

江陵凹陷早始新世石盐流体包裹体均一温度研究及其古气候意义*

李皓楠^{1,4}, 王春连^{2,3}, 刘成林², 杨申谷⁴, 徐海明², 余小灿⁵, 胡海兵⁶

(1 中国石油化工股份有限公司河南油田分公司第一采油厂, 河南 南阳 473132; 2 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; 3 中国科学院资源地层学与古地理学重点实验室(中国科学院南京地质古生物研究所), 江苏 南京 210008; 4 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 5 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 6 湖南省湘澧盐化有限责任公司, 湖南 津市 415400)

摘 要 近年来江陵凹陷因深层富钾卤水及钾盐矿物的发现受到各界的关注。而钾盐的形成与古环境有着密切的联系。本文通过石盐包裹体均一温度的研究, 对江陵凹陷早始新世古气候进行了初步探讨, 力求为确定江陵凹陷成钾有利期提供一定依据。通过对石盐样品中的单一液相流体包裹体采用冷冻法进行均一温度测定, 测温结果显示其均一温度范围是 14.9~32.3℃, 均值 23.7℃, 且各样品间温度数据波动不大。由此说明, 江陵凹陷早始新世新沟嘴组中段的古气温较高, 且比较稳定, 属于温暖干旱的气候。此外, 还通过分析对比前人研究成果, 发现该区域古气温自沙市组至新沟嘴组下段有明显降低的趋势, 这可能与古新世—始新世极热事件(PETM)之后的降温期有关。

关键词 地球化学 石盐 流体包裹体 均一温度 古气候 极热事件 早始新世 江陵凹陷

中图分类号: P619.211

文献标志码: A

A research on Early Eocene homogenization temperature of fluid inclusions in halite and its paleoclimatic significance in Jiangling Depression

LI HaoNan^{1,4}, WANG ChunLian^{2,3}, LIU ChengLin², YANG ShenGu⁴, XU HaiMing²,
YU XiaoCan⁵ and HU HaiBing⁶

(1 1st Oil Production Plant of SINOPEC Henan Oilfield Branch Company, Nanyang 430100, Henan, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Key Laboratory of Economic Stratigraphy and Palaeogeography, Chinese Academy of Sciences(Nanjing Institute of Geology and Palaeontology), Nanjing 210008, Jiangsu, China; 4 Academy of Geological Science, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 5 School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083 China; 6 Xiangli Salt LLC, Jinshi 415400, Hunan, China)

Abstract

Recent discovery of large-scale potassium-rich brine and potassium minerals in Jiangling depression have attracted much attention increasingly. Formation of potash deposits are closely related to paleoenvironment. In this paper, through the element geochemistry and salt mineral inclusions homogenization temperature analysis to

* 本文得到国家“973”项目(编号: 2011CB403007)、国家自然科学基金青年基金(编号: 41502089)、中国地质大调查项目(编号: 12120114051901)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(编号: K1415)

第一作者简介 李皓楠, 男, 1988 年生, 硕士, 主要从事油气地质及流体包裹体研究。Email: li.haonan198806@gmail.com

** 通信作者 王春连, 男, 1983 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事盐湖沉积与钾盐矿床研究。Email: wangchunlian312@163.com

收稿日期 2016-05-15; 改回日期 2016-10-19。秦思婷编辑。

restore the paleotemperature of Late Paleocene- Early Eocene. Shashi Formation and the lower section of Xingouzui Formation in Jiangling Depression deposited a thick rock series of salt. Salts of mineral fluid inclusion body refers to surface water (sea, Lake) under the strong evaporation, the formation of mineral salts tend to capture the mother liquor, they preserve the various information of the lithosphere, can provide reliable quantitative data for the study of paleotemperature and paleoenvironment. The homogenization temperatures of primary fluid inclusions in halite from the middle section of Xingouzui Formation of Early Eocene were measured by freezing method. Temperature results show that the homogenization temperature range is $14.9\sim 32.3^{\circ}\text{C}$, the average is 23.7°C and the temperature data of each sample is not stable. This shows that the Early Eocene paleotemperature in middle of Xingouzui Formation in Jiangling Depression was higher and relatively stable, which belongs to the warm and dry climate. In addition, by comparing with previous research, trying to restore the Late Paleocene-Early Eocene paleoenvironment change trend and exploring the relationship between the trend and PETM.

Key words: geochemistry, halite, fluid inclusions, homogenization temperature, paleoenvironment, PETM, Early Eocene, Jiangling Depression

盐类矿物流体包裹体是指地表水体(海洋、湖泊)在强烈的蒸发作用下,从卤水中结晶的盐类矿物捕获残余的饱和溶液而形成的,它们能够保存大气圈、水圈、生物圈等的信息,可以为研究古温度、古水体成分、古大气成分以及生物的演化等方面提供可靠的定量数据(Satterfield et al., 2005; 卢焕章等, 2000; 刘兴起等, 2005)。

通过流体包裹体测温来研究古气候的方法相对于其他测试方法的优势之一,是可以提供直接的数据,而其他方法所得的数据大都是间接的,这对于恢复干旱区古气候环境具有十分重要的理论和实践意义。由于盐类矿物溶解度较高以及易于变形的特点,使流体包裹体容易产生重结晶、延展、泄漏、压缩等次生变化,影响测温数据的准确性,因此要选择原生流体包裹体测温。原生、次生流体包裹体可通过石盐晶体特征、包裹体群组的排列组合形式以及同一世代流体包裹体均一温度变化范围等来判别(Roberts et al., 1995; 赵艳军等, 2014)。其次,应选择单一液相流体包裹体测温,因为气液两相流体包裹体中可能含有从大气中捕获的气体,其均一温度范围变化很大,显然不能代表矿物的结晶温度,而单一液相流体包裹体中没有气泡,属于准稳定现象,一般指示较低的捕获温度(Roedder, 1984a),单一液相流体包裹体在经过冷冻后,可能会有气泡产生,这样就可以测均一温度(池国祥, 2008; 赵艳军等, 2013; 王春连, 2013c, 其均一温度同现代卤水的水温和气温具有很好的相关性(Roberts et al., 1997; Meng et al., 2013)。

目前,盐类矿物中用于包裹体测温的较常见矿物为石盐(Roberts et al., 1995; 刘兴起等, 2007; 赵艳军等, 2014; Meng et al., 2014),另外还可见钙芒硝(刘成林等, 2006)、石膏等(Krüger et al., 2013)。本次测温所选择的盐类矿物为石盐,测温均挑选只含有单一液相流体包裹体或只含少量气液两相流体包裹体的盐类矿物样品(气液两相流体包裹体均被标记出并在测温过程中排除),从而保证了测温数据的准确性。

本文通过石盐包裹体均一温度分析,并结合其他学者的成果,旨在重建研究区域古新世—始新世的古气候,为钾盐成矿研究提供依据。

1 地质背景

江陵凹陷位于江汉盆地的西南部,是江汉盆地内最大的次级构造单元,也是继潜江凹陷之后的又一生烃凹陷。纪山寺断层为其北部边界,与荆门、河溶凹陷相邻; 河安寺断层为其西部边界与枝江凹陷、宜都鹤峰背斜带相隔; 西南与洞庭盆地澧县凹陷相通,桑植-石门复向斜呈一向凹陷内倾伏的凸起延伸到凹陷内大路口附近; 白垩系—新近系剥蚀线为其南部边界与华容隆起相接; 清水口断层及龙安断层为其东部边界,分别与丫角-新沟低凸起及陈沱口凹陷相邻(陈晓辉等, 2010; 王春连等, 2013b), 面积 6500 km^2 (图 1)。

江陵凹陷历经了多期次构造运动,凹陷内发育众多断层,而且各期次构造发育的断层在性质上以

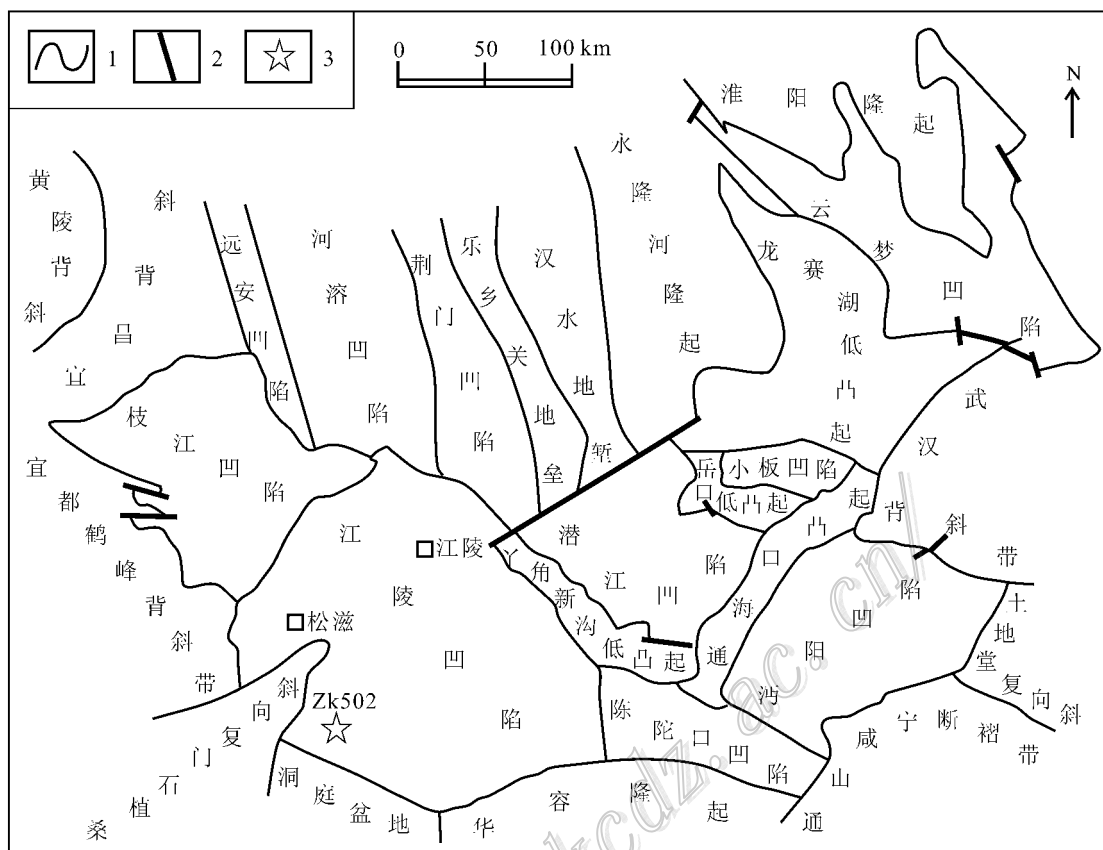


图 1 江陵凹陷区域构造位置示意图(据陈晓辉等,2010 修改)

1—地质界线；2—断层；3—采样位置

Fig. 1 Regional tectonic sketch map of Jiangling Depression(modified after Chen et al. , 2010)

1—Geological boundary ; 2—Fault ; 3—Sampling position

及展布上都有较大的异同,因而凹陷内的断层具有多向性、多类型、多级别、多期性及分区性特征,它们同盆地的发展、演化密切相关,对同时期的沉积建造、岩浆活动及油气的形成与分布具有控制作用。凹陷内白垩系—新近系发育厚度近万米,自下而上为:白垩系红花套组、渔洋组,古近系沙市组、新沟嘴组、荆沙组、潜江组、荆河镇组,新近系广华寺组及平原组(表 1)。其中,沙市组(E_s)厚度及岩性变化大,按地层分为 2 段:下段(E_s 下)主要为盐岩、红褐色及灰色含膏质泥岩、钙芒硝质泥岩,最大厚度超过万米;上段(E_s 上)深色泥岩稳定发育,至下部可见红色泥岩,一般厚 300~500 m。新沟嘴组(E_x)沉积比较稳定,岩性、厚度均没有较大变化。按地层分为 2 段:下段(E_x 下)为凹陷内主要生油层,厚度可达 500~700 m。局部如陵西等地受新沟嘴组末期或荆沙早期构造运动的影响缺失上部地层;上段(E_x 上)为一套棕色、紫红色泥岩夹薄、中厚层粉砂岩、含膏

泥岩、泥膏岩、局部见玄武岩、厚 200~300 m,在凹陷带厚度加大。

2 盐类矿物特征与样品

江陵凹陷沙市组和新沟嘴组下段沉积为一套巨厚含盐岩系,盐岩层异常发育,其中沙市组主要盐类矿物组合为硬石膏、无水芒硝、钙芒硝、石盐等,而新沟嘴组主要盐类矿物为硬石膏和钙芒硝,含一定量的石盐、芒硝和无水芒硝(刘成林,2013;王春连等,2013a;沈立建等,2014;涂小灿等,2014;Yu et al.,2015)。

本文用于取样研究的 ZK502 井位于江陵凹陷西南部(图 1),为探采井,井型为二开直井。地理位置位于湖南省常德市澧县盐井镇。该研究区陆相地层发育较齐全,自下而上依次为:上白垩统、古近系沙市组、新沟嘴组、荆沙组、潜江组、荆河镇组、广华寺

表 1 江陵凹陷白垩纪-第四纪构造演化特征表(据杨长清等,2003 修改)

Table 1 Cretaceous-Quaternary tectonic evolution characteristics in Jiangling Depression(modified after Yang et al. ,2003)								
系	统	组		构造运动及幕次	演化阶段	发展演化特征	构造旋回	
Q	Q _p	平原组		喜马拉雅运动Ⅲ幕	拗陷期	凹陷整体下沉，期间有段时间抬升	定型期	
N	N ₁	广华寺组			隆升剥蚀期	整体抬升遭受剥蚀	第二构造旋回	
E	E ₃	荆河组		喜马拉雅运动Ⅱ幕	断拗期	断裂活动较弱，次级构造定型		
		潜江组			强烈断陷期	断裂活动强烈，凹陷和凸起分明		
	荆沙组		断拗期					断裂活动较弱，形成明晰的构造格局
	新沟咀组	上段						
		下段						
	E ₁	沙市组	上段		断陷期	断裂活动为主，奠定早期的凹陷构造格局		
			下段					

组及平原组。该区域常见盐类矿物有石盐、硬石膏、钙芒硝、无水芒硝等。其中,无水芒硝在其他区域较少见。

本文主要研究 ZK502 井下始新统下部的新沟嘴组中段含盐层,该段含盐层自上而下大致可划分为钙芒硝段,石盐段,钙芒硝段,另可见无水芒硝及硬石膏,其中有 3 层石盐层,深度从 306.62~312.80 m,层厚约 1~2 m(图 3)。ZK502 井石盐常以厚层状产出,多数为白色或无色透明状,有些石盐段因含杂质而呈黑色,石盐晶体发育较好,晶型清晰可见(图 3a、b),常有肉红色含钾石盐充填于泥岩裂隙中。硬石膏常与泥岩互层或呈团块状夹杂于泥岩中(图 3c)。钙芒硝呈层状或块状分布于其他岩层中,常为灰白色自形,半自形菱板状集合体(图 3d、e)。无水芒硝呈块状,无色透明或浅蓝色,油脂光泽(图 3f)。

石盐为无色或白色,有些石盐因含有暗色泥质或与硬石膏、钙芒硝共生而呈灰黑色。半自形-自形结构,晶体大小从粗晶-巨晶到细晶都可见到。细粒晶体说明当时的结晶速度较快,而粗晶-巨晶的晶体则说明当时的结晶速度较慢。

3 流体包裹体研究

3.1 样品采集与制备

样品来自江陵凹陷 ZK502 井,采集位置在下始新统新沟嘴组中段三段石盐层。在制备石盐流体包裹体片时,同样并未采用磨片的方法,因为在磨片

的过程中需要对样品进行切割和打磨抛光,很可能会改变包裹体的原始温度信息。样品制备参考 Benison 等(1999)的方法,选用晶形较好的石盐颗粒,将其沿解理面切开,获取 0.5~1.5 mm 厚的石盐晶体解理片,挑选只含有单一液相流体包裹体或只含少量气液两相流体包裹体的解理片,并在显微镜下观察拍照,标记出气液两相流体包裹体用于在以后测温中加以区分排除,然后用塑料自封袋封好,放进密封性好并加入干燥剂的塑料盒内,以备测试用。

3.2 研究方法

温度测定使用英国产 LINKAM THMS600 型冷热台,采用液氮进行冷冻。冷热台的有效温度范围在 -196~+600℃ 之间,工作中数据精度为 ±0.1℃。该仪器通过配套软件可任意设定冷冻和加热时间、精度等。

测试前,首先将样品放入冰箱中冷冻 1~2 周,冰箱的温度在 -18℃ 左右。该温度不会使样品中的流体包裹体冻结,造成包裹体延展变形、泄露等从而对包裹体造成破坏,影响测温结果(Zhao et al., 2014)。在冷冻 1~2 周后,可见在样品中 2%~10% 的流体包裹体中产生了气泡。此方法在大多数情况下都有良好的效果,但是不同的样品亦会有所差别,大部分样品中都会观测到有气泡产生,有些样品中产生的气泡则较少甚至不产生气泡。将样品从冰箱中取出,迅速放入 THMS600 冷热台中再冷冻 1 小时左右(温度保持 -18℃),并对产生气泡的流体包裹体进行定位和标记。随后缓慢升温,升温速率为

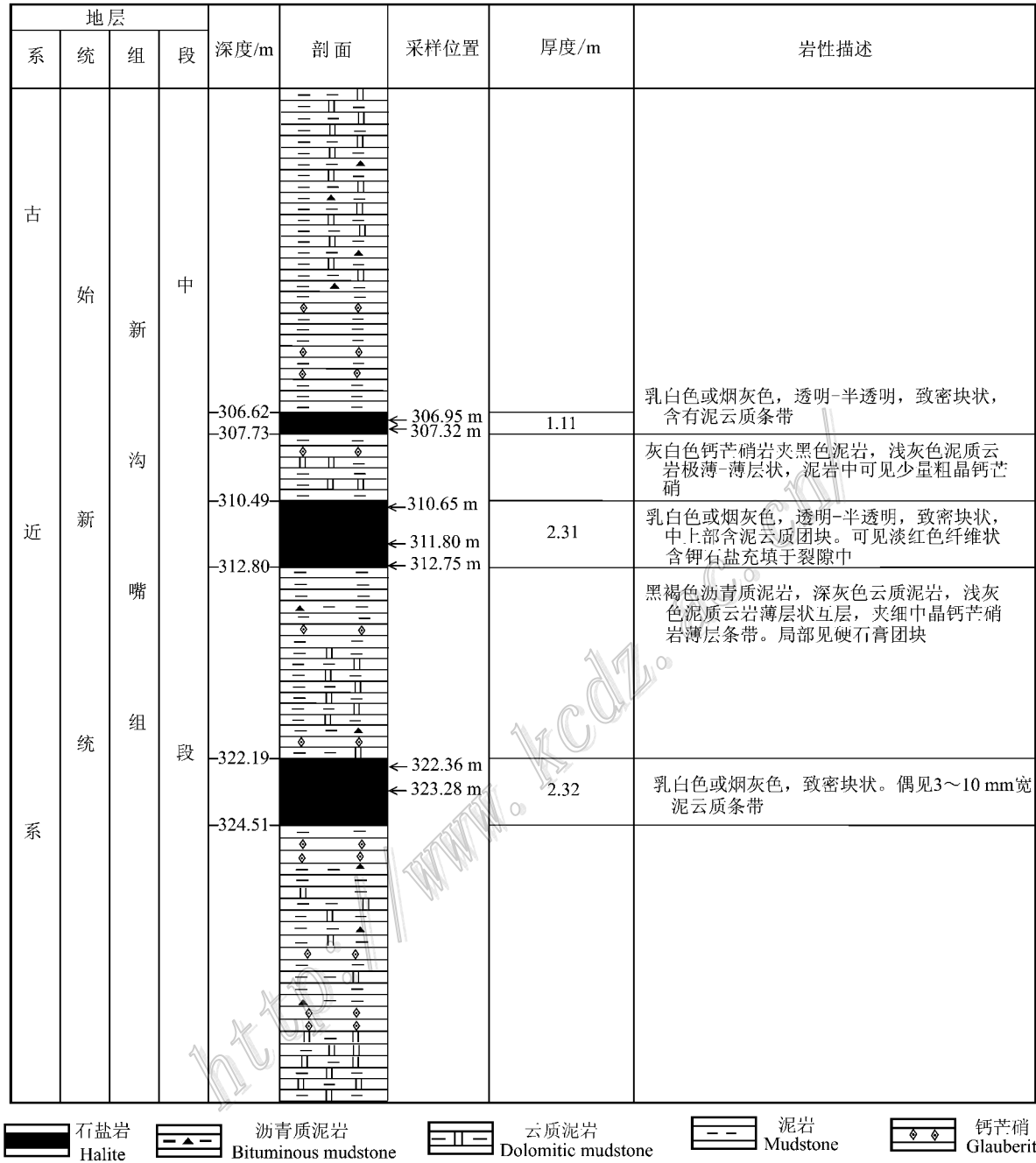


图 2 ZK502 井新沟嘴组中段岩性柱状图

Fig. 2 ZK502 lithological column in middle of Xingouzui Formation

0.5℃/min, 当在镜下观察到气泡开始变小, 即接近均一温度时将升温速率调整为 0.1℃/min 直至气泡消失, 记录下此刻的温度即为流体包裹体的均一温度 (Losey et al., 2000; 孟凡巍等, 2011; 汪春连等, 2013c)。

关于如何确定包裹体中的气泡是否真的消失即达到均一还是因为显微镜精度问题导致体积变小后的气泡在镜下难以观察到而造成达到均一的假象,

可通过以下方法验证 将温度再次降低 10~15℃, 如果气泡还存在, 那么气泡的体积将重新增长直到在视野下可见, 而达到完全均一的流体包裹体即使再次降温 10~15℃ 也不会重新出现气泡 (Roberts et al., 1995)。

3.3 研究中的问题

区分原生和次生流体包裹体的关键是看其与主要结晶矿物形成时间之间的关系。如包裹体是在主

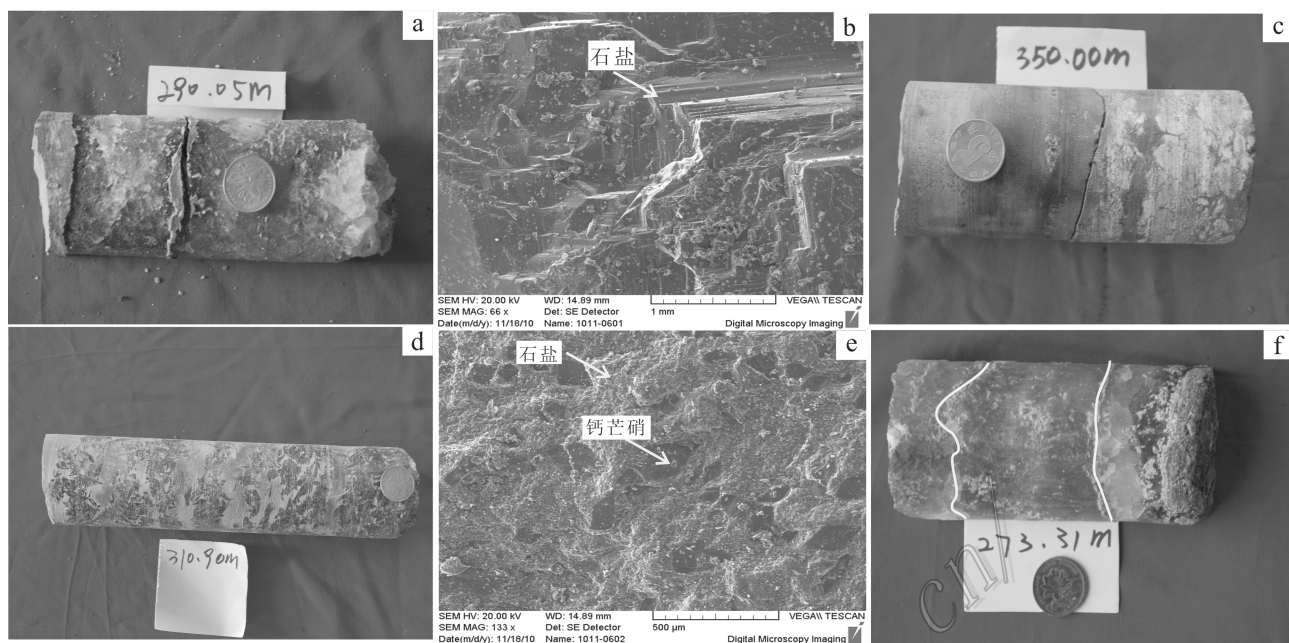


图3 ZK502井岩芯及扫描电镜照片

a. 石盐岩,粗晶,自形,块状构造,深度290.05 m; b. 漏斗型石盐晶体,深度323.36 m; c. 团块状硬石膏,深度350 m; d. 菱板状钙芒硝,块状构造,深度310.9 m; e. 菱形钙芒硝与石盐共生,图中深灰色为钙芒硝,浅灰色为石盐,深度308.65 m; f. 淡蓝色无水芒硝,块状构造,图中黄线内,深度273.31 m

Fig. 3 ZK502 drilling core and stereoscan photograph

a. Saline rock, coarse-grain, idiomorphic, massive structure, depth 290.05 m; b. Cumulate crystal, depth 323.36 m; c. Crumbly anhydrite, depth 350 m; d. Diamond glauberite, massive structure, depth 310.9 m; e. Diamond glauberite symbiosis with halite, glauberite is dark grey, halite is light grey, depth 308.65 m; f. Light blue thenardite, massive structure, inside the yellow lines depth 273.31 m

晶矿物结晶时包裹其周围的流体而形成的就是原生的,如包裹体在主晶矿物形成之后才形成,则为次生包裹体。可见,只有原生包裹体才携带了主晶矿物形成时的物理化学条件及流体环境等信息,而次生流体包裹体则代表着主晶矿物形成后期被改造事件中的物理化学条件及流体环境等信息,因此区分原次生流体包裹体是流体包裹体一切研究的前提和基础(孙贺等,2009)。然而区分原生和次生流体包裹体即是流体包裹体研究中的关键也是难点,目前除了扫描电镜-阴极发光法判断原次生包裹体以外,大部分是通过镜下从包裹体岩相学方面入手区分的,虽然前人总结出了许多行之有效的办法来区分原次生包裹体,但因为包裹体在镜下形态的复杂性,难免出现错误。如判断原次生包裹体的主要经验之一就是看包裹体是否是沿主晶矿物晶体生长带分布,如果是,则基本可以判断为原生包裹体,但是如果矿物的晶体生长带较宽或者被其他包裹体叠加,则会出现无法区分该包裹体究竟是原来沿生长带分布的原生包裹体还是后期叠加形成的次生包裹体;此外,还有孤立的包裹体、无序分布的包裹体和一个相对较

小的区域内分布的数个包裹体,它们与其他包裹体相隔距离较远,这些类型的包裹体想要精确区分是原生的还是次生的并不容易。可见,区分原次生包裹体即需要认真谨慎的态度,也需要丰富的经验。当然一些无法区分原次生的包裹体还可以通过均一温度的范围来判断,当均一温度范围变化较小时(小于 15°C),也可以判定为原生包裹体(Roedder, 1984b)。

另外,由于盐类矿物溶解度较高以及易于变形的特点使流体包裹体容易产生重结晶、延展、泄漏、压缩等次生变化,较不利于原生包裹体的保存,因此,要在一块样品中找到理想的原生包裹体样品并不容易,需要大量的重复工作以及镜下仔细的观察和寻找。

4 原生石盐流体包裹体与均一温度特征

4.1 石盐流体包裹体特征

研究发现,石盐晶体生长主要有2种形态:漏斗形(图4)和人字形(图5)。其中漏斗形是石盐在水体表面结晶形成的,而人字形则是石盐在水体底部

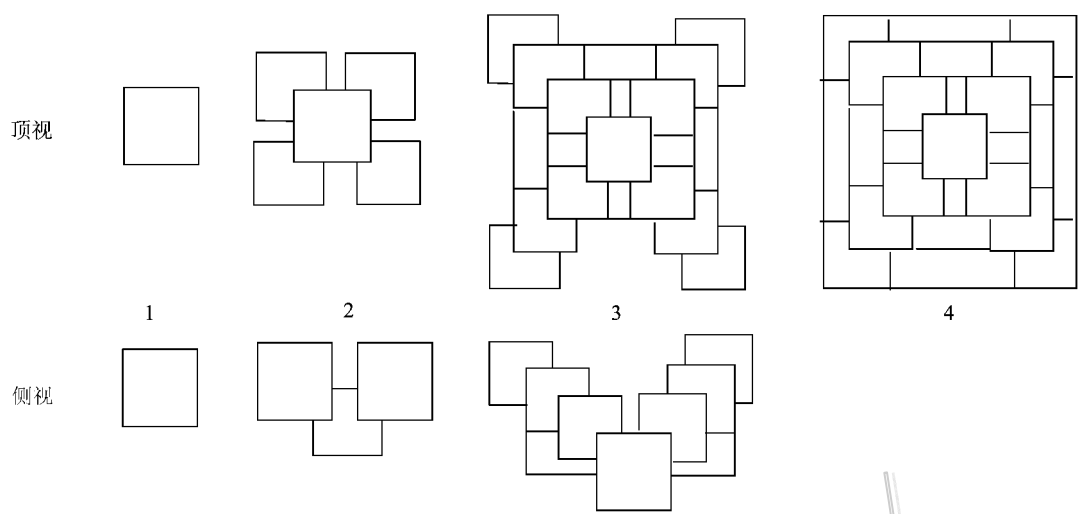


图 4 气水界面形成的漏斗形晶体(据 Roberts et al. ,1995 孟凡巍等,2011 修改)

1—在水体表面形成的单个石盐晶体,在结晶过程中,晶体稍稍侵入水面,但由于表面的张力使其依然悬浮于水中;2~3—水体表面石盐晶体继续生长,尤其在晶体四个角处;4—晶体继续生长,最终将形成一个中空漏斗形团块

Fig. 4 Cumulate crystals formed at air-water interface(modified after Roberts et al. ,1995 Meng et al. ,2011)

1—A halite crystal nucleates at the surface of an evaporating brine. The cube sinks slightly as it grows, but is buoyed up by surface tension ;

2~3—Additional growth continues at the outside surfaces, preferentially at the corners, which are still in contact with the brine ;

4—This process results in a crystal with a partially hollow center and an inverted pyramid shape

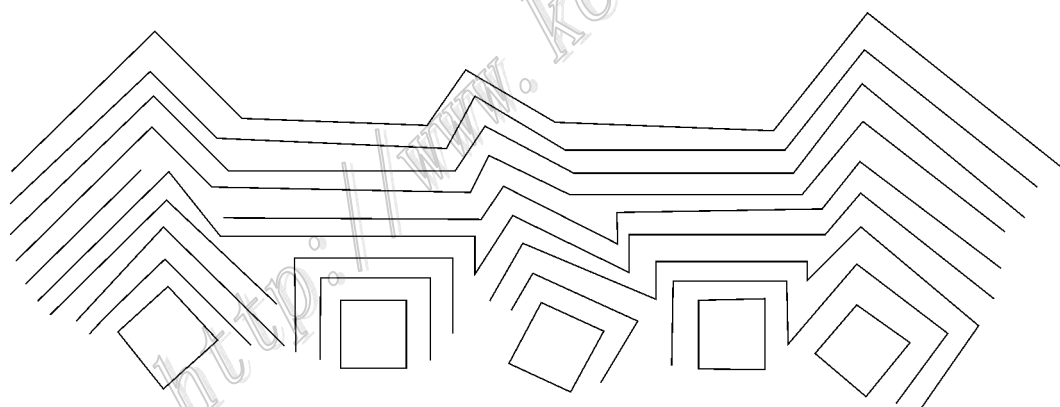


图 5 浅水底部形成的人字形晶体(据 Shearman,1978 孟凡巍等,2011 修改)

Fig. 5 Chevron crystals formed at the bottom of the shallow saline lake(modified after Shearman, 1978 ; Meng, 2011)

形成的(Shearman,1978 Zhang et al. ,2015),且形成时的卤水深度可能小于 1 m (Lowenstein et al. ,1998),所以人字形包裹体的均一温度不仅能代表当时的水温,也与古气温有良好的相关关系,而其他形态的原生单一液相流体包裹体则因为无法确定当时晶体形成时的水深,其均一温度也只能代表古水温。近年来,也有学者研究实验室人工合成石盐包裹体的均一温度,发现不论是浅水底部形成的人字形晶

体,还是气水界面形成的漏斗形晶体,其晶体内包裹的原生单一液相流体包裹体都可以用来恢复当时的古气温(孟凡巍等,2011)。遗憾的是,本次研究未能在 ZK502 石盐样品中发现足量人字形包裹体,所以测温以漏斗形晶体中的条带形为主。

镜下观察发现,粗粒、巨粒石盐晶体中流体包裹体极为发育,主要有单一液相包裹体、气液两相包裹体和少量含子矿物的多相包裹体。大多数包裹体呈

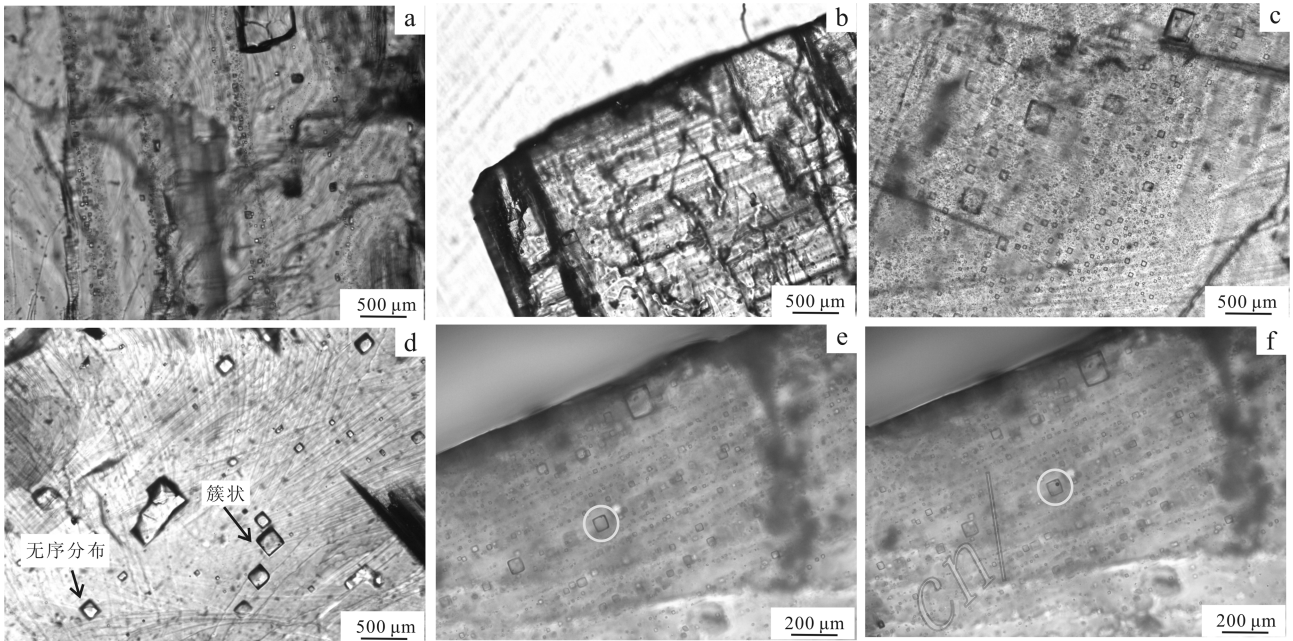


图 6 ZK502 井石盐中的原生流体包裹体照片

a~c. 条带状流体包裹体,注意条带明暗相间现象; d. 无序包裹体和簇状包裹体; e. 包裹体冷冻前为单一液相; f. 包裹体冷冻后,出现气泡

Fig. 6 The primary fluid inclusions in halite from ZK502 drilling
a~c. Dark and light fluid inclusion bands within a cumulate crystal, showing discrete growth planes (fluid inclusion assemblages) that formed relatively synchronously; d. Unordered single fluid inclusion and tufted fluid inclusions; e. A single phase (liquid) fluid inclusion before cooling; f. Fluid inclusions after cooling, artificially nucleated vapor bubble

表 2 江陵凹陷 ZK502 井石盐包裹体均一温度

Table 2 Homogenization temperature date of primary fluid inclusions in halite from ZK502 drilling in Jiangling Depression								
地层	深度/m	包裹体组合	包裹体形态	有效数据数/个	最高温度/℃	最低温度/℃	平均温度/℃	温差/℃
新沟嘴组中段	306.95	条带状	正方形	28	29.6	17.9	24.9	11.7
新沟嘴组中段	307.32	条带状	正方形	6	29.2	14.9	22.9	14.3
新沟嘴组中段	310.65	条带状	正方形	37	30.4	17.6	25.0	12.8
新沟嘴组中段	311.80	条带状	正方形	26	28.5	16.7	22.7	11.8
新沟嘴组中段	312.75	条带状	正方形	13	32.3	20.8	26.1	11.5
新沟嘴组中段	322.36	条带状	正方形	23	26.5	16.9	22.4	9.6
新沟嘴组中段	323.28	条带状	正方形	60	31.7	14.9	22.9	16.8
合计				193				

正方形,即主晶矿物的负晶型(葛晨东等,2007),也有少量包裹体可能经过后期改造而呈长方形,圆形或其他不规则形。包裹体组合的分布主要以漏斗形晶体中的条带状(图 6a~c)为主,此外还有单独或无序分布的、簇状(图 6d)等,另可见一些沿愈合裂隙生长的次生或假次生流体包裹体。流体包裹体的形态和分布均显示出了其原生特征,其中沿晶体生长带分布的条带状单一液相流体包裹体是原生包裹体的有力证据。

4.2 均一温度特征

本次研究在下始新统新沟嘴组中段三石盐层中

按深度共采集到 7 组样品。共计进行 15 次实验,测得 193 个有效数据(表 2,图 7)。流体包裹体均一温度分布范围为 14.9~32.3℃,均值 23.7℃。

Goldstein 等(1994)研究认为,同一包裹体带中所测得的均一温度变化范围 90% 以上不超过 10~15℃,则可以认为数据是有效的。本次研究共计进行了 15 次测温实验,其均一温度范围除一次达到 16.8℃ 以外,其余均未超过 15℃(表 2),这也证明了用于测温的流体包裹体是原生的。

4.3 讨论

通过石盐中的原生单一液相流体包裹体均一温

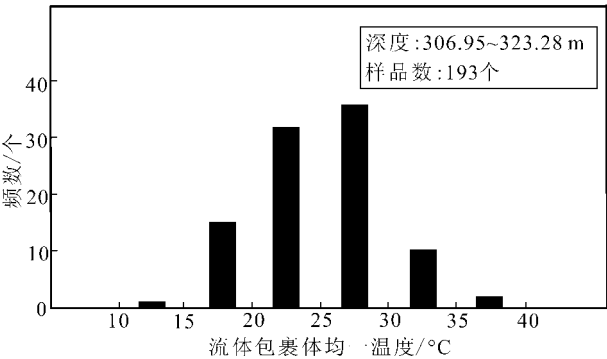


图 7 ZK5022 井石盐包裹体均一温度分布

Fig. 7 Homogenization temperature date distribution of primary fluid inclusions in halite from ZK502 drilling

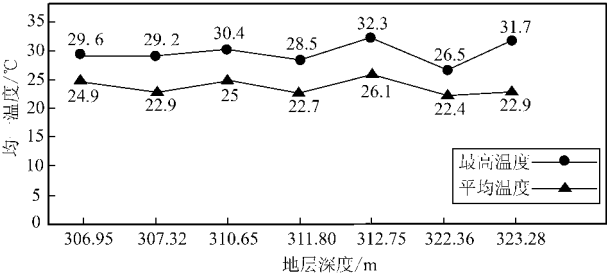


图 8 江陵凹陷早始新世新沟嘴组中段石盐包裹体均一温度

Fig. 8 Homogenization temperature of primary fluid inclusions in halite in middle of Xingouzu Formation in Early Eocene

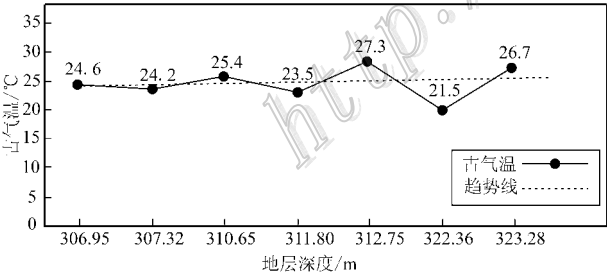


图 9 江陵凹陷早始新世古气温

Fig. 9 Early Eocene paleotemperature in Jiangling Depression

度来反映古气候信息的研究,已日趋成熟。石盐作为寻找原生流体包裹体的载体相对于其他盐类矿物有以下几点优势:首先,石盐广泛分布于各类蒸发岩系中,因此石盐相较于其他盐类矿物来说,也就记录了最广泛的地质信息,这一点是其他盐类矿物无法比拟的;其次,石盐中的包裹体较为丰富,体积也较

大,且石盐解理发育,较易制备合适的样品。本文以石盐中的流体包裹体为研究对象,主要从岩相学和包裹体均一温度的测定两方面进行了初步探索,这对于研究原、次生包裹体的辨别准则以及包裹体均一温度分与古气候的关系等方面也有一定的意义。

通过分析包裹体均一温度数据可知,研究区域在早始新世新沟嘴组中段沉积时的水温较高,最大值达到 32.3℃,均值也达 23.7℃。此外,通过均一温度图还可以发现(图 8),其均一温度波动不大,最大值在 30℃ 左右,而均值也在 23℃ 上下,说明当时的古湖水温比较稳定,因古水温与古气温有较好的相关性,可以推测,研究区域在早始新世新沟嘴组中段时的古气温也较为稳定。

石盐包裹体均一温度只能说明当时的古水温,而通过 Roberts 等(1995)在死谷的研究表明气温和水温有一定的相关关系,一般气温比水温低 5℃ 左右。如前文所说,这一关系在浅水底部形成的人字形包裹体上有着良好的对应关系,而其他类型的原生单一液相流体包裹体能否适用尚存争议。本文测温以在气水界面形成的漏斗状石盐晶体中的原生条带形包裹体为主,应用此关系所得出的古气温可能会比实际略低,因此仅作为参考用(图 9)。图 9 可知,当时气温较高,且比较稳定,波动不大。

根据王春连等(2013c)对江陵凹陷古新统沙市组石盐层及李皓楠等(2015)对江陵凹陷早始新统新沟嘴组下段原生无水芒硝层的研究,发现江陵凹陷古气温自沙市组至新沟嘴组下段有明显降低的趋势,但当时的气温依然较高:沙市组上段包裹体均一温度均值为 33.6℃,沙市组顶部包裹体均一温度均值为 29.2℃,新沟嘴组下段包裹体均一温度均值为 27.2℃。而本文新沟嘴组中段包裹体均一温度均值为 23.7℃(图 10)。

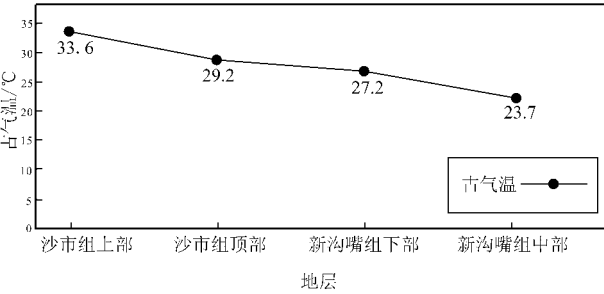


图 10 江陵凹陷晚古新世—早始新世古气温数据

Fig. 10 Late Palaeocene-Early Eocene paleotemperature in Jiangling Depression

由于地球地质历史现有记录中出现的一次最快、强度最大的全球变暖事件,即古新世—始新世极热事件(PETM)的发生,地球温度迅速升高,这次迅速而剧烈的升温(在高纬度地区温度上升了 7°C 之多)持续的时间少于 10 万年(Kennett et al., 1991; Zachos et al., 2003)。之后,气温开始回落,本文所发现的古气温自沙市组至新沟嘴组下段明显降低的趋势可能与极热事件后的降温期有关。

5 结 论

本次测温选用石盐,参考前人测温方法并加以改进,共在 7 个层位进行 15 次实验,测得 193 个有效数据,流体包裹体均一温度分布范围为 $14.9 \sim 32.3^{\circ}\text{C}$,均值 23.7°C 。说明当时古盐湖水的温度较高。通过古水温与古气温的对应关系还可以看出,江陵凹陷早始新世气温较高,且比较稳定,波动不大。

江陵凹陷晚古新世气候干旱炎热,在经历古新世—始新世一次短暂的迅速升温事件之后,至早始新世气温开始回落。本文通过分析比对前人对该区域古气温的研究成果,发现该区域古气温自沙市组至新沟嘴组下段有明显降低的趋势。这与 PETM 事件之后的降温期基本吻合,据此推测,降温期可能从沙市组顶部开始延续到新沟嘴组中段,直至保持稳定,但当时的气温依然较高,属于温暖干旱的气候特征。

志 谢 野外样品采集得到长江大学刘锦磊硕士,中国地质科学院矿产资源研究所陈鹏工程师,湖南省湘漫盐化有限责任公司杨勇工程师的支持和帮助,钻井岩芯也由该公司提供。在本论文的实验和撰写工作中,中国地质科学院矿产资源研究所赵艳军副研究员、王九一助理研究员、张华助理研究员在流体包裹体研究以及在实验方法、论文撰写等方面给予了悉心指导,在此一并志谢!

References

- Benison K C and Goldstein R H. 1999. Permian paleoclimate data from fluid inclusions in halite[J]. *Chemical Geology*, 154(1): 113-132.
- Chen X H, He Y B and Wang Y J. 2010. Recovery of eroded strata thickness of Jingsha Formation in Jiangling Depression[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 7(4): 48-52 (in Chinese with English abstract).
- Chi G X and Lu H Z. 2008. Validation and representation of fluid inclusion microthermometric data using the fluid inclusion assemblage (FIA) concept[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 1945-1953 (in Chinese with English abstract).
- Ge C D, Wang T G, Liu X Q, Meng F W and Liu J Q. 2007. Paleoclimatic information recorded in fluid inclusions in halite from Chaka salt lake, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2063-2068 (in Chinese with English abstract).
- Goldstein R H and Reynolds T J. 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals: SEPM Short Course 31 [J]. Society for Sedimentary Geology, 31: 1-199.
- Kennett J P and Stott L D. 1991. Abrupt deep sea warming, paleoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Paleocene[J]. *Nature*, 353: 225-229.
- Krüger Y, García-Ruiz J M, Canals à, Marti D, Frenz M and Van Driessche A E. 2013. Determining gypsum growth temperatures using monophasic fluid inclusions: Application to the giant gypsum crystals of Naica, Mexico[J]. *Geology*, 41(2): 119-122.
- Lu H Z and Guo D J. 2000. Progress and trends of researches on fluid inclusions[J]. *Geological Review*, 46(4): 385-390 (in Chinese with English abstract).
- Li H N, Wang C L, Liu C L, Yang S G, Xu H M, Hu H B and Liu J L. 2015. Paleotemperatures of Early Eocene in the Jiangling Depression: Evidence from fluid inclusions in thenardite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2019-2027 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Chen Y Z and Chen W S. 2006. Studies of fluid inclusions in glauberite of middle-Upper Pleistocene strata and their paleoclimate significance in Lop Nur salty lake, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(1): 93-98 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L. 2013. Characteristics and formation of potash deposits in continental rift basins: A review[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5): 515-527 (in Chinese with English abstract).
- Liu X Q and Ni P. 2005. Advances in studies of fluid inclusions in halite formed in earth's surface environments[J]. *Advances in Earth Science*, 20: 856-862 (in Chinese with English abstract).
- Liu X Q, Ni P and Dong H L. 2007. Homogenization temperature and its significance for primary fluid inclusion in halite formed in Chaka salt lake, Qardam Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 113-

116.

- Losey A B and Benison K C. 2000. Silurian paleoclimate data from fluid inclusions in the Salina Group halite Michigan Basin [J]. *Carbonates and Evaporites*, 15(1): 28-36.
- Lowenstein T K, Li J and Brown C B. 1998. Paleotemperatures from fluid inclusions in halite: Method verification and a 100,000 year paleotemperature record, Death Valley, CA [J]. *Chemical Geology*, 150(3): 223-245.
- Meng F W, Ni P and Ge C D. 2011. Homogenization temperature of fluid inclusions in laboratory grown halite and its implication for paleotemperature reconstruction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1543-1547 (in Chinese with English abstract).
- Meng F W, Ni P and Yuan X L. 2013. Choosing the best ancient analogue for projected future temperatures: A case using data from fluid inclusions of middle-late Eocene halites [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 67: 46-50.
- Meng F W, Galamay A R, Ni P, Yang C H, Li Y P and Zhuo Q G. 2014. The major composition of a middle Late Eocene salt lake in the Yuning Depression of Jiangnan Basin of Middle China based on analyses of fluid inclusions in halite [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 85: 97-105.
- Roberts S M and Spencer R J. 1995. Paleotemperatures preserved in fluid inclusions in halite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19): 3929-3942.
- Roberts S M, Spencer R J and Yang W. 1997. Deciphering some unique paleotemperature indicators in halite-bearing saline lake deposits from Death Valley, California, USA [J]. *Journal of Paleolimnology*, 17(1): 101-130.
- Roedder E. 1984a. Fluid inclusions [M]. Washington D C: Mineralogical Society of America.
- Roedder E. 1984b. The fluids in salt [J]. *American Mineralogist*, 69(5-6): 413-439.
- Satterfield C L, Lowenstein T K and Vreeland R H. 2005. Paleobrine temperatures, chemistries and paleoenvironments of Silurian Salina Formation F-1 Salt, Michigan Basin, USA, from petrography and fluid inclusions in halite [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 75(4): 534-546.
- Shearman D J. 1978. Evaporites of coastal sabkhas [A]. In: Dean W E and Schreiber B C, eds. Short course notes [C]. Marine Evaporites. Oklahoma City, 4: 6-42.
- Shen L J, Liu C L and Xu H M. 2014. Paleocene mineral assemblage characteristics of Jiangling Depression and their significance for potash formation [J]. *Mineral Deposits*, 33(5): 1020-1030 (in Chinese with English abstract).
- Sun H and Xiao Y. 2009. Fluid inclusions: Latest development, geological applications and prospect [J]. *Advances in Earth Science*, 24(10): 1105-1121 (in Chinese with English abstract).
- Wang C L, Liu C L and Xu H M. 2013a. Paleogene potash environment and potassium enrichment mechanism of Jiangling Depression [J]. *Geological Review*, 59: 550-551 (in Chinese with English abstract).
- Wang C L, Liu C L and Xu H M. 2013b. Sulfur isotopic composition of sulfate and its geological significance of member 4 of palaeocene Shashi Formation in Jiangling Depression of Hubei Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(3): 691-703 (in Chinese with English abstract).
- Wang C L, Liu C L, Xu H M and Hu H B. 2013c. Homogenization temperature study of salt inclusions from the upper section of Shashi Formation in Jiangling Depression [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(3): 383-392 (in Chinese with English abstract).
- Yang C Q, Chen K Q and Cheng Z Q. 2003. Constituent evolution and exploration potential in Jiangling Depression [J]. *Natural Gas Industry*, 23(6): 51-53.
- Yu X C, Wang C L and Liu C L. 2014. Re-e geochemical characteristics of sedimentary rocks in Jiangling Depression and their geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 33(5): 1057-1068 (in Chinese with English abstract).
- Yu X C, Wang C L and Liu C L. 2015. Sedimentary characteristics and depositional model of a Paleocene-Eocene salt lake in the Jiangling Depression, China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33: 1426-1435.
- Zachos J C, Wara M W, Bohaty S, Delaney M L, Petrizzo M R, Brill A and Premoli S I. 2003. A transient rise in tropical sea surface temperature during the Paleocene-Eocene thermal maximum [J]. *Science*, 302(5650): 1551-1554.
- Zhang H, Liu C L, Zhao Y J, Mischke S, Fang X M and Ding T. 2015. Quantitative temperature records of mid Cretaceous hothouse: Evidence from halite fluid inclusions [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 437: 33-41.
- Zhao Y J, Liu C L, Zhang H, Wang L C, Ren C X and Wang X. 2013. Analytical method and paleoenvironmental interpretation of fluid inclusion homogenization temperature of ancient halite [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(5): 603-609 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y J, Liu C L, Zhang H, Wang L C, Feng Y, Wu Y and Liu B K. 2014. Characteristics and geological significance of fluid inclusions in

halite of the first member of Shahejie Formation in Shulu Depression, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science(Journal of China University of Geoscience), 39(10):1355-1363 (in Chinese with English abstract).

Zhao Y J, Zhang H and Liu C L. 2014. Late Eocene to Early Oligocene quantitative paleotemperature record: Evidence from continental halite fluid inclusions[J]. Scientific Reports, 4:5776.

附中文参考文献

陈晓辉,何幼斌,王永军. 2010. 江陵凹陷荆沙组地层剥蚀厚度恢复探讨[J]. 长江大学学报自然科学版:理工(上旬),07(4):48-52.

池国祥,卢焕章. 2008. 流体包裹体组合对测温数据有效性的制约及数据表达方法[J]. 岩石学报,24(9):1945-1953.

卢焕章,郭迪江. 2000. 流体包裹体研究的进展和方向[J]. 地质论评,46(4):385-392.

葛晨东,王天刚,刘兴起,孟凡巍,刘吉强. 2007. 青海茶卡盐湖石盐中流体包裹体记录的古气候信息[J]. 岩石学报,23(9):2063-2068.

李皓楠,王春连,刘成林,杨申谷,徐海明,胡海兵,刘锦磊. 2015. 江陵凹陷始新世早期古气温:来自无水芒硝流体包裹体的证据[J]. 地质学报,89(11):2019-2027.

刘成林,陈永志,陈伟十,焦鹏程,王弼力,李树德. 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[J]. 矿物学报,26(1):93-98.

刘成林. 2013. 大陆裂谷盆地钾盐矿床特征与成矿作用[J]. 地球学报,34(5):515-527.

刘兴起,倪培. 2005. 表生环境条件形成的石盐流体包裹体研究进展[J]. 地球科学进展,20(8):856-862.

刘兴起,倪培,董海良,王天刚. 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[J]. 岩石学报,23(1):113-116.

孟凡巍,倪培,葛晨东. 2011. 实验室合成石盐包裹体的均一温度及古气候意义[J]. 岩石学报,27(5):1543-1547.

沈立建,刘成林,徐海明. 2014. 江陵凹陷古新统盐类矿物沉积特征及其成钾指示意义[J]. 矿床地质,33(5):1020-1030.

孙贺,肖益林. 2009. 流体包裹体研究进展,地质应用及展望[J]. 地球科学进展,24(10):1105-1121.

王春连,刘成林,徐海明. 2013a. 江陵裂谷凹陷古近纪成钾环境及其钾盐富集机理[J]. 地质论评(中文界面),59(z1):550-551.

王春连,刘成林,徐海明. 2013b. 湖北江陵凹陷古新统沙市组四段硫酸盐硫同位素组成及其地质意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版,43(3):691-703.

王春连,刘成林,徐海明,王立成,张林兵. 2013c. 江陵凹陷沙市组上段石盐包裹体测温学研究[J]. 岩石矿物学杂志,32(3):383-392.

杨长清,陈孔全,程志强. 2003. 江陵凹陷形成演化与勘探潜力[J]. 天然气工业,23(6):51-54.

余小灿,王春连,刘成林. 2014. 江陵凹陷古新统沉积岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质,33(5):1057-1068.

赵艳军,刘成林,张华,王立成,任彩霞,王鑫. 2013. 古代石盐岩流体包裹体均一温度分析方法及古环境解释[J]. 地球学报,34(5):603-609.

赵艳军,刘成林,张华,王立成,丰勇,吴悠,刘宝坤. 2014. 渤海湾盆地束鹿凹陷沙一段石盐岩中流体包裹体特征及其地质意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报,39(10):1355-1363.