中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 12 期: 1655 ~ 1668
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

塔里木库车坳陷新生代盐构造解析及其变形模拟

汪新[①*], 王招明[②], 谢会文[②], 李世琴[③], 唐鹏程[①], 尹宏伟[④], 李勇[②], 黄少英[②]

① 浙江大学地球科学系, 杭州 310027;
② 中国石油塔里木油田分公司, 库尔勒 841000;
③ 西南石油大学资源环境学院, 成都 610500;
④ 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093
* E-mail: wx@zju.edu.cn

收稿日期: 2010-04-20; 接受日期: 2010-08-22
国家科技重大专项(编号: 2009ZX05009-001)和中国石油科技创新基金(编号: 2008D-5006-01-05)资助

摘要 塔里木盆地北缘库车坳陷新生代盐构造为油气聚集提供了丰富的圈闭和良好的盖层, 是我国重要的油气勘探目标. 通过详细的野外地质观测和二维、三维地震反射剖面解析, 结合物理模拟实验和离散元数值模拟, 发现库车坳陷发育三层结构的挤压冲断型盐构造: 盐上层逆冲断层和褶皱、盐岩塑性流变形成的盐丘和盐背斜和盐下层构造. 盐岩聚集于拜城凹陷南北两侧, 盐下构造发育于拜城凹陷北侧, 盐上构造向南传播的更远, 盐上层与盐下层的构造形态和高点存在较大的差异, 它们没有一一对应的关系. 库车坳陷盐构造分为两个阶段: 渐新世-中新世库车坳陷构造变形微弱, 天山山前的重力(沉积)差异负载导致盐岩发生塑性流变, 由山前向盆地流动, 形成刺穿型盐丘、盐株; 上新世库车坳陷受到强烈挤压, 发生大规模逆冲推覆, 早期的盐底辟构造演变为盐席断层推覆体, 形成大型盐撤凹陷、外来盐席和整合型盐背斜. 盐岩边界、区域构造应力变化、差异负载(沉积负载和局部构造负载)是影响库车坳陷盐构造的三个主要因素.

关键词
塔里木盆地
库车坳陷
盐构造
新生代
物理和离散元数值模拟

塔里木盆地北缘库车坳陷新生代沉积厚层膏盐岩, 在重力、浮力和挤压应力联合作用下, 膏盐岩及其周围岩层发生形变, 形成复杂盐底辟构造和断裂褶皱, 为油气运移提供了通道与驱动力, 又为油气聚集提供了丰富的圈闭和良好的盖层. 然而库车坳陷盐构造地质结构复杂, 膏盐岩的不规则外形和密度非均质性造成地震成像差, 加上膏盐岩的地震传播速度比沉积碎屑岩要快, 对盐下层地震反射形成屏蔽和干扰; 另外, 膏盐岩的塑性流变对上、下地层构造变形产生极大影响, 造成盐上层和盐下层发生拆离变形, 增加了精确厘定盐下层构造的难度. 近年来库车山地地震采集和处理技术得到改进, 获得高质量的二维、三维反射地震资料, 为识别和研究盐构造提供了坚实的基础, 库车坳陷盐构造研究与油气勘探获得重大进展, 发现一批大中型油气田. 库车坳陷盐构造成为构造地质研究和油气勘探的热点, 与盐

引用格式: Wang X, Wang Z M, Xie H W, et al. Cenozoic salt tectonics and physical models in the Kuqa depression of Tarim Basin, China (in Chinese). Sci Sin Terrae, 2010, 40: 1655—1668

构造相关的油气藏是重要的油气储量增长点.

近年来, 许多学者对库车的盐构造进行了研究, 汤良杰等[1,2]、Chen等[3]、余一欣[4]通过盐构造类型识别和划分, 确认库车盐构造属于挤压型盐构造, 形成于天山山前重力滑脱扩展环境, 盐构造从北往南迁移, 分为盐岩沉积、低幅度盐枕和盐背斜持续隆升三个演化阶段, 盐岩厚度、盐上覆层沉积物厚度、盐下古隆起和断裂是影响库车盐构造的主要因素. 随后的研究发现库车盐构造并非是单纯的挤压型盐构造, 库车盐岩早期发育盐底辟, 晚期受到构造挤压形成逆冲断层、盐席推覆体、盐背斜[5]. 因此, 将库车盐构造归结为挤压型盐构造过于简单, 研究认识需要深化. 目前迫切需要研究的问题包括: 不同类型盐构造识别与划分、盐构造变形期次和时代确定、盐构造变形参数和演化过程模拟恢复.

本文通过盐构造地表形态调查, 二维、三维石油勘探地震反射剖面和钻测井资料解析, 建立库车坳陷盐构造区域剖面, 揭示库车坳陷盐构造和周边岩层的变形特征. 库车盆地沉积了 6~8 km 厚的新生代地层, 它们记录了库车构造变形的演化过程和时代, 通过研究这套沉积地层, 确定库车盐构造演化期次和变形时间. 在此基础上, 通过物理模拟实验和离散元数值模拟, 研究盐构造变形过程和机理, 模拟基底构造、盐岩厚度、上覆岩层厚度和强度、同构造沉积负载、区域挤压作用对库车盐构造的影响, 确定库车坳陷盐构造变形参数.

1 库车坳陷盐构造特征

库车坳陷位于塔里木盆地北部, 北与南天山毗邻, 面积约 2.85×10^4 km^2(图 1). 库车坳陷沉积两套膏盐层, 古近系古-始新统库姆格列木组盐岩分布在库车坳陷西段, 新近系中新统吉迪克组(N_1j)盐岩分布在库车坳陷东段, 古近系膏盐岩厚度和分布范围远大于新近系膏盐岩. 新生代印度板块和欧亚大陆碰撞引发天山隆升[6,7], 天山南北麓发生强烈构造变形[8~13], 天山南麓库车坳陷膏盐岩卷入变形, 形成复杂的盐构造和冲断推覆构造[14~19]. 库车坳陷东段膏盐岩厚度薄, 盐岩作为逆冲推覆构造的滑脱层, 并且聚集于东秋里塔格背斜、库车塔吾背斜核部, 盐底辟构造不发育; 库车坳陷西段膏盐岩厚度大, 盐岩不仅作为构造滑脱层, 又为盐底辟构造提供盐源, 即发

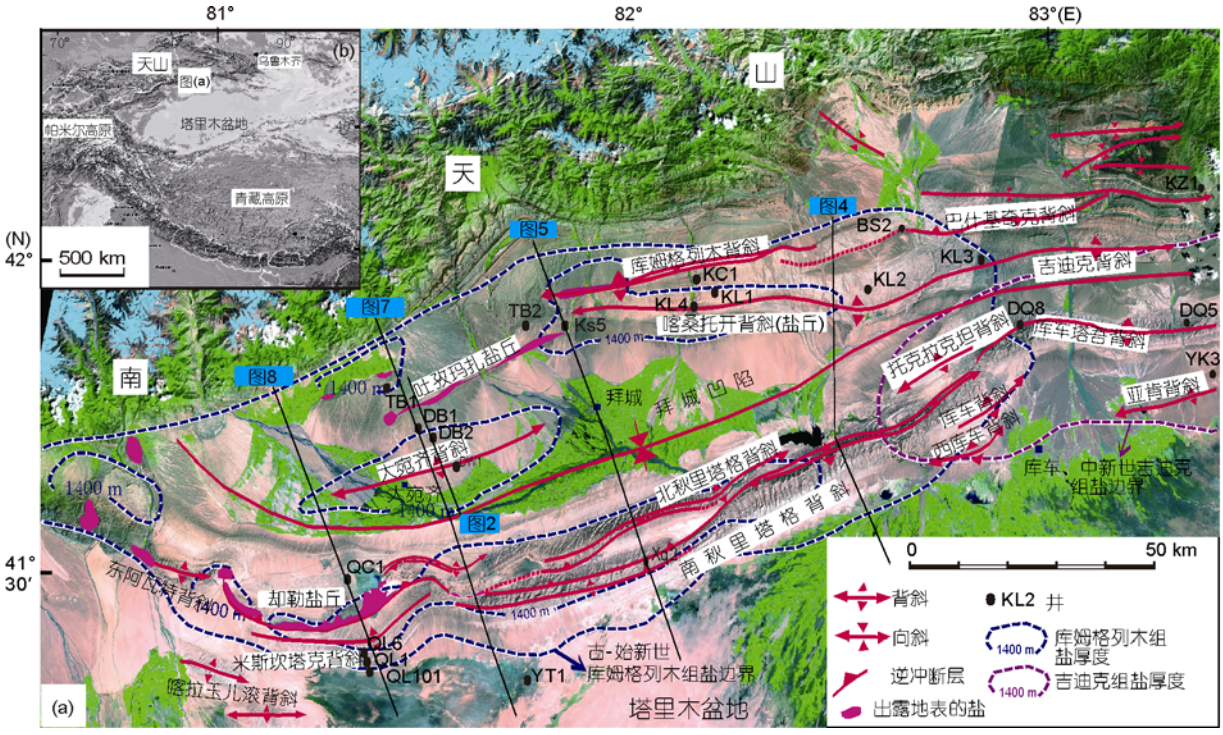


图 1　塔里木盆地北缘库车坳陷 ETM 影像地质解译图

育整合接触的整合型(非刺穿型)盐丘、盐背斜, 也发育不整合接触(刺穿型)盐墙、盐丘, 甚至发育喷发流出(挤压型)盐席、盐舌(图 2). 总的来讲, 库车坳陷东段主要发育构造幅度及成熟度较低的整合型盐构造, 库车坳陷西段不仅发育整合型盐构造, 也发育变形幅度及成熟度较高的刺穿型盐构造, 甚至发育挤压型盐席推覆体[2~5].

库车坳陷盐构造由三个部分组成, 从下往上分别为盐下层、膏盐层、盐上覆层(图 2, 表 1). 盐下层是位于盐岩之下的岩层, 主要由三叠系、侏罗系和下白垩统陆相砂泥岩组成, 下侏罗统为一套煤系地层; 膏盐层是指盐下层与盐上覆层之间的古近系库姆格列木组盐岩, 这套塑性膏盐岩是盐构造发生的主要部位; 盐上覆层是指沉积于盐岩之上的渐新统苏维依组($E_{2\text{-}3}s$)、中新统吉迪克组(N_1j)和康村组(N_1k)、上新统库车组(N_2k)、第四系西域组(Q_1x)地层, 它记录了盐层沉积后的各种地质事件, 对识别盐构造运动的时间和方式起着关键性的作用. 根据沉积和形变在时间上的先后关系, 盐上覆层可以细分为三个构造层[22]: 构造前沉积层、同构造沉积层、构造后沉积层(图 3). 构造前沉积层是在盐构造发生前所沉积的岩层, 岩层厚度均匀, 没有明显的加厚与减薄现象. 同构造层通常位于前构造层之上, 是在构造运动中沉积的岩层, 反映了盐构造过程中的沉积作用. 构造后沉积层为构造运动停止后沉积的岩层, 记录了构造结束后的截顶和超覆沉积现象及其岩层厚度的变化.由于库车盐构造变形尚在发生, 库车地区不存在构造后沉积层.

1.1　库车坳陷克拉苏剖面

剖面穿过库车坳陷山前带-拜城凹陷-南秋里塔格背斜(位置见图 1), 剖面显示一系列由北向南的逆

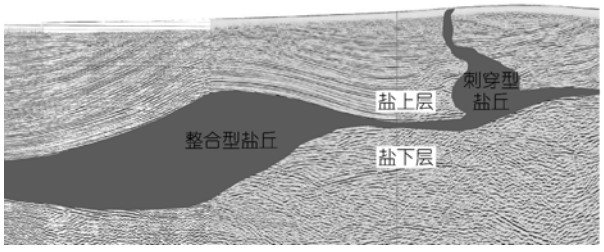


图 2　库车坳陷盐构造三层结构及其刺穿型和整合型盐构造示意图

冲断层和褶皱, 靠山前的两条逆冲断层切过膏盐层, 形成巴什基奇克背斜、喀桑托开背斜, 向盆地方向(向南)盐下断层没有穿过膏盐层, 形成盐下的叠瓦状逆冲构造(图 4). 拜城凹陷北侧的巴什基奇克背斜、喀桑托开背斜属于逆冲断层相关褶皱, 巴什基奇克背斜位于盐株之上, 盐株北翼被逆冲断层切割; 喀桑托开背斜是断层传播褶皱, 这两个背斜下伏发育逆冲断层. 拜城凹陷南侧的南秋里塔格背斜属于盐背斜, 背斜核部聚集 5~6 km 厚的盐岩, 盐下层没有发生变形, 古生界地层保持水平状(南秋里塔格背斜盐下反射地震波组上翘是盐岩速度拉升造成).

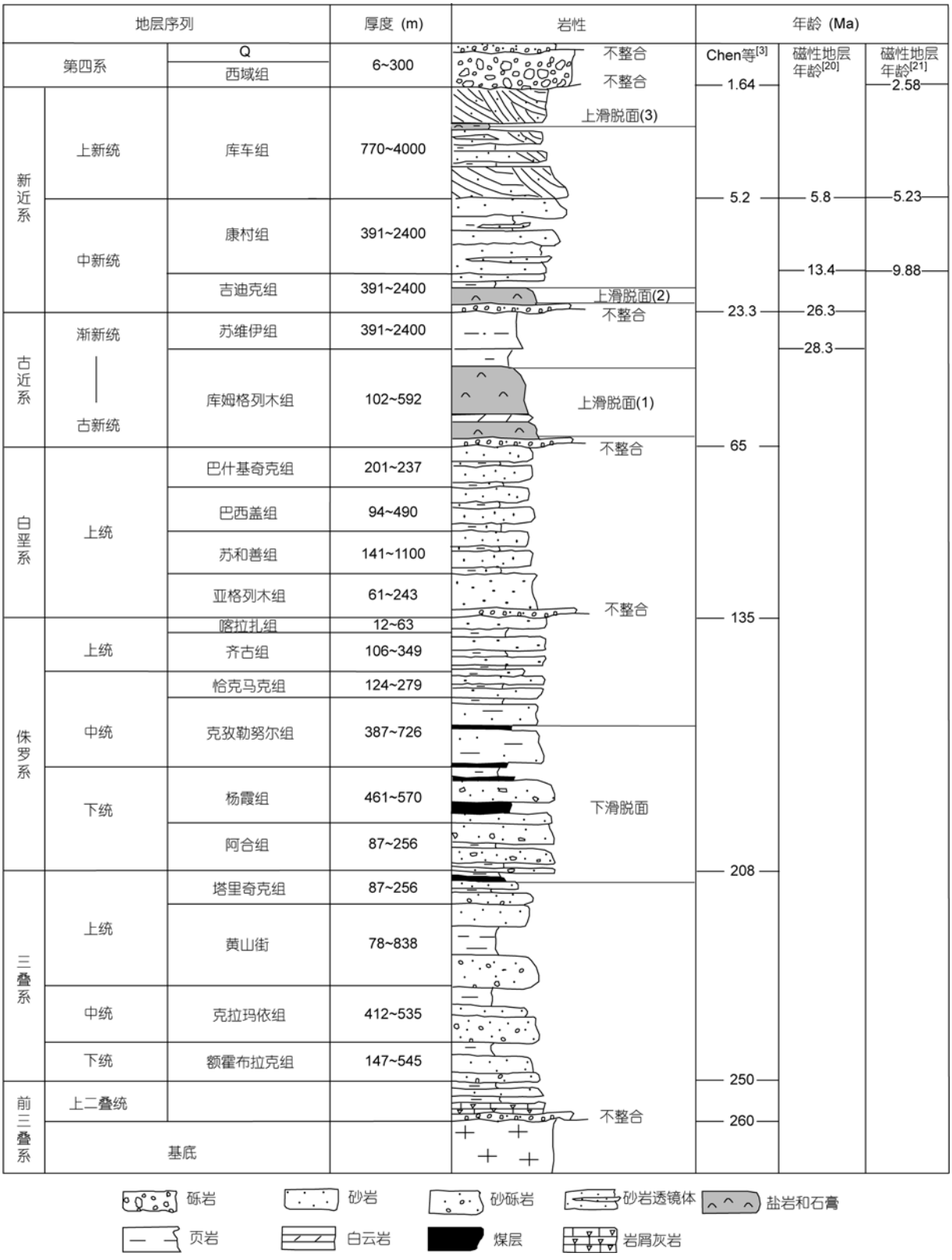
盐上覆层可以细分为二个构造层: 渐新统苏维依组($E_{2\text{-}3}s$)、中新统吉迪克组(N_1j)构造前沉积层, 中新统康村组(N_1k)、上新统库车组(N_2k)、第四系(Q_1x)同构造沉积层. 不论是背斜顶部或者向斜核部, 渐新统苏维依组($E_{2\text{-}3}s$)、中新统吉迪克组(N_1j)的厚度都没有变化, 表明渐新世-早中新世库车坳陷没有构造活动, 沉积了厚度均匀的岩层. 拜城凹陷上新统库车组(N_2k)、第四系(Q_1x)厚度达到 4~5 km, 南秋里塔格背斜、喀桑托开背斜顶部上新统库车组(N_2k)、第四系(Q_1x)地层明显变薄, 因此上新统库车组(N_2k)、第四系(Q_1x)属于同构造沉积层.

巴什基奇克背斜的生长地层是中新统康村组(N_1k), 喀桑托开背斜的生长地层是上新统库车组(N_2k)下段, 南秋里塔格背斜的生长地层是上新统库车组(N_2k)上段, 这些同构造沉积的楔状生长地层依次向南变新, 表明背斜形成和地形隆起自北向南逐渐变新, 构造变形的时序依次是巴什基奇克背斜(盐株)形成于中新世, 喀桑托开背斜形成于早上新世, 南秋里塔格背斜形成于晚上新世(图 4).

1.2　库车坳陷克拉苏西剖面

剖面位于库车坳陷克拉苏西端(位置见图 1). 拜城凹陷南北两侧发育盐底辟构造(图 5), 北侧的吐孜玛扎盐丘北翼发育断层, 断层上盘地层出露地表, 早期的盐岩边界已被破坏; 盐丘南翼没有遭受构造破坏, 保留盐底辟边界, 始-渐新统苏维依组、中新统吉迪克组/康村组、上新统库车组岩层与盐岩呈刺穿型盐边界. 南秋里塔格背斜和北秋里塔格背斜是两个紧闭箱状褶皱, 它们位于盐丘之上, 盐丘厚度达到 5~7 km. 盐下层变形发生在拜城凹陷沉降中心以北, 凹陷以南的盐下层未变形, 盐岩向南流动聚积于拜

表 1　库车坳陷综合地层柱状图



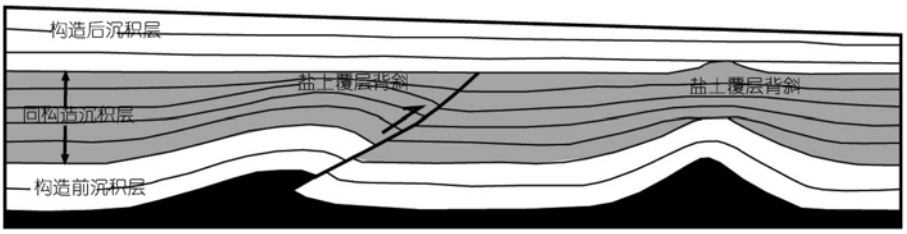


图 3　挤压型盐构造上覆层三个构造层分布示意图

引自Jackson和Talbot[22]

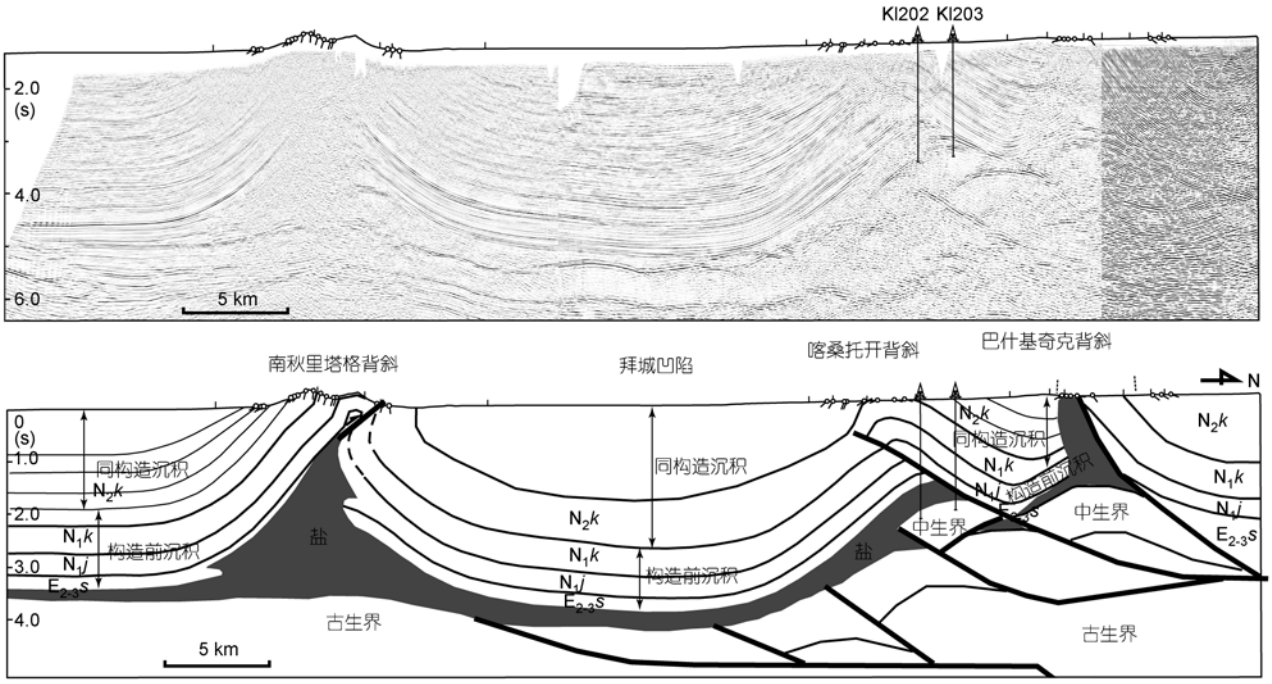


图 4　库车坳陷克拉苏剖面

剖面位置见图 1

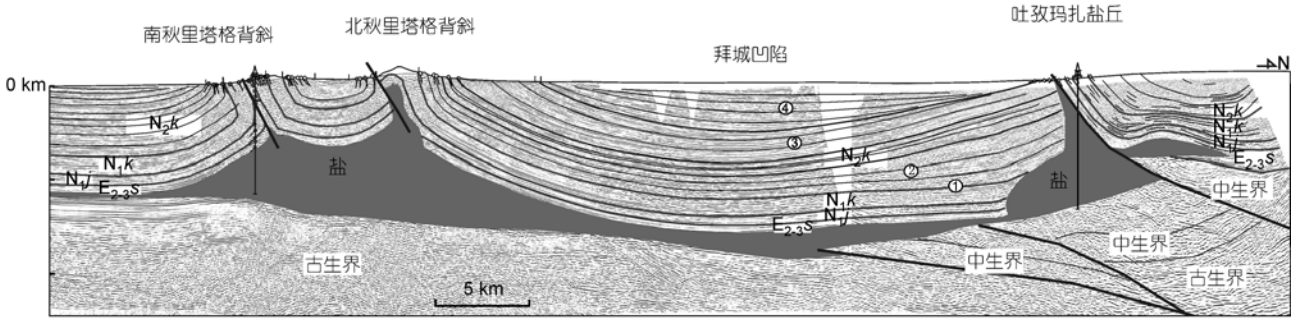


图 5　库车坳陷克拉苏西剖面

剖面位置见图 1. ① 中新世康村组顶界; ② 上新世库车组下段顶界; ③ 上新世库车组上段; ④ 更新世西域组底界

城凹陷南侧, 形成秋里塔格背斜, 盐上覆层变形比盐下层变形向南传播的更远.

拜城凹陷盐上覆层厚度达到 6~7 km, 它记录了盐层沉积后拜城凹陷发生的变化, 可以用来恢复凹陷形成过程和盐岩流动方式. 拜城凹陷盐上覆层可以细分为四个构造层(图 5), 通过四个构造层的逐层拉平, 复原中新世-现今四个阶段的地质剖面[23](图 5), 恢复不同地质时期库车盐构造活动与拜城凹陷变迁过程(图 6):

(1) 渐新世-中新世构造剖面(图 6(a)). 剖面右端发育吐孜玛扎盐丘, 盐丘左侧沉积的始-渐新统苏维依组($E_{2\text{-}3}s$)、中新统吉迪克组(N_1j)和康村组(N_1k)地层厚度均匀, 没有明显的加厚与减薄现象, 表明沉积期间构造变形微弱, 它们属于构造前沉积层.

(2) 上新世早期构造剖面(图 6(b)). 吐孜玛扎盐丘生长变大, 盐丘左侧出现边缘凹陷, 接受上新统库

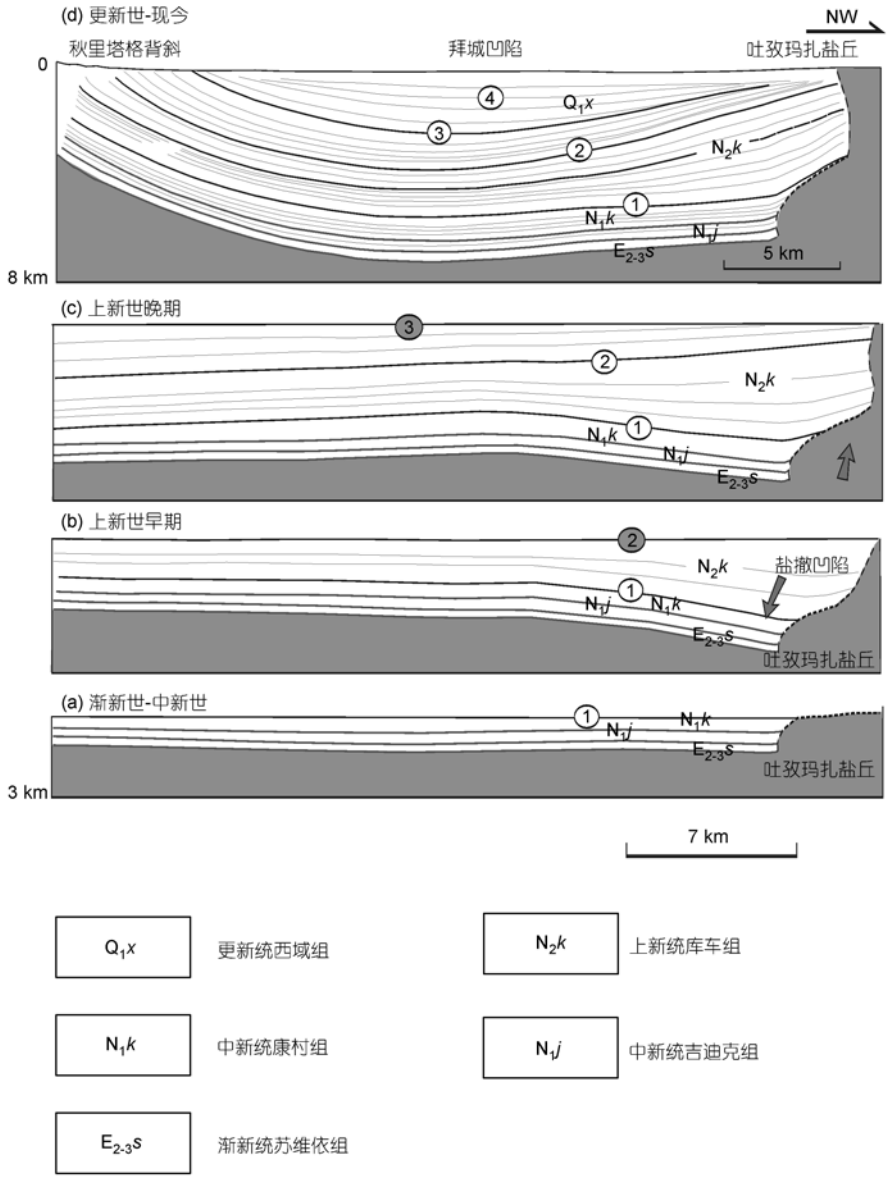


图 6　库车坳陷拜城凹陷盐上覆层构造复原图

①~④说明同图 5

车组(N_2k)沉积.

(3) 上新世晚期构造剖面(图 6(c)). 天山开始隆升, 最新沉积地层向南增厚, 向北减薄. 岩盐向南流动, 剖面中部出现低幅度盐丘.

(4) 更新世-现今剖面(图 6(d)). 拜城凹陷下伏盐岩向南流动, 聚集于凹陷南部边界, 形成秋里塔格盐丘(盐背斜), 此时拜城凹陷下陷接受沉积.

复原剖面显示拜城凹陷的沉陷与盐岩流出同步发生, 我们并不清楚拜城凹陷同构造沉积与盐岩流出的因果关系, 是同构造沉积负载造成拜城凹陷下伏盐岩流出, 或者反之盐岩流出造成盆地下陷接受沉积, 但是, 拜城凹陷下伏盐岩流出与凹陷的下陷同步发生.

1.3　库车坳陷吐孜玛扎-秋里塔格剖面

剖面(位置见图 1)北端的吐孜玛扎盐丘刺穿上覆岩层溢出地表(图 7), 盐丘两翼新生界岩层与盐岩呈刺穿型盐边界. 吐孜玛扎盐丘活动由来已久, 早期(渐新世-中新世)盐源补充丰富, 大量盐岩聚积, 形成宽大的盐丘, 晚期(上新世-现今)盐源枯竭, 形成刺穿型盐墙(株). 吐孜玛扎盐岩溢出地表, 表明盐岩现今还在上拱. 大宛齐盐枕是整合型(非刺穿型)盐背斜, 盐岩与上覆层呈整合接触, 盐枕上覆始-渐新统苏维依组、中新统吉迪克组/康村组厚度均匀, 属于构造前沉积层, 上新统库车组、第四系是扇状同构造生长地层, 推断大宛齐盐枕形成于上新世库车期. 南秋里塔格背斜、北秋里塔格背斜属于挤压型盐上覆层褶皱, 北秋里塔格背斜下伏发育断层, 盐岩沿断层溢出地表, 南秋里塔格背斜核部紧闭, 两翼地层高陡倾斜.

盐下层变形发生在大宛齐盐枕以北, 盐下逆冲断层由北向南逆冲, 依次由山前向盆地方向扩展(图 7). 天山山前的断层将古生界-中生界地层抬升到地表, 吐孜玛扎盐丘也被抬升. 吐孜玛扎盐丘、大宛齐盐枕下伏断层没有穿过膏盐层, 而是终止于盐岩中, 拜城凹陷、秋里塔格背斜盐下层没有发生变形.

1.4　库车坳陷博孜-却勒剖面

剖面位于库车坳陷西端(位置见图 1). 剖面北端发育逆冲断层, 这些都是隐伏断层(图 8). 位于剖面中部的却勒盐席推覆体是规模较大的逆冲断层, 断层上盘地层向南逆冲, 断层推覆距离达到 16~18 km. 却勒断层是沿早期盐丘发育的, 地震剖面清楚显示残余盐丘的痕迹, 表明早期盐丘是后续断层优先发生的位置[5]. 却勒推覆体的前端是米斯坎塔克背斜, 米斯坎塔克背斜是整合型(非刺穿型)盐背斜, 盐岩与上覆层呈整合接触, 背斜核部盐岩厚度达 2~3 km,

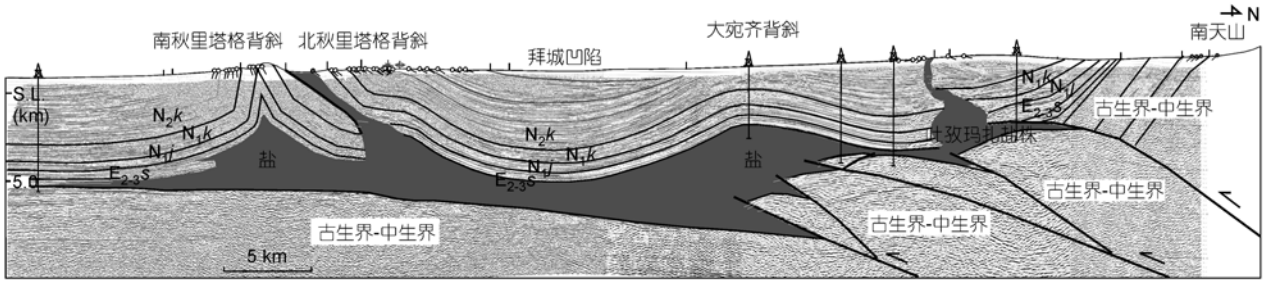


图 7　库车坳陷吐孜玛扎-秋里塔格剖面

剖面位置见图 1

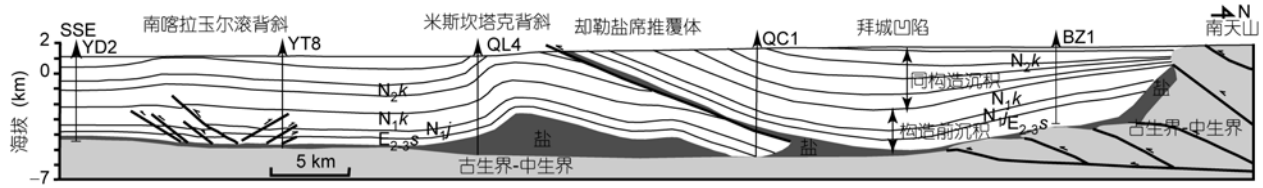


图 8　库车坳陷博孜-却勒剖面

剖面位置见图 1

背斜两翼沉积第四系扇状生长地层, 表明米斯坎塔克背斜发育于更新世. 南喀拉玉尔滚背斜是低缓的滑脱褶皱, 滑脱断层沿盐岩层滑移, 背斜核部发育倾向相反的两组逆冲断层. 南喀拉玉尔滚背斜北翼更新统西域组(Q_1x)地层发育扇状生长地层, 表明背斜形成于更新世.

剖面显示拜城凹陷盐上覆层可以分为上下两部分, 下段的始-渐新统苏维依组、中新统吉迪克组/康村组厚度均匀, 没有明显的加厚与减薄现象, 是构造前沉积的地层; 上段的上新统库车组地层向南变厚, 呈北薄南厚的楔形体, 是同构造沉积的生长地层, 因此, 库车坳陷西端的挤压构造和凹陷沉降应该始于上新世.

2 库车坳陷盐构造物理模拟实验与数值模拟

通过物理模拟实验和离散元数值模拟方法, 依据几何学、运动学、动力学相似性原理, 按照适度比例模拟库车坳陷盐构造变形过程, 与现今的地质剖面对比, 研究盐构造变形的主控因素和机理, 确定基底构造、盐岩厚度、上覆岩层厚度和强度、同构造沉积负载、区域挤压作用对盐构造变形的影响. 物理模拟是在实验室选择恰当的模拟材料和实验方法, 通过较短的时间和较小的模型再现盐构造的变形过程; 离散元数值模拟通过构建自由弹性粒子组成的系统, 给系统施加外力, 观测系统的运动行为及动力学特征. 由于文章篇幅限制, 本文简要介绍库车坳陷盐构造物理模拟实验和离散元数值模拟的结果, 详细的研究认识和成果将专文叙述.

2.1 物理模拟实验

物理模拟实验用干燥石英砂(不同颜色的石英砂力学性质相同)和小玻璃珠模拟沉积岩[24,25], 用聚合硅树脂模拟膏盐岩[26]. 实验模型中 1 cm代表自然界地质原型中 1 km, 模型的初始设置由三个构造层组成(图 9(a)), 自下而上分别为: (1) 盐下层由石英砂和小玻璃珠组成, 厚度为 7~45 mm, 移动端(右)厚 45 mm, 固定端(左)减薄为 7 mm, 盐下层顶面水平, 底面向右倾斜; (2) 盐层呈透镜状, 长 78.5 cm, 中间厚 20 mm, 两端减薄尖灭, 距离模型固定端和移动端分别为 20, 19 cm, 盐层左端有一个“盐底辟”; (3) 盐上层厚 20 mm. 实验模型的左端固定不动, 右端在计算机程控马达驱动下以 0.46 cm/h的速率向左匀速推移, 使模型发生压缩变形. 在变形过程中, 模型接受同构造沉积(约 8 h添加一次石英砂), 而不遭受人为的剥蚀. 实验进行了 66 h(相当于地质时代 2~3 Ma), 总缩短量为 30.5 cm(相当于地质剖面 30.5 km).

模拟剖面具有上下叠置的三层结构: 盐下层与盐上层发育不同形态的构造, 二者之间被塑性滑脱盐岩分开(图 9(b), (c)). 盐下层变形出现于右侧挤压端前方, 两条盐下逆冲断层(F1 和 F2)向上消失于盐层中, 向下终止于底部的滑脱断层, 断层 F1 的倾角 30°~43°, 断层 F2 的倾角 18°, 断层 F1 形成时间早于断层 F2, 盐下逆冲断层的初始倾角 18°~20°, 晚期形成的断层 F2 导致断层 F1 发生旋转, 使得早期形成的 F1 断层面倾角增大, 断层 F1 上盘的岩层倾角也变陡.

模拟结果表明盐上层逆冲断层和褶皱位于盆地两端, 盆地中部形成开阔向斜(凹陷). 断层Fa最先形成, 它位于早期“盐底辟”位置, 早期盐底辟是优先发育逆冲断层的部位; 断层Fb发育于模型右端盐岩尖灭部位, 由于挤压强烈断层Fb近于直立甚至倒转; 断层Fc位于盐岩左端尖灭位置, 形成时间晚. 这三条断层向下消失于盐岩中, 断层Fa吸收了大部分挤压缩短量, 水平断距 14~15 cm; 断层Fb和断层Fc吸收的挤压缩短量较断层Fa要小的多. 模拟剖面移动端前方的盐岩向左流动, 盐下层背斜与盐上向斜右翼之间的盐岩几乎全部流失, 形成盐焊接; 断层Fa下伏也发育盐焊接, 它位于断层Fa逆冲推覆体的下方[27]. 尽管挤压造成盐岩局部变薄或增厚, 但是没有形成刺穿型盐构造. 盐下层变形位于移动端附近, 盐上层变形向南传播的更远, 盐上层与盐下层的构造形态和高点存在较大的差异, 它们没有一一对应的关系. 同构造沉积形成的差异负载导致模拟剖面中部发生沉降, 向斜下伏盐岩向两侧流动减薄, 但是, 模拟剖面向斜两端未出现盐岩聚集的现象. 这与拜城凹陷下伏盐岩向两侧流动, 聚集于凹陷两端, 形成规模较大的盐丘不一致(图 9).

2.2 数值模拟

离散元模拟方法[28]是一种数字沙箱技术. 模型是一个由自由弹性粒子组成的系统, 系统根据小球之间的接触关系计算作用力, 每个小球所受的合力决定其运动轨迹. 与其他连续体数值模拟方法相比,

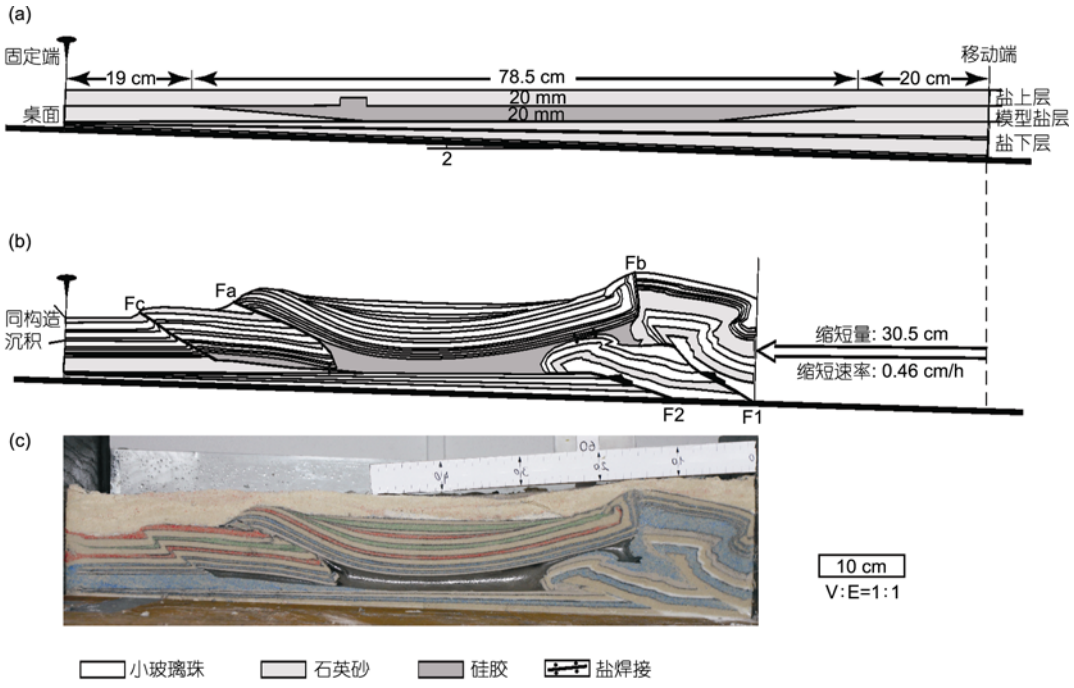


图 9　水平挤压盐构造物理模拟实验剖面

(a) 水平挤压前设计的初始剖面; (b) 水平挤压构造解释剖面; (c) 水平挤压实验剖面

离散元方法采用粒子相互作用来模拟系统的动力学机制, 允许粒子间较大相对位移, 可以很好地模拟高度形变, 所以非常适于研究存在大量间断(如断层、节理、破裂)的问题.

以离散元方法为基础, 我们构建了二维数值模型, 模拟挤压环境下盐构造的变形机理与演化过程. 模型初始长度 60 km, 厚 5.5 km(其中盐下地层 2 km, 盐岩 1.5 km, 盐上地层 2 km)(图 10(a)). 模型由约 3 万个球形单元组成, 每个单元的半径 40, 60, 80 m不等, 模型底边及右边界为固定边界, 左边界为活动边界, 左边界向右匀速推进模拟褶皱冲断带的水平挤压作用. 模型中小球单元包括两种类型, 分别模拟塑性变形的盐岩和脆性变形的围岩. 岩石强度的变化通过单元小球属性(小球密度、球间链接、接触关系)设定. 通过反复测试, 模型最终选定的盐岩材料可以较好地模拟盐岩的蠕变过程, 密度 2200 kg/m^3, 黏滞度约 10^{10} Pa·s, 围岩材料以脆性变形为主, 密度 2500 kg/m^3, 黏结强度 2~3 MPa, 内摩擦角 15°~16°. 模型的调试与运行由作者在美国Rice大学完成, 所用软件为Julia K. Moragan 教授创建的离散元模拟软件 Ricebal5.4.

模拟的结果显示, 在挤压起始阶段(水平缩短量小于 2 km)地层出现幅度很小的隆起(图 10(b)). 经历 4 km 水平缩短变形之后(图 10(c)), 地层左端产生明显的变形, 盐上层形成对称的圆弧状背斜, 盐下层形成不对称背斜, 背斜前翼陡, 发育断层, 断层向上终止于盐层. 当水平缩短量达到 8 km 时(图 10(d)), 盐上背斜幅度加大, 其顶部产生张裂; 盐下断层的断距增大, 断层右侧出现新背斜. 此时模型左侧加载约 2 km 厚的沉积层, 模拟同构造沉积作用. 同构造沉积作用导致明显的差异负载, 盐岩向负载较小的两侧流动, 形成宽广的向斜(图 10(e)), 向斜左侧盐岩几乎刺穿早先形成的背斜核部; 同构造沉积阻止向斜下伏地层破裂, 向斜内没有发现断层. 随着挤压作用的继续进行(水平缩短量 12 km), 向斜右侧相继形成两条反向断层; 盐下层变形传播距离远小于同时期的盐上地层, 盐下层变形集中于挤压端, 并在该阶段产生第三个盐下背斜(图 10(e)). 向斜前端的两条断层与褶皱为盐岩的聚集提供了有利区位, 在水平挤压及差异负载的共同作用下, 盐岩向右侧聚集, 在向斜右端形成规模较大的复杂盐背斜(图 10(f)); 同时挤压端盐下背斜的幅度增大, 三个背斜的前翼均有断层形成.

数值模拟的结果显示挤压边界条件下, 盐下层

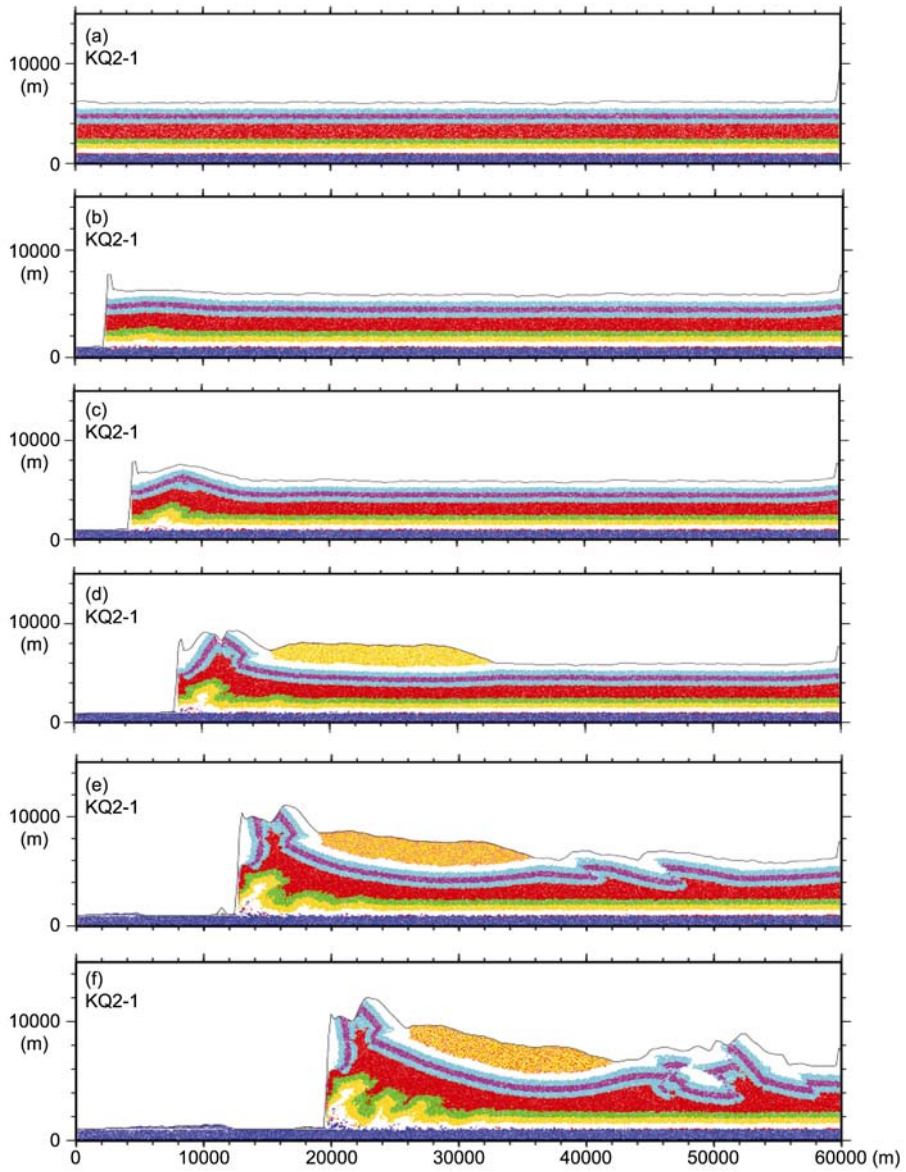


图 10　水平挤压盐构造演化离散元模拟剖面

(a) 为模型的初始阶段; (b)~(f) 分别代表水平缩短为 4, 8, 12, 19 km 时的变形特征, 模型中间红色层为盐岩层

变形传播距离远小于同时期的盐上层变形, 盐下层变形集中于挤压端, 盐上层变形传播到向斜右侧. 同构造沉积负载是形成宽阔向斜的主要原因, 在上覆重力负载作用下向斜下伏盐岩向负载较小的两侧流动, 形成宽广的向斜, 大量盐岩聚集于向斜两端, 形成盐丘. 这些构造变形特征与库车盐构造具有较好的可对比性.

3　库车坳陷盐构造演化与变形因素探讨

3.1　库车坳陷盐构造演化过程

通过盐构造解析及其同构造沉积分析, 结合物理模拟实验和离散元数值模拟的盐构造变形过程, 建立库车坳陷构造演化剖面(图 11). 根据同构造沉积地层界面将库车坳陷盐岩沉积以来发生的构造变化

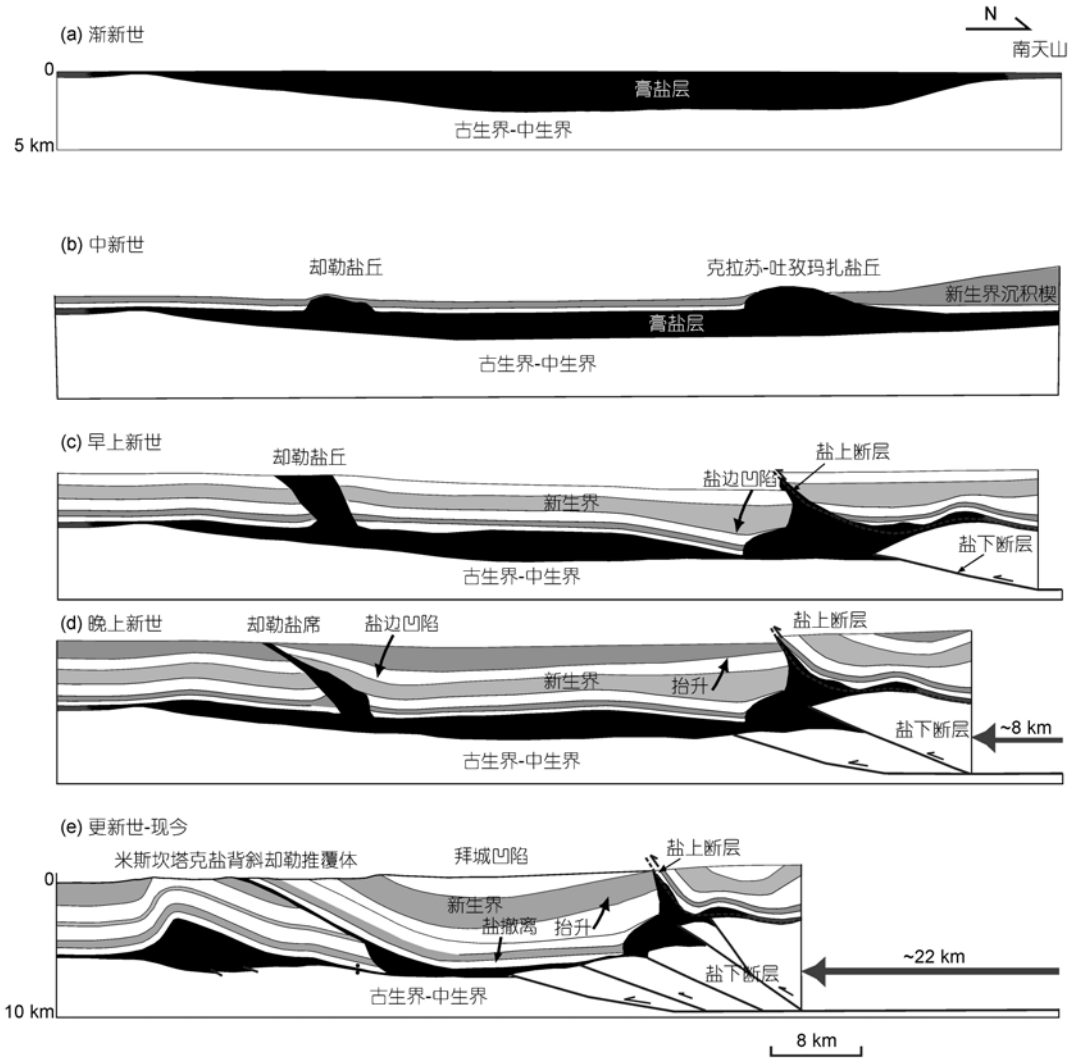


图 11　库车坳陷构造演化剖面

库车坳陷盐构造变形分为四个阶段, 详细解释见正文

分为四个阶段, 说明库车坳陷盐构造变形与盆地沉降和充填过程.

(1) 渐新世-中新世(图 11(a)). 渐新世天山开始隆升, 天山南坡接受大量沉积, 形成向盆地方向减薄的楔形沉积扇. 山前沉积差异重力负载造成库车坳陷北部盐岩向南流动[29~33], 引发盐岩的撤离和聚集, 库车坳陷两端发育盐底辟构造(喀桑托开-吐孜玛扎盐丘和却勒盐丘), 坳陷沉积的渐新世-中新世地层厚度均一, 说明这个时期库车坳陷的构造变形微弱. 由此推则, 天山早期的隆升并没有引发山前带大规模的构造变形, 主要发生盐岩塑性流变, 形成盐撤凹陷和盐底辟构造.

(2) 上新世早期(图 11(b)). 天山隆升引发的挤压构造向盆地传递, 库车坳陷北部盐上层和盐下层均发育断层, 盐下层断层造成山前带抬升, 盐上层断层沿克拉苏-吐孜玛扎盐丘北翼突破地表, 盐岩沿断层流出地表. 喀桑托开-吐孜玛扎盐丘南翼盐岩撤离, 形成盐边凹陷, 盐岩向南流动, 聚集于坳陷南端, 却勒盐丘持续发育.

(3) 上新世晚期(图 11(c)). 挤压构造向南扩展, 库车坳陷构造缩短大约 8 km, 库车坳陷北部变为隆起区, 沉降中心向南迁移至却勒盐丘北翼. 却勒盐丘受到挤压, 演化为却勒盐席推覆体, 盐丘北翼岩层逆冲到南翼岩层之上, 库车坳陷南端出现米斯坎塔克

背斜雏形.

(4) 更新世-现今(图 11(d)). 库车坳陷构造缩短量达到 20 km. 拜城下伏的盐岩撤离, 形成大型的盐撤凹陷-拜城凹陷; 盐下断层向南扩展至拜城凹陷中部(凹陷巨厚沉积岩层负载阻止盐下断层向南传播). 盐上构造向南传播的更远, 却勒盐席推覆体的断距达 16~18 km, 盐岩沿断层流出地表, 却勒盐席推覆体前端发育延伸十几公里的地表盐席. 盐岩聚积于米斯坎塔克背斜核部, 形成整合型滑脱盐背斜.

3.2 影响库车坳陷盐构造的几个因素

库车坳陷盐构造受到诸多因素的影响, 综合上述的研究认识及物理实验和数值模拟结果, 盐岩边界、区域构造应力变化、差异负载(沉积负载和局部构造负载)是影响库车坳陷盐构造的三个主要因素. 库车坳陷南缘聚集大量外来盐岩, 发育盐丘和盐背斜构造, 它们位于盆地边缘盐岩尖灭线附近, 在这些部位地层岩相和盐岩厚发生改变, 地层岩性由软弱的盐岩变成硬性的砂泥岩, 或者盐岩厚度发生明显减薄, 地层摩擦阻力将大大增加[34], 由此产生的盆地边缘末端阻力阻止盐岩流动, 使得外来盐岩聚集于盐岩尖灭线附近[35,36]. 库车坳陷南缘秋里塔格、米斯坎塔克聚集大量外来盐岩, 形成盐背斜和盐丘, 很可能受盐盆地边缘因素控制.

区域构造应力变化对库车坳陷盐构造具有重要影响. 研究发现上新世库车坳陷构造环境发生重大变化. 渐新世-中新世除构造变形限于毗邻天山的山前地带, 整个库车坳陷渐新世-中新世构造活动微弱, 盆地沉积的渐新世-中新世地层厚度均匀, 没有明显的加厚与减薄现象; 在此期间盐岩发生塑性流变, 聚集于库车坳陷南北两端, 形成吐孜玛扎盐丘、却勒盐丘、北秋里塔格盐丘, 盐上覆层重力负载是盐岩塑性流变的主要原因. 上新世库车坳陷受到强烈的挤压, 发生大规模的逆冲推覆, 吐孜玛扎盐丘、却勒盐丘被断层破坏, 盐岩被挤出地表, 这些早期形成的盐丘演变为盐席断层推覆体, 与此同时形成新的整合型盐构造-大宛齐盐枕、米斯坎塔克盐背斜、南秋里塔格盐背斜.

物理模拟实验和离散元数值模拟结果表明盐岩在挤压过程主要起到滑脱作用并充填背斜核部, 很难形成刺穿型盐底辟构造(图 9, 10)[37,38], 这与实际观察到的库车坳陷盐构造相吻合. 库车坳陷盐底辟构造形成于上新世挤压构造之前, 挤压作用改造这些盐底辟构造, 使其规模和幅度变大, 例如挤压期间北秋里塔格盐丘聚集更多的盐岩; 或者盐丘被断层破坏演变为盐席推覆体, 例如吐孜玛扎盐丘、却勒盐丘受到挤压演变为盐席逆冲断层和推覆体; 同时形成整合型盐背斜构造, 例如大宛齐盐枕、米斯坎塔克盐背斜, 但是没有发育新的盐底辟构造. 因此, 前人将库车坳陷盐底辟构造解释为挤压作用的产物[1~4,17,18], 这个认识需要修正.

库车坳陷盐上层和盐下层变形发生在挤压构造期间, 盐下层变形传播距离远小于盐上层变形. 盐下层变形集中于库车坳陷北部, 没有越过拜城凹陷, 拜城凹陷南侧盐下断层不发育, 主要发育盐上构造. 盐上构造向南传播的更远, 库车坳陷前缘亚肯背斜、南喀拉玉尔滚背斜属于盐上滑脱背斜. 盐上层与盐下层的构造形态和高点存在较大的差异, 它们没有一一对应的关系.

盐上覆差异负载(沉积负载和局部构造负载)对库车坳陷盐构造具有重要影响. 上新世挤压构造发生之前, 库车坳陷的盐岩流变是沉积差异负载造成的, 此时天山隆起, 山前沉积地层厚, 盆地腹地沉积地层薄, 产生的重力(沉积)差异负载导致山前盐岩流向盆地, 引发早期的盐底辟构造. 上新世形成的拜城凹陷也与沉积差异负载有关, 由于拜城凹陷沉积岩层厚, 盐上覆层重力负载大, 下伏盐岩流向负载较小地区, 凹陷继续下陷接受更多沉积, 这样加大了盐上覆层的重力负载, 促使凹陷下伏盐岩流出的更多, 这个过程周而复始直至凹陷下伏盐岩流尽, 出现盐上层与盐下层直接相连的盐焊接构造. 目前, 拜城凹陷下伏尚有少量盐岩, 表明拜城凹陷的下陷将会继续.

同样, 物理模拟实验和离散元数值模拟结果发现, 挤压过程中的沉积负载是形成宽阔向斜的主要原因, 在上覆重力负载作用下向斜下伏盐岩向负载较小的两侧流动, 形成宽广的向斜. 但是, 物理模拟剖面向斜两端未出现盐岩聚集的现象(图 9), 这与离散元数值模拟结果不同(图 10), 也与拜城凹陷下伏盐岩向两侧流动, 聚集于凹陷两端, 形成规模较大的秋里塔格盐背斜、吐孜玛扎-喀桑托开盐丘的情况有别(图 5, 7). 库车坳陷盐下地层变形集中在拜城凹陷以北, 凹陷以南很少发现盐下构造变形, 物理模拟实验和离散元数值模拟结果表明, 盐下构造变形发育于挤压前端, 并且逐步向前扩展, 但是盐下断层只发育

在宽广向斜的右侧, 没有越过沉积物最厚的向斜中部(图 9, 10), 凹陷巨厚的沉积负载很可能阻止盐下断层传播的更远.

秋里塔格盐背斜、吐孜玛扎-喀桑托开盐丘聚集大量盐岩, 被归结为早期发育的基底断层和断陷盆地[2~4]. 依据这个思路我们设计了发育基底断层和断陷盆地的物理模拟和离散元数值模拟实验, 结果发现基底断层和基底断陷盆地是优先发育逆冲断层的部位, 但是这些部位并没有大量盐岩聚集(详细资料另文叙述). 因此, 不能简单地将盐岩聚集归结为下伏发育基底断层和断陷盆地.

4 结论

塔里木盆地北缘库车坳陷发育三层结构(盐上层、盐岩、盐下层)的挤压冲断型盐构造. 盐上层逆冲断层和褶皱位于库车坳陷南北两端, 坳陷中部形成开阔向斜(拜城凹陷); 盐岩在挤压过程中起到滑脱层作用, 并且聚集于拜城凹陷两端, 形成秋里塔格、吐孜玛扎、喀桑托开盐背斜(丘)构造; 盐下断层集中于天山山前, 并且逐步向前扩展, 通常盐下断层向上消失于盐层中, 拜城凹陷南侧很少发现盐下断层, 很可能凹陷巨厚的沉积负载阻止盐下断层向南传播. 盐上层与盐下层的构造形态和高点存在较大的差异, 它们没有一一对应的关系, 盐上构造比盐下构造传播的更远.

库车坳陷盐构造分为两个阶段: 渐新世-中新世库车坳陷构造活动微弱, 由于天山隆起, 山前沉积地层厚, 盆地腹地沉积地层薄, 产生的重力(沉积)差异负载导致山前盐岩发生塑性流变, 聚集于库车坳陷南北两端, 形成刺穿型盐底辟构造. 上新世库车坳陷受到强烈挤压, 发生大规模逆冲推覆, 早期的盐底辟构造演变为盐席断层推覆体, 盐岩在挤压过程作为滑脱层, 并充填于背斜核部, 形成大型盐撤凹陷、外来盐席和盐背斜.

影响库车坳陷盐构造的因素很多, 综合盐构造地质及地震分析、物理实验和数值模拟研究结果, 盐岩边界、区域构造应力变化、差异负载(沉积负载和局部构造负载)是影响库车坳陷盐构造的三个主要因素.

致谢 中国石油塔里木油田分公司同仁提供帮助, 物理模拟在法国 Universit é des Sciences et Technologies de Lille 1 完成, 数值模拟在 Rice University 完成, Julia K. Morgan 教授提供数值模拟程序及指导, Bruno Vendeville 教授在物理模拟实验方面给予指导, 两位匿名审稿专家提出宝贵修改意见, 一并致以谢意.

参考文献

1 汤良杰, 贾承造, 皮学军, 等. 库车前陆褶皱带盐相关构造样式. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 38—46
2 汤良杰, 李京昌, 余一欣, 等. 库车前陆褶皱-冲断带盐构造差异变形和分段性特征探讨. 地质学报, 2006, 80: 313—320
3 Chen S P, Tang L J, Jin Z J, et al. Trust and fold tectonics and the role of evaporates in deformation in the western Kuqa foreland of Tarim Basin, northwest China. Mar Petrol Geol, 2004, 21: 1027—1042
4 余一欣. 库车坳陷秋里塔格构造带盐相关构造及其形成机理. 博士学位论文. 北京: 中国石油大学, 2006. 1—101
5 汪新, 唐鹏程, 谢会文, 等. 库车坳陷西段新生代盐构造特征及演化. 大地构造与成矿学, 2009, 33: 57—65
6 Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects on a continental collision. Science, 1975, 189: 419—426
7 Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia and Baykal regions. J Geophys Res, 1979, 84: 3425—3459
8 Hendrix M S, Dumitru T A, Graham S A. Late Oligocene-early Miocene unroofing in the Chinese Tian Shan: An early effect of the India-Asia collision. Geology, 1994, 22: 487—490
9 Sobel R E, Dumitru T A. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim Basin during the India-Asia collision. J Geophys Res, 1997, 102: 5043—5063
10 Sobel E R, Chen J, Heermance R V. Late Oligocene-Early Miocene initiation of shortening in the Southwestern Chinese Tian Shan implications for Neogene shortening rate variations. Earth Planet Sci Lett, 2006, 247: 70—81
11 Allen M B, Windley B F, Zhang C, et al. Basin evolution within and adjacent to the Tien Shan range, NW China. J Geol Soc Lond, 1991, 148: 369—378

12 Avouac J P, Tapponnier P, Bai M. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and late Cenozoic ratation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. J Geophys Res, 1993, 98: 6755—6804
13 Yin A, Nie S, Craig P, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. Tectonics, 1998, 17: 1—27
14 卢华复, 贾东, 陈楚铭, 等. 库车新生代构造性质和变形时间. 地学前缘, 1999, 6: 215—221
15 卢华复, 贾承造, 贾东, 等. 库车再生前陆盆地冲断构造楔特征. 高校地质学报, 2001, 7: 257—271
16 汪新, 贾承造, 杨树锋, 等. 南天山库车冲断褶皱带构造变形时间——以库车河地区为例. 地质学报, 2002, 76: 55—63
17 Wang X, Suppe J, Guan S W, et al. Cenozoic structure and tectonic evolution of the Kuqa fold belt, southern Tianshan, China. In: McClay K, Shaw J, Suppe J, eds. Thrust Fault-related Folding. AAPG Memoir 94, in press
18 邬光辉, 刘玉魁, 罗俊成, 等. 库车前陆冲断褶皱带盐构造特征及其对油气成藏的作用. 地球学报, 2003, 24: 249—254
19 邬光辉, 王招明, 刘玉魁, 等. 塔里木盆地库车盐构造运动学特征. 地质评论, 2004, 50: 476—483
20 Huang B C, Piper J D A, Peng S T, et al. Magnetostratigraphic and rock magnetic constraints on the history of Cenozoic uplift of the Chinese Tian Shan. Earth Planet Sci Lett, 2006, 251: 346—364
21 Sun J M, Li Y, Zhang Z Q, et al. Magnetostratigraphic data on Neogene growth folding in the foreland basin of the southern Tianshan Mountains. Geology, 2009, 37: 1051–1054, doi: 10.1130/G30278A.1
22 Jackson M P A, Talbot C J. A glossary of salt tectonics. Geological Circular. The University of Texas at Austin. Bureau of Economic Geology, 1991. 1—44
23 李世琴. 南天山库车中-西段挤压盐构造及同构造沉积地层研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2009. 1—142
24 Schellart W P. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: Scaling implications for their usage in analogue modelling. Tectonophysics, 2000, 324: 1—16
25 Schreurs G, Buiter S H, Boutelier D, et al. Analogue benchmarks of shortening and extension experiments. In: Buiter S J H, Schreurs G, eds. Analogue and Numerical Modeling of Crustal-Scale Processes. Geol Soc London-Spec Publ, 2006, 253: 1—27
26 Weijermars R, Jackson M P A, Vendeville B C. Rheological and tectonic modeling of salt provinces. Tectonophysics, 1993, 217: 143—174
27 Hudec M R, Jackson M P A. Terra infirma: Understanding salt tectonics. Earth-Sci Rev, 2007, 82: 1—28
28 Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique, 1979, 29: 47—65
29 Ge H X, Jackson M P A, Vendeville B C. Kinematics and dynamics of salt tectonics driven by progradation. AAPG Bull, 1997, 81: 398—423
30 Ge H X, Jackson M P A, Vendeville B C, et al. Deformation of prograding wedges over a ductile layer——Applications of physical models to geologic examples. Gulf Coast Assoc Geol Soc Trans, 1997, XLVII: 177—183
31 Gemmer L, Ings S J, Medvedev S, et al. Salt tectonics driven by differential sediment loading: Stability analysis and finite-element experiments. Basin Res, 2004, 16: 199—218
32 Gemmer L, Beaumont C, Ings S J. Dynamic modelling of passive margin salt tectonics: Effects of water loading, sediment properties and sedimentation patterns. Basin Res, 2005, 17: 383—402
33 Vendeville B C. Salt tectonics driven by sediment progradation: Part I——Mechanics and kinematics. AAPG Bull, 2005, 89: 1071—1079
34 Dooley T P, Jackson M P A, Hudec M R. Inflation and growth of salt-based thrust belts on passive margins: Results from physical models. Basin Res, 2007, 19: 165—177, doi: 10.1111/j.1365-2117.2007.00317.x
35 Costa E, Vendeville B C. Experimental insights on the geometry and kinematics of fold-and-thrust belts above weak, viscous evaporitic decollement. J Struct Geol, 2002, 24: 1729—1739
36 Dooley T P, Jackson M P A, Hudec M R. Inflation and deflation of deeply buried salt stocks during lateral shortening. J Struct Geol, 2009, doi: 10.1016/j.jsg.2009.03.013
37 Duerto L, McClay K. The role of syntectonic sedimentation in the evolution of doubly vergent thrust wedges and foreland folds. Mar Petrol Geol, 2009, 26: 1051—1069
38 戈红星, Bruno V, Martin J. 前陆褶皱冲断带厚皮缩短盐构造运动的物理模拟. 高校地质学报, 2004, 10: 39—49