

文章编号:1001-6112(2010)04-0373-04

严重生物降解稠油成熟度判识

——以准噶尔盆地三台—北三台地区为例

路俊刚¹, 陈世加¹, 王绪龙², 陆林超¹, 陈雪¹, 王熠¹

(1. 西南石油大学 资源与环境学院, 成都 610500; 2. 中国石油 新疆油田分公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:严重生物降解作用形成的稠油轻重组分均遭损失, 其演化阶段性判识是油气成因研究的一个难题。该文以准噶尔盆地三台—北三台地区为例, 在前人研究的基础上, 进一步对 Ts/Tm 对成熟度的敏感性进行了分析, 认为在同源条件下, Ts/Tm 能有效的随成熟度增大而增大, 且抗生物降解能力强, 可以用来对严重生物降解原油成熟度进行判识。文章以此为指标指出三台—北三台地区重质稠油和储层沥青主要是低—未成熟阶段的原油并遭严重生物降解所致, 中质稠油主要是成熟阶段原油遭中等生物降解或散失所致。

关键词:生物降解; 储层沥青; 原油成熟度; Ts/Tm; 三台—北三台地区; 准噶尔盆地

中图分类号:TE133

文献标识码:A

MATURITY STUDY OF THE STRONG BIODEGRADATION VISCOUS OIL: TAKING THE SANTAI—BEISANTAI AREA OF JUNGGAR BASIN AS AN EXAMPLE

Lu Jungang¹, Chen Shijia¹, Wang Xulong², Lu Linchao¹, Chen Xue¹, Wang Yi¹

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Xinjiang Oil Field Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: When the oil is suffered from strong biodegradation, most hydrocarbon component (including sterane) is loss, and the common maturity parameters can hardly play their roles. So, how to distinguish the maturity of the strong biodegradation oil is one of the research puzzles. Based the previous research, this paper takes the Santai—Beisantai area of the Junggar Basin for example, analyses the dependability of Ts/Tm. It is pointed out that Ts/Tm increases with maturity and is hard to be biodegraded, and can be used to distinguish the maturity of different type of crude oil. The bitumen and heavy oil derived from the result that the crude oil at low evolutionary stage suffered from loss and strong biodegradation. The medium density oil comes from the result that oil at mature evolutionary stage suffered from loss and moderate biodegradation.

Key words: biodegradation; reservoir bitumen; maturity of crude oil; Ts/Tm; Santai—Beisantai region; Junggar Basin

稠油成因很多^[1-7], 生物降解作用形成的稠油在地层中广泛存在。原油通过与储层中的细菌发生作用从而导致正构烷烃、异构烷烃以及环烷烃依次受到破坏和消失, 烃组分大量损失, 油质变稠^[6-10]。降解严重时甾萜烷也会降解损失, 此时常用的判识原油成熟度的轻烃、中分子量烃和甾萜异构化等成熟度指标都不再适用, 如何表征这类稠油的演化阶段性成为油气成因研究中的一个难题。

本文以准噶尔盆地三台—北三台地区为例, 在前人研究的基础上, 进一步分析了 Ts/Tm 对成熟

度的敏感性, 认为在同源条件下, Ts/Tm 能有效的随成熟度增大而增大, 且抗生物降解能力强, 可以用来对严重生物降解原油进行成熟度判识。

1 地质概况

三台—北三台地区位于准噶尔盆地东部帐北断褶带南部, 东邻吉木萨尔凹陷, 西接阜康凹陷东斜坡, 北至 B56 井区, 南至阜康断裂带, 面积近 2 000 km²。该区自 20 世纪 80 年代进行勘探以来, 先后发现了北三台油田和三台油田; 油气藏类型以断鼻、断块、

收稿日期: 2009-09-26; 修订日期: 2010-06-09。

作者简介: 路俊刚(1980—), 男, 博士, 讲师, 从事石油天然气地质与地球化学研究与教学工作。E-mail: lujungang21@yahoo.com.cn。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB202305)及四川省重点学科项目(SZD0414)资助。

断背斜为主,油层层位多,从石炭系到第三系均发现有油气层,是一个勘探程度较高的地区。

该区钻揭地层自下而上为石炭系、二叠系平地泉组(P_2p)、梧桐沟组(P_3wt),三叠系韭菜园子组(T_1j)、烧房沟组(T_1s)、小泉沟群($T_{2-3}xq$),侏罗系八道湾组(J_1b)、三工河组(J_1s)、头屯河组(J_2t)、齐古组(J_3q),白垩系、第三系和第四系。

该区经历了多期构造运动,二叠系沉积以来经历了大的不整合至少有 11 次,其中属于强烈剥蚀的至少有 7 次,使该区南部第三系地层直接覆盖在三叠系之上,北三台北部则出现了侏罗系直接暴露地表的情况。

2 原油特征

2.1 原油分类

根据石油天然气储量计算规范(DZ/T 0217—2005),并结合研究区原油特征,本文将研究区原油分为 4 类:轻质油(密度小于 0.84 g/cm^3)、正常原油(密度为 $0.84\sim 0.88 \text{ g/cm}^3$)、中质油(密度为 $0.88\sim 0.92 \text{ g/cm}^3$)和重质油(密度大于 0.92 g/cm^3)。

而密度大于 0.9 g/cm^3 的原油成因较为特殊,除与演化阶段性有关外,还存在生物降解,粘度较大,普遍大于 $100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,本文称为稠油。并进一步将稠油分为 2 类:中质稠油(密度为 $0.9\sim 0.92 \text{ g/cm}^3$)和重质稠油(密度大于 0.92 g/cm^3)。

2.2 储层中沥青分布广泛

大量储层荧光片观察发现三台—北三台地区从石炭系到侏罗系储层均不同程度出现沥青(干沥青),充填于储层孔隙或裂缝中,在显微荧光镜下呈黑色。

2.3 稠油和含沥青储层抽提物普遍遭生物降解

三台—北三台地区经历多期构造运动,构造高部位多次被剥蚀,保存条件较差,原油生物降解严重。

如图 1 所示,不同密度原油的饱和烃色谱特征存在明显不同,密度小于 0.88 g/cm^3 的正常油和轻质油饱和烃色谱正构烷烃分布完整,保存条件较好;密度为 $0.88\sim 0.90 \text{ g/cm}^3$ 的中质油存在轻微的生物降解,主要以散失作用为主,正构烷烃保存较为完整;密度大于 0.90 g/cm^3 的中质稠油普遍遭中等生物降解,正构烷烃部分保存;重质稠油和储层沥青降解更为强烈,正构烷烃全部被降解。

3 成熟度判识指标选择

3.1 严重生物降解稠油判识指标分析

原油中不同生物标志化合物抗生物降解能力不

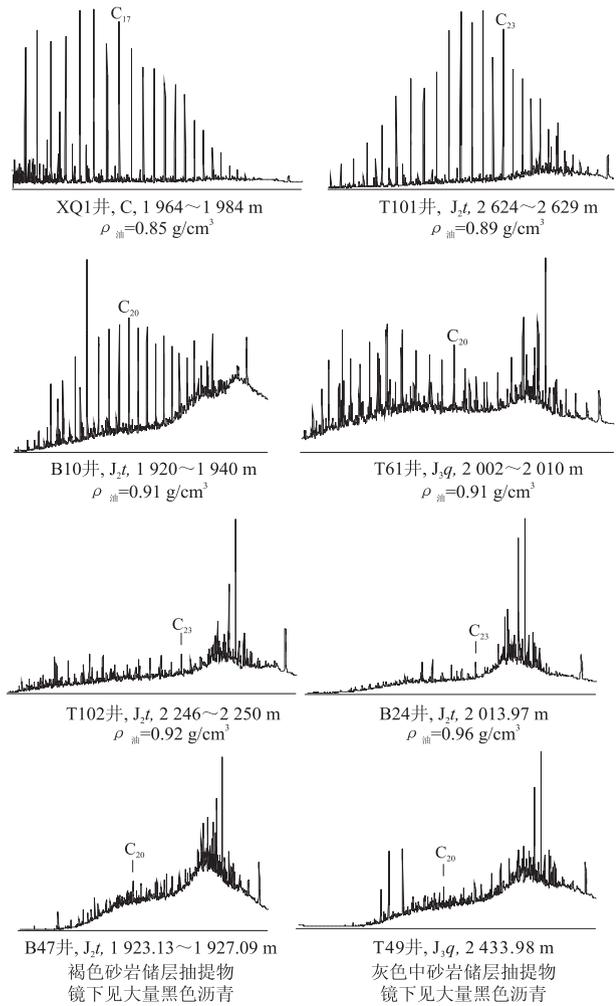


图 1 准东三台—北三台地区储层抽提物 and 不同密度原油饱和烃色谱对比
Fig. 1 Saturated hydrocarbon chromatograms contrast of oil and reservoir extract of Santai—Beisantai region in the Junggar Basin

同,一般按下列顺序增强:正构烷烃、类异戊二稀烷烃、甾烷、藿烷、重排藿烷、芳香烃。如果原油中出现 25-降藿烷,表明原油遭受严重生物降解,降解程度为十个等级划分中的第 6 级,此时正构烷烃、类异戊二稀烷烃被全部降解,甾烷也部分被降解^[8]。

三台—北三台地区原油普遍遭生物降解,特别是密度较高的重质稠油降解更为强烈,正构烷烃分布不完整,部分产物中出现了 25-降藿烷(图 2),说明其生物降解程度已经达到 6 级以上。按照生物降解序列,达到严重降解级别,此时甾烷等部分也被降解,判识原油成熟度的轻烃参数、甾烷异构化等参数已经不再适用。因此,如何更准确、有效的界定原油成熟度成为本地区原油成因判识的关键。

据文献^[11]报道, T_s 形成于富含粘土矿物的沉积物, T_s/T_m 受成熟度的影响明显,在相同来源的情况下,随成熟度的增大其比值增大,该参数在

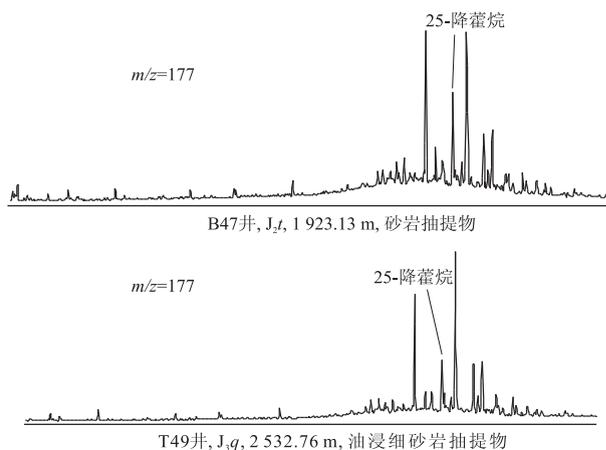


图2 准东三台—北三台地区
储层抽提物萜烷质量色谱图

Fig. 2 Terpene mass chromatograms of reservoir extract of Santai—Beisantai region in the Junggar Basin

生烃高峰期后原油中还可继续适用,可用于低成熟、成熟和高成熟原油成熟度的判别,是成熟度判别较好的指标。而且 T_s/T_m 抗生物降解的能力很强,可用于严重生物降解原油的成熟度判别。

3.2 T_s/T_m 判别原油成熟度可靠性分析

研究区原油主要来源于二叠系平地泉组(另文发表),来源较为单一,符合 T_s/T_m 判识的同源条件,为了进一步验证 T_s/T_m 判别原油成熟度的可靠性,将其与其他常用参数进行对比。

3.2.1 与甾烷异构化成熟度参数对比

生物标志化合物来源于生物有机质,分布在原油或沉积岩有机质中,在成岩演化过程中碳骨架保持不变的化合物,又称“分子化石”,它能提供油源、沉积环境和成熟度等方面的详细信息,是原油成因研究中最有力的工具。为了说明 T_s/T_m 比值在成熟度判别方面的可靠性和敏感性,将其与经典的甾烷构型成熟度参数 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 进行对比。

T60井资料较多,3 166.23~3 420.96 m 范围内储层抽提物做了系统的色质分析,正构烷烃分布完整(图3),且没有出现25-降萜烷,说明其没有遭受生物降解,此时高分子化合物甾萜烷保存较好,符合甾烷异构化成熟度参数 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 的适用范围。

如表1所示,甾烷异构化成熟度参数 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 与 T_s/T_m 之间具有较好的相关性,随成熟度增大 T_s/T_m 相应增大,说明 T_s/T_m 指标表征原油成熟度具有较强的敏感性和可靠性。

3.2.2 与轻烃成熟度参数对比

轻烃在原油中的含量较高,其成熟度参数具有较高的可靠性^[12]。研究中选择保存条件较好的原

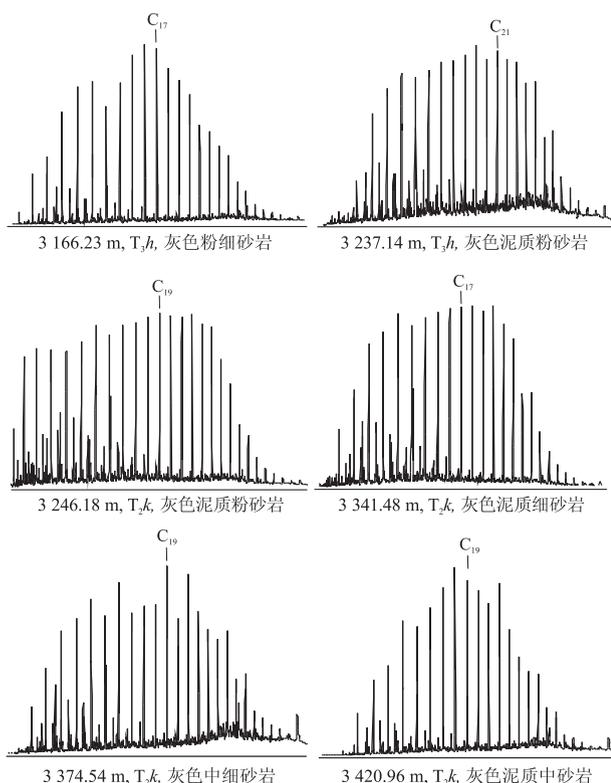


图3 准东三台—北三台地区 T60 井储层抽提物色谱图

Fig. 3 Reservoir extract chromatograms of different strata of Well T60 in the Junggar Basin

表1 准东三台—北三台地区
T60井储层抽提物成熟度参数对比

Table 1 The reservoir extract maturity index contrast of different strata of Well T60 in the Junggar Basin

样品深度/m	层位	岩石定名	$C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$	T_s/T_m
3 166.23	T ₃ h	灰色粉细砂岩	0.49	0.43
3 237.14	T ₃ h	灰色泥质粉砂岩	0.50	0.44
3 246.18	T ₂ k	灰色泥质粉砂岩	0.47	0.30
3 341.48	T ₂ k	灰色泥质细砂岩	0.48	0.24
3 374.54	T ₂ k	灰色中细砂岩	0.46	0.27
3 420.96	T ₂ k	灰色泥质中砂岩	0.42	0.26

油样品,计算其轻烃成熟度参数并与 T_s/T_m 进行对比。

如表2所示,XQ1井(C)、F10井(C)、F5井(T₂₋₃xq)轻烃成熟度参数庚烷值(H)和异庚烷值(I)都较高,按照判别标准^[13],应属于高成熟阶段的产物。相应的这些井的 T_s/T_m 也较高,分布在1.2~2.05范围内,是目前发现的原油成熟度最高的,也属于高成熟阶段。

3.2.3 T_s/T_m 比值与源岩 R_o 的关系

统计研究区二叠系平地泉组源岩抽提物 T_s/T_m 和 R_o ,并作图(图4),发现 T_s/T_m 随源岩 R_o 增大而增大,并存在较好的对应关系。

表 2 准东三台—北三台地区
XQ1、F10 和 F5 等井原油成熟度参数对比
Table 2 The oil maturity index contrast
of XQ1、F10 and F5 well, the Junggar Basin

井号	层位	原油密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	Ts/Tm	庚烷值 (H)	异庚烷值 (I)
XQ1	C	0.84	1.57	28.71	2.26
F10	C	0.81	1.20	32.72	1.42
F5	T ₂₋₃ xq	0.84	2.05	32.72	1.42

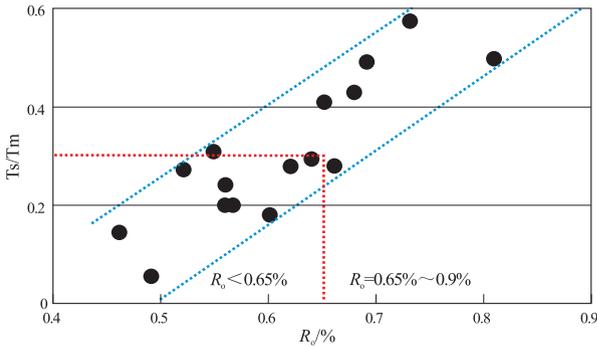


图 4 准东三台—北三台地区
源岩 R_o 与抽提物 Ts/Tm 比值关系

Fig. 4 Relationship between Ts/Tm ratio of source rock extract and R_o of kerogen in the Junggar Basin

综上所述,成熟度参数 Ts/Tm 具有较强的敏感性,与常用的生物标志化合物对比参数、原油轻烃参数和源岩 R_o 等都具有很好的对应关系,随成熟度增大而增大,而且抗生物降解能力很强,可以用来表征三台—北三台地区不同类型原油(包括降解稠油)的演化程度。

4 成熟度判识

如图 5 所示,按照 Ts/Tm 值分布可将研究区原油分为 3 部分:含沥青的储层抽提物重质稠油 Ts/Tm 主要分布 0.2~0.3 之间;中质稠油和正常原油 Ts/Tm 值分布在同一个区间,为 0.3~0.6,说明其成熟度一致;而轻质油 Ts/Tm 值分布在大于 0.6 的区域内。结合源岩 R_o 和 Ts/Tm 的对应关系(图 4),沥青和重质稠油 Ts/Tm 与成熟度 $R_o < 0.65\%$ 的源岩抽提物一致,属于低—未成熟阶段产物;中质原油和正常油 Ts/Tm 与成熟度 $R_o = 0.65\% \sim 0.9\%$ 的源岩抽提物一致,为成熟阶段;轻质油为高成熟阶段产物。

5 结论

1)研究区储层沥青和稠油均遭生物降解,中质稠油遭中等生物降解,重质稠油和储层抽提物遭强烈生物降解,烃组分大量损失,通常用来表征成熟

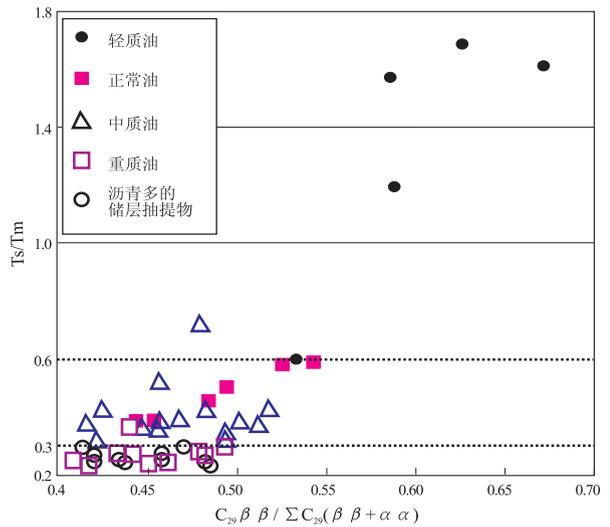


图 5 准东三台—北三台地区不同密度原油和储层抽提物 Ts/Tm 与 $C_{29} \beta\beta / \sum C_{29}(\beta\beta + \alpha\alpha)$ 关系
Fig. 5 Relationship between Ts/Tm ratio and $C_{29} \beta\beta / \sum C_{29}(\beta\beta + \alpha\alpha)$ ratio of oil and reservoir extract in the Junggar Basin

度的轻烃参数、甾烷异构化等参数已经不能适用。

2)通过 Ts/Tm 与甾烷异构化、轻烃和源岩 R_o 对比表明,对于同源产物 Ts/Tm 判识原油成熟度具有较强的敏感性,随成熟度的增大而增大,适用范围广,且其抗生物降解的能力强,可用于严重生物降解原油和沥青的成熟度判识。

3)研究区原油主要来源于本地二叠系平地泉组源岩,具同源性质。采用 Ts/Tm 对该原油成熟度进行判识,认为重质稠油和储层沥青为低—未成熟产物,中质稠油和正常油为成熟阶段产物,轻质油为高成熟阶段产物。

参考文献:

- [1] BLANC P, CONNAN J. Origin and occurrence of 25-norhopanes; a statistical study [J]. Org Geochem, 1992, 18(6): 813-828.
- [2] 王顺玉,王廷栋. 气侵对油气分布规律的影响[J]. 天然气工业, 1998, 18(5): 91-93.
- [3] 李建新,杨斌,何丽蓉,等. 准噶尔盆地西北缘稠油成因和早期成烃机制的探讨[J]. 新疆石油地质, 1993, 14(3): 239-249.
- [4] BAILEY N J L, KROUSE H R, EVANS C R. Alteration of crude oils by waters and bacteria: Evidence from Geochemical and isotope studies [J]. AAPG Bull, 1973, 57(7): 1276-1290.
- [5] LAFARGUE E, THIEZ P L. Effect of water washing on light ends compositional heterogeneity [J]. Org Geochem, 1996, 24(12): 1141-1150.
- [6] KUO LUNGCHUAN. An experimental study of crude oil alteration in reservoir rocks by water washing [J]. Org Geochem, 1994, 21(5): 465-479.

[4] 陈世加,付晓文,沈昭国,等. 天然气分步捕获原理及在成藏研究中的作用[J]. 西南石油学院学报,2001,23(5):4-5.

[5] 戴金星,裴锡古,戚厚发. 中国天然气地质学[M]. 北京:石油工业出版社,1992.

[6] THOMPSON K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbon [J]. *Geo Chim et Cosmoch Acta*,1983, 47(2):303-316.

[7] BLANC P, CONNAN J, Origin and occurrence of 25-norhopanes: a statistical study [J]. *OrgGeochem*, 1992, 18(6): 813-828.

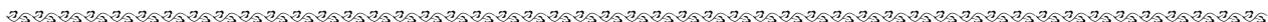
[8] CURIALE J A, BROMLEY B W. Migration induced compositional changes in oils and condensates of a single field[J]. *Org Geochem*,1996,24(12):1097-1113.

[9] 倪春华,包建平,顾忆. 生物降解作用对芳烃生物标志物参数的影响研究[J]. 石油实验地质,2008,30(4):386-389.

[10] 倪春华,包建平,梁世友. 渤海湾盆地渤中凹陷原油成熟度的多参数综合评价[J]. 石油实验地质,2009,31(4):399-402.

[11] 彼得斯 K E, 莫尔多万 J M. 生物标记化合物指南[M]. 姜乃煌,张水昌,译. 北京:石油工业出版社,1995.

(编辑 黄娟)



(上接第 376 页)

[7] HEAD I M, JONES D M, LARTER, S R. Biological activity in the deep subsurface and the origin of heavy oil[J]. *Nature*,2003,426:344-352.

[8] 张渠,宋晓莹,张志荣. 原油中甾烷的生物降解模拟实验研究[J]. 石油实验地质,2007,29(1):99-103.

[9] 袁莉,包建平. 生物降解作用对原油中烷基萘分布与组成特征的影响[J]. 石油实验地质,2009,31(5):512-515.

[10] 倪春华,包建平,顾忆. 生物降解作用对芳烃生物标志物参数的影响研究[J]. 石油实验地质,2008,30(4):386-389.

[11] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. New Jersey: Prentice Hall,1993:110-265.

[12] PHILIPPI C T. The deep subsurface temperature controlled origin of the gaseous and gasoline-range hydrocarbons of petroleum [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1975, 39: 1353-1373.

[13] THOMPSON K F M. Light hydrocarbons in subsurface sediments[J]. *Geochim Cosmochim Acta*,1979,43:657-672.

(编辑 徐文明)



(上接第 381 页)

Bakken-derived oils in Madison Group reservoirs[J]. *Organic Geochemistry*,2002,33(7):761-787.

[18] ZHANG SHUICHANG, LIANG DIGANG, GONG ZAISHENG, et al. Geochemistry of petroleum systems in the eastern Pearl River Mouth Basin: evidence for mixed oils[J]. *Organic Geochemistry*,2003,34(7):971-991.

[19] 王文军,宋宁,姜乃煌,等. 未熟油与成熟油的混源实验、混源理论图版及其应用[J]. 石油勘探与开发,1999,26(4):34-37.

[20] 陈建平,邓春萍,宋孚庆,等. 用生物标志物定量计算混合原

油油源的数学模型[J]. 地球化学,2007,36(2):205-214.

[21] 梁狄刚,陈建平. 中国南方高、过成熟区海相油源对比问题[J]. 石油勘探与开发,2005,32(2):8-14.

[22] 杜德文,孟宪伟,王永吉,等. 沉积物物源组成的定量判别方法及其在冲绳海槽的应用[J]. 海洋与湖沼,1999,30(5):532-539.

[23] PETERS K E, RAMOS L S, ZUMBERGE J E, et al. Deconvoluting mixed crude oil in Prudhoe Bay Field, North Slope, Alaska[J]. *Organic Geochemistry*,2008,39(3):623-645.

(编辑 韩 或)