

文章编号: 1000-0747(2008)06-0710-05

烃源岩中 C₅—C₁₃ 分析新方法及其在油源对比中的应用

徐冠军¹, 王培荣^{1,2}, 刘建宪¹, 肖廷荣¹, 任冬苓¹

(1. 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心; 2. 长江大学有机地球化学系)

基金项目: 国家自然科学基金项目(40573030); 国家“863”课题(2007AA06Z211)

摘要: 采用液氮冷冻—冲击粉碎—密闭加热脱附—氦气吹扫—冷阱捕集—气相色谱在线分析装置(专利申请号 2007101194606)对粒径达 2 cm 左右的烃源岩样品进行轻烃在线分析。因样品粒径大,大大减少了样品在粉碎前、后轻馏分的损失,较好地保留了烃源岩分散有机质中轻馏分的原始面貌。所获色谱图中,由 C₅ 至 C₁₃ 大约可得 203 个化合物的色谱峰;在 C₆—C₈ 馏分段中,通常较难分离的谱峰分离对(2-甲基己烷与 2,3-二甲基戊烷)可得到低于半峰宽的较满意分离,尚可见 3-乙基戊烷呈肩峰出现。重复性实验证明该方法重复性较好。以准噶尔盆地烃源岩样品为例,对该分析方法在油源对比研究中的应用作了初步探索,结果表明此方法有可能为油气勘探中油源的识别和残留烃量的计算等提供一个新的研究工具。图 3 表 6 参 19

关键词: 轻烃; GC 在线分析; 轻馏分; 烃源岩; 油源对比

中图分类号: TE122.1 文献标识码: A

A new analysis method for C₅—C₁₃ fractions of organic matter in source rocks and its primary application to oil-source correlation

XU Guan-jun¹, WANG Pei-rong^{1,2}, LIU Jian-xian¹, XIAO Ting-rong¹, REN Dong-ling¹

(1. Central Laboratory of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Department of Organic Geochemistry, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: By the online analysis system of liquid nitrogen freezing—impact crushing—closed thermal desorption—helium purging—cold trap capturing—gas chromatogram (Patent Application No. 2007101194606), the online analysis is made for the source rock samples of about 2 cm grain size. Due to the large grain size of the samples, the light fraction loss of the samples before and after crushing is greatly reduced. As a result, the original status of light fractions of organic matter in the source rock is maintained well. In the acquired chromatogram, about 203 peaks from C₅—C₁₃ have been got, pair peaks of 2-methylhexane and 2,3-dimethylpentane could be separated to lower than half of the peak width, and 3-ethylpentane could also be seen as a shoulder peak. The repeatability of the measurement is good. With the source rock samples from Junggar Basin as an example, this analysis method is applied in oil-source correlation. This method may provide a new research tool for identifying the oil sources and calculating the remaining hydrocarbon volume in oil-gas exploration.

Key words: light hydrocarbon; online GC analysis; light fraction; source rock; oil-source correlation

0 引言

对岩石中轻质烃的分析和研究多年来一直是石油地质和油气地球化学研究工作者十分关注的课题之一,针对轻烃的分析方法和应用作了大量的有益努力和探索。在轻烃地球化学应用研究中,岩石轻烃是油—气—源岩三位一体研究的桥梁。Bement 等提出了用烃源岩中轻烃类化合物研究原油成熟度的公式^[1], Odden 等分别用烃源岩分散有机质中的 C₄—C₁₃ 热解吸和热裂解数据与油进行了油—岩对比研究^[2,3]。在分析方法和技术方面,除了传统的岩石轻烃测试方法如气体洗提法^[4]、热蒸发法^[5]、酸解法^[6]、岩屑搅拌粉碎脱气法^[7]外,1987 年钱志浩等在第三届全国有机地球化学会议上介绍了岩石密封抽提 C₆—C₃₂ 分析方法^[8]; 20 世纪 90 年代中国石油化工股份有限公司无锡中心实验室推出了用低沸点溶剂抽提烃

源岩,挥发、浓缩后,再进行色谱分析的成套装置——WX-2001 型岩屑密闭切割抽提仪^[9],方法获国家专利;中国石油勘探开发研究院廊坊分院将澳大利亚 SGE 公司生产的热解装置与 HP5890A 气相色谱仪连接,进行在线岩石轻烃分析^[10];大庆油田研究院则将岩样密闭粉碎,用排水取水法收集岩样中吸附烃,再进行色谱分析。

本文在前人研究工作的基础上提出了一种岩石轻烃在线分析方法,即液氮冷冻—冲击粉碎—密闭加热脱附—氦气吹扫—冷阱捕集—气相色谱在线分析法。由于直接用于分析的岩石样品粒径可达 2 cm,减少了分析前的轻烃损失,相对较好地保持了烃源岩分散有机质中轻质烃的原始面貌。

1 实验方法

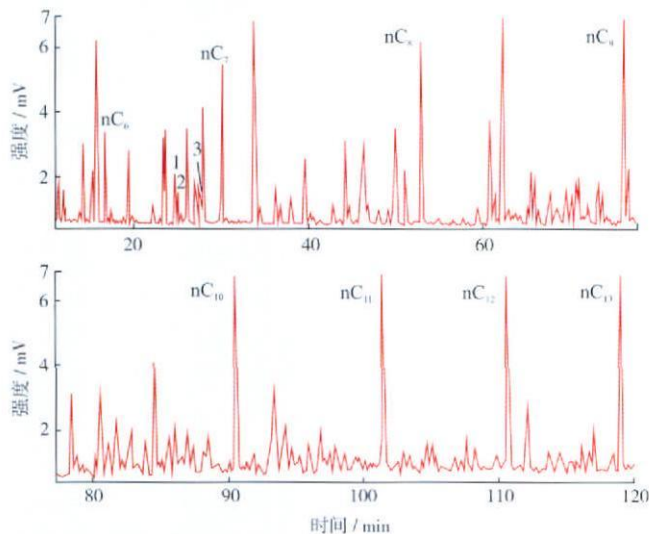
色谱分析在岛津 GC-17A 色谱仪上完成,色谱仪

装有自制的液氮冷冻—冲击粉碎—密闭加热脱附—氦气吹扫—冷阱捕集在线分析装置(专利申请号2007101194606)。

实验条件: PONA 色谱柱, 50 m×0.2 mm, 膜厚0.5 μm; 升温程序: 35 °C恒温10 min, 以0.5 °C/min速率升至60 °C, 改以2 °C/min升至200 °C, 再以8 °C/min升至300 °C, 恒温20 min; FID 氢焰检测器温度310 °C, 在线进样装置热脱附最高温度为200 °C, 冷阱收集20 min; 样品最大直径可达2 cm。

实验样品: 选择1个原油样品, 1个烃源岩样品, 原油样品为东海盆地平湖4井轻质原油, 产自花港组, 产层深度2778.5~2786.7 m; 烃源岩样品为松辽盆地五102井青一段(765.18 m)岩心。

图1是松辽盆地五102井青一段烃源岩岩心样品的分析结果, 从C₅至C₁₃, 大约可得203个色谱峰, 在C₆—C₈馏分段中较难分离的谱峰分离对(2-甲基己烷与2,3-二甲基戊烷)可得到低于半峰宽的分离, 同时尚可见到3-乙基戊烷呈肩峰出现, 说明色谱分离度较好, 可以满足应用研究的需要。



1—2-甲基己烷; 2—2,3-二甲基戊烷; 3—3-乙基戊烷

图1 松辽盆地五102井青一段(765.18 m)烃源岩岩心样品轻馏分分析色谱图

表1 平湖4井轻质原油连续5次分析的重复性实验结果

序号	C ₆ /%	C ₇ /%	C ₈ /%	C ₉ /%	C ₁₀ /%	C ₁₁ /%	C ₁₂ /%	C ₁₃ /%	C ₆ /C ₇	C ₇ /C ₈	C ₈ /C ₉	C ₉ /C ₁₀	C ₁₀ /C ₁₁	C ₁₁ /C ₁₂	C ₁₂ /C ₁₃
1	2.31	2.19	10.64	15.09	17.48	20.46	16.93	14.90	0.39	0.55	0.71	0.86	0.85	1.21	1.14
2	2.71	6.11	10.64	13.76	15.82	16.96	16.32	17.68	0.44	0.57	0.77	0.87	0.93	1.04	0.92
3	2.57	6.08	12.56	14.06	16.52	19.92	15.56	12.73	0.42	0.48	0.89	0.85	0.83	1.28	1.22
4	2.71	6.51	13.67	15.16	17.98	15.48	15.88	12.61	0.42	0.48	0.90	0.84	1.16	0.98	1.26
5	2.30	5.36	11.27	12.78	14.82	18.54	16.08	18.85	0.43	0.48	0.88	0.86	0.80	1.15	0.85
\bar{X}	2.52	5.25	11.76	14.17	16.53	18.27	16.15	15.35	0.42	0.51	0.83	0.86	0.92	1.13	1.08
S	0.20	0.42	1.32	0.99	1.27	2.07	0.52	2.84	0.02	0.05	0.09	0.01	0.15	0.12	0.18

注: 表中数据为根据峰面积计算的各正构烷烃相对百分含量(%)或有关峰的面积比; \bar{X} —测量平均值; S—测量标准偏差

2 实验方法的重复性

两个样品的重复性实验结果分别列于表1、表2。

由表1可见, 同一轻质油5次分析C₆—C₁₃正构烷烃相对百分含量的标准偏差为0.20~2.84; 相邻正构烷烃峰面积比值的标准偏差仅为0.01~0.18。

由表2可见, 同一烃源岩岩心样品3次重复分析结果的C₆—C₁₃正构烷烃相对百分含量的标准偏差为0.22~2.36, 相邻正构烷烃峰面积比值的标准偏差仅为0.06~0.16。

实验结果表明本文提出的实验分析方法有相当好的重复性, 其中对具有均质性的原油样品重复性更高, 同时对均质性不好、较难重复实验的岩石样品也表现了较好的重复性。这说明不仅提出的方法可行, 而且自制的液氮冷冻—冲击粉碎—密闭加热脱附—氦气吹扫—冷阱捕集的在线分析装置运行平稳, 可靠性、平行性均较好, 保证了实验结果的重复性。

为了考察该分析技术在实际应用中所表现的重复性, 本文计算了这2个样品的常用轻烃地球化学参数值, 分别列于表3、表4。正庚烷值(H)和异庚烷值(I)是K F M Thompson提出的用于研究原油成熟度和母源类型的参数^[11,12], 甲苯/正庚烷(Tol/nC₇)也是K F M Thompson提出的研究成藏过程石油“蒸发分馏效应”的参数^[13,14]; K₁、K₂是众所周知的Mango参数^[15]; 甲基环己烷指数和环己烷指数等参数由胡惕麟、张义纲等提出^[16]; 最近王培荣等报道C₇环烷烃与C₇异构链烷烃的比值(N/I)可能与烃源岩的沉积水体盐度有关^[17,18]。从表3、表4中看出, 平湖4井原油5次分析结果, 上述常用轻烃参数的标准偏差为0.003~4.58; 五102井青一段烃源岩岩心3次分析结果, 这些参数的标准偏差为0.02~2.48。在10个参数值中有9个参数的平均标准偏差值小于0.1, 仅参数Tol/nC₇达0.33, 这可能与Tol(甲苯)的极性较大有关。五102井烃源岩岩心样品比平湖4井原油分析结果的重复性要差, 可能与原油有很好的均质性而烃源岩有非均质性

表2 松辽盆地五102井青一段(765.18 m)岩心样品连续3次分析的重复性实验结果

序号	C ₆ /%	C ₇ /%	C ₈ /%	C ₉ /%	C ₁₀ /%	C ₁₁ /%	C ₁₂ /%	C ₁₃ /%	C ₆ /C ₇	C ₇ /C ₈	C ₈ /C ₉	C ₉ /C ₁₀	C ₁₀ /C ₁₁	C ₁₁ /C ₁₂	C ₁₂ /C ₁₃
1	5.72	12.04	17.87	18.12	14.14	12.07	9.09	10.95	0.48	0.67	0.99	1.28	1.17	1.33	0.83
2	3.16	8.68	14.89	17.55	17.39	16.46	11.33	10.54	0.36	0.58	0.85	1.01	1.06	1.45	1.07
3	2.58	7.61	14.91	18.14	18.28	15.77	12.11	10.60	0.34	0.51	0.82	0.99	1.16	1.30	1.14
\bar{X}	3.82	9.44	15.89	17.94	16.60	14.77	10.84	10.70	0.39	0.59	0.89	1.09	1.13	1.36	1.02
S	1.67	2.31	1.72	0.34	2.18	2.36	1.57	0.22	0.07	0.08	0.09	0.16	0.06	0.08	0.16

注:表中数据为根据峰面积计算的各正构烷烃相对百分含量(%)或有关峰的面积比

表3 平湖4井原油样品部分常用轻烃参数重复性实验结果

序号	H	I	K ₁	K ₂	nC ₇ /MCYC ₆	ToI/nC ₇	MCYC ₆ /DMCYC ₅	N/I	甲基环己烷指数	环己烷指数
PH4(1)	13.96	1.02	1.17	0.20	0.27	1.32	3.86	5.06	61.29	44.36
PH4(2)	13.84	0.89	1.16	0.19	0.27	2.42	3.42	5.06	51.29	42.66
PH4(3)	13.89	0.89	1.15	0.20	0.27	2.46	3.49	5.03	51.11	43.21
PH4(4)	13.93	0.89	1.16	0.19	0.27	2.49	3.50	5.11	50.87	43.32
PH4(5)	13.92	0.89	1.15	0.19	0.27	2.48	3.47	5.11	50.90	42.95
\bar{X}	13.91	0.92	1.16	0.19	0.27	2.23	3.55	5.07	53.09	43.30
S	0.05	0.06	0.01	0.01	0.003	0.51	0.18	0.03	4.58	0.64
S/ \bar{X}	0.004	0.065	0.009	0.053	0.011	0.229	0.051	0.006	0.086	0.015

注:S/ \bar{X} —平均标准偏差;MCYC₆—甲基环己烷;DMCYC₅—二甲基环戊烷

表4 五102井青一段岩心样品部分常用轻烃参数重复性实验结果

序号	H	I	K ₁	K ₂	nC ₇ /MCYC ₆	ToI/nC ₇	MCYC ₆ /DMCYC ₅	N/I	甲基环己烷指数	环己烷指数
五102(1)	18.01	0.68	0.75	0.28	0.60	0.02	1.13	2.72	60.37	38.22
五102(2)	16.90	0.72	0.71	0.30	0.55	0.04	1.19	2.58	62.45	42.33
五102(3)	17.07	0.71	0.71	0.33	0.54	0.03	1.35	2.47	62.97	42.69
\bar{X}	17.32	0.70	0.72	0.30	0.56	0.03	1.22	2.59	61.93	41.08
S	0.60	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.11	0.12	1.38	2.48
S/ \bar{X}	0.035	0.029	0.028	0.067	0.054	0.333	0.090	0.046	0.022	0.060

有一定的关系。

综合以上因素总体分析,本方法具有较好的重复性,基本上能满足地球化学研究的需要。

3 油源对比应用初探

大量的石油地质和地球化学研究已经揭示和证明,准噶尔盆地南缘和腹部主要发育了5套烃源岩,自下而上分别为二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和古近

系^[19]。为了查明轻烃分析和研究能否用于油、气源对比,首先需要考察其所展示的轻烃分布特征能否有效地区分并表征这几套烃源岩。表5列出了4套烃源岩的典型代表样品及其基本地球化学参数(尚没有三叠系优质典型样品),可见,这4套烃源岩都具有相当高的有机质丰度,属未熟至低熟样品。使用本方法和技术对这5块烃源岩样品中分散有机质的轻烃馏分进行了分析,色谱图中nC₆—nC₉段化合物的分布见图2。

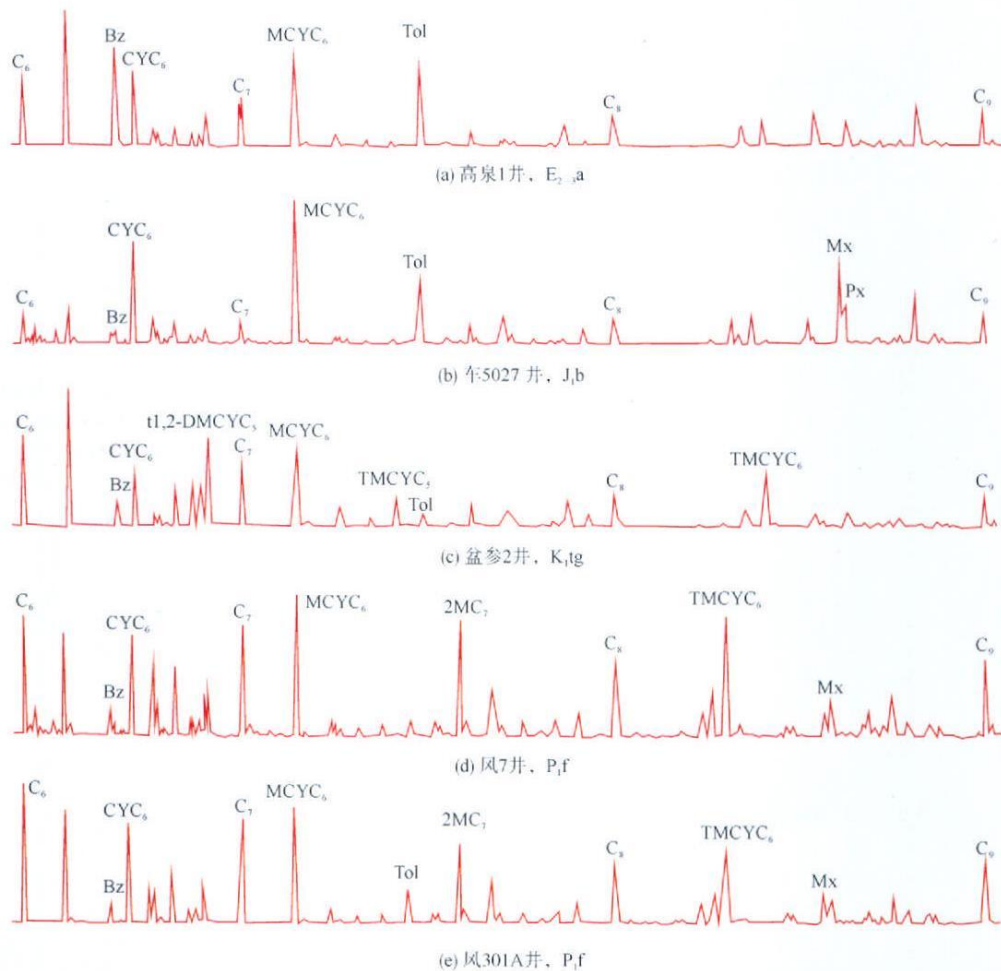
表5 准噶尔盆地不同时代烃源岩部分基础数据

井号 (位置)	井深/ m	层位	岩性	TOC/ %	T _{max} / °C	S ₁ / (mg·g ⁻¹)	S ₂ / (mg·g ⁻¹)	(S ₁ +S ₂)/ (mg·g ⁻¹)	HI/ (mg·g ⁻¹)
高泉1(南缘)	5 053~5 054	E _{2-3a}	灰黑色泥岩	1.49	435	0.29	8.09	8.38	543
盆参2(南缘)	4 232~4 235	K _{1tg}	灰黑色泥岩	1.33	428	0.45	7.18	7.63	540
车5027(西北缘)	5 220~5 221	J _{1b}	黑色泥岩	2.35	436	0.17	2.60	2.77	111
风7(西北缘)	3 152~3 155	P _{1f}	灰黑色泥岩	6.34	439	0.68	20.54	21.22	324
风301A(西北缘)	3 036.65~3 039.52	P _{1f}	黑色泥灰岩	1.27	431	0.38	6.07	6.45	478

注:样品及其地化参数等资料均由陈建平教授提供

由图2可见,因物源、沉积环境等不同,4套不同时代烃源岩中分散有机质轻馏分nC₆—nC₉段化合物的分布有明显区别。如:高泉1井5 053~5 054 m岩样(E_{2-3a})所代表的古近系烃源岩具有甲苯相对高含量的特征;车5027井5 220~5 221 m岩样所代表的侏罗系

八道湾组(J_{1b})烃源岩则含极丰富的甲基环己烷和环己烷,芳烃甲苯、间二甲苯和邻二甲苯丰度也很高,且间二甲苯丰度大于邻二甲苯;盆参2井4 232~4 235 m样品(K_{1tg})代表的白垩系烃源岩中环烷类的反1,2-二甲基环戊烷、三甲基环戊烷和甲基环己烷、三甲基环己



Bz—苯; CYC_6 —环己烷; $MCYC_6$ —甲基环己烷; Tol—甲苯; Mx—间二甲苯; Px—邻二甲苯; t1,2- $DMCYC_5$ —反1,2-二甲环戊烷; $TMCYC_5$ —三甲环戊烷; $2MC_7$ —2-甲基庚烷; $TMCYC_6$ —三甲环己烷

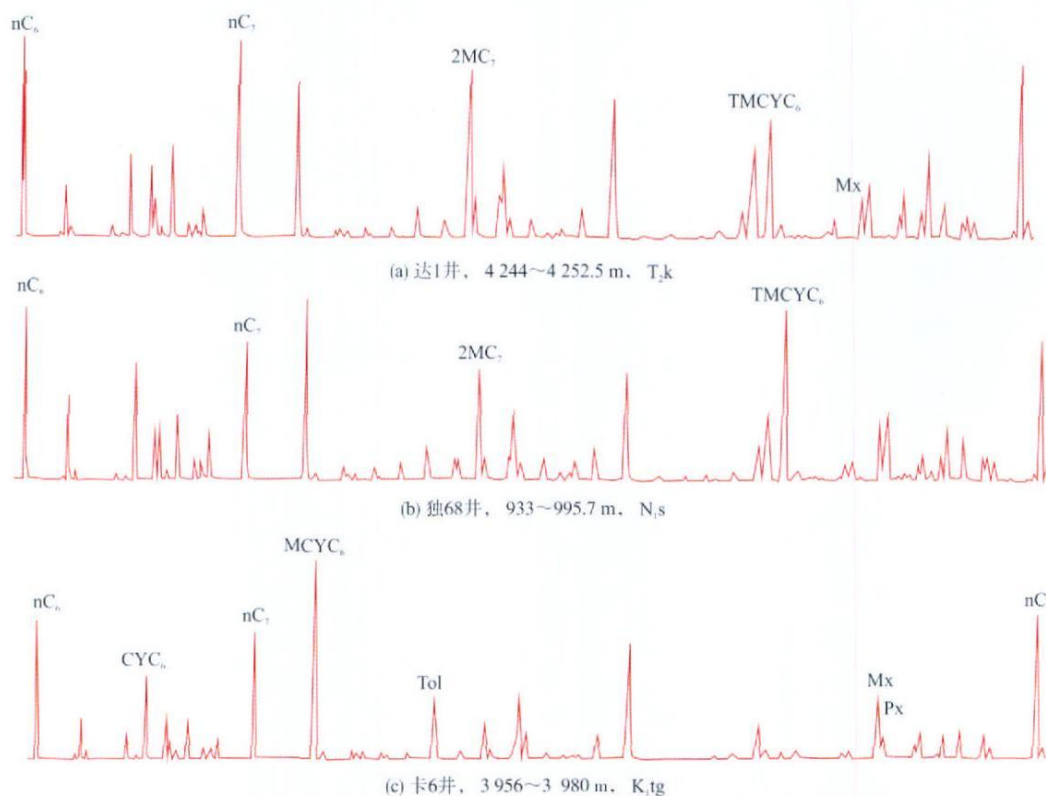
图2 烃源岩中分散有机质轻馏分 C_6-C_9 段化合物色谱图

烷丰度很高; 风7井3152~3155 m 岩样代表的二叠系风城组(P_{1f})烃源岩分散有机质在 nC_6-nC_9 段则具丰度极高的2-甲基庚烷和三甲环己烷; 风301井岩样也取自二叠系风城组, 它与风7井3152~3155 m 岩样的轻馏分分布有较相似的特征。虽然不同时代岩样分散有机质轻馏分分布出现上述区别的原因和机理尚不清楚, 有待今后进一步研究, 但这5个来自不同时代的烃源岩样品中轻烃分布表现出的明显区别, 为有效区分、表征不同层位烃源岩, 并根据岩、油之间“基因遗传”和特征相似原则进行油源对比提供了可能。

将这5块不同时代烃源岩中分散有机质的轻馏分与准噶尔盆地南缘和腹部部分油样的轻馏分分析数据对比后, 可发现一些现象。例如, 达1井(T_{2k})和独68井(N_{1s})油样 nC_6-nC_9 化合物分布(见图3)与风7井(P_{1f})烃源岩残留烃中的 nC_6-nC_9 分布特征(见图2)具相似性, 它们都具有2-甲基庚烷、三甲环己烷丰度高的特征; 而源自侏罗系的卡6井原油(K_{1tg})与风7

井(P_{1f})烃源岩有明显区别, 与车5027井5220~5221 m 岩样所代表的侏罗系八道湾组烃源岩具一定的相似性, 它们均含极丰富的甲基环己烷, 芳烃甲苯、间二甲苯和邻二甲苯丰度也很高, 且间二甲苯丰度大于邻二甲苯(见图2、图3)。

从族组成百分比(见表6)看, 烃源岩残留烃中 C_7 正构烷烃含量比油中低, 环烷烃百分含量近似, 这符合烃源岩在热演化过程中具色层效应的排烃规律。其他部分参数也具一定的相似性, 风7井(P_{1f})烃源岩和独68井(N_{1s})、达1井(T_{2k})原油的 Tol/nC_7 值都不高, 在0.2左右, N/I 值均小于2, 甲基环己烷指数均小于50, 属腐泥型; 车5027井(J_{1b})烃源岩和卡6井(K_{1tg})油样的 N/I 值均大于2, 甲基环己烷指数均大于50, 属腐殖型, 岩、油之间似有“基因遗传”而特征相似的关系。陈建平教授根据这些样品生物标志化合物、单体烃稳定碳同位素等分析结果, 并结合准噶尔盆地南缘地质背景的研究成果, 也认为独68井(N_{1s})、达1井(T_{2k})2



CYC₆—环己烷; MCYC₆—甲基环己烷; Tol—甲苯; 2MC₇—2-甲基庚烷; TMCYC₆—三甲基环己烷; Mx—间二甲苯; Px—邻二甲苯

图3 准噶尔盆地原油样品 nC₆—nC₉ 轻烃馏分段的分布图

表6 独68井、达1井和卡6井原油样品与风7井(P_{1D})、车5027井(J_{1b})烃源岩样品轻馏分参数对比

井号	样品	烃含量/%							nC ₇ / MCYC ₆	Tol/ nC ₇	N/I	I/P	甲基环己烷 指数	Mx/ Px
		iC ₇	nC ₇	C ₇ 链烷烃	C ₇ 环烷烃	C ₇ 芳烃	MCYC ₆	DMCYC ₅						
风7	烃源岩	31.40	18.44	49.83	46.14	4.03	28.14	18.00	0.66	0.22	1.47	1.70	43.58	0.66
独68	原油	24.69	21.93	46.63	47.17	6.20	31.34	15.83	0.70	0.28	1.91	1.13	45.35	0.68
达1	原油	29.42	30.10	59.52	35.37	5.11	25.92	9.45	1.16	0.17	1.20	0.98	39.59	0.63
车5027	烃源岩	16.31	5.82	22.13	51.07	26.80	40.11	10.96	0.15	4.60	3.13	2.80	70.51	2.13
卡6	原油	15.97	22.27	38.24	50.51	11.25	41.63	8.88	0.53	0.51	3.16	0.72	57.20	2.05

注: I/P—异构烷烃与正构烷烃含量比值; MCYC₆—甲基环己烷; DMCYC₅—二甲环戊烷; Tol—甲苯; Mx—间二甲苯; Px—邻二甲苯

个油样源自二叠系烃源岩,卡6井(K_{1tg})油样源自侏罗系烃源岩(私人交流)。本研究为分析原油中轻馏分部分的烃源岩来源提供了一个实验依据。由于分析样品的数量和典型性均不够充分,本文仅仅作一初探。

4 结论

本方法采用液氮冷冻—冲击粉碎—密闭加热脱附—氦气吹扫—冷阱捕集—气相色谱在线分析装置,进样样品直径可达2 cm,大大减少了吸附烃轻馏分段的损失,能较好地保留烃源岩分散有机质中轻馏分的原始面貌,方法具有较好的重复性,基本上能满足地球化学研究的需要。该方法可用于石油地球化学的油源对比、残留烃量分析等方面的研究工作。

致谢:衷心感谢中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心张大江教授仔细地阅读全文,并提出宝贵的意见。对陈建平教授慷慨地提供样品、基础数据和有关样品的地质背景致深切的谢意。

参考文献:

- [1] Bement W O, Levey R A, Mango F D. The temperature of oil generation as defined with C₇ chemistry maturity parameter (2,4-DM P/2,3-DMP ratio)[A]. Grimalt J O, Dorronsoro C. Organic geochemistry: Developments and applications in energy, climate, environment and human history [C]. Spain: Donostia-San Sebastian, 1995. 505-507.

(下转第741页)

- [2] 马宗金,肖润德.现代欠平衡钻井技术[J].钻采工艺,2000,23(3):1-4.
- [3] 吴清忠,夏远明,杨宇飞,等.欠平衡定向井在风城区块的应用[J].石油勘探与开发,2002,29(2):81-83.
- [4] 龙芝辉,汪志明,范军.欠平衡钻井多相流动理论与计算分析[J].石油勘探与开发,2006,33(6):749-753.
- [5] Shadizadeh S R, Zaferanieh M. The feasibility study of using underbalanced drilling in Iranian oil field[A]. SPE 97317, 2005.
- [6] Friedel T, Mtchedlishvili G, Voigt H D, et al. Simulation of inflow whilst underbalanced drilling with automatic identification of formation parameters and assessment of uncertainty[A]. SPE 93974, 2005.
- [7] Rojas Y, Kakadjian S, Aponte A, et al. Stability and rheological behavior of aqueous foams for underbalanced drilling[A]. SPE 64999, 2001.
- [8] 康毅力,罗平亚.中国致密砂岩气藏勘探开发关键工程技术现状与展望[J].石油勘探与开发,2007,34(2):239-245.
- [9] 秦胜飞,陶士振,涂涛,等.川西坳陷天然气地球化学及成藏特征[J].石油勘探与开发,2007,34(1):34-38.
- [10] 李显贵,范菊芬,张学映.川西坳陷须家河组气藏DR技术应用[J].石油勘探与开发,2006,33(5):566-568.
- [11] 刘绘新,孟英峰.注气欠平衡钻水平井的新技术[J].石油勘探与开发,2005,32(1):100-102.
- [12] 王安庆,张红英.欠平衡状态下测井及资料解释[J].测井技术,2004,28(4):316-318.
- [13] 王安庆,钱洪英.欠平衡带压测井资料质量的控制[J].天然气工业,2003,23(4):35-37.
- [14] 李大潜,郑宋穆,谭永基,等.有限元素法在电法测井中的应用[M].北京:石油工业出版社,1980.
- [15] 谭永基,于泳.水平井和大斜度井的双侧向测井数值模拟[J].复旦学报(自然科学版),1997,36(6):633-638.
- [16] 汪涵明,张庚骥.倾斜地层的双侧向测井响应[J].测井技术,1994,18(6):408-412.
- [17] 刘振华,胡启.用有限元法计算侵入条件下双侧向测井仪器响应[J].石油仪器,1994,8(3):149-152.
- [18] 张庚骥.电法测井[M].北京:石油工业出版社,1984.

第一作者简介:李长喜(1977-),男,河北邯郸人,博士,中国石油勘探开发研究院测井与遥感所工程师,从事电法测井数值模拟、岩石物理及测井解释评价研究工作。地址:北京市海淀区学院路20号,中国石油勘探开发研究院测井与遥感技术研究所,邮政编码:100083。E-mail:lichangxi@petrochina.com.cn

收稿日期:2007-12-13 修回日期:2008-09-10

(编辑 唐金华 绘图 付改荣)

(上接第714页)

- [2] Odden W, Patience R L, van Graas G W. Applications of light hydrocarbons (C₄-C₁₃) to oil/source rock correlations: A study of the light hydrocarbons compositions of source rocks and test fluids from offshore Mid-Norway[J]. Organic Geochemistry, 1998, 28(12):823-847.
- [3] Odden W, Barth T. Study of the composition of light hydrocarbons (C₅-C₁₃) from pyrolysis of source rock samples[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(2-3):211-229.
- [4] 武杰,张以珈.岩石中微量轻烃(C₂-C₉)的氢抽提——毛细管色谱分析方法[J].石油实验地质,1985,7(1):20-24.
- [5] 钱志浩,曹玉兰,荣正光.热蒸发法测定岩石中的轻烃[J].石油实验地质,1982,4(4):279-284.
- [6] 蒋启贵,熊良华,唐少凡,等.酸解烃的Al₂O₃填充毛细柱分离分析技术[J].石油与天然气地质,1996,17(2):167-168.
- [7] 詹智玉. C₁-C₉烃类指纹分析[A]. 钱志浩,曹寅,王从风,等.石油地质实验测试技术新进展[C].北京:地质出版社,1994.24-31.
- [8] 钱志浩,荣正光,王兴国.岩石氟里昂抽提物(C₆-C₃₂)的测定及意义[A].中国地质学会石油地质专业委员会.有机地球化学论文集[C].北京:地质出版社,1987.120-128.
- [9] 蒋启贵,张志荣,宋晓莹,等.轻烃指纹分析及其应用[J].地质科技情报,2005,24(1):61-64.
- [10] 徐兴友,李政,王宇蓉,等.气源岩热模拟产物轻烃在线分析技术[J].石油实验地质,2007,29(1):103-107.
- [11] Thompson K F M. Light hydrocarbons in subsurface sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43(5):657-672.
- [12] Thompson K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47(2):303-316.
- [13] Thompson K F M. Fractionated aromatic petroleum and the generation of gas-condensates[J]. Organic Geochemistry, 1987, 11(6):573-590.
- [14] Thompson K F M. Gas-condensates migration and oil fractionation in deltaic systems[J]. Marine and Petroleum Geology, 1988, 5(3):237-246.
- [15] Mango F D. The origin of light hydrocarbons in petroleum: A kinetic test of the steady-state catalytic hypothesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54(5):1315-1323.
- [16] 胡惕麟,戈葆雄,张义纲,等.源岩吸附轻烃和天然气轻烃指纹参数的开发和应用[J].石油实验地质,1990,12(4):375-393.
- [17] 王培荣,徐冠军,肖廷荣,等.原油C₅-C₁₃轻馏分族组成的环境指相意义探索[J].自然科学进展,2007,17(6):755-763.
- [18] 王培荣,徐冠军,肖廷荣,等.用C₇轻烃参数判别烃源岩沉积环境的探索[J].石油勘探与开发,2007,34(2):156-159.
- [19] 陈建平,梁狄刚,王绪龙,等.准噶尔盆地三叠系生源油藏的发现及其意义[J].地球化学,2003,32(6):582-589.

第一作者简介:徐冠军(1961-),女,北京市人,硕士,中国石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事有机地球化学实验方法及应用研究。地址:北京市海淀区学院路20号,中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心,邮政编码:100083。E-mail:xuguanjun@petrochina.com.cn

收稿日期:2008-01-31 修回日期:2008-08-25

(编辑 姚俊梅 绘图 付改荣)