

文章编号: 1000-0550(2012)02-0375-10

川东北地区普光2井飞仙关组储层沥青 地球化学特征及成因分析^①

赵兴齐 陈践发 张铜磊 刘岩 吴雪飞 刘娅昭 刘芬芬

(中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249)

摘要 根据储层中沥青的产状及类型、族组成、饱和烃色谱、生物标志化合物以及储层沥青反射率等,对普光2井飞仙关组储层固体沥青的地球化学特征及成因进行了详尽的剖析。研究表明,普光2井飞仙关组储层沥青为古油藏原油经裂解成气之后的残留物,属热演化的焦沥青。储层沥青的正构烷烃分布较为完整,碳数在 $C_{14} \sim C_{30}$ 范围,没有受到明显的生物降解作用。 Pr/Ph 、 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值都小于1.0;OEP值1.25~1.43,CPI值0.98~1.19,无奇偶优势或偶奇优势;规则甾烷系列中 C_{27} 化合物含量占优势, $C_{27}-C_{29}$ 规则甾烷呈不对称的“V”字型分布,甾烷异构化程度较低,明显低于异构化平衡值,认为是由于高、过成熟阶段S构型比R构型裂解速率更快的结果。飞一段、飞二段孕甾烷、升孕甾烷含量明显较飞三段高,可能是有机质生源或沉积环境性质上的不同所致。萜类化合物以五环萜烷为主,三环萜烷较为发育,其中以 C_{23} 三环萜烷为基峰,伽马蜡烷的含量较高。这些特征表明普光2井储层沥青主要来源于低等水生生物,有机质的热演化程度较高,主要处于高一过成熟阶段,有机母质形成于沉积水体咸度较高的海相沉积环境中。储层沥青中高含量25-降藿烷并非生物降解作用所致,而主要与源岩的热演化程度较高有关。

关键词 储层沥青 地球化学特征 沥青成因 飞仙关组 普光2井 川东北

第一作者简介 赵兴齐 男 1984年出生 博士研究生 地球化学 E-mail: zhaoxingqi_77@126.com

中图分类号 P593 **文献标识码** A

在普光地区长兴—飞仙关组储层中含有大量的沥青。由于储层固体沥青是石油通过一系列地球化学作用转变而成的,记录了油气藏形成之后石油所经历的演化历史过程的地质—地球化学信息,通过对各种成因类型储层固体沥青的地球化学对比分析能够更好地研究固体沥青的成因机理。对储层固体沥青的成因研究也有益于分析古油藏的成藏期次,重建其充注—成藏—破坏历史,从而指导我国海相碳酸盐岩油气勘探和资源评价。前人对川东北地区储层沥青进行了大量的研究,取得了很多重要认识^[1~6],认为川东北飞仙关组中的沥青是古油藏原油经热降解的演化产物,属于后生储层沥青,在成因上为焦沥青类。但在飞仙关组储层沥青中检测到可能表征古油藏经历生物降解改造的25-降藿烷系列还鲜有报道,关于飞仙关组储层沥青的源岩还存在争议,储层沥青中甾烷异构化值偏低,与邻近烃源岩的有机质热演化程度不一致的现象目前还没有合理的解释。基于以上存在的问题,本文拟通过对普光2井飞仙关组储层沥青的产状及类型、族组成、饱和烃色谱、生物标志化合物

以及沥青反射率等特征进行系统的研究,希望能够进一步剖析该区储层沥青的地球化学特征及成因,从而为探索该区油气成藏演化规律及勘探提供科学依据。

1 研究区地质概况

普光气田位于四川盆地东部宣汉—达县断褶带的东北段,为一构造—岩性复合型大型气藏,是我国迄今发现的最大的整装海相碳酸盐岩大气田^[7]。该区除泥盆系缺失外,其沉积层系基本齐全,具有沉积厚度大、旋回多、变质弱的特点。经历了包括加里东、海西、印支、燕山、喜山等多次构造运动。该区烃源岩非常发育,在纵向上可划分出 ϵ_1 、 S_1 、 P_1 、 P_2 、 T_3 、 J_1 等6套有效烃源岩,其中 ϵ_1 、 S_1 、 J_1 主要为泥质烃源岩, P_1 主要为碳酸盐岩烃源岩, P_2 、 T_3 主要为煤系烃源岩。前人研究认为,川东北地区主力烃源岩主要来自上二叠统泥岩、碳酸盐和志留系泥岩^[8]。普光气藏圈闭面积约为45.6 km²,主要含气层段为下三叠统飞仙关组及上二叠统长兴组,均为白云岩储层。主要的盖层为中下三叠统膏岩及上三叠统、侏罗系泥质岩。

^①国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(编号:2006CB202307)资助。
收稿日期:2011-04-25; 收修改稿日期:2011-06-30

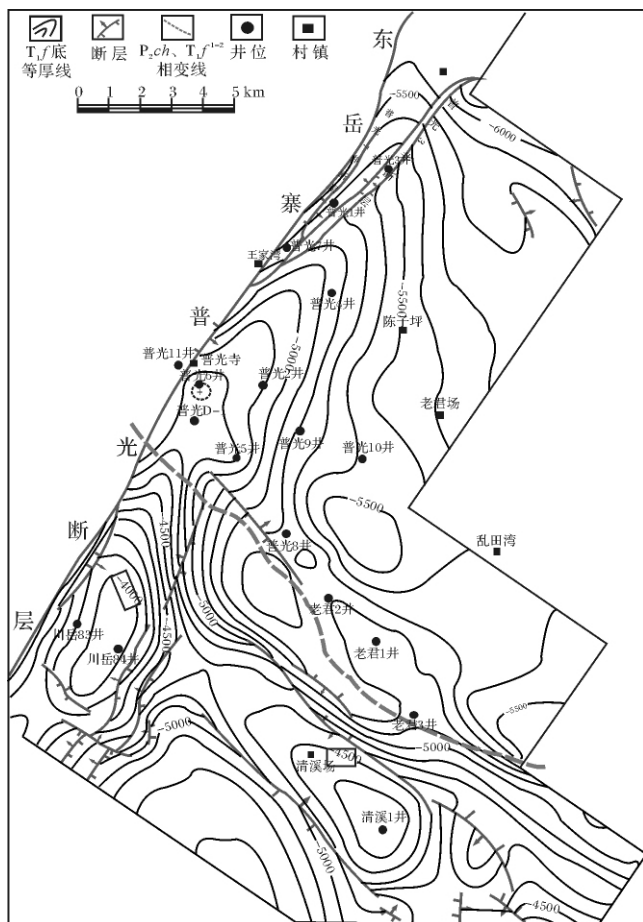


图1 普光气田构造图

Fig. 1 Map of tectonic units of Puguang gas field

普光2井坐落在四川省宣汉县普光镇,是四川盆地川东断褶带黄金口构造带东岳寨—双石庙潜伏背斜带普光构造长轴高部位(图1)。普光2井上二叠统长兴组和下三叠统飞仙关组储层中普遍含有沥青(图2),其以粒间孔隙、溶孔中粒状充填及脉状、网络状充填。其中下三叠统飞仙关组鲕粒滩储层沥青主要产状有:①各种类型白云岩的晶间孔、粒间溶孔型



图2 普光2井含沥青白云岩储集层

Fig. 2 Containing asphalt dolomite reservoir of Puguang 2 Well

沥青,是飞仙关组储层沥青类型中最主要的分布形式,溶孔主要形成于埋深在2000 m左右的浅埋环境。②残余鲕粒内溶孔或鲕膜孔型沥青,以及构造碎裂缝型沥青,这类孔隙形成时间较早,应为大气淡水环境下溶蚀形成,留下来的也较少。③构造碎裂缝型沥青,沥青呈细小团块充填于碎粒间,可能为进油后孔隙被挤压破碎所形成^[9]。前人研究认为这些地层中的沥青均是古油藏原油或运移液态烃经热演化的残留产物^[1-6]。

2 样品及实验条件

本次分析共采集普光2井储层沥青样品6件,见表2。称取岩样50 g,粉碎后用氯仿抽提,获得氯仿沥青“A”。氯仿沥青“A”的沥青质用正己烷沉淀后,将其可溶物通过硅胶氧化铝层析柱,依次用正己烷和二氯甲烷冲洗,分离出饱和烃、芳香烃备用。将饱和烃和芳香烃进行气相色谱—质谱分析,所用仪器为Finnigan公司DSQ型GC—MS析系统。检测环境:温度为25℃,相对湿度为57%,室内清洁无尘。色谱—质谱分析条件:载气为99.999 9%氦气,进样口温度为300℃,传输线温度为300℃,色谱柱为HP—5MS弹性石英毛细柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm),升温程序为初温100℃(恒温1 min),以4℃/min的升温速率升温至220℃,再以2℃/min的升温速率升温至300℃,保持20 min,载气流速为1 ml/min,采用EI(70 eV)电子轰击方式,灯丝电流为100 μA,倍增器电压为1 200 eV,采用全扫描采集方式。

3 储层沥青的地球化学特征

3.1 氯仿沥青“A”及族组成特征

对普光2井沥青样品进行族组分分离,储层沥青样品飞一、二段氯仿沥青“A”含量较高,为0.26%~0.72%,飞三段含量明显偏低,为0.015%;饱和烃、

表1 普光2井储层沥青族组成特征

Table 1 The group composition of reservoir bitumen in Well Puguang 2

井号	层位	深度/m	含量/%						饱/芳	非/沥青质
			沥青"A"	饱和烃	芳烃	非烃	沥青质	非+沥青质		
普光2井	T ₁ f ³	4821.0	0.015	9.68	0.68	54.57	22.04	76.61	14.23	2.48
普光2井	T ₁ f ²	4943.2	0.26	1.75	0.44	44.61	50.58	95.19	4.00	0.88
普光2井	T ₁ f ¹	5050.9	0.72	13.80	1.55	56.12	28.37	84.50	8.90	1.98
普光2井	T ₁ f ¹	5065.7	0.20	4.30	1.04	50.59	42.39	92.98	3.88	1.19

芳烃含量较低,分别为1.75%~13.80%和0.44%~1.55%,非烃及沥青质含量相对较高,其分别为44.61%~56.12%和22.04%~50.58%,非烃+沥青质含量较高,为76.61%~95.19%,饱和烃/芳烃比值为3.88~14.23(表1)。

3.2 饱和烃色谱特征

普光2井储层沥青的正构烷烃呈单峰型分布(图3),碳数在C₁₄~C₃₀范围,主峰碳出现在C₂₀左右,色谱图上基线出现较平缓的鼓包,但从它们低碳数化合物较少的情况看,说明储层沥青没有受到明显的生物降解作用,其可能是热裂解作用使正烷烃损失较多所造成。碳优势指数(CPI)为1.25~1.43,奇偶优势指数(OEP)为0.98~1.19,不具备奇偶优势和偶奇优势。C₂₁-/C₂₂₊值为0.54~1.60,C₍₂₁₊₂₂₎/C₍₂₈₊₂₉₎为4.53~26.69,Pr/Ph为0.36~0.80,Pr/nC₁₇和Ph/nC₁₈分别为0.52~0.69和0.71~0.88,以上特征总体表明储层沥青的烃源岩来源于还原性的

沉积环境中,有机母质主要以低等水生生物为主,且热演化程度较高。

3.3 甾烷类化合物分布特征

甾烷化合物几乎全部来源于真核生物,其在经历了漫长的地史演化后,仍能保存基本骨架,因而其结构组成和某些特征分子能提供有机质生源构成、古沉积环境等方面的信息。沉积环境的不同导致生物种类的不同,并造成了生物标志化合物组成的差异。人们常根据规则甾烷C₂₇、C₂₈、C₂₉的相对含量的高低来确定不同生源贡献的比例,用于判断有机质母质类型以及沉积环境^[10]。通常认为,藻类和低等水生生物富含孕甾烷系列、C₂₇和C₂₈规则甾烷,而C₂₈甾烷相对含量的变化比较复杂,可能与浮游植物生物多样性有关,而相对高含量的C₂₉甾烷可以指示高等植物生源^[11]。

普光2井储层沥青抽提物中的甾烷化合物以规

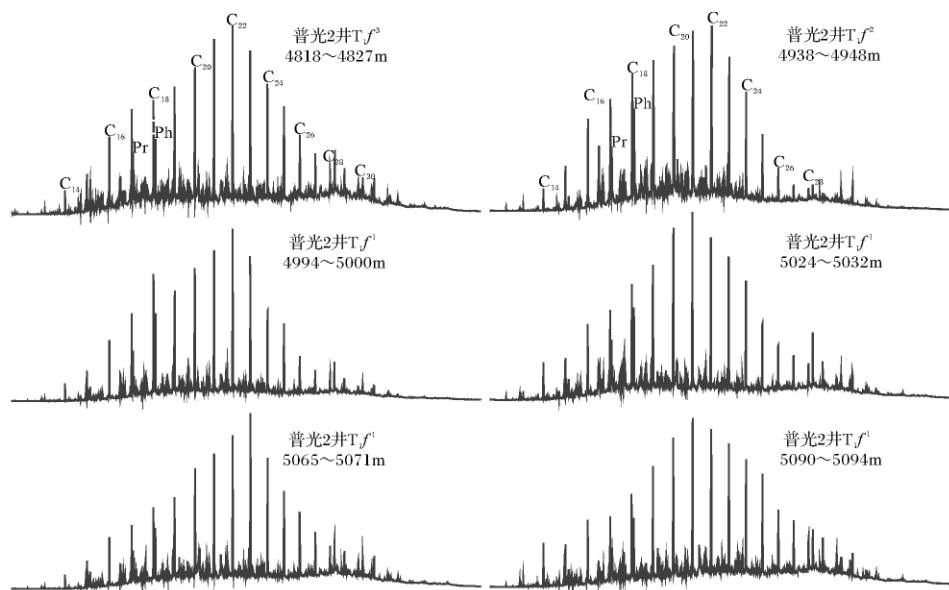


图3 普光2井储层固体沥青饱和烃气相色谱图

Fig. 3 Gas chromatogram for saturated hydrocarbons of solid bitumen in Well Puguang 2

表2 普光2井储层沥青饱和烃气相色谱参数

Table 2 Gas chromatograph parameters for saturated hydrocarbons of reservoir bitumen in Well Puguang 2

井号	深度/m	层位	岩性	主峰碳	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	C ₂₁ - ¹ C ₂₂₊	CPI	OEP
普 光 2 井	4818~4827	T ₁ f ³	灰色残鲕中细晶白云岩	C ₂₃	0.80	0.64	0.71	1.17	1.25	1.19
	4938~4948	T ₁ f ²	深灰色鲕粒白云岩	C ₂₂	0.45	0.65	0.85	0.54	1.28	1.12
	4994~5000	T ₁ f ¹	深灰色残鲕中晶白云岩	C ₂₂	0.48	0.69	0.85	0.72	1.37	1.05
	5024~5032	T ₁ f ¹	深灰、黑色残鲕白云岩	C ₂₁	0.36	0.68	0.88	1.29	1.37	1.01
	5065~5071	T ₁ f ¹	深灰色中晶角砾溶孔白云岩	C ₂₃	0.44	0.58	0.78	0.69	1.30	1.08
	5090~5094	T ₁ f ¹	深灰色角砾溶孔白云岩	C ₂₀	0.44	0.52	0.75	1.60	1.43	0.98

则甾烷为主,含有一定的重排甾烷、孕甾烷以及升孕甾烷(图4)。在规则甾烷中C₂₇规则甾烷含量占优势,C₂₇-C₂₉甾烷呈不对称的“V”字型分布,反映原始母质输入具有水生生物和陆源高等植物的混源输入特征,其C₂₇规则甾烷含量较高,表明储层沥青的成油母质有机质生源中水生生物贡献较大,反映了海相古生界烃源岩的甾烷分布特征^[12]。原油中低的重排甾烷/甾烷比值指示着缺氧、贫黏土的碳酸盐岩生油岩的存在,而高的重排甾烷/甾烷比值是原油来源于富含黏土生油岩的典型特征。研究区沥青的重排甾烷/规则甾烷比值较低,为0.17~0.28(表3),表明源岩形成于缺氧的碳酸盐岩沉积环境,其主要来源于二叠

系海相碳酸盐岩。储层沥青的甾烷的异构化程度较低,C₂₉ααα20S/20(S+R)值为0.33~0.42,明显低于甾烷异构化的平衡值(0.52~0.55),这与实测的飞仙关组源岩R₀值都在2.0%左右不一致^[6,13,14],分析认为这是由于高、过成熟阶段S构型比R构型裂解速率更快的结果^[15-17]。值得注意的是,飞三段储层沥青孕甾烷、升孕甾烷含量明显较飞一段、飞二段低,结合前面的Pr/Ph值变化情况,说明古油藏中可能曾有两期不同油源的原油充注。通过成熟度参数的对比,其孕甾烷、升孕甾烷的含量高低并非成熟度不同所致,可能由于有机质生源或沉积环境的不同所造成。

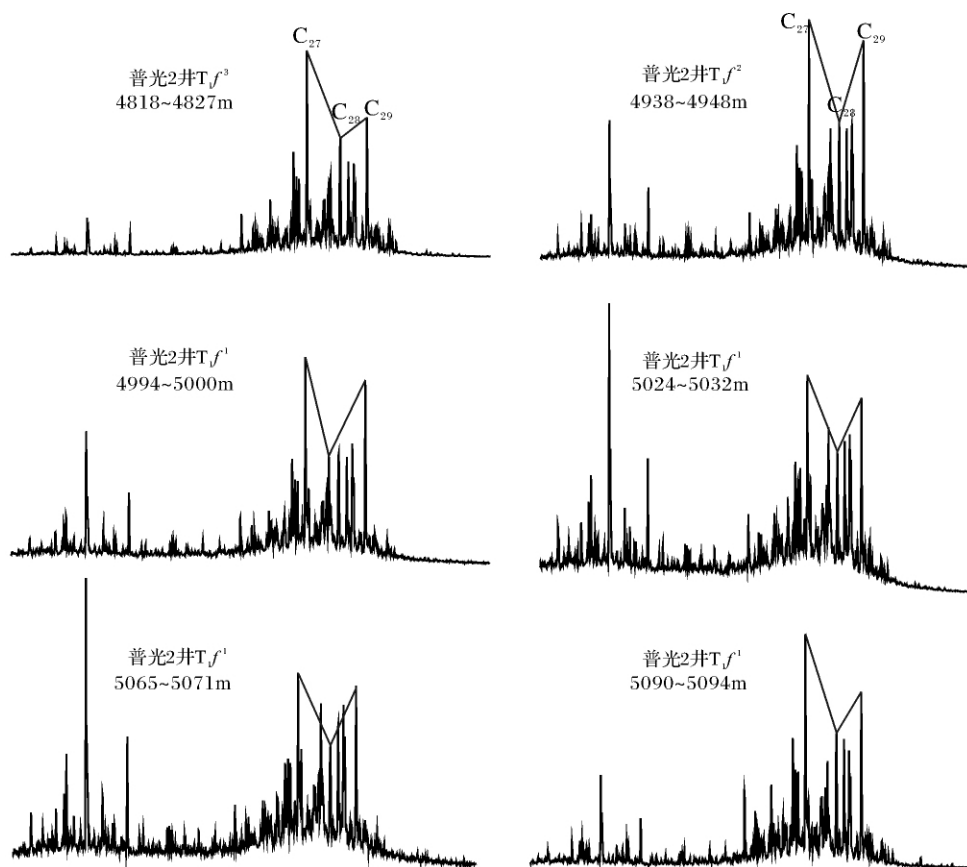


图4 普光2井储层沥青 m/z217 质量色谱图

Fig. 4 m/z 217 mass chromatogram of reservoir bitumen from Feixianguan Formation in Well Puguang 2

3.4 萜烷类化合物分布特征

普光2井储层沥青抽提物中萜烷类化合物比较发育,萜烷类化合物以五环萜烷为主,其中又以17 α (H)藿烷系列为主要成分(图5)。三环萜烷较为发育,其三环萜烷中以C₂₃三环萜烷为基峰,指示水生生物有机质生源,C₂₁/C₂₃三环萜比值为0.85~0.96。C₃₁-C₃₅随侧链增长丰度依次下降,碳数大于C₃₁的升藿烷呈正常阶梯状级数分布,表明他们并非来源于典型的强还原环境中的碳酸盐岩烃源岩。伽马蜡烷含量较高,其伽马蜡烷/C₃₀藿烷比值为0.28~0.33(表3),表征原始有机质的沉积水体咸度较高,这也说明普光2井储层沥青更有可能来源于海相沉积地层。甾烷与藿烷的比值反映了藻类与细菌的相对贡献的大小,普光2井藿烷/甾烷的比值较大,其值为2.18~2.92,表明源岩有机质中细菌类低等水生生物的贡献较大。飞二、飞一段储层沥青的三环萜烷相对含量较飞三段明显偏高(图5),分析认为这可能与烃源岩的类型或沉积环境不同有关,在飞二、飞一段沉积时期

主要为台地边缘浅滩相,而飞三段主要为台地蒸发岩相。Ts/Tm是反映有机质成熟度的一个指标,随着成熟度增高,Ts/Tm比值增大,生油门限为0.67,上限可达到1^[18],但其也受源岩沉积有机相的影响^[12]。由于研究区总体处在碳酸盐岩沉积相下,因此可以利用Ts/Tm比值来反映该区源岩的热演化程度。普光2井储层沥青样品的Ts/Tm比值均较高,其值分布在0.78~0.92之间(表3),显示了高一过成熟的热演化特征。

3.5 储层沥青反射率

镜质体反射率(R_o)作为源岩的热演化程度的标尺已得到了广泛应用^[19-21],实验研究结果表明固体沥青的反射率(R_b)随热演化程度的增加也发生有规律地变化,在评价缺乏镜质体的碳酸盐地层热演化程度中得到比较广泛地应用。沥青反射率主要反映了沥青形成后的热演化史。普光2井储层沥青样品反射率(R_b)为2.38%~3.66%,换算的镜质体反射率

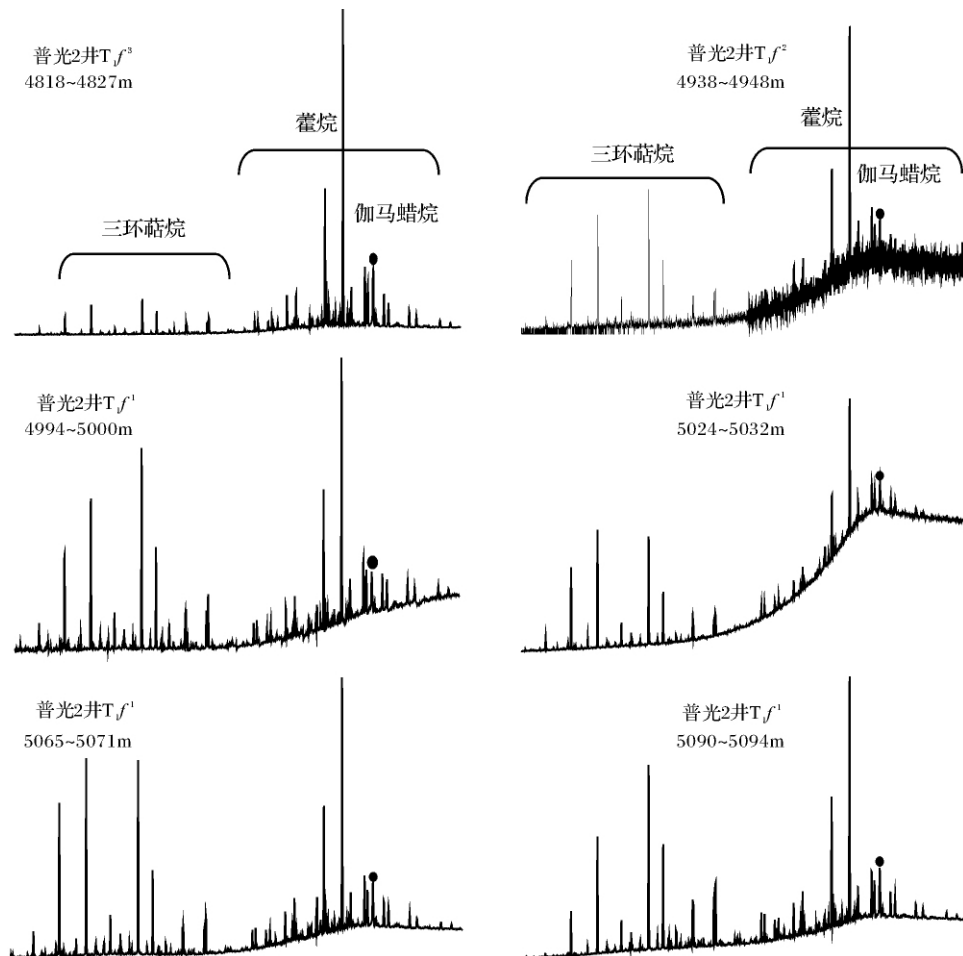


图5 普光2井飞仙关组储层沥青 m/z 191 质量色谱图

Fig. 5 m/z 191 mass chromatograms of reservoir bitumen from Feixianguan Formation in Well Puguang 2

表3 普光2井储层沥青甾萜烷地球化学参数

Table 3 Geochemistry parameters of steranes and terpanes from reservoir bitumen in Well Puguang 2

井号	深度/m	地层	$\frac{C_{21}}{C_{23}}$	$\frac{T_s}{T_m}$	$\frac{C_{29}H}{C_{30}H}$	伽马蜡烷	$\frac{C_{35}}{C_{34}}$	$\frac{C_{29}S}{(S+R)}$	三环萜烷	重排甾萜烷	藿烷
			三环萜烷			C_{30} 藿烷		C_{30} 藿烷	规则甾萜烷	藿烷	
	4818~4827	T_{1j}^3	0.85	0.92	0.14	0.29	0.51	0.34	0.61	0.18	2.69
普	4938~4948	T_{1j}^2	0.85	0.83	0.14	0.29	0.52	0.33	2.05	0.18	2.39
光	4994~5000	T_{1j}^4	0.92	0.78	0.15	0.28	0.48	0.33	2.29	0.17	2.18
2	5024~5032	T_{1j}^4	0.99	0.81	0.15	0.32	0.49	0.42	3.34	0.28	2.92
井	5065~5071	T_{1j}^4	0.94	0.80	0.15	0.29	0.47	0.39	2.31	0.17	2.20
	5090~5094	T_{1j}^4	0.96	0.82	0.15	0.33	0.49	0.41	3.30	0.27	2.91

($R_o = 0.6569R_b + 0.3364$) 为 1.90% ~ 2.74% ,其样品的 R_o 介于 2.18% ~ 2.60% ,表明储层沥青处于高一过成熟的热演化阶段 ,因此这部分沥青应为热成因的 ,这为沥青为焦沥青提供了有力的证据。储层沥青折算反射率 R_o 值随深度的增加总体有增大的趋势 (图 6)。

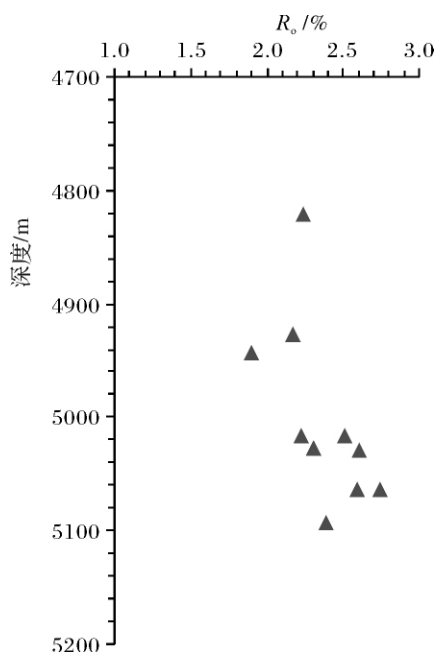


图6 普光2井储层沥青反射率与深度关系图

Fig. 6 Relationship between the bitumen and depth in Well Puguang 2

3.6 固体沥青中 25-降藿烷的成因

一般而言,25-降藿烷系列是重要的特征性生物标志物,它可作为衡量原油遭受深度生物降解作用的可靠标志。但值得注意的是,生物降解作用自身是个氧化过程,它可使原来的烃类发生氧化,并形成相应的带官能团的化合物。因而有学者认为,25-降藿烷系列是一类客观存在的生物标志物,但只是浓度通常较低不易检测,但在遭受生物降解作用后其浓度可显

著提高。Peters 等从分子结构解释了 25-降藿烷的成因,其研究认为分子的体积和结构形态是控制 25-降藿烷形成的主要因素^[22]。Bost 等对委内瑞拉原油进行喜氧降解实验认为 25-降藿烷和藿烷的降解机理相同^[23]。包建平研究认为 25-降藿烷系列化合物并不一定是生物降解作用后的必然产物^[24]。Blanc 等得出的结论是 25-降藿烷是原油和生油层中原本就存在的生物标志物^[25],之所以在降解油中含量高,是因为生物降解作用选择性地消耗了更易降解的规则藿烷所致,并非由藿烷的脱甲基作用形成。

近年来不同学者对普光气田储层沥青的地球化学特征研究做了很多工作,发表了许多成果,但是其中检测可能表征古油藏遭受生物降解、水洗等作用的 25-降藿烷还鲜有报道。本次研究在普光 2 井储层沥青样品中均检出了含量较高的 25-降藿烷(图 7),据此,很多学者认为这些沥青经历了生物降解作用。通过对该区储层沥青的地质-地球化学特征分析认为这些高含量的 25-降藿烷并非由生物降解作用所导致,而主要与源岩的热演化程度较高有关。其理由有二:①首先,飞仙关组现今的地层埋深一般在 2 500 ~ 5 000 m 之间,温度处于 100 ~ 120℃,而喜氧细菌存活温度不超过 65 ~ 80℃,且需石油中无 H_2S ,因其有毒,而导致细菌死亡。前人研究表明普光气田飞仙关组气藏硫化氢含量平均在 14%,部分高达 16% ~ 17%^[26~28],因此,认为普光 2 井储层沥青未遭受生物降解作用的影响。其次,储层沥青的低碳数正构烷烃分布较为完整,色谱图上基线出现较平缓的鼓包,但从它们低碳数化合物较少的情况看,说明储层沥青没有受到明显的生物降解作用,其可能是热裂解作用使正烷烃损失较多所造成。②与规则藿烷相比,25-降藿烷的热稳定性更高,这是由于 25-位甲基取代位于藿烷结构的屏蔽位置,要失去这个甲基则需要释放更多的能量^[5, 29, 30],因而在高热演化的沥青中这类化合

物的相对含量就较高。

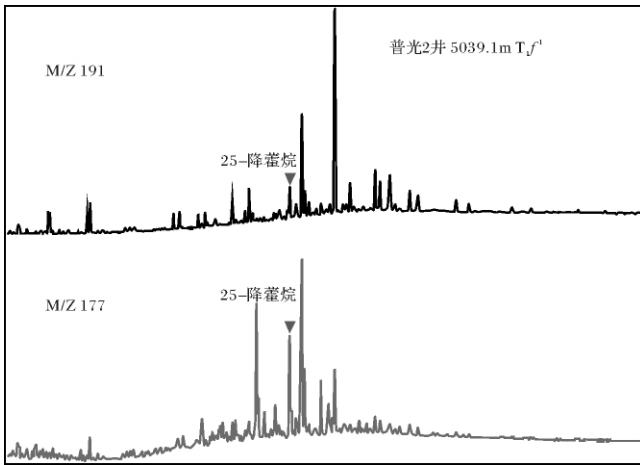


图 7 普光 2 井飞仙关组储层沥青 25-降藿烷色谱图
 Fig. 7 Mass chromatogram of 25-norhopane from reservoir bitumen in Well Puguang 2

4 储层固体沥青成因分析

沥青在地层中是一种常见的产物,其成因多种多样。一般来讲地层中的沥青有 3 种主要成因:①热演化成因沥青(焦沥青、碳沥青),是石油处于较高温地热系统中,轻的部分向链烷烃转化直至 CH₄;重的部分通过缩合作用形成以高碳为特征的多环焦沥青残余物。②冷变质成因氧化沥青(软沥青、地沥青、石沥青)是石油处于较低温度、较浅埋深的开启环境中普遍通过挥发、氧化、细菌降解、水洗等冷变质作用,促使石油中轻组分损失、胶质、沥青质组分增加从而

形成重质沥青。③脱沥青成因的沥青质沥青:是石油中注入了气态烃或轻烃而导致沥青质沉淀,也叫气洗,属物理分异产物^[31-32]。

从演化机理上分析,石油中各族烃的热裂解转化作用,可以分为以下 3 个方面:①芳香烃—同分异构化作用—原子团转移,进一步向 2 个方向演化:去烷基作用,形成石蜡烃和低分子量的芳香烃;高分子的缩合作用,形成高碳物质。②多环环烷烃—异构化作用—脱环化作用,进一步向 2 个方向演化:去烷基作用形成石蜡烃;单环环烷烃完全的脱环化作用,向石蜡化作用方向演化。③石蜡烃热裂解主要是碳链断裂,形成低分子量的烷烃。以上各族烃的最终演化向 2 个方向进行演化,一是低分子量的烃类不断裂解形成气态甲烷;二是含芳香核的高分子物质的缩聚作用向高碳固态物质聚集,进一步形成固体碳质沥青^[33]。普光 2 井储层沥青的地球化学特征表明,该区储层沥青未遭受明显的生物降解作用,储层沥青的热演化程度较高,处于高一过成熟阶段。因此普光 2 井中高含量的甲烷以及大量的固体沥青主要为原油热裂解的产物,这为储层沥青的裂解成因提供了佐证。

四川盆地东北地区飞仙关组顶面现今埋深一般在 2 500 ~ 5 000 m 之间,目前的地温小于 140℃(图 8),低于原油发生裂解的最低温度条件,但是,由于中三叠世的印支早期运动和晚侏罗世的燕山中期运动,使该区地层被剥蚀的厚度累计在 3 000 ~ 4 000 m 之间,尤其是中上侏罗统,被剥蚀厚度在 2 500 m 以上。从该区地质演化历程分析,晚侏罗世沉积后(燕

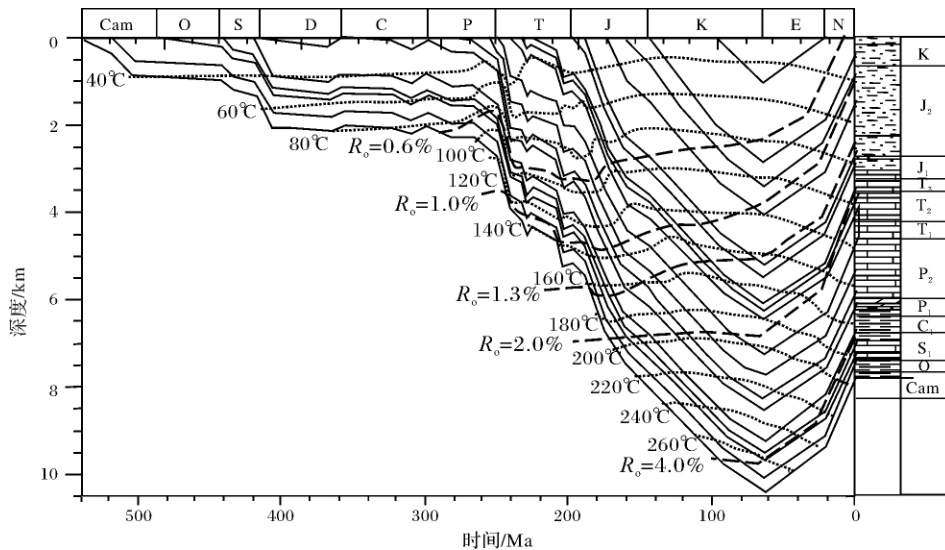


图 8 普光 2 井飞仙关组储层埋藏史、热演化史曲线图

Fig. 8 Burial and thermal evolution history curves of reservoir bitumen from Feixianguan Formation in Well Puguang 2

山中期运动之前),飞仙关组地层顶面埋深达到5 500~8 000 m不等,底面温度均超过160℃^[34,35],高者超过200℃,并且大于160℃的持续时间在20~35 Ma左右,具备了原油发生裂解的条件。其成藏过程主要为:印支晚期—燕山早期液态烃运聚形成油藏,燕山期埋深进一步加大,使早期形成的古油藏原油开始发生热裂解形成天然气和固体沥青,原油裂解气向上运移聚集成藏,而固体沥青残留在上二叠系、下三叠系中形成储层固体沥青。

5 结论与认识

(1) 储层沥青抽提物的氯仿沥青“A”、族组分特征及固体沥青反射率均显示了高一过成熟的特征,反映了该区沥青属于高一过成熟的焦沥青类。储层沥青其饱和烃中正烷烃系列碳数分布较为完整,表明其未遭受过明显的生物降解作用。

(2) 储层沥青的生物标志物特征表明,普光2井飞仙关组储层沥青有机质主要来源于低等水生生物,形成于沉积水体咸度较高的海相沉积环境中。飞三段储层沥青的C₂₇规则甾烷含量明显占优势,其孕甾烷、升孕甾烷含量明显较飞一段、飞二段低,结合Pr/Ph值变化情况,说明古油藏中可能曾有两期不同油源的原油充注。飞一段储层沥青的三环萜烷相对含量较飞二、飞三段偏高,这可能与烃源岩的类型或沉积环境不同有关。储层沥青的甾烷的异构化程度较低,与实测的飞仙关组源岩R₀值都在2.0%左右不一致,分析认为这是由于高、过成熟阶段S构型比R构型裂解速率更快的结果。

(3) 储层沥青中含有丰度较高的25-降藿烷,通过对该区地质—地球化学特征综合分析认为这些高含量的25-降藿烷并非由生物降解作用所导致,而主要与源岩的热演化程度较高有关。

(4) 普光2井储层沥青的成因为古油藏在经历较高温度条件下裂解成气,残余物形成的固体沥青,属于热演化的焦沥青。其成藏过程主要为:印支晚期—燕山早期液态烃运聚形成油藏,燕山期埋深进一步加大,使早期形成的古油藏原油开始发生热裂解形成天然气和固体沥青,原油裂解气向上运移聚集成藏,而固体沥青残留在上二叠系、下三叠系中形成储层固体沥青。

参考文献(References)

1 谢增业,魏国齐,李剑,等. 川东北飞仙关组鲕滩储层沥青与天然

- 气成藏过程[J]. 天然气工业,2004,24(12): 17-19 [Xie Zengye, Wei Guoqi, Li Jian, et al. Feixianguan Formation oolitic beach reservoir bitumen and gas reservoiring process in northeast Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(12): 17-19]
- 2 刘文斌,秦建中,孟庆强,等. 川东北地区飞仙关组—长兴组储层沥青反射率及含硫量特征[J]. 地质学报,2008,82(3): 373-379 [Liu Wenbin, Qin Jianzhong, Meng Qingqiang, et al. Reflectance and content of sulfur character of bitumen the Feixianguan-Changxing Formation, northeastern Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(3): 373-379]
- 3 王涌泉,熊永强,王彦美. 川东北固体沥青的有机地球化学[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(1): 76-80 [Wang Yongquan, Xiong Yongqiang, Wang Yanmei. Organic geochemistry of solid bitumen from the northeastern Sichuan Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(1): 76-80]
- 4 胡安平, Li Maowen, 杨春, 等. 川东北高含硫化氢气藏中储层沥青的特征[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 231-236 [Hu Anping, Li Maowen, Yang Chun, et al. Characteristics of reservoir bitumen in Puguang and Maoba gas fields with high H₂S content in northeastern Sichuan Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2010, 31(2): 231-236]
- 5 蔡勋育,朱扬明,黄仁春. 普光气田沥青地球化学特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 40-47 [Cai Xunyu, Zhu Yangming, Huang Renchun. Geochemical behaviors and origin of reservoir bitumen in Puguang gas pool [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 40-47]
- 6 王铜山,耿安松,孙永革,等. 川东北飞仙关储层固体沥青地球化学特征及其气源指示意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 340-348 [Wang Tongshan, Geng Anlian, Sun Yongge, et al. Geochemical characteristics of solid bitumen in reservoir and their implication for the origin of natural gas of Feixianguan Formation in Northeastern Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 340-348]
- 7 马永生,郭旭升,郭彤楼,等. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示[J]. 地质论评, 2005, 51(4): 477-480 [Ma Yongsheng, Guo Xusheng, Guo Tonglou, et al. Discovery of the large-scale Puguang gas field in the Sichuan Basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting [J]. Geological Review, 2005, 51(4): 477-480]
- 8 马永生. 普光气田天然气地球化学特征及气源探讨[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 1-7 [Ma Yongsheng. Geochemical characteristic and origin of natural gases from Puguang gas field on eastern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 1-7]
- 9 秦建中,等. 中国烃源岩[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 8-78 [Qin Jianzhong, et al. The Source Rocks of China [M]. Beijing: Science Press, 2005: 8-78]
- 10 秦建中,付小东,刘效曾. 四川盆地东北部气田海相碳酸盐岩储层固体沥青研究[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1055-1071 [Qin Jianzhong, Fu Xiaodong, Liu Xiaozeng. Solid bitumens in the marine carbonate reservoir of gas field in the northeast area of the Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8): 1055-1071]
- 11 Huang W Y, Meinchein W G. Sterols as ecological indicators [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 43: 739-745
- 12 Peters K E, Moldowan J M. The Biomarker Guide: Interpreting mo-

- lecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. England: Prentice Hall Inc Press, 1993: 109-126, 159
- 13 蔡勋育, 韦宝东, 赵培荣. 南方海相烃源岩特征分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(3): 20-22 [Cai Xunyu, Wei Baodong, Zhao Peirong. Characteristics of the marine hydrocarbon source rocks in South China[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(3): 20-22]
- 14 沃玉进, 肖开华, 周雁, 等. 中国南方海相层系油气成藏组合类型与勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 11-16 [Wo Yujin, Xiao Kaihua, Zhou Yan, et al. Types of marine plays in southern China and exploration prospects [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(1): 11-16]
- 15 Lewan M D, Bjory M and Doleater D L. Effects of thermal maturation on steroid hydrocarbons as determined by hydrous pyrolysis of phosphoria Retort shale [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50: 1977-1987
- 16 Peters K E, Moldowan J M and Sundaraman P. Effects of hydrous pyrolysis on biomarker thermal maturity parameters: Montereyphosphatic and siliceous members [J]. Organic Geochemistry, 1990, 15(3): 249-265
- 17 陈世加, 王庭栋, 黄清德, 等. C_{29} 甾烷成熟度指标“倒转”及其地质意义[J]. 天然气地球科学, 1997, 8(1): 28-30 [Chen Shijia, Wang Tingdong, Huang Qingde, et al. C_{29} steroid maturity index "upside-down" and geological significance [J]. Natural Gas Geoscience, 1997, 8(1): 28-30]
- 18 齐跃春, 高红梅, 鲍志东, 等. 漠河盆地依列克得组火山活动间歇期烃源岩有机地球化学特征研究[J]. 沉积学报, 2010, 29(1): 164-171 [Qi Yaochun, Gao Hongmei, Bao Zhidong, et al. Organic geochemical characteristics of source rocks from Yiliekede Formation in the intermittent stages of volcanic activity in Mohe Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 29(1): 164-171]
- 19 丰国秀. 岩石中沥青反射率与镜质组反射率之间的关系[J]. 天然气工业, 1988, 8(3): 20-25 [Feng Guoxiu. Relationship between the reflectance of bitumen and vitrinite in rock [J]. Natural Gas Industry, 1988, 8(3): 20-25]
- 20 Jacob H. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen (migration) [J]. International Journal of Coal Geology, 1989, 11(1): 65-79
- 21 刘德汉, 史继扬. 高演化碳酸盐烃源岩非常规评价方法探讨[J]. 石油勘探开发, 1994, 21(3): 113-115 [Liu Dehan, Shi Jiyang. Discussion on high evolution carbonate hydrocarbon source rocks unconventional evaluation method [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(3): 113-115]
- 22 Peters K E, Moldowan J M, McCaffrey M A, et al. Selective biodegradation of extended hopanes to 25-norhopanes in petroleum reservoirs. Insights from molecular mechanics [J]. Organic Geochemistry, 1996, 24(8~9): 765-783
- 23 Bost F D, Frontera-Suau R, McDonald T J, et al. Aerobic biodegradation of hopanes and norhopanes in Venezuelan crude oils [J]. Organic Geochemistry, 2001, 32(1): 105-114
- 24 包建平, 梅博文. 25-降藿烷系列的“异常”分布及其成因[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 179-183 [Bao Jianping, Mei Bowen. The abnormal distribution and the origin of 25-norhopane series [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 179-183]
- 25 Blanc P, Connan J. Origin and occurrence of 25-norhopanes: statistical study [J]. Organic Geochemistry, 1992, 18(6): 813-828
- 26 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北地区飞仙关组高含 H_2S 天然气 TSR 成因的同位素证据 [J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(11): 1037-1046 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Isotopic evidence of TSR origin for natural gas bearing high H_2S contents with in the Feixianguan Formation of the northeastern Sichuan Basin, southwestern China [J]. Science in China: Series D, 2005, 48(11): 1960-1971]
- 27 朱光有, 张水昌, 梁英波. 四川盆地普光大型气田 H_2S 及优质储层形成机理探讨——读马永生教授的“四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示”有感 [J]. 地质论评, 2006, 52(2): 230-235 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo. Probe into formation mechanism of H_2S and high-quality reservoirs of Puguang large gas field in Sichuan Basin: The new cognition after reading professor Ma's paper "discovery of the large-scale gas field in the Sichuan Basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting" [J]. Geological Review, 2006, 52(2): 230-235]
- 28 王一刚, 窦立荣, 文应初, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组高含硫气藏 H_2S 成因研究 [J]. 地球化学, 2002, 31(6): 517-524 [Wang Yigang, Dou Lirong, Wen Yingchu, et al. Origin of H_2S in Triassic Feixianguan Formation gas pool, northeastern Sichuan Basin, China [J]. Geochemical, 2002, 31(6): 517-524]
- 29 倪春华. 25-降藿烷系列化合物及其在油藏地球化学研究中的应用 [J]. 江苏地质, 2008, 32(1): 50-54 [Ni Chunhua. 25-norhopanoids compounds and application in reservoir geochemistry study [J]. Jiangsu Geology, 2008, 32(1): 50-54]
- 30 马安来, 张水昌, 张大江, 等. 生物降解原油地球化学研究新进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 449-454 [Ma Anlai, Zhang Shuichang, Zhang Dajiang, et al. The advances in the geochemistry of the biodegraded oil [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 449-454]
- 31 凡元芳. 储层沥青的研究进展及存在问题 [J]. 石油与地质工程, 2009, 23(6): 35-38 [Fan Yuanfang. Advances and main problems in reservoir bitumen research [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(6): 35-38]
- 32 谢增业, 田世澄, 魏国齐, 等. 川东北飞仙关组储层沥青与古油藏研究 [J]. 天然气地球科学, 2005, 16(3): 283-287 [Xiao Zengye, Tian Shicheng, Wei Guoqi, et al. The study on bitumen and foregone pool of Feixianguan oolitic reservoir in Northeast Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3): 283-287]
- 33 李艳霞, 钟宁宁. 川东石炭系气藏中固体沥青形成机理探讨 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(4): 402-404 [Li Yanxia, Zhong Ningning. Approach to solid migrabitumen mechanism of Carboniferous gas reservoir in the east of Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 29(4): 402-404]
- 34 Schenk H J, Primio R DI, Horsfield B. The conversion of oil into gas in petroleum reservoirs. Part 1: Comparative kinetic investigation of gas generation from crude oils of lacustrine, marine and fluviodeltaic

origin by programmed-temperature closed-system pyrolysis [J]. Organic Geochemistry, 1997, 26(7/8): 467-481

mation: constraints from experimental and empirical data, and from thermodynamics [J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(6): 553-575

35 Waples D W. The kinetics of in-reservoir oil destruction and gas for-

Geochemical Characteristics and Genesis of Reservoir Bitumen of Feixianguan Formation in Well Puguang 2, Northeast of Sichuan

ZHAO Xing-qi CHEN Jian-fa ZHANG Tong-lei LIU Yan

WU Xue-fei LIU Ya-zhao LIU Fen-fen

(State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249)

Abstract: Based on the information about reservoir bitumen, such as occurrences, types, group composition, the characteristic of saturated hydrocarbon gas chromatogram and biomarkers, as well as the reservoir bitumen reflectivity, this paper thoroughly analyze the geochemical characteristic of reservoir bitumen from Feixianguan Formation in Well Puguang 2 and its possible cause of formation. It is concluded that the reservoir bitumen which is classified to thermal pyrobitumen is the residue formed after ancient reservoir cracked. n-alkane in reservoir bitumen distribute integrally with the carbon number range from C_{14} to C_{30} , without obvious trace of biodegradation. Pr/Ph, Pr/n C_{17} and Ph/n C_{18} are all smaller than 1.0, OEP varies from 1.25 to 1.43 and CPI varies from 0.98 to 1.19, without odd even predominance of normal alkanes. Among regular silane series, C_{27} plays a dominant role with the appearance of "V" shape of the distribution of C_{27} - C_{29} . Isomerization of sterane in initial stage, the ratio is obviously below average value. It is believed that "S" configuration crack faster than "R" configuration is the reason. The content of pregnane and litres of progesterone silane steroid in Fei1 Formation and Fei2 Formation is apparently higher than the counterpart of Fei3 Formation as the result of the difference of environment of sedimentation or source rock. Among terpene series, pentacyclic triterpenoids dominate, tricyclic ones develop well, especially C_{23} is the base peak, the content of gammacerane is relatively high. All of these characteristics mentioned above demonstrate that reservoir bitumen in Puguang2 Well mainly derived from lower level hydrobiont, thermal evolution stayed at middle-higher stage. Parent materials formed in marine sedimentary environment with high salinity. The high content of C_{25} -norhopane is associated with high thermal evolutionary stage rather than biodegradation.

Key words: reservoir bitumen; geochemical; genesis; Feixianguan Formation; Well Puguang 2; northeast of Sichuan Basin