库车坳陷西段的逆冲推覆距离研究

金文正[1,2)]，汤良杰[1,2)]，王清华[3)]，余一欣[1,2)]，万桂梅[1,2)]，杨文静[3)]，彭更新[3)]，雷刚林[3)]

1）中国石油大学盆地与油藏研究中心，北京，102249；2）石油与天然气成藏机理教育部重点实验室，中国石油大学，北京，102249；3）中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院，新疆库尔勒，841000

内容提要：库车坳陷西段地区发育有巨厚膏盐层，喜马拉雅山末期构造运动使天山造山带大幅度向南挤压，造成大量盐体在库车前陆褶皱冲断带前缘被逆冲推覆至地表，地层并发生强烈的褶皱和逆冲推覆，所以在计算该区域地层向南推覆的总距离时，不仅要考虑平衡剖面技术所恢复出地层横剖面上的缩短量，另外还要考虑由于膏盐层塑性流动所造成上盘推覆体向南的滑移距离，本文综合利用平衡剖面技术和物理模拟实验方法求取了该研究区域的地层缩短量(24.5 km)及上盘推覆体向南的滑移距离(3.969～14.727 km)，从而计算出库车坳陷西段的逆冲推覆距离为18.5～39.227 km。

关键词：库车坳陷；盐岩层；冲推覆；平衡剖面；溶解物理模拟

1 地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北部，发育有两套膏盐层，古近系库姆格列木群和新近系吉迪克组膏盐层，其中库姆格列木群膏盐层厚约110～3000 m(汤良杰等，2003a；陈书平等，2000，2004；许建新等，2006)，主要分布在库车坳陷西段—库车—康村一线以西地区，新近系吉迪克组膏盐层分布在该线以东地区。喜马拉雅晚期(1.64 Ma)强烈的造山运动产生由北向南的挤压力(张朝军等，1998；汪新等，2002；邬光晖等，2004；曾联波等，2004)，库姆格列木群膏盐层在挤压过程中起到了滑脱面的作用(王子煜，2002；管树巍等，2003；邬光辉等，2003；陈书平等，2004；曾联波，2004；杨明慧等，2006)，造成大量的盐体被推覆至地表(图1、2)，并使得其上地层向南发生逆冲推覆(胡剑风等，2004；汤良杰等，2003b，2004a，2004b)，遭受大气降水的溶解，所以在计算天山造山带向南推覆距离时，一方面要考虑由平衡剖面所得出的缩短量(汤良杰等，2006)，另一方面还应加上膏盐层由于其塑性流动而出露于地表的总高度。本文一方面通过对采集于该区域出露地表的膏盐层样品进行溶解物理模拟实验，从而估算出第四纪以来被大气降水溶解掉的逆冲推覆盐体的量，同时从该角度来确定库车坳陷盐上地层向南的滑移距离；另一方面通过对两条南北向横穿研究区的地质剖面进行横剖面恢复，计算出该研究区的地层缩短量，二者之和即为逆冲推覆距离。

2 物理模拟实验

2.1 实验模型

本次实验是在中国石油大学(北京)石油与天然气成藏机理教育部重点实验室完成的。对于物理模拟而言，模型与自然界模型的相似程度是很重要的。针对本次实验，降雨量的模拟很重要。普遍认为，该区域的年平均降雨量在60 mm左右(管海晏等，1997)。实验装置见图3，利用喷淋装置模拟降雨，利用其下方的量筒来计量降雨量的大小，利用进水口的进水阀门控制降雨的强度。在实验中，将盐体样品按照采集时的方位放好，尽量做到能够反映实际情况。

2.2 实验数据

本次实验共进行了12组，其中杂盐10组，纯盐2组。由于盐体样品分别采集于研究区内不同位置，具有一定的代表性，其岩性、密度等物理性质有着一定的差别，所以在实验数据的记录和处理中未

注：本文为国家自然科学基金项目(编号40672143、40472107、40172076)、国家"973"计划项目(编号2005CB422107、G1999043305)、中国石油塔里木油田分公司研究项目(编号41004050009)联合资助成果。

收稿日期：2006-12-14；改回日期：2007-01-10；责任编辑：周健。

作者简介：金文正，男，1978年生。中国石油大学(北京)在读博士研究生，主要从事石油地质和含油气盆地研究。通讯地址：102249，北京市昌平区，中国石油大学(北京)盆地与油藏研究中心；电话：010－89733405；Email：jwz20@163.com。

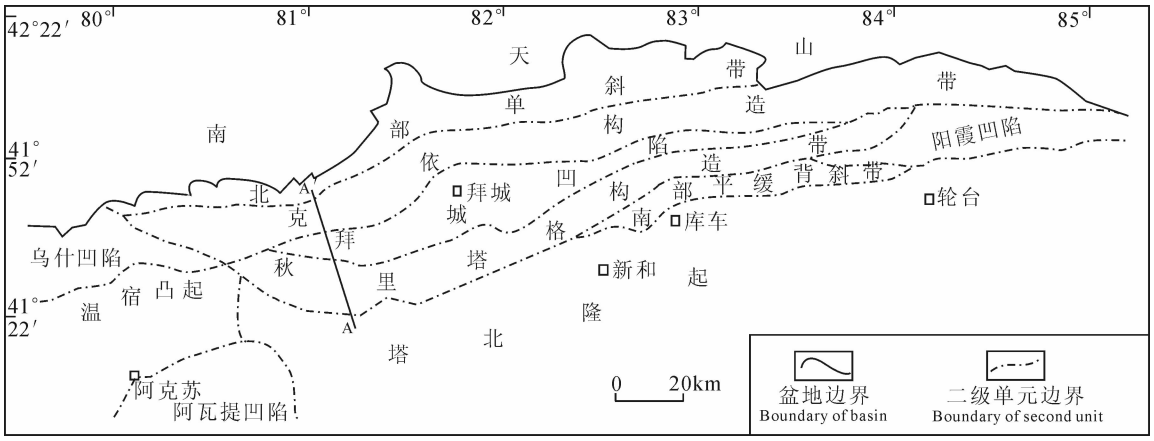

图 1 库车坳陷西段构造单元划分示意图(图中 AA′代表 S83-120+QL03-112+BC99-113 测线)

Fig. 1 The sketch map of the tectonic units in the west part of the Kuqa depression
(Line ′AA is S83-120+QL03-112+BC99-113 seismic section)

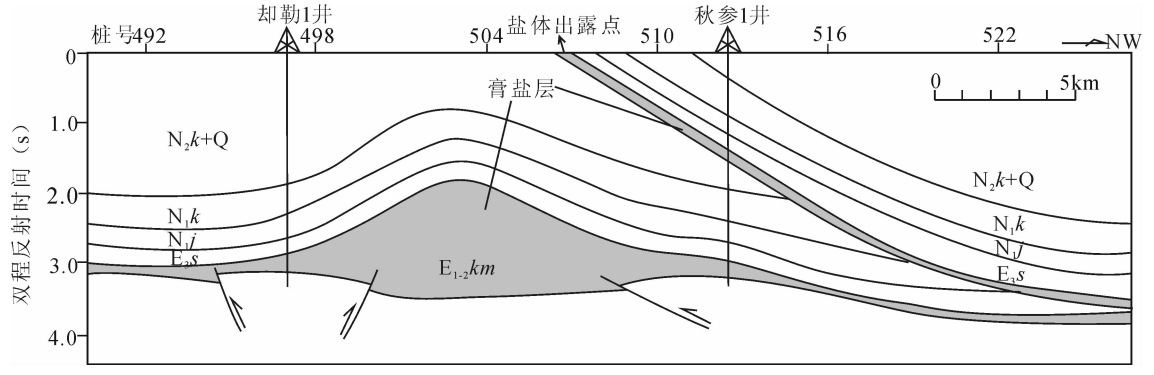

图 2 库车坳陷西段新近系盐体出露示意图(以 QL03-112 测线为例)

Fig. 2 The sketch map of the Eogene salt appeared in the west part of the Kuqa depression
(take QL03-112 seismic section as an example)

将其算术平均,而是分样品进行单独记录和分析处理。具体实验数据如表 1。

2.3 实验数据分析

(1) 盐体样品的溶解体积:由表 1 的实验数据得出各盐体样品所溶解掉的体积,计算公式为:溶解体积(cm^3)=溶解掉的质量(g)÷盐体的密度(g/cm^3),计算结果见表 2 中的 A 行。

(2) 年溶解厚度(即溶解速率):由表 1 数据求出各盐体样品所溶解掉的厚度,该厚度可以近似地认为是该地区每年溶解掉的厚度,即该地区盐体的年溶解速率:年溶解厚度(cm)=溶解体积(cm^3)÷受水表面积(cm^2),计算结果见表 2 中的 B 行。

(3) 第四纪以来出露盐体溶解总厚度:大型逆冲推覆作用发生在第四纪(1.64Ma)以来,由年溶解

表 1 实验数据

Table 1 Experimental datum

实验编号	密度(g/cm^3)	溶解前质量(g)	溶解后质量(g)	溶解掉的质量(g)	表面积(cm^2)	受水表面积(cm^2)	溶解时间(min)
1	1.905	181.5	96	85.5	102	36	10
2(纯盐)	2.125	139	90.5	48.5	84	18	11
3	2.013	458.5	231	227.5	208	80	21
4	1.899	536.5	403.5	133	248	49	11
5	2.167	391	196.5	194.5	100	35	10
6	2.13	290	154.5	135.5	110	45	10
7	2.026	299	187	112	128	40	10
8	1.98	443.5	272	171.5	110	40	12
9	2.155	543.5	208.5	335	220	96	10
10(纯盐)	2.160	811	630.5	180.5	345	91	10
11	2.038	741.5	600.5	141	285	60	15
12	2.022	334	251	83	95	42	6

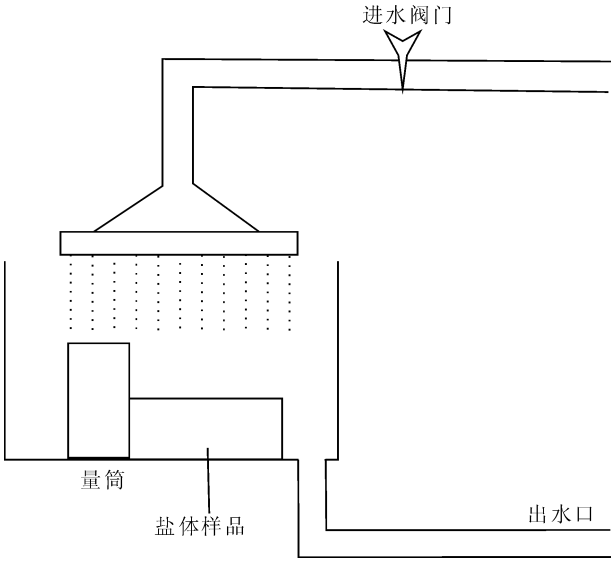

图 3　实验装置示意图

Fig. 3　Sketch figure of experimental apparatus

厚度可以得出第四纪以来盐岩层溶解总厚度:出露盐体溶解总厚度($\times10^3$ m)=年溶解厚度($\times10^{-2}$ m/a)$\times$1.64$\times10^3$(a),计算结果见表 2 中的 C 行。

由以上数据得知,第四纪(1.64 Ma)以来库车前陆褶皱冲断带盐推覆构造前缘盐岩层在逆冲推覆至地表的同时,遭受大气降水的溶解,被溶解的盐岩层厚度可达 3.969～14.727 km,即 3.969～14.727 km 逆冲推覆距离的盐岩层被溶解掉。

2.4　实验误差分析

(1)实验中采用自来水模拟大气降水,而自来水与天然雨水所含成分的区别可能对盐体溶解速率有一定的影响。

(2)实验中的测量面积和称重也存在一些不可避免的误差。

(3)实验中并未考虑实际坡度,气温等自然条件。

表 2　实验数据的计算结果

Table 2　The calculated result of the experimental datum

编号	1	2(纯盐)	3	4	5	6	7	8	9	10(纯盐)	11	12
A	44.88	22.82	113.02	70.04	89.76	63.62	55.28	86.62	155.45	83.56	69.19	41.05
B	0.440	0.272	0.543	0.282	0.898	0.578	0.432	0.787	0.707	0.242	0.243	0.432
C	7.216	4.456	8.911	4.631	14.72	9.484	7.083	12.914	11.588	3.972	3.981	7.086

注:上表中行 A、B、C 依次表示为溶解体积(cm^3)、溶解速率(cm/a)、出露盐体溶解总厚度($\times10^3$ m)。

(4)盐体样品的选取数量少,可能未能够代表该地区整体岩性分布,因为盐体的纯度不同则溶解速率也不同。实验中发现杂盐的各项溶解指标在总体上要比纯盐的高,这可能是因为在杂盐区域,雨水在冲刷溶解盐体中膏盐的同时,使得盐层中的泥、砂、砾等杂质发生滑脱和坍塌,随着水流发生位移,离开其原始位置,虽然这些杂质并未发生溶解,但从区域范围上看,它们的存在加速了盐层的溶解速率。

(5)此次实验所取得的数据结果区间跨度较大,这个可能是由于所采样品位置的差异。有学者(Christopher et al., 1997)利用数字模拟技术模拟了一个顶部正遭受溶解的塑性涌出体的形态和尺寸,实验结果表明了地表盐体的溶解速率与盐从盐口涌出的速率有关,那么针对于库车坳陷西段而言,不同膏盐层的出露点的涌出速度不同,当然也就造成了地表盐体溶解速率的差异。

3　剖面复原过程和结果分析

3.1　盐构造平衡剖面制作方法

本文的研究区域发育有膏盐层,盐体容易发生塑性流动,其结果不符合制作平衡剖面所要求的"二维面积平衡"原则。Rowan(1993)和 Bishop 等(1995)都研究过盐构造区平衡剖面的制作方法,基本思路是将盐上层、盐下层分别复原,然后将其合并,盐上层的下界面与盐下层的上界面之间的空缺就是盐层,因此在复原过程中可先不考虑盐体的流动。盐下层位置的确定是通过计算均衡调整量得到的。

在上述研究基础上,Buchanan 等(1996)将此方法改进,使用一种去压实和均衡调整的复原盐构造剖面的方法(图 4):以一个深度转换剖面开始(图 4A),将其回剥至水平面以下,然后参照其作恢复(图 4B)。一旦盖层被拿掉,剩下的部分欠压实,就会从基底向上扩张,所以在回剥过程中,去掉上覆盖层时,整个剖面应该均衡反弹相应的量,整个剖面从水平的基底向上抬升,这就是均衡校正(图 4C)。依照 Rowan 的观点,沿着剖面的顶部可以划一条光滑的曲线,这个曲线与恢复期间看起来相对稳定的断块相连,同样没有受到盐运动的影响(图 4C),这条曲线是一条倾斜线或是一条水平线,代表古水深的

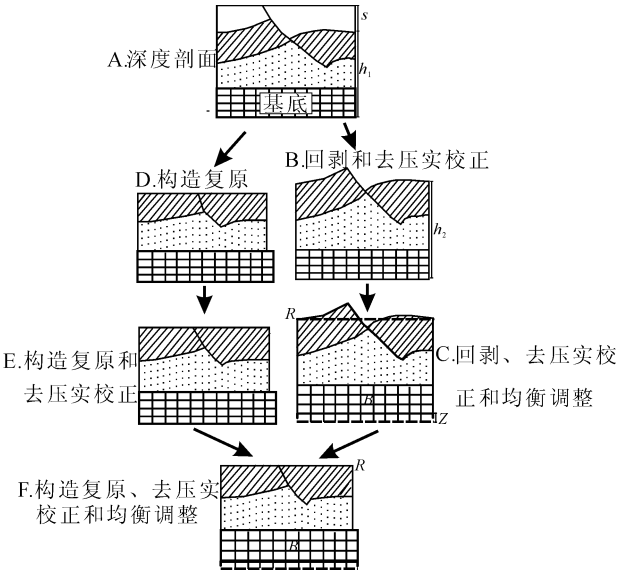

图 4 含盐剖面的恢复方法(据 Buchanan 等, 1996)

Fig. 4 The steps of recovering the salt structural section (after Buchanan et al., 1996)

h_1—盐及以前剖面的原始厚度; h_2—去压实厚度; s—移去的上覆层; Z—均衡响应; R—区域基准面; B—基线

h_1—Original thickness of supra-salt section; h_2—decompacted thickness; s—removed overburden; Z—isostatic response; R—regional; B—baseline

剖面。因为剖面可以恢复到"区域"线而不是任意的水平线。第二个独立的步骤首先要恢复构造剖面(图 4D),然后去压实(图 4E)。应用计算的区域剖面作参考,真正去压实的剖面可以转换为均衡补偿剖面(图 4F)。

3.2 剖面复原过程和结果分析

利用上面的方法,对地震剖面(测线号是 S83-120+QL03-112+BC99-113)编制了平衡剖面(图 5),该测线为一条地质结构大剖面,从南向北依次通过却勒 101、却勒 1、却勒 6 和秋参 1 等钻井。盐上地层在羊塔克地区较为平缓,变形作用很微弱。却勒地区主要发育低幅度的盐核背斜和逆冲推覆构造。天山山前发育大量逆冲断裂带。第四纪的强烈挤压作用促使盐上地层在却勒地区发生远距离的逆冲推覆,并将盐层推露出地表。但盐下地层的强烈褶皱变形作用主要发生在山前地区,形成叠瓦冲断带。库姆格列木组含盐层系作为滑脱层在这个差异变形过程中起到了调节作用。

由上面的平衡剖面得知,该测线的现今长度是 85 km,原始长度是 109.5 km,由于天山造山带的向南挤压使其缩短了 24.5 km,缩短率达 22.4%,在各个不同地质历史时期中第四纪期间地层发生的缩短量最大,为 14.5 km(表 3)。另外,利用同样的方法,对位于库车坳陷西段的测线 S89-80+BC99-171+ BC00-170 和测线 QL99-199+BC95-198.5 进行了构造演化恢复,其缩短量分别为18.5 km 和 34 km[1]。

表 3 测线缩短量及缩短率

Table 3 The shortening amount of the profile line and the ratio of the shortening

测线号	现今长度 (km)	原长 (km)	缩短长度 (km)	缩短率 (%)
S83-120+QL03-112+BC99-113	85	109.5	24.5	22.4
S89-80+BC99-171+BC00-170	91.5	110	18.5	16.8
QL99-199+BC95-198.5	69	103	34	33

4 结论

在测线 S83-120+QL03-112+BC99-113 上,盐体出露地表并发生溶解,所以根据平衡剖面和溶解试验的结果可以得出,该剖面所在的地区从早古生代奥陶纪以来,由于北部天山造山带的向南挤压作用,位于逆冲推覆体上盘的地层共向南推覆了 28.469~39.227 km。但是在测线 S89-80+BC99-171+ BC00-170 和测线 QL99-199+BC95-198.5 上并没有盐体出露,盐体并未受到大气降水的溶解作用,这两条测线的构造演化剖面上的缩短量分别为 18.5 km 和 34 km。所以综合以上的结果,可以得出,在库车坳陷西段,由于造山带的挤压,逆冲推覆体上盘的地层共向南推覆了 18.5~39.227 km。

致谢:特别感谢中国地质大学(北京)刘和甫教授和中国石油大学(北京)曾联波副教授对本文所提出的宝贵意见和建议,在此一并表示感谢。

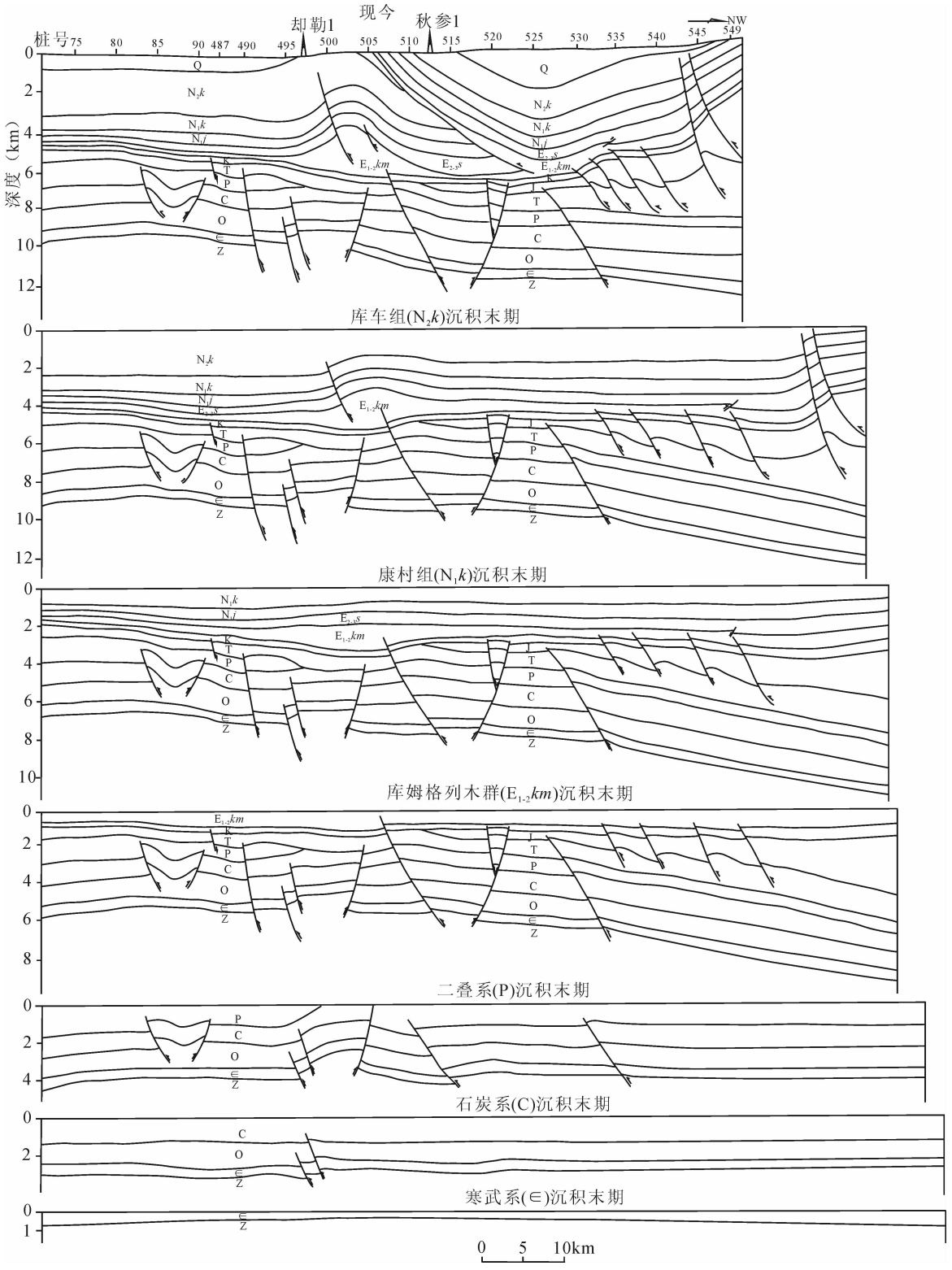

图 5　测线 S83-120＋QL03-112＋BC99-113 构造演化剖面(位置见图 1 AA′)

Fig. 5　Tectonic evolution of S83-120＋QL03-112＋BC99-113 seismic section (location is AA′ in Fig. 1)

注　释

❶ 雷刚林，汤良杰，马玉杰，等. 2005. 却勒西秋地区构造形成机制与构造建模研究. 中国石油大学(北京)与塔里木油田分公司合作项目科研报告.

参 考 文 献

陈书平，汤良杰，贾承造，等. 2000. 库车坳陷西段第三系盐上层基底沉降分析. 西南石油学院学报，26(1)：5～8.

陈书平，汤良杰，贾承造，等. 2004. 库车坳陷西段盐构造及其与油气的关系. 石油学报，25(1)：30～39.

管海晏，王学佑，袁宏仕，等. 1997. 塔里木盆地遥感地质. 北京：地质出版社，1～20.

管树巍，陈宁华，徐峰，雷刚林，2003. 库车坳陷秋里塔格褶皱带几何学和运动学特征与油气圈闭. 石油学报，24(6)：30～34.

胡剑风，刘玉魁，杨明慧，等. 2004. 塔里木盆地库车坳陷盐构造特征及其与油气的关系. 地质科学，39(4)：580～588.

汤良杰，贾承造，皮学军，等. 2003a. 库车前陆褶皱带盐相关构造样式. 中国科学(D辑)，33(1)：38～46.

汤良杰，贾承造，金之钧，等. 2003b. 塔里木盆地库车前陆褶皱带中段盐相关构造特征与油气聚集. 地质论评，49(5)：501～506.

汤良杰，金之钧，贾承造，等. 2004a. 库车前陆褶皱—冲断带前缘大型盐推覆构造. 地质学报，78(1)：17～25.

汤良杰，金之钧，贾承造，等. 2004b. 塔里木盆地多期盐构造与油气聚集. 中国科学(D辑)，34(增刊1)：89～97.

汤良杰，李京昌，余一欣，等. 2006. 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，80(3)：313～320.

汪新，贾承造，杨树锋，等. 2002. 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，76(1)：55～63.

王子煜. 2002. 库车坳陷秋立塔克盐构造形成过程物理模拟. 西安石油学院学报(自然科学版)，17(6)：1～8.

邬光辉，刘玉魁，罗俊成，等. 2003. 库车坳陷盐构造特征及其对油气成藏的作用. 地球学报，2(3)：249～254.

邬光辉，王招明，刘玉魁，等. 2004. 塔里木盆地库车坳陷盐构造运动学特征. 地质论评，50(5)：476～483.

许建新，马海州，杨来生，等. 2006. 库车盆地古近纪和新近纪构造环境与蒸发岩沉积. 地质学报，80(2)：228～234.

杨明慧，金之均，吕修祥，等. 2006. 库车褶皱冲断带东秋里塔格位移转换及其演化—兼论侧断坡相关背斜构造圈闭的形成. 地质学报，80(3)：321～328.

曾联波. 2004. 库车前陆盆地喜马拉雅运动特征及其油气地质意义. 石油与天然气地质，25(2)：175～179.

曾联波，周天伟，吕修祥. 2004. 构造挤压对库车坳陷异常地层压力的影响. 地质论评，50(5)：471～475.

张朝军，田在艺. 1998. 塔里木盆地库车坳陷第三系盐构造与油气. 石油学报，19(1)：6～10.

Bishop D J, Buchanan P G, Bishop C J. 1995. Gravity-driven thinskinned extension above Zechstein Group evaporites in the Western North Sea: an application of computer-aided section restoration techniques. Marine and Petroleum Geology, 12: 115～135.

Buchanan P G, Bishop D J, Hood D N. 1996. Development of saltrelated structures in the Central North Sea: Results from section balancing. Salt tectonics, London: The Geological Society, 111～128.

Christopher J Talbot, Sergei Medvedev, Mehdi Alavi, et al. 2000. Salt Extrusion at Kuhe-Jahani, Iran, from June 1994 to November 1997. Salt, Shale and Igneous Diapirs in and around Europe. Geological Society of London, Special Publication 174, 93～110.

Rowan M G. 1993. A systematic technique for the sequential restoration of salt structures. Tectonophysics, 228: 331～348.

Displacement of a Thrust in the Western Kuqa Depression

JIN Wenzheng[1,2], TANG Liangjie[1,2], WANG Qinghua[3], YU Yixin[1,2], WAN Guimei[1,2], YANG Wenjing[3], PENG Gengxin[3], LEI Ganglin[3]

1) *Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing*, 102249

2) *Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Education, Beijing*, 102249

3) *Research Institute of Petroleum Exploration and Development of Tarim Oil field, Korla, Xinjiang*, 841000

Abstract

There is a thick salt layer in the western Kuqa Depression. The tectonic activities during the late Himalayan made the Tianshan orogeny advance southward and the salt body in the front edge of the Kuqa foreland fold-thrust belt emerged to the earth's surface. Tense folding and thrusting happened to the stratum of this place. So, the calculation of the distance that regional geological bodies moved southward should refer not only to the amount calculated from the balanced-section technique, but also the sliding distance of the upper body as a result of the plastic feature of the salt layer. Through both methods of balanced-section technique and physical modeling, the amount of the stratum's shortening (24.5 km) and the southward sliding distance (3.969～14.727 km) of the upper body are worked out, and then we know the displacement of the thrust (18.5～39.227 km) in the western Kuqa Depression.

Key words: Kuqa Depression; salt layer; thrust; the balanced-section; solution modeling