

不同填充方法色谱柱分离原油及沥青砂岩抽提物的饱和烃地球化学特征

朱 雷¹, 王月辉¹, 杨永才¹, 秦黎明¹, 张宏友²

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国海洋石油有限公司 天津分公司技术部, 天津 300452)

摘要: 采用柱色谱分离方法, 分别以氧化铝(5 g)、上部为氧化铝下部为硅胶(3 g : 2 g)、上部为硅胶下部为氧化铝(3 g : 2 g)和硅胶(5 g) 4种填充方法对原油和沥青砂岩抽提物进行族组成分析, 对其饱和烃馏分进行气相色谱-质谱分析, 对比剖析了饱和烃生物标志物组成特征。结果表明: 这4种不同的填充方法对类异戊间二烯型烷烃、藿烷、规则甾烷等生物标志物的分子组成影响一般均较小, 但对于高碳数正构烷烃和重排甾烷等化合物的影响则较明显。

关键词: 色谱柱; 氧化铝; 硅胶; 族组成; 生物标志物

中图分类号: P618.130.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)04-0389-07

Geochemical Characteristics of the Saturate Hydrocarbon of Crude Oils and Bituminous Sandstone Extracts Separated by Chromatographic Columns with Different Packed Methods

ZHU Lei¹, WANG Yue-hui¹, YANG Yong-cai¹, QIN Li-ming¹, ZHANG Hong-you²

(1. State Key Laboratory for Petroleum Resource and Prospecting, China University of

Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Technical Department of Tianjin Branch of China

National Offshore Oil Corporation Limited, Tianjin 300452, China)

Abstract: The fractions of crude oil and bituminous sandstone extract were separated by chromatographic columns with four packed methods, that is respectively, alumina (5 g), alumina (3 g) at the top and silica gel (2 g) in the bottom, silica gel (3 g) at the top and alumina (2 g) in the bottom, silica (5 g). The saturated hydrocarbons were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry, and the compositions of biomarkers were compared. The results show that the four column chromatographic methods yield slight affection to the distributions of isoprenoid alkanes, tricyclic terpanes, hopanes and regular steranes in the saturated hydrocarbon fraction, but apparent affection to the occurrence of high molecular weight n-alkanes and diasteranes.

Key words: chromatographic column; alumina; silica gel; fractions; biomarkers

0 引言

用经典的柱色谱分离法将原油和岩石抽提物分离为饱和烃、芳烃、非烃和沥青质, 是各国有机地球化学研究最常用的族组成分离方法。中国颁布

的石油天然气行业标准《岩石可溶有机物和原油族组分柱层析分析方法》(SY/T 5119—1995)为上部氧化铝下部硅胶填充柱^[1], Later等^[2]则采用上部硅胶下部氧化铝填充柱。有些研究则采用单一的氧化铝或硅胶填充柱分离方法^[3-4]。基于石油炼制

收稿日期: 2008-02-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB202303)

作者简介: 朱 雷(1969-), 男, 上海人, 试验师, 从事试验地球化学研究。E-mail: zhuleidike@126.com

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

工艺,李勇志等^[3-4]探讨了氧化铝和硅胶对重质油族组成分离的影响,并剖析了氧化铝对长链正构烷烃的吸附性。Jiang 等^[5]探讨了氧化铝色谱柱对饱和烃和单环芳烃的不完全分离。色谱-质谱分析资料表明:在相同的分离条件下,同一样品用不同吸附剂进行族组成分离时,其饱和烃、芳烃具有一定的差异。目前中国学者对此问题关注仍然不够,尽管从不同角度提出一些改进方法^[6-9],但是经典的硅胶-氧化铝柱色谱分离方法由于无需复杂的仪器,操作简便,在各个实验室内仍广泛应用,是有机地球化学研究中最常用的色谱分离方法。

笔者采用柱色谱分离方法,以氧化铝(5 g)、上部氧化铝下部硅胶(3 g : 2 g)、上部硅胶下部氧化铝(3 g : 2 g)和胶硅(5 g)4种填充方法对原油和沥青砂岩抽提物进行族组成分离,用气相色谱-质谱法对饱和烃进行全扫描分析,探讨这4种方法对族组成定量分析准确度及生物标志物组成的影响。

1 样品与试验

样品为原油和沥青砂岩。原油系自准噶尔盆地永1井,产层为中侏罗统西山窑组(J_{2x})含砾细砂岩(5 874.00~5 882.50 m),原油密度0.922 4 g/cm³(20℃),粘度286.1 mPa·s(50℃),含硫量0.13%,含蜡量5.01%;灰褐色沥青细砂岩系自塔里木盆地塔中隆起塔中31井下志留统塔塔埃尔塔格组(S_{1tt})(4 612.80 m)。

吸附剂采用中性氧化铝,粒径0.149~0.074 mm(100~200目),粗孔硅胶粒径0.177~0.149 mm(80~100目),使用前需抽提至无荧光。氧化铝和硅胶的活化温度分别为400℃和180℃。

表 1 不同填充方法色谱柱分离原油及沥青砂岩抽提物的族组成

Tab. 1 Saturated, Aromatic, Polar and Asphaltene Fractions of the Crude Oils and Bituminous Sandstone Extracts Separated by Chromatographic Columns with Different Packed Methods

样品编号	井号	岩性	方法编号	吸附剂	吸附 剂量/g	族组成/%				
						饱和烃	芳烃	非烃	沥青质	饱和烃+芳烃
ZL1-1	永1	原油	I	氧化铝	5	60.68	19.23	10.68	9.40	79.91
ZL1-2	永1	原油	II	上部氧化铝下部硅胶	3 : 2	61.50	19.25	10.16	9.09	80.75
ZL1-3	永1	原油	III	上部硅胶下部氧化铝	3 : 2	61.89	19.23	10.49	8.39	81.12
ZL1-4	永1	原油	IV	硅胶	5	59.61	20.69	10.34	9.36	80.30
ZL2-1	塔中31	砂岩	I	氧化铝	5	37.89	14.98	21.59	25.55	52.86
ZL2-2	塔中31	砂岩	II	上部氧化铝下部硅胶	3 : 2	35.29	16.74	22.62	25.34	52.04
ZL2-3	塔中31	砂岩	III	上部硅胶下部氧化铝	3 : 2	38.43	16.20	20.83	24.54	54.63
ZL2-4	塔中31	砂岩	IV	硅胶	5	35.19	16.67	21.76	26.39	51.85

沥青砂岩用二氯甲烷抽提24 h,干燥后称重。准确称取4份20 mg的沥青砂岩抽提物或原油,用30 mL正己烷溶解,静置过夜,沉淀出沥青质。滤液用旋转蒸发器蒸至2~3 cm³(1 cm³=1 mL)备用,称取5 g氧化铝、上部3 g氧化铝下部2 g硅胶、上部3 g硅胶下部2 g氧化铝、5 g硅胶,装入4根分离柱中。滤液分别加入到4根分离柱中,然后分别以φ(正己烷)、φ(二氯甲烷):φ(正己烷)为2:1、φ(乙醇):φ(三氯甲烷)为1:1为淋洗剂,洗提饱和烃、芳烃、非烃。用称量法进行族组成定量。试剂使用前均蒸馏纯化。

对饱和烃、芳烃进行了气相色谱-质谱检测,全扫描分析。分析在Thermo-Finnigan Trace-DSQ型仪器上进行,分析条件为:HP-5MS弹性石英毛细管柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm),初温50℃,恒温1 min,以20℃/min升至120℃,再以3℃/min升到310℃,恒温25 min;载气为He,纯度为99.999%,流速为1 mL/min;电子轰击法,MID检测。

2 结果与讨论

2.1 族组成

4种分离方法在原油及沥青砂岩抽提物的族组成分析中存在细微差异。在族组成分析中(表1),第II(上部充填氧化铝下部充填硅胶,3 g : 2 g)、II种(上部充填硅胶下部充填氧化铝,3 g : 2 g)分析方法的族组成中饱和烃与芳烃的相对丰度较高,而第I(氧化铝,5 g)、IV种(硅胶,5 g)中的非烃与沥青质的相对丰度则较高,因此,第II、II种分析方法对于饱和烃与芳烃的吸附性较好,而第I、IV种对于饱和烃与芳烃的吸附性能较差(表1)。饱和烃总离子流图见图1。

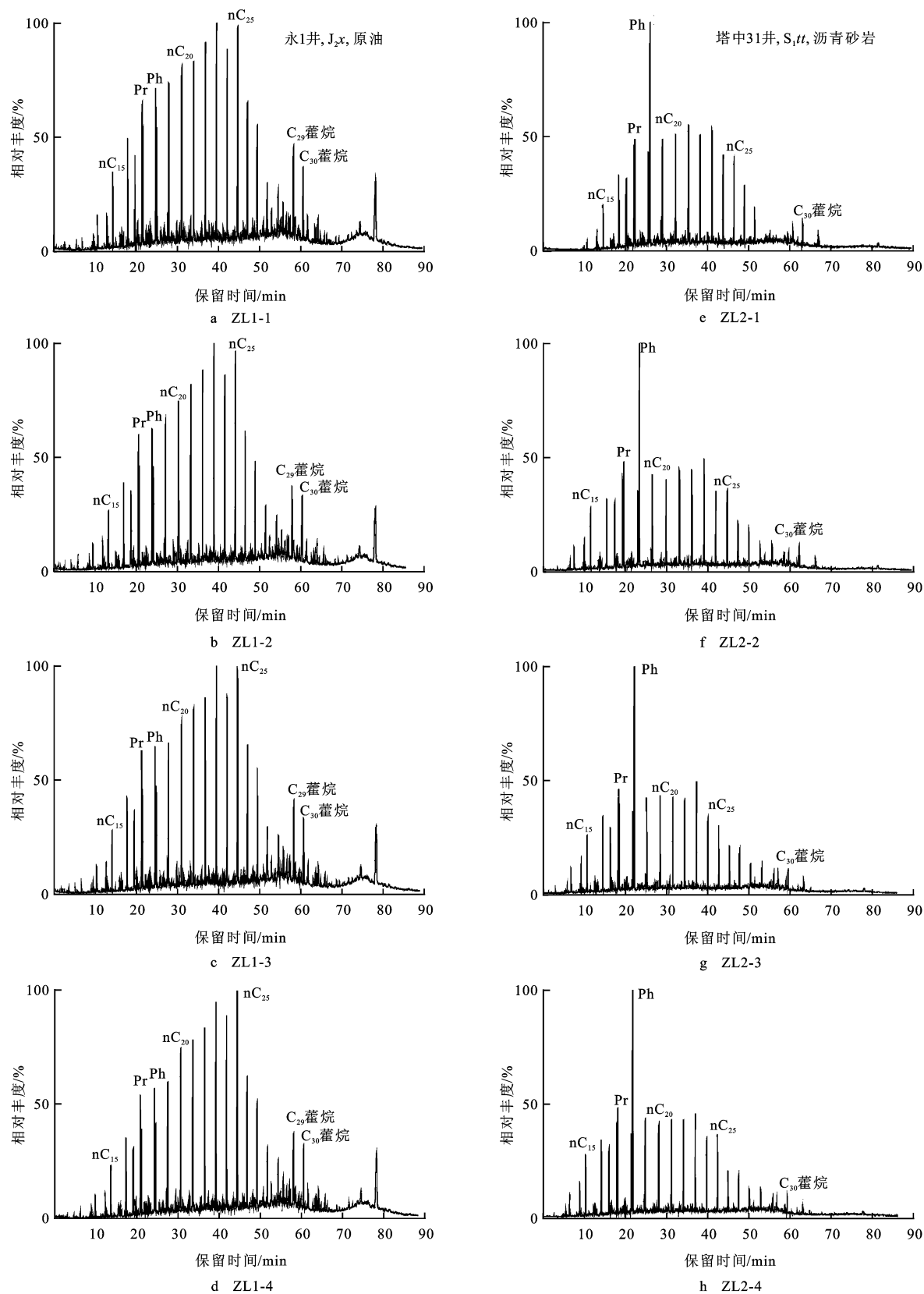


图 1 不同填充方法色谱柱分离原油及沥青砂岩抽提物的饱和烃总离子流

Fig. 1 Total Ion Chromatogram (TIC) Shows the Distribution of the Saturates in the Crude Oils and Bituminous Sandstone Extracts Separated by Chromatographic Columns with Different Packed Methods

2.2 正构烷烃

从饱和烃总离子流图(图 1)可以看出,4 种不同填充方法色谱柱分离的原油及沥青砂岩抽提物并不存在显著的差别,各种方法分离的正构烷烃均具有相同的奇数碳优势以及主峰碳数。在正构烷烃分布特征文方面,第 I 种方法对原油和沥青砂岩抽提物高碳数的吸附性能较差,其余的 3 种方法则表现出较好的一致性(图 2a、b)。

从正构烷烃相关参数的分布特征看(图 2c、d),4 种方法得到的碳优势指数(CPI)、奇偶优势比值(OEP)差异小,永 1 井原油的 CPI 为 1.18~1.19, OEP 为 1.17~1.20,而 $(nC_{21} + nC_{22}) / (nC_{27} + nC_{28})$ 为 3.43~4.18,轻重比 nC_{21}^- / nC_{22}^+ 为 0.63~0.76。为了表示这 4 种方法对生物标志物参数的差异性,采用生物标志物参数差异系数 $P_{\delta}^{①}$ 进行对

比分析,分析得到上述参数的 P_{δ} 分别为 0.08、0.03、0.18、0.17,因此,第 I 种方法对于低碳数的吸附性能好,而第 IV 种方法对于高碳数的吸附性能好,第 II、III 种方法介于前两种方法之间,对正构烷烃具有很好的吸附性能,这亦得到了塔中 31 井砂岩正构烷烃相关参数分布特征的佐证(图 2c、d)。因此,这 4 种方法对于原油与沥青砂岩抽提物的正构烷烃分离结果是相似的,第 I、IV 种方法分别对低碳数和高碳数的吸附性能较差,而第 II、III 种方法对于整个正构烷烃的分布均具有很好的吸附性能。

2.3 类异戊间二烯烷烃

类异戊间二烯烷烃中姥鲛烷(Pr)与植烷(Ph)的相对丰度对判断生源环境具有重要意义^[10-12]。因此,姥鲛烷与植烷的准确测定至关重要。永 1 井原油和塔中 31 井沥青砂岩抽提物的 Pr/Ph 分布范

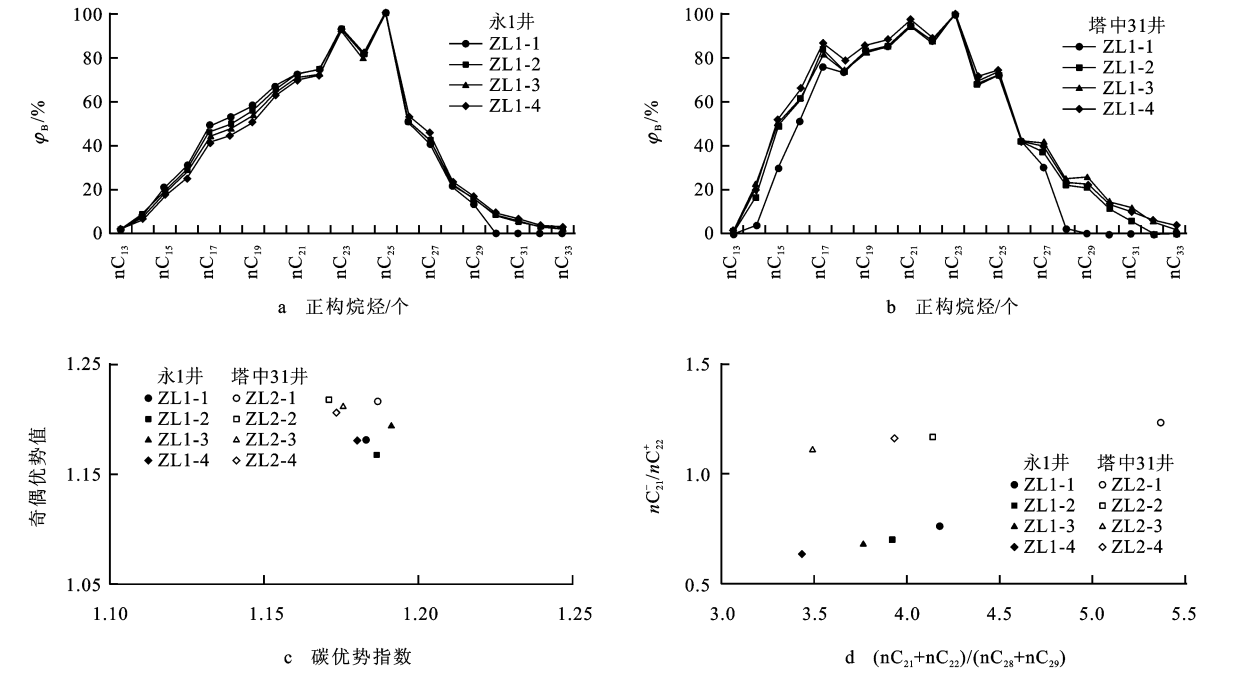


图 2 不同填充方法色谱柱分离原油及沥青砂岩抽提物中正构烷烃分布以及相关参数分布

Fig. 2 Biomarker Fingerprinting and Parameters of the Crude Oils and Bituminous Sandstone Extracts Separated by Chromatographic Columns with Different Packed Methods

围分别为 0.93~0.96 和 0.37~0.38,其 P_{δ} 均为 0.03。由此可见,4 种方法对于原油中类异戊二烯烷烃的相对丰度影响甚微,这与 4 种方法对类异戊间二烯烷烃的吸附性能差异均很小有关(图 3)。

2.4 五环三萜烷

C_{30} 重排藿烷/ C_{29} Ts^[13-14]、升藿烷指数^[11] 可指

示沉积古环境的氧化还原性。高相对丰度的伽马蜡烷指示有机质沉积时的强还原超盐度条件^[15-16]。 C_{31} 升藿烷 $22S / (22S + 22R)^{[17]}$ 、 $Ts / (Ts + Tm)$ 、 $C_{29} Ts / (C_{29} Ts + C_{29} 藿烷)^{[13-14]}$ 可以表征有机质热演化程度。从总离子流图(图 1)中可以看出, C_{30} 藿烷、 C_{29} 藿烷相对丰度的差异甚微。从永 1 井原油与塔中 31 井沥青砂岩抽提物中萜烷相关参数可以看出(表 2),这 4 种填充方法的 $Ts / (Ts + Tm)$ 、 C_{29} 藿烷/

①生物标志物参数(P)差异系数 $P_{\delta} = (P_{max} - P_{min}) / P_{max}$, P_{δ} 为 0~1

表 2 不同填充方法色谱柱分离的原油及沥青砂岩抽提物藿烷参数
Tab. 2 Hopane Parameters of the Crude Oils and Bituminous Sandstone Extracts
Separated by Chromatographic Columns with Different Packed Methods

编号	方法	Ts/ (Ts+Tm)	C ₂₉ 藿烷/ C ₃₀ 藿烷	C ₂₉ Ts/(C ₂₉ Ts+ C ₂₉ 藿烷)	C ₃₀ 重排 藿烷/C ₂₉ Ts	C ₃₁ 升藿烷 22S/ (22S+22R)	伽马蜡烷/ C ₃₀ 藿烷	升藿烷 指数
ZL1-1	I	0	0.44	0.11	0.33	0.57	0.46	0.078
ZL1-2	II	0	0.44	0.11	0.33	0.56	0.46	0.081
ZL1-3	III	0	0.44	0.11	0.31	0.57	0.45	0.080
ZL1-4	IV	0	0.43	0.11	0.34	0.58	0.44	0.078
P _δ		0	0.02	0	0.09	0.03	0.04	0.04
ZL2-1	I	0.44	0.24	0.27	0.73	0.61	1.30	0
ZL2-2	II	0.44	0.25	0.27	0.76	0.63	1.26	0
ZL2-3	III	0.43	0.25	0.28	0.73	0.61	1.27	0
ZL2-4	IV	0.45	0.25	0.26	0.73	0.61	1.29	0
P _δ		0.04	0.04	0.07	0.04	0.03	0.03	0

注: 藿烷参数比值系面积分数比
C₃₀ 藿烷、C₂₉ Ts/(C₂₉ Ts+C₂₉ 藿烷)、C₃₀ 重排藿烷/
C₂₉ Ts、C₃₁ 升藿烷 22S/(22S+22R)、伽马蜡烷/C₃₀
藿烷以及升藿烷指数等参数之间差别均甚微, 其
P_δ 均小于 0.10, 大部分小于 0.04, 表明这 4 种填充
方法对于藿烷系列的化合物吸附差异性均较小。

甾烷反映超盐环境^[21]。C₂₉ 甾烷 20S/(20S+20R)、
C₂₉ 甾烷 ββ/(αα+ββ)是表征烃源岩或原油特别有效
的成熟度参数^[13-14, 17]。重排甾烷/规则甾烷通常用
于鉴别原油是来源于碳酸盐岩还是碎屑岩烃源
岩^[13-14]。C₂₇-C₂₈-C₂₉ 甾烷三角图可用于区分不同烃
源岩的石油或相同烃源岩不同有机相的原油^[13-14]。

从永 1 井原油与塔中 31 井沥青砂岩抽提物中
甾烷相关参数(表 3)可以看出, 在这 4 种填充方法
中, (孕甾烷+升孕甾烷)/规则甾烷、ααα20R 甾烷
C₂₇/C₂₉、ααα20R 甾烷 C₂₈/C₂₉、C₂₉ 甾烷 20S/(20S+
20R)、C₂₉ 甾烷 ββ/(αα+ββ)等参数之间差异很小,
其 P_δ 均小于 0.06。在 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 甾烷三角图中
(图 4), 其差别亦甚微。这表明 4 种填充方法对于

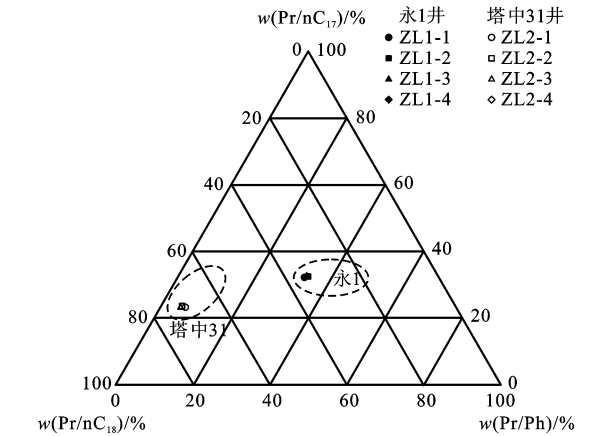


图 3 不同填充方法色谱柱分离原油及沥青砂岩
抽提物 Pr/ Ph-Pr/ nC₁₇-Ph/ nC₁₈ 的相对组成三角
Fig. 3 Triangular Diagram Showing the Relative Distribution
of Pr/ Ph-Pr/ nC₁₇-Ph/ nC₁₈ of the Crude Oils and Bituminous
Sandstone Extracts Separated by Chromatographic
Columns with Different Packed Methods

2.5 甾烷

甾烷化合物主要来源于植物、动物和细菌中的
甾醇类, 特别是真核生物隔膜中的类脂化合物成分,
在判断原油和沉积物有机质沉积环境、有机质输入
类型以及成熟度等方面具有重要的意义^[18]。高相对
丰度的 C₂₉ 甾烷可指示高等植物生源, C₂₇ 甾烷主要来
自藻类生源^[11, 19-20], ααα20RC₂₇/C₂₉ 甾烷、ααα20RC₂₈/
C₂₉ 甾烷可作为反映有机质生源参数。孕甾烷、升孕

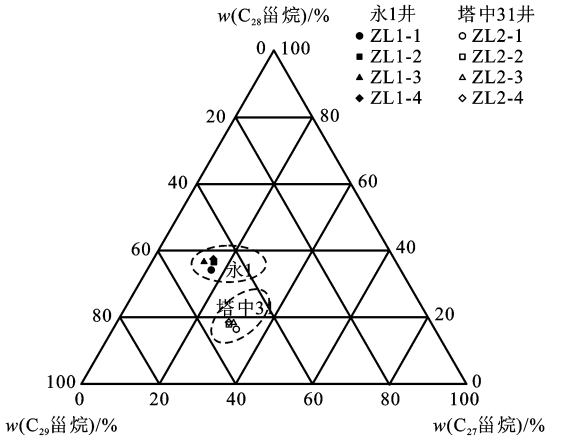


图 4 不同填充方法色谱柱分离原油及沥青砂岩抽
提物 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 甾烷的相对组成三角
Fig. 4 Triangular Diagram Showing the Relative Distribution
of C₂₇-C₂₈-C₂₉ Regular Steranes of the Crude Oils and
Bituminous Sandstone Extracts Separated by Chrom-
atographic Columns with Different Packed Methods

表 3 不同填充方法色谱柱分离原油及沥青砂岩抽提物甾烷参数

Tab. 2 Sterane Parameters of the Crude Oils and Bituminous Sandstone Extracts Separated by Chromatographic Columns with Different Packed Methods

编号	方法	(孕甾烷+升孕甾烷)/ 规则甾烷	$\alpha\alpha\alpha$ 20R 甾烷 C_{27}/C_{29}	$\alpha\alpha\alpha$ 20R 甾烷 C_{28}/C_{29}	C_{29} 甾烷 20S/ (20S+20R)	C_{29} 甾烷 $\beta\beta$ / ($\alpha\alpha+\beta\beta$)	重排甾烷/ 规则甾烷
ZL1-1	I	0.01	0.35	0.90	0.25	0.21	0.02
ZL1-2	II	0.01	0.34	0.92	0.25	0.20	0.05
ZL1-3	III	0.01	0.36	0.93	0.25	0.21	0.05
ZL1-4	IV	0.01	0.34	0.93	0.24	0.21	0.04
P_8		0	0.06	0.03	0.04	0.05	0.60
ZL2-1	I	0.03	0.59	0.44	0.36	0.35	0.06
ZL2-2	II	0.03	0.62	0.46	0.36	0.36	0.10
ZL2-3	III	0.03	0.59	0.45	0.35	0.37	0.10
ZL2-4	IV	0.03	0.59	0.44	0.36	0.36	0.11
P_8		0	0.05	0.04	0.03	0.05	0.45

注: 甾烷参数比值系面积分数比

规则甾烷和孕甾烷系列化合物吸附差异性均较小。但重排甾烷/规则甾烷之间却差别极大, 此参数在原油及沥青砂岩抽提物的差异系数分别高达 0.60 和 0.45, 第 I 种方法的重排甾烷/规则甾烷较其他 3 种方法均很小(表 2、图 5)。表明这 4 种不同方法对孕甾烷、升孕甾烷及规则甾烷吸附性能均较好; 对重排甾烷吸附性能差别很大, 这是由于第 I 种方法对重排甾烷的吸附性能较强所导致。

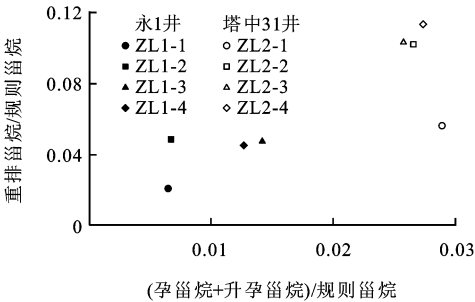


图 5 不同填充方法色谱柱分离原油及
沥青砂岩抽提物甾烷参数

Fig. 5 Cross-plots of Sterane Parameters of the Crude Oils and Bituminous Sandstone Extracts Separated by Chromatographic Columns with Different Packed Methods

影响生物标志物组成的因素十分复杂, 生物标志物除了受到母源性质、沉积环境和热成熟度 3 个方面^[22-23]的影响之外, 还可能受到试验分析方法的影响。因此, 应用生物标志进行原油族群划分和原油对比时, 应选用多个生物标志物参数, 进行多因素、多参数对比研究, 以消除试验产生的误差, 避免单一参数的局限性。

3 结语

(1)用 4 种填充方法, 即氧化铝(I)、上氧化铝下硅胶(II)、上硅胶下氧化铝(III)、硅胶(IV), 对原油及沥青砂岩抽提物族组分离均能达到较好的效果。

(2)4 种不同的填充方法对藿烷、规则甾烷、孕甾烷和升孕甾烷等化合物的相对丰度影响一般均较小, 因此, 不同分离方法得出的这些生物标志物数据之间可对比分析。

(3)4 种不同的填充方法对高碳数正构烷烃、重排甾烷等化合物相对丰度影响较大, 导致 $(nC_{21} + nC_{22})/(nC_{27} + nC_{28})$ 和轻重比 nC_{21}^-/nC_{22}^+ 、重排甾烷/规则甾烷等参数变化较大。

(4)应用生物标志物进行原油族群划分和油源对比时, 应进行多因素、多参数对比研究, 以消除试验产生的误差。

参考文献:

[1] SY/T 5119—1995, 岩石可溶有机物和原油族组分柱层析分离方法[S] .
[2] Later D W, Lee M L, Bartle K D, et al. Chemical Class Separation and Characterization of Organic Compounds in Synthetic Fuels[J] . Analytical Chemistry, 1981, 53(11): 1612-1620.
[3] 李勇志, 邓先梁, 俞惟乐. 对氧化铝和硅胶分离重质油组分性能的新认识[J] . 石油学报, 1998, 14(2): 75-80.
[4] 李勇志, 邓先梁, 俞惟乐. 氧化铝对长链正构烷烃的吸附性能[J] . 科学通报, 1998, 43(1): 53-55.

[5] Jiang C, Li M, van Duin A C T. Inadequate Separation of Saturate and Monoaromatic Hydrocarbons in Crude Oils and Rock Extracts by Alumina Column Chromatography[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(7/8): 751-756.

[6] 别道哲, 曹建平, 郑伦举. 原油及生油岩族组分旋转变薄层色谱分析[J]. 石油试验地质, 1999, 21(2): 184-187.

[7] 徐世平, 孙永革. 一种适用于沉积有机质族组分分离的微型柱色谱法[J]. 地球化学, 2006, 35(6): 681-688.

[8] 季 东, 关 平, 肖玉雄, 等. 原油极性分离法及其对解释原油碳同位素特征的作用[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 447-453.

[9] 孟志强, 秦 鹏, 刘景伟, 等. 有机抽提物族组分小柱状色谱分离[J]. 化学世界, 2006, 8(5): 271-272.

[10] Didyk B M, Simoneit B R T, Brassell S C, et al. Organic Geochemical Indicators of Palaeoenvironmental Conditions of Sedimentation[J]. Nature, 1978, 272: 216-222.

[11] Peters K E, Moldowan J M. Effects of Source, Thermal Maturity, and Biodegradation on the Distribution and Isomerization of Homohopanes in Petroleum[J]. Organic Geochemistry, 1991, 17(1): 47-61.

[12] Hughes W B, Holba A G, Dzou L I. The Ratios of Dibenzothiophene to Phenanthrene and Pristane to Phytane as Indicators of Depositional Environment and Lithology of Petroleum Source Rocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17): 3581-3598.

[13] Peters K E, Moldowan J M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

[14] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The Biomarker Guide: Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History[M]. Combridge: Cambridge University Press, 2005.

[15] Moldowan J M, Seifert W K, Gallegos E J. Relationship between Petroleum Composition and Depositional Environment of Petroleum Source Rocks[J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1985, 69(8): 1255-1268.

[16] Fu J M, Sheng G R, Peng P A, et al. Peculiarities of Salt Lake Sediments as Potential Source Rocks in China[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1/3): 119-126.

[17] Seifert W K, Moldowan J M. The Effect of Thermal Stress on Source Rock Quality as Measured by Hopane Stereochemistry[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1980, 12: 229-237.

[18] Tissot B P, Welte D H. Petroleum Formation and Occurrence [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978.

[19] Volkman J K. A Review of Sterol Markers for Marine and Terigenous Organic Matter [J]. Organic Geochemistry, 1986, 9(2): 83-99.

[20] Czochanska Z, Gilbert T D, Philp R P, et al. Geochemical Application of Sterane and Triterpane Biomarkers to a Description of Oils from the Taranaki Basin in New Zealand[J]. Organic Geochemistry, 1988, 12(2): 123-135.

[21] Ten Haven H L, de Leeuw J W, Peakman T M, et al. Anomalies in Steroid and Hopanoid Maturity Indices[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50(5): 853-855.

[22] 张枝焕, 关 强. 新疆三塘湖盆地二叠系油源分析[J]. 石油试验地质, 1998, 20(2): 174-181.

[23] 常象春, 王明镇, 韩作振. 试论适合叠合盆地的油源对比方法[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(4): 32-36.

(上接第 388 页)

[3] Sangster D F. Paleogeomorphology in the Exploration for Undiscovered Sandstone-Lead Deposits, Salmon River Basin, Nova Scotia[J]. CIM Bulletin, 1990, 83(4): 62-68.

[4] 宋 凯, 吕剑文, 凌升阶, 等. 鄂尔多斯盆地定边—吴旗地区前侏罗纪古地貌与油藏[J]. 古地志学报, 2003, 5(4): 497-508.

[5] 吴丽艳, 陈春强, 江春明, 等. 浅谈我国油气勘探中的古地貌恢复技术[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(4): 559-586.

[6] 徐国强, 李国蓉, 刘树根, 等. 塔里木盆地早海西期多次风化壳岩溶洞穴[J]. 地质学报, 2005, 79(4): 557-568.

[7] 代金友, 史若珩, 何顺利. 鄂尔多斯盆地中部气田沟槽识别新方法[J]. 天然气工业, 2006, 26(4): 26-28.

[8] 王家豪, 王 华, 赵忠新, 等. 层序地层学应用于古地貌分析——以塔河油田为例[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2003, 28(4): 425-430.

[9] 刘栓驹, 黄 杰, 王根久, 等. 碳酸盐岩潜山油藏古地貌及剩余油分布关系[J]. 石油学报, 1999, 20(2): 39-44.

[10] 丁晓琪, 张哨楠, 王少飞, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘镇泾油田长 6-2 沉积相研究[J]. 新疆地质, 2007, 25(1): 105-110.

[11] 周 瑞, 胡学智. 鄂尔多斯盆地西北部灵盐定地区油藏类型及其控制因素[J]. 石油实验地质, 2001, 23(4): 390-394.

[12] 喻 建, 宋江海, 向 惠. 鄂尔多斯盆地中生界隐蔽性油气藏成藏规律[J]. 天然气工业, 2004, 24(12): 35-40.

[13] 王 平, 周 义, 李海银. 靖安油田北东区局部构造与石油富集关系研究[J]. 地球科学与环境学报, 2003, 25(4): 9-12.

[14] 郭正权. 前侏罗纪古地貌刻画技术[J]. 低渗透油气田, 2001, 6(3): 64.

[15] 郭正权. 鄂尔多斯盆地侏罗系古地貌油田的形成条件与分布规律[J]. 杨 华. 低渗透油气田研究与实践. 北京: 石油工业出版社, 2001: 51-60.

[16] Chilingarian G V. Compaction of Coarse-grained Sediments [M]. New York: Elsevier Scientific Publish, 1975.

[17] 付 广, 许泽剑, 韩冬玲, 等. 不整合面在油气藏形成中的作用[J]. 大庆石油学院学报, 2001, 25(1): 1-4.

[18] 赵卫军, 支东明, 党玉芳, 等. 准噶尔盆地陆西地区侏罗系西山窑组顶界不整合结构特征及其与油气关系[J]. 新疆地质, 2007, 25(1): 92-96.