

doi: 10.12029/gc20211010001

张军振, 常健, 李晨星, 冯乾乾, 张海祖, 李丹. 2024. 新疆库车坳陷东部中—新生代构造—热演化与油气勘探远景分析[J]. 中国地质, 51(3): 799–810.

Zhang Junzhen, Chang Jian, Li Chenxing, Feng Qianqian, Zhang Haizu, Li Dan. 2024. Meso–Cenozoic tectono–thermal evolution and prospect analysis of oil and gas exploration of the eastern Kuqa Depression in the Tarim Basin[J]. Geology in China, 51(3): 799–810(in Chinese with English abstract).

## 新疆库车坳陷东部中—新生代构造—热演化与油气 勘探远景分析

张军振<sup>1,2,3</sup>, 常健<sup>1,3</sup>, 李晨星<sup>1,3</sup>, 冯乾乾<sup>1,3</sup>, 张海祖<sup>4</sup>, 李丹<sup>1,3</sup>

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120; 3. 中国石油大学(北京)地球与科学学院, 北京 102249; 4. 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:**【研究目的】库车坳陷油气资源丰富, 但与油气生成与保存相关的构造—热演化研究很薄弱。【研究方法】本研究通过对库车坳陷东部典型钻孔样品开展磷灰石裂变径迹测试分析与热史模拟, 精确重建了库车坳陷东部自中生代以来的构造—热演化史, 并评价了烃源岩成熟演化期次。【研究结果】本文基于原位 LA-ICP-MS 法测试的磷灰石裂变径迹年龄介于 77.7~104.5 Ma, 远小于地层年龄, 有效地记录了晚白垩世的快速隆升事件。通过热史模拟揭示出库车坳陷东部地区自侏罗纪以来经历了早白垩世—晚始新世(120~40 Ma)和晚中新世至今(10~0 Ma)两期快速隆升事件, 分别是由拉萨地块、印度板块与欧亚板块南缘碰撞的远程效应造成的。【研究结论】库车坳陷东部地区的差异性构造隆升是由南天山由北向南逐渐推进的俯冲挤压造成的。库车坳陷东部地区侏罗系烃源岩在长期沉降作用影响下表现为多阶段成熟演化模式, 但受构造隆升事件的影响, 曾在早白垩世—晚始新世和晚中新世至今处于停滞阶段。本研究厘定了库车坳陷东部自中生代以来的构造—热演化史, 明确了主要烃源岩成熟演化过程, 对区域构造演化和下一步油气勘探具有重要的指导意义。

**关键词:** 石油天然气; 烃源岩热演化; 热史模拟; 磷灰石裂变径迹; 构造—热演化; 构造隆升; 油气地质勘查工程; 库车坳陷东部; 新疆

**创 新 点:** 揭示了库车坳陷东部 120~40 Ma 和 10~0 Ma 两期快速隆升事件; (2) 结合热史和盆地模拟明确了库车坳陷东部侏罗系烃源岩成熟演化期次。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)03-0799-12

## Meso–Cenozoic tectono–thermal evolution and prospect analysis of oil and gas exploration of the eastern Kuqa Depression in the Tarim Basin

ZHANG Junzhen<sup>1,2,3</sup>, CHANG Jian<sup>1,3</sup>, LI Chenxing<sup>1,3</sup>, FENG Qianqian<sup>1,3</sup>, ZHANG Haizu<sup>4</sup>, LI Dan<sup>1,3</sup>

(1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249,

收稿日期: 2021-10-10; 改回日期: 2024-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972125)资助。

作者简介: 张军振, 男, 1995 年生, 硕士生, 主要从事低温热年代学研究; E-mail: 2582965891@qq.com。

通讯作者: 常健, 男, 1982 年生, 博士, 教授, 主要从事沉积盆地热历史重建、低温热年代学方法与应用、沉积物源分析和油气成藏机理方面的研究; E-mail: changjian@cup.edu.cn。

China; 2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co. Ltd., Shanghai 200120, China; 3. School of Earth and Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Exploration and Development Research Institute of Tarim Oilfield Company, Petro China, Korla 841000, Xinjiang, China)

**Abstract:** This paper is the result of oil and gas geological exploration engineering.

**[Objective]** Kuqa Depression is rich in oil and gas resources, but the study of tectonic–thermal evolution related to oil and gas generation and preservation is very weak. **[Methods]** In this study, the apatite fission track test analysis and thermal history simulation were carried out on typical drilling samples in the eastern part of Kuqa Depression. The tectonic–thermal evolution history of the eastern part of Kuqa Depression since Mesozoic was accurately reconstructed, and the maturity evolution period of source rocks was evaluated. **[Results]** The apatite fission track ages measured by in-situ LA–ICP–MS are between 77.7 Ma and 104.5 Ma, which are much smaller than the stratigraphic age, and the rapid uplift events of Late Cretaceous are effectively recorded. The thermal history simulation reveals that Kuqa Depression has experienced two periods of rapid uplift since Jurassic (Early Cretaceous–Late Eocene (120–40 Ma) and Late Miocene–present (10–0 Ma)), which are caused by the remote effect of the collision between Lhasa plate, Indian plate and the southern margin of Eurasia plate. **[Conclusions]** The differential tectonic uplift in Kuqa Depression is caused by the subduction and compression of the southern Tianshan Mountains gradually advancing from north to south. The Jurassic source rocks in Kuqa Depression show a multi-stage mature evolution model under the influence of multi-stage subsidence. Affected by tectonic uplift events, the Jurassic source rocks mature evolution was at a stagnation stage from early Cretaceous to late Eocene and late Miocene. This study determines the tectonic–thermal evolution history of eastern Kuqa Depression since Mesozoic, and clarifies the mature evolution process of main source rocks, which have important guiding significance for regional tectonic evolution and next oil and gas exploration.

**Key words:** oil and gas; thermal evolution of source rock; thermal history simulation; apatite fission track; tectonic–thermal evolution; structural uplift; oil and gas geological exploration engineering; eastern Kuqa Depression; Xinjiang

**Highlights:** (1) The eastern Kuqa Depression experienced two rapid uplifting events of 120–40 Ma and 10–0 Ma; (2) The maturation evolution stages of the Jurassic source rocks in the eastern Kuqa Depression were determined by combining the thermal histories and basin modeling.

**About the first author:** ZHANG Junzhen, male, born in 1995, master candidate, mainly engaged in low-temperature thermochronology research; E-mail: 2582965891@qq.com.

**About the corresponding author:** CHANG Jian, male, born in 1982, doctor, professor, mainly engaged in sedimentary basin thermal history reconstruction, low temperature thermal chronology method and application, sediment source analysis, hydrocarbon accumulation mechanism research; E-mail: changjian@cup.edu.cn.

**Fund support:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41972125).

## 1 引 言

库车坳陷地处塔里木盆地最北部,与南天山毗邻交接,呈逆冲叠瓦状东西向展布。作为向造山带过渡的前缘地区,库车坳陷是盆地内重要的天然气产区,是研究造山带隆起和盆地沉降的载体,也是油气勘探的重点区域(Chang et al., 2012)。中国石油塔里木油田公司早期已在塔里木盆地北缘库车逆冲推覆带发现克拉 2、迪那 2、却勒 1 等大型油气田,最近(2018 年 12 月)又在其南部秋里塔格背斜带中段发现中秋 1 特大型凝析气藏(杜金虎等,

2019),这表明库车逆冲推覆带具有良好的油气勘探前景,已成为中国未来油气勘探的重要接替区。

磷灰石裂变径迹(AFT)技术作为一种成熟的低温热年代学技术,已广泛应用于造山带构造隆升、地形地貌、成矿期次、沉积盆地热历史等研究领域(Stockli et al., 2000; Ehlers and Farley, 2003; Gavillot et al., 2010; Wilke et al., 2012)。磷灰石、锆石等矿物所含的放射性元素 $^{238}\text{U}$ 经自发裂变会形成辐射损伤区(经化学蚀刻变成裂变径迹),这些径迹受温度影响会发生不同程度的退火行为,裂变径迹技术就是基于与时间、温度相关的退火行为发展而来的。

沉积盆地在形成过程中会经历沉积、隆升和剥蚀等地质事件,其热演化史非常复杂,而对于这种相对复杂的热历史,传统的古温标方法(如镜质体反射率等)无法给出令人满意的结果,裂变径迹技术通常能够有效地重现地质历史事件,更好地解释复杂的构造—热历史(Stockli et al., 2000; Ehlers and Farley, 2003)。近年来,激光剥蚀等离子体质谱仪法(LA-ICP-MS)越来越被广泛地应用于磷灰石、锆石等的裂变径迹测年中,许多学者基于该方法对典型盆地或山脉进行了探索研究(Zhang et al., 2018; 庞建章, 2019; Donahue et al., 2020; 武利民等, 2021)。一些学者已利用磷灰石裂变径迹参数对库车坳陷西部构造—热演化和隆升事件开展过研究工作(Yin et al., 1998; 王飞宇等, 1999; 罗梦等, 2012; 喻顺等, 2014; Yu et al., 2014; Chang et al., 2017),但目前库车坳陷东部地区缺少相关研究。本研究拟通过对库车坳陷东部 7 个钻孔样品进行磷灰石裂变径迹年龄测试与分析,并基于退火模型开展热史模拟,从而精细地揭示库车坳陷东部中—新生代的构造—热演化史,为下一步油气勘探与资源评价提供重要参考依据。

## 2 地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北部,南起塔北隆起,沿天山造山带北东东向展布,其形成与印欧大陆碰撞的远距离效应密切相关。东西长 550 km,南北宽 20~60 km,总面积 2.8 万 km<sup>2</sup>。库车盆地被称为

为前陆盆地或再生前陆盆地(孙龙德等, 2002; 李曰俊等, 2008)。中生代以来,在天山的强烈挤压作用下,发育了大型逆冲断层和褶皱带,库车坳陷形成了“四带三凹”的构造格局(图 1)。由北向南依次为北部单斜带、克拉苏—依奇克里克构造带、拜城—阳霞凹陷带、秋立塔格构造带和前缘隆起带(汤良杰等, 2006)。

库车坳陷是一个以中—新生代沉积为主的复合前陆盆地,受多期构造运动的影响(王伟锋等, 2018; Qin et al., 2022),经历了晚二叠世—三叠纪前陆盆地、侏罗纪—古近纪伸展坳陷盆地和新近纪—第四纪陆内前陆盆地等多期演化阶段(舒良树等, 2004; 能源等, 2012; Chang et al., 2017; 成亚, 2020)。晚二叠世—三叠纪,随着塔里木克拉通和伊犁—中天山地块的碰撞和增生作用,塔里木板块向南天山发生“A”型俯冲,从而在其北部(如库车地区)发育出周缘前陆盆地。沉积中心位于库车坳陷北缘,沉积粗粒磨拉石建造。侏罗纪,由于造山后大陆内部的均衡调整与岩石圈冷却,库车坳陷开始进入伸展坳陷盆地阶段。沉积中心仍然位于库车坳陷北缘,侏罗系整体为河湖相沉积,具有北厚南薄的楔形体沉积特征(成亚, 2020)(图 2)。白垩系沉积中心发生了南移,发展为一套冲积扇—扇三角洲—河流浅湖沉积(曾联波和周天伟, 2004)。晚白垩世时期,在拉萨地块碰撞远程效应的作用下,区域性构造隆升在该时期不断发生,库车坳陷整体构造由伸展转变为挤压,在早白垩世时曾发生大面积

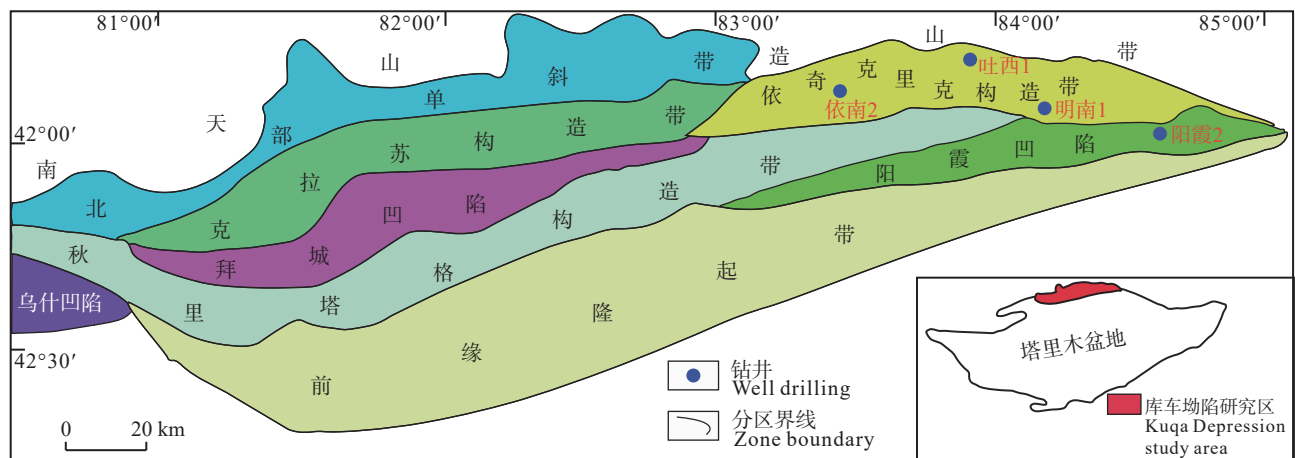


图 1 库车坳陷构造单元划分图

Fig.1 Structural units of Kuqa Depression

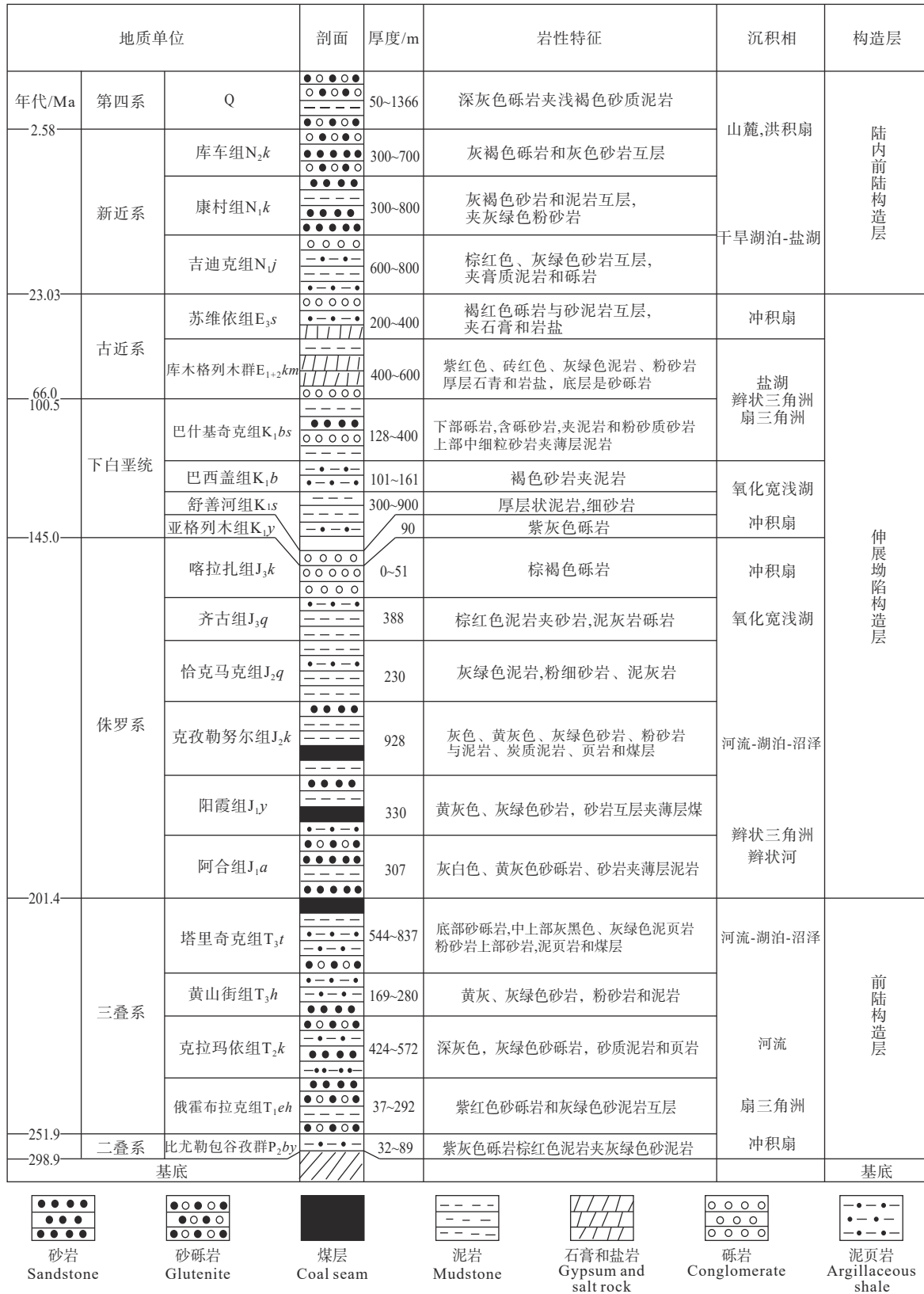


图 2 库车拗陷地层柱状图  
Fig.2 General stratigraphic column of Kuqa Depression

地层缺失。古近纪时期,塔里木板块内部在特提斯洋往塔里木板块俯冲及其伴随的火山活动下处于弧后扩张状态。库车坳陷整体处于弱伸展环境,古近系主要为干旱潟湖沉积,以厚层砂岩、泥岩夹膏盐岩、碳酸盐岩特征。古近纪末期,由于印度板块与欧亚板块碰撞作用的远程效应影响,库车坳陷开始由弱伸展环境向挤压环境过渡。新近纪至第四纪,在喜山作用远程效应的影响下,中亚地区受到强烈的陆内挤压,引起了构造调整和侧向逃逸作用,在山前形成了系列大型逆冲断层和与之相伴生的褶皱构造,构成了库车坳陷现今“四带三凹”的东西向构造格局(石刚, 2010)。

库车坳陷整体以中—新生代沉积为主,地层最厚可达 10000 m。该地区中生代以湖泊—沼泽—河流相沉积为主,中下部夹煤层;新生代为湖泊—河流相沉积,夹两套古近系和新近系膏泥岩或膏盐岩(图 2)。其中,白垩系巴什基齐克组砂岩是库车坳陷西部克拉苏构造带的主要储集层,侏罗系阿合组致密砂岩是库车坳陷东部依奇克里克构造带的主要储集层(贾承造等, 2002; 曾联波和周天伟, 2004)。

### 3 样品及实验

为了揭示出库车坳陷东部地区的构造—热演化历史,本次实验共采集了 7 块井下样品,采样井位分布见图 1。样品 YN2-02 和 YN2-07 为采自依奇克里克构造带西部依南 2 井的红色泥质细砂岩,样品 TX1-03 和 TX1-04 为采自依奇克里克构造带中部吐西 1 井的浅灰色中砂岩,样品 MN1-04 与样品 MN1-05 分别为灰白色中细砂岩和灰白色中砂岩,采自依奇克里克构造带中部的明南 1 井,而样品 YX2-04 采自阳霞凹陷的东部,为灰白色中细砂岩,具体见表 1。这 7 个样品通过重矿物分选技术筛选

出实验所需的磷灰石矿物晶体,筛选结果中样品 TX1-03 与样品 MN1-04 所含磷灰石矿物晶体颗粒数较少,仅大于 300 粒,而样品 YX2-04 所包含颗粒数最多,为 10 mg。样品所含磷灰石矿物晶体颗粒数对实验的可进行性及实验结果的准确性有着密不可分的影响,其矿物筛选成效可能与送样岩石块径大小及样品地质成分相关。实验中需要对样品进行多次精密的打磨抛光处理,该过程对样品中的磷灰石颗粒有所损耗,加之后期的化学蚀刻,对样品中所包含的磷灰石颗粒数有着数量上的要求,同样质地的样品,块径越大,所包含的磷灰石颗粒数越多,一般样品中磷灰石颗粒数在 1000 粒以上效果较好。

磷灰石裂变径迹测试是在中国石油大学(北京)热年代学实验室完成的。首先通过粗碎、细碎、筛选、冲洗、磁选及重液分选等步骤从样品中分选出实验所需的磷灰石颗粒。接着调制特定比例(体积比 7.5 : 1)的环氧树脂(epoxy)和硬化剂(hardener)混合液体,在混合液体冷却固结的同时将磷灰石样品颗粒均匀的撒在直径约 20 mm 的圆柱状硅胶模具底部,使样品晶体在静电吸附作用下牢牢固定在模具底部水平面上。经过 10 min 的除泡与冷凝,使用标准医用注射器将半冷凝状态的混合液约 1 mL 缓慢均匀的注入硅胶模具中,放置 48 h,待其固化后利用 1200 目的砂纸粗磨薄片,磨至大部分磷灰石颗粒最大面出露;然后在磨抛机上利用 StruersMD-Dac 型号抛光布依次搭配 6  $\mu\text{m}$ 、3  $\mu\text{m}$ 、1  $\mu\text{m}$  钻石研磨膏进行抛光,目的是去除颗粒表面的擦痕,可借助双目显微镜观察抛光效果。采用 5.5 mol/L 硝酸在室温(20 $\pm$ 1)  $^{\circ}\text{C}$  条件下蚀刻样品薄片(20.0 $\pm$ 1) s,蚀刻出自发径迹。将样品薄片粘贴在载玻片上,并在载玻片上按照所粘贴样品顺序贴上相

表 1 库车坳陷东部地区样品基本地质信息

Table 1 Geological information of the samples in the eastern Kubian Depression

样品号	井号	深度/m	岩性	层位
TX1-03	吐西1井	1075.5	浅灰色中砂岩	下侏罗统(J <sub>1</sub> )
TX1-04	吐西1井	1309.0	浅灰色中砂岩	下侏罗统(J <sub>1</sub> )
YN2-02	依南2井	3407.9	红色泥质细砂岩	侏罗系(J)
YN2-07	依南2井	4071.0	灰白色细砂岩	侏罗系(J)
MN1-04	明南1井	964.0	灰白色中细砂岩	下侏罗统(J <sub>1</sub> )
MN1-05	明南1井	1151.7	灰白色中砂岩	侏罗系(J)
YX2-04	阳霞2井	5285.3	灰白色中细砂岩	侏罗系(J)

对应的标号标签,即可统计裂变径迹数量、测量封闭径迹长度和  $D_{\text{par}}$  值。随后调整 ICP-MS 测样系统的相关参数,将样品进行铀元素含量的测试,测试的相关流程参考 Donelick(2005)。将所测数据导入 Iolite4 软件中进行初步处理,最后将导出的数据使用 Zeta 法进行样品年龄的计算,最终测得了 7 个样品的裂变径迹年龄和封闭径迹长度数据(表 2)。

## 4 测试结果

本次测试的磷灰石裂变径迹中值年龄介于  $(77.7\pm 8.7)\sim(104.5\pm 14.7)\text{Ma}$ , 平均封闭径迹长度介于  $(9.42\pm 1.53)\sim(13.14\pm 1.52)\mu\text{m}$ (表 2)。所测样品其平均  $D_{\text{par}}$  值变化范围为  $2.48\sim 2.65\mu\text{m}$ 。通常情况下,当卡方检验  $P(\chi^2)>5\%$  时,说明所测样品通过了  $\chi^2$  检验,数据具有统一组分(王飞宇等, 1999),测试年龄使用中值年龄。本文所测 7 个磷灰石样品均通过了检验( $P(\chi^2)>5\%$ )(图 3, 表 2)。

进一步分析发现,靠近北部天山地区的依南 2 井与吐西 1 井的样品磷灰石裂变径迹年龄(YN2-02、YN2-07、TX1-03 与 TX1-04)介于  $(91.1\pm 13.1)\sim(104.5\pm 14.7)\text{Ma}$ , 均远小于相应的地层年龄。而位于库车坳陷中部的明南 1 井两个样品的磷灰石裂变径迹年龄分别为  $(81.0\pm 24.2)\text{Ma}$ 、 $(79.1\pm 27.6)\text{Ma}$ 。位于库车坳陷最南端的阳霞 2 井的样品 YX2-04 的磷灰石裂变径迹年龄为  $(77.7\pm 8.7)\text{Ma}$ , 与其他样品相比最小。整体上,实测磷灰石裂变径迹年龄具有由北向南逐渐减小的特征,这可能反映了库车坳陷构造变形由盆缘向盆内逐渐扩展的过程(王飞宇等, 1999)。

## 5 热史模拟

为了进一步精确和直观的分析库车坳陷东部地区的构造-热演化史,本文将所测磷灰石样品数据利用 HeFTy 软件进行了热史模拟。本次裂变径迹热史模拟采用化学动力学多组分模型(Ketcham et al., 2007)进行。本文实验所采集和测试的样品分别来自四口井,其中井位依南 2、吐西 1、明南 1 均位于库车坳陷与南天山接壤的依奇克里克构造带,阳霞 2 井位于相对靠南的阳霞凹陷,参照前人对库车坳陷东部地区构造与沉积背景的研究设置样品的约束条件(Chang et al., 2017; 张玮等, 2019; 成亚, 2020)。其中,根据磷灰石裂变径迹年龄设置了晚白垩世和早白垩世两个约束条件,结合不整合面发育程度、残余地层厚度及区域构造演化成果设置了始新世和中新世两个约束条件。模拟的起始时间设置为样品开始沉积时间,开始沉积与现今温度均为地表温度( $\sim 20^\circ\text{C}$ ),对适合做模拟(封闭径迹是否测出结果)的 6 个样品进行热史模拟(图 4)。模拟中使用蒙特卡洛法搜索 30000 条热史路径,绿色路径代表拟合度大于 5%,为可接受的路径,粉色路径代表拟合度大于 50%,为好的路径,较粗黑色实线代表最佳模拟路径。

6 个样品的热史模拟结果揭示出库车坳陷东部自侏罗纪以来主要经历了早白垩世—始新世(120~40 Ma)和晚中新世以来(10~0 Ma)两期快速冷却事件(图 4)。研究区多个期次、多个阶段的复杂沉积和隆升过程,晚侏罗世到晚白垩世的沉积速率基本一致,早白垩世到始新世的隆升速率在距

表 2 库车坳陷东部地区磷灰石裂变径迹测试结果

Table 2 Fission track results of apatites in the eastern Kuqa Depression

样品号	颗粒数(n)/个	$\Sigma\text{piO}_i$	$2\sigma\Sigma\text{piO}_i$	$\zeta\text{ICP}$	$2\sigma\zeta\text{ICP}$	$P(\chi^2)/\%$	中值年龄/Ma	封闭径迹长度/ $\mu\text{m}$	$D_{\text{par}}/\mu\text{m}$
TX1-03	25	$7.58\times 10^{-6}$	$2.31\times 10^{-7}$	0.55	0.07	7.1	$104.5\pm 14.7$	$12.47\pm 1.63(30)$	$2.65\pm 0.32$
TX1-04	30	$4.91\times 10^{-6}$	$1.28\times 10^{-7}$	0.55	0.07	32.2	$100.6\pm 14.6$	$12.63\pm 1.55(25)$	$2.62\pm 0.31$
YN2-02	31	$3.08\times 10^{-6}$	$1.16\times 10^{-7}$	0.55	0.07	17.3	$93.3\pm 14.8$	$10.95\pm 3.36(4)$	$2.59\pm 0.20$
YN2-07	43	$5.89\times 10^{-6}$	$1.39\times 10^{-7}$	0.55	0.07	20.1	$91.1\pm 13.1$	$13.14\pm 1.52(22)$	$2.53\pm 0.32$
MN1-04	41	$5.14\times 10^{-6}$	$1.46\times 10^{-7}$	0.55	0.07	8.6	$81.0\pm 24.2$	$9.42\pm 1.53(54)$	$2.51\pm 0.20$
MN1-05	27	$5.35\times 10^{-6}$	$1.80\times 10^{-7}$	0.55	0.07	12.3	$79.1\pm 27.6$	$11.66\pm 1.36(39)$	$2.48\pm 0.32$
YX2-04	37	$1.44\times 10^{-5}$	$2.71\times 10^{-7}$	0.73	0.07	25.3	$77.7\pm 8.7$	—	—

注:  $\Sigma\text{piO}_i$ 、 $2\sigma\Sigma\text{piO}_i$  分别表示某分组测试区域及区域误差值;  $\zeta\text{ICP}$ 、 $2\sigma\zeta\text{ICP}$  分别表示基于 LA-ICP-MS 年龄标准的 Zeta 校准因子及其调整误差;  $P(\chi^2)$  表示卡方检验的结果,当该数值小于 5% 时,表示测试样品在沉积后没有经历过高温重置,记录的是仍是物源区信息,当该数值大于 5% 时,表示测试样品在接受沉积后经历过高温重置,此时样品的中值年龄记录的是沉积地区热历史信息;  $D_{\text{par}}$  表示自发径迹蚀刻象的长轴长度。

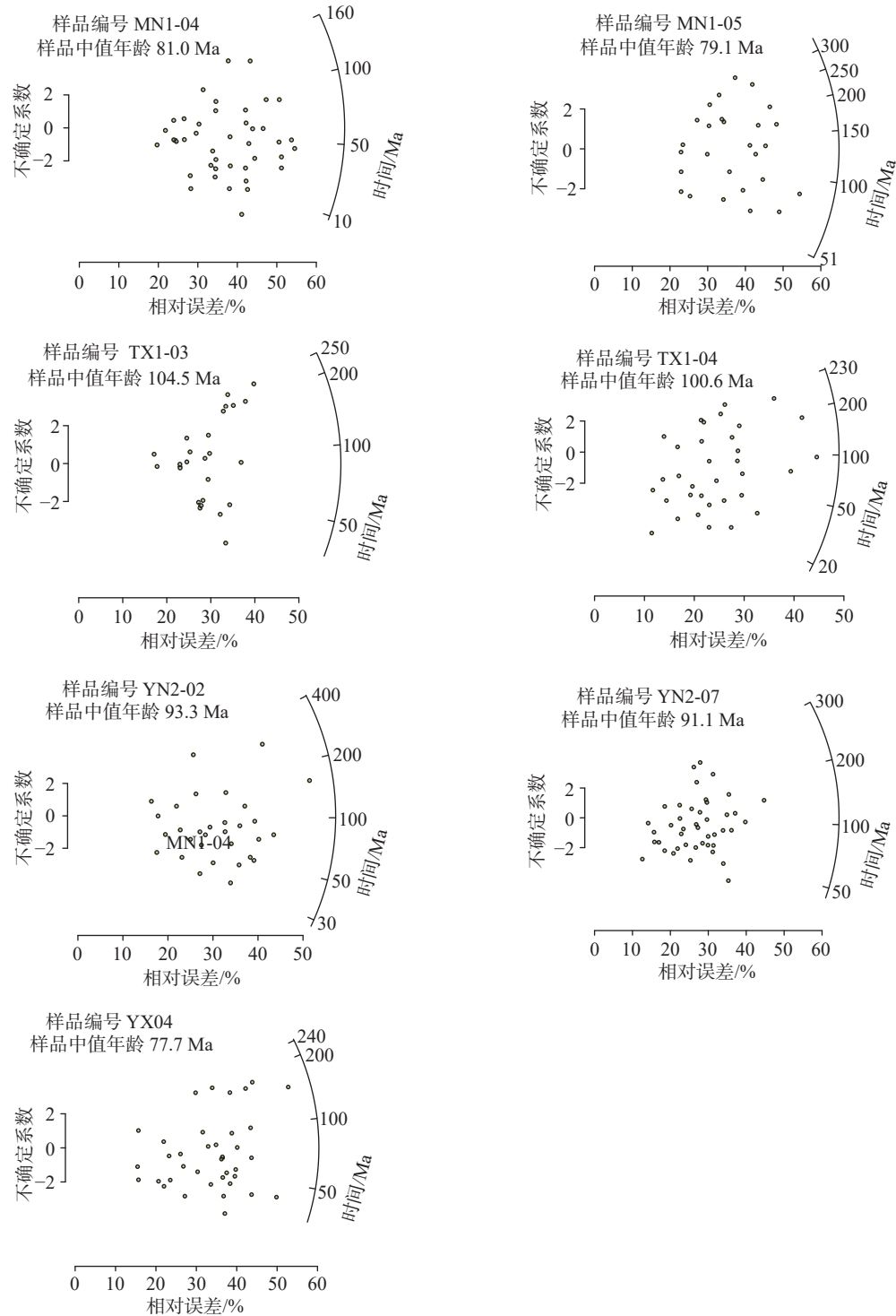


图 3 库车坳陷东部地区样品裂变径迹年龄雷达放射图

Fig.3 Radar radiograms of the apatite fission track ages in the eastern Kuqa Deresspion

今~80 Ma 逐渐变缓, 新纪至第四纪的模拟结果中, YN2-07 沉降趋势与另外 5 个样品有所差异, 这可能与依奇克里克构造带在第四纪天山造山活动中发生的强烈变形有关(张玮等, 2019)。从采样位

置上分析, 最靠近南天山区域的吐西 1 井开始升降时间为 120 Ma(由样品 TX1-03 和 TX1-04 热史模拟结果揭示), 位于依奇克里克构造中部的依南 2 井和明南 1 井升降初始时间为 125 Ma(由样品

MN1-04、MN1-05、YN2-02 与 YN2-07 热史模拟结果揭示),整体可以说明库车坳陷东部地区北部先抬升,进而南部开始抬升,这与磷灰石裂变径迹的年龄数据测试结果是一致的。

此外,库车坳陷东部晚期构造运动强烈,本实验中构造-热演化史揭示的新近纪喜马拉雅运动是其主要动力,喜马拉雅晚期构造挤压强度达到高峰,是研究区构造的主要形成期,也是油气成藏的主要时期(李峰等, 2015)。库车坳陷东部构造-热演化史和烃源岩成熟演化史这种较好的耦合关系,可以为后续库车东部油气藏的勘探开发和评价提供一定的指示意义。

## 6 讨 论

### 6.1 地质构造背景

沉积与剥蚀是地质系统的重要环节,他们的关系在热史模拟图中可以很好地通过曲线走势来表示。早三叠世—白垩纪,库车坳陷属于伸展坳陷盆地形成阶段,其东部地区处在弱伸展环境下,长时间的沉积作用使得依奇克里克构造带库车组的温度逐渐升高至 120~140℃。后期受 Kohistan-Dras 岛弧和拉萨地块碰撞远程效应影响,构造背景由伸展转为挤压,库车坳陷经历了一期区域性构造隆升事件(Chang et al., 2017),造成下白垩统缺失,样品埋藏温度降至 60~80℃。始新世(56~40 Ma)期间库车坳陷东部地区处于弱伸展阶段,但印度-欧亚板块碰撞作用的远程效应影响依然存在,研究区温度整体依然处于下降阶段,其温度冷却速率有较为明显的降低。新近纪受印度-欧亚板块碰撞深远影响,南天山加速隆升,库车坳陷向南天山持续逆冲,其沉积中心南移(成亚, 2020),样品埋藏温度随着沉积层加厚逐渐上升至 90~110℃。更新世时期,随着南天山造山作用的持续影响,库车坳陷与南天山接壤处遭受强烈挤压,随着加剧断裂活动的出现依奇克里克构造带形成了深部背斜和依奇克里克斜坡,并最终逐渐形成库车坳陷东部呈东西向展布的两个线性褶皱带(曹远志, 2009)。该时期库车坳陷隆升活动频繁且顶部伴随剥蚀,地层温度也迅速降低,是前陆盆地的主要活动时期。

确定研究区隆升和剥蚀的一般传统方式是调查相邻地区的沉积物情况(Sobel et al., 2006a)。在

库车坳陷和天山山脉范围内的其他一些前陆盆地中,古近纪底部的库姆格列木组由横向广泛分布的砂岩和砾岩单元组成(马前等, 2006),该序列覆盖白垩纪地层,具有明显的不整合面,被认为代表着天山山脉中新生代逆冲作用的开始(Allen et al., 1991)。库车坳陷白垩系—古近系发育的砂岩反映了物源区发生了明显变化(李双建等, 2006),侧面揭示了天山的沉积-构造演化时间。自古近纪以来,南天山的大面积隆升导致中天山碎屑物质被阻滞而未进入塔里木盆地北部(王超等, 2009),但库车坳陷碎屑沉积记录了库姆格列木组沉积过程中南天山隆升和剥蚀的时间,其磁性地层年龄为 60.5~38 Ma(郑民和孟自芳, 2006)。

受印度板块与欧亚板块碰撞的影响,库车坳陷自新生代以来开始发育逆冲推覆构造。本次研究的磷灰石裂变径迹年龄北老南新的特征体现了构造变形逐渐向南推进的过程,南天山向库车坳陷推进,导致南天山和库车坳陷北部的褶皱带快速抬升和剥蚀。前人研究的结果记录了新生代时期南天山从 42 Ma 到 37 Ma 的加速冷却事件(Yu et al., 2014)。在依奇克里克构造带,热年代学数据记录了一个从 40 Ma 开始的持续冷却过程。本文推测这种升温现象与天山的隆升及推覆沉积作用的时间和程度有关,尽管库车坳陷的地层冷却可能滞后于天山隆升的时间,但是天山的隆升限制了这种变形发生的时间和幅度。

### 6.2 热史分析

从 HeFTy 热模拟结果可以看到,依奇克里克构造带断裂上盘在距今约 10 Ma 发生了快速抬升和剥蚀。根据前人对位于依奇克里克构造带南部的呀哈剖面中新世沉积物的研究(Charreau et al., 2006),这一时间点与 11 Ma 的沉积速率增加后发生的造山隆升作用的时间相一致。11 Ma 的隆升和剥蚀作用增强,很可能和依奇克里克构造带发生逆冲构造变形的时间相匹配。这一发现与西部邻近地区克拉苏背斜中断裂相关褶皱的生长相一致(Liu et al., 2000),其初步地层变形时间为新近纪康村组沉积时期(13.5~5.9 Ma)。这表明在地层变形开始(~13.5 Ma)后的几百万年依奇克里克构造带才开始出现显著冲断层。前人对天山山脉 10~11 Ma 的快速隆升时间也有相关的研究。西天山山前的冲断



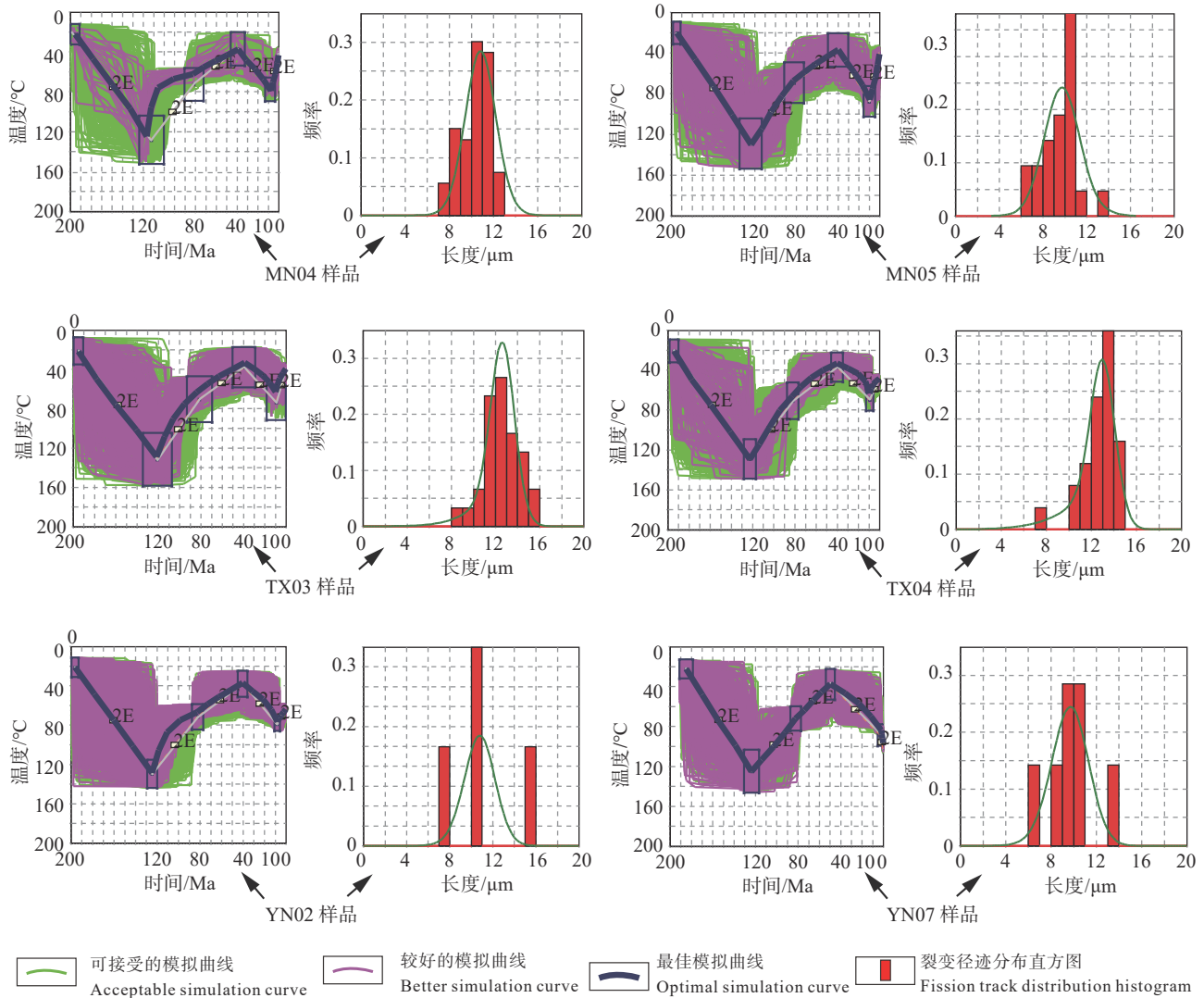


图 4 库车坳陷东部地区样品热史模拟结果

Fig.4 Thermal history of the samples in the eastern Kuqa Depression

层快速隆升时期的磷灰石裂变径迹年龄为 (13.6±2.2) Ma (Sobel and Dumitru, 1997)。吉尔吉斯斯坦天山西部的磁性地层和地质年代学资料研究显示, 在约 11 Ma 时其区域沉积速率加快 (Bullen et al., 2001; Sobel et al., 2006b)。Charreau et al. (2006) 研究认为在约 11 Ma, 天山山脉经历了快速的构造隆升和剥蚀速率加快的过程。这些研究表明, 晚中新世天山造山带整体隆升并且速率加快, 库车坳陷东部地区受其影响随之出现快速的隆升构造过程, 本次模拟的样品热史曲线很好地揭示了该时期的地质运动。

Yu et al. (2014) 通过对克拉苏—依奇克里克构造带吐孜 2 井和克拉 2 井的地层分析发现库车组

及其上覆地层缺失, 并结合磷灰石 (U-Th)/He 年龄认为该地区的隆升—剥蚀开始的时间可能在 ~5.9 Ma。前人利用电子自旋共振 (ESR) 测年法对坎亚肯背斜逆冲断层活动时间进行探测, 发现其断层作用发生在早新世末期 (约 2.1 Ma) 之前 (Charreau et al., 2006)。但需要指出的是, 前人利用磷灰石裂变径迹参数并未揭示出库车坳陷早新世以来的构造隆升史 (贾承造等, 2003; 马前等, 2006; Du et al., 2007; 罗梦等, 2012), 这可能是因为这期隆升事件强度弱, 剥蚀量少, 所以未被磷灰石裂变径迹年龄记录。

结合热史模拟结果、实测镜质体反射率及沉积埋藏史, 本文评价了库车坳陷东部依南 2 井阳霞

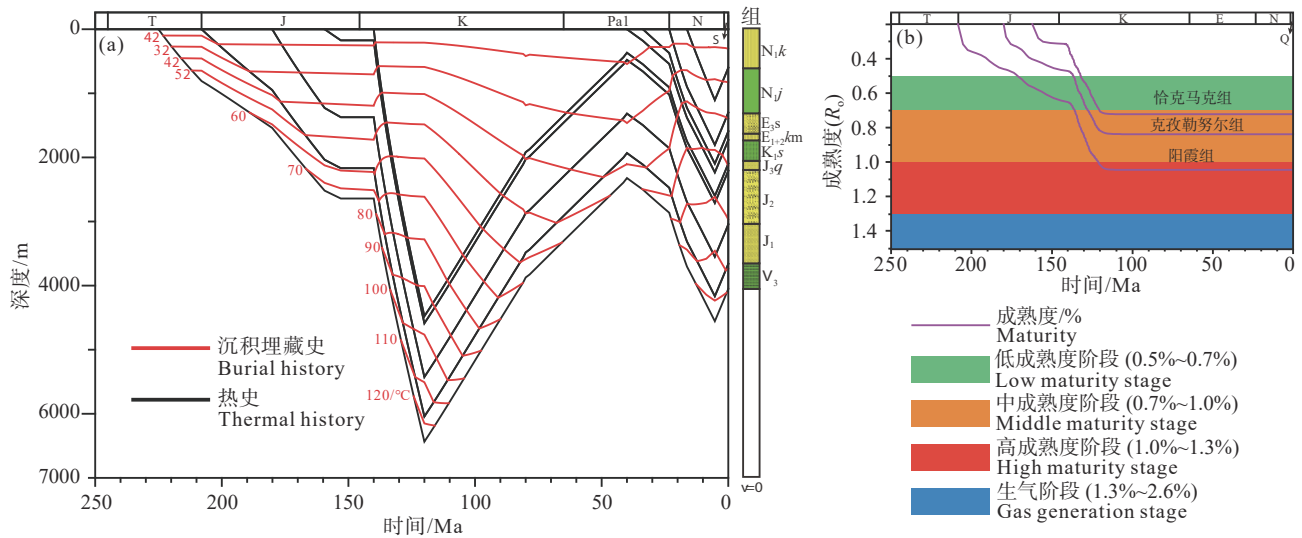


图5 库车坳陷东部地区沉积埋藏史与热史(a)和阳霞组、克孜勒努尔组、恰克马克组烃源岩成熟演化史(b)  
Fig.5 Burial and thermal histories of the eastern Kuqa Depression (a), and the maturation evolution of Yangxia Formation, Kezilnuer Formation and Chakmak Formation source rocks (b)

组、克孜勒努尔组、恰克马克组3套烃源岩的成熟演化过程(图5)。阳霞组烃源岩在中侏罗世进入低成熟阶段,开始生油,早白垩世早期受快速沉降作用影响进入高成熟演化阶段,早白垩世晚期受燕山运动影响地层发生抬升剥蚀,地层温度开始降低,烃源岩热演化过程停止,现今其成熟度为~1.03%;克孜勒努尔组烃源岩在早白垩世进入低成熟阶段,早白垩世晚期因地层隆升剥蚀作用而停止生烃,现今其成熟度为~0.9%;恰克马克组烃源岩在早白垩世早期进入低成熟阶段,同时在早白垩世晚期受构造抬升作用影响停止生烃,现今其成熟度为~0.72%。

## 7 结论

本文通过对库车坳陷东部典型钻孔(吐西1井、依南2井、明南1井和阳霞2井)的磷灰石样品进行实验分析,得到以下主要结论:

(1)库车坳陷东部典型钻孔(吐西1井、依南2井、明南1井和阳霞2井)中生界样品磷灰石封闭径迹长度介于9.42~13.14  $\mu\text{m}$ ,裂变径迹年龄介于77.7~104.5 Ma,平面上表现为由北向南逐渐减小的特征。

(2)通过热史模拟揭示出库车坳陷东部自侏罗纪以来曾经历过两期隆升事件,分别是早白垩世—晚始新世(120~40 Ma)时期因欧亚板块南缘

拉萨地块的拼合导致的构造抬升;新近纪时期(约10 Ma)在南天山构造运动影响下的再次快速隆升。

(3)库车坳陷东部地区新生隆升活动并不是整体统一抬升的过程,表现为与南天山接壤的北部先发生隆起,而后向南部逐渐扩展隆升态势的演化规律。

(4)受多期构造—热演化的影响,库车坳陷东部烃源岩成熟演化呈现出多阶段加热演化模式。

## References

- Allen M B, Windley B F, Chi Z, Chi Z, Zhongyan Z, Guang W. 1991. Basin evolution within and adjacent to the Tien Shan Range, NW China[J]. *Journal of the Geological Society*, 148(2): 369–378.
- Bullen M E, Burbank D W, Garver J I, Ye G, Abdрахmatov. 2001. Late Cenozoic tectonic evolution of the northwestern Tien Shan: New age estimates for the initiation of mountain building[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1544–1559.
- Chang J, Qiu N S, Li J W. 2012. Tectono-thermal evolution of the northwestern edge of the Tarim Basin in China: Constraints from apatite (U–Th)/He thermochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61: 187–198.
- Chang J, Tian Y T, Qiu N S. 2017. Mid–Late Miocene deformation of the northern Kuqa fold-and-thrust belt (southern Chinese Tian Shan): An apatite (U–Th–Sm)/He study[J]. *Tectonophysics*, 694: 101–113.
- Cao Yuanzhi. 2009. Structural Characteristics of Piedmont Belt in Eastern Part of Kuqa Depression[D]. Xi'an: Northwest University, 1–74 (in Chinese with English abstract).
- Charreau J, Gilder S, Yan C, Dominguez S, Avouac J, Sen S, Jolivet M,

- Li Y, Wang W. 2006. Magneto stratigraphy of the Yaha section, Tarim Basin (China): 11 Ma acceleration in erosion and uplift of the Tian Shan Mountains[J]. *Geology*, 34(3): 181–184.
- Cheng Ya. 2020. Structural Analysis of Rastern Kuqa Depression: Influence of Preexisting Faults and Salt-rock Development on Tectonic Deformation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1–84 (in Chinese with English abstract).
- Donahue N D, Francek E R, Kiyotake E, Thomas E E, Wilhelm S. 2020. Assessing nanoparticle colloidal stability with single-particle inductively coupled plasma mass spectrometry (SP-ICP-MS)[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 412(22): 1–12.
- Donelick R. 2005. Apatite fission-track analysis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 49–94.
- Du Jinhui, Tian Jun, Li Guoxin, Yang Haijun, Zang Yijie, Li Yong, Xu Zhenping, Luo Haoyu. 2019. Strategic breakthrough and prospect of Qiuritag structural belt in Kuqa Depression[J]. *China Petroleum Exploration*. 24(1): 16–23 (in Chinese with English abstract).
- Du Z L, Wang Q C, Zhou X H. 2007. Mesozoic and Cenozoic uplifting history of the Kuqa–South Tianshan Basin–Mountain system from the evidence of apatite fission track analysis[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 399–408.
- Ehlers T A, Farley K A. 2003. Apatite (U–Th)/He thermochronometry: Methods and applications to problems in tectonic and surface processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 206(1/2): 1–14.
- Gavillot Y, Axen G J, Stockli D F, Horton B K, Fakhari M D. 2010. Timing of thrust activity in the High Zagros fold–thrust belt, Iran, from (U–Th)/He thermochronometry[J]. *Tectonics*, 29(4): C4025.
- Jia Chengzao, Gu Jiayu, Zhang Guangya. 2002. Geological conditions of large and medium-sized gas fields in Kuqa Depression[J]. *Chinese Science Bulletin*, (S1): 49–55 (in Chinese).
- Jia Chengzao, Chen Hanlin, Yang Shufeng, Lu Huaifu, Zhou Yuzhang. 2003. Late Cretaceous uplift process of Kuqa Depression and its geological response[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 1–5, 15 (in Chinese with English abstract).
- Ketchum R A, Carter A, Donelick R A, Barbarand J, Hurford A J. 2007. Improved modeling of fission-track annealing in apatite[J]. *American Mineralogist*, 92(5/6): 799–810.
- Li Feng, Jiang Zhenxue, Li Zhuo, Xiao Zhongyao, Yuan Wenfang, Cao Shaofang. 2015. Characteristics of condensate oil in eastern Kuqa Depression and its accumulation significance[J]. *Geoscience*, 29(6): 1425–1434 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuangjian, Wang Qingchen, Li Zhong, Wang Daoxuan. 2006. Detrital modes of sandstones and their implications for basin–mountain evolution between the Kuqa Depression and South Tianshan Mountains[J]. *Chinese Journal of Geology*, 41(3): 465–478 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuejun, Wu Genyao, Lei Ganglin, Zhang Jingzhou, Wang Yueran, Liu Yalei. 2008. Deformation characteristics, age and mechanism of the Cenozoic foreland fold thrust belt in Kuqa, Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, (3): 488–506 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z, Lu H, Jia C. 2000. Orogeny timing and fault–slip rate and their significance to the rejuvenated foreland thrusts belt of Kuche[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 27(1): 12–15.
- Luo Meng, Zhu Wenbin, Zheng Bihai, Zhu Xiaoqing. 2012. Mesozoic tectonic evolution in the Kuqa Basin: Evidence from apatite fission tracks[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 37(5): 893–902 (in Chinese with English abstract).
- Ma Qian, Shu Liangshu, Zhu Wenbin. 2006. Study on the history of Mesozoic and Cenozoic burial, uplift and exhumation of Wu–Ku Highway section in Tianshan Mountains[J]. *Xinjiang Geology*, (2): 99–104 (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).
- Pang Jianzhang. 2019. Apatite Fission Track Age Measurement Method Based on LA–ICP–MS and Cenozoic Extension in Qilian Mountains[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 1–122 (in Chinese with English abstract).
- Qin X, Chen X H, Shao Z G, Zhang Y P, Wang Y C. 2022. New timing of the Indosinian intracontinental deformation from the Triassic growth strata in the Kuqa Depression, Southern Tianshan, China[J]. *China Geology*, 5(4): 771–773.
- Shi Gang. 2010. Influence of Structural Evolution on Oil and Gas Accumulation in Kuqa Depression[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–58 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Guo Zhaojie, Zhu Wenbin, Lu Huaifu, Wang Bo. 2004. Post-collision structure and basin–mountain evolution in the Tianshan Mountains[J]. *Geological Journal of China Universities*, (3): 393–404 (in Chinese with English abstract).
- Sobel E R, Chen J, Heermance R V. 2006a. Late Oligocene–Early Miocene initiation of shortening in the Southwestern Chinese Tian Shan: Implications for Neogene shortening rate variations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 247(1/2): 70–81.
- Sobel E R, Dumitru T A. 1997. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim basin during the India–Asia collision[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3): 5043–5063.
- Sobel E R, Oskin M, Burbank D, Mikolaichuk A. 2006b. Exhumation of basement–cored uplifts: Example of the Kyrgyz Range quantified with Apatite Fission-track Thermochronology[J]. *Tectonics*, 25(2): TC2008.1–TC2008.17.
- Stockli D F, Farley K A, Dumitru T A. 2000. Calibration of the apatite (U–Th)/He thermochronometer on an exhumed fault block, White Mountains, California[J]. *Geology*, 28(11): 983–986.
- Sun Longde, Li Yuejun, Song Wenjie, Tian Zuoji, Wang Guolin, Wu Guanghui. 2002. Structure and hydrocarbon distribution in northern Tarim Basin[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (S1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Tang Liangjie, Yu Yixin, Yang Wenjing, Peng Gengxin, Lei Ganglin, Jin Wenzheng, Wan Guimei. 2006. Internal deformation characteristics of decollement in the front of Kuqa foreland fold thrust belt[J]. *Geology in China*, 33(5): 944–951 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chao, Luo Jinhai, Che Zicheng, Liu Liang, Zhang Jingyi. 2009.

- Geochemical characteristics and LA-ICP-MS dating of zircon LA-ICP-MS in the Daban granitic pluton of Ouxidaban, Xinjiang: Implications from Paleozoic ocean basin subduction in the Tianshan Mountains, Southwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 272–283 (in Chinese with English abstract).
- Wang Feiyu, Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Zhao Mengjun. 1999. Organic matter maturity of Mesozoic source rocks in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, (3): 47–50, 97 (in Chinese with English abstract).
- Wang Weifeng, Wang Qian, Shan Xinjian. 2018. Development characteristics and formation mechanism of transverse faults in Kuqa foreland thrust belt[J]. *Geology in China*, 45(3): 493–510 (in Chinese with English abstract).
- Wilke F D, Sobel E R, Stockli D F. 2012. Apatite fission track and (U-Th)/He ages from the Higher Himalayan Crystallines, Kaghan Valley, Pakistan: Implications for an Eocene Plateau and Oligocene to Pliocene exhumation[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 59: 14–23.
- Wu Limin, Min Kang, Gao Jianfeng, Peng Touping. 2019. Principle experimental flow and application of LA-ICP-MS/FT fission track method[J]. *Geology and Resources*, 30(1): 75–84 (in Chinese with English abstract).
- Yin A, Nie S, Craig P, Harrison T, Yang G. 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan[J]. *Tectonics*, 17(1): 1–27.
- Yu S, Chen W, Evans N J, McInnes B I A, Yin J Y, Sun J B, Li J, Zhang B. 2014. Cenozoic uplift, exhumation and deformation in the north Kuqa Depression, China as constrained by (U-Th)/He thermochronometry[J]. *Tectonophysics*, 630: 166–182.
- Yu Shun, Chen Wen, Lü Xiuxiang, Noreen Evans, Brent McInnes, Yin Jiyuan, Sun Jingbo, Li Jie. 2014. Tectonic thermal evolution in the northern margin of Kucha Basin under the constraint of (U-Th)/He technology: A case study of Well Tuzi 2[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(1): 62–74 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Lianbo, Zhou Tianwei. 2004. Reservoir fracture distribution in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Industry*, (9): 23–25, 172, 4 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S H, Liu C Y, Yang M H, Bai J K, Wang J Q. 2018. Latest Triassic to Early Jurassic thrusting and exhumation in the southern Ordos Basin, North China: Evidence from LA-ICP-MS-based apatite fission track thermochronology[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(4): 1334–1348.
- Zhang Wei, Xu Zhenping, Zhao Fengquan, Wu Shaojun, Huang Cheng, Zhang Xueqi. 2019. Tectonic deformation patterns and evolution characteristics of eastern Kuqa Depression[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 40(1): 48–53 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Min, Meng Zifang. 2006. Division of Paleogene magnetic stratigraphy in Baicheng, Xinjiang[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, (5): 650–656 (in Chinese with English abstract).
- 成亚. 2020. 库车坳陷东部构造分析: 先存断裂与膏盐岩发育对构造变形的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 1–84.
- 杜金虎, 田军, 李国欣, 杨海军, 张义杰, 李勇, 徐振平, 罗浩渝. 2019. 库车坳陷秋里塔格构造带的战略突破与前景展望[J]. *中国石油勘探*, 24(1): 16–23.
- 贾承造, 顾家裕, 张光亚. 2002. 库车坳陷大中型气田形成的地质条件[J]. *科学通报*, (S1): 49–55.
- 贾承造, 陈汉林, 杨树锋, 卢华复, 周宇章. 2003. 库车坳陷晚白垩世隆升过程及其地质响应[J]. *石油学报*, (3): 1–5, 15.
- 李峰, 姜振学, 李卓, 肖中尧, 袁文芳, 曹少芳. 2015. 库车坳陷东部凝析油特征及其成藏意义[J]. *现代地质*, 29(6): 1425–1434.
- 李双建, 王清晨, 李忠, 王道轩. 2006. 砂岩碎屑组份变化对库车坳陷和南天山盆地演化的指示[J]. *地质科学*, 41(3): 465–478.
- 李曰俊, 吴根耀, 雷刚林, 张敬洲, 王月然, 刘亚雷. 2008. 新疆库车新生代前陆褶皱冲断带的变形特征、时代和机制[J]. *地质科学*, (3): 488–506.
- 罗梦, 朱文斌, 郑碧海, 朱晓青. 2012. 库车盆地中生代构造演化: 磷灰石裂变径迹证据[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 37(5): 893–902.
- 马前, 舒良树, 朱文斌. 2006. 天山乌—库公路剖面中、新生代埋藏、隆升及剥露史研究[J]. *新疆地质*, (2): 99–104.
- 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.
- 庞建章. 2019. 基于 LA-ICP-MS 的磷灰石裂变径迹年龄测试方法及祁连山新生代扩展研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 1–122.
- 石刚. 2010. 库车坳陷构造演化对油气成藏的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–58.
- 舒良树, 郭召杰, 朱文斌, 卢华复, 王博. 2004. 天山地区碰撞后构造与盆地演化[J]. *高校地质学报*, (3): 393–404.
- 孙龙德, 李曰俊, 宋文杰, 田作基, 王国林, 郭光辉. 2002. 塔里木盆地北部构造与油气分布规律[J]. *地质科学*, (S1): 1–13.
- 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.
- 王超, 罗金海, 车自成, 刘良, 张敬艺. 2009. 新疆欧西达坂花岗岩体地球化学特征和锆石 LA-ICP-MS 定年: 西南天山古生代洋盆俯冲作用过程的启示[J]. *地质学报*, 83(2): 272–283.
- 王飞宇, 张水昌, 张宝民, 赵孟军. 1999. 塔里木盆地库车坳陷中生界烃源岩有机质成熟度[J]. *新疆石油地质*, (3): 47–50, 97.
- 王伟锋, 王乾, 单新建. 2018. 库车前陆冲断带横断层发育特征及其形成机制[J]. *中国地质*, 45(3): 493–510.
- 武利民, 闵康, 高剑峰, 彭头平. 2021. 裂变径迹 LA-ICP-MS/FT 法原理、实验流程和应用[J]. *地质与资源*, 30(1): 75–84.
- 喻顺, 陈文, 吕修祥, Noreen Evans, Brent McInnes, 尹继元, 孙敬博, 李洁. 2014. (U-Th)/He 技术约束下库车盆地北缘构造热演化——以吐孜 2 井为例[J]. *地球物理学报*, 57(1): 62–74.
- 曾联波, 周天伟. 2004. 塔里木盆地库车坳陷储层裂缝分布规律[J]. *天然气工业*, (9): 23–25, 172, 4.
- 张玮, 徐振平, 赵凤全, 吴少军, 黄诚, 章学岐. 2019. 库车坳陷东部构造变形样式及演化特征[J]. *新疆石油地质*, 40(1): 48–53.
- 郑民, 孟自芳. 2006. 新疆拜城古近系磁性地层划分[J]. *沉积学报*, (5): 650–656.

## 附中文参考文献

曹远志. 2009. 库车坳陷东段山前带构造特征[D]. 西安: 西北大学, 1–74.