

doi: 10.12029/gc20170112

王洪浩, 李江海, 潘相茹, 毛翔, 黄少英, 能源. 2017. 库车前陆冲断带西部却勒盐推覆体变形特征分析[J]. 中国地质, 44(1): 177-187.

Wang Honghao, Li Jianghai, Pan Xiangru, Mao Xiang, Huang Shaoying, Neng Yuan. 2017. An analysis of the deformation characteristics of the Quele salt nappe in the western Kuqa foreland thrust belt[J]. Geology in China, 44(1): 177-187(in Chinese with English abstract).

库车前陆冲断带西部却勒盐推覆体变形特征分析

王洪浩¹ 李江海¹ 潘相茹¹ 毛翔² 黄少英³ 能源³

(1.造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2.中国石化集团新星石油有限责任公司
新能源研究院, 北京 100083; 3.中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:库车前陆冲断带西部发育中国最好的地表盐构造, 可作为盐构造研究的天然实验室。前人对本区盐构造的研究主要集中于地下, 包括地下盐构造样式的识别、地下盐构造分段性研究及盐构造形成机制研究等, 而对于地表盐构造的研究相对较少。文章在前人研究的基础上, 通过详细的野外填图, 并辅以地震解释、遥感解译等方法, 对库车前陆冲断带西部却勒盐推覆体变形特征进行分析, 认为却勒盐推覆体的发育受控于却勒逆冲断层, 库姆格列木群盐岩随逆冲断层出露地表。盐推覆体在东西向上构造差异较大, 具有明显的分段性, 在推覆体的中、西部, 推覆体上盘地层发育齐全, 盐岩仅沿推覆体逆冲前缘出露地表, 属于典型的露趾增生型盐席; 而在推覆体东部的察尔汗盐席处, 盐上地层被剥蚀, 盐岩出露地表后在重力的驱动下向周缘流动, 属于溢流增生型盐席。察尔汗盐席受地表径流和降水作用影响明显, 发育大量溶洞和盐山构造, 并以“脉动流”的形式向前增生。盐内能干层的变形特征是反映盐岩流动性强弱的指标, 盐推覆体东部察尔汗盐席盐内能干层变形样式更复杂, 盐岩的流变性更强。缺少厚层顶板的限制和受降水及地表径流的充分影响是察尔汗盐席盐岩流变性较强的原因。

关键词:库车前陆冲断带; 却勒盐推覆体; 察尔汗盐席; 分段性; 变形特征

中图分类号: P542.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)01-0177-11

An analysis of the deformation characteristics of the Quele salt nappe in the western Kuqa foreland thrust belt

WANG Honghao¹, LI Jianghai¹, PAN Xiangru¹, MAO Xiang²,
HUANG Shaoying³, NENG Yuan³

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. SINOPEC Star Petroleum Co., Ltd. (Sinopec Star), New Energy Researching Institute, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang, 841000, China)

Abstract: The western Kuqa foreland thrust belt hosts the best surface salt structures in China, and hence can be regarded as a natural laboratory for salt structure research. Previous researches have been mainly focused on the underground salt structures, such as the identification of the underground salt structures, the segmentation of the underground salt structures and the formation

收稿日期: 2016-01-08; 改回日期: 2016-04-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973计划”项目(2009CB219302)及中国地质调查局项目(DD20160175-1-1)联合资助。

作者简介: 王洪浩, 男, 1989年生, 博士生, 构造地质学专业, 主要从事盐构造相关研究; E-mail: whhpeking@163.com。

mechanism of the salt structures, while the researches on the surface salt structures in this region are relatively less. Based on previous researches, the authors used the methods of field mapping, seismic interpretation and remote sensing images interpretation to analyze the deformation characteristics of the Quele salt nappe in the western Kuqa foreland thrust belt. The development of the Quele salt nappe was controlled by the Quele thrust fault, and the salt rock of Kumugeliemu Group rose to the surface with the thrust fault. The Quele salt nappe is characterized by segmentation, and the deformation characteristics change from west to east. In the western and central part of the Quele salt nappe, the overburden of the salt is intact, and the salt rose to the surface only along the thrust frontier of the nappe. The salt structure pattern of the western and central part of the Quele salt nappe belongs to "open-toed advance salt sheet". Nevertheless, in the eastern part of the Quele salt nappe which is also called Charerhan Namakier, the overburden of the salt was eroded and the salt was driven to flow downward by gravity after the migration of the salt to the surface. The Charerhan Namakier belongs to "extrusive advance salt sheet". The topography of the Charerhan Namakier has been strongly affected by the surface runoff and rainfall, which has caused a lot of karst caves and salt hills to form at the surface of the Charerhan Namakier. Heavy rainfall could affect the advance way of the namakier, making the Namakier advance as "surging flow". The deformation characteristics of the competent interlayers can reflect the rheological strength of the salt. The deformation patterns of the competent layers inside the Charerhan Namakier are more complicated, indicating that the salt in the Charerhan Namakier has experienced stronger rheology, resulting from the lack of limit of the overburden and the full effect from the surface runoff and rainfall.

Key words: Kuqa foreland thrust belt; Quele salt nappe; Charerhan Namakier; segmentation; deformation characteristics

About the first author: WANG Honghao, male, born in 1989, doctor candidate, majors in structural geology; E-mail: whhpeking@163.com.

Fund support: Supported by National Key Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2009CB219302) and China Geological Survey Program (No. DD20160175-1-1).

1 引 言

盐构造是指由于盐岩或其他蒸发岩的流动变形所形成的地质变形体,包括盐变形体本身及其周围的其他变形岩层(戈红星等,1996)。盐构造是油气系统中的常规要素,盐构造研究对于认识储层的时空分布、烃源岩生成、圈闭构造演化和油气运移路径形成有着重要意义(Hudec et al., 2007),此外,由于盐岩具有较弱的力学强度和强烈的流变特性,盐岩可作为认识岩石圈深部层次、地壳早期高热状态下岩层塑性变形的理想参照物,盐构造研究可以为前寒武基底构造、造山带深部地壳研究提供指导。因此,盐构造研究在基础地质和石油地质领域内均受到了极大重视,也是研究的热点问题。

库车前陆冲断带作为中国西部重要的油气勘探区(王招明等,2002;赵孟军等,2005),古近纪盐岩分布及变形特征对本区油气成藏产生了重要影响(赵孟军等,2015)。前人对本区盐构造的研究主要集中于地下,包括地下盐构造样式的识别(陈书平等,2004;邬光辉等,2004;余一欣等,2005,2006;汤良杰等,2007;黄少英等,2009;汪新等,2009;唐

鹏程等,2010;能源等,2012)、地下盐构造分段性研究(黄少英等,2009;漆家福等,2009)及盐构造形成机制研究(余一欣等,2008;汪新等,2010;尹宏伟等,2011;Li et al.,2012)等,而对于地表盐构造的研究相对较少(程小岛等,2013;Li et al.,2014)。库车前陆冲断带西部发育中国最好的地表盐构造,其中却勒盐推覆体为中国发育最好的盐席构造(Li et al., 2014;Hudec et al.,2006),可作为盐构造研究的天然实验室,同时地表盐构造是地下盐构造的地表延伸,明确地表盐构造变形特征对于辅助地下盐构造识别,进而指导油气勘探有着重要意义。

本文在前人研究的基础上,通过详细的野外填图,并辅以地震解释、遥感解译等方法,对库车前陆冲断带西部却勒盐推覆体变形特征进行分析,同时,结合该区盐内能干层的变形样式,探讨却勒盐推覆体盐岩流变特征。

2 区域地质概况

天山造山带为典型的古生代增生造山带,经历了古生代的增生及新生代的再变形过程,印度板块和欧亚板块碰撞导致天山再活化,并在天山山前形

成一系列前陆盆地和前陆冲断带(Xiao et al., 2013)。库车前陆冲断带位于塔里木盆地北部,夹持于南天山造山带与塔北隆起之间,强烈的挤压作用和盐岩滑脱层的存在导致本区构造变形在整体上具有“南北分带、东西分段、上下分层”的特征,即从西到东以乌什凹陷、拜城凹陷和阳霞凹陷为主体分为3段;自北而南划分为北部单斜带、克拉苏—依奇克里克构造带、中轴凹陷带、秋里塔格构造带、南部斜坡带等5个构造变形带;按照变形样式自上而下划分为盐上层、盐岩层、盐下层和基底等4个构造变形层(汤良杰等,2006;漆家福等,2013;李艳友等,2012,2013)。自北向南,收缩型强变形带(克拉苏—依奇克里克构造带、秋里塔格构造带)分隔弱变形带(北部单斜带、中轴凹陷带、南部斜坡带)。

本区中生代—新生代地层发育齐全,厚度10000 m以上,自下而上依次发育上二叠统、三叠系、侏罗系、下白垩统、古新统一始新统库姆格列木群(E_{1-2km})、渐新统苏维依组(E_{3s})、中新统吉迪克组(N_j)、中新统康村组(N_k)、上新统库车组(N_k)、第四系。在西部的阿瓦特地区,则发育古新统塔拉克组(E_{1t})、始新统小库孜拜组(E_{2x})和渐新统阿瓦特组(E_{3a}),可与库姆格列木群和苏维依组相对应。古—始新世和中新世,库车地区处于盐湖、干旱湖泊—盐湖的环境下,分别沉积了库姆格列木群膏盐岩和吉迪克组膏盐岩,构成了地区最主要的滑脱层,以库车为界,前陆冲断带西部主要发育库姆格列木群(E_{1-2km})膏盐岩,分布范围较广,厚度较大,最厚处超过6000 m;东部主要发育吉迪克组(N_j)膏盐岩,分布面积较小,厚度也相对较小,最厚处约1800 m(赵孟军等,2015;陈书平等,2004;邬光辉等,2004;余一欣等,2005,2006;汤良杰等,2007)。

强烈的挤压作用导致库车前陆冲断带西部盐构造发育,盐下基底发育的背斜圈闭是油气勘探的重点位置,目前发现大北3、大北201、克深5、克拉2、克拉3等多个含油气构造,具有良好的勘探前景(赵孟军等,2005,2015)。同时,在地表形成却勒盐推覆体、吐孜玛扎盐墙、博孜墩盐席、东阿瓦特盐席和温宿大峡谷奥奇克盐底辟等多种盐构造样式(图1),其中却勒盐推覆体是本区最大的地表盐构造,同时也是中国发育最好的盐席构造(程小岛等,2013;Li et al.,2014)。却勒盐推覆体在地理位置上

位于拜城西南约60 km处,在构造属性上属于西秋里塔格构造带,位于密斯坎塔格背斜北部,在东西向上延伸约30 km(图2a)。其变形过程经历了从盐底辟向推覆构造演化的过程(Hudec et al.,2006),主要包括以下阶段:①渐新世末,自南天山山前的加积作用形成的差异沉积负载诱发盐底辟在盆地方向发育;②随着库车前陆冲断带西段的挤压应力不断向南传播,至上新世中期,却勒盐底辟进一步发育,盐底辟体积、上升高度不断增大,同时,一个低幅度的非对称盐枕在现今的拜城凹陷处发育;③上新世中期—早更新世,随着挤压作用的进一步加强,应力在却勒盐底辟处集中导致却勒逆冲断层发育,推覆构造开始形成,盐岩随逆冲断层出露地表形成盐席构造,同时密斯坎塔格背斜在断层下盘发育;④更新世早期—现今为库车前陆冲断带挤压变形的高峰期,密斯坎塔格背斜强烈隆升,大量的外来盐体聚集在背斜下部。早期的拜城盐枕发生反转形成现今的拜城凹陷,却勒盐推覆体进一步发育,同时盐下逆冲断层向拜城凹陷扩展,形成叠瓦构造(Li et al.,2012)。

受后期剥蚀作用的影响,却勒盐推覆体现今在东西向上构造差异较大,具有明显的分段性,在推覆体的中、西部,推覆体上盘地层发育齐全,库姆格列木群盐岩仅沿推覆体逆冲前缘出露地表,属于典型的露趾增生型盐席构造,盐岩厚度最厚约200 m;在推覆体东部的察尔汗盐席处,盐上层被剥蚀,盐岩出露地表后向周缘流动,且受地表径流和降水作用影响明显,在盐席表面发育大量溶洞和盐山构造,属于溢流增生型盐席(Hudec et al.,2006)。

3 却勒盐推覆体中、西部变形特征

Hudec and Jackson(2006)基于数值模拟将盐席按照增生方式分为4种类型:①溢流增生型盐席,②露趾增生型盐席,③逆冲增生型盐席,④盐翼侵入型盐席。其中溢流型增生的型盐席产生于盐供给源速率大于其沉降、受侵蚀及溶解速率的情况下,盐席通常没有上覆岩层或上覆岩层的力学强度可以忽略,盐席运动主要受重力作用驱动。露趾增生型盐席盐上发育力学强度较高的上覆岩层,但在上覆岩层的前缘存在开放的趾状结构。盐岩流变速率大于盐上层和盐下层的增生速率,最终导致盐席

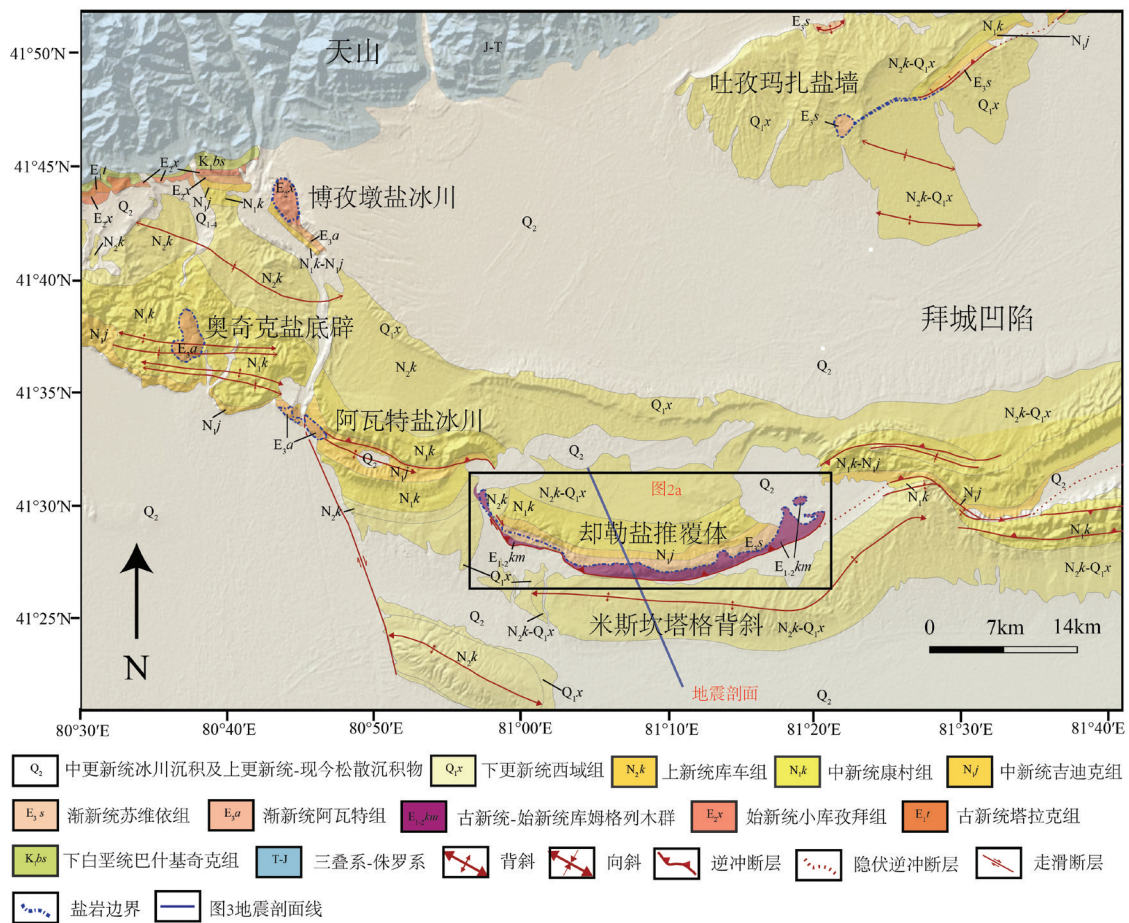


图1 库车前陆冲断带西部地表盐构造分布图
Fig.1 Distribution of surface salt structures in western Kuqa foreland thrust belt

发育(Hudec et al.,2006)。

却勒盐推覆体在东西向上构造差异较大,具有明显的分段性,盐推覆体中、西部为典型的露趾增生型盐席构造(Li et al.,2014),盐上地层发育齐全,渐新统苏维依组—上新统库车组地层从南向北依次出露,且倾向向北(图2b、图3b),盐上吉迪克组内部可见叠瓦状逆冲构造,但规模、断距都比较小。盐岩沿逆冲断层前缘出露地表,呈露趾状产出,并向南流动,流动前缘与逆冲断层下盘在地形上变化较大(图3b、图4b)。在遥感图上可以看出,盐体形态受推覆体上部冲沟的影响明显,被分隔成多个扇状盐体(图2b),发育冲沟的位置,盐岩被溶解蚀蚀,在形态上向北凹陷,同时在逆冲断层下盘发育冲积扇。盐推覆体西段相比于中段,盐岩出露地表的量较少,可能与季节性河流的侵蚀作用有关。

盐推覆体最西端为却勒逆冲断层在地表尖灭的位置,发育走滑断层协调周缘变形(Li et al.,2014)(图1),盐岩沿走滑断层出露地表,厚度约30 m(图4a)。从地震剖面上看出,却勒断层沿盐层发育,且强烈的挤压作用导致盐岩发生流动,仅有相对较少的盐岩随逆冲断层出露地表,大量的盐岩在逆冲断层下盘大量聚集,形成盐背斜(米斯坎塔格背斜),在地下盐背斜和盐推覆体接触的部位还可见盐焊接构造(图3a)。

盐岩具有较弱的力学强度,其变形以塑性变形为主,盐岩流变强弱通常通过盐内能干层的变形样式反映。钻井资料表明,地下库姆格列木群盐内能干层有泥岩、石膏和泥质灰岩等,在盐推覆体中、西部出露地表的盐体内可见大量的石膏夹层,厚度从几十厘米到数米不等,但变形较弱,多以原始的层

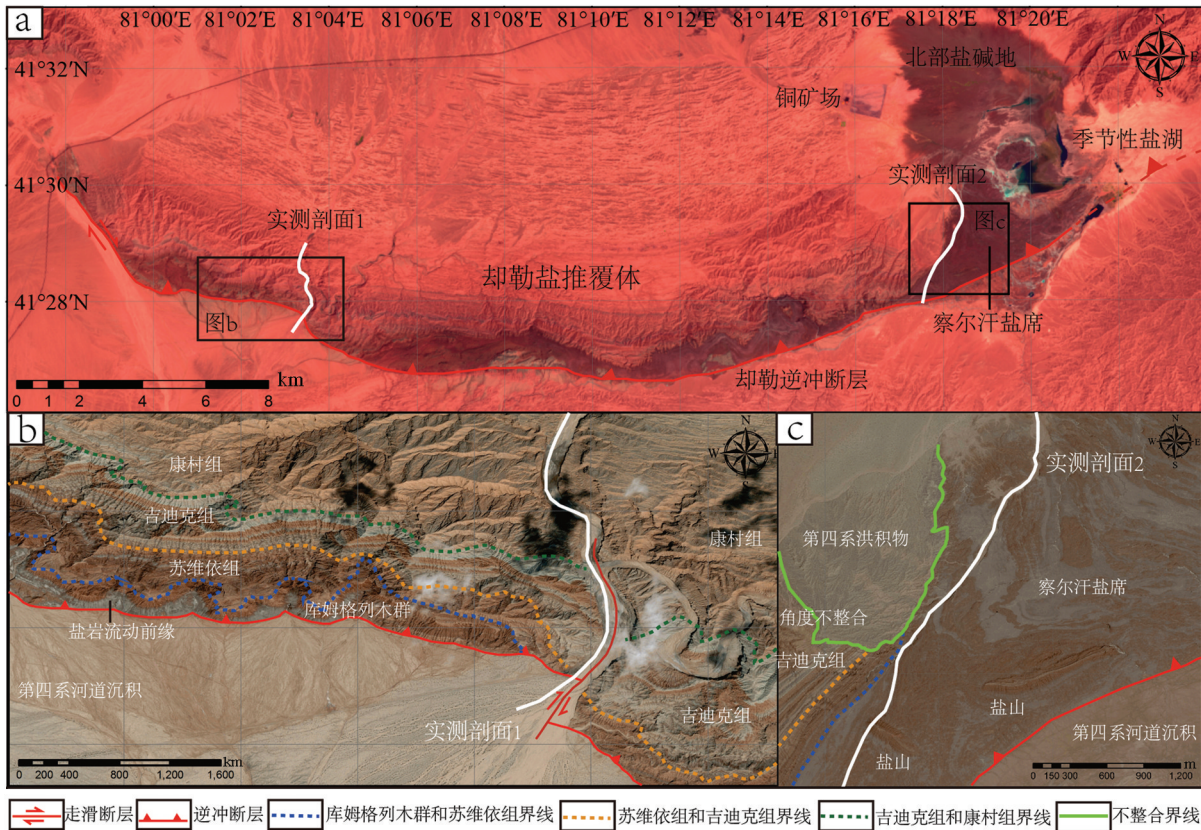


图2 却勒盐推覆体遥感解译图

a—却勒盐推覆体整体遥感图像;b—却勒盐推覆体西部遥感解译图;c—却勒盐推覆体东部察尔汗盐席遥感解译图

Fig.2 Remote sensing interpretation image of the Quele salt nappe

a—Remote sensing interpretation image of the integral Quele salt nappe;b—Remote sensing interpretation image of the western part of Quele salt nappe;c—Remote sensing interpretation image of the eastern part of Quele salt nappe (Chaerhan Namakier)

状构造为主,且不同扇状盐体之间的石膏层大多可相连(图4c),少量石膏层形成钩状褶皱,为盐内能干层随盐岩流动,前缘受到阻力发生弯曲的结果(图4d)。盐体的展布形态表明,在却勒盐推覆体中、西部盐岩出露地表后主要向南流动,但在盐内还可见少量东西向上的钩状褶皱,表明盐体在向南流动的同时,还伴随有一定的侧向流动。盐推覆体中、西部盐岩流变较弱的原因与盐上顶板有关,巨厚的顶板阻碍了盐体的流动,同时最大限度的阻碍了盐岩被流水侵蚀。

4 东部察尔汗盐席变形特征

与盐推覆体中、西部不同,盐推覆体东部察尔汗盐席盐上地层被剥蚀,盐岩出露地表后在重力的驱动下向周缘流动,且地下盐岩供给速率大于盐席受侵蚀及溶解速率,为典型的溢流增生型盐席(图

3b)(Hudec et al.,2006)。受周缘河流的改造作用,盐席边界呈三角形,面积约12 km²(图2a、图2c)。此区域与盐推覆体中、西部相比,逆冲推覆特征不明显,未见明显的逆冲断层前缘,但推测却勒逆冲断层可继续向东延伸,甚至与秋里塔格背斜北部的逆冲断层相连(图1)。察尔汗盐席受地表径流和的降水影响明显,季节性河流限制了盐席的边界,降水对盐岩的侵蚀作用导致在盐席的表面和内部发育大量的溶蚀构造,同时在盐席表面形成以棕色石膏土为主的表壳。此外,察尔汗盐席由于缺少顶板的限制流动性较强,盐内能干层发生变形,形成复杂的褶皱系统。

4.1 察尔汗盐席内部溶蚀构造

察尔汗盐席盐上地层缺失,盐席直接暴露在地表,降水和地表径流对盐席溶蚀作用明显。盐席表面发育盐岩溶解后残余的石膏土,表壳石膏土呈棕

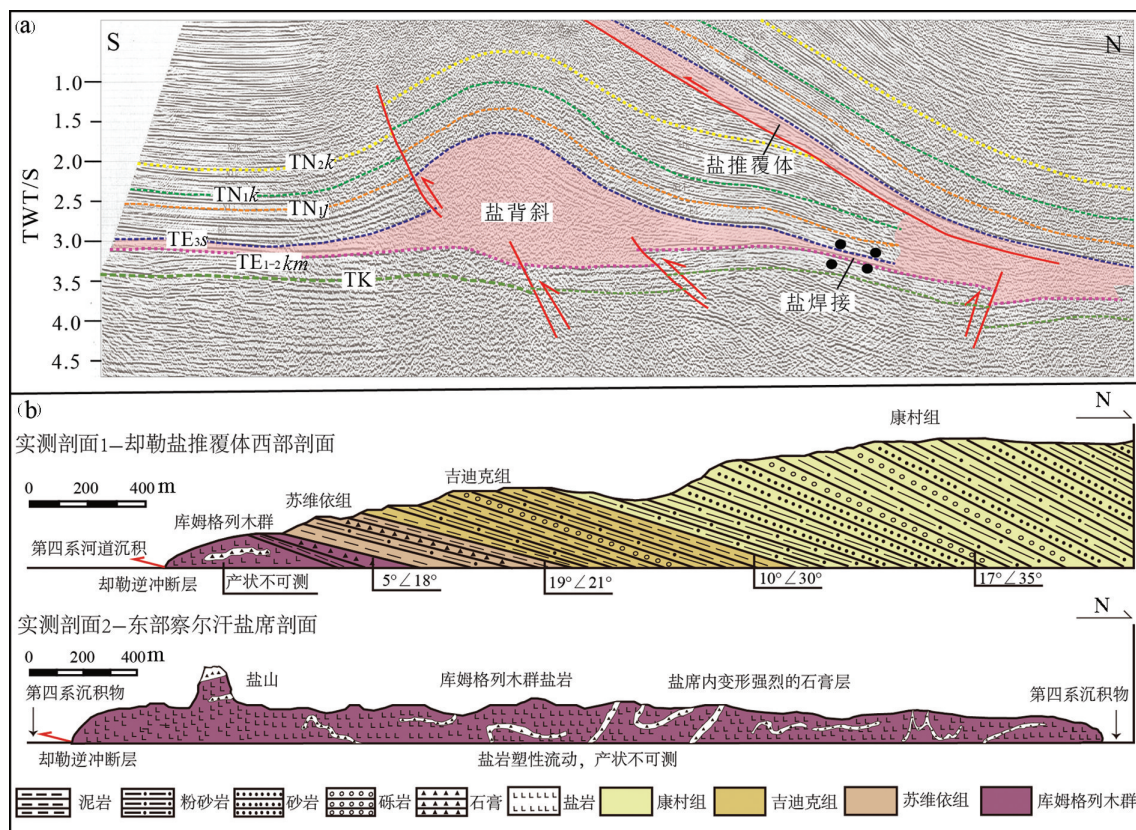


图3 却勒盐推覆体地震剖面解释及实测剖面图

a—却勒盐推覆体中、西部地震剖面解释图,剖面位置见图1;b—却勒盐推覆体实测剖面图,剖面位置见图2

Fig.3 Seismic profile interpretation image and field sections of the Quele salt nappe

a—Seismic profile interpretation image of the central and western part of Quele salt nappe, the position of the seismic profile is shown in Fig 1.

b—Field sections of the Quele salt nappe, the position of the sections are shown in Fig 2.

色,较为松软,未固结成岩,平均厚度在数十厘米。石膏土之下,可见结晶性较好的盐岩颗粒,为地下原生的盐岩晶体,部分区域发育糜棱盐构造,盐岩颗粒表现出明显的定向性(图4j)(Talbot et al.,1987; Schlöder et al.,2007)。盐席表面可见大量的溶洞,溶洞的大小不一,直径通常在1 m左右,最大的直径约十几米(图4f)。除表层外,地下盐岩也发育大量溶蚀构造,降水量较多时,可在盐席内部形成暗河(图4g),当地下盐岩溶蚀到一定程度时,表层盐层会发生塌陷(图4e),并有季节性的卤水贮存,边缘存在大量过饱和析出的盐岩(图4i)。

察尔汗盐席在地形起伏较大,除溶洞和塌陷构造外,盐席内部还可见隆起的盐山构造,高度多在30~50 m,是盐席内部差异溶蚀的结果。察尔汗盐席内能干层类型以石膏为主,石膏溶解度比盐岩溶解度小约一个数量级,由于差异溶蚀作用,盐内的

石膏层相对突出。察尔汗盐席内部盐山顶部均可见厚层的石膏顶板(图4h),顶板的存在减弱了降水和地表径流对顶板下盐岩的溶蚀作用,导致该处在地形上形成高地。盐山和溶洞构造均属于盐席内部的溶蚀构造,共同构成了察尔汗盐席起伏地形。

4.2 察尔汗盐席内部复杂褶皱系统

湿盐的流变速率比干盐的流变速率大约2个数量级(Talbot et al.,2009a)。察尔汗盐席由于缺少顶板的限制及受降水和地表径流的充分影响,相比于却勒盐推覆体中、西部,本处盐岩流动性更强,且流动的方向缺少规律性,主要表现在察尔汗盐席内部能干层具有更复杂的变形样式。

察尔汗盐席盐内能干层类型以石膏层为主,同时存在少量的泥岩和泥灰岩夹层。盐内能干层多不连续,随盐岩流动发生变形,形成复杂的褶皱系统。相比于却勒盐推覆体中、西部,本区能干层变

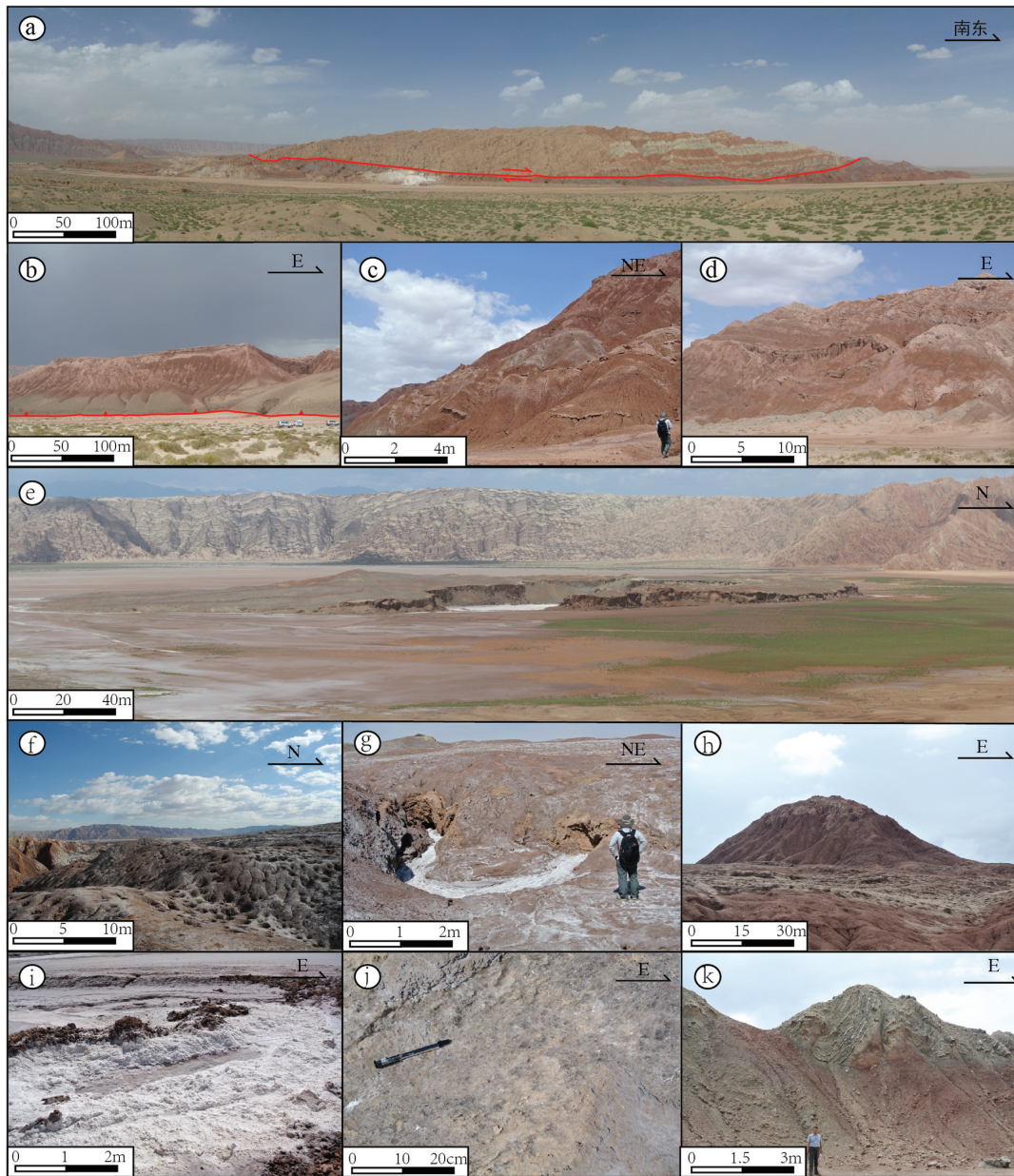


图4 却勒盐推覆体野外相关照片

a—却勒盐推覆体最西端变形特征,本处为却勒逆冲断层在地表尖灭的位置,发育走滑断层协调周缘变形;b—却勒盐推覆体中、西段盐岩流动前缘;c—却勒盐推覆体中、西段盐内未变形的层状石膏夹层;d—却勒盐推覆体中段盐内钩状褶皱,东西向展布的钩状褶皱表明盐岩存在一定的侧向流动;e—却勒盐推覆体东段察尔汗盐席内溶蚀塌陷结构;f—察尔汗盐席内部大量的溶洞构造;g—察尔汗盐席内部地下暗河在地表的出露部分;h—察尔汗盐席内部盐山构造,盐山顶部可见厚层的石膏顶板;i—察尔汗盐席季节性卤水边缘析出的盐岩;j—察尔汗盐席内的糜棱盐构造;k—察尔汗盐席盐内石膏夹层形成的多期叠加褶皱

Fig. 4 Related photos of the Quele salt nappe in the field

a—Deformation characteristics of the westernmost part of the Quele salt nappe. The Quele thrust fault pinches out and a strike-slip fault develops in this part; b—Flowing frontier of the salt rock in the central and western part of the Quele salt nappe; c—Undeformed gypsum interlayers in the salt rock in the central and western part of the Quele salt nappe; d—Gypsum hook fold in the salt rock in the central part of the Quele salt nappe. The EW-trending hook fold indicates that the salt rock has some lateral flow; e—The collapse structure in the Chaerhan Namakier (eastern part of the Quele salt nappe); f—Karst caves at the surface of the Chaerhan Namakier; g—Explored part of an underground river in the Chaerhan Namakier; h—Salt hill in the Chaerhan Namakier. Gypsum roof can be seen on the top of the salt hill; i—Precipitated salt at the edge of seasonal brine in the Chaerhan Namakier; j—Mylonitic salt in the Chaerhan Namakier; k—Superposed fold of gypsum interlayers in the Chaerhan Namakier

形程度更强,出露的能干层大多发生褶皱变形,基本未见简单层状产出的能干层,且大部分能干层产状不可测量。能干层构造样式除少量的简单的钩状褶皱外,更可见大量的鞘褶皱、紧闭褶皱及多期叠加褶皱,且规模变化较大,既有露头尺度(图4k)也有遥感尺度(图2c)。其变形机制可以类比于高级变质岩区,是多种构造作用共同作用的结果,包括不同程度的差异压实、褶皱缩短、压扁拉长、韧性剪切、塑性流动、断层作用等。

4.3 察尔汗盐席变形模式

结合前人对于扎格罗斯前陆冲断带地表盐构造变形模式的研究(Talbot et al.,1987,2009a,2009b)和本区的构造特征,可建立察尔汗盐席变形的地质模型(图5)。盐岩在却勒逆冲断层的作用下冲破地表,盐岩上升的方式近似于科特流的流动方式(Davison et al.,1996),即在靠近顶板的一侧,由于顶板的拖曳作用,盐岩上升速率较快,往下盐岩上升速率逐渐减慢。由于缺少顶板的限制,盐岩在上升分界点时,受重力作用开始向四周扩散,形成盐冰川。降水作用和地表径流导致盐冰川表面风化严重,易溶的盐岩被地表径流带走,在盐冰川的表面形成数十厘米厚的残余石膏土,差异溶蚀作用导致在盐席表面形成溶洞和盐山构造,使得盐席在地形上起伏不平。

由于盐冰川强烈的流变作用,盐内能干层发生强烈变形,形成复杂的褶皱样式。在盐冰川的翼部,由于盐冰川底部与地面的摩擦作用,导致盐冰川在向前运动的过程中,前缘会向下弯曲,在剖面

上会形成“履带式褶皱”(tank fold)。降水作用会对盐岩流动速率产生较大的影响。在干旱气候条件下,由于盐岩顶部弹性外壳的限制,盐岩在喷口顶部积聚,导致顶部隆起,在重力驱动下,盐岩以每年几厘米至几十厘米的速率向前流动。而在强降水的作用下,盐岩顶部外壳溶解或弱化,盐岩在强硬外壳限制下积累的能量迅速释放,盐岩的流动速率会迅速增大,在随后数天里,盐岩流动速率能够达到每天几厘米至几十厘米,就会导致在原有的“履带式褶皱”上叠加鞘褶皱,形成一种叫做“脉动流”(surging flow)的流动方式(Talbot et al.,2009a)。

5 却勒盐推覆体发育特殊性探讨

却勒盐推覆体是中国发育最典型的盐推覆构造,其形成有其特殊性,是多种因素综合作用的结果,可具体归纳为以下几点:①库车前陆冲断带西部盐岩主要集中在变形较强的克拉苏构造带和秋里塔格构造带中,厚层的盐岩是大规模推覆构造发育的基础。而在北部的克拉苏构造带,因靠近天山山前,断层以高角度逆冲断层为主,盐岩随断层出露地表后,被周缘地层围限,多发育盐墙构造(吐孜玛扎盐墙),而在南部的秋里塔格构造带,断层倾角较平缓,更易发育推覆构造。②本区大规模盐推覆构造具有继承性的特征。早期的差异沉积作用导致在本区发育先存盐底辟,在后期强烈的挤压应力下,先存盐底辟的位置成为应力的集中点,容易发生冲断构造,却勒盐推覆构造是在先存盐底辟的基础上,进一步发育的结果。③在平行于秋里塔格构

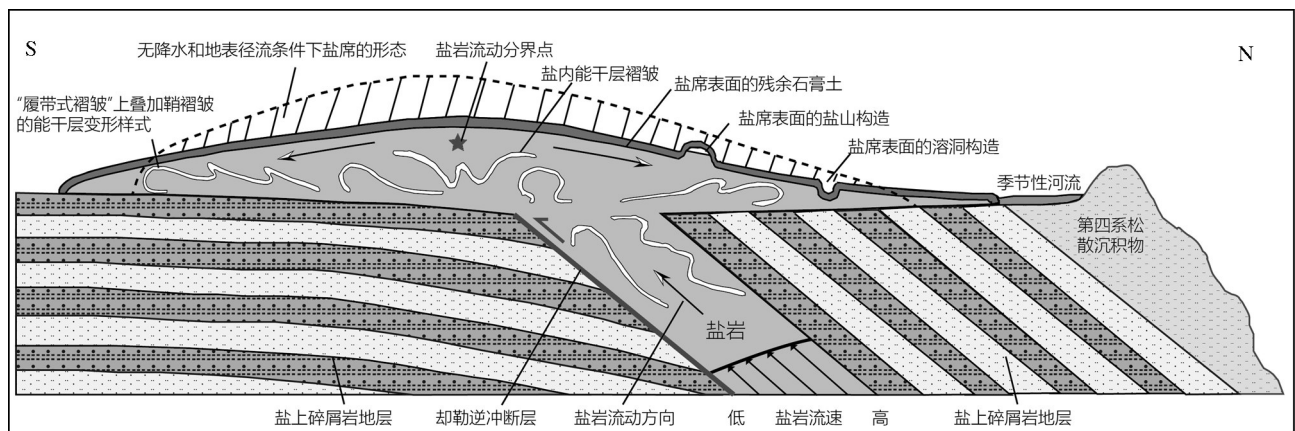


图5 察尔汗盐席地质模型图
Fig.5 Geological model of the Chaerhan Namakier

造走向的方向上,在盐推覆体西端发育有走滑断层协调逆冲变形,而从察尔汗盐席以东,库姆格列木群含盐量逐渐降低,含盐地层逐渐由古新统一始新统库姆格列木群转变为中新统吉迪克组,但吉迪克组含盐地层厚度较小,导致察尔汗盐席以东推覆构造不发育,而是发育大规模的滑脱背斜(南、北秋里塔格背斜)来协调同一构造带盐上层缩短量,因此,大规模的盐推覆构造仅在却勒地区发育。

却勒盐推覆体地下盐岩供给充分,逆冲断层的断距在东、西部也大致相等,但盐推覆体东、西部盐体本身及盐内能干层变形特征却存在较大差异。是否存在盐上厚层顶板是导致其变形差异性的主要原因。在却勒盐推覆体的中、西部,盐上地层齐全,在盐上地层的拖曳作用下,盐岩层变形以顺层剪切变形为主,流动方向较为固定,盐内能干层多保持原始的层状结构,并可见少量的钩状褶皱,为盐内能干层随盐岩流动,前缘受到阻力发生弯曲的结果。而在盐推覆体东部的察尔汗盐席,盐上顶板缺失,盐岩在喷出地表后受降水及地表径流的影响,流动性明显增强。且缺少顶板的限制,盐岩在重力的作用下向周缘流动,形成溢流增生型盐席。由于盐岩流动的方向性较差,盐内能干层变形的规律性较差,且盐席“脉动流”的增生模式会在原有的褶皱系统上叠加新的褶皱类型,导致本区能干层形成复杂的褶皱系统。

盐构造的发育也对本区油气系统产生了较大影响。却勒地区的油气源主要来自拜城凹陷三叠—侏罗系烃源岩,库姆格列木群巨厚的膏盐岩作为区域的盖层,盖层之下发育库姆格列木群底部砂岩和白垩系砂岩储集层,盐下冲断楔形成构造圈闭是油气发育的有利位置,目前已经发现却勒1井等多个含油气构造。本区盐岩对于油气系统的影响不仅表现在作为区域良好的盖层,同时由于盐岩层具有极强的阻隔应力传递的作用,却勒盐推覆体的发育至少吸收了16 km的构造缩短量(唐鹏程等,2010),盐下构造形态在强烈的构造挤压应力作用下基本未受破坏,从而使盐下的油气圈闭得到了较好的保存(万桂梅等,2007)。

6 结 论

(1)库车前陆冲断带西部却勒盐推覆体发育中

国最好的盐席构造,且在东西向上构造差异较大,具有明显的分段性,在推覆体的中、西部,推覆体上盘地层发育齐全,库姆格列木群盐岩仅沿推覆体逆冲前缘出露地表,属于典型的露趾增生型盐席构造;而东段的察尔汗盐席,盐上地层被剥蚀,盐岩出露地表后在重力的驱动下向周缘流动,且地下盐岩供给速率大于盐席受侵蚀及溶解速率,为典型的溢流增生型盐席。

(2)盐岩变形以塑形变形为主,其流变强弱通常通过盐内能干层的变形样式反映。却勒盐推覆体中、西部盐岩流变较弱,盐体以向南流动为主,并伴随有一定的侧向流动,盐内能干层以原始的层状构造和简单的钩状褶皱为主;东部察尔汗盐席盐岩流变较强,盐岩出露地表后向四周溢流,盐内能干层变形以复杂的鞘褶皱、紧闭褶皱及多期叠加褶皱为主。缺少厚层顶板的限制和受降水及地表径流的充分影响是察尔汗盐席盐岩流变性较强的原因。

(3)察尔汗盐席由于缺少顶板,降水作用和地表径流导致盐冰川表面风化严重。同时差异溶蚀作用导致在盐席表面形成溶洞和盐山构造,使得盐席在地形上起伏不平。盐席以“脉动流”的形式向前增生,盐席流动前缘在摩擦力的作用下会向下弯曲,在剖面上会形成“履带式褶皱”,同时,强降水作用会导致盐岩顶部外壳溶解或弱化,盐岩流速在短时间内迅速增加,产生一次“脉动”,并在原有简单的“履带式褶皱”上叠加鞘褶皱。

致谢:本文在野外工作及后期写作过程中得到了英国利兹大学A. Alexander G. Webb教授、西班牙巴塞罗那大学Eduard Roca和Josep Anton Muñoz教授的指导和帮助,在此表示感谢!

References

- Chen Shuping, Tang Liangjie, Jia Chengzao, Pi Xuejun, Xie Huiwen. 2004. Salt tectonics in the western Kuqa Depression and its relation to oil and gas distribution[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 25(1): 30–34,39 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Xiaodao, Li Jianghai, Cheng Haiyan, Deng Gang. 2013. Typical surface salt structure and deformation characteristics in western Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 34(2): 189–192(in Chinese with English abstract).
- Davison I, Alsop I, Blundell D. 1996. Salt tectonics: some aspects of deformation mechanics[J]. Geological Society, London, Special Publications, 100(1): 1–10.

- Ge Hongxing, Jackson M P A. 1996. Salt structures, hydrocarbon traps and mineral deposits[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, 32(4): 640–649(in Chinese with English abstract).
- Huang Shaoying, Wang Yueran, Wei Hongxing. 2009. Characteristics of salt structures and its evolution in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1): 117–123(in Chinese with English abstract).
- Hudec M R, Jackson M P A. 2006. Advance of allochthonous salt sheets in passive margins and orogens[J]. *AAPG Bulletin*, 90(10): 1535–1564.
- Hudec M R, Jackson M P A. 2007. Terra infirma: understanding salt tectonics[J]. *Earth–Science Reviews*, 82(1): 1–28.
- Li J, Webb A A G, Mao X, Eckhoff I, Colon C, Zhang K, Wang H, Li A, He D. 2014. Active surface salt structures of the western Kuqa fold–thrust belt, northwestern China[J]. *Geosphere*, 10(6): 1219–1234.
- Li S, Wang X, Suppe J. 2012. Compressional salt tectonics and synkinematic strata of the western Kuqa foreland basin, southern Tianshan, China[J]. *Basin Research*, 24(4): 475–497.
- Li Yanyou, Qi Jiafu. 2012. Delamination contractional deformation and its main controlled factors of Kelasu structural zone in Kuqa depression[J]. *Chinese Journal of Geology*, 47(3): 607–617(in Chinese with English abstract).
- Li Yanyou, Qi Jiafu. 2013. Structural segmentation and mechanism in Dabei–Keshen area of Kelasu structural belt, Kuqa depression[J]. *Chinese Journal of Geology*, 48(4): 1177–1186(in Chinese with English abstract).
- Neng Yuan, Qi Jiafu, Xie Huiwen, Li Yong, Lei Ganglin, Wu Chao. 2012. Structural characteristics of northern margin of Kuqa depression, Tarim basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(9): 1510–1519(in Chinese with English abstract).
- Qi Jiafu, Lei Ganglin, Li Minggang, Gu Yongxing. 2009. Analysis of structure model and formation mechanism of Kelasu structure zone, Kuqa depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1): 49–56(in Chinese with English abstract).
- Qi Jiafu, Li Yong, Wu Chao, Yang Shujiang. 2013. The interpretation models and discussion on the contractive structure deformation of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Geology in China*, 40(1): 106–120(in Chinese with English abstract).
- Schlöder Z, Urai J L. 2007. Deformation and recrystallization mechanisms in mylonitic shear zones in naturally deformed extrusive Eocene – Oligocene rocksalt from Eyvanekey plateau and Garmsar hills (central Iran)[J]. *Journal of Structural Geology*, 29(2): 241–255.
- Talbot C J, Jackson M P A. 1987. Internal kinematics of salt diapirs[J]. *AAPG Bulletin*, 71(9): 1068–1093.
- Talbot C J, Pohjola V. 2009. Subaerial salt extrusions in Iran as analogues of ice sheets, streams and glaciers[J]. *Earth–Science Reviews*, 97(1): 155–183.
- Talbot C, Aftabi P, Chemia Z. 2009. Potash in a salt mushroom at Hormoz island, Hormoz strait, Iran[J]. *Ore Geology Reviews*, 35(3): 317–332.
- Tang Liangjie, Yu Yixin, Yang Wenjing, Peng Gengxin, Lei Ganglin, Jin Wenzheng, Wan Guimei. 2006. Internal deformation features of detachment layers in the front of the Kuaq foreland fold–thrust belt[J]. *Geology in China*, 33(5): 944–951(in Chinese with English abstract).
- Tang Liangjie, Yu Yixin, Yang Wenjing, Peng Gengxin, Lei Ganglin, Ma Yujie. 2007. Paleo–uplifts and salt structures and their influence on hydrocarbon accumulations in the Kuqa Depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 145–150(in Chinese with English abstract).
- Tang Pengcheng, Wang Xin, Xie Huiwen, Lei Ganglin, Huang Shaoying. 2010. The Quele area of the Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China: Cenozoic salt structures, evolution and controlling factors[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1735–1745 (in Chinese with English abstract).
- Wan Guimei, Tang Liangjie, Jin Wenzheng, Yu Yixin. 2007. Functions of gypsum–salt layer in tectonic deformation and hydrocarbon accumulation of the Qiultag structural belt, Kuqa Depression[J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(4): 666–677.
- Wang Xin, Tang Pengcheng, Xie Huiwen, Lei Ganglin, Huang Shaoying. 2009. Cenozoic salt structures and evolution in the western Kuqa depression, Tarim Basin, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1): 57–65(in Chinese with English abstract).
- Wang Xin, Wang Zhaoming, Xie Huiwen, Li Shiqin, Tang Pengcheng, Yin Hongwei, Li Yong, Huang Shaoying. 2010. Cenozoic salt tectonics and physical models in the Kuqa depression of Tarim Basin, China[J]. *Science China: Earth Science*, 40(12): 1655–1668 (in Chinese).
- Wang Zhaoming, Wang Tingdong, Xiao Zhongyao, Xu Zhiming, Li Mei, Lin Feng. 2002. Migration and accumulation of natural gas in Kela–2 gas field[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(s1): 107–112.
- Wu Guanghui, Wang Zhaoming, Liu Yukui, Zhang Baoshou. 2004. Kinematics characteristics of the Kuqa Depression in the Tarim Basin[J]. *Geological Review*, 50(5): 476–483(in Chinese with English abstract).
- Xiao W, Windley B F, Allen M B, Han C. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1316–1341.
- Yin Hongwei, Wang Zhe, Wang Xin, Wu Zhenyu. 2011. Characteristics and mechanics of Cenozoic salt–related structures in Kuqa foreland basins: Insights from physical modeling and discussion[J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(2): 308–317(in Chinese with English abstract).
- Yu Yixin, Ma Baojun, Tang Liangjie, Yang Wenjing, Lei Ganglin, Ma Yujie, Wang Pengwan. 2008. Major factors controlling salt structures in western Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 35(1): 23–27(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Yu Yixin, Tang Liangjie, Li Jingchang, Yang Wenjing, Jin Wenzheng, Peng Gengxin, Lei Ganglin, Wan Guimei. 2006. Influence of basement faults on the development of salt structures in the Kuqa foreland fold-and-thrust belt in the northern Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(3): 330-336(in Chinese with English abstract).
- Yu Yixin, Tang Liangjie, Wang Qinghua, Yang Wenjing, Peng Gengxin, Lei Ganglin. 2005. Salt structures and forming models of hydrocarbon pools in the Kuqa depression[J]. *Coal Geology & Exploration*, 33(6): 5-9(in Chinese with English abstract).
- Zhao Mengjun, Lu Xuesong, Zhuo Qingong, Li Yong, Song Yan, Lei Ganglin, Wang Yuan. 2015. Characteristics and distribution law of hydrocarbon accumulation in Kuqa foreland basin[J]. *Acta Prtrolei Sinica*, 36(4):395-404(in Chinese with English abstract).
- Zhao Mengjun, Wang Zhaoming, Zhang Shuichang, Wang Qinghua, Song Yan, Liu Shaobo, Qin Shengfei. 2005. Accumulation and features of natural gas in the Kuqa foreland basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 414-422(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈书平, 汤良杰, 贾承造, 皮学军, 谢会文. 2004. 库车坳陷西段盐构造及其与油气的关系[J]. *石油学报*, 25(1): 30-34,39.
- 程小岛, 李江海, 程海艳, 邓罡. 2013. 库车坳陷西部地表典型盐构造样式及变形特征[J]. *新疆石油地质*, 34(2): 189-192.
- 戈红星, Jackson M P A. 1996. 盐构造与油气圈闭及其综合利用[J]. *南京大学学报:自然科学版*, 32(4): 640-649.
- 黄少英, 王月然, 魏红兴. 2009. 塔里木盆地库车坳陷盐构造特征及形成演化[J]. *大地构造与成矿学*, 33(1): 117-123.
- 李艳友, 漆家福. 2012. 库车坳陷克拉苏构造带分层收缩构造变形及其主控因素[J]. *地质科学*, 47(3): 607-617.
- 李艳友, 漆家福. 2013. 库车坳陷克拉苏构造带大北-克深区段差异变形特征及其成因分析[J]. *地质科学*, 48(4): 1177-1186.
- 能源, 漆家福, 谢会文, 李勇, 雷刚林, 吴超. 2012. 塔里木盆地库车坳陷北部边缘构造特征[J]. *地质通报*, 31(9): 1510-1519.
- 漆家福, 雷刚林, 李明刚, 谷永兴. 2009. 库车坳陷克拉苏构造带的结构模型及其形成机制[J]. *大地构造与成矿学*, 33(1): 49-56.
- 漆家福, 李勇, 吴超, 杨书江. 2013. 塔里木盆地库车坳陷收缩构造变形模型若干问题的讨论[J]. *中国地质*, 40(1): 106-120.
- 汤良杰, 余一欣, 杨文静, 彭更新, 雷刚林, 金文正, 万桂梅. 2006. 库车前陆褶皱冲断带前缘滑脱层内部变形特征[J]. *中国地质*, 33(5): 944-951.
- 汤良杰, 余一欣, 杨文静, 彭更新, 雷刚林, 马玉杰. 2007. 库车坳陷古隆起与盐构造特征及控油气作用[J]. *地质学报*, 81(2): 145-150.
- 唐鹏程, 汪新, 谢会文, 雷刚林, 黄少英. 2010. 库车坳陷却勒地区新生代盐构造特征、演化及变形控制因素[J]. *地质学报*, 84(12): 1735-1745.
- 万桂梅, 汤良杰, 金文正, 余一欣. 2007. 膏盐层在库车秋里塔格构造带构造变形及成藏中的作用[J]. *地质科学*, 42(4): 666-677.
- 汪新, 唐鹏程, 谢会文, 雷刚林, 黄少英. 2009. 库车坳陷西段新生代盐构造特征及演化[J]. *大地构造与成矿学*, 33(1): 57-65.
- 汪新, 王招明, 谢会文, 李世琴, 唐鹏程, 尹宏伟, 李勇, 黄少英. 2010. 塔里木库车坳陷新生代盐构造解析及其变形模拟[J]. *中国科学地球科学(中文版)*, 40(12): 1655-1668.
- 王招明, 王廷栋, 肖中尧, 徐志明, 李梅, 林峰. 2002. 克拉2气田天然气的运移和聚集[J]. *科学通报*, 47(s1): 103-108.
- 邬光辉, 王招明, 刘玉魁, 张宝收. 2004. 塔里木盆地库车坳陷盐构造运动学特征[J]. *地质论评*, 50(5): 476-483.
- 尹宏伟, 王哲, 汪新, 吴珍云. 2011. 库车前陆盆地新生代盐构造特征及形成机制: 物理模拟和讨论[J]. *高校地质学报*, 17(2): 308-317.
- 余一欣, 马宝军, 汤良杰, 杨文静, 雷刚林, 马玉杰, 王鹏万. 2008. 库车坳陷西段盐构造形成主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 35(1): 23-27.
- 余一欣, 汤良杰, 李京昌, 杨文静, 金文正, 彭更新, 雷刚林, 万桂梅. 2006. 库车前陆褶皱-冲断带基底断裂对盐构造形成的影响[J]. *地质学报*, 80(3): 330-336.
- 余一欣, 汤良杰, 王清华, 杨文静, 彭更新, 雷刚林. 2005. 库车坳陷盐构造与相关成藏模式[J]. *煤田地质与勘探*, 33(6): 5-9.
- 赵孟军, 鲁雪松, 卓勤功, 李勇, 宋岩, 雷刚林, 王媛. 2015. 库车前陆盆地油气成藏特征与分布规律[J]. *石油学报*, 36(4):395-404.
- 赵孟军, 王招明, 张水昌, 王清华, 宋岩, 柳少波, 秦胜飞. 2005. 库车前陆盆地天然气成藏过程及聚集特征[J]. *地质学报*, 79(3): 414-422.