

基于新钻井对柴达木盆地东部石炭系分布 及控制因素的再认识

商琳¹, 戴俊生¹, 王彤达², 曹国娟³, 叶志达¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化股份胜利油田分公司地质科学研究院, 山东东营 257015; 3. 塔里木油田勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000)

摘要:通过钻井、野外地质考察、地震精细解释等资料,重新确定柴达木盆地东部石炭系残余地层的分布范围,并根据平衡剖面恢复和印支期应力场数值模拟分析柴达木盆地东部构造演化特征,探讨石炭系分布的影响因素。结果表明:石炭系主要分布于大柴旦凹陷、德令哈凹陷、霍布逊凹陷和大红沟凸起等地区,鱼卡凹陷、欧南凹陷基本无石炭系残留;石炭系残余分布受古地理格局和后期构造运动共同控制,古地理格局造成了东西方向石炭系分布的差异,柴达木盆地东部地区印支期褶皱抬升,形成近东西走向背斜凸起,造成石炭系抬升剥蚀;柴达木盆地东部在印支期以逆冲断裂和与之相关的断展褶皱为主要构造变形模式,在不均匀分布的最大主应力与右旋剪应力共同作用下,石炭系在各地遭受不同程度的剥蚀。

关键词:柴达木盆地东部; 石炭系; 残余地层分布; 构造应力场; 数值模拟

中图分类号:P 542.3

文献标志码:A

New study on Carboniferous stratigraphic distribution and controlling factors in the eastern Qaidam Basin based on new drilling data

SHANG Lin¹, DAI Jun-sheng¹, WANG Tong-da², CAO Guo-juan³, YE Zhi-da¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Geological Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257015, China;

3. Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield, Kurler 841000, China)

Abstract:Based on drilling data, field geological investigation, fine interpretation of seismic data, the distribution of the residual Carboniferous strata in the eastern Qaidam Basin was determined. According to the balanced section and the numerical simulation of tectonic stress field in Indosinian, the characteristics of basin tectonic evolution were analyzed and the impacts of Carboniferous strata distribution factors were explored. The results show that Carboniferous is mainly distributed in Dachaidan sag, Delingha sag, Huobuxun sag and Dahonggou salient. There is almost no Carboniferous residual in Yuqia sag and Ounan sag, the Carboniferous residual strata distribution is controlled by the ancient geographical pattern and the late tectonic movement. The palaeogeographic pattern may explain the Carboniferous residual differences between the east and west. And the eastern Qaidam Basin folded and uplifted in Indosinian, forming a series of nearly east-west anticlinal bulge, which resulted in Carboniferous uplift and erosion. Thrust faults and fault propagation folds are the major tectonic deformation modes of the eastern Qaidam Basin in Indosinian. Affected by the uneven distribution of the principal stress and dextral shear of Indosinian, Carboniferous suffered different degrees of erosion in various regions.

Key words: the eastern Qaidam Basin; Carboniferous; residual stratum distribution; tectonic stress field; numerical simulation

柴达木盆地东部是指北缘块断带鱼卡以东的地区和三湖坳陷东部,两者以绿梁山、锡铁山、埃姆尼

克山为界,北部主要有鱼卡、大柴旦、小柴旦、红山、欧南、德令哈等凹陷,内部有绿梁山、欧龙布鲁克山、

收稿日期:2013-09-28

基金项目:国家重大科技专项课题(2011ZX05014-004);中央高校基本科研业务费专项资金资助(12CX06004A)

作者简介:商琳(1987-),男,博士研究生,主要从事石油地质研究工作。E-mail:shanglinsonny@163.com。

锡铁山、埃姆尼克山等山体,南部主要有大红沟凸起和霍布逊凹陷^[1-3]。勘探初期,人们认为柴达木盆地石炭系可能已变质,将石炭系作为盆地基底对待。近年来,在盆地周缘的露头上不断发现有机质丰度较高、类型较好的石炭系烃源岩,并引起了广泛重视。学者们逐步认识到石炭系是柴达木盆地潜在的有利烃源岩层系。刘洛夫等^[4-6]认为柴达木盆地东部大部分地区有机质成熟度中等,正处于生、排烃高峰期,且分布广泛,具有良好的油气勘探前景。李守军^[7-9]等认为石炭系平面分布主要受古地理格局的控制,广泛分布于欧南、怀头他拉、德令哈一带,其中欧南凹陷石炭系残余厚度为 1 000 ~ 1 600 m。由于柴达木盆地石炭系勘探程度较低,全区只有霍参 1 井、尕丘 1 井、埃北 1 井等钻井钻遇石炭系,地震测网密度低,品质较差,导致前人对石炭系残余分布的认识存在一些问题,最新钻井(欧 1 井)揭示欧南凹陷缺失了石炭系—中下侏罗统。考虑到石炭系烃源岩对于柴达木盆地油气勘探的重要性,笔者根据钻井、野外地质考察、地震精细解释等资料对石炭系残余分布规律与控制因素进行研究。

1 石炭系残余分布

统计钻井及野外露头石炭系残余厚度(表 1),

并结合钻达基岩但未钻遇石炭系的钻井分布,确定了石炭系剥蚀区的范围;根据新井的钻探情况进行地层对比、地震层位标定追踪,确定不同地区石炭系的残余厚度并绘制柴达木盆地东部石炭系地层残余厚度(图 1)。

表 1 石炭系残余厚度统计
Table 1 Residual thickness of Carboniferous

序号	钻井或野外剖面	厚度 δ/m	序号	钻井或野外剖面	厚度 δ/m
1	埃北 1 井	>418	21	野马 1 井	0
2	尕丘 1 井	>610	22	园丘 1 井	0
3	霍参 1 井	1 200	23	马参 1 井	0
4	扎布萨尕秀西	999	24	马北 1 井	0
5	扎布萨尕秀东	528	25	野马 1 井	0
6	城墙沟	574	26	红山 1 井	0
7	石灰沟	1 035	27	红山参 1 井	0
8	穿山沟	932	28	红山参 2 井	0
9	大海滩	1 016	29	牦牛山	0
10	旺尕秀	116	30	大煤沟	0
11	胜利口	186	31	鱼卡	0
12	锡铁山	483	32	绿草山	0
13	结绿素	99	33	花石沟	0
14	小赛什腾山	457	34	柏树山	0
15	红山	39	35	达达肯乌拉山	0
16	旺尕秀打柴沟	387	36	大头羊	0
17	欧 1	0	37	尕扎乌嘴	0
18	鱼 34 井	0	38	圆顶山	0
19	尕中 20 井	0	39	平顶山	0
20	格参 1 井	0	40	羊肠子沟	0

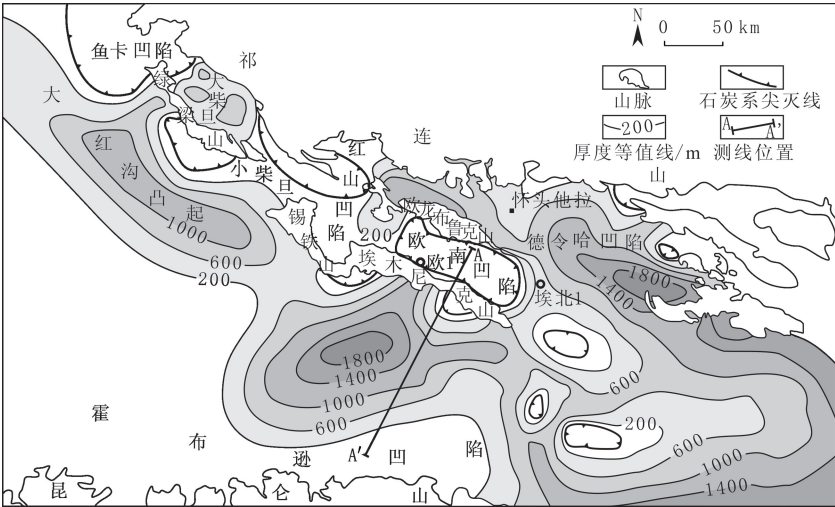


图 1 柴达木盆地东部石炭系残余厚度

Fig. 1 Residual thickness of Carboniferous in the eastern Qaidam Basin

从南北方向来看,绿梁山-锡铁山-埃姆尼克山一线以南地区,石炭系残余地层分布广,厚度大。其中霍布逊凹陷石炭系残余厚度最厚可达 2 000 m,分布最广;其次为大红沟凸起的南部,最厚达 1 000 m。绿梁山-红山-欧龙布鲁克山一线以北的柴北缘地

区,石炭系残余分布不稳定,厚度变化较大。大柴旦地区呈现凸起凹陷相间的格局,石炭系残余厚度为 200 ~ 600 m;红山凹陷东部、怀头他拉地区及德令哈凹陷石炭系残余分布相对稳定,厚度为 500 ~ 2 000 m。

东西方向上,以红山凹陷-锡铁山一线为界,以东地区,包括霍布逊凹陷、德令哈凹陷、怀头他拉地区石炭系残余地层分布广,厚度大;以西地区,包括大柴旦、大红沟凸起石炭系残余地层分布范围小,厚度变化大。

总体来看,石炭系主要分布在绿梁山-红山-锡铁山-欧南凹陷一线以南和以北地区,德令哈凹陷、霍布逊凹陷残留厚度大、范围广的石炭系地层是石炭系油气勘探的有利地区,鱼卡凹陷、欧南凹陷石炭系基本无残留。

2 石炭系残余地层分布控制因素

2.1 石炭纪盆地原始沉积分布特征

柴达木盆地东部石炭系自下而上发育下石炭统阿木尼克组、穿山沟组、城墙沟组、怀头他拉组,上石炭统克鲁克组、扎布萨尕秀组。通过对野外剖面的观察对比,认为石炭纪柴达木盆地东部经历了一个完整的海进—海退沉积旋回,石炭系在沉积期广泛分布于柴达木盆地东部地区,是一套平面展布较为广泛的沉积盖层。

早石炭世为一个海进的沉积旋回,受古陆分布的控制,在南部霍布逊地区沉积基底东高西低,石炭系沉降中心位于埃姆尼克山、德令哈一带^[10];晚石炭世整体是一个海退的沉积旋回,该层段主要发育多套灰岩-泥岩-砂岩-煤层的沉积组合,古陆向北西方向扩大,使得东部抬升,地形比南部略高,沉降中心由北东向西南迁移至埃姆尼克山南侧的霍布逊凹陷地区。

对比石炭系残余地层分布情况可知,研究区东西方向石炭系分布与古地理格局具有一致性,石炭纪沉降、沉积中心主要位于霍布逊凹陷、德令哈凹陷;而西南部牛-达古陆的存在限制了石炭系分布范围,古地理格局决定了研究区东西方向石炭系分布的差异。

2.2 石炭纪盆地后期改造

区域构造研究认为,柴达木盆地自石炭纪以来主要经历了海西晚期运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动^[1,10],为了分析各期构造运动对盆地的影响,选择了关键地震测线编制构造演化剖面。由于研究区经历了多期构造运动,抬升剥蚀严重,造成剖面无法平衡,因此在编制构造演化剖面过程中利用地层结构外延、断层切割关系和褶皱变形特征等地层要素特点恢复了被剥蚀前的地层形态,估算关键时期的剥蚀厚度。为了较为全面地反映研究区的构造演化过程,以横穿研究区的 CDM97472-

NE493.4 测线构造演化剖面(图2)为例来进行说明,剖面位置见图1。

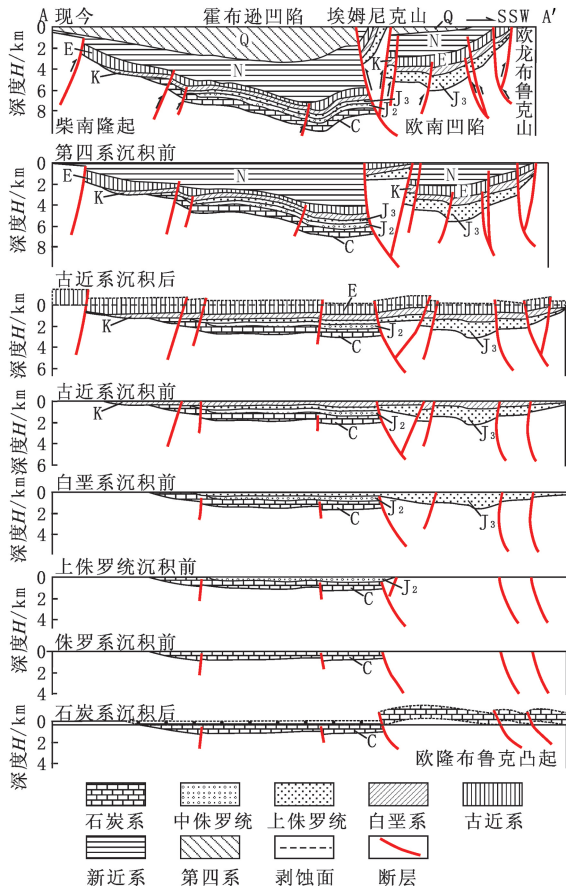


图2 柴达木盆地东部构造演化剖面

Fig. 2 Tectonic evolution sections in the eastern Qaidam Basin

石炭纪研究区形成陆表海和陆缘沉积,二叠系和三叠系主体未见出露,也未被钻井揭示,汤良杰等^[10]认为石炭纪—早二叠世柴达木盆地是继承性弧后陆缘海盆地;柴达木地块与华北地块在印支期发生陆间拼合,早二叠世区域构造应力场开始由早期的拉张向挤压过渡,晚二叠世区域挤压应力增强,三叠纪时挤压碰撞最为剧烈。由图2可知,石炭系沉积后侏罗纪沉积前,盆地整体遭受抬升剥蚀,北部的欧隆布鲁克陆块逆冲断裂强烈活动伴生褶皱,欧隆布鲁克凸起形成,古生界地层剥蚀殆尽;南部的霍布逊凹陷抬升相对较弱,石炭系及下伏古生界地层仍有残留。

侏罗纪开始了柴达木地块的陆相盆地演化,盆地纬度在侏罗纪中期基本保持不变,而华北与扬子地块继续北移^[11],盆地处在相对松弛伸展环境,构造反转,欧隆布鲁克凸起向北缩小,至晚侏罗世—白垩纪,霍布逊凹陷与欧南凹陷连成一片,欧南地区成为沉降中心。

白垩纪末至古近纪,盆地受到燕山晚期旋回以

及喜马拉雅早期旋回的影响,应力场逐渐由拉张转变为挤压,构造再次反转,逆冲断裂复活,并形成倾向相反的背冲断裂,古近系顶部遭受剥蚀,但总体来看变形较弱。

新近纪至第四纪,由于印度板块与欧亚板块碰撞的远程效应,盆地遭受强烈挤压,欧隆布鲁克山、埃姆尼克山等山脉在逆冲推覆的同时大幅度抬升,造成中生界、古生界乃至盆地基底遭受剥蚀;山前地区盆地受挤压大幅度拗陷,接受巨厚的新近系和第四系沉积。

综合分析认为石炭系剥蚀主要发生在三叠纪和新近纪至第四纪,但是由于新近纪和第四纪石炭系深埋地下,只在主要山体遭受剥蚀,影响相对较小,因此最终确定,印支期的挤压碰撞是造成柴达木盆地东部石炭系缺失的决定因素。

3 印支期应力场数值模拟

根据石炭系的剥蚀区的分布情况(图1),推测在印支期的碰撞过程中在柴达木盆地东部形成了一系列背斜隆起,造成石炭系遭受剥蚀,为了验证这一观点,进行了印支期应力场的数值模拟。

3.1 印支期古应力方向确定

通过对研究区内断层性质、形态及组合规律的分析,可判断出古构造应力场^[12]。印支期柴达木盆地东部活动断层都为逆断层,平面上断层的发育方向主要为 SE115°~NW295°(图3),根据安德生模式,最大主应力与逆断层走向呈水平垂直,因此印支期的最大主应力方向为 NE25°~SW205°。

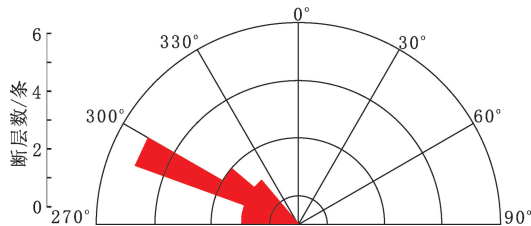


图3 印支期活动断层走向玫瑰花图

Fig.3 Rose diagram of active faults strike of Indochina

3.2 模拟方法

应力场模拟主要采用有限单元方法,建立地质模型并划分网格进而计算每个单元内应力和应变值^[12-15],具体步骤如下:

(1)建立地质模型。由于北部块断带与三湖拗陷基底性质的差异,受力时最容易在基底边界附近应力集中^[16-17],位于基底边界部位的绿南、埃南断裂在挤压过程中最先形成,因此建立绿南、埃南断裂先存的地质模型,将断层处理成具有一定宽度的断

裂带。依据实际情况,将不同区块赋以特定的力学参数,选用的力学参数来源于岩石力学试验。

(2)确定边界条件。根据声发射古应力测试结果可以确定盆地印支期最大主应力有效值为 58~73 MPa。通过反复模拟试验,选择了一种最合理的加载方式,最终确定模型南、北边界施加 60 MPa 挤压力,方向为 NE25°—SW205°。

(3)加载并输出计算结果。对上述加载边界条件的数学模型在 ANSYS 中求解,在后处理模块中可得到印支期最大主压应力、最小主压应力、平面剪应力较清晰的应力分布云图,模拟结果见图4。

3.3 模拟结果分析

印支期最大主应力模拟结果(图4(a))显示,最大主应力值为 38.9~72.6 MPa(负值代表压应力),方向为 NNE-SSW(图4(d)),与先存断裂在水平方向垂直。总体来看,断裂的上盘最大主应力值要高于下盘,位于上盘的绿梁山、红山、欧南地区最大主应力出现高值区,应力值大于 50 MPa,且分布稳定,因此这些地区构造活动相对较强;断裂下盘出现最大主应力的低值区,这些地区构造活动相对较弱;最大主应力在断裂两端以及断裂走向发生转变的位置明显变大,尤其是断裂交汇处,这些地区应力集中,很容易发育各种次级构造以释放应力。

最小主应力以张应力为主,张应力值为 0~10 MPa(图4(b)),断层内出现压应力,方向以垂向为主(图4(e)),应力等值线的延伸方向与断裂的展布方向一致,沿断裂呈条带状分布。主张应力在断裂走向发生变化和断裂的倾末端也是张应力高值区,是张性破裂发育的主要构造部位。

平面剪应力方向为右旋(负值代表右旋),应力值为 6~22.4 MPa(图4(c)),因此印支期形成的断裂具有压扭性右旋走滑断裂性质。总体来看断裂的上盘剪应力大于断层下盘,断裂走向发生变化处和断裂的倾末端也是剪应力的高值区。

3.4 印支期构造变形模式

柴达木盆地东部印支期最大主应力和中间主应力水平,最小主应力直立,符合安德生模式形成逆断层的应力条件,在应力的低值区易发育走向与最大主应力近于垂直的逆冲断裂,断裂走向为 SEE-NWW 方向;在逆冲断裂由深部层位向浅部层位扩展时,应力逐渐减弱,褶皱变形吸收了断裂的位移滑动量,断裂变形被褶皱变形所取代,在断裂前锋形成断展褶皱^[18-19],褶皱长轴方向与断层走向平行;随着挤压作用的增强,断裂位移量增大,沿褶皱前翼膝折带的轴面突破,最终发展成前端突破的断展背斜

(图 5)。在应力的 高值区,逆断层活动量大,褶皱吸收的位移量也会相应增大,背斜隆起的幅度与规模大,石炭系遭受强烈剥蚀;反之,应力的低值区隆起幅度相对较小,石炭系剥蚀相对较弱。

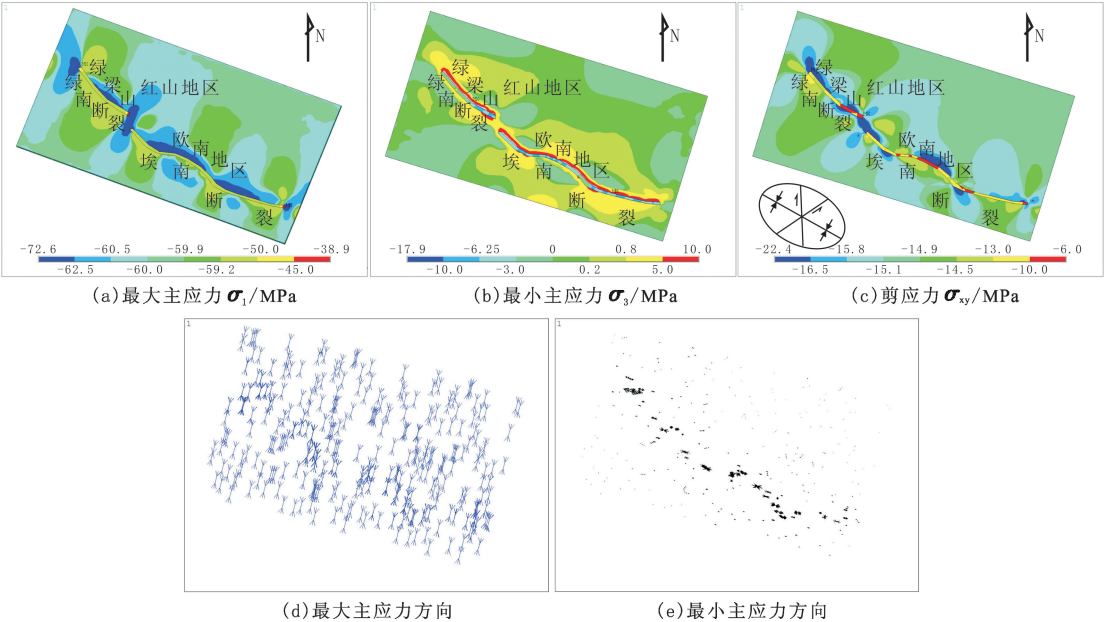


图 4 柴达木盆地东部印支期构造应力分布
Fig. 4 Distribution of structural stress of Indochina in the eastern Qaidam Basin

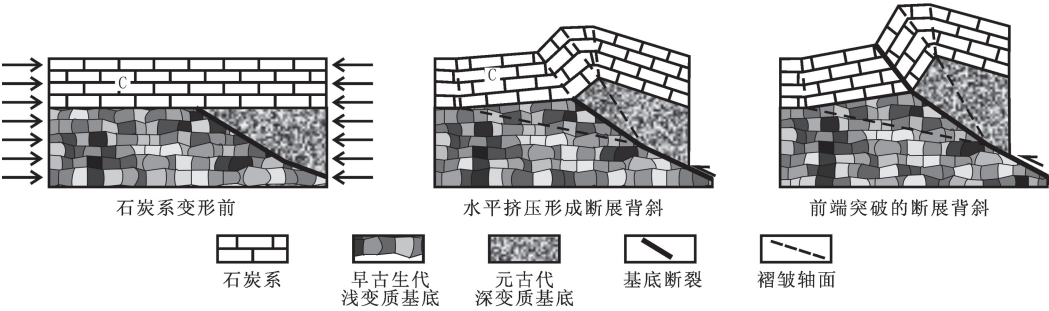


图 5 印支期断展褶皱发育模式
Fig. 5 Development model of fault-propagation folds of Indochina

根据库伦-莫尔破裂准则,两组剪切破裂面具有共轭性,其钝夹角被最小主应力所平分,一组剪切破裂面具有左旋性质,另一组剪切破裂面表现为右旋性质。在平面应变椭圆中,两组共轭剪切破裂线代表着两组断层的走向线。受平面剪应力分布的控制,两组断层的发育程度通常不同^[20-21]。研究区印支期在 NNE-SSW 方向的挤压条件下,平面剪应力为右旋,根据应变椭圆特征(图 4(c))认为近 N-S 走向的断裂具有右旋走滑性质,NEE-SWW 走向的断层具有左旋走滑性质,可以判断印支期柴达木盆地东部除发育与最大主应力垂直的断裂外还应发育一组近 N-S 走向的断裂,将背斜凸起分割开来(图 6(b))。

虽然应力场的数值模拟简化了一些地质条件,不可能做到完全符合地质历史时期的真实地质情

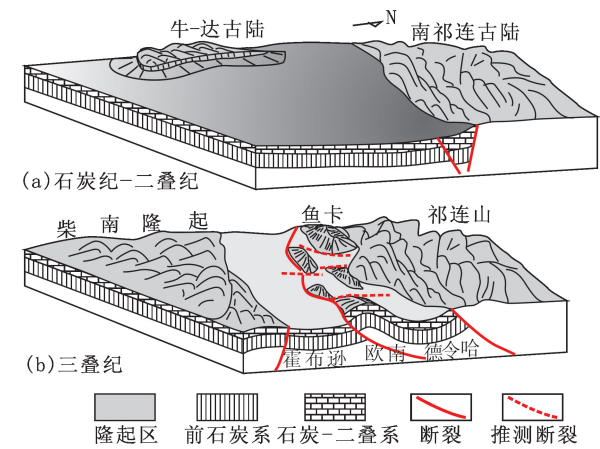


图 6 柴达木盆地东部印支期盆地演化
Fig. 6 Basin-mountain evolution of the eastern Qaidam Basin in Indochina

况,但从印支期应力场的模拟结果来看,应力的 高值

区基本对应了石炭系的剥蚀区,验证了对于印支期挤压碰撞造成石炭系差异剥蚀的推测。

4 结 论

(1)柴达木盆地东部石炭系主要分布在绿梁山-红山-锡铁山-欧南凹陷一线以南和以北地区,其中德令哈凹陷、霍布逊凹陷残留厚度大范围广的石炭系地层,是石炭系油气勘探的有利地区;鱼卡凹陷、欧南凹陷基本无石炭系残留。

(2)石炭系残余地层的分布受到古地理格局和后期构造运动共同的控制。古地理格局控制了东西方向石炭系的差异;印支期的挤压碰撞使柴达木盆地东部地区褶皱抬升,形成的近东西走向背斜凸起,造成绿梁山-红山-锡铁山-欧南凹陷一带石炭系缺失。

(3)柴达木盆地东部在印支期以逆冲断裂和与之相关的断展褶皱为主要构造变形模式,并派生近南北走向右旋走滑断层,应力分布不均影响褶皱隆升的规模,进而决定了石炭系剥蚀与残留情况。

参考文献:

- [1] 青藏油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志青藏油气区[M]. 北京:石油工业出版社,1990.
- [2] 戴俊生,叶兴树,汤良杰,等. 柴达木盆地构造分区及其油气远景[J]. 地质科学,2003,38(3):413-424.
DAI Jun-sheng, YE Xing-shu, TANG Liang-jie, et al. Tectonic units and oil-gas potential of the Qaidam Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2003,38(3):413-424.
- [3] 戴俊生,曹代勇. 柴达木盆地新生代构造样式的演化特点[J]. 地质评论,2000,46(5):455-460.
DAI Jun-sheng, CAO Dai-yong. Evolution character of structural style during Cenozoic in the Qaidam Basin[J]. Geological Review,2000,46(5):455-460.
- [4] 刘洛夫. 柴达木盆地东部地区烃源岩的生源与沉积环境[J]. 古地理论,2001,3(2):82-91.
LIU Luo-fu. Sedimentary environments of source rocks in the eastern Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2001,3(2):82-91.
- [5] 王桂宏,马达德,张启全,等. 柴达木盆地北缘盆山构造关系与油气勘探方向[J]. 石油勘探与开发,2008,35(6):668-673.
WANG Gui-hong, MA Da-de, ZHANG Qi-quan, et al. Basin-mountain tectonic pattern and hydrocarbon exploration domain in north margin of Qaidam Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008,35(6):668-673.
- [6] 杨超,陈清华,王冠民,等. 柴达木地区晚古生代沉积构造演化[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(5):38-43.
YANG Chao, CHEN Qing-hua, WANG Guan-min, et al. Sedimentary and tectonic evolution of Qaidam areas in Late Paleozoic[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2010,34(5):38-43.
- [7] 李守军,张洪. 柴达木盆地石炭系地层特征与分布[J]. 地质科技情报,2000,19(1):1-10.
LI Shou-jun, ZHANG Hong. Characteristics and distribution of the Carboniferous strata in the Qaidam Basin, China[J]. Geological Science and Technology Information, 2000,19(1):1-10.
- [8] 万传治,乐幸福,陈迎宾. 柴达木盆地东部地区石炭系分布规律与生烃潜力评价[J]. 天然气地球科学,2006,17(5):663-667.
WAN Chuan-zhi, LE Xing-fu, CHEN Ying-bin. Distribution laws and evaluation of hydrocarbon potential on Carboniferous in the east of Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006,17(5):663-667.
- [9] 甘贵元,严晓兰,赵东升,等. 柴达木盆地德令哈断陷石油地质特征及勘探前景[J]. 石油实验地质,2006,28(5):499-503.
GAN Gui-yuan, YAN Xiao-lan, ZHAO Dong-sheng, et al. Petroleum geologic characteristics and exploration prospect of the Delingha fault-depression in the Qaidam Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006,28(5):499-503.
- [10] 汤良杰,金之钧,张明利,等. 柴达木震旦纪—三叠纪盆地演化研究[J]. 地质科学,1999,34(3):289-300.
TANG Liang-jie, JIN Zhi-jun, ZHANG Ming-li, et al. Tectonic evolution of Qaidam Basin in sinian-Triassic[J]. Scientia Geologica Sinica, 1999,34(3):289-300.
- [11] 吴汉宁,刘池阳,张小会,等. 用古地磁资料探讨柴达木地块构造演化[J]. 中国科学:D辑,1997,27(1):9-14.
WU Han-ning, LIU Chi-yang, ZHANG Xiao-hui, et al. Discussion on tectonic evolution of Qaidam massif with paleomagnetic data[J]. Scientia Sinica Terrae (Ser D), 1997,27(1):9-14.
- [12] 戴俊生,王霞田,季宗镇,等. 高邮凹陷南断阶东部阜宁期构造应力场及其对断层的控制作用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(2):1-5.
DAI Jun-sheng, WANG Xia-tian, JI Zong-zhen, et al. Structural stress field of Funing sedimentary period and its control on faults in the east of south fault terrace in Gaoyou sag[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011,35(2):1-5.
- [13] ANSYS Inc. Theory release 5. 7[M]. Canonsburg PA: ANSYS Inc, 2001.
- [14] 王红才,王薇,王连捷,等. 油田三维构造应力场数值模拟与油气运移[J]. 地球学报,2002,23(2):175-

- 178.
- WANG Hong-cai, WANG Wei, WANG Lian-jie, et al. Three dimensional tectonic stress field and migration of oil and gas in Tanhai [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(2):175-178.
- [15] HICKS T W, PINE R J, WILLIS-Richards J, et al. A hydro-thermo-mechanical numerical model for HDR geo-thermal reservoir evaluation [C]//International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts. Pergamon, 1996, 33(5):499-511.
- [16] 陈能松, 王勤燕, 陈强, 等. 柴达木和欧龙布鲁克陆块基底的组成和变质作用及中国中西部古大陆演化关系初探[J]. *地学前缘*, 2007, 14(1):43-55.
- CHEN Neng-song, WANG Qin-yan, CHEN Qiang, et al. Components and metamorphism of the basements of the Qaidam and Oulongbuluke micro continental blocks, and a tentative interpretation of paleocontinental evolution in NW Central China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1):43-55.
- [17] 刘桂侠, 杨永泰. 柴达木盆地北部基底岩性对上部地层构造演化及储集条件的影响[J]. *天然气工业*, 2003, 23(2):40-43.
- LIU Gui-xia, YANG Yong-tai. Influence of basement lithology on the structural evolution and reservoir conditions of overlying strata in the north margin of Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(2):40-43.
- [18] SUPPE J, DONALD A. Medwedeff geometry and kinematics of fault-propagation folding [J]. *Eclogae GeolHelv*, 1990, 83(3):409-454.
- [19] 刘重庆, 周建勋, 张博. 柴达木盆地西北部新生代褶皱-冲断带形成机制的物理模拟[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2013, 37(4):15-22.
- LIU Chong-qing, ZHOU Jian-xun, ZHANG Bo. Physical modeling of Cenozoic fold-thrust belts formation mechanism in northwestern Qaidam Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(4):15-22.
- [20] SANTANU M. Deformation localization at the tips of shear fractures: an analytical approach [J]. *Tectonophysics*, 2011, 503(1):182-187.
- [21] KAUS B J P. Factors that control the angle of shear bands in geodynamic numerical models of brittle deformation [J]. *Tectonophysics*, 2010, 484(1):36-47.
- (编辑 徐会永)