

川西北地区飞仙关组原油的发现及地质意义

刘 春, 郭庆新, 张惠良

(中国石油天然气股份有限公司杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要:采用色谱(GC)、色谱—质谱(GC-MS)和同位素分析等技术方法,以广元长江沟剖面为例,系统分析了川西北地区飞仙关组原油地球化学特征,并初步分析了其成因。结果表明,长江沟剖面飞一段灰岩缝洞中原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和各族组成 $\delta^{13}\text{C}$ 值都小于 -30‰ ,族组分之间的碳同位素分馏效应较小,原油没有遭受细菌分解、淡水淋滤等次生同位素分馏效应;正构烷烃为前高后低的单峰型,主峰碳为 C_{22} ,Pr/Ph值为0.75,姥姢烷和植烷均较相应正构烷烃($n\text{C}_{17}$ 和 $n\text{C}_{18}$)优势;芳烃色谱呈现驼峰,总体上组成比较复杂,以菲系列为主,经过MPI1折算该原油成熟度 $R_0=0.94\%$;三环萜分布在 $\text{C}_{19}-\text{C}_{30}$ 之间,以 C_{23} 为主峰;藿烷以 C_{30} 为主峰,伽马蜡烷含量较高,表明其母源为还原—弱还原的咸水环境;规则甾烷以 C_{29} 优势,呈 $\text{C}_{29}>\text{C}_{27}>\text{C}_{28}$ 的“V”字型分布,甾烷成熟度参数 $\text{C}_{29}20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 值和 $\text{C}_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 值分别为0.39和0.31,均未达到平衡值。结合区域地质背景、飞一段烃源岩特征、原油地球化学特征,认为飞仙关组原油是寒武系烃源岩进入生烃高峰期的产物,现今灰岩缝洞中原油的分布状态是原油早期充注以后遭受构造运动破坏的结果。

关键词:川西北地区;长江沟剖面;飞仙关组一段;原油;分子地球化学特征;地质意义

中图分类号:TE133

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2011)04-0692-08

引用格式:刘春,郭庆新,张惠良.川西北地区飞仙关组原油的发现及地质意义[J].天然气地球科学,2011,22(4):692-699.

0 引言

川西北地区地处四川盆地西北部(图1),是四川盆地天然气的主力产区,研究区内发育下寒武统、下志留统、二叠系和上三叠统等多套烃源岩^[1-3],天然气储层目前主要有二叠系、三叠系飞仙关组和须家河组及侏罗系中下统^[4]。勘探实践与科学研究也已表明研究区内烃源岩层系热演化程度高,大都已进入高成熟—过成熟阶段^[5],是一个典型的天然气勘探地区。然而,笔者在进行川西北地区油气资源调查过程中,在广元地区长江沟剖面飞仙关组一段的灰岩缝洞中发现了液态原油的存在,原油主要富集在灰岩缝洞中,该发现再次对川西北地区飞一段是否能成为烃源岩提出了质疑:该原油是原生的还是次生的?如果是原生的,那么飞仙关组的烃源岩条件如何?如果是次生的,那原油究竟来源于哪套

烃源岩?前人^[1-6]对四川盆地飞仙关组做过大量的工作,但均认为飞仙关组不具备生烃潜力。本文报道了该岩缝洞分布原油的分子地球化学特征以及它们所反映的母源性质、形成环境和成熟度,进而进行了油源对比,初步探索该原油的成因,希望能引起人们的注意,以期对四川盆地飞仙关组原油有进一步广泛深入的认识。

1 区域地质背景

长江沟剖面位于广元市境内,地处龙门山北段山前断褶带,属于上扬子准地台向外围槽区过渡的台缘断褶带,构造带呈北东向展布,构造的复杂表明断褶构造活动频繁^[7]。龙门山山前带飞仙关组为一受龙门山岛链控制的混积台地,主要堆积了一套灰色碳酸盐岩与紫红色泥页岩沉积^[8]。飞仙关组一段岩性以灰色、深灰色薄—中厚层状泥晶灰岩为主,夹

收稿日期:2010-02-25;修回日期:2010-09-23.

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技项目(编号:2010D-0706-01)资助.

作者简介:刘春(1982-),男,贵州毕节人,工程师,硕士,主要从事石油地质与地球化学方面的研究工作. E-mail:liuc_hz@petrochina.com.cn.

极薄层黄绿色泥页岩和数层不规则中—厚层状和透镜状砾屑灰岩。龙门山山前带北段的飞仙关组一段碳酸盐岩晶洞或裂缝中都存在一些残余原油^[8],因此对原油的地球化学特征及成因研究对区内下一步油气勘探具有重要意义。

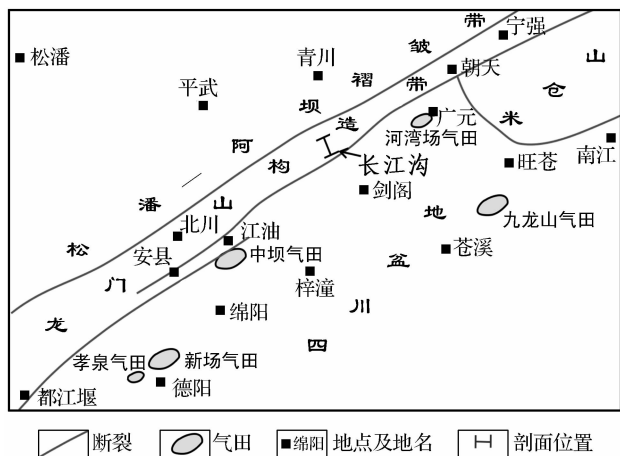


图1 研究区地理位置

2 缝洞中原油地球化学特征

2.1 原油族组分及其组分碳同位素特征

通过对原油族组成的分离研究,发现飞仙关组原油饱和烃、芳香烃、非烃、沥青质含量呈饱和烃>芳香烃>非烃>沥青质分布,其值分别为31.86%、25.98%、25.00%、11.76%,原油饱和烃/芳香烃值较低(为1.23),原油质量较好。

通常认为,原油的碳同位素取决于有机质生物来源,来源于陆源高等植物的有机质碳同位素组成重,如煤成油 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常在 $-26\text{‰} \sim -24\text{‰}$ 之间变化,而源于水生生物的有机质碳同位素组成轻,如古生代海相和深湖相原油碳同位素值低,大多小于 -30‰ ^[9]。高盐环境造成原油碳同位素组成偏重,如柴西地区第三系咸水湖相原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要集中在 $-26\text{‰} \sim -24\text{‰}$ 之间,江汉盆地潜江凹陷咸湖相原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-27.2\text{‰} \sim -23.9\text{‰}$ 之间^[10]。长江沟剖面飞一段灰岩洞缝中原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -32.69‰ ,如此低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值表明该原油母源为古生代水生生物,原油族组成中饱和烃、芳香烃、沥青质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -34.58‰ 、 -33.14‰ 和 -30.35‰ ,呈 $\delta^{13}\text{C}_{\text{饱和烃}} < \delta^{13}\text{C}_{\text{芳香烃}} < \delta^{13}\text{C}_{\text{沥青质}}$,表明该原油没有遭受细菌分解、水淋滤等次生的同位素分馏效应。据ZviSofer提出海相原油遵循 $\delta^{13}\text{C}_{\text{芳香烃}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{饱和烃}} + 3.75$ 关系^[11],该原油2种族组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 符合该关系式,也论证了该原油的海相来源。

此外,Stal W发现,随着储油地层时代的变老相应原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值趋向于降低^[12],上古生界和中—新生界原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值频率分布的主峰为 $-25\text{‰} \sim -28\text{‰}$ ^[13]。根据研究区内烃源岩发育情况,表明缝洞中原油其来源可能为下古生界烃源岩,由于研究区内震旦系烃源岩普遍缺失(仅在棉竹清平黑沟磷矿发现陡山沱组黑色泥岩)或均已变质(如青川桥庄震旦系千枚岩),因此该原油最可能来源于下古生界的志留系或比志留系更古老的寒武系烃源岩。原油的碳同位素组成以高度富集碳的轻同位素(^{12}C)为特征,表明当时大气中氧含量很低,在海洋中占统治地位的原核生物细菌和蓝藻在进行光合作用时,都是优先吸收 CO_2 中 ^{12}C ,从而造成了生源母质的 ^{12}C 优势。

2.2 饱和烃气相色谱特征

原油饱和烃色谱正构烷烃碳数分布范围为 $n\text{C}_{16} \sim n\text{C}_{35}$,主峰碳为 C_{22} , $n\text{C}_{16}$ 以前正构烷烃消失殆尽,呈单峰群分布(图2),表明原油具有较高成熟度。原油正构烷烃有微弱的偶碳数优势,表明其母源的高盐度和强还原环境。

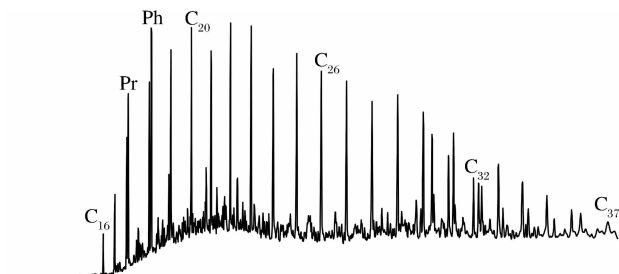


图2 原油饱和烃气相色谱

Pr/Ph值随着有机质演化程度的不同,大致表现为:从未成熟阶段的Pr/Ph值小于1,植烷呈优势;演化到成熟阶段,其Pr/Ph值逐渐增高至大于1,姥姢烷呈优势;当进一步演化到高成熟和过成熟阶段,又“倒转”过来Pr/Ph值逐渐降低到小于1,植烷又呈优势^[13-16]。长江沟剖面飞一段原油中Pr/Ph值为0.75,这说明其母源有机质在生烃时期已处于成熟阶段。姥姢烷和植烷均较相应正构烷烃优势(图2),这可能是在当时喜盐性细菌大量繁衍,提供了植烷的补充来源。

2.3 芳香烃气相色谱特征

多环芳烃(PAHs)系列化合物是原油和生油岩中重要的组成部分,特殊的环状结构使其在热演化过程中比链状烷烃化合物表现更为稳定,未成熟阶段的原始可溶有机质中芳烃成熟度参数变化受控于可溶有机质的演化。原油芳烃色谱呈现驼峰,总体

上组成比较复杂。多环芳烃总量占烃类化合物总量的 25.98%，以菲系列(菲、甲基菲、二甲基菲、三甲基菲等)为主，屈系列、荧蒽、芘、蒽烯以及苯并芘等化合物均有不同程度检出(图 3)。

菲系列化合物主要用于研究原油和烃源岩的成熟度，某些化合物对沉积环境和有机母源输入也有指示意义。沉积物中甲基菲化合物主要是 1-甲基菲(1-MP)、2-甲基菲(2-MP)、3-甲基菲(3-MP)和 9-甲基菲(9-MP)(图 4)。当有机质从低成熟阶段向高成熟阶段演化时，甲基菲指数和二甲基菲指数均逐渐增

大^[17]。在热演化过程中，菲系列甲基化、甲基重排及脱甲基化作用主要受热力学控制，热力学不稳定的 α 位取代基向较稳定的 β 位迁移，即具有 β 位取代的异构体的相对浓度增加。Radke 等利用菲及甲基菲的相对丰度计算成熟度的参数甲基菲指数(MPI1)，提出了由 MPI1 折算镜质体反射率 R_o 的方法^[18]，国内外学者^[19]又对此进行了深入探索和研究，用以解决原油和烃源岩的成熟度问题。经 MPI1 折算该原油成熟度 R_o 值为 0.94%，与原油 Pr/Ph 值互为论证，反映出该原油确实是生油高峰期的产物。

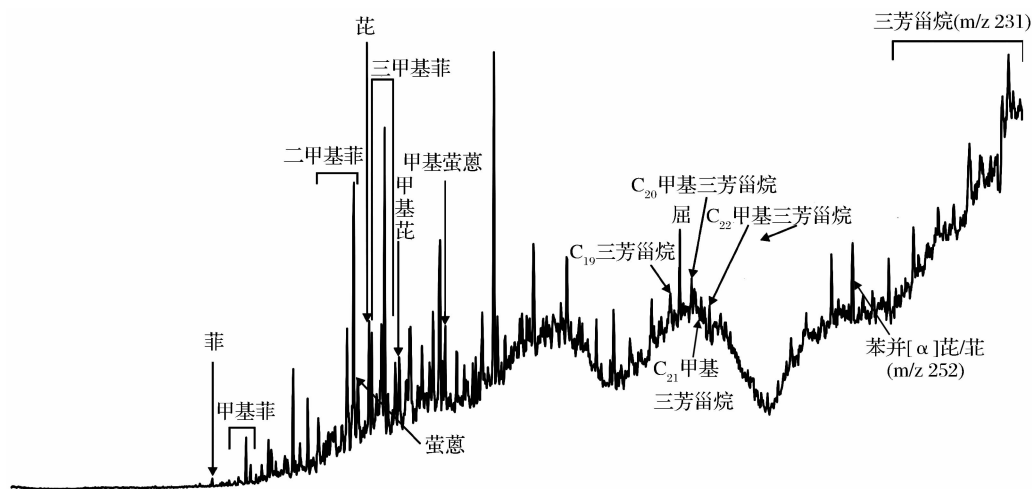


图 3 原油芳香烃气相色谱

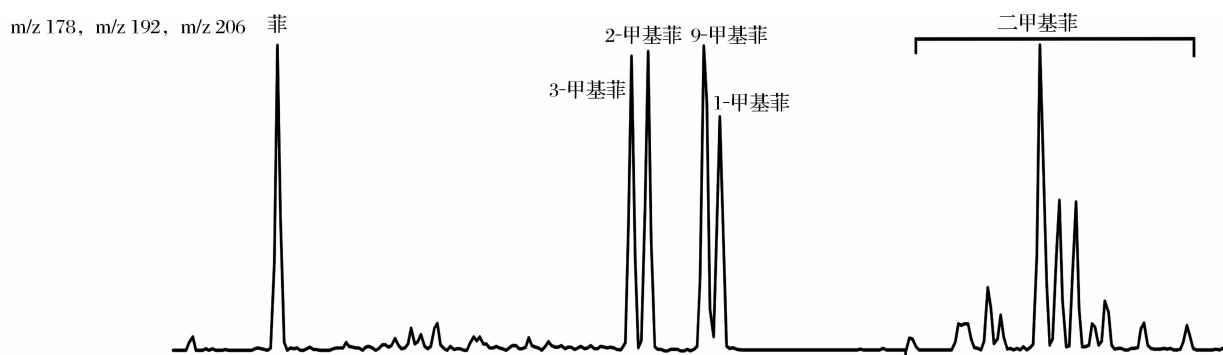


图 4 原油菲系列化合物质量色谱

2.4 生物标志化合物特征

2.4.1 三环萜烷、四环萜烷和藿烷(m/z 191)特征

长江沟剖面飞仙关组灰岩裂缝中原油三环萜烷分布在 C_{19} — C_{30} 之间，并以 C_{23} 为主峰，三环萜/五环三萜值为 0.21， C_{24} 四环萜含量大约为相应 C_{26} 含量的一半左右。藿烷以 C_{30} 藿烷为主峰，并有微量 C_{30} 重排藿烷的存在， $C_{29}H/C_{29}Ts$ 值为 4.32， Ts/Tm 值为 0.37，升藿烷 C_{31} — C_{35} 分布齐全，且含量逐步降低，莫烷含量较高， γ -蜡烷较高，伽马蜡烷/ C_{31} 值为 0.17，伽马蜡烷的存在表明其母源为还原—弱还

原的咸水环境(图 5)。

2.4.2 甾烷(m/z 217)特征

原油孕甾烷含量高于升孕甾烷，且二者含量较低， $(C_{21}+C_{22})$ /规则甾烷值仅为 0.07，规则甾烷较重排甾烷明显优势，重排甾烷/规则甾烷值为 0.1，甾烷呈 $C_{29} > C_{27} > C_{28}$ ，呈“V”字型分布(图 6)，相对含量分别为 44%、26%、30%。甾烷生物标志化合物的 2 个成熟度参数 $C_{29}20S/(20S+20R)$ 值和 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 值分别为 0.39 和 0.31，均未到其平衡值(平衡值分别为 0.52~0.55 和 0.67~0.71)，

组成 $\delta^{13}\text{C}$ 值有较大差异(表 1),推测飞仙关组碳酸盐岩缝洞中原油和泥盆系油砂岩可能具有相同的来源,根据油气生成碳同位素的分馏原理最接近原油族组分分布趋势的源岩为下寒武统筇竹寺组烃源岩。

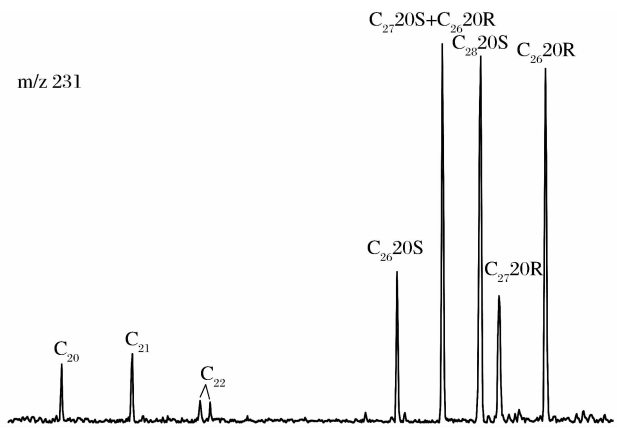


图 7 原油饱和烃 m/z 231 质量色谱

表 1 原油及烃源岩抽提物族组成碳同位素
(部分数据源于文献[8])

地区	层位	岩性	饱和烃 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	芳香烃 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	沥青质 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$
长江沟	T ₁ f ₁	灰岩(原油)	-34.58	-33.14	-30.35
长江沟	T ₁ f ₁	泥灰岩	-29.02	-31.18	-31.86
扁 1 井	T ₁ f	灰岩(原油)	-35.59	-33.63	-34.80
永平 1 井	T ₁ f	鲕粒灰岩(原油)	-34.40	-34.32	-36.16
鱼洞梁	T ₁ f	豆粒灰岩(原油)	-35.28	-34.15	-35.60
马角坝	T ₁ f	灰岩(原油)	-35.83	-34.41	-35.37
长江沟	P ₂ d	泥灰岩	-29.45	-27.64	-28.84
扁 1 井	P ₂ d	灰黑色灰岩	-31.38	-29.87	-30.62
长江沟	P ₂ w	浅灰色灰岩	-28.34	-27.83	-30.45
长江沟	P ₁ q	深灰色灰岩	-27.3	-30.15	-29.4
矿 2 井	P ₁ m	灰黑色灰岩	-30.32	-30.23	-30.71
矿 2 井	P ₁ q	灰黑色灰岩	-31.16	-30.05	-30.29
半桶盐	D ₁	油砂岩	-35.35	-35.91	-34.94
绵竹清平	ε ₁	黑色泥岩	-31.11	-31.55	-34.06
绵竹清平	Z ₂	黑色泥岩	-30.55	-31.95	-32.09

3.2 原油族组分碳同位素特征表明飞仙关组原油与二叠系无明显关系

长江沟剖面飞仙关组碳酸盐岩缝洞中原油族组分的碳同位素组成都较轻,饱和烃和芳香烃的碳同位素明显比二叠系碳酸盐岩地层氯仿沥青“A”饱和烃和芳香烃的碳同位素组成轻,而与天井山半桶盐泥盆系油砂岩的相似(表 1),根据油气生成过程中

碳同位素的分馏原理可以推测飞仙关组碳酸盐岩缝洞中原油和泥盆系油砂岩可能具有相同的来源,结合前面原油分子地球化学特征认为该原油来源于寒武系烃源岩。

3.3 生物标志化合物特征对比表明原油来源于下寒武统烃源岩

原油和寒武系烃源岩生物标志化合物分布特征十分相似,与飞一段烃源岩差异较大:飞仙关组灰岩缝洞中原油与寒武系泥岩的三环萜烷分布以 C₂₃ 为主峰,五环三萜烷含量均较高。通常认为三环萜烷来源于水生有机质,可能反映与原油母质相关性不大。原油与寒武系泥岩藿烷都以 C₃₀ 藿烷为主峰,以 Ts/Tm 值小于 1 为特征,γ-蜡烷丰度较高,二者 C₂₉ Ts 分布也极为相近(图 8);原油孕甾烷和升孕甾烷的分布也与寒武系烃源岩极为相近。寒武系烃源岩规则甾烷 C₂₇、C₂₈、C₂₉ 呈 C₂₉ > C₂₇ > C₂₈ 的“V”字型分布(图 8),因此认为原油是下古生界寒武系(筇竹寺组)烃源岩的共同产物。

3.4 构造、沉积演化研究表明该原油是古油藏遭受破坏的结果

结合沉积、成岩、构造和烃源岩演化研究(图 9),认为长江沟剖面飞仙关组一段原油是古油藏遭受破坏的结果[8]。其形成过程大致划分为:

(1)早寒武世龙门山北段为一坳陷,接受了下寒武统海相碎屑岩沉积。早寒武世末期,地壳抬升,缺失中寒武统、上寒武统及下奥陶统。中奥陶世早期,该区发生海侵,沉积了中奥陶统、上奥陶统和大套海相地层。发生在志留纪末的加里东运动,使志留系遭受大幅度剥蚀,其结果形成了天井山古隆起和唐王寨坳陷,并以天井山古隆起为界,使该区和四川地块在构造形态和沉积环境上都出现明显差异。加里东运动以后,该区再次发生沉降,沉积了以海相碳酸盐岩为主的泥盆系、石炭系、二叠系和中三叠统、下三叠统。在这次沉降过程中,泥盆纪末和石炭纪末各发生了一次构造运动,使上泥盆统和上石炭统遭受不同程度剥蚀。进入二叠纪以后,四川地块与龙门山北段连为一体,再次为海洋所覆盖。

(2)早三叠世飞仙关期形成的碳酸盐台地边缘的鲕粒、豆粒滩,受强烈的准同生白云化、混合白云化作用改造,再经过早期溶解作用,发育溶蚀孔隙和原生孔隙,但被继来之而来的粉晶白云石胶结,使孔隙部分被充填。中三叠世末,天井山古隆起露出水面而遭受剥蚀,由于埋藏变浅,断层出露地表,由于地表水的渗入,改变了孔隙水介质条件,中止了后期的

白云石胶结,再发生后期溶解作用,残余孔隙又被溶蚀扩大,为飞仙关组一段古油藏的形成奠定了基础。

(3)晚三叠世,上三叠统的沉积形成封盖,其间曾发生多次构造活动,使断褶构造形成古圈闭。构造活动使断层开启,研究区内存在 4 条长期活动的区域大断裂,即青川—茂汉断裂、北川—映秀断裂、马角坝—灌县断裂和江油—广元隐伏断裂。这几条大断裂切割层系多且深,其上部高角度进冲,下

部呈低角度,无疑成为油气跨层系运移的通道。刘春^[7]对川西北地区寒武系烃源岩详细的研究认为川西北地区下寒武统烃源岩在二叠纪进入生油阶段,成油高峰期相对集中在三叠纪—侏罗纪初,气态烃的大量形成时间多为早侏罗世末—晚侏罗世。这样使处于生油高峰期的下寒武统烃源岩生成的原油进入飞一段储层而成藏。断层、裂缝在古油藏的运移、聚集成藏中起着重要的作用。

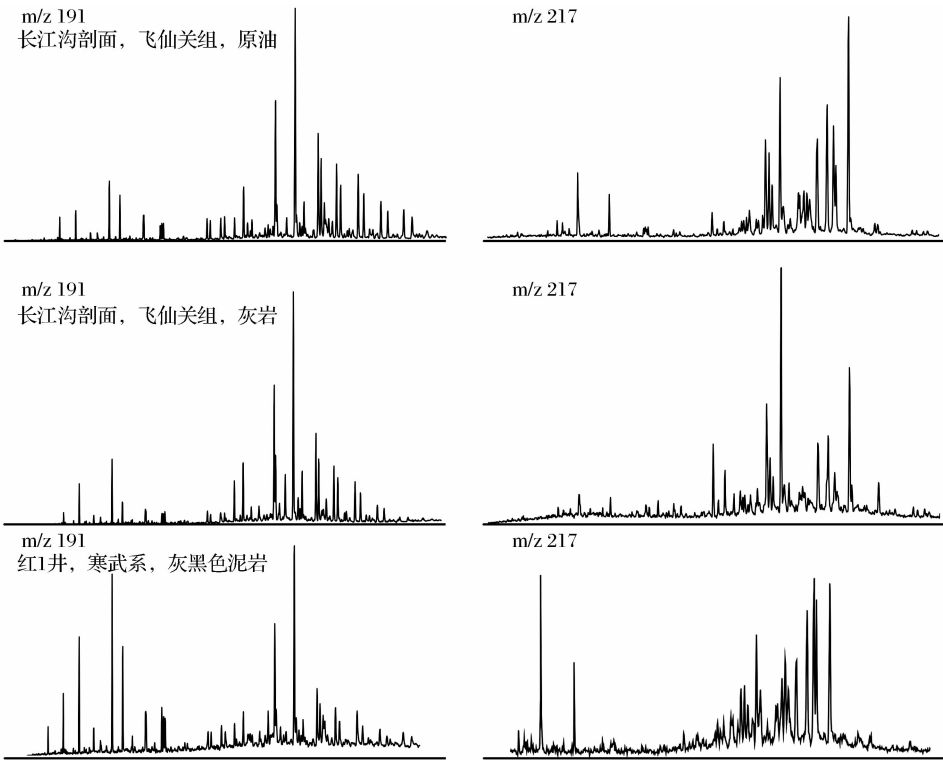


图 8 饱和烃 m/z 191 和 m/z 217 质量色谱油源对比

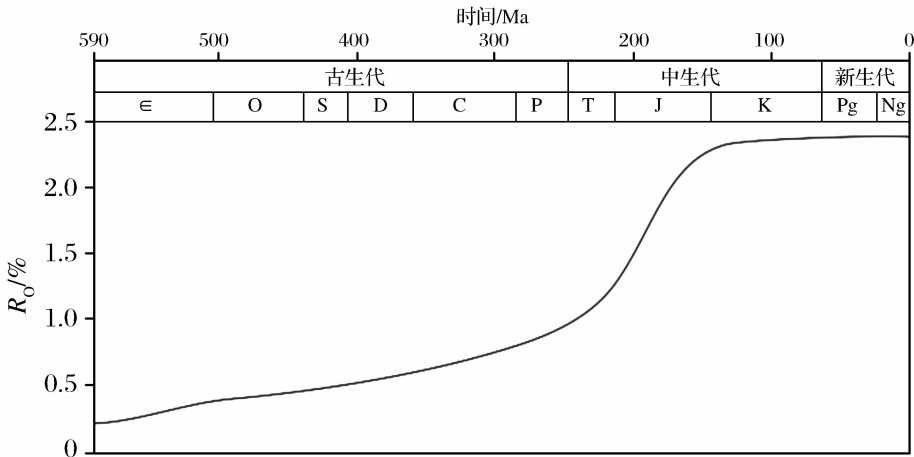


图 9 川西北地区寒武系烃源岩热演化史进程

(4)晚三叠世末,随着印支运动的第三幕,三叠系及其下伏地层全面回返、褶皱变形,形成了该区各主要逆掩断层。该期龙门山强烈推覆,古构造再度

抬升,其上覆层剥蚀至嘉一段,东南翼的庙子坝断层出露地表,沟通了大气水与古油藏的联系,使飞一段古油藏遭受一定程度的破坏。

(5)侏罗纪—白垩纪,龙门山再次较大幅度上升,其间也受龙门山“幕”式推覆的影响,飞一段古油藏再次受到一定程度的破坏。

(6)喜马拉雅期又经历了强烈构造活动,飞一段古油藏有的完全暴露于地表,彻底破坏。飞仙关组一段古油藏成藏最突出的是孔隙演化高孔期进油,反映了在成藏条件都具备的情况下,时空配置至关重要,这与地处构造活动复杂的龙门山推覆构造带有关。这也与对龙门山露头沥青、原油、油砂岩研究的结论相吻合^[20-21]。

4 结论

(1)原油正构烷烃为前高后低的单峰型,碳数分布范围为 nC_{16} — nC_{35} ,主峰碳为 C_{22} ;芳烃色谱呈现驼峰,总体上组成比较复杂,原油成熟度 R_o 值为 0.94%,是生油高峰期产物。

(2)原油三环萜分布在 C_{19} — C_{30} 之间,以 C_{23} 为主峰;霍烷以 C_{30} 霍烷为主峰;规则甾烷呈 $C_{29} > C_{27} > C_{28}$,“V”字型分布, $C_{29} 20S/(20S + 20R)$ 值和 $C_{29} \beta/(\beta + \alpha\alpha)$ 值未到其平衡值。

(3)结合区域地质背景、烃源岩特征及其原油地球化学特征,认为飞仙关组原油是寒武系烃源岩进入生烃高峰期的产物,现今洞缝分布的原油是原油早期充注后遭受构造运动破坏的结果。该发现表明川西北地区存在寻找古油藏的勘探前景。

致谢:本文在成稿过程中得到了浙江大学孙永革教授、中国石油西南油气田公司勘探开发研究院地质实验室王密云工程师和中国石油西南油气田公司川西北气矿朱永刚高级工程师的热情帮助,在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] Editorial Group of Sichuan Oil Gas Field Petroleum Geology. China Petroleum Geology: Vol. 10, Sichuan Oil Gas Field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989. [四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志: 卷十, 四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.]
- [2] Wang Shunyu, Dai Hongming, Wang Haiqing, *et al.* Geochemical characteristics and origin of natural gases from marine facies carbonate rock large gas field of Sichuan basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2000, 11(2): 10-17. [王顺玉, 戴鸿鸣, 王海清, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩大型气田天然气地球化学特征与气源[J]. 天然气地球科学, 2000, 11(2): 10-17.]
- [3] Wang Shunyu, Dai Hongming, Wang Haiqing, *et al.* Source rock feature of the south of the the Dabashan and Micangshan [J]. Natural Gas Geoscience, 2000, 11(4/5): 4-16. [王顺玉, 戴鸿鸣, 王海清, 等. 大巴山、米仓山南缘烃源岩特征研究[J]. 天然气地球科学, 2000, 11(4/5): 4-16.]
- [4] Yang Jiaping, Wang Yigang, Wang Lansheng, *et al.* The origin of natural gases and geochemistry characters of Changxing reef and Feixianguan oolitic beach gas reservoirs in eastern Sichuan basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 349-353. [杨家静, 王一刚, 王兰生, 等. 四川盆地东部长兴组—飞仙关组气藏地球化学特征及气源探讨[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 349-353.]
- [5] Cai Kaiping, Wang Yingrong, Yang Yueming, *et al.* Evaluation of hydrocarbon source rocks in Permian and Triassic at Guangyuan-Wangcang region in northwest Sichuan basin and a primary discussion on gas source[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(2): 10-14. [蔡开平, 王应蓉, 杨跃明, 等. 川西北广旺地区二、三叠系烃源岩评价及气源初探[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 10-14.]
- [6] Xie Banghua, Wang Lansheng, Zhang Jian, *et al.* Vertical distribution and geochemical behaviours of the hydrocarbon source rocks in the north section of Longmen mountains[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(5): 21-23. [谢邦华, 王兰生, 张鉴, 等. 龙门山北段烃源岩纵向分布及地化特征[J]. 天然气工业, 2003, 23(5): 21-23.]
- [7] Liu Chun. Characteristic and Evaluation of Marine Facies Carbonate Source Rock in Rendezvous of between Micangshan and Longmenshan, The Northwest of Sichuan Basin [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2008. [刘春. 米仓山—龙门山交会带二叠系海相碳酸盐岩烃源岩特征研究及评价[D]. 成都: 西南石油大学, 2008.]
- [8] Wang Shunyu, Ming Qiao, He Zuyi, *et al.* Study on forming process and geochemical character of the crude oil in fracture of the limestone in northwest of Sichuan basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(4): 579-581. [王顺玉, 明巧, 贺祖义, 等. 川西北部飞仙关组灰岩缝洞中原油的地球化学特征及成藏过程初探[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(4): 579-581.]
- [9] Zhou Wen, Wu Qingyu, Wang Ruiyong, *et al.* The distribution of aromatic hydrocarbon bio-marker in thermal simulate product of coccolithophores[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(22): 2438-2445. [周文, 吴庆余, 王睿勇, 等. 颗石藻热模拟产物中芳烃生物标志物分布[J]. 科学通报, 2000, 45(22): 2438-2445.]
- [10] Chang Zhenheng, Chen Zhonghong, Zhang Yuti, *et al.* An investigation on the geochemical characteristics of crude oil from Wenliu area in the Dongpu SAG, Bohai Bay basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(2): 178-187. [常振恒, 陈中红, 张玉体, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷原油地球化学特征研究[J]. 石油实验地质, 2007, 29(2): 178-187.]
- [11] Wang Darui. Hydrocarbon Stable Isotope Geochemistry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000. [王大锐. 油气稳定同位素地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.]
- [12] Wei Juying, Wang Guanyu. Isotopic Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988. [魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988.]

- [13] Huang Difan, Wang Lansheng. Geochemical characteristics of bituminous dike in Kuangshanliang area of the northwestern Sichuan basin and its significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(1): 23-28. [黄第藩, 王兰生. 川西北矿山梁地区沥青脉地球化学特征及其意义[J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 23-28.]
- [14] Volkman J K. A review of sterol marker for marine and terrigenous organic matter[J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 9(2): 83-99.
- [15] Peters K E, Moldowan J M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediment S[M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1993: 104-110, 144.
- [16] Duan Yi, Zhou Shixin. Study on thermal simulation of carboniferous source rocks in Tarim basin: II composition and evolution of biomarkers[J]. *Oil & Gas Geology*, 2001, 22(1): 13-16. [段毅, 周世新. 塔里木盆地石炭系烃源岩热模拟实验研究—II 生物标志化化合物的组成和演化[J]. *石油与天然气地质*, 2001, 22(1): 13-16.]
- [17] Ten Haven H L, De Leeuw J W, Rullkotter J, *et al.* Restriict-edility of the pristane/phytane ratio as a palaeoenvironmental indicator[J]. *Nature*, 1987, 330 (6149): 641-643.
- [18] Radke M, Welte D H. The Met Hyllphenant Hrene Index (MPI): A Maturity Parameter Based on Aromatic Hydrocarbons[C]. *Advances in Organic Geochemistry*, Wiley, Chichester, 1981: 504-512.
- [19] Guo Xiaowen, He Sheng, Shi Wanzhong. Aromatic geochemistry characteristics of light oils from Panyu lower uplift in Pearl River Mouth basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(1): 52-57. [郭小文, 何生, 石万忠. 珠江口盆地番禺低隆起轻质原油芳烃地球化学特征[J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 52-57.]
- [20] Dai Hongming, Liu Wenlong, Yang Yueming, *et al.* The origin of Jurassic oil-soaked sandstone in the piedmont zone of north Longmenshan, the Sichuan basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(6): 604-608. [戴鸿鸣, 刘文龙, 杨跃明, 等. 龙门山北段山前带侏罗系油砂岩成因研究. *石油实验地质* [J]. 2007, 29(6): 604-608.]
- [21] Liu Chun, Zhang Huiliang, Shen Anjiang, *et al.* Geochemistry characteristics and origin of Devonian oil-sandstone in the northwest of Sichuan basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(2): 253-258. [刘春, 张惠良, 沈安江, 等. 川西北地区泥盆系油砂岩地球化学特征及成因[J]. *石油学报*, 2010, 31(2): 253-258.]

The Discovery and Geological Significance of Petroleum of Triassic Feixianguan Formation in Northwest Sichuan Basin

LIU Chun, GUO Qing-xin, ZHANG Hui-liang

(Hangzhou Research Institute of Petroleum Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Several techniques, including GC, GC-MS and GC-IRMS, are used to study the molecular geochemistry and origin of oil (filled joint and cavern in limestone) of T_1f_1 in the Changjianggou profile of the northwest of the Sichuan basin. The data show that the petroleum $\delta^{13}C$ values for bulk oil and group compositions are less than -30% . The crude oil has not suffered the secondary change such as bacterial decomposition, water leaching and so on. The isotope fractionation effect for the group compositions is small. The distribution of normal paraffin alkane is single peak, with nC_{22} prominent peak. Pr/Ph ratio (isoprenoid) is 0.75, with the Pr and Ph prominent predominance comprised with nC_{17} and nC_{18} respectively. The aromatic hydrocarbons present a shape of camel shoulder suggesting complicate components, and the phenanthrene is the prominent peak. Based on the methyl phenanthrene index (MPI1), R_o for the crude oil is about 0.83%. The carbon number for the tricyclene is distributed from C_{19} to C_{30} , with C_{23} prominent peak. C_{30} is the prominent peak in hopanoid and γ -wax alkane is the medium intensity content. The C_{29} steroid is predominant in the sterane series, with the "V" shape distribution of $C_{29} > C_{27} > C_{28}$. The values of maturity parameter $C_{29}20S/(20S+20R)$ and $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ are 0.39 and 0.31 respectively, which not reach the isomerization equilibrium. On the basis of regional geology, source rock characteristics of T_1f_1 , geochemical characteristics of petroleum and oil-source correlation, we consider that the crude petroleum is a product of Cambrian source rock at the oil generation peak and the occurrence of crude petroleum in the limestone cave and seam is a result of tectonic destroys after the early oil accumulation.

Key words: Northwest Sichuan basin; Changjianggou profile; T_1f_1 ; Crude petroleum; Molecular geochemistry; Geological significance.