第34卷第5期:547-558

www.cagsbulletin.com www.地球学报.com

# 库车前陆盆地古近纪一新近纪盐湖环境变迁 及其成钾效应探讨

刘成林1, 曹养同1, 杨海军2, 焦鹏程1, 顾乔元2)

1)中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037; 2)塔里木油田公司勘探开发研究院,新疆库尔勒 841000

摘 要: 库车前陆盆地古近纪一新近纪发育巨厚的蒸发岩沉积。古新世, 盐湖沉积主要集中在库车盆地西部拜城凹陷的中东部; 始新世, 盐湖沉积扩展至整个拜城凹陷, 沉积中心和蒸发浓缩中心位于其北部; 新新世, 盐湖沉积仍然分布于拜城凹陷, 但沉积和浓缩中心已从北部迁移到南部, 改变了此前"南浅北深"的箕状盆地构造格局; 中新世, 盆地沉积中心已从西部的拜城凹陷转移到东部的阳霞凹陷, 盐湖沉积区也随之迁移到东部, 浓缩中心呈串珠状分布。库车前陆盆地古近纪—新近纪环境变迁显示, 盆地次级凹陷的发育、迁移明显受控于盆地构造演化; 而盆地构造活动在制约盐湖岩相古地理面貌(沉积中心、物质来源与浓缩中心等)变迁的同时, 亦对盐湖晚期富钾卤水的再汇集过程具有明显的控制作用, 进而对随后可能的钾盐沉积起到决定性作用。进一步分析表明, 库车前陆盆地古近系—新近系蒸发岩序列中钾离子在横向上的富集势亦明显受控于这一时期盆地岩相古地理的变迁, 即在盐岩沉积面积、厚度大的凹地出现钾离子相对富集。而西部拜城凹陷, 钻孔(始新统)盐岩岩屑的钾离子含量从下向上逐渐增高的趋势, 峰值分别为 1.07%、1.43%、3.05%; 东部凹陷钻孔(中新统)盐岩岩屑钾离子含量由下向上亦呈增高趋势, 最低值 0.008%, 最高值为 0.152%等证据表明, 地层中钾离子纵向上的富集趋势, 则正是始于对岩相古地理面貌变迁的地球化学响应。综上所述, 认为库车前陆盆地具有钾盐成矿远景: 始新世时期, 库车盆地西部凹陷的蒸发浓缩中心区成钾远景相对较好;中新世时期, 有利的成钾区可能转移到东部凹陷的浓缩中心区。

关键词: 塔里木; 库车前陆盆地; 古近纪; 新近纪; 蒸发岩

中图分类号: P588.247; P534.6; P512.32 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2013.05.05

# Discussion on Paleogene-Neogene Environmental Change of Salt Lakes in Kuqa Foreland Basin and Its Potash-forming Effect

LIU Cheng-lin<sup>1)</sup>, CAO Yang-tong<sup>1)</sup>, YANG Hai-jun<sup>2)</sup>, JIAO Peng-cheng<sup>1)</sup>, GU Qiao-yuan<sup>2)</sup>

- 1) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
- 2) Institute of Exploration and Development, Tarim Oil and Gas Branch Company, Korla, Xinjiang 841000

Abstract: Evaporites with large thickness were formed in Kuqa foreland basin during Paleogene-Neogene period. The paleo-salt lake deposits during Paleocene were mainly distributed in central and estern Baicheng depression in the west of Kuqa Basin; then the paleo-salt lake deposits expanded into almost entire Baicheng

本文由国家 "973" 计划项目(编号: 2011CB403007)、国家科技支撑计划课题(编号: 2006BAB07B06)和塔里木油田公司科技项目(编号: 41005050002)联合资助。

收稿日期: 2013-05-20; 改回日期: 2013-06-30。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介:刘成林, 男, 1963 年生。研究员, 博士生导师。主要从事钾盐、盐湖及沉积矿床等研究。E-mail: liuchengl@263.net。

depression and both depocenter and brine enrichment center of salt lake located in the north part during Eocene; after that the salt lake deposits were still distributed in the most of the depression during Oligocene, but evaporites and brine enrichment center had already moved to its south, and hence the previous tectonic pattern of the half-graben basin characterized by "deep in the north and shallow in the south" was remarkably altered; finally, with the migration of the depocenter from Baicheng depression to Yangxia depression in the east of the basin during Miocene, the salt lake sediments also moved eastward. The brine enrichment centers occured as bead distribution during Paleocene to Miocene. The evolution of paleogeography of Kuqa basin indicated that the development and migration of sub-depression was strongly influenced by tectonic activities in the baisn, which controled the paleogeography of salt lake (e.g. depocenter, material source and brine enrichment center) and might have played an important role in the later potential formation of potash deposits. Further analysis reveals that enrichment tendency for potassium in evaporite sequence also controlled obviously by the paleogeographic changes of the Basin, namely, potassium enrichments should have occurred in the regions with large area and great thickness of the salt deposits. The fact that, potassium content of salt rock cuttings in some oil drill holes gradually increased from the bottom to the top, for example, in the western Baicheng depression, the maximum values of potassium content are 1.07%, 1.43%, 3.05% upward in one drill hole, and in the eastern Yangxia depression, the potassium content varies from 0.008% to 0.152%, was just the geochemical response to the enrichment trend of potassium content controlled by change of lithofacies and paleogeography in the paleo-salt lake. From the above, it can predict that the Kuqa foreland basin has good potash metallogenic prospects, which might exist in brine enrichment center of Baicheng depression in Eocene time and probably migrate to the center of Yangxia depression in Miocene time.

Key words: Tarim; Kuqa foreland basin; Paleogene; Neogene; evaporite

海相及海陆交互相蒸发岩盆地,按照 Miall (1984)分类,可以分为:克拉通盆地(克拉通背景)、前陆盆地(板块碰撞背景)、大陆裂谷盆地(离散背景)等类型。上述不同类型盆地在钾盐沉积规律上常常表现出一定差异。前陆盆地,又称山前坳陷,指介于山系前缘及相邻克拉通之间的沉积盆地(Dickinson,1974);其通常形成于挤压构造背景之下,具有构造活动性强,不稳定的特征。勘探实践表明,前陆盆地常常发育蒸发岩沉积,如中东的扎格罗斯盆地、西加拿大盆地(Macqueen et al., 1992)等,而盆地内蒸发岩及钾盐沉积则往往具有以下特征:蒸发岩沉积不仅受大地构造环境、盆地基地凸凹起伏控制,且其古地理环境、沉积中心、浓缩中心及其"次级深凹"等改变产生的叠加效应,可能对盐湖晚期富钾卤水迁移、汇聚和成钾产生深远影响。

库车盆地位于新疆塔里木盆地西北缘(图 1)。 古新世—始新世,库车盆地受到来自西部的海侵 (刘群等,1987;地质矿产部矿床地质研究所,1980), 基本属于海陆交互相,渐新世海水退出。古近纪— 新近纪,库车盆地干旱炎热,以库车河为界,可以 分为东部的阳霞凹陷和西部的拜城凹陷,西部拜城 凹陷为浅湖和滨湖环境,阳霞凹陷主要为冲积扇和 三角洲所占据。中新世早、中期,盆地古地理面貌 发生了转变,由先前"西低东高",转变为"西高

东低",东部成为主要汇水区。盆地古近系以发育 盐岩、膏岩、膏泥岩、泥岩为主要特征, 为干旱气 候条件下蒸发咸湖、盐湖环境的产物。地层岩性特 征及岩石组合类型表明, 古近纪时期库车盆地西部 曾经历多次间歇性海侵以及咸化期, 从而形成多套 蒸发岩沉积旋回。中新世吉迪克时期, 沉积中心向 东迁移至阳霞凹陷, 地层岩性主要以泥膏岩、石膏 岩、盐岩、泥岩为主, 厚度达 2000 m。上述地质条 件说明盆地蒸发岩的发育受干旱气候、构造差异沉 降和成盐物质供给等多种因素控制。盆地中盐岩层 厚度巨大, 表明盆地具有较好的成钾潜力。20世纪 80 年代初, 在库车盆地古近系石盐层中发现次生 光卤石(刘群等, 1987; 地质矿产部矿床地质研究所, 1980), 为盆地内第三系地层钾盐找矿提供了线索。 近年来, 库车盆地盐丘露头和石油钻井岩屑的石盐 晶间微细粒中钾石盐、光卤石、钾芒硝等多种钾盐 矿物的陆续发现(刘成林等, 2008, 2009a, b), 以及 盆地蒸发岩地球化学、构造演化、沉积特征与成钾 资源量模型预测研究(谭红兵等, 2004; 许建新等, 2006; 唐敏等, 2009; 曹养同等, 2010a, b), 进一步 表明库车前陆盆地古近纪一新近纪盐湖具备成钾 的条件与潜力。

为了深入研究库车盆地古盐湖沉积环境演化与 成钾作用,本文在充分收集石油与地质勘查、科研 成果基础上,首次编制库车盆地古近纪—新近纪盐湖沉积的"岩相古地理图",以此为基础讨论库车前陆盆地盐湖浓缩中心迁移与成钾远景。

# 1 地质背景

库车盆地属于塔里木北缘的一部分,与西南天山构造带相邻;盆地基底岩石圈物质组成主要为中性岩、基性岩、变质岩,发育一些大型逆冲推覆构造,形成于新生代印度—欧亚板块碰撞的动力学背景(贾承造,1996)。因南天山向南逆冲,使库车盆地底板向北倾斜,自三叠纪以来,总体上保持一个向北倾斜的"箕状"盆地的状态(孙家振等,2003)。始新世末,库车盆地受印度板块和欧亚板块碰撞产生的远距离效应影响(郭令智等,1992);渐新世晚期,塔里木板块再次向天山构造带俯冲,库车前陆盆地再次复活并接受沉积(贾承造,1992;卢华复等,1996)。

库车盆地古近纪—新近纪发育巨厚的蒸发岩沉 积, 蒸发岩沉积与特提斯构造域构造事件、海浸一 海退旋回等紧密相关。早白垩世早期, 新特提斯洋 壳向北俯冲, 弧后扩张作用使得西部原黑海—里海 残余洋盆扩大(弧后盆地), 滨里海地区海侵范围再 次扩大; 早白垩世晚期, 海侵到达塔里木盆地西南 部,此时中亚盆地与塔里木的莎车盆地发育不同类 型的海相层序(杨树锋等, 2002)。晚白垩世晚期, 新 特提斯洋关闭,并向北俯冲拉萨地体之下,发生海 退, 库车盆地出现沉积间断, 缺失上白垩统地层, 这种缺失与晚白垩世 Kohistan-Dras 岛弧与拉萨地体 碰撞有关(Graham et al., 1993)。古新世—始新世, 海 侵范围再一次扩大,海水到达库车盆地,库车盆地 中库姆格列木群出现海相化石(地质矿产部矿床地 质研究所, 1980)。渐新世, 受印度—亚洲碰撞产生的 远距离效应影响,退出库车盆地(库车盆地苏维依组 仅发育少量的膏、泥岩沉积)。中新世初,印度—拉萨板块持续碰撞使得帕米尔凸起向北西西逆冲,阿莱依地堑隆升,塔里木盆地与阿富汗—塔吉克盆地完全分割(Searle., 1991, 1996)。但也有学者根据生物化学记录认为,中新世时期塔里木西部,甚至北部的库车凹陷还受到海侵影响(郭宪璞等, 2002)。总之,尽管塔里木盆地西部受到海侵的时代仍有争议,但对古近纪库车盆地的海侵事件认识比较一致,这种海水自西向东补给的古地理格局,对于库车古近纪及新近纪成盐成钾有重要的影响。

库车盆地古近系—新近系地层发育连续,自下而上可依次划分为古近系库姆格列木群(E<sub>1-2</sub>k)、苏维依组(E<sub>2-3</sub>s),新近系吉迪克组(N<sub>1</sub>j)、康村组(N<sub>1-2</sub>K)及库车组(N<sub>2</sub>K)(图 2)。古近系沉积环境主要为河湖相(张丽娟等,2006),其下部库姆格列木群发育巨厚的蒸发岩沉积,上部为少量盐岩、膏岩、细砂岩、粉砂岩及泥岩沉积。新近系下部为河湖相-盐湖相沉积,上部为山麓相洪积,洪积物主要为砾岩、含砾砂岩、粉砂岩夹泥岩。盆地古近系—新近系地层发育大量的盐岩和膏岩,北部克拉苏—依奇克里克背斜带及南部秋里塔格背斜带核部出露古近系库姆格列木群盐岩(表现为盐丘地貌),地表发育多处盐泉及结晶盐壳。

# 2 研究方法

#### 2.1 样品采集与分析方法

本次研究以钻井岩屑为主要对象。在分析测试之前,结合钻井岩屑编录情况,对钻井岩屑采集,人工挑选出较纯的石盐岩(片、粒)。其中 DN-102 井岩屑挑出盐岩屑样品 256 件; XQ-2 井挑选出盐岩屑样品 375 件。

本次样品测试工作由中国地质科学院矿产资源 研究所外生地球化学实验室完成。其中盐岩岩屑样

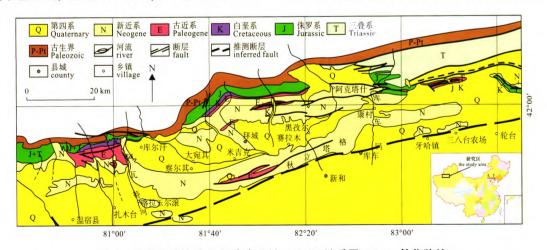


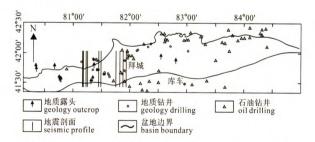
图 1 库车盆地地质图(据库车盆地 1: 20 万地质图, 1967, 简化改编)
Geologocal map of Kuqa basin (simplified after 1:200000 Geological Map of Kuqa Basin, 1967)

品钾、镁、锶含量利用水溶法,溶解样品,再用原子吸收仪(国产瑞利 WFX-130)分析测试; 氯用容量法分析、溴用比色法。

## 2.2 岩相古地理数据获取方法

收集、分析库车盆地内 77 口含石盐和石膏的钻井(石油钻井和钾盐地质钻井等)、11 条露头剖面(累计 3400 m)和 10 条地震剖面资料(图 2),通过提取(度量)钻孔柱状图、剖面图中盐岩(石盐岩)、膏岩(石膏岩)、含膏泥岩、含盐(石盐)泥岩、泥岩、砂岩、砾岩、白云岩、灰岩的厚度、顶底板高程,同时获取钻孔与剖面大地坐标等指标参数,并按地层层位整理、获得库车盆地古近系—新近系蒸发岩性的空间参数 2 万多组。基于这些数据,尝试"定量化"研究库车盆地蒸发岩沉积环境演化,以获得有利于成钾的岩相古地理"指标参数"。

另外,依据蒸发岩沉积韵律及旋回划分,将库车盆地古近系—新近系(吉迪克组)共划出 5 期蒸发岩沉积旋回,其中库姆格列姆群 2 期( $I_1$ 、 $I_2$ 沉积旋回),苏维依组 1 期( $I_3$ 沉积旋回),吉迪克组 2 期( $I_4$ 、 $I_5$ 沉积旋回),我们认为这 5 期蒸发岩沉积旋回与地层层位存在对应关系(表 1)(刘成林等, 2009a),据此进行地层单位细分,以便按时代编图和进行古地理演变分析。



#### 图 2 库车盆地岩相古地理编图数据来源的钻孔 及剖面分布

Fig. 2 Distribution of sections and drill holes for compiling lithofacies paleogeographic map of Kuqa basin

#### 表 1 库车盆地古近系一新近系蒸发岩沉积旋回与地层 层位对应关系

Table 1 Corresponding relationship between evaporite sedimentary cycles and stratigraphic horizons from Paleogene to Neogene

传统地层层位划分		蒸发岩沉积 旋回	本文采用地层层位 划分 (刘成林等, 2009a)
新近 系(N)	吉迪克组(N <sub>i</sub> j)	I,沉积旋回 中新统 I,沉积旋回	
	苏维依组(E2-38)	I <sub>3</sub> 沉积旋回	渐新统
古近	库姆格列姆群	I <sub>2</sub> 沉积旋回	始新统
系(E)	$(E_{1-2}k)$	I <sub>1</sub> 沉积旋回	古新统

#### 2.3 数据处理方法

编图的基本思路类似"单因素分析多因素综合作图法——定量岩相古地理重建"的方法(冯增昭,2004)。应用 SUFER 软件,分别编制盆地砂岩、泥岩、碳酸盐岩、膏岩、含膏泥岩、盐岩及含盐泥岩等岩性等厚度分布趋势图;在考虑盆地新生代的构造背景的同时,将各类型等值线图叠加,编制出"库车盆地盐湖沉积岩相古地理图"。需要说明的是,由于库车盆地在新生代曾遭受到强烈挤压变形、逆冲,盐层发生塑性流动等,此时的岩相分布与原型盆地的岩相分布特征可能已有较大的差异,因此本文编出的"岩相古地理图"与真正意义上的岩相古地理图有一定差异。然而,岩相总体分布规律及其相互关系,应该基本保留,据此,进行古盐湖岩相古地理分析研究,对于钾盐找矿和油气成藏勘探仍具有重要意义。

#### 2.4 古盐湖沉积环境分析原理

海相盐类沉积的典型模式是"牛眼式"和"泪滴式"(Schmalz, 1966)。封闭的陆相盐湖沉积环境,由冲积-洪积扇、冲积平原及三角洲、盐(膏)泥坪、盐坪(或干盐滩)及盐盘(残余卤水湖沉积纯盐层)构成(Hardie et al., 1978; 沈振枢等, 1991),图 3 展示了典型的陆相盐湖沉积环境分布规律。本次岩相古地理分析正是基于上述理论模式开展的。

#### (1)盐(膏)泥坪

盐(膏)泥坪是位于冲-洪积扇底以下至盐湖滨岸或盐坪之间的环盐湖的平原地带。沉积物主要是由洪水席状流带来的粉砂和泥,也可以是湖水收缩时出露地表的粉砂泥质湖底或浅湖沉积物。由于气候干旱,沉积物表面因毛细管蒸发作用,常常形成薄盐霜,主要是石盐或石膏。

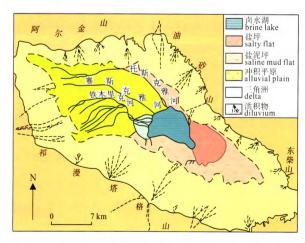


图 3 柴达木盆地尕斯库勒现代盐湖沉积相环境分布图 (沈振枢等, 1991)

Fig. 3 Sedimentary facies distribution of modern saline lake, Gasikule salt lake in Qaidam Basin (after SHEN et al., 1991)

#### (2)盐(膏)坪或盐滩

盐(膏)坪是因盐湖或咸水湖进一步收缩而露出 地表的滨湖石盐(膏)沉积区,其盐类矿物主要为盐 湖卤水结晶沉积形成,主要沉积物为石盐或石膏 等。此外,还常含少量粉砂粘土等碎屑沉积物,沉积 岩主要为含粉砂粘土(或粘土粉砂)的石盐岩或石膏 岩等;碎屑物的成因有风积和湖积。

#### (3) 盐盘

盐盘属于盐湖中心的纯化学沉积, 盐类矿物从 卤水中析出于湖盆低洼部位沉积形成。主要沉积物 为石盐岩、光卤石岩等, 这些化学沉积岩一般比较 纯净, 有时也含量少量的风成细碎屑沉积物。

# 3 库车前陆盆地古近纪—新近纪沉积岩相 古地理特征

#### 3.1 古新统

#### 3.1.1 沉积相分布特征

古新世早期为盐湖淡化阶段, 泥岩分布于库车 盆地西部; 沉积厚度最大区位于盆地西北部, 为当 时盆地沉降中心位(图 4)。少量白云岩沉积, 主要分 布于拜城凹陷北部, 呈不规则椭圆状, 长轴走向为 北东向。石膏岩分布面积很大,基本占据了整个拜 成凹陷, 向东南方向突出形成一个次级沉积中心, 其最大厚度分布区位于库车盆地北部, 最大厚度可 达 520 m, 属于咸水湖沉积产物, 纯石膏尤其厚层石 膏的出现, 反映沉积环境比较稳定。盐湖沉积区位 干库车盆地西部的拜城凹陷中部(图 4), 形态呈扁圆 状, 南起秋里塔克构造带, 北到克拉苏构造带, 南 部以 XQ-2 井为中心, 北部以 KL-4 井为中心, 最大 厚度 110 m。石盐岩层一般沉积于盐湖中心,由于受 外部干扰较少, 以较纯的石盐为主, 粉砂粘土含量 较少。含盐的岩类(主要为含石盐的泥岩)沉积范围明 显小于纯石盐区,总体上向北收缩,形态大致呈椭 圆状, 尾部向西延伸, 沉积中心位于北部, 以 KL-4 井为中心, 最大厚度达 220 m, 属于盐泥坪相, 为盐 湖边缘沉积或泥岩与石盐沉积频繁交替变化的环境 (图 4)。

## 3.1.2 岩相古地理特征

库车盆地古新统蒸发岩主要集中在盆地的中部偏西,蒸发岩分布范围广,厚度较大。图 4 中灰色代表泥岩沉积,主要分布于库车盆地西部,分布区大多被蒸发岩覆盖,泥岩厚度达 1000 多 m,反映了当时淡水环境时间较长。土黄色代表含膏泥岩,属于膏泥坪环境,是凹陷西部沉积的最外环圈。黄色代表

石膏岩,它的分布面积最大,最小厚度值是3 m,最大厚度达503 m,其沉积范围可代表古库车咸水湖范围。浅蓝色代表含盐的沉积物,分布于盆地的内部,属于盐泥坪相沉积,厚度从1 m到300 m以上,反映盐湖边缘的变化范围。蓝色代表古盐湖的盐岩沉积,分布于拜城凹陷中心区,呈南北向展布的椭圆形;其西侧和东部出现含盐粉砂泥岩分布,是库车盐湖的边缘地带(图4)。盐岩沉积是盐湖沉积的后期阶段产物,盆地内古新统盐岩的最小厚度2 m,最大厚度102 m。最大值分布在 KL-4 井和 XQ-2 井。此外,少量冲洪积砂砾岩分布于蒸发岩沉积的边缘。

总体上,蒸发岩的分布形态呈牛眼式模式,根据岩相、岩性及其形态,推测出该时期地表水的补给来源,主要为来自西北及西南方向的海水,东部可能有间歇性的山区淡水补给。古新世蒸发岩仅分布于库车盆地西部的拜城凹陷,尤其石盐沉积区收缩于拜城凹陷的中部,据沉积厚度推断,当时的沉降区位于北部,靠近天山构造带,拜城凹陷应是一个"北深南浅"的箕状盆地。

#### 3.2 始新统

#### 3.2.1 沉积相特征

始新统蒸发岩分布于库车盆地中西部的广大地 区, 并表现为三个明显的沉积中心, 即拜城凹陷主 沉积区、东部区(库车县城北区)及南部区(英买区); 在主沉积区的西南部还有一个次级沉积区, 而其最 大厚度分布于主沉积区北部, 厚度达 1050 m。始新 世出现部分砂岩沉积, 共有四个沉积区, 盆地北部 两个区, 盆地南部和中部各一个区, 4个砂岩沉积区 的存在, 指示它们处于海水或河水补给通道上。始 新世白云岩分布量很少, 出现两个沉积区, 分布于 盆地北部和南部,最大厚度分别为9m和4m。石膏 岩大面积分布于拜城凹陷及其南部的英买地区, 主 要沉积区在拜城凹陷,沉积厚度从南向北呈上升趋 势、最大厚度 200 m, 位于盆地北部; 在英买地区, 石膏最大厚度 190 m。含膏岩石的分布范围与石膏 岩的分布及特征基本一致, 拜城凹陷含膏岩沉积厚 度明显比膏岩大, 最厚达 500 m, 分布趋势是, 南部 厚、北部薄, 由此可以说明, 在咸水湖沉积期间, 古 湖的补给来源主要位于西南部, 由于靠近补给源, 碎屑沉积相对比北部多。始新世石盐沉积基本充满 了拜城凹陷, 可以分出两个浓缩中心, 均分布于北部, 最大厚度为 800~1250 m; 而盆地南部, 盐层厚度一 般 100~300 m, 此时期盐湖沉积时期盆地沉降中心 仍然在北部。含盐的岩石主要为盐质泥岩及粉砂岩,

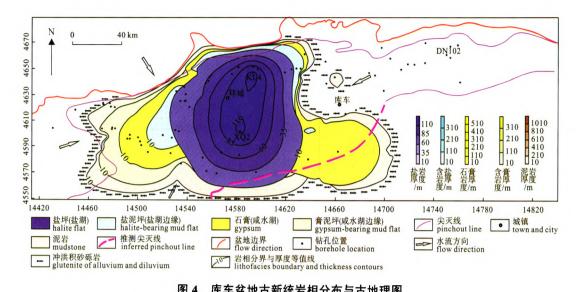


图 4 库车盆地古新统岩相分布与古地理图
Fig. 4 Paleocene Lithofacies distribution and paleogeographic map of Kuqa basin

其分布范围比石盐范围明显收缩减少,厚度由南向北增加,最大厚度 280 m。根据石盐岩和含盐的岩石等值线形态特征,可以大致确定盐湖沉积时期,盆地沉积受到西南部、东部和北部的水源补给(图 5)。

#### 3.2.2 岩相古地理特征

始新世,库车盆地蒸发岩广泛发育,覆盖了拜城凹陷大部分地区(图 5),沉积中心仍然位于北部,这个期间,拜城凹陷仍然是一个南浅北深的箕状盆地。蒸发岩沉积主要分布于库车盆地的西部拜城地区,最外围是冲洪积砂砾岩,泥岩仅有少部暴露,范围相对较小,但在盆地东部分布范围相对较大,泥岩的厚度在 21 m 到 1237 m 之间。膏泥坪和膏岩相主要分布拜城凹陷的东部边缘带,盐坪相分布范围主要集中在凹陷中西部以及南部,沉积中心集中在西部和北部地区,盐岩厚度为 26~1447.5 m,最厚盐岩体主要呈北东—西南向分布。从整个岩相古地

理图可以看出,从东部到西部古盐湖水有逐渐变浓的趋势,可能反映了东部有大量的河流补给,而西部以及西北部为阶段性海水补给(Liu et al., 2012;地质矿产部矿床地质研究所,1980;张华等,2013)(图 5)。

#### 3.3 渐新统

#### 3.3.1 沉积相特征

渐新世,由图 5 可见,库车盆地泥岩主要分布于拜城凹陷,盆地东部的阳霞凹陷和东南部的英买地区(或凹地)有少量分布,表现为四个沉积中心,其中两个主要沉积中心位于拜城凹陷南部,最大厚190~220 m。白云岩分布范围很小,仅分布与拜城凹陷南部,最大厚度 4.5 m。含膏岩在拜城凹陷大面积分布,总体分布趋势是"南厚北薄",最大厚度为180 m。石膏岩主要分布于拜城凹陷和英买地区,表现为两个沉积中心,拜城凹陷,石膏岩分布范围要

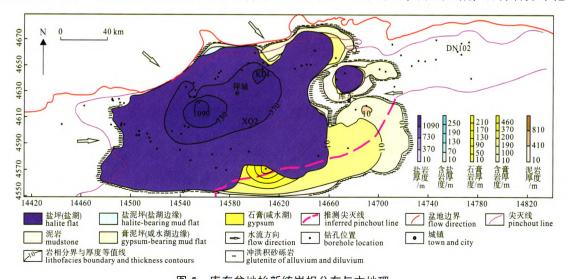


图 5 库车盆地始新统岩相分布与古地理 Fig. 5 Eocene lithofacies distribution and paleogeography of Kuqa basin

比含膏岩小,最大厚度达 50 m,英买地区的石膏沉积自成一个沉积浓缩区,最大厚度 20 m。另外,在阳霞凹陷西部,也有少量石膏沉积。石盐岩仅出现于拜城凹陷南部,最大厚度为 51 m,与始新世石盐岩相比,明显减小,说明湖盆演化开始退入咸化期(图 6)。

#### 3.3.2 岩相古地理特征

渐新世时期,先前拜城凹陷的沉积中心或沉降中心,已从北部迁移到南部,改变了此前库车盆地"南浅北深"的箕状盆地构造格局。该时期蒸发沉积相也分布符合一般的蒸发沉积分布规律,由盆地边缘向盆地中心,岩相分布为冲洪积砂砾岩、泥岩、膏泥坪、石膏,盐泥坪、盐坪(盐湖),具有较典型的"牛眼式"分布模式特征。由图 6 还可看出,膏岩沉积在该时期向南迁移并出现两个沉积中心,分布在东南以及西南部。盐岩沉积也明显向南迁移,沉

积中心在库车盆地中部偏南方向。从渐新世岩相地理图可以看出,古盐湖卤水大致有由北向南、由西向东变淡的趋势,由此推测,该时期库车盆地北部东北部以及西南部都有充裕的河水补给(图 6)。

#### 3.4 中新统

#### 3.4.1 沉积相特征

中新世时期,泥岩广泛分布于拜城凹陷和阳霞凹陷。拜城凹陷泥岩沉积中心位于南部,大多数地区厚度50~350 m,最厚650 m(图7)。在阳霞凹陷,泥岩有三个沉积中心,呈串珠状分布,一般厚度300 m以上,最大厚度1400 m。泥岩厚度分布呈"西薄东厚"态势,说明库车盆地沉积中心已从西部向东部转移。灰岩呈两个沉积中心分布于库车盆地北部。含膏岩广泛分布于库车盆地内,但东、西部沉积厚度相差很大,西部拜城凹陷内,虽然含膏岩分布面积大,但厚度很薄,一般10~50 m,而在东部的阳霞

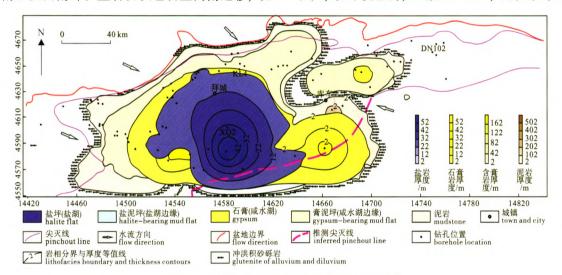


图 6 库车盆地渐新统岩相分布与古地理图

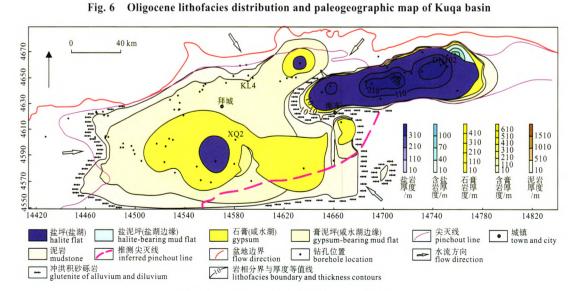


图 7 库车盆地中新统岩相分布与古地理图

Fig. 7 Miocene lithofacies distribution and paleogeographic map of Kuqa basin

凹陷,虽然面积不大,但厚度大,厚度一般在 50 m以上,最大可达 500 m。青岩沉积主要集中于阳霞凹陷,部分与拜城凹陷交汇处,表现为 3 个沉积中心,一般厚度 40 m以上,最厚达 320 m。而西部拜城凹陷,仅在南部有一些分布,厚度 10 m。石盐岩基本分布于阳霞凹陷,呈三个沉积中心分布,厚度 10 m以上,最厚 280 m。另外,在拜城凹陷南部和北部,还有一些零星分布,厚度约 10 m。渐新世时期,盆地东部几乎无泥岩沉积,主要发育冲洪积砂砾岩,分布于蒸发岩沉积边缘。而在中新世,盆地东部接受较厚的细碎屑岩-泥岩沉积,沉积环境开始变为相对较深的湖泊环境。

#### 3.4.2 岩相古地理特征

中新世,库车盆地沉积沉降中心已从拜城凹陷南部转移到东部的阳霞凹陷地区,导致蒸发岩沉积随之转移东部,蒸发岩总体呈狭长的带状分布(图7)。石膏岩在中新世分布范围最广,厚度也较大,最小值是3m,最大值达400m。结合采样地点和石

膏硫同位素特征,中新世库车盆地已经转变为陆相 沉积环境。由岩相分布(图 7),推测出库车盆地中新 世补给水源主要来自盆地西南部,因西南部泥岩分 布较广,然后依次为含膏岩、石膏岩、岩盐等;另外, 凹陷东部也有少量补给。

## 4 蒸发岩地球化学

对库车盆地 2 口石油钻井盐岩的岩屑样品进行 采集、分析, 研究其地球化学变化特征, 以揭示古盐 湖沉积环境及其演化规律。

#### 4.1 古近系盐类化学沉积演化

由图 8 可见, 古近系(库姆格列木群)盐岩的钾离子含量变化,由下往上出现 3 个较为明显的峰值段,深度和峰值深度分别为 5013~4969 m、4857~4757 m、4497~4413 m,峰值分别为 1.07%(4983 m)、1.43%(4819 m)、3.05%(4417 m)。因此,从时间序列上看,库车古盐湖卤水总体上表现为不断蒸发浓缩的正演化过程,到始新世晚期或库姆格列木群沉积

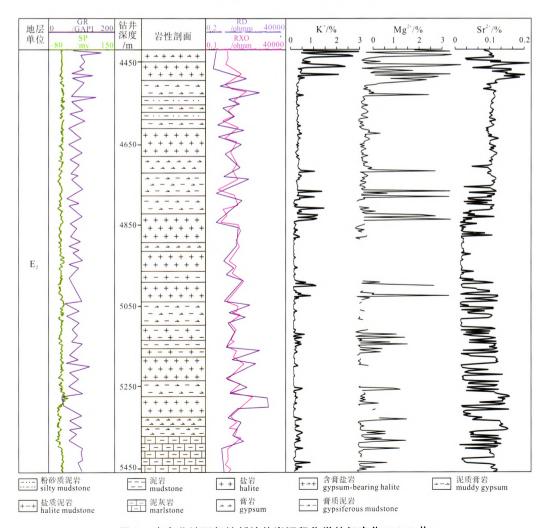


图 8 库车盆地西部始新统盐岩沉积化学特征变化(XQ-2 井)

Fig. 8 Chemical characteristic variation of Eocene salt rocks in western Kuqa basin (borehole XQ-2)

晚期, 钾离子含量达到最大, 接近 3%; 将钾离子换算成氯化钾, 则达到边界品位甚至接近工业品位, 因此, 可以将  $4857\sim4757$  m、 $4497\sim4413$  m 两个层段钾富集期段, 分别命名为  $K_1$ 、 $K_2$  成钾期。

#### 4.2 新近系中新统盐类化学沉积演化

由图 9 可见,盆地中新统盐岩的钾含量变化:最高值为0.152%,最低值0.008%,平均含量0.053%;钠含量的分布范围 5.01%~39.02%,平均值 33.36%;氯离子含量7.75%~60.25%,平均含量为51.52%;锶离子含量分布范围 0%~0.099%,平均值为 0.018%;溴含量0~9.405×10-6,平均值为 3.27×10-6。

钾/氯比值变化大致可分出三个峰值区,4800~4725 m、4700~4600 m、4500~4400 m,后者最大,总体上,钾含量呈上升态势。锶和钾的含量变化具有一定相似性,由下向上,呈现上升趋势,由此揭示古盐湖总体上呈不断蒸发浓缩的趋势。在 DN-102 井中新统顶部(4500~4400 m)段出现了钾含量明显富集的峰值区,可能代表了中新世时期的钾离子富

集期。东部凹陷钾离子的相对富集,可能与盆地基 底反转、西部卤水迁移再汇集有关。

通过上述钻孔盐岩化学变化分析,可以确认库车盆地古盐湖化学沉积演化规律是:西部从古新世一始新世期间,出现两个钾离子富集期,东部中新世晚期也出现一个钾离子富集期。这三个富集期可以称为  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  钾离子富集期(刘成林等,2009b),这三个钾离子富集期的出现明显受到库车古盐湖环境的变迁控制。

## 5 古盐湖沉积环境变迁与成钾效应分析

#### 5.1 古浓缩中心变迁

库车盆地蒸发岩沉积与盆地的构造演化紧密相关。古新世一始新世,盆地呈"南浅北深"的"箕状"形态。蒸发岩主要集中于拜城凹陷,蒸发岩最厚区域分布于北部。渐新始,发生构造反转,盆地变为"南深北浅",蒸发岩沉积中心已从北部迁移到南部。中新世,盆地沉积沉降中心已从拜城凹陷南部转移到

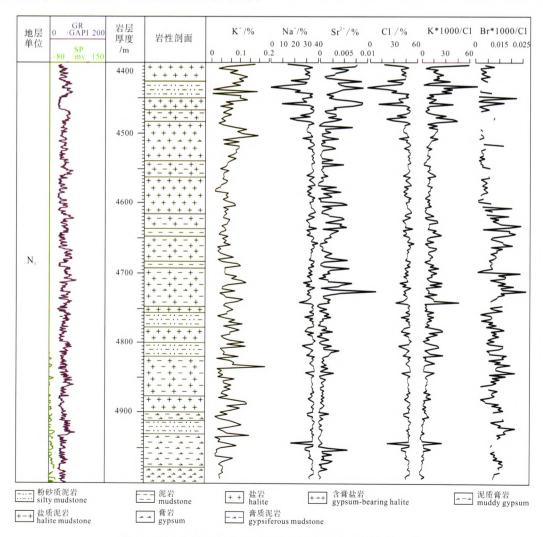


图 9 库车盆地东部中新统盐岩化学特征变化(DN-102 井) Chemical characteristic variation of Miocene salt rocks in eastern Kuqa basin(borehole DN-102)

东部阳霞凹陷,蒸发岩呈串珠状分布。古近纪蒸发岩 沉积中心由北向南迁移,新近纪则从西向东迁移。

#### 5.2 古海水补给

古新世一渐新世,有多次海侵进入库车盆地 (Liu et al., 2012; 地质矿产部矿床地质研究所, 1980; 张华等, 2013),海侵方向来自塔里木盆地西部,经阿莱依地堑(阿莱依海峡)进入莎车及库车盆地。古生物化石和海相地层资料研究(郭宪璞等, 2002),提出了早白垩世、晚白垩世、古近纪的海侵范围的新认识,同时,依据露头和钻井资料提出了中新世仍有海水进入库车盆地的看法。可见,古近纪时期古地中海水曾经多次进入库车盆地,为盐湖成钾提供了重要的物质补给。

#### 5.3 成钾效应分析

研究成果显示,库车盆地古近系地层中发现了钾石盐、光卤石、钾石膏等钾盐矿物(刘群等,1987;刘成林等,2008,2012,2013;邢万里等,2013);通过地层盐类地球化学研究,初步确定库车盆地蒸发岩系发育 3 个钾离子富集的层位,其中两个主要层位于库姆格列木群中上部,一个位于吉迪克组中上部。上述钾盐矿物及富钾层位的出现,显然受到古盐湖岩相古地理变迁、分布的控制影响,即补给来源、沉积中心、沉积厚度、浓缩中心的迁移及"次级深凹"等岩相古地理要素,对钾盐聚集产生了控制作用,即成钾效应。

库车盆地古盐湖浓缩演化可能已接近或达到钾 盐析出阶段, 但能否出现工业钾盐沉积, 即盐湖晚 期富钾卤水能否大量汇集于次级凹地,并进一步蒸 发浓缩析出钾盐矿物堆积, 这就要取决于盆地构造 演化与古地理环境。古新世时期,盐湖蒸发浓缩至石 盐析出, 盐类沉积分布于库车盆地拜城凹陷的中东 部、补给主要来自西部, 其最大厚度(102 m)区的分 布面积约 1500 km², 浓缩区面积较小, 成钾潜力可 能有限。而始新世时期, 盐湖沉积面积大大扩展, 石 盐厚度 360 m 以上分布区的面积达 4725 km², 其中 出现两个更深的浓缩中心, 显然, 始新世时期出现 巨量石盐沉积, 其成钾可能性最大, 成钾远景区应 分布于拜城凹陷中北部和东北部。渐新世时期, 盐湖 沉积区范围明显缩小, 蒸发浓缩区向南迁移, 最大 厚度(50 m)区的面积仅约 400 km2, 显然, 渐新世时 期成钾条件又变差。中新世时期, 盐湖沉积已基本迁 移到库车盆地东部的阳霞凹陷, 盐湖面积进一步缩 小, 浓缩中心呈串珠状分布, 最大厚度(77 m)区的面 积 1200 km², 尽管中新世时期盐湖面积已缩小, 但 可能受到西部预备盆地的卤水迁移补给,物质来源 还是相对丰富,也应该具有一定的成钾潜力。

## 6 结论

库车前陆盆地蒸发岩发育与浓缩中心迁移,受 塔里木盆地与天山造山带相互作用影响, 古盐湖浓缩中心发生多次迁移, 这种不稳定的构造变动对古盐湖晚期富钾卤水的汇集与钾盐沉积具有关键性意义。伊朗 Great Kavir(Rahimpour-Bonab et al., 2003, 2007)、东欧喀尔巴仟盆地(Cendo'n et al., 2004; 钱自强等, 1994)盆地等, 与库车盆地存在相同之处, 即也属于前陆盆地, 均受特提斯构造演化控制, 同处于北半球副热高压气候带, 它们的成盐时代也相近, 前两者已出现钾盐沉积。

库车盆地古盐湖的岩相古地理研究表明,古新世—始新世时期,蒸发岩主要集中在盆地的西部,即拜城凹陷沉积区,浓缩中心位于凹陷的中北部和东北部;渐新始时期,蒸发岩沉积仍在西部拜城凹陷,浓缩中心已从北部迁移到南部,改变此前"南浅北深"的箕状盆地构造格局;中新世,库车盆地沉降中心已从拜城凹陷转移到东部的阳霞凹陷,蒸发浓缩中心也随之东迁,蒸发岩呈串珠状分布于多个更次级凹地中。鉴于始新统的石盐厚度最大、分布面积最广,加之在地层中发现钾盐矿物和钾离子富集层位,推论其成钾远景与找钾潜力最大;中新统,尽管石盐厚度与面积相对均较小,但可能受到西部预备凹陷盐湖卤水补给,成矿物质丰富,也应具有一定的成钾潜力;古新统和渐新统成钾潜力则相对较小。

总之,基于岩相古地理的变化研究显示,库车前陆盆地具有钾盐成矿潜力。

致谢:参加此项工作的还有中国地质大学唐敏、胡妍娜、赵宪福、高超,中国地质科学院矿产资源所陈永志、张华、邢万里等,工作还得到塔里木油田分公司及塔里木石油勘探开发研究院有关领导的大力支持与指导,在此一并表示谢意。

# 参考文献:

- 曹养同, 刘成林, 焦鹏程, 陈永志. 2010b. 中新生代盆地蒸发岩沉积旋回对比及库车盆地成钾探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 657-668.
- 曹养同, 刘成林, 杨海军, 顾乔元, 焦鹏程, 卢玉红. 2010a. 库车盆地古一新近纪蒸发岩沉积旋回识别及其对比[J]. 古地理学报, 12(1): 31-41.
- 地质矿产部矿床地质研究所. 1980. 新疆库车盆地第三纪成盐条件及找钾远景研究报告[R]. 北京: 地质矿产部矿床地质研究所: 36-70.
- 冯增昭. 2004. 单因素分析多因素综合作图法——定量岩相古地理重建[J]. 古地理学报, 6(1): 3-18.

- 郭令智,施央申,卢华复. 1992. 印藏碰撞的两种远距离 效应[C]//李清波等主编,现代地质学研究文集(上). 江苏南京:南京大学出版社:1-7.
- 郭宪璞, 丁孝忠, 何希贤, 李汉敏, 苏新, 彭阳. 2002. 塔里木盆 地中新生代海侵和海相地层研究的新进展[J]. 地质学报, 76(3): 299-307.
- 贾承造. 1992. 塔里木板块构造演化[C]//李清波等主编. 现代地质学研究文集(上). 南京: 南京大学出版社: 22-31.
- 贾承造.1996. 塔里木盆地构造特征与油气聚集("九五"国家重点科技攻关项目《塔里木盆地石油天然气勘探(96-111)》)[R]. 塔里木石油勘探开发指挥部,石油勘探开发科学研究院廊坊分院:11-13.
- 刘成林, 焦鹏程, 曹养同. 2009a. 塔里木盆地钾盐大规模成矿条件与找矿靶区预测技术研究[R]. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力. 2009b. 我国重要成矿区带主要矿床类型成矿规律和找矿评价[M]. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所: 323-338.
- 刘成林, 焦鵬程, 宣之强, 曹养同, 赵宪福. 2013. 库车盆地古近系 蒸发岩中钾盐矿物研究进展[J]. 地质论评, 59(2): 233-234.
- 刘成林,杨海军,顾乔元,焦鹏程. 2008. 塔里木盆地重要蒸发岩坳 陷成盐及油气生储条件研究[R]. 库尔勒: 塔里木油田公司.
- 刘群, 陈郁华, 李银彩, 蓝庆春, 袁鹤然, 阎东兰. 1987. 中国中、新生代陆源碎屑岩-化学岩型盐类沉积[M]. 北京: 北京科学技术出版社: 15-17.
- 卢华复, 贾东, 蔡东升. 1996. 塔里木和西天山古生代板块构造演化[C]//童晓光等主编. 塔里木盆地石油地质研究新进展[M]. 北京: 科学出版社: 235-245.
- 钱自强, 曲懿华, 刘群. 1994. 钾盐矿床[M]. 北京: 地质出版社: 203-210.
- 沈振枢,程果,乐昌硕. 1991. 柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境[M]. 北京: 地质出版社: 1-162.
- 孙家振, 李兰斌, 周新源, 皮学军. 2003. 塔里木盆地库车凹陷克拉苏构造带典型构造样式与变形机理分析[J]. 石油实验地质, 25(3): 247-251.
- 谭红兵,马海州,马万栋,董亚萍,张西营,许建新. 2004. 塔里木盆地西部古岩盐地质地球化学特征与成钾条件分析[J]. 矿物岩石地球化学通报,23(3): 194-199.
- 唐敏, 刘成林, 焦鹏程. 2009. 库车盆地古近纪岩盐层中钾盐资源量预测研究[J]. 矿床地质, 28(4): 503-509.
- 邢万里,刘成林,王安建,焦鹏程,李国武,赵宪福,高超. 2013. 库车前陆盆地古近系蒸发岩岩石学、矿物学与成钾 环境分析——以 DZK01 孔岩芯为例[J]. 地球学报,34(5):
- 许建新,马海州,杨来生,谭红兵,王建国.2006. 库车盆地古近纪和新近纪构造环境与蒸发岩沉积[J]. 地质学报,80(2):227-235.
- 杨树锋, 贾承造, 陈汉林, 魏国齐, 程晓敢, 贾东, 肖安成, 郭召杰. 2002. 特提斯构造带的演化和北缘盆地群形成及塔里木 天然气勘探远景[J]. 科学通报, 47(Z1): 36-43.
- 张华, 刘成林, 曹养同, 孙宏伟, 王立成. 2013. 塔里木古海湾新生代海退时限及方式的初步探讨[J]. 地球学报, 34(5):
- 张丽娟, 李多丽, 孙玉善, 李程明. 2006. 库车坳陷西部古近系-白垩系沉积储层特征分析[J]. 天然气地球科学, 17(3): 355-360.

#### **References:**

- CAO Yang-tong, LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, CHEN Yong-zhi. 2010b. Sedimentary cycles of correlation of evaporites in Paleogene-Neogene basin and formation mechanism of potash deposits in Kuqa basin[J]. Mineral Deposites, 29(4): 657-668(in Chinese with English abstract).
- CAO Yang-tong, LIU Cheng-lin, YANG Hai-jun, GU Qiao-yuan, JIAO Peng-cheng, LU Yu-hong. 2010a. Identification and correlation of the Paleogene and Neogene evaporites sedimentary cycle in Kuqa Basin[J]. Journal of palaeogeography, 12(1): 31-41(in Chinese with English abstract).
- CENDO'N D I, PERYT T M, AYORA C, PUEYO J J, TABERNER C. 2004. The importance of recycling processes in the Middle Miocene Badenian evaporite basin (Carpathian foredeep): palaeoenvironmental implications[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 212(1-2): 141-158.
- DICKINSON W R. 1974. Plate tectonics and sedimentation.In:
  Dickinson W R, ed. Plate Tectonics and Sedimentation. Spec.
  Publ. Soc. Econ. Placont. Miner, Tulsa: 22: 1-27.
- FENG Zeng-zhao. 2004. Single factor analysis and multifactor comprehensive mapping method—reconstruction of quantitative lithofacies palaeogeography[J]. Journal of palaegeography, 6(1): 3-18(in Chinese in Chinese with English abstract).
- GRAHAM S A, HENDRIX M S, WANG L B. 1993. Collision success or basin of western China: Impact of tectonic in heritance on sand composition[J]. Geological Society of American Bulletin, 105: 323-324.
- GUO Ling-zhi, SHI Yang-shen, LU Hua-fu. 1992. The two Distance Domino Offect on India Slab and Tibetan Plateau[C].//LI Qing-bo, DAI Jin-xing, LIU Qi-ru, LI Ji-liang editor, Corpus of Research on modern geology (First). Nanjing: Nanjing university Press: 1-7(in Chinese).
- GUO Xian-pu, DING Xiao-zhong, HE Xi-xian, LI Han-min, SU Xin, PENG Yang. 2002. New Progress in the Study of Marine Transgressional Events and Marine Strata of the Meso-Cenozoic in the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 76(3): 299-307(in Chinese with English abstract).
- HARDIE L A, SMOOT J P, EUGSTER H P. 1978. Saline lakes and their deposits: a sedimentological approach[C].//Modern and Acient Lake Sediments(Ed. By A. Matter & M.E. Tucker), Spec. Publs int. Ass. Sediment. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 4-71.
- Institute of Mineral Deposits, Ministry of Geology and Mineral Resources. 1980. Research report of salt-forming conditions and promising area to find potash ore deposit in Tertiary of Kuche basin in Xinjiang[R]. Beijing: Institute of Mineral Deposits, Ministry of Geology and Mineral Resources: 36-70(in Chinese).
- JIA Cheng-zao. 1992. Evolvement of Slab Structure in Tarim Basin[C].//LI Qing-bo, DAI Jin-xing, LIU Qi-ru, LI Ji-liang editor, Corpus of Research on modern geology (First). Nanjing: Nanjing university Press: 22-31(in Chinese).
- JIA Cheng-zao. 1996. Structural feature and oil-gas accumulation("Nine Five" national key scientific and technological project) (Oil and gas exploration)(96-11)[R]. Tarim Petroleum

- Exploration and development headquarters, Research institute Petroleum Exploration and development Langfang branch: 11-13(in Chinese).
- LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, CAO Yang-tong. 2009a. Research on Large-scale potassium metallogenic conditions and Prediction of prospecting target area[R]. Beijing: Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, WANG Mi-li. 2009b. The investigation and appraisement and formation regularity of main types of mineral deposits in the important metallogenic belts in China[M]. Beijing: Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences: 323-338(in Chinese).
- LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, XUAN Zhi-qiang, CAO Yang-tong, ZHAO Xian-fu. 2013. The research progress of Potash Minerals in Evaporites of Paleogene, Kuqia Basin, Xinjiang[J]. Geological Review, 59(2): 233-234(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, ZHAO Xian-fu, CAO Yang-tong. 2012. Sulfur isotope values of gypsum in Cenozoic strata in Tarim Basin and their indication for the transgression of ancient Mediterranean Sea[C]. IGC 2012 Detailed Author Index: 746-1492.
- LIU Cheng-lin, YANG Hai-jun, GU Qiao-yuan, JIAO Peng-cheng. 2008. Research on relation between evaporate and conditions of Generation and preservation in Oil and gas in Tarim Basin[R]. Koria: Tarim Oilfield Company(in Chinese).
- LIU Qun, CHENG Yu-hua, LI Yin-cai, LAN Qing-chun, YUAN He-ran, YAN Dong-lan. 1987. Halogenic deposit of Terrigenous clastic rock-Chemical rock types in China in the Mesozoic and Cenozoic[M]. Beijing: Beijing science and Technology Press: 15-17(in Chinese).
- LU Hua-fu, JIA Dong, CAI Dong-sheng. 1996. Evolvement of Slab Structure in Paleozoic in Tarim Basin and in the west in Tianshan. IN; Tong Xiaoguang, Liang Digang, Jia Chengzao editor, The New Evolvement of Petroleum Geology in Tarim Basin[M]. Beijing: Science Press: 235-245(in Chinese).
- MACQUEEN R W, LECKIE D A. 1992. Foreland basins and fold belts[M]. United States: Tulsa, OK (United States); American Association of Petroleum Geologists: 1-460.
- MIALL A D. 1984. Principles of Sedimentary Basin Analysis[M]. New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo: Springer-Verlag.
- QIAN Zi-qiang, QU Yi-hua, LIU Qun. 1994. Potash deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House: 203-210(in Chinese).
- RAHIMPOUR-BONAB H, ALIJANI N. 2003. Petrography, Diagenesis and Depositional Model for Potash Deposits of North Central Iran, and use of Bromine Geochemistry as a Prospecting tool[J]. Carbonates and Evaporites, 18(1): 19-28.
- RAHIMPOUR-BONAB H, SHARITINIAL Z, SIEMANN M G. 2007. Role of rifting in evaporite deposition in the Great Kavir Basin, central Iran[C]//SCHREIBER B C., LUGLI S & Babel, M. (eds) Evaporites Through Space and Time. Geological Society, London, Special Publications, 285: 69-85.
- SCHMALZ R F. 1966. Environment of marine evaporate deposi-

- tion[J]. Mineral Industrial, 35: 1-7.
- SEARLE M P. 1991. Geology and Tectonics of the Karakorum Mountains[M]. New York: John and Sons Publication: 229-338.
- SEARLE M P. 1996. Geological evidence against large-scale Pre-Holocene offsets along the Karakorum Fault: Implications for the limited extrusion of the Tibetan plateau[J]. Tectonics, 15(1): 171-186.
- SHEN Zhen-shu, CHENG Guo, LE Chang-shuo. 1991. Stratigraphic subdivision and sedimentary environment on Salt-bearing strata in Qaidam Basin in Quaternary period[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-162(in Chinese).
- SUN Jia-zhen, LI Lan-bin, ZHOU Xin-yuan, PI Xue-jun. 2003.

  Analysis on the typical structural styles and deformation mechanism of the kelasu tectonic zone in the Kuqa depression of the Tarim Basin[J]. petroleum geology & experiment, 25(3): 247-251(in Chinese with English abstract).
- TAN Hong-bing, MA Hai-zhou, MA Wan-dong, DONG Ya-ping, ZHANG Xi-ying, XU Jian-xin. 2004. Research on Geological and Geochemical Characteristics of Paleo-Salt Rock and its Potash ore Formation in Western Tarim Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geo-chemistry, 23(3):194-199(in Chinese with English abstract).
- TANG Min, LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng. 2009. Prognosis of potash resource quantity in Eogene rock salt strata of Kuqa Basin, Xingjiang[J]. Mineral Deposits, 28(4): 503-509(in Chinese with English abstract).
- XING Wan-li, LIU Cheng-lin, WANG An-jian, JIAO Peng-cheng, LI Guo-wu, ZHAO Xian-fu, GAO Chao. 2013. Analysis of Petrology, Mineralogy and K-forming Environment of Paleogene Evaporites in Kuqa Foreland Basin: A Case Studyof Drill Hole DZK01[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(5): 559-566(in Chinese with English abstract).
- XU Jian-xin, MA Hai-zhou, YANG Lai-sheng, TAN Hong-bin, YANG Jian-guo. 2006. Paleaogene and Neogene Tectonic Environment and Sedimentation of Evaporite in Kuqa Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 80(2): 227-235(in Chinese with English abstract).
- YANG Shu-feng, JIA Cheng-zao, CHEN Han-lin, WEI Guo-qi, CHENG Xiao-gan, JIA Dong, XIAO An-cheng, GUO Zhao-jie. 2002. Evolution on Tethyan tectonic belt, Formation of Basin group in north of it, and Natural gas exploration prospect in Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 47(Z1): 36-43(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hua, LIU Cheng-lin, CAO Yang-tong, SUN Hong-wei, WANG Li-cheng. 2013. A Tentative Discussion on the Time and the Way of Marine Regression from Tarim Bay during the Cenozoic[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(5): 577-584(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Li-juan, LI Duo-li, SUN Yu-shan, LI Cheng-ming. 2006.
  Analysis of Characteristics of Sedimentary Reservoir Between
  Cretaceous and Palaeogene in the Western Part of the Kuqa
  Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 17(3): 355-360(in
  Chinese with English abstract).