

# 应用激光探针技术评价烃源岩成熟度 ——以东营凹陷生油岩研究为例\*

郭汝泰 王建宝 高喜龙 鹿洪友 肖贤明\*\*

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

**摘要** 我国第三纪含油气盆地生油岩由于存在明显镜质组反射率抑制作用, 长期以来, 生油岩成熟度评价一直是未解决的难题. 激光探针技术是目前解决这类问题较可靠的方法. 应用澳大利亚石油资源研究所激光探针对东营凹陷典型烃源岩成熟度进行了系统研究, 结果表明该区烃源岩镜质组反射率存在明显的抑制作用, 且母质类型越好, 抑制程度越强, I型为0.20%~0.25%; II<sub>1</sub>型为0.15%~0.20%; II<sub>2</sub>型为0.10%~0.20%; III型为0.0~0.10%. 在此基础上, 进一步根据研究结果及生油岩母质类型, 建立起了应用实测镜质组反射率( $MVR_o$ )得到烃源岩校正反射率( $EqVR_o$ )的公式为: I型  $EqVR_o = MVR_o + 0.25\%$ ; II<sub>1</sub>型  $EqVR_o = MVR_o + 0.20\%$ ; II<sub>2</sub>型  $EqVR_o = MVR_o + 0.15\%$ ; III型  $EqVR_o = MVR_o + 0.05\%$ . 研究结果对于该区烃源岩成熟度评价及油气勘探具有重要指导意义.

**关键词** 镜质组 反射率抑制作用 东营凹陷 激光显微荧光探针 烃源岩成熟度

长期以来, 烃源岩成熟度一直是烃源岩评价的弱点与难点. 济阳拗陷东营凹陷早第三系沙三段下部( $ES_3^1$ )与沙四段上部( $ES_4^2$ )烃源岩生烃母质以II<sub>1</sub>型与I型为主, 实测镜质组反射率存在明显的抑制作用<sup>[1]</sup>. 关于生油岩镜质组反射率的抑制作用问题, 至今国内还没有完善的解决方法. 近年来, 国内外学者致力于发展一些新的成熟度指标, 用以补偿镜质组反射率的不足, 如荧光参数, 生物标志物参数, 镜质组反射率增长动力学计算, 以及激光探针技术<sup>[2~9]</sup>. 其中, 最直接、最可靠、应用最成功的是激光探针技术<sup>[3,5~7,9]</sup>. 本研究应用此技术对东营凹陷 $ES_3^1$ 与 $ES_4^2$ 典型烃源岩成熟度进行了标定, 试图建立起一种应用实测镜质组反射率( $MVR_o$ )与烃源岩母质类型综合评价烃源岩成熟度的方法.

## 1 原理与方法

激光探针技术也简称FAMM技术, 它是应用多组分荧光特征确定烃源岩成熟度的方法. 发明人澳大利亚CSIRO石油资源研究所Wilkins博士<sup>[3]</sup>使

用的仪器是自行设计与组装的激光荧光探针, 通过测定镜质组荧光强度变化, 来校正镜质组反射率. 所得参数为 $I_0$ : 开始激发时的荧光强度值;  $I_{400}$ : 激发400S后的相对荧光强度值;  $R$ (荧光强度比): 定义为 $I_{400}/I_0$ .

图1是所建立起的模式图, 也称 $R-I_{400}-MVR_o$ 相关模式图. 生油岩校正镜质组反射率( $EqVR_o$ )可由两种方法推断出来:

其一是应用实测镜质组反射率( $MVR_o$ )与校正曲线确定. 如图1中, SL121号样, 实测 $MVR_o = 0.46\%$ , 根据其荧光参数, 该样品在模式图中处于B点, 校正值为0.25, 校正后的 $MVR_o = 0.71\%$ .

其二是应用实测镜质组 $I_{400}-R$ 相关点的平均值向标准曲线(也称J曲线)引平行线, 根据其交点在图中的位置直接求取校正后的反射率. 如图1中, SL121号样镜质组 $R-I_{400}$ 点平均值与标准J曲线的交点为A, 读取反射率为0.70%.

在镜质组反射率测定较准确的情况下, 用两种方法所确定的 $EqVR_o$ 非常接近. 本研究选择第二

2002-10-15 收稿, 2003-02-12 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40072043)

\*\* 联系人, E-mail: xmxiao@gig.ac.cn

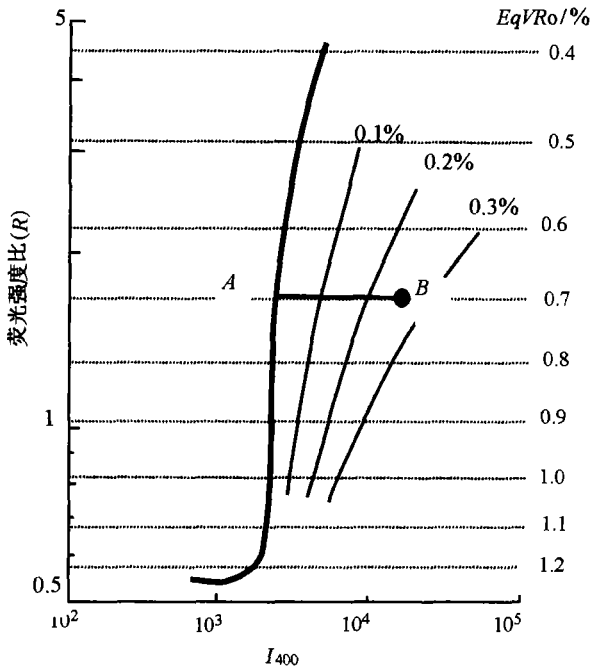


图1 应用激光探针技术荧光参数校正镜质组  $MVR_o$ 。模式图引自文献[3]。样品 SL121, 实测  $MVR_o=0.46\%$ 。校正方法 1:  $EqVR_o=0.71\%$ ; 校正方法 2:  $EqVR_o=0.70\%$

种方法直接确定  $EqVR_o$ 。

大量研究证实, 应用激光探针方法确定  $EqVR_o$  在  $MVR_o$  0.30% ~ 1.2% 范围内具有很高的可靠性<sup>[3]</sup>, 对于 I 型、II 型烃源岩是目前比较公认的最可靠的成熟度指标。

## 2 样品与实验

研究样品共 40 个, 取自东营凹陷利津-民丰洼陷与牛庄洼陷, 样品类型包括煤(III型)、II型及I型

生油岩, 对其中 15 个典型样品作激光探针分析, 样品地质地球化学特征见表 1。因激光探针分析十分昂贵, 本研究采用的方法是用这 15 个样品建立起该地区  $ES_3$  与  $ES_4$  不同类型生油岩由实测  $MVR_o$  得到校正镜质组反射率( $EqVR_o$ )的计算公式, 然后应用此校正公式确定本区其他烃源岩样品的成熟度。

本研究激光探针实验在澳大利亚 CSIRO 石油资源研究所现代有机岩石学中心完成, 使用仪器为该中心专利产品: Microdil-28 型激光探针, 实验条件与方法见文献[3, 5]。本区烃源岩典型的特点是均发现有一定数量镜质组, 且镜质组沿岩石层理方向呈不规则条带状分布, 显示其原生性。镜质组反射率测定在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完成, 使用仪器为 MPV3 显微光度计, 为保证测定结果的可靠性, 每个样品测定数在 20 个点以上。本研究对全岩及对应干酪根样品进行了镜质组反射率测定。结果见表 2。从中可见, 总的来讲, 干酪根样品实测  $MVR_o$  要略高于对应全岩  $MVR_o$  实测值, 尤其是对于 I 型干酪根, 这一规律更加明显, 差值可达 0.10% ~ 0.05%。主要原因是在全岩中镜质组较难抛光, 导致其实测镜质组反射率比干酪根样品要低。本研究采用干酪根样品实测  $MVR_o$  进行讨论。

## 3 结果与讨论

表 1 是本研究 15 个重点研究样品镜质组反射率实测结果。根据区域地质背景资料, 这些样品明显受到镜质组反射率抑制作用影响, 且抑制程度与母质类型有关。

表 1 所研究东营凹陷生油岩地质地化特征

样品号	孔号	深度/m	时代	岩石类型	TOC/%	Rock-Eval			母质类型
						$T_{max}/^{\circ}C$	$S_2/mg \cdot g$	HI/ $mg \cdot g$ , TOC	
SL138	L38	2805	ES <sub>3</sub>	灰褐泥岩	1.02	434	3.92	384	II <sub>1</sub>
SL143	L38	3046	ES <sub>3</sub>	灰褐泥岩	1.60	433	5.79	362	II <sub>1</sub>
SL148	L38	3188	ES <sub>3</sub>	灰黑泥岩	2.95	440	15.78	535	II <sub>1</sub>
SL151	L38	3253	ES <sub>3</sub>	灰黑泥岩	1.91	440	7.26	380	II <sub>1</sub>
SL152	L38	3310	ES <sub>3</sub>	灰黑泥岩	1.51	437	5.80	384	II <sub>1</sub>
SL92	T73	2497	ES <sub>3</sub>	灰褐泥岩	1.66	435	4.01	241	II <sub>2</sub>
SL93	T73	2893	ES <sub>3</sub>	褐色泥岩	2.04	437	8.40	412	II <sub>1</sub>
SL94	T73	2994	ES <sub>3</sub>	黑褐泥岩	2.56	441	11.05	432	II <sub>1</sub>
SL97	T73	3377	ES <sub>3</sub>	黑褐泥岩	2.08	444	6.32	304	II <sub>2</sub>
SL98	T73	3403	ES <sub>3</sub>	黑褐泥岩	2.18	448	8.95	411	II <sub>1</sub>
SL101	Y182	2238	ES <sub>3</sub>	煤	49.54	434	75.4	152	III
SL103	Y182	2506	ES <sub>3</sub>	黑褐泥岩	1.54	436	4.07	264	II <sub>2</sub>
SL121	W7	2630	ES <sub>4</sub>	灰褐页岩	4.01	439	24.7	616	I
SL126	W35	2172	ES <sub>4</sub>	灰褐页岩	4.34	438	27.66	637	I
SL128	W128	3731	ES <sub>4</sub>	灰黑页岩	2.95	458	4.77	161	I

表2 东营凹陷生油岩实测 MVR<sub>o</sub> 与校正 EqVR<sub>o</sub> 对比

样品号	孔号	深度/m	时代	岩石类型	母质类型	全岩实测 MVR <sub>o</sub> /%	干酪根实测 MVR <sub>o</sub> /%	EqVR <sub>o</sub> /%
SL138	L38	2805	ES <sub>3</sub>	灰褐泥岩	II <sub>1</sub>	0.49	0.49	0.66
SL143	L38	3046	ES <sub>3</sub>	灰褐泥岩	II <sub>1</sub>	0.54	0.54	0.74
SL148	L38	3188	ES <sub>3</sub>	灰黑泥岩	II <sub>1</sub>	0.58	0.59	0.79
SL151	L38	3253	ES <sub>3</sub>	灰黑泥岩	II <sub>1</sub>	0.64	0.60	0.82
SL152	L38	3310	ES <sub>3</sub>	灰黑泥岩	II <sub>1</sub>	0.53	0.65	0.85
SL92	T73	2497	ES <sub>3</sub>	灰褐泥岩	II <sub>2</sub>	0.47	0.46	0.60
SL93	T73	2893	ES <sub>3</sub>	褐色泥岩	II <sub>1</sub>	0.46	0.48	0.68
SL94	T73	2994	ES <sub>3</sub>	黑褐泥岩	II <sub>1</sub>	0.50	0.59	0.80
SL97	T73	3377	ES <sub>3</sub>	黑褐泥岩	II <sub>2</sub>	0.64	0.62	0.82
SL98	T73	3403	ES <sub>3</sub>	黑褐泥岩	II <sub>1</sub>	0.67	0.67	0.86
SL101	Y182	2238	ES <sub>3</sub>	煤	III	0.53	0.53	0.55
SL103	Y182	2506	ES <sub>3</sub>	黑褐泥岩	II <sub>2</sub>	0.53	0.54	0.68
SL121	W7	2630	ES <sub>4</sub>	灰褐页岩	I	0.40	0.50	0.76
SL126	W35	2172	ES <sub>4</sub>	灰褐页岩	I	0.30	0.43	0.65
SL128	W128	3731	ES <sub>4</sub>	灰黑页岩	I	0.78	0.82	1.08

表2、图2列出了典型样品激光探针分析结果，可得到如下几点认识：

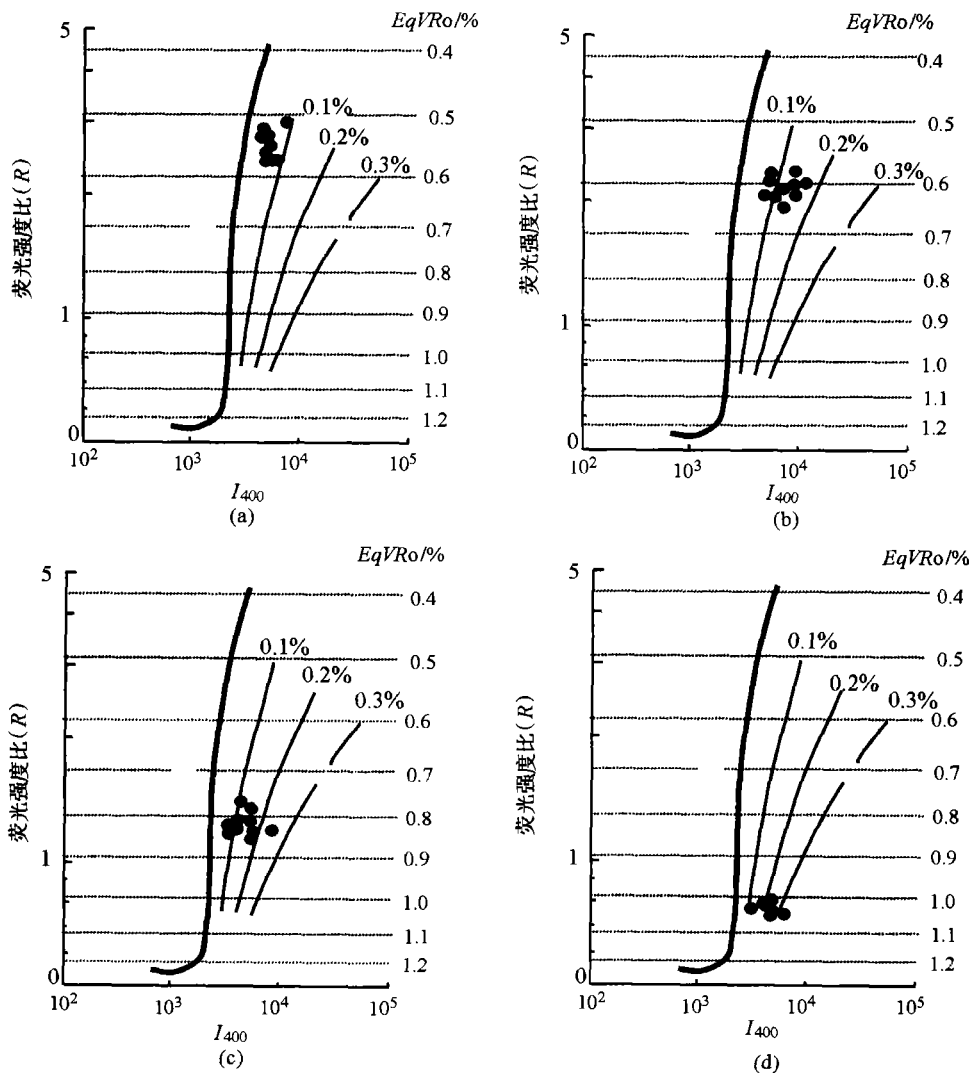


图2 东营凹陷典型生油岩激光显微荧光探针分析结果

(a) Y182井, 2238 m, 煤样; (b) T73井, 2497 m, 暗色泥岩; (c) SL73井, 3377 m, 暗色泥岩; (d) W128井, 3731 m, 黑色泥岩

(1) 本区生油岩中镜质组  $I_{400-R}$  相关点较分散, 只有煤样镜质组实测点较集中, 说明生油岩中镜质组成因较复杂, 实测镜质组  $MVR_o$  值作为烃源岩成熟度具有高度不可靠性。

(2) 除煤样外, 本区烃源岩存在明显的反射率抑制作用, 而且抑制程度不等, 一般的规律是母质类型越好, 镜质组反射率抑制作用越强;

(3) 虽然成熟度本身对镜质组反射率抑制程度有一定影响, 但是在高成熟阶段仍是明显的(图2)。

大量研究表明, 烃源岩镜质组反射率抑制程度与其母质类型有关。根据本研究样品, 圈定出本区生油岩镜质组反射率抑制程度大致为(图3): III型: 0.0~0.1%; II<sub>2</sub>型: 0.10%~0.15%; II<sub>1</sub>型: 0.15%~0.25%; I型: 0.20%~0.35%。取其平均值, 则本区生油岩实测与校正  $EqVR_o$  的关系为: I型:  $EqVR_o = MVR_o + 0.25(\%)$ ; II<sub>1</sub>型:  $EqVR_o = MVR_o + 0.20\%$ ; II<sub>2</sub>型:  $EqVR_o = MVR_o + 0.15\%$ ; III型:  $EqVR_o = MVR_o + 0.05\%$ 。因此, 当知道烃源岩母质, 根据实测镜质组  $MVR_o$ , 应用上述公式, 并可确定生油岩等效镜质组反射率, 较精确评价烃源岩成熟度。

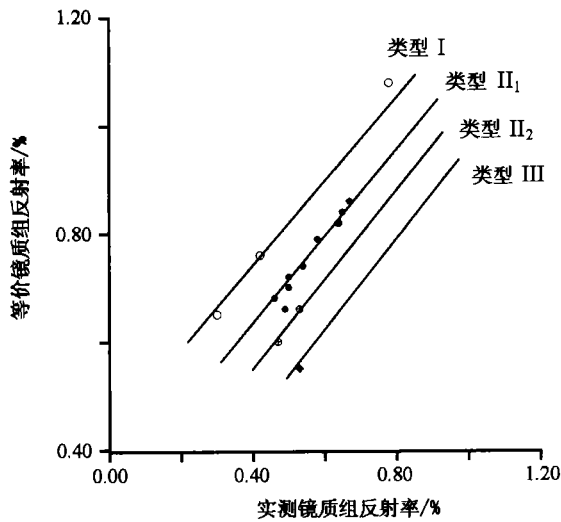


图3 东营凹陷生油岩实测镜质组反射率( $MVR_o$ )与校正镜质组反射率( $EqVR_o$ )的关系校正镜质组反射率由激光探针技术确定

按本研究方法, 对东营凹陷40块烃源岩成熟度进行了标定, 并分别建立起了东营凹陷  $ES_3^1$  与  $ES_4^2$  生油岩埋深与  $EqVR_o$  相关图(图4与图5), 可见, 在等埋深的情况下,  $EqVR_o$  比  $MVR_o$  要大0.15%~0.25%。本研究样品埋深与  $EqVR_o$  呈非

常好的相关性, 其相关性优于样品埋深与实测  $MVR_o$  的相关性。

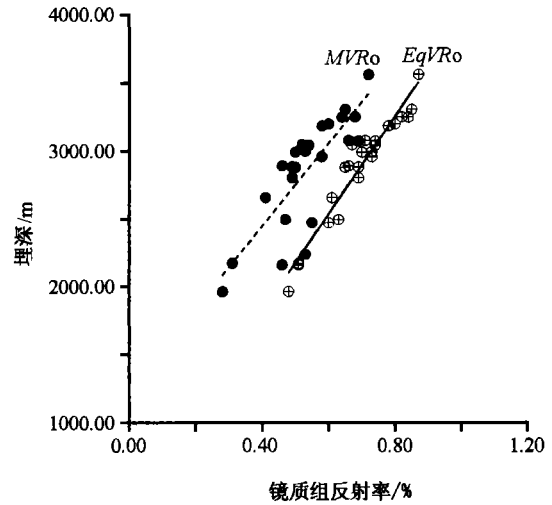


图4 东营凹陷  $ES_3$  生油岩埋深与实测镜质组反射率( $MVR_o$ )与校正镜质组反射率( $EqVR_o$ )的关系可见埋深— $EqVR_o$  关系中数据点仍较分散, 主要因为样品取自不同生油洼陷, 受沉降—埋藏史的影响

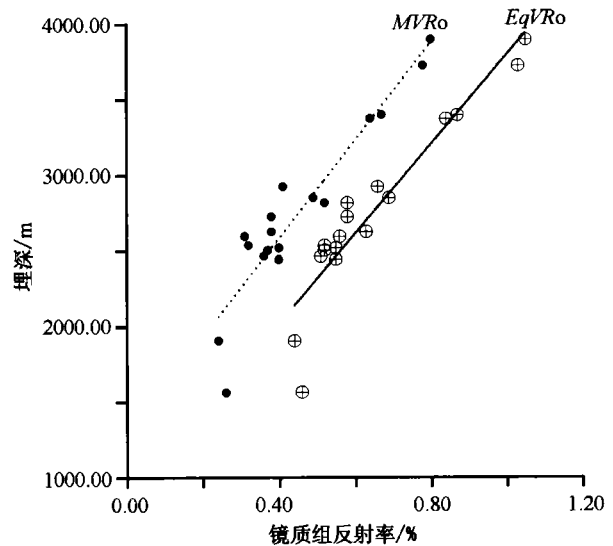


图5 东营凹陷  $ES_4$  生油岩埋深与实测镜质组反射率( $MVR_o$ )与校正镜质组反射率( $EqVR_o$ )的关系可见埋深( $H$ )— $EqVR_o$  关系中数据点仍较分散, 主要因为样品取自不同生油洼陷, 受沉降—埋藏史的影响

如按  $MVR_o = 0.6\%$  作为生油门限, 根据本研究结果, 则埋深为2500m, 生油峰期出现在3750m左右, 生油死限出现在4000m左右。

根据以往的研究, 东营凹陷牛庄洼陷南部斜坡存在低成熟-未成熟石油, 并认为该洼陷  $ES_4^2$  褐色页

岩为其母岩。该洼陷生油岩实际地球化学资料表明,牛庄洼陷  $ES_4^2$  页岩烃转化率在 2200 m 明显增加,峰值出现在 2700 m 以下<sup>[1]</sup>。按以往的研究结果,对应此深度  $MVR_o$  分别在 0.30% 与 0.50% 左右。按本研究结果,对应此深度  $MVR_o$  分别在 0.50% 与 0.70% 左右。因此,这套烃源岩在 2200 m 以下实际上已进入低成熟,开始明显生烃。本研究成果比以往确定的该区烃源岩成熟度平均要高  $MVR_o$  0.20% 左右。早期研究镜质组反射率偏低的原因是存在镜质组反射率抑制作用。因此,已往所划归的那些所谓未成熟生油岩,按本研究观点,实际上应划归在低成熟生油岩范畴,在牛庄凹陷未熟油的问题应看作是一个特殊地质现象,而低成熟油应当是较普遍的。

#### 4 结论

(1) 东营凹陷  $ES_3^1$  与  $ES_4^2$  生油岩镜质组反射率具有明显的抑制作用,其抑制程度与母质类型有关, I 型为 0.25% ~ 0.30%;  $II_1$  型为 0.15% ~ 0.25%;  $II_2$  型为 0.10% ~ 0.20%; III 型为 0.0 ~ 0.10%。

(2) 根据实测镜质组反射率与生油岩母质类型,建立起如下公式确定生油岩成熟度: I 型:  $E_qVR_o = MVR_o + 0.25\%$ ;  $II_1$  型:  $E_qVR_o = MVR_o + 0.20\%$ ;  $II_2$  型:  $E_qVR_o = MVR_o + 0.15\%$ ; III 型:  $E_qVR_o = MVR_o + 0.05\%$ 。

(3) 根据本研究结果,东营凹陷牛庄洼陷埋深

2200 m 对应  $E_qVR_o$  0.50% 左右, 2700 m 对应  $E_qVR_o$  0.70% 左右,这一成熟度模式更有利于对该区未成熟石油与低成熟石油成因与分布的解释。

**致谢** 澳大利亚 CSIRO 石油资源研究所 Wilkin 为本研究完成了激光显微探针分析,并与他讨论了本文的主要观点,谨此致谢。

#### 参 考 文 献

- 1 张林晔,等. 低熟油生成机理及成油体系. 北京: 地质出版社, 1999. 115~137
- 2 肖贤明. 有机岩石学及其在油气勘探中的应用. 广州: 广东省科技出版社, 1992. 150~165
- 3 Wilkin, R W T, et al. Fluorescence alteration and the suppression of vitrinite reflectance. *Org Geochem*, 1992, 18(5): 629
- 4 Lo H B. Correction criteria for the suppression of vitrinite reflectance in hydrocarbon-rich kergens: Preliminary guidelines. *Org Geochem*, 1993, 20(6): 653
- 5 Wilkins R W T, et al. Should fluorescence alteration replace vitrinite reflectance as major tool for thermal maturity determination in oil exploration? *Org Geochem*, 1995, 22(1): 191
- 6 Veld H, et al. A fluorescence alteration of multiple macerals (FAMM) study of Netherlands coal with 'normal' or 'deviating' vitrinite reflectance. *Org Geochem*, 1997, 26(3): 247
- 7 Newman J. New approaches to detection and correction of suppressed vitrinite reflectance. *The APPEA J*, 1997, 37(1): 524
- 8 刘祖发,等. 中国典型煤的激光显微荧光特征及 R-I-VR<sub>o</sub> 模式图的建立. *沉积学报*, 1999, 17(增刊): 687
- 9 钟宁宁,等. 激光显微荧光探针: 方法与应用. *地球化学*, 2000, 29(1): 180