



## 论文

# 扎格罗斯山前 Fauqi 背斜滑脱生长褶皱的构造几何解析与模拟

欧成华<sup>①</sup>, 陈伟<sup>①\*</sup>, 李朝纯<sup>②</sup>, 周文江<sup>③</sup><sup>①</sup> 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500;<sup>②</sup> 西南石油大学国有资产管理处, 成都 610500;<sup>③</sup> 中石油新疆油田公司准东采油厂, 阜康 831511

\* 通讯作者, E-mail: chomm@163.com

收稿日期: 2015-12-29; 接受日期: 2016-04-25; 网络版发表日期: 2016-08-25

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2014CB239201)和国家科技重大专项子课题项目(编号: 2011ZX05030-005-03)资助

**摘要** 利用满覆盖采集的三维地震剖面, 对 Fauqi 背斜平面构造变形格局及剖面构造变形样式进行了详细的构造解析; 基于断层滑脱褶皱模型, 采用正演平衡地质剖面技术, 开展了 Fauqi 背斜深部滑脱耦合浅部生长褶皱及断裂的运动学模拟, 提取的构造特征与实际地震剖面特征基本一致; 利用构造解析成果, 结合生、储、盖时空配置关系分析, 探讨了 Fauqi 背斜的石油差异性富集机制. 结果表明: 在深部的滑脱作用、浅部生长地层的同构造沉积作用, 以及来自扎格罗斯山的南西向水平构造应力挤压作用等的叠加耦合下, 形成了 Fauqi 背斜差异性平面构造变形格局及层次性剖面构造变形样式; 正是差异性构造变形造成了 Fauqi 背斜中石油的差异性富集; 而通过深部滑脱耦合浅部生长褶皱及断裂运动的计算机模拟, 发现 Fauqi 背斜褶皱的水平滑移距离达 3.5km 左右.

**关键词** Fauqi背斜, 滑脱作用, 生长褶皱, 构造几何解析, 运动学模拟, 石油富集, 扎格罗斯山

## 1 引言

扎格罗斯山前是中东的石油富集区, 该区油气生成及运聚特征(Pitman等, 2004)和大油气田分布主控因素(Beydoun等, 1992; Ziegler, 2001; 贾小乐等, 2013)的研究成果表明, 大地构造及其演化形成的各类构造样式对区内石油富集具有良好的控制作用. 而就扎格罗斯山的构造演化史(Stoneley, 1990;

Simmons等, 2007; 薛峰, 2006), 构造单元格局与样式(Colman-Sadd, 1978; Alavi, 1994), 以及广泛发育的逆冲断裂(Berberian, 1995)、走滑断裂(Shahram等, 2005)等构造体系的深入分析则进一步显示了扎格罗斯山及其山前构造具有的成因类型多样、成生机制复杂和构造解释难度大等特点(韩耀祖等, 2014; 欧成华等, 2016), 给该区的石油勘探开发带来了极大的挑战. 中国海洋石油总公司获得了扎格罗斯山前伊拉

中文引用格式: 欧成华, 陈伟, 李朝纯, 周文江. 2016. 扎格罗斯山前 Fauqi 背斜滑脱生长褶皱的构造几何解析与模拟. 中国科学: 地球科学, 46: 1265–1277, doi: 10.1360/N072015-00585  
英文引用格式: Ou C H, Chen W, Li C C, Zhou W J. 2016. Structural geometrical analysis and simulation of decollement growth folds in piedmont Fauqi Anticline of Zagros Mountains. Science China Earth Sciences, 59: 1885–1898, doi: 10.1007/s11430-016-5332-6

克所属米桑油田群的石油开采权, 在米桑油田群的 Fauqi 背斜构造满覆盖测取了高信噪比的三维地震数据, 为深入开展 Fauqi 背斜构造体系研究提供了可靠的资料. 本文从切过 Fauqi 背斜的地震剖面的构造几何解析入手, 对 Fauqi 背斜的平面和剖面构造变形样式进行了构造分析, 利用基于断层滑脱褶皱模型的运动学模拟计算机程序, 再现了 Fauqi 背斜深部滑脱耦合浅部生长褶皱及断裂的运动学形成过程, 以此为基础, 探讨了 Fauqi 背斜石油差异性富集机制.

## 2 地质背景

Fauqi 背斜所在地区位于伊拉克东部与伊朗接壤的边境线上, 背斜构造处于扎格罗斯山前坳陷的南部边缘, 毗邻美索不达米亚盆地(图1a). 扎格罗斯山是在喜马拉雅运动过程中, 受非洲-阿拉伯板块与欧亚板块持续碰撞产生的北东-南西向巨大水平挤压构造应力作用而快速隆升形成的(Stoneley, 1990; Ziegler, 2001; Simmons等, 2007; 薛峰, 2006). 受扎格罗斯山隆升产生的南西向水平挤压构造应力作用, 形成了

北西-南东走向的 Fauqi 收缩背斜构造体系(图1b).

Fauqi 背斜所在地区自白垩系到新近系中新统广泛发育海相沉积地层, 具有极其有利的生储盖组合和明显的地震反射层(图2). 区内生油层为上白垩统 Kazhdumi 组的生屑灰岩和泥灰岩; 下部储集层为上白垩统 Mishrif 组孔隙型颗粒灰岩, 盖层为上白垩统到渐新统的泥灰岩和泥页岩; 上部储集层为古近系渐新统 Asmari 组白云岩及砂岩的混合沉积, 盖层为新近系中新统 Fars 组巨厚石膏沉积. 区内自上而下可识别出特征明显的6套地震反射层(T0~T5), 涵盖了从白垩系到第四系更新统发育的所有地层, 为研究 Fauqi 背斜白垩系以来的构造变形特征及规律提供了有利条件.

## 3 地震剖面构造几何解析

中国海洋石油总公司在伊拉克境内 Fauqi 背斜构造满覆盖采集的三维地震数据(图1b)具有良好的品质(测点密度66.7点/km<sup>2</sup>、采集面元25m×25m、采样间隔2ms、主频28~30Hz、优势频带宽度10~50 Hz), 地层反射特征明显, 易于纵横向追踪, 完全满足 Fauqi

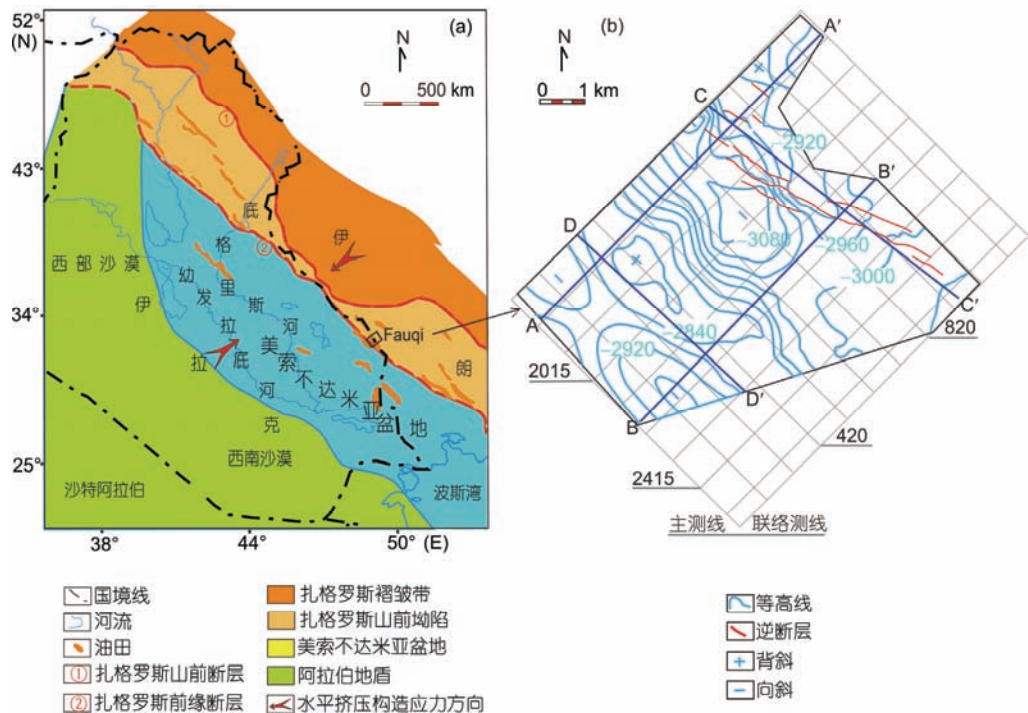


图1 Fauqi 背斜大地构造位置及基本形态

(a) 扎格罗斯山构造格局及大地构造应力背景; (b) Fauqi 背斜三维地震工区位置及 T3 地震反射层深度域构造形态

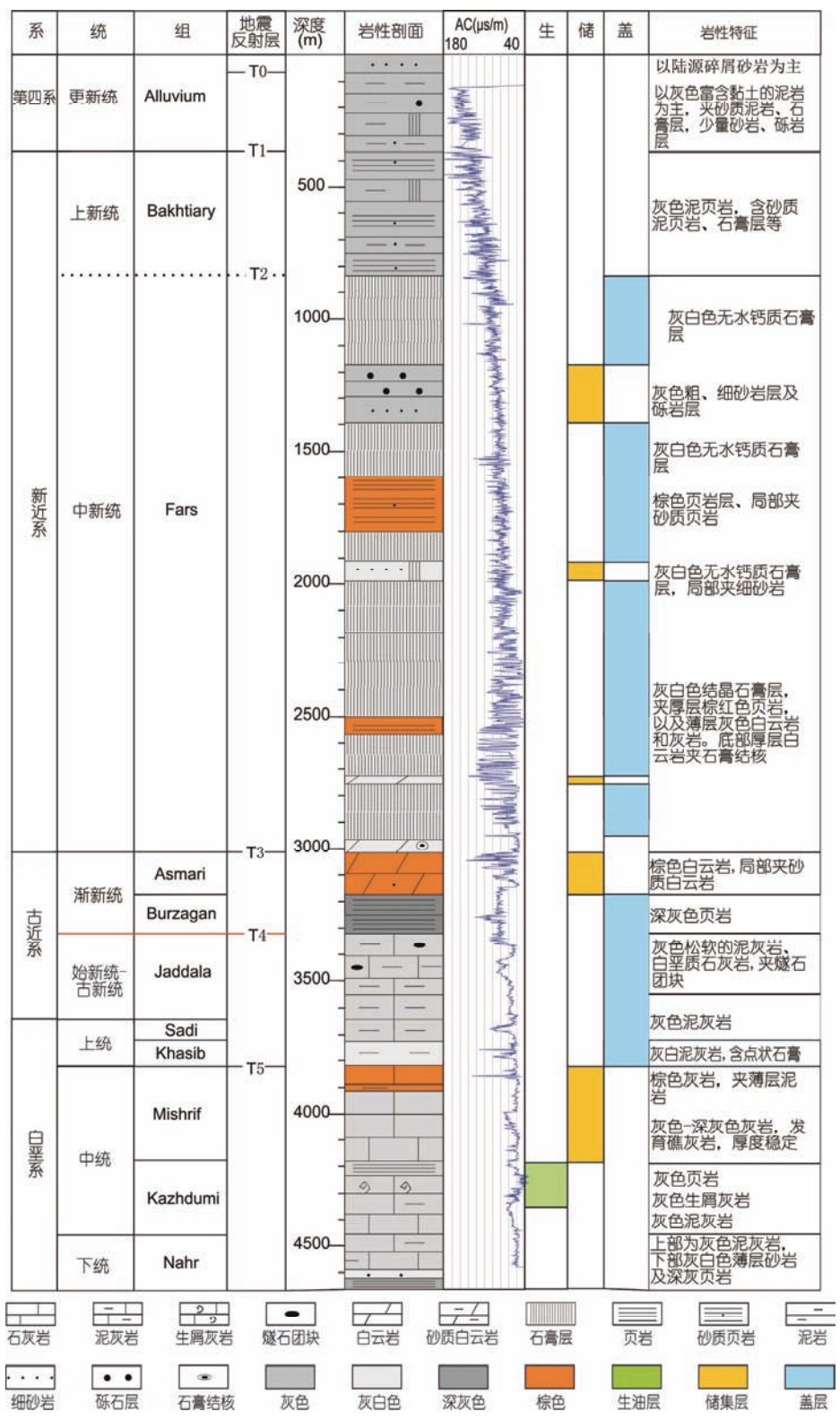


图 2 扎格罗斯山前 Fauqi 背斜的地层系统、地震反射层、岩性剖面、生储盖组合及岩性特征

T4 为滑脱面, T2 为不整合面

背斜地震剖面构造几何解析的需要.

地震剖面的构造几何解析一般包括层位追踪与断裂体系解释, 以及构造体系整合分析(陈伟等, 2009; 李本亮等, 2010; Ou等, 2015, 2016a; Ou, 2016). 首先依靠井-震结合标定及地震同相轴错段关系分析方法, 开展地震工区内六个地震反射层的追踪和断裂体系解释, 同时对生长褶皱内部地层进行了进一步细分. 然后在断裂相关褶皱理论(Suppe等, 1997; Shaw等, 2005; 何登发等, 2005; 李本亮等, 2010; 苏金宝等, 2011)的基础上, 采用地层倾角域分析和褶皱轴面分析方法(管树巍等, 2007; 李本亮等, 2010; 张波等, 2012; 贾东等, 2011; 李志刚等, 2013), 完成了褶皱与断裂体系整合分析, 识别出了滑脱面, 划分了构

造轴面, 剖析了生长地层, 编制了各反射层构造图.

滑脱面常常出现在软硬接触的地层中, 由滑脱面的滑脱作用常常诱发形成逆冲断裂、走滑断裂及其相关的断裂褶皱, 这些褶皱是自然界中常见的含油气构造之一(Poblet等, 1997; Shahram等, 2005; Wang等, 2010). Fauqi背斜内典型的滑脱面位于Jaddala组与上覆Burzagan组的分界面, 即地震反射层T4所在界面处. T4作为滑脱面的主要依据为: (1) T4之下的Jaddala组发育松软的泥灰岩和白垩质石灰岩, 而T4之上的Burzagan组由一套页岩组成(图2), 这是滑脱面存在的岩性证据; (2) T4之上的地层中发育各类断裂, 这些断裂基本都消失在T4面附近, 而T4之下仅发育破碎带, 没有大的断层出现(图3~5), 这是滑脱

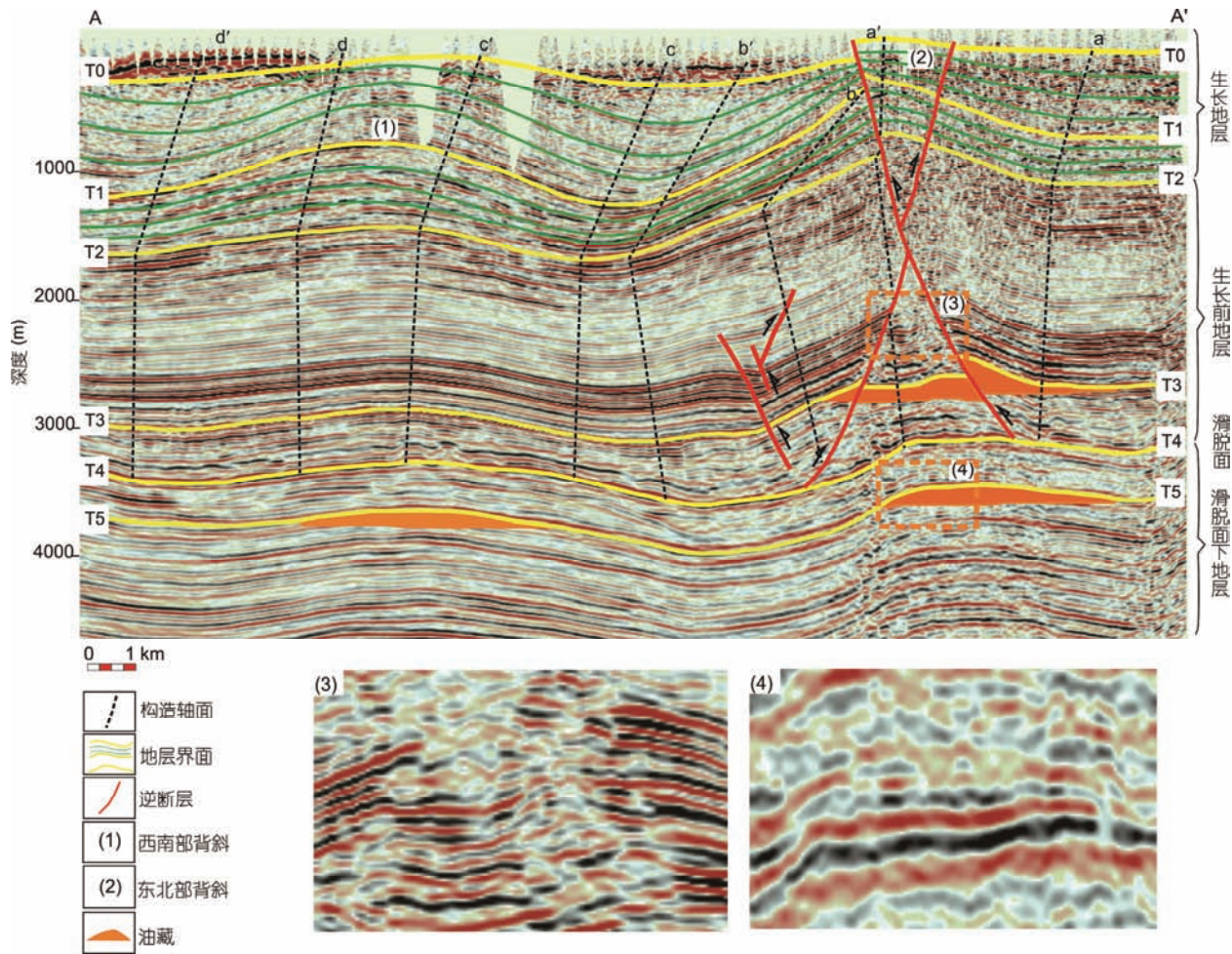


图3 Fauqi 西南部及东北部两组背斜短轴方向 A-A'地震剖面(位置见图 1b)构造几何解析及石油富集特征

a~d 代表滑脱面转折处的活动轴面, a'~d'代表由活动轴面随滑脱作用分离出来的固定轴面. 断层为红色线, 地震反射层为蓝(黄)色线, 生长地层内细分层为绿色线, 构造轴面为黑色虚线, 油藏为橙红色区域. (3)为 T4 滑脱面之上断裂带局部放大图, (4)为 T4 滑脱面之下破碎带局部放大图

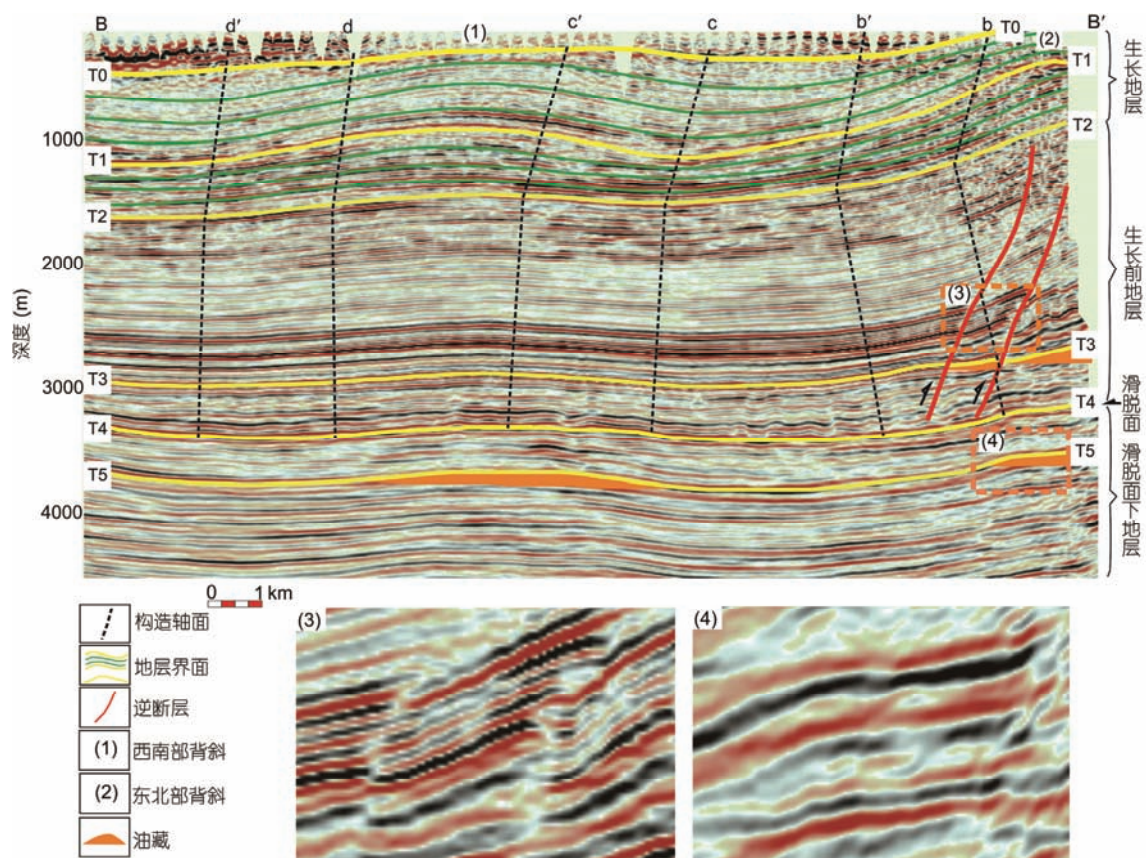


图4 Fauqi 西南部及东北部两组背斜短轴方向 B-B'地震剖面(位置见图 1b)构造几何解析及石油富集特征

a~d 和 a'~d'的含义、断层、地震反射层、生长地层内细分层、构造轴面和油藏的表示与图 3 相同。(3)为 T4 滑脱面之上断裂带局部放大图,(4)为 T4 滑脱面之下破碎带局部放大图

面存在的构造变形依据;(3)由图3~6可以明显观察到,T4之上附近的地震反射(Burzagan组页岩)存在明显的揉皱现象,这是滑脱面存在的地震反射依据。由此可见,由T4滑脱面诱发形成了Fauqi背斜现今的构造变形样式。

轴面是构造几何分析中最为常见的要素,反映了构造变形特征及位移量大小(管树巍等,2007;李本亮等,2010)。考虑到T4为Fauqi背斜成生的诱导滑脱面,以T4为基准识别并绘制区内构造轴面。图3和4分别展示了Fauqi背斜西北端和东南端北东-南西短轴方向的构造轴面特征;Fauqi背斜存在由北东向南西滑移的位移量;T4~T2间,背斜后翼转折处的活动轴面(a、c)和固定轴面(a'、c')基本直立,略向东北方向倾斜,背斜前翼转折处的活动轴面(b、d)和固定轴面(b'、d')则略向南西方向倾斜,形成下部略窄,上部略宽的宽缓双轴背斜;T2之上,构造轴面急剧偏向东北方

向,呈现出背斜核部地层与翼部地层厚度交替变化的生长地层特点。

生长地层是指同构造活动沉积地层,形成的生长褶皱不仅记录了褶皱变形的运动学过程,还可以用来判断构造形成时间(管树巍等,2007;陈伟等,2009;郭卫星等,2010;李本亮等,2010)。Fauqi背斜自T2以上的地层均为典型的生长地层,形成了T2~T1和T1~T0两套特征不同的生长褶皱。

在上述地震剖面构造几何解析的基础上,利用解释的地层及断裂数据编制了各反射层构造图,表征了区内构造体系特征及其变形总体样式(图1b)

#### 4 Fauqi 背斜构造变形样式分析

为了论述方便,选取四条闭合的地震剖面,分别展示了Fauqi背斜西北区域(图3)、东南区域(图4)、东

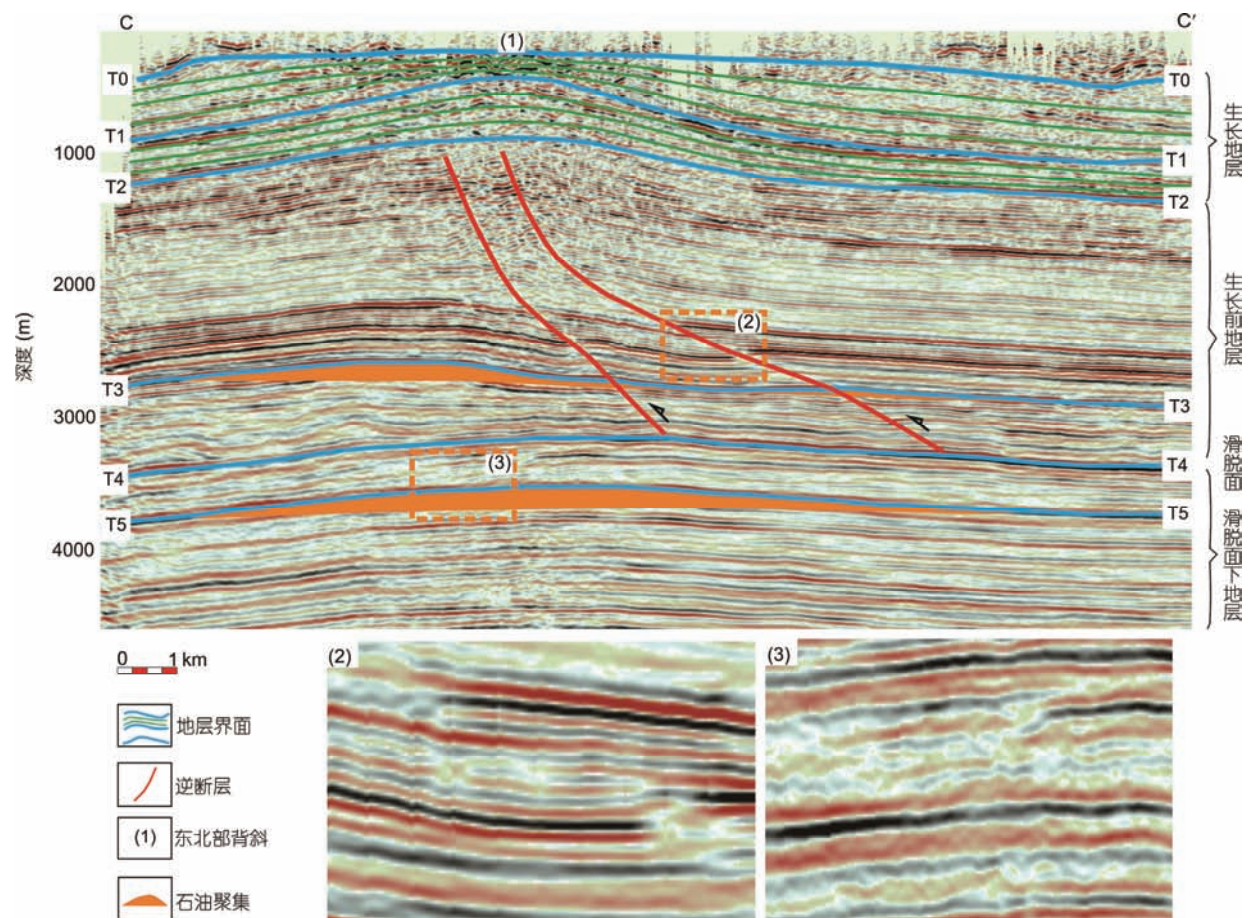


图5 Fauqi 东北部背斜长轴方向 C-C'地震剖面(位置见图 1b)构造几何解析及石油富集特征

断层、地震反射层、生长地层内细分层和油藏的表示与图 3 相同. (2) T4 滑脱面之上断裂带局部放大图. (3) T4 滑脱面之下破碎带局部放大图

北区域(图5)和西南区域(图6)的剖面构造变形样式. 由于T3地震反射层切过了区内的各类断裂(图3~5), 因而选取绘制的T3构造图(图1b)来反映Fauqi背斜的平面构造变形特征.

4.1 平面构造变形格局差异性特征分析

图1b显示Fauqi背斜由北西-南东向、呈雁形排列、特征差异较大的西南部和东北部两组背斜构造构成. 西南部背斜构造全部位于伊拉克境内, 东北部背斜仅其西北部分位于伊拉克境内(图1b、3和4). 西南部背斜地震剖面(图3、4和6)显示的反射层形态从上到下均相对简单、特征一致、连续性较好, 未见破碎; 表明Fauqi西南部背斜受扎格罗斯造山运动的影响相对较弱. 东北部背斜地震剖面(图3~5)显示的反射层形态复杂、连续性差、破碎严重; 表明Fauqi东北部背

斜受扎格罗斯造山运动的影响相对强烈.

由扎格罗斯山强烈隆升形成的南西向水平挤压构造应力优先作用于Fauqi东北部背斜构造, 使其发生强烈变形, 当南西向水平挤压应力施加到西南部背斜构造时, 应力强度已经有所削弱, 产生的构造变形也渐趋缓和, 由此产生了Fauqi西南部背斜和东北部背斜构造变形格局的差异性.

4.2 剖面构造变形样式层次性特征分析

图3~6显示了Fauqi背斜构造具有的构造活动时间的长期性及构造变样样式的层次性特点. 自晚白垩世到第四纪更新世, 无论是Fauqi西南部背斜还是其东北部背斜(图3和4), 从下到上的褶皱均具有较好的继承性, 显示构造活动的长期持续性特点. 地震反射层T4以下未见断层只见破碎带, T4以上发育各类

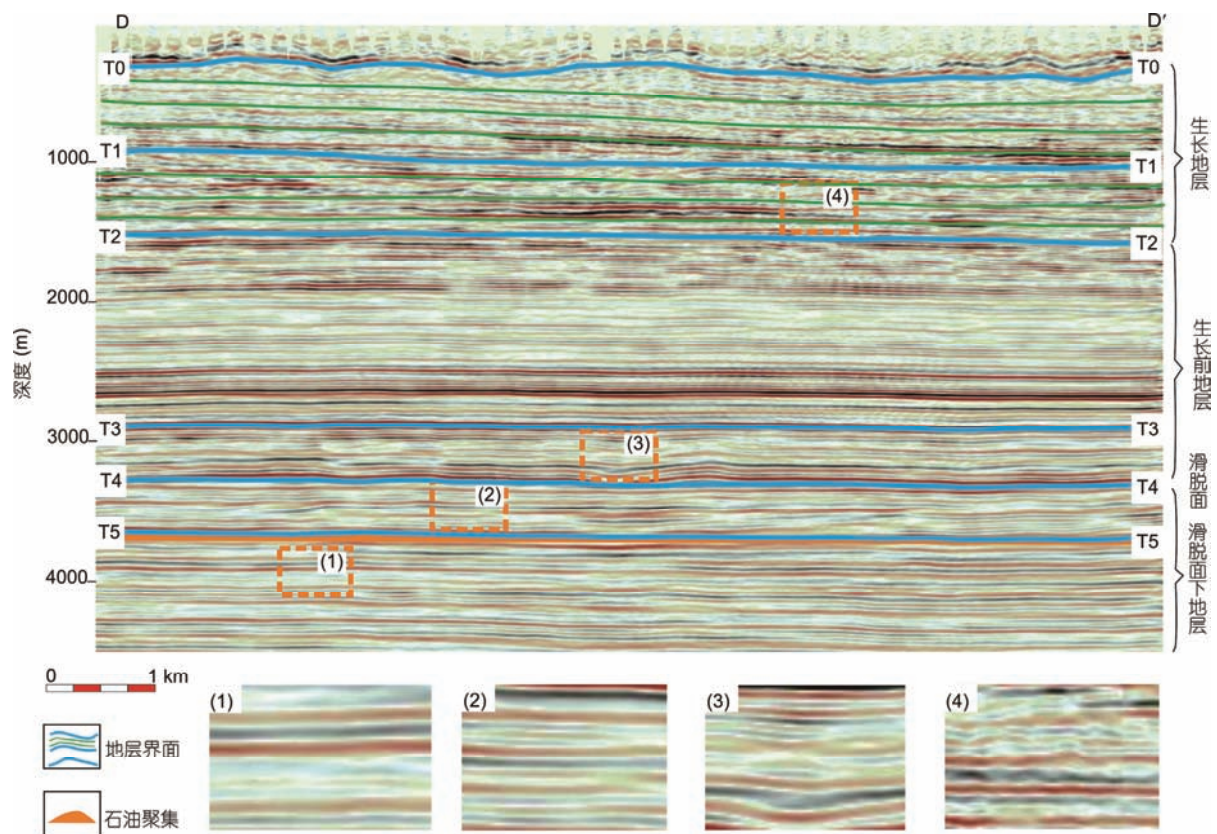


图6 Fauqi 西南部背斜长轴方向 D-D'地震剖面(位置见图 1b)构造几何解析及石油富集特征

地震反射层和生长地层内细分层的表示与图 3 相同。(1)为 T5 以下地层地震特征放大图, (2)为 T4~T5 间地层地震特征放大图, (3)为 T3~T4 间地层地震特征放大图, (4)为 T1~T2 间地层地震特征放大图

断层;地震反射层T2 以下构造轴面基本统一,地层厚度变化不大,而T2以上不仅构造轴面发生偏移,还呈现出背斜核部与两翼地层厚度显著差异的现象。由此可见,Fauqi背斜剖面构造变形样式结构自下而上可以划分为地震反射层T4以下、T4~T2间和T2以上三个不同的层次。下面分别论述Fauqi西南部背斜和东北部背斜剖面构造变形样式的层次性特征。

#### 4.2.1 Fauqi 西南部背斜

(1) 地震反射层T4以下。从背斜短轴方向(图3和4)看,T4以下构造呈现平缓对称的开阔背斜形态特征,背斜幅度极低;从背斜长轴方向(图6)看,岩层面近于水平。无论是短轴方向还是长轴方向,上下岩层面均近于平行,地层厚度分布稳定,连续性极好。反映受到的来自扎格罗斯山南西向水平挤压构造应力较为轻微。

(2) 地震反射层T4~T2间。从背斜短轴方向(图3和4)看,T4~T2间的构造仍然呈现平缓对称的开阔背斜形态特征,背斜幅度较T4以下略有增大;背斜后翼的活动轴面(c)和固定轴面(c')略向东北方向倾斜,背斜前翼的活动轴面(d)和固定轴面(d')略向南西方向倾斜,背斜宽度具有由下向上略有增大的趋势;从背斜长轴方向(图6)看,岩层面仍然近于水平。无论是短轴方向还是长轴方向,上下岩层面仍然近于平行,地层厚度分布稳定,连续性极好。T4界面以上附近的地震反射出现明显揉皱现象,可能为T4界面之上的Burzagan组页岩受水平构造应力作用而沿T4滑脱面的弹塑性流动所致。上述特征反映区内受到的来自扎格罗斯山南西向水平挤压构造应力作用较T4以下略有增强。

(3) 地震反射层T2之上。从背斜短轴方向(图3和4)看,T2之上的构造呈现出非对称开阔背斜形态特

征, 背斜幅度较T4~T2间显著增大; 背斜前后翼的活动轴面(c)和固定轴面(c')均大幅向北东方向倾斜; 地震反射连续性仍然较好, 但上下岩层面不再平行; T1~T2间的地层厚度在背斜两翼减薄、背斜核部增厚, 前翼地层在翼部出现超覆; T0~T1间的地层厚度则在背斜两翼增厚、背斜核部减薄, 前翼地层在翼部接近核部开始超覆. 从背斜长轴方向(图6)看, 岩层面不再水平和相互平行, 但厚度变化较短轴方向小. 反映扎格罗斯山南西向水平挤压构造应力作用生成了生长褶皱.

上述剖面构造变形样式表明: Fauqi西南部背斜雏形在Bakhtiary组沉积前已经形成, 现今的构造面貌是在Bakhtiary组沉积的同时, 随着扎格罗斯山南西向水平挤压构造应力作用改造而形成的; 由于Jaddala组顶部滑脱面(T4)对构造应力的吸收, 导致其下部褶皱变形程度弱于其上部褶皱构造, 由此形成了Fauqi西南部背斜剖面变形样式的层次结构特征.

#### 4.2.2 Fauqi 东北部背斜

(1) 地震反射层T4以下. Fauqi东北部背斜构造在地震反射层T4以下存在明显的破碎带特征. 在背斜西北方向的A-A'地震剖面上(图3), 破碎带几乎覆盖了整个背斜构造, 当地震剖面往东南方向移动时(见图4中B-B'), 破碎带的范围逐渐缩小以致消失. 而当破碎带范围较大时, 地震同相轴扭曲变形较为剧烈(图3); 随着破碎带范围变小, 地震同相轴扭曲变形逐渐微弱(图4). 破碎带是指由无定向的裂口和裂隙破坏的岩石带, 在自然界中经常遇见; 破碎带内部发育大量呈网状脉络相互连通的不规则裂缝, 但并没有贯穿始终的断层; 破碎带通常在较大的构造应力作用下, 当软弱岩体与刚性岩体交替出现时形成(Sung等, 2008; Daniel等, 2004; 金强等, 2012; Peter等, 2012). 对比图3~5发现, 上述破碎带发育区域刚好对应于T4滑脱面之上的断层发育区, 表明引起破碎带破裂的应力源与T4滑脱面之上断层的应力源基本一致, 均来源于东北方向扎格罗斯造山运动作用引起的南西方向的水平挤压应力. 由于T4滑脱面的缓冲作用, 使得该水平挤压应力施加于T4滑脱面之下的地层时能量大量衰减, 仅造成了地层破裂而未形成地层错断.

(2) 地震反射层T4~T2间. 受扎格罗斯造山运动

形成的水平挤压应力在T4滑脱面之上受到滑脱叠加聚集而加大, 造成Fauqi东北部背斜在地震反射层T4~T2之间的地层剧烈变形错段, 形成多种类型的断裂; 背斜的西北区域发育大型X型共轭断裂和部分小型褶皱调节断层(图3); 由于地震测线覆盖范围限制, 背斜的东南区域整体形态并未呈现在剖面中, 但因挤压应力向西南传递受到阻挡而引起的岩层褶皱变形依然很明显, 导致与西北区域情况类似地出现了小型叠瓦状的逆冲断裂组合(图4和5). Fauqi东北部背斜在地震反射层T4~T2之间的褶皱整体西南低东北高; 背斜核部反射层形态复杂、连续性差, 翼部反射层形态相对简单、连续性较好; 背斜东北翼反射层倾角较小, 西南翼反射层倾角大; 背斜后翼的活动轴面(a)和固定轴面(a')略向北东方向倾斜, 背斜前翼的活动轴面(b)和固定轴面(b')向南西方向大幅倾斜, 背斜宽度由下向上逐渐增大.

(3) 地震反射层T2之上. 尽管受到断层复杂化的严重影响, 但无论从背斜短轴方向还是长轴方向, Fauqi东北部背斜在地震反射层T2之上仍然显示出与Fauqi西南部背斜类似的生长褶皱特征: ① 背斜前后翼的构造轴面(a、b、a'和b')均大幅向北东方向倾斜, 只是因为生长地层沉积速率与构造变形速度的快慢差异, 以及受断层影响程度大小不同, 倾斜的幅度出现了较大差异(图3和4); ② 背斜幅度较T4~T2间显著增大, T1~T2间的地层厚度在背斜两翼减薄、背斜核部增厚, 前翼地层在翼部出现超覆, T0~T1间的地层厚度则在背斜两翼增厚、背斜核部减薄, 前翼地层在翼部接近核部开始超覆(图3~5).

通过Fauqi西南部和东北部背斜剖面构造变形样式分析发现: 正是由于来自东北方向扎格罗斯造山运动形成的南西向水平挤压应力, 以及T4滑脱面、T2之上生长地层间的耦合作用, 才形成了Fauqi背斜剖面构造变形样式的层次性结构特点, 即在T4滑脱面之下发育破碎带, 其上发育多种类型的断层, T2之上出现明显的生长褶皱.

## 5 Fauqi 背斜深部滑脱耦合浅部生长褶皱及断裂的运动学模拟

基于断层滑脱褶皱模型(Poblet等, 1997; Suppe等, 1997; 李本亮等, 2010), 采用正演平衡地质剖面

技术(陈伟等, 2009; Li等, 2013; 张岳桥等, 2006; Jia等, 2009; Ou等, 2015, 2016a), 选取区内最具代表性的A-A'地震剖面为蓝本, 开展Fauqi背斜深部滑脱耦合浅部生长褶皱及断裂的运动学模拟, 展示Fauqi背斜差异性平面构造变形格局和层次性剖面构造变形样式的运动学成生过程, 验证上述构造样式解释的合理性。

依据对Fauqi背斜变形样式的认识, 模拟操作按照构造活动的时间序列分生长褶皱前、两期生长褶皱和地层断裂四个阶段进行(图7), 以实现深部滑脱耦合浅部生长褶皱及断裂活动叠加作用的定量表征。考虑到模拟对象的构造尺度较大(背斜平面延伸范围9~15km, 垂向变形范围达到2~3km), 模拟过程以大套地层平均岩性的岩石力学参数和扎格罗斯盆地大地构造应力背景作为初始参数和边界条件。与此同时, 模拟过程中着重考虑了断面或滑脱面形态与上覆地层变形之间的几何对应关系的一致性, 其中有关褶皱轴面和等倾角域的划分, 滑脱面形态和构造缩短量等参数是通过人工不断修改与调整完善, 伴随着计算机大量反复数据运算而渐趋合理的。最后得到了一套相对最接近实际情况的模拟参数: 最大主应力方位为北东-南西, 断面走向300°~315°, 断面倾向210°~225°, 断面倾角60°~75°, 沉积速率24.6m/Myr, 抬升速率21.5m/Myr, 构造缩短量约3.5km。

(1) 第一阶段(图7a)。受扎格罗斯山隆升引发的挤压构造应力作用, Fauqi背斜所在区域自白垩系到新近系中新统Fars组的海相地层整体发生褶曲, 形成东北部和西南部两组宽缓近对称的背斜褶皱, 由于挤压应力在远离扎格罗斯山的方向有所减弱, 致使东北部褶皱较西南部褶皱变形强度略大, 形成的褶皱幅度稍大而宽度稍小。T4滑脱面处于激活前状态, 自T4滑脱面以上的褶皱固定轴面(a'、b'、c'、d')与活动轴面(a、b、c、d)重合在一起, 背斜前翼的轴面略向南西方向倾斜, 后翼的轴面略向北东方向倾斜, 前后翼轴面间的背斜宽度自下而上略有增大。Fars组及其以下地层相互平行, Fars组顶部因褶曲形成角度不整合面, 其上沉积的上新统Bakhtiary组地层兼具填平补齐作用, 导致Fars组地层与Bakhtiary组角度相交, Fars组顶部低洼区域沉积的Bakhtiary组地层厚, 而隆起区域沉积的Bakhtiary组地层薄。

(2) 第二阶段(图7b)。随着扎格罗斯山隆升运动

的逐渐加强, Fauqi背斜受到来自北东方向的水平挤压应力越来越大, T4滑脱面逐渐被激活, 其上覆地层开始沿T4滑脱面自北东向南西方向滑移, 褶皱的固定轴面逐渐与活动轴面分离并向南西方向运动。Bakhtiary组地层沉积厚度逐渐加大, 先期沉积地层随着下伏地层向南西方向滑移的同时产生与下伏地层一致的形变, 后期沉积地层在滑移的同时兼顾填平补齐, 造成Bakhtiary组褶皱轴面逐渐向东北方向偏移, 从而形成了Bakhtiary组生长褶皱。在Bakhtiary组生长褶皱轴面偏移的同时, 先期沉积在向斜低洼区域的厚地层逐渐被移向背斜高处, 而先期沉积在背斜高处的薄地层则顺序被移向向斜低洼区域, 造成背斜高处地层加厚, 向斜低洼区域地层减薄的现象; 受距离扎格罗斯山远近不同, 构造应力强弱差异的影响, 东北部生长褶皱变形的强度较西南部稍大。在扎格罗斯山隆升运动、T4滑脱面滑移作用及Bakhtiary组沉积作用叠加影响下, Fauqi背斜T4以下, T4~T2间, 以及T2之上构造变形样式的层次性差异逐渐产生, Fauqi东北部与西南部褶皱变形强度差异的格局开始出现。

(3) 第三阶段(图7c)。随着扎格罗斯山隆升运动的持续增强, T4滑脱面滑移作用持续进行, 继续接受第四系更新统Alluvium组地层沉积, 并在Bakhtiary组地层基础上形成新的生长地层, 受水平滑移量与背斜翼部宽度间关系的影响, Alluvium组生长褶皱出现背斜核部地层减薄、翼部增厚现象, 与Bakhtiary组生长褶皱地层厚度的变化特征刚好相反。通过本阶段的构造变形, Fauqi背斜构造变形样式的剖面层次性结构及平面差异性格局逐渐形成。

(4) 第四阶段(图7d)。第四纪更新世晚期, 随着扎格罗斯造山运动后期的强化, 挤压应力沿T4滑脱面向西南持续传递, 到美索不达米亚盆地边缘后因受到阻挡而开始聚集, 造成应变能量不断累积。在Fauqi东北部背斜核部聚集的应变能量逐渐超出了地层的应变极限而使地层破裂, 形成了大型X型共轭断裂及小型的褶皱调节断层, 依靠滑脱面的缓冲吸收, T4滑脱面之下的应变能量有所较弱, 造成地层大量破碎但未产生错段位移。Fauqi西南部背斜接受的挤压应力因传递距离较远, 加上东北部背斜地层断裂的消耗, 聚集的应变能量大大降低, 只够引发岩层褶皱变形而未能激发岩层断裂, 使西南部背斜仍然保

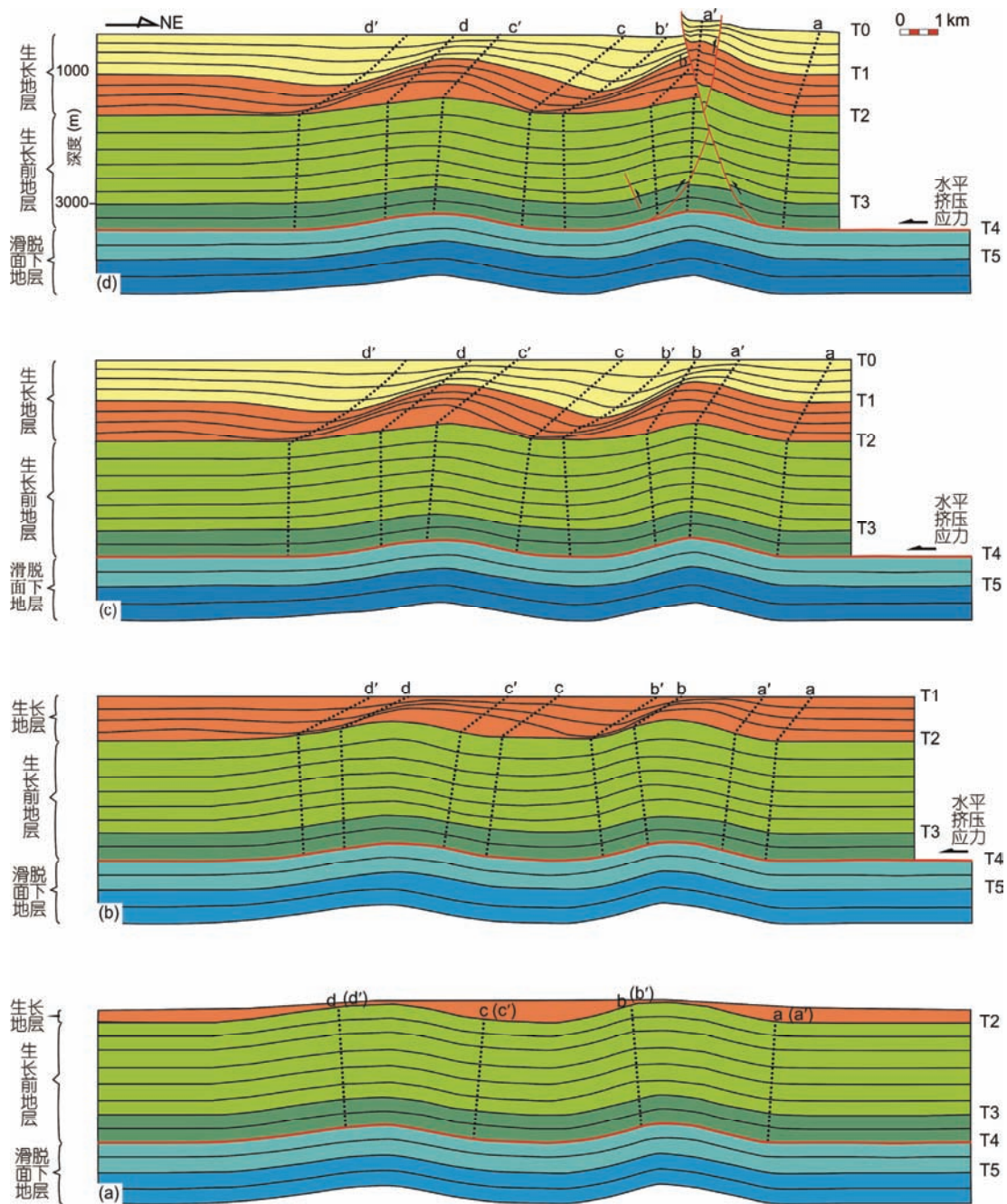


图 7 Fauqi 背斜深部滑脱耦合浅部生长褶皱及断裂的运动学模拟

以图 3 中 A-A' 剖面为例, d 为模拟的最终结果, 其几何形态基本保持与图 3 一致. (a) 新近系中新统 Fars 组顶部不整合面形成, 同时接受上新统 Bakhtiary 组地层沉积; (b) 古近系 Jaddala 组顶面的滑脱作用与新近系 Bakhtiary 组生长褶皱的形成; (c) 古近系 Jaddala 组顶面持续滑脱及从新近系到第四系生长褶皱规模的扩大; (d) 第四系山前断裂的发育及其对生长褶皱的复杂化(现今剖面)

留了未发生断裂的褶皱特征(包括T2以下的正常褶皱和T2以上的生长褶皱). 由此形成了Fauqi背斜现今的构造面貌. 对比模拟结果(图7d)和解释成果(图3), 两

者无论在变形样式方面, 还是在变形强度方面均高度吻合, 证实了前述Fauqi背斜构造变形样式分析成果的合理性.

而Fauqi背斜的构造变形样式也可以从薄皮构造理论(Bouzari等, 2013; Fillon等, 2014)得到解释: Fauqi东北部背斜构造T4滑脱面之上的地层因强烈挤压变形而断裂, 之下的地层接受的挤压应力通过滑脱层的吸收而大幅减弱, 因而未被上部构造卷入而呈现出较小的变形特征, 仅发生局部破碎; T2之上的地层则受与下部滑脱同构造沉积作用, 以及与区域构造应力作用叠加的影响而呈现出典型的生长褶皱特征.

## 6 Fauqi 背斜石油差异性富集机制探讨

实际钻探揭示, Mishrif组在Fauqi东北部与西南部两组背斜中均发现了工业性油藏, 各油藏内的油水界面保持一致, 而Asmari组仅在Fauqi东北部背斜构造中发现了工业性油藏, 油水界面存在较大差异(图3~6). 上述差异性石油富集特征的成因机制成为Fauqi背斜石油勘探开发亟待解决的难题.

### 6.1 Mishrif 组油藏的成因机制

前人研究成果(Pitman等, 2004; Beydoun等, 1992)业已证实, 扎格罗斯山前中生界和新生界丰富的石油资源主要来自于上白垩统Kazhdumi组生油层(图2). 而上述构造变形几何学及运动学研究成果表明, 新近纪中新世中晚期之前, T4滑脱层之下的Fauqi西南部和东北部两组背斜构造, 及其生(Kazhdumi组)、储(Mishrif组)、盖(Khasib组、Sadi组、Jaddala组和Burzagan组)空间配置关系已经形成, 中新世晚期, Kazhdumi组生油层(埋深达到3000m以上)已经进入主生烃期, 生成的大量石油直接运移到上覆Mishrif组孔隙型颗粒灰岩中, 因同时受到上覆盖层的阻止而聚集成藏. 这一时期, 受T4滑脱层的缓冲吸收, 来自扎格罗斯造山运动形成的水平挤压应力在T4之下的强度有所减弱, Fauqi东北部和西南部两组背斜的褶皱形态保持完整, 地层相互平行, 连续性良好, 保障了石油聚集的持续进行. 长期稳定的石油聚集和重力分异作用, 以及上覆上白垩统到渐新统的泥灰岩和泥页岩具有的良好封盖条件, 促使Mishrif组油藏形成稳定、统一的水油界面.

### 6.2 Asmari 组油藏的成因机制

新近纪中新世晚期, T4滑脱层之上的Fauqi西南

部和东北部两组背斜构造, 及其储(Asmari组)、盖(Fars组)组合也已经形成, 经过新近纪上新世沿T4滑脱层的滑移改造后保留了完整的背斜形态, 但由于白垩统至渐新统泥灰岩和泥页岩的封隔, Mishrif组地层中的石油不能继续向上运移, Asmari组并没有形成石油聚集. 第四纪更新世晚期, Fauqi东北部背斜在T4滑脱层之上发育断裂、之下诱发破碎带, 从而打开了石油从上白垩统到渐新统地层之间发生垂向运移的输导通道, Asmari组白云岩及砂岩开始接受石油聚集. 尽管大型X型共轭断裂断过了渐新统到第四系地层, 但中新统Fars组巨厚的塑性石膏沉积及巨大的挤压构造应力保证了地层错段过程中断层仍具有良好的封堵性能(Ou, 2016), 保护了Asmari组中的石油不再逸散, 从而在Asmari组形成油藏. 但由于受到重力分异与断层分隔的双重叠加作用, 油藏内的油水界面出现较大差异. 而Kazhdumi组生油层强大的生烃能力则保障了Fauqi东北部背斜Mishrif组油藏及Asmari组油藏的石油供给. 由于Fauqi西南部背斜自上白垩统到渐新统的地层连续性良好、封隔石油的能力强, 致使Fauqi西南部背斜的Asmari组圈闭因没有油源供给而成为空圈闭.

综上所述, Fauqi背斜的差异性平面构造变形格局和层次性剖面构造变形样式, 以及生、储、盖时空配置关系(Ou等, 2016b), 是形成区内石油富集差异性特征的根本原因.

## 7 结论

(1) 由于距离扎格罗斯山远近不同, 由扎格罗斯山隆升形成的南西向水平挤压构造应力对距离近的Fauqi东北部背斜构造变形影响大, 对距离远的Fauqi西南部背斜构造变形影响小, 从而产生了Fauqi西南部背斜与东北部背斜构造变形格局的差异性. Fauqi西南部背斜变形弱, 地层连续性好, 背斜形态完整, 呈现挤压宽缓双轴褶皱特征; Fauqi东北部背斜变形强, 地层错段严重, 背斜形态被X型共轭断裂及小型褶皱调节断层复杂化.

(2) 受扎格罗斯造山运动形成的南西向水平挤压应力、Jaddala组顶部滑脱面(T4)的滑脱作用、Fars组顶面(T2)之上同构造沉积作用, 以及第四纪更新世晚期强烈构造运动形成的断裂作用等的耦合叠加,

形成了Fauqi背斜在地震反射层T4以下发育宽缓双轴褶皱和局部破碎带、T4~T2间发育X型共轭断裂及小型褶皱调节断层, T2以上发育生长褶皱的三种不同层次结构的剖面构造变形样式。

(3) Fauqi背斜的变形样式是由其四个不同阶段的运动学成生过程决定的: 白垩系到新近系中新统Fars组地层整体褶曲发生的同时, 上新统Bakhtiary组地层开始沉积, Fars组顶部形成角度不整合面; 之后, Jaddala组顶部滑脱面(T4)被激活, 带动上部地层, 尤其是同构造沉积的上新统Bakhtiary组地层产生南西向水平滑移, 形成Bakhtiary组生长褶皱; 随着Jaddala组顶部滑脱面(T4)滑脱作用与第四系更新统Alluvium组地层沉积作用的持续进行, 形成了新的Alluvium组生长褶皱; 而第四纪更新世晚期扎格罗斯造山运动的强化, Fauqi东北部背斜在T4以上发生断裂作用, T4以下发生破碎作用, 造成T4以上地层错断促使褶皱构造复杂化, T4以下地层破碎形成复杂高角度裂缝网络。模拟结果表明, 通过深部滑脱耦合浅部生长褶皱及断裂运动, Fauqi背斜褶皱沿T4滑脱面向南西方向滑移的距离达到了3.5km左右。

(4) 受层次性剖面构造变形样式及生、储、盖时空配置关系的控制, Fauqi西南部和东北部两组背斜构造在T4滑脱面之下的Mishrif组均分布着油水界面一致的工业性油藏。而在差异性平面构造变形格局及储、盖组合的影响下, 仅Fauqi东北部一组背斜构造在T4滑脱面之上的Asmari组分布有油水界面不一致的工业性油藏。事实证明, 正是差异性构造变形造成了Fauqi背斜中石油的差异性富集。

**致谢** 本文所用基础资料主要来源于中国海洋石油总公司研究总院, 研究工作分别得到了中国海洋石油总公司研究总院邓运华院士、高云峰、罗银富、杨玉贵、张宇琨以及中国海洋石油总公司伊拉克有限公司王星、周守信的帮助, 评审人提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示诚挚的谢意。

## 参考文献

陈伟, 杨克明, 李书兵, 简高明, 唐进, 赵尧, 苏强. 2009. 龙门山南段山前印支晚期隐伏生长褶皱的构造几何模拟与分析. 科学通报, 54: 382-386

管树巍, 李本亮, 何登发, 汪新. 2007. 复杂构造解析中的几何学方

法与应用. 地质科学, 42: 722-739

郭卫星, 漆家福, 李明刚, 李艳友. 2010. 生长褶皱发育模式. 中国石油大学学报(自然科学版), 34: 1-6

韩耀祖, 陈伟, 欧成华, 周小军, 李世琴. 2014. 伊拉克米桑地区阿布古拉卜背斜的几何解析和运动学模拟. 新疆石油地质, 35: 124-129

何登发, Suppe J, 贾承造. 2005. 断层相关褶皱理论与应用研究新进展. 地学前缘, 12: 353-363

贾东, 李一泉, 王毛毛, 李海滨. 2011. 断层相关褶皱的三维构造几何学分析: 以川西三维地震工区为例. 岩石学报, 24: 732-740

贾小乐, 何登发, 童晓光. 2013. 扎格罗斯前陆盆地大油气田的形成条件与分布规律. 中国石油勘探, 18: 54-67

金强, 周进峰, 王端平, 杨勇. 2012. 断层破碎带识别及其在断块油田开发中的应用. 石油学报, 33: 82-89

李本亮, 管树巍, 陈竹新, 何登发, John H S, 雷永良, 石听, 张朝军. 2010. 断层相关褶皱理论与应用——以准噶尔盆地南缘地质构造为例. 北京: 石油工业出版社

李志刚, 陈伟, 贾东, 李世琴, 许强, 周小军, 金柯. 2013. 郯庐断裂带渤海湾北段早新生代逆冲推覆的生长褶皱证据. 地质学报, 87: 789-795

欧成华, 陈伟, 韩耀祖, 李朝纯. 2016. 扎格罗斯盆地Buzurgan背斜斜向逆冲断裂褶皱几何解析及运动学模拟. 地球科学, 41: 385-393

苏金宝, 朱文斌, 贾东, 杨彦峰, 王志强. 2011. 伸展断层相关褶皱的几何学分析及其在车镇凹陷中的应用. 地质学报, 80: 1563-1573

薛峰. 2006. 中东地区的构造发育史和构造格局. 中国科技信息, 17: 56

张波, 闫淑玉, 张仲培, 张进江, 郑亚东, 王晓先, 王盟, 王佳敏. 2012. 塔里木盆地巴楚褶皱带构造几何学及其构造物理模拟. 北京大学学报(自然科学版), 48: 92-104

张岳桥, 施炜, 廖昌珍, 胡博. 2006. 鄂尔多斯盆地周边断裂运动学分析与晚中生代构造应力体制转换. 地质学报, 80: 639-646

Alavi M. 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations. Tectonophysics, 229: 211-238

Berberian M M. 1995. Master "Blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: Active basement tectonics and surface morphotectonics. Tectonophysics, 241:193-224

Beydoun Z R, Hughes-Clarke M W, Stoneley R. 1992. Petroleum in the Zagros basin: A late Tertiary foreland basin overprinted onto the outer edge of a vast hydrocarbon-rich Paleozoic passive-margin shelf. In: Macqueen R W, Leckie D A, eds. Foreland Basins and Fold Belts. AAPG Memoir, 55: 309-339

Bouzari S, Konon A, Kopraniuk M, Julapour A A. 2013. Thin-skinned tectonics in the Central basin of the Iranian Plateau in the Semnan area, Central Iran. J Asian Earth Sci, 62: 269-281

Colman-Sadd S P. 1978. Fold development in Zagros simply folded belt, southwest Iran. AAPG Bull, 62: 984-1003

Daniel B, Luca G, Enrico B, Peter S. 2004. Dolomite formation in pelagic limestone and diatomite, romanche fracture zone, equatorial

- Atlantic. *J Sediment Res*, 74: 924–932
- Fillon C, Huisman R, Van der B P. 2014. Sedimentation controls on thin-skinned fold-and-thrust belts and application to the southern Pyrenees. EGU General Assembly Conference (Abstract), 16: 16777
- Jia Q P, Jia D, Luo L, Chen Z, Li Y, Deng F, Li H. 2009. Three dimensional evolutionary models of the Qiongsi structures, southwestern Sichuan basin, China: Evidence from seismic interpretation and geomorphology. *Acta Geol Sin*, 83: 372–385
- Li Z G, Jia D, Chen W. 2013. Structural geometry and deformation mechanism of the Longquan anticline in the Longmen Shan fold-and-thrust belt, eastern Tibet. *J Asian Earth Sci*, 64: 223–234
- Ou C H, Chen W, Ma Z G. 2015. Quantitative identification and analysis of sub-seismic extensional structure system: Technique schemes and processes. *J Geophys Eng*, 12: 502–514
- Ou C H, Chen W, Li C C. 2016a. Using structure restoration maps to comprehensively identify potential faults and fractures in compressional structures. *J Cent South Univ*, 23: 677–684
- Ou C H. 2016. Technique improves exploration, exploitation offshore Myanmar. *Oil Gas J*, 114: 56–61
- Ou C H, Wang X L, Li C C, He Y. 2016b. Three-dimensional modelling of a multi-layer sandstone reservoir: The Sebei gas field, China. *Acta Geol Sin*, 90: 801–840
- Peter H, Patricia A, Pijush P, Chris Z, Ray R J, Hugh A, Roland K, Bob L, Elliott H. 2012. Relationship between fractures, fault zones, stress, and reservoir productivity in the Suban gas field, Sumatra, Indonesia. *AAPG Bull*, 96: 753–772
- Pitman J K, Steinshouer D, Lewan M D. 2004. Petroleum generation and migration in the Mesopotamian Basin and Zagros Fold Belt in Iraq: Results from a basin modeling study. *Geol Arabia*, 9: 41–72
- Poblet J, McClay K, Storti F, Muñoz J A. 1997. Geometries of syntectonic sediments associated with single-layer detachment folds. *J Struct Geol*, 19: 369–381
- Shahram S, Matteo M, Dominique F L, Jean L. 2005. Detachment folding in the Central and Eastern Zagros fold-belt (Iran): Salt mobility, multiple detachments and late basement control. *J Struct Geol*, 27: 1680–1696
- Shaw J H, Connors C D, Suppe J. 2005. Seismic interpretation of contractional fault related folds: An AAPG seismic atlas. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists. 46
- Simmons M D, Sharland P R, Casey D M, Davies R B, Sutcliffe O E. 2007. Arabian Plate sequence stratigraphy: Potential implications for global chronostratigraphy. *Geol Arabia*, 12: 101–130
- Stoneley R. 1990. The Arabian continental margin in Iran during the late Cretaceous. *Geol Soc Lond*, 49(Suppl): 787–795
- Sung H C, Samuel B M, John W S. 2008. Initiation of Franciscan subduction along a large-offset fracture zone: Evidence from mantle peridotites, Stonyford, California. *Geology*, 36: 595–598
- Suppe J, Sàbat F, Munoz J A, Poblet J, Roca E, Vergés J. 1997. Bed-by-bed fold growth by kink-band migration: Sant llorenç de Morunys, eastern Pyrenees. *J Struct Geol*, 19: 443–461
- Wang Z, Zhang J, Li T, Xie G, Ma Z. 2010. Structural analysis of the multi-layer detachment folding in Eastern Sichuan Province. *Acta Geol Sin*, 84: 497–514
- Ziegler M A. 2001. Late Permian to Holocene paleofacies evolution of the Arabian Plate and its hydrocarbon occurrences. *Geol Arabia*, 6: 445–504