

成藏三要素的耦合对高效气藏形成的控制作用

——以四川盆地川东北飞仙关组鲮滩气藏为例

汪泽成 赵文智 张水昌 王红军 余谦

(中国石油勘探开发研究院地质研究所, 北京 100083; 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 中国石油勘探开发研究院石油地质实验中心, 北京 100083; 成都地质矿产研究所, 成都 610082. E-mail: wangzecheng@petrochina.com.cn)

摘要 以川东北地区飞仙关组高效气藏为例, 通过能量场的数值模拟, 定量-半定量地分析油气成藏关键时刻能量场控制下所发生的烃类生成、运移和聚集及储层等要素演化以及其相互作用、相互影响. 指出晚三叠世—早侏罗世是二叠系烃源岩大量成油期, 断层沟通油源, 油气在飞仙关组古构造圈闭内聚集成大型古油藏; 晚侏罗世—白垩纪大巴山前陆盆地巨厚堆积, 导致古油藏被深埋, 古温度达到 170~210 °C, 古油藏发生裂解成气, 古油藏成为高效气源灶; 与此同时, 高温环境下发生的硫酸盐热还原作用, 产生大量 H₂S 等酸性气体, 使得古油藏范围内的白云岩储集层发生深部溶蚀作用, 储层物性得以改善与保持; 喜马拉雅运动, 在大巴山前缘产生强烈变形, 古气藏发生调整、降温与降压, 形成现今气藏分布状态.

关键词 能量场 耦合 数值模拟 高效气藏 飞仙关组 四川盆地

油气藏是石油地质学的核心. 近年来国内外学者从含油气系统的角度^[1-5]逐渐统一了油气成藏研究的思路和方法, 即通过分析油气成藏地质要素与油气生成、运移、聚集到在圈闭内被保存的地质作用过程的组合关系, 指出历史上形成的、现今仍保存的油气藏分布位置, 指导勘探选区与钻探目标选择, 最大限度地减少风险, 提高成功率. 然而, 地下油气藏形成是一个复杂的物理、化学作用过程, 不仅取决于地质要素的规模与质量以及诸要素在空间上配位关系, 还取决于成藏作用过程的时效性、优质地质要素形成与保持的时效性以及两者在时间和空间上有效配置的时效性.

近年来, 作者在对比研究高效气藏^[6]和低效气藏^[7,8]的形成机理过程中, 提出油气藏形成的三要素^[6,9], 即能量场、成藏作用过程和地质要素. 地质要素是油气流体赋存的载体, 成藏作用过程包括了油气从生成、运移、聚集到保存与改造的全过程. 能量场是地温场、地压场、地应力场“三场”的通称, 是地球内能以不同形式在地壳上的表现^[10,11]. 能量场是地质要素形成和成藏作用发生所依赖的环境条件. 不同能量场背景下所形成的地质要素差异大, 所发生的成藏作用过程差异也很大, 由此导致了油气藏

的类型、规模与质量等方面的差异. 关键时刻的三要素耦合作用, 对油气藏的规模与质量起决定作用.

高效气藏定义参照文献^[9]. 这类气藏可动用程度高, 投入开发后具有较好的经济效益. 近年来研究表明, 高效气藏的形成必须具备高效气源灶^[12]、高效输导过程^[13]以及优质成藏地质要素(如大圈闭、好储层、优盖层等)组合. 实际上, 同时具备上述条件并不是在所有含油气盆地或者所有构造单元内都能够发生的, 需要有特定的地质条件以及能量场. 也就是说, 高效气藏形成的地质条件苛刻, 只有成藏三要素在时空演化上出现最佳配置时, 才能形成高效气藏.

本文以四川盆地川东地区飞仙关组鲮滩气藏为例. 利用数值模拟技术, 反演地温场、压力场、应力场演化历史; 利用油气藏定年技术与实验分析数据, 剖析成藏三要素的演化以及成藏关键时刻的耦合作用, 分析要素之间的耦合对高效气藏形成的控制作用.

1 川东北地区飞仙关组高效气藏基本特征

川北地区位于四川盆地北部, 包括米苍山-大巴山冲断褶皱带前缘、川北凹陷带、川中隆起带北部以及川东断褶带北部, 面积约 4×10^4 km². 大地构造位置处在四川盆地与大巴山弧形褶皱带接壤部位(图 1),

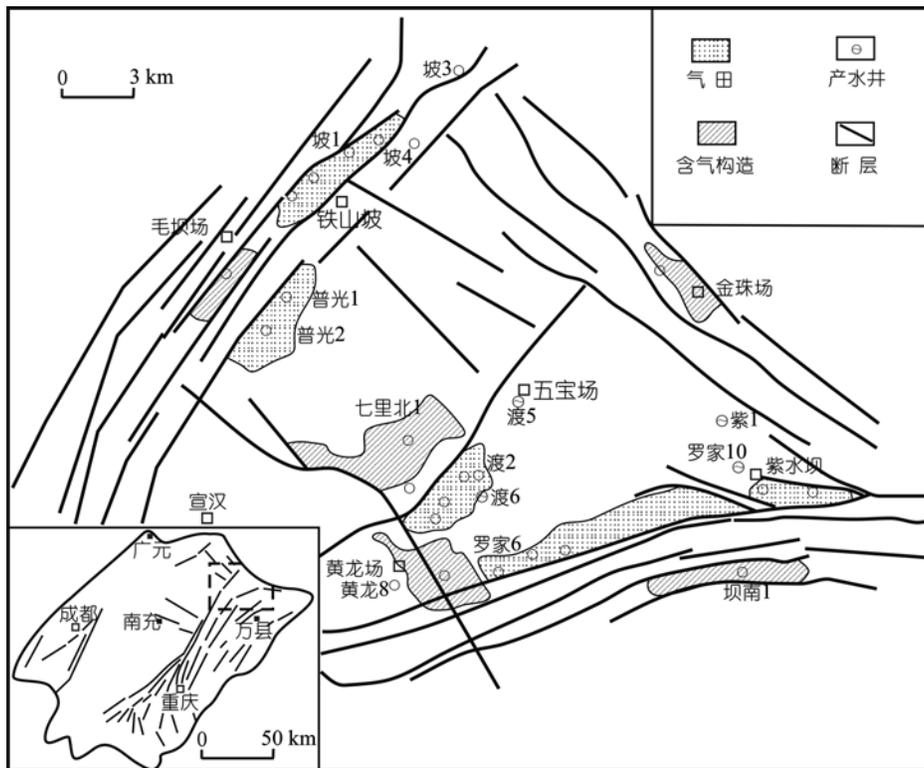


图 1 川东北飞仙关组鲧滩天然气勘探成果略图

同时还包括了部分川西断褶带、川中地块北部、川北拗陷带以及川东高陡构造带中北段。二叠纪—早三叠世，该区发育北西向延伸的开江—梁平海槽^[14,15]，海槽边缘发育礁滩沉积，是主要的勘探目的层。中、晚侏罗世发育大巴山前陆盆地^[16]。燕山晚期—喜马拉雅期，发生冲断与褶皱变形^[17]。

川东北地区飞仙关组鲧滩气藏是近年来中国天然气勘探的重大突破。飞仙关组天然气勘探始于 20 世纪 60 年代初期，发现的气藏多属于灰岩裂缝性气藏，储量规模小，因而长期未被重视。自 1995 年渡口河构造发现鲧粒白云岩气藏以来的 10 余年，先后发现了渡口河、铁山坡、罗家寨、普光等 5 个探明地质储量大于 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 大气田以及金珠坪、毛坝场、正坝南、七里北等含气构造。截止 2005 年底，该地区获得的累计探明地质储量超过 $3500 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，已成为四川盆地探明储量最多的层系。气藏的平均储量丰度为 $(7.3 \sim 42) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，单井无阻流量达 $(12 \sim 73) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，属于高效气藏。

目前发现的鲧滩气藏属于构造-岩性复合型气藏，气藏埋深在 3048~5845 m，气藏温度 64~130℃，压力梯度在 0.95~1.30 MPa/km 之间。天然气组分中以 CH_4

为主，占 54.2%~99.4%，平均 90.6%。 H_2S 含量高，达到 3.0%~17.4%，平均值达到 11.2%，渡 5 井高达 36.6%；现场分析 H_2S 含量为 0.05~523.63 g/m^3 ，平均为 125.82 g/m^3 。硫化氢含量与甲烷含量具良好的负相关性，甲烷含量越高，硫化氢含量越低(图 2)。

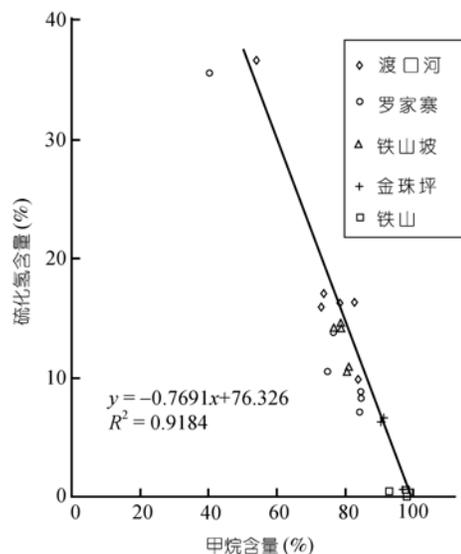


图 2 飞仙关组鲧滩气藏甲烷与硫化氢含量相关关系

储层物性受岩性控制. 鲕粒白云岩物性条件好, 既使在埋深超过 5000 m 的深层仍具良好物性. 如七里北 1 井在 5700~5900 m 井段孔隙度高达 15%~20%, 且孔隙度与渗透率之间具良好的相关性, 可拟合关系式: $K = 0.0027\phi^{3.3887}$ ($R^2 = 0.78$). 相反, 鲕粒灰岩物性差, 孔隙度通常小于 4%, 以裂缝为主.

近几年来, 前人针对飞仙关组鲕滩气藏的研究做了大量工作, 研究重点集中在鲕滩储层发育的沉积环境、白云岩成因及其分布规律、鲕滩气藏气源对比以及成因分析等方面, 提出了晚二叠世—早三叠世早期(飞仙关组飞一段沉积期)在大巴山前缘发育北西向展布的“开江-梁平海槽”^[14,15]; 海槽两侧高能环境发育台地边缘鲕坝(滩)沉积^[18,19]; 混合水白云石化作用是该区鲕粒白云岩形成的主要成岩机制^[20,21]; 飞仙关组气源主要来自二叠系^[22], 属于原油裂解气^[23]. 针对天然气中高含硫的成因, 提出了硫酸盐热还原作用(简称 TSR 反应)的成因机制^[24,25]. 这些成果认识为指导该区天然气勘探提供了理论依据, 也是本文研究的基础.

2 研究方法

耦合作用(coupling)是指系统间或一个系统的各种特性之间的相互作用而表现出的具有成因联系的现象. 耦合作用是一种普遍性地质现象, 不同系统之间存在耦合作用, 如地球内部层圈耦合作用^[26]、地球内外动力耦合作用^[27]、构造与气候耦合作用^[28]、构造耦合(包括中国西部的盆山耦合以及东部的活动大陆边缘构造耦合现象)^[29]. 同一系统内部不同作用过程也存在耦合作用, 如天然气成藏过程中运移动力耦合^[30]、金属矿床形成的渗流场、地应力场、地温场耦合作用^[31], 等等.

地质上的各种耦合作用日益成为研究的热点. 目前研究耦合作用多是从定性角度进行认识, 量化研究难度较大. 油气藏形成过程中, 能量场、成藏作用过程与成藏地质要素三者之间耦合同样具有普遍性和必然性, 而且贯穿的全过程. 实际上, 油气藏形成是一个漫长、不可逆的自然过程, 因此, 研究成藏三要素的耦合作用必须站在时间坐标轴上, 考察关键时刻的能量场、成藏作用过程以及地质要素三者之间的相互作用与成因联系. 基于此考虑, 可以通过数值模拟手段, 反演能量场、成藏作用过程及其动力、地质要素的形成演化历史, 分析大量生烃与排烃关键时刻各要素的相互作用与成因联系, 实现耦合

作用的量化、半量化分析.

本文研究工作中, 针对飞仙关组和上二叠统两个目的层系, 开展古构造恢复与应力场分析、热史与生烃史模拟、压力史模拟等模拟工作; 同时, 结合包裹体等成藏年龄测定、岩石薄片鉴定等资料, 探讨成藏三要素的耦合对川东北飞仙关组高效气藏的影响.

3 能量场演化模拟

3.1 应力场分析与古构造恢复

构造动力学和构造变形机制分析是应力场研究的重要途径. 区域构造演化历史研究表明, 大巴山前构造带在不同动力学背景下经历了多期应力转换. 野外观察到古生界地层中发育高角度正断层^[32]以及受隐伏基底断裂和深断裂活动影响的海底基性火山岩(峨嵋山玄武岩)^[33], 表明印支期前主要为拉张伸展环境. 在此区域应力场背景下, 晚二叠世—早三叠世早期(相当于飞仙关早期)继承性发育广元-开江裂陷槽, 早三叠世晚期—中三叠世进入拗陷沉积期. 印支运动末期在华蓥山断裂东翼形成西北向延伸的开江古隆起. 燕山早期在大巴山前缘形成中、晚侏罗世前陆盆地即大巴山前陆盆地^[16]. 燕山晚期—喜马拉雅期, 随着大巴山前陆和雪峰山前陆的褶皱隆升及其向四川盆地推挤, 在川东北地区形成了独特的挤压应力场, 来自大巴山的挤压应力为南西向, 来自川东的挤压应力为北西向, 两者的合力作用在华蓥山基底断裂以西、具刚性基底的川中地块上, 产生南西向反作用力. 三方向应力的联合作用(图 3), 形成了大巴山前缘弧形带与川东北弧形带“双弧交汇”的

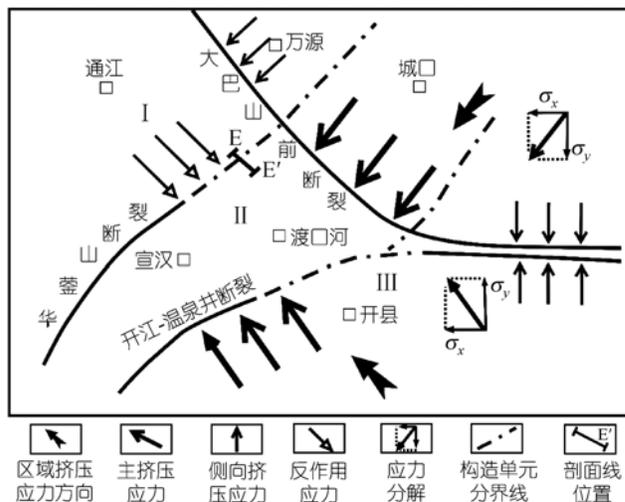


图3 川东北地区中新代应力场分析

构造变形样式^[17], 构造形迹上表现出构造干扰复合现象.

基于上述认识, 作者对钻探程度较高的渡口河-开江地区开展古构造恢复研究. 在研究过程中, 通过拟合镜质体反射率与深度的相关关系, 得公式如下: $H = 1010R_0 + 889.65 (R^2 = 0.7558)$, 式中 H 为地层埋深 (m), R_0 为镜质体反射率 (%). 利用该公式恢复单井在不同时期的剥蚀厚度, 共计 42 口井. 再利用地层厚度趋势厚度法进行平面成图, 完成了飞仙关组顶面和二叠系顶面在不同时期的古构造图. 图 4 中(a), (b) 分别是晚三叠世末和晚侏罗世末飞仙关组顶面构造图. 图 4 中可以看出, 开江古隆起在三叠纪末期就已形成(图 4(a)), 并在早侏罗世继承性发育. 中侏罗世受大巴山前陆快速沉降影响古隆起成为凹陷区, 到晚侏罗世末受燕山运动影响, 古隆起形态明显, 但埋深已达到 6500~7200 m. 古构造演变对该区油气生成、聚集与成藏的控制作用明显.

3.2 温度场演化

和中国中西部地区中生代地温场演化相似, 川东地区现今地温梯度较低. 利用 15 口钻井测试资料, 拟合温度与深度关系曲线, 得方程如下: $T = 0.028H - 485.08 (R^2 = 0.90)$, 地温梯度为 2.8 °C/100 m. 飞仙关组地层温度集中在 60~110 °C (图 5).

古热流场研究^[34]表明, 川东北地区自晚二叠世以来大地热流场处于逐渐降温, 晚二叠世初期(约在 255 Ma)古热流为 62~70 mW/m², 现今热流平均为 45 mW/m². 古热流场演变反映了构造环境的变化, 二叠纪克拉通裂陷作用(可见玄武岩喷发), 大地热流值高; 晚三叠世以来挤压背景下的前陆挠曲沉降, 大地热流值明显变低.

为了定量模拟飞仙关组古地温演化历史, 选用古热流法恢复热史(古热流值采用卢庆治等人^[34]研究成果), 对区内的 24 口井开展了热史恢复. 部分单井热史恢复结果见图 6. 由图 6 可见: 220~170 Ma(晚三叠世—早侏罗世)飞仙关组地层温度相对稳定, 保持在 90~110 °C; 到 170~135 Ma(中侏罗世—早白垩世), 地层快速增温, 并于晚侏罗世—早白垩世达到 170~220 °C; 晚白垩世以来, 地层温度因抬升逐渐降低. 这一模拟结果和包裹体均一温度有较好的吻合. 模拟结果还显示温度场演化受构造沉降与隆升影响, 不同区块地温差异较大, 总体上华蓥山断裂以西的大巴山前缘深凹陷区地层温度比开江古隆起区高.

3.3 压力场演化

川东北地区飞仙关组现今地层压力复杂, 存在常压和异常高压两种压力状态(图 7). 统计 30 口井 33 个地层压力资料点, 结果表明物性良好的白云岩储集层以常压为主, 压力与埋深具有良好的正相关性, 表明气藏储层的连通性好、且有高产和稳产特征. 相反, 超压主要出现在致密、连通性较差的灰岩或致密的白云岩地层中, 压力系数在 1.15~1.8 之间变化, 但以 1.2~1.5 的压力系数为主; 气藏因储层致密产量较低, 但当存在裂缝时, 产量变高, 如峰 15 井在埋深 3831.5 m(飞三段)的灰岩中地层压力达到 72.24 MPa, 压力系数超过 1.8, 裂缝性储层, 产气量为 140.89 × 10⁴ m³/d.

采用德国 IES 公司 PetroMod 模拟软件, 反演研究区飞仙关组地层压力演化历史. 通过对坡东 1 井飞仙关组地层压力进行模拟, 得出飞仙关组静岩压力、地层压力、静水压力 3 个压力值, 再利用三者之间关系计算超压和有效应力. 从图 8 中可以看出, 晚三叠世前, 地层压力和静水压力相近, 超压较低, 反映处于正常压实状态. 早侏罗世开始, 飞仙关组地层超压明显, 并于晚侏罗世—早白垩世达到高峰. 晚白垩世—现今, 地层压力和超压明显降低.

模拟结果表明, 超压形成时间与古温度高值区形成时间有较好的吻合性, 均发生在晚侏罗世—早白垩世. 这表明异常高压的形成可能与天然气大量生成和强烈构造挤压作用有关. 成烃史模拟揭示二叠系烃源岩在早侏罗世末进入生油高峰, 石油通过断层输导进入飞仙关组储集层, 导致地层超压; 中、晚侏罗世, 二叠系烃源岩和飞仙关组古油藏均进入生气期, 因而大量气体充填孔隙是导致异常高压的主要原因. 此外, 中侏罗世以来的快速沉降以及挤压作用不断增强, 也可能对异常高压形成产生一定影响.

4 关键时刻的耦合作用

地质上的各种耦合作用是一种普遍现象, 表现形式也各不相同. 本文探讨关键时刻的耦合作用是指在一个油气系统内的关键时刻(古油藏形成期和原油裂解成气期), 能量场演化过程中成藏作用过程(主要是成烃作用、成藏动力)与地质要素(主要是储层)两者之间的相互影响、相互作用, 是飞仙关组鲕滩高效气藏形成的关键因素.

4.1 晚三叠世—早侏罗世的耦合作用

飞仙关组本身烃源岩条件较差, 天然气主要来

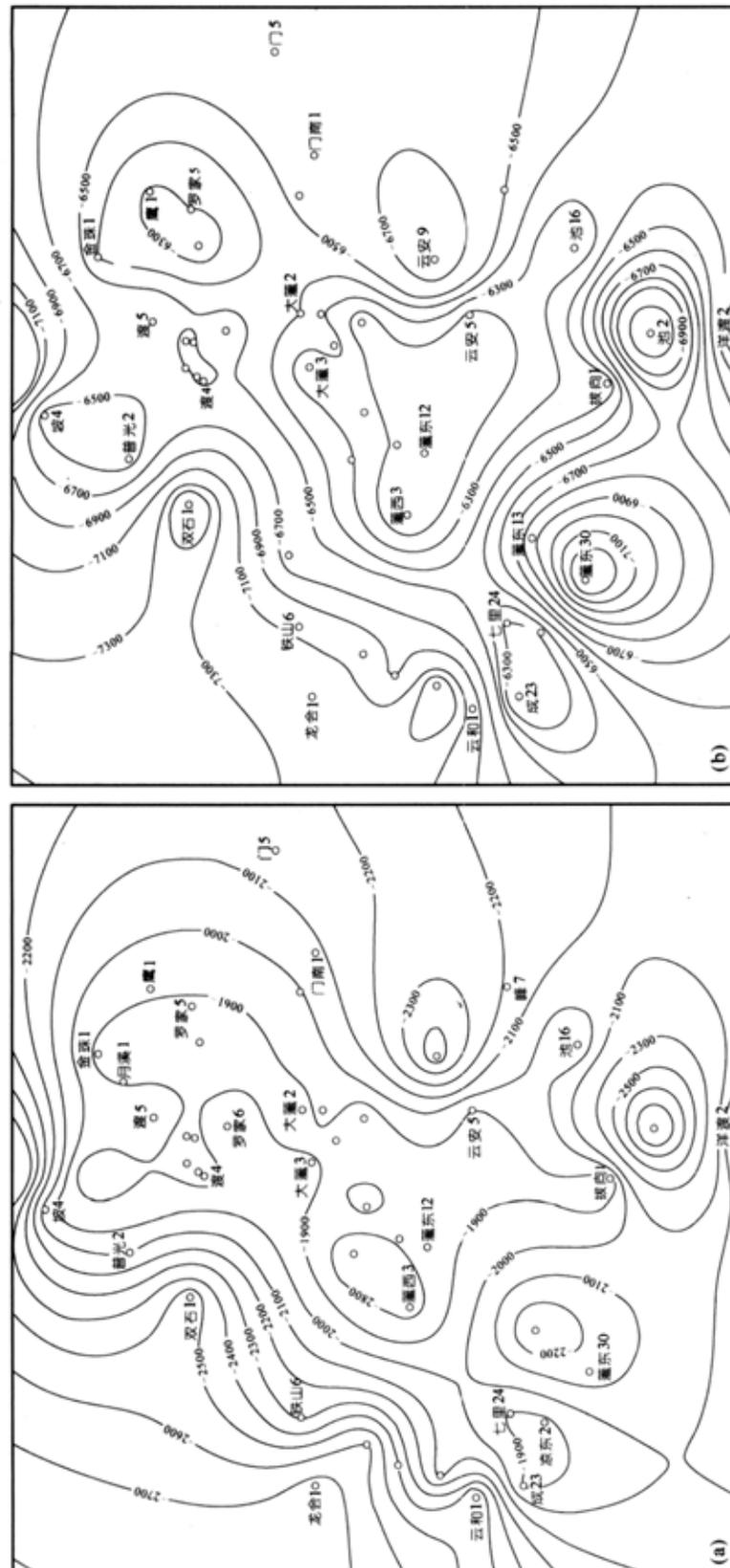


图4 川东北飞仙关组顶面在不同时期古构造复原图
(a) 晚三叠世末; (b) 晚侏罗世末

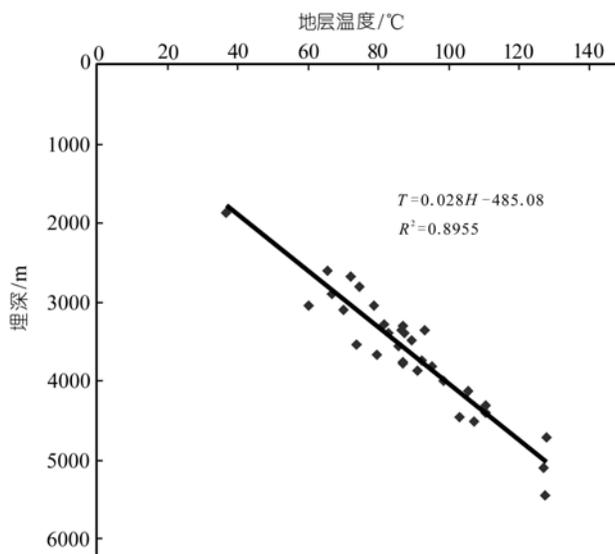


图 5 川东北飞仙关组现今地层温度与埋深关系图

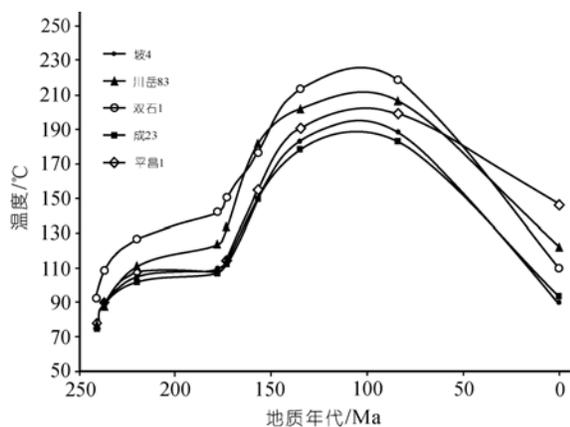


图 6 川东北地区部分钻井飞仙关组地层温度演化模拟曲线

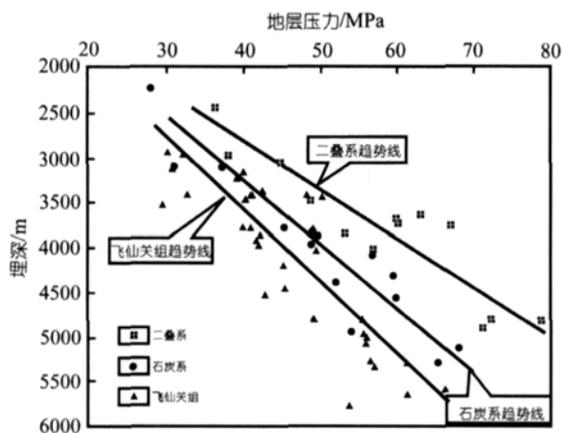


图 7 川东北地区石炭系—下三叠统地层压力与埋深关系图

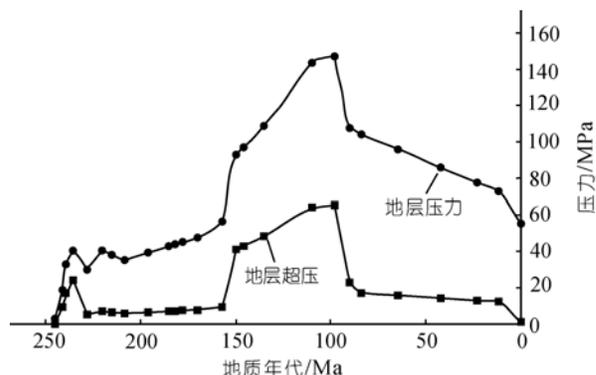


图 8 坡东 1 井飞仙关组顶压力演化历史模拟

源于上二叠统烃源岩。这套烃源岩在川东北地区主要由海相生物灰岩、暗色泥岩组成^[22]。温度和有机质成熟度反演模拟结果表明，晚三叠世—早侏罗世川东北地区上二叠统地层温度为 90~120，有机质镜质体反射率 R_o 值在 230 Ma 达到 0.5%，170~180 Ma 为 1.0% 左右，进入大量成油期。也就是说，上二叠统烃源岩在晚三叠世进入生油窗，到晚侏罗世达到生油高峰。

古构造分析表明，晚三叠世末期的印支运动在华蓥山断裂东翼形成北东向延伸的开江古隆起，同时产生北东向和北西向两组逆冲断层。利用钻井勾绘的渡口河-开江地区古构造，表现为东高西低的“复式褶皱”(图 9)，罗家寨-渡口河以及铁山坡分别处于复式褶皱的两个高带，其间被双石 1 井到朱家 1 井鞍部所隔。川东北地区飞仙关组气藏的储层中不同程度地含有固体沥青。沥青分布与孔隙大小和含气性具良好正相关性，是古油藏原油裂解成气后的残留物^[23]。

断层的形成为原油运移提供了良好通道，而大型古构造则为石油聚集提供了有利场所。断层是该区油气运移的主要通道。目前发现的古油藏以及气藏均与断层有关。断层输导油气的直接证据是储层中构造裂缝内充填大量沥青(图 10)。显微镜下观察，至少存在三期裂缝。第一期裂缝，多呈张性，被方解石充填，且被后期裂缝错开。裂缝内方解石脉包裹体以盐水包裹体为主，均一温度在 80~95 之间，推测形成于印支早期，并在成油期前形成。第二期裂缝切割第一期裂缝，缝内充填大量沥青(图 10(d))；部分薄片可见沥青充填鲕粒并被错开(图 10(b))。裂缝内方解石脉包裹体均一温度在 120~130，推测形成于燕山早期，与大量生油期相吻合。第三期裂缝，切割早

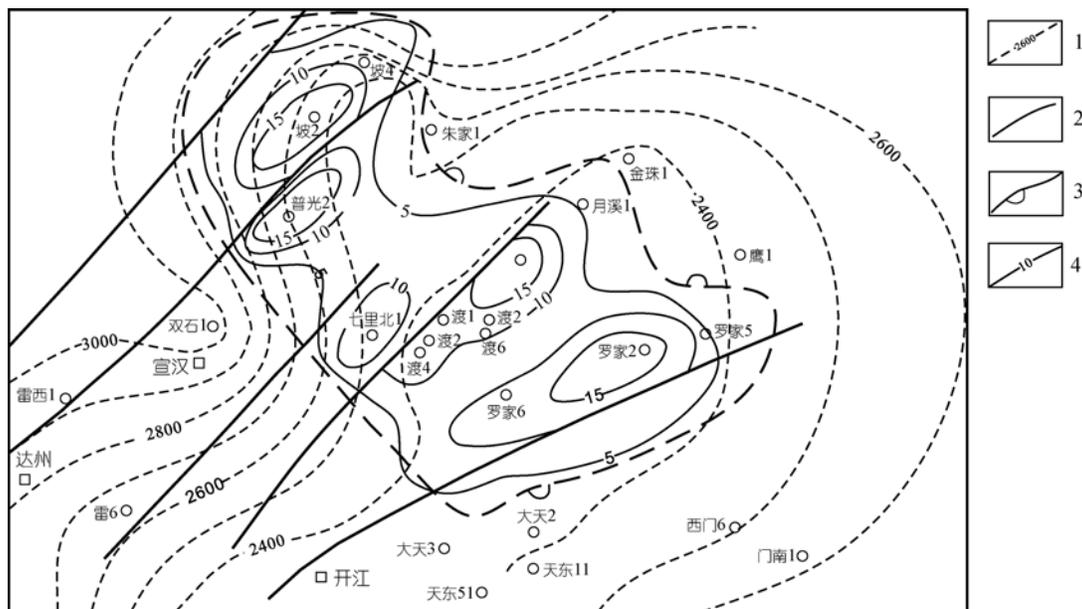


图9 川东北部飞仙关组古油藏分布示意图

1. 早侏罗世末飞仙关组顶界埋深等值线(m), 2. 晚印支—早燕山运动形成的东北向断层, 3. 推测古油藏分布范围, 4. 储层沥青含量等值线(%)

期裂缝, 多未被充填(图 10(d)); 裂缝内少量方解石脉的包裹体均一温度在 150~170 ; 推测形成于燕山晚期或喜马拉雅期, 与成气期相吻合. 裂缝发育程度与溶蚀孔发育程度有很好的相关关系, 网状分布的裂缝发育区(图 10(c), (d), (e)), 溶蚀孔往往连成一片; 孤立的裂缝, 溶蚀孔多呈链条状分布(图 10(d)). 岩芯观察发现沥青沿微裂缝呈叶脉状或毛细血管状分布(图 10(f)), 清晰地再现了油气运移痕迹.

川东北地区飞仙关组古油藏到底有多大规模? 古油藏分布范围的确定主要依据钻井的储层沥青的分布与含量, 结合成油期古构造形态进行综合判断. 沥青含量在铁山坡、普光 2、渡口河、罗家寨等气田部位表现出明显的高值, 反映古油藏分布受局部构造控制, 紧邻断层的高部位沥青含量增高. 将沥青含量等值线图 and 早侏罗世末期飞仙关组顶面的古埋深图叠合(图 9), 考虑受相带控制的白云岩分布, 综合推测古油藏分布面积达 700 km², 原油储量(45~50) × 10⁸ t, 为大型的构造-岩性复合型油藏或含油区块.

古油藏形成后, 液态烃充注孔隙可有效抑制成岩作用, 使得储层良好物性得以保持. 大量铸体薄片观察表明, 未见沥青充填的灰岩或白云岩, 孔隙几乎全被白云石胶结物充填, 从颗粒边缘至粒间孔中心, 由栉壳状白云石 细晶白云石 中晶白云石的变化特征明显(图 11). 相反, 有沥青充填的白云岩中, 溶蚀孔发育, 且被沥青环绕, 充分表明这些储层中曾经

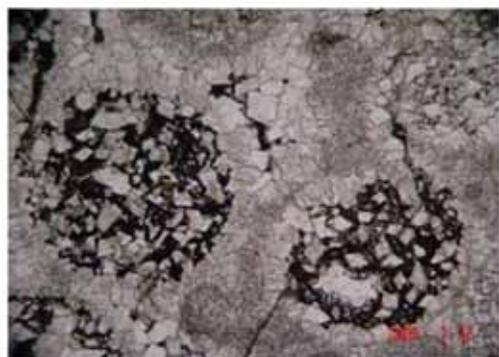
被液态烃所充注. 液态烃充注孔隙的过程, 实际上是油驱水的过程, 使得孔隙内可动水含量大大减少, 水-岩反应几率降低^[35], 孔隙内的胶结作用减少, 早期形成的孔隙得以保存.

从上述清楚地看出, 晚三叠世—早侏罗世是上二叠统烃源岩大量成油期, 印支运动形成的断层和大型古圈闭为石油在飞仙关组鲕滩聚集成藏提供了有利条件; 石油充注鲕粒溶孔和粒间孔, 有效阻止成岩作用发生, 使得早期形成的良好孔隙得以保持, 也为后期的孔隙演化奠定基础.

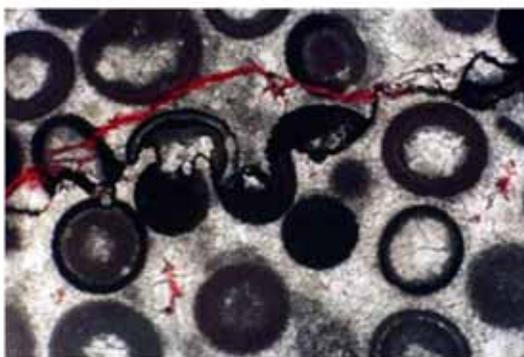
4.2 晚侏罗世—白垩纪的耦合作用

中、晚侏罗世大巴山前陆盆地形成与快速堆积, 使下三叠统一二叠系被深埋, 埋深可达 6500~7200 m, 地层温度也因此上升. 热史模拟结果显示晚侏罗世—白垩纪飞仙关组地层古地温达到 170~220 , 达到了原油裂解成气温度^[36], 古油藏发生裂解成气. 按上述古油藏的石油储量规模推算生气量, 可达到 (2.5~3.0) × 10¹² m³, 为气藏的形成提供了充足的气源. 这一点从目前发现的高效气藏主要分布在古油藏分布区内得到证实(图 9), 飞仙关组古油藏成为主要的气源灶.

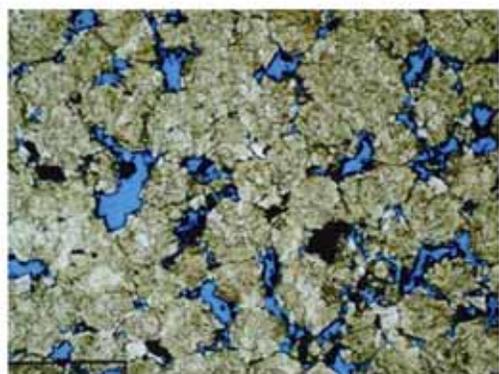
目前研究得出的高效气源灶评价指标^[7], 分别为熟化速率(R₀/Ma)>0.05、生气速率 > 0.02 m³/km².



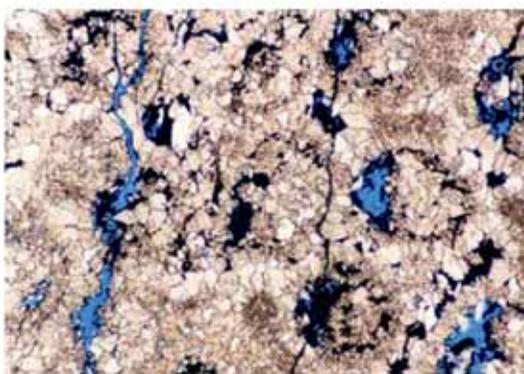
(a) 残余蠕虫粒内孔及其粒间孔被沥青充填
(七里北1井, 5740.05 m, 铸体单偏光, ×100)



(b) 沥青充填蠕粒, 并被后期裂缝错开与压溶
(普光2井, 4593.48 m, 铸体单偏光, ×100)



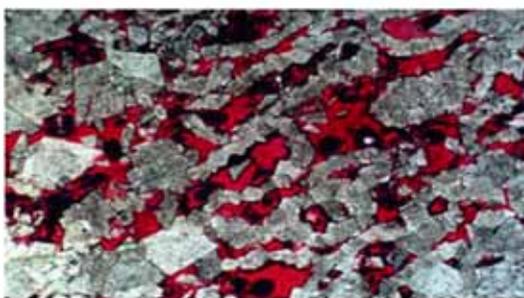
(c) 粒间溶孔, 并被沥青充填
(罗家1井, 5740.05 m, 铸体单偏光, ×100)



(d) 溶孔沿裂缝发育, 第二期裂缝被沥青充填, 晚期裂缝未被充填
(罗家1井, 5740.05 m, 铸体单偏光, ×100)



(e) 岩芯裂缝
上图: 裂缝被沥青
充填;
下图: 局部放大
(七里北1井,
5740.05 m)



(f) 溶蚀孔沿裂缝发育, 并被沥青充填
(普光2井, 5740.05 m, 铸体单偏光, ×100)



(g) 膏质砂岩中发育
溶蚀孔洞, 被方解石半
充填, 见单体硫磺及向
洞内生长的石英晶体,
石英包裹体均一温度
141~147℃
(金珠1井, 2798.79 m,
岩芯)

图 10 飞仙关组岩芯与薄片照片

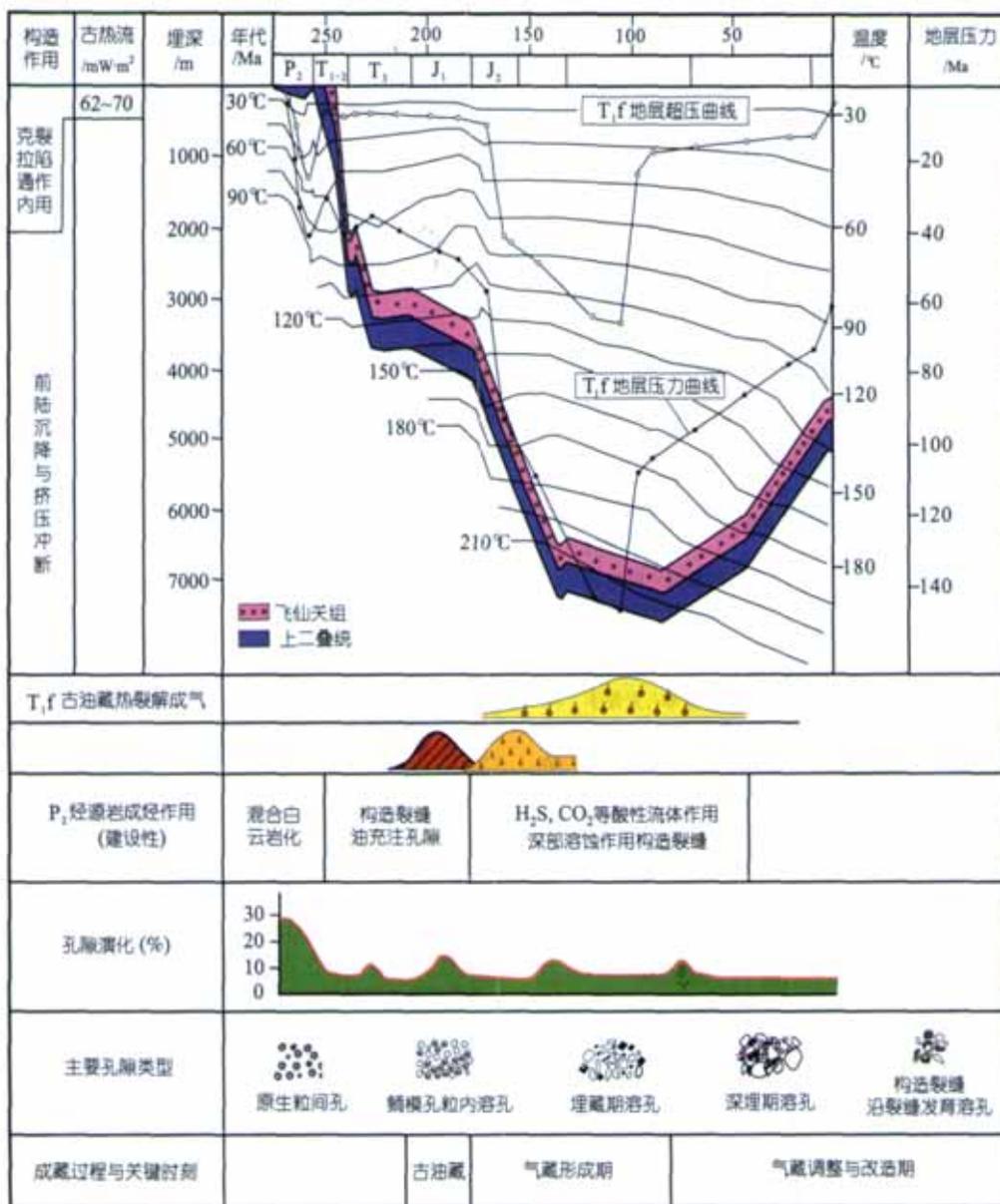


图 11 飞仙关组高效气藏形成过程中成藏三要素的耦合作用示意图

Ma⁻¹($\times 10^8$)、主生气期持续时间 <40 Ma. 以 160 做为原油裂解成气的温度下限推算, 多数井模拟结果显示飞仙关组古油藏温度从 157 Ma 进入 160 , 并持续到 135 Ma, 持续时间为 22 Ma; 生气速率为 1.6~2.0 m³/km²·Ma⁻¹($\times 10^8$). 由此可见, 飞仙关组古油藏属于高效气源灶.

同时, 高温环境下发生硫酸盐热还原作用(简称 TSR 反应), 导致飞仙关组鲕滩储层的深部溶蚀作用, 形成优质储层. 在 TSR 反应过程中^[37], 主要控制因素包括硫酸根浓度、H₂S 分压^[38]以及温度^[39]. 其中, 温度是最重要的影响因素. 尽管目前认识到的 TSR

反应最低温度尚不统一, 可以在 100~140 温度之间^[40~42], 但 TSR 反应速率与 H₂S 含量有关, 且随着 H₂S 分压增大而升高^[37]; 在无 H₂S 时反应速率特别低.

TSR 反应是川东北部飞仙关组鲕滩高效气藏普遍高含 H₂S 的关键因素^[24,25], 但 TSR 反应的地质年代目前尚不清楚. 从温度模拟结果分析, TSR 反应发生可能在 157~135 Ma, 即晚侏罗世—早白垩世. 该时期发生断裂作用, 使得富含 SO₄²⁻ 的地层水不断沿原有溶孔、溶缝以及断裂进入古油藏, 在高温环境下, 烃类与 SO₄²⁻ 发生 TSR 反应. 从与单体硫磺相伴生的

石英晶体包裹体均一温度(147 °C), 推断 TSR 反应温度应在 140 °C 以上. 此外, 原油大量裂解成气导致异常高压, 也有利于 TSR 反应速率增大.

TSR 反应一方面消耗烃类, 另一方面产生大量酸性气体 H_2S 和 CO_2 . 而这些酸性气体对早期方解石胶结物产生溶蚀作用, 使得原有的孔隙不断扩大. 这种深埋环境下发生的溶蚀孔隙, 在薄片上主要表现为沥青四周都发育孔隙, 而且孔隙形态多呈港湾状, 或者与裂缝相连(图 10). 薄片统计表明, 在局部层段, 深部溶蚀孔的面孔率可达到 3%~6%.

4.3 飞仙关组鲕滩成藏三要素耦合作用模式

上述能量场模拟与成藏研究研究表明, 飞仙关组鲕粒高效气藏的形成是能量场、成藏作用过程、地质要素三者耦合作用的结果, 尤其是两个关键时刻的耦合作用使得高效气源灶、优势输导以及优质储盖组合在空间上具良好配置, 是高效气藏形成的关键因素(图 11).

首先, 晚三叠世—早侏罗世上二叠统烃源岩进入大量成油期, 开江-渡口河地区发育大型古构造圈闭, 强大的源—储剩余压力差促使石油沿断层发生优势运移, 形成巨型大油田(或油田群). 同时, 液态烃充注孔隙, 使得储层的早期溶蚀孔隙得以保存.

第二, 晚侏罗世—白垩纪, 大巴山前陆盆地充填期, 尽管地温场变低, 但快速沉降与巨厚堆积使得古油藏被深埋, 地层温度高, 古油藏裂解成气, 为气藏形成提供了充足的气源. 同时, 与膏盐岩互层的储集层地层水中富含 SO_4^{2-} , 在裂缝输导及高温作用下, 与烃类发生 TSR 反应, 产生了大量的 H_2S 和 CO_2 等酸性流体, 使得先存的被石油充注的孔隙发生再溶蚀作用, 孔隙进一步被扩大, 物性变好.

第三, 燕山晚期—喜马拉雅期, 大巴山前陆的冲断、隆升作用, 一方面早期形成的气藏发生调整与改造, 形成现今受构造-岩性控制的复合型气藏; 另一方面, 地层温度与压力在抬升过程中发生降温与降压作用, TSR 作用趋于停滞, 连通性良好的高效气藏压力以常压为主, 但储层致密的灰岩气藏仍保持异常超压.

5 结论

油气藏的形成是地下流体系统和固体系统在能量场环境下发生相互作用的复杂过程. 油气藏形成条件可归纳为三大要素, 即能量场、作用过程与地质

要素. 地质要素包括烃源岩、输导层、储集层、圈闭和盖层等地质体, 是油气藏形成的物质基础; 作用过程是油气从生成经运移、聚集到最终成藏或被破坏的物理作用和化学作用. 能量场包括地温场、地压场、地应力场等, 为地质要素演化与作用过程发生提供源动力. 能量场演化对地质要素的质量、作用过程的时序与效率有控制作用, 因而三要素之间必然存在耦合作用, 贯穿油气藏形成的整个过程.

关键时刻的成藏三要素耦合作用是高效气藏成藏的重要因素. 一方面, 能量场演化控制了油气生成、运移与聚集的时序、途径与效率. 快速升温作用有利于形成高效气源灶; 古断裂及其相关大型构造圈闭有利于形成大型古油气藏; 高温环境利于原油裂解气发生. 另一方面, 作用过程及其相关产物反过来影响地质要素和能量场. 烃类充注导致成岩作用延缓, 利于良好储层物性得以保持; 高温环境发生的 TSR 反应所产生的酸性气体, 有利于储层的深部溶蚀作用; 气体的大量生成导致地层的异常高压.

川东北地区飞仙关组鲕粒高效气藏形成有 3 个重要因素, 即充足的气源、优质储层以及良好的盖层条件(飞仙关组发育的膏盐岩). 前两者的形成主要受控于两个关键时刻的耦合作用. (1) 晚三叠世—早侏罗世, 上二叠统烃源岩大量成油, 沿古断层向上运移到印支末期古圈闭, 聚集形成大型飞仙关组古油藏; 烃类充注孔隙, 有效阻止成岩作用, 良好物性得以保持. (2) 晚侏罗世—白垩纪, 飞仙关组被快速深埋, 导致地层快速增温并达到原油裂解温度, 古油藏成为高效气源灶, 并发生大量裂解成气, 使得地层出现异常高压; 同时, TSR 反应产生大量酸性气体, 导致深部溶蚀作用, 形成优质储层.

致谢 参与相关研究的人员还包括王一刚教授级高级工程师、王云鹏研究员、胡圣标研究员、卢庆治博士、唐泽玮硕士等. 论文的相关观点得到了戴金星院士、胡见义院士、张厚福教授、李明诚教授、柳广第教授、王兆云博士的指教. 在此一并致以谢意.

参 考 文 献

- 1 Dow W G. Application of oil correlation and source rock data to exploration in Willston basin (abs). AAPG Bull, 1972, 56: 615
- 2 Magoon L B, Dow W G. The petroleum system from source to trap. AAPG Memoir 60, 1994
- 3 Demaison G, Huizinga B J. Genetic classification of petroleum systems. AAPG Bull, 1991, 75(10): 1626—1643

- 4 Pollastro R M. Application of the total Petroleum system concept to assessing undiscovered gas resources of the Ghaba and Fahud salt basin Provinces, north-central Oman (abstract). Extended Abstracts Volume. AAPG Intle conferenced Exhibition Birmingham England, 1999
- 5 赵文智. 中国叠合盆地含油气系统基本特征及其评价方法. 北京: 科学出版社, 2003. 120—158
- 6 赵文智, 汪泽成, 朱怡祥. 鄂尔多斯盆地苏里格气田低效气藏的形成机理. 石油学报, 2005, 26(5): 5—9
- 7 Zhao W Z, Wang Z C, Li X Q. Lithological architecture, geological process and energy-field environment are major factors for the formation of hydrocarbon reservoirs. Prog Nat Sci, 2005, 15(10): 877—886
- 8 Zhao W Z, Wang Z C, Chen M J. Formation mechanism of the upper palaeozoic high-quality natural gas reservoirs in Ordos basin. Acta Geol Sin, 2005, 79(6): 843—855
- 9 赵文智, 汪泽成, 王兆云. 中国高效天然气藏形成的基础理论研究进展与意义. 地学前缘, 2005, 12(4): 499—506
- 10 张厚福, 方朝亮. 盆地油气成藏动力学初探——21世纪油气地质勘探新理论探索. 石油学报, 2002, 23(4): 7—12
- 11 郝芳, 邹华耀, 姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展. 地学前缘, 2000, 7(3): 11—21
- 12 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 高效气源灶及对形成高效气藏的作用. 沉积学报, 2005, 23(4): 709—718
- 13 柳广弟, 李剑, 李景明, 等. 天然气成藏过程有效性的主控因素与评价方法. 天然气地球科学, 2005, 16(1): 1—6
- 14 王一刚, 刘划一, 文应初, 等. 川东飞仙关组鲕滩储层分布规律勘探方法与远景预测. 天然气工业, 2002, 22(增刊): 14—19
- 15 杨雨, 文应初. 川东北开江梁平海槽发育对 T_{1f} 鲕粒岩分布的预测. 天然气工业, 2002, 22(增刊): 30—32
- 16 汪泽成, 邹才能, 陶士振, 等. 大巴山前陆盆地形成及演化与油气勘探潜力分析. 石油学报, 2004, 25(6): 23—28
- 17 乐光禹. 大巴山造山带及其前陆盆地的构造特征和构造演化. 矿物岩石, 1988, 18(增刊): 8—15
- 18 张静, 王一刚. 四川宣汉河口地区飞仙关早期碳酸盐蒸发台地边缘沉积特征. 天然气工业, 2003, 23(2): 19—22
- 19 Zhao W Z, Luo P, Chen G S, et al. Origin and reservoir rock characteristics of dolostones in the Early Triassic Feixianguan Formation, NE Sichuan Basin, China: Significance for future gas exploration. J Pet Geol, 2005, 28(1): 83—100
- 20 陈更生, 曾伟, 杨雨, 等. 川东北部飞仙关组白云石化成因探讨. 天然气工业, 2005, 25(4): 40—43
- 21 魏国齐, 杨威, 张林, 等. 天然气地质学川东北飞仙关组鲕滩储层白云石化成因模式. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 162—166
- 22 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讨论. 沉积学报, 2002, 20(2): 349—353
- 23 赵文智, 汪泽成, 王一刚. 四川盆地东北部飞仙关组高效气藏形成机理. 地质论评, 2006, 52(5): 708—718
- 24 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. 地球化学, 2002, 31(6): 517—524
- 25 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. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(11): 1037—1046
- 26 毛桐恩, 刘新美, 赵明, 等. 地球内部层圈耦合作用研究进展. 科技导报, 1999, 6: 28—30
- 27 王思敬. 地球内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探. 工程地质学报, 2002, 10(2): 115—117
- 28 蒋复初, 吴锡浩, 肖华国. 中原邙山黄土及构造与气候耦合作用. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 45—51
- 29 郭令智, 朱文斌, 马瑞士, 等. 论构造耦合作用. 大地构造与成矿学, 2003, 27(3): 197—206
- 30 宋岩, 夏新宇, 王震亮, 等. 天然气运移和聚集动力的耦合作用. 科学通报, 2001, 46(22): 1906—1910
- 31 谭凯旋, 谢焱石, 赵志忠, 等. 构造流体成矿体系的反应输运力学耦合模型和动力学模拟. 地学前缘, 2001, 8(4): 311—321
- 32 王一刚, 陈盛吉, 徐世琦. 四川盆地古生界—上元古界天然气成藏条件及勘探技术. 北京: 石油工业出版社, 2001
- 33 罗志立. 中国西南地区晚古生代以来地裂运动对石油等矿产形成的影响. 四川地质学报, 1981, 2(1): 45—51
- 34 卢庆治, 胡圣标, 郭彤楼, 等. 川东北地区异常高压形成的地温场背景. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1110—1116
- 35 Marchand A M E, Smalley P C, Haszeldine R S, et al. Note on the importance of hydrocarbon fill for reservoir quality prediction in sandstones. AAPG Bull, 2002, 86(9): 1561—1571
- 36 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 油裂解生气是海相气源灶高效成气的重要途径. 科学通报, 2006, 51(5): 589—595
- 37 Worden R H, Smalley P C, Oxtoby N H. Gas souring by thermochemical sulfate reduction at 140 °C. AAPG Bull, 1995, 79(6): 854—863
- 38 Ezat H. The role of burial diagenesis in hydrocarbon destruction and H_2S accumulation, upper Jurassic Smackover formation, Black Creek field, Mississippi. AAPG Bull, 1997, 81(1): 26—45
- 39 Machei H G. Gas souring by thermochemical sulfate reduction at 140 °C: Discussion. AAPG Bull, 1998, 82(100): 1870—1873
- 40 Machei H G, Krouse H R, Sassen R. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction. Appl Geochem, 1995, 10: 373—389
- 41 Machel H G. Relationships between sulphate reduction and oxidation of organic compounds to carbonate diagenesis, hydrocarbon accumulations, salt domes, and metal sulfide deposits. Carbonates Evaporites, 1989, 4: 137—151
- 42 Gertrud B, Mladen J. Gas Souring by Thermochemical Sulfate Reduction at 140 °C: Discussion. AAPG Bull, 1997, 81(5): 814—815