

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.026>



# 库车盆地早始新世成盐期卤水温度及其意义

徐 洋<sup>1</sup>, 曹养同<sup>2</sup>, 刘成林<sup>2\*</sup>

1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,江西南昌 330013

2. 中国地质科学院矿产资源研究所,自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037

**摘要:** 古气候和古卤水温度条件与盐湖成钾有着密切的联系,定量重建库车盆地早始新世成盐期古卤水温度演化特征对评价盆地成钾潜力具有重要的科学意义。因此,首次以库车盆地西部QL1井下始新统石盐岩为研究对象,在详细的岩相学研究的基础上,开展石盐原生流体包裹体均一温度的定量分析工作。分析结果显示,来自钻孔不同深度的6个样品共有135个均一温度数据,介于21.2~57.8℃,平均值为31.8℃,剖面垂向上自底向顶整体上呈现一个稍微升温的趋势。本研究测定的温度范围、平均温度以及最高温度特征均与同时期特提斯海水温度数据吻合,进一步说明温度数据的可靠性和合理性。另外,高温条件有利于水体发生强烈的蒸发浓缩作用,这点与库车盆地始新世初期沉积的巨厚蒸发岩系和钾盐矿物相符。

**关键词:** 卤水温度;石盐流体包裹体;早始新世;库车盆地;特提斯域;环境地质。

中图分类号: P611.4

文章编号: 1000-2383(2021)11-4188-09

收稿日期: 2021-02-07

## Brine Temperature of Early Eocene Salt Formation Period in Kuqa Basin and Its Significance

Xu Yang<sup>1</sup>, Cao Yangtong<sup>2</sup>, Liu Chenglin<sup>2\*</sup>

1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**Abstract:** Paleoclimate and paleobrine temperature conditions are closely related to potassium formation in salt lakes. Quantitatively reconstructing evolution characteristics of paleobrine temperature during Early Eocene salt-forming period of the Kuqa basin has important scientific significance for evaluating the potash potential of the basin. In this paper it takes Lower Eocene rock salt of core QL1 which is located in the western Kuqa basin as research object for the first time. Based on the detailed petrographic research, the test and analysis of homogenization temperature of primary fluid inclusions of halite were carried out. The analysis results show that a total of 135 homogenization temperature data were obtained from six samples with different depths of the borehole, ranging from 21.2 to 57.8℃, with an average value of 31.8℃, the profile shows a slight warming trend from bottom to top in the vertical direction. The characteristics of homogenization temperature range, average homogenization temperature, and maximum homogenization temperature measured in this paper are consistent with the temperature data of the Tethys seawater in the same period, which further indicates reliability and rationality of homogenization temperature data. In addition, the high temperature condition is conducive to strong evaporation and concentration of water bodies, which is in good agreement with the thick evaporite series and potassium minerals deposited in the Early Eocene of the Kuqa basin.

**基金项目:** 中国地质科学院基本科研业务费项目(No.YYWF201716);国家自然科学基金项目(Nos.41902064, 41902065, 41602100);中央公益性基本科研业务费项目(No. KK2016);东华理工大学博士科研启动基金项目(No.DHBK2018029)。

**作者简介:** 徐洋(1991—),男,讲师,博士,主要从事流体包裹体、盐湖等研究工作。ORCID: 0000-0001-7667-865X. E-mail: geologyxu@163.com

**\*通讯作者:** 刘成林,ORCID: 0000-0003-2233-4274. E-mail: liuchengl@263.net

**引用格式:** 徐洋,曹养同,刘成林,2021.库车盆地早始新世成盐期卤水温度及其意义.地球科学,46(11):4188-4196.

**Key words:** brine temperature; halite fluid inclusion; Early Eocene; Kuqa basin; Tethys realm; environmental geology.

## 0 引言

自地球形成以来,全球气候在温室和冰室之间相互转变,这是两个极端的气候状态。其中古新世与始新世界限发生的气候事件(PETM; 55.5 Ma)是古近纪重要的全球极热气候事件,而且这种全球变暖趋势持续 5.5 Ma 直到早始新世早期(EECO; 50 Ma)(Nicolo *et al.*, 2007; Sexton *et al.*, 2011)。Mcinerney and Wing(2011)指出 PETM 期间全球气候温度提高了 5~8 °C。早始新世被认为是新生代最温暖的全球气候事件(Pagani *et al.*, 2005)。近几十年来,古生物学和矿物学指标在古气候重建的研究中已取得了巨大进步。然而,特提斯域最东部(比如库车盆地)早始新世古气候记录尚未有报道。该盆地在极端环境条件下沉积的巨厚石盐岩几乎限制了传统气候和环境指标的可用性,这阻碍了人们对库车盆地早始新世气候的全面认识。

Roberts and Spence(1995)指出沉积在蒸发盆地中的盐类矿物由于其对温度波动的敏感性而显示出巨大的气候重建潜力。石盐晶体在析出过程中会捕获周边母液,且以流体包裹体的形式保存下来,这些流体包裹体的均一温度( $T_h$ )记录了原生水体和大气温度的详细特征(Lowenstein *et al.*, 1998; Benison and Goldstein, 1999)。此外,对现代盐湖和人工流体包裹体样品的研究表明,最大均一温度等于石盐结晶过程中捕获的最高水温(Lowenstein *et al.*, 1998; Benison and Goldstein, 1999; Zhang *et al.*, 2017)。Roberts and Spencer(1995)通过对美国死谷石盐的研究,发现水温与气温存在良好的线性关系,形成于水体底部的人字形晶所指示的水温高于气温 5 °C 左右。刘兴起等(2007)通过对茶卡盐湖石盐析出时水温和大气温度的研究发现,石盐包裹体指示的水温与同一时间的气温呈良好的相关关系,且前者高于后者。因此,石盐形成时捕获的原生流体包裹体指示的最大均一温度与气温具有很好的相关性。

本文以 QL1 钻孔下始新统原生石盐岩为研究对象,首次对库车盆地下始新统石盐原生流体包裹体均一温度进行研究,从而定量重建古盐湖成盐期卤水温度。这为特提斯域东部地区古温度重建提供了可比较的温度记录。

## 1 地质背景

受冈瓦纳大陆解体的影响,印度洋地块与欧亚大陆地块不断汇合,晚中生代—早新生代新特提斯洋和大西洋—特提斯海之间形成了一个连接欧洲、西亚、中亚和青藏高原南部的内陆海(特提斯海)(Yin and Harrison, 2000; 黄丰等, 2020; 曾庆高等, 2020)。特提斯海海侵和海退与全球海平面变化和板块隆升密切相关,并可能通过改变海陆分布和水汽输送而对特提斯域乃至全球气候和环境演变产生重要影响(孙继敏等, 2017)。中亚塔里木地区的侏罗纪—古近纪蒸发岩系列的形成与特提斯海的演化直接相关(刘成林等, 2015; 唐敏等, 2016)。空间上,中亚地区主要包括卡拉库姆盆地和阿富汗—塔吉克盆地。塔里木地区主要包括塔里木西南部(莎车盆地)和塔里木北部(库车盆地)。时间上,中亚—塔里木地区蒸发岩系的形成年龄自西向东依次变新。

库车盆地位于南天山构造带与塔里木盆地之间,呈近东西向展布(图 1)。白垩纪—古近纪是塔里木盆地中—新生代沉积环境演化的关键变革时期,期间特提斯海多期次海侵—海退运动对盆地后期的资源、环境演化产生了深刻影响。晚白垩世初期海水自塔里木盆地西北部阿莱依海峡入侵塔里木盆地西南部,古新世伴随着海侵范围进一步扩大,海水开始延伸至塔里木盆地北部的库车盆地。晚白垩世—古近纪期间主要有 5 次大的海侵运动影响了塔里木盆地海相沉积物的发育。古新世初期库车盆地西部开始接受海源的补给,控制海水退出塔里木盆地的关键因素主要源于帕米尔高原向北的突刺而非印度—欧亚板块的碰撞(Carrapa *et al.*, 2015; 孙继敏等, 2017; Chen *et al.*, 2018)。目前,海水退出塔里木盆地的最终时间主要介于 47~33 Ma (Zheng *et al.*, 2010; Bosboom *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2016)。在此期间盆地西部沉积了厚层库姆格列木群(古新统塔拉克组和始新统小库孜拜组)地层,且古新统和始新统地层中均发现海相化石,比如有孔虫和腹足类生物等(郝诒纯, 1982; 张义民等, 1982)。小库孜拜组下部以含暗灰色泥砾石盐岩为主,部分含砂泥岩、灰岩和微化石;上部以含褐红色泥砾石盐岩为主,部分含泥石膏岩和含砂泥岩。

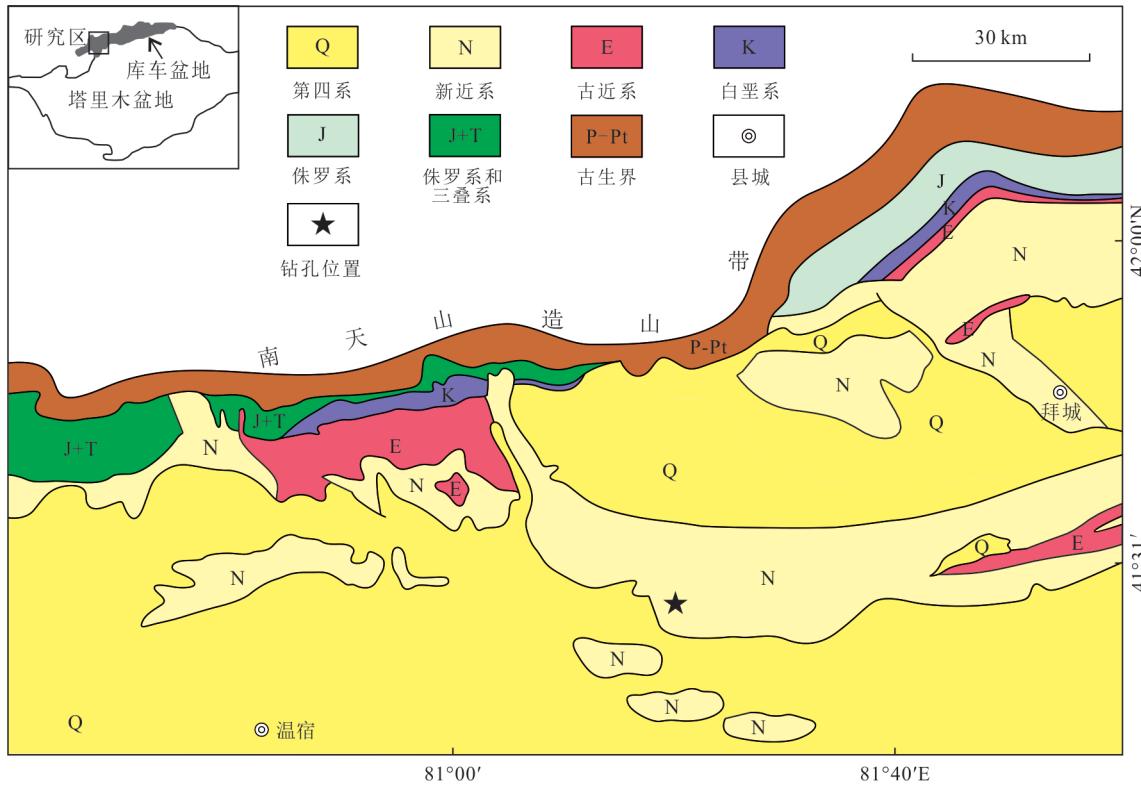


图 1 库车盆地简要地质图(Xu et al., 2019)

Fig. 1 Simplified geological map of the Kuqa basin (Xu et al., 2019)

郑民和孟自芳(2006)根据古地磁资料,对库车盆地的古近系地层进行了精确的磁性地层划分,确定了库姆格列木群地层顶、底界年代,分别为38 Ma 和 60.5 Ma. 滕志宏等(1997)、李忠等(2003)也指出库姆格列木群/苏维依地层界限年代为38 Ma. 曹养同等(2010)基于多口塔里木油田钻孔资料,对库车盆地古近系蒸发岩沉积旋回进行识别和对比,建立了蒸发岩沉积旋回标准剖面. 因此,可以初步确定QL1井含盐系地层形成年代为早始新世.

## 2 材料和实验方法

### 2.1 材料

用于均一温度测试的石盐样品采自库车盆地西部QL1井下始新统蒸发岩岩屑(图1), QL1井是中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司以找油为目的实施的钻孔, 我们选取井段5 545~5 674 m 蒸发岩岩屑为研究对象, 钻孔下部5个样品岩性为灰色含泥含盐石膏岩, 上部1个样品岩性为灰色含泥石盐岩.

QL1井中石盐主要表现为两种特征:一种透明的不规则的石盐晶体, 含有少量的次生流体包裹

体; 另一种是烟雾状的立方体石盐晶体, 显示了保存完好的条原生流体包裹体特征(图2). 原生立方体石盐晶体大小通常是毫米级, 且富含明暗相间的条带状流体包裹体. 这些流体包裹体相态主要为单一液相, 大小不一, 粒径主要介于2~80 μm, 可见部分气液两相, 气液固三相基本不发育. 本文所使用的样品都是严格挑选的原生流体包裹体样品.

### 2.2 实验方法

均一温度测试工作在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的, 测试仪器为Linkam THMS 600(英格兰制造)冷却台, 该仪器测得的温度范围为-196 °C至+ 600 °C, 冷冻和均一温度数据的精度分别为±0.1 °C和±0.5 °C.

在运用“冷却成核”测量均一温度之前, 我们使用小锤子将石盐晶体沿其解理面劈成约1 mm厚的解理片. 首先在显微镜下仔细观察石盐解理片并拍照, 记录所有的单一液体包裹体. 然后将挑选好的解理片置于冰箱中(-15 °C至-20 °C条件下)保存一周, 之后将冰箱中的解理片快速移至准备就绪的冷热台中, 并在-18 °C温度下冷冻, 直到流体包裹体内的人工成核气泡出现. 初始加热速率设定为0.5 °C/min, 然后在接近10 °C时减慢至0.1 °C/min,

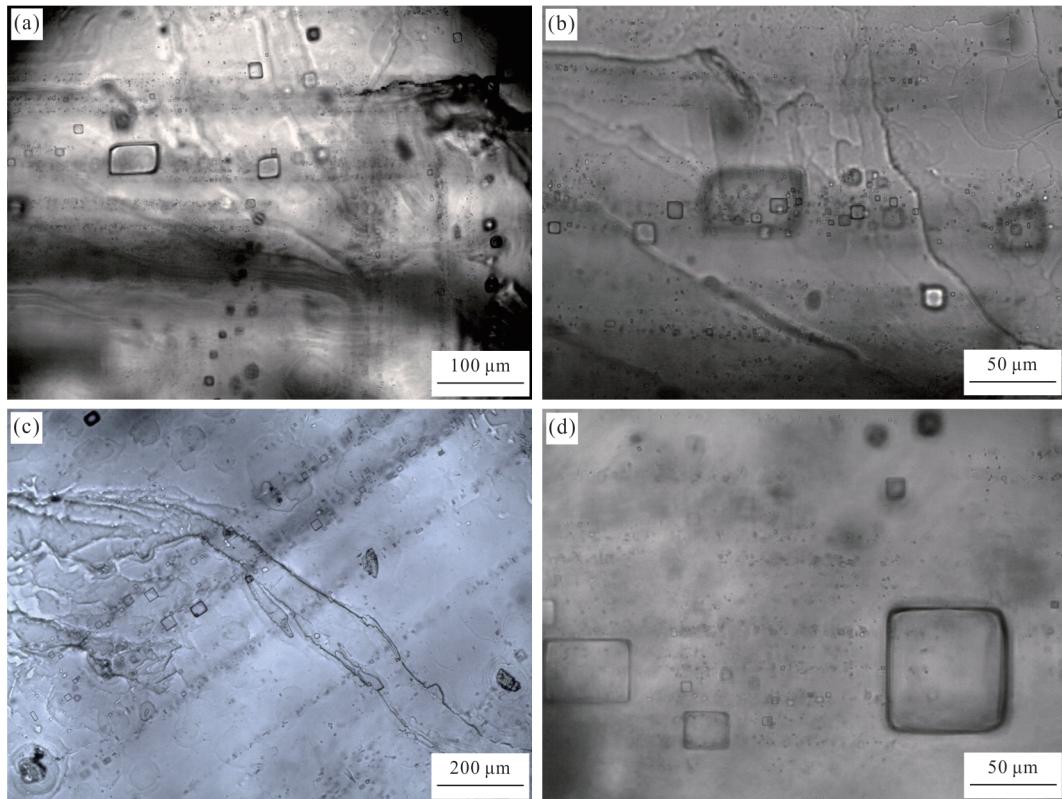


图2 库车盆地QL1井石盐中条带状原生流体包裹体特征

Fig. 2 Petrographic characteristics of band-like primary fluid inclusions in halite from core QL1, Kuqa basin

直至所有观察到的人工成核气泡均一化。Roberts and Spencer(1995)指出冷却前存在的气泡  $T_h$  异常高。因此,我们仅仅选择冷却后人工成核的流体包裹体作为研究对象。

### 3 分析结果

冷冻后,仅约10%的单一液体流体包裹体产生人工成核气泡。本文分别采取QL1井来自6个不同深度的石盐样品,有效的流体包裹体均一温度数据为135个(表1)(图3)。深度5 674 m样品的均一温度介于22.8~34.5 °C,平均值为28.1°C;深度5 638 m样品的均一温度介于22.4~35.8 °C,平均值为29.2 °C;深度5 612 m样品的均一温度介于21.2~57.8 °C,平均值为37.3 °C;深度5 596 m样品的均一温度介于24.2~32.7 °C,平均值为28.8 °C;深度5 572 m样品的均一温度介于22.3~52.6 °C,平均值为31.8 °C;深度5 545 m样品的均一温度介于34.3~38.3 °C,平均值为36.4 °C。每个高频率流体包裹体条带被看作是一个单独的流体包裹体组合(FIA)(Goldstein and Reynolds, 1994)。15个FIAs中测得的温度范围介于0.7~10.5 °C,平均值为6.2 °C。

## 4 讨论

### 4.1 数据的有效性

由于石盐的易潮解性和溶解性,在其埋藏和保存期间很容易遭受破坏或发生重结晶,这将会影响  $T_h$  数据的合理性和稳定性,尤其对于古代石盐样品(Benison and Goldstein, 1999)。 $T_h$  数据不需要进行压力校正,因为岩盐在较浅的沉积环境中沉积,并且流体包裹体在低压条件下捕获的温度近似等于  $T_h$ ,从而提供岩盐沉积的直接温度记录。来自同一包裹体生长带的原生流体包裹体是同一时间捕获的(Benison and Goldstein, 1999)。然而,发育良好的石盐晶体中的多个原生包裹体条带可能不是同时形成的,比如同一天的上午和晚上。因此,来自不同包裹体条带的  $T_h$  数据获取的温度也不同(Benison and Goldstein, 1999)。

我们使用两种方法来验证原生流体包裹体是否经历了热再平衡的改变或破坏,包括  $T_h$  数据的热再平衡分析和流体包裹体大小与  $T_h$  之间的关系。一方面,给定的FIA中  $T_h$  数据的一致性可以作为评估热再平衡的指标(Benison and Goldstein, 1999)。

表 1 库车盆地 QL1 井下始新统石盐原生流体包裹体  $T_h$ ( $^{\circ}$ C)Table 1 Homogenization temperatures ( $^{\circ}$ C) of Lower Eocene halite primary fluid inclusions from core QL1, Kuqa basin

序号	深度 (m)	$T_h$ /直径(μm)	$T_{h\text{MAX}}$	$T_{h\text{MIN}}$	$T_{h\text{AVG}}$	$T_{h\text{RANGE}}$
S1	5 545		38.3	34.3	36.4	
FIA 1	34.4/12; 34.5/10; 34.7/15; 36.1/16; 36.5/18; 37.2/12; 37.7/13; 38.1/15; 38.3/16					3.9
S2	5 572		52.6	22.3	31.8	
FIA 1	28.2/23; 28.8/22; 28.9/22; 29.3/16; 29.5/16; 29.8/17; 29.9/15; 30.2/24; 30.6/20; 31.4/22; 31.6/22; 31.7/23; 31.7/18; 32.0/19; 22.3/28; 24.5/32; 24.7/30; 24.8/28; 25.1/16; 25.2/18; 25.2/17; 25.6/14; 25.8/14; 26.1/17; 26.2/28; 29.2/32; 29.2/34; 29.3/34				4.8	
FIA 2	18; 27.2/17; 27.3/17; 27.6/21; 27.9/22; 28.2/14; 28.4/14; 28.5/13; 28.6/13; 29.1/18; 29.1/18; 29.2/32; 29.2/34; 29.3/34					7.0
FIA 3	31.2/30; 31.6/30; 32.1/28; 32.2/26; 33.5/32; 35.4/27; 36.7/22; 37.8/23; 39.4/18; 40.5/18					9.3
FIA 4	47.2/24; 48.3/23; 48.9/23; 50.6/25; 50.8/19; 52.6/18					5.4
S3	5 596		32.7	24.2	28.8	
FIA 1	24.2/13; 25.9/12; 26.3/13; 26.4/12; 26.7/15; 27.7/16; 28.5/14; 28.6/14					4.4
FIA 2	27.8/18; 28.1/28; 28.3/29; 30.1/26; 30.2/26; 31.3/27; 31.3/24; 31.5/17; 32.4/8; 32.7/12					4.9
S4	5 612		57.8	21.2	37.3	
FIA 1	21.2/10; 25.4/12; 26.7/13; 27.1/8; 27.5/7; 27.6/8; 27.8/13; 28.0/24; 28.2/18; 28.4/28					7.2
FIA 2	34.9/27; 36.8/28; 39.7/24; 41.3/15; 42.1/16; 44.6/24					9.7
FIA 3	47.3/22; 48.2/25; 50.8/26; 54.2/20; 55.9/21; 57.8/23					10.5
S5	5 638		35.8	22.4	29.2	
FIA 1	22.4/14; 22.8/16; 22.8/16; 23.1/15; 28.7/15; 28.9/13; 29.3/26; 30.8/18					8.4
FIA 2	29.8/24; 30.4/22; 31.6/16; 32.2/18; 34.5/19; 35.1/15; 35.8/22					6.0
S6	5 674		34.5	22.8	28.1	
FIA 1	22.8/24; 23.2/28; 24.2/27; 26.2/24; 27.6/26; 28.1/28					5.3
FIA 2	27.8/32; 27.9/30; 27.9/28; 28.3/15; 28.3/17; 28.5/16					0.7
FIA 3	29.1/19; 30.4/20; 30.8/24; 32.6/19; 34.5/22					5.4

注:  $T_{h\text{MAX}}$  代表最高均一温度,  $T_{h\text{MIN}}$  代表最低均一温度,  $T_{h\text{AVG}}$  代表平均均一温度,  $T_{h\text{RANGE}}$  代表均一温度范围.

Goldstein and Reynolds(1994)指出, 单个 FIA 中约 90% 的  $T_h$  数据的波动范围小于  $15^{\circ}\text{C}$ , 表明原生流体包裹体未经历热再平衡的改变或破坏. 本文中的  $T_h$  数据精确地遵循该指标, 揭示了来自 15 个 FIAs 的所有  $T_h$  数据的温度范围均小于  $15^{\circ}\text{C}$ , 最小值为  $0.7^{\circ}\text{C}$ , 最大值为  $10.5^{\circ}\text{C}$ . 该证据说明石盐晶体未遭受热再平衡的影响. 另一方面, 流体包裹体的大小与  $T_h$  之间的关系可以作为判定是否遭受热再平衡影响的另一个指标. 大的包裹体比小的包裹体更具延伸性, 并且经历延伸的流体包裹体具有比实际捕获温度更高的  $T_h$  (Roedder, 1984). 换言之, 如果包裹体经历了延伸, 那么大的包裹体比小的包裹体更容易产生较高的  $T_h$ . 我们的结果显示流体包裹体的大小和相应的  $T_h$  之间未存在相关关系(图 4). 因此, 热再平衡未对石盐晶体产生改变或破坏, 这进一步支持了  $T_h$  数据的合理性和稳定性. 来自 QL1 井下始新统石盐的  $T_h$  数据可能准确地

反映早始新世海水或成盐期卤水的温度.

#### 4.2 $T_h$ 指示意义

根据钻孔 6 个不同深度石盐的平均和最大  $T_h$  数据初步推断库车盆地早始新世卤水温度变化特征, 结果显示成盐期卤水温度经历了较大的波动变化(图 3). 来自钻孔剖面底部的样品 S6 和 S5 的平均和最大均一温度比较稳定, 分别为  $28.1^{\circ}\text{C}$  和  $29.2^{\circ}\text{C}$ 、 $34.5^{\circ}\text{C}$  和  $35.8^{\circ}\text{C}$ . 向上至中部 S4 的平均和最大温度显示了一个急剧升高的趋势, 达到了该剖面的峰值, 分别为  $37.3^{\circ}\text{C}$  和  $57.8^{\circ}\text{C}$ . 相比之下, 上部 S3、S2 和 S1 的平均和最大温度(分别为  $28.8^{\circ}\text{C}$ 、 $31.8^{\circ}\text{C}$  和  $36.4^{\circ}\text{C}$ 、 $32.7^{\circ}\text{C}$ 、 $52.6^{\circ}\text{C}$  和  $38.3^{\circ}\text{C}$ )显示了波动降温的趋势. 虽然剖面垂向上温度变化趋势起伏不定, 但是自底向上整体上呈现一个升温的趋势.

尽管所有的  $T_h$  数据都代表了成盐期卤水温度, 但是不论分析多少数据量和多大样本, 都很难根据石盐流体包裹体  $T_h$  来恢复卤水完整的温度变

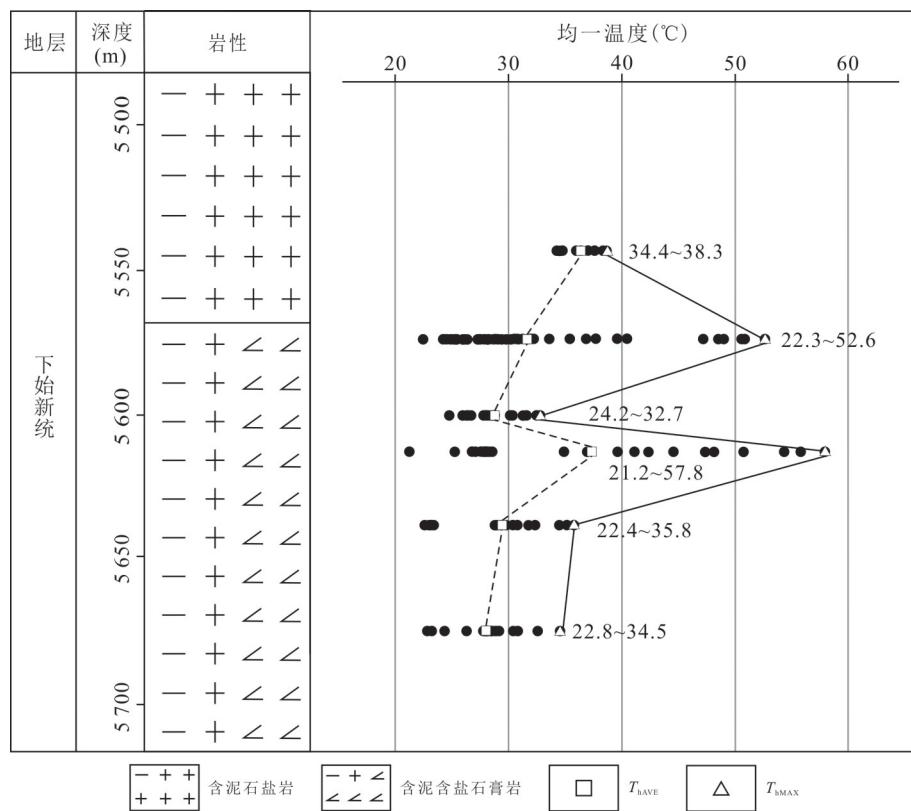
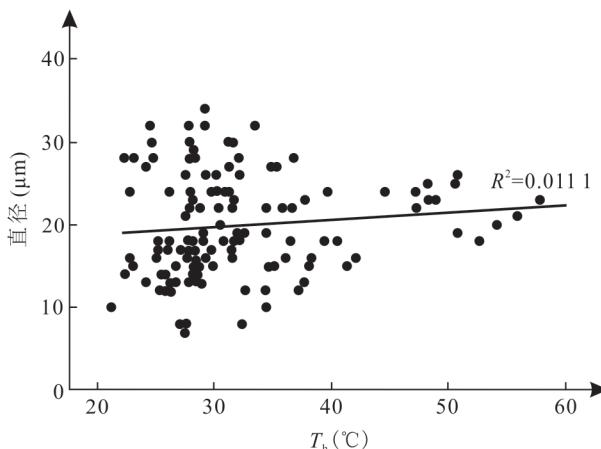


图3 库车盆地QL1井下始新统石盐原生流体包裹体均一温度特征

Fig. 3  $T_h$  data characteristics of primary fluid inclusions from Lower Eocene halite in core QL1, Kuqa basin图4 流体包裹体直径大小与  $T_h$  之间的关系Fig. 4 Cross-plot of the  $T_h$  data plotted against size of fluid inclusions

化,这是由于石盐及所含的流体包裹体并不是以恒定速率形成的,白天和夏季、尤其下午石盐的形成速率较高(Roberts and Spencer, 1995; Lowenstein *et al.*, 1998; Benison and Goldstein, 1999)。因此,均一温度的平均值对成盐期卤水的温度特征具有一定的代表性。虽然钻孔剖面6个样品的

$T_{h\text{AVE}}$  分别代表了早始新世6个不同时期的平均温度特征,但所有温度数据的平均值能够更有效地代表库车盆地早始新世成盐期卤水的平均温度特征,因此31.8 °C代表了库车盆地早始新世成盐期卤水平均温度。这个结果与前人大气环流模型和同时期海相化石的结果吻合。Inglis *et al.*(2015)根据全球气候模型指出研究区早始新世平均海水表面温度接近30 °C。Huyghe *et al.*(2015)根据特提斯域巴黎盆地海相软体动物化石氧同位素认为早始新世平均海水表面温度约30 °C左右。此外,早始新世特提斯域塔里木盆地西部以及费尔干那盆地多个海相牡蛎化石的生长纹被精细研究,结果显示早始新世海水温度介于13~53 °C,平均温度为30 °C(Bougeois *et al.*, 2016)。因此,同时期海水的温度范围、平均温度以及最高温度均与本文研究结果很接近,指示了我们的均一温度数据与同时期特提斯域海水温度的一致性和可靠性。

本文的  $T_h$  数据普遍较高,  $T_{h\text{MAX}}$  介于32.7~57.8 °C,指示了高温卤水条件,符合全球EECO极热气候事件。而且,相比库车盆地中始新世石盐原生流体包裹体  $T_{h\text{MAX}}$ (34.6~37.3 °C)(Xu *et al.*, 2019),

前者的温度数据明显高于后者,该变化特征与全球早始新世至中始新世稳定降温的趋势相符。极端高温(气温及水温)条件有利于盐湖卤水的快速浓缩,缩短从成盐至成钾的时间间隔(赵艳军等,2015)。刘成林等(2015)指出炎热干旱的气候条件是古盐湖蒸发成钾的先决条件。许多古代和现代钾盐矿床的形成与高温古卤水环境有着密切的联系。比如,志留纪密歇根盆地钾盐矿床重建的最高古卤水温度为59℃(Losey and Benison, 2000);中白垩世呵叻高原钾盐矿床最高古卤水温度为62.1℃(Zhang et al., 2015);塔里木盆地第四纪罗布泊钾盐矿床最高古卤水温度为58℃(刘成林等,2006)。因此,库车盆地早始新世成盐期经历了高温的气候环境和较快的蒸发速率,沉积了厚层石盐岩。而且,该地层发现了钾石盐、光卤石、钾石膏等钾盐矿物(刘群等,1987;刘成林等,2013),表明盐湖卤水的蒸发浓缩程度较高,高温气候条件为钾盐矿物的析出奠定了良好的基础。

## 5 结论

(1)通过测定石盐流体包裹体 $T_h$ 数据我们定量地重建了库车盆地早始新世成盐期卤水的温度记录,温度范围介于21.2~57.8℃,平均值为31.8℃。

(2)获得的 $T_h$ 范围、 $T_{h\text{AVE}}$ 以及 $T_{h\text{MAX}}$ 特征均与同时期特提斯域海水温度特征相符,可以推测整个特提斯域早始新世海水经历了相近的温度条件,进一步说明 $T_h$ 数据的可靠性和合理性。

(3)剖面垂向上6个样品的 $T_{h\text{MAX}}$ 介于32.7~57.8℃,说明高温卤水条件为库车盆地钾盐矿物的析出提供了良好的温度条件。

致谢:我们衷心地感谢《地球科学》的主编、责任编辑和匿名审稿专家对稿件修改所提出的建设性和宝贵意见!

## References

- Benison, K. C., Goldstein, R. H., 1999. Permian Paleoclimate Data from Fluid Inclusions in Halite. *Chemical Geology*, 154(1–4): 113–132.
- Bosboom, R., Dupontivet, G., Grothe, A., et al., 2014. Linking Tarim Basin Sea Retreat (West China) and Asian Aridification in the Late Eocene. *Basin Research*, 26(5): 621–640.
- Bougeois, L., Raféolis, M. D., Reichart, G. J., et al., 2016. Mg/Ca in Fossil Oyster Shells as Palaeotemperature Proxy, an Example from the Palaeogene of Central Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 441: 611–626.
- Cao, Y. T., Liu, C. L., Yang, H. J., et al., 2010. Identification and Correlation of the Paleogene and Neogene Evaporites Sedimentary Cycles in Kuqa Basin, Xinjiang. *Journal of Palaeogeography*, 12(1): 31–41 (in Chinese with English abstract).
- Carrapa, B., De Celles, P. G., Wang, X., et al., 2015. Tectono-Climatic Implications of Eocene Paratethys Regression in the Tajik Basin of Central Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 424: 168–178.
- Chen, X., Chen, H., Lin, X., et al., 2018. Arcuate Pamir in the Paleogene? Insights from a Review of Stratigraphy and Sedimentology of the Basin Fills in the Foreland of NE Chinese Pamir, Western Tarim Basin. *Earth-Science Reviews*, 180: 1–16.
- Goldstein, R. H., Reynolds, T. J., 1994. Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals. SEPM Society for Sedimentary Geology, Tulsa, 31.
- Hao, Y. C., 1982. Late Cretaceous and Tertiary Strata and Foraminifera in Western Talimu Basin. *Earth Science*, 2: 119–146 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F., Xu, J. F., Wang, B. D., et al., 2020. Density of Neo-Tethyan Lithosphere during India-Asia Collision. *Earth Science*, 45(8): 2785–2804 (in Chinese with English abstract).
- Huyghe, D., Lartaud, F., Emmanuel, L., et al., 2015. Palaeogene Climate Evolution in the Paris Basin from Oxygen Stable Isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ) Compositions of Marine Molluscs. *Journal of the Geological Society*, 172(5): 576–587.
- Inglis, G. N., Farnsworth, A., Lunt, D., et al., 2015. Descent toward the Icehouse: Eocene Sea Surface Cooling Inferred from GDGT Distributions. *Paleoceanography and Paleoceanography*, 30(7): 1000–1020.
- Li, Z., Wang, Q. C., Wang, D. X., et al., 2003. Depositional Record Constraints on Late Cenozoic Uplift of Tianshan and Tectonic Transformation in Kuqa Depression, West China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 38–45 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. L., Chen, Y. Z., Chen, W. S., et al., 2006. Studies of Fluid Inclusions in Glauberite of Middle–Upper Pleistocene Strata and Their Paleoclimatic Significance in Lop Nur Salty Lake, Xinjiang, NW China. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(1): 93–98 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. L., Jiao, P. C., Xuan, Z. Q., et al., 2013. Research

- Progress of Potash Minerals in Paleogene Evaporites in Kuqa Basin. *Geological Review*, 59(2): 233—234 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C.L., Xuan, Z.Q., Cao, Y.T., et al., 2015. Research on Potash Exploration at China Land Mass-Potash Alteration and Pattern of Eastern Tethys Ocean, China. *Geology of Chemical Minerals*, 37(4): 193—197 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q., Chen, Y. H., Li, Y. C., et al., 1987. Meso-Cenozoic Terrigenous Clastic Rock-Chemical Rock Salt Deposits in China. Beijing Science and Technology Press, Beijing, 15—17 (in Chinese).
- Liu, X.Q., Ni, P., Dong, H.L., et al., 2007. Homogenization Temperature and Its Significance for Primary Fluid Inclusion in Halite Formed in Chaka Salt Lake, Qardam Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 113—116 (in Chinese with English abstract).
- Losey, A. B., Benison, K. C., 2000. Silurian Paleoclimate Data from Fluid Inclusions in the Salina Group Halite Michigan Basin. *Carbonates Evaporites*, 15: 28—36.
- Lowenstein, T. K., Li, J. R., Brown, C. B., 1998. Paleotemperatures from Fluid Inclusions in Halite: Method Verification and a 100,000 Year Paleotemperature Record, Death Valley, CA. *Chemical Geology*, 150(3—4): 223—245.
- Mcinerney, F. A., Wing, S. L., 2011. The Paleocene – Eocene Thermal Maximum: A Perturbation of Carbon Cycle, Climate, and Biosphere with Implications for the Future. *Earth and Planetary Science Letters*, 39(39): 489—516.
- Nicolo, M. J., Dickens, G. R., Hollis, C. J., et al., 2007. Multiple Early Eocene Hyperthermals: Their Sedimentary Expression on the New Zealand Continental Margin and in the Deep Sea. *Geology*, 35(8): 699—702.
- Pagani, M., Zachos, J. C., Freeman, K. H., et al., 2005. Marked Decline in Atmospheric Carbon Dioxide Concentrations during the Paleogene. *Science*, 309(5734): 600—603.
- Roberts, S. M., Spence, R. J., 1995. Paleotemperatures Preserved in Fluid Inclusions in Halite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19): 3929—3942.
- Roedder, E., 1984. The Fluids in Salt. *American Mineralogist*, 69: 413—439.
- Sexton, P. F., Norris, R. D., Wilson, P. A., et al., 2011. Eocene Global Warming Events Driven by Ventilation of Oceanic Dissolved Organic Carbon. *Nature*, 471 (7338): 349—352.
- Sun, J. M., Liu, W. G., Liu, Z. H., et al., 2017. Effects of the Uplift of the Tibetan Plateau and Retreat of Neotethys Ocean on the Stepwise Aridification of Mid-Latitude Asian Interior. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, (9): 39—46 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. M., Windley, B. F., Zhang, Z. L., et al., 2016. Diachronous Seawater Retreat from the Southwestern Margin of the Tarim Basin in the Late Eocene. *Journal of Asian Earth Sciences*, 116: 222—231.
- Tang, M., Cao, Y. T., Jiao, P. C., et al., 2016. Spatial Distribution on Halite in the Kuqa Depression in Paleogene and Signification of Potash Survey. *Geology of Chemical Minerals*, 38(3): 129—135 (in Chinese with English abstract).
- Teng, Z. H., Yue, L. P., He, D. F., et al., 1997. Magnetostratigraphic Research of Cenozoic Section of Kuche River Area, South Xinjiang. *Journal of Stratigraphy*, 21(1): 55—62 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y., Liu, C. L., Cao, Y. T., et al., 2019. Quantitative Temperature Recovery from Middle Eocene Halite Fluid Inclusions in the Easternmost Tethys Realm. *International Journal of Earth Sciences*, 108(1): 173—182.
- Yin, A., Harrison, M. T., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan – Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(28): 211—280.
- Zeng, Q. G., Wang, B. D., Xiluo, L. J., et al., 2020. Suture Zones in Tibetan and Tethys Evolution. *Earth Science*, 45(8): 2735—2763 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Liu, C. L., Zhao, Y. J., et al., 2015. Quantitative Temperature Records of Mid Cretaceous Hothouse: Evidence from Halite Fluid Inclusions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 437: 33—41.
- Zhang, H., Lü, F. L., Mischke, S., et al., 2017. Halite Fluid Inclusions and the Late Aptian Sea Surface Temperatures of the Congo Basin, Northern South Atlantic Ocean. *Cretaceous Research*, 71: 85—95.
- Zhang, Y. M., He, G. Z., Wang, Z. R., 1982. Analysis of the Tertiary Salt Rock System and Potassium Fertilizer in Kuqa Basin. *Northwestern Geology*, 4: 44—52 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. J., Liu, C. L., Zhang, H., et al., 2015. The Control of Paleotemperature on Potassium Salt Precipitation in Ancient Salt Lakes. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2751—2756 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, H., Tada, R., Jia, J., et al., 2010. Cenozoic Sediments in the Southern Tarim Basin: Implications for the Uplift of Northern Tibet and Evolution of the Taklimak-

- an Desert. *Geological Society, London, Special Publications*, 342(1): 67—78.
- Zheng, M., Meng, Z. F., 2006. Magnetostratigraphy of Tertiary System in Baicheng, Xinjiang. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(5): 650—656 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹养同, 刘成林, 杨海军, 等, 2010. 新疆库车盆地古近系—新近系蒸发岩沉积旋回识别及对比. 古地理学报, 12(1): 31—41.
- 郝诒纯, 1982. 塔里木盆地西部晚白垩世—第三纪地层及有孔虫. 地球科学, 2: 119—146.
- 黄丰, 许继峰, 王保弟, 等, 2020. 印度—亚洲大陆碰撞过程中新特提斯洋岩石圈的命运. 地球科学, 45(8): 2785—2804.
- 李忠, 王清晨, 王道轩, 等, 2003. 晚新生代天山隆升与库车坳陷构造转换的沉积约束. 沉积学报, 21(1): 38—45.
- 刘成林, 陈永志, 陈伟十, 等, 2006. 罗布泊盐湖更新世晚期沉积钙芒硝包裹体特征及古气候意义探讨. 矿物学报, 26(1): 93—98.
- 刘成林, 焦鹏程, 宣之强, 等, 2013. 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.
- 刘成林, 宣之强, 曹养同, 等, 2015. 探索中国陆块找钾—中国东特提斯域成钾作用及模式. 化工矿产地质, 37(4): 193—197.
- 刘群, 陈郁华, 李银彩, 等, 1987. 中国中、新生代陆源碎屑岩—化学岩型盐类沉积. 北京: 北京科学技术出版社, 15—17.
- 刘兴起, 倪培, 董海良, 等, 2007. 内陆盐湖石盐流体包裹体均一温度指示意义的现代过程研究. 岩石学报, 23(1): 113—116.
- 孙继敏, 刘卫国, 柳中晖, 等, 2017. 青藏高原隆升与新特提斯海退却对亚洲中纬度阶段性气候干旱的影响. 中国科学院院刊, (9): 39—46.
- 唐敏, 曹养同, 焦鹏程, 等, 2016. 库车坳陷古近纪石盐岩空间展布及找钾意义. 化工矿产地质, 38(3): 129—135.
- 滕志宏, 岳乐平, 何登发, 等, 1997. 南疆库车河新生界剖面磁性地层研究. 地层学杂志, 21(1): 55—62.
- 曾庆高, 王保弟, 西洛郎杰, 等, 2020. 西藏的缝合带与特提斯演化. 地球科学, 45(8): 2735—2763.
- 张义民, 贺光正, 王佐仁, 1982. 新疆库车盆地第三纪含盐岩系和成钾条件的分析. 西北地质, 4: 44—52.
- 赵艳军, 刘成林, 张华, 等, 2015. 古盐湖卤水温度对钾盐沉积的控制作用探讨. 岩石学报, 31(9): 2751—2756.
- 郑民, 孟自芳, 2006. 新疆拜城古近系磁性地层划分. 沉积学报, 24(5): 650—656.