

doi: 10.12029/gc20210109

杨梦莲, 李江海, 王洪浩, 陶崇智, 章雨. 2021. 新疆库车西部古近系奥奇克盐底辟地质地貌特征及构造形成模式[J]. 中国地质, 48(1): 129–138.
Yang Menglian, Li Jianghai, Wang Honghao, Tao Chongzhi, Zhang Yu. 2021. Geological landform and structure formation model of the Paleogene Ochirbat salt diapir in the western Kuqa, Xinjiang[J]. Geology in China, 48(1): 129–138(in Chinese with English abstract).

新疆库车西部古近系奥奇克盐底辟地质地貌特征及构造形成模式

杨梦莲¹, 李江海¹, 王洪浩¹, 陶崇智², 章雨¹

(1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:库车前陆冲断带西部古近系奥奇克盐底辟是中国最典型的盐底辟构造,可作为盐构造研究的天然实验室。本文在前人研究的基础上,通过详细的野外填图,同时辅以遥感解译、地震解释和合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术,探讨了奥奇克盐底辟盐喀斯特地貌特征,并分析了其形成机制及流变模式。奥奇克盐底辟表面盐喀斯特构造发育,在风化面上可见大量的溶洞、溶蚀冲沟构造,在新鲜面上可见梳状溶痕、微型峰丛等构造样式,此外,溶蚀坍塌等机械侵蚀构造也是本区常见的盐喀斯特构造类型。奥奇克盐底辟在形成过程中受逆冲断层、盐上地层的剥蚀作用、差异负载作用及盐岩自身的浮力作用的控制,共经历了逆冲盐底辟、侵蚀盐底辟、主动盐底辟和被动盐底辟 4 个主要阶段。盐岩喷出地表后,在重力作用下由核部向四周流动形成盐冰川,季节性河流的存在限制了盐底辟向东侧、东北侧及北侧传播,导致盐底辟呈现单侧增生的流变模式。

关键词:库车前陆冲断带;奥奇克盐底辟;盐喀斯特;构造类型;地质调查工程;新疆
中图分类号:P542 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)01-0129-10

Geological landform and structure formation model of the Paleogene Ochirbat salt diapir in the western Kuqa, Xinjiang

YANG Menglian¹, LI Jianghai¹, WANG Honghao¹, TAO Chongzhi², ZHANG Yu¹

(1. The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. SINOPEC Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: As the Paleogene Ochirbat salt diapir in the western Kuqa foreland thrust belt is the most typical salt diapir structure in China, it can serve as a natural laboratory for the study of salt structure. Based on previous researches, the methods of field mapping, seismic interpretation, remote sensing images interpretation and InSAR (interferometric synthetic aperture radar) technique were used to analyse the salt karst landform characteristics, formation mechanism and rheological model of the Ochirbat

收稿日期:2018-07-03; 改回日期:2018-09-14

基金项目:国家科技重大专项“南大西洋两岸盆地分析与油气资源评价”(2016ZX05033-001)资助。

作者简介:杨梦莲,女,1993年生,硕士,地质学专业,主要从事石油地质方向研究;E-mail:11920488@qq.com。

通讯作者:李江海,男,1965年生,教授,主要从事地质学研究;E-mail:jhli@pku.edu.cn。

salt diapir. The salt karst landforms are mainly developed on the surface of the salt diapir. Karst caves and gullies can be seen on the weathering surface of the diapir, while rillen karrens and miniature karst peak cluster can be seen on the fresh surface. Further more, collapse structures belonging to salt karst landforms can also be regularly seen in the diapir. The formation of the salt diapir was controlled by many factors, including the thrust fault, the erosion of the overburden, the differential loading and buoyancy, and the evolution process of the diapir can be divided into 4 main stages, including thrust piercement, erosion piercement, active piercement and passive piercement stages. It is summarized that after coming out from the underground, the salt flowed from the core to the periphery of the diapir under the gravity, forming salt glacier, and the seasonal river restricted the salt spreading to east, northeast and north directions, resulting in the asymmetric rheological model of the diapir.

Key words: Kuqa foreland thrust belt; Ochirbat salt diapir; salt karst landform; tectonic type; geological survey engineering; Xinjiang

About the first Author: YANG Menglian, female, born in 1993, Master, engaged in petroleum geology; E-mail: 11920488@qq.com.

About the corresponding Author: LI Jianghai, male, born in 1965, professor, engaged in geological research; E-mail: jhli@pku.edu.cn.

Fund support: Supported by major National Research and Development project "Basin Analysis and Oil and Gas Resource Evaluation on Both Sides of the South Atlantic"(2016ZX05033-001).

1 引 言

库车前陆冲断带是中国西部重要的油气勘探区(王招明等, 2002; 赵孟军等, 2005), 古近系盐岩的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; 汪新等, 2009; 黄少英等, 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(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(程小島等, 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, 其中温宿大峡谷奥奇克盐底辟为中国最典型的盐底辟构造(王会萍, 2011), 且出露地表后受地表径流的影响, 盐喀斯特地貌发育, 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, 明确奥奇克盐底辟的变形特征对于辅助本区地下盐构造识别, 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, 通过详细的野外调查, 探讨了奥奇克盐底辟盐喀斯特地貌特征。同时辅以3D遥感解译、地震解释等方法, 对奥奇克盐底辟的形成机制进行分析, 探讨了底辟形成的期次。最后, 结合合成孔径雷达干涉测量技术建立了奥奇克盐底辟的流变模式。

2 区域地质概况

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; 李艳友等, 2012; 漆家福等, 2013)。

本区中生界—新生界地层发育齐全, 厚达10000 m以上。其中, 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, 以膏盐岩沉积为主, 构成了本区最主要的滑脱层。以库车为界, 前陆冲断带西部主要发育库姆格列木群(E_1-km)膏盐岩, 东部主要发育吉迪克组(N_j)膏盐岩, 西部膏盐岩分布范围和厚度均比东部要大(陈书平等, 2004; 邬光辉等, 2004; 汤良杰等, 2007; 赵孟军等, 2015)。

强烈的挤压作用导致库车前陆冲断带西部盐构造发育, 盐下前古近系基底发育背斜圈闭(余一欣等, 2006), 如大北3、大北201、克深5、克拉2、克拉3等多个含油气构造(赵孟军等, 2005, 2015), 盐上地表形成却勒盐推覆体, 如吐孜玛扎盐墙、博孜墩盐冰川、阿瓦特盐冰川和温宿大峡谷奥奇克盐底

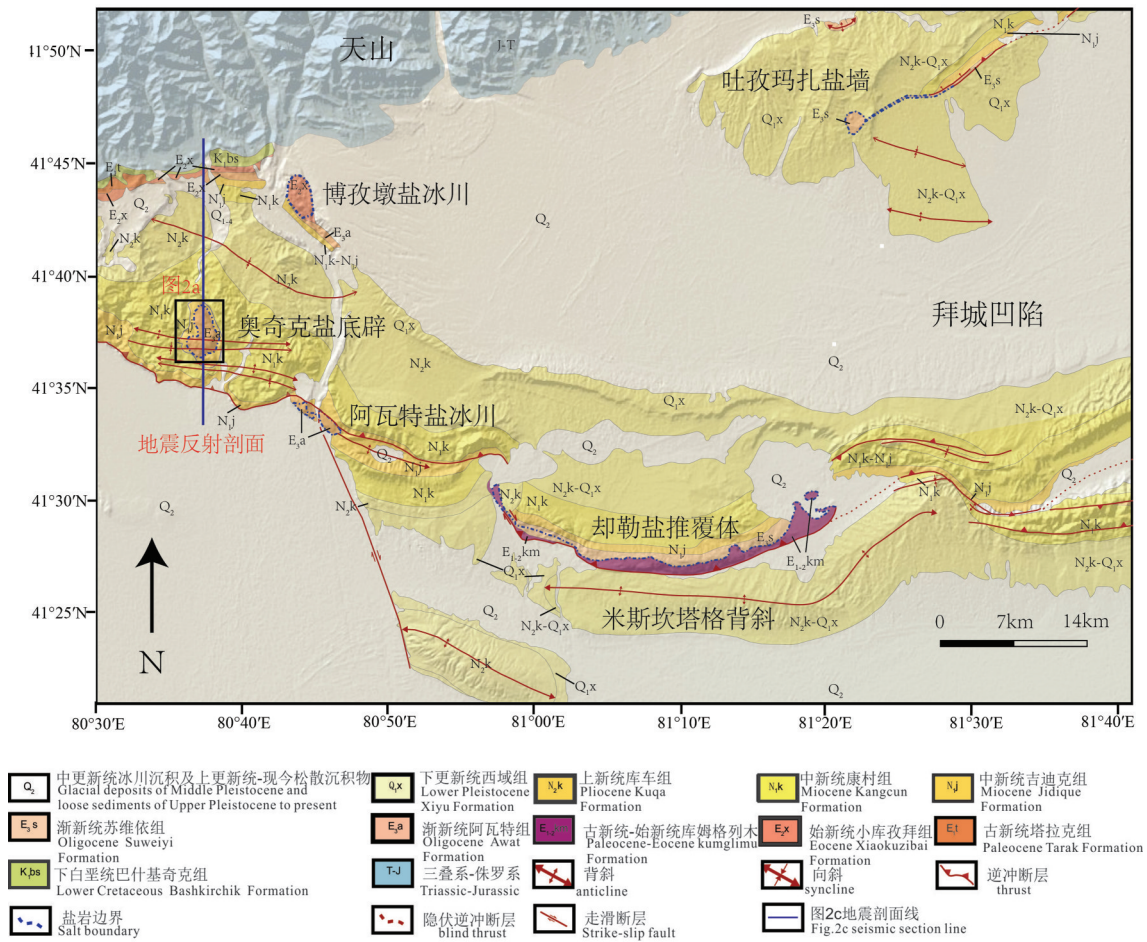


图1 库车前陆冲断带西部地表盐构造分布图
Fig.1 Distribution of surface salt structures in western Kuqa foreland thrust belt

辟等多种盐构造样式(图1)。其中,奥奇克盐底辟位于温宿峡谷西部奥奇克盐丘地质遗迹保护区,面积约16 km²,呈近椭圆状产出(图2a,图3a),是目前中国发现的面积最大、最典型的盐丘底辟构造。奥奇克盐底辟构造,在平面上具有明显的构造分带特征;构造长轴方向与断裂走向一致或平行;构造发育位置与断裂位置具有明显的相关性,其规模一般受控于断裂的规模。在剖面上,奥奇克盐底辟位于断裂带内或附近,上覆地层呈穹隆式背斜构造,在底辟核周围被刺穿,盐岩层呈蘑菇状向外扩张,地层常呈掀斜状,其在外观形态上呈葫芦状。盐底辟在出露地表后,受降水和河流的影响,在盐体中心盐溶作用发育,形成特有的“盐喀斯特地貌”,如垂向溶洞,深约数百米,常直通沟底侵蚀基准面。盐底辟顶部的盐溶水从此排泄,形成一种独特的白色盐溪景观(王会萍,2011)。本文基于野外调查、遥

感解译、地震解释和合成孔径雷达干涉测量技术等探讨了奥奇克盐底辟“盐喀斯特地貌”、形成机制及流变模式。

3 奥奇克盐底辟“盐喀斯特地貌”

蒸发岩作为地球上溶解度最高岩石类型之一,其溶蚀形成的“盐喀斯特地貌”是喀斯特地貌的一种重要形式(Johnson, 1997)。“盐喀斯特地貌”在智利(Sesiano, 2006)、西班牙(Lucha et al.,2008)、罗马尼亚、伊朗(Bruthans et al.,2007)和以色列(Frumkin, 1998)等地均有分布,其中以以色列塞多姆山(Mt. Sedom)盐底辟的研究最为深入(Frumkin, 1994, 1996)。库车前陆冲断带西部地表盐构造发育,但缺少对于本区“盐喀斯特地貌”的研究。

“盐喀斯特地貌”与传统的碳酸盐岩喀斯特地貌相比,区别主要表现在以下两个方面:(1)由于蒸

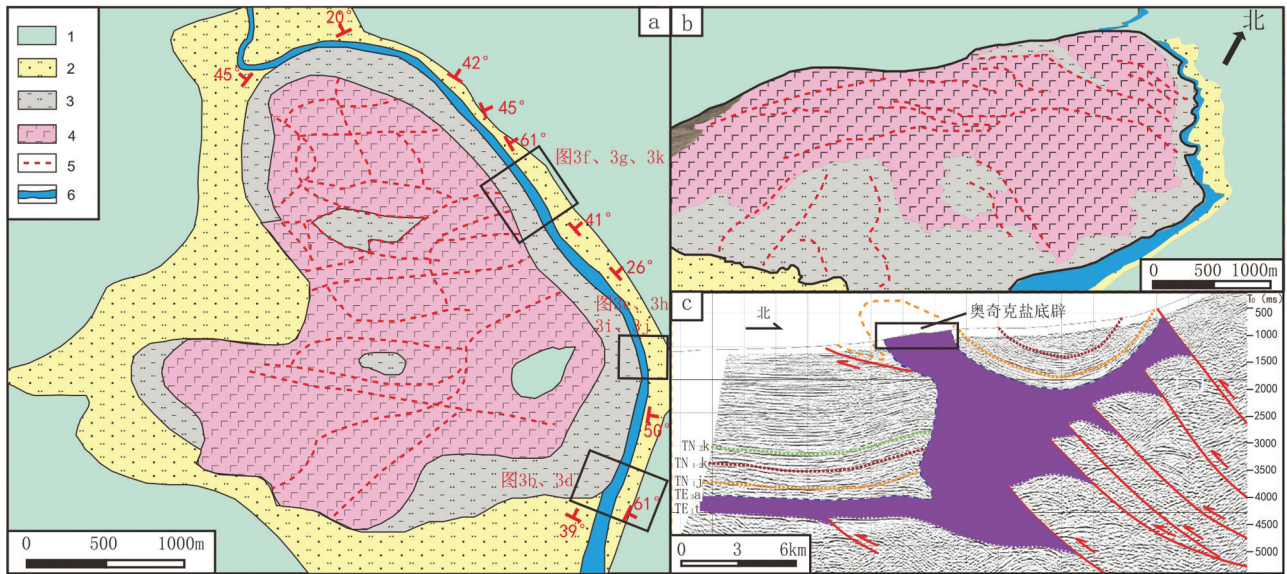


图2 奥奇克盐底辟变形样式图

a—奥奇克盐底辟野外地质填图(据王会萍,2011修改);b—奥奇克盐底辟三维遥感解译图;c—过奥奇克盐底辟南北向地震剖面解释图(剖面位置见图1);1—中新统康村组砾岩、含砾砂岩、砂岩、粉砂岩;2—中新统吉迪克组砂岩、粉砂岩;3—渐新统阿瓦特组含岩泥岩、泥质、膏盐;4—渐新统阿瓦特组表面析出的盐岩;5—岩底辟表面冲沟;6—干河道

Fig.2 Deformation pattern of the Ochirbat salt diapir

a—Field mapping of the Ochirbat Salt Diapir (modified from Wang Huiping,2011); b—3D remote sensing interpretation image of the Ochirbat Salt Diapir; c—Interpretation of a N-S direction seismic profile across the Ochirbat Salt Diapir (the position of the seismic profile is shown in Fig 1). 1—Miocene Kangcun Formation conglomerate, gravel-bearing sandstone, sandstone and siltstone; 2—Miocene Jidique Formation sandstone and siltstone; 3—Oligocene Awat Formation salt-bearing mudstone and gypsum salt; 4—Oligocene Awat Formation salt rock on the surface; 5—Surface gully of salt diapir; 6—Dry channel

发岩和碳酸盐岩溶解度的差异(10°C下石盐、石膏和石灰岩的溶解度分别是357.2 g/L、2.05 g/L和0.013 g/L),盐喀斯特地貌可以在非常短的时间内形成,时间跨度多为数天、数星期,一般不超过数年,而碳酸盐岩喀斯特地貌则需要数年、数十年甚至数百年才能形成。(2)由于盐岩极低的渗透率以及较强的流变性,盐喀斯特地貌主要发育在盐岩表面,而碳酸盐岩喀斯特地貌除在碳酸盐岩表面发育外,还因岩石内部渗流通道和结合面的存在,在碳酸盐岩内部也有发育(Jiri et al.,2010)。

奥奇克盐丘出露地表后,由于降水的溶蚀作用,在盐体的表面发育一层残余的石膏土,导致盐体在外观上呈现棕褐色。表壳石膏土较为松软,未固结成岩,厚度在数厘米至数十厘米。盐底辟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。此外,基于遥感解译和野外填图,在盐底辟表面还可见大量的溶蚀冲沟构造,作为降水排泄的通道(图2a、2b,图3h)。

在奥奇克盐丘靠近河道的一侧,盐底辟地形较

陡,部分区域表面风化壳缺失,盐岩出露地表(图3g、3i、3j),可见最新发育的盐喀斯特地貌类型,其中最常见为梳状溶痕构造(rillenkarren)(图3j)。梳状溶痕发育于裸露的盐岩表面,其形成与降水和随后的流失作用相关,梳状溶痕脊之间的间距在1~2 cm,呈近平行排列。梳状溶痕构造也常见与碳酸盐岩喀斯特地区,但与之相比,盐岩表面的梳状溶痕的溶痕脊更为尖锐,且保留时间较短。常见于碳酸盐岩喀斯特地区的大型峰丛和石林构造在本区不发育,盐岩较大的溶解度导致大型尖锐的溶蚀构造在本区无法长期保存,但可见类似的微型峰丛构造(图3i)。微型峰丛构造高度约在数十厘米,且顶端尖锐,盐峰之间排列紧密,是降水对盐岩溶蚀作用的结果。

此外,由于降水及地表径流导致的坍塌等机械侵蚀也属于“盐喀斯特地貌”的一种类型,在奥奇克盐底辟靠近河道的一侧,溶蚀坍塌现象普遍存在(图3k),坍塌的体积大小不等,最大的坍塌体可达数百立方米,甚至部分阻碍了河水的流动。图3k展

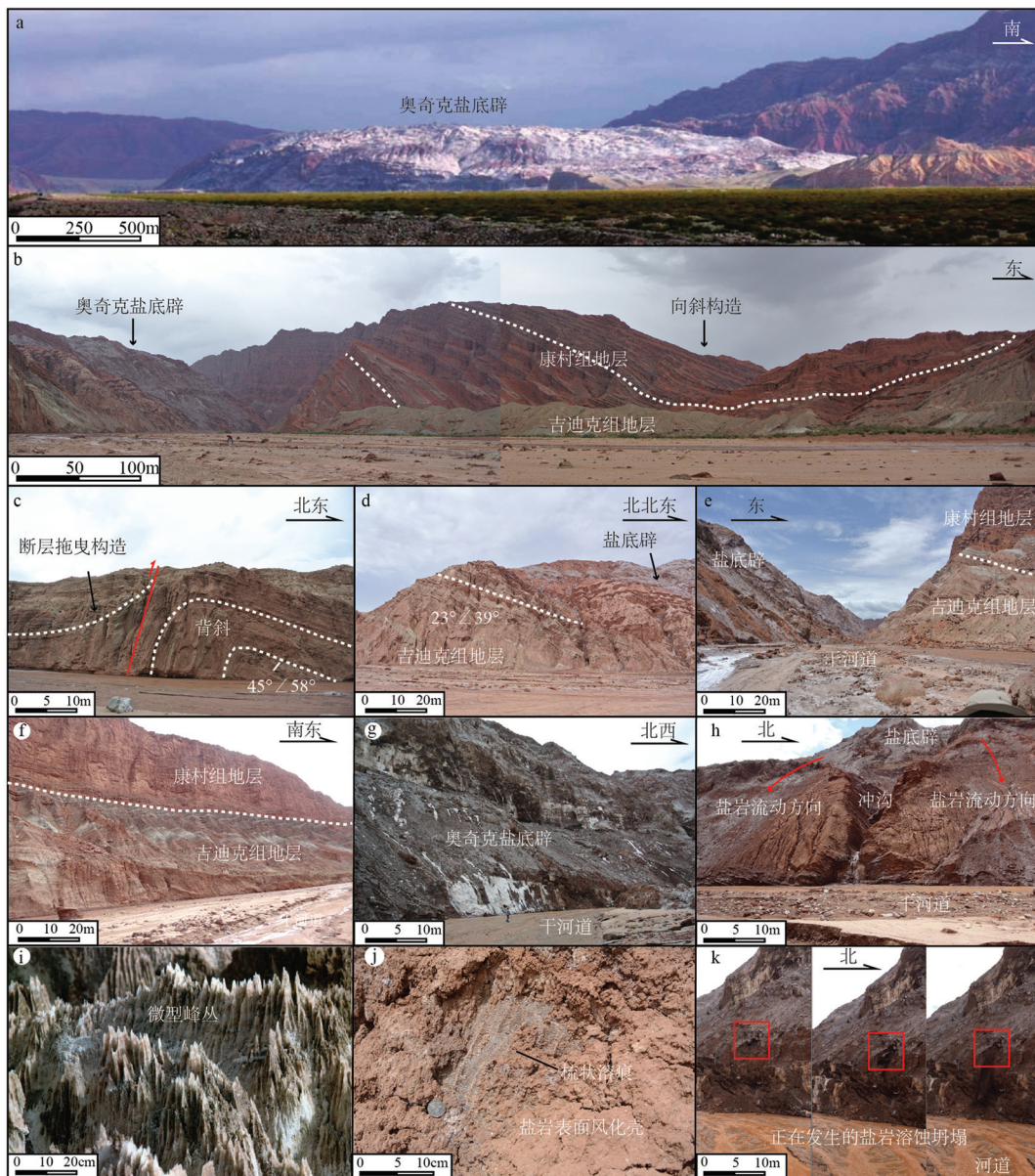


图3 奥奇克盐底辟野外相关照片

a—奥奇克盐底辟整体形态照片(据李丽,2008修改);b—奥奇克盐底辟东南缘野外照片,展示了盐底辟和东部围岩的界线,盐上地层可见明显的向斜构造;c—奥奇克盐底辟南部盐上地层变形特征,可见冲断构造和背斜构造;d—奥奇克盐底辟东南缘野外照片,展示了盐底辟和南部围岩的界线;e—奥奇克盐底辟东缘野外照片,河流限制了盐底辟的边界,盐上地层掀斜构造明显;f—奥奇克盐底辟东部盐上吉迪克组和康村组地层界线;g—奥奇克盐底辟东北缘边界,地形较陡峭,新鲜的盐岩大量出露地表;h—奥奇克盐底辟东缘盐岩流动构造,盐岩表面冲沟发育;i—奥奇克盐底辟表面的微型峰丛构造;j—奥奇克盐底辟表面的梳状溶痕构造;k—奥奇克盐底辟正在发生的溶蚀坍塌构造.图b、d、e、f、g、h、i、j、k的位置可见图2a

Fig.3 Photos of the Ochirbat salt diapir in the field

a—Panorama of the Ochirbat Salt Diapir(modified from the reference Li,2008); b—Field photo of the southeastern edge of the Ochirbat Salt Diapir, showing the boundary between the diapir and the eastern surrounding rocks.Syncline structure can be seen in the surrounding rocks. c Deformation characteristics of the overburden of salt to the south of the diapir. Thrust fault and anticline structure can be seen in this photo. d Field photo of the southeastern edge of the Ochirbat Salt Diapir, showing the boundary between the diapir and the southern surrounding rocks. e Field photo of the eastern edge of the Ochirbat Salt Diapir. The river limits the boundary of the diapir and tilting structure can be seen in the overburden. f Boundary of the Jidike Formation and Kangcun Formation of the overburden on the eastern edge of the diapir. g Field photo showing the northeastern edge of the diapir. The topography is relative steep and fresh salt can be seen in the surface .h Flowing structure in the eastern edge of the Ochirbat Salt Diapir, and gullies can be seen on the weathering surface of the diapir. i rillenkarrn structure on the fresh surface of the diapir. k collapse structure which is happening in the Ochirbat Salt Diapir. The position of the photos b, d, e, f, g, h, I, j, k can be seen in Fig 2a

示了正在发生的溶蚀坍塌现象,坍塌的体积约为 20 m³,持续时间在 5 min 左右。

“盐喀斯特地貌”的形成需要 4 个条件(Jiří et al., 2010):阻碍流水的盐体、未饱和水的供给、水流的逃逸通道和导致水流动的能量。奥奇克盐底辟体的形成改变了季节性河流的流向,对流水起到了阻碍作用,本区未饱和水的供给方式主要是大气降水及北部山区冰川融水形成的季节性河流,盐底辟表面的冲沟和河道为水流提供了逃逸的通道,而导致水流动能量主要是地形差形成的重力势能。在上述条件均满足的情况下,本区“盐喀斯特地貌”发育,成为中国研究“盐喀斯特地貌”最理想的地区之一。

4 奥奇克盐底辟形成机制

王会萍(2011)探讨了奥奇克盐底辟的演化阶段,将底辟体的形成划分为盐岩层沉积期、低幅度盐枕发育期、盐背斜构造发育期、盐底辟构造发展期和盐底辟刺穿扩张期 5 个连续的演化阶段,但缺少对于盐底辟形成的主控因素的探讨(王会萍, 2011)。盐底辟按照形成机制大致可以分为 6 种基本类型,即韧性盐底辟、逆冲盐底辟、再活化盐底辟、侵蚀盐底辟、主动盐底辟和被动盐底辟(Hudec et al., 2007)。

韧性盐底辟较为少见,为盐上地层同为韧性地层,盐岩上涌导致上覆地层发生韧性形变的盐底辟类型;逆冲型盐底辟的形成与逆冲断层密切相关,为盐岩随逆冲断层上升形成的盐底辟类型;再活化盐底辟是上覆地层在区域侧向应力作用下(包括伸展应力作用和走滑拉分作用等)发生减薄,导致盐岩刺穿上覆地层形成的盐底辟类型(Talbot et al. 2009);侵蚀盐底辟为上覆地层在侵蚀作用下发生减薄,导致盐岩刺穿上覆地层形成的盐底辟类型,侵蚀型盐底辟多发生在背斜核部;主动盐底辟为盐岩较厚而上覆岩层较薄的情况下,盐岩主动隆升并刺穿上覆岩层形成的盐底辟类型,被动盐底辟是盐岩出露地表后,上部无负载的底辟形式。实际中的盐底辟多为多种因素共同作用的结果,在不同的发育阶段,可能属于不同的底辟类型。

奥奇克盐底辟为点状盐底辟,在形态上呈近椭圆形,发育在盐背斜核部,盐岩刺穿上部地层向周缘流动。基于地质图和野外调查可以看出(图 1,图

2a),从盐底辟体向外,依次为中新统吉迪克组和新统康村组(图 3e、3f),且围岩地层基本呈辐射状向外倾斜(图 2a,图 3b、3e)(南部部分地层除外,应为后期挤压作用导致的地层反转(图 3d)),为盐岩底辟上升过程中,导致周缘地层发生掀斜作用的结果。盐上地层在挤压作用下发生强烈的滑脱变形,发育向斜、背斜甚至冲破断层等构造样式(图 3b、3c)。

在前人研究的基础上,结合过底辟体的南北向地震剖面可以对奥奇克盐底辟形成机制进行探讨(图 2c),在近南北向挤压应力的作用下,盐岩作为区域的滑脱层,盐上发育多个滑脱褶皱,在褶皱-冲断带的前缘发育阿瓦特逆冲断层(图 1,图 2c)。奥奇克盐底辟虽然并非和本区的却勒盐推覆体一样随逆冲断层出露地表(Li et al., 2014),但南缘阿瓦特断层的发育也对底辟的早期演化起到了重要的影响,逆冲断层的发育是盐岩层早期抬升的机制(吴珍云等, 2015),因而奥奇克盐底辟在演化的最早期阶段也属于逆冲盐底辟;随着挤压作用的继续,断层面上盘持续抬升,且盐上层滑脱变形加剧,盐岩在背斜的核部聚集,地形的抬升导致背斜核部的侵蚀加剧,盐上地层逐渐减薄,盐底辟在此阶段属于侵蚀盐底辟;当盐上地层厚度小于底辟临界厚度(piercement threshold)时,盐岩可以在重力差异负载和浮力的作用下刺穿上部地层(Jackson et al., 1994; Warren, 2006),盐底辟在此阶段属于主动盐底辟;现今的奥奇克盐底辟已经刺穿地表,处于被动盐底辟阶段,在盐岩供给稳定的前提下,盐岩可以源源不断的上涌,在底辟体的周缘形成盐冰川。

综上所述,奥奇克盐底辟在发育过程中,并非单一因素作用的结果,共经历了逆冲盐底辟、侵蚀盐底辟、主动盐底辟和被动盐底辟 4 个主要阶段,区域挤压应力形成的逆冲断层、盐上地层的剥蚀作用、差异负载作用及盐岩自身的浮力作用均是影响奥奇克盐底辟发育的重要因素。

5 奥奇克盐底辟流变模式

合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)结合了合成孔径雷达成像技术和干涉测量技术,是以同一地区的两张合成孔径雷达图像为基本处理数据,通过求取两幅合成孔径雷达图像的相位差,获取干涉图像,然后

经相位解缠,从干涉条纹中获取地形高程数据的空间对地观测新技术(Zebker et al.,1986;Rosen et al.,2000)。由于InSAR可以对地表微小的垂向位移进行监测,近十年来InSAR技术被应用于盐构造变形研究中,Weinberger et al.(2006)基于InSAR技术测量了死海Mount Sedom盐底辟不同部位盐岩的喷出速率;Aftabi et al.(2010)、Baikpour et al.(2010)、Barnhart and Lohman(2012)等也基于InSAR技术对扎格罗斯前陆冲断带不同盐底辟的隆升和沉降速率进行了监测。

Aftabi et al.(2010)通过对扎格罗斯前陆冲断带Syahoo盐底辟超过14 a间(1992—2006年)的合成孔径雷达干涉图像的研究,建立了在地下盐岩供给稳定的条件下,点状盐底辟合成孔径雷达干涉图像(平面图)和盐底辟流变模式(剖面图)之间的关系(图4a)(Aftabi et al.,2010)。图4a(1)展示了简单隆升盐底辟的垂向变化的平面模式图和相应的流变剖面图。该类盐底辟在平面上表现为盐底辟的中心区为宽广的隆升区而盐底辟的周缘则为大范围的沉降区,盐底辟在剖面上表现为类似喷泉的形态,周缘的沉降则与重力传播作用和盐冰川的侧向流动有关;当盐底辟处于干旱环境下时,盐底辟表面的风化壳变得强硬,在风华壳的限制下,盐穹隆的中心区发生大范围的沉降,周缘盐冰川的流动速率变缓,导致盐底辟在剖面形态上相比简单隆升盐底辟变得更为平直,不同部位发生不等量的隆升或沉降,因此在平面上表现为中心为沉降区的多个同心圆样式(图4a(2));当盐底辟再次处于潮湿环境下时,盐底辟表面的风化壳重新变得软弱,盐底辟发生再活化,盐岩流动速率增加,盐底辟在剖面上变得更有曲度,变形样式与干旱条件下基本相反,在平面上呈现出中心为隆升区的多个同心圆样式(图4a(3))。无论在干旱条件还是潮湿条件下,盐底辟的最外缘均发生隆升,但二者的机制截然不同,干旱条件下,强硬的风化壳限制了边缘盐冰川的流动,导致垂向上堆积,而在潮湿条件下,风化壳变得软弱,盐冰川向前流动,导致盐岩在新的地形上堆积。

图4b展示了基于欧空局数据通过InSAR技术得到的2003年6月—2010年10月间奥奇克盐底辟的平均垂向变化(Colón et al.,2016)。从图中可以看出,奥奇克盐底辟体的东部表现为大范围的隆升

区,在隆升区的内部存在数个东西向条带状的沉降区。从底辟体的东部向南部、西部和西北部,逐渐过渡为大范围沉降区,季节性河流对盐底辟形态的影响作用明显,由于河水对盐岩的侵蚀作用,盐底辟无法越过河道向另一侧流动,故河道的另一侧地表在垂向上基本不发生变化。奥奇克盐底辟垂向变化的平面图大致可与图4a(1)中的类比,基本表现为盐底辟的核部为大范围的隆升区,而周缘为大范围的沉降区,但季节性河流的存在导致底辟的另一侧被截切。奥奇克盐底辟隆升区内部呈条带状展布且近乎平行的沉降区,基本上与图2b中盐底辟表面冲沟的位置相对应,应为冲沟附近盐岩流失导致的沉降。

在图4b的基础上,参考图4a(1)剖面模型,可以建立奥奇克盐底辟剖面上的流变模式(图4c)。奥奇克盐底辟在背斜核部出露地表,周缘盐上地层发育向斜构造,地下盐岩通过泊肃叶流的模式向盐底辟处进行补给(Davison et al.,1996)。由于地下盐岩供给稳定,盐岩在差异负载和浮力的作用下源源不断的出露地表,在喷口附近形成盐穹隆,同时由于盐岩的塑性流变特性,盐岩在重力作用下由核部向四周流动形成盐冰川。但季节性河流的存在,限制了盐底辟向东侧、东北侧及北侧传播,因此奥奇克盐底辟在剖面上并非呈现理想的喷泉状形态,而是呈现单侧增生的样式。盐底辟在靠近河道的一侧并非不发生流动,可见大量的盐岩流动构造(图3h)和溶蚀塌陷现象(图3k),但流水的溶解作用导致盐底辟边界在该侧变化不大,并呈现出陡峭的地形(图3g)。此外,降水作用导致盐底辟表面风化严重,在盐底辟表面形成数十厘米厚的残余表壳土,表壳土的存在对盐岩流动起到了限制作用。而在强降水作用下,盐岩表面的表壳土溶解或弱化,盐岩在强硬外壳的限制下积累的能量快速释放,盐岩的流动速率会迅速增大。由于盐内存在少量的石膏及泥岩夹层,且上述能干层多不连续,盐内能干层随盐岩流动发生变形,形成复杂的褶皱样式(王洪浩等,2016)。

6 结 论

(1)奥奇克盐底辟“盐喀斯特地貌”发育,是中国研究“盐喀斯特地貌”最理想的地区之一。在风化面上可见大量的溶洞及溶蚀冲沟构造,在靠近河

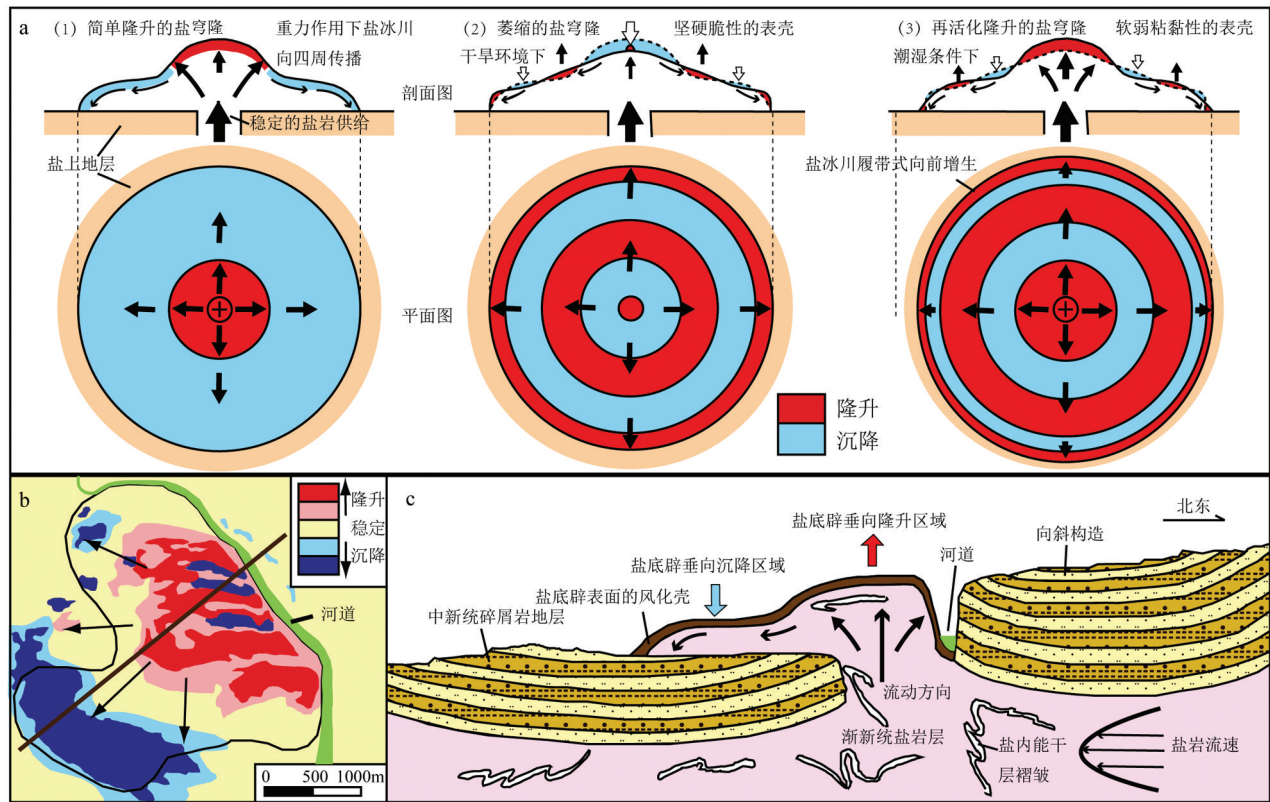


图4 奥奇克盐底辟流变模式图

a—InSAR 图像与盐底辟流变剖面对应关系模型(据 Aftabi et al., 2010 修改); b—奥奇克盐底辟 2003 年 6 月—2010 年 10 月间平均垂向变化; c—奥奇克盐底辟流变剖面(剖面位置可见图 4b)

Fig.4 Rheological model of the Ochirbat salt diapir

a—Model of the corresponding relationship between the InSAR images and rheological profiles of diapirs(modified from Aftabi et al.,2010). b—Average vertical change of the Ochirbat Salt Diapir from 2003.6 to 2010.10. c—Rheological profile of the Ochirbat Salt Diapir (the position of the profile can be seen in Fig 4b)

道的新鲜面上可见梳状溶痕、微型峰丛等构造样式,此外,溶蚀坍塌构造也是本区常见的盐喀斯特构造类型。奥奇克盐底辟出露地表后,满足盐喀斯特地貌形成的 4 个条件:底辟体对季节性河流起到了阻碍作用;大气降水及季节性河流是本区未饱和水的供给方式;盐底辟表面的冲沟和河道为水流提供了逃逸的通道,而导致水流动能主要是地形差形成的重力势能。

(2)奥奇克盐底辟呈近椭圆状出露,对周缘地层掀斜作用明显,在底辟发育的过程中,区域挤压应力形成的逆冲断层、盐上地层的剥蚀作用、差异负载作用及盐岩自身的浮力作用均是影响奥奇克盐底辟发育的重要因素。盐底辟的发育过程共经历了逆冲盐底辟、侵蚀盐底辟、主动盐底辟和被动盐底辟 4 个主要阶段。

(3)依据奥奇克盐底辟地区合成孔径雷达干涉

图像的研究,可以建立奥奇克盐底辟的流变模式。盐底辟在出露地表后,在喷口附近形成盐穹隆,同时由于盐岩的塑性流变特性,盐岩在重力作用下由核部向四周流动形成盐冰川。但季节性河流的存在,限制了盐底辟向东侧、东北侧及北侧传播,因此奥奇克盐底辟在剖面上并非呈现理想的喷泉状形态,而是呈现单侧增生的样式。但盐底辟在靠近河道的一侧并非不发生流动,可见大量的盐岩流动构造和溶蚀坍塌现象,但流水的溶解作用导致盐底辟边界在该侧变化不大,并呈现出陡峭的地形。

References

Aftabi P, Roustaei M, Alsop G I, Talbot C J. 2010. InSAR mapping and modelling of an active Iranian salt extrusion[J]. Journal of the Geological Society, 167(1):155-170.
 Baikpour S, Zulauf G, Dehghani M, Bahroudi A. 2010. InSAR maps and time series observations of surface displacements of rock salt

- extruded near Garmsar, northern Iran[J]. *Journal of the Geological Society*, 167(1): 171–181.
- Barnhart W D, Lohman R B. 2012. Regional trends in active diapirism revealed by mountain range– scale InSAR time series[J]. *Geophysical Research Letters*, 39(8):89–106.
- Bruthans J, Asadi N, Filippi M, Vilhelm Z, Zare M. 2007. A study of erosion rates on salt diapir surfaces in the Zagros Mountains, SE Iran[J]. *Environmental Geology*, 53(5):1079–1089.
- Chen Shuping, Tang Liangjie, Jia Chengzhao, 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).
- Colón C, Webb A A G, Lasserre C, Doin M P, Baudoin P F. 2016. The variety of subaerial active salt deformations in the Kuqa fold– thrust belt (China) constrained by InSAR[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 450:83–95.
- Davison I, Alsop I, Blundell D. 1996. Salt tectonics: Some aspects of deformation mechanics[J]. *Geological Society London Special Publications*, 100(1):1–10.
- Frumkin A. 1994. Hydrology and denudation rates of halite karst[J]. *Journal of Hydrology*, 162(1–2):171–189.
- Frumkin A. 1994. Morphology and development of salt caves[J]. *National Speleological Society Bulletin*, 56:82–95.
- Frumkin A. 1996. Structure of northern Mount Sedom salt diapir (Israel) from cave evidence and surface morphology[J]. *Israel Journal of Earth Sciences*, 45(2):73–80.
- Frumkin A. 1998. Salt cave cross– sections and their paleoenvironmental implications[J]. *Geomorphology*, 23(2/4):183–191.
- 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).
- Jackson M P A, Vendeville B C. 1994. Regional extension as a geologic trigger for diapirism[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 106(1):57–73.
- Jiří Bruthans, Filippi M, Zare M, Churackova Zdenka, Asadi N, Fuchs M, Adamovic Jiri. 2010. Evolution of salt diapir and karst morphology during the last glacial cycle: Effects of sea– level oscillation, diapir and regional uplift, and erosion (Persian Gulf, Iran)[J]. *Geomorphology*, 121(3):291–304.
- Johnson K S. 1997. Evaporite karst in the United States[J]. *Carbonates & Evaporites*, 12(1):2–14.
- 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 Li. 2008. Research and development conception of salt dome geological relics in Wensu area, Xinjiang[D]. Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Li Yanyou, Qi Jiafu. 2012. Salt– related contractional structure and its main controlling factors of Kelasu structural zone in Kuqa depression: Insights from Physical and numerical experiments[J]. *Chinese Journal of Geology*, 47(3): 607– 617 (in Chinese with English abstract).
- Lucha P, Cardona F, Gutiérrez F, Guerrero J. 2008. Natural and human– induced dissolution and subsidence processes in the salt outcrop of the Cardona Diapir (NE Spain) [J]. *Environmental Geology*, 53(5):1023–1035.
- 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 Shuijiang. 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).
- Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, Li F K, Madsen S N, Rodriguez E, Goldstein R M. 2000. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of the IEEE*, 88(3):333–382.
- Sesiano J. 2006. Evolution actuelle des phénomènes karstiques dans la Cordillera de la Sal (Atacama, Nord Chili)[J]. *Karstologia*, 47:49–54.
- Talbot C J, Pohjola V. 2009. Subaerial salt extrusions in Iran as analogues of ice sheets, streams and glaciers[J]. *Earth– Science Reviews*, 97(1/4):155–183.
- Tang Liangjie, Yu Yixin, Yang Wenjing, Peng Gengxin, Lei Ganglin, Jin Wenzheng. 2006. Internal deformation features of detachment layers in the front of the Kuqa 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).
- Wang Honghao, Li Jianghai, Li Weibo, Huang Shaoying, Neng Yuan. 2016. Deformation behavior of underground salt rock in Kuqa

- Kelasu tectonic zone[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 23(4):20–24 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huiping. 2011. Ochirbat salt diapiric structure and hydrocarbon accumulation in the canyon of Xinjiang Wensu county[J]. *Journal of Xi'an University of Science & Technology*, 31(1):59–63(in Chinese with English abstract).
- 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 Zhaoming, Wang Tingdong, Xiao Zhongyao, Xu Zhiming, Li Mei, Lin Feng. 2002. Migration and accumulation of natural gas in Kela-2 gas field [J]. *The Chinese Science Bulletin*, z1: 103–108 (in Chinese with English abstract).
- Warren J K. 2006. Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons[M]. Springer Science & Business Media.
- Weinberger R, Waldmann N, Frumkin A, Gardosh M, Wdowski S. 2006. Quaternary rise of the sedom diapir, Dead Sea basin[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 401: 33–51.
- 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).
- Wu Zhenyun, Yin Hongwei, Wang Xin, Xu Shijin. 2015. The structural features and formation mechanism of exposed salt diapirs in the front of fold–thrust belt, western Kuqa depression[J]. *Journal of Nanjing University*, (3): 612–625(in Chinese with English abstract).
- Yin Hongwei, Wang Zhe, Wang Xin, Wu Zhenyun. 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, 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 kuga foreland fold–and–Thrust belt in the Northern Tarim basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(3):330–336(in Chinese with English abstract).
- Zebker H A, Goldstein R M. 1986. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 91(B5):4993–4999.
- 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 Petrolei 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.
- 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.
- 李丽. 2008. 新疆温宿地区的盐丘地质遗迹研究及开发构想[D]. 长安大学.
- 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
- 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. 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.
- 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.
- 王洪浩, 李江海, 李维波, 黄少英, 能源. 2016. 库车克拉苏构造带地下盐岩变形特征分析[J]. *特种油气藏*, 23(4):20–24.
- 王会萍. 2011. 新疆温宿峡谷盐底辟构造与油气聚集[J]. *西安科技大学学报*, 31(1):59–63.
- 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*, z1: 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.
- 吴珍云, 尹宏伟, 汪新, 徐士进. 2015. 库车坳陷西段褶皱–冲断带前缘盐底辟构造特征及形成机制[J]. *南京大学学报(自然科学)*, (3): 612–625.
- 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, 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.
- 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.