

文章编号: 1671-1505(2024)04-0926-15 DOI: 10.7605/gdxb.2024.03.052

早始新世温室气候与海侵作用对库车坳陷 库姆格列木群含盐层系沉积的协同控制作用*

张锡婷^{1,2} 范坤宇³ 郭佩^{1,2} 李鹏真³ 苗如霖^{2,4} 邓宾^{2,4}

1 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 成都理工大学沉积地质研究院, 四川成都 610059

2 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都理工大学, 四川成都 610059

3 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 652801

4 成都理工大学能源学院, 四川成都 610059

摘要 塔里木盆地北部库车坳陷库姆格列木群 (54–46 Ma) 厚层含盐层系为油气成藏的优质区域盖层, 但该套含盐层系的原始时空展布、古地理环境和沉积控制因素尚不明确, 给盐下油气藏钻井施工造成了较大困难。通过盆缘野外露头剖面实测与盆内录井元素分析相结合, 开展盐湖中心与边缘沉积旋回对比研究, 探讨库姆格列木群含盐层系发育的主控因素。库姆格列木群发育 3 个 III 级旋回: 第 1 个 III 级旋回 I₁ 以盆缘砂砾岩—泥岩—石膏岩组合、湖盆中心泥岩—石膏岩—盐岩—碳酸盐岩组合为特征, 指示陆内盆地向陆缘盆地的古地理环境转变。第 2 个 III 级旋回 I₂ 以盆缘砂砾岩—泥岩—石膏岩组合、湖盆中心厚层盐岩加泥岩组合为特征, 为陆缘盆地盐湖沉积模式。第 3 个 III 级旋回 I₃ 盆缘—盆内沉积具有相似的膏质泥岩和泥岩组合特征, 为陆内干盐湖沉积模式。结合早始新世全球气候和海平面升降变化历史, 认为 I₁ 旋回 (约 54–51 Ma) 由陆内向陆缘环境的转变及厚层石膏岩的沉积受早始新世气候适宜期 (53–51 Ma) 和全球海平面升高的影响, I₂ 旋回 (约 51–48 Ma) 厚层盐岩的沉积受全球持续干旱气候和海平面再次升高的影响, 而 I₃ 旋回 (约 48–46 Ma) 厚层含盐层系沉积的缺失与全球气候持续干旱和海平面下降有关。

关键词 含盐层系 物质来源 陆缘盆地 沉积旋回 库姆格列木群 库车坳陷 塔里木盆地

第一作者简介 张锡婷, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 地质学专业。E-mail: 1348167494@qq.com。

通讯作者简介 郭佩, 女, 1990 年生, 博士, 副教授, 主要从事咸化湖盆沉积与油气地质研究。E-mail: guopei18@cdut.edu.cn。

中图分类号: P588.24⁷ 文献标志码: A

Collaborative controls of the Early-Eocene greenhouse climates and transgression on deposition of salt-bearing sequence of Kumugeliemu Group in Kuqa Depression

ZHANG Xiting^{1,2} FAN Kunyu³ GUO Pei^{1,2} LI Pengzhen³ MIAO Rulin^{2,4} DENG Bin^{2,4}1 Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources,
Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

* 国家自然科学基金项目 (编号: 42272117, 42002116) 资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42272117, 42002116)]

收稿日期: 2023-05-04 改回日期: 2023-10-25

3 Research Institute of Exploration & Development PetroChina Tarim Oilfield Company, Xinjiang Korla 652801, China

4 School of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract The thick salt-bearing sequence in Paleogene Kumugeliemu Group (54–46 Ma) of the Kuqa Depression acts as the high-quality regional caps for oil and gas accumulation. However, the original temporal-spatial distribution, palaeogeographic environment, and sedimentary controlling factors of the salt-bearing sequence remain unclear, which causes great difficulties for the drilling of the subsalt hydrocarbon reservoirs. Through the outcrop measurement at the basin margin and the logging element analysis within the basin, the correlation of sedimentary cycles between the lake-basin center and the margin was carried out to explore the main controlling factors of the salt-bearing sequence deposition of Kumugeliemu Group. The Kumugeliemu Group consists of three third-order cycles. The first third-order cycle I_1 is characterized by the lithofacies assemblage of conglomerates, sandstones, mudstones and gypsums at basin margins, and of mudstones, gypsums, halites, carbonates at basin center, indicating an palaeogeographic-environment transformation from a terrigenous basin to a continental-margin basin. The second third-order cycle I_2 is characterized by the lithofacies assemblage of conglomerates, sandstones, mudstones, and gypsums at basin margins and the assemblage of thick halites and minor mudstones at basin center, corresponding to a depositional model of a terrigenous epeiric basin. The third third-order cycle I_3 has similar lithofacies assemblage at the lake-basin margin and center, characterized by thin layer gypsaceous mudstones and mudstones, typical depositional model of terrigenous playa lakes. Combined with the Early-Eocene global climates and sea-level changes, it is believed that the deposition of thick gypsum rocks of I_1 (ca. 54–51 Ma) were related to the Early Eocene Climatic Optimum (53–51 Ma) and global sea-level rise. The deposition of thick halite rocks in I_2 (ca. 51–48 Ma) was controlled by the global dry climate and sea-level rise. The absence of thick salt-bearing sequence deposits in I_3 (ca. 48–46 Ma) is related to the global dry climate and sea-level drops.

Key words salt-bearing sequence, salt sources, epeiric basin, sedimentary cycle, Kumugeliemu Group, Kuqa Depression, Tarim basin

About the first author ZHANG Xiting, born in 1999, major in geology. E-mail: 1348167494@qq.com.

About the corresponding author GUO Pei, born in 1990, Ph.D., is an associate professor. She is engaged in sedimentology and petroleum geology of saline lake basins. E-mail: guopei18@cdu.edu.cn.

含盐层系是重要的区域盖层,对油气藏的形成具有重要意义(张朝军和田在艺,1998),在现已发现具有商业价值的含油气盆地中,许多油气田的形成与含盐层系有关(马新华,2000;张勇刚等,2012)。塔里木盆地北部库车坳陷古近系库姆格列木群(E_{1-2k})发育了一套巨厚含盐层系(卓勤功等,2013),为白垩系大型气藏的区域盖层,是中国西气东输的重要保证。含盐层系盖层压力系数高,与目的层储集层压力系数相差较大,需要对含盐层系底界面精确卡层,否则容

易破坏储集层(郇志鹏等,2022)。因此,查明含盐层系沉积的控制因素从而明确含盐层系的分布规律是提高盐底卡层准确性的基础。

白垩纪至古近纪的海侵事件是塔里木盆地地质发展史的重要事件之一(郭宪璞,1991;郭宪璞等,2002),早白垩世以来,海水自中亚向东亚灌入,深入内陆,流入塔西南莎车坳陷(唐天福,1989;郭宪璞,1991;丁道桂等,1997;郭宪璞等,2002;苏新等,2003)。古近纪,海侵范围进一步扩大,海水流入库车坳陷。由于海侵

次数及范围存在不同说法 (郭宪璞等, 2002; 张华等, 2013; Xu *et al.*, 2020), 针对库姆格列木群含盐层系盐类沉积环境存在 3 种争议: 海相、陆相、海陆过渡相。部分学者认为库姆格列木群含盐层系沉积环境为陆相, 主要成盐物质来源于大气降水 (谭红兵等, 2005; 章振国等, 2010)。部分学者认为该含盐层系沉积环境为海陆过渡相, 由海水和大气降水共同提供盐类物质来源 (徐洋等, 2018; 宋金鹏等, 2021; 王凡等, 2022)。还有学者认为库姆格列木群含盐层系沉积环境为海相, 由海水提供成盐离子 (王兴元等, 2015)。

白垩纪—古近纪为典型的温室气候, 在此背景下, 叠加了一系列高温事件, 为全球气候最为波动的时期 (Zachos *et al.*, 2001, 2008; Lauretano *et al.*, 2015)。蒸发岩是从卤水中通过蒸发作用沉淀出来的化学沉积岩, 沉淀过程与沉积环境与古气候息息相关 (Warren, 2016; 钟逸斯等, 2022)。受该时期全球的温室气候影响, 东营凹陷、东濮凹陷、兰坪盆地等多地沉积厚层蒸发岩, 库姆格列木群成盐的多期次、长期性也极有可能受到温室气候的影响 (Zuo *et al.*, 2020; Fan *et al.*, 2022)。

以前人的成果为基础, 通过盆缘野外露头剖面实测与盆内录井元素分析相结合对库姆格列木群含盐层系岩相组合、沉积旋回、物质来源、古气候等

方面进行分析, 从而探讨库姆格列木群含盐层系沉积的成因, 明确含盐层系分布规律, 为油气田开发研究中的盐底卡层提供技术支撑。

1 区域地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北部, 南接塔北隆起, 西南面为温宿凸起, 北邻南天山造山带, 总面积约为 25 000 km², 走向呈近 EW 向展布。新生代以来, 受印度板块和欧亚板块碰撞以及南天山隆升的影响, 在构造挤压背景下, 形成再生前陆盆地。在南北向的挤压作用下库车坳陷由北向南依次发育北部单斜带、克拉苏构造带、依奇克里克构造带和秋里塔格构造带, 由西向东依次发育乌什凹陷、拜城凹陷和阳霞凹陷 (贾承造, 1997, 1999; 卢华复等, 2000)。古近纪, 库车坳陷为弱伸展构造环境, 发育有大量盐类矿产如钾石盐、光卤石、钾石膏等 (刘成林等, 2006, 2013a; 郑绵平等, 2010; 徐洋等, 2021)。

库姆格列木群是库车坳陷在白垩纪晚期遭到抬升剥蚀后沉积的第 1 套地层。库姆格列木群的含盐层系主要分布在库车坳陷西边的克拉苏构造带上 (王凡等, 2022)。其中含盐层系的发育与构造密切相关, 古新世—始新世期间, 库车坳陷为“南浅北深”的“箕状”, 蒸发岩主要沉积在西部的拜城凹陷中 (图 1) (卢华复等, 2000; 刘成林等, 2013a)。库车坳陷中、东地区古近系从下而上分为

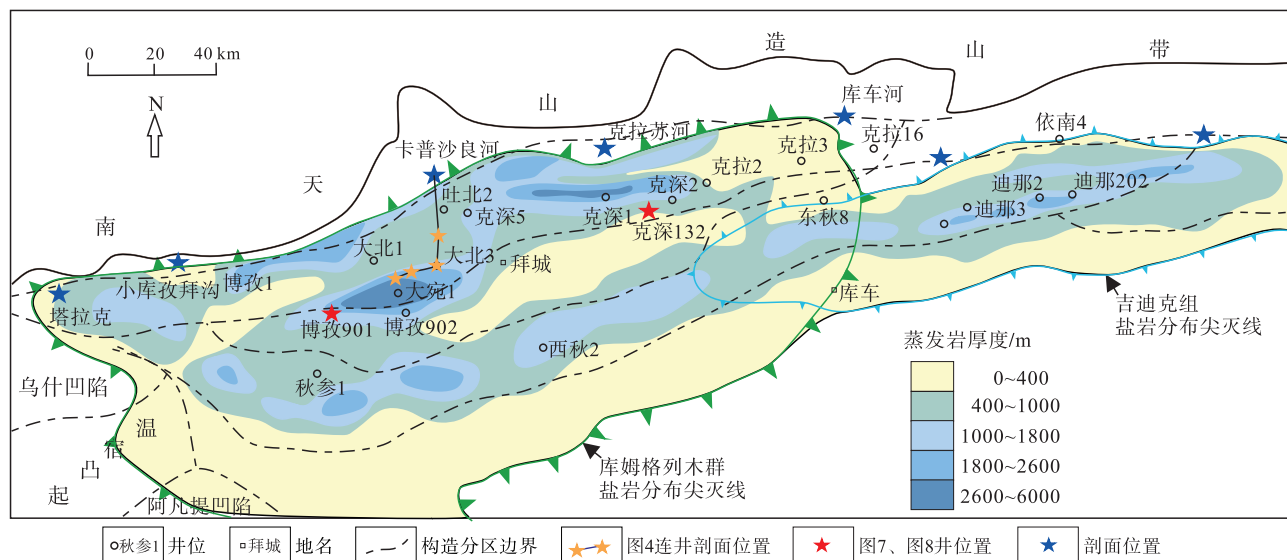


图 1 库车坳陷新生界蒸发岩层厚度分布图 (据郇志鹏等, 2022; 有修改)

Fig. 1 Thickness distribution map of Cenozoic gypsum-salt layer in Kuqa Depression (modified from Huan *et al.*, 2022)

库姆格列木群和苏维依组，西部地区库姆格列木群细划为塔拉克组、小库孜拜组、阿瓦特组。库姆格列木群的含盐层系在地表的出露较少（王凡等，2022）。

2 库姆格列木群沉积旋回划分及对比

由于受后期构造活动影响，库车坳陷现今含盐层系的分布及厚度受断裂强烈控制，构造改造变形复杂（张朝军和田在艺，1998；何登发等，2005；曹养同等，2010；王招明等，2013；田军等，2020），导致基于含盐层系沉积的控制因素有待商榷。因此，有必要对构造改造较弱的盆缘盐湖边缘沉积展开沉积旋回研究，并与盆内盐湖沉积进行对比，从而对含盐层系的沉积演化特征及控制因素进行研究。本部分在宽浅盐湖沉积环境划分的基础上，分别选取东部受海侵影响较小的库车河剖面 and 西部受海侵影响明显的小库孜拜沟剖面（王招明，2004），对库车坳陷库姆格列木群进行沉积旋回划分。

2.1 盐湖边缘沉积相划分

古近纪是塔里木盆地由海向陆转化的时期，库姆格列木群为典型的宽浅型湖泊沉积（邵龙义等，2006），北部为南天山构造带，南部为塔北隆起。陆相宽浅盐湖的沉积环境从边缘至中心可依次划分为：冲积扇、砂坪、干泥坪、膏泥坪、膏坪和盐盘（图 2）。

以库车河剖面库姆格列木群为例，探讨各类沉积环境的岩相组合特征。（1）冲积扇相：冲积扇主要分布在库车坳陷北部以及西北部造山带附近，为山区河流进入盆地迅速堆积下来的粗碎屑沉积物，水体能量大，主要发育中厚层砾岩—含砾粗砂岩，岩石分选较差，磨圆度一般，受到北部、东部淡水注入，陆源碎屑丰富；（2）砂坪相：砂坪相相对远离山前带，由于地势平缓，水体能量变小，主要岩性为细砂岩、含砾砂岩，岩石粒度逐渐变细；（3）干泥坪相：进一步远离山前地带，位于地下水位之上，主要发育纯泥岩，不含石膏等结核；

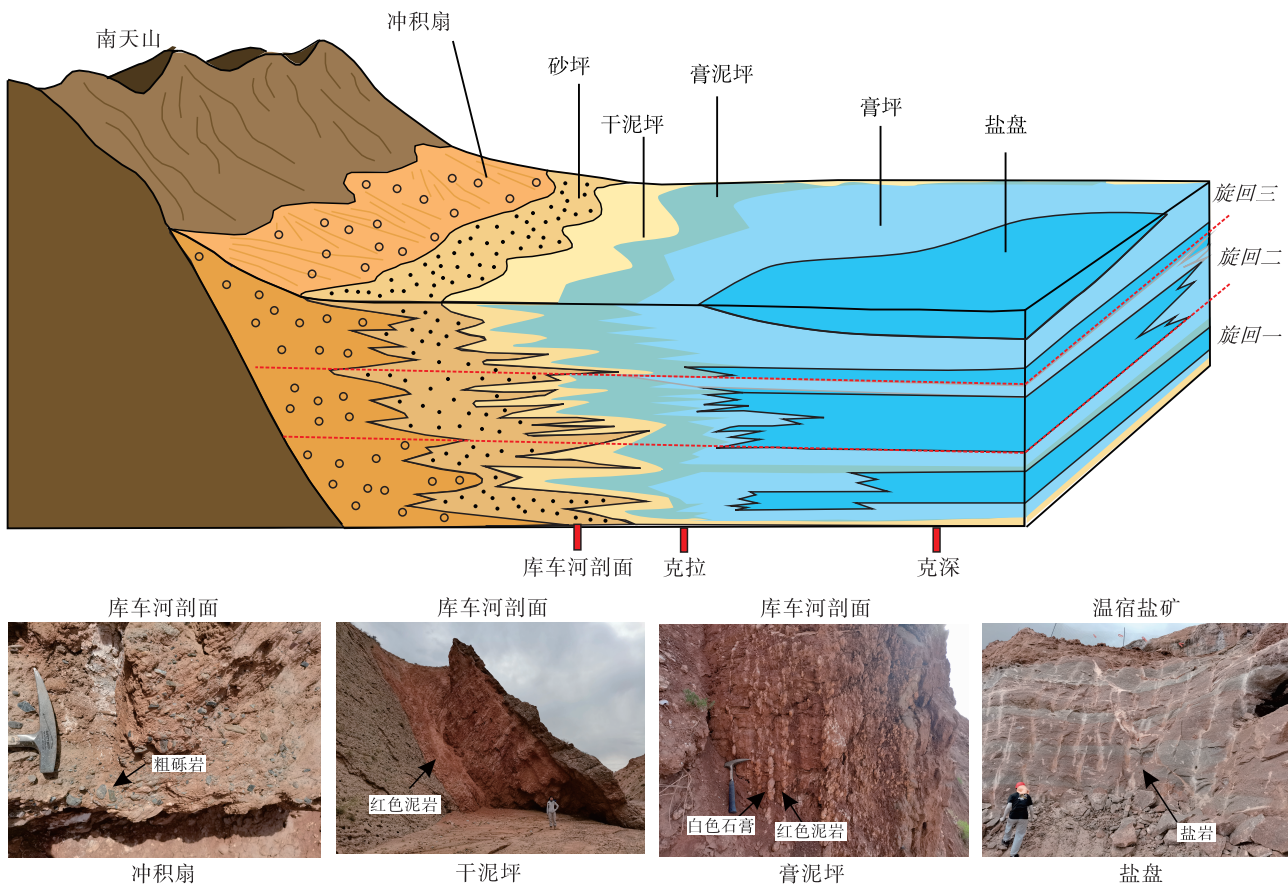


图 2 库车坳陷库姆格列木群沉积相空间组合关系（据 Hardie *et al.*, 1978；有修改）

Fig. 2 Spatial association of sedimentary facies of the Kumugeliemu Group in Kuqa Depression (modified from Hardie *et al.*, 1978)

(4) 膏泥坪相: 位于地下水位附近, 由于地势平缓, 湖岸线来回波动, 以膏质泥岩沉积为主; (5) 膏坪相: 盐湖发育早中期, 受强烈蒸发作用的影响, 湖水达到石膏岩沉淀饱和度, 大面积沉积石膏岩; (6) 盐盘相: 盐湖发育晚期, 湖水达到石盐沉淀饱和度, 沉积大套盐岩, 主要发育于湖盆中心, 受周缘山体物源的影响小。若湖水水位较高, 湖岸线迁移至山前附近, 则亦有可能发育三角洲相。

2.2 盆缘东部和西部剖面旋回对比

盆缘东部库车河剖面库姆格列木群整体发育棕红色砾岩、含砾粗砂岩、砂岩、泥岩以及白色石膏岩。根据岩相组合特征, 划分出3个Ⅲ级沉积旋回(图3)。第1个Ⅲ级沉积旋回 I_1 主要发育紫红色砾岩、泥岩和厚层石膏岩, 进一步分为3个Ⅳ级旋回。其中底部发育2个Ⅳ级旋回, 主要发育砾岩、泥岩, 为 I_1 的低水位期, 以冲积扇沉积为主, 向上砾岩多含灰质, 代表水进体系域, 此次水进持续时间较为持久, 沉积大套的石膏岩。第2个Ⅲ级沉积旋回 I_2 主要发育棕红色砂岩、泥岩、白色石膏岩, 进一步分为3个Ⅳ级旋回。第1个Ⅳ级旋回为三角洲进积体系, 相当于 I_2 的低位域。第2个Ⅳ级旋回主要发育石膏岩及泥岩, 泥质膏岩为水进体系域, 此次湖进较快速。第3个Ⅳ级旋回为河流—三角洲沉积相, 从下到上以砂岩—灰质泥岩—石膏岩指示湖进, 泥岩—砂岩指示湖退。第3个Ⅲ级沉积旋回 I_3 序列从下到上为细砂岩—泥岩—石膏岩—粉砂岩, 可进一步细分为3个Ⅳ级旋回, 其中砂坪—泥坪代表水进体系域, 膏泥坪—泥坪—砂坪为水退体系域。

盆缘西部小库孜拜沟剖面与库姆格列木群对应的地层为塔拉克组与小库孜拜组, 塔拉克组下部岩性主要为紫红色钙质砂砾岩与云质粉砂岩、云岩互层, 上部为石膏岩、云岩、灰质泥岩互层, 小库孜拜组岩性主要表现为黄红、灰绿色粉砂质泥岩、钙质泥岩与泥质膏岩、膏质泥岩互层(王招明, 2004)。小库孜拜沟剖面塔拉克组与小库孜拜组亦可整体分为3个Ⅲ级旋回。第1个Ⅲ级沉积旋回 I_1 可以细划分为3个Ⅳ级旋回, 前2个Ⅳ级旋回冲积扇发育, 相当于 I_1 的低水位期, 为一套砾岩夹粉砂岩, 第3个Ⅳ级旋回为膏坪相—膏泥坪相组合, 沉积大套石膏岩, 其中灰色砂屑泥晶白云岩发

育时为水位最高期。第2个Ⅲ级沉积旋回 I_2 可以划分3个Ⅳ级旋回, 其中第1个Ⅳ级旋回主要发育中—厚层状含灰粉砂质泥岩、灰质泥岩夹石膏岩, 以河流相沉积为主, 第2个Ⅳ级旋回由泥岩到砂岩, 粒径变粗, 砾石分选性较差, 表明此次水进较迅速。第3个Ⅳ级旋回持续时间较长, 石膏岩多为灰色, 此时为水位最高时。第3个Ⅲ级沉积旋回 I_3 也可以划分3个Ⅳ级旋回, 为灰质砂岩—灰质泥岩的岩性组合。

尽管库车坳陷东部地区和西部地区野外剖面厚度相差较大, 但三级旋回整体对应良好, 四级旋回对比也较好, 共同经历了2次大规模的湖进事件以及4次小规模湖进事件(图3), 说明2者沉积于1个统一大湖盆内。东部的库车河剖面与西部的小库孜拜沟剖面 I_1 旋回底部均发育大量的砂砾岩, 该时期为低水位期, 以冲积扇相为主。低水位期过后, I_1 旋回顶部, 库车坳陷开始1次大范围的湖进, 小库孜拜沟剖面发育大量石膏岩, 发育的沉积相为膏坪、膏泥坪、半深湖。库车河剖面开始发育泥岩、石膏岩, 主要发育的沉积相为泥坪、膏坪, 在 I_1 旋回中小库孜拜沟剖面出现灰色泥晶白云岩, 为还原环境, 说明西部的水位比东部的高。

在 I_2 旋回中, 小库孜拜沟剖面底部发育大量的砂岩、泥岩, 主要发育砂坪, 干泥坪沉积相, 库车河剖面底部发育大量砾岩, 以冲积扇沉积相为主, 说明此时2个剖面物源都以周缘山体河流为主。小库孜拜沟剖面在第2个Ⅳ级旋回开始发育大量泥岩以及砂岩, 干泥坪、砂坪沉积相发育, 库车河剖面开始出现大量纯石膏岩、泥岩以及砂岩, 沉积相由膏泥坪到砂坪, 说明此时库车坳陷经历1次快速的湖进。在 I_2 旋回顶部小库孜拜沟剖面开始发育石膏岩, 泥岩, 可以观察到灰—深灰色页岩以及泥灰岩, 库车河剖面三角洲沉积相发育, 发育灰绿色灰质泥岩, 此时2个剖面都有经历1次较大范围的湖进。

I_3 沉积旋回中, 库车河剖面和小库孜拜沟剖面岩性变化具有一致性, 库车河剖面岩性变化规律大致为石膏岩—泥岩—石膏岩—泥岩—石膏岩—泥岩—砂岩, 小库孜拜沟剖面岩性变化规律大致为砂岩—泥岩—砂岩—含膏泥岩—泥岩—含膏泥岩—砂质泥岩, 2个剖面都有经历3次小范围的湖进和湖退。

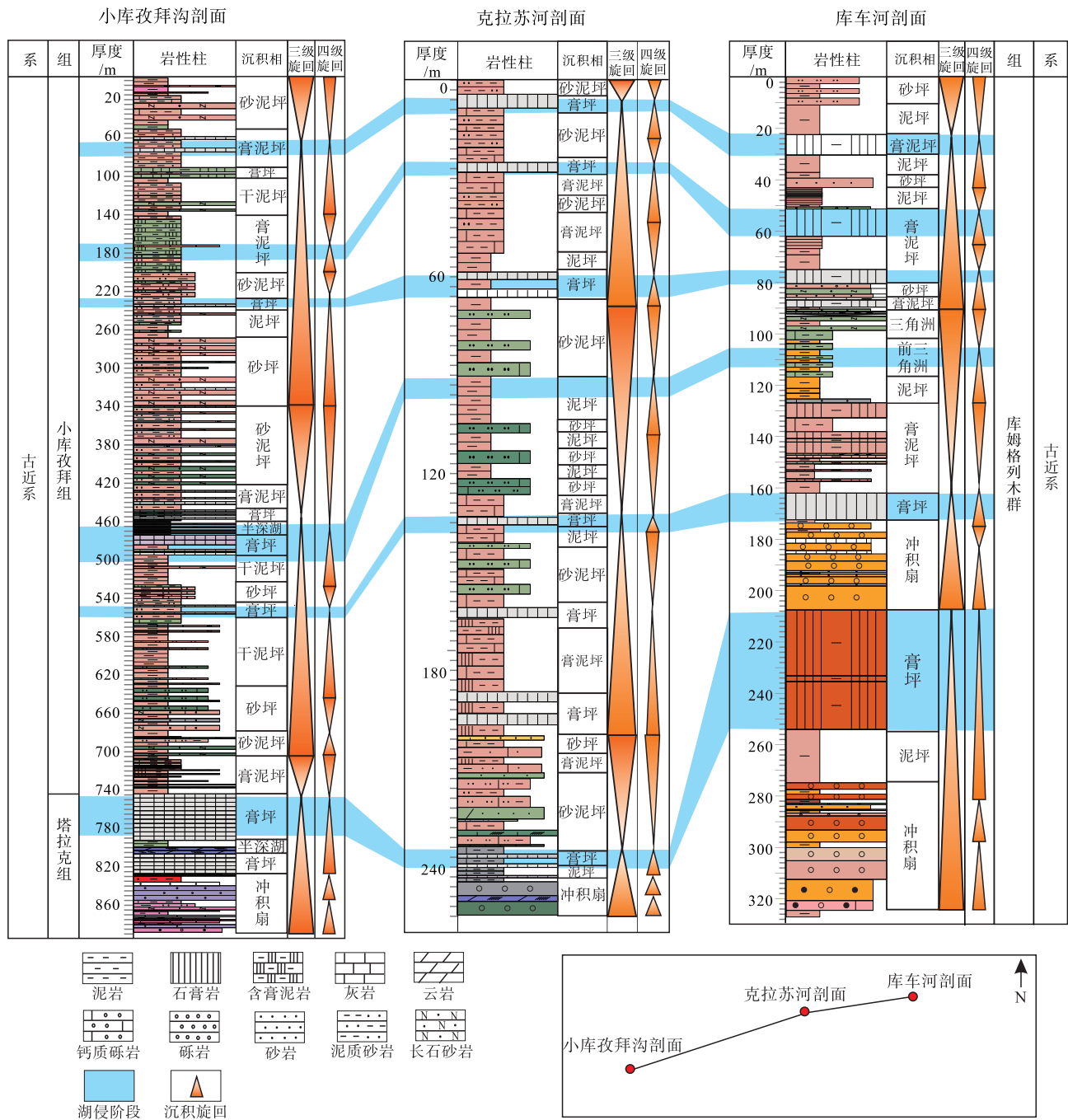


图 3 库车坳陷库姆格列木群及同期地层野外剖面 III 级和 IV 级旋回对比

Fig. 3 Stratigraphic correlation of third and fourth-order cycle comparison of field profiles and the Kumugeliemu Group in Kuqa Depression

2.3 盐湖中心与盆缘沉积旋回对比

盐湖中心下泥岩段、膏盐岩段、中泥岩段对应第 1 个 III 级旋回 I_1 ，盐岩段中下部对应第 2 个 III 级旋回 I_2 ，盐岩段上部和上泥岩段对应第 3 个 III 级旋回 I_3 。下泥岩段中主要发育泥岩，夹有砂岩，

由于受到古地貌的影响，下泥岩段的厚度变化较大，位于古隆起的井下泥岩段厚度较小，为 I_1 旋回的水进期沉积，湖盆边缘三角洲沉积相发育，水位较低，膏盐岩段为 I_1 旋回的水进体系域，主要发育石膏岩，盐岩，碳酸盐岩，与海侵作用有关，湖盆边缘湖水水位波动较大，发育泥质膏岩、膏质

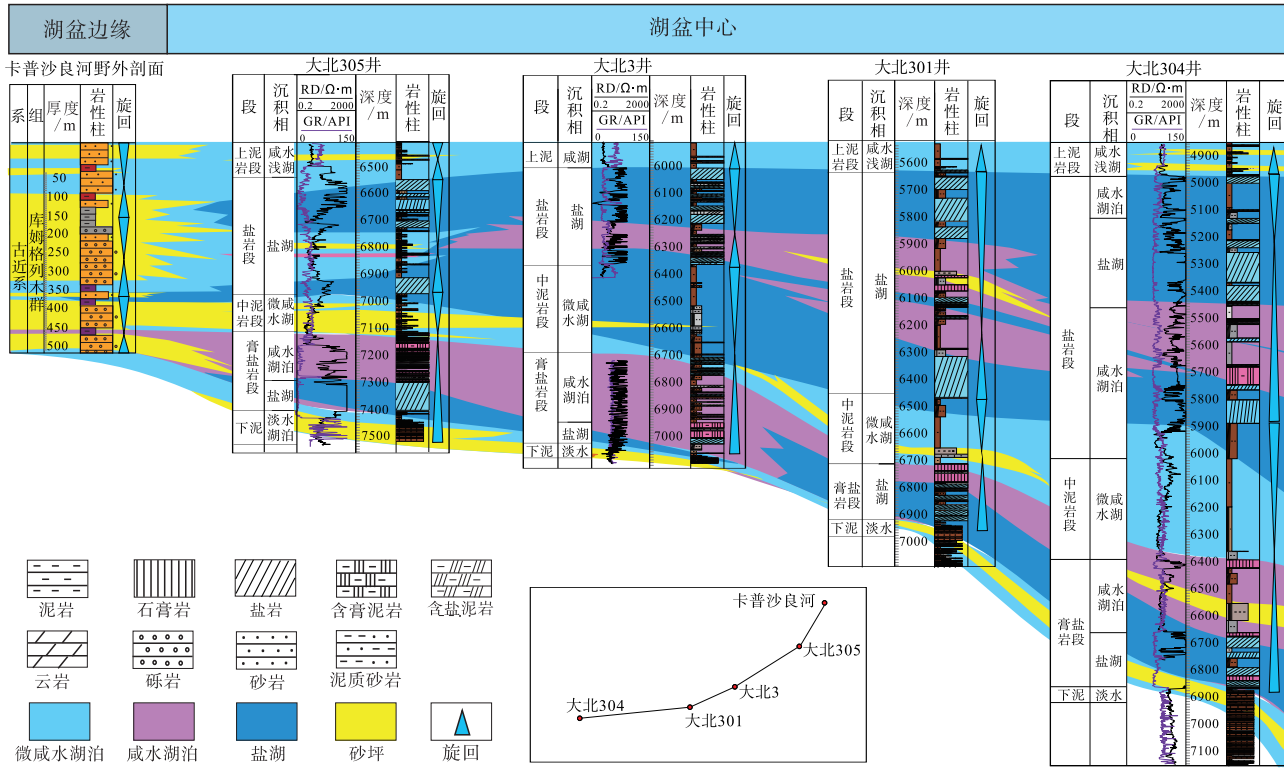


图 4 库车坳陷库姆格列木群沉积时期湖盆中心与边缘沉积旋回对比

Fig. 4 Comparison of sedimentary cycles between center and edge of basin during the sedimentary period of Kumugeliemu Group in Kuqa Depression

泥岩。中泥岩段为 I_1 旋回的最顶部，中泥岩段的厚度由于构造作用的影响呈现西薄东厚的特征。盐岩段的中下部主要发育有盐质泥岩、盐岩，对应第 2 个 III 级旋回 I_2 ，盐岩段受到后期构造作用影响，厚度变化极大，盐质泥岩对应水进期。盐岩段上部和中泥岩段对应第 3 个 III 级旋回 I_3 ，此时湖盆中心为盐湖，受蒸发作用影响，湖水水位较低，湖盆边缘发育砂泥坪 (图 4)。

湖盆中心与湖盆边缘剖面 III 级旋回对应良好。在受海侵影响前，湖盆中心沉积泥岩，与湖盆边缘砂砾岩对应，此时湖盆水位最高。在海侵以及温暖湿润气候的共同影响下，湖盆中心先沉积大套石膏岩，湖盆边缘水位波动较大，发育泥质石膏岩与之对应，随后湖盆中心盐度逐渐变高，沉积盐质泥岩，主要发育盐泥坪沉积相，此时湖盆边缘发育石膏岩。后期在干旱气候持续影响下，湖水进一步蒸发，此时湖盆水位达到最低，沉积大套盐岩，与此同时，湖盆边缘发育冲积扇、砂泥坪沉积相 (图 5)。

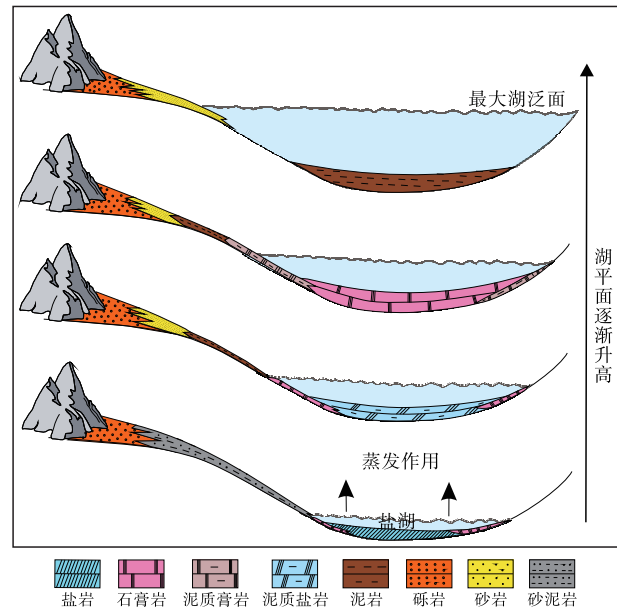


图 5 库车坳陷库姆格列木群沉积序列

Fig. 5 Sedimentary sequence of the Kumugeliemu Group in Kuqa Depression

3 库姆格列木群沉积时期海侵及古气候的演变

3.1 库姆格列木群沉积年龄

精确沉积年龄的确定有利于了解陆地沉积时期的海侵和气候背景。早期古生物学表明库姆格列木群沉积于晚古新世—早始新世（张一勇和詹家祯，1991；何承全等，2009；祝幼华等，2012）。为获得精确的沉积年龄，郑民和孟自芳（2007）通过古地磁测试方法得出库姆格列木群的沉积时间为 38.0~60.5 Ma。张志亮等（2013）以克拉苏河剖面为重点研究对象，综合判断后将库姆格列木群的沉积时间定为 33~41.5 Ma。张涛（2014）综合利用孢粉组合以及古生物资料，确定库姆格列木群的沉积时间为 38~42.2 Ma。为了更好地限定南天山前陆盆地新生代沉积年龄，Zhang 等（2015）再次对克拉苏河剖面古地磁数据进行了分析，将库姆格列木群的沉积年龄限制在 46~54 Ma。

3.2 海侵的演变

库姆格列木群发育海相化石 *Potamides* spp.，

Natica sp., *Ampullina* sp., *Newtoniella* sp. 等，为中亚盐湖链的最东支，形成时间较晚，属于干旱气候背景下断续海侵的产物（雍天寿和单金榜，1986；陈荣林，1996；曹养同等，2016）。根据全球海平面升降变化（Miller *et al.*, 2020），结合古生物学、地球化学等证据综合判断，认为 I₁ 旋回沉积时期可能为 54~51 Ma，在此阶段全球海平面波动较大，有过 2 次上升，同时期塔西南阿尔塔什组的³⁴S 值介于 16.4‰~19.1‰之间，塔北地区塔拉克组石膏的³⁴S 值介于 16.5‰~17.9‰之间，与同时期海水的³⁴S 值相接近（孙宏伟，2014；徐洋等，2018），并且在塔拉克剖面的石膏层中能观察到生物夹层，发现孢粉：*Schizaeoisporites longus*, *S. laevigatiformis*, *Cyathidites minor* 等，在最后 1 个 IV 级旋回石膏岩层中发现有海相双壳类化石（王招明，2004），并夹有薄层灰绿色泥灰岩，为海侵留下的证据，指示该时期湖平面上升与海侵有关，海水从塔西南坳陷经阿克苏一带，流入库车坳陷，海侵表现为间断性。全球海平面于 54~51 Ma 后在 I₂ 旋回又经历了 2 次较大升高（51~48 Ma），在该旋回生物层中发现

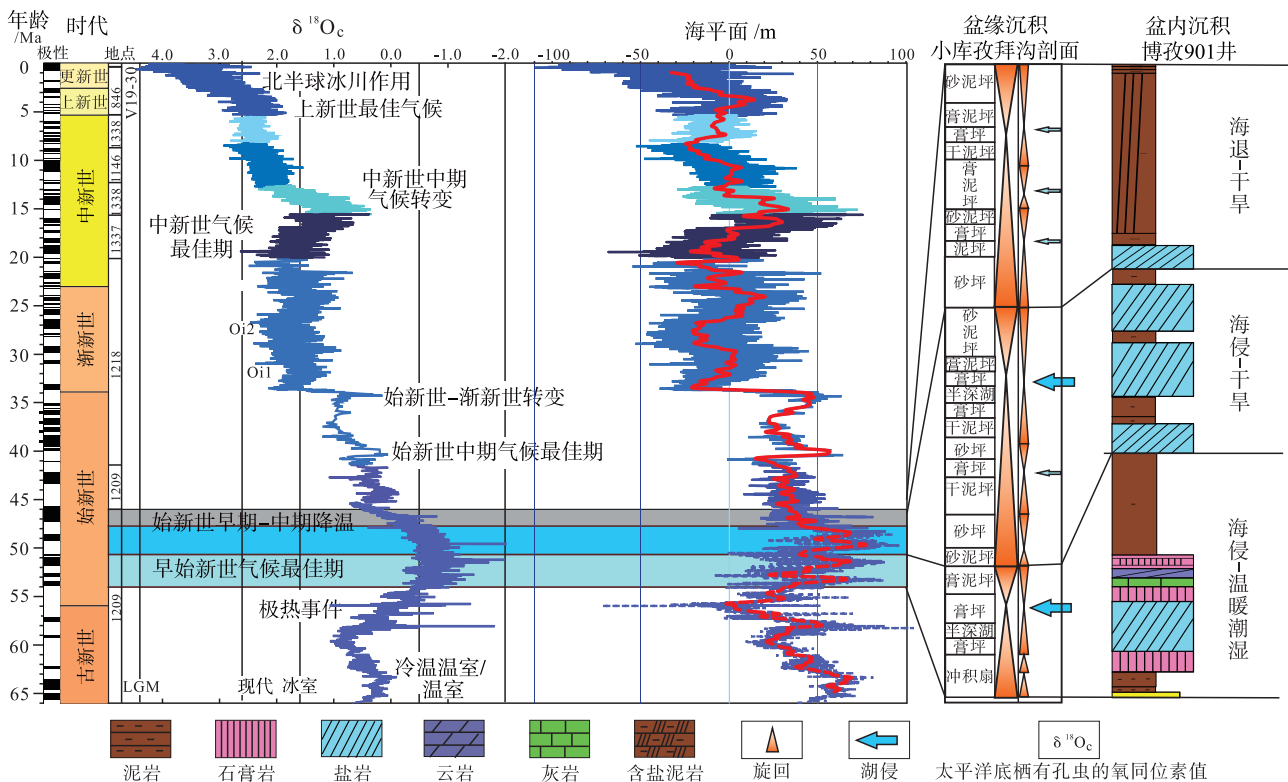


图 6 库车坳陷库姆格列木群沉积时期全球气候和海平面变化特征（据 Miller *et al.*, 2020；有修改）
 Fig. 6 Global climatic and eustatic changes during the deposition of the Kumugeliemu Group in Kuqa Depression
 (modified from Miller *et al.*, 2020)

有丰富的腹足类及双壳类化石, 腹足类如 *C. praeovus wensuensis*, *C. cinctus* 等, 介形类如 *Neocyprideis galba*, *N. sp.* (王招明, 2004), 说明在 I_2 沉积期间海平面的 2 次上升亦与海侵有关。 I_3 旋回沉积期间, 全球海平面在 48 Ma 后持续下降, 未达到 51–48 Ma 的高度, 且在沉积物中没有发现海侵留下的痕迹, 说明该阶段没有发生过海侵(图 6)。

3.3 古气候的演变

如前所述, I_1 旋回沉积于 54–51 Ma 时期, Warren (2016) 在蒸发岩专著中强调, 陆缘盆地蒸发岩主要发育于温室气候模式下, 与库姆格列木群亦发育于始新世温室气候期对应较好。EECO (Early Eocene Climatic Optimum) 发生于 51–53 Ma 期间, 在此阶段温度显著增加, 碳同位素出现负偏, 降雨量显著增加。在高纬度地区, 气候最为湿润, 并且氧同位素值较高, 随着纬度变低, 湿润度降低 (Hyland *et al.*, 2018; Westerhold *et al.*, 2018; Van Dijk *et al.*, 2020)。同时, 博孜 901 井、克深 132 井的 Mg/Ca 值都较低, 低值指示温湿气候, Ca 元素含量在逐渐减小, 表明水体流动变快, 在沉积物中不易析出, 陆源碎屑输入变多, Ti、Al 元素含量在 I_1 旋回逐渐增加, 表明陆源碎屑输入变多, 表明温暖潮湿的气候背景(图 7; 图 8) (马宝林和王琪, 1997; 谭红兵和于升松, 1999; 刘子涵等, 2022)。此外, 在库姆格列木群下部发现腹足类: *Potamides angustsa*, 介形类 *Nucleolina longillipita*, 通过研究发现蕨类植物孢子异常发育, 以 *Polypodiaceosporites*, *Ephedripites-Paricisporites-Quercoidites* 孢粉组合为主并发现轮藻化石: *Sphaerochara chainensis*, *S. primorskensis* 等 (胡兰英, 1982; 张一勇, 1995; 李玉英, 2007), 在塔西南与塔北地区同时期地层中的 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 都有记录到该时期炎热潮湿的气候 (Qin *et al.*, 2023)。说明 I_1 旋回的古气候以温暖潮湿为主。

I_2 旋回中, 博孜 901 井、克深 132 井 P 元素含量明显富集, 克深 132 井的 Mg/Ca 值与 Sr/Ba 值都较高(图 7; 图 8; 图 9), 两者同时说明该阶段气候较为干旱 (许丽等, 2016; 王淑丽等, 2019)。通过孢粉组合的研究得出生物组合主要为亚热带及亚热带—热带植被, 麻黄类含量较高, 同样反映出较为干旱的气候 (王得林, 2000)。此时

气候有可能受到行星风系的控制下变为干旱 (苗运法等, 2008)。在野外剖面可观察到沉积厚层蒸发岩, 但蒸发岩总与碎屑岩交互沉积, 反映出炎热干旱的背景下, 并存在有周期性湿润的时期 (贾进华, 2002; 曹养同等, 2010), 因此判断 I_2 旋回阶段古气候以干旱炎热为主, 夹有多期次短暂的湿润期。

I_3 旋回(48–46 Ma)中, 克深 132 井的 V/(V+Ni) 值与 Fe/Mn 值较高(图 9), 临夏、西宁、柴达木盆地等多个盆地的赤铁矿记录到的硅酸盐风化强度表明在约 47 Ma 附近气候受全球气候变冷的影响下开始变冷(冯展涛, 2022), 同时该阶段不受海侵的影响, 来自副特提斯洋的水汽输入较少, 因此推断 I_3 旋回阶段库车坳陷气候逐渐变冷变干。

4 库姆格列木群含盐层系发育的控制因素

4.1 海侵的影响

成盐环境可以不为单一的特定环境, 可以是海湾、潟湖、内陆湖等, 也可以为陆地上与海有通道半封闭的陆缘盆地, 成盐物质既可以来源于海水、亦可来源于大气降水, 通过本次研究, 发现不同沉积旋回中受海侵影响程度的不同, 成盐物质来源略有不同。

第 1 个 III 级旋回 I_1 , 湖盆中心发育冲积扇—河流相—湖泊相沉积组合, 在盆缘库车河剖面表现为 2 个冲积扇和 1 个膏坪相 IV 级旋回沉积(图 3), 说明在海侵发生前物质来源主要来自大气降水。后期在断续海侵的影响下, 库车坳陷由内陆内流盆地转变为与海有联系的陆缘盆地。湖盆中心沉积 1 套石膏岩—盐岩—碳酸盐岩的岩性组合, 湖盆边缘也可观察到大套的石膏岩。第 1 次海平面上升对应博孜 901 井底部石膏岩—盐岩的形成, 第 2 次海平面上升对应底部云岩—灰岩—石膏岩的沉积, 此次海侵导致原先咸化的水体先发生淡化, 发育 1 套碳酸盐岩, 随后逐渐蒸发浓缩, 沉积石膏岩(图 6)。

第 2 个 III 级旋回 I_2 , 湖盆中心以沉积盐岩夹泥岩为主, 部分井还发育有石膏岩, 并不发育碳酸盐岩, 为冲积扇—河流相—湖泊相沉积组合。在湖盆边缘库车河剖面依次发育冲积扇、膏坪相和扇三角洲 3 个 IV 级旋回, 盆缘西部小库孜拜沟剖面依次

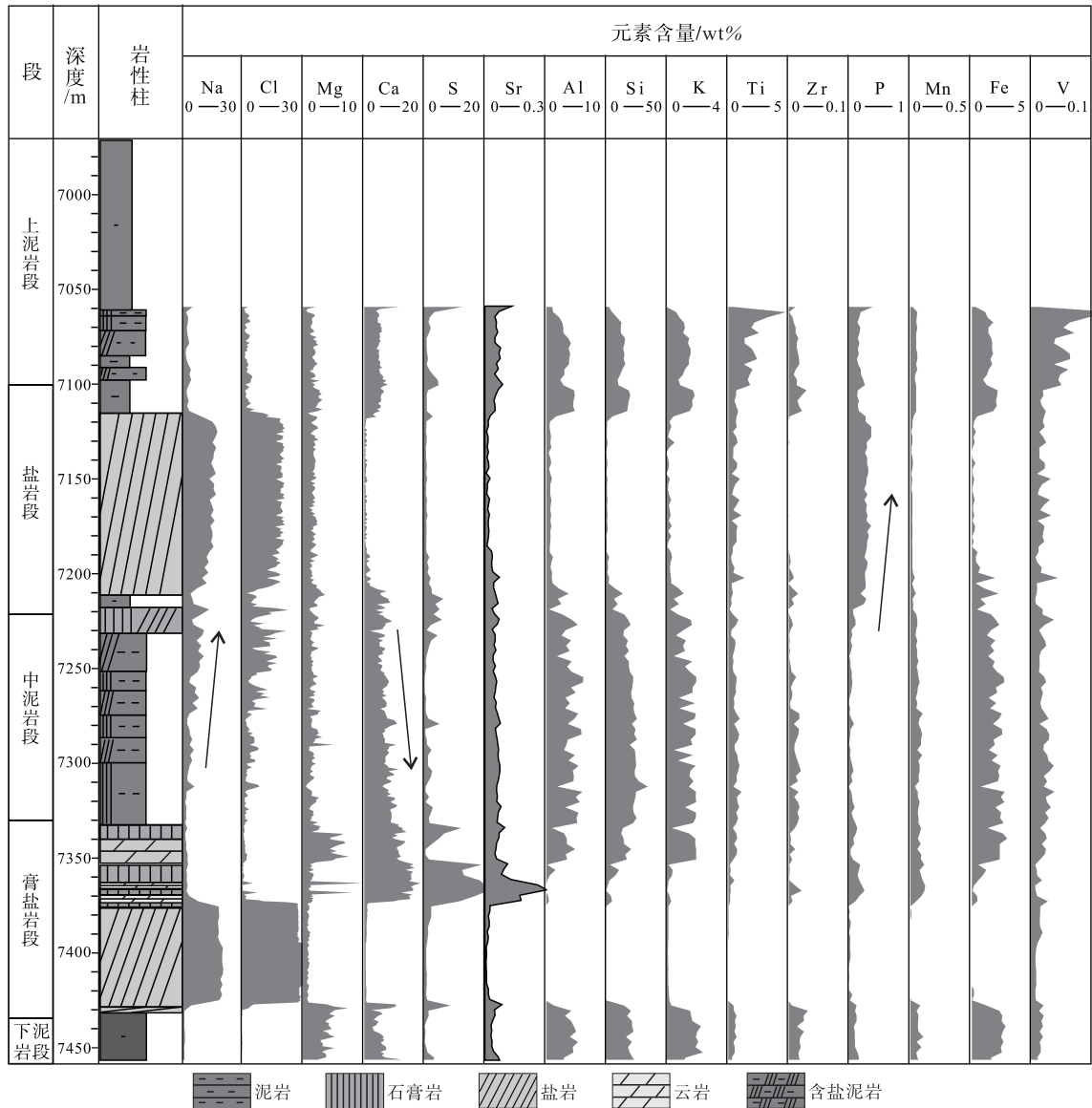


图 7 库车坳陷克深 132 井库姆格列木群元素含量变化趋势

Fig. 7 Trend of element content of Well Keshen 132 of the Kungeliemu Group in Kuqa Depression

发育砂坪、泥坪和膏坪相的Ⅳ级旋回(图 3), 反映了湖水水位整体升高的趋势。如前所述, 该旋回同样受到了海侵的影响, 但该旋回小库孜拜组石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 12‰ 左右, 均低于 15‰, 低于当时海相沉积石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 的值, 在库姆格列木群盐岩段的 $\delta^{34}\text{S}$ 及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分别为 11.250‰~14.375‰, 0.7100~0.7108, 均指示海陆过渡相(章振国等, 2010; 王凡等, 2022), 且该旋回不发育碳酸盐岩, 没有发育正常的海侵—海退沉积模式, 该套厚层盐岩的 $\text{Br}\times 10^3/\text{Cl}$ 极低, 不能用正常的海水蒸发沉积模式解释(谭红兵等, 2005)。说明该旋回盐类的沉积不仅受海侵影响, 同样受到大气降水的影响。由于

天山褶皱带不断隆起, 库车坳陷也相应抬高, 致使库车坳陷逐渐由潟湖转变为了盐湖, 海水可能以地下水的方式输送到库车坳陷, 大套盐岩的沉积受海水与大气降水混合的影响。

第 3 个Ⅲ级旋回 I_3 , 在此阶段没有发生海侵, 物质来源应为大气降水。湖盆不发育厚层蒸发岩, 主要表现为沉积厚层泥岩和膏质泥岩, 与此同时, 兰州盆地的野城狐组、西宁盆地的洪沟组都有类似的沉积特征(岳乐平等, 2003; Fang *et al.*, 2019), 为典型的干盐湖沉积特征, 干盐湖的发育与全球海平面下降有关。

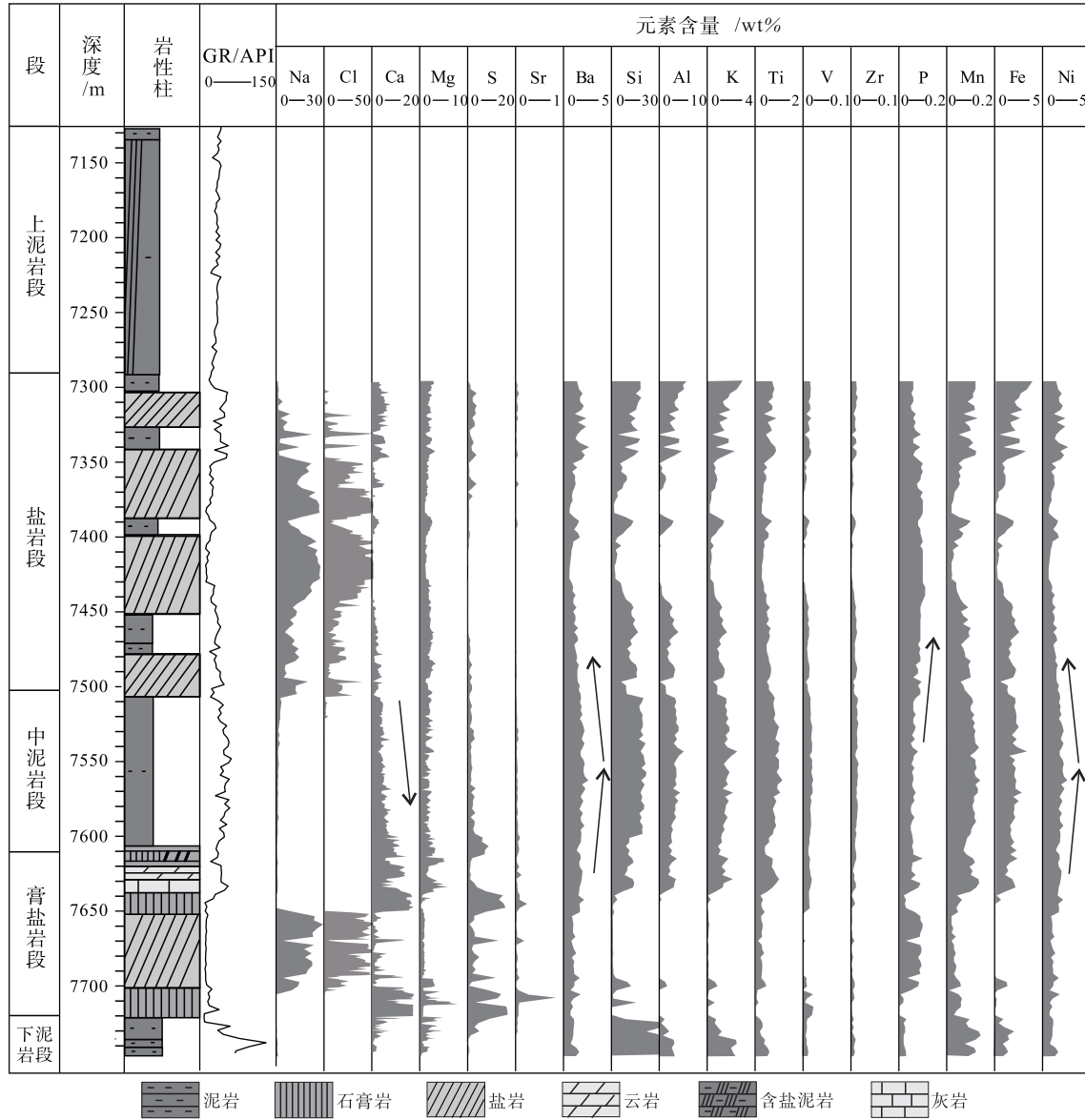


图 8 库车坳陷博孜 901 井库姆格列木群元素含量变化趋势

Fig. 8 Trend chart of element content of Well Bozi 901 of the Kungeliemu Group in Kuqa Depression

4.2 气候的影响

库姆格列木群沉积时处于温室气候背景下，在温室气候条件下，两极缺乏永久性冰川，海底扩张速率增加，大陆自由空间增加，与此同时，全球海平面波动频率和幅度远较冰室气候小，以每 10 万年 5~10 m 升降为主 (Warren, 2016)。该类波动既保证了陆缘盆地在海平面下降时与外海有效隔离，亦保证了海平面上升时盐类物质源源不断供应 (Warren, 2016)。库姆格列木群含盐层系岩相组合特征，在不同 III 级旋回内显著不同，说明除了受海侵影响外，可能与早始新世气候变化有关。

库姆格列木群在 I₁ 旋回中，海水在温室气候影响下逐渐浓缩，湖盆中心盐度逐渐升高，沉积碳酸盐岩—石膏岩—盐岩的岩性组合，与此同时，在湖盆边缘发育大套石膏岩。同时期不同纬度地区的蒸发岩都受到温室气候的影响，如江汉盆地新沟嘴组，东营凹陷沙河街组发育的蒸发岩 (Zuo *et al.*, 2020; Fan *et al.*, 2022)，到了后期气候逐渐变得潮湿温暖，大气降水输入的增加使湖盆水体的盐度逐渐降低，无法达到石膏岩、盐岩的析出条件，于是在湖盆中心沉积薄层碳酸盐岩，在后期湿润气候进一步的影响下，湖盆水体盐度已达不到蒸发岩沉淀

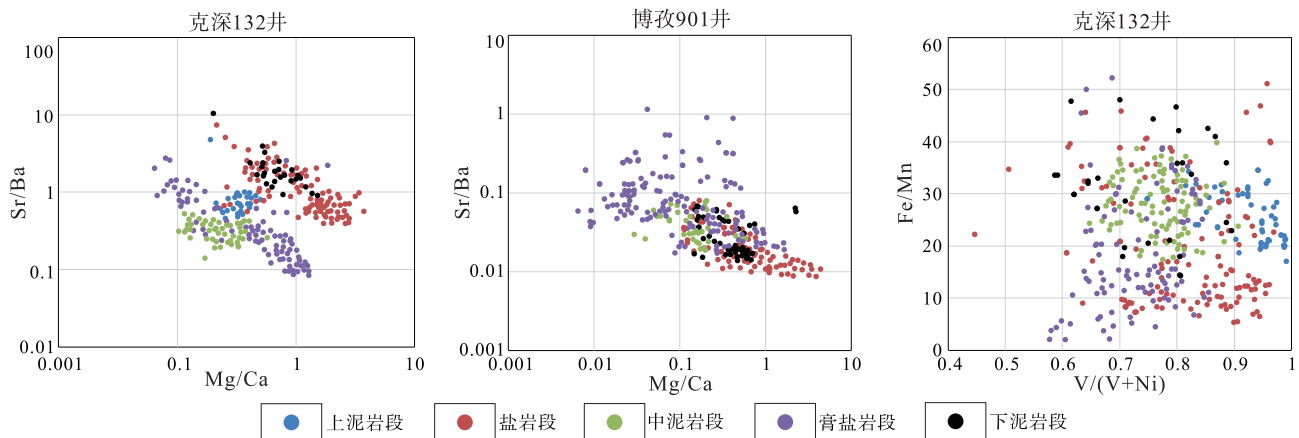


图9 库车坳陷库姆格列木群不同层段元素比值交会图

Fig. 9 Cross plots of element ratios of the Kumugeliemu Group in Kuqa Depression

条件, 在湖盆中心表现为发育大套的泥岩, 盆缘则表现为泥岩与膏质泥岩互层, 沉积相由膏坪转变为膏泥坪。

在 I_2 旋回中, 气候总体干旱, 并存在多期次短暂的湿润期。具体表现为, 受干旱气候的影响, 湖盆中心水体不断蒸发, 盐度变高, 发育厚层盐岩, 在湖盆边缘同时也沉积多个石膏层, 在整体炎热的背景下夹杂多期次短暂的湿润期, 使得湖盆水体盐度不断变化, 在短暂的湿润期气候条件下, 在湖盆中心沉积多个盐质泥岩层, 在湖盆边缘小库孜拜沟剖面IV级旋回中可见黄红色泥岩与灰绿色砂岩互层, 在库车河剖面可见砖红色泥岩与灰绿色灰质泥岩互层。该旋回气候较为波动, 导致湖盆水体的盐度不断波动, 出现了盐岩与盐质泥岩互层的现象。

在 I_3 旋回中, 由于气候变冷且较为干旱, 同时湖盆中的盐类物质较少, 湖盆水体蒸发量不足以达到蒸发岩析出的条件, 仅沉积厚层红棕色泥岩与盐质泥岩, 在湖盆边缘则表现为厚层的膏质泥岩以及泥岩。在野外剖面上多以干泥坪、膏泥坪沉积相为主。

5 结论

1) 建立了陆相宽浅氧化型盐湖的沉积模式, 由物源区至盐湖中心分别发育冲积扇、砂坪、干泥坪、膏泥坪、膏坪和盐盘沉积, 其中泥岩可发育于多种类型的沉积环境中, 不具指相意义。

2) 库车坳陷库姆格列木群发育3个III级旋回, I_1 旋回以冲积扇砂砾岩—泥岩—石膏岩组合为特征; I_2 旋回以冲积扇砂砾岩—泥岩—石膏岩

组合为特征; I_3 旋回以泥岩—石膏岩组合为主。库车坳陷经历了由陆内河湖相沉积转化为陆缘盐湖盆地沉积, 继而又转化为陆内干盐湖沉积。

3) 库车坳陷库姆格列木群含盐层系的沉积受早始新世气候和全球海平面变化的协同控制。早始新世气候适宜期 (53–51 Ma) 和海平面上升使库车坳陷由陆内内流盆地转化为陆缘盐湖盆地, 后期 (51–48 Ma) 海平面再次升高和持续的干旱气候促进了陆缘盆地大套盐岩的沉积, 晚期 (48–46 Ma) 全球海平面的下降及持续干旱气候, 是陆缘盆地向内陆干盐湖转化的主要原因。

参考文献 (References)

- 曹养同, 杨海军, 刘成林, 顾乔元, 焦鹏程, 卢玉红. 2010. 库车盆地古—新近纪蒸发岩沉积对喜马拉雅构造运动期次的响应. 沉积学报, 28(6): 1054–1065. [Cao Y T, Yang H J, Liu C L, Gu Q Y, Jiao P C, Lu Y H. 2010. Response on sediment of evaporate in Kuqa Basin from Paleogene to Neogene period and Himalayan tectonic phase. Acta Sedimentologica Sinica, 28(6): 1054–1065]
- 曹养同, 刘成林, 颜辉, 焦鹏程, 张华, 吕凤琳, 丁婷. 2016. 中—新生代塔里木与中亚盐湖链蒸发岩沉积及其控制因素初探. 矿床地质, 35(3): 591–604. [Cao Y T, Liu C L, Yan H, Jiao P C, Zhang H, Lü F L, Ding T. 2016. Research on evaporite deposit and its controlling factors for saline lake chain of Tarim Basin and Central Asia Basin during Mesozoic-Cenozoic period. Mineral Deposits, 35(3): 591–604]
- 陈荣林. 1996. 塔里木盆地第三纪含盐系地质特征研究. 化工矿产地质, 18(4): 276–283. [Chen R L. 1996. Geological characteristics of the tertiary salt-bearing sequences in Tarim Basin. Geology of Chemical Minerals, 18(4): 276–283]
- 丁道桂, 刘伟新, 崔可锐, 王道轩, 孙世群. 1997. 塔里木中生代前陆盆地构造分析与油气领域. 石油实验地质, 19(2): 97–107. [Ding D G, Liu W X, Cui K R, Wang D X, Sun S Q. 1997. Tectonic

- analyses and hydrocarbon domains in the Mesozoic and Cenozoic foreland basins of Tarim. *Petroleum Geology & Experiment*, 19(2): 97-107]
- 冯展涛. 2022. 青藏高原东北缘临夏盆地始新世地层序列及其构造—气候意义. 兰州大学博士学位论文. [Feng Z T. 2022. Eocene stratigraphic sequence and its tectonic-climatic significance in Linxia Basin, northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau. Doctoral dissertation of Lanzhou University]
- 郭宪璞. 1991. 新疆克孜勒苏群的沉积环境探讨: 兼论塔里木盆地西部白垩系最低海相层位. *地质学报*, 65(2): 188-198. [Guo X P. 1991. An approach to the depositional environment of the Cretaceous Kizilsu group: the lowermost marine horizon of the Cretaceous in the western Tarim Basin. *Acta Geologica Sinica*, 65(2): 188-198]
- 郭宪璞, 丁孝忠, 何希贤, 李汉敏, 苏新, 彭阳. 2002. 塔里木盆地中新世海侵和海相地层研究的新进展. *地质学报*, 76(3): 299-307. [Guo X P, Ding X Z, He X X, Li H M, Su X, Peng Y. 2002. New progress in the study of marine transgressive events and marine strata of the meso-cenozoic in the Tarim Basin. *Acta Geologica Sinica*, 76(3): 299-307]
- 何承全, 宋之琛, 祝幼华. 2009. 中国沟鞭藻类化石. 北京: 科学出版社. [He C Q, Song Z C, Zhu Y H. 2009. *China Dinoflagellate Fossils*. Beijing: Science Press]
- 何登发, 贾承造, 德生, 张朝军, 孟庆任, 石昕. 2005. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化. *石油与天然气地质*, 26(1): 64-77. [He D F, Jia C Z, De S, Zhang C J, Meng Q R, Shi X. 2005. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 26(1): 64-77]
- 胡兰英. 1982. 塔里木盆地晚第三纪有孔虫古生态及地质意义. *科学通报*, 27(15): 938-941. [Hu L Y. 1982. Late Tertiary foraminifer ecology of the Tarim Basin and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 27(15): 938-941]
- 郇志鹏, 胡剑风, 王志民, 宋金鹏, 莫涛, 郝祥保, 田盼盼, 崔德育, 杨敬博, 李浩平, 刘新宇, 平忠伟. 2022. 库车坳陷古近系盐底卡层技术研究与应用. *中国石油勘探*, 27(1): 142-150. [Huan Z P, Hu J F, Wang Z M, Song J P, Mo T, Hao X B, Tian P P, Cui D Y, Yang J B, Li H P, Liu X Y, Ping Z W. 2022. Research and application of the base salt rock discrimination of the Paleogene in Kuqa Depression. *China Petroleum Exploration*, 27(1): 142-150]
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社. [Jia C Z. 1997. *Structural Characteristics and Oil and Gas in Tarim Basin, China*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 贾承造. 1999. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律. *新疆石油地质*, 20(3): 177-183. [Jia C Z. 1999. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 20(3): 177-183]
- 贾进华. 2002. 新疆库车坳陷中、新生界碳酸盐岩及其成因意义. *古地理学报*, 4(4): 30-38. [Jia J H. 2002. Carbonate rocks and their genetic significance of the Mesozoic and Cenozoic in kuqa depression of Xinjiang area. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 4(4): 30-38]
- 李玉英. 2007. 库车盆地古近纪沉积环境与岩相古地理研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Li Y Y. 2007. The research on depositional environments and lithofacies palaeogeography in Kuqa Basin. Masteral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]
- 刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 陈永志. 2006. 世界主要古代钾盐找矿实践与中国找钾对策. *化工矿产地质*, 28(1): 1-8. [Liu C L, Wang M L, Jiao P C, Chen Y Z. 2006. The exploration experiences of potash deposits in the world and probing of countermeasures of China's future potash-deposits investigation. *Geology of Chemical Minerals*, 28(1): 1-8]
- 刘成林, 曹养同, 杨海军, 焦鹏程, 顾乔元. 2013a. 库车前陆盆地古近纪—新近纪盐湖环境变迁及其成钾效应探讨. *地球学报*, 34(5): 547-558. [Liu C L, Cao Y T, Yang H J, Jiao P C, Gu Q Y. 2013a. Discussion on paleogene-neogene Environmental Change of Salt Lakes in Kuqa Foreland Basin and its potash-forming Effect. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(5): 547-558]
- 刘成林, 焦鹏程, 宣之强, 曹养同, 赵宪福. 2013b. 库车盆地古近系蒸发岩中钾盐矿物研究进展. *地质论评*, 59(2): 233-234. [Liu C L, Jiao P C, Xuan Z Q, Cao Y T, Zhao X F. 2013b. Research progress of sylvite in the Paleogene Evaporates in Kuqa Basin. *Geological Review*, 59(2): 233-234]
- 刘子涵, 李建明, 陈琰, 柳金城, 崔俊. 2022. 微量元素在沉积环境中的应用: 以柴西英西地区下干柴沟组上段为例. *中外能源*, 27(6): 23-34. [Liu Z H, Li J M, Chen Y, Liu J C, Cui J. 2022. Application of trace elements in sedimentary environment: case study of upper member of lower Ganchaigou formation in Yingxi area, Western Qaidam Basin. *Sino-Global Energy*, 27(6): 23-34]
- 卢华复, 陈楚铭, 刘志宏, 贾东, 王国强, 贾承造. 2000. 库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因. *石油学报*, 21(3): 18-24. [Lu H F, Chen C M, Liu Z H, Jia D, Wang G Q, Jia C Z. 2000. The structural features and origin of the kuqa rejuvenation foreland thrust belt. *Acta Petrolei Sinica*, 21(3): 18-24]
- 马宝林, 王琪. 1997. 青海湖现代沉积物的元素分布特征. *沉积学报*, 15(3): 120-125. [Ma B L, Wang Q. 1997. Distribution characteristics of elements in modern sediments of Qinghai Lake. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(3): 120-125]
- 马新华. 2000. 含盐油气盆地. 北京: 石油工业出版社. [Ma X H. 2000. *Saline Oil and Gas Basin*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 苗运法, 方小敏, 宋之琛, 吴福莉, 韩文霞. 2008. 青藏高原北部始新世孢粉记录与古环境变化. *中国科学(D辑)*, (2): 187-196. [Miao Y F, Fang X M, Song Z C, Wu F L, Han W X. 2008. Eocene palynological records and paleo-environmental changes in the northern Tibetan Plateau. *Science in China Press (Series D)*, (2): 187-196]
- 邵龙义, 何志平, 顾家裕, 罗文林, 贾进华, 刘永福, 张丽娟, 张鹏飞. 2006. 塔里木盆地古近纪岩相古地理. *古地理学报*, 8(3): 353-364. [Shao L Y, He Z P, Gu J Y, Luo W L, Jia J H, Liu Y F, Zhang L J, Zhang P F. 2006. Lithofacies palaeogeography of the Paleogene in Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 8(3): 353-364]
- 宋金鹏, 田盼盼, 代俊杰, 杨连刚, 戴瑞瑞, 郭喜阳. 2021. 塔里木盆地库车坳陷膏盐岩分布特征及油气地质意义. *断块油气田*, 28(6): 800-804. [Song J P, Tian P P, Dai J J, Yang L G, Dai R R, Guo X Y. 2021. Distribution characteristics of gypsum-salt rock and petroleum geological significance in Kuqa Depression of Tarim Basin. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 28(6): 800-804]

- 苏新,郭宪璞,丁孝忠. 2003. 塔里木北部库车前陆盆地晚白垩世和古新世的钙质超微化石组合. 现代地质, 17(4): 370-377. [Su X, Guo X P, Ding X Z. 2003. Late Cretaceous and Paleocene calcareous nannofossil assemblages from Kuqa foreland Basin in the northern Tarim Basin. *Geoscience*, 17(4): 370-377]
- 孙宏伟. 2014. 新疆莎车盆地上白垩统一古近系蒸发岩沉积特征及其找钾指示意义. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Sun H W. 2014. Sedimentary characteristics of Upper Cretaceous-Paleogene evaporite in Shache Basin, Xinjiang and its indicative significance for potassium prospecting. Masteral dissertation of China University of Geosciences]
- 谭红兵,于升松. 1999. 我国湖泊沉积环境演变研究中元素地球化学的应用现状及发展方向. 盐湖研究, 7(3): 58-65. [Tan H B, Yu S S. 1999. Present situation and future development of elemental geochemistry in the study of lake sediments' evolution. *Journal of Salt Lake Research*, 7(3): 58-65]
- 谭红兵,马海州,许建新,肖应凯,王建国,李廷伟. 2005. 塔里木盆地西部古盐岩同位素地球化学与成钾预测研究. 地球学报, 26(B09): 174-179. [Tan H B, Ma H Z, Xu J X, Xiao Y K, Wang J G, Li T W. 2005. Isotope geochemistry of ancient salt rocks and prognosis of sylvinitic deposits in western Tarim Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(B09): 174-179]
- 唐天福. 1989. 新疆塔里木盆地西部白垩纪至早第三纪海相地层及含油性. 北京: 科学出版社. [Tang T F. 1989. Cretaceous-Paleogene Marine Strata and Oil-bearing in Western Tarim Basin, Xinjiang. Beijing: Science Press]
- 田军,杨海军,吴超,莫涛,朱文慧,史玲玲. 2020. 博孜 9 井的发现与塔里木盆地超深层天然气勘探潜力. 天然气工业, 40(1): 11-19. [Tian J, Yang H J, Wu C, Mo T, Zhu W H, Shi L L. 2020. Discovery of Well Bozi 9 and ultra-deep natural gas exploration potential in the Kelasu tectonic zone of the Tarim Basin. *Natural Gas Industry*, 40(1): 11-19]
- 王得林. 2000. 新疆古近纪和新近纪古地理. 新疆地质, 18(4): 352-356. [Wang D L. 2000. Palaeogeography of the Paleogene in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 18(4): 352-356]
- 王凡,邓小林,郑绵平,韦钊,王淑丽,赵玉海,刘星旺,王占文. 2022. 新疆库车坳陷西段膏盐层沉积、地球化学特征及找钾方向. 地球科学, 47(1): 56-71. [Wang F, Deng X L, Zheng M P, Wei Z, Wang S L, Zhao Y H, Liu X W, Wang Z W. 2022. Sedimentary-geochemical characteristics and potash-prospecting potential of gypsum-salt layer in western Kuqa Depression. *Earth Science*, 47(1): 56-71]
- 王淑丽,郑绵平,王永明,王凡,王英林,张震,吴静依,李洪普. 2019. 中国盐湖地球化学发展历程与研究进展. 科学技术与工程, 19(9): 1-9. [Wang S L, Zheng M P, Wang Y M, Wang F, Wang Y L, Zhang Z, Wu J Y, Li H P. 2019. Advances and development history of geochemistry on salt lakes in China. *Science Technology and Engineering*, 19(9): 1-9]
- 王兴元,尹宏伟,邓小林,韦钊. 2015. 库车坳陷新生代盐岩锶同位素特征及物质来源分析. 南京大学学报(自然科学), 51(5): 1068-1074. [Wang X Y, Yin H W, Deng X L, Wei Z. 2015. Strontium isotope characteristics and the origin of Cenozoic salt deposits in Kuqa Depression. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 51(5): 1068-1074]
- 王招明. 2004. 库车前陆盆地露头区油气地质. 北京: 石油工业出版社. [Wang Z M. 2004. Petroleum Geology in Outcrop Area of Kuqa Foreland Basin. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 王招明,谢会文,李勇,雷刚林,吴超,杨宪彰,马玉杰. 2013. 库车前陆冲断带深层盐下大气田的勘探和发现. 中国石油勘探, 18(3): 1-11. [Wang Z M, Xie H W, Li Y, Lei G L, Wu C, Yang X Z, Ma Y J, Neng Y. 2013. Exploration and discovery of large and deep subsalt gas fields in kuqa foreland thrust belt. *China Petroleum Exploration*, 18(3): 1-11]
- 许丽,李江海,王洪浩,黄少英. 2016. 库车坳陷大北地区古近纪沉积特征及盐湖演化. 特种油气藏, 23(5): 56-61. [Xu L, Li J H, Wang H H, Huang S Y, Neng Y. 2016. Paleogene sedimentary properties and salt lake evolution in Dabeí of Kuqa Depression. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 23(5): 56-61]
- 徐洋,曹养同,刘成林,焦鹏程. 2018. 库车盆地始新世盐湖物源及蒸发浓缩程度研究. 地质学报, 92(8): 1617-1629. [Xu Y, Cao Y T, Liu C L, Jiao P C. 2018. Provenance and degree of evaporation and concentration of Eocene salt lake in the Kuqa Basin. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1617-1629]
- 徐洋,刘成林,曹养同. 2021. 新疆库车盆地中始新世成盐演化特征: 以 KL4 钻孔为例. 地质学报, 95(7): 2183-2192. [Xu Y, Liu C L, Cao Y T. 2021. Salt-forming evolution characteristics of Middle Eocene in the Kuqa Basin, Xinjiang: A case study of borehole KL4. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2183-2192]
- 雍天寿,单金榜. 1986. 白垩纪及早第三纪塔里木海湾的形成与发展. 沉积学报, 04(3): 67-75. [Yong T S, Shan J B. 1986. The development and formation in the Tarim Bay in Cretaceous-Paleogene ages. *Acta Sedimentologica Sinica*, 04(3): 67-75]
- 岳乐平,邱占祥,颜光普,邱铸鼎,张莉,张云翔, Heller F. 2003. 兰州盆地永登剖面记录的第三纪沉积环境. 沉积学报, 21(4): 683-687. [Yue L P, Qiu Z X, Xie G P, Qiu Z D, Zhang L, Zhang Y X, F H. 2003. Sedimentary environment of Tertiary recorded in the Yongdeng section of Lanzhou Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(4): 683-687]
- 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. [Zhang C J, Tian Z Y. 1998. Tertiary salt structures and hydrocarbons in Kuqa Depression of Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 19(1): 6-10]
- 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. 地球学报, 34(5): 577-584. [Zhang H, Liu C L, Cao Y T, Sun H W, Wang L C. 2013. A tentative discussion on the time and the way of marine regression from Tarim Bay during the Cenozoic. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5): 577-584]
- 张涛. 2014. 天山南麓库车坳陷新生代高精度磁性地层与构造演化. 兰州大学博士学位论文. [Zhang T. 2014. Cenozoic high-precision magnetic strata and tectonic evolution in Kuqa Depression at the southern foot of Tianshan Mountains. Doctoral dissertation of Lanzhou University]
- 张勇刚,吕福亮,范国章,王彬,李丽,李东,邵大力,杨姣. 2012. 盐相关盆地油气地质特征及其勘探认识: 以红海盆地为例. 盐湖研究, 20(1): 9-15. [Zhang Y G, Lü F L, Fan G Z, Wang B, Li L, Li D, Shao D L, Yang J. 2012. Salt-related basin hydrocarbon geology characteristics and exploration recognition: a case study of Red

- Sea basin. *Journal of Salt Lake Research*, 20(1): 9-15]
- 张一勇. 1995. 中国早第三纪孢粉植物群纲要. *古生物学报*, 34(2): 212-227. [Zhang Y Y. 1995. Outline of palaeogene palynofloras of China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 34(2): 212-227]
- 张一勇, 詹家祯. 1991. 新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪孢粉. 北京: 科学出版社. [Zhang Y Y, Zhan J Z. 1991. Sporopollen from Late Cretaceous to Early Tertiary in Western Tarim Basin, Xinjiang. Beijing: Science Press]
- 章振国, 高继雷, 张向文. 2010. 塔里木盆地古代蒸发岩硫同位素地球化学研究. *甘肃地质*, 19(1): 32-37. [Zhang Z G, Gao J L, Zhang X W. 2010. Geochemistry of sulfur isotope of paleo-evaporites in Tarim Basin. *Gansu Geology*, 19(1): 32-37]
- 张志亮, 沈忠悦, 汪新, 唐鹏程, 余养里, 赵博, 潘小青, 石林权. 2013. 库车坳陷克拉苏河新生代沉积岩磁组构特征与古流向分析. *地球物理学报*, 56(2): 567-578. [Zhang Z L, Shen Z Y, Wang X, Tang P C, Yu Y L, Zhao B, Pan X Q, Shi L Q. 2013. Characteristics of magnetic fabrics and paleocurrent directions of Cenozoic sediments in the Kelasu River, Kuqa Depression. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(2): 567-578]
- 郑民, 孟自芳. 2006. 新疆拜城古近系磁性地层划分. *沉积学报*, (5): 650-656. [Zheng M, Meng Z F. 2006. Magnetostratigraphy of tertiary system in Baicheng, Xinjiang. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(5): 650-656]
- 郑绵平, 袁鹤然, 张永生, 刘喜方, 陈文西, 李金锁. 2010. 中国钾盐区域分布与找钾远景. *地质学报*, 84(11): 1523-1553. [Zheng M P, Yuan H R, Zhang Y S, Liu X F, Chen W X, Li J S. 2010. Regional distribution and prospects of potash in China. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1523-1553]
- 钟逸斯, 王立成, 董浩伟. 2022. 蒸发岩沉积特征及环境综述. *沉积学报*, 40(5): 1188-1214. [Zhong Y S, Wang L C, Dong H W. 2022. Evaporite sedimentary characteristics and environment: a review. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(5): 1188-1214]
- 祝幼华, 赵媛媛, 钟石兰. 2012. 塔里木盆地库车坳陷小库孜拜剖面古近纪钙质超微化石. *古生物学报*, 51(3): 328-333. [Zhu Y H, Zhao Y Y, Zhong S L. 2012. Palaeogene calcareous nannofossils from the Xiaokuzibai section of the Kuqa Depression, Tarim Basin. *Acta Palaeontologica Sinica*, 51(3): 328-333]
- 卓勤功, 李勇, 宋岩, 杨宪彰, 赵孟军, 方世虎, 柳少波, 鲁雪松. 2013. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带古近系膏盐岩盖层演化与圈闭有效性. *石油实验地质*, 35(1): 42-47. [Zhuo Q G, Li Y, Song Y, Yang X Z, Zhao M J, Fang S H, Liu S B, Lu X S. 2013. Evolution of Paleogene saline deposits and effectiveness of traps in Kelasu tectonic zone, Kuqa Depression, Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(1): 42-47]
- Fan X J, Lu Y C, Zhang J Y, Wu S Q, Zhang L A, Du X J, Cui Q Y, Wang H. 2022. Lithofacies characteristics, depositional environment and sequence stratigraphic framework in the saline lacustrine basin: a case study of the Eocene low member of Xingouzui Formation, Jianghan Basin, China. *Energies*, 15: 6235.
- Fang X M, Fang Y H, Zan J B, Zhang W L, Song C H, Appel E, Meng Q Q, Miao Y F, Dai S, Lu Y, Zhang T. 2019. Cenozoic magnetostratigraphy of the Xining Basin, NE Tibetan Plateau, and its constraints on paleontological, sedimentological and tectonomorphological evolution. *Earth-Science Reviews*, 190: 460-485.
- Hardie L, Smoot J, Eugster H. 1978. Saline Lakes and their deposits: A sedimentological approach. *Modern and ancient lake sediments*, 7-41.
- Hyland E G, Huntington K W, Sheldon N D, Reichgelt T. 2018. Temperature seasonality in the North American continental interior during the Early Eocene Climatic Optimum. *Climate of the Past*, 14: 1391-1404.
- Lauretano V, Littler K, Polling M, Zachos J C, Lourens L J. 2015. Frequency, magnitude and character of hyperthermal events at the onset of the Early Eocene climatic optimum. *Clim Past*, 11: 1313-1324.
- Miller K G, Browning J V, Schmelz W J, Kopp R E, Mountain G S, Wright J D. 2020. Cenozoic Sea-level and cryospheric evolution from deep-sea geochemical and continental margin records. *Science Advances*, 6: eaaz1346.
- Qin P, Zhong D K, Su C, Yang X Z, Sun H T, Zhang H, Song L, Yang Y, Wang H X. 2023. A unique saline lake sequence in the eastern Tethyan Ocean in responses to the Palaeocene-Eocene thermal maximum: a case study in the Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 250: 105594.
- Van Dijk J, Fernandez A, Bernasconi S M, Caves Rogenstein J K, Passey S R, White T. 2020. Spatial pattern of super-greenhouse warmth controlled by elevated specific humidity. *Nature Geoscience*, 13: 739-744.
- Warren J. 2016. *Evaporites: a Geological Compendium*. Springer: 408-413.
- Westerhold T, Röhl U, Donner B, Zachos J C. 2018. Global extent of early Eocene hyperthermal events; a new Pacific benthic foraminiferal isotope record from shatsky rise(ODP site 1209). *Paleoceanog and Paleoclimatol*, 33: 626-642.
- Xu Y, Cao Y T, Liu C L, Zhang H, Nie X. 2020. The history of transgressions during the Late Paleocene-Early Eocene in the Kuqa depression, Tarim Basin: Constraints from C-O-S-Sr isotopic geochemistry. *Minerals*, 10: 834.
- Zachos J, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K. 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 292: 686-693.
- Zachos C, Dickens R, Zeebe E. 2008. An Early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*, 451: 279-283.
- Zhang Z L, Shen Z Y, Sun J M, Wang X, Tian Z H, Pan X Q, Shi L Q. 2015. Magnetostratigraphy of the Kelasu section in the Baicheng Depression, Southern Tian Shan, Northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 492-504.
- Zuo X C, Li C L, Zhang J L, Ma G Y, Chen P P. 2020. Geochemical characteristics and depositional environment of the Shahejie Formation in the Binnan Oilfield, China. *Journal of Geophysics and Engineering*, 17: 539-551.

(责任编辑 王绍华; 英文审校 龚承林)