地质应用提供了新的思路.

关键词 沥青 反射率 成熟度 油气生成与运移

含油气盆地地层中普遍有沥青产出. 沥青作为石油与天然气的伴生产物最早用来作为寻找油气藏的标志[1～3]. 自 20 世纪 70 年代, 沥青反射率被用作成熟度指标[1～5]. 近年来有些研究说明沥青可作为油气生成与运移的标志[1,6]. 沥青所包含的地质信息日益受到重视.

地质体中的沥青有多种成因, 然而从有机质热成熟作用机理看, 无论何种成因类型沥青, 其反射率所反映的是沥青形成后的受热历史, 在不少情况下, 它不能代表其所处地层成熟度. 反过来, 根据埋藏史与受热史, 可推断沥青形成的地质时代, 进而确定相关油气生成与运移的地质时间. 塔里木盆地塔中地区早古生代地层中沥青发育, 并有明显分期现象[6], 为这方面研究提供了良好地质基础. 本文以该地区沥青为研究对象, 目的在于建立起一种能定量评价油气生成与运移地质时间的方法.

1 原理与方法

1.1 沥青成因类型的考虑

由于目前对生油岩中原沥青的成因在认识上还有不同观点[7], 本研究暂不涉及这种成因的沥青. 本文研究的是一种运移沥青, 它充填于岩石显微孔隙、显微裂隙或缝合线中, 易于与原生显微组分相区别. 从成因上讲, 这种沥青是生油母质生成的油气在初次运移或二次运移过程中残留下的重质馏分经热变质作用形成. 这类沥青反射率所记录的是其形成以后所经历的埋藏史与古地温史, 因此其形成的地质时间也反映了油气生成与运移的地质时间.

1.2 沥青形成地质时间推算方法

Karweil 图解建立起了有机质成熟度、温度及地质时间三者的定量关系[8], 为根据沥青受热史及其反射率推算其形成地质时间提供了基础. 然而近年来油气勘探实践说明该方法由于过分强调地质时间的作用, 在一些地质条件下使得模拟计算成熟度明显高于实测成熟度[9]. 肖贤明等人[9]曾提出对该方法进行改进, 一是对 Karweil 图解进行修改, 将图中时间改为有效受热时间, 更主要的是对成熟度计算方法进行了改进, 以下两点改进原则是本文将要应用与值得强调的:

(1) 有机质热成熟作用平衡原则. 在一定程度范围内, 当有机质热成熟作用反应达到平衡后, 地质时间的作用不再明显, 只有在进一步增温的条件下, 热成熟作用才会进一步增进. 平衡时间与受热温度有关, 温度越高, 所需平衡时间越短. 如下对应关系在塔里木盆地取得了

较好应用效果: < 75℃, 150 Ma; 75 ~ 100℃, 100 Ma; 100 ~ 150℃, 75 Ma; >150℃, 50 Ma[9].

(2) 有机质再次变质作用原则. 对于沉降-抬升-沉降型盆地, 地层中有机质再次变质作用的一般条件是第 2 次沉降过程中古地温应高于早期所经历的古地温, 但对于早期阶段尚未达到热成熟作用平衡的地层, 即使第 2 次沉降受温较低, 也可增进成熟度.

经改进后的 Karweil 方法比较适合塔里木盆地及其他叠合型盆地成熟度模拟计算[9], 也是本研究推算沥青形成地质时期的方法基础. 图 1 是本方法应用实例. TZ1 井寒武系 6 500 m 样品模拟计算 VR_o 为 2.35%, 该值与该样品实测成熟度相吻合(等价镜质组反射率为 2.40%)[9].

应用 Karweil 图解的另一重要点是客观划分热成熟作用阶段. 位于塔里木盆地塔中断垒带上的 TZ-1 井沉积-构造发展史体现出沉降-抬升-沉降模式, 对于我国叠合型盆地具有一定代表性(图 1). 本文以该井为例说明成熟作用阶段划分原则及沥青形成时间推算方法. 根据图 1(a)和(b), TZ-1 井地层热成熟作用可划分成 3 个阶段:

第 1 阶段: 寒武纪 ~ 中晚奥陶世. 此阶段的特点是升温快, 由于加里东期抬升、剥蚀, 有效受热时间不到 50 Ma, 热成熟作用未达到平衡并终止. 第 2 阶段: 志留纪 ~ 早第三纪. 此阶段地质时间漫长, 一直缓慢沉降, 热成熟作用非常缓慢. 根据成熟作用平衡原则, 形成于此阶段或第 1 阶段的沥青, 只需考虑三叠纪以后的成熟作用. 第 3 阶段: 晚第三纪, 特点是快速沉降, 地层受温达最高, 成熟度增进明显.

图 1(b)是取自 TZ-1 井沥青样品受热史. 设以上 3 个阶段成熟作用标尺分别为 Z_1, Z_2 和 Z_3, 对应温度分别为 T_1, T_2 和 T_3, 对应受热时间或平衡受热时间分别为 t_1, t_2 和 t_3, 则有总成熟作用标尺 $Z = Z_1 + Z_2 + Z_3$. 其中 Z 由实测沥青反射率(BR_o, 百分比)换算成镜质组反射率(VR_o)后在 Karweil 图解中直接量取, Z_1, Z_2 和 Z_3 可根据其受热温度与有效受热时间在 Karweil 图解中量

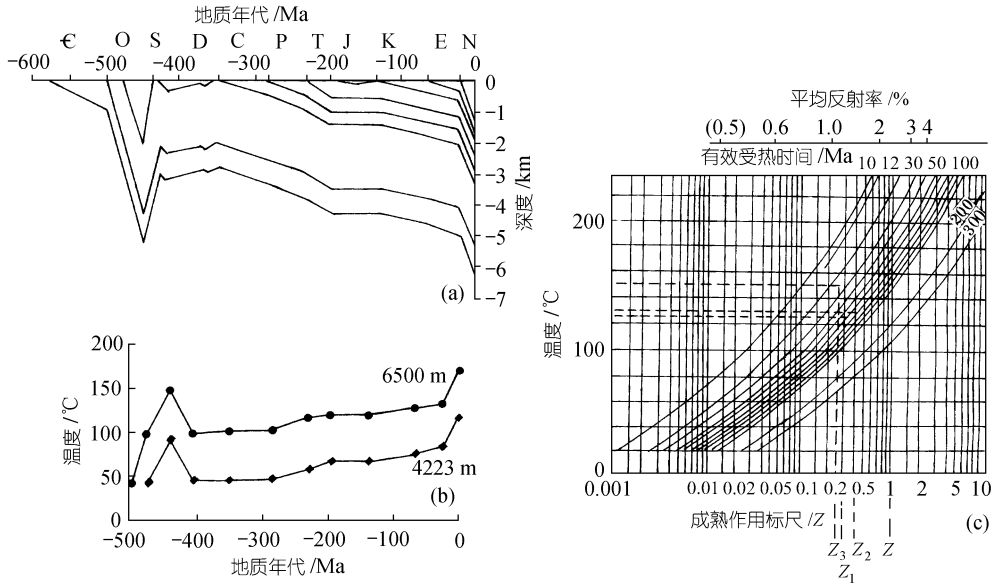

图 1 TZ-1 井埋藏史(a), 某些样品受热史(b)和 Karweil 图解及改进方法计算实例(c)

地层分层数据根据塔里木盆地石油指挥部 1997 年地层分层数据公报, 地层剥蚀厚度据中国科学院广州地球化学研究所"九五"攻关报告 96-111-01-04-06,古地温梯度数据据文献[10]. 计算实例为 6 500 m 深样品,变质标尺 $Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 = 0.97$, 对应 $VR_o = 2.35\%$

取或计算求得，如 $Z_1 = Z - Z_2 - Z_3$. 据此，沥青形成的地质时间可按如下原则推算:

(1) 当 $Z = Z_3$ 时，Z_1 和 Z_2 为零，说明沥青形成于第 3 演化阶段，则沥青形成时间 $t = t_3 = f(Z_3, T_3)$，可在 Karweil 图解中量取;

(2) 当 $Z = Z_2 + Z_3$ 时，Z_1 为零，说明沥青形成于第 2 阶段，则 $t = t_2 + t_3$，其中 t_3 为第 3 阶段时间; $t_2 = f(Z - Z_3, T_2)$，可在 Karweil 图解中量取;

(3) 当 $Z = Z_1 + Z_2 + Z_3$ 时，说明沥青形成于第 1 演化阶段，则 $t = t_1 + t_2 + t_3$，其中 t_3 为第 3 阶段时间; $t_1 = f(Z - Z_2 - Z_3, T_1)$，可在 Karweil 图解中量取; t_2 为第 2 阶段时间，对于 TZ-1 井而言，在此情况下 t_2 不是热成熟作用平衡时间，包括第 2 阶段志留纪～早第三纪漫长地质时间.

应当指出的是，有些含油气盆地沉积构造发展史可能比 TZ-1 井更复杂，其成熟作用阶段可能更多，可根据同样的原则划分.

2 塔中地区沥青形成时间推算

2.1 沥青反射率及等价镜质组反射率

表 1 是塔中断垒带及北斜坡区某些钻孔早古生代地层中 BR_o 实测结果. TZ-1 井寒武系地层中 BR_o 较高，两个样品分别为 1.87%和 2.65%. 北斜坡区 TZ-10 井和 TZ-12 井早古生代地层

表 1　塔中地区早古生代地层中沥青反射率实测结果及其形成时间推算

钻孔	孔深/m	时代	岩性	沥青			总成熟度标尺	成熟度阶段			沥青形成地质时代/Ma $t=t_1+t_2+t_3$
				分组	实测 R_o/%	等价镜质 R_o/%[a)]		第 1 阶段/Ma $Z_3=f(T_3,t_3)$ 或 $t_3=f(Z_3,T_3)$	第 2 阶段/Ma $Z_2=f(T_2,t_2)$ 或 $t_2=f(Z_2,T_2)$	第 3 阶段/Ma $t_1=f(Z_1,T_1)$	
TZ1	5 310	$\in$	灰黑色灰岩	/	1.87	1.56	0.43	Z_3(124℃, 25 Ma) = 0.2	Z_2(99℃, 100Ma)=0.25	t_1(0.06, 94℃)=35 Ma	475
TZ1	6 500	$\in$	灰黑色灰岩	/	2.65	2.04	0.78	Z_3(150℃, 75 Ma) = 0.25	Z_2(126℃, 75 Ma)=0.40	t_1(0.13, 123℃)=25 Ma	465
TZ10	4 920	O_{2-3}	暗色泥灰岩	A	0.703	0.83	0.16	Z_3(116℃, 25 Ma) = 0.10	t_2(0.06, 90℃)=30 Ma		55
TZ10	4 920	O_{2-3}	暗色泥灰岩	B	0.197	0.52	0.015	T_3(0.015, 116℃)<10 Ma			<10
TZ10	5 243	O_{2-3}	暗色泥灰岩	A	0.68	0.82	0.16	Z_3(123℃, 25 Ma) = 0.13	t_2(0.03, 96℃)=18 Ma		43
TZ10	5 243	O_{2-3}	暗色泥灰岩	B	0.15	0.49	0.014	t_3(0.014, 123℃)<10 Ma			<10
TZ12	4 669	O_{2-3}	暗色泥灰岩	A	0.55	0.74	0.12	Z_3(109℃, 25 Ma) = 0.075	t_2(0.045, 79℃)=38 Ma		63
TZ12	4 669	O_{2-3}	暗色泥灰岩	B	0.19	0.52	0.017	t_3(0.017, 109℃)<10 Ma			<10
TZ12	4 970	O_{2-3}	暗色泥灰岩	A	0.61	0.78	0.14	Z_3(116℃, 25 Ma)= 0.10	t_2(0.004, 90℃)=20 Ma		45
TZ12	4 970	O_{2-3}	暗色泥灰岩	B	0.18	0.51	0.016	t_3(0.016, 116℃) < 10 Ma			<10
TZ12	5 291	O_1	深灰色灰岩	A	0.87	0.94	0.22	Z_3(123℃, 25 Ma) = 0.14	t_2(0.08, 95℃)=40 Ma		65
TZ12	5 298	O_1	深灰色灰岩	B	0.27	0.56	0.017	t_3(0.017, 123℃)<10 Ma			<10

a) $VR_o = 0.618BR_o + 0.40$(据文献[1])

中沥青可明显分为两组，A 组 BR_o 在 0.50% ~ 0.80%，B 组 BR_o 在 0.10% ~ 0.30%. 这两组沥青均属运移沥青，充填在碳酸盐岩、泥灰岩孔隙或显微裂隙中. 等价镜质组 R_o 按 Jacob[1]提出的经典公式计算. 北斜坡区这两个井样品中还发现有原生成因的海相镜质组，由海相镜质组反射率所确定的成熟度在 VR_o 1.1% ~ 1.4%之间，明显高于这两种沥青所反映的成熟度，说明北斜区这两组沥青形成较晚.

2.2 成熟作用演化阶段划分

TZ-1 地层成熟作用阶段划分在前面已作过讨论. 图 2 和 3 是 TZ-12 井和 TZ-10 井埋藏史与典型样品热历史演化图. 因两者处在同一构造位置，受热历史非常相似. 根据上述原则，其成熟作用可划分成 3 个阶段：第 1 阶段，寒武纪 ~ 中晚奥陶世；第 2 阶段，志留纪 ~ 早第三纪；第 3 阶段，晚第三纪.

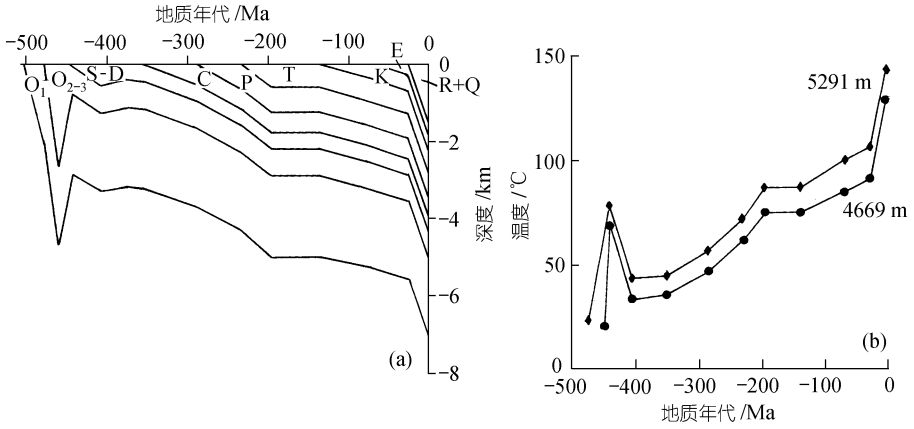

图 2 TZ-12 井埋藏史(a)及某些样品受热史(b)

地层分层数据根据塔里木盆地石油指挥部 1997 年地层分层数据公报，地层剥蚀厚度据中国科学院广州地球化学研究所“九五”攻关报告 96-111-01-04-06，古地温梯度数据据文献[10]

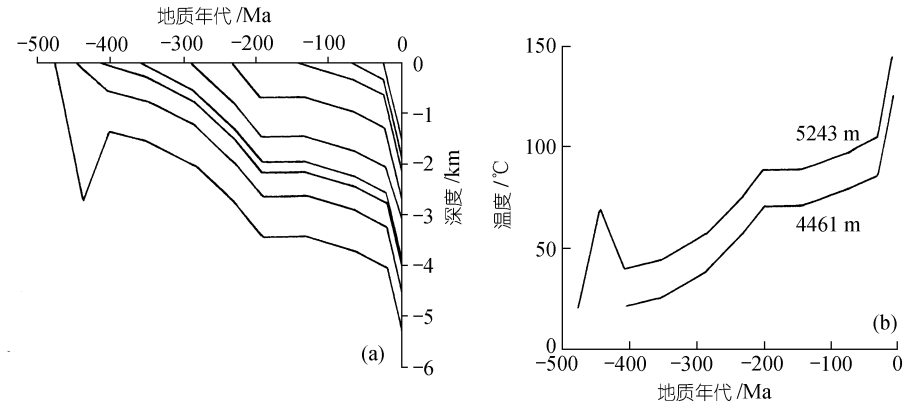

图 3 TZ-10 井埋藏史(a)及某些样品受热史(b)

说明同图 2

2.3 沥青形成地质时间

根据塔中地区沥青形成的上述地质背景，应用上述原则与公式，对沥青形成时代进行了推算. 结果表明 TZ-1 井寒武系沥青形成于中-晚奥陶世，北斜坡区两组沥青分别形成于晚白垩世～早第三纪早期及晚第三纪晚期(表 1). 这一结果也说明塔中地区在这 3 个时期发生过油气生成与运移.

应当指出的是，本研究结果与塔中地区油气生成的地质背景相一致. 北斜坡区中上奥陶统烃源岩是一套有效烃源岩，其主成油期出现在晚第三纪[6]. 在 1 号断层以北毗邻北斜坡区的满加尔拗陷南缘，中-上奥陶统地层主生油期出现在晚白垩世～早第三纪. 这两期油气均可向北斜坡区运移与聚集. 形成了北斜坡区的两组沥青. 塔中断垒带 TZ-1 井寒武系地层主生油期出现在中奥陶世，与该地层中沥青形成期相吻合. 虽然这期成烃作用规模不详，或是生成的油气在加里东期破坏，但这次成烃作用是存在的.

3 结论

应用生油岩与疏导层中沥青反射率可推算含油气盆地油气生成与运移的地质时期. 我国叠合型含油气盆地往往具有多期成烃、多期运移与聚集、油气成因复杂等特点，在地层中往往可见大量沥青. 加强沥青的研究，将地球化学与地质背景相结合，可有效的解决较复杂油气的成因问题.

致谢 本工作为国家“九五”攻关项目(编号: 96-111-01-04-06)和中国科学院有机地球化学国家重点实验室创新基地资助项目.

参 考 文 献

1 Jacob H. Disperse solid bitumens as an indicator for migration and maturity in prospecting for oil and gas. Erdol und Kohle, 1985, 38: 364～366

2 Jacob H. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen. Int J Coal Geol, 1989, 11: 65～79

3 Van Gijzel P. Applications of the geomicophotometry of kerogen, solid hydrocarbons and crude oils to petroleum exploration. In: Brooks J, ed. Organic Maturation Studies and Fossil Fuel Exploration. London: Academic Press, 1981. 351～377

4 丰国秀，陈盛吉. 岩石中沥青反射率与镜质组反射率之间的关系. 天然气工业, 1988, 8(2): 20～25

5 Robert P. Organic Matumorphism and Geothermal History. Boston: D Reidel Publishing Company, 1988. 61～129

6 Xiao X, Liu D, Fu J. Multiple phases of hydrocarbon generation and migration in the Tazhong petroleum system. Org Geochem, 1996, 25: 191～197

7 钟宁宁，秦 勇. 碳酸盐岩有机岩石学——显微组分特征成因、演化及其与油气关系. 北京: 科学出版社, 1998. 156～168

8 Karweil J. Die Metamorphose der Kohlen vom Standpunkt der Physikalishen Chemie. Z Deutsch Geol Ges, 1955, 107: 132～139

9 肖贤明，刘祖发，刘德汉，等. 含油气盆地成烃史恢复新方法: 地质地球化学剖面法. 科学通报, 2000, 45(增刊): 2725～2730

10 肖贤明，刘祖发，申家贵，等. 确定含油盆地古地温梯度的一种新方法——镜质组反射率梯度法. 科学通报, 1998, 43(21): 2340～2344

(2000-01-30 收稿, 2000-05-10 收修改稿)