

柴达木盆地北缘新生代构造变形的物理模拟

周建勋¹⁾ 徐凤银²⁾ 朱战军¹⁾

(1)石油大学教育部石油天然气成藏机理重点实验室,北京,102249;

2)中国石油青海油田分公司,甘肃 敦煌,736202)

摘 要 文中设计了3种类型的基底收缩挤压砂箱实验模型和一种基底无收缩挤压砂箱实验模型,用于研究柴达木盆地北缘新生代构造的变形机制。实验结果表明,基底收缩挤压模型以反冲断层发育为特色。在双侧对称对冲挤压模型中,正冲和反冲断层的发育程度基本处于均衡状态;在双侧不对称对冲挤压模型中,反冲断层更加发育,尤其在挤压速度较快一侧更加显著;单侧挤压模型中,以反冲断层发育、正冲断层很少为特征。由此表明,基底收缩作用和挤压作用的不对称性促使反冲断层的发育。根据实验结果与实际剖面的对比,笔者认为,基底收缩和不对称挤压是导致该区特殊剖面结构的可能原因,该区新生代构造变形是在基底收缩作用参与下、以祁连山为主的侧向不对称挤压作用的结果。

关键词 柴达木盆地 新生代变形 物理模拟 砂箱实验

Physical Modeling of the Cenozoic Deformation in Northern Qaidam Basin

ZHOU Jianxun¹⁾ XU Fengyin²⁾ ZHU Zhanjun¹⁾

(1)Department of Earth Science, University of Petroleum, Beijing, 102249;

2)Qinghai Petroleum Branch Corporation of CNPC, Dunhuang, Qinghai, 736202)

Abstract Three types of sandbox models with contractive substrate and one without contractive substrate were employed to study the deformation mechanism of Cenozoic structures in northern Qaidam Basin. The results indicate that the models with contractive substrate are characterized by the development of rearward-vergent thrusts. When the models were compressed from opposite directions, the development of forward-vergent thrusts was similar to that of rearward-vergent thrusts, whereas in the models with asymmetric compression the rearward-vergent thrusts were more developed, especially on the side with higher compression speed. In the models compressed only from one direction, rearward-vergent thrusts were well developed, while forward-vergent thrusts were rarely seen. These facts show that substrate contraction and asymmetric compression can facilitate the development of rearward-vergent thrusts. A comparison of the experimental results with actual sections in northern Qaidam Basin suggests that substrate contraction and asymmetric compression are probably responsible for the distinctive structures in this region, and the Cenozoic deformational structures must have resulted from the asymmetric lateral compression, mainly from Qilian Mountain, with the participation of substrate contraction.

Key words Qaidam Basin Cenozoic structure physical modeling sandbox experiment

1 引 言

柴达木盆地位于青藏高原北部,盆地南被昆仑山、北被祁连山、西北被阿尔金山等3个强烈隆升的造山带所围,盆内构造格局较为复杂,分4个一级构造单元:北缘块断带、西部坳陷、三湖坳陷、德令哈坳

陷(图1)。受印度板块新生代向北强烈挤压作用(Meyer等,1998;Chen等,1999),以及祁连造山带向南推挤作用的影响,位于北缘块断带的北缘地区,因紧邻祁连造山带南侧,新生代期间经受了强烈的挤压变形。由于北缘地区广泛分布具有良好生烃能力的中、下侏罗统湖相泥岩地层,具有很大的油气资

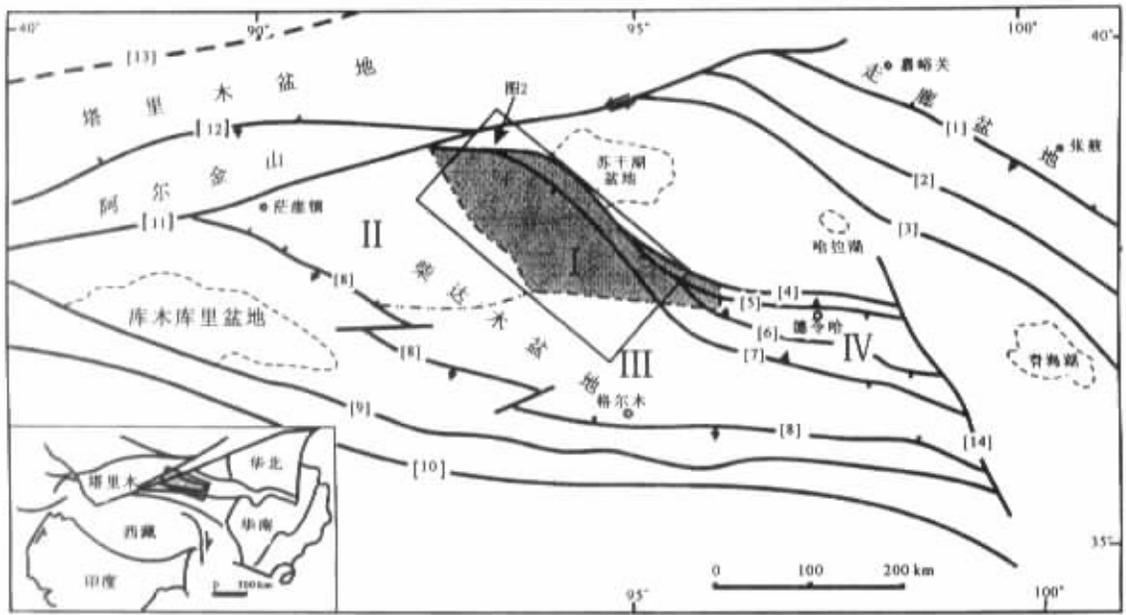


图 1 柴达木盆地构造格架图

Fig. 1 Tectonic sketch of the Qaidam basin

I-北缘块断带 ;II-西部拗陷 ;III-三湖拗陷 ;IV-德令哈拗陷 ;1-北祁连山山前断裂 ;2-北祁连山南缘断裂带 ;3-中祁连山南缘断裂带 ;4-北宗务隆山断裂带 ;5-南祁连山山前断裂带 ;6-欧龙布鲁克-牦牛山断裂带 ;7-赛什腾山-锡铁山山前断裂带 ;8-昆北断裂带 ;9-昆中断裂带 ;10-昆南断裂带 ;11-阿尔金山南缘断裂带 ;12-阿尔金山北缘断裂带 ;13-塔南隆起断裂带 ;14-鄂拉山断裂带

I -the northern fault block zone ;II -the western depression ;III -the Sanhu depression ;1 -fronthead fault zone of North Qilian orogen ;2 -south marginal fault zone of North Qilian orogen ;3 -south marginal fault zone of Middle Qilian orogen ;4 -north Zhongwulong mountain fault zone ;5 -fronthead fault zone of South Qilian orogen ;6 -oulongbuluke-Maoniou mountain fault zone ;7 -fronthead fault zone of Sanshiteng-Xitie mountain ;8 -north Kunlun mountain fault zone ;9 -middle Kunlun mountain fault zone ;10 -south Kunlun mountain fault zone ;11 -south marginal fault zone of Altyn Tagh Mountain ;12 -North marginal fault zone of Altyn Tagh Mountain ;13 -fault zone of Southern Tarim ;14 -Ela mountain fault zone

源潜力(石油地质资源量近 $20 \times 10^8 t$)。但因对构造变形的研究程度不够,导致油气勘探尚未取得突破性的进展。近年来,人们逐渐意识到构造形成演化过程对该区油气运聚具有重要控制作用。然而,有关柴达木盆地构造形成演化问题大多是从区域上作定性论述(翟光明等,1997;曹运江等,2000;王明儒等,1997;胡受权,1999;汤良杰等,2000;戴俊生等,1999),深入解剖的工作不多。

柴达木新生代盆地整体为昆仑山和祁连山对冲挤压盆地,北缘地区属于这一对冲挤压盆地的北部,北缘地区的构造在平面上由6个逆冲带和断褶带组成(图2)。剖面上可划分为3个构造系统(图3-b)。因与祁连山较近,北缘地区的构造变形主要应受祁连山向南推挤作用的控制,侏罗系底界向北逐渐升高的特点也表明这点(图3)。但侏罗系及其以上地层的剖面结构特征(包括逆断层的运动方向和褶皱的不对称性)总体显示由S向N的构造指向,仅在剖面北侧显示有S指向(图3)。绝大多数情况下,

挤压构造总体指向是与挤压方向相一致。而北缘地区这种盖层构造指向与挤压方向的逆反现象则是一种少见的、形成机制尚不十分清楚的构造现象

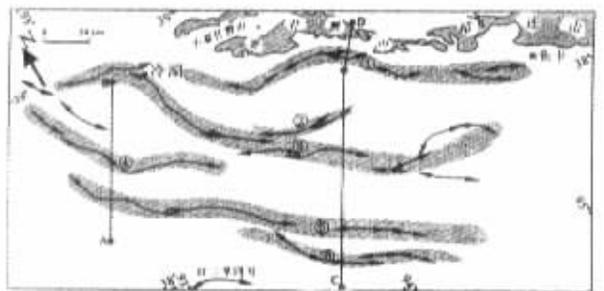


图 2 柴达木盆地北缘地区构造格架图

Fig. 2 Structural sketch of the Northern Qaidam basin

- ①-山前逆冲带 ;②-小丘林-玛瑙挤压带 ;③-冷湖断褶带 ;
- ④-鄂博梁 I号(葫芦山断褶带);⑤-鄂博梁 II号(伊克雅乌汝断褶带);⑥-鸭湖-台吉乃尔断褶带
- ① -fronthead thrust zone ;② -Xiaoqiuling-Manao compressional zone ;
- ③ -Lenghu fault-fold belt ;④ -Eboliang I (Hulusan fault-fold belt) ;
- ⑤ -Eboliang II (Yikeyawuru fault-fold belt) ;
- ⑥ -Yahu-Taijinaier fault-fold belt

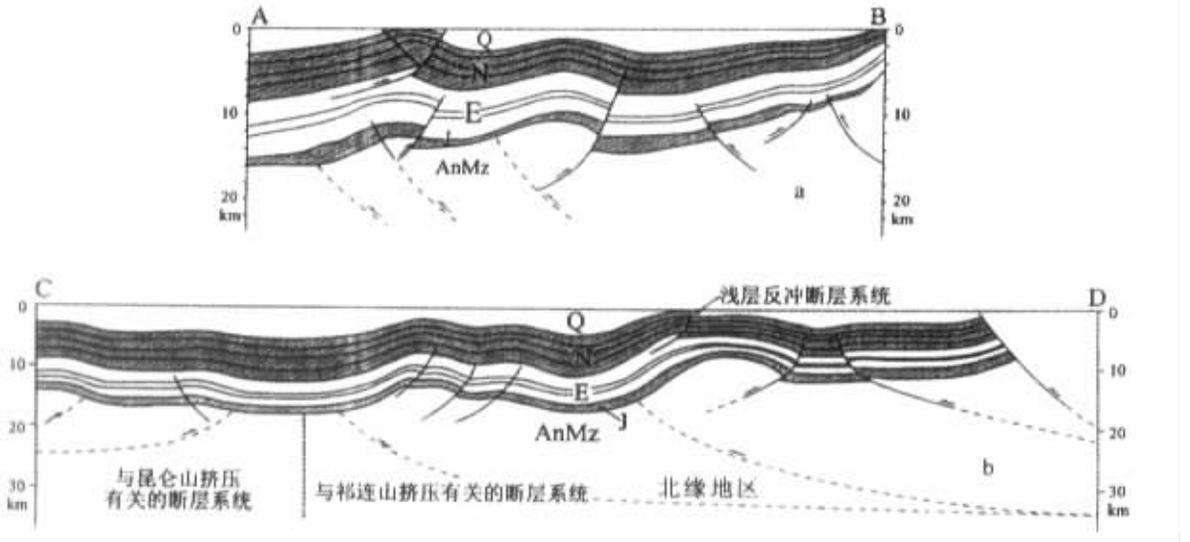


图 3 柴达木盆地北缘地区剖面结构图(据青海油田地震资料)

Fig. 3 Structures of major sections in the Northern Qaidam Basin (Based on seismic profile from Qinhai Oil field)

(a) A-B 剖面 (b) C-D 剖面, 剖面位置见图 2

(a) A-B section (b) C-D section, section locations in Fig. 2

(MacKay, 1995; Gutscher 等, 2001), 容易被误认为南侧昆仑山挤压作用有关。因此, 有必要对其形成机制进行深入研究。

目前, 构造物理模拟是构造研究的重要手段, 可用于造山带和盆地构造的研究, 为构造形成过程和成因机制研究提供依据, 在油气勘探中可为数据质量不高或只有浅层资料(缺乏深层资料)的地震剖面解释提供模式和思路。近年来, 构造物理模拟研究在中国得到了进一步重视, 在造山带研究(冯向阳等, 2001)和盆地构造研究(周建勋等, 1999)方面均开展了一些新的工作。对于浅层次的盆地构造模拟, 通常采用以松散砂为材料的砂箱实验方法(Koyi, 1997)。本文选择柴达木盆地北缘地区的典型剖面, 利用砂箱实验方法深入其构造的形成过程和机制, 以期对构造形成演化研究和油气勘探提供基础依据。

2 实验方法

对于挤压构造的模拟实验, 通常受断层形成的安德生模式的习惯影响, 主要考虑侧向挤压力的作用, 对于基底边界仅考虑到摩擦力(Liu 等, 1992; Calassou 等, 1993; Storti 等, 1997)或实验材料性质(Cotton 等, 2000; Gutscher 等, 2001)对构造变形特征的影响作用。然而, 柴达木盆地非地震勘探中 MT 剖面显示莫霍面有很大的起伏, 过柴达木盆地的格尔木至额济纳旗地学断面也表明, 柴达木盆地

下地壳有明显的缩短(邓晋福等, 1995)。因此, 设计了基底收缩和基底无收缩 2 种对冲挤压模型, 基底收缩对冲挤压模型考虑了基底缩短对盖层构造的影响, 基底无收缩对冲挤压模型则是用于对比分析。

(1) 基底收缩挤压模型: 实验模型装置如图 4-a 所示。模型底面平铺有伸缩性的橡皮, 橡皮两端分别固定在两端活动挡板的底缘。橡皮初始长度为 60 cm, 通过活动挡板向外移动把橡皮长度拉伸至 80 cm, 然后平铺一层 3 cm 砂层代表基底岩层。随着两侧活动挡板向内移动, 使砂层发生对冲挤压, 基底橡皮也同时收缩, 形成基底收缩对冲挤压构造。实验过程中每 2.5 cm 挤压量加铺 0.5 cm 的砂层, 以模拟柴达木盆地新生代的同构造沉积作用。实验过程分双侧对称对冲挤压、双侧不对称对冲挤压和单侧挤压 3 种方式。

(2) 基底无收缩对冲挤压模型: 实验模型装置如图 4-b 所示, 与基底收缩对冲挤压模型的差别是模型底面不具有伸缩性的橡皮布, 砂层被直接铺设在模型底板之上。

挤压位移量(d)为 20 cm, 相当 25% 应变。实验材料为 300~500 μm 的松散海滩石英砂, 内摩擦角为 31°~33°, 并作着色处理, 基底砂层加少量的水增加内聚力, 用于模拟深部较为塑性的地层。挤压位移速率为 $8 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。为观察模型内部的真实变形情况, 模型作切片观测。每一种模型均进行 2~3 次重复实验, 以验证实验结果的可重复性。实

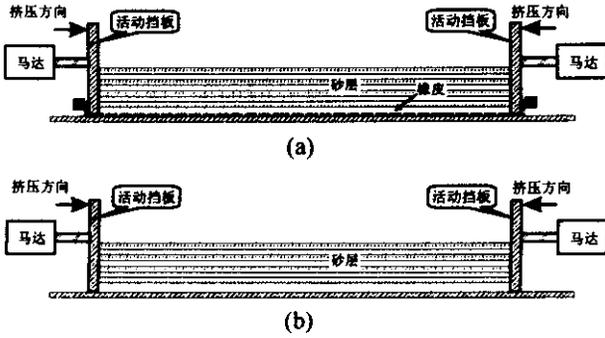


图4 砂箱实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the sandbox deformation rig

- a-基底收缩对冲挤压模型 b-基底无收缩对冲挤压模型
- a-the opposite thrusting model with contractive substrate ;
- b-The opposite thrusting model without contractive substrate

验在石油大学(北京)构造物理模拟实验室进行。实验过程用数码照相和高清晰度摄像记录,以便分析对比。

3 实验结果

3.1 基底收缩挤压模型

3.1.1 双侧对称对冲挤压 两侧活动挡板以相同的速度同时向内挤压。变形初期,在两侧基底最先

隆起,并出现少量逆断层构成对冲基本格局。随着挤压量的增大,出现反冲断层,并逐渐向后扩展。当挤压总位移达到 20 cm 时,形成反冲断层明显发育的对冲构造,其中部分反冲断层相对较浅,向深部通常被正冲断层阻断(图 5-a)。断层的初始倾角为 31°,随着挤压量的增加,均有不同程度的增大。模型两边正冲和反冲断层的发育程度基本均衡。

3.1.2 双侧不对称对冲挤压 两侧活动挡板以不同的速率同时向内挤压,其中右侧活动挡板的挤压速率为 16×10^{-3} cm/s,是左侧活动挡板挤压速率的两倍。变形过程中,右侧基底隆起较早,当挤压量增大,左侧逆断层也开始形成并逐渐向前扩展,右侧则逐渐出现反冲断层。随着挤压量进一步增加,右侧反冲断层向前扩展,左侧反冲断层也逐渐活跃,基底继续隆升,断层倾角趋陡(图 5-b)。与双侧对称挤压模型相比(图 5-a,b),模型两侧反冲断层更加发育,尤其在挤压速度较快的右侧更加显著。

3.1.3 单侧挤压 随着右侧活动挡板单侧向内挤压,模型右侧基底首先隆起,并出现反冲断层,随着挤压量增大,反冲断层逐渐向前(左侧)扩展,并形成

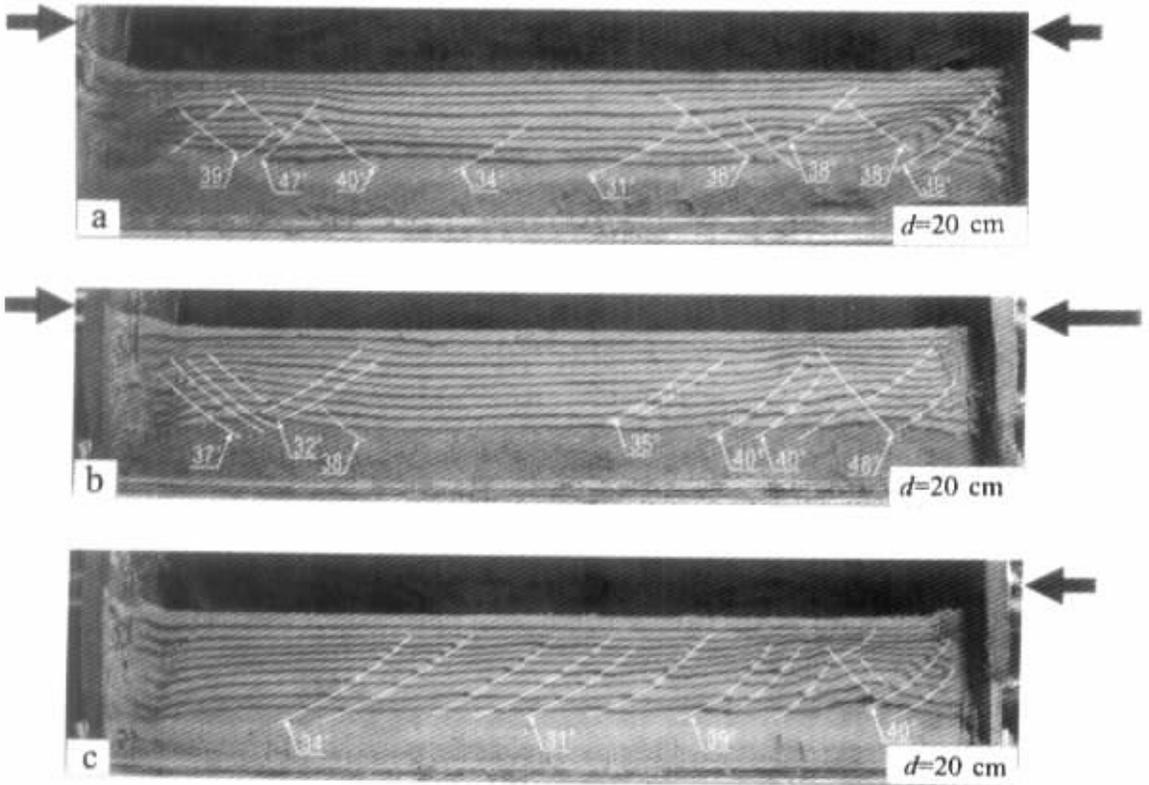


图5 基底收缩对冲挤压模型实验结果

Fig. 5 The experimental results of opposite thrust model with contractive substrate

- a-双侧对称挤压模型 b-双侧不对称挤压模型 c-单侧挤压模型

a-the model compressed symmetrically from opposite directions b-the model compressed asymmetrically from opposite directions c-the model compressed from one direction only

少量正冲断层。当挤压量进一步增加,基底继续隆升,反冲断层数量增多,而断距和倾角的变化不大。与以上双侧挤压模型的差别十分明显,整个模型以反冲断层发育、正冲断层很少为特征(图5-c)。

3.2 基底无收缩对冲挤压模型

该模型为双侧对称挤压,变形初期,模型两侧形成倾角 31° 的正冲断层,随着挤压量的增大,断层从

两侧逐渐向中部扩展,早期形成的断层倾角逐渐增大,最终形成典型的对冲构造样式(图6),与基底收缩对冲挤压模型的显著区别是反冲断层不发育。

4 讨论与结论

以上实验结果表明,与基底无收缩对冲挤压模型相比,基底收缩挤压模型以反冲断层发育为特色。

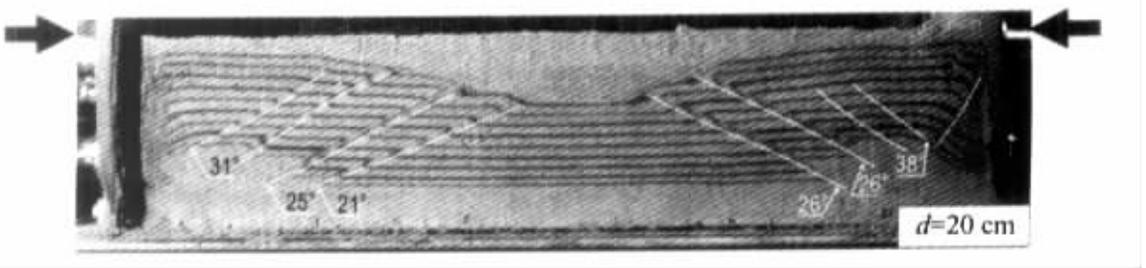


图6 基底无收缩对冲挤压模型实验结果

Fig. 6 The experimental results of opposite thrusting model without contractive substrate

在双侧对称对冲挤压模型中,正冲和反冲断层的发育程度基本处于均衡状态;在双侧不对称对冲挤压模型中,反冲断层更加发育,尤其在挤压速度较快一侧更加显著,单侧挤压模型中,以反冲断层发育、正冲断层很少为特征。由此表明,基底收缩作用和挤压作用的不对称性促使反冲断层的发育。

其他一些基底无收缩挤压变形实验(Liu等,1992;Calassou等,1993;Storti等,1997)也大多以正冲断层发育(反冲断层不发育)为特征。但在基底摩擦力较低(Liu等,1992)和基底存在塑性层(Cotton等,2000;Gutscher等,2001)的情况下,也可促使反冲断层的发育,但对其力学机制还未加以很好的解释。从Cotton等(2000)和Gutscher等(2001)的实验情况来看,塑性层在挤压过程中发生了明显的缩短增厚,亦说明了基底收缩促使了反冲断层的发育。

柴达木北缘地区的剖面结构(图3),与基底收缩双侧不对称对冲挤压模型(图5-c)和基底收缩单侧挤压模型(图5-d)的结果更为接近,即反冲断层较正冲断层更加发育,而与双侧对称对冲挤压模型(图5-a)尚有一定差距。由此可见,基底收缩和不对称挤压是导致该区特殊剖面结构的可能原因,该区新生代构造变形是在基底收缩作用参与下、以祁连山为主的侧向不对称挤压作用的结果。

参考文献

曹运江,陆廷清,牟中海等.2000.柴达木盆地北缘构造型式及油气勘

探前景.西南石油学院学报,22(3):9-12.

戴俊生,曹代勇,张守仁.1999.冷湖背斜带中东段构造特征分析.煤炭学报,24(6):561-565.

邓晋福,吴宗絮,杨建军等.1995.格尔木-额济纳旗地质断面走廊带地壳-上地幔岩石学结构与深部过程.地球物理学报,38(增刊2):130-144.

冯向阳,孟宪刚,邵兆刚等.2001.雪峰山陆内造山带变形特征及挤压推覆伸展滑脱构造的物理模拟.地球学报,22(5):419-424.

胡受权,曹运江,黄继祥等.1999.柴达木盆地北缘地区前陆盆地演化及油气勘探目标.天然气工业,19(4):1-5.

汤良杰,金之钧,张明利等.2000.柴达木盆地北缘构造演化与油气成藏阶段.石油勘探与开发,27(2):36-39.

王明儒,胡文义,彭德华.1997.柴达木盆地北缘侏罗系油气前景.石油勘探与开发,24(5):20-24,119.

翟光明,徐凤银,李建青.1997.重新认识柴达木盆地力争油气勘探获得新突破.石油学报,18(2):1-7.

周建勋.1999.基于平面砂箱实验对黄骅盆地新生代构造成因的新解释.大地构造与成矿学,23(3):281-287.

Reference

Calassou S, Larroque C, Malavieille J. 1993. Transfer zones of deformation in thrust wedges: an experimental study. Tectonophysics, 221: 325-344.

Cao Yunjiang, Lu Tingqing, Huang Jixiang, Hu Shouquan. 2000. Structural style and hydrocarbon exploration prospect in the northern margin of Qaidam basin. Journal of Southwest Petroleum Institute, 22(3): 9-12 (in Chinese with English abstract).

Cotton J, Koyi H. 2000. Modeling of thrust fronts above ductile and

- frictional detachments: Application to structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3):351~363.
- Dai Junsheng, Cao Daiyong, Zhang Shouren. 1999. The analysis on structural characteristics of the central and east part of Lenghu anticline belt. *Journal of China Coal Society*, 24(6):561~565 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Wu Zhongxu, Yang Jianjun et al. 1995. Crustal-mantle petrological structure and deep processes along the Golmud-Ejin QI geoscience section. *Acta Geophysica Sinica*, 38(Sup. II):130~144 (in Chinese with English abstract).
- Feng Xiangyang, Meng Xiangang, Shao Zhaogang et al. 2001. Deformation features and modeling experiments of nappe/decollement structure in Xuefeng mountain intracontinental orogenic belt. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(5):419~424 (in Chinese with English abstract).
- Gutscher M, Klaeschen D, Flueh E, Malavieille J. 2001. Non Coulomb wedges, wrong-way thrusting, and natural hazards in Cascadia. *Geology*, 29(5):379~382.
- Hu Shouquan, Cao Yunjiang, Huang Jixiang et al. 1999. Evolution of the foreland basin and the target for oil and gas exploration in the northern margin area of Chaidamu Basin. *Natural Gas Industry*, 19(4):1~5 (in Chinese with English abstract).
- Koyi H. 1997. Analogue modelling: from a qualitative to a quantitative technique—a historical outline. *Journal of Petroleum Geology*, 20(2):223~238.
- Liu H, McClay K, Powell D. 1992. Physical models of thrust wedges. in: *Thrust tectonics* (edited by McClay K, Chapman and Hall), New York, 71~81.
- MacKay M. 1995. Structural variation and landward vergence at the toe of the Oregon accretionary prism. *Tectonics*, 14(5):1309~1320.
- Storti F, Salvini, F. 1997. Fault-related folding in sandbox analogue models of thrust wedges. *Journal of Structural Geology*, 19(3/4):583~602.
- Tang Liangjie, Jin Zhijun, Zhang Minli et al. 2000. Tectonic evolution and oil (gas) pool-forming stage in northern Qaidam Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 27(2):36~39 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mingru, Hu Yiwen, Peng Dehua. 1997. Oil and gas potential of Jurassic strata in northern margin of Qaidam Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 24(5):20~24 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Guangming, Xu Fengyin, Li Jianqing. 1997. A reconsideration of Qaidam Basin for a great breakthrough oil and natural gas exploration. *Acta Petrolei Sinica*, 18(2):1~7 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianxun. 1999. New interpretation on the mechanism of Cenozoic structures in Huanghua basin, North China: Insights from plane sandbox experiments. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(3):281~287 (in Chinese with English abstract).