

文章编号:0253-9985(2012)02-0314-07

合采井分层产量贡献地球化学实验监测技术

税蕾蕾¹, 彭平安², 黄合庭¹, 刘玉明¹

(1. 中海油 能源发展股份有限公司 采油技术服务公司 钻采工程研究院 湛江实验中心, 广东 湛江 524057;
2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510000)

摘要:采用单组分分离、多内标绝对浓度色谱定量分析、生物标志物质谱分析、碳同位素组成分析等方法,建立了地球化学产能监测实验方法,能快速有效识别分层原油差异。首次利用原油非均质性评价结果,采用聚类分析统计方法和原油混合配比实验选取了多套地球化学产能监测指标,评价了各类地球化学产能监测指标的适用性。所选色谱指纹化合物经过色谱-质谱定性鉴定,证实非混合化合物。运用原油色谱指纹技术在W1和W2油田4口合采油井上进行了现场分层产能监测,色谱指纹法的计算结果与生产测井结果相对误差在10%~15%左右,能准确判别主力油层。地球化学产能监测技术具有快速、经济的特点,结合生产测井使用,对油田的生产优化具有重要意义。

关键词:绝对定量;配比实验;聚类分析;合采油井;产能监测;地球化学

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical monitoring technology of single layer production in commingled producing wells

Shui Leilei¹, Peng Ping'an², Huang Heting¹ and Liu Yuming¹

(1. Zhanjiang Central Laboratory, Oilfield Engineering Research Institute, CNOOC Technology & Services Company, Zhanjiang, Guangdong 524057, China;
2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510000, China)

Abstract: A geochemical monitoring technique is developed through integrating single component separation, quantitative GC analysis of absolute concentration with multi-internal standards, biomarkers GC-MS analysis and carbon isotope analysis. It can rapidly and effectively identify the differences of crude oil produced from different layers. Multiple geochemical production monitoring indexes were selected through clustering statistical analysis and crude oil blend proportion experiment, and their applicability was evaluated. Qualitative GC-MS analysis of the fingerprint compounds verified that they are non-mixed compounds. The fingerprint technology was used to perform separate-layer production monitoring in four commingled producing wells in W1 and W2 oilfields. The error is only about 10% to 15%, indicating that this technology can accurately identify the major pay zone. It is quick and economic and can be combined with production logging.

Key words: absolute quantitative analysis, partition experiment, clustering method, commingled producing well; production monitoring, geochemistry

随着油田含水升高,合采油井各分层产量也会发生变化,需要及时调整开采方案,科学配产。常规分层产量监测方法,如生产测井法受作业次数、关井停产、经济成本等因素所限,不可能实时

对每一口油井进行产能监测。20世纪80年代末,原油色谱指纹分析技术首次应用于两层原油的产能评价中^[1-2],因其快速、经济、无需关井停产的显著优点颇受众多研究者关注^[3-5]。但综合国内、外

收稿日期:2011-05-19;修订日期:2012-03-16。

第一作者简介:税蕾蕾(1978—),女,工程师,石油地球化学。

的研究成果,传统色谱指纹技术在产能评价时还存在一些问题,主要表现在:①原油样品成分复杂,色谱分析共溢出现象严重,全油色谱的本底干扰效应,使得色谱分析定量的准确性不易保证;②色谱分析不能对化合物进行定性分析,选取的指纹化合物通常结构不清、成因不清,稳定性不强;③用于产能监测的化学指标仅限于原油色谱指纹,太单一。

针对以上问题,中海油钻采工程研究院湛江实验中心在2008—2011年间对原油色谱指纹技术进行了优化与改进,建立了一套全面、快捷、高精度的原油地球化学实验产能监测技术,并成功应用于南海海域的W1、W2和W11油田部分合采油井的分层产能监测和原油非均质性评价中。

1 实验方法

针对全油色谱分析技术对含量相对较低的支链、环状烃、芳烃类化合物因其容易受到色谱本底干扰,定量准确性不易保证的问题,采用了芳烃组分分离和多内标(氘代系列饱和烃混合标样和六甲基苯系列氘代芳烃类标样)绝对浓度定量分析方法进行改进^[6]。同时,加入生物标志物色谱-质谱分析、单体烃碳同位素分析和全油、沥青质的总碳同位素分析等分析手段,使原油指纹差异分析更快捷、更灵敏。

1.1 色谱分析条件

在HP6890GC气相色谱上完成全油色谱和芳烃色谱烃的测定。气相色谱柱为(30 m × 0.32 mm × 0.25 μm, HP-5MS),氮气为载气,气体流速为1 mL/min。进样口温度为290℃。手动无分流进样,进样体积为1 μL,色谱升温程序为:初始温度50℃,保持2 min,然后以3℃/min升温到290℃并保留10 min。

1.2 色谱-质谱分析条件

使用Finnigan Voyager型GC-MS联用仪。色谱条件为:柱头进样,色谱柱为DB5-MS型毛细管(30 m × 0.32 mm × 0.25 μm)。氮气作载气,流量1.4 mL/min。升温程序:35℃起保持10 min,

以3℃/min升至300℃,恒温10 min。质谱条件为:扫描数范围 m/z 50~700,离子源:EI源。离子源温度200℃,电子能量70 eV。

1.3 单体烃碳同位素分析

使用HP6890GC-Isoprime同位素比值质谱仪分析。色谱柱为DB5-MS型毛细管柱(50 m × 0.32 mm × 0.25 μm),氦气作载气。升温程序:起始温度60℃,保留时间1 min,以15℃/min升至110℃,保留时间1 min,以3℃/min升至290℃,恒温30 min。色谱进样口温度为290℃,无分流进样。

1.4 全油、沥青质的总碳同位素分析

样品在元素分析仪CE Flash1112EA的燃烧管中完全燃烧为CO₂和NO_x,然后还原管将NO_x还原为N₂。CO₂和N₂分别经元素分析仪的ConFlo III接口进入质谱仪实现总碳同位素的连续流测定。

2 实验结果及讨论

2.1 色谱指纹定量分离效果

实验发现,芳烃化合物含量色谱分析结果的差异较正烷烃和支链烷烃的定量分析结果要明显得多(图1),而且芳烃组分在3个单层原油样品中出现不同分布特征的概率更大,这表明单组分的分离过程改善了色谱指纹差异的可分辨性。

2.2 原油色谱定量分析精度

通过大量的实验证实,合理的实验方法能保证正烷烃(含姥鲛烷、植烷)达到低的分析误差(低于5%)^[7],异构烷烃的分析误差为6.1%~10%,由于芳烃浓度低、异构体多,仅有20%的芳烃可满足相对误差低于10%,但对于轻组分损失严重的油样,这无疑增加了可选指纹的范围。

2.3 原油非均质性评价

进行产能监测前,对区域内原油的非均质性评价是不能回避的问题^[8]。原油非均质性越强,

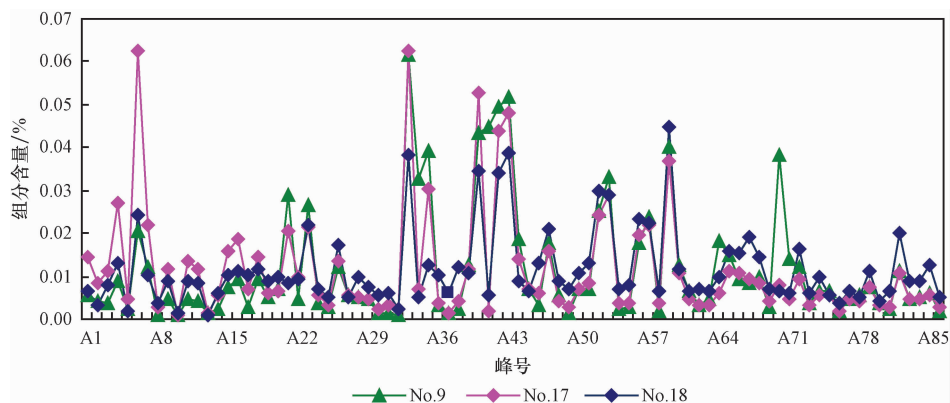


图1 W1油田单层原油样品中芳烃化合物的含量分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of aromatic compound content of crude oil samples from single layer in W1 oilfield

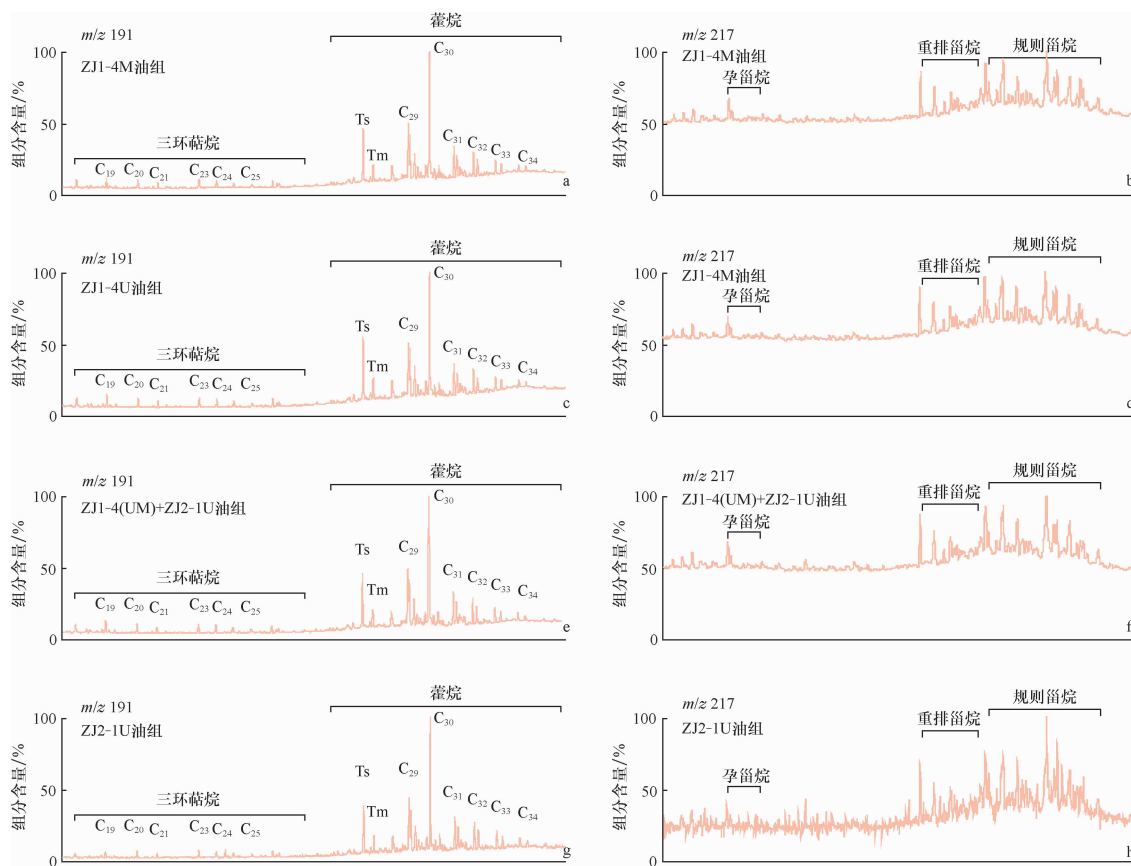


图2 W1油田原油样品饱和烃组分中的生物标志物分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of biomarkers in saturated hydrocarbons of crude oil samples from W1 oilfield

指示原油间的差异越大,越有利于选取产能监测的指标。但是,原油非均质性太强,原油指纹化合物极易发生变化,不稳定。通过实验分析发现,各类地球化学分析方法对区别W1和W2油田和W11油田原油指纹差异有所不同,因此,不同油田产能监测指标的选择也应区别对待。

2.3.1 W1和W2油田原油非均质性判别

从生物标志物色-质分析结果(图2)和碳同位素分析结果(图3)来看,W1和W2油田各分层原油的来源和生成期次基本一致^[9],表明W1和W2油田原油非均质性不强,原油在储层内发生的

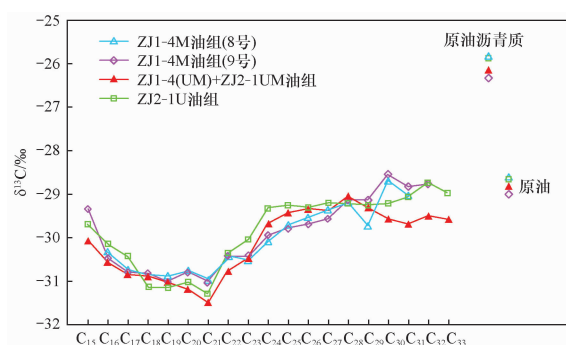


图3 W1油田原油样品中正烷烃、沥青质组分以及全油的碳同位素组成特征

Fig. 3 Carbon isotope composition characteristics of alkanes, asphaltene fractions and the whole hydrocarbons of crude oil samples from W1 oilfield

变化是产能监测主要考虑的因素,因此对母源变化灵敏的指标,如全油或组分碳同位素、正烷烃分子碳同位素,以及生物标志物指标不适合进行产能监测研究,定量特征色谱指纹仍将是该油田产能监测可选用的主要指标。

2.3.2 W11油田原油非均质性判别

与W1和W2油田不同的是,W11油田不同层原油的三环萜烷的相对强度、藿烷系列化合物和甾烷系列的相对分布都有明显差异(图4)。原油、沥青质的总碳同位素组成总体上偏重,正烷烃同位素随碳数的分布型式也明显不同(图5)。表明该油田原油非均质性强。母源变化引起的原油

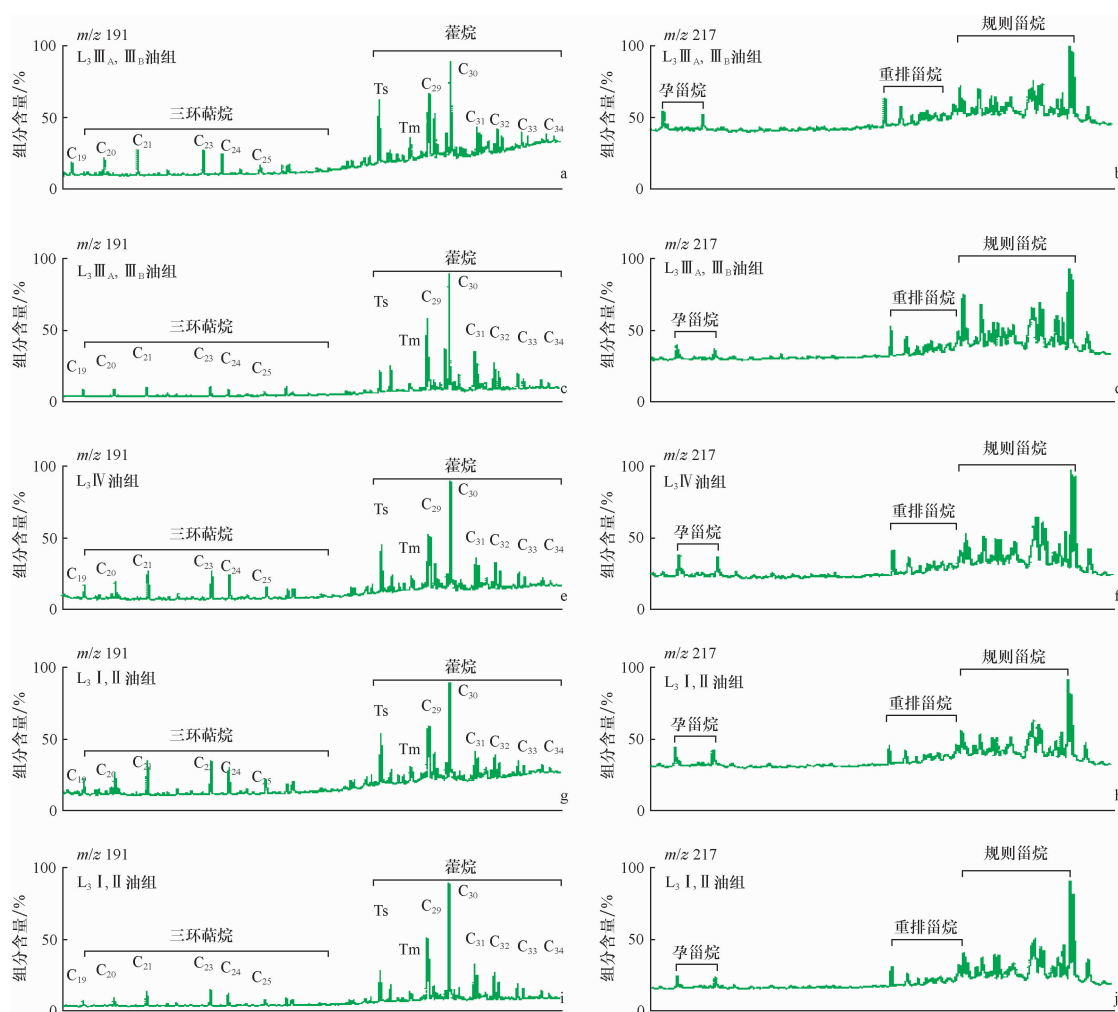


图4 W11油田原油样品饱和烃组分中的生物标志物分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of biomarkers in saturated hydrocarbons of crude oil samples from W11 oilfield

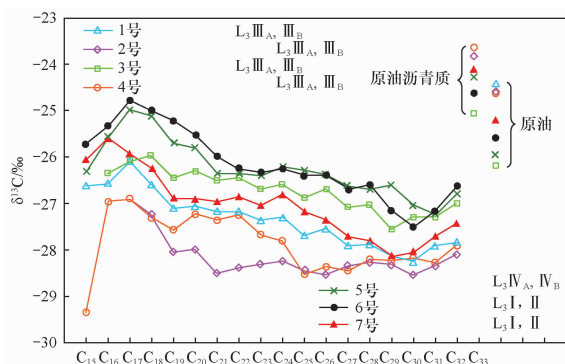


图5 W11 油田原油样品中正烷烃、沥青质组分

以及全油的碳同位素组成特征

Fig. 5 Carbon isotope composition characteristics of alkanes, asphaltene fractions and the whole hydrocarbon of crude oil samples from W11 field crude oil samples

差异可能是产能监测主要考虑的因素。因此,对于该油田除了色谱指纹的定量方法以外,可以考虑诸如生物标志物定量、碳同位素组成等新指标的产能监测研究。

2.4 各类产能监测指标优选与评价

2.4.1 W1 和 W2 油田原油色谱指纹指标优选

选取 W1 和 W2 油田的 3 个单层原油样品进行 2 层和 3 层的配比实验,分别对正烷烃、全烃次要组分以及芳烃组分进行了指纹优选。计算结果表明(表 1,表 2),芳烃色谱指纹指标优于全烃色谱中的次要组分色谱指纹指标,优于正构烷烃指标。2 层配比色谱指纹计算结果与实际配比值的

表1 不同指纹指标的二层配比计算结果

Table 1 Ratio of calculated results of different fingerprint indicators in two layers of blend crude oil

	实际配比比例	正烷烃、姥植烷/% (8 参数拟合比例结果)	次要组分/% (5 参数拟合比例结果)	次要组分/% (8 参数拟合比例结果)	芳烃/% (7 参数拟合比例结果)
配比 1	18 号:0.8	0.82	0.80	0.80	0.84
	17 号:0.2	0.18	0.20	0.20	0.16
配比 2	18 号:0.6	0.59	0.69	0.64	0.61
	17 号:0.4	0.41	0.31	0.36	0.39
配比 3	18 号:0.4	0.55	0.52	0.48	0.37
	17 号:0.6	0.45	0.48	0.52	0.63
配比 4	8 号:0.2	0.55	0.35	0.29	0.18
	17 号:0.8	0.45	0.65	0.71	0.82
配比 5	17 号:0.8	1.16	0.80	0.81	0.85
	9 号:0.2	-0.16	0.20	0.19	0.15
配比 6	18 号:0.8	0.86	0.80	0.79	0.82
	9 号:0.2	0.14	0.20	0.21	0.18
配比 7	18 号:0.6	0.75	0.62	0.59	0.56
	9 号:0.4	0.25	0.38	0.41	0.44

表2 不同指纹指标的三层配比计算结果

Table 2 Ratio of calculated results of different fingerprint indicators in three layers of blend crude oil

	实际配比比例	正烷烃、姥植烷/% (8 参数拟合比例结果)	次要组分/% (5 参数拟合比例结果)	次要组分/% (8 参数拟合比例结果)	芳烃/% (7 参数拟合比例结果)
配比 1	18 号:0.6	0.63	0.67	0.53	0.63
	17 号:0.2	0.21	0.16	0.26	0.18
	9 号:0.2	0.16	0.18	0.20	0.18
配比 2	18 号:0.4	0.35	0.26	0.45	0.41
	17 号:0.4	0.46	0.56	0.34	0.35
	9 号:0.2	0.18	0.18	0.22	0.24
配比 3	18 号:0.2	0.25	0.29	0.25	0.24
	17 号:0.6	0.32	0.54	0.57	0.54
	9 号:0.2	0.44	0.18	0.18	0.22
配比 4	18 号:0.4	0.33	0.34	0.50	0.48
	17 号:0.2	0.38	0.43	0.22	0.34
	9 号:0.4	0.27	0.23	0.26	0.18
配比 5	18 号:0.2	0.12	0.11	0.24	0.21
	17 号:0.4	0.51	0.60	0.45	0.43
	9 号:0.4	0.37	0.30	0.35	0.36

相对误差在5%以内,3层配比色谱指纹计算结果与实际配比值的相对误差也能控制在12%以内,精度较高。

为了考察那些分析精度较高的色谱指纹化合物是否为进样系统或色谱柱污染所致,对所选特征色谱指纹化合物进行了GC-MS分析,并进行了初步的谱库检索与结构鉴定(图6,图7)。结果表明,这些指纹化合物都是单一组分,而非混合物。

2.4.2 W11 油田产能监测指标选择

由于本次研究没有取到W11油田合采油井对应的单层油样,故未能通过原油配比实验来明确各类色谱指纹的具体差异,但根据前面所述原油样品地球化学指纹分析,利用数学统计的方法可以作些推测^[10-15]。

聚类分析结果表明(数据略),该区原油的指纹可分为4类,第一类包括正烷烃的分子碳同位素组成,可以作为一类独立的指标体系,和其分子组成的内在联系不大;第二类包括了主要的和次要组分,第三类主要包括了低碳数的生物标志物(低于C₂₂)以及少量次要组分,第四类主要包括了高碳数的生物标志物。从上述4类色谱指纹体系中优选分析误差小和配比性好的色谱指纹,可能可以实现多层的产能监测。

3 应用

在W1和W2油田的4口合采油井上进行了现场产能监测,在全烃次要组分相对分布特征变化不大的情况下,引入相对分布特征明显不同的

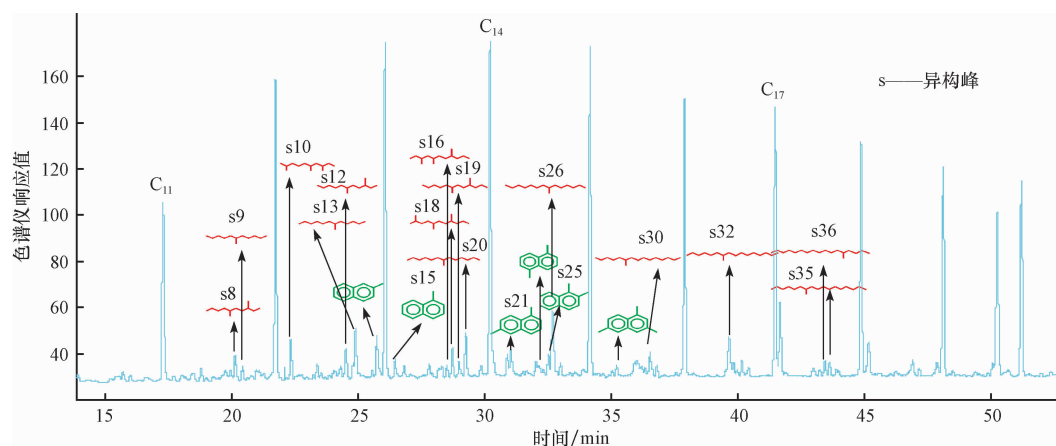


图6 全烃色谱指纹中部分次要组分结构鉴定

Fig. 6 Structural diagrams of some minor components in the whole hydrocarbon chromatographic fingerprints

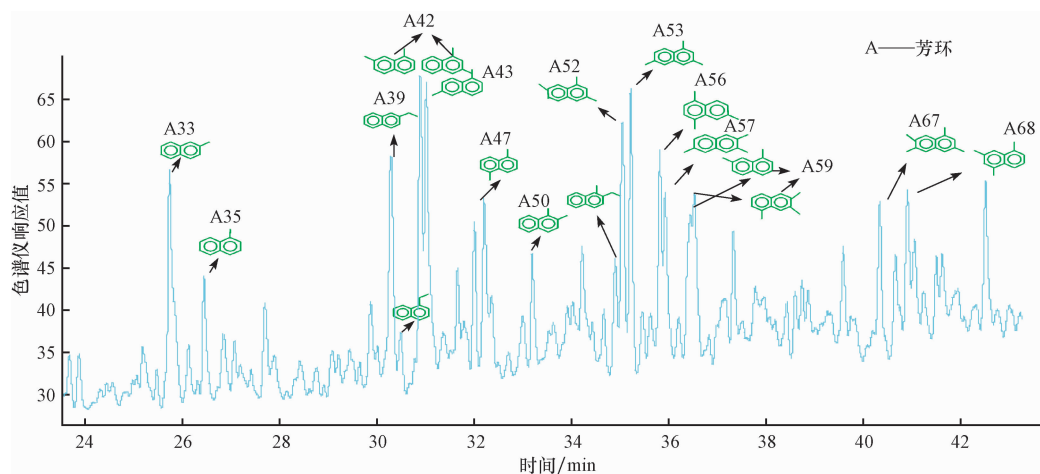


图7 部分芳烃色谱指纹结构鉴定

Fig. 7 Structural diagrams of some aromatic chromatographic fingerprints

表 3 W1 和 W2 油田合采井分层产量贡献解释

Table 3 Production partition between pay zones in commingled producing wells of W1 and W2 oilfields

油井	油层	分层产量贡献/%			油层贡献
		生产测井法	色谱指纹法	相对误差	
W17	A	100.0	80.0	20.0	主力油层
	B	0	20.0		
W24	C	5.1	7.1	39.2	次主力油层
	D	12.9	14.9	15.5	
	E	82.0	78.2	-4.6	
W25	F	16.3	14.9	-8.6	次主力油层
	G	14.4	13.1	-9.0	
	H	69.3	72.0	3.9	
W28	I	77.9	81.6	4.7	主力油层
	J	5.1	3.4	-33.3	
	K	17.0	15.0	-11.8	

正烷烃指纹参数,计算结果中不再出现负值。将色谱指纹法计算得到的产量分配结果与生产测井结果进行了比较(表 3)。

4 结论

1) 单组分的分离使得可选取的指纹指标范围扩大,也有利于提高微量化合物的定量以及配比结果精度。芳烃色谱指纹指标对改善产能监测的计算精度有重要意义。正构烷烃尽管具有可配比性和很高的分析精度,但对某些原油而言,相对分布上的相似性使得他们在产能监测中的应用受到限制。但正构烷烃与其他指纹参数配合使用,可优化计算结果。

2) 质谱分析可以弥补色谱分析无法准确定性的不足,对于确保所选指纹化合物是原油自身的单一组分,而非混合物或色谱系统污染所致,从而提高色谱指纹的稳定性和监测精度具有重要作用。

3) 多指标体系的选取不仅有助于丰富产能监测的方法,也增加了变量性质上的差异性,进而可以改善产能监测的计算精度。生物标志物和碳同位素组成指标地质意义明确,能有效区分不同产层原油特征,今后可作为两类产能监测新指标加强研究。

4) 地球化学产能监测技术避免了常规产能监测需关井停产的缺点,简单快捷,结果可靠,可以为油田提供动态的实时监测,又可与其他生产测试手段联合使用,具有良好的应用前景。

参 考 文 献

[1] Kaufman R L, Ahmed A S, Moldowan J M. A new technique for

the analysis of commingled oils and its application to production allocation calculations[C] // Indonesian Petroleum Association. Proceedings of the 16th Annual Convention of Indonesian Petroleum Assoc. 1987;247 - 268.

[2] Kaufman R L, Ahmed A S. Gas chromatography as a development and production tool for fingerprinting oils from individual reservoirs; applications in the Gulf of Mexico[C] // . GCS/SEPM. Foundation Ninth Annual Research Conference Proceedings, 1990;263 - 282.

[3] 付晓文,吴刚. 原油指纹技术在陆梁油田产能监测中的应用[J]. 西南石油学院学报,2002,24(5) :4 - 6.

Fu Xiaowen, Wu Gang. Application of geochemical fingerprinting technique in production allocation in luliang oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24, (5) :4 - 6.

[4] 陈世加,马力宁,付晓文,等. 原油指纹技术在合采油井分层产能监测中的应用[J]. 新疆石油地质,2001, 22(2) :158 - 159.

Chen Shijia, Ma Lining, Fu Xiaowen, et al. Application of oil fingerprints technique in monitoring individual zone production allocation of commingled oil wells[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2001, 22(2) :158 - 159.

[5] 陈世加,陈小凡,马力宁. 混采井分层产能确定的新方法[J]. 西南石油学院学报,2001,23(6) :31 - 33.

Chen Shijia, Chen Xiaofan, Ma Lining. A new method of determining separate zone production allocation[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2001, 23(6) :31 - 33.

[6] 金晓辉,朱丹,林壬子. 油田开发动态色谱指纹监测技术的数学模拟研究[J]. 石油勘探与开发,2001,28(3) :86 - 89.

Jin Xiaohui, Zhu Dan, Lin Renzi. Mathematical modeling of dynamic chromatography fingerprint monitoring in the oilfield development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28, (3) :86 - 89.

[7] 方伟,张居和,冯子辉,等. 油藏地球化学测试技术在大庆油田的应用[J]. 沉积学报,2004,22(增刊 1) :118 - 123.

- Li Weizhong, Sun Weifeng. Damage study of clay mineral in high water sensitivity Wangzhuang oil field [J]. *Northwestern Geology*, 2005, 38(4): 86–93.
- [13] 李健, 李红南. 油藏开发流体动力地质作用对储层的改造[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(1): 86–89.
- Li Jian, Li Hongnan. Reconstruction of hydrodynamic geology effect of reservoir development on reservoir [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(1): 86–89.
- [14] 徐守余, 李红南. 储集层孔喉网络场演化规律和剩余油分布[J]. *石油学报*, 2003, 24(1): 48–53.
- Xu Shouyu, Li Hongnan. Evolvement of reservoir pore-throat-net and remaining oil distribution [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(1): 48–53.
- [15] 王红光, 蒋明, 张继春, 等. 高含水期油藏储层物性变化特征模拟研究[J]. *石油学报*, 2004, 25(1): 53–58.
- Wang Hongguang, Jiang Ming, Zhang Ji chun, et al. Simulation on variation of physical properties in high water-cut reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(1): 53–58.
- [16] 刘斌, 杨琦, 谈士海. 苏北盆地台兴油田注水水质对储层的伤害和对策[J]. *石油实验地质*, 2002, 24(6): 568–572.
- Liu Bin, Yang Qi, Tan Shihai, et al. Damages of injection water quality to reservoirs in TaiXing oilfield and their countermeasures [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2002, 24(6): 568–572.
- [17] 时佃海. 王庄油田强水敏性稠油油藏热采开发研究[J]. *地层学杂志*, 2007, 31(增刊II): 605–624.
- Shi Dianhai. Research on thermal recovery of strong water sensitive heavy oil reservoir in the Wang Zhuang oil field [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(Supp. II): 605–624.
- [18] 谢晓永, 唐洪明, 孟英峰, 等. 气体泡压法在测试储集层孔隙结构中的应用[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(5): 17–20.
- Xie Xiaoyong, Tang Hongming, Meng Yingfeng, et al. The application of gas bubble-pressure method in the study on reservoir pore structures [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2009, 31(5): 17–20.

(编辑 董立)

(上接第320页)

- Fang Wei, Zhang Juhe, Feng Zihui, et al. The Application of the Test Technique on Reservoir-Geochemistry in Daqing Oilfield [J]. *Acta Sedimentological Sinica*, 2004, 22(S1): 118–123.
- [8] 张居和, 方伟, 冯子辉, 等. 多层混采原油分层产能贡献监测色谱技术[J]. *石油学报*, 2004, 25(4): 75–79.
- Zhang Juhe, Fang Wei, Feng Zihui, et al. Gas chromatogram technique for dynamic monitor of productivity contribution in single zone of multiple-zone production [J]. *Acta Petrol Ei Sinica*, 2004, 25(4): 75–79.
- [9] 金晓辉, 朱丹, 林壬子, 等. 原油气相色谱指纹可配比性实验研究[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(1): 53–57.
- Jin Xiaohui, Zhu Dan, Lin Renzi, et al. Partition experiment of GC fingerprint of crude oil [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(1): 53–57.
- [10] 陈建平, 邓春萍, 梁狄刚, 等. 叠合盆地多烃源层混源油定量判析——以准格尔盆地东部彩南油田为例[J]. *地质学报*, 2004, 78(2): 279–288.
- Chen Jianping, Deng Chenping, Liang Digang, et al. Quantification of mixed oil derived from multiple source rocks: a typical case study of the Cainan oilfield in the east Junggar basin, Northwest China [J]. *Acta Geological Sinica*, 2004, 78(2): 279–288.
- [11] 金晓辉, 刚文哲, 林壬子, 等. 油藏流体动态色谱指纹监测技术与应用[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(5): 657–667.
- Jin Xiaohui, Gang Wenzhe, Lin Renzi, et al. Dynamic monitoring of chromatographic fingerprint of reservoir fluid and its application [J]. *Oil & Gas Geology* 2009, 30(5): 657–667.
- [12] 金晓辉, 朱丹, 林壬子, 等. 油藏色谱指纹非均质性形成机理及其稳定性实验模拟[J]. *地质评论*, 2003, 49(2): 217–221.
- Jin Xiaohui, Zhu Dan, Lin Renzi, et al. Mechanization of the heterogeneity of petroleum chromatographic fingerprint compounds and its stabilization [J]. *Geological Review*, 2003, 49(2): 217–221.
- [13] 姜华, 王华, 李俊良, 等. 珠江口盆地珠三坳陷油气成藏模式与分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(3): 275–286.
- Jiang Hua, Wang Hua, Li Junliang, et al. Research on hydrocarbon pooling and distribution patterns in the Zhu-3 depression, the Pearl River Mouth basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(3): 275–286.
- [14] 陈庆春. 油藏开发中应用原油气相色谱指纹技术的可行性研究[J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(3): 68–70.
- Chen Qingchun. Feasibility study on application of gas chromatographic fingerprint technique in reservoir development [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(3): 68–70.
- [15] 刘春, 刘宾, 柴永波, 等. 应用地球化学方法判别混采稠油井主产层[J]. *断块油气田*, 2008, 15(6): 80–82.
- Liu Chun, Liu Bin, Chai Yongbo, et al. Identification of main producing layer of commingling heavy oil by geochemistry way [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2008, 15(6): 80–82.

(编辑 董立)