

平庄凹陷烃源岩有机质成熟度评价

高玉娟, 张亚明, 王宇林

(辽宁工程技术大学 资源与环境工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 平庄凹陷盖层中发育九佛堂组、沙海组和阜新组 3 套烃源岩, 虽然以往围绕煤矿生产展开了大量的煤田地质勘探工作, 但石油、天然气勘探工作较少, 研究程度较低。为了客观评价平庄凹陷的油气资源, 需对烃源岩有机质成熟度进行评判。在对平庄凹陷烃源岩岩石热解、镜质组反射率、生物标志物参数分析的基础上, 对平庄凹陷九佛堂组、沙海组烃源岩有机质热演化特征及演化阶段进行了系统研究。结果表明: 平庄凹陷烃源岩各参数随埋藏深度的增加变化明显, 具有纵向上的连续性和横向上的不均匀性; 平庄洼陷烃源岩有机质成熟度处于未成熟—低成熟—成熟阶段, 其中, 九佛堂组烃源岩是盆地的主要成油岩系; 四龙洼陷烃源岩有机质成熟度较低, 对盆地成烃贡献不大。

关键词: 岩石热解; 镜质体反射率; 生物标志物; 成熟度; 热演化; 平庄凹陷

中图分类号: P618.13; TE122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)01-0048-05

Maturity Evaluation of the Organic Matter of Source Rock in Pingzhuang Depression

GAO Yu-juan, ZHANG Ya-ming, WANG Yu-lin

(School of Resource and Environment Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract In the coverage of Pingzhuang depression, there are three sets of source rocks named Jiufotang formation, Shahai formation and Fuxin formation. Although much coalfield geological exploration work had been done earlier, the exploration work on petroleum and gas is few up to now. In order to objectively assess the oil and gas resources in Pingzhuang depression, the maturity of organic matter source rock must be judged. In this paper, the thermal evolution characteristics and stages of organic matter in the source rock of Jiufotang formation and Shahai formation in Pingzhuang depression are systemacally studied based on the the analysis of thermal decomposition, vitirnite reflectance and biomarker parameters. It is found that, parameters of source rock in the Pingzhuang depression vary obviously with the variation of burial depth which is characterized by longitudinal continuity and transversal nonuniformity. The maturity of organic matter of source rock in Pingzhuang depression is at the immature-low mature-mature stage, and the source rock of Jiufotang formation is the main rock series creating oil in the basin. Maturity of organic matter of source rock in Silong depression is lower, which has little contribution to the generation of hydrocarbon in the depression.

Key words: rock pyrolysis; vitrinite reflectance; biological markers; maturity; thermal evolution; Pingzhuang depression

0 引言

平庄—马厂盆地处于华北地块与天山—兴蒙褶皱系两个一级大地构造单元的结合部位, 其主体

位于华北地块内蒙隆起的喀喇沁断隆带(图 1)^[1], 是在早白垩世北北西—南东东区域伸展体制持续作用下, 由发育于北北东向八里罕拆离断层上盘次级断层活动而形成的不对称(西深东浅)地堑式裂

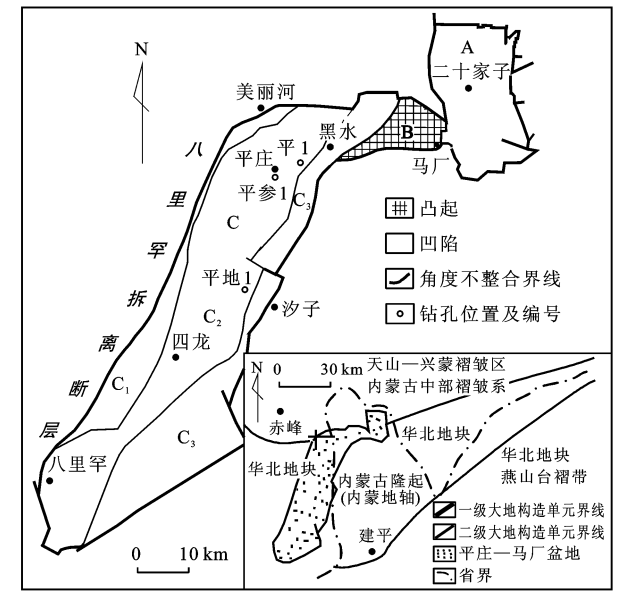
收稿日期: 2008-06-20

基金项目: 辽宁省教育厅计划项目(202183383)

作者简介: 高玉娟(1976—), 女, 山东海阳人, 讲师, 工学硕士, 从事地球化学教学和研究。Email: gaoyujuan0122@sina.com

© 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

陷盆地^[2], 盆地主体呈北北东向展布, 北东向长约 140 km, 北西向宽约 20 km, 面积约 2 800 km²。盆地及其外围发育的地层主要有太古宇建平群, 侏罗系蓝旗组, 白垩系义县组、九佛堂组、沙海组、阜新组和孙家湾组。其中, 沙海组和阜新组发育可采煤层, 对于该聚煤盆地来说, 义县组及其以下地层构成盆地基底, 其以上地层为盆地的沉积盖层。根据盆地基底结构和盆地发展演化特点, 将平庄—马厂盆地划分为平庄凹陷、二十家子凹陷和敖包山—石帽子山凸起 3 个二级构造单元, 其中, 平庄凹陷又分为西部断阶带、中部洼陷带和东部断阶带, 而中部洼陷带又可进一步划分为平庄洼陷和四龙洼陷等构造单元^[3]。以往多围绕煤矿生产开展了大量的煤田地质勘探工作, 煤田地质研究程度较高, 石油、天然气勘探工作却较少, 研究程度较低, 资料也不够丰富, 然而与之相邻、在同一构造应力场下形成的赤峰—元宝山盆地发育有工业价值的油气藏^[4]。因此, 有必要对平庄—马厂盆地开展油气资源评价研究工作。



A—二十家子凹陷; B—敖包山—石帽子山凸起; C—平庄凹陷; C₁—西部断阶带; C₂—中部洼陷带; C₃—东部断阶带

图 1 平庄—马厂盆地构造单元划分
Fig. 1 Structural Subdivisions of Ping Zhuang-Ma Chang Basin

结合前人研究工作, 通过对大量钻孔资料分析, 确定出平庄—马厂盆地盖层中发育九佛堂组、沙海组和阜新组 3 套烃源岩, 岩性主要为暗色泥岩^[5-6]。其中, 平庄凹陷九佛堂组和沙海组是盆地重

要的成烃岩系, 然而能否形成有工业价值的油气藏, 不仅取决于是否有足够的烃源岩, 还取决于烃源岩的成熟度, 定性或定量评价其烃源岩有机质成熟度, 确定其成烃门限至关重要。虽然镜质组反射率 R_o 是重要的热演化指标, 但是 R_o 在 0.3% ~ 0.7% 范围内测定很容易产生误差。基于以上原因, 在对烃源岩进行有机质成熟度评价时, 为了能够准确地确定烃源岩的热演化程度, 笔者以平庄凹陷为例, 采用多种指标进行综合评判。

1 岩石热解

岩石热解峰温 (t_{max}) 是衡量热演化程度的一项简便、快速且较为有效的指标。在岩石热解过程中, 随埋藏深度的增加, 烃源岩有机质发生降解, 活化能较低或热稳定性较差的干酪根将首先降解, 使残留下来的有机质热稳定性增强, 因此, t_{max} 随热演化程度的升高而增大。大量统计数据显示: t_{max} 为 435 °C 时, 烃源岩达到生烃门限; t_{max} 在 435 °C ~ 440 °C 之间时, 烃源岩处于低演化阶段; t_{max} 为 440 °C 时, 烃源岩进入大量生烃的成熟阶段^[7]。而对于烃产率指数 (I_p) 和烃指数 (S_1/TOC) 的绝对值, 虽然不能用来划分有机质的成熟度阶段, 但其变化趋势仍可用于有机质热演化规律研究, 在正常情况下, I_p 和 S_1/TOC 随埋深的增加而增大。研究过程中对平庄凹陷平参 1 井进行了密集取样, 为有机质热演化规律研究创造了良好条件。

平庄凹陷的 t_{max} 普遍较高, 并总体具有随埋藏深度增加呈缓慢升高的趋势, 主要集中在 435 °C ~ 448 °C 之间 (表 1), 这主要是由于泥岩的有机质丰度低, 对可溶有机质的沥青 “A” 吸附能力弱, 致使烃源岩中可溶有机质绝对含量降低, 从而造成热解 t_{max} 在测定时偏高; I_p 和 S_1/TOC 也随埋深的增加而增大 (表 1)。这 3 个参数在平庄凹陷不同洼陷存在一定差异, 平庄洼陷较高, 四龙洼陷较低, 还没有达到生烃门限, 这表明烃源岩有机质热演化纵向上的连续性和横向上的不均匀性。

2 镜质组反射率 R_o 的变化

自从 20 世纪 50 年代 Teichmüller 将镜质组反射率 R_o 推广到确定沉积岩中分散有机质的成熟度以来, 镜质组反射率 R_o 一直是人们关注的有机质成熟度指标^[8-9]。在连续沉积的沉积剖面上, 镜质体反射率 R_o 与深度之间是一种半对数的直线关

表 1 平庄凹陷烃源岩成熟度参数

Tab. 1 Maturity Parameters of Source Rocks in Pingzhuang Depression														
名称	地区	井号	层位	井深/m	岩性	w(烃/碳)/ %	OEP 值	t _{max} /℃	产率指 数 I _p	烃指数 S ₁ /TOC	反射率 R _o /%	ααC ₂₉ 20S/ 20(R+S)	qβC ₃₁ 22S/ 22(R+S)	
平庄洼陷			K _{1sh}	105.5	深灰色泥岩	2.07	2.32	430.4	0.037	12	0.50	0.07	0.32	
				122.0	浅灰色泥质粉砂岩	0.39	1.75	438.5	0.072	3	0.59	0.33	0.46	
				156.0	深灰色泥岩	0.77	2.19	436.7	0.017	3	0.55	0.06	0.20	
				166.0	灰色砂质泥岩	0.60	2.18	430.4	0.018	3	0.60	0.04	0.27	
				192.5	灰色泥岩	1.08	2.32	427.7	0.042	9	0.57	0.10	0.24	
				202.5	灰色泥岩	0.48	1.66	435.8	0.016	1	0.61	0.02	0.21	
				220.0	深灰色泥岩	1.38	1.86	440.3	0.023	7	0.64	0.03	0.26	
				245.0	灰色粉砂泥岩	0.65	1.67	440.3	0.091	4	0.66	0.13	0.42	
				256.0	深灰色泥岩	0.62	1.88	436.7	0.057	4	0.67	0.11	0.32	
				272.5	深灰色泥岩	1.41	1.41	441.2	0.023	7	0.64	0.01	0.08	
				282.5	深灰色泥岩	1.71	1.56	441.2	0.019	6	0.65	0.05	0.44	
				299.2	灰色泥岩	1.52	1.52	440.3	0.010	2	0.69	0.17	0.41	
				313.0	灰色粉砂泥岩	1.25	1.62	435.8	0.021	3	0.72	0.11	0.38	
				330.0	灰色泥岩	1.65	1.39	442.1	0.016	3	0.64	0.11	0.44	
				346.0	灰色泥岩	1.51	1.47	439.4	0.014	3	0.69	0.06	0.48	
				358.0	灰色泥岩	1.66	1.43	440.4	0.029	8	0.72	0.14	0.52	
				383.0	灰色泥岩	1.43	1.32	440.3	0.035	7	0.70	0.10	0.50	
				403.0	灰色泥岩	1.75	1.34	441.2	0.028	8	0.72	0.10	0.51	
				420.0	灰色泥岩	1.56	1.34	439.4	0.039	7	0.75	0.09	0.53	
				434.0	灰色泥岩	2.20	1.39	443	0.037	11	0.70	0.10	0.56	
				470.0	深灰色泥岩	3.66	1.37	442.1	0.044	17	0.79	0.13	0.52	
				489.8	深灰色泥岩	2.89	1.29	444.8	0.047	14	0.63	0.13	0.58	
				505.7	深灰色泥岩	6.01	1.26	442.9	0.071	28	0.73	0.22		
				530.6	深灰色泥岩	3.39	1.27	445.6	0.095	25	0.68	0.13	0.56	
				547.5	深灰色泥岩	3.58	1.23	441.2	0.065	19	0.76	0.30	0.56	
				K _{1jf}	568.9	深灰色泥岩	4.44	1.17	472.4	0.095	29	0.85	0.36	0.53
					586.3	灰色粉砂泥岩	4.20	1.13	444.7	0.072	37	0.93	0.29	0.55
					606.6	深灰色泥岩	5.72	1.14	446.5	0.061	32	0.96	0.36	0.67
					632.3	深灰色泥岩	5.51	1.14	447.4	0.061	28	0.88	0.40	0.50
					651.4	灰色泥岩	7.12	1.12	440.3	0.163	47	0.96	0.40	0.52
					667.6	深灰色泥岩	4.87	1.03	450.1	0.070	39	0.86	0.39	0.59
					687.6	深灰色泥岩	4.46	1.20	437.6	0.079	22	0.96	0.38	0.46
					705.6	深灰色泥岩	6.85	1.17	442.9	0.148	65	1.11	0.38	0.55
					727.7	深灰色泥岩	4.50	1.15	445.6	0.082	25	1.13	0.29	0.55
					741.2	深灰色泥岩	4.17	1.12	446.5	0.104	42	1.25	0.44	0.62
					778.9	深灰色泥岩	6.73	1.13	446.5	0.119	46	1.26	0.42	0.54
					794.9	深灰色泥岩	8.45	1.09	442.9	0.190	51	1.26	0.38	0.56
					815.1	深灰色泥岩	4.43	1.04	446.5	0.064	34	1.13	0.44	0.62
					838.7	深灰色泥岩	6.97	1.11	439.4	0.121	44	1.22	0.45	0.53
					867.0	深灰色泥岩	11.91	1.13	441.4	0.194	92		0.45	0.57
					880.7	深灰色泥岩	8.28	1.12	440.6	0.170	38	1.22	0.48	0.56
					909.3	深灰色泥岩	4.46	1.08	450.5	0.088	30	1.40	0.44	0.56
					930.0	深灰色泥岩	16.85		439.8	0.195	42	1.73	0.48	0.58
					947.3	深灰色泥岩	10.46	1.06	447.2	0.257	63	1.63	0.51	0.57
					980.7	灰色泥岩	7.08	1.06	453.8	0.494	29	1.71	0.44	0.52
平1井	K _{1jf}	691.0	深灰色泥岩	0.81	1.27	435.6	0.062	7	0.58	0.096	0.52			
		215.2	黑灰色泥岩		2.27	449.9	0.405	30	0.40	0.13	0.19			
		601.7	深灰色泥岩	4.66	1.09	443.5	0.045	19	0.46	0.50	0.52			
四龙洼陷1井	K _{1jf}	75.0	灰黑色泥岩	0.45	2.24	437.3	0.002	0		0.02	0.33			
		213.0	灰黑色泥岩	0.73	1.96	426.8	0.096	7			0.14			

系,这一关系反映了沉积盆地的连续沉积作用,并且以深度为函数的反射率变化随地温梯度的增加

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而增加^[10]。

在进行镜质组反射率测试时,采用油浸反射率法,并且采用随机测试值,测试仪器为 MPV-3 型显微光度计,测试依据 SY/T 5124—1995 标准^[11];测试时温度为 24 ℃~25 ℃,湿度为 50%~57%,测试时采用比较法。一般认为,镜质体反射率 R_o 为 0.55% 是生油门限,0.55%~0.75% 为低成熟阶段,大于 0.75% 为成熟阶段。由于研究区烃源岩岩性以暗色泥岩为主,因此,选用暗色泥岩进行测试,通过对获取的测试数据进行统计,得到测试样品的平均值、标准差等参数,然后根据数据的可信程度进行相应的取舍。从测试数据可以发现,平庄凹陷 R_o 随埋藏深度的增加明显增大,且普遍较高,主要集中在 0.55%~1.25%(表 1)。究其原因,可能是在热演化过程中由于再循环的氧化镜质体和沥青的输入,或是藻类体生成的烃类充填到镜质体中,使得实测数据偏高^[12]。

3 正构烷烃奇偶优势

实践证明,未成熟有机质存在明显的奇偶优势(OEP),并随烃源岩埋藏深度的增加和热成熟作用的增强而逐渐消失。由于原始生物有机质具有强烈的偶数碳优势,决定了烃源岩中有机质的这种继承性特征。Scalan 等^[13] 最早用数学方法推导出了正构烷烃奇偶优势 OEP 值的计算方法,一般认为 OEP 值为 1.5 时进入生油门限,1.5~1.2 为低成熟阶段,降低到 1.2~1.0 为成熟阶段。平庄凹陷 OEP 值随埋藏深度的增加明显降低,其中平庄凹陷中部洼陷带平庄洼陷九佛堂组底部 OEP 值接近于 1,而平庄凹陷中部洼陷带四龙洼陷九佛堂组烃源岩的 OEP 值较高,为 2.24~1.96(表 1),还未达到生烃门限,表明烃源岩有机质热演化纵向上的连续性和横向上的不均匀性。同时,还表明该烃源岩的成熟

度随样品不同有一定的变化,成熟度较低的样品尚处在低成熟至未成熟阶段,成熟度较高的样品则正处在生烃高峰期,但还未到过成熟热演化阶段。

4 甾萜烷异构化参数

饱和烃中生物标志化合物在温度和时间的作用下,发生差向异构化反应,由热不稳定的生物构型转化为热稳定的地质构型,它们可以用于有机质热演化规律的研究^[14-18];甾类参数 $\alpha\alpha C_{29} 20S/20(R+S)$ 值小于 0.2,是未成熟有机质特征,在 0.2~0.4 之间为低成熟有机质特征,大于 0.4 为成熟有机质特征^[19];烃源岩藿烷 $\alpha\beta C_{31} 22S/22(R+S)$ 参数值为 0.6 时进入生油门限。平庄凹陷烃源岩以上两个参数均随埋藏深度的增加而明显增大(表 1),但是,由于四龙洼陷参数值低,还未进入生烃门限。

5 结语

综合以上分析,可以得出平庄凹陷烃源岩各参数随埋藏深度的增加变化明显,总体具有在纵向上的连续性和横向上的不均匀性,结合烃源岩成熟度的划分标准^[20],对平庄凹陷烃源岩有机质成熟度做出客观评价:

(1)平庄凹陷中部洼陷带平庄洼陷烃源岩随埋藏深度的增加,有机碳和 OEP 值减少,烃/碳、 t_{max} 、 $\alpha\alpha C_{29} 20S/20(R+S)$ 、 $\alpha\beta C_{31} 22S/22(R+S)$ 和反射率(R_o)增加(图 2),反映出平庄洼陷烃源岩有机质成熟度由浅入深逐渐升高,是一个未成熟—低成熟—成熟阶段相对完整的演化体系(表 2)。其中,沙海组烃源岩埋藏深度小,热演化程度低,处于未成熟—低成熟阶段,对盆地成烃贡献小;九佛堂组烃源岩埋藏深度大、热演化程度高,处于低成熟—成熟阶段,但未达到过成熟阶段,是盆地的主要生油岩系。

表 2 平庄凹陷平参 1 井生油岩成熟阶段划分
Tab. 2 Mature Phase of Source Rocks in Parameter Well No. 1 in Pingzhuang Depression

成熟阶段	埋深/ m	w(烃/ 碳)/ %	OEP 值	$t_{max}/ ^\circ C$	$R_o/ \%$	$\alpha\alpha C_{29} 20S/20(R+S)$	$\alpha\beta C_{31} 22S/22(R+S)$
未成熟	< 350	0.39~2.07/1.14	1.39~2.32/1.79	427.7~442.1/437.1	0.50~0.72/0.63	0.01~0.33/0.09	0.08~0.48/0.33
低成熟	350~700	1.43~7.12/3.79	1.03~1.43/1.25	437.6~472.4/444.7	0.63~0.96/0.79	0.09~0.4/0.24	0.46~0.67/0.51
成熟	700	4.17~16.85/7.78	1.04~1.17/1.11	439.4~453.8/444.9	1.11~1.73/1.34	0.29~0.51/0.43	0.52~0.62/0.56

注: 最小值~最大值/平均值

(2)虽然平庄凹陷中部洼陷带四龙洼陷平地 1 井九佛堂组烃源岩的各参数指示其成熟度处于未成熟阶段,但是,由于四龙洼陷与平庄洼陷是受同

一条断层控制的西断东超的单断型洼陷,洼陷结构与平庄洼陷相似;同时,平地 1 井烃源岩的各项指标之所以较差,可能是由于平地 1 井位于湖泊滨岸

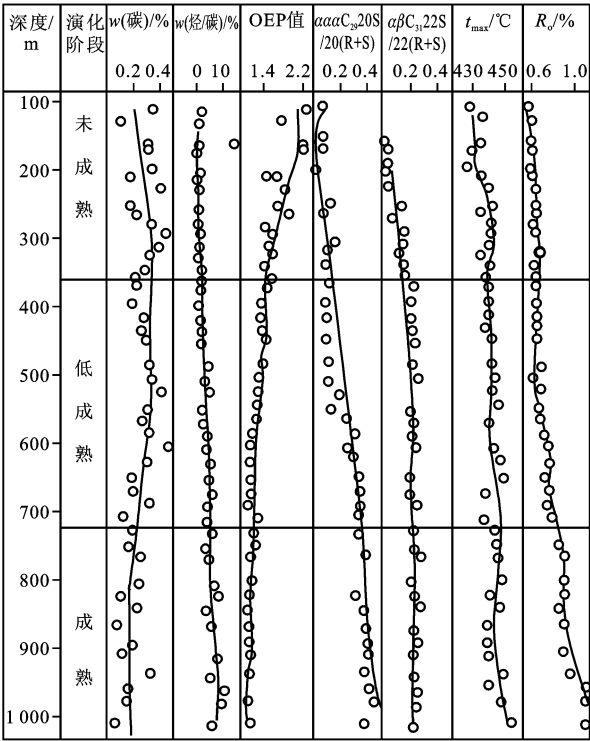


图 2 平参 1 井生油岩综合演化剖面
Fig. 2 Comprehensive Evolution Profile of
Source Rocks in No. 1 Parameter Well

相或非湖泊相所致。故推测在四龙洼陷内部的九佛堂组下部烃源岩可能处于低成熟阶段,即四龙洼陷烃源岩有机质成熟度处于未成熟—低成熟阶段,其对盆地成烃贡献不大。

参考文献:

[1] 辽宁省地质矿产局. 辽宁省区域地质志[M] . 北京: 地质出版社, 1989.
[2] 王宇林, 何 保, 姜志刚, 等. 平庄盆地地质构造及演化特征[J] . 煤炭学报, 2007, 32(10): 1036-1040.
[3] 王宇林, 陈振东, 何 保, 等. 平庄—马厂盆地石油地质综合评价[R] . 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
[4] 孙洪军, 李 艳, 徐景成. 赤峰凹陷宝地 2 块超稠油开采方法探讨[J] . 内蒙古石油化工, 2005(3): 113-115.

[5] 王宇林, 邵显琨, 范国强, 等. 箕状湖盆萎缩阶段两种湖泊三角洲的沉积特征及成因探讨——以平庄、铁法盆地为例[J] . 沉积学报, 2002, 20(2): 238-242.
[6] 王宇林, 刘志刚, 邵靖邦, 等. 平庄盆地充填沉积特征和聚煤规律[J] . 煤田地质与勘探, 1994, 22(4): 1-6.
[7] 邬立言, 顾信章, 盛志纬, 等. 生油岩热解快速定量评价[M] . 北京: 科学出版社, 1986.
[8] Stach E, Mackowsky M T H, Teichmüller M, et al. Stach ' s Textbook of Coal Petrology[M] . 3rd Revised and Enlarged Edition. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1982.
[9] Teichmüller M. Organic Petrology of Source Rocks: History and State of the Art[J] . Org Geochem, 1986, 10(1/3): 581-599.
[10] Dow W G. Kerogen Studies and Geological Interpretations[J] . J Geochem Explor, 1977, 7: 79-99.
[11] SY/T 5124—1995, 沉积岩中镜质组反射率测定方法[S] .
[12] 李 鑫, 尚鸿群, 李继宏, 等. 烃源岩热演化指标研究现状[J] . 新疆石油地质, 2007, 28(3): 379-384.
[13] Scalan R S, Smith J E. An Improved Measure of the Odd-even Predominance in the Normal Alkanes of Sediment Extracts and Petroleum [J] . Geochim et Cosmochim Acta, 1970, 34: 611-620.
[14] Mackenzie A S, Mckenzie D. Isomerization and Aromatization of Hydrocarbon in Sedimentary Basins Formed by Extension[J] . Geol Mag, 1983, 120(5): 417-470.
[15] Seifert W K, Woldowan J M. The Effect of Thermal Stress on Source-rock Quality as Measured by Hopane Stereochemistry[J] . Phys Chem Earth, 1980, 12: 229-237.
[16] 曾宪章, 梁狄刚, 王忠然. 中国陆相原油和生油岩中的生物标志化合物[M] . 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1989.
[17] 胡见义, 黄第藩. 中国陆相石油地质理论基础[M] . 北京: 石油工业出版社, 1991.
[18] Peters K E, Moldowan J M. The Biomarker Guide-Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments [M] . New Jersey: Prentice Hall, 1993.
[19] 陈中红, 吴孔友, 赵卫卫. 柴达木盆地东部第四系低丰度高效气源岩地球化学特征及成藏机理[J] . 地球科学与环境学报, 2007, 29(1): 41-46.
[20] 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.