

文章编号: 0253-2697(2023)08-1191-15 DOI:10.7623/syxb202308001

天山陆内冲断带构造动力控储效应与超深层规模储层

贾承造¹ 张荣虎² 魏国齐³ 王珂² 余朝丰² 曾庆鲁² 司学强²

(1. 中国石油天然气集团有限公司 北京 100724; 2. 中国石油杭州地质研究院 浙江杭州 310023; 3. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要:构造动力控制储层性质是陆内冲断带的重要特征,为了明确天山陆内冲断带在喜马拉雅期的构造逆冲推覆作用对超深层砂岩储层的成岩响应特征,开展了基于大量实验分析和多尺度成岩物理模拟的构造动力推覆岩石响应和规模储层成因模式研究。结果表明,天山冲断带在喜马拉雅期的逆冲推覆构造活动强烈,构造活动自盆缘向盆内逐渐减弱,在构造逆冲推覆挤压作用下砂岩主要有3种响应:压实减孔加深储层基质致密性、破裂裂缝增渗加剧储层非均质性、异常增压加大流体-岩石作用的有效性。大尺度构造推覆挤压效应的模拟表明:含膏盐地层在构造推覆作用下的岩石应力、应变集中区主要位于盐下冲断叠瓦带,向冲断前展带方向岩石受力明显减弱;含煤地层在构造推覆作用下的岩石应力、应变集中区主要位于叠瓦带的巨厚砂岩中,向推覆前展带应变明显减弱,其中,煤层及砂泥岩互层中的岩石应力、应变较弱,但褶皱构造发育明显;在高温超压条件下,有机酸沿裂缝网络的溶蚀作用增强,裂缝-孔隙-喉道的连通性明显增强。天山冲断带的超深层主要发育2种成因模式的规模储层。在万米埋深以内,强构造挤压区裂缝-孔隙型储层的孔隙度可达5%~8%,弱构造挤压区孔隙型储层的孔隙度可达7%~12%,有利勘探面积达 $3.76 \times 10^4 \text{ km}^2$,是近期超深层效益勘探值得重视的有利领域。

关键词:超深层;储层机制;构造动力;成岩响应;天山冲断带

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Reservoir-controlling effects of tectonic dynamics and ultra-deep reservoirs in Tianshan intracontinental thrust belt

Jia Chengzao¹ Zhang Ronghu² Wei Guoqi³ Wang Ke² Yu Chaofeng² Zeng Qinglu² Si Xueqiang²

(1. China National Petroleum Corporation Limited, Beijing 100724, China; 2. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Zhejiang Hangzhou 310023, China; 3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: The control of tectonic dynamics on reservoirs is one of the most critical factors for the development of intracontinental thrust belts. In order to clarify the impact of tectonic thrust nappe activity on the diagenetic response characteristics of ultra-deep sandstone reservoirs in intracontinental foreland thrust belt during the Himalayan period, a study was performed on rock responses to tectonic dynamics and the genetic model of large-scale reservoirs based on extensive experimental analysis and multi-scale diagenetic physical modeling. The results show that the thrust nappe tectonic activity of Tianshan thrust belt was strong during the Himalayan period, and gradually weakening from the basin margin to the interior basin. Under the action of tectonic compression, there are three main responses of sandstone: intensification of reservoir matrix densification due to compaction and porosity reduction, intensification of reservoir heterogeneity due to fracturing and permeability increase, and increased effectiveness of fluid-rock interactions due to abnormal pressurization. The modeling of large-scale tectonic nappe and compression effects shows the following characteristics. The rock stress and strain concentration areas of gypsum/salt-bearing strata under tectonic nappe activity are mainly located in the pre-salt imbricated thrust belt, and the rock stress is significantly weakened towards the thrust propagation belt. The rock stress and strain concentration areas of coal-bearing strata under tectonic nappe activity are mainly located in the ultra-thick sandstone of the imbricated belt, and the strain is obviously weakened towards the nappe propagation belt. In particular, the rock stress and strain in the interbeds of coal seam and sand-mudstone are weak, but the fold structure is well developed. Under high temperature and pressure, the dissolution of organic acids along the fracture network is enhanced, and the connectivity of fractures, pores, and throats is significantly enhanced. The ultra-deep strata of Tianshan thrust belt mainly develop large-scale reservoirs with two genetic models. Within the depth of 10 kilometers, the porosity of fracture-pore type reservoirs in strong tectonic compression areas can reach 5% to 8%, and the porosity of pore type reservoirs in weak tectonic compression areas can reach 7% to 12%. The favorable exploration area is $3.76 \times 10^4 \text{ km}^2$, which proves that this thrust belt is a favorable field worth paying attention to in recent efficient exploration of ultra-deep reservoirs.

Key words: ultra-deep strata; reservoir mechanism; tectonic dynamics; diagenetic response; Tianshan thrust belt

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金集成项目(No. U22B6002)、中国石油天然气股份有限公司基础性前瞻性科技重大专项(2023ZZ02)和中国石油天然气股份有限公司“十四五”前瞻性基础性科技重大项目(2021DJ0302)资助。

第一作者:贾承造,男,1948年3月生,1987年获南京大学博士学位,现为中国科学院院士,长期从事构造地质学、石油地质学研究和油气勘探工作。Email:jiacz@petrochina.com.cn

通信作者:张荣虎,男,1976年9月生,2013年获中国石油勘探开发研究院博士学位,现为中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师,主要从事西部盆地陆相沉积储层、成藏与油气地质综合研究工作。Email:zrh_hz@petrochina.com.cn

引用:贾承造,张荣虎,魏国齐,王珂,余朝丰,曾庆鲁,司学强.天山陆内冲断带构造动力控储效应与超深层规模储层[J].石油学报,2023,44(8):1191-1205.

Cite :JIA Chengzao,ZHANG Ronghu,WEI Guoqi,WANG Ke,YU Chaofeng,ZENG Qinglu,SI Xueqiang. Reservoir-controlling effects of tectonic dynamics and ultra-deep reservoirs in Tianshan intracontinental thrust belt[J]. Acta Petrolei Sinica,2023,44(8):1191-1205.

在沉积体(砂岩、碳酸盐岩和细粒岩)成孔、成储过程中,构造动力作用十分关键且影响极其复杂,主要表现在不同构造背景和不同性质的构造变形始终影响着沉积速率及其随后的渐序成岩作用。冲断带超深层构造在逆冲推覆作用下的挤压动力与砂岩储层性质的相互关系一直是学者们关注的前沿难题^[1-3]。国外学者认为,构造动力成岩作用主要研究变形作用和变形构造与沉积物化学变化之间的相互关系,并可用于研究和评价储层天然裂缝及孔隙度的演化过程^[4-6]。构造作用与成岩作用之间的相互关系在预测深部地层的流体行为和非常规深部储层油气资源的开发中越来越重要^[7-9]。中国学者认为,构造动力作用(包括构造变形时间、变形方式和变形强度)对沉积储层的成岩改造效应是多方面和不均匀的,例如,在前陆盆地冲断带中,水平构造挤压应力在盆地的一些部位会造成压实作用加强,而在另一些部位(如冲断构造或断层相关褶皱的转折端等部位)则由于岩石变形产生局部拉张或托举应力,上覆静岩压力压实作用的影响可能会减缓,从而有利于储层孔隙体积保存^[10-12]。在一些高孔隙的砂岩储层中,流体可以使岩石的韧性增强^[13]。当岩石受到水平构造挤压作用时,高孔隙砂岩并不一定以脆性破裂的方式产生破裂面,而可能在某些部位产生局部化变形,形成岩石颗粒变形条带,包括压缩条带、剪切条带和膨胀条带等,影响储层中流体活动及成岩作用的非均质性,进而影响储层的物性^[14-16]。在构造挤压(剪切或拉张)作用下形成的断层及其相关裂缝发育带,当深部(或地表)流体进入断裂破碎带后,随着压力和温度变化,含有矿物的热液流体将发生结晶作用,并逐渐形成沉淀,然后,断裂带中的充填物会发生压实、胶结等成岩作用,胶结断层核及其破碎带中的裂缝和断层角砾^[17-19],而溶蚀作用则可改造被方解石或石英等矿物胶结的断裂带,从而影响断裂带的渗透性和封闭性。对这样的构造成岩作用开展研究可为断层的封闭性评价及其演变规律分析提供理论依据^[13,20]。储层构造动力成岩作用研究的关键主要在于厘清3个核心关系:构造成岩作用与储层致密化/裂缝化的关系、构造成岩作用与流体-岩石相互作用的耦合关系、构造成岩作用与储层断层带/裂缝带的关系^[13,20]。研究含油气盆地储层在形成演化过程中的构造作用和成岩作用及其相互关系,既可以阐明构造动力成岩作用对储层

形成演化的控制,又可以为有利碳酸盐岩储层、低孔高渗砂岩储层、规模优质砂岩储层的形成机理提供地质理论基础^[13]。

针对冲断带的构造逆冲推覆活动对砂岩储层的改造效应,需要融合成岩作用的全过程和关键要素,开展储层微观结构表征和数值模拟、物理模拟方面的综合研究。笔者着眼于天山冲断带超深层白垩系和侏罗系储层的强非均质性和复杂演化过程,聚焦喜马拉雅期的构造逆冲推覆作用及其对砂岩储层的关键控制作用,从生产实践、实验分析和物理模拟3个角度讨论了构造挤压对超深层储层的成岩作用效应及其对油气勘探的地质意义。

1 地质概况

1.1 沉积演化及储-盖组合特征

库车和淮南(准噶尔盆地南缘)前陆冲断带虽然位于两个不同的古板块边缘,被天山分隔(图1),但其主要含油气层系(中生界—新生界)的构造演化与构造变形特征均受到陆内构造和天山隆升作用控制,具有可对比性^[21-23]。喜马拉雅期,受环青藏高原巨型盆山体构造域控制和天山造山带构造复活影响,天山南、北缘均发育以水平挤压作用为主的前陆冲断带^[24-26]。中生代—新生代,欧亚大陆南侧羌塘板块、拉萨地体、科希斯坦板块和印度板块向北的依次拼合与碰撞影响着天山的形成、活动与隆升,而天山的活动则控制了其两侧沉积盆地的构造演化与沉积充填过程^[27-29]。

二叠纪及其以前,受天山南、北两侧残余洋盆影响,地层差异相对明显,库车坳陷发育火山岩,淮南地区则沉积上二叠统芦草沟组 and 红雁池组海相泥页岩。三叠纪以来,受造山隆升影响,天山南、北两侧均接受了来自天山的物源,沉积了陆源碎屑岩,其中,库车坳陷的下三叠统俄霍布拉克组和淮南地区的下三叠统上苍房沟群均以发育砂砾岩沉积为主,且随着天山构造带活动的减弱,库车坳陷的克拉玛依组、黄山街组、塔里奇克组和淮南地区的小泉沟组均沉积了构造宁静期的深湖亚相泥页岩和沼泽相煤系岩层。早—中侏罗世,受特提斯北缘盆地群区域伸展构造作用影响,库车坳陷的阿合组、阳霞组、克孜勒努尔组和淮南地区的八道湾组、三工河组、西山窑组均沉积了相似的煤系地层;随后,受拉萨地体碰撞影响,天山造山带再次隆升,

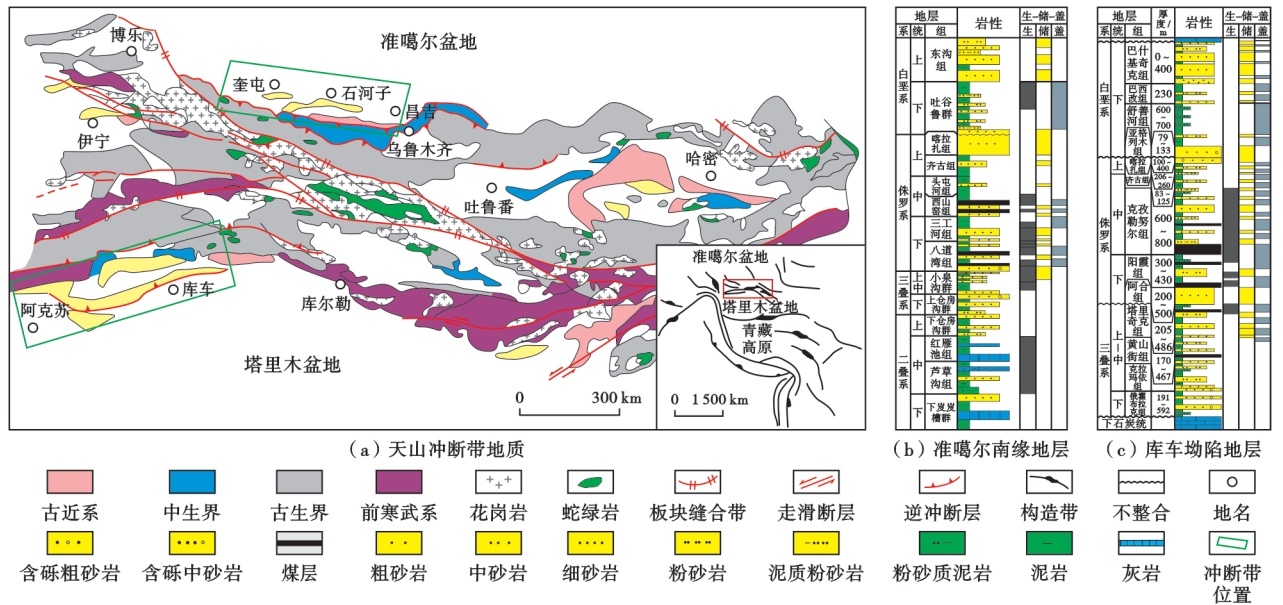


图 1 天山冲断带中生界—新生界地质特征

Fig. 1 Mesozoic-Cenozoic geological characteristics of Tianshan thrust belt

其南、北两侧沉积了上侏罗统喀拉扎组“城墙砾岩”，并随着沉积间断或地层剥蚀的出现，导致侏罗系与白垩系呈不整合接触。白垩纪，整个中国西部趋于构造应力松弛阶段，盆地沉积上发育砾岩、砂岩和泥岩互层；晚白垩纪，受科希斯坦板块碰撞影响，天山及其两侧盆地隆升，出现砂砾岩沉积、沉积间断或地层剥蚀。古近纪，受古特提斯洋盆关闭影响，天山造山带在隆升后其南、北两侧开始接受粗粒沉积，随后进入构造宁静期，天山南缘的库车坳陷受来自塔西南地区的海水侵入影响，坳陷内沉积了巨厚的库姆格列木组、苏维依组和吉迪克组膏盐岩和砂泥岩地层，而北缘的淮南地区则以发育湖相含膏泥岩沉积为特色。随着天山造山带在印度板块碰撞的远距离效应作用下再次复活，粗粒沉积物堆积在天山两侧，水平挤压的构造变形向天山两侧的沉积盆地内传播，发育出前陆冲断带。

天山构造带自晚古生代以来的构造活动控制其两侧盆地的沉积和构造演化，以上二叠统至中—上三叠统发育粗碎屑红色类磨拉石建造、上三叠统一侏罗系发育灰色含煤地层、白垩系发育红色碎屑岩、古近系—新近系发育红色膏盐岩或含膏泥岩、第四系发育现代堆积物为显著特征，并具有可对比性。库车坳陷的三叠系黄山街组和中—下侏罗统克孜勒努尔组、阳霞组，淮南地区的上二叠统芦草沟组和红雁池组、上三叠统黄山街组、下侏罗统八道湾组和三工河组、中侏罗统西山窑组、古近系安集海河组都是较好的烃源岩，以湖相泥岩和煤系为主。天山南、北缘烃源岩的有机质丰度和成熟度基本一致，其中，天山北缘的生油层系多于南缘^[30-31]。

库车冲断带的超深层发育 2 套区域上稳定分布的储-盖组合：①侏罗系阿合组砂岩与阳霞组煤系泥岩、克孜勒努尔组—阳霞组砂岩与恰克马克组泥岩储-盖组合；②白垩系巴什基奇克组砂岩与古近系膏盐岩储-盖组合^[32-33]。淮南冲断带的超深层同样存在 2 套良好的储-盖组合：①苍房沟群砂砾岩与上三叠统小泉沟组储-盖组合；②中—上侏罗统砂岩与下白垩统吐谷鲁群泥岩储-盖组合^[34-36]。天山南、北缘的三叠系—侏罗系煤系地层和古近系膏盐岩或含膏泥岩分别是烃源岩和区域盖层，其在新世代水平挤压构造应力作用下同时也是传递构造变形的主要滑脱层，这些在地质力学性质上表现为软弱层或塑性的地层会将挤压构造应变从天山隆起区向其两侧的沉积盆地内传播^[37-39]。

1.2 喜马拉雅期的构造活动特征

天山南、北两侧新生代前陆冲断带构造变形的启动时间从造山带向克拉通方向依次变新，但由于受天山构造带岩石圈相对塑性影响^[40]，导致被印度—欧亚板块碰撞控制的陆内构造应变在穿越天山向北传递时具有一定的滞后效应，淮南地区构造变形的启动时间整体上比库车坳陷晚。这种构造变形启动时间的差异是印度—欧亚板块碰撞远距离效应向北传播的体现，也是天山陆内造山带形成过程的真实反映^[40]。中新世(距今 25 Ma)以来，天山构造带受陆内造山作用制约，在南缘冲断构造形成第 1 排构造带。此后，随着印度—欧亚板块碰撞挤压作用的持续，构造应力和变形持续向北传播，南缘依次形成多个前陆褶皱冲断带。在距今 10 Ma 前后，天山北缘前陆冲断构造带启动变形，第 1 排构造带开始发育，随后发育了第 2 排与第 3

排构造带。

天山的隆升导致水平挤压构造变形向两侧传播,构造变形首先集中在山前,形成冲断隆升,其指向克拉通盆地的水平挤压应力加大。根据库仑-摩尔破裂准则,由于地层介质的内摩擦角不同,构造变形主要通过库车、淮南前陆冲断带中主要的滑脱面从造山带向克拉通内部传播。天山两侧的上三叠统、中一下侏罗统都具有煤系滑脱层,其中,库车地区还包含另一套主要的滑脱层,即古近系库姆格列木组(库车坳陷中西部)或新近系吉迪克组(库车坳陷东部)的膏盐层,淮南地区除了对应发育古近系紫泥泉子组和安集海河组膏质泥岩外,还存在白垩系泥岩滑脱层。天山南缘的构造变形从山前向盆内逐渐减弱,向盆地方向,深部的滑脱断层逐渐抬升并进入煤系地层和古近系膏盐层,由此发育多个切过中生界的逆冲断层,形成多个薄皮逆冲岩片,但变形强度减弱。库车坳陷的深部冲断构造由北向南表现出断层的断距减小、产状变缓、地层褶皱和抬升幅度减弱的特征,这反映构造变形在由北向南的发育过程中变形强度逐渐降低。在天山北缘,有6.6 km的水平构造位移量通过齐古南楔形构造、齐古楔形断层传播褶皱和吐谷鲁浅层断层传播褶皱吸收;对于深部通过中生界煤系地层向准噶尔盆地内部传播的8.4 km水平构造位移量,一部分通过断层转折形成的背斜(东湾背斜深部、吐谷鲁深部、吐北背斜)吸收,另一部分则通过向南反冲的楔形构造吸收,并与浅部沿古近系膏盐层滑脱层冲断的吐谷鲁断层传播褶皱合并消减^[22]。

1.3 逆冲推覆挤压的古应力特征

喜马拉雅期为天山隆起造山期,强烈的逆冲推覆

活动产生巨大的侧向构造挤压应力,其最大古应力值通过岩石声发射法的 Kaiser 效应获取,其与岩石性质和裂缝密度等具有良好的相关性^[12]。对天山南、北两侧地区60余块露头的定向样品(尺寸为30 cm×30 cm×30 cm)和岩心(尺寸为直径10 cm、长度10 cm)开展声发射法古应力测试(由四川大学岩土工程四川省重点实验室完成),结合测井的定量最大有效古应力计算表明:库车坳陷库车河地区侏罗系阿合组所受的最大有效古应力为60~120 MPa,最大可达142 MPa;迪北地区侏罗系阿合组所受的最大有效古应力一般为60~90 MPa;吐格尔明地区侏罗系阿合组所受的最大有效古应力一般为30~90 MPa。最大有效古应力总体呈EW向带状展布,自北向南减弱降低的趋势明显,其中,吐格尔明地区受基底卷入的古隆起遮挡,背斜北翼侏罗系中的最大有效古应力明显比南翼高,二者相差约30~60 MPa。库车坳陷克拉构造带白垩系巴什基奇克组的最大有效古应力一般为50~85 MPa,自北向南递减明显,至博孜9构造带为20~30 MPa,中秋一东秋构造带为30~40 MPa,库车南斜坡地区为10~20 MPa(图2)。淮南地区EW向的喜马拉雅期构造挤压最大有效古应力的差异较大,主要分布在齐古断裂带和呼图壁背斜区两个强烈挤压区。在淮南地区的中西段,最大有效古应力在四棵树凹陷高泉背斜区一般为15~30 MPa,在齐古断褶带一般为20~130 MPa,其中,最大有效古应力在强烈挤压的齐古背斜区为70~125 MPa,在呼图壁背斜区为40~100 MPa,在昌吉背斜一喀拉扎背斜区为20~35 MPa,在头屯河地区为33 MPa。

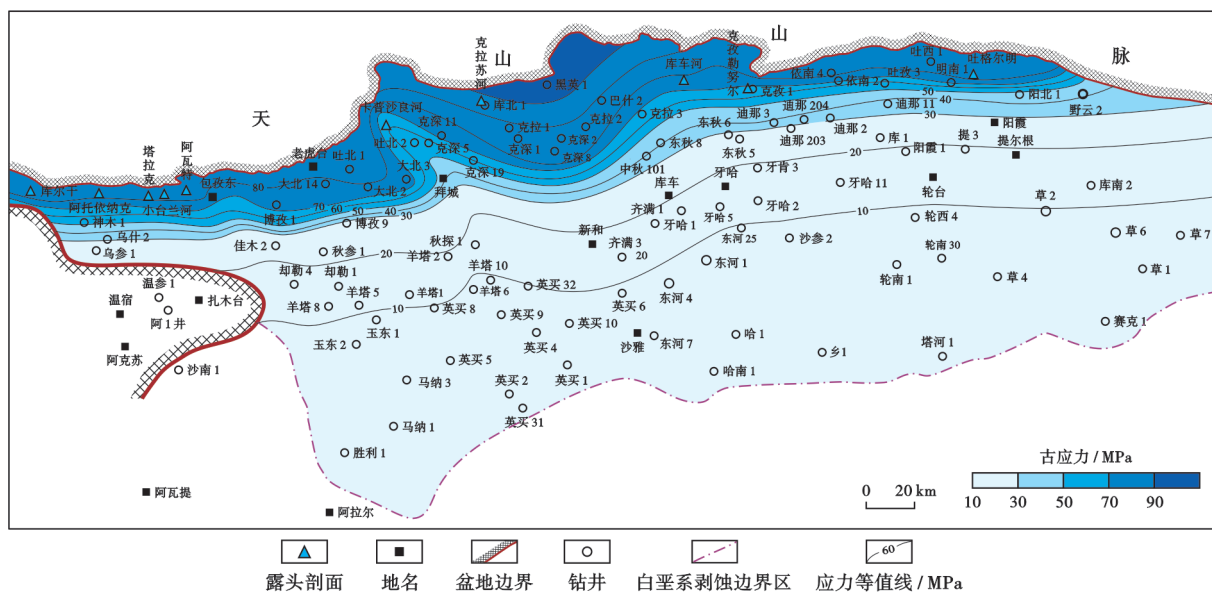


图2 库车坳陷白垩系巴什基奇克组最大有效构造古应力分布

Fig. 2 Distribution of maximum effective tectonic paleostress of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa depression

2 构造动力挤压的储层响应特征

对天山冲断带砂岩的储层性质进行表征显示,在埋藏成岩的中—晚期,砂岩受构造动力挤压作用影响,主要有3方面的显著响应特征:①基质孔隙减小/喉道变窄,加深了岩石储层致密化;②岩石破裂处发育高渗带,加剧了储层结构的强非均质性;③地层流体异常增压,加速了流体—岩石相互作用,形成缝网溶蚀带和胶结充填带。

2.1 构造逆冲推覆的侧向压实造成减孔作用,加深了储层基质致密性

天山冲断带在喜马拉雅期的构造逆冲推覆挤压造成冲断带内侏罗系、白垩系储层的基质孔隙快速降低,残余粒间孔大量消失,孔隙喉道急剧变窄甚至消失,这加深了储层基质致密化。构造古应力、埋藏压实减孔、储层物性、微观结构的综合分析表明:库车坳陷侏罗系阿合组中粗砂岩的构造减孔量计算式为 $\phi_s = 0.9529 \exp(0.0257S)^{[14]}$;库车坳陷白垩系巴什基奇克组中砂—细砂岩的构造减孔量计算式为 $\phi_s = 3.539 \ln S - 7.5247^{[20]}$;淮南侏罗系中砂—细砂岩的孔隙度与最大有效古应力的关系为 $\phi_s = 28.96 \exp(-0.013S)$ (图3)。从盆缘的天山冲断带向盆内,伴随着多级逆冲断裂的错断释压、膏盐岩或膏泥岩的滑脱消压、古隆起基底岩层的遮挡削弱,构造挤压应力逐渐减弱,储层的基质孔隙逐渐得到保存。

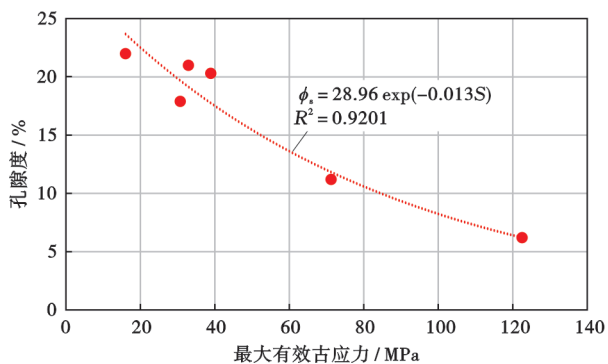


图3 准噶尔盆地南缘侏罗系储层孔隙度与最大古构造应力关系

Fig. 3 Correlation of Jurassic reservoir porosity and maximum tectonic paleostress in the southern margin of Junggar Basin

2.2 构造挤压的破裂造缝作用导致增渗,加剧了储层结构的强非均质性

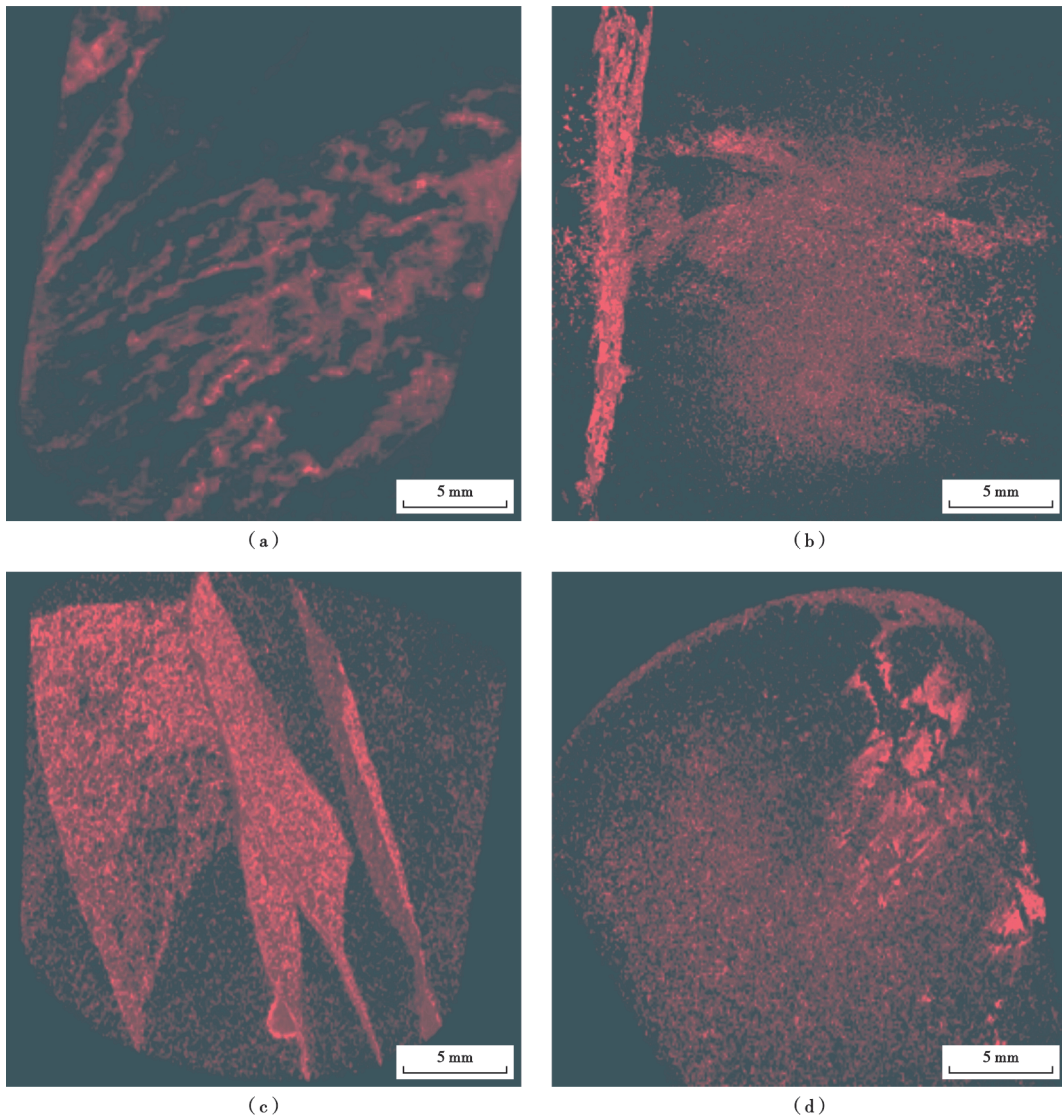
逆冲推覆构造的挤压作用致使天山冲断带的中生界砂岩储层形成大量颗粒贯穿缝、线性排列缝、

颗粒破碎缝。在库车河地区侏罗系阿合组中,裂缝的线密度一般在6~8条/m;在吐格爾明地区背斜北翼阿合组中,构造裂缝的线密度约为3.3条/m;在迪北地区阿合组中,构造裂缝的线密度一般低于0.7条/m,平均约为0.2条/m。在淮南冲断带和斜坡带的侏罗系—白垩系储层中,裂缝密度呈规律性降低,第1排构造带齐古3井的裂缝线密度为1.60条/m,第2排构造带乐探1井的裂缝线密度为0.94条/m,第3排构造带呼探1井的裂缝线密度为0.80条/m,北部斜坡带芳草1井不发育高角度裂缝,仅见少量顺层缝^[41]。

对库车坳陷克深气田白垩系巴什基奇克组的储层物性和微观结构资料分析表明:裂缝连通呈网状,将储层基质的渗透率提高了10~100倍;岩石基质的孔隙度、渗透率分别为5%~8%、0.1~1.0 mD;含裂缝岩石的孔隙度为7%~8%,渗透率为1~100 mD、最高可达2667.28 mD。裂缝的发育往往具有选择性,主要受控于砂岩的矿物成分及岩性、应力大小及方向、构造样式及断裂距离等,不同尺度和产状的裂缝与储层基质沟通,大大增强了储层的非均质性,也影响着储层各向渗透率的大小,尤其是在顺缝和垂缝方向,储层的渗流能力差异很大(图4)。

2.3 构造逆冲推覆活动形成异常增压,加大了地层流体—岩石相互作用的有效性

喜马拉雅晚期,天山因强烈隆升而产生强烈的侧向构造挤压作用,致使岩石应变特征明显,地层流体由此在构造背斜、断背斜和斜坡背景上形成砂岩压力封存箱,形成流体超压。天山冲断带中生界的钻井实测数据表明:库车坳陷迪北地区侏罗系阿合组的地层流体压力系数为1.73~1.78,吐格爾明地区背斜低部位侏罗系阿合组的地层流体压力系数为1.1~1.6,克拉苏—秋里塔格构造带白垩系巴什基奇克组的地层流体压力系数为1.6~2.3,淮南地区侏罗系的地层流体压力系数普遍大于2.0,一般在2.1~2.3(图5、图6)。在强构造挤压背景下,富含碳酸盐的地层流体、煤系地层在演化过程中的酸性流体会沿着岩石裂缝网络形成高效的沟通空间,其在深埋的高温超压条件下将更有利于次生孔隙的形成和原生孔隙的保存。根据库车坳陷迪北地区600余块岩石薄片和微观结构扫描资料分析表明:在高温超压条件下,碳酸盐类的溶解度提高,趋于欠饱和,基质孔隙中的沉淀胶结作用减弱,酸性地层水的溶蚀作用增强,缝网系统的连通性更好,沿裂缝的网络系统及颗粒粒间的溶蚀作用更加活跃,显微镜下可见大量溶蚀缝、溶扩缝和缝孔溶蚀带(图7)。



(a) 储层非均质性增强,发育基质和网状裂缝双重介质,红色为网状缝及孔隙,X射线扫描,分辨率为 $25\ \mu\text{m}$,克深 8003 井 6 778.76 m;(b)网状+垂向开启缝密集,储层非均质性增强,红色为网状缝及孔隙,X射线扫描,分辨率为 $25\ \mu\text{m}$,克深 8-1 井 6 870.00 m;(c)高角度裂缝沟通基质孔隙,非均质性增强,红色为网状缝及孔隙,X射线扫描,分辨率为 $25\ \mu\text{m}$,克深 6 井 5 620.46 m;(d)半充填高角度裂缝沟通基质孔隙,非均质性增强,红色为裂缝及孔隙,X射线扫描,分辨率为 $25\ \mu\text{m}$,克深 208 井 6 605.21 m。

图 4 库车坳陷克深气田白垩系巴什基组储层裂缝及基质孔隙的工业 CT 扫描图像

Fig. 4 Industrial CT scanning images of reservoir fractures and matrix pores in Cretaceous Bashiji Formation of Kesheng gas field, Kuqa depression

3 构造动力成储效应的物理模拟

3.1 含盐地层逆冲推覆构造内储层岩石的应力、应变响应

中国石油天然气集团有限公司油藏描述重点实验室的“三维动态构造控藏物理模拟实验平台”是将“构造变形与油气充注物理模拟实验”结合为一体的构造物理模拟实验装置,该装置通过引入高精度工业 CT 技术,实现了实验过程的三维数据成像,实现了对构造变形、模型内部结构变化和流体运聚全过程的实时动

态检测,可揭示复杂构造变形过程及其控藏机理。依托该物理模拟平台,笔者构建了库车坳陷博孜一大北冲断带白垩系—古近系含盐地层在构造逆冲推覆作用下巨厚砂岩储层的应力、应变物理模型。以博孜一大北地区为地质背景,实钻证实,其在横向上构造样式的差异分三段,从冲断抬升带、冲断叠置带到冲断前展带,构造样式的形成期次依次渐晚,构造应力依次减弱,储层流体的压力系数逐渐降低,储层性质相对变好,其中,冲断叠瓦带(深层—超深层区)的构造裂缝最发育,冲断前展带(深凹区)的裂缝相对不发育,冲断抬

升带(浅—中层区)的裂缝较发育。在构造挤压相关的储层应力、应变物理模拟实验中,材料上用石英砂(红色、黄色、蓝色、白色)代表巨厚砂岩地层,用硅胶(黑色)代表膏盐岩地层,在施加单向逆冲挤压作用下,开展了粒子图像测速法(PIV)的速度场和应变场数值模拟,结果表明:在冲断叠瓦带岩石的应变、应力较大,呈集中发育特征;从构造变形的山前带至叠瓦带再至前展带,岩石受到的应力、应变具有明显减弱的趋势,在推覆前展带最弱,总体呈现规律性变化(图 8)。

3.2 含煤地层逆冲推覆构造内储层的应力应变响应

依托中国石油天然气集团有限公司油藏描述重点实验室的“三维动态构造控藏物理模拟实验平台”,笔者构建了库车坳陷侏罗系含煤地层在构造逆冲推覆作用下巨厚砂岩、砂泥岩互层储层的应力、应变物理模型。以迪北冲断带为地质背景,实钻证实,其在横向上

的构造样式表现为逆冲背斜及其斜坡带,自北向南,构造的形成期次依次渐晚,构造应力依次减弱,储层性质相对变好,砂岩、泥岩和煤层呈互层状(阳霞组—克孜勒努尔组),岩石所受的构造挤压应力相对较弱,巨厚层砂岩段(阿合组)所受的构造挤压应力强。实验模拟在材料上用 3 层石英砂分别代表巨厚砂岩地层(2 层,分别为灰红色和灰青色)和薄层砂岩地层(1 层,灰红色),用 3 层硅胶(黑色)分别代表煤层和泥岩滑脱地层。结果表明:在单向逆冲挤压作用下,煤层间的厚层砂岩会在应力作用下变形,发育宽缓背斜和断背斜,岩石骨架主体承受应力载荷,自山前抬升斜坡带到冲断叠置带再向盆地内部,推覆前展带的应变、应力明显减弱,总体呈规律性变化[图 9(a)]。煤层与砂泥岩互层中的薄层砂岩遭受构造逆冲推覆作用,自山前抬升带到冲断叠置带,沿滑脱层形成系列窄陡背斜,薄层砂岩

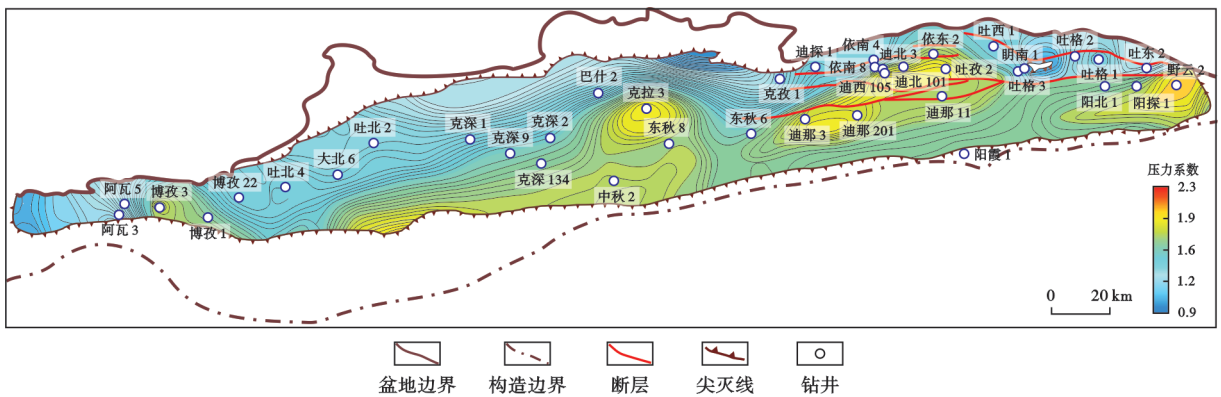


图 5 库车坳陷侏罗系阿合组储层现今的压力系数分布

Fig. 5 Present pressure coefficient distribution of Jurassic Ahe Formation reservoir in Kuqa depression

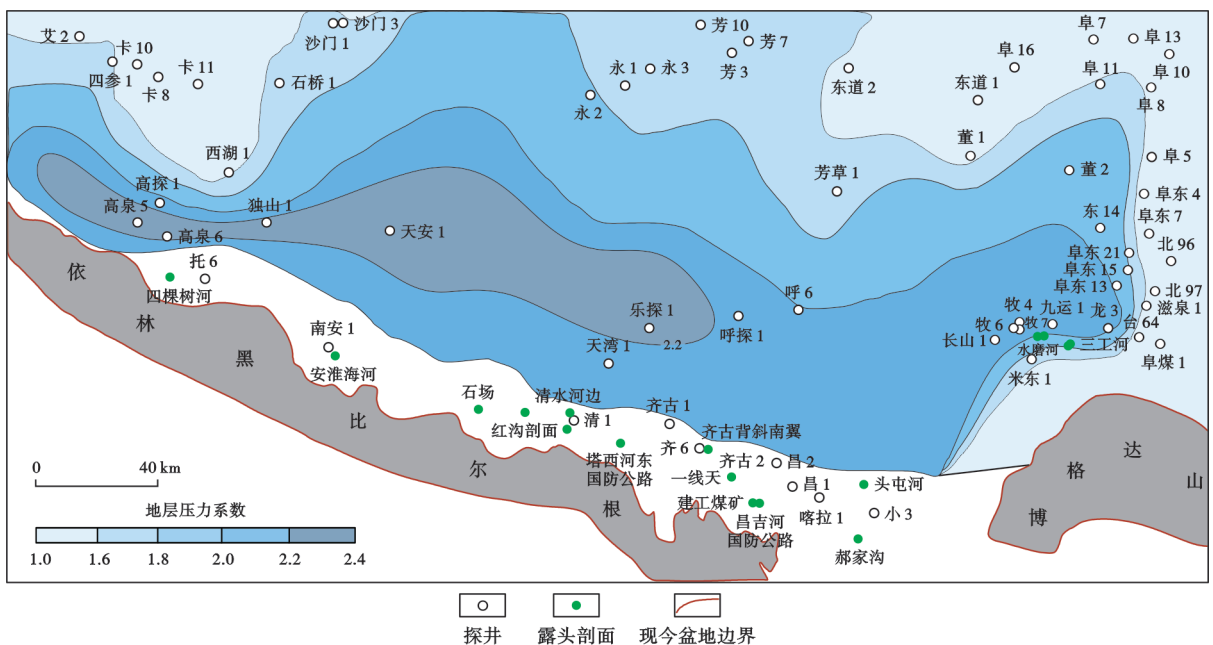
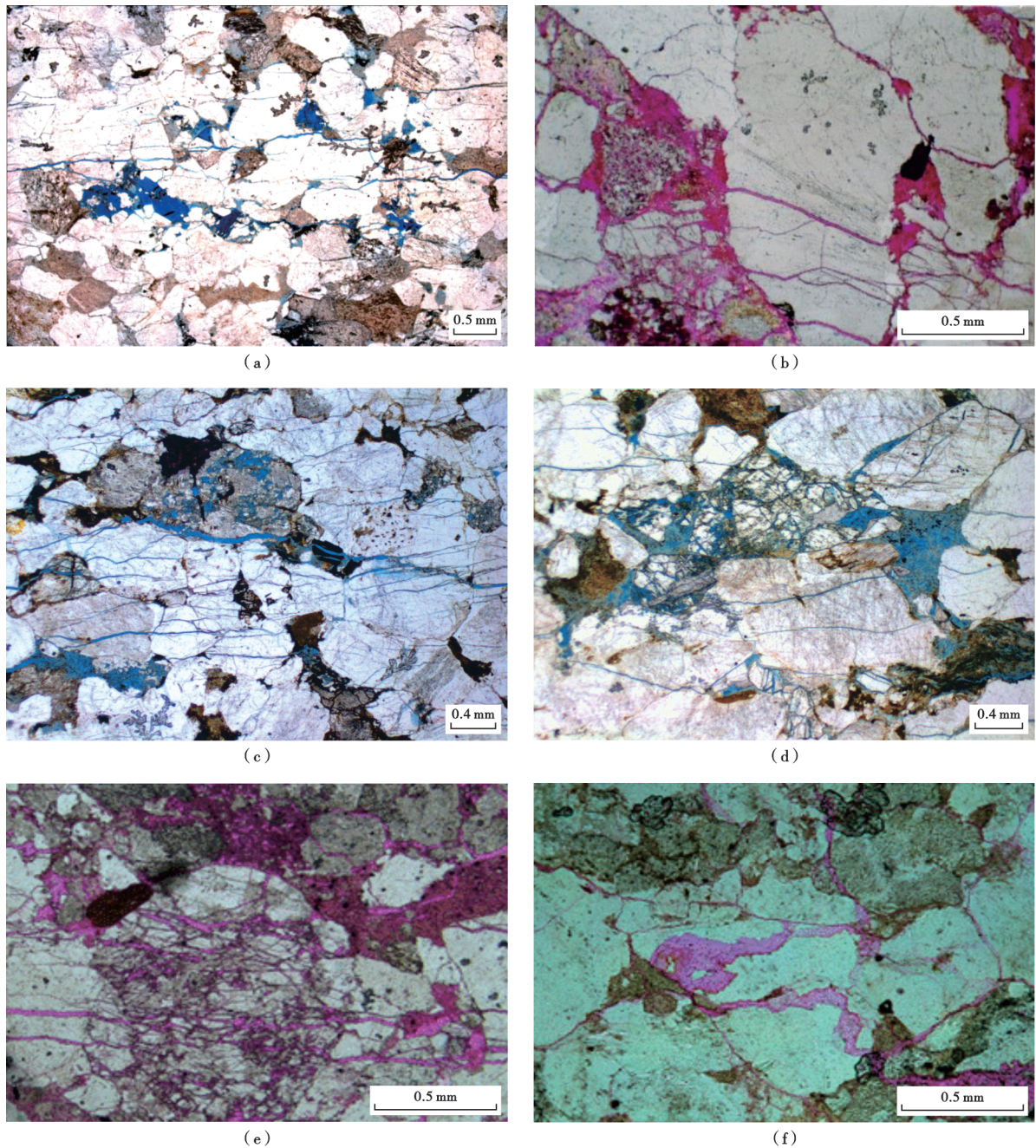


图 6 准噶尔盆地南缘侏罗系顶部地层压力系数分布

Fig. 6 Distribution of formation pressure coefficient at the top of Jurassic in the southern margin of Junggar Basin



(a)粒间孔、粒内溶孔与缝相连通,孔隙度为9.43%,渗透率为5.42 mD,迪北105X井4764.18 m;(b)含砾粗砂岩,以微孔隙为主,次为粒内溶孔、粒缘溶孔和粒间溶孔,微孔隙在伊利石和高岭石中,孔隙度为11.87%,渗透率为9.57 mD,依南4井4377.14 m;(c)定向构造缝、粒间孔,裂缝沟通粒间孔促进溶蚀扩大,孔隙度为11.58%,渗透率为9.46 mD,阳探1井7790.54 m;(d)铁泥质充填裂缝,沿裂缝有选择性溶蚀,溶孔呈串珠状,依南2井4702.20 m;(e)微裂缝极其发育,沿裂缝形成溶蚀扩大孔,依南5井4938.34 m;(f)发育斜交的构造微裂缝,迪北102-167井5146.35 m。

图7 库车坳陷东部侏罗系阿合组含裂缝岩石的微观特征

Fig. 7 Microscopic characteristics of fractured rocks in Jurassic Ahe Formation, eastern Kuqa depression

的岩石内部承受的应力、应变较强,而向盆地内,推覆前展带所受的应力、应变明显减弱[图9(b)]。

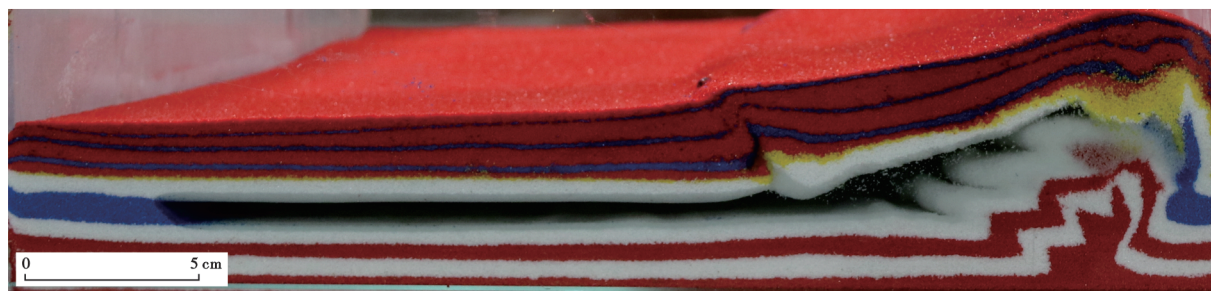
3.3 高温超压储层缝网系统的流体—岩石相互作用响应

中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室的“高温高压溶解动力学物模装置”,其主要功

能为模拟高温超压条件下岩石样品与溶液的水—岩反应,并原位定量分析反应后溶液的成分及含量,实时检测岩心样品的渗透率变化。笔者依托该装置,针对库车冲断带盐下白垩系的超深层储层,选取了克深2-1-5井6476.34 m深度段直径为2.5 cm、长度为3.0 cm的岩心样品,其中含半充填裂缝,岩性为中—细岩屑长石



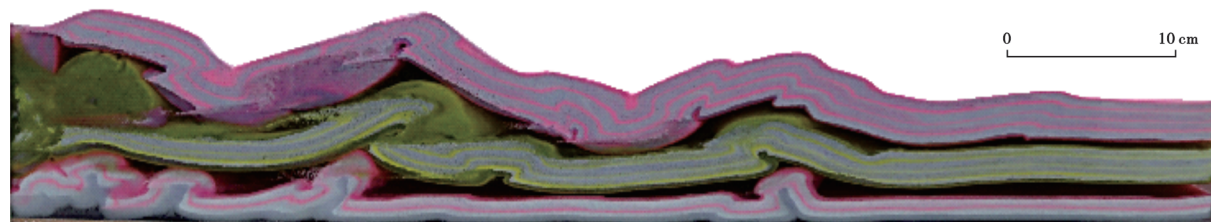
(a) PIV 应变场



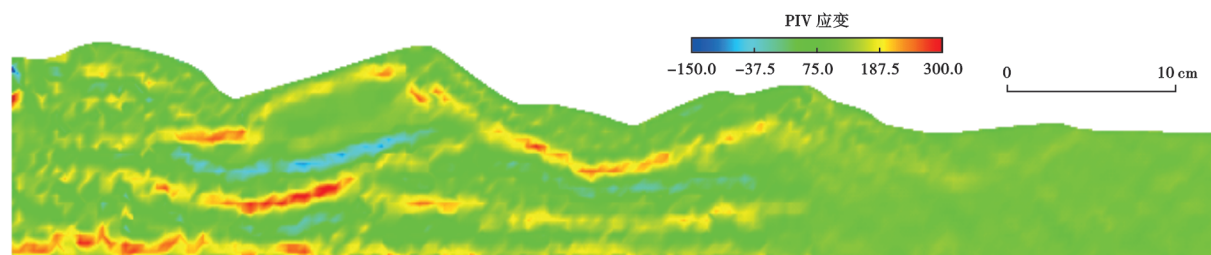
(b) 物理模拟

图 8 南天山冲断带超深层含盐地层的构造动力控储特征

Fig. 8 Characteristics of reservoir controlled by tectonic dynamics in ultra-deep salt-bearing strata in southern Tianshan thrust belt



(a) 物理模拟



(b) PIV 应变场

图 9 南天山冲断带深层含煤地层构造动力控储特征

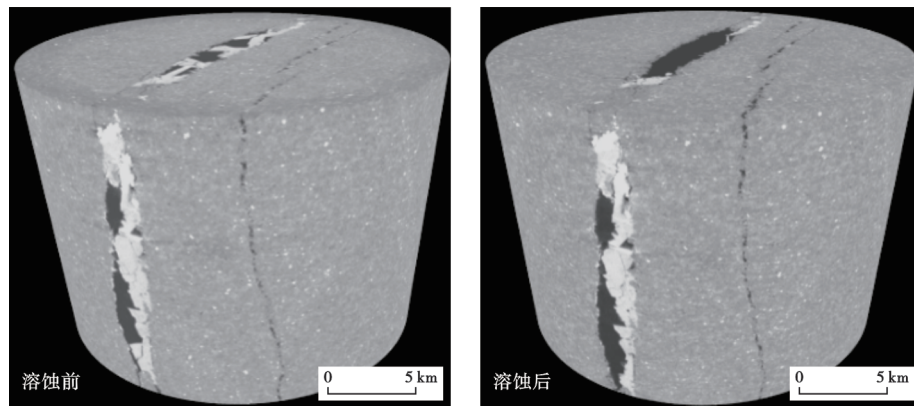
Fig. 9 Characteristics of reservoir controlled by tectonic dynamics in deep coal bearing strata in southern Tianshan thrust belt

砂岩,在实验温压为 140 ℃、50 MPa 的条件下,模拟砂岩储层在埋藏中—晚期的地层条件;溶液类型为体积浓度在 2 mL/L 的乙酸,流体—岩石的反应时间为 240 min,流速为 1.0 mL/min,模拟油气晚期充注时有机酸对储层裂缝网络及微观结构的改造作用。结果表明:通过溶蚀前后储层孔隙度、渗透率和 CT 扫描微观结构的对比,在高温超压条件下,裂缝网络系统是酸性流体与岩石发生溶蚀作用的优势路径,往往形成溶蚀扩大缝和连通缝网,其次是裂缝附近的基质发生局部溶蚀;溶蚀后的储层性质改善明显,孔隙度可增高 55%,尤其是渗透率可增大为原来的 83 倍;缝-孔-喉

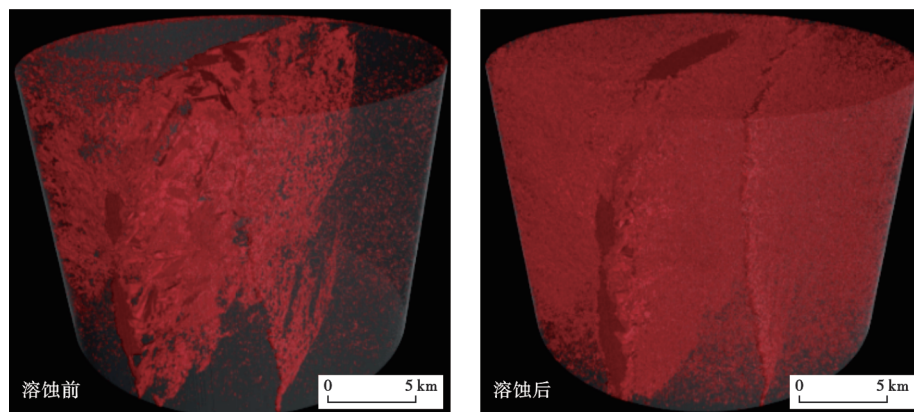
的连通性明显增强,由原来的 20% 提高到 45%,连通大缝—孔的体积增多,连通的小孔隙相对增多(表 1、图 10)。

表 1 砂岩储层半充填裂缝样品在高温超压溶蚀前后的物性
Table 1 Physical properties of semi-filled fracture samples in sandstone reservoir before and after dissolution under high-temperature and ultra-pressure

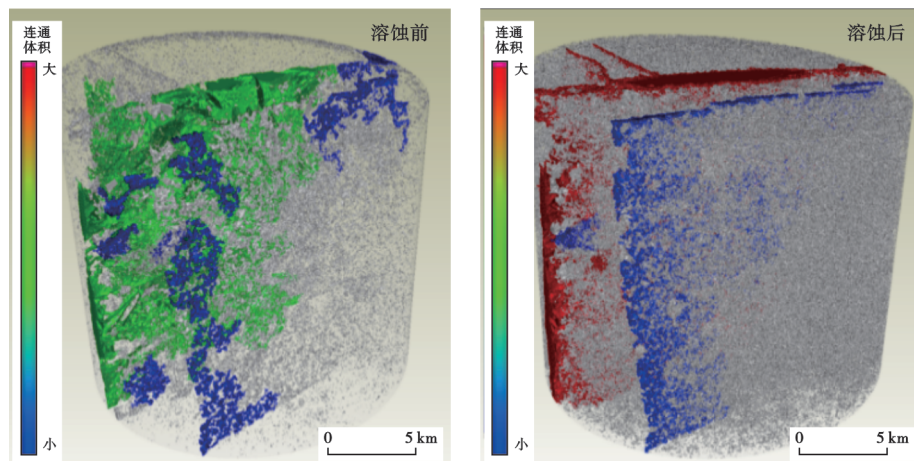
阶段	孔隙度/ %	渗透率/ mD	孔隙体积/ μm^3	裂缝体积/ μm^3
样品溶蚀前	5.71	0.271	1.21×10^8	7.64×10^9
样品溶蚀后	8.83	22.790	7.90×10^8	1.40×10^{10}



(a) 数字岩心重构 (扫描分辨率为 8 μm)



(b) 裂缝-孔隙网络系统 (扫描分辨率为 8 μm)



(c) 裂缝-孔隙连通的大小 (扫描分辨率为 8 μm)

注:黑色(红色)代表孔隙;片状、线性孔隙代表裂缝;浅灰色代表颗粒或基质;深灰色可能为黏土矿物;灰白色可能为碳酸盐等矿物;亮色为重矿物,如黄铁矿。

图 10 砂岩储层半充填裂缝样品在高温超压有机酸溶蚀前后的特征

Fig. 10 Characteristics of semi-filled fracture samples in sandstone reservoir before and after organic acid dissolution under high-temperature and ultra-pressure

4 超深层储层的成因机制及地质意义

4.1 储层成因机制

勘探实践和储层成岩演化综合研究认为,受喜马拉雅期天山强烈隆升、逆冲推覆作用影响,从天山南、北两侧冲断带超深层的强挤压区至弱挤压区,规模储层呈规律性有序分布,具有 2 种典型成因演化机制:①受逆冲

单斜-叠瓦带强构造挤压作用,形成长期浅埋、短期深埋的裂缝-(多期埋藏酸性水)溶蚀孔型储层,如库车坳陷北部构造带和克拉苏构造带的白垩系-侏罗系、阳霞凹陷及北缘侏罗系(如阳探 1 井,图 11)和淮南第 1 排-第 2 排构造带的白垩系-侏罗系超深层;②受冲断前展带弱构造挤压作用,形成长期浅埋、短期深埋的残余粒间孔型储层,如库车坳陷拜城凹陷周缘和秋里塔格

构造带的白垩系(博孜 9 井、佳木 2 井等,图 11)、淮南第 2 排—第 3 排超深层区的白垩系(呼探 1 井等)。

4.2 超深层规模储层的地质意义及有利区预测

天山南、北两侧冲断带在万米埋深以内的中生界勘探面积广阔,构造圈闭显示丰富,油气资源量大,是值得加强勘探的有利领域,在油气的诸多成藏条件中,

规模储层的发育是最关键的因素之一。基于库车坳陷超深层白垩系钻井的实钻数据和淮南地区白垩系储层的成岩物理模拟分析表明:在 8 000~10 000 m 埋深区,强构造挤压带内裂缝-孔隙型砂岩储层的孔隙度仍可达 5%~8%,弱构造挤压区内孔隙型砂岩储层的孔隙度可达 7%~12%(图 11)。天山冲断带油气成藏的

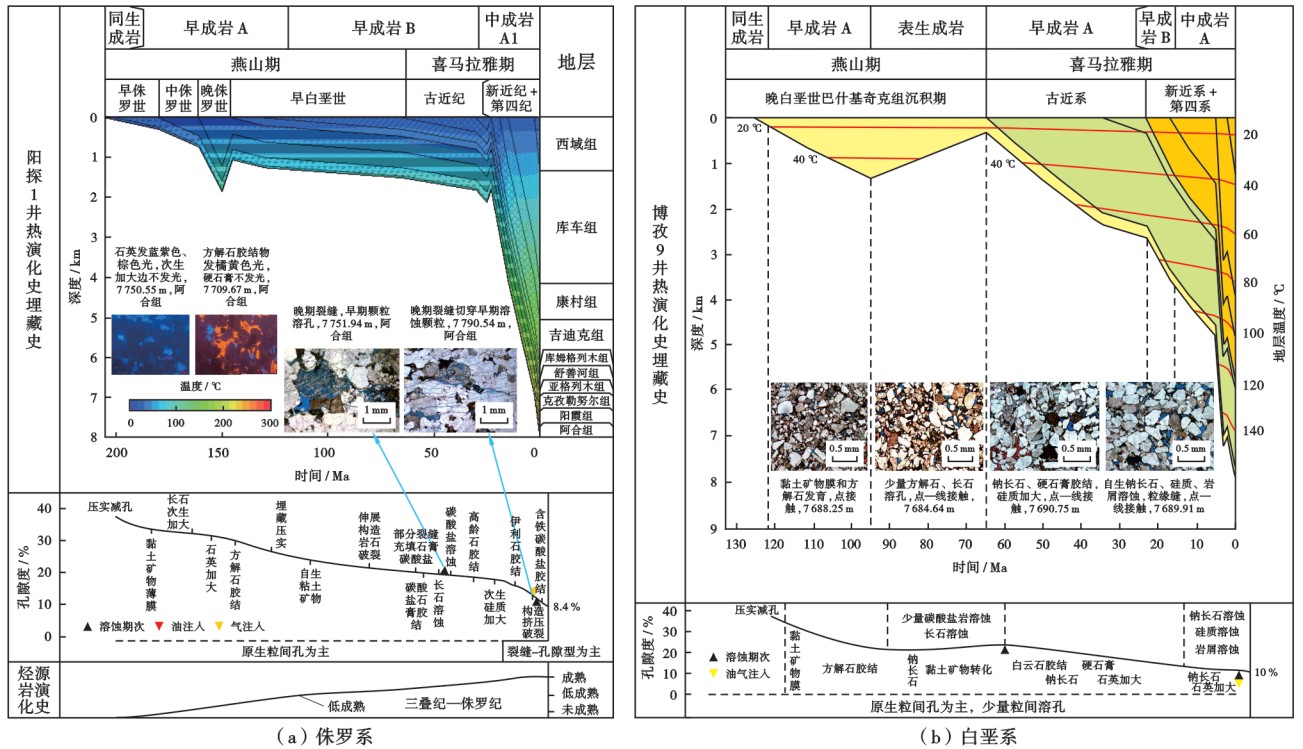


图 11 库车冲断带超深层储层的成因模式

Fig. 11 Genesis model of ultra-deep reservoirs in Kuqa thrust belt

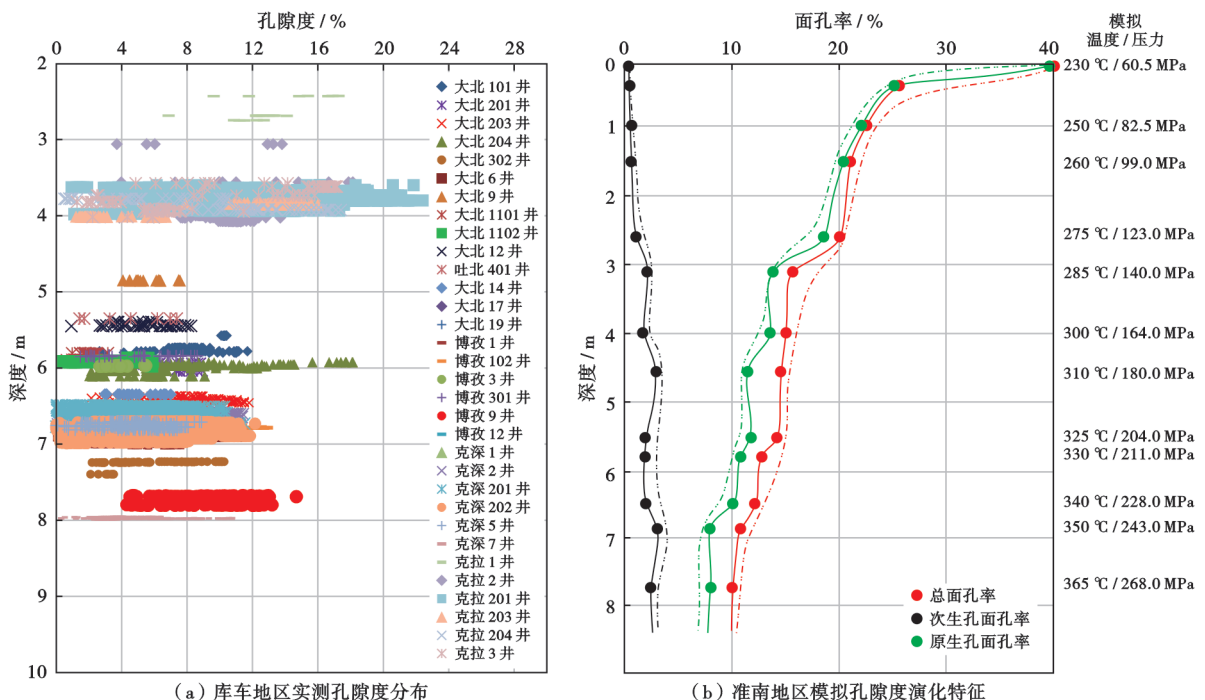


图 12 天山冲断带超深层白垩系储层的孔隙度预测

Fig. 12 Porosity prediction of ultra-deep Cretaceous reservoir in Tianshan thrust belt

下组合(白垩系下部—侏罗系)更邻近煤系优质烃源岩。例如:库车坳陷的白垩系亚格列木组和侏罗系阳霞组—阿合组,其沉积地层厚度达800~1000 m,岩性以含砾粗砂岩、含砾中砂—细砂岩为主,其中,白垩系亚格列木组有利储层的勘探面积为5600 km²、天然气资源量为1.8×10¹² m³,已落实圈闭的显示面积为188 km²、天然气资源量为1.215×10⁸ m³、凝析

油为24×10⁴t(图12),侏罗系阿合组的有利储层勘探面积为11000 km²、天然气资源量为3×10¹² m³;淮南冲断带下组合白垩系清水河组和侏罗系头屯河组、三工河组、八道湾组砂岩的累计厚度达320~1200 m,有利储层的勘探面积累计达14000 km²,其中,落实圈闭的显示面积为6973 km²,天然气资源量为2.84×10¹² m³(图13)。

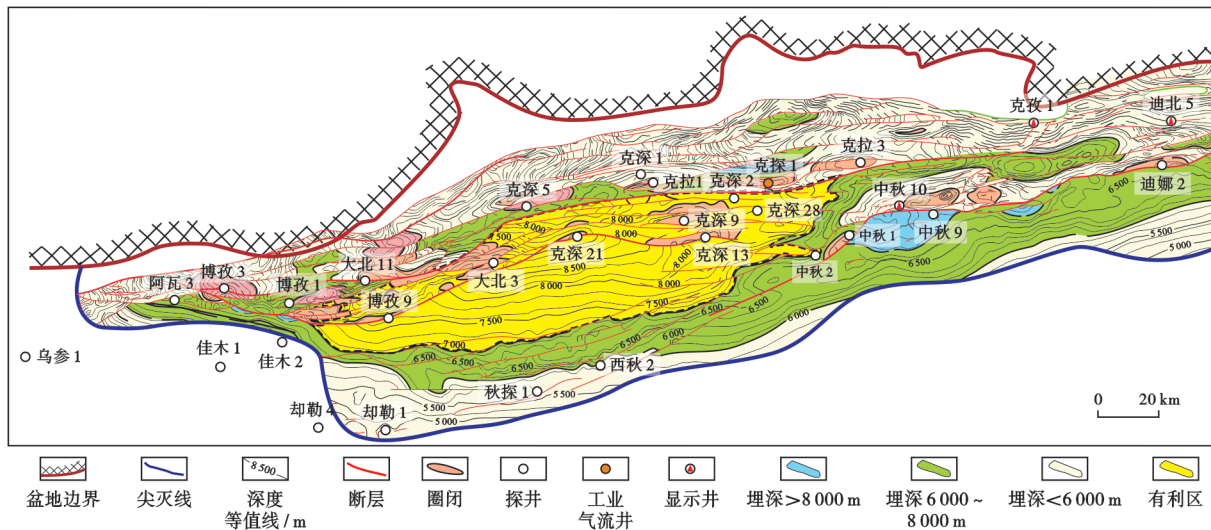


图13 库车坳陷超深层(>8000 m)白垩系亚格列木组规模有利储层分布

Fig. 13 Favorable reservoir distribution of ultra-deep (over 8000 m) Cretaceous Yagelemu Formation in Kuqa depression

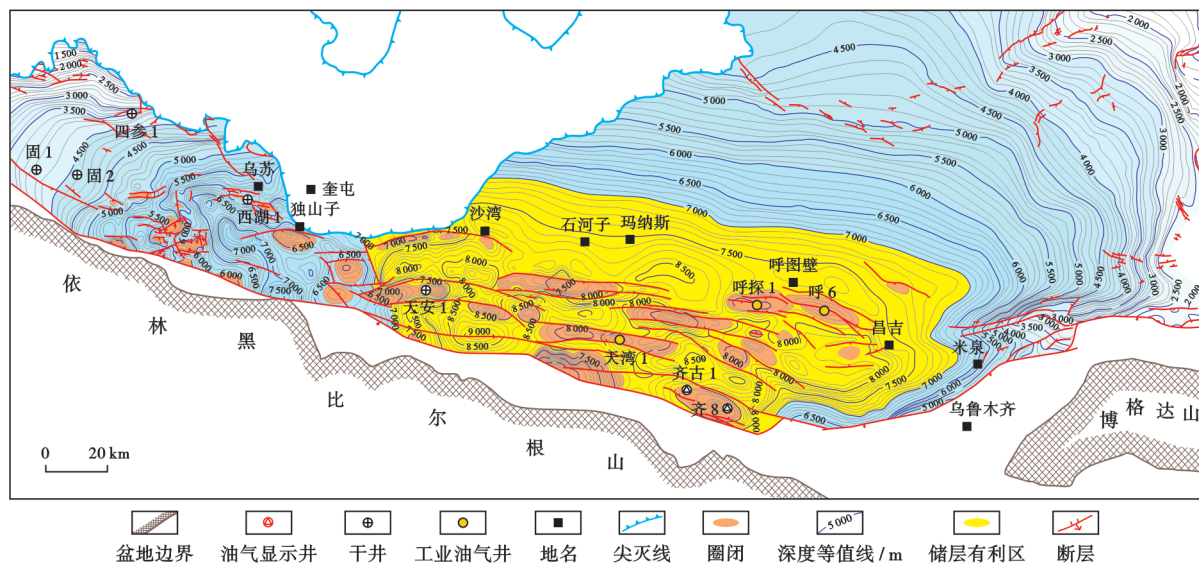


图14 准噶尔盆地南缘超深层(>8000 m)侏罗系头屯河组规模储层分布预测

Fig. 14 Reservoir prediction of ultra-deep (over 8000 m) Jurassic Toutunhe Formation in southern margin of Junggar Basin

5 结论

(1) 天山冲断带在喜马拉雅期逆冲推覆构造活动强烈,自盆缘向盆内,构造活动逐渐减弱,砂岩储层在构造动力挤压作用下有3种岩石响应特征:压实减孔,

加深储层基质致密性;破裂造缝增渗,加剧储层非均质性;异常增压,加大水—岩作用的有效性。

(2) 构造动力成储效应的模拟表明:含盐地层在构造逆冲推覆作用下的应力、应变集中区主要位于盐下冲断叠置带(深层—超深层区),岩石在冲断前展带

受力明显减弱;含煤地层在构造逆冲推覆作用下的应力、应变集中区主要位于煤层间的巨厚砂岩,推覆前展带的应力、应变明显减弱,煤层及砂泥岩互层中的砂岩的应力、应变明显较弱;在高温超压条件下,沿裂缝网络的溶蚀作用增强,裂缝-孔隙-喉道的连通性增强。

(3) 天山冲断带的超深层受喜马拉雅期构造动力主控作用影响,主要发育2种成因模式的规模储层。在万米埋深以内,预测强构造挤压区裂缝-孔隙型储层的孔隙度可达5%~8%,弱构造挤压区孔隙型储层的孔隙度可达7%~12%。预测累计有利勘探面积达 $3.06 \times 10^4 \text{ km}^2$,是近期值得勘探重视的有利领域。

符号注释: ϕ_s —减孔量; S —最大古应力,MPa。

参 考 文 献

- [1] 贾承造. 中国中西部前陆冲断带构造特征与天然气富集规律[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 9-15.
JIA Chengzao. Foreland thrust-fold belt features and gas accumulation in midwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 9-15.
- [2] 寿建峰, 张惠良, 斯春松, 等. 砂岩动力成岩作用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
SHOU Jianfeng, ZHANG Huiliang, SI Chunsong, et al. Dynamic diagenesis of sandstone[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [3] 贾承造. 中国喜马拉雅构造运动的陆内变形特征与油气矿藏富集[J]. 地学前缘, 2007, 14(4): 96-104.
JIA Chengzao. The characteristics of intra-continental deformation and hydrocarbon distribution controlled by the Himalayan tectonic movements in China[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 96-104.
- [4] FOSSEN H, SCHULTZ R A, SHIPTON Z K, et al. Deformation bands in sandstone: a review[J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164(4): 755-769.
- [5] EICHHUBL P, DAVATZ N C, BECKER S P. Structural and diagenetic control of fluid migration and cementation along the Moab fault, Utah[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(5): 653-681.
- [6] FOSSEN H. Deformation bands formed during soft-sediment deformation: observations from SE Utah[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(1): 215-222.
- [7] LAUBACH S E, EICHHUBL P, HILGERS C, et al. Structural diagenesis[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(12): 1866-1872.
- [8] EICHHUBL P, HOOKER J N, LAUBACH S E. Pure and shear-enhanced compaction bands in Aztec sandstone[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(12): 1873-1886.
- [9] ÁBALOS B, ELORZA J. Structural diagenesis of siderite layers in black shales (Albian black flysch, northern Spain)[J]. The Journal of Geology, 2012, 120(4): 405-429.
- [10] 李忠, 张丽娟, 寿建峰, 等. 构造应变与砂岩成岩的构造非均质性——以塔里木盆地库车坳陷研究为例[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2320-2330.
LI Zhong, ZHANG Lijuan, SHOU Jianfeng, et al. Structural strain and structural heterogeneity of sandstone diagenesis: a case study for the Kuqa subbasin in the northern Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2320-2330.
- [11] 李军, 张超谟, 李进福, 等. 库车前陆盆地构造压实作用及其对储集层的影响[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 47-51.
LI Jun, ZHANG Chaomo, LI Jinfu, et al. Tectonic compaction and its influence on reservoirs in the Kuqa foreland basin, Tarim[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(1): 47-51.
- [12] 张荣虎, 姚根顺, 寿建峰, 等. 沉积、成岩、构造一体化孔隙度预测模型[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 145-151.
ZHANG Ronghu, YAO Genshun, SHOU Jianfeng, et al. An integration porosity forecast model of deposition, diagenesis and structure[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 145-151.
- [13] 张荣虎, 曾庆鲁, 王珂, 等. 储层构造动力成岩作用理论技术新进展与超深层油气勘探地质意义[J]. 石油学报, 2020, 41(10): 1278-1292.
ZHANG Ronghu, ZENG Qinglu, WANG Ke, et al. New progress in the theory and technology of tectonic diagenesis on reservoir and the geological significance of ultra-deep oil and gas exploration[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 41(10): 1278-1292.
- [14] 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 Petrologica Sinica, 2014, 35(6): 1057-1069.
- [15] 张荣虎, 杨海军, 魏红兴, 等. 塔里木盆地库车坳陷北部构造带中东段中下侏罗统砂体特征及油气勘探意义[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(9): 1243-1252.
ZHANG Ronghu, YANG Haijun, WEI Hongxing, et al. The sandstone characteristics and hydrocarbon exploration significance of Lower Jurassic in middle east section of northern tectonic belt in Kuqa depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(9): 1243-1252.
- [16] 冯佳睿, 高志勇, 崔京钢, 等. 深层、超深层碎屑岩储层勘探现状与研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 37(7): 718-736.
FENG Jiarui, GAO Zhiyong, CUI Jinggang, et al. The exploration status and research advances of deep and ultra-deep clastic reservoirs[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(7): 718-736.
- [17] 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 Geo-

- science, 2016, 27(4): 591-599.
- [18] ENGLISH K L, ENGLISH J M, BONNELL L M, et al. Controls on reservoir quality in exhumed basins—an example from the Ordovician sandstone, Illizi Basin, Algeria[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 80: 203-227.
- [19] ZHANG Ronghu, WANG Ke, ZENG Qinglu, et al. Effectiveness and petroleum geological significance of tectonic fractures in the ultra-deep zone of the Kuqa foreland thrust belt; a case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in the Keshen gas field[J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(3): 728-741.
- [20] 张荣虎, 魏国齐, 王珂, 等. 前陆冲断带构造逆冲推覆作用与岩石响应特征——以库车坳陷东部中—下侏罗统为例[J]. *岩石学报*, 2021, 37(7): 2256-2270.
- ZHANG Ronghu, WEI Guoqi, WANG Ke, et al. Tectonic thrust nappe activity and sandstone rock response characteristics in foreland thrust belt; a case study of Middle and Lower Jurassic, Kuqa depression, Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(7): 2256-2270.
- [21] 郭召杰, 邓松涛, 魏国齐, 等. 天山南北缘前陆冲断构造对比研究及其油气藏形成的构造控制因素分析[J]. *地学前缘*, 2007, 14(4): 123-131.
- GUO Zhaojie, DENG Songtao, WEI Guoqi, et al. Comparative study of the foreland thrust belts of south and north Tianshan and implications for hydrocarbon accumulation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(4): 123-131.
- [22] 李本亮, 陈竹新, 雷永良, 等. 天山南缘与北缘前陆冲断带构造地质特征对比及油气勘探建议[J]. *石油学报*, 2011, 32(3): 395-403.
- LI Benliang, CHEN Zhuxin, LEI Yongliang, et al. Structural geology correlation of foreland thrust-folded belts between the southern and northern edges of the Tianshan Mountain and some suggestions for hydrocarbon exploration[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 32(3): 395-403.
- [23] 管树巍, 李本亮, 何登发, 等. 晚新生代以来天山南、北麓冲断作用的定量分析[J]. *地质学报*, 2007, 18(6): 725-744.
- GUAN Shuwei, LI Benliang, HE Dengfa, et al. Late Cenozoic active fold-and-thrust belts in the southern and northern flanks of Tianshan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(6): 725-744.
- [24] 李本亮, 贾承造, 庞雄奇, 等. 环青藏高原盆地体系内前陆冲断构造变形的空间变化规律[J]. *地质学报*, 2007, 81(9): 1200-1207.
- LI Benliang, JIA Chengzao, PANG Xiongqi, et al. The spatial distribution of the foreland thrust tectonic deformation in the Circum-Tibetan Plateau Basin and Range System[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(9): 1200-1207.
- [25] CHEN Shuping, TANG Liangjie, YU Yixin. Wave coupling between the Tianshan orogen and the deformations in its south and north foreland basins in Cenozoic[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(S2): 61-69.
- [26] 汤良杰, 邱海峻, 云露, 等. 塔里木盆地北缘—南天山造山带盆—山耦合和构造转换[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 195-204.
- TANG Liangjie, QIU Haijun, YUN Lu, et al. Analysis of basin-mountain coupling and transition of the northern Tarim Basin-southern Tianshan orogenic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 195-204.
- [27] 贾承造, 邹才能, 杨智, 等. 陆相油气地质理论在中国中西部盆地的重大进展[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 546-560.
- JIA Chengzao, ZOU Caineng, YANG Zhi, et al. Significant progress of continental petroleum geology theory in basins of central and western China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 546-560.
- [28] 卓勤功, 赵孟军, 邹开真, 等. 中国中西部前陆冲断带油气分布规律及勘探领域[J]. *新疆石油地质*, 2018, 39(2): 125-133.
- ZHUO Qingong, ZHAO Mengjun, ZOU Kaizhen, et al. Petroleum distribution in foreland thrust belts and its exploration areas in midwest China[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2018, 39(2): 125-133.
- [29] 贾承造, 宋岩, 魏国齐, 等. 中国中西部前陆盆地的地质特征及油气聚集[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 3-13.
- JIA Chengzao, SONG Yan, WIE Guoqi, et al. Geological features and petroleum accumulation in the foreland basins in central and western China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 3-13.
- [30] 魏国齐, 李剑, 杨威, 等. 中国陆上天然气地质与勘探[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- WEI Guoqi, LI Jian, YANG Wei, et al. *Geology and exploration of onshore gas in China*[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [31] 李剑, 余源琦, 高阳, 等. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(4): 403-417.
- LI Jian, SHE Yuanqi, GAO Yang, et al. Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(4): 403-417.
- [32] 汤良杰, 余一欣, 杨文静, 等. 库车坳陷古隆起与盐构造特征及控油气作用[J]. *地质学报*, 2007, 18(2): 145-150.
- TANG Liangjie, YU Yixin, YANG Wenjing, et al. Paleo-uplifts and salt structures and their influence on hydrocarbon accumulations in the Kuqa depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 145-150.
- [33] 王招明. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏盐下深层大气田形成机制与富集规律[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(2): 153-166.
- WANG Zhaoming. Formation mechanism and enrichment regularities of Kelasu subsalt deep large gas field in Kuqa depression, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(2): 153-166.
- [34] 雷德文, 唐勇, 常秋生. 准噶尔盆地南缘深部优质储集层及有利勘探领域[J]. *新疆石油地质*, 2008, 29(4): 435-438.
- LEI Dewen, TANG Yong, CHANG Qiusheng. The deep and relatively high-quality clastic reservoir bodies and favorable exploration areas in southern margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(4): 435-438.
- [35] 雷德文, 陈能贵, 李学义, 等. 准噶尔盆地南缘下部成藏组合储集层及分布特征[J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(6): 648-650.
- LEI Dewen, CHEN Nenggui, LI Xueyi, et al. The major reservoirs and distribution of lower combination in southern margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(6): 648-650.
- [36] 杜金虎, 支东明, 李建忠, 等. 准噶尔盆地南缘高探1井重大发现及下组合勘探前景展望[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(2): 205-215.

- DU Jinhui, ZHI Dongming, LI Jianzhong, et al. Major breakthrough of Well Gaotan 1 and exploration prospects of lower assemblage in southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 205-215.
- [37] 何海清, 支东明, 雷德文, 等. 准噶尔盆地南缘高泉背斜战略突破与下组合勘探领域评价[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 137-146.
- HE Haiqing, ZHI Dongming, LEI Dewen, et al. Strategic breakthrough in Gaoquan anticline and exploration assessment on lower assemblage in the southern margin of Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 137-146.
- [38] 司学强, 袁波, 郭华军, 等. 准噶尔盆地南缘清水河组储集层特征及其主控因素[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 38-45.
- SI Xueqiang, YUAN Bo, GUO Huajun, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of Cretaceous Qingshuihe Formation in the southern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(1): 38-45.
- [39] 张玲, 杨晓平, 万景林, 等. 中生代南北天山差异性抬升历史的磷灰石裂变径迹证据[J]. 岩石学报, 2020, 34(3): 837-850.
- ZHANG Ling, YANG Xiaoping, WAN Jinglin, et al. Mesozoic and Cenozoic differential uplifting history of the north Tianshan and the south Tianshan from apatite fission-track date[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(3): 837-850.
- [40] LIU Shaowen, WANG Liangshu, LI Cheng, et al. Thermal-rheological structure of lithosphere beneath the northern flank of Tarim Basin, western China; implications for geodynamics[J]. Science in China Series D; Earth Sciences, 2004, 47(7): 659-672.
- [41] 司学强, 彭博, 庞志超, 等. 储集层多尺度裂缝特征及控制因素——以准噶尔盆地南缘侏罗系—白垩系为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(4): 731-741.
- SI Xueqiang, PENG Bo, PANG Zhichao, et al. Characteristics and controlling factors of multi-scale fractures in reservoir: a Jurassic-Cretaceous case from the southern margin of Junggar Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(4): 731-741.

(收稿日期 2023-05-22 改回日期 2023-06-26 编辑 雷永良)

关于维护科技道德、加强自律的联合公告

为了加强科技界精神文明建设,提高科技工作者和编辑部工作人员的职业道德水平,保障我国科技事业的健康发展,《石油学报》、《石油勘探与开发》、《天然气工业》、《石油地球物理勘探》、《新疆石油地质》、《天然气地球科学》、《海相油气地质》、《特种油气藏》、《油气地质与采收率》、《石油实验地质》、《大庆石油地质与开发》、《中国海上油气》、《钻井液与完井液》、《测井技术》、《中国石油大学学报(自然科学版)》、《国外测井技术》、《石油工业计算机应用》、《石油钻采工艺》、《断块油气田》、《油气储运》、《石油与天然气地质》、《中国石油勘探》、《石油物探》等编辑部经过认真讨论,决定联合发表如下公告:

1. 提倡追求真理、实事求是、团结协作、诚实劳动;坚持学术民主,鼓励百家争鸣,尊重他人劳动成果,严肃政治纪律,坚决反对伪科学。
2. 严格执行审稿制度,不徇私情,不登人情稿,公正廉洁。
3. 维护投稿人的权益,一般在规定的期限内(收到稿件的3个月内)对来稿是否采用予以答复。
4. 拒绝刊登署名有争议、引用他人著述未注明出处、在上述规定的期限内一稿两投或多投的稿件。
5. 对弄虚作假、抄袭剽窃和一稿两投或多投者,一经查实,相关编辑部视其情节轻重分别给予书面警告、通知其所在单位、3年内拒绝刊登有其署名的任何稿件、在所有签署本公告的期刊上公开曝光等处理。
6. 鼓励对上述所列违反道德规范的行为进行据实举报。强调编者、作者的诚信,各编辑部尊重举报人的合理要求。
7. 对于严重违反科技工作者职业道德、情节严重、影响极坏的事件,将转请有关部门进行严肃处理,并在签署本联合公告的期刊范围内建立情况通报制度。
8. 本联合公告欢迎国内能源界科技期刊加盟。

本联合公告于各期刊编辑部签署并在期刊上刊出后生效。