

doi:10.3799/dqkx.2016.030

扎格罗斯盆地 Buzurgan 背斜斜向逆冲断裂褶皱的几何解析及运动学模拟

欧成华¹, 陈伟¹, 韩耀祖², 李朝纯³

1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610500

2. 中国石油东方地球物理公司研究院库尔勒分院, 新疆库尔勒 841000

3. 西南石油大学国有资产管理处, 四川成都 610500

摘要: 扎格罗斯盆地因其丰富的油气资源和复杂的构造体系而深受国际石油界的重视, 其中是否存在斜向逆冲断裂褶皱对于进一步深化盆地构造特征的认识至关重要。基于断裂相关褶皱理论, 采用地层倾角域分析和褶皱轴面分析方法, 系统地开展了扎格罗斯盆地 Buzurgan 背斜地震剖面的构造几何解析, 获得了时间构造等 T_0 图、沿层时间域水平切片图和平行于断层走向的地震剖面图。在此基础上, 依据斜向逆冲断裂褶皱的构造几何识别特征, 解释出 Buzurgan 背斜的斜向逆冲断裂褶皱几何变形样式。最后通过计算机正演模拟, 再现了 Buzurgan 背斜斜向逆冲断裂褶皱构造样式的成生过程, 验证了斜向逆冲断裂褶皱解释的合理性和可靠性。

关键词: 扎格罗斯盆地; Buzurgan 背斜; 斜向逆冲断裂褶皱; 构造几何解析; 运动学模拟; 石油地质。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2016)03-0385-09

收稿日期: 2015-10-11

Geometric Analysis and Kinematic Simulation of Oblique-Thrust Fault-Related-Fold of Buzurgan Anticline in Zagros Basin

Ou Chenghua¹, Chen Wei¹, Han Yaozu², Li Chaochun³

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Korla Institute of BGP, CNPC Korla 841000, China

3. State-owned Asset Management Office, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

Abstract: Zagros basin is one of the most important basins in the international petroleum industry because of its rich oil and gas resources and the complex structure system, and it is crucial to the understanding of the structural characteristics of Zagros basin as to whether oblique-thrust fault-related-fold exist or not. Based on the fault-related-fold theories, and by using the dip angle domain analysis and fold axial plane analysis methods, geometric analysis of the structure of Buzurgan anticline in Zagros basin was carried out, and the time structure of T_0 diagrams, the time domain horizontal slices and the seismic profiles parallel to the strike of the fault of Buzurgan anticline were made. On this basis, relying on the geometric feature recognition of oblique-thrust fault-related-fold, the geometry deformation style of oblique-thrust fault-related-fold of Buzurgan anticline was systematically interpreted. And the forming processes of the Buzurgan oblique-thrust fault-related-fold in Zagros basin were reproduced by using the forward balanced cross section technique, the rationality and reliability of the above-mentioned interpretation about the Buzurgan oblique-thrust fault-related-fold was eventually validated.

Key words: Zagros basin; Buzurgan anticline; oblique-thrust fault; geometric analysis; kinematic simulation; petroleum geology.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2014CB239201); 国家科技重大专项子课题(No. 2011ZX05030-005-03)。

作者简介: 欧成华(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事石油与天然气地质及开发工程研究。E-mail: chomm@163.com

引用格式: 欧成华, 陈伟, 韩耀祖, 等, 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(3): 385-393.

扎格罗斯盆地横跨伊朗和伊拉克,向西北延伸至叙利亚和土耳其,是中东地区重要的油气富集区,吸引研究者在此进行了大量研究工作. Beydoun *et al.* (1992)划分了盆地的含油气系统; Alavi (1994, 2007)分析了盆地挤压构造背景,同时研究了冲断带的构造特征; Berberian (1995)从基底构造与地表地貌间的关系出发,揭示了隐伏构造特征; Hessami *et al.* (2001)研究了走滑断裂特征及其成生规律; Blanc *et al.* (2003)总结了构造样式; Sepehr and Cosgrove (2004)分析了构造格架特征; Pitman *et al.* (2004)揭示了盆地内油气的生成、运移规律; Sherkati and Letouzey (2004)进一步分析了构造演化特征,并指出了各种构造样式间的差异; Sherkati *et al.* (2005)研究了滑脱构造特征及其成因; Sarkarinejad and Azizi (2008)研究了盆地构造的力学机制; Allend *et al.* (2013)分析了土耳其—伊朗高原与扎格罗斯构造带的边界特征及其相互关系; 韩耀祖等 (2014)研究了盆地内局部构造的几何特征,等等. 总结前人研究成果不难发现扎格罗斯盆地具有油气资源丰富,构造分区明显,构造体系复杂等特点. 前人在此发现了逆冲断裂、走滑断裂、滑脱构造等,但缺乏对局部存在的斜向逆冲断裂及相关褶皱的发育特征与成生规律的深入研究.

自然界中的斜向逆冲作用普遍存在,由此形成的斜向逆冲断裂及相关褶皱因常常伴生各类矿藏而

广受研究者的重视(徐嘉伟,1995; Xu *et al.*, 2009; 张猛等,2013; 王长势等,2015). 笔者在前人相关研究成果的基础上,依靠构造几何学的断裂相关褶皱理论(Suppe *et al.*, 1997; Shaw *et al.*, 2005; 何登发等,2005; 管树巍等,2007; 贾东等,2011; 张波等,2012),系统地解析了扎格罗斯盆地 Buzurgan 背斜的构造几何特征,发现了存在斜向逆冲断裂褶皱的证据,通过计算机正演模拟,再现了斜向逆冲断裂褶皱构造样式的成生过程,从而验证了扎格罗斯盆地 Buzurgan 背斜斜向逆冲断裂褶皱解释的合理性及可靠性. 本文研究成果对于深化扎格罗斯盆地构造特征的认识不无裨益.

1 地质背景

扎格罗斯盆地走向以北西—南东向为主,由扎格罗斯山前拗陷带和美索不达米亚盆地两排构造单元组成,盆地东北为扎格罗斯褶皱带,西南为阿拉伯地盾(图 1a). 扎格罗斯盆地现今地质构造格局是在新生代喜马拉雅造山运动过程中,阿拉伯板块与欧亚板块发生碰撞,导致阿拉伯板块东北缘快速隆升后形成的(Ziegler, 2001).

Buzurgan 背斜构造在地面位于伊拉克东南部 Missan 省,毗邻伊朗边界,在地下处于扎格罗斯盆

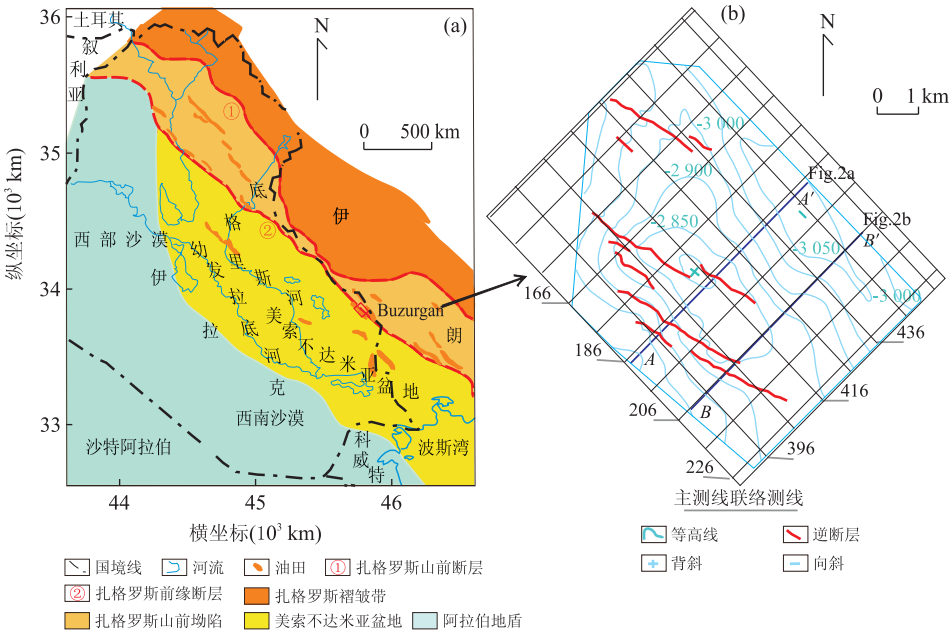


图 1 Buzurgan 背斜大地构造背景(a)及三维地震工区位置及构造形态特征(b)

Fig. 1 The geotectonic background (a), the 3D seismic work area location and structure features (b) of Buzurgan anticline in Zagros basin

地中部的东缘. 受扎格罗斯褶皱带和阿拉伯地盾夹持形成的北东—南西向水平挤压应力影响, Buzurgan 地区在地下形成了北西—南东向的长轴挤压背斜, 发育挤压构造体系(图 1b).

Buzurgan 背斜所在地区自下而上发育白垩系中统 Mishrif 组、古近系始新统的 Jaddala 组、渐新统的 Asmari 组、新近系中新统 LowFars 组和 UpperFars 组、上新统 Bakhtiary 组等地层(图 2). 其

中 Mishrif 组和 Asmari 组是该区最重要的两套含油气层, 岩性分别以灰岩和白云岩为主; Jaddala 组为 Mishrif 组油气藏的盖层, 以层状泥灰岩为主, 夹白垩化的生屑灰岩; LowFars 组与 UpperFars 组为 Asmari 组的油气盖层, 以巨厚的石膏、蒸发盐岩为特征.

2013 年, 研究人员在满覆盖 Buzurgan 背斜区域采集了 3D 地震, 采集面元 $25\text{ m}\times 25\text{ m}$ (图 1b),

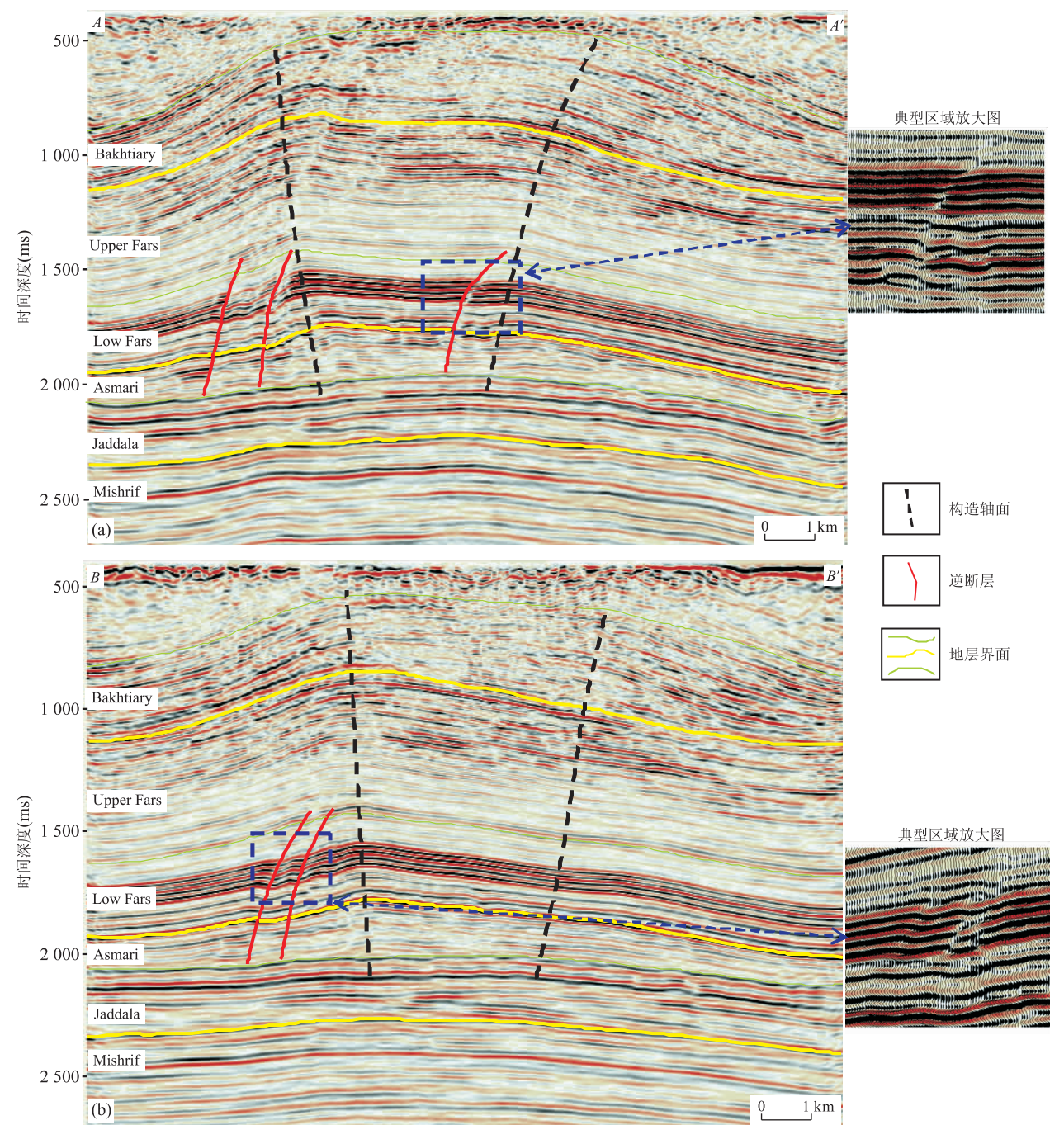


图 2 Buzurgan 背斜中部(a)及东南部(b)地震剖面构造几何解析特征

Fig. 2 Structure geometry features of the middle seismic profile A-A' (a), and the southeast seismic profile B-B' (b)

为开展区内构造体系研究奠定了坚实的资料基础。

2 Buzurgan 背斜的构造几何解析

断裂相关褶皱理论表明,断裂作用与褶皱作用之间存在着密切的相关关系(Suppe *et al.*, 1997; Shaw *et al.*, 2005;何登发等,2005),可以通过地层倾角和褶皱轴面变化来研究断裂与地层间的几何关系(管树巍等,2007;张波等,2012;贾东等,2011)。为此,笔者依据采集到的高信噪比地震剖面,利用其反射特征明显,分层界面与断裂特征容易识别的特点,基于断裂相关褶皱理论,采用地层倾角域分析和褶皱轴面分析方法,系统开展了 Buzurgan 背斜的构造几何解析,识别出如下特征(图 2a、图 2b):

(1)从横向上来看:Buzurgan 背斜构造区域活动较强,地层变形幅度大,远离背斜构造的西北和东南区域,因滑脱变形与传递距离加大的影响,构造活动渐次减弱,地层变形幅度相应变小;其中,背斜构造的南西翼构造变形幅度大,产生了小规模褶皱调节断层,近核部依然存在破碎现象,派生一定规模的次级褶皱调节断层,而背斜北东翼构造变形幅度相对较小,地层连续性相对较好,地层破碎现象不明显。

(2)从纵向上来看:Buzurgan 背斜的构造变形与扎格罗斯造山带的挤压作用及 Jaddala 组滑脱层密切相关,从西北往东南因滑脱层对构造挤压应力的传递效率不一致,导致了构造局部变形的较大差异性;以 Jaddala 滑脱层顶面为界,其上部地层变形特征复杂,其下部地层变形较弱;Jaddala 滑脱层之上的背斜主体构造为一顶部平缓的双高点开阔背斜,顶部背斜最宽,随着埋深增加,两个高点逐渐向背斜核部靠拢,发生向心式运动,整体构造轴面随深度的增加发生较大偏移,具有典型的斜向逆冲作用特征;Jaddala 滑脱层之下的地层变形幅度小,上下层的高点基本一致,地层连续性好。

(3)从活动时间来看:Jaddala 组滑脱层的活动时间较长,一直持续到了第四纪,引起 Bakhtiary 组地层在背斜核部加厚,向两翼减薄,背斜轴面逐渐向东偏移,形成了特征明显的生长褶皱。

将地震剖面上识别出的上述构造几何特征运用于构造解释,获得了 Buzurgan 背斜等 T_0 图(限于篇幅,仅附 Asmari 组顶面等 T_0 图,见图 3a),沿 Asmari 组的时间域水平切片图(图 3b)和平行于断层走向的地震剖面图(图 3c),为进一步开展区内构造变形样式分析奠定了基础。

3 斜向逆冲断裂褶皱变形样式

挤压构造体系在受挤压推覆运动过程中,常常派生各类断裂:一般将断层上盘逆冲方向与断层走向垂直或近于垂直的称为正向逆冲断裂,将断层上盘逆冲方向与断层走向斜交的称为斜向逆冲断裂。正向逆冲断裂的走滑分量基本为零,而斜向逆冲断裂存在程度不等的走滑分量,更易伴生复杂的剪切旋转构造而受到研究者的重视(徐嘉炜,1995;Xu *et al.*, 2009;张猛等,2013)。

严格来说,需要选用成因相关的一系列二维剖面进行几何学分析,并通过古地磁和构造变形等证据来揭示斜向逆冲断裂相关褶皱及其变形样式(Tindall and Davis, 1999;Tetreault *et al.*, 2008;Keating *et al.*, 2012)。但古地磁的精度较低,构造几何分析需要选取的二维地震剖面要求分别平行或者垂直于最大应力和应变方向(Cristallini *et al.*, 2004),在实际操作中很难保证所选地震剖面满足上述条件,从而导致对剖面认知的不全面甚至是误判。为此,张猛等(2013)通过系列断裂相关褶皱假三维模型的对比分析后提出了斜向逆冲断裂褶皱的 3 项识别特征:(1)等 T_0 构造图上显示褶皱最高点与后翼中点的连线方向均与断层走向斜交;(2)时间域水平切片图显示地层核心点与后翼中点的连线方向均与断层走向斜交,而与逆冲滑移方向一致;(3)平行于断层走向的地震剖面图上显示各个褶皱层面最大弯曲点连线发生倾斜,轴面倾斜的程度与滑移方向和断层走向的夹角相关,走滑分量越大,轴面倾斜幅度越大。

依照上述识别特征,利用 Asmari 组等 T_0 图(图 3a)、沿 Asmari 组的时间域水平切片图(图 3b)和平行于断层走向的地震剖面图(图 3c),系统分析并进一步确定了 Buzurgan 背斜的斜向逆冲断裂褶皱变形样式。

由图 3a 可以看出,Asmari 组等 T_0 图上的最高点与后翼中点的连线(图 3a 中绿色箭头线)方向与断层走向斜交。图 3b 显示的 Asmari 组 2 000 ms 时间水平切片图上地层核心点与后翼中点的连线(图 3b 中绿色箭头线)方向也与断层走向斜交,且图中最高点与后翼等高线中点的连线方向或者核心点与后翼中点的连线方向均与 Buzurgan 背斜东北—西南的逆冲滑移方向一致。图 3c 显示提取的平行于断层走向的地震剖面,发现从下到上各个层面最大弯曲点的连线(即褶皱轴面)向西北方向倾斜。上述特

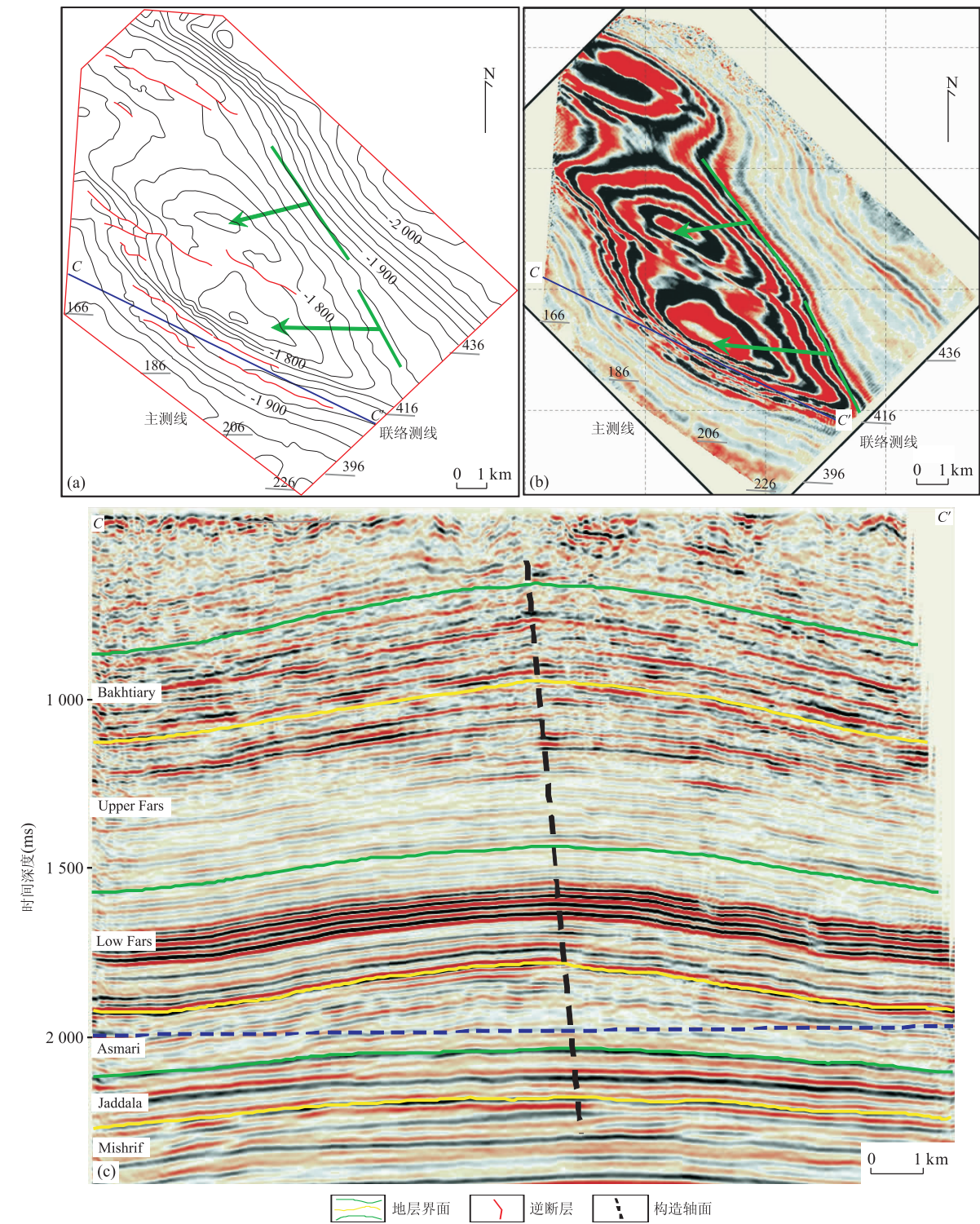


图 3 Buzurgan 背斜 Asmari 组顶面等 T_0 图(a)、沿 Asmari 组 2 000 ms 时间域水平切片(b)和平行于断层走向的地震剖面(c)
Fig. 3 The time structure of T_0 diagrams (a), the time domain horizontal slices (b) and the seismic profiles (c) parallel to the strike of the fault of Buzurgan anticline

征表明:Buzurgan 背斜发生了典型的斜向逆冲作用,形成的褶皱调节断层也具有典型的斜向逆冲断裂褶皱特征.

4 斜向逆冲断裂褶皱几何变形的运动学模拟

以 Buzurgan 背斜中部地震剖面 A-A' 测线(图

表 1 Buzurgan 背斜斜向逆冲断裂褶皱几何变形计算机数字化正演模拟关键参数

断面走向(°)	断面倾向(°)	断面倾角(°)	沉积速率(m/Ma)	抬升速率(m/Ma)	构造缩短量(km)	最大主应力方位
300~315	210~225	70~85	24.6	21.5	~6	北东—南西

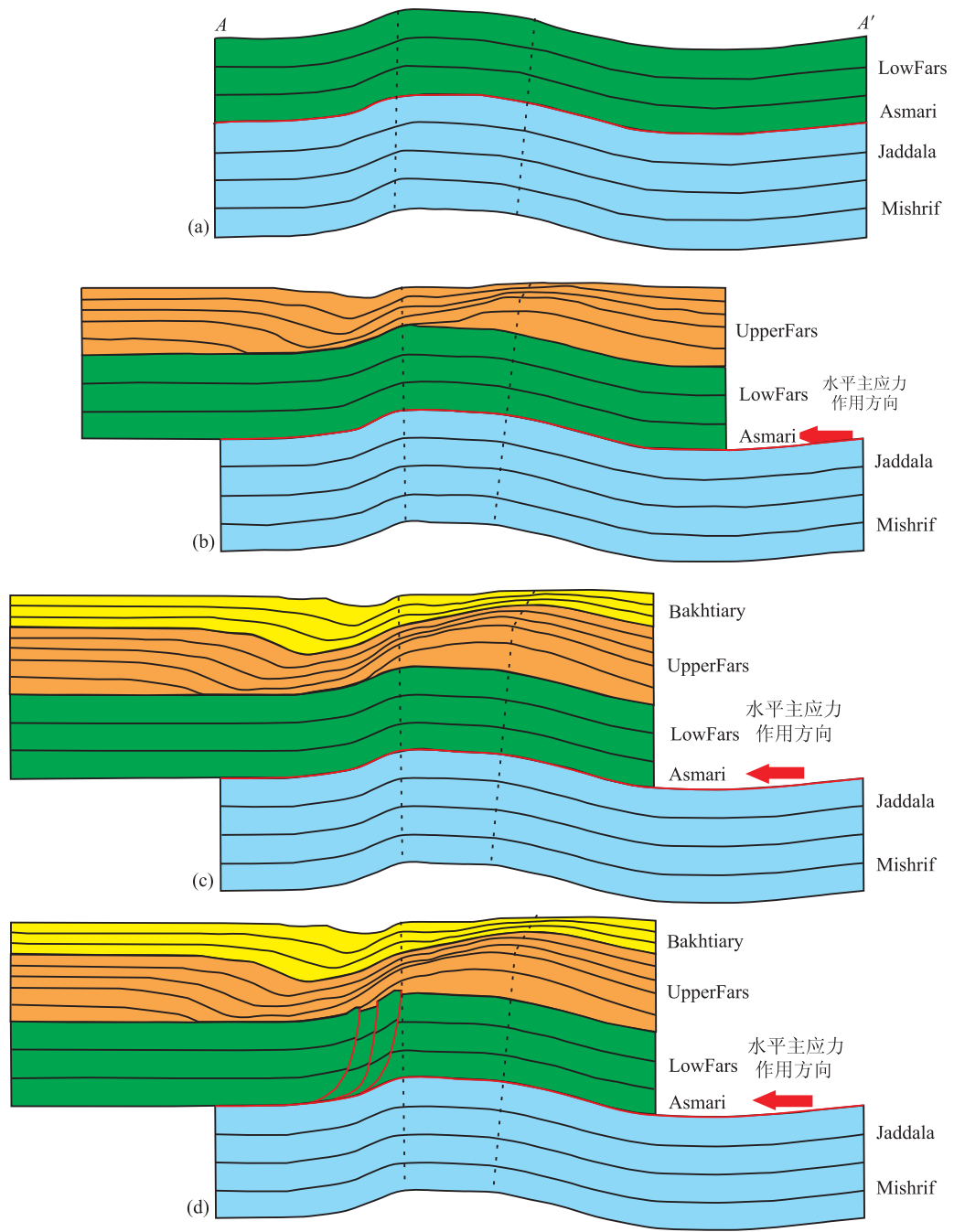


图 4 Buzurgan 背斜斜向逆冲断裂褶皱几何变形运动学模拟的 4 个阶段
Fig. 4 Kinematic simulation of Buzurgan oblique-thrust fault-related-fold in Zagros basin

2a)为蓝本,对解释的斜向逆冲断裂褶皱几何变形过程进行了计算机数字化正演模拟,通过将模拟结果与实际地震剖面进行对比和判定,以进一步确定上述构造样式解释的合理性。

由于本文模拟的 Buzurgan 背斜的尺度较大(背斜平面延伸 8~14 km,垂向变形达到 3~4 km),故模拟过程只能以大套地层的平均岩性岩石力学参数(如新近系地层厚度有 2 km 左右的全是膏盐)和扎

格罗斯盆地的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、构造缩短量等参数则通过人工不断修改并调整完善,伴随着计算机大量反复数据运算而渐趋合理,最后得到了与 Buzurgan 背斜及其附近地区实际地质特征最为接近的一套模拟参数,表 1 列举了其中关键的 7 个定量参数,采用这些参数获得了与实际地震剖面 A-A' 测线相似度最大的模拟结果(图 4).这一结果显示了 Buzurgan 背斜斜向逆冲断裂褶皱几何变形运动过程分为 4 个阶段:

第 1 阶段(图 4a):受扎格罗斯山隆起形成的向西南方向的水平挤压应力作用的影响,Buzurgan 地区地下地层发生变形,形成开阔对称的 Buzurgan 古隆起.

第 2 阶段(图 4b):随着扎格罗斯造山运动的加强,水平挤压应力沿 Jaddala 组顶部滑脱面向西南方向传递,运动过程中接受沉积,形成早期生长地层.

第 3 阶段(图 4c):随着扎格罗斯造山运动形成的水平挤压应力沿滑脱层持续不断的传递,构造变形活动持续进行,继续接受沉积物,最终在 Buzurgan 背斜顶部出现前翼超覆,后翼削蚀的完整的生长地层;生长轴面在前翼略向西南倾斜,后翼略偏倾向东北,形成具有双高点开阔背斜形态的生长褶皱,且生长褶皱背斜双高点向下略有靠拢;表明本地区的最大主应力为来自东北—西南方向的水平挤压.

第 4 阶段(图 4d):挤压应力沿 Jaddala 组滑脱面向西南传递过程中,受前方美索不达米亚盆地的阻挡,导致塑性岩层在 Buzurgan 背斜中部开始聚集,应变能量不断累积,最终导致塑性岩层聚集区以上的地层,打破自身的应变极限而发生破裂,从而派生出一系列的褶皱调节断层,引起相关地层发生不同规模的构造变形,以吸收过剩的水平挤压应力.

将最终模拟剖面(图 4d)与实际地震剖面(图 2a)对比发现,二者主要构造特征基本吻合,在几何变形上验证了地震剖面构造解释的合理性.二者的一致性主要表现在以下几个方面:背斜两翼地层减薄,背斜核部地层加厚,由下向上褶皱轴面明显偏移,褶皱高点距离略有加大;Jaddala 组滑脱层之上褶皱西南翼上产生小规模褶皱调节断层,但没有严重影响整个 Buzurgan 背斜的构造样式;Jaddala 组滑脱层以下地层产状基本一致,连续性较好.

需要指出的是,由于受古气候、古水深、地压梯度、应力方向、应力大小、岩性变化、尤其是新生代以来的巨厚盐构造活动等各种复杂因素影响,现有的计算机数字化正演模拟技术难以实现对各个构造演化阶段地质特征的再现,使得模拟结果(图 4d)与实际地震剖面(图 2a)出现了一定的差异,但上述模拟结果保证了与 Buzurgan 背斜及其相关构造的构造期次划分、几何样式模式、水平位移量等本质特征的一致.由此可见,本文模拟结果进一步验证了 Buzurgan 背斜斜向逆冲断裂褶皱几何变形样式解释的合理性与可靠性.

而无论是模拟结果,还是实际地震剖面均显示 Jaddala 组滑脱层上下的构造样式存在较大差异.这一差异可以从薄皮构造理论(Chapple, 1978)得到解释:Jaddala 组滑脱层之上的地层发生了显著变形,之下的地层接受的挤压应力通过 Jaddala 组滑脱层的吸收而大幅减弱,导致之下地层未被上部构造卷入而呈现出了较小的变形特征.

5 斜向逆冲的动力学特征及其与油气富集的关系

前人的研究工作(Beydoun *et al.*, 1992; Pitman, 2004)已经表明,扎格罗斯盆地绝大部分构造的 Asmari 组和 Mishrif 组均同时含有丰富的石油资源(如 Buzurgan 背斜东南边的 Fauqi 构造).然而 Buzurgan 背斜的油气则主要聚集在 Mishrif 组地层中,Asmari 组地层没能形成可工业化开采的石油资源.这一现象与 Buzurgan 背斜斜向逆冲的动力学特征密切相关.

依靠 Jaddala 组顶部滑脱面的吸收,Mishrif 组地层受到来自扎格罗斯褶皱带与阿拉伯地盾夹持形成的水平挤压应力作用的影响较小,断裂不发育,由此衍生的构造裂缝也不发育,来自下倾方向 Kazhdumi 组生成的石油大量储集在 Mishrif 组的孔隙型颗粒灰岩中,其上 Jaddala 组的致密泥灰岩阻止了石油的外溢,良好的聚集和保存条件让 Mishrif 组中形成的石油聚集得以完好保存.

与此同时,受 Jaddala 组滑脱层聚变大的影响,Asmari 组受到来自扎格罗斯褶皱带与阿拉伯地盾夹持形成的水平挤压作用极其强烈,造成斜向逆冲作用不仅在 Asmari 组及其以上地层中形成了斜向逆冲褶皱.因变形地层中累积的变形位移量释放还

形成了较大的褶皱调节断层及相关的诱导裂缝.来自下倾方向 Kazhdumi 组生成的石油一方面受 Jaddala 组地层遮盖难以运移到达 Asmari 组地层中,即使有部分石油逸散到了 Asmari 组地层中,也会沿着 Asmari 组斜向逆冲褶皱及其相关断裂进一步外溢,造成在 Asmari 组地层中无法形成有效的石油聚集.

由此可见,研究斜向逆冲的作用规模、作用强弱及其动力学特征,不仅具有构造分析的科学意义,对于深入理解 Buzurgan 背斜石油的差异聚集现象,促进该区石油资源的进一步详探和有效开发也是大有裨益的.

6 结论

(1)通过对地震剖面构造几何解析、断裂褶皱变形样式分析和计算机数字化正演模拟,证实了扎格罗斯盆地 Buzurgan 背斜 Jaddala 组之上存在着斜向逆冲断裂及相关褶皱,这一发现有利于深入认识研究区的断裂褶皱特征.

(2)扎格罗斯盆地 Buzurgan 背斜 Jaddala 组之下构造变形较弱,地层展布平缓,表明 Jaddala 组的滑脱作用有力消减了区域逆冲作用的影响.

(3)Buzurgan 背斜 Jaddala 组之上的 Asmari 组地层中分布着不具工业开采价值的多油水系统,而其下的 Mishrif 组为具有稳定、统一油水界面的油藏.

(4)上述构造特征及油水系统的巨大差异凸显了扎格罗斯盆地 Buzurgan 背斜斜向逆冲断裂及相关褶皱研究的学术与应用价值.

致谢:中海油研究总院的邓运华副院长对本文研究工作提供了许多指导性意见,中海油研究总院的高云峰高级工程师、罗银富高级工程师、杨玉贵工程师、张宇琨工程师等提供了本研究所需的基础资料,中国海油伊拉克有限公司的周守信高级工程师至始至终都关注着本研究工作,在此一并表示诚挚的谢意.

References

Alavi,M.,1994. Tectonics of the Zagros Orogenic Belt of Iran: New Data and Interpretations. *Tectonophysics*, 229(3—4): 211—238. doi:10. 1016/0040—1951(94)90030—2

Alavi,M.,2007. Structures of the Zagros Fold-Thrust Belt in Iran. *American Journal of Science*, 307(9): 1064—

1095. doi:10. 2475/09. 2007. 02

Allen,M. B. ,Saville,C. ,Blanc,E. JP. ,et al. ,2013. Orogenic Plateau Growth: Expansion of the Turkish-Iranian Plateau Across the Zagros Fold-and-Thrust Belt. *Tectonics*, 32(2):171—190. doi:10. 1002/tect. 20025

Berberian,M. ,1995. Master “Blind” Thrust Faults Hidden under the Zagros Folds: Active Basement Tectonics and Surface Morphotectonics. *Tectonophysics*, 241(3): 193—224. doi:10. 1016/0040—1951(94)00185—C

Beydoun,Z. R. ,Clarke,M. H. ,Stoneley,R. ,1992. Petroleum in the Zagros Basin: A Late Tertiary Foreland Basin Overprinted onto the Outer Edge of a Vast Hydrocarbon-Rich Paleozoic-Mesozoic Passive-Margin Shelf: Chapter 11. *Aapg Special Volumes*, 136:309—339.

Blanc,E. J. P. ,Allen,M. B. ,Inger,S. ,et al. ,2003. Structural Styles in the Zagros Simple Folded Zone,Iran. *Journal of the Geological Society*, 160(3):401—412. doi:10. 1144/0016—764902—110

Chapple,W. M. ,1978. Mechanics of Thin-Skinned Fold-and-Thrust Belts. *Geological Society of America Bulletin*, 89(8): 1189. doi: 10. 1130/0016—7606(1978)89<1189:motfb>2. 0. co;2

Cristallini,E. O. ,Giambiagi,L. ,Allmendinger,R. W. ,2004. True Three-Dimensional Trishear: A Kinematic Model for Strike-Slip and Oblique-Slip Deformation. *Geological Society of America Bulletin*, 116(7):938. doi:10. 1130/b25273. 1

Guan,S. W. ,Li,B. L. ,He,D. F. ,et al. ,2007. Geometrical Methods of Complicated Structural Analysis and Their Application. *Chinese Journal of Geology*, 42(4):722—739 (in Chinese with English abstract).

Han,Y. Z. ,Chen,W. ,Ou,C. H. ,et al. ,2014. Geometric Analysis and Kinematic Simulation of Abu Ghirab Anticline in Missan Area, Iraq. *Xinjiang Petroleum Geology*, 35(1): 124—129 (in Chinese with English abstract).

He,D. F. ,John S. ,Jia,C. Z. ,2005. New Advances in Theory and Application of Fault-Related Folding. *Earth Science Frontiers*, 12(4):353—364 (in Chinese with English abstract).

Hessami,K. ,Koyi,H. A. ,Talbot,C. J. ,2001. The Significance of Strike-Slip Faulting in the Basement of the Zagros Fold and Thrust Belt. *Journal of Petroleum Geology*, 24(1):5—28. doi:10. 1111/j. 1747—5457. 2001. tb00659. x

Jia,D. ,Li,Y. Q. ,Wang,M. M. ,et al. ,2011. Three-Dimensional Structural Geometry of Fault-Related Folds: Examples from 3-D Seismic Explored Blocks in the Western Sichuan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*,

- 27(3):732—740 (in Chinese with English abstract).
- Keating, D. P. , Fischer, M. P. , Blau, H. , 2012. Physical Modeling of Deformation Patterns in Monoclines above Oblique-Slip Faults. *Journal of Structural Geology*, 39:37—51. doi:10.1016/j.jsg.2012.03.008
- Pitman, J. K. , Steinshouer, D. , Lewan, M. D. , 2004. Petroleum Generation and Migration in the Mesopotamian Basin and Zagros Fold Belt of Iraq: Results from a Basin-Modeling Study. *Georabia-Manama*, 9(4):41—72.
- Sarkarinejad, K. , Azizi, A. , 2008. Slip Partitioning and Inclined Dextral Transpression along the Zagros Thrust System, Iran. *Journal of Structural Geology*, 30(1):116—136. doi:10.1016/j.jsg.2007.10.001
- Sepehr, M. , Cosgrove, J. W. , 2004. Structural Framework of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 21(7):829—843. doi:10.1016/j.marpetgeo.2003.07.006
- Shaw, J. H. , Connors, C. D. , Suppe, J. , 2005. Seismic Interpretation of Contractional Fault-Related Folds; An AAPG Seismic Atlas, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 46—87.
- Sherkati, S. , Letouzey, J. , 2004. Variation of Structural Style and Basin Evolution in the Central Zagros (Izeh Zone and Dezful Embayment), Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 21(5):535—554. doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.01.007
- Sherkati, S. , Molinaro, M. , de Lamotte, D. F. D. , et al. , 2005. Detachment Folding in the Central and Eastern Zagros Fold-Belt (Iran): Salt Mobility, Multiple Detachments and Late Basement Control. *Journal of Structural Geology*, 27(9):1680—1696. doi:10.1016/j.jsg.2005.05.010
- Suppe, J. , Sābat, F. , Muñoz, J. A. , et al. , 1997. Bed-By-Bed Fold Growth by Kink-Band Migration: Sant Llorenç de Morunys, Eastern Pyrenees. *Journal of Structural Geology*, 19(3—4):443—461. doi:10.1016/s0191—8141(96)00103—4
- Tetreault, J. , Jones, C. H. , Erslev, E. , et al. , 2008. Paleomagnetic and Structural Evidence for Oblique Slip in a Fault-Related Fold, Grayback Monocline, Colorado. *Geological Society of America Bulletin*, 120(7—8):877—892. doi:10.1130/b26178.1
- Tindall, S. E. , Davis, G. H. , 1999. Monocline Development by Oblique-Slip Fault-Propagation Folding: The East Kaibab Monocline, Colorado Plateau, Utah. *Journal of Structural Geology*, 21(10):1303—1320. doi:10.1016/s0191—8141(99)00089—9
- Wang, C. S. , Zhu, W. L. , Zhong, K. , et al. , 2015. Late Cretaceous Tectonic Thrusting and Its Genesis in Northern Slope of South China Sea. *Earth Science*, 40(9):1505—1516 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. W. , 1995. Some Major Problems on Strike-Slip Faulting. *Earth Science Frontiers*, 2(2):125—136 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. , Wen, X. , Yu, G. , et al. , 2009. Coseismic Reverse-And Oblique-Slip Surface Faulting Generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake, China. *Geology*, 37(6):515—518. doi:10.1130/g25462a.1
- Zhang, B. , Yan, S. Y. , Zhang, Z. P. , et al. , 2012. Geometric and Tectonophysical Simulate of the Bachu Fold Belt: Central Region of Tarim Basin. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 48(1):92—104 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. , Jia, D. , Wang, M. M. , et al. , 2013. Forward Modeling of Oblique-Thrust Fault-Related-Folds and Instances Analysis. *Geological Review*, 59(6):1207—1217 (in Chinese with English abstract).
- Ziegler, M. A. , 2001. Late Permian to Holocene Paleofacies Evolution of the Arabian Plate and Its Hydrocarbon Occurrences. *Georabia-Manama*, 6:445—504.

附中文参考文献

- 管树巍, 李本亮, 何登发, 等, 2007. 复杂构造解析中的几何学方法与应用. *地质科学*, 42(4):722—739.
- 韩耀祖, 陈伟, 欧成华, 等, 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(1):124—129.
- 何登发, John S. , 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(4):353—364.
- 贾东, 李一泉, 王毛毛, 等, 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*, 27(3):732—740.
- 王长势, 朱伟林, 钟锴, 2015. 南海北部陆坡晚白垩世构造逆冲及其成因. *地球科学*, 40(9):1505—1516.
- 徐嘉伟, 1995. 论走滑断层作用的几个主要问题. *地学前缘*, 2(2):125—136.
- 张波, 闫淑玉, 张仲培, 等, 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(1):92—104.
- 张猛, 贾东, 王毛毛, 等, 2013. 斜向逆冲断层相关褶皱的正演模型与实例分析. *地质论评*, 59(6):1207—1217.