

王古1井奥陶系油气成因及其意义

李素梅^{1,2}, 庞雄奇^{1,2}, 邱桂强³, 高永进³

1. 中国石油大学油气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249

3. 中国石化胜利石油有限公司, 山东东营 257015

摘要: 首次在东营凹陷南斜坡王古1井奥陶系古潜山中获得深层高蜡油(含蜡量40.84%),其富含蜡质烃,甾、萜类等高分子量化合物含量甚微。采用分子筛络合技术对王古1井原油中的甾、萜类化合物进行了浓缩,并对碳酸盐岩储层中的方解石脉包裹体进行了化学成分分析。结果表明,王古1井奥陶系原油及储层包裹烃的组成与分布具有深层孔店组烃源岩的特征,与沙四段烃源岩相关性差,揭示奥陶系原油不同于以往发现的第三系沙河街组原油。正构烷烃单体同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值分析也表明,王古1井原油与孔店组烃源岩接近且变化趋势大体一致,反映孔店组为其可能的油源岩。王古1井奥陶系油气的发现表明东营凹陷存在一套迄今尚未发现的深层油源岩,该区具有深层油气勘探潜力。

关键词: 奥陶系;古潜山;高蜡油;源岩;孔店组。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2005)04-0451-08

收稿日期: 2004-12-25

Origin and Significance of the Ordovician Oil from Well WG 1, Dongying Depression, Bohai Bay Basin

LI Su-mei^{1,2}, PANG Xiong-qi^{1,2}, QIU Gui-qiang³, GAO Yong-jin³

1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Shengli Oilfield Company Limited, SINOPEC, Dongying 257015, China

Abstract: Considerable quantities of Ordovician oils were recently discovered from the burial hill in well WG 1 in the south slope of the Dongying depression, Bohai Bay basin. The oils are characterized by high content of waxy alkanes (40.84%) with a low concentration of steranes and terpanes, which are completely different from the overlying Tertiary oils of the Shahejie Formation. By removing the alkanes from the Ordovician oil with a molecular sieve and analyzing the inclusion component of well WG 1, important biomarker information was obtained, such as steranes and terpanes, which are crucial for source rock tracing. Results show that the Ordovician oil and inclusion component of the well WG 1 correlated well with the source rocks of the Tertiary Kongdian Formation (E_k^2) rather than that of the Shahejie Formation, suggesting potential source rocks for the Ordovician oils. Results of the $\delta^{13}\text{C}$ values of the compound-specific isotope of alkanes show similar values and varying trend of the Ordovician oils to that of the E_k^2 source rocks, which further proves the E_k^2 mudstones to be responsible for the deep oils. The discovery of the high waxy oils of Ordovician from well WG 1 suggests the existence of a new set of deep source rocks and good potential of deep oils in the Dongying depression.

Key words: Ordovician; burial hill; high waxy oil; source rock; Kongdian Formation.

2003年在东营凹陷南斜坡钻探的王古1井首产工业油流(刘克奇和金之钧,2004)。该井的钻探成次在奥陶系古潜山(3 421.5~3 444.5 m)中获得高功,说明东营凹陷内部潜山具有巨大的勘探潜力,证

明东营凹陷深层可能存在一种与以往发现的(沙三、沙四段)不同的新型油源,这类油源的存在,将大大拓展该凹陷的勘探空间,对今后深层勘探必将带来深远影响。

1 地质背景

王古 1 井位于济阳拗陷东营凹陷南部缓坡带东段,处于牛庄洼陷南斜坡的王家岗—丁家屋子构造带。该区以往发现油气多为第三系沙河街组成因(张林晔和张春荣,1999;庞雄奇等,2001;Pang *et al.*, 2003;庞雄奇等,2004;Li *et al.*, 2003;李素梅等,2004),分布于王家岗、八面河、羊角沟、广利、草桥—乐安等多个油田(图 1)。其中,草桥—乐安油田为埋藏较浅的潜山油藏(吕修祥,1992)。

钻井与地震资料反映,牛庄洼陷南斜坡地层与东营凹陷基本一致,构造高部位地层因抬升有剥蚀。从下而上主要发育:古生界寒武系—奥陶系、石炭—二叠系,中生界下第三系孔店组、沙河街组、东营组;上第三系明化镇组、馆陶组;第四纪平原组。牛庄洼陷南斜坡缺失沙三下、孔二段、孔三段,局部地区缺失中生界地层。沙三段、沙四段是牛庄洼陷最重要的 2 套烃源岩,最近发现的孔店组也可能是东营凹陷一

套重要的生油岩系。

2 实验与方法

采集王古 1 井奥陶系原油样 1 个、王古 1 井碳酸盐岩(含方解石脉)1 块、沙四段和孔店组岩样 9 个、王家岗沙河街组油样 5 个(图 1、表 1)。另外,八面河油田 21 个油样(庞雄奇等,2001;Pang *et al.*, 2003)用于对比分析。

王古 1 井包裹体烃类提取方法与碎屑岩相似(吴景富等,2003)。将碳酸盐中方解石脉取出,压碎、筛分成单个颗粒,用氯仿浸泡,去除表面污物;在显微镜下挑选出洁净的方解石细颗粒,用氯仿索氏抽提 72 h 两次,将第二次抽提物作色谱—质谱分析;在无残留烃情形下(否则继续抽提),用研钵将方解石颗粒磨碎成粉末(<200 目),用正己烷萃取可溶有机质,将溶解物加入经高温活化的氧化铝层析柱;分别用石油醚、二氯甲烷冲洗出饱和烃、芳烃馏分,最后用色谱—质谱检测。采用赵萌等(2003)报道的方法进行正构烷烃络合以浓缩甾萜类化合物。

原油、岩样的氯仿抽提物采用常规柱色谱分离。在岛津 GC-9A 型色谱仪和 Finnigan-MAT TSQ-45 型 GC/MS 系统上进行饱和烃色谱及饱和烃、

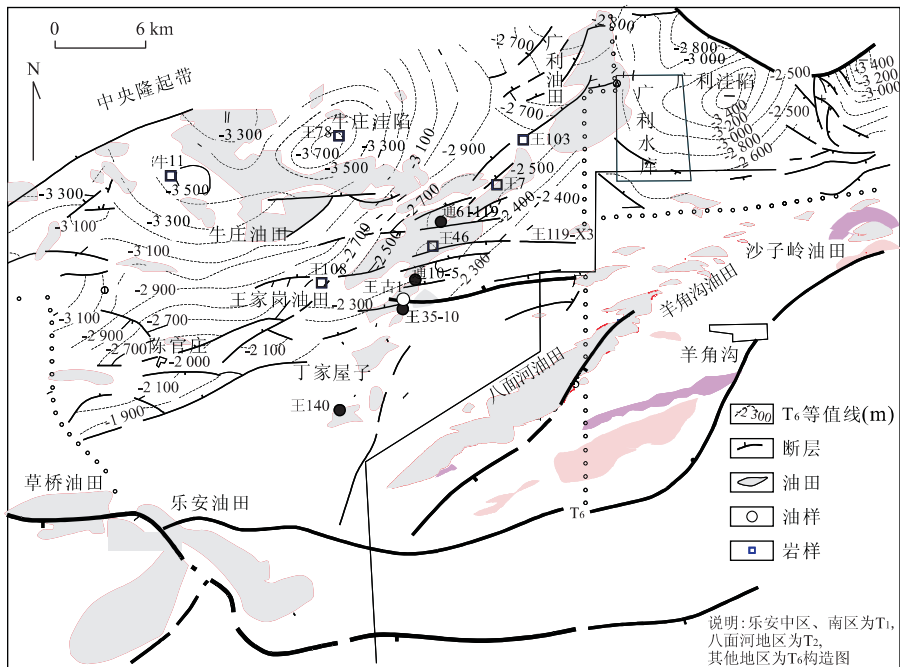


图 1 样品与油气分布

Fig. 1 Oil distribution and location of the samples collected

表 1 原油、烃源岩可溶物饱和和烃气相色谱参数表
Table 1 Basic parameters of gas chromatogram for the oils and rock extracts

编号	井号	井段/m	性质	层位	CPI	OEP	nC_{21-22}/nC_{28-29}	$\frac{\sum C_{21-}^-}{\sum nC_{22}^+}$	主峰碳	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈
1	王 119-X3	2 592.5~2 624	Es ⁴	原油	0.93	0.93	2.13	1.31	19	0.41	0.96	2.29
2	通 61-119	—	Es	原油	0.99	1.00	1.71	2.72	15	0.61	0.69	1.42
3	王 35-10	1 511.6	Es	原油	0.85	0.94	1.61	2.11	13	0.4	1.31	3.33
4	通 10-5	2 133.4	Es ³	原油	0.89	0.93	1.65	2.20	15	0.46	1.04	2.46
5	王 140*	1 387.0	Es	原油	—	—	—	—	—	—	—	—
6	王古 1	3 421.9	O	原油	1.06	1.05	1.65	1.10	17	0.87	0.16	0.20
7	王古 1	3 426.6	O	包裹体	1.03	1.06	1.90	1.20	18	0.72	0.20	0.26
8	王 7	2 707.5	Es ⁴	页岩	0.89	0.88	1.31	0.46	24	0.19	0.91	2.85
9	王 103	3 081.29	Es ⁴	泥页岩	0.88	0.83	2.41	1.14	18	0.40	0.76	1.29
10	牛 11	3 602.3	Es ⁴	页岩	1.26	0.93	11.35	1.37	18	0.37	0.95	1.92
11	牛 11	3 603.5	Es ⁴	页岩	0.98	1.00	2.13	0.62	20	0.32	1.08	1.97
12	王 78	3 905.62	Es ⁴	页岩	1.05	1.04	1.54	0.76	23	0.62	0.61	0.90
13	王 46	3 393.7	Ek	泥岩	1.04	1.04	3.84	4.50	17	1.17	0.58	0.61
14	王 46	3 788.0	Ek	泥岩	1.13	1.09	0.83	0.37	25	0.55	0.37	0.61
15	王 46	4 115.8	Ek	泥岩	1.01	1.05	3.89	1.44	19	0.55	0.43	0.55
16	王 46	4 205.05	Ek	泥岩	1.04	1.06	1.41	0.56	22	0.46	0.64	1.28

*. 该井原油生物降解较严重, 轻质馏分多被损耗.

芳烃色谱—质谱分析. 分析前加入 D₄-C₂₉ 甾烷、D₈-二苯并噻吩、nC₂₄ D₅₀ 标样. 色谱条件: SE-54 弹性熔硅毛细管柱 (25 m×0.25 mm i. d.), 以 4 °C/min 自 100 °C 升至 300 °C, 载气为 He 气. 色谱—质谱条件: 采用 SE-54 弹性熔硅毛细管柱 (25 m×0.25 mm i. d.), 载气为氦气, 升温程序: 以 4 °C/min 的速率由 100 °C 升至 220 °C; 再从 220 °C 以 2 °C/min 升温到 300 °C. 质谱电离能量 70 eV.

3 结果与讨论

3.1 王古 1 井奥陶系古潜山原油特征

(1) 原油物性特征. 王古 1 井奥陶系原油为含天然气的棕黄色高蜡、高凝固点 (49 °C) 原油, 含蜡量为 40.84%, 高于渤海湾盆地黄骅坳陷千米桥奥陶系古潜山凝析油 (含蜡量为 15.91%~34.08%) (卢鸿等, 2001), 与我国其他一些高含蜡区原油含蜡量相当 (Wang *et al.*, 1997; Huang *et al.*, 2003), 如南襄盆地泌阳凹陷原油含蜡量为 24.26%~40.27%; 辽河盆地大民屯油田原油含蜡量为 45%. 王古 1 井奥陶系原油还具有低密度 (0.827 g/cm³)、低粘度 (4.79 MPa·s) 及低含硫 (0.07%) 特征, 上述特征明显不同于具有高硫特征的以第三系沙河街组为主的上部层系原油, 如八面河油田沙河街组原油为重质 (密度一般 >0.9 g/cm³)、高硫 (南区含硫

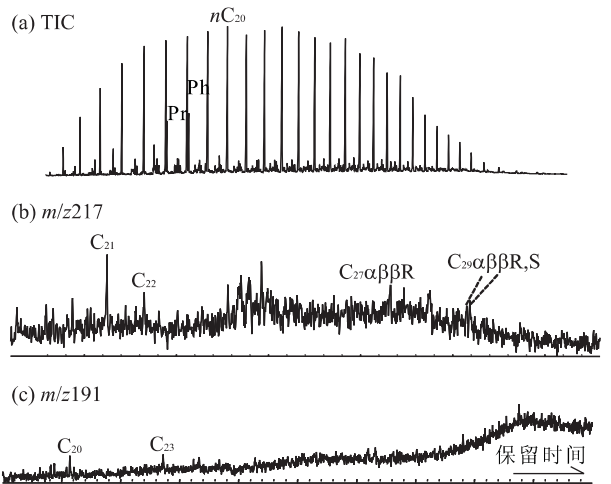


图 2 王古 1 井原油 TIC、m/z217、m/z191 质量色谱
Fig. 2 TIC, m/z217 and m/z191 mass fragmatograms of the saturate fractions of the oils from WG 1 well

量高达 1.22%~2.37%) 原油, 反映王古 1 井原油成因不同于第三系沙河街组.

(2) 烃类组成特征. 王古 1 井原油烃类组成与分布进一步反映了原油的高蜡特性. 饱和烃总离子流图显示 (图 2a), 正构烷烃分布范围较宽, 呈单峰对称型分布, 大于 nC₂₁ 的蜡质烃极为发育, 正构烷烃最高碳数可为 nC-39. 定量结果表明, 正构烷烃含量为 979.15 mg·g⁻¹, 几乎全部为此类化合物, 反映原油中甾、萜等其他化合物含量甚微. 原油 Pr/Ph 值为 0.87, 反映母源岩偏还原性原始沉积环境;

表 2 原油、烃源岩基本地球化学参数

Table 2 Basic geochemical parameters for the oils and rock extracts

编号	井号	井深/m	层位	性质	S/(S+R)	$\alpha\alpha\alpha/\alpha\beta\beta$	$C_{21-22}/C_{27-29}St$	St/H	C_{27}/C_{29-St}	Tri/Terp	$C_{31}HS/(S+R)$	Ts/Tm	G/ $C_{30}H$	4-m/ $C_{29}St$
1	王 119-X3	2 592.5~2 624	Es ⁴	原油	0.39	0.32	0.014	2.37	0.80	0.09	0.58	0.55	0.65	0.28
2	通 61-119	—	Es	原油	0.46	0.45	0.015	0.70	0.72	0.07	0.59	0.86	0.30	0.37
3	王 35-10	1 511.6	Es	原油	0.39	0.32	0.013	2.72	0.77	0.08	0.58	0.51	0.91	0.22
4	通 10-5	2 133.4	Es ³	原油	0.38	0.35	0.011	1.96	0.84	0.07	0.58	0.47	0.82	0.31
5	王 140	1 387.0	Es	原油	0.33	0.29	0.010	2.82	0.79	0.06	0.56	0.36	1.09	0.24
6	王古 1	3 421.9	O	原油	0.63	0.49	0.052	0.95	0.97	0.88	0.46	0.87	0.31	0.29
7	王古 1	3 426.6	O	包裹烃	0.52	0.52	0.090	0.74	0.82	0.35	0.58	0.77	0.17	0.17
8	王 7	2 707.5	Es ⁴	页岩	0.33	0.26	0.013	2.54	0.72	0.08	0.60	0.33	0.87	0.31
9	王 103	3 081.29	Es ⁴	泥页岩	0.51	0.40	0.020	2.81	0.70	0.10	0.58	1.39	1.88	0.21
10	牛 11	3 602.3	Es ⁴	页岩	0.56	0.59	0.052	2.40	0.85	0.22	0.59	3.42	1.41	0.21
11	牛 11	3 603.5	Es ⁴	页岩	0.48	0.63	0.042	1.35	0.98	0.17	0.59	2.71	0.48	0.28
12	王 78	3 905.62	Es ⁴	页岩	0.42	0.65	0.084	1.54	0.57	0.96	0.41	10.87	0.80	0.34
13	王 46	3 393.7	Ek	泥岩	0.40	0.36	0.019	0.89	0.78	0.20	0.60	0.94	0.52	0.29
14	王 46	3 788.0	Ek	泥岩	0.32	0.37	0.007	0.35	0.86	0.05	0.57	0.58	0.27	0.35
15	王 46	4 115.8	Ek	泥岩	0.44	0.38	0.027	0.65	0.89	0.16	0.58	0.90	0.30	0.30
16	王 46	4 205.05	Ek	泥岩	0.45	0.40	0.013	0.64	0.73	0.08	0.57	0.68	0.44	0.43

S/(S+R); C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha S/(S+R)$; $\alpha\alpha\alpha/\alpha\beta\beta$; C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$; $C_{21-22}/C_{27-29}St$; C_{21-22}/C_{27-29} 规则甾烷; C_{27}/C_{29-St} ; C_{27}/C_{29} 规则甾烷; Tri/Terp; 三环萜烷/五环萜烷; $C_{31}HS/(S+R)$; C_{31} 藿烷 $22S/(S+R)$; Ts/Tm; $18\alpha(H)-/17\alpha(H)-$ 三降藿烷; G/ $C_{30}H$; 伽玛蜡烷/ C_{30} 藿烷; 4-m/ $C_{29}St$; 4-甲基甾烷/ C_{29} -规则甾烷。

原油 CPI 值为 1.06(表 1), 无奇偶优势; 具有低 Pr/ nC_{17} (0.16)、Ph/ nC_{18} (0.20) 值特征(表 1), 反映原油成熟度相对较高。沙河街组上部层系原油具有较高含量甾、萜类化合物(庞雄奇等, 2001; Pang *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2003) 和原油 Pr/ nC_{17} (0.69~1.31)、Ph/ nC_{18} (1.42~3.33) 值较高的特征(表 1)。

$m/z217$ 、 $m/z191$ 质量色谱图充分体现王古 1 井原油中甾、萜化合物含量甚微(图 2b, 2c), 渤海湾盆地黄骅拗陷千米桥奥陶系古潜山凝析油中甾、萜类化合物丰度也极低(卢鸿等, 2001)。除了深层油气, 常规油中很少出现此类生物标志物含量极低的情形, 油气运移分馏可能难以出现甾萜类高分子量化合物匮乏的情形, 原油相对较高的成熟度可能是重要原因之一。显然, 常规分析由于缺少具有重要生物标志物意义的甾、萜类化合物, 很难对王古 1 原油成因特别是油源作进一步分析。

为解决这一难题, 本研究首先尝试采用分子筛萃取络合正构烷烃法浓缩原油中的甾、萜类化合物(赵萌等, 2003), 从而提高甾、萜化合物图谱分辨率。络合处理后, 王古 1 井原油甾、萜类化合物图谱的分辨率明显提高(图 3), 总体具有低分子量孕甾烷、三环萜烷系列相对丰度较高和高分子量 $C_{27} \sim C_{29}$ -规则甾烷、五环三萜烷系列丰度较低的特征(图 3), 如 C_{21-22}/C_{27-29} -规则甾烷值为 0.052, 高于同区沙

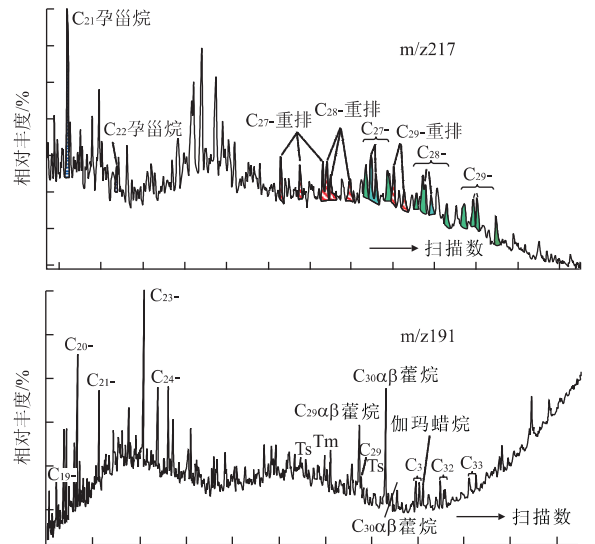


图 3 王古 1 井原油(络合后) $m/z217$ 、 $m/z191$ 质量色谱
Fig. 3 $m/z217$ and $m/z191$ mass chromatograms for the oil of the WG 1 well after removal of alkanes by molecular sieve

河街组原油(0.01~0.015); 三环萜/五环萜烷值为 0.88, 同区沙河街组原油仅为 0.06~0.09(表 2、图 4b)。原油 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$ 值高达 0.63, 超过平衡终点值(0.52~0.55), 高于同区沙河街组为主的上部层系原油(对应值为 0.33~0.46); C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 值为 0.49, 同样高于同区沙河街

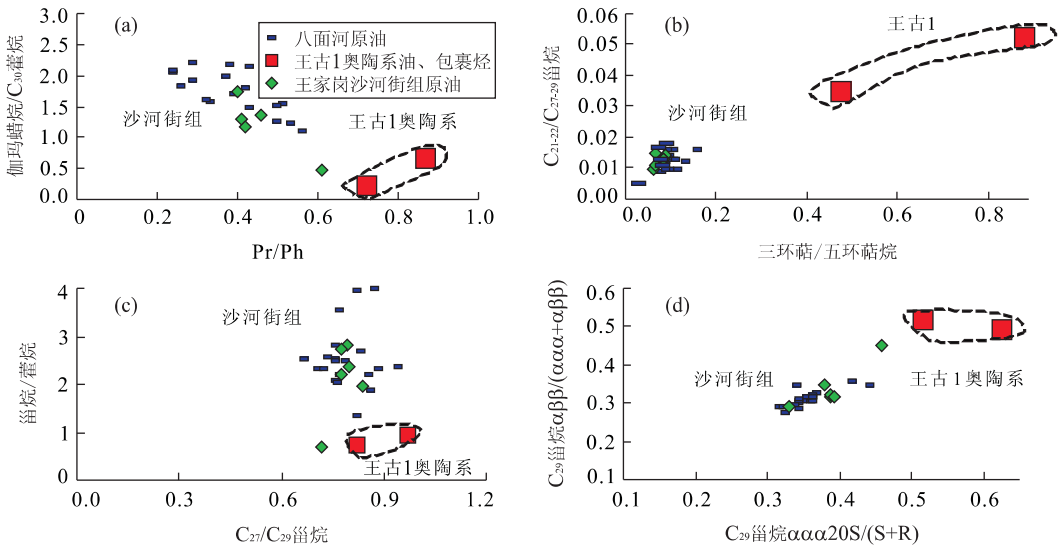


图 4 王古 1 井奥陶系原油、储层包裹烃与沙河街组原油对比特征

Fig. 4 Correlation of the Ordovician oils and inclusion component of the WG 1 well with the oils of Shahejie Formation

为主的上部层系原油(0.29~0.45)(表 2、图 4d),反映王古 1 井原油相对偏低(未达平衡终点值),甚至低于同井奥陶系灰岩方解石脉包裹体成分的对值(分别为 0.52, 0.58)。理论上,被包裹的烃类成熟度极可能低于油藏中的原油,王古 1 井原油成熟度参数 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta)$ 值反而偏低,可能与原油中甾萜类化合物含量低从而导致其分辨率不高有关。王古 1 井原油较低的 Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 值、低分子量孕甾烷与三环萜烷占绝对优势及相对高值的 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$ 反映原油已达到相对较高的成熟度。成熟度是影响原油、烃源岩中生物标志物相对分布与丰度的重要因素,随着成熟度的增加,原油、烃源岩链烷烃丰度会增加,甾、萜类化合物丰度会降低(Pang *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2003),低分子量三环萜烷相对于藿烷系列增加(Seifert and Moldowan, 1978; Peters *et al.*, 1990),孕甾烷相对于常规甾烷系列丰度常会增加(尽管孕甾烷系列的相对丰度还与沉积环境相关)(曾宪章等, 1989)。此外,经络合处理后的样品中伽玛蜡烷含量较低,伽玛蜡烷/ C_{30} 藿烷为 0.31,显示与王家岗油田沙河街组高含量伽玛蜡烷原油有显著的区别(表 2、图 4a);王古 1 井原油甾烷/藿烷值也远低于沙河街组(表 2、图 4c)。

3.2 王古 1 井奥陶系储层包裹体成分分析

王古 1 井原油络合处理后的甾、萜类化合物谱图尽管反映其自身的特点,但原油中可提供重要地质、地球化学信息的甾、萜类化合物丰度仍然偏低,从而影响分析效果。本研究对王古 1 井碳酸盐岩储层

(3 426.6 m)方解石脉中的包裹体烃类作了进一步分析,以获取更多的烃类生物标志物及母源岩信息。

在顺利提取王古 1 井包裹体成分的前提下,着重对包裹体中的饱和烃进行了色谱-色质分析。结果表明,包裹体中饱和烃总离子流图与常规处理指纹相似,具有正构烷烃含量相对较高、类异戊二烯烃较低、 $Pr/Ph < 1$ 、 Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 值较低的特征(图 5a), $m/z 217$ 、 $m/z 191$ 质量色谱图与常规分析、络合处理分析结果大相径庭(图 5b, 5c、图 3、图 2b, c)。包裹体中甾、萜类化合物较为完整、规则性的分布说明包裹于矿物中的烃类可能受到了较好的保护,并且在一定程度上体现了油气充注时的原始面貌。类似地,包裹体烃类也显示相对较高的热演化程度,体现在具有相对高丰度的低分子量孕甾烷系列(C_{21-22}/C_{27-29} -甾烷值 0.09)与三环萜烷系列(三环萜/五环萜值 0.35),原油 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$ (0.52)与 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta)$ (0.52)值也相对高于上覆沙河街组原油(表 3、图 4b、图 5b, 5c)。包裹体烃还具有 $C_{27}-C_{29}$ - $\alpha\alpha\alpha$ 规则甾烷呈“V”字型分布、伽玛蜡烷含量相对较低的特征,伽玛蜡烷/ C_{30} 藿烷值仅为 0.17。以上包裹烃类的组成与分布特征对识别王古 1 井奥陶系潜山油气的来源及其成因至关重要。

3.3 王古 1 井奥陶系原油油源分析

东营凹陷主要有 2 套主力烃源岩,分别是淡水相的沙三段、咸水相的沙四段。这 2 套烃源岩在王古 1 井附近的牛庄洼陷、广利洼陷及其斜坡带较为发育。迄今为止,该区所发现的油气主要源于这 2 套生

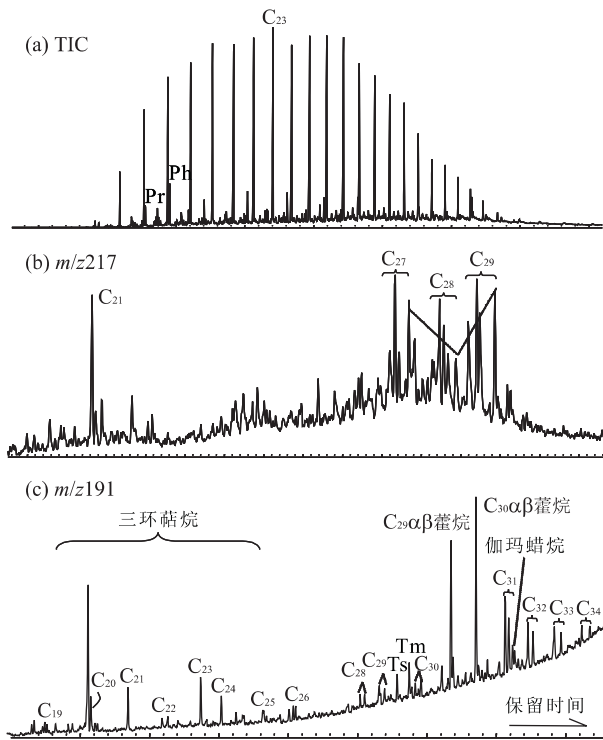


图 5 王古 1 井储层包裹体成分饱和烃 TIC、 $m/z217$ 、 $m/z191$ 质量色谱

Fig. 5 TIC, $m/z217$ and $m/z191$ mass chromatograms of the inclusion component from the WG 1 well

油岩(张林晔等, 1999; 庞雄奇等, 2001; Pang *et al.*, 2003; 庞雄奇等, 2004; Li *et al.*, 2003). 最近丁家屋子孔店组、王古 1 井奥陶系油气的发现引发了是否存在深层烃源岩的讨论与研究. 东营凹陷已有多口深井钻遇孔店组暗色泥岩, 如王 46 井、柳参 2、新东风 1、莱深 1. 分析测试结果显示, 下伏于沙四段的孔店组二段可能为东营凹陷另一套以往未被重视的重要烃源岩. 从生烃潜力特别是烃源岩热成熟度角度来看, 同区中生界、古生界不太可能为研究区深层油气的主力烃源岩(谯汉生等, 2002). 与渤海湾盆地其他地区类似(受进才, 2002), 王古 1 井奥陶系原油最可能的油源为下第三系深层沙四段及其下伏孔店组.

沙四段深层烃源岩的存在及其生烃潜能已被确认(Li *et al.*, 2003), 研究区王家岗、八面河、草桥—乐安、羊角沟、广利等油田油气已被证实主要来自沙四段(张林晔等, 1999; 庞雄奇等, 2001; Pang *et al.*, 2003; 庞雄奇等, 2004; Li *et al.*, 2003), 此类原油成熟度相对不高, 反应来自接近成熟至中等成熟的烃源岩. 王家岗地区近年发现相当量的孔店组油气, 研究表明, 其为深层沙四段与孔店组烃源岩所

提供, 具有混源成因, 反映孔店组烃源岩具有一定的液态烃生成能力.

从 $m/z191$ 质量色谱图来看, 王古 1 井原油、包裹烃中的低伽玛蜡烷含量特征与沙四段烃源岩相对高丰度伽玛蜡烷不相吻合, 而与王 46 井钻遇的孔店组的泥岩具有较好的相关性(图 5、6), 指示后者为其可能的烃源岩. 但王 46 井孔店组烃源岩甾烷指纹与沙四段烃源岩及其相关原油未表现出明显的差异(图 6), 反映烃源岩生源母质的相似性.

王古 1 井原油正构烷烃单体烃同位素分布特征明显不同于同区沙河街组, 王古 1 井不同碳数正构烷烃 $\delta^{13}C$ 值相差不大, 并呈逐渐增加趋势(图 7); 沙河街组王 119X3、通 61—119 井原油不同碳数正构烷烃 $\delta^{13}C$ 值变化较大, 随碳数增加具有先增加后降低的趋势, nC_{32} 的 $\delta^{13}C$ 值出现异常(图 7). 王 46 井 4 115.8 m 孔店组烃源岩正构烷烃中 $nC_{19} \sim nC_{31}$ 的 $\delta^{13}C$ 值与王古 1 井奥陶系原油特别接近, 曲线变化趋势基本相同(图 7)(头尾碳数出现异常可能与仪器稳定性有关), 进一步揭示王古 1 井奥陶系原油与王 46 井孔店组烃源岩具有较好的相关性.

值得一提的是, 研究区孔店组烃源岩可能具有一定的非均质性. 王 46 井钻遇的孔店组烃源岩性质与邻区昌潍坳陷孔二段及其相关原油, 以及渤海湾盆地大港探区沧东—南皮孔二段成因油气尚有区别, 后者既有低丰度伽玛蜡烷含量特征, 同时具有王 46 井孔店组烃源岩不具备的显著的 C_{29} -规则甾烷优势特征(反映湖沼相丰富的高等植物生源输入), 表明渤海湾盆地不同凹陷孔店组烃源岩存在成因差异. 引人注目的是, 王家岗近 10 口孔店组工业油流井原油都具有较强的 C_{29} -规则甾烷优势, 而目前区内尚未钻遇具有这一典型特征的烃源岩. 综合分析认为, 尚未钻遇的烃源岩极可能为孔二段(沙四段烃源岩显然不具备 C_{29} -规则甾烷优势特征(张林晔等, 1999; 庞雄奇等, 2001; Pang *et al.*, 2003; 庞雄奇等, 2004; Li *et al.*, 2003), 而渤海湾盆地典型的孔二段烃源岩及相关油气几乎都具有这一普遍特征). 王 46 井并非位于牛庄洼陷中心地带, 尽管其可对斜坡带潜山油气作出贡献, 该井钻遇的孔店组未必是区内最具代表性的孔二段烃源岩. 何以形成区内孔店组烃源岩性质的差异有待进一步研究.

东营凹陷孔二段为局限湖泊—冲洪积沉积, 上部孔一段为河流—盐湖相, 主要发育 4 套储层. 孔二段烃源岩作为生油岩较为可靠, 岩性以灰色、深灰色

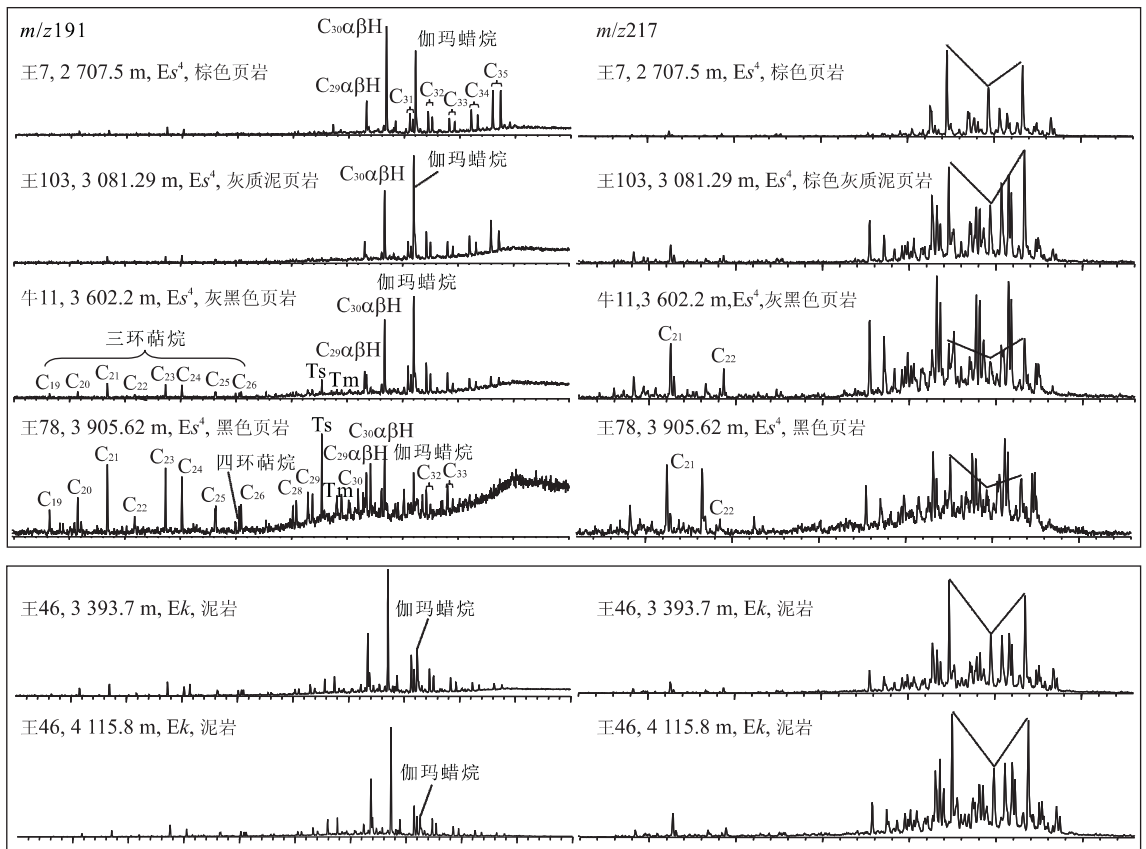


图 6 牛庄洼陷及其斜坡带沙四段、孔店组烃源岩 $m/z191$ 、 $m/z217$ 质量色谱

Fig. 6 $m/z191$ and $m/z217$ mass chromatograms of the Es^4 and Ek rock extracts of the samples from the Niuzhuang sag and its south slope

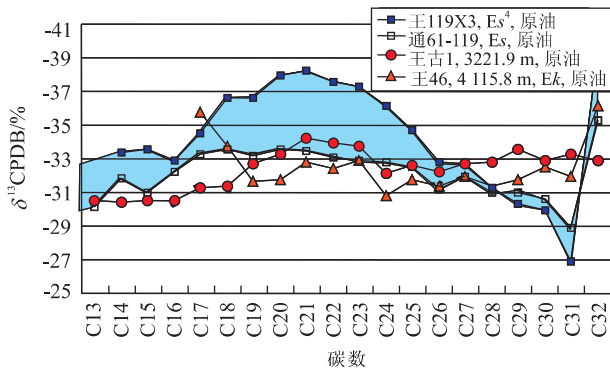


图 7 原油、烃源岩可溶物正构烷烃同位素分布

Fig. 7 Distribution of compound specific isotope of the alkanes from the oils and rock extracts

泥岩为主。结合数口钻探井, 预测孔二段地层厚 400~1 000 m, 暗色泥岩厚 200~500 m, 最大厚度超过 600 m。研究区王 46 井 4 200 m 孔店组烃源岩镜质体反射率 R_o 约 1.2%, $TOC > 0.9\%$; 同区菜深 1 井 4 160.8 m 烃源岩镜质体反射率 R_o 约 0.85%, TOC 值高达 1.41%。可见, 4 200 m 左右的孔店组烃

源岩仍处于液态烃范围, 并仍有一定的生烃潜能。孔二段烃源岩所形成的油气可经由孔店组与下伏地层间的不整合等运移通道进入奥陶系潜山或上伏地层, 形成油藏。

4 结论

王古 1 井奥陶系高蜡油具有高含量链烷烃和微量甾、萜类生物标志物特征, 常规分析无法获取具有重要生物标志物意义的甾、萜类化合物信息。利用分子筛络合技术去除正构烷烃, 将甾、萜类化合物浓缩后进行色谱检测, 揭示王古 1 井奥陶系原油含有相对较高丰度的低分子量孕甾烷、三环萜烷系列, 原油 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$ 、 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$ 值分别 0.63、0.49, 反映母源岩相对较高的成熟度; 原油还具有低含量伽玛蜡烷的特征。以上特征不同于上覆沙河街组原油, 反映王古 1 井原油成因的差异。包裹体成分分析揭示, 王古 1 井储层包裹烃具有

Pr/Ph<1 和蜡质烃、低分子量孕甾烷与三环萜烷系列含量相对较高而伽玛蜡烷含量较低的特征。原油络合处理、储层包裹烃分析及正构烷烃单体烃同位素对比结果一致显示,王古 1 井奥陶系原油与王 46 井孔店组烃源岩具有较好的相似性,与沙四段烃源岩相关性较差,孔店组而非沙四段为其可能的烃源岩。

致谢:感谢中国石油大学油气成藏机理教育部重点实验室王飞宇教授、朱雷及中石油开发研究院中心徐冠军同志对本研究实验工作的帮助与协作。

References

- Huang, H. P., Larter, S. R., Love, G. D., 2003. Analysis of wax hydrocarbons in petroleum source rocks from the Damintun depression, eastern China, using high temperature gas chromatography. *Organic Geochemistry*, 34: 1673—1687.
- Li, S. M., Pang, X. Q., Qiu, G. Q., et al., 2004. Oil migration and accumulation mechanisms for heavy oils in north steep slope of Dongying depression, eastern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4): 451—456 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. M., Li, M. W., Pang, X. Q., et al., 2003. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang south slope of Bohai Bay basin. Part 1: Source rock characterization. *Organic Geochemistry*, 34(3): 389—412.
- Liu, K. Q., Jin, Z. J., 2004. Ordovician petroleum accumulation system in Tazhong low uplift of Tarim basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4): 489—494 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H., Wang, T. G., Wang, C. J., et al., 2001. Hydrocarbon sources of high waxy condensate oil and gas pools in Qianmiqiao buried hill zone of Huanghua depression. *Petroleum Exploration and Development*, 28(4): 17—21 (in Chinese with English abstract).
- Lü, X. X., 1992. Oil and gas accumulation in burial hill of Bامianhe, Bohai Bay basin. *Acta Petrolei Sinica*, 20(2): 23—29 (in Chinese with English abstract).
- Pang, X. Q., Li, M. W., Li, S. M., et al., 2003. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang south slope of Bohai Bay basin. Part 2: Evidence for significant contribution of mature source rocks to “immature oils” in the Bامianhe field. *Organic Geochemistry*, 34(7): 931—950.
- Pang, X. Q., Li, S. M., Jin, Z. J., et al., 2004. Oil and gas migration and accumulation in Bامianhe zone, Bohai Bay

- basin. *Science in China (Ser. D)*, 34 (Suppl. 1): 152—161 (in Chinese).
- Pang, X. Q., Li, S. M., Li, M. W., et al., 2001. Origin of “immature oils” in the Bامianhe oilfield of eastern China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(4): 586—591 (in Chinese with English abstract).
- Peters, K. E., Moldowan, J. M., Sundararaman, P., 1990. Effects of hydrous pyrolysis on biomarker thermal maturity parameters: Monterey phosphatic and siliceous members. *Organic Geochemistry*, 15: 249—265.
- Qiao, H. S., Fang, C. L., Niu, J. Y., et al., 2002. Deep petroleum geology of the Bohai Bay basin. Petroleum Industry Press, Beijing, 102—134 (in Chinese).
- Seifert, W. K., Moldowan, J. M., 1978. Application of steranes, terpanes, and monoaromatics to the maturation, migration and source of crude oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 77—95.
- Tuo, J. C., 2002. Research status and advances in deep oil and gas exploration. *Advance in Earth Sciences*, 17(4): 565—571 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., He, P., Hao, S., 1997. Origin of Chinese lacustrine high-wax oils and organic petrology of its source rocks. *AAPG Bull.*, 81: 1567.
- Wu, J. F., Sun, Y. M., Xi, X. Y., et al., 2003. Practical methodology for study on petroleum accumulation—Biomarker analysis of petroleum within fluid inclusion: A case for south-east Shaleitian structure zone. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 348—354 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, X. Z., Liang, D. G., Wang, Z. R., et al., 1989. Biomarkers in terrestrial oils and source rocks in China. Gansu Science and Technology Press, Lanzhou, 206 (in Chinese).
- Zhang, L. Y., Zhang, C. R., 1999. Origins of immature oils and related petroleum systems: Case studies from the southern slope of Niuzhuang sag, Jiyang depression. Petroleum Industry Press, Beijing, 5—123 (in Chinese).
- Zhao, M., Zhao, H., Wang, H. T., et al., 2003. Experimental study of removal of alkanes by molecular sieve. *Petroleum Exploration and Development*, 30(5): 83—85 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李素梅, 庞雄奇, 邱桂强, 等, 2004. 东营凹陷北部陡坡带稠油成藏机理与油气运聚特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(4): 451—456.