

准噶尔盆地南缘下组合储层异常高压成因 机制及演化特征

张凤奇^{1,2}, 鲁雪松³, 卓勤功³, 钟红利⁴, 张佩¹, 魏驰¹, 刘伟¹

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘要:准噶尔盆地南缘喜马拉雅晚期构造挤压强烈, 导致其下组合储层超压的形成和演化过程复杂。综合地层压力和实际地质资料, 探讨了准噶尔盆地南缘下组合超压的测井响应特征和砂岩、泥岩的综合压实特征; 结合改进的超压识别图版和声发射测定的古应力等, 确认了研究区下组合储层超压的主要形成机制; 结合构造应力和垂向载荷双重压实作用的数值模拟, 定量分析了各超压形成机制的演化特征和对现今超压形成的贡献。结果表明, 构造挤压作用是研究区下组合储层超压形成的最主要成因, 其次为垂向上的不平衡压实作用及沿断裂的垂向和沿砂体的侧向超压传递作用。古近纪以来到塔西河期, 垂向上的不平衡压实作用在研究区部分地区开始形成, 该增压作用对四棵树凹陷东部和第三排构造带东部深层下组合齐古组强超压形成的贡献分别为1.4%和33.3%; 塔西河末期以来, 持续的强烈构造挤压作用引起了研究区下组合储层压力快速增加, 该增压作用对四棵树凹陷东部和第三排构造带东部下组合齐古组强超压形成的贡献分别为65.8%和50.8%; 独山子末期以来特别是第四纪, 背斜的形成和断裂的开启引起下组合深层储层形成了快速的超压传递增压, 该增压作用对四棵树凹陷东部和第三排构造带东部下组合齐古组强超压形成的贡献分别为32.8%和15.9%。

关键词:构造挤压; 超压传递; 深层; 异常高压; 下组合; 准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Genetic mechanism and evolution characteristics of overpressure in the lower play at the southern margin of the Junggar Basin, northwestern China

Zhang Fengqi^{1,2}, Lu Xuesong³, Zhuo Qingong³, Zhong Hongli⁴, Zhang Pei¹, Wei Chi¹, Liu Wei¹

(1. College of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Provincial Key Lab of Hydrocarbon Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

4. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Intensive tectonic compression during the late Himalayan resulted in overpressure of complex evolution history in the lower play at the southern margin of the Junggar Basin. Based on an integration of formation pressure with geological data, this study discusses the features of log responses and comprehensive compaction of sandstone and mudstone in the lower play of the study area. The genetic mechanisms of the overpressure in the play are identified in combination with modified overpressure recognition diagrams and paleo-tectonic stress measured by Kaiser effect. The evolution characteristics of these mechanisms and their contribution to the current overpressure are also quantitatively evaluated based on the numerical simulation of both tectonic stress and overburden on compaction. The results show that horizontal tectonic compression is the main cause of the over-pressurized Qigu Formation in the lower play of the study area, followed by vertical disequilibrium compaction and overpressure transmission vertically along the faults and laterally in sandstone. The vertical disequilibrium compaction began to develop in certain parts of the study area since the Paleogene to the deposition of the Taxihe Formation. Its contribution to the presently over-pressurized Qigu Formation in

收稿日期: 2018-07-10; 修订日期: 2020-08-07。

第一作者简介: 张凤奇(1981—), 男, 博士、副教授, 油气成藏动力学和油气形成机制。E-mail: zhangfengqi68@126.com。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2016B-0502, 2019B-0504); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JM4004); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS110)。

the eastern Sikesu Sag and the east part of the third row of structural belt in the play are 1.4% and 33.3%, respectively. The continuous tectonic compression in high intensity led to a rapid increase of overpressure in the lower play since the end of the Taxihe depositional period, with contributions of 65.8% and 50.8% respectively to the overpressure in the formation of the two locations. The overpressure transmission mechanism was initiated and accelerated in the deep reservoirs of the play since the end of the Dushanzi depositional period, especially the Quaternary, when anticlines and faults were formed. Its contributions to the overpressure of the formation in the two locations are 32.8% and 15.9%, respectively.

Key words: tectonic compression, overpressure transmission, deep zone, abnormal high pressure, lower play, Junggar Basin

准噶尔盆地南缘与天山北部毗邻,新生带以来的天山隆升作用使得准噶尔盆地南缘地区经受了强烈的构造挤压作用,形成了多排冲断褶皱带^[1]。在强烈构造挤压影响下,这些冲断褶皱带地层中形成了强度不等的超压^[2-3],前人主要针对研究区中、上组合超压的成因开展了一些研究,有以下几种观点:①不平衡压实为主要原因,后期构造挤压起到加强作用^[4];②不平衡压实和构造挤压的共同影响,没有明确各要素的贡献大小^[5-7];③不平衡压实、构造挤压、高流体势承压和断层对水动力的垂向贯通为主要成因,不同地区成因有差异,西部地区超压的成因以压实不平衡为主,东部则与构造挤压、断层活动导致的水动力贯通等有关^[8];④不平衡压实、构造挤压和超压传递为主要成因,并认为研究区霍玛吐构造带古近系强超压是在不平衡压实和构造挤压作用所形成的地层高压背景下,叠加了超压传递而形成^[2]。随着勘探的不断深入,勘探的层系逐渐向深部下组合转移^[9],实测压力资料显示,研究区山前第一排构造带埋藏相对较浅的下组合储层中发育弱超压,而远离山前的第二排、第三排构造带和四棵树凹陷东部深层下组合储层中发育强超压,目前对研究区下组合储层超压形成机制的研究较少,不同构造部位超压的差异性形成机制、演化特征及其对现今超压形成的贡献如何尚未揭示。本文通过国内外最新研究进展,总结构造挤压增压的识别新模式;综合各类资料获得的地层压力和砂岩、泥岩的综合压实曲线,探讨超压的测井响应特征和砂岩、泥岩的综合压实特征;结合实际地质资料、声发射测定的古应力和典型井的垂向有效应力与声波速度、密度与声波速度的关系图,综合分析研究区不同构造部位下组合储层超压的主要形成机制;与同时考虑构造应力和垂向载荷双重作用的流体压力数值模拟结合,定量分析各超压形成机制的演化特征及对现今超压形成的贡献。该研究以期深化认识研究区多因素复合成因下的超压形成机制和演化特征,同时为研究区的油气勘探提供指导作用。

1 研究区概况

准噶尔盆地南缘位于准噶尔盆地南部,北与昌吉凹陷相接,南与北天山相邻,东起阜康断裂带,西到四棵树凹陷,东西长 500 km,南北宽 40 ~ 60 km,面积为 $2.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,构造位置为北天山山前坳陷(也称为北天山山前冲断带)^[10-11](图 1)。准噶尔盆地南缘自二叠纪以来共经历了 3 期大的构造演化阶段而形成现今的构造格局,这 3 期演化阶段为:二叠纪—三叠纪前陆盆地演化阶段、侏罗纪—古近纪陆内拗陷演化阶段及新近纪—第四纪再生前陆盆地演化阶段^[12]。现今构造上具有典型的“东西分段、南北分带”的特征,可被进一步划分为 3 个二级构造单元:四棵树凹陷(西段)、山前冲断带(中段)和阜康断裂带(东段),其中山前冲断带自南向北进一步划分为喀拉扎—齐古—托斯台山前冲断带(第一排构造带)和霍尔果斯—玛纳斯—吐谷鲁冲断褶皱带(第二排构造带)和独山子—安集海河背斜带(第三排构造带)3 个次级构造单元^[1,10,13-14](图 1)。

由于新生代印度板块与欧亚板块的碰撞挤压的远程效应,天山开始大幅度隆升,不断向北挤压,在强烈构造挤压下准噶尔盆地南缘形成了构造样式复杂多样的断裂体系^[12,15-16],主要发育以乌鲁木齐为界的两大断裂体系:博格达山断裂体系(东段)和伊林黑比尔根山断裂体系(西段)^[17]。第一排喀拉扎—齐古—托斯台山前冲断带主要发育近东西走向的山前推举构造带^[17-18],由于中、新生代以来天山的向北挤压作用,该构造带地层剥蚀严重,残留者多为北翼发育的二叠系、三叠系和侏罗系构成的次级褶皱构造^[2];第二排冲断褶皱带主要包括霍尔果斯背斜、玛纳斯背斜和吐谷鲁背斜,主要发育霍玛吐滑脱断裂及相关次级断裂如霍尔果斯断裂、吐谷鲁断裂和玛纳斯断裂^[17-18];第三排冲断褶皱带主要包括安集海背斜和呼图壁背斜,该构造带背斜基本为一东西向长轴背斜,北翼陡、南翼缓,

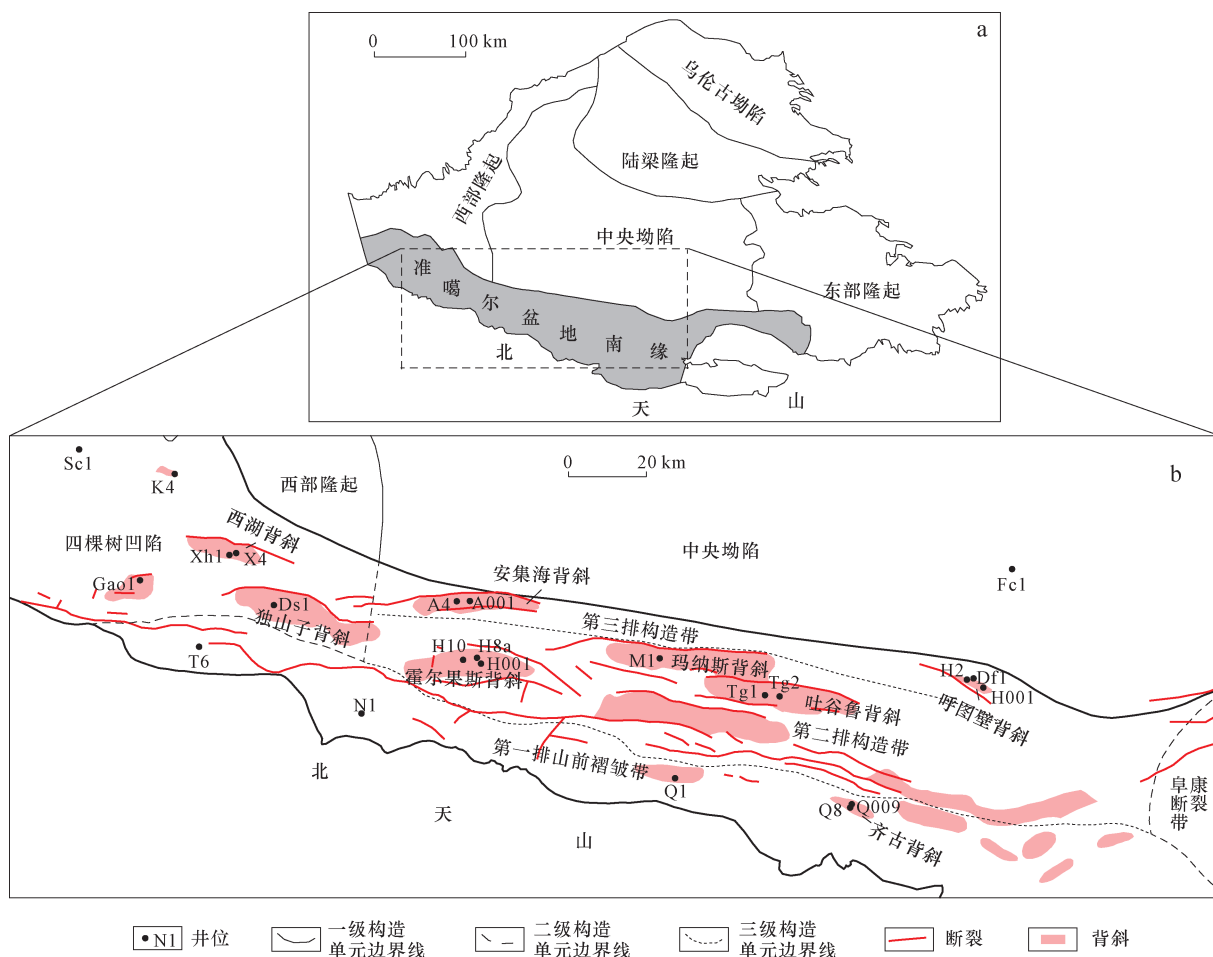


图1 准噶尔盆地南缘构造位置(a)和单元划分(b)

Fig. 1 Sketch map showing the tectonic locations(a) and unit divisions(b) at the southern margin of the Junggar Basin

背斜轴部遭受剥蚀^[2,17];四棵树凹陷主要包括靠近山前的一系列南倾高角度逆冲断层的山前褶皱带、中央褶皱带、北东挠褶皱带和北部斜坡带,这里中央褶皱带主要包括受控于逆冲断裂的卡因迪克背斜、卡东背斜、西湖和独山子背斜^[19-20]。

研究区主要发育的地层自下而上为二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系,自二叠纪以来地层持续性沉积,沉积厚度一般在10 km以上,最大可达15 km^[11]。研究区发育有5套烃源岩层:二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和古近系,其中侏罗系为分布范围较广的主力烃源岩^[11,21]。研究区储层较多,主要为侏罗系、下白垩统清水河组、上白垩统东沟组、古近系紫泥泉子组和新近系沙湾组等,区域性盖层主要为白垩系吐谷鲁群、古近系安集海河组和新近系塔西河组^[22-23];纵向可划分为上、中、下3大成藏组合,其中位于相对深部以三叠系、侏罗系为储层、白垩系吐谷鲁群为盖层构成的下部油气成藏组合(以下简称为下组合)^[24]为本次的研究对象。

2 主要超压形成机制的识别及模式

有关超压的形成机制前人研究较多,将其归类后沉积盆地中超压的主要形成机制有以下5种类型:不均衡压实(垂向负荷为主)、流体膨胀、超压传递、水平构造挤压和成岩作用等^[25-30],这里流体膨胀主要包括生烃作用、油裂解成气和水热作用^[26],成岩作用主要指蒙脱石向伊利石的转化;上述超压机制中流体膨胀、超压传递和水平构造挤压等产生超压后可引起上覆载荷的卸载,从而引起垂向有效应力降低^[28,31-33];由于蒙脱石向伊利石的成岩转化过程中可使层间水转化为孔隙水、承载载荷颗粒的溶解及粘土矿物的选择性定向排列等作用,这些综合效应可引起上覆载荷向流体转化而产生超压^[27,29]。

正常压实作用、流体膨胀和超压传递增压作用在孔隙度与埋深、地层压力与埋深、垂向有效应力与声波速度和密度与声波速度的关系图中的变化详见文献

[28]和文献[32],如图2所示,这里不再赘述。

粘土矿物成岩作用引起流体增压后孔隙度变化较小(图2a和2b),而密度会增大。因此,粘土矿物成岩作用引起的超压地层中垂向有效应力与声波速度的变化关系将偏离正常压实趋势线,沿着图2c中 $G-H_c$ 趋势线变化,而密度与声波速度的变化关系将沿着图2d中的 $G-H_c$ 趋势线变化^[28,32,34-35]。

构造挤压可使地层产生侧向压实和超压两种效应,这里分别简称为构造压实和构造挤压增压。随着对构造压实和构造挤压增压的深入认识,发现构造挤压增压和垂向载荷增压之间在一些方面,如垂向有效应力与声波速度的关系曲线上的变化趋势还存在较大差异^[28,34,36]。目前,针对构造压实和构造挤压增压作用下孔隙度、地层压力、垂向有效应力及测井响应变化

特征等的认识仍然较低。根据国内外相关研究成果,本次新总结了构造压实和构造挤压增压作用下孔隙度、地层压力、垂向有效应力和测井响应变化特征(图2),为构造挤压增压识别提供模式。

当最大主应力由垂向变为水平方向后,构造挤压会引起地层进一步压实,在此过程中伴随着地层流体的持续排出,地层孔隙度会随之降低,这时与以垂向压实为主相比,构造挤压和垂向负荷共同压实作用下的地层孔隙度随埋深变化趋势会整体变小,而地层流体压力仍为对应埋深的静水压力。因此,在构造压实过程中,地层孔隙度和地层压力随埋深的变化趋势线应分别为图2a和图2b的 $A-B$ 线。在构造压实过程中,地层中的声波速度和垂向有效应力的变化与在以垂向压实为主阶段类似,因此,在垂向有效应力与声波速度

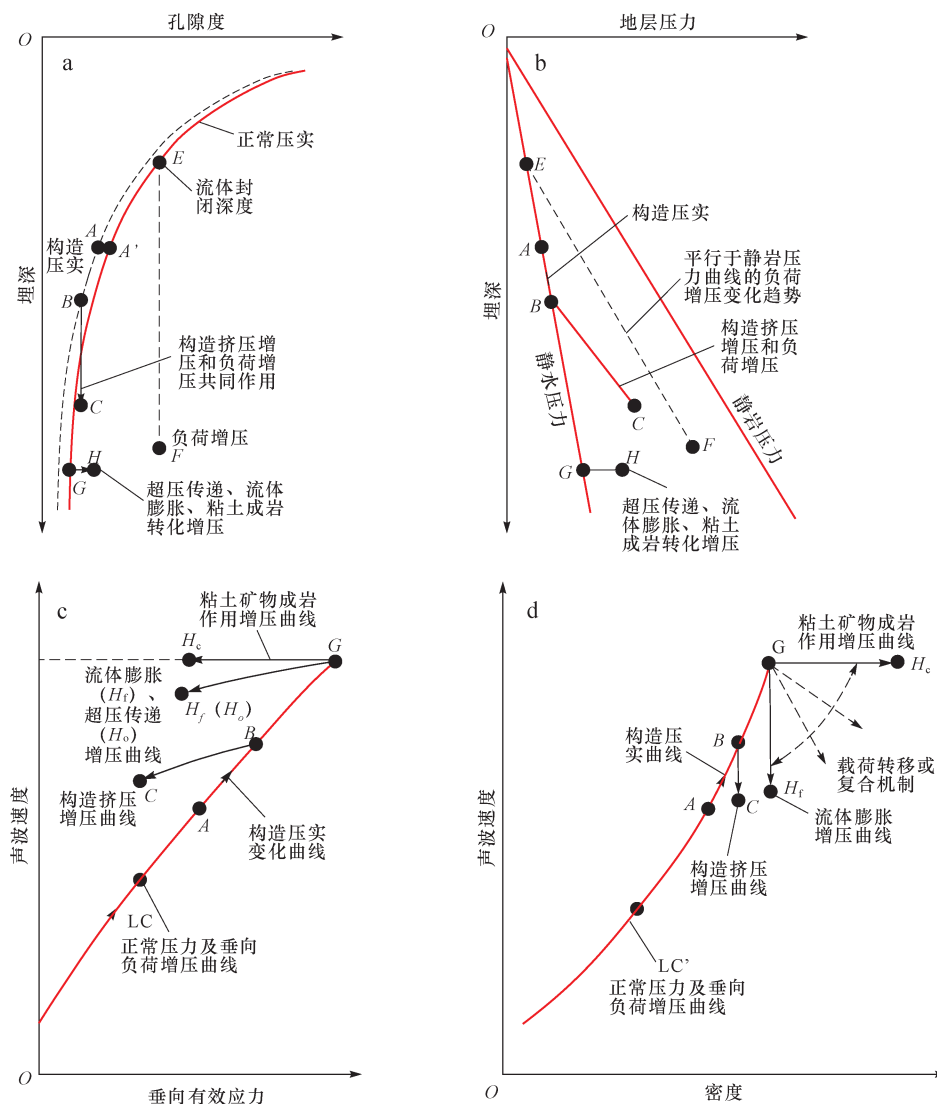


图2 主要超压形成机制识别模式(据文献[28]、文献[31]和文献[34]修改)

Fig. 2 Models for differentiating the main overpressure mechanisms (modified after references[28], [31], and [34])

a. 孔隙度与深度关系; b. 压力与深度关系; c. 垂向有效应力与声波速度关系; d. 密度与声波速度关系

的关系图中,构造压实作用下曲线的变化应为图2c的A—B所示。反映体积压实的密度在构造压实和垂向压实过程中是等效的,因此,声波速度和密度的关系图中构造压实的变化应沿着垂向压实的变化曲线^[34],如图2d的A—B所示。与欠压实增压作用类似,构造挤压增压作用是在侧向构造应力增大过程中孔隙流体不能排出而形成的,因此,其增压过程中孔隙度应保持不变,而地层压力随着构造应力的增大而增大,这时该流体增压会引起垂向有效应力的降低^[28,36],而有效应力的减小会引起声波速度的降低^[37-38],所以构造挤压增压过程中地层孔隙度和地层压力的变化分别如图2a和图2b中B—C所示,该过程中垂向有效应力与声波速度的变化应如图2c中的B—C所示。由于构造挤压增压过程中地层孔隙度基本是不变的,所以地层的密度应不变,因此,该过程中声波速度和密度的变化应如图2d中的B—C所示。

3 超压的测井响应及砂、泥岩的综合压实特征

本次共收集了准噶尔盆地南缘7口井下组合储层14个深度点的实测地层压力数据(图3),同时还运用了泥浆密度和dc指数法获得的地层压力数据(图4—图6),各类压力资料综合表明,研究区第一排构造带下组合侏罗系和三叠系普遍为弱超压或常压,第二排、第三排构造带和四棵树凹陷下组合侏罗系齐古组普遍为强超压。研究区钻遇下组合的井主要集中在准噶尔盆地南缘第一排构造带,而第二排、第三排构造带和四棵树凹陷内钻遇下组合侏罗系的井仅有3口(均钻遇

深部齐古组),资料较全的仅有Ds1和Xh1两口井(井的位置如图1b所示,位于第三排的Df1井下白垩统中下部和侏罗系无测井资料)。为了深入分析下组合超压的形成机制,本次分别读取了3口井砂岩和泥岩的声波时差、电阻率、密度和中子孔隙度值(图4—图6)。通过地层压力的纵向变化和地层压力的测井响应特征,可综合确定Ds1井、Xh1井和T6井的超压顶面,其埋深分别为2 485,1 890和1 350 m,Ds1井和Xh1井的超压顶面分别位于安集海河组顶部和独山子组中部,T6井的超压顶面位于断层上盘的中—上三叠统下部。

与声波时差和电阻率测井相比,密度和中子孔隙度测井可更为准确地反映体积孔隙度^[39-40],为此,本次选用密度和中子孔隙度测井来研究砂岩和泥岩地层的综合压实特征,这两种测井随埋深的变化趋势不一致时,则主要以密度测井为主。从Xh1井、Ds1井和T6井泥岩和砂岩密度及中子孔隙度变化曲线可看出,其下组合泥岩和砂岩储层密度和中子孔隙度的变化趋势较为相似,与正常压实趋势相比,其中的大部分泥岩和砂岩均表现出相对低密度和相对高中子孔隙度的特征,表明这些地层形成了异常高孔隙度,从偏离正常压实趋势线的幅度来看,其下组合吐谷鲁群部分泥岩和砂岩(Xh1井、Ds1井的呼图壁组底部、清水河组和Xh1井胜金口组)和T6井断层上盘的中—下三叠统下部和断层下盘的中—上三叠统上部和中部局部泥岩和砂岩,偏离幅度相对较大,表明这些地层中形成了相对较大的异常高孔隙度(图4—图6)。结合实际地质条件,推断这些异常高孔隙度的形成与不平衡压实密切相关,同时受到晚期构造挤压的影响。

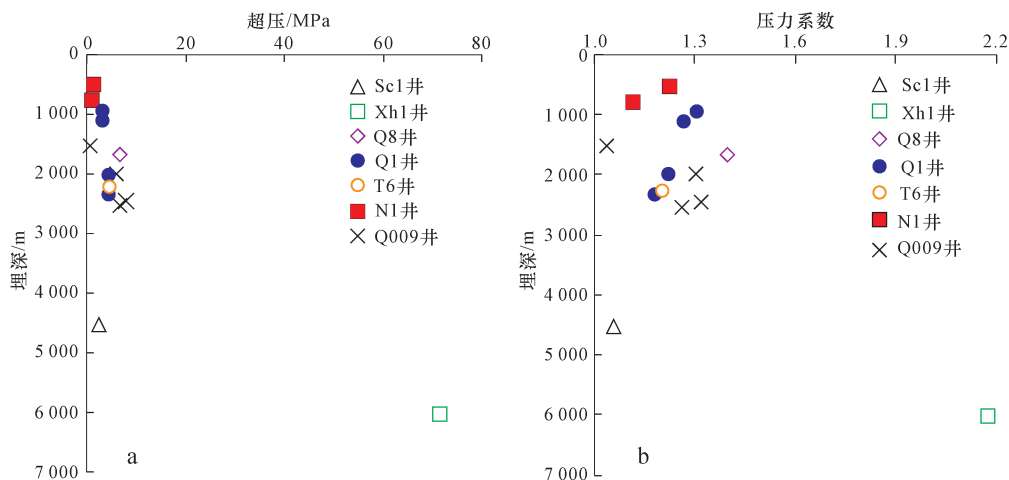


图3 准噶尔盆地南缘下组合实测地层压力分布

Fig. 3 Distribution of measured formation pressure in the lower play at the southern margin of the Junggar Basin

a. 超压与埋深关系; b. 压力系数与埋深关系

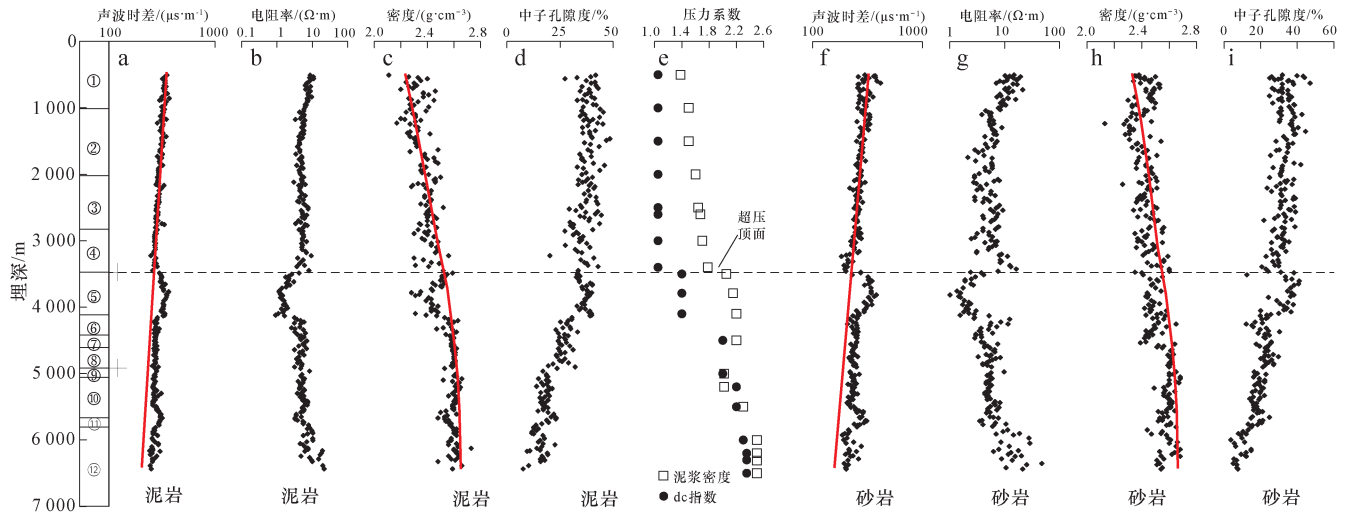


图4 准噶尔盆地南缘Ds1井砂、泥岩综合压实曲线及地层压力分布

Fig. 4 Comprehensive compaction curves and formation pressure distribution of sandstone and mudstone from Well Ds1 at the southern margin of the Junggar Basin

① 第四系;② 独山子组;③ 塔西河组;④ 沙湾组;⑤ 安集海河组;⑥ 紫泥泉子组;
⑦ 东沟组;⑧ 连木沁组;⑨ 胜金口组;⑩ 呼图壁组;⑪ 清水河组;⑫ 齐古组

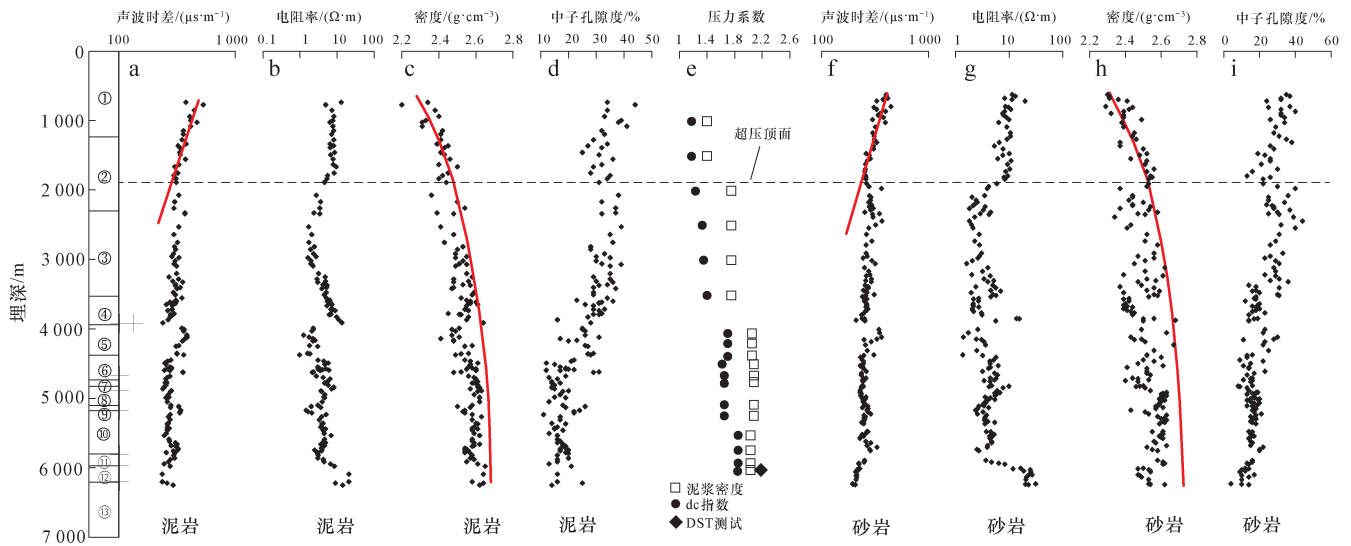


图5 准噶尔盆地南缘Xh1井砂、泥岩综合压实曲线及地层压力分布

Fig. 5 Comprehensive compaction curves and formation pressure distribution of sandstone and mudstone from Well Xh1 at the southern margin of the Junggar Basin

① 第四系;② 独山子组;③ 塔西河组;④ 沙湾组;⑤ 安集海河组;⑥ 紫泥泉子组;⑦ 东沟组;
⑧ 连木沁组;⑨ 胜金口组;⑩ 呼图壁组;⑪ 清水河组;⑫ 齐古组;⑬ 西山窑组

4 下组合储层超压的主要形成机制

4.1 不均衡压实作用

不均衡压实作用的发生与地层发育的岩性组合及其沉积速率等地质条件密切相关,地质历史时期经历较大沉积速率的较厚泥岩地层往往易发生不均衡压实作用^[2,41],研究区安集海河组和吐谷鲁群发育有较

厚的泥岩和粉砂质泥岩,为研究区较好的区域性盖层^[22-23],钻井资料统计发现,安集海河组泥岩盖层累计厚度一般分布在200~600 m,最厚约为1 840 m;吐谷鲁群泥岩盖层累计厚度一般分布在500~1 000 m,最厚约为1 900 m。这些发育的低渗透性岩层为不均衡压实作用的发生提供了基础条件。

研究区自新生代以来,沉积速率开始变大,沙湾期和塔西河期研究区沉积速率普遍在50~100 m/Ma;独山子期,四棵树凹陷东部独山子背斜和西湖背斜翼部

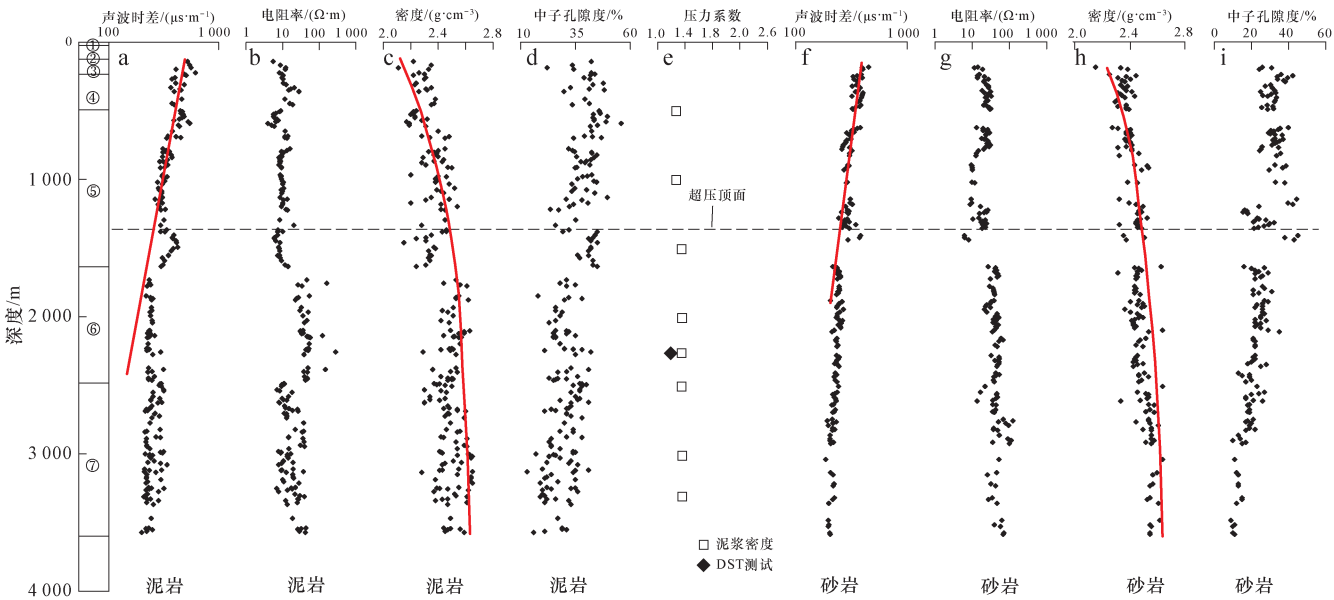


图 6 准噶尔盆地南缘 T6 井砂、泥岩综合压实曲线及地层压力分布

Fig. 6 Comprehensive compaction curves and formation pressure distribution of sandstone and mudstone from Well T6 at the southern margin of the Junggar Basin

① 第四系;②. 下白垩统;③ 齐古组;④ 八道湾组(上盘);⑤ 中上三叠统(上盘);⑥ 八道湾组(下盘);⑦ 中上三叠统(下盘)

其沉积速率为 230 ~ 330 m/Ma, 四棵树凹陷北部斜坡带其沉积沉积速率为 330 ~ 620 m/Ma, 第三排构造带安集海背斜和呼图壁背斜翼部其沉积沉积速率分别约为 300 和 370 m/Ma, 第二排构造带霍尔果斯—玛纳斯—吐谷鲁背斜翼部其沉积沉积速率约为 200 m/Ma; 第四纪, 由于强烈构造挤压下背斜处抬升、向斜处的沉积作用, 使得不同构造部位沉积速率差别较大, 多数背斜轴部均遭受不同程度的剥蚀, 背斜翼部或局部低部位有不同厚度的第四纪沉积, 四棵树凹陷独山子背斜 Ds1 井和西湖背斜 Xh1 井其沉积速率分别约为 535 和 750 m/Ma; 第三排构造带呼图壁背斜其沉积速率分别约为 300 m/Ma。由此可见, 研究区新生代以来的较快沉积速率使得地层中渗透性较差的岩层形成不均衡压实作用成为可能。

从上述分析的砂岩和泥岩的压实特征可看出, 研究区下组合大部分泥岩和砂岩均形成了不均衡压实作用, 该作用在吐谷鲁群部分地层(Xh 井和 Ds1 井的呼图壁组底部、清水河组和 Xh1 井胜金口组)和第一排构造带 T6 井断层上盘的中—下三叠统下部和断层下盘的中—上三叠统上部和中部较为明显(图 4—图 6), 该作用的产生与前述的研究区新生代以来的相对较高沉积速率和自身的较厚泥岩有较大关系。因此, 推断不均衡压实作用为研究区下组合储层超压的主要形成机制之一。

4.2 构造挤压作用

研究区实测和间接计算资料揭示四棵树凹陷东

部、第二排和第三排构造带深层侏罗系齐古组存在强超压, 第一排构造带侏罗系和三叠系部分地层存在弱超压。前人研究认为, 在经历强烈构造挤压背景的地区, 其超压的形成与水平构造挤压密切相关, 可作为超压的主要形成机制^[2,38,42-43]。研究区在喜马拉雅时期以来特别是喜马拉雅晚期经历了来自北天山的由南向北的强烈构造挤压作用^[1,18,20], 通过笔者(Q009, Fc1, Sc1, Ds1 和 Q1 井)及前人^[44](H001 井)声发射实验测得的喜马拉雅晚期水平最大主应力结果(表 1)来看, 准噶尔盆地南缘在接近现今时期的喜马拉雅晚期第一排、第二排、第三排构造带和四棵树凹陷东部地区水平最大主应力均大于垂向上的载荷应力, 而远离山前的位于第三排构造带以北的 Sc1 井和四棵树凹陷北部斜坡带的 Fc1 井水平最大主应力均小于垂向上的载荷应

表 1 准噶尔盆地南缘典型井声发射测试结果

Table 1 Acoustic emission test results of typical wells at the southern margin of the Junggar Basin

井号	层位	埋深/m	水平最大主应力 (σ_H)/MPa	垂向载荷应力 (σ_V)/MPa	两者应力对比	两者应力差值/ MPa
Q009	J ₂ x	677.78	62.16	16.27	$\sigma_H > \sigma_V$	45.90
Fc1	K ₁ q	5 784.50	126.99	138.89	$\sigma_H < \sigma_V$	-11.90
Sc1	J ₂ x	4 188.70	95.62	100.57	$\sigma_H < \sigma_V$	-5.00
Ds1	J ₃ q	6 417.90	254.51	155.60	$\sigma_H > \sigma_V$	98.90
Q1	J ₂ x	2 653.50	126.78	63.71	$\sigma_H > \sigma_V$	63.10
H001	E ₂₋₃ a	3 180.00	115.52	77.39	$\sigma_H > \sigma_V$	38.13

力,这与前人得到的研究区大部分地区最大主应力基本为水平方向的认识基本吻合^[15]。

前人基于构造压实作用,建立了实际地层条件下构造挤压引起流体增压的定量评价模型^[42]:

$$\Delta p = \xi(\sigma_1 - S) \quad (1)$$

式中: Δp 为构造挤压引起的流体增压,MPa; ξ 为介于0~1的封闭系数,0代表完全开放流体体系,1代表完全封闭流体体系; σ_1 为最大水平主压应力,MPa; S 为增压前的载荷,MPa;

该公式推导时尽管没有考虑构造挤压应力施加到固体颗粒和孔隙流体上的分配比例,但仍能通过该公式来大致判断构造挤压增压作用。从公式(1)可以看出,某地层体系产生的构造挤压增压大小与该体系的封闭程度(大小可用封闭系数 ξ 来表示)和构造挤压应力与挤压前的载荷应力差有关^[42],在同等构造应力作用下,系统封闭程度越大,其构造挤压引起的增压就越大;对于具有一定封闭能力的同一地层体系来说,构造挤压应力与挤压前的载荷应力差越大,其构造挤压引起的增压就越大。从表1中可看出,准噶尔盆地南缘喜马拉雅中晚期(基本在塔西河期以来)第一排、第二排、第三排构造带和四棵树凹陷东部地区水平最大主应力与垂向上的载荷应力的差值较大,在38~99 MPa,从公式(1)可得到构造挤压引起的流体增压与该差值呈正比,所以研究区大部分地区具备形成较大幅度构造挤压增压的条件;有些地区如第一排构造带中水平最大主应力与垂向上的载荷应力的差值也较大,没能形成强烈构造挤压作用下的强超压(实测压力显示该构造带下组合超压基本为弱超压)(图3),这可能

与该构造带喜马拉雅晚期构造抬升作用有关,构造抬升除了可引起地层压力降低^[45],还可引起上覆盖层剥蚀后下组合地层封闭程度减弱,根据公式(1)地层封闭系数较小时,在同等构造应力作用下引起的构造挤压增压较小。

从泥岩的密度与声波速度关系曲线中可提供研究区深层构造挤压引起增压的证据。从Xh1和Ds1两口井的深层侏罗系和下白垩统超压泥岩点和其上部古近系和白垩统超压泥岩点的密度与声波速度的落点来看,大部分下组合超压点均偏离了正常压实关系曲线(图7),从图2的超压识别模式图中可看出,这种偏离说明泥岩超压的形成机制主要有粘土矿物转化、生烃增压和构造挤压。根据前人研究认为研究区中侏罗统西山窑组和下侏罗统三工河组和八道湾组煤层、白垩系清水河组泥岩和古近系安集海河组泥岩等为可能的烃源岩层,但有效烃源岩在研究区的分布范围不同,侏罗系有效烃源岩在研究区分布广泛,基本覆盖了研究区大部分地区,白垩系清水河组有效烃源岩分布范围较侏罗系稍小,主要分布在第二、第三构造带和四棵树凹陷东部地区,古近系安集海河组有效烃源岩主要分布在四棵树凹陷^[11],从声波速度与密度关系(图7)可看出,偏离正常压实曲线的泥岩点除了可能的侏罗系烃源岩层,还有古近系安集海河组和白垩系非烃源岩层,且烃源岩层与非烃源岩相比这种偏离幅度没有明显差异,说明这种偏离不是由于生烃作用所致。前人研究表明,在泥岩温度达到70~110℃时,可引起泥岩层中粘土矿物之间进行转化,如蒙脱石向伊利石转化,这种转化可引起泥岩地层产生超压^[27];根据研究区

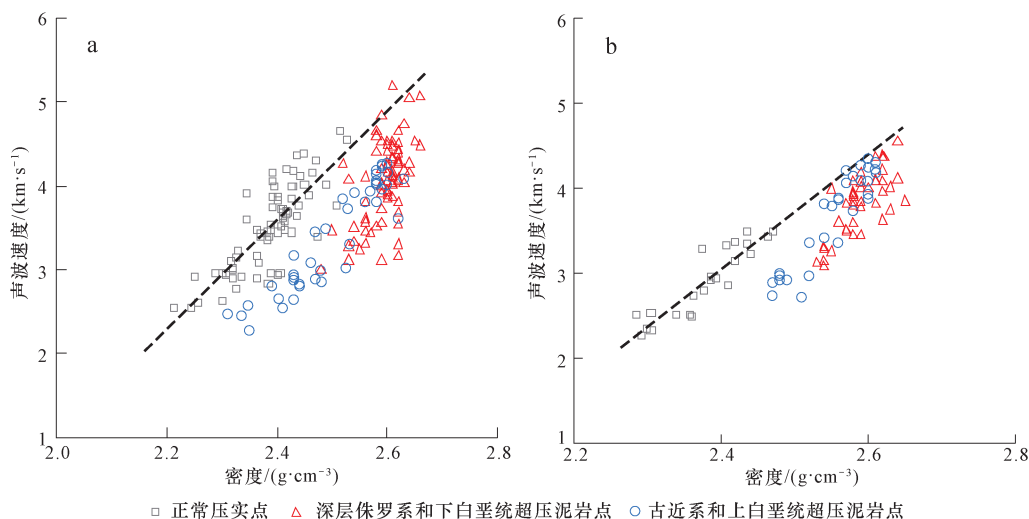


图7 准噶尔盆地南缘典型井密度与声波速度的关系

Fig.7 Density and sonic velocity cross plots of typical wells at the southern margin of the Junggar Basin

a. Ds1 井; b. Xh1 井

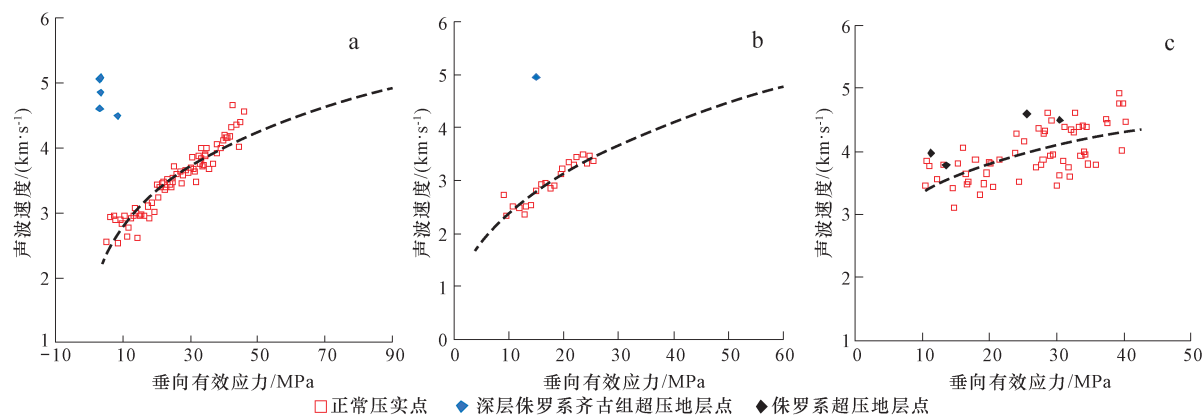


图8 准噶尔盆地南缘典型井垂向有效应力与声波速度的关系

Fig. 8 Cross plots of effective vertical stress and sonic velocity of typical wells at the southern margin of the Junggar Basin

a. Ds1 井; b. Xh1 井; c. Q1 井

实测温度数据和以往有关研究区温度的研究^[46]表明,研究区地温梯度普遍较低,一般在 15 ~ 22 °C/km,而研究区两口井出现的超压顶面埋深在 1 890 ~ 2 500 m,超压泥岩的温度与粘土矿物转化的温度窗口不一致,所以推测研究区粘土矿物转化也不是深层超压的主要形成机制。排除两个可能超压机制后,可推断水平构造挤压作用是研究区下组合储层超压的主要形成机制之一。

4.3 超压传递作用

超压传递作用可引起储层中产生超压在很多盆地都有报道,如文莱巴拉姆地区、北海中央地区、中国塔里木、准噶尔、柴达木、渤海湾、莺歌海等盆地^[31,33,47-48],超压传递包括垂向沿断裂的传递^[2,31,33]和侧向沿倾斜渗透性储层的传递^[2,33,47]。前已述及,研究区断裂较为发育,西湖背斜、独山子背斜、霍尔果斯-玛纳斯-吐谷鲁背斜带、安集海背斜、呼图壁背斜及第一排山前褶皱带均发育多条与深部油气源沟通的断裂^[2,17,19],这些断裂在强烈构造挤压作用下,会周期性开启,所以这些背斜具备垂向超压传递的条件;另外,这些背斜的形成使得背斜两翼地层发生倾斜,同一渗透性地层在不同的埋深与具有不同过剩压力的地层接触,超压流体在过剩压力差的驱动下沿渗透性地层由深部侧向上向浅部流动直至达到压力平衡为止,该过程即为超压的侧向传递作用,所以研究区这些背斜的形成也具有侧向超压传递的条件^[2,47]。

通过研究区 Xh1 和 Ds1 两口井地层的声波速度与垂向有效应力关系图(图中深层超压泥岩点的地层压力数据来自邻近砂岩,可反映邻近砂岩的超压状态^[31]),发现四棵树凹陷东部地区西湖背斜 Xh1 井、独山子背斜 Ds1 井下组合齐古组超压点在声波速度与垂向有效应力关系图中均明显偏离正常压实关系曲线

(图 8a,b),根据图 2 中不同类型超压形成机制的电性差异响应特征,这些点处的超压形成机制应为超压传递、粘土矿物转化和生烃增压和构造挤压;上述图 7 中已把粘土矿物转化和生烃增压两种机制排除,这里对于渗透性储层来说,超压传递不能排除,超压传递发生的地质条件为喜马拉雅晚期强烈构造挤压作用下断裂的形成和周期性开启和背斜形成引起的地层倾斜,其分别可形成垂向超压传递和侧向超压传递,所以,从这些关系图和实际地质条件综合推断出,研究区下组合储层强超压的形成机制除了构造挤压,还应有超压传递作用。

第一排构造带的 Q1 井地层声波速度与垂向有效应力的关系图(图中下组合超压泥岩点的地层压力数据来自邻近砂岩)中可看出,其中, Q1 井 4 个实测压力点均略微偏离了正常压实趋势线(图 8c),可推断该井处下组合砂岩弱超压的主要形成机制,除了上述分析的不均衡压实之外,还应有构造挤压和超压传递作用。

5 研究区下组合储层超压的演化特征及其贡献

常用数值模拟软件如 PetroMod 和 BasinMod 等在模拟地层压力时,均没有考虑构造挤压作用,本次主要利用自主开发的软件的数值模拟与地质综合分析相结合,来定量表征研究区下组合储层超压的形成和演化特征及各超压形成机制对现今超压形成的贡献。

利用基于同时考虑水平构造应力和垂向载荷双重压实作用的水动力学方程^[49-50]开发的软件,来数值模拟构造挤压对地层超压的影响,公式如下:

$$(\beta\Phi + \beta_s) \frac{dp}{dt} = \frac{1}{\rho_f} \nabla \left[\frac{K\rho_f}{\mu} (\nabla p - \rho_f \vec{g}) \right] + \beta_s \frac{d\bar{\sigma}}{dt} + \alpha\Phi \frac{dT}{dt} + Q \quad (2)$$

式中: β 和 β_s 分别为流体和岩石的压缩系数, MPa^{-1} ; K 为地层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; Φ 为地层孔隙度,小数; μ 为流体的动力学粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; t 为时间, s ; $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}' + p$ 为平均应力, MPa ; $\bar{\sigma}'$ 为平均有效应力, MPa ; p 为地层压力, MPa ; α 为流体的热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; Q 是单位体积流体的体积增长率,小数; ρ_f 为流体的密度, kg/m^3 ,这里取1 020; g 为重力加速度, m/s^2 。

公式(2)中地层渗透率 K 可采用简化的 Kozeny-Carmen 公式^[50]:

$$K = \lambda \Phi^n \quad (3)$$

式中: λ 为渗透率系数, n 为一接近5.0的经验系数^[50],本次模拟时所有地层中 n 均取5.0;这里平均有效应力^[50]可表示为:

$$\bar{\sigma}' = \frac{1}{3}(\sigma_v + 2\nu\sigma_v + \sigma_T) - p \quad (4)$$

式中: σ_v 为垂向载荷应力, MPa ; ν 为应力比系数; σ_T 为构造挤压应力, MPa 。这里构造挤压应力 σ_T 在浅部时为随深度的函数,大于一定深度则为一定值^[50],可表示为:

$$\begin{cases} \sigma_T = \sigma_{T_{\max}} e^{b(z-z_m)}, & z < z_m, \\ \sigma_T = \sigma_{T_{\max}}, & z \geq z_m, \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{T_{\max}}$ 为最大构造应力, MPa ; z_m 为给定的深度, m ; b 为系数。公式(2)涉及参数较多,求解十分复杂,但可用循环迭代的方法进行求解,这样可实现地质历史时期不同构造挤压条件下地层流体压力的定量恢复。该模型只考虑机械压实作用,各种化学成岩作用均不予考虑。

选取分别位于研究区四棵树凹陷东部和第三排构造带东部的 Xh1 井和 Df1 井作为主要模拟对象,在模拟时,应力比系数取 0.82^[50], z_m 取 10 000 m, b 取 0.000 2,Xh1 井和 Df1 井在独山子期以来施加最大构造应力($\sigma_{T_{\max}}$)分别为 310 和 200 MPa,施加该构造应力时得到的 Xh1 井侏罗系在喜马拉雅晚期(接近现今时期)最大水平主压应力与该井较近的 Ds1 井声发射实验测定的构造应力(表 1)较为接近,得到的 Df1 井安集海河组在喜马拉雅晚期最大水平主压应力与该井较近的 H001 井声发射实验测定的构造应力(表 1)较为接近。通过构造挤压和沉积负荷等共同作用下超压的数值模拟,得到 Xh1 井下组合侏罗系齐古组在强烈构造挤压作用之前(基本在塔西河末期)压力系数为 1.03,过剩压力为 1.1 MPa,占现今地层实测超压的 1.4%,基本为常压;在强烈构造挤压之后,由于构造挤压增压作用使得该地层压力快速增大,构造挤压作用而产生的增压为 47.1 MPa,占现今实测超压的 65.8%

(图 9a)。Df1 井下组合侏罗系齐古组,在强烈构造挤压作用之前由于不平衡压实而形成了弱超压,超压值为 17.3 MPa,占现今地层超压的 33.3%(现今该地层压力取自 dc 指数法的计算值,压力系数为 1.7),在独山子期强烈构造挤压之后,由于构造挤压增压作用使得该地层压力快速增大,强烈构造挤压快速增压的同时,也引起该地层孔隙度有一定幅度的降低,该地层由于构造挤压作用而产生的超压值为 26.4 MPa,占现今地层超压的 50.8%(图 9b)。除了构造挤压和垂向不平衡压实产生的地层增压外,还有沿着侧向砂岩和垂向断裂的超压传递引起的地层增压,把现今地层超压值减去构造挤压和垂向不平衡压实两者形成的地层增压值视为超压传递引起的增压大小。这时,可得到 Xh1 井和 Df1 井下组合侏罗系齐古组超压传递作用引起的增压值分别为 23.5 和 8.3 MPa,对现今地层超压的贡献分别为 32.8%和 15.9%。超压传递的产生与背斜的形成和断裂的形成和开启有密切关系,前人研究表明,淮南地区三排构造带形成时间不同,形成的相对时间序列为山前第一排构造形成于 6~7 Ma,第二排构造带(霍-玛-吐褶皱带)形成于 2 Ma,第三排构造带(安集海和呼图壁褶皱带)和四棵树凹陷东部(西湖和独山子褶皱带)形成于中更新世 1 Ma 之后^[1],这些构造形成时伴随着断裂的形成和开启,促使了侧向和垂向上超压传递的发生。因此,本次 Xh1 井和 Df1 井齐古组储层中超压传递产生增压发生的时间基本在 1 Ma 以来(图 9)。

从上述得到的主要超压形成机制、形成时期和贡献评价来看,研究区古近纪以来到塔西河期,在下白垩统吐谷鲁群区域性盖层的封盖和快速深埋作用下,部分地区如 Df1 井下组合齐古组储层中由于垂向上的不平衡压实作用开始产生了一定幅度的超压,其对现今强超压形成的贡献为 33.3%(图 9),而部分地区如第一排构造带、四棵树凹陷东部 Xh1 井下组合齐古组储层中仅形成了较弱的垂向不平衡压实增压,说明在塔西河末期研究区第二排、第三排构造带和四棵树凹陷东部地区下组合储层中基本已形成了较好的封闭能力;塔西河末期到现今,天山的持续隆起使得研究区开始遭受自南向北的强烈构造挤压作用,在此作用下研究区下组合储层中普遍形成了强度不等的构造挤压增压,封闭性较好的第二排、第三排构造带和四棵树凹陷东部地区下组合侏罗系储层中形成了大幅度的构造挤压增压,这些构造带中构造挤压增压对现今储层强超压形成的贡献普遍在 50%以上,Df1 井和 Xh1 井分别为 50.8%和 65.8%(图 9),而第一排构造带由于抬升剥蚀

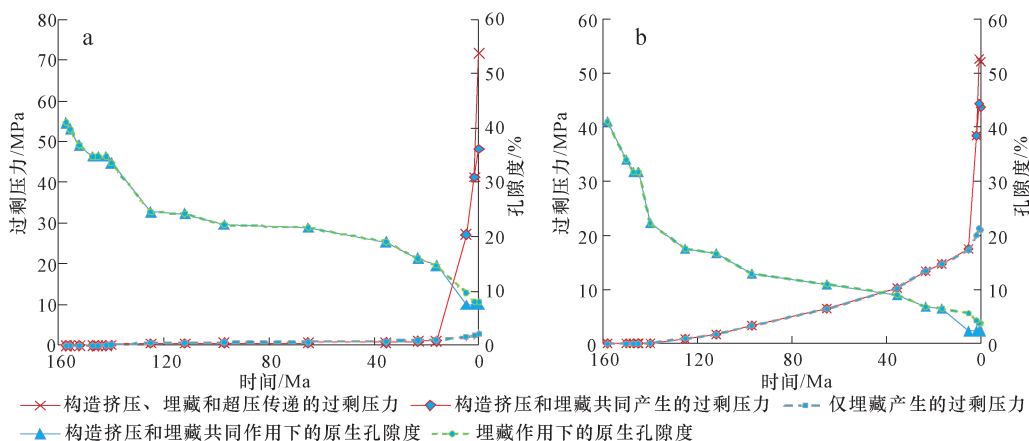


图9 准噶尔盆地南缘典型井齐古组过剩压力和孔隙度演化

Fig. 9 Diagram showing the evolution of residual pressure and porosity of the Qigu Formation from typical wells at the southern margin of the Junggar Basin

a. Xh1 井; b. Df1 井

作用使得前期形成的低幅度不平衡压实增压降低,同时也减弱了下组合侏罗系和三叠系储层的封闭能力,使其内仅形成了低幅度的构造挤压增压;独山子末期以来特别是第四纪,第二排、第三排构造带和四棵树凹陷东部背斜的形成和新断裂的形成或已有断裂的开启促使了侧向和垂向上超压传递的发生,加速了这些构造带中下组合侏罗系储层中强超压的形成,Df1 井和 Xh1 井下组合侏罗系齐古组超压传递作用对现今强超压形成的贡献分别为 15.9% 和 32.8% (图 9),该增压作用对第一排构造带弱超压的形成可能也有一定贡献。

6 结论

1) 构造挤压增压和垂向不平衡压实增压在地层孔隙度和地层压力随埋深的变化关系、垂向有效应力与声波速度、密度与声波速度的变化关系方面表现出明显差异性,这种差异性的认识为前陆挤压区构造挤压增压机制识别提供了一种方法。

2) 准噶尔盆地南缘第一排构造带下组合储层弱超压、第二排、第三排构造带和四棵树凹陷东部深层侏罗系齐古组强超压的最主要成因为构造挤压作用,其次为沿断裂的垂向和沿砂体的侧向超压传递作用和垂向上的不平衡压实作用。

3) 古近纪以来到塔西河期,垂向上的不平衡压实作用在研究区部分地区开始形成,该增压作用对四棵树凹陷东部和第三排构造带东部深层下组合齐古组强超压形成的贡献分别为 1.4% 和 33.3%;塔西河末期以来,持续的强烈构造挤压作用引起了研究区下组合储层中快速增压,该增压作用对两个构造带下组合齐古组强

超压形成的贡献分别为 65.8% 和 50.8%;独山子末期特别是第四纪,背斜的形成和断裂的开启使得超压传递增压作用快速形成,该增压作用对两个构造带下组合齐古组强超压形成的贡献分别为 32.8% 和 15.9%。

致谢:在研究过程中得到中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院的大力支持,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 郭召杰,吴朝东,张志诚,等. 准噶尔盆地南缘构造控藏作用及大型油气藏勘探方向浅析[J]. 高校地质学报,2011,17(2):185-195.
Guo Zhaojie, Wu Chaodong, Zhang Zhicheng, et al. Tectonic control on hydrocarbon accumulation and prospect for large oil-gas field exploration in the Southern Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities,2011,17(2):185-195.
- [2] Luo X R, Wang Z M, Zhang L Q, et al. Overpressure generation and evolution in a compressional tectonic setting, the southern margin of Junggar Basin, northwestern China[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(8):1123-1139.
- [3] 杨庚,李伟,李本亮,等. 淮南逆冲褶皱带超压与逆冲断层持续活动[J]. 地质科学,2012,47(3):669-684.
Yang Geng, Li Wei, Li Benliang, et al. Activity thrust faults and overpressure in the thrust and fold belt of southern Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology,2012,47(3):669-684.
- [4] 曲江秀,查明. 准噶尔盆地异常压力类型及成因探讨[J]. 石油实验地质,2003,25(4):333-336.
Qu Jiangxiu, Zha Ming. Origin and characteristics of abnormal pressure in the Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003,25(4):333-336.
- [5] 徐国盛,匡建超,李建林,等. 天山北侧前陆盆地异常高压成因研究[J]. 成都理工学院学报,2000,27(3):255-262.
Xu Guosheng, Kuang Jianchao, Li Jianlin, et al. Research on the genesis of abnormal high pressure in the foreland basin to the north of Tianshan[J]. Journal of Chengdu University of Technology,2000,27(3):255-262.

- [6] 李忠权,陈更生,郭冀义,等.准噶尔盆地南缘西部地层异常高压基本地质特征[J].石油实验地质,2001,23(1):47-50.
Li Zhongquan, Chen Gengsheng, Guo Jinyi, et al. Basic geological characteristics of the abnormal formation overpressure in the western part of southern fringe of Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(1): 47-50.
- [7] 张闻林,张峭楠,陈义才,等.淮南西部地层超压分析[J].天然气工业,2004,24(1):26-28.
Zhang Wenlin, Zhang Shaonan, Chen Yicai, et al. Analysis of formation overpressures in the west part of Zhunnan region[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(1): 26-28.
- [8] 王震亮,孙明亮,耿鹏,等.淮南地区异常地层压力发育特征及形成机理[J].石油勘探与开发,2003,30(1):32-34.
Wang Zhenliang, Sun Mingliang, Geng peng, et al. The development features and formation mechanisms of abnormal high formation pressure in southern Junggar region[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 32-34.
- [9] 邵雨.准噶尔盆地南缘深层下组合侏罗系油气成藏研究[J].高校地质学报,2013,19(1):86-94.
Shao Yu. Hydrocarbon accumulation of the Jurassic deeply-buried Lower assemblage in the Southern Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 86-94.
- [10] 魏东涛,赵应成,阿不力米提,等.准噶尔盆地南缘前陆冲断带油气成藏差异性分析[J].高校地质学报,2010,16(3):339-350.
Wei Dongtao, Zhao Yingcheng, Abulimiti, et al. Difference of hydrocarbon accumulation in the foreland thrust-fold belt of the southern Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(3): 339-350.
- [11] 陈建平,王绪龙,邓春萍,等.准噶尔盆地南缘油气生成与分布规律——烃源岩地球化学特征与生烃史[J].石油学报,2015,36(7):767-780.
Chen Jianping, Wang Xulong, Deng Chunping, et al. Geochemical features of source rocks in the southern margin, Junggar Basin, North-western China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 767-780.
- [12] 万里皋,刘登明,侯六根.准噶尔盆地南缘前陆冲断带构造特征研究[J].石油地球物理勘探,2005,40(增刊):40-45.
Wan Ligao, Liu Chenming, Hou Liugen. Structural feature of foreland thrust-fold belts in the southern edge of Junggar Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(S1): 40-45.
- [13] 杨海波,陈磊,孔玉华.准噶尔盆地构造单元划分新方案[J].新疆石油地质,2004,25(6):686-688.
Yang Haibo, Chen Lei, Kong Yuhua. A novel classification of structural units in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(6): 686-688.
- [14] 孙自明,何治亮,牟泽辉.准噶尔盆地南缘构造特征及有利勘探方向[J].石油与天然气地质,2004,25(2):216-221.
Sun Ziming, He Zhiliang, Mou Zehui. Structural features and favorable exploration areas in southern margin of Junggar basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 216-221.
- [15] 吴晓智,王立宏,宋志理.准噶尔盆地南缘构造应力场与油气运聚的关系[J].新疆石油地质,2000,21(2):97-100.
Wu Xiaozhi, Wang Lihong, Song Zhili. The relations between structural stress field and hydrocarbon migration and accumulation in southern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21, 97-100.
- [16] 何登发,张磊,吴松涛,等.准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J].石油与天然气地质,2018,39(5):845-861.
He Dengfa, Zhang Lei, Wu Songtao, et al. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 845-861.
- [17] 陈涛,魏东涛,杨海波,等.淮南前陆冲断带构造特征及其对油气成藏的影响[J].天然气地球科学,2006,17(5):711-718.
Chen Tao, Wei Dongtao, Yang Haibo, et al. The tectonic characteristics on the foreland thrust belt and its influence of reservoiring of oil and natural gas in southern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(5): 711-718.
- [18] 汪新伟,汪新文,刘剑平,等.准噶尔盆地南缘褶皱逆冲断层带分析[J].地学前缘,2005,12(4):411-421.
Wang Xinwei, Wang Xinwen, Liu Jianping, et al. Analysis of the fold thrust zone in the southern Junggar Basin north western China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 411-421.
- [19] 张健,崔琴,胡瀚文,等.准噶尔盆地南缘四棵树凹陷下组合油气成藏条件与评价[J].新疆地质,2016,24(2):269-274.
Zhang Jian, Cui Qin, Hu Hanwen, et al. Hydrocarbon accumulation conditions of the Lower assemblage in Sikesu Sag, the southern margin of Junggar basin[J]. Xinjiang Geology, 2016, 24(2): 269-274.
- [20] 方世虎,贾承造,宋岩,等.淮南地区前陆冲断带晚新生带构造变形特征与油气成藏[J].石油学报,2007,28(6):1-5.
Fang Shihu, Jia Chenzao, Song Yan, et al. Late Cenozoic structural deformation and its implication for petroleum accumulation in the southern Junggar thrust belt[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 1-5.
- [21] 郭继刚,王绪龙,庞雄奇,等.准噶尔盆地南缘中下侏罗统烃源岩评价及排烃特征[J].中国矿业大学学报,2013,42(4):595-605.
Guo Jigang, Wang Xulong, Pang Xiongqi, et al. Evaluation and hydrocarbon expulsion characteristics of the Middle-Lower Jurassic source rock in the southern margin of Junggar basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 595-605.
- [22] 李学义,邵雨,李天明.准噶尔盆地南缘三个油气成藏组合研究[J].石油勘探与开发,2003,32(6):32-34.
Li Xueyi, Shao Yu, Li Tianming. Three oil-reservoir combinations in south marginal of Jungar basin, Northwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 32(6): 32-34.
- [23] 田孝茹,卓勤功,张健,等.准噶尔盆地南缘吐谷鲁群盖层评价及对下组合油气成藏的意义[J].石油与天然气地质,2017,38(2):334-344.
Tian Xiaoru, Zhuo Qingong, Zhang Jian, et al. Sealing capacity of the Tugulu Group and its significance for hydrocarbon accumulation in the lower play in the southern Junggar Basin, northern China[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 334-344.
- [24] 雷德文,张健,陈能贵,等.准噶尔盆地南缘下组合成藏条件与大油田勘探前景[J].天然气工业,2012,32(2):16-22.
Lei Dewen, Zhang Jian, Chen Nenggui, et al. Conditions for gas pooling in the lower assemblage in the southern margin of the Junggar Basin and the exploration prospect of large hydrocarbon fields[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 16-22.
- [25] Osborne M J, Swarbrick R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: a reevaluation[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6):1023-1041.
- [26] Grauls D. Overpressures: causal mechanisms, conventional and hydro-mechanical approaches[J]. Oil & Gas Science and Technology, 1999, 54: 667-678.

- [27] Ramdhan A M, Goult N R. Overpressure and mudrock compaction in the Lower Kutai Basin, Indonesia: A radical reappraisal [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(10): 1725–1744.
- [28] 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.
- [29] 张宇. 流体超压对西部凹陷天然气分布的控制作用[J]. 特种油气藏, 2018, 25(3): 28–31.
Zhang Yu. Effect of fluid overpressure on the natural gas distribution in the West Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 28–31.
- [30] 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.
- [31] Tingay M R P, Hillis R R, Swarbrick R E, et al. Origin of overpressure and pore-pressure prediction in the Baram province, Brunei [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(1): 51–74.
- [32] Tingay M R P, Morley C K, Laird A, Limpornpipat O, et al. Evidence for overpressure generation by kerogen-to-gas maturation in the northern Malay Basin [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(4): 639–672.
- [33] 张凤奇, 王震亮, 赵雪娇, 等. 库车坳陷迪那2气田异常高压成因机制及其与油气成藏的关系[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 739–746.
Zhang Fengqi, Wang Zhenliang, Zhao Xuejiao, et al. Genetic mechanism of overpressure and its relationship with hydrocarbon accumulation in Dina-2 gasfield, Kuqa depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 739–746.
- [34] Couzens-Schultz B A, Azbel K. Predicting pore pressure in active fold-thrust systems: An empirical model for the deepwater Sabah fold-belt [J]. Journal of Structural Geology, 2014, 69: 465–480.
- [35] O'Conner S, Swarbrick R E, Lahann R W. Geologically driven pore fluid pressure models and their implications for petroleum exploration. Introduction to thematic set [J]. Geofluids, 2011, 11: 343–348.
- [36] Yassir N A, Bell J S. Abnormally high fluid pressures and associated porosities and stress regimes in sedimentary Basins [J]. SPE Formation Evaluation, 1996, 5: 5–10.
- [37] Hermanrud C, Wensaas L, Teige G M G, et al. Shale porosities from well logs on Haltenbanken (Offshore Mid-Norway) show no influence of overpressuring [M]//Law B E, Ulmishek G F, Slavin V I. Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments. Tulsa: AAPG, 1998, 70: 65–85.
- [38] Guo X W, Liu K Y, Jia C Z, et al. Constraining tectonic compression processes by reservoir pressure evolution: Overpressure generation and evolution in the Kelasu Thrust Belt of Kuqa Foreland Basin, NW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 72: 30–44.
- [39] Bowers G L, Katsube T J. The role of shale pore structure on the sensitivity of wire-line logs to overpressure [M]//Huffman A R, Bowers G L. Pressure regimes in sedimentary basins and their prediction. Tulsa: AAPG, 2002, 76: 43–60.
- [40] 何生, 何治亮, 杨智, 等. 准噶尔盆地腹部侏罗系超压特征和测井响应以及成因[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2009, 34(3): 457–470.
He Sheng, He Zhiliang, Yang Zhi, et al. Characteristics, well-log responses and mechanisms of overpressures within the Jurassic formation in the central part of Junggar Basin [J]. Earth Science—Journal of China University Geosciences, 2009, 34(3): 457–470.
- [41] Audet D M, McConnell J D C. Forward modelling of porosity and pore pressure evolution in sedimentary basins [J]. Basin Research, 1992, 4: 147–162.
- [42] 张凤奇, 王震亮, 宋岩, 等. 库车坳陷构造挤压增压定量评价的新方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(4): 1–7.
Zhang Fengqi, Wang Zhenliang, Song Yan, et al. The new method of quantitative evaluation on pressurization according to tectonic compression in Kuqa depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(4): 1–7.
- [43] Obradors-Prats J, Rouainia M, Aplin A C, et al. Assessing the implications of tectonic compaction on pore pressure using a coupled geo-mechanical approach [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 79: 31–43.
- [44] 李铁军. 准噶尔盆地南缘异常高压及其形成机制初探[J]. 地质科学, 2004, 39(2): 234–244.
Li Tiejun. Overpressure and its generation in south edge of the Junggar Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(2): 234–244.
- [45] 孙波, 蒋有录, 石小虎, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷压力演化与超压形成机制[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(2): 28–35.
Sun Bo, Jiang Youlu, Shi Xiaohu, et al. Pressure evolution and formation mechanism of overpressure in Dongpu depression, Bohaiwan Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(2): 28–35.
- [46] 邱楠生, 王绪龙, 杨海波, 等. 准噶尔盆地地温分布特征[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 350–358.
Qiu Nansheng, Wang Xulong, Yang Haibo, et al. The characteristics of temperature distribution in the Junggar Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(3): 350–358.
- [47] Yardley G S, Swarbrick R E. Lateral transfer: a source of additional overpressure? [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(4): 523–537.
- [48] 范昌育, 王震亮, 王爱国, 等. 柴达木盆地北缘鄂博梁构造带超压形成机制与高压气、水层成因[J]. 石油学报, 2015, 36(6): 699–706.
Fan Changyu, Wang Zhenliang, Wang Aiguo, et al. Mechanisms for overpressure generation and origin of overpressured gas and aquifer layers, Eboliang structure belt, northern Qaidam Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 699–706.
- [49] 王震亮, 罗晓容, 陈荷立. 沉积盆地地下古水动力场恢复——原理与方法[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1997, 27(2): 155–159.
Wang Zhenliang, Luo Xiaorong, Chen Heli. Rebuilding of palaeohydrodynamic field in sedimentary basin: Principle and means [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1997, 27(2): 155–159.
- [50] 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 X R. Quantitative analysis on overpressuring mechanism resulted from tectonic stress [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(6): 1086–1093.