

基于高密度地震反射和砂箱实验的准噶尔盆地南缘 霍尔果斯背斜深层构造解析

马德龙^{1,2,3}, 袁剑英^{1,2}, 张虎权¹, 何登发³, 潘建国¹, 潘树新¹,
王宏斌^{1,2}, 魏东涛⁴, 王彦君^{1,2,5}, 崔 键⁵

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃兰州 730020; 2. 中国石油油藏描述重点实验室, 甘肃兰州 730020;
3. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 4. 中国地质调查局西安地调中心, 陕西西安 710054;
5. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093)

摘要:利用霍尔果斯背斜高密度三维地震反射资料和砂箱模拟实验,并根据构造几何学的分析方法,获得准噶尔盆地南缘霍尔果斯背斜的深部地质结构及运动学演化过程。结果表明:霍尔果斯背斜高密度三维地震反射揭示安集海河组(E_{2-3a})滑脱层冲出地表、上盘形成单斜构造;下侏罗统滑脱层与安集海河组(E_{2-3a})滑脱层构成深部构造楔,构造楔缩短量为 2306 m,平均缩短率为 2 mm/a;下侏罗统深部下凹的地震反射特征揭示深层可能发育早期断陷。先存断陷和同构造沉积控制下的双层滑脱构造物理模拟实验结果与霍尔果斯背斜高密度三维地震反射形态相近,并且其运动学特征也一致。获得的霍尔果斯深层构造楔变形速率明显低于前人通过其他方式获得的相邻区域浅层变形速率,可能是由于北天山山前发育多套塑性滑脱层,并在挤压过程中塑性地层内部层间剪切作用造成的;另外,研究区下侏罗统及以下地层可能发育早期的断陷,并对晚期构造变形有一定的控制作用。

关键词:准噶尔盆地南缘;霍尔果斯背斜;砂箱模型;深层结构

中图分类号:P 542 **文献标志码:**A

引用格式:马德龙,袁剑英,张虎权,等. 基于高密度地震反射和砂箱实验的准噶尔盆地南缘霍尔果斯背斜深层构造解析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(6):9-18.

MA Delong, YUAN Jianying, ZHANG Huquan, et al. Deep structure analysis of Huoerguosi Anticline at the southern margin of Junggar Basin based on high-density seismic reflection and sandbox modeling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(6): 9-18.

Deep structure analysis of Huoerguosi Anticline at the southern margin of Junggar Basin based on high-density seismic reflection and sandbox modeling

MA Delong^{1,2,3}, YUAN Jianying^{1,2}, ZHANG Huquan¹, HE Dengfa³, PAN Jianguo¹, PAN Shuxin¹,
WANG Hongbin^{1,2}, WEI Dongtao⁴, WANG Yanjun^{1,2,5}, CUI Jian⁵

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest, PetroChina, Lanzhou 730020, China;
2. Key Laboratory of Reservoir Description, PetroChina, Lanzhou 730020, China;
3. School of Energy Resources in China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
4. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, China;
5. School of Earth Sciences and Engineering in Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: High-density seismic reflection data and sandbox physical modeling method were used to obtain the deep structure and evolution history of the Huoerguosi Anticline at the southern margin of Junggar Basin. E_{2-3a} detachment fault thrusts northward and outcrops at the ground surface, and the hanging wall layers dip southward to form monoclonal structure. The lower Ju-

rassic detachment is combined with the E_{2-3} a detachment fault, forming a structural wedge in the deep with shorting up to 2306 m and at a rate of 2 mm/a. The layers below lower Jurassic may develop earlier fault depression. In the sandbox modeling which were controlled by the early fault depression and syn-tectonic sediment, the similar structure style as seen in the seismic profile was obtained, and the kinematic features are consistent between the sandbox modeling and the geological structure obtain from seismic reflection. The shorting rate calculated in this paper is much smaller than that from previous studies of shallow layers or at ground surface, which may result from the velocity difference between layers in multiple detachment layers in this area. The early fault depression structure may exert great influence on the subsequent structural evolution in the region.

Keywords: southern margin of Junggar Basin; Huoerguosi Anticline; sandbox modeling; deep structure

准噶尔盆地南缘紧邻北天山造山带,发育完整的中新生代地层,记录了北天山造山带晚古生代以来完整的构造-沉积演化历史。尤其是新生代晚期受印度板块与欧亚大陆碰撞及持续挤压的远程效应影响,天山造山带再次复活^[1-3],并在准噶尔盆地南缘形成一系列的褶皱冲断带^[4-9],通过对地表及浅层生长地层的识别、磁性地层年代的分析^[10-16],取得了一批丰硕成果和地质认识。然而由于老地层埋深较大,深部构造复杂,地表地势起伏剧烈导致地震反射成像较差,以至于深部地质结构认识分歧较大,运动学规律不清楚。笔者利用准噶尔盆地南缘霍尔果斯背斜新采集的高密度三维地震反射,结合砂箱构造物理模拟实验,进一步认识霍尔果斯背斜深部地质结构,同时探讨北天山山前构造带深浅层运动学规律的差异性并分析其形成机制。

1 地质背景

天山全长 2500 km,横亘中国新疆和中亚地区,平均海拔 2500 m,最高峰超过 7000 m。现今的地貌是在古生代天山基础上,在新生代晚期复活形成^[1-3]。准噶尔盆地南缘褶皱冲断带位于天山北麓,在乌鲁木齐以西发育 3 排近东西向构造带,自山向盆地方向依次为齐古断褶带、霍尔果斯—玛纳斯—吐谷鲁背斜带和独山子—安集海背斜带。复活的时间为 23 ~ 24 Ma,并在 15 和 11 Ma 加速^[15,17-19]。天山及周缘地壳平均缩短率约为 6 mm/a,其中很大一部分被山前褶皱带所吸收^[4,20-21]。研究区位于山前第二排构造带上,平面上呈长轴状(图 1)。在地表和地震剖面中均可见逆冲断层向北冲出地表(图 1(b)和图 2),上盘自北向南依次发育安集海河组、沙湾组、塔西河组,下盘地层被第四系覆盖,深部发育较完整的中新生界(图 3)。

2 霍尔果斯背斜深部构造特征

在霍尔果斯背斜地表可见向北逆冲的逆冲断裂,该断裂在地震剖面中断面清晰,倾向朝南并逐渐

滑脱收敛在 4 ~ 5 km 深度处(图 2,剖面位置见图 1(b))。断裂上盘发育南倾的单斜地层,且 N_2d 具有典型的生长地层特征,前人做过大量的基础研究工作^[15,19],在此不做赘述。在高密度三维深度域地震剖面中(图 2),背斜核部 3 ~ 6 km 深度可见明显的地震同相轴交切关系,断面倾向朝北。在背斜南翼 6 ~ 9 km 深度处同样发育断面南倾的逆冲断裂,并在 9 ~ 10 km 深度处变平收敛。两条逆冲断裂在空间上构成典型的构造楔样式(图 2),剖面中的层位引自邻近地震工区,数据可靠。在深度 10 km 以下的地震反射中,剖面南北两侧地震反射近于水平,中部(构造楔南翼之下)同相轴下凹明显,推测可能是早期的伸展断陷在晚期发生弱反转的结果(图 2)。

3 砂箱实验模型及结果

根据研究区地层发育特征,按照其能干性的强弱进行简化,设计初始实验模型地层厚度(图 3)。实际地质特征与实验模型之间的比例关系按照表 1 中的相似性参数进行换算。实验过程中用 120 ~ 150 μm 石英砂和黑刚玉互层代表能干性地层,其内摩擦角为 $29^\circ \sim 36^\circ$,力学性质符合库伦-摩尔破裂准则,可以代表沉积地层中的脆性地层。用硅胶代表非能干性地层或滑脱层,其黏度为 $1.2 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,在低应变速率情况下符合牛顿流体行为,可以代表沉积地层中的塑性地层。实验在中国石油集团油藏描述重点实验室“三维动态构造控藏物理模拟实验平台”完成,其构造变形模拟实验装置与国内其他科研院所不同^[22-23],配置了工业 CT 可以对变形过程和模拟内部流体运聚进行动态监测。实验模型初始长度为 25 cm,模型底部紧靠固定挡板处固定一块长度为 10 cm 的薄硬塑料板。按照简化后的实验模型地层厚度自下而上依次铺设 0.5 cm 硅胶、1.5 cm 石英砂、0.5 cm 硅胶和 2.0 cm 石英砂(图 4)。挤压速度为 2 cm/h,缩短量为 5 cm。在挤压过程中每 0.5 h 加 0.3 cm 的同构造沉积。

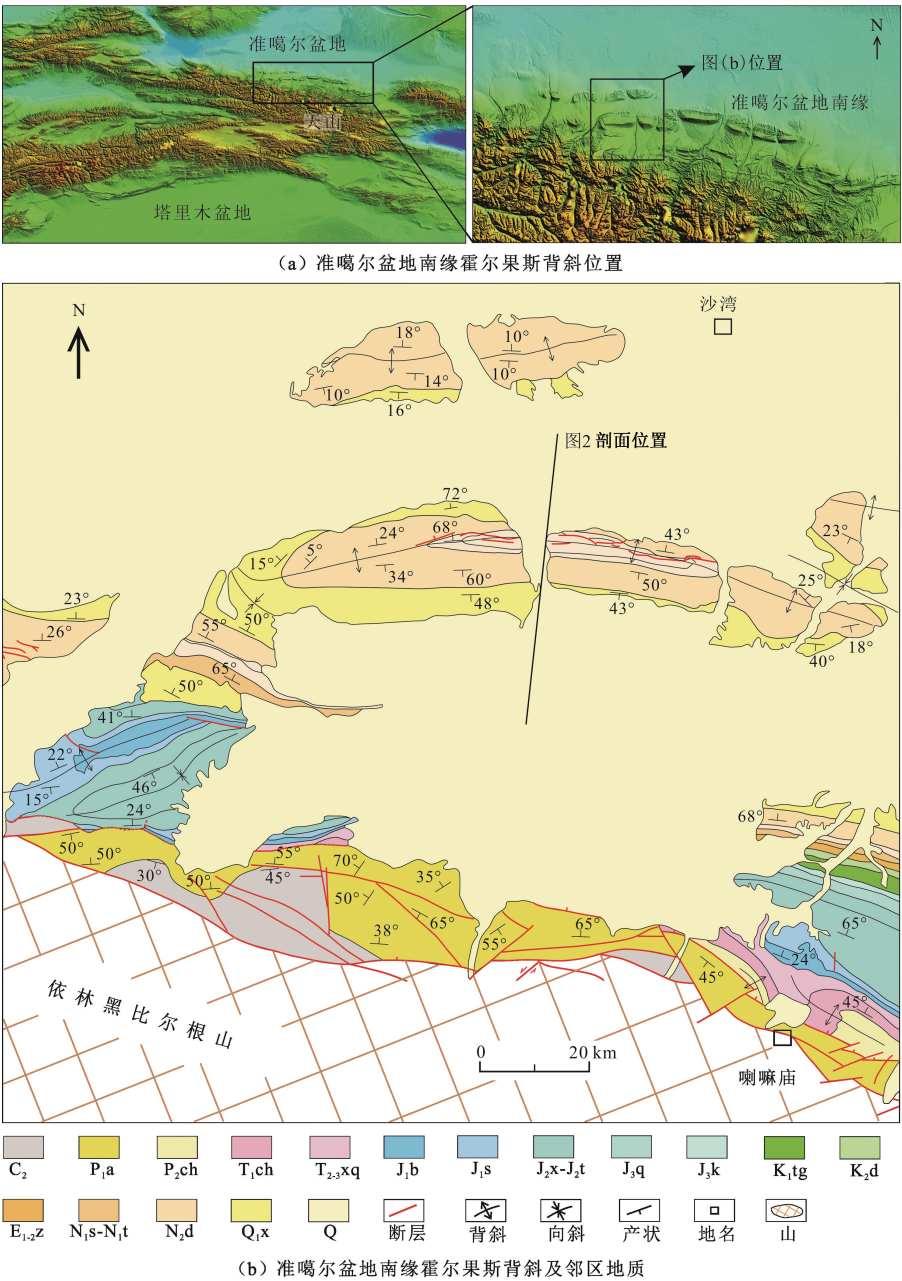


图 1 准噶尔盆地南缘霍尔果斯背斜及邻区地质图

Fig.1 Geological map of Huoerguosi Anticline and adjacent areas at the southern margin of Junggar Basin

利用工业 CT 对完成的实验模型进行扫描,结果如图 5 所示,此次实验得到的双层滑脱构造模型与霍尔果斯背斜地震剖面具有很好的相似性。下部滑脱层发育断层转折褶皱与上部滑脱层内发育的反冲断层构成了深层构造楔。浅层滑脱层冲出实验模型表层,断层上盘地层具有单斜特征,倾角向左逐渐变缓,具有生长地层特征。值得注意的是,在浅层滑脱层冲出实验模型表层所形成的逆冲大断裂下盘,砂箱实验模型表现为单斜构造特征,而在实际地震剖面中具有背斜形态,这种差异可能与浅层逆冲大断裂切割和破坏构造反冲断

层上盘背斜的位置有关。由于浅层逆冲大断裂形成时间相对于深部构造楔形成时间较晚(实验过程和平衡演化剖面均证实),如果断裂切割背斜核部或者北翼,那么逆冲断裂下盘仅保留北翼单斜构造(如实验模型所示),如果断裂仅切割背斜的南翼,那么背斜的核部保存比较完整(如地震剖面所示)。至于背斜哪个部位被破坏而发育晚期逆冲大断裂,可能与背斜应力状态和地层性质有关,实验室条件下很难模拟真实状况,但构造形态整体相似,可以反映出实验边界条件和初始模型与实际地质条件比较吻合。

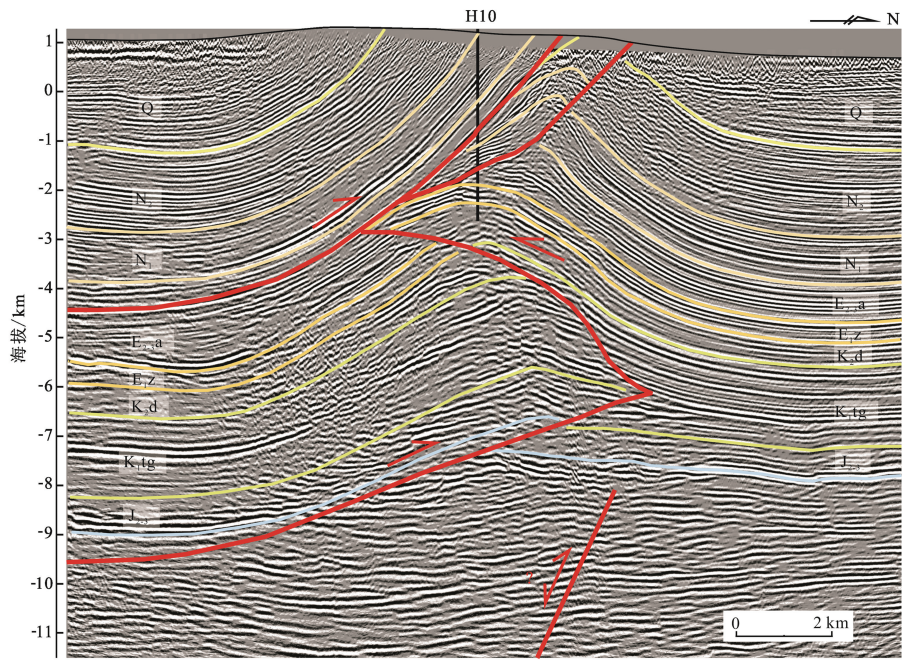


图 2 霍尔果斯背斜地质结构

Fig. 2 Geological structrue of Huoerguosi anticline

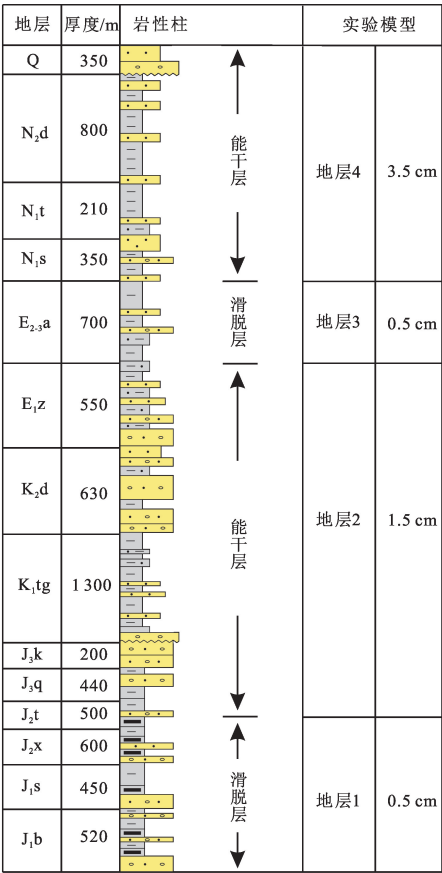


图 3 霍尔果斯背斜地层综合柱状图及地层简化
Fig. 3 Comprehensive stratigraphic column of Huoerguosi Anticline and its simplification for physical model

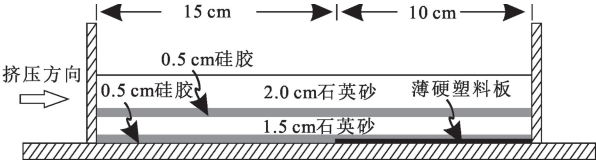


图 4 构造物理模拟实验模型

Fig. 4 Physical model of sandbox experiment

4 运动学特征

利用面积-深度-应变的分析方法 (area-depth-strain method, 以下简称 ADS 方法) 对霍尔果斯背斜地质模型和构造物理模拟实验模型进行运动学分析。这种方法是通过将目的层相对深度和变形过程中产生的剩余面积进行投影的方法来验证构造解释是否平衡,还能够预测滑脱层的深度、位移量、变形速率和层间的应变 (图 6)。这种方法在滑脱褶皱^[24-27]和断层转折褶皱^[28-30]中的应用取得了良好效果。本文中主要介绍与研究区实际情况相似的地层连续沉积型的 ADS 方法原理。

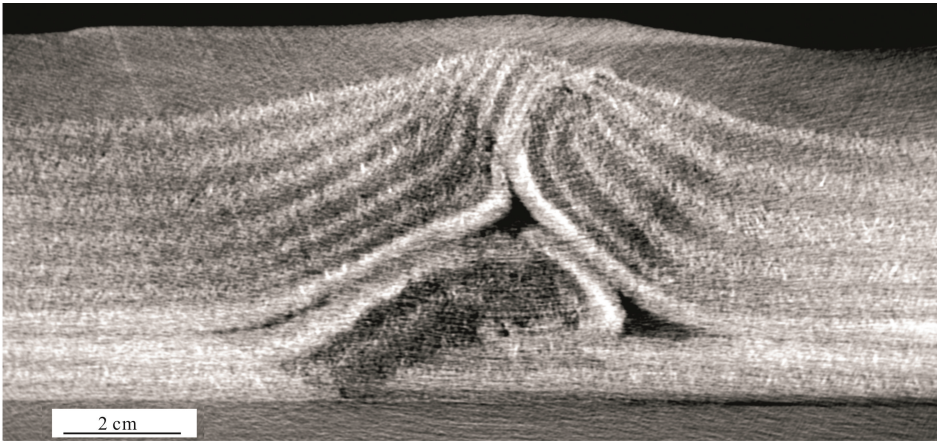
如图 6(a) 所示,在剖面中任意选择一条固定的参考面,并且在剖面中选出 7 个标志层,将 7 个标志层相对固定参考面的深度与标志层变形后相对初始未变形多出的剩余面积进行投影,如图 6(b) 右侧投影图所示。图中编号为 1~3 的地层 (蓝色) 为前生长地层,在不同位移量下前生长地层投点始终保持一条直线,而直线斜率的倒数即为前生长地层的位移量,直线与纵坐标的交点为滑脱层的深度。将生

长地层投点与交点相连,所得直线的斜率倒数为生长地层(编号为 4~9 的地层)的位移量,可以明显看出越晚沉积的生长地层的位移量越小。

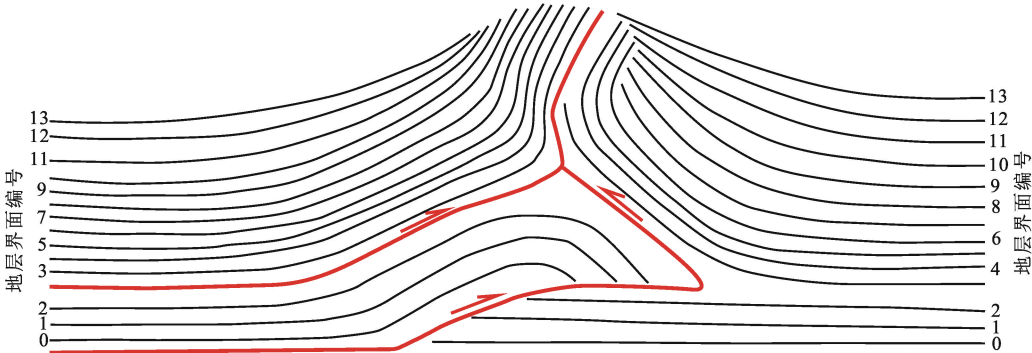
表 1 实验材料物理参数及模型相似比

Table 1 Analogue material properties and scaling ratios of model

类别	长度 L/m	自由落体加速度 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	时间 t/s	应力 α/Pa
自然界	2.5×10^4	9.8	2300	1×10^{19}	1.38×10^{-10}	3.84×10^{14} (12 Ma)	2.2×10^7
模型	2.5×10^{-1}	9.8	1400	1.2×10^4	5.6×10^{-6}	9×10^3 (2.5 h)	1.4×10^2
模型/自然界	1.0×10^{-5}	1.0	0.6	1.2×10^{-15}	4.1×10^4	2.3×10^{-11}	6.3×10^{-6}



(a)砂箱物理模拟实验结果CT扫描图



(b)实验结果地质解译

图 5 砂箱物理模拟实验结果 CT 扫描图与地质解译图

Fig. 5 CT image of sandbox physical model and geological interpretation

本文中对霍尔果斯背斜地质模型(图 2)进行平衡复原,得到霍尔果斯背斜构造演化剖面(图 7)。早侏罗世霍尔果斯地区可能发育断陷结构^[9,33],中晚侏罗世进入拗陷阶段,造成现今地震剖面上 J_{2-3} 厚度在背斜南翼比北翼厚 300~400 m(图 2),之后研究区进入构造稳定阶段,南北翼地层基本等厚,除 E_{2-3a} 泥岩塑性地层在晚期构造变形过程中出现局部厚度增加或减小的现象。新近纪以来,研究区经历了强烈的挤压构造变形,形成了霍尔果斯背斜深部构造楔和浅层断层相关褶皱的叠加。

利用 ADS 方法对霍尔果斯地质模型进行分析

发现,发现 J_2x-N_1 投点基本在同一条直线上,而 N_2 和 Q 投点偏离直线明显(图 8(a)),反映出 J_2x-N_1 可能具有前生长地层特征,而 N_2 和 Q 为生长地层,这与地震剖面 and 野外露头^[12,15]上观察到的现象吻合,同时利用 ADS 方法计算得到 J_2x-N_1 的位移量为 2 306 m,与构造演化剖面中根据层长守恒的原理得到的 J_2x-N_1 的缩短 2 429 m 比较接近。将实验获得的已知模型也用 ADS 方法计算,得到的位移量为 4.98 cm(图 8(b)),与实际挤压 5 cm 的误差为 0.4%,同时 9~13 标志层投点偏离 0~7 所拟合出的直线,具有生长地层特征,这也与实际模型相符,反映出该方法的可靠性。

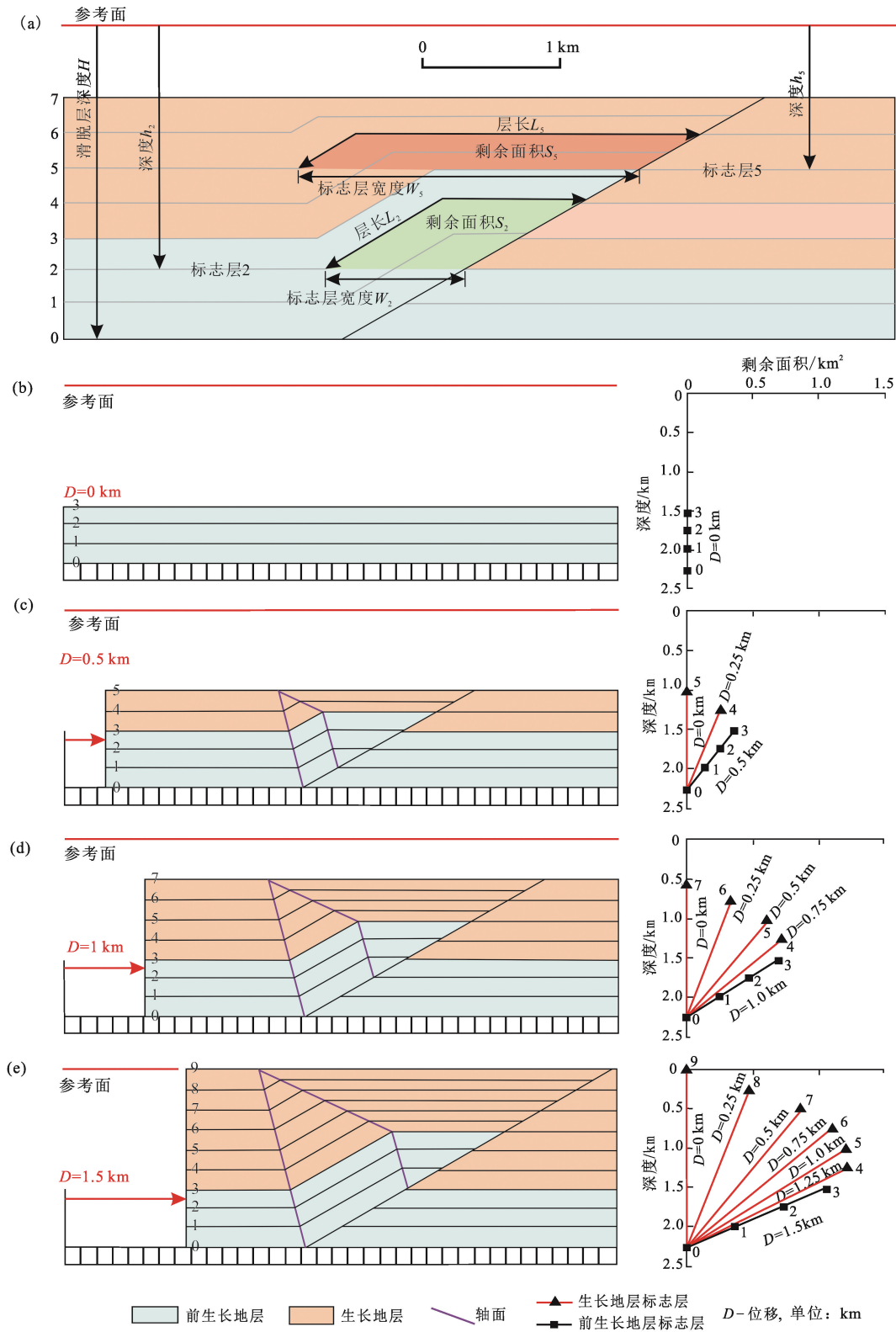


图 6 ADS 方法原理示意图(据 Schlische 等)

Fig. 6 Schematic of theory of ADS method (After Schlische, et al^[30])

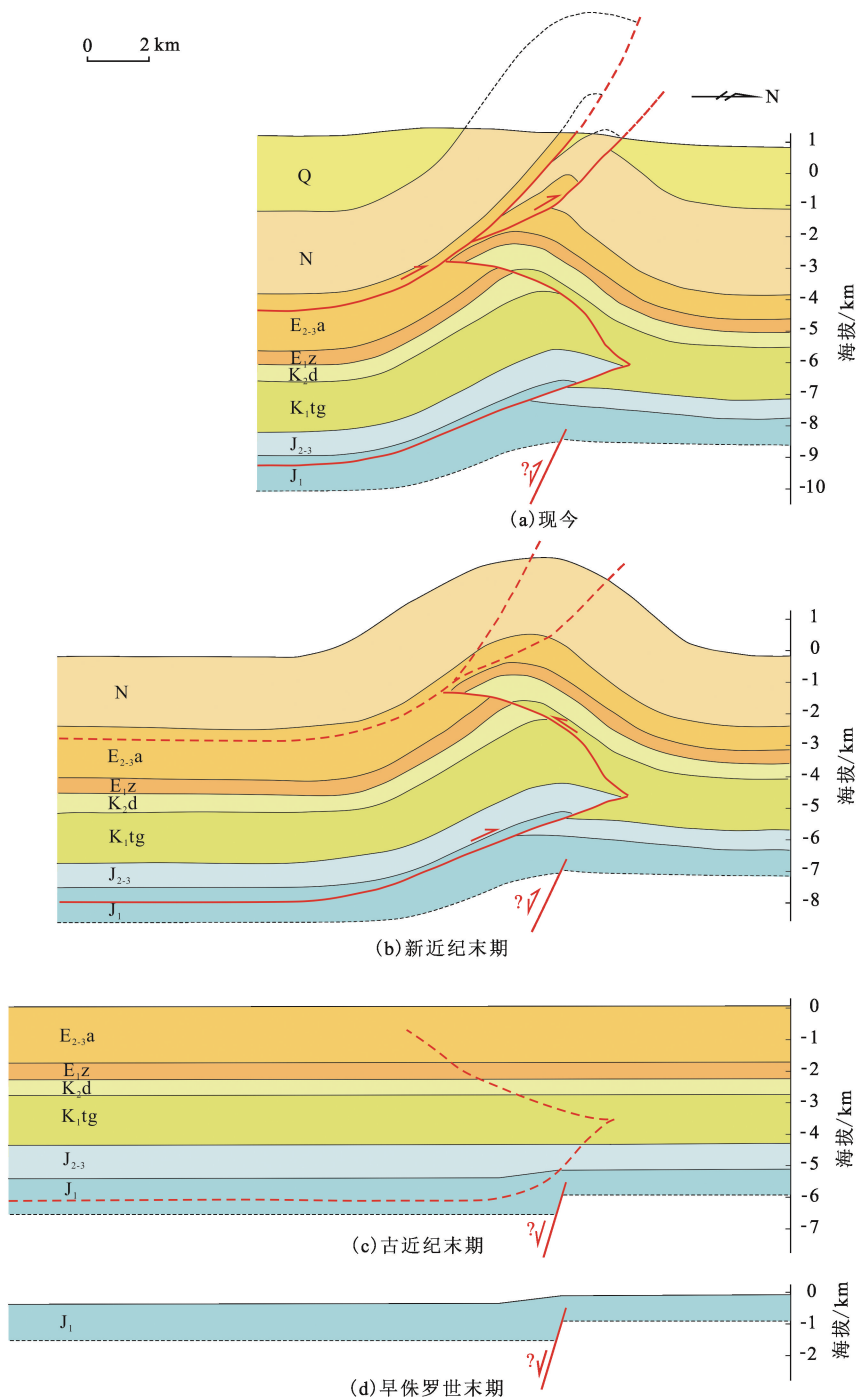


图 7 霍尔果斯背斜构造演化

Fig. 7 Structural evolution of Huoerguosi Anticline

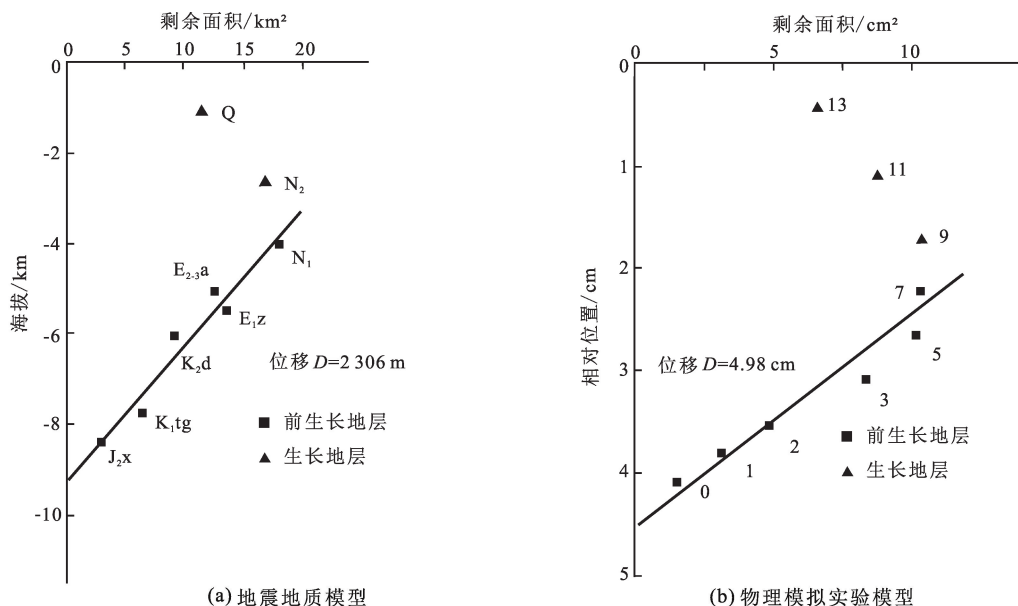


图8 地震地质模型与物理模拟实验结果深度-面积曲线对比

Fig. 8 Contrast of area-depth curves between seismic model and physical model of sandbox experiment

5 讨论

通过地表生长地层的识别和高精度磁性地层年代的限定,霍尔果斯背斜发育时间起始于 12 Ma^[11]。本文获得的霍尔果斯背斜深层构造楔的地层缩短量为 2306 m,平均缩短率约为 2 mm/a,低于前人天山南北地壳尺度的平均 6 mm/a 的缩短速率^[20-21,31]。另外,通过该方法获得生长地层 N₂ 和 Q 的位移量为 2047 m,平均缩短速率为 0.89 mm/a,同王胜利^[15]和 Charreau^[19]等发表的实验结果较接近,考虑到浅层地层剥蚀严重,生长地层的缩短速率应大于该数值,这也是与活动构造地质学家对研究区及相邻区域通过河流阶地变形测量得到的地壳缩短率 3 ± 1.5 mm/a^[4]有差异的原因。对比浅层和深层构造缩短率,发现深层构造缩短率要比浅层缩短率小得多,这可能与准噶尔盆地南缘发育多套塑性层而造成的层间剪切有关^[32]。

近年来有学者提出早侏罗世天山及邻区可能发育伸展断陷^[9,33],在初始实验模型的设计上,有针对性地预制硬塑料板以模拟早期可能发育先存断陷。而从实验结果来看,实验模型与地震剖面结构形态相似。另外,在地震剖面中构造楔南翼之下深度 9 ~ 12 km 处地震反射同相轴具有明显的下凹特征,也反应出早期可能发育断陷,在后期的构造演化过程中,该断陷未发生或者发生较弱的反转。

6 结论

(1) 准噶尔盆地南缘霍尔果斯背斜深部发育 3

套构造层,分别为下侏罗统及下伏地层的断陷结构、下侏罗统滑脱层与安集海河组 (E₂₋₃a) 滑脱层构成深部构造楔和安集海河组 (E₂₋₃a) 滑脱层控制的上覆单斜冲断构造。

(2) 霍尔果斯背斜地质结构及运动学演化过程受 3 方面因素控制,分别为早侏罗世断陷结构、下侏罗统和安集海河组 (E₂₋₃a) 2 套滑脱层以及晚新生代同构造沉积。

致谢 感谢南京大学崔键博士、中国石油油藏描述重点实验室杨瑞祥工程师在实验过程中给予的帮助。

参考文献:

- [1] BURTMAN V S. Structural geology of the Variscan Tian Shan, USSR[J]. American Journal of Science, 1975, 12: 157-186.
- [2] TAPPONNIER P, MOLNAR P. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal Regions [J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84 (B7): 3425-3459.
- [3] WINDLEY B F, ALLEN M B, ZHANG C, et al. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tian Shan Range, Central Asia [J]. Geology, 1990, 18 (2): 128-131.
- [4] AVOUAC J P, TAPPONNIER P, BAI M, et al. Active thrusting and folding along the northern Tian Shan and late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan [J]. Journal of Geophysical Research,

- 1993, 98(B4): 6755-6804.
- [5] 邓起东,冯先岳,张培震,等. 乌鲁木齐山前拗陷逆断裂-褶皱带及其形成机制[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 191-201.
- DENG Qidong, FENG Xianye, ZHANG Peizhen, et al. Reverse fault and fold zone in the Urumqi rang-front depression of the northern Tianshan and its genetic mechanism[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 191-201.
- [6] 张玉兰,王伟锋,马宗晋. 准噶尔盆地南缘构造物理模拟实验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(3): 1-5.
- ZHANG Yulan, WANG Weifeng, MA Zongjin. Physical simulation experiment on geological structures in the south of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2003, 27(3): 1-5.
- [7] 陈勇,王鑫涛,方世虎,等. 淮南霍玛吐构造带紫泥泉子组油气成藏流体动力学特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(3): 30-36.
- CHEN Yong, WANG Xintao, FANG Shihu, et al. Hydrodynamic characteristics of hydrocarbon accumulation in E₁₋₂z of Huo-Ma-Tu structural belt, southern Junggar Basin, NW China[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 27(3): 30-36.
- [8] 于福生,李国志,杨光达,等. 准噶尔盆地南缘褶皱-冲断带变形特征及成因机制模拟[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 386-395.
- YU Fusheng, LI Guozhi, YANG Guangda, et al. Deformation feature and genesis simulation of fold-and-thrust belts in the southern margin, Junggar Basin[J]. Geotectonica et Metalligenia, 2009, 33(3): 386-395.
- [9] GUAN S W, STOCKMEYER J M, SHAW J H, et al. Structural inversion, imbricate wedging, and out-of-sequence thrusting in the southern Junggar fold-and-thrust belt, northern Tian Shan, China[J]. AAPG, 2016, 100: 1443-1468.
- [10] LU H, DAVID G H, JIA D, et al. Rejuvenation of the Kuqa foreland basin, north flank of the Tarim Basin, Northwest China[J]. International Geology Review, 1994, 36(12): 1151-1158.
- [11] CHARREAU J, CHEN Y, GILDER S, et al. Magnetostratigraphy and rock magnetism of the Neogene Kuitun He section (northwest China): implications for Late Cenozoic uplift of the Tianshan mountains[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 230: 177-192.
- [12] CHARREAU J, CHEN Y, GILDER S, et al. Neogene uplift of the Tian Shan Mountains observed in the magnetic record of the Jingou River section (northwest China) [J]. Tectonics, 2009, 28(2): 224-243.
- [13] SUN J M, XU Q H, HUANG B C. Late Cenozoic magnetochronology and paleoenvironmental changes in the northern foreland basin of the Tian Shan Mountains[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(B4): 3043-3061.
- [14] SUN J M, ZHU R X, BOWLER J. Timing of the Tianshan Mountains uplift constrained by magnetostratigraphic analysis of molasse deposits[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 219: 239-253.
- [15] 王胜利, CHEN Y, 卢华复. 天山北麓霍尔果斯背斜晚中新世以来翼旋转方式的生长[J]. 科学通报, 2008, 53(12): 1414-1421.
- WANG Shengli, CHEN Y, LU Huaifu. Limb rotation growth history of Huoerguosi anticline in the North Tian Shan since late Miocene[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(12): 1414-1421.
- [16] LI C X, DUPONT-NIVET G, GUO Z J. Magnetostratigraphy of the Northern Tian Shan foreland, Taxi He section, China[J]. Basin Research, 2011, 23(1): 101-117.
- [17] HENDRIX M S, DUMITRU T A, GRAHAM A S. Late Oligocene-early Miocene unroofing in the Chinese Tian Shan: an early effect of the India-Asia collision[J]. Geology, 1994, 22(6): 487-490.
- [18] DAERON M, AVOUAC J P, CHARREAU J. Modeling the shortening history of a fault tip fold using structural and geomorphic records of deformation[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(B03), DOI: 10.1029/2006JB004460.
- [19] CHARREAU J, AVOUAC J P, CHEN Y, et al. Miocene to present kinematics of fault-bend folding across the Huerguosi anticline, northern Tianshan (China), derived from structural, seismic, and magnetostratigraphic data[J]. Geology, 2008, 36(11): 871-874.
- [20] REIGBER C, MICHEL G W, GALAS R, et al. New space geodetic constraints on the distribution of deformation in the Central Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 191(1): 157-165.
- [21] WANG Q, ZHANG P Z, FREYMUeller J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements[J]. Science, 2001, 294: 574-577.
- [22] 杨少春, 白青林, 路智勇, 等. 东辛地区营26断层变换带形成机制模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 25-33.
- YANG Shaochun, BAI Qinglin, LU Zhiyong, et al. Forming mechanism simulation of Ying 26 transfer zone in Dongxin area[J]. Journal of China University of Petro-

- leum (Edition of Natural Science), 2017, 41(1): 25-33.
- [23] 李理, 时秀朋, 胡秋媛, 等. 双帚状断层的成因和生长发育[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(6): 41-49.
- LI Li, SHI Xiupeng, HU Qiuyuan, et al. Mechanism and growth of broom-like faults[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(6): 41-49.
- [24] EPARD J L, Jr GROSHONG R H. Excess area and depth to detachment[J]. AAPG, 1993, 77: 1291-1302.
- [25] Jr GROSHONG R H, EPARD J L. The role of strain in area-constant detachment folding[J]. Journal of Structural Geology, 1994, 16(5): 613-618.
- [26] GONZALEZ-MIERES R, SUPPE J. Relief and shortening in detachment folds[J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28(10): 1785-1807.
- [27] GONZALEZ-MIERES R, SUPPE J. Shortening histories in active detachment folds based on area-of-relief methods[J]. AAPG Memoir, 2011, 94: 39-67.
- [28] Jr GROSHONG R H, WITHJACK M O, SCHLISCHE R W, et al. Bed length does not remain constant during deformation; recognition and why it matters[J]. Journal of Structural Geology, 2012, 41: 86-97.
- [29] WILTSCHKO D V, Jr GROSHONG R H. Why did Chamberlin go wrong? Context and contribution of Chamberlin (1910) [J]. Journal of Structural Geology, 2012, 41: 7-23.
- [30] SCHLISCHE R W, Jr GROSHONG R H, WITHJACK M O. Quantifying the geometry, displacements, and subsurface deformation in thrust-ramp anticlines with growth and erosion: from models to seismic-reflection profile [J]. Journal of Structural Geology, 2014, 69: 304-319.
- [31] BURCHFIEL B C, BROWN E T, DENG Q D, et al. Crustal shortening on the margins of the Tian Shan, Xinjiang, China [J]. International Geology Review, 1999, 41(8): 663-700.
- [32] SUPPE J, CONNORS C D, ZHANG Y. Shear fault-bend folding[J]. AAPG Memoir, 2004, 82: 303-323.
- [33] YANG W, JOLIVET M, DUPONT-NIVET G, et al. Source to sink relations between the Tian Shan and Junggar Basin (northwest China) from Late Palaeozoic to Quaternary: evidence from detrital U-Pb zircon geochronology [J]. Basin Research, 2013, 25: 219-240.

(编辑 修荣荣)