

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

李皓楠¹⁾, 王春连²⁾, 刘成林²⁾, 杨申谷¹⁾, 徐海明²⁾, 胡海兵³⁾, 余小灿⁴⁾, 刘锦磊¹⁾

1) 长江大学地球科学学院, 武汉, 430100;

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) 湖南省湘澧盐化有限责任公司, 湖南津市, 415400; 4) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京, 100083

内容提要:江陵凹陷古新统沙市组 and 始新统新沟嘴组下段沉积为一套巨厚含盐岩系。对始新世早期新沟嘴组下段沉积的无水芒硝中的原生单一液相流体包裹体采用冷冻法进行均一温度测定。原生流体包裹体是在矿物沉积的过程中被捕获的, 矿物生长过程中所圈闭的流体(即古盐湖卤水)保存了当时地质环境的各种地质地球信息, 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。测温结果显示, 其均一温度范围是 17.6~38.5℃, 均值为 27.2℃。这可能说明, 江陵凹陷早始新世新沟嘴组下段的古气温在 27.2℃左右, 极端情况下, 当时的古气温可达 38.5℃。通过与前人的研究比对发现江陵凹陷自沙市组上段到新沟嘴组下段有明显降温趋势。由于古新世—始新世的升温事件(PETM)使全球气温普遍升高, 可以看出江陵凹陷自新沟嘴底部虽已进入 PETM 事件后的降温期但气候依然以炎热干旱为主要特征。

关键词:无水芒硝; 原生流体包裹体; 均一温度; 冷冻法; 古气温; 始新世早期; 江陵凹陷

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, 形成的盐类矿物往往捕获有母液, 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(Lowenstein et al., 1998; 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、次生流体包裹体可通过流体包裹体的形态, 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。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, 1984), 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(池国祥等, 2008; 赵艳军等, 2013), 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 F W 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., 1997; Liu X Q et al., 2007; Meng F W et al., 2014; 赵艳军等, 2014), 另可见钙芒硝(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无水芒硝, 无水芒硝相对于石盐来讲, 有硬度高, 溶解度低, 较不易重结晶等优点, 更有利于原生包裹体的保存, 且无水芒硝是暖性矿物的代表性矿物(郑绵平等, 1998; 刘成林等, 2008; 王春连等, 2012), 其流体包裹体所含温度信息可能会与当时的古气温有较好的关系。前人对无水芒硝包裹体用于均一温度测温的研究较

注: 本文为国家 973 项目(编号: 2011CB403007)、国家自然科学基金青年基金(编号: 41502089, 41202059)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(编号: K1415)和中国地质大调查项目(编号: 12120114051901)联合资助。

收稿日期: 2015-07-15; 改回日期: 2015-07-25; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 李皓楠(1988—), 男, 硕士研究生, 地质工程专业, 主要从事流体包裹体研究。Email: li.haonan198806@gmail.com。通信作者: 王春连(1983—), 男, 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。

少,因而本文对于包裹体均一温度的研究以及其在盐类矿物中的更广泛应用都有一定的意义。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无水芒硝样品(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。

1 地质背景

江陵凹陷为新生代江汉断陷盆地的一部分,是江汉盆地最大的次级负向构造单元,是在侏罗纪末期燕山变形褶皱基底上形成的晚白垩—下第三系凹陷背景下的断陷盆地。其东界为丫角断层,北边有纪山寺断层,西为问安寺断层,南界为公安断层,它们共同控制着江陵凹陷的形成与发展(图1)。江陵凹陷以万城断层为界,具有NW分带、NE分块的构造格局,处于新华夏裂谷系,有近一半的面积被火山岩覆盖,深源物质的补给十分丰富(王典敷等,1998)。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(杨长清等,2003;刘成林,2013;王春连等,2013a;沈立建等,2014;余小灿等,2014)。

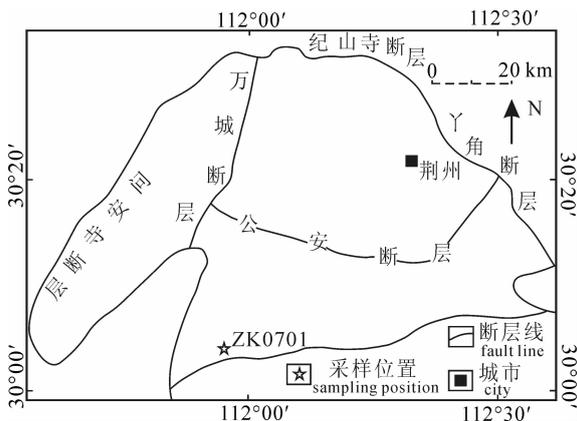


图1 江陵凹陷构造单元分布图(杨长青等,2003)

Fig. 1 Structure Map of Jinangling Depression (Yang Changqing et al., 2003)

2 实验样品与方法

2.1 样品采集与制备

样品来自江陵凹陷 ZK0701 井(图1,图2),采集位置在 290.05 m 和 302 m 两处。在制备无水芒硝流体包裹体片时,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(赵艳军等,2013)。样品制备参考 Benison(1999) 等的方法,选用晶形较好的无水芒硝颗粒,将其沿解理面切开,获取 0.5~1.5 mm 厚的无水芒硝解理片,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。

2.2 实验方法

温度测定使用英国产 LINKAM THMS600 型冷热台,采用液氮进行冷冻。仪器测定温度范围在 $-196\sim+600\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷冻数据和均一温度数据精度分别为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

测试前,首先将无水芒硝样品放入冰箱中冷冻 1~2 周,冰箱的温度在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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(Meng F W et al., 2011; Zhao Y J et al., 2014)。在冷冻 1~2 周后,可见样品中 5%~30% 的流体包裹体中产生了气泡(图 3c, 3d)。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大量气泡产生,相对的有些样品中产生的气泡则较少,还有一些样品中因为流体包裹体较少,产生的气泡也较少。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 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$),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 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,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 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 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; 王春连, 2013)。

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得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 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$,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 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 也不会重新出现气泡(Robert et al., 1995)。

3 无水芒硝沉积特征

取岩心时发现从深度 213.52~303.76m 包含

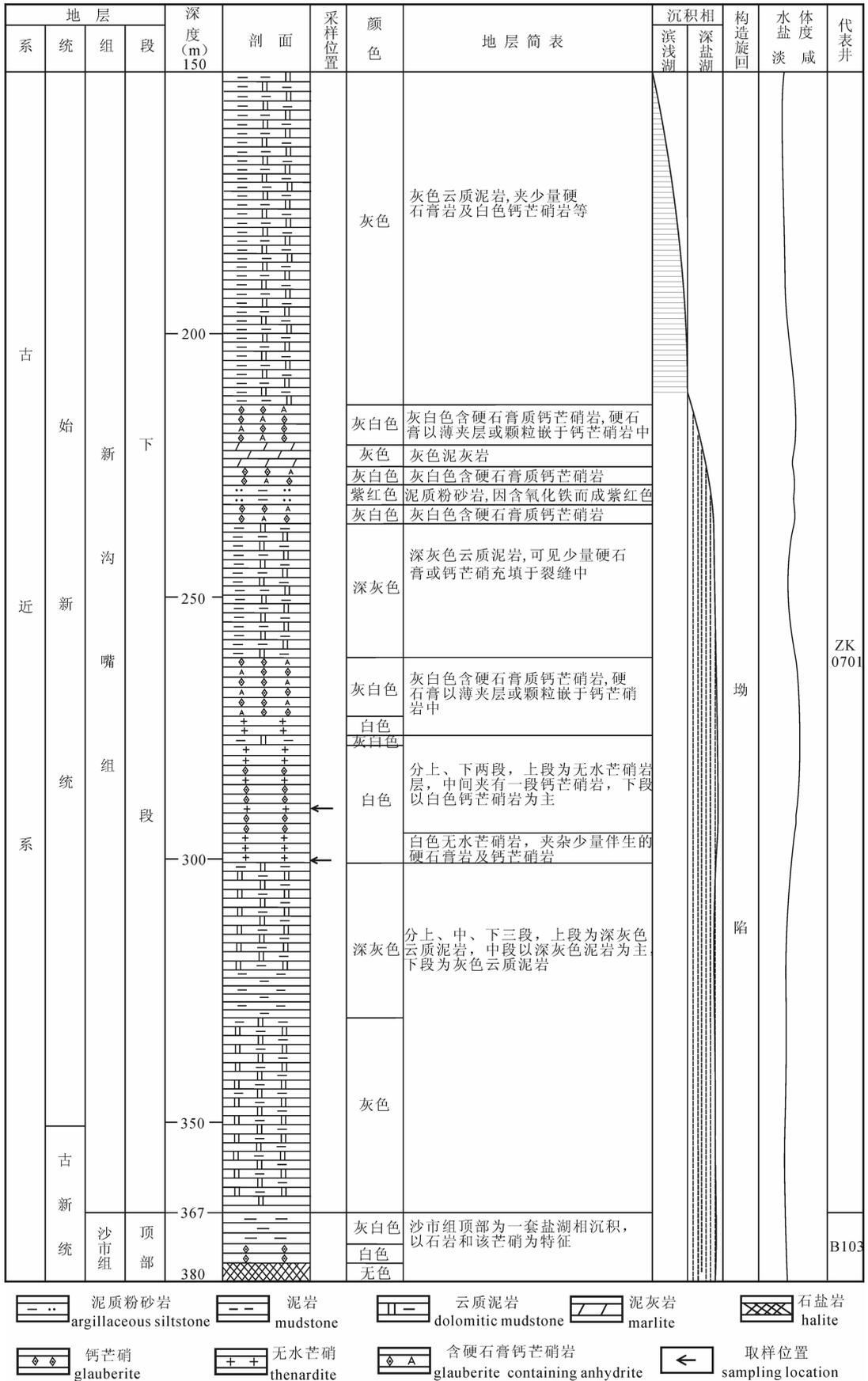


图 2 江陵凹陷新沟嘴组下段地层柱状图及采样位置

Fig. 2 Stratigraphic column of the lower section of Xingouzui Formation in Jinangling Depression

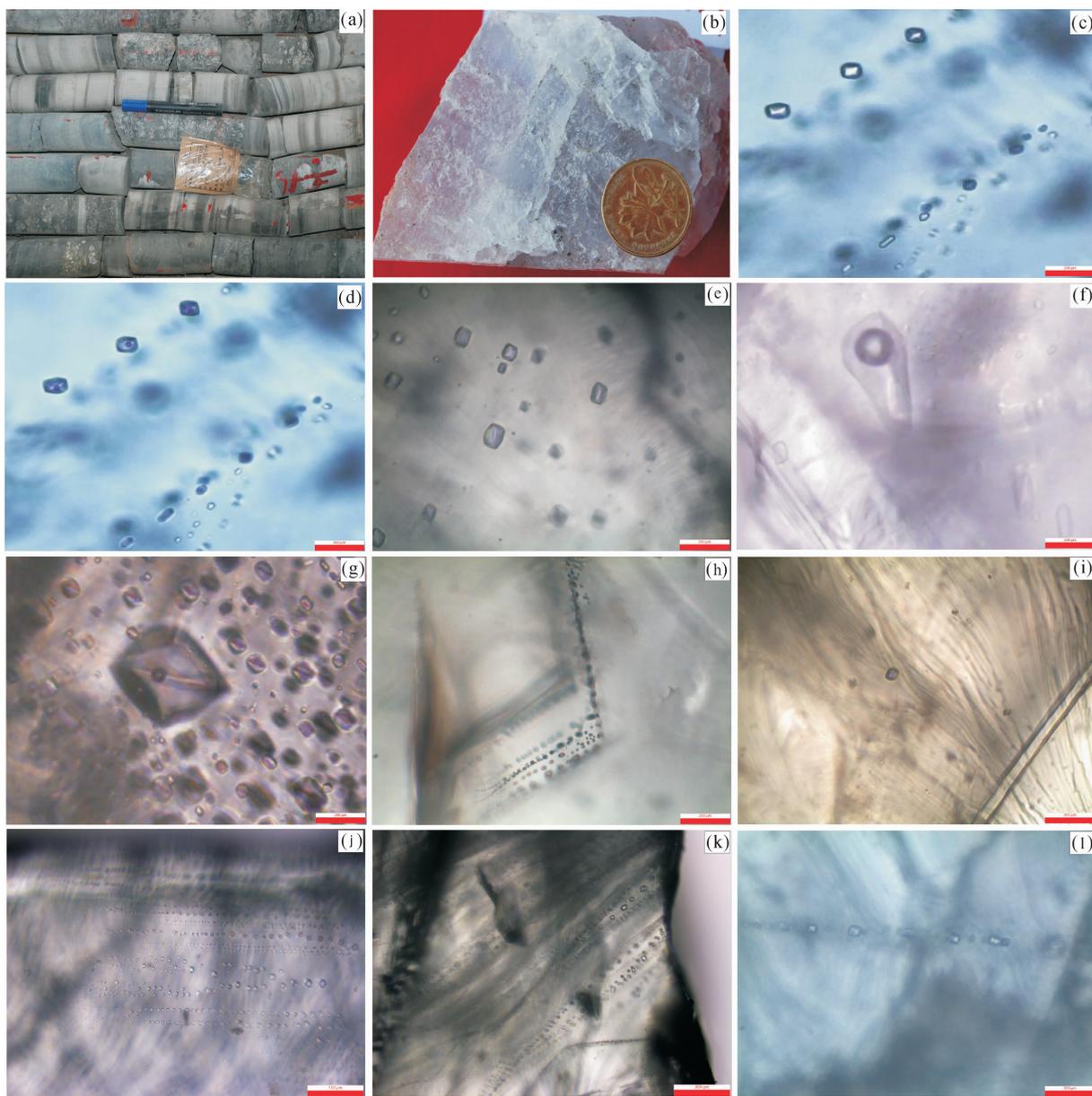


图3 江陵凹陷新沟嘴组下段地层无水芒硝样品和无水芒硝包裹体显微照片

Fig. 3 Thenardite samples and microphotograph of thenardite inclusions of Xingouzui Formation in Jinangling Depression

(a)—ZK0701 井岩心, 水平层理发育; (b)—无水芒硝样品, 取自 ZK0701 井 302m 处, 无色, 玻璃光泽, 粗晶结构; (c)—冷冻前, 无水芒硝中的单一液相流体包裹体; (d)—冷冻后, 部分无水芒硝中的单一液相流体包裹体中出现了气泡; (e, f, g)—无水芒硝中的单一液相、气液两相、气液固三相包裹体; (h)—沿晶体生长带分布的人字形包裹体; (i)—单独无序分布的包裹体; (j, k)—一条带状包裹体; (l)—沿愈合裂隙生长的次生或假次生流体包裹体

(a)—ZK0701 well core, horizontal bedding development; (b)—thenardite samples, taken from 302m of ZK0701, colorless, vitreous luster, coarse grain structure; (c)—Before freezing, primary fluid inclusions in thenardite; (d)—after freezing, part of primary fluid inclusions in thenardite appeared bubbles; (e, f, g)—fluid inclusions, gas-liquid inclusions, gas-liquid-solid inclusions; (h)—chevron inclusions, distributed with crystal growth band; (i)—separate inclusions, distributed disorderly; (j, k)—inclusion bands; (l)—secondary inclusions or false secondary inclusions growth along healed fractures

数层含钙芒硝或无水芒硝地层, 两类含盐地层呈互层状产出。单层含无水芒硝地层厚度从 0.53 ~ 1.96m, 可见明显层状构造, 除无水芒硝外, 仅夹杂少量伴生的硬石膏岩和钙芒硝岩(图 2, 图 3a)。

无水芒硝矿物为浅灰色或无色, 玻璃光泽, 中粗晶结构, 粒状, 味微咸(图 3b)。因采集位置在 300m 左右, 埋藏较浅, 含无水芒硝地层所受地层上覆压力及地温梯度的影响均较小, 且从肉眼和显微镜下观

察无水芒硝结晶均很好, 镜下可观察到大多数包裹体呈双锥状或板状的规则形态, 这表明其很可能是湖水蒸发过程中形成的原生矿物, 而非后期改造形成的次生矿物(刘兴起等, 2007)。

4 无水芒硝流体包裹体与均一温度特征

4.1 流体包裹体特征

镜下观察发现, 无水芒硝晶体中流体包裹体较为发育, 主要有单一液相包裹体(图 3e)、气液两相包裹体(图 3f)和少量含子矿物的多相包裹体(图 3g)。大多数包裹体呈双锥状或板状, 这与无水芒硝的晶形相吻合。流体包裹体群一般沿晶体生长带分布(图 3h)或沿晶面呈片状分布(图 3e)或单独无序分布(图 3i), 也可见条带状分布(图 3j, 3k)。流体包裹体的形态和分布均显示出了其原生特征(Roedder, 1984; Lowenstein, 1985; Handford, 1990; Zambito et al., 2013;), 其中沿晶体生长带分布和单独无序分布的包裹体是原生包裹体的有力证据(卢焕章, 2014)。另可见一些愈合裂隙生长的次生或假次生流体包裹体(图 3l)。

4.2 实验结果

本次测温共计 14 个样品, 174 个流体包裹体, 得到有效数据 170 个, 其中 4 个包裹体可能在后期遭受过变形、泄漏等破坏了包裹体的原生性, 其所测得的数据与其他包裹体相比明显异常, 故不作为有效数据统计。

流体包裹体均一温度分布范围为 17.6~38.5℃, 均值 27.2℃, 中值 28.8℃(表 1), 其中样品 1 共得到 16 个流体包裹体均一温度, 范围 28.4~30.6℃, 均值 29.5℃, 中值 29.4℃; 样品 2 共 20 个数据, 范围 28.8~30.6℃, 均值 29.9℃, 中值 30.0℃; 样品 3 共 18 个数据, 范围 28.2~31.1℃, 均值 29.5℃, 中值 29.4℃; 样品 4 共 9 个数据, 范围 26.5~26.9℃, 均值 26.7℃, 中值 26.6℃; 样品 5 共 9 个数据, 范围 26.4~36.3℃, 均值 31.1℃, 中值 33.2℃; 样品 6 共 21 个数据, 范围 29.2~25.9℃, 主要集中在 24~26℃, 均值 24.1℃, 中值 24.9℃; 样品 7 共 7 个数据, 范围 20.2~31.5℃, 主要集中在 20~21℃, 均值 22.7℃, 中值 20.8℃; 样品 8 共 11 个数据, 范围 26.1~34.1℃, 均值 29.7℃, 主要集中在 29~30℃, 中值 29.4℃; 样品 9 共 8 个数据, 范围 19.4~31.7℃, 均值 22.7℃, 中值 21.5℃; 样品 10 共 6 个数据, 范围 17.6~25.6℃, 均值

20.9℃, 中值 20.0℃; 样品 11 共 6 个数据, 范围 23.5~29.6℃, 均值 25.9℃, 中值 25.5℃; 样品 12 共 21 个数据, 范围 24.9~29.7℃, 主要集中在 28~30℃, 均值 28.4℃, 中值 28.9℃; 样品 13 共 5 个数据, 范围 19.3~34.7℃, 均值 26.0℃, 中值 23.1℃; 样品 14 共 11 个数据, 范围 30.2~38.5℃, 均值 34.0℃, 中值 33.5℃。前人研究认为, 同一包裹体

表 1 江陵凹陷新沟嘴组下段地层无水芒硝包裹体均一温度
Table 1 Homogenization temperature date of primary fluid inclusions in thenardite of Xingouzui Formation in Jinangling Depression

样品 编号	有效数 据(个)	均一温度(℃)			
		范围	温差	均值	中值
1	16	28.4~30.6	2.2	29.5	29.4
2	18	28.8~30.6	1.8	29.9	30.0
3	20	28.2~31.1	2.9	29.5	29.4
4	9	26.5~26.9	0.4	26.7	26.6
5	9	26.4~36.3	9.9	31.1	33.2
6	21	19.2~25.9	6.7	24.1	24.9
7	7	20.2~31.5	11.3	22.7	20.8
8	11	26.1~34.1	8.0	29.7	29.4
9	8	19.4~31.1	11.7	22.7	21.5
10	6	17.6~25.6	8.0	20.9	20.0
11	8	23.5~29.6	6.1	25.9	25.5
12	21	24.9~29.7	4.8	28.4	28.9
13	5	19.3~34.7	15.4	26.0	23.1
14	11	30.2~38.5	8.3	34.0	33.5
合计	170	17.6~38.5	20.9	27.2	28.8

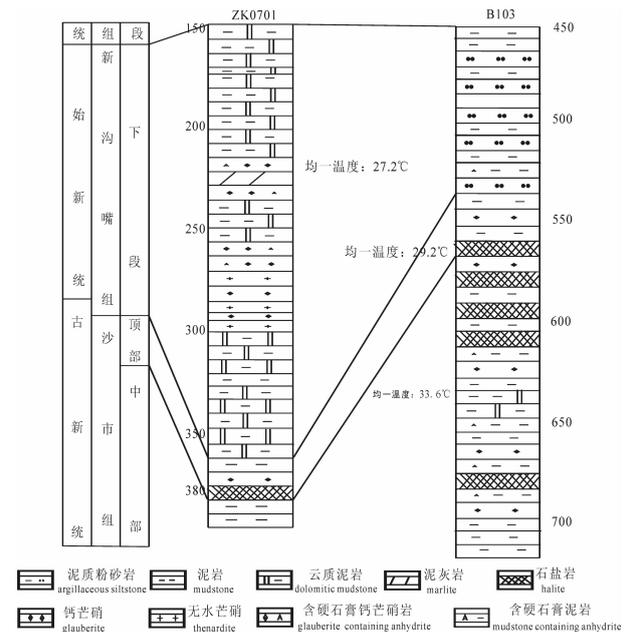


图 4 江陵凹陷新沟嘴组下段地层对比和均一温度分布
Fig. 4 Correlations of strata and distribution of homogenization temperature of primary fluid inclusions of Xingouzui Formation in Jinangling Depression

带中所测得的均一温度范围 90% 以上不超过 10~15℃, 则可以认为数据是有效的 (Goldstein et al., 1994), 而本次实验所选用的 14 个样品均一温度范围大都不超过 10℃, 这也证明了用于测温的流体包裹体的原生性。14 个样品的均一温度分布见图 4, 可见大多数样品均一温度均有明显峰值, 且各样品均一温度的均值和中值都十分接近。

5 讨论

无水芒硝作为常见的盐类矿物, 以往对其包裹体的研究却较少见。本文以无水芒硝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并取得了一些成果, 这对于流体包裹体在盐类矿物中的研究是一个很好的补充, 此外对于研究原、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 ZK0701 井所取岩心, 发现含无水芒硝地层水平层理发育, 无水芒硝呈层状并与围岩产状一致, 具明显同生特征。无水芒硝晶体透明, 较洁净, 含少量粘土粉砂, 可能是在浅水至半深水的卤水中结晶生长的结果。

本次测温所用样品来自江陵凹陷早始新世新沟嘴组下段, 距今约 51Ma, 恰好在古新世—始新世的

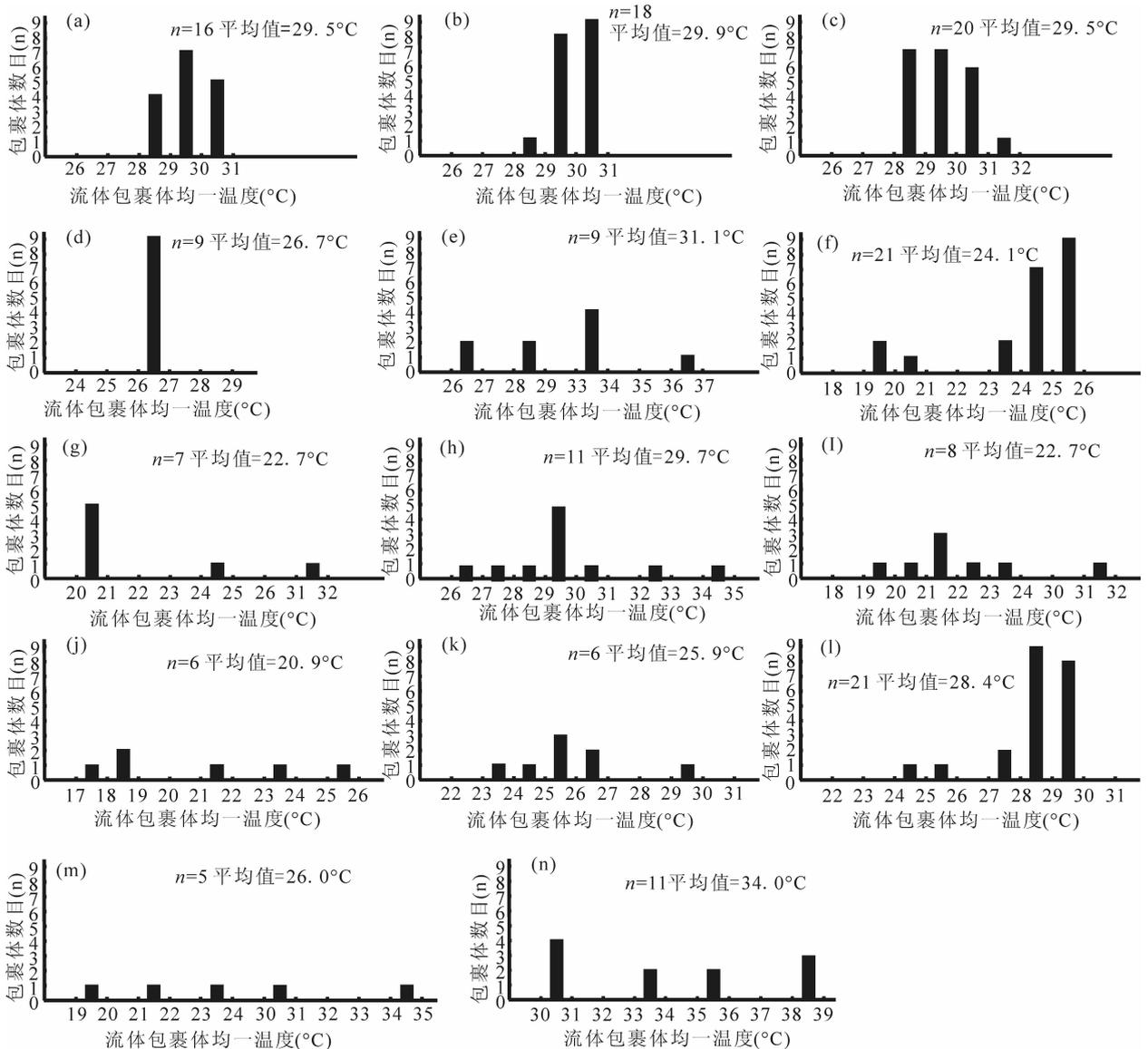


图 5 江陵凹陷新沟嘴组下段地层无水芒硝包裹体均一温度分布图

Fig. 5 Histograms of homogenization temperature of primary fluid inclusions in thenardite of Xingouzui Formation in Jinangling Depression

升温期之后,即 PETM 极热事件之后。PETM (Paleocene-Eocene Thermal Maximum) 极热事件是指全球深海、高纬地区和陆地温度在古新世一始新世界线附近(约 55 Ma)不到 10ka 的时间内升高 4~8℃(Zachos et al., 2001),局部地区海水表层温度可达 33℃,且目前普遍运用的古气候模型所建立的拟合温度很可能比实际气温还要低(江湮等, 2012;陆钧等, 2006)。另据王春连等(2013b)对江陵凹陷古新统沙市组上段各石盐样品包裹体均一温度的研究,发现地层自下而上气温有明显降低的趋势:中、下部石盐层包裹体的均一温度均值为 33.6℃,而盐层顶部包裹体的均一温度为 29.2℃。本次测温的无水芒硝样品来自沙市组上覆新沟嘴组下段,其流体包裹体均一温度均值为 27.2℃,小于盐层顶部包裹体的均一温度 29.2℃,这与气温自下而上降低的趋势相吻合,江陵凹陷自沙市组上段到新沟嘴组下段气温持续下降(图 4),表明江陵凹陷自新沟嘴底部已进入 PETM 事件后的缓慢降温期。本次测温所得流体包裹体均一温度可以代表当时的古气温。

6 结论

本次测温选用暖性矿物的代表性矿物无水芒硝,参考前人测温方法并加以改进,共测得 170 个流体包裹体均一温度,其范围在 17.6~38.5℃之间,均值 27.2℃,中值 28.8℃,说明当时古盐湖水的温度较高。江陵凹陷早始新世新沟嘴组下段,距今约 51Ma,根据前人对江陵凹陷古气温的研究与本文测温数据比对,发现江陵凹陷古气温自沙市组上段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。流体包裹体测温显示江陵凹陷早始新世新沟嘴组下段沉积期的古气温在 27.2℃左右,极端温度可达 38℃以上,反映了当时炎热干旱的气候特征。

致谢:野外样品采集得到中国地质大学(北京)张林兵硕士,锦辉(荆州)精细化工有限公司孙鹏工程师,湖南省湘澧盐化有限责任公司杨勇工程师的支持和帮助,钻井岩心也由该公司提供;在本论文的试验和撰写工作中,中国地质科学院矿产资源研究所赵艳军助理研究员在流体包裹体均一温度研究方面给予了悉心指导,汪明泉硕士在实验方法、论文撰写方面提供了很多帮助,在此一并致谢!

参 考 文 献

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. 岩石学报, 24(9): 1945~1953.
- 江湮,贾建忠,邓丽君,万晓樵. 2012. 古近纪重大气候事件及其生物响应. 地质科技情报, 31(3): 31~38.
- 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. 岩石学报, 23(9): 2063~2068.
- 刘成林,陈永志,陈伟十,焦鹏程,王弭力,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. 矿物学报, 26(1): 93~98.
- 刘成林,焦鹏程,陈永志,王弭力. 2008. 罗布泊盐湖晚更新世末期芒硝岩沉积及其古气候意义. 地球学报, 29(4): 397~404.
- 刘成林. 2013. 大陆裂谷盆地钾盐矿床特征与成矿作用. 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. 地球科学进展, 20(8): 856~862.
- 刘兴起,王永波,沈吉,王苏民,杨波. 2007. 16000 a 以来青海茶卡盐湖的演化过程及其对气候的响应. 地质学报, 81(6): 843~849.
- 卢焕章. 2014. 流体包裹体岩相学的一些问题探讨. 高校地质学报, 20(2): 177~184.
- 卢焕章,郭迪江. 2000. 流体包裹体研究的进展和方向. 地质评论, 46(4): 385~392.
- 陆钧,陈木宏. 2006. 新生代主要全球气候事件研究进展. 热带海洋学报, 25(6): 72~79.
- 孟凡巍,倪培,葛晨东,王天刚,王国光,刘吉强,赵超. 2011. 实验室合成石盐包裹体的均一温度以及古气候意义. 岩石学报, 27(05): 1543~1547.
- 沈立建,刘成林,徐海明,王春连,王立成,刘宝坤,张林兵. 2014. 江陵凹陷古新统盐类矿物沉积特征及其成钾指示意义. 矿床地质, 33(5): 1020~1030.
- 王春连,刘成林,胡海兵,毛劲松,沈立建,赵海彤. 2012. 江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义. 古地理学报, 14(2): 165~175.
- 王春连,刘成林,徐海明,王立成,沈立建. 2013a. 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. 吉林大学学报, 43(3): 691~703.
- 王春连. 2013. 江陵裂谷凹陷古近纪成钾环境及其钾盐富集机理. 北京:中国地质科学院.
- 王春连,刘成林,徐海明,王立成,张林兵. 2013b. 江陵凹陷沙市组上段石盐包裹体测温学研究. 岩石矿物学杂志, 32(3): 383~392.
- 王典敷,汪仕忠. 1998. 盐湖油气地质. 北京:石油工业出版社: 1~35.
- 杨长清,陈孔全,程志强,詹海军. 2003. 江陵凹陷形成演化与勘探潜力. 天然气工业, 23(6): 51~54.
- 余小灿,王春连,刘成林,张招崇,徐海明,谢腾骁. 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. 矿床地质, 33(5): 1057~1068.
- 郑绵平,赵元艺,刘俊英. 1998. 第四纪盐湖沉积与古气候. 第四纪研究, (4): 297~307.
- 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. 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. 地

- 球科学,39(10):1455~1463.
- Benison K C and Goldstein R H. 1999. Permian paleoclimate data from fluid inclusions in halite. *Chemical Geology*, 154(1-4): 113~132.
- Goldstein R H and Reynolds T J. 1994. Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals. Tulsa; SEPM short Course, 31:1~199.
- Liu X Q, Ni P, Dong H L and Wang T G. 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
- Losey A B and Benison K C. 2000. Silurian paleoclimate data from fluid inclusions in the salina group halite, michiganbasin. *Carbonates and Evaporites*, 15(1):28~36.
- Handford C R. 1990. Halite depositional facies in a solar salt pond : A key to interpret physical energy and water depth in ancient deposits ?. *Geology*, 18:691~694.
- Lowenstein T K, Li J R and Brown C B. 1998. Paleotemperatures from fluid inclusions in halite: method verification and a 100,000 year paleotemperature record, Death Valley, CA. *Chemical Geology*, 150:223~245.
- Lowenstein T K. 1985. Criteria for the recognition of salt-pan evaporates. *sedimentology*, 32:627~644.
- Krüger Y, García-Ruiz J M, Canals À, Martí 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. *Geology*, 41(2):119~122.
- Meng F W, Ni P, Schiffbauer J D, Yuan X L, Zhou C M, Wang Y G and Xia M L. 2011. Ediacaran seawater temperature: Evidence from inclusions of Sinian halite. *Precambrian Research*, 184:63-69.
- Meng F W, Ni P, Yuan X L, Zhou C M, Yang C H and Li Y P. 2013. Choosing the best ancient analogue for projected future temperatures: A case using data from fluid inclusions of middle-late Eocene halites. *Asian Earth Science*, 67-68: 46~50.
- Meng F W, Galamay A R, Ni P, Yang C H, Li Y P, Zhuo Q G. 2014. The major composition of a middle-late Eocene salt lake in the Yunying depression of Jiangnan Basin of Middle China based on analyses of fluid inclusions in halite. *Journal of Asian Earth Sciences*, 85:97~105.
- Robert S M and Spence R J. 1995. Paleotemperatures preserved in fluid inclusions in halite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19):3929~3942.
- Roberts S M, Spencer R J, Yang W B and Krouse H R. 1997. Deciphering some unique paleotemperature indicators in halite-bearing saline lake deposits from Death Valley, California, USA. *Journal of Paleolimnology*, 17: 101-130.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions. *Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy*, 12:1~644.
- Roedder E. 1984. The fluids in salt. *American Mineralogist*, 69(5~6):413~439.
- Satterfield C I, Lowenstein T K, Vreeland R H and Rosenzweig W D. 2005. Paleobrine Temperatures, Chemistries and Paleoenvironments of Silurian Salina Formation F-1 Salt, Michigan Basin, U. S. A from petrography and fluid inclusions in halite. *journal of sedimentary research*, 75(4):534~546.
- Zachos J C, Pagani M and Sloan L. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *science*, 292:686~693.
- Zambito J J and Benison K C. 2013. Extremely high temperatures and paleoclimate trends recorded in Permian ephemeral lake halite. *Geology*, 41(5):587~590.
- Zhao Y J, Zhang H, Liu C L, Liu B K, Ma L C, W L C. 2014. Late Eocene to early Oligocene quantitative paleotemperature record: evidence from inclusions of continental halite. *Scientific Reports*, 4:5776.

Paleotemperatures of Early Eocene in the Jinangling Depression: Evidence from Fluid Inclusions in Thenardite

LI Haonan¹⁾, WANG Chunlian²⁾, LIU Chenglin²⁾, YANG Shengu¹⁾, XU Haiming²⁾,
HU Haibing³⁾, YU Xiaocan⁴⁾, LIU Jinlei¹⁾

1) *Academy of Geological Science, Yangtze University, Wuhan, 430100*; 2) *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*;

3) *Xiangtan Salt LLC, Hunan, 415400*; 4) *School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083*

Abstract

Shashi Formation and the lower section of Xingouzui Formation in the Jinangling Depression deposited a thick rock series of salt. The homogenization temperatures of primary fluid inclusions in thenardite from the lower section of Xingouzui Formation of Early Eocene were measured by freezing method. The samples were placed in a freezer at -18°C for one or two weeks. This temperature was not cold enough to freeze the fluid inclusions. Once removing the sample in a Linkam THMS600 heating/freezing stage when we observed the fluid inclusions in a sample produced vapor bubbles. Then the sample was slowly heated until the bubbles disappeared. The current temperature was the homogenization temperature. Temperature results show that the homogenization temperature range is $17.6 \sim 38.5^{\circ}\text{C}$, with the average of 27.2°C . This maybe show that, the paleotemperature of lower section of Xingouzui Formation in Jinangling Depression of Early Eocene was around 27.2°C . In extreme cases, the paleotemperature can reach 38.5°C . By comparison with previous studies, we found a significant cooling trend from the upper section of Shashi Formation to the the lower section of Xingouzui Formation in the Jinangling Depression. However, due to PETM (Paleocene-Eocene Thermal Maximum) events, global temperatures were generally higher at that time. It can be concluded that although the lower section of the Xingouzui Formation entered the cooling period after the PETM event, the climate was still parched.

Key words: thenardite; primary fluid inclusions; homogenization temperature; the freezing method; paleotemperature; Early Eocene; Jiangling Depression