

断背斜储层物性演化及流固耦合数值模拟 ——以库车坳陷克拉苏构造带白垩系储层为例

汪顺宇¹, 王健¹, 李勇², 王阿瑞³, 陈美伊⁴, 刘可禹¹

(1. 中国石油大学(华东) 深层油气国家重点实验室, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油塔里木油田公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000; 3. 中国石化西北石油局 勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 中国石油大港油田公司 勘探事业部, 天津 300450)

摘要:以库车坳陷克拉苏构造带逆冲断层相关褶皱为研究对象,分析断背斜储层的粒间体积分布特征,采用流固耦合数值方法模拟断背斜的形成过程与物性演化,评价构造挤压与流体流动对储层物性演化的控制作用。结果表明:在库车坳陷克拉苏构造带的断背斜形成过程中,储层处于压应变状态,受外弧扩张作用和逆断层的影响,断背斜的枢纽和后翼是高孔隙度储层的优势发育部位。晚期构造挤压型超压对储层储集空间的保护作用有限,保护孔隙度为 0.25%~0.47%和 0.18%~0.43%的断背斜枢纽和后翼免受构造挤压应力的破坏。压应变演化路径控制储层孔隙度演化,早期强压应变导致孔隙度快速下降,后期外弧扩张作用抵消部分压应变,早期损失的储层孔隙度不能完全恢复。该结果为挤压背景下的断背斜优质储层分布及预测提供依据。

关键词:储层物性演化;流固耦合数值模拟;构造;流体;断背斜;有限元;白垩系;克拉苏构造带;库车坳陷

中图分类号:TE122.1;P168.130.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)02-0030-16

0 引言

受新生代晚期强烈的构造挤压作用影响,库车坳陷克拉苏构造带逆冲断层相关褶皱广泛发育^[1-2],逆冲断层相关背斜(断背斜)是勘探开发的重点区域。克拉苏构造带发现多个大中型油气田,包括克深、博孜 9、大北 12 和大北 14 等,白垩系巴什基奇组碎屑岩储层是塔里木盆地重要的油气产区^[3-6],在埋深超过 6 km 的碎屑岩储层中获得高产气流,单井日产天然气可达 10^6 m³。高产气流井多分布于断背斜的中上部(距离储层顶部一般小于 200 m),储层物性好,断背斜的中下部(距离储层顶部 200~300 m)单层测试获得的高产气流井较少,储层物性差,应力环境更为复杂^[7],研究断背斜优质储层分布及发育规律对指导深层油气勘探具有重要意义。

在强侧向挤压的构造环境中,断背斜储层内部的物性和裂缝分布存在垂向分层差异^[2,8-9]。中和面模型^[10-11]将横向褶皱中的外弧扩张区域与内弧压缩区域分开。压性带和张性带的范围常用于解释断背斜储层中构造裂缝性质和数量的纵向分布^[8,12],以及物性在垂向上的压实分异现象^[13-14]。周洪波等^[15]认为张性段厚度与地层厚度、构造变形程度呈正相关关系。在实测钻井资料的基础上,周鹏等^[7]应用有限元法确定断背斜应变中和面的主控因素,预测张性段厚度。在前陆盆地强侧向挤压环境下,岩石体积压实是垂向应力和侧向应力共同作用的结果,晚期侧向构造挤压使岩石孔隙度和渗透率进一步降低^[16]。同时,构造压实过程中增加地层压实和排水的不平衡程度,导致地层出现构造成因的超压^[17-18]。在极端条件下,构造挤压型超压为构造应力的 50%~75%^[16,19]。当盖层封闭性较好时,10%的地层缩短量可在储层中形成接近静岩压力的孔隙压力^[20-21]。另外,高异常流体压力能够降低储层有效应力,有利于储层保持较高的孔渗特性^[22-23]。

人们采用中和面模型分析横向褶皱的运动学^[10,24]、预测裂缝带分布和张性带厚度^[7-8],在挤压变形过

收稿日期:2024-10-28;编辑:刘丽丽

基金项目:国家自然科学基金项目(92055204);国家自然科学基金项目(42172146);中国石油集团公司重大科技项目(ZD2019-183-01-04);山东省泰山学者青年专家项目(tsqn202312111);中国石油大学(华东)深层油气国家重点实验室自主研究课题(SKL-DOG2024-ZYRC-05)

作者简介:汪顺宇(1995—),男,博士研究生,主要从事储层成岩作用与多场耦合数值模拟方面的研究。

程中,没有考虑地层超压及真实地质条件对中和面模型可用性和储层物性的影响。笔者采用麦克斯韦黏弹性本构方程,结合达西定律,在侧向挤压过程中考虑上覆地层压力、构造变形、孔隙压力和流体流动对储层物性的影响,明确高孔优质储层发育分布规律及主控因素,为挤压背景下深层优质储层分布及预测提供指导。

1 区域地质概况

塔里木盆地是一个以中—新生代沉积为主的叠加型含油气前陆盆地^[1,25]。库车坳陷处于塔里木盆地最北端,北与南天山造山带毗邻,是一个近东西向展布的前陆坳陷(见图1(a)),自下而上沉积三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系(见图2),沉积物累积厚度可达上千米^[26]。研究区克拉苏构造带位于塔里木盆地库车坳陷西北部,油气主力产层主要为白垩系巴什基奇克组扇三角洲前缘和辫状河三角洲前缘亚相^[27-28],主要来自于南天山造山带陆相沉积物^[29-30]。巴什基奇克组储层主要由长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩组成,砂体横向分布稳定,垂向厚度大,砂地比大于0.8,埋深在5~8 km之间^[31-32]。

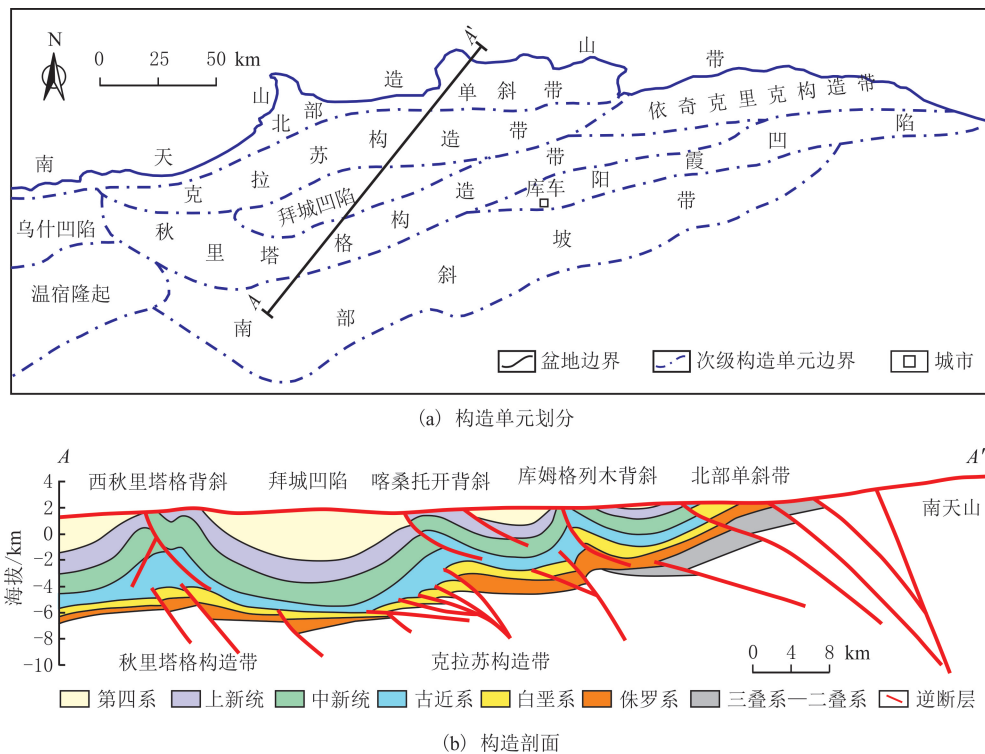


图1 库车坳陷构造单元划分和构造剖面(据文献[1,25]修改)

Fig. 1 Structural units division and structural profile in the Kuqa Depression(modified by references[1,25])

克拉苏构造带是在南天山强烈逆冲推覆作用下形成的叠瓦状构造带,从北向南逆冲断层的倾角逐渐降低^[33](见图1(b))。三叠纪—白垩纪,随造山运动结束,在重力平衡和应力松弛作用下,库车坳陷进入造山后伸展坳陷阶段。白垩纪—古近纪,在早白垩世炎热干旱气候背景下,库车坳陷持续沉降,白垩系沉积地层广泛发育^[34],主要以扇三角洲、辫状河三角洲沉积为主^[35],沉积中心开始向盆地内部转移(见图3(a)),根据塔里木油田内部资料修改)。燕山中—晚期构造活动使库车坳陷整体抬升,上白垩统几乎剥蚀殆尽^[36](见图3(b))。古近纪—中新世,库车坳陷再次进入弱挤压构造阶段,盆地沉降缓慢。古新世,古特提斯海水入侵到库车坳陷,几乎淹没整个库车坳陷,后续沉积巨厚的膏泥岩和盐岩等潟湖相沉积物^[37]。中新世,潟湖相逐渐转变为陆相沉积,以湖泊相和河流相沉积为主(见图3(c))。上新世早期,印度板块继续向欧亚板块加速俯冲,南天山在喜马拉雅运动远程效应作用下开始快速隆升^[38],构造活动强烈,在库车坳陷形成一系列逆冲叠瓦状构造(见图3(d))。上新世晚期,在南北向应力的作用下,古近系盐层开始向克

拉苏构造带和秋里塔格构造带之下聚集,盐上层和盐下层整体变形,盐下层的变形程度高于盐上层的^[34](见图 3(e-g))。断背斜的褶皱幅度与构造样式主要受新生代喜马拉雅晚期运动和上覆古近系巨厚膏岩层的耦合控制^[39]。另外,克拉苏构造带白垩系储层普遍发育超压,压力因数大多介于 1.5~2.0,构造挤压作用是克拉苏构造带白垩系储层超压的主要成因^[40-41]。

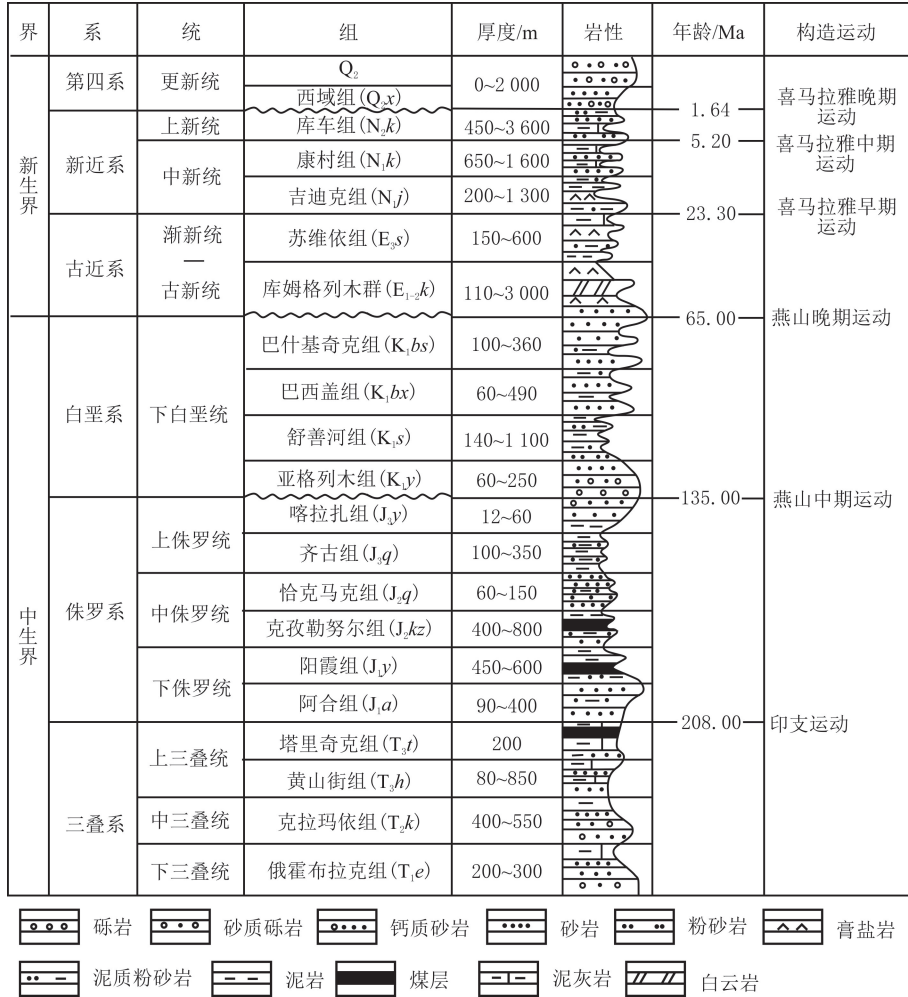
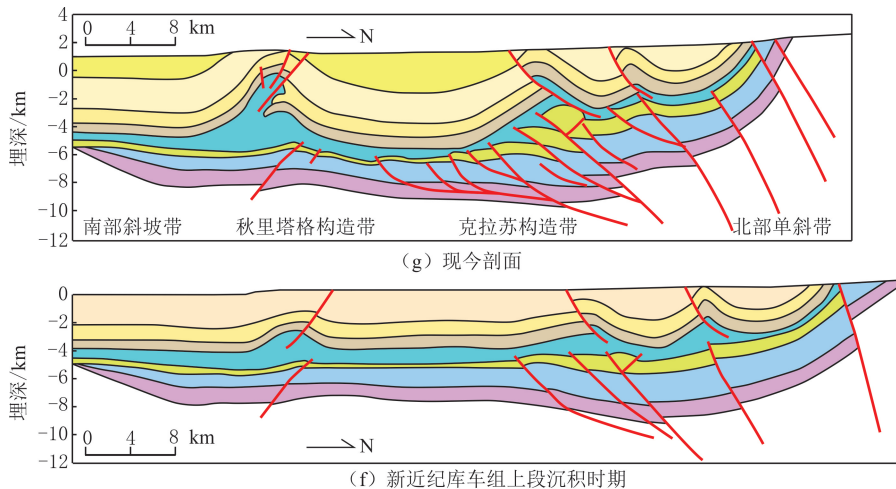


图 2 库车坳陷地层综合柱状图(据文献[32]修改)

Fig. 2 Stratigraphic composite columnar of the Kuqa Depression(modified by reference [32])



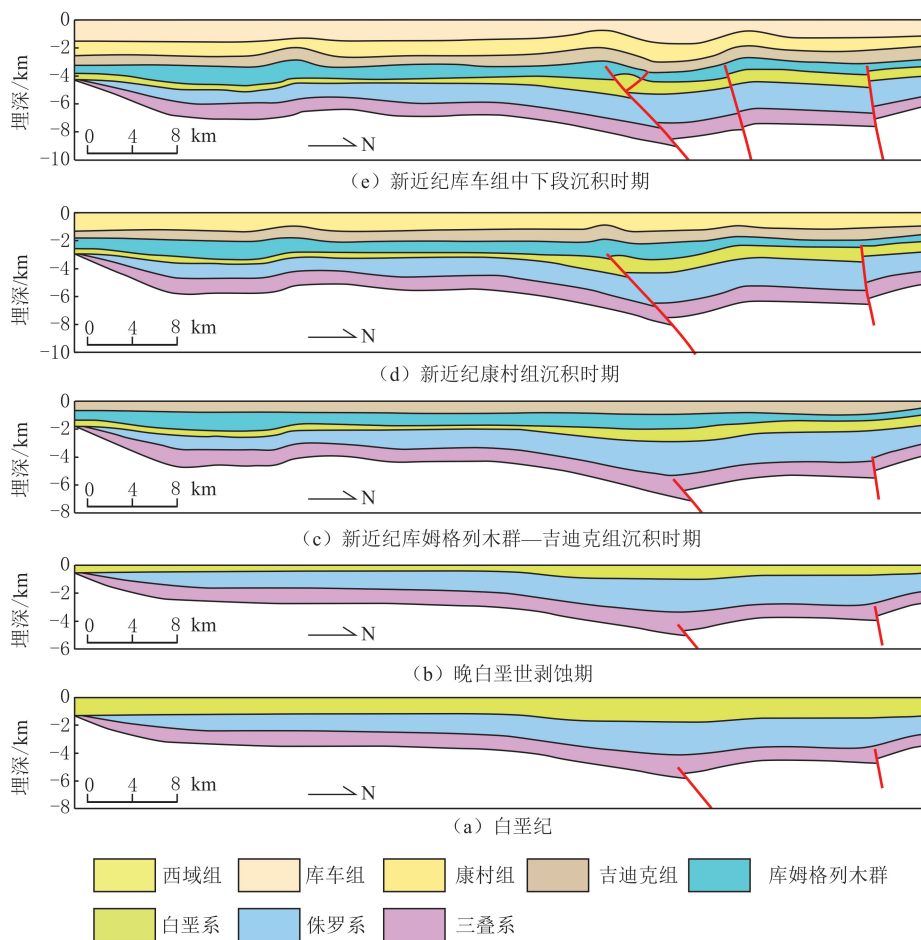


图3 库车坳陷南北向构造演化剖面
Fig. 3 The N-S trending structural evolution sections of Kuqa Depression

2 储层粒间体积分布特征

2.1 垂向分布特征

在理想情况下,当碎屑岩储层由不可压缩的岩石颗粒组成,并且没有受后期化学成岩及其他地质因素影响时,砂岩储层的粒间体积与孔隙度相等。粒间体积随深度的变化趋势可以量化压实减孔的程度^[42]。巴什基奇克组储层砂岩与 Wilcox 和 Carrizo 砂岩的结构成分相似^[43],采用 Athy 经验公式^[44]计算砂岩的粒间体积,预测深层巴什基奇克组储层的理想粒间体积(见图 4(a))。在理想(无塑性岩屑、无胶结物及岩石颗粒不可压缩等)情况下,巴什基奇克组储层在埋深 8 000 m 时保留约为 19.0% 的粒间体积。巴什基奇克组砂岩的粒间体积在 7.2%~18.0% 之间,小于 Athy 压实曲线的预测值,表明巴什基奇克组砂岩经历强侧向压实减孔效应(见图 4(a))。在厚度约为 250 m 的储层内部,粒间体积具有随与储层顶面(不整合面)距离的增加而逐渐减小的趋势,粒间体积在 250 m 的储层厚度内最大差值为 11%(见图 4(b))。

2.2 垂向和侧向压实减孔分布特征

巴什基奇克组储层的垂向压实减孔量主要介于 20%~32%,埋深为 4 500~8 000 m 时具有缓慢下降并逐渐趋于稳定的分布趋势(见图 5(a))。在厚度约为 250 m 的储层内部,垂向压实减孔量具有随与储层顶面(不整合面)距离的增加而缓慢降低的趋势(见图 5(b))。当储层埋深较大时,由上覆沉积物引起的垂向压实作用对储层孔隙度的影响不显著。侧向压实减孔量主要分布在 1%~13% 之间,随储层埋深的增加,侧向压实减孔量与埋深没有显著的相关关系(见图 6(a))。在储层内部,随与储层顶面(不整合面)距离的增加,侧向压实减孔量具有快速增加的趋势;在与储层顶面(不整合面)距离 100 m 内,侧向压实减孔

量小于 5%，在距离超过 100 m 的范围，侧向压实减孔量迅速增大为 13% 左右(见图 6 (b))。侧向压实减孔效应在储层顶部(距离小于 100 m)较弱，在远离储层顶部的位置(距离超过 100 m)侧向压实减孔效应显著影响粒间体积。

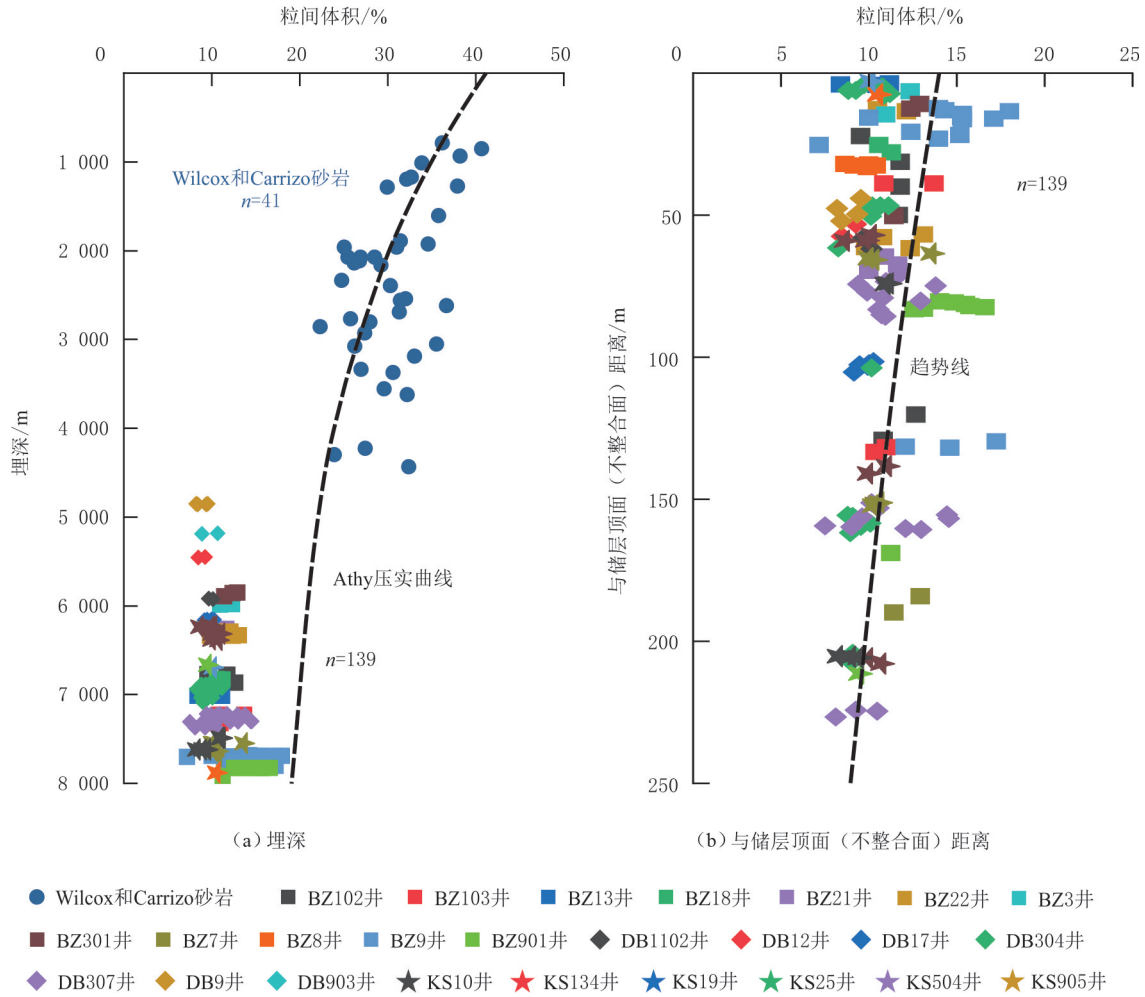


图 4 巴什基奇克组储层粒间体积与埋深、储层顶部(不整合面)距离关系

Fig. 4 Relationships between intergranular volumes and burial depths and distance away from the unconformity or the top surface of the Bashijiqike Formation

3 实验方法及数值模拟结果

3.1 实验方法

3.1.1 储层孔隙度演化计算

选取克拉苏构造带巴什基奇克组 25 口井 139 个岩心样品,采用点计法计算各类成岩作用的增孔/减孔效应^[45]。将面孔率 x 换算为相应的孔隙度 ϕ_1 , $\phi_1 = 4.6276x^{0.3482}$ ^[46]。

碎屑岩沉积时的初始孔隙度是孔隙演化恢复的起点,随机选取 118 个巴什基奇克组砂岩样品测试激光粒度,巴什基奇克组砂岩的分选因数主要分布在 1.2~1.5 之间,粒间体积介于 36.00%~39.00%,平均为 37.75%。根据各类增孔/减孔作用的计算公式^[47],以及侧向压实减孔量与最大古构造应力的关系式^[48],计算粒间体积垂向压实减孔量并分析侧向压实减孔量在垂向上的分布特征。

3.1.2 流固耦合数值模拟

地质力学建模分析是研究断层相关褶皱和其他地质结构形成演化常用的技术^[8,49-50]。根据黏弹性单层褶皱研究^[51-52],采用麦克斯韦模型模拟地质材料中断层传播褶皱的演化过程。麦克斯韦流变方程能够

实现快应变率下材料的瞬时弹性行为,以及慢应变率下材料随时间变化的黏性行为^[50,53]。假设断层传播褶皱的演化平行于 X-Z 平面,利用二维平面应变方法求解方程。假设岩石颗粒和孔隙流体是不可压缩的(Biot 因数为 1^[54]),孔隙流体压力通过有效应力分析纳入模型。采用有限元商业软件包 AbaqusTM (Learning Edition)^[55-56]求解平衡方程、质量守恒方程、本构方程和流体流动方程。

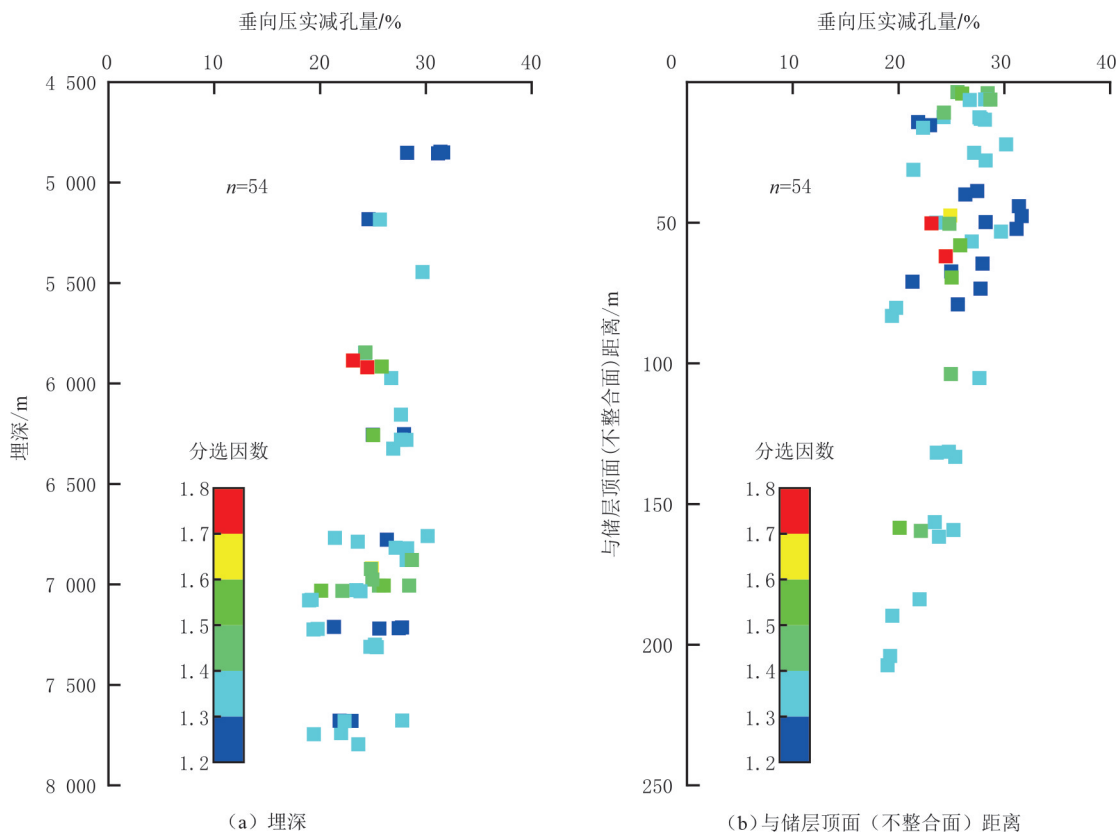


图 5 巴什基奇克组储层垂向压实减孔量与埋深、储层顶面(不整合面)距离关系

Fig. 5 Relationships between decreasing porosity by vertical compaction and burial depth and distance away from the unconformity or the top surface of the Bashijiqike Formation

3.2 数值模型

根据库车凹陷构造演化过程(见图 3),建立 $15.0 \text{ km} \times 3.7 \text{ km}$ 的逆冲断层、倾角为 30° 的二维地质模型(见图 7)。模型设置 5 套地层,从上到下分别为库车组(N_2k)、康村组($N_{1-2}k$)、吉迪克组(N_1j)、古近系(E)和白垩系(K),根据文献[49]的地层厚度略有修改。对于不同地层沉积亚相和岩性描述,将古近系设置为膏岩层,其余地层设置为砂岩层。模型整体采用黏弹性本构方程^[51],使用 prony 级数进行材料的黏性设置。砂岩和石膏的 prony 级数分别来自文献[57-58]。考虑侧向挤压前垂向压实减孔效应,即纯净砂岩孔隙度随深度的变化^[59]及孔渗关系^[46]。

在埋藏过程中,受压实作用和成岩作用的影响,松散颗粒逐渐固结成坚硬岩石,随岩石孔隙度降低,杨氏模量上升^[60-61]。由于石膏属于化学沉积岩,具有低孔低渗特征,受压实作用影响较弱,将石膏孔隙度设为 1%,渗透率设为该深度砂岩层的 $1/1\,000$ ^[62]。模型中,考虑由沉积层理导致的地层渗透率各向异性,将水平渗透率(沿层理面方向)设为垂直渗透率(垂直层理面方向)的 5 倍^[50,53];考虑地层层间滑动及断层剪切滑动的影响,地层层间的摩擦因数设为 0.25,断层的摩擦因数设为 0.01^[49,55-56]。研究区典型构造演化剖面缩短量约为 18%,对于长度为 15.0 km 的地质模型,使用 $3\,000 \text{ m}$ 挤压位移(约为 20%缩短量)近似模拟克拉苏构造带的挤压过程。不考虑成岩作用对储层物性的影响。模型初始岩石力学和岩石物性参数见表 1。

断层传播褶皱的流固耦合数值模拟分为 3 个步骤:第一步,对于整个模型施加重力载荷和静水压力,

达到地应力平衡的初始状态;第二步,在模型顶部施加约为 49 MPa 的上覆荷载及 25 MPa 的孔隙压力,模拟变形时的 2.5 km 的上覆层重力,使模型达到平衡状态;第三步,在模型右侧施加 3 000 m 的挤压位移模拟 5 Ma 内挤压变形。

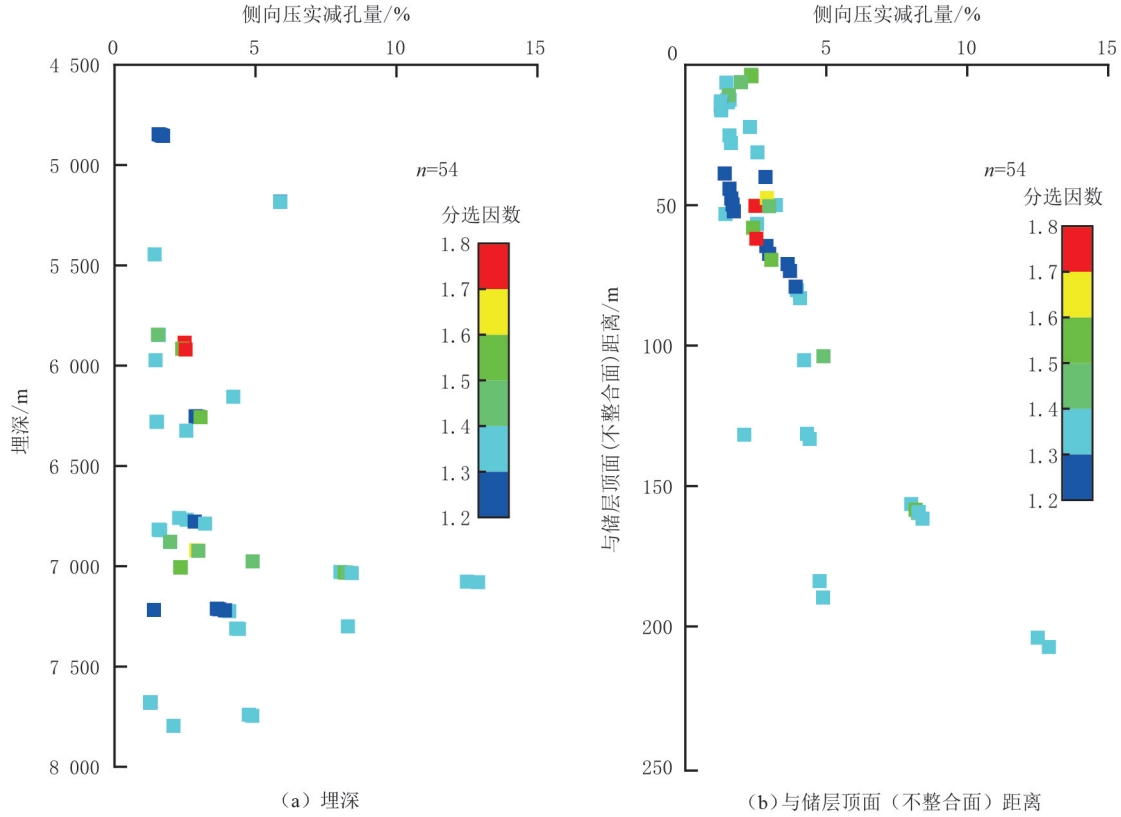


图 6 巴什基奇克组储层侧向压实减孔量与埋深、储层顶面(不整合面)距离关系

Fig. 6 Relationships between decreasing porosity by lateral compaction and burial depth and distance away from the unconformity or the top surface of the Bashijiqike Formation

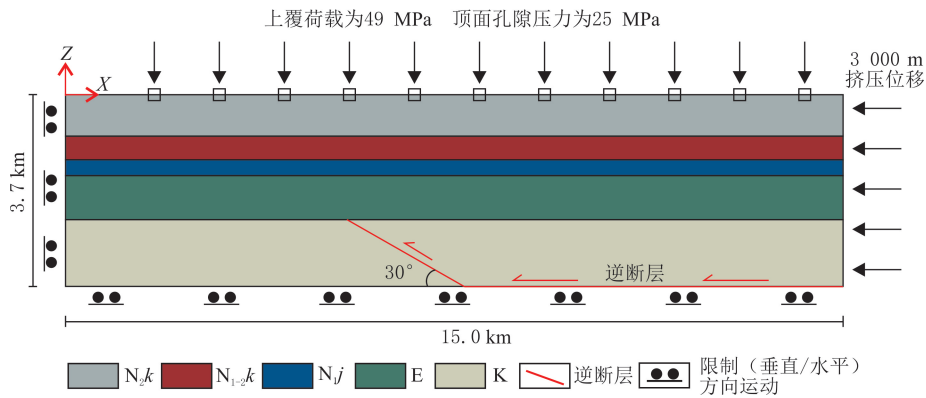


图 7 有限元模型初始几何形状和边界条件

Fig. 7 Initial geometry and boundary conditions of the finite element mode

3.3 面应变分布及演化

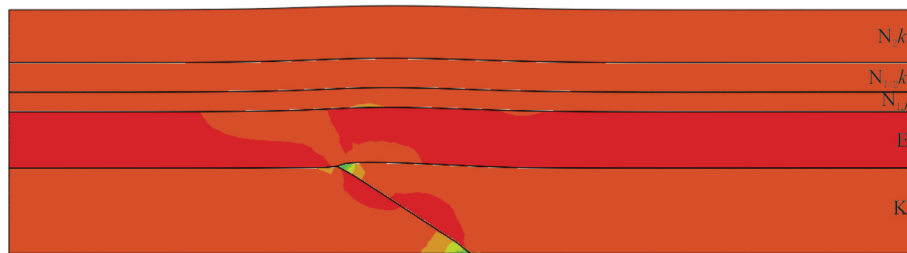
断背斜的应变分布从褶皱层的顶部向底部逐渐降低,在断背斜的应变分布中没有观察到明显的中和面(主应变值为 0 的面)(见图 8)。在整个挤压变形过程中,断背斜的面应变值小于 0,模型受压应力作用,处于收缩变形的过程,随挤压位移的逐渐增加,压应变越来越大。在逆断层的端部,受断层的影响,出现应变集中现象,断层两侧位置存在少量的张应变。在 1 000 m 挤压位移时,盐上层(N_{2k} 、 N_{1-2k} 和 N_{1j})受均匀的挤压应变;盐层(E)和盐下层(K)受断层的影响,挤压应变优先集中于断层附近,断层传播褶皱开始形

成(见图 8(a))。在 2 000 m 挤压位移时,随断层传播褶皱幅度增加,整个模型受压应变增加;盐上层受断背斜影响,外弧扩张作用减缓背斜顶部的压应变,内弧压缩作用增加背斜底部的压应变;盐下层断背斜顶部受外弧扩张作用影响,在一定程度上减缓压应变在断背斜顶部的累积,断层端部受强烈的压应变作用(见图 8(b))。在 3 000 m 挤压位移时,模型的压应变达到最大;盐上层应变具有与横向对称褶皱类似的分布模式,不同地层岩石力学性质的差异使应变在层间的过渡并不均匀,但是整体的趋势不会改变;断背斜受断层和外弧扩张作用影响,盐下层最小压应变向褶皱后翼偏移;断层引起的应变集中导致最大压应变位于断层端部,远离断层的地层压应变均匀分布(见图 8(c))。

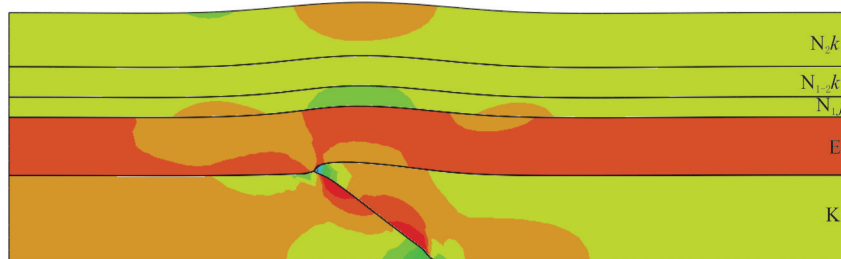
表 1 初始岩石力学和岩石物性参数(据文献[49]修改)

Table 1 Initial geomechanical and petrophysical parameters used in the simulation(modified by reference[49])

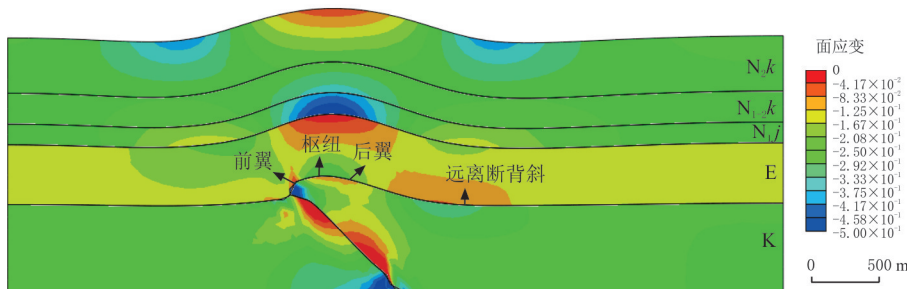
地层	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/ GPa	泊松比	孔隙度/%	水平渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	垂直渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
库车组(N_2k)	2 220	11.40	0.25	26.52~28.93	277.95~642.52	55.59~128.50
康村组(N_{1-2k})	2 250	12.70	0.24	25.21~26.52	176.26~277.95	35.25~55.59
吉迪克组(N_{1j})	2 250	13.40	0.24	24.59~25.21	142.08~176.26	28.42~35.25
古近系(E)	2 080	5.82	0.31	1.00	0.14	0.03
白垩系(K)	2 350	15.90	0.23	20.45~22.42	33.68~66.81	6.74~13.36



(a) 1 000 m



(b) 2 000 m



(c) 3 000 m

图 8 不同挤压位移时面应变分布

Fig. 8 Plane strain distributions after different lateral displacement applied

3.4 孔隙压力分布及演化

在断背斜形成过程中,盐上层始终保持静水压力梯度,盐层和盐下层一直处于超压状态。由于模型在构造变形前进行地应力平衡,盐层和盐下层的超压由侧向挤压作用产生。在 1 000 m 挤压位移时,盐下层

孔隙压力介于 81.7~102.9 MPa,静水压力介于 49.0~63.0 MPa,超压介于 32.7~39.9 MPa,压力因数为 1.63~1.67,盐下层处于强超压体系(见图 9(a))。在 2 000 m 挤压位移时,盐下层孔隙压力介于 95.8~110.0 MPa,静水压力介于 49.0~65.0 MPa,超压介于 45.0~46.8 MPa,压力因数为 1.69~1.96,盐下层处于强超压体系(见图 9(b))。在 3 000 m 挤压位移时,盐下层孔隙压力介于 81.7~110.0 MPa,静水压力介于 51.0~69.0 MPa,超压介于 30.7~41.0 MPa,压力因数为 1.60,盐下层处于强超压体系(见图 9(c))。在挤压过程中,盐层和盐下层孔隙压力等值线总是平行于盐层的起伏形态,低渗盐层是盐下层超压形成和保存的必要条件。盐下层孔隙压力具有先增加后降低的现象,可能与断背斜形成过程中地层抬升和孔隙度增加有关。

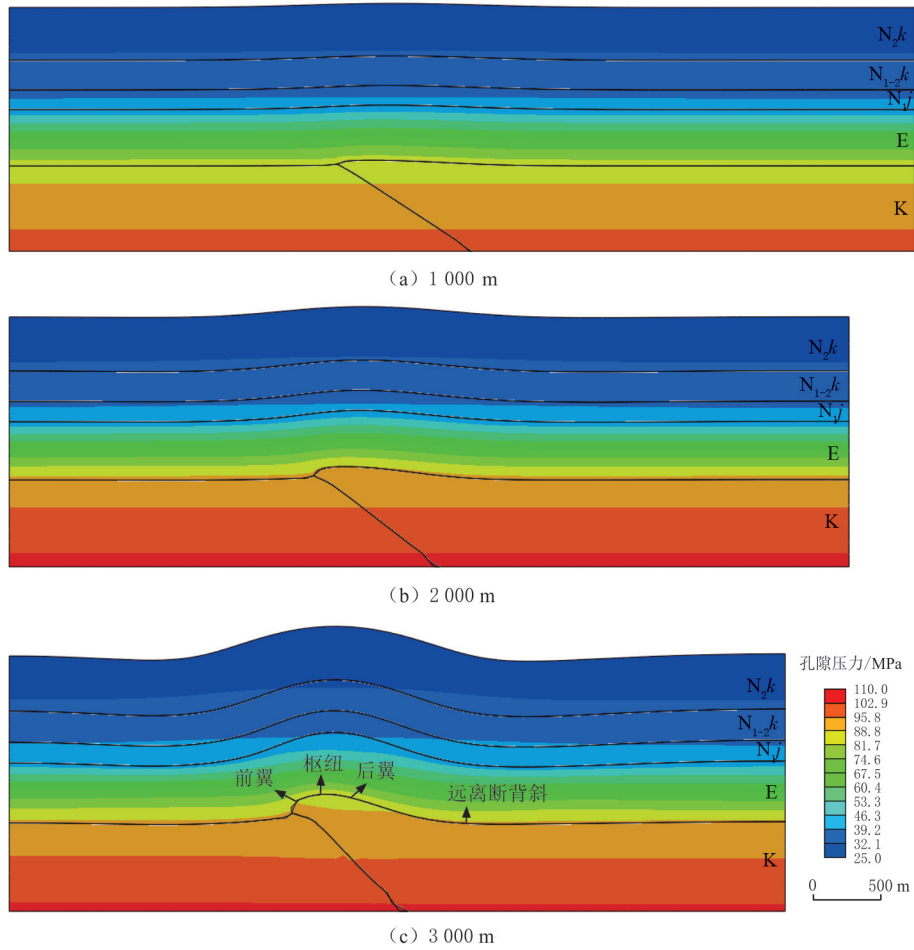


图 9 不同挤压位移时孔隙压力分布
Fig. 9 Pore pressure distributions after different lateral displacement applied

3.5 孔隙度分布及演化

在挤压变形过程中,模型受压应力作用的影响,地层孔隙度逐渐降低。在 1 000 m 挤压位移时,盐上层受均匀的挤压应力作用影响,孔隙度均匀降低;受断层的影响,在断层端点处,盐下层由应力集中导致断层附近的孔隙度迅速降低至 5%左右,在远离断层的地层中,孔隙度逐渐降低(见图 10(a))。在 2 000 m 挤压位移时,断层传播褶皱初步形成,盐上层孔隙度受横向褶皱作用的影响,在外弧扩张处的地层孔隙度缓慢上升,在内弧压缩处的地层孔隙度迅速下降;在盐下层孔隙度下降的背景下,断背斜的外弧扩张作用减缓,断背斜顶部的孔隙度下降(见图 10(b))。在 3 000 m 挤压位移时,盐上层形成对称横向褶皱,高孔储层分布在外弧扩张区域,低孔储层分布在内弧压缩区域,储层物性在挤压应力的作用下具有明显的非均质性分布;断背斜形成过程中,外弧扩张作用显著控制盐下层孔隙度的分布,在断背斜顶部孔隙度高,向底部孔隙度逐渐降低,并且随背斜幅度的升高,外弧扩张作用的影响范围逐渐缩小。受断层的影响,高孔储

层并不总是位于断背斜枢纽处,而是向后翼偏移。对于远离断层的位置,盐下层孔隙度持续降低,受断层影响程度低(见图 10(c))。

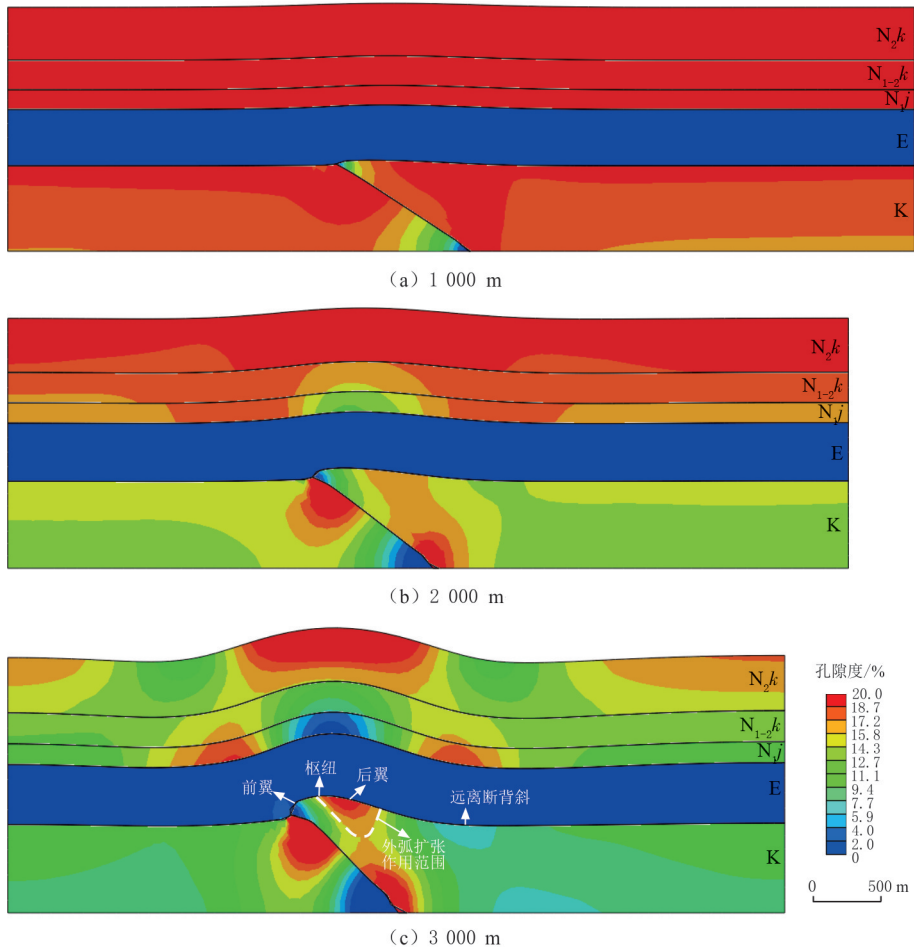


图 10 不同挤压位移时孔隙度分布
Fig. 10 Porosity distributions after different lateral displacement applied

4 讨论

4.1 构造挤压型超压影响

模型其他条件不变,改变模型中盖层与储层渗透率比,研究不同程度构造超压对孔隙度的影响。在静水压力条件下进行数值模拟,盐层和盐下层中产生的超压由侧向挤压作用引起。在构造挤压过程中,盖层与储层渗透率比降低,导致盐下层孔隙压力从 49 MPa 上升至约为 129 MPa,最大超压约为 80 MPa(见图 11)。当侧向挤压位移开始施加在模型边界上时,孔隙压力迅速上升,1.0 Ma 后孔隙压力缓慢上升,在 4.8 Ma 时,孔隙压力稍有降低,可能与断背斜顶部储层孔隙度的增加有关。

当盐下层超压为 0 MPa 时,断背斜枢纽处的孔隙度为 19.95%,面应变为 -0.077 0。随盐下层超压逐渐上升,断背斜枢纽处的孔隙度和面应变有明显的升高趋势(见图 12)。在研究区压力因数范围(1.5~

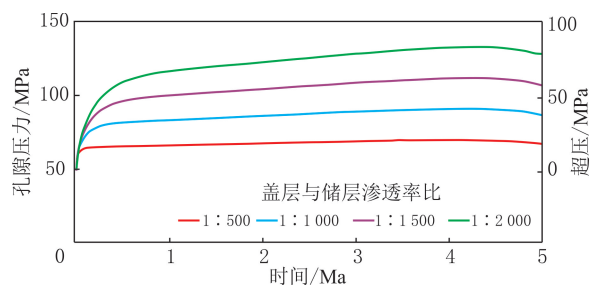


图 11 不同盖层与储层渗透率比时孔隙压力和超压演化

Fig. 11 Pressure evolution considering different permeability ratios of cap rocks to reservoir formations during the compression

2.0)^[40-41]内,盐下层断背斜枢纽处的孔隙度介于 17.20%~17.42%,面应变介于-0.0746~-0.0722。与超压为 0 MPa 时的孔隙度和面应变相比,构造挤压型超压形成 0.0025~0.0048 拉张面应变,保护孔隙度为 0.25%~0.47%的断背斜枢纽免受挤压应力破坏(见图 12(a))。盐下层断背斜后翼处的孔隙度介于 20.13%~20.38%,面应变介于-0.0755~-0.0732。与超压为 0 MPa 时的孔隙度和面应变相比,构造挤压型超压形成 0.0012~0.0035 拉张面应变,保护孔隙度为 0.18%~0.43%的断背斜后翼免受挤压应力破坏(见图 12(b))。晚期构造挤压作用形成的异常高流体压力对储层孔隙度的增加有限。

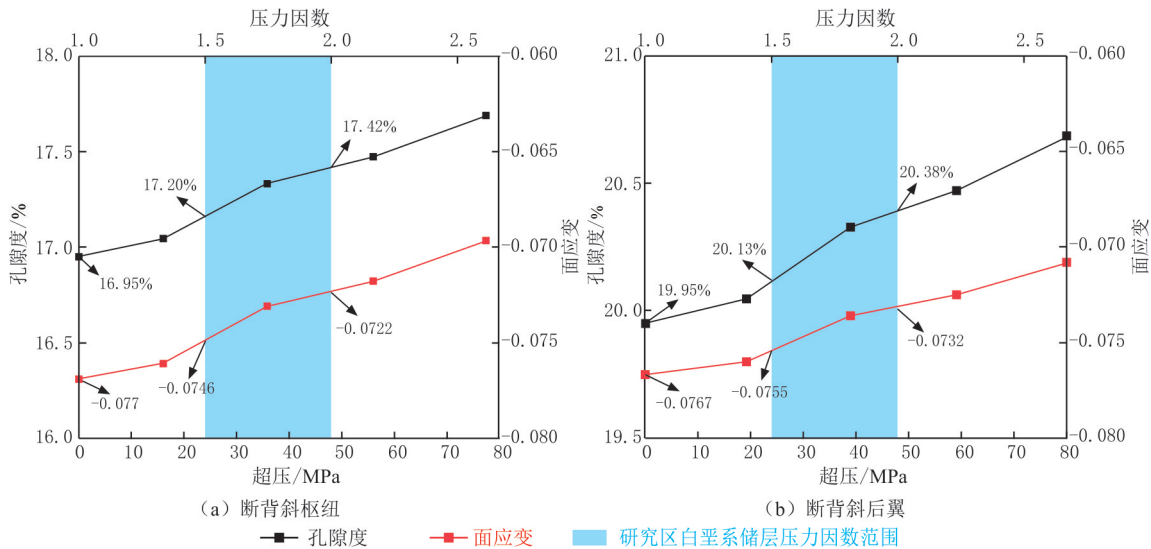


图 12 断背斜孔隙度、面应变与超压和压力因数的关系

Fig. 12 Relationships between porosity, plane strains and overpressure and pressure factor of fault-related anticlin

4.2 断背斜储层物性演化

断背斜不同位置处的储层孔隙度具有不同的演化过程,分别选取前翼、枢纽、后翼和远离断背斜 4 个典型位置,分析面应变、孔隙压力和孔隙度演化(见图 13)。在盖层与储层渗透率比为 1:1 000 时,4 个典型位置的孔隙压力演化曲线一致,在远离断背斜位置的孔隙压力略高于其他位置的(见图 13(b)),构造挤压引起的高异常孔隙压力对孔隙度的保护有限(见图 12)。面应变与孔隙度演化曲线具有相同的先降低后升高的演化趋势(见图 13(a-c)),压应变显著影响孔隙度分布(见图 8、图 10)。枢纽和后翼的孔隙演化虽然变形结束时压应变相同(见图 13(a)),但压应变演化路径不同。枢纽处更靠近逆断层,经历更强烈的压应变,即使晚期受外弧扩张作用使压应变降低,但枢纽处的储层孔隙度始终低于后翼处的(见图 13(c))。断背斜前翼与远离断背斜位置的压应变在挤压过程中持续降低。断背斜形成晚期(5.0~3.8 Ma),断背斜前翼的压应变高于远离断背斜的,但断背斜前翼的孔隙度始终低于远离断背斜的(见图 13(c))。不同位置压应变的路径对储层孔隙度的演化具有明显的控制作用。当储层在挤压变形过程中经历较强的压应变(断背斜前翼和枢纽)时,即便晚期压应变在外弧扩张作用下有所上升(断背斜枢纽和后翼),受侧向挤压作用损失的孔隙度不会完全恢复(断背斜前翼)。

4.3 断背斜储层孔隙度垂向演化

垂向上,随侧向挤压位移的增加,在挤压位移达到 2 000 m 时,断背斜没有完全隆起(见图 14),白垩系储层受均匀挤压应变作用影响,储层孔隙度整体均匀下降至 16%左右(见图 14(a)),侧向压实减孔量约为 5.7%(见图 14(b))。当挤压位移达到 3 000 m 时,断背斜隆起,外弧扩张作用抵消断背斜顶部(后翼和枢纽)部分挤压应变,储层孔隙度增加至 20%左右(见图 14(a))。内弧挤压作用降低断背斜底部孔隙度,断背斜内部孔隙度从断背斜顶部向底部逐渐降低。断背斜储层内部侧向压实减孔量最小约为 2%,主要位于断背斜枢纽和后翼;侧向压实减孔量最大约为 6%,主要位于储层埋深约为 400 m 处(见图 14)。

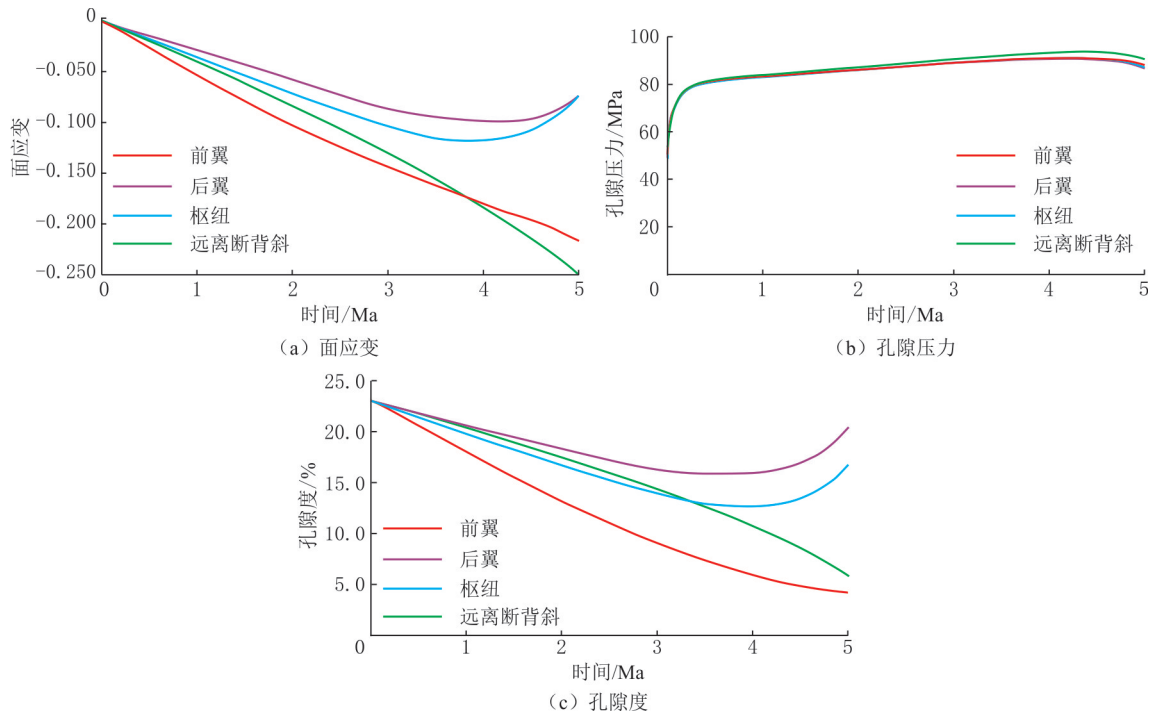
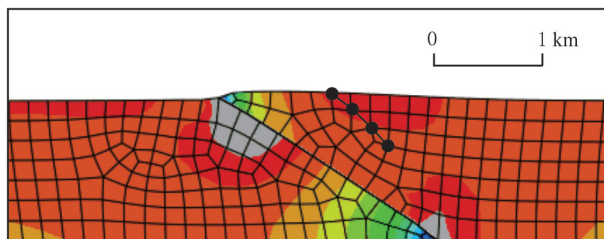
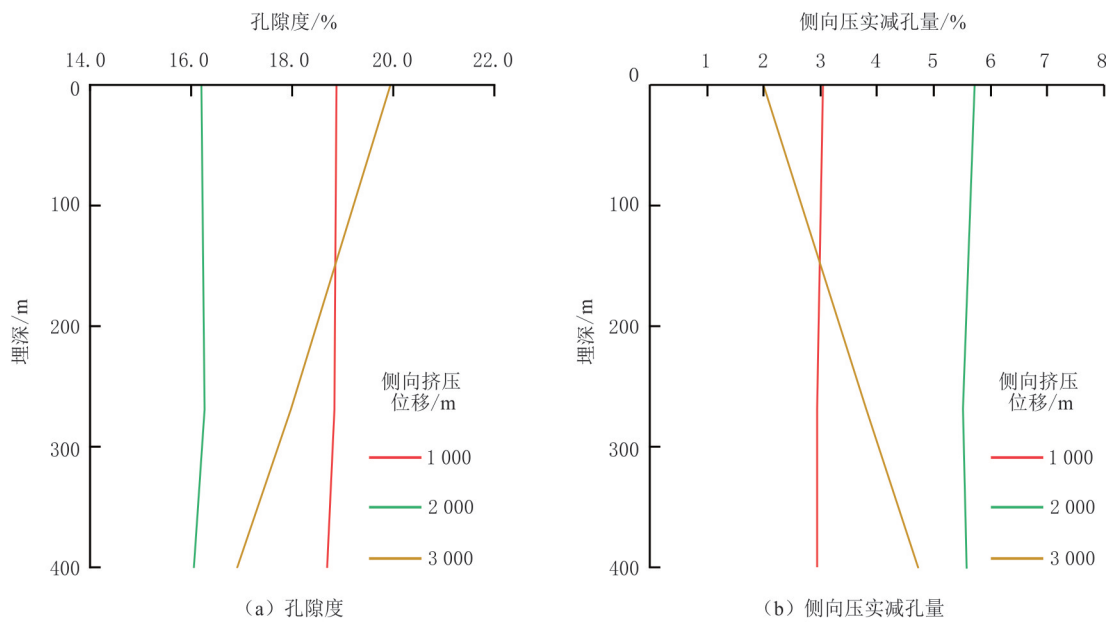


图 13 不同位置的断背斜面应变、孔隙压力和孔隙度演化

Fig. 13 Evolution of plane strains, pore pressure and porosity at different locations of the fault-related anticline



(i) 1000 m 挤压

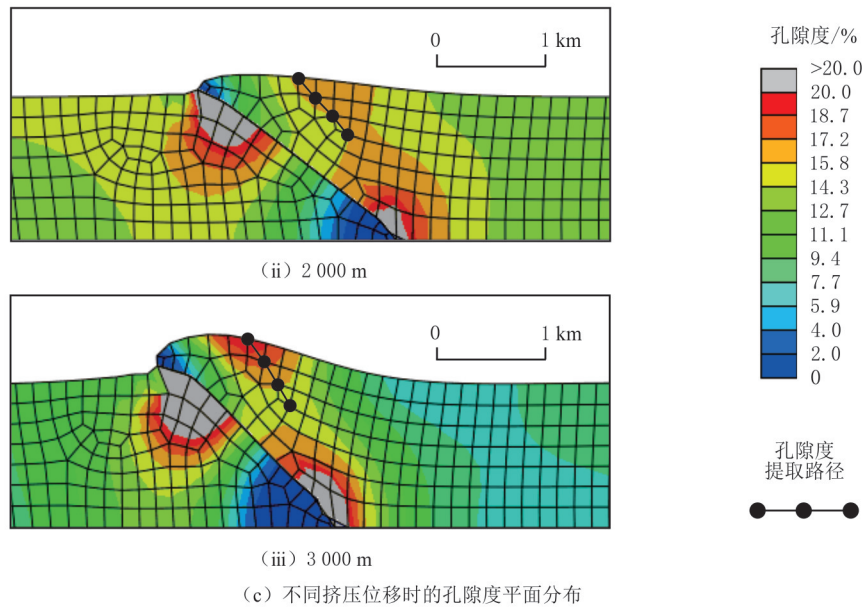


图 14 不同挤压位移时断背斜孔隙度垂向演化特征

Fig. 14 Vertical evolution of porosity on the fault-related anticline under different lateral displacement applied

5 结论

(1)对库车坳陷克拉苏构造带断背斜储层进行黏弹性流固耦合数值模拟,实现侧向挤压与流体流动的耦合过程,构造挤压作用使储层处于压应变状态,储层体积减小,孔隙度降低,形成构造挤压型超压。

(2)在断背斜形成过程中,研究区外弧扩张作用控制断背斜枢纽和后翼处高孔储层的形成和发育。构造变形是控制断背斜储层孔隙的主要因素,晚期构造挤压型超压对储层孔隙的保护作用有限。

(3)不同位置的断背斜储层压应变演化路径控制储层孔隙度演化。断背斜枢纽和后翼经历相同的应变演化路径,在变形结束后具有相同的应变,早期强压应变导致孔隙度快速下降,后期外弧扩张作用能够抵消部分压应变的影响,由早期侧向挤压作用损失的储层孔隙度不能完全恢复。

参考文献(References):

- [1] 漆家福,雷刚林,李明刚,等. 库车坳陷—南天山盆山过渡带的收缩构造变形模式[J]. 地学前缘,2009,16(3):120-128.
QI Jiafu, LEI Ganglin, LI Minggang, et al. A model of contractional structure for transition belt between Kuche Depression and Southern Tianshan Uplift[J]. Earth Science Frontiers, 2009,16(3):120-128.
- [2] 史玲玲,唐雁刚,汪斌,等. 库车坳陷克深5井区巴什基奇克组应力垂向分层特征[J]. 新疆石油地质,2016,37(4):430-435.
SHI Lingling, TANG Yangang, WANG Bin, et al. Characteristics of vertical zonation of Bashijigike Reservoir by stress intervals in wellblock Keshen-5 in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016,37(4):430-435.
- [3] 倪玲梅,李忠,郭春涛,等. 储层成岩流体系统特征及其影响:以塔里木盆地库车坳陷依奇克里克构造带阿合组为例[J]. 东北石油大学学报,2022,46(2):45-57.
NI Lingmei, LI Zhong, GUO Chuntao, et al. Properties of diagenetic fluid systems and their influences: taking Ahe Formation reservoir in Yigikelike Structural Belt of the Kuqa Depression Tarim Basin as an example[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022,46(2):45-57.
- [4] 罗富文,柳少波,卓勤功,等. 库车坳陷秋里塔格构造带中东段油气充注期次及成藏模式[J]. 东北石油大学学报,2024,48(1):26-38.
LUO Fuwen, LIU Shaobo, ZHUO Qingong, et al. Hydrocarbon charging stage and accumulation model in the middle-east section of Qiulitag Structural Belt, Kuqa Depression[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(1):26-38.
- [5] 田军,杨海军,吴超,等. 博孜9井的发现与塔里木盆地超深层天然气勘探潜力[J]. 天然气工业,2020,40(1):11-19.
TIAN Jun, YANG Haijun, WU Chao, et al. Discovery of well Bozi 9 and ultra-deep natural gas exploration potential in the Kelasu

- Tectonic Zone of the Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020,40(1):11-19.
- [6] 杨海军,李勇,唐雁刚,等.塔里木盆地克拉苏盐下深层大气田的发现[J]. *新疆石油地质*, 2019,40(1):12-20.
YANG Haijun, LI Yong, TANG Yangang, et al. Discovery of Kelasu subsalt deep large gas field, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019,40(1):12-20.
- [7] 周鹏,尹宏伟,周露,等.断背斜应变中和面张性段储层主控因素及预测方法:以克拉苏冲断带为例[J]. *大地构造与成矿*, 2018,42(1):50-59.
ZHOU Peng, YIN Hongwei, ZHOU Lu, et al. Reservoir controlling factor and forecast of tensional zone in geostain neutral plane of faulted anticline: example from Kelasu Fold-Thrust Belt[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2018,42(1):50-59.
- [8] SUN S, HOU G, ZHENG C. Fracture zones constrained by neutral surfaces in a fault-related fold: insights from the Kelasu Tectonic Zone, Kuqa Depression[J]. *Journal of Structural Geology*, 2017,104:112-124.
- [9] 韩登林,李忠,寿建峰.背斜构造不同部位储集层物性差异:以库车坳陷克拉2气田为例[J]. *石油勘探与开发*, 2011,38(3):282-286.
HAN Denglin, LI Zhong, SHOU Jianfeng. Reservoir property difference between structural positions in the anticline: a case study from Kela-2 Gas Field in the Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011,38(3):282-286.
- [10] FREHNER M. The neutral lines in buckle folds[J]. *Journal of Structural Geology*, 2011,33(10):1501-1508.
- [11] RAMSAY J. *Folding and fracturing of rocks*[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1967:1.
- [12] 史超群,王佐涛,朱文慧,等.塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带大北地区超深储层裂缝特征及其对储层控制作用[J]. *天然气地球科学*, 2020,31(12):1687-1699.
SHI Chaoqun, WANG Zuotao, ZHU Wenhui, et al. Fracture characteristic and its impact on reservoir quality of ultra-deep reservoir in Dabei Region, Kelasu Tectonic Belt, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020,31(12):1687-1699.
- [13] 毛亚昆,钟大康,李勇,等.构造挤压背景下深层砂岩压实分异特征:以塔里木盆地库车前陆冲断带白垩系储层为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017,38(6):1113-1122.
MAO Yakun, ZHONG Dakang, LI Yong, et al. Differential compaction of deep sandstones in compressive tectonic setting: a case study of Cretaceous reservoirs in Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017,38(6):1113-1122.
- [14] 杨宪彰,毛亚昆,钟大康,等.构造挤压对砂岩储层垂向分布差异的控制:以库车前陆冲断带白垩系巴什基奇克组为例[J]. *天然气地球科学*, 2016,27(4):591-599.
YANG Xianzhang, MAO Yakun, ZHONG Dakang, et al. Tectonic compression controls the vertical property variation of sandstone reservoir: an example of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016,27(4):591-599.
- [15] 周红波,刘永雷,刘军,等.克拉苏构造带褶皱中和面地质特征与纵向位置确定:以克拉苏构造带S构造为例[J]. *石油地质与工程*, 2016,30(3):69-72.
ZHOU Hongbo, LIU Yonglei, LIU Jun, et al. Determination of geological characteristics and longitudinal position of the neural plane in the Kelasu Tectonic Belt: a case from the S Structure of the Kelasu Tectonic Belt[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2016,30(3):69-72.
- [16] 罗晓容.构造应力超压机制的定量分析[J]. *地球物理学报*, 2004,47(6):1086-1093.
LUO Xiaorong. Quantitative analysis on overpressure mechanism resulted from tectonic stress[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004,47(6):1086-1093.
- [17] 赵靖舟,李军,徐泽阳.沉积盆地超压成因研究进展[J]. *石油学报*, 2017,38(9):973-998.
ZHAO Jingzhou, LI Jun, XU Zeyang. Advances in the origin of overpressures in sedimentary basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017,38(9):973-998.
- [18] 张凤奇,王震亮,钟红利,等.沉积盆地主要超压成因机制识别模式及贡献[J]. *天然气地球科学*, 2013,24(6):1151-1158.
ZHANG Fengqi, WANG Zhenliang, ZHONG Hongli, et al. Recognition model and contribution evaluation of main overpressure formation mechanisms in sedimentary basins[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013,24(6):1151-1158.
- [19] 曾联波,刘本明.塔里木盆地库车前陆逆冲带异常高压成因及其对油气成藏的影响[J]. *自然科学进展*, 2005,15(12):1485-1491.
ZENG Lianbo, LIU Benming. Causes of anomalous high pressure in the Kuqa foreland thrust zone in the Tarim Basin and its influence on hydrocarbon accumulation[J]. *Advances in Natural Sciences*, 2005,15(12):1485-1491.
- [20] OBRADORS-PRATS J, ROUAINIA M, APLIN A C, et al. Assessing the implications of tectonic compaction on pore pressure using a coupled geomechanical approach[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017,79:31-43.
- [21] BURGREN-CHAN B, MEISLING K E, GRAHAM S. Basin and petroleum system modelling of the East Coast Basin, New Zealand: a test of overpressure scenarios in a convergent margin[J]. *Basin Research*, 2015,28(4):536-567.
- [22] 管树巍,陈竹新,李本亮,等.再论库车克拉苏深部构造的性质与解释模型[J]. *石油勘探与开发*, 2010,37(5):531-536.

- GUAN Shuwei, CHEN Zhuxin, LI Benliang, et al. Discussions on the character and interpretation model of Kelasu deep structures in the Kuqa Area[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010,37(5):531-536.
- [23] 陈治军,刘洛夫,王伟力,等.塔中I号断裂带上奥陶统油气藏特征及主控因素[J].*石油勘探与开发*,2010,37(4):409-415.
CHEN Zhijun, LIU Luofu, WANG Weili, et al. Characteristics and controlling factors of the Upper Ordovician petroleum reservoirs in the Tazhong No.1 Fault Belt, Tarim Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010,37(4):409-415.
- [24] HUDLESTON P J, TREAGUS S H. Information from folds: a review[J]. *Journal of Structural Geology*, 2010,32(12):2042-2071.
- [25] 于璇,侯贵廷,能源,等.库车坳陷构造裂缝发育特征及分布规律[J].*高校地质学报*,2016,22(4):644-656.
YU Xuan, HOU Guiting, NENG Yuan, et al. Development and distribution characteristics of tectonic fractures in Kuqa Depression [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2016,22(4):644-656.
- [26] 胡建宁,能源,姜帅,等.克拉苏构造带博孜段古隆起及盐层对盐下冲断带的控制[J].*东北石油大学学报*,2023,47(4):57-69.
HU Jianning, NENG Yuan, JIANG Shuai, et al. The control of paleo-uplift and salt layer on subsalt thrust belt in Bozi Section of Kelasu Tectonic Belt[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2023,47(4):57-69.
- [27] 刘立炜,周慧,张承泽,等.库车坳陷克拉苏构造带协同变形机制及盆山耦合关系[J].*地质科学*,2022,57(1):61-72.
LIU Liwei, ZHOU Hui, ZHANG Chengze, et al. Synergistic deformation mechanisms and basin-mountain coupling of Kelasu Structural Belt in Kuqa Depression[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2022,57(1):61-72.
- [28] 肖建新,林畅松,刘景彦.塔里木盆地北部库车坳陷白垩系沉积古地理[J].*现代地质*,2005,19(2):253-260.
XIAO Jianxin, LIN Changsong, LIU Jingyan. Depositional palaeogeography of Cretaceous of Kuqa Depression in Northern Tarim Basin[J]. *Geoscience*, 2005,19(2):253-260.
- [29] 马玉杰,张荣虎,唐雁刚,等.塔里木盆地库车坳陷白垩系巴什基奇克组岩相古地理[J].*新疆石油地质*,2016,37(3):249-256.
MA Yujie, ZHANG Ronghu, TANG Yangang, et al. Lithofacies paleogeography of Cretaceous Bashijiqi Formation in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016,37(3):249-256.
- [30] 陈戈,黄智斌,张惠良,等.塔里木盆地库车坳陷白垩系巴什基奇克组物源精细分析[J].*天然气地球科学*,2012,23(6):1025-1033.
CHEN Ge, HUANG Zhibin, ZHAN Huiliang, et al. Provenance analysis of clastic rocks in the Cretaceous Bashijiqi Formation at Kuqa Depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012,23(6):1025-1033.
- [31] 蔡振忠,王健,莫涛,等.库车坳陷克拉苏构造带博孜段巴什基奇克组超深储层特征及成岩演化[J].*非常规油气*,2024,11(6):8-16.
CAI Zhenzhong, WANG Jian, MO Tao, et al. Characteristics and diagenesis evolution of ultradeep Bashijiqi Formation reservoir in Bozi Section of Kelasu Structural Belt, Kuqa Depression[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024,11(6):8-16.
- [32] 王珂,张荣虎,曾庆鲁,等.库车坳陷博孜—大北地区下白垩统深层—超深层储层特征及成因机制[J].*中国矿业大学学报*,2022,51(2):311-328.
WANG Ke, ZHANG Ronghu, ZENG Qinglu, et al. Characteristics and formation mechanism of Lower Cretaceous deep and ultradeep reservoir in Bozi-Dabei Area, Kuqa Depression[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022,51(2):311-328.
- [33] 何登发,周新源,杨海军,等.库车坳陷的地质结构及其对大油气田的控制作用[J].*大地构造与成矿学*,2009,33(1):19-32.
HE Dengfa, ZHOU Xinyuan, YANG Haijun, et al. Geological structure and its controls on giant oil and gas fields in Kuqa Depression, Tarim Basin: a clue from new shot seismic data[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009,33(1):19-32.
- [34] 谢会文,李勇,漆家福,等.库车坳陷中部构造分层差异变形特征和构造演化[J].*现代地质*,2012,26(4):682-690.
XIE Huiwen, LI Yong, QI Jiafu, et al. Differential structural deformation and tectonic evolution in the middle part of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Geoscience*, 2012,26(4):682-690.
- [35] 陈戈,赵继龙,张荣虎.库车前陆盆地白垩系构造演化与沉积响应[J].*地质学报*,2013,87(增刊1):185.
CHEN Ge, ZHAO Jilong, ZHANG Ronghu. Cretaceous tectonic evolution and sedimentary response in the Kuqa Foreland Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013,87(Supp.1):185.
- [36] 王珂,杨海军,李勇,等.塔里木盆地库车坳陷北部构造带地质特征与勘探潜力[J].*石油学报*,2021,42(7):885-905.
WANG Ke, YANG Haijun, LI Yong, et al. Geological characteristics and exploration potential of the northern tectonic belt of Kuqa Depression in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021,42(7):885-905.
- [37] XU Y, CAO Y, LIU C, et al. The history of transgressions during the Late Paleocene-Early Eocene in the Kuqa Depression, Tarim Basin: constraints from C-O-S-Sr isotopic geochemistry[J]. *Minerals*, 2020,10(9):834.
- [38] 李曰俊,杨海军,赵岩,等.南天山区域大地构造与演化[J].*大地构造与成矿学*,2009,33(1):94-104.
LI Yuejun, YANG Haijun, ZHAO Yan, et al. Tectonic framework and evolution of South Tianshan NW China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009,33(1):94-104.
- [39] JIN Z, YANG M, LU X, et al. The tectonics and petroleum system of the Qiulitagh fold and thrust belt, Northern Tarim Basin, NW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008,25(8):767-777.
- [40] 吴海,赵孟军,鲁雪松,等.膏盐岩层控藏机制研究进展[J].*地质科技情报*,2016,35(3):77-86.

- WU Hai, ZHAO Mengjun, LU Xuesong, et al. Research progress of hydrocarbon accumulation mechanism controlled by salt[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(3):77-86.
- [41] 王冰,邱楠生,王祥,等.库车坳陷克拉苏—依奇克里克构造带构造挤压型超压识别与计算[J]. *石油学报*, 2022, 43(8):1107-1121.
WANG Bing, QIU Nansheng, WANG Xiang, et al. Identification and calculation of tectonic compression overpressure of Kelasu-Yiqikelike Tectonic Belt in Kuqa Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(8):1107-1121.
- [42] 赵承锦,蒋有录,刘景东,等.基于正演与反演结合的孔隙度演化恢复方法:以川东北地区须家河组为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(6):708-723.
ZHAO Chengjin, JIANG Youlu, LIU Jingdong, et al. A recovery method of porosity evolution based on forward and inverse analyses: a case study of the tight sandstone of Xujiahe Formation, Northeast Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(6):708-723.
- [43] MCBRIDE E F, DIGGS T N. Compaction of Wilcox and Carrizo sandstones(Paleocene-Eocene) to 4 420 m, Texas Gulf Coast[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1991, 61(1):73-85.
- [44] ATHY L F. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks[J]. *AAPG Bulletin*, 1930, 14:1-24.
- [45] 李宝帅.库车坳陷克拉苏构造带深层致密砂岩气成藏机制[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(5):17-22.
LI Baoshuai. Accumulation mechanism of deep tight sandstone gas reservoir in Kelasu Structural Belt, Kuqa Depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(5):17-22.
- [46] 王阿瑞.库车坳陷白垩系超深层碎屑岩储层原生粒间孔隙保存机理[D].青岛:中国石油大学(华东), 2022:64.
WANG Arui. Preservation mechanism of primary intergranular pores of Cretaceous ultra-deep clastic reservoirs in the Kuqa Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2022:64.
- [47] 潘荣,朱筱敏,谈明轩,等.库车坳陷克拉苏冲断带深部巴什基奇克组致密储层孔隙演化定量研究[J]. *地学前缘*, 2018, 25(2):159-169.
PAN Rong, ZHU Xiaomin, TAN Mingxuan, et al. Quantitative research on porosity evolution of deep tight reservoir in the Bashijiqike Formation in Kelasu Structure Zone, Kuqa Depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2):159-169
- [48] 张荣虎,杨海军,王俊鹏,等.库车坳陷超深层低孔致密砂岩储层形成机制与油气勘探意义[J]. *石油学报*, 2014, 35(6):1057-1069.
ZHANG Ronghu, YANG Haijun, WANG Junpeng, et al. The formation mechanism and exploration significance of ultra-deep, low porosity and tight sandstone reservoirs in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(6):1057-1069.
- [49] JU W, ZHONG Y, LIANG Y, et al. Factors influencing fault-propagation folding in the Kuqa Depression: insights from geomechanical models[J]. *Journal of Structural Geology*, 2023, 168:104826.
- [50] LIU X, ECKERT A, CONNOLLY P, et al. Visco-elastic parasitic folding: influences on the resulting porosity distribution[J]. *Journal of Structural Geology*, 2020, 130:103892.
- [51] ECKERT A, CONNOLLY P, LIU X. Large-scale mechanical buckle fold development and the initiation of tensile fractures[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(11):4570-4587.
- [52] LIU X, ECKERT A, CONNOLLY P. Stress evolution during 3D single-layer visco-elastic buckle folding: implications for the initiation of fractures[J]. *Tectonophysics*, 2016, 679:140-155.
- [53] ECKERT A, LIU X, CONNOLLY P. Pore pressure evolution and fluid flow during visco-elastic single-layer buckle folding[J]. *Geofluids*, 2015, 16(2):231-248.
- [54] BIOT M A, WILLIS D G. The elastic coefficients of the theory of consolidation[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1957, 24(4):594-601.
- [55] KHALIFEH-SOLTANI A, ALAVI S A, GHASSEMI M R, et al. Geomechanical modelling of fault-propagation folds: estimating the influence of the internal friction angle and friction coefficient[J]. *Tectonophysics*, 2021, 815:228992.
- [56] SMART K J, FERRILL D A, MORRIS A P, et al. Geomechanical modeling of stress and strain evolution during contractional fault-related folding[J]. *Tectonophysics*, 2012, 576/577:171-196.
- [57] 张院成,邓飞.砂岩蠕变模型及参数演化规律[J]. *矿业研究与开发*, 2024, 44(3):136-142.
ZHANG Yuancheng, DENG Fei. Creep model and parameter evolution law of sandstone[J]. *Mining Research and Development*, 2024, 44(3):136-142.
- [58] 焦明,谢涛,张磊,等.巨厚盐膏岩蠕变特性实验研究[J]. *非常规油气*, 2019, 6(3):87-90.
JIAO Ming, XIE Tao, ZHANG Lei, et al. Experimental study on creep properties of thick salt-gypsum rock[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2019, 6(3):87-90.
- [59] DEUDÉ V, DORMIEUX L, MAGHOUS S, et al. Compaction process in sedimentary basins: the role of stiffness increase and hardening induced by large plastic strains[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004, 28(13):1279-1303.

(下转第70页)