

# 江陵凹陷沙市组上段石盐包裹体测温学研究

王春连<sup>1</sup>, 刘成林<sup>1</sup>, 徐海明<sup>1</sup>, 王立成<sup>1</sup>, 张林兵<sup>2</sup>

- (1. 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;  
2. 中国地质大学 地球科学与资源学院 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 对江陵凹陷古新统沙市组盐湖沉积中的石盐进行了包裹体显微测温 and 氢氧同位素测定。测试结果显示, 江陵凹陷沙市组上段石盐包裹体均一温度范围为 18~50℃, 主要集中在 22~38℃; 包裹体  $\delta^{18}\text{O}$  同位素值变化范围为 -1.2‰~9.7‰, 均值 5.1‰;  $\delta\text{D}$  同位素值变化范围为 -91.5‰~-63.5‰, 均值 -79.4‰。这与当时整体热的古气候特点相吻合。同层石盐层的中下部包裹体的均一温度和氢氧同位素值均偏高, 上部包裹体的均一温度和氢氧同位素值均偏低。这一认识对研究盐湖演化阶段、石盐成因以及预测钾盐成矿的地质时代和层位都有极为重要的意义。

**关键词:** 江陵凹陷, 石盐包裹体, 均一温度, 氢氧同位素, 古水温, 盐湖演化

中图分类号: P611.2<sup>+</sup>2; P611.4<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)03-0383-10

## Homogenization temperature study of salt inclusions from the upper section of Shashi Formation in Jiangling depression

WANG Chun-lian<sup>1</sup>, LIU Cheng-lin<sup>1</sup>, XU Hai-ming<sup>1</sup>, WANG Li-cheng<sup>1</sup> and ZHANG Lin-bing<sup>2</sup>

- (1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;  
2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Owing to Yanshanian and Himalayan movement, a series of downfaulted basins were formed in late Cretaceous-Paleogene, when Paleocene halite of salt lake deposition was formed in Shashi Formation of Jiangling depression. Homogenization temperatures of the inclusions in Paleocene halite of Jiangling depression vary from 18 to 50°C, mainly in the range of 22~38°C; the  $\delta^{18}\text{O}$  values of the inclusion are between -1.2‰ and 9.7‰, with an average of 5.1‰; the  $\delta\text{D}$  values vary from -91.5‰ to -63.5‰, -79.4‰ on average. These data are consistent with the thermal features of paleoclimate in that period. However, the homogenization temperatures of inclusions and the H-O isotope values are relatively high in the middle-lower halite layer and relatively low at the top of the same halite layer. This understanding of paleoclimate has important significance for the study of the evolutionary phase of salt lake, the halite origin and the prediction of geological stages and strata of potash salts.

**Key words:** Jiangling depression; halite inclusion; homogenization temperature; H-O isotope; paleotemperature; salt lake evolution

收稿日期: 2013-01-12; 修订日期: 2013-03-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403000); 中国地质调查局计划项目(1212010011808); 国家自然科学基金青年基金资助项目(41202059)

作者简介: 王春连(1983-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: wangchunlian312@yahoo.com.cn; 通讯作者: 刘成林(1963-), 男, 研究员, E-mail: liuchengl@263.net

古气候温度变化是研究全球气候变化的重要内容,目前恢复古气温变化主要采用古生物学和地球化学研究等间接方法,包括孢粉组合、沉积粘土矿物和海相微体化石等(Zachos *et al.*, 2001; 董国榜等, 2002; 李双建等, 2006; 胡作维等, 2008)。然而,仅仅通过这些研究难以得到精确的温度变化资料(孟凡巍等, 2011a)。原生流体包裹体是在晶体形成过程中捕获于晶体晶格缺陷中的显微流体样品,它可以反映晶体赖以生长的母液的 PVTX 性质(Roedder, 1963)。蒸发岩矿物中的流体包裹体,尤其是石盐中的流体包裹体,所捕获的液体和气体中的成分,可以保存地质时期古环境的水圈、大气圈甚至生物圈的信息(Petrichenko, 1979; Knauth and Beeunas, 1986; Goldstein and Barker, 1990; Benison and Goldstein, 1999; Goldstein, 2001; Siemann and Ellendorf, 2001; Petrichenko *et al.*, 2005)。蒸发岩系主要矿物中的石盐形成于表生环境,在各个地质时代都广泛分布(袁见齐等, 1991; 杨吉根, 1994; 魏东岩, 1999; 张芳等, 2001; 王弼力等, 2001; 刘成林, 2003; 刘成林等, 2005, 2009, 2010, 2012; 孟凡巍等, 2011b, 2012)。石盐中原生流体包裹体由于形成于表生环境,其均一温度不必进行压力校正就可以反映包裹体形成期间卤水蒸发结晶时候的水温,因此成为古气候研究的热点(Roberts and Spencer, 1995; Lowenstein *et al.*, 1998, 2001; Benison and Goldstein, 1999; Satterfield *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007; 葛晨东等, 2007; Meng *et al.*, 2013)。

在海水/湖水蒸发过程中析出的石盐矿物形成于气水界面附近,因此,石盐中捕获的流体包裹体的成分会随着捕获位置的微小差异而有所不同。在气水界面以下捕获的包裹体为纯液相包裹体,这些流体包裹体沿石盐解理分布,流体的成分为蒸发过程中不同阶段的海水/湖水。而在接近气水界面的位置,除了捕获海水/湖水之外,还常常捕获大气,形成气液两相包裹体(葛晨东等, 2007)。对于这种气液两相包裹体而言,由于包裹体的捕获方式为非均一捕获,因此,其均一温度变化范围很大,测温结果往往过高,不具有地质意义(Roberts *et al.*, 1995)。

长期以来,国内学者一直在探索利用石盐中的流体包裹体研究现代盐湖,并开展了显微测温学工作(袁见齐等, 1991; 杨吉根, 1994; 张芳等, 2001; 刘成林等, 2006),但由于选择的流体包裹体多为非均一方式捕获的气液两相包裹体,所测定的均一温

度在 30~100℃ 之间(Dreyer *et al.*, 1949; Dellwig, 1955; McCulloch, 1959; Roedder and Belkin, 1979; Roedder, 1984),变化范围很大,显然不能代表石盐的沉积温度。另一个导致测定温度偏高的原因是石盐埋藏在地下几百米,会发生塑性流动,晶体随之发生变形和重结晶,原生的包裹体和基质也会产生物质交流,导致石盐包裹体测温结果不准确。

江陵凹陷位于江汉盆地西部,在古新统沙市组上段出现大量的石盐沉积,并在泥岩裂隙、砂岩和火山岩中储存了大量的富钾卤水资源,富钾卤水的成因问题受到了钾盐专家的关注。富钾卤水的成因受多种因素影响,尤其与古气候条件有密切联系(刘成林等, 2006, 2007; Liu *et al.*, 2006)。为了准确获得石盐沉积时的古水温资料,本文采用了国际通行的研究方法(Roberts and Belkin, 1995; Lowenstein *et al.*, 1998; Benison and Goldstein, 1999; Satterfield *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007; 葛晨东等, 2007),对江陵凹陷古新统沙市组上段石盐中的原生单相流体包裹体,进行了详细的冷冻和显微测温实验及氢氧同位素测试工作,欲通过对石盐中流体包裹体的均一温度和氢氧同位素组成的讨论,来预测江陵凹陷钾盐沉积的时代与层位。

## 1 地质背景

我国白垩纪晚期—古近纪,由于燕山运动和喜马拉雅运动,形成了一系列的断陷盆地。在东部的秦岭—大别山以南形成了江汉、苏北等盆地,并出现了大量的石盐沉积(袁见齐, 1991; 魏东岩, 1999)。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世—古近纪断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)。江陵凹陷古新统由沙市组和新沟嘴组下段底部组成(表 1)。沙市组上段沉积为一套含盐岩系,盐岩层异常发育,最厚的单层盐岩达 66 m,盐层累计厚度约达 240 m。根据沙市组晚期典型暖相盐类矿物原生钙芒硝层发育广泛和  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  的比值特征,可以推断

表 1 江陵凹陷古近系地层简表 据柯小平等(2009)修改]

Table 1 Paleogene stratigraphy of Jiangling depression (modified after Ke Xiaoping et al., 2009)

地层				厚度 (m)	剖面	颜色	地层简表	沉积相			构造旋回	水体 盐度	代表井
系	统	组	段					河流	滨浅湖	深盐湖			
第四系	平原组			25-150		杂色	杂色砾石层、灰色粘土层。凹陷内普遍存在				披盖		江深五井
新近系	中新统	广华寺组		300		黄灰、灰白色	由砂砾岩、粘土岩组成韵律层，属河流、冲积平原相沉积。与下伏地层呈平行不整合接触。				拗陷		江深九井
				600		灰绿色、绿色	泥岩、粉砂岩夹灰岩、油页岩，属浅湖相沉积，普遍剥蚀，只在江口、梅槐桥、资福寺等洼地保存。						
古近系	渐新统	荆河镇组	潜一段	500		深灰—灰黑色	以灰绿、灰—深灰色泥岩为主，夹油页岩、薄层泥灰岩、粉砂岩及玄武岩，潜二、三段油页岩发育，属深湖、半深湖相沉积，部分地区顶部底遭受剥蚀，在清水口、资福寺等洼地沉积厚度逾千米。				断陷		江深五井
			潜二段			棕红、紫红色	以棕红、紫红色泥岩为主，夹粉砂岩、玄武岩。下部部分泥岩含硬石膏，往上减少。属冲积平原相沉积，厚度和岩性变化大，江口、资福寺等洼地较发育。						陵七五井
			潜三段			棕红、灰紫色	分上、下段。上段为棕红、灰紫色泥岩夹粉砂岩、玄武岩，部分泥岩含硬石膏；下段为砂岩互层，泥岩以灰色为主，部分含硬石膏。属三角洲、浅湖—半深湖相，沉积稳定，梅槐桥洼地最后逾千米。						沙十八井
			潜四段			灰黑、深紫色	为一套深灰、灰黑色和棕紫色、含膏泥岩、钙芒硝岩、盐岩夹薄层粉砂岩和玄武岩的浅湖—半深湖、盐湖相沉积。沉积不稳定，岩性和厚度变化大。下部在资福寺、清水口、裁缝店等洼地以出现紫色泥岩和大量硬石膏、钙芒硝及盐岩为特征，而上部在凹陷西南盐井—申津渡洼地发育上百米的硬石膏岩、钙芒硝岩和盐岩。						B 103 井
中始新统	荆沙组		600		棕红、紫红色	棕红、紫红色泥岩为主，夹粉砂岩、玄武岩。下部部分泥岩含硬石膏，往上减少。属冲积平原相沉积，厚度和岩性变化大，江口、资福寺等洼地较发育。				断陷		江深五井	
		1200		棕红、紫红色	棕红、紫红色泥岩为主，夹粉砂岩、玄武岩。下部部分泥岩含硬石膏，往上减少。属冲积平原相沉积，厚度和岩性变化大，江口、资福寺等洼地较发育。						陵七五井		
下始新统	新沟嘴组	上段	200		棕红、灰紫色	棕红、灰紫色泥岩为主，夹粉砂岩、玄武岩，部分泥岩含硬石膏；下段为砂岩互层，泥岩以灰色为主，部分含硬石膏。属三角洲、浅湖—半深湖相，沉积稳定，梅槐桥洼地最后逾千米。				拗陷		陵七五井	
		300		灰、深棕色	棕红、灰紫色泥岩为主，夹粉砂岩、玄武岩，部分泥岩含硬石膏；下段为砂岩互层，泥岩以灰色为主，部分含硬石膏。属三角洲、浅湖—半深湖相，沉积稳定，梅槐桥洼地最后逾千米。						沙十八井		
古新统	沙市组	四段	150		灰黑、深紫色	为一套深灰、灰黑色和棕紫色、含膏泥岩、钙芒硝岩、盐岩夹薄层粉砂岩和玄武岩的浅湖—半深湖、盐湖相沉积。沉积不稳定，岩性和厚度变化大。下部在资福寺、清水口、裁缝店等洼地以出现紫色泥岩和大量硬石膏、钙芒硝及盐岩为特征，而上部在凹陷西南盐井—申津渡洼地发育上百米的硬石膏岩、钙芒硝岩和盐岩。				断陷		B 103 井	
		三段			深灰、棕紫色	为一套深灰、灰黑色和棕紫色、含膏泥岩、钙芒硝岩、盐岩夹薄层粉砂岩和玄武岩的浅湖—半深湖、盐湖相沉积。沉积不稳定，岩性和厚度变化大。下部在资福寺、清水口、裁缝店等洼地以出现紫色泥岩和大量硬石膏、钙芒硝及盐岩为特征，而上部在凹陷西南盐井—申津渡洼地发育上百米的硬石膏岩、钙芒硝岩和盐岩。							
		二段			深灰、棕紫色	为一套深灰、灰黑色和棕紫色、含膏泥岩、钙芒硝岩、盐岩夹薄层粉砂岩和玄武岩的浅湖—半深湖、盐湖相沉积。沉积不稳定，岩性和厚度变化大。下部在资福寺、清水口、裁缝店等洼地以出现紫色泥岩和大量硬石膏、钙芒硝及盐岩为特征，而上部在凹陷西南盐井—申津渡洼地发育上百米的硬石膏岩、钙芒硝岩和盐岩。							
		一段			深灰、棕紫色	为一套深灰、灰黑色和棕紫色、含膏泥岩、钙芒硝岩、盐岩夹薄层粉砂岩和玄武岩的浅湖—半深湖、盐湖相沉积。沉积不稳定，岩性和厚度变化大。下部在资福寺、清水口、裁缝店等洼地以出现紫色泥岩和大量硬石膏、钙芒硝及盐岩为特征，而上部在凹陷西南盐井—申津渡洼地发育上百米的硬石膏岩、钙芒硝岩和盐岩。							
白垩系	上统	渔洋组	1000		红棕、灰色	棕红、棕紫色泥岩、粉砂岩、细—中砂岩夹石膏质、白云质砂岩，河流、滨浅湖相沉积，厚度变化大，江口洼陷最厚达 2000 米。				断陷		鄂深十一井	
		罗镜组	2500		杂色	杂色块状砂砾岩，洪积相沉积。						鄂深十二井	
前白垩系													

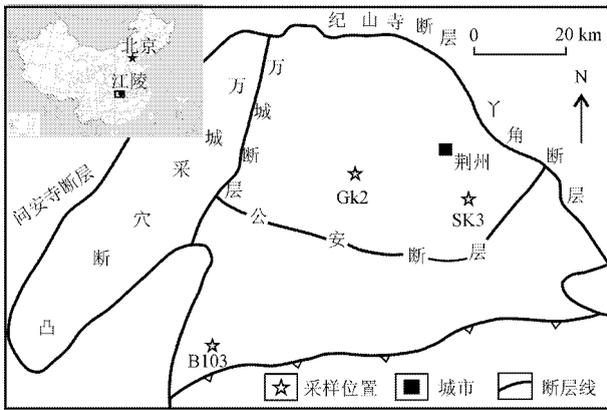


图 1 江陵盐盆构造单元分布图(杨长青等, 2003)

Fig. 1 Structural map of Jiangling salt basin (after Yang Changqing et al., 2003)

江汉盆地江陵凹陷在古新世沙市组沉积晚期出现的干旱古气候属于暖旱型气候(王春连等 2012)。江陵凹陷在古新统沙市组上段演变成以石盐为主、固液相并存(有富钾卤水形成)的综合性盐类矿床,主要盐类矿物为石盐、石膏、钙芒硝及碳酸盐岩等(王春连等 2012)。江陵凹陷盐湖为常年性较深水分层盐

湖,盐间段沉积环境大体可分为微咸水湖、半咸水湖、咸水湖和盐湖。

## 2 石盐钻孔样品的采集及测试方法

### 2.1 石盐样品的采集

样品取自江陵凹陷 3 个钻孔(GK2、SK3 和 B103)的岩芯(图 1、图 2)。采集样品时,为了防止石盐溶解或者重结晶,在钻取石盐岩芯时所使用的泥浆必须对石盐是饱和的,如果钻取的岩芯仍然可见一些原生的包裹体富集带,那么可以认为石盐在取样的过程中没有发生溶解或重结晶。更为重要的是在选择石盐做包裹体时,必须选择那些原生的石盐。原生石盐应该保持好完整的年韵律,未发生塑性变形和重结晶(图 3a、3b)。

### 2.2 石盐包裹体的均一温度测定

由于石盐溶解度较大,在磨制包裹体薄片时即使使用饱和石盐水,也会造成石盐的部分溶解或者石盐某些部分的重结晶;又由于石盐硬度较小,在磨制剖光时,石盐晶体很容易弯曲变形,因此,本次实

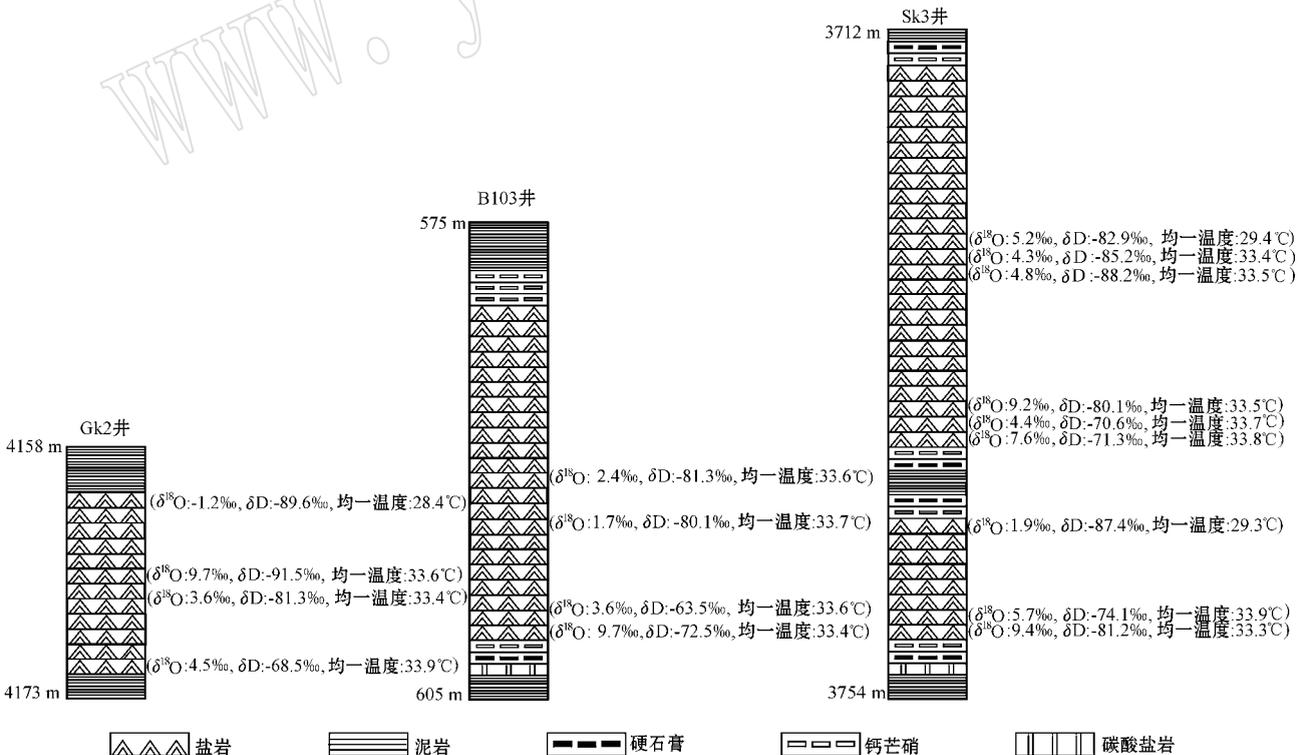


图 2 钻井柱状图和采样位置图

Fig. 2 Drilling columnar section and sampling sites

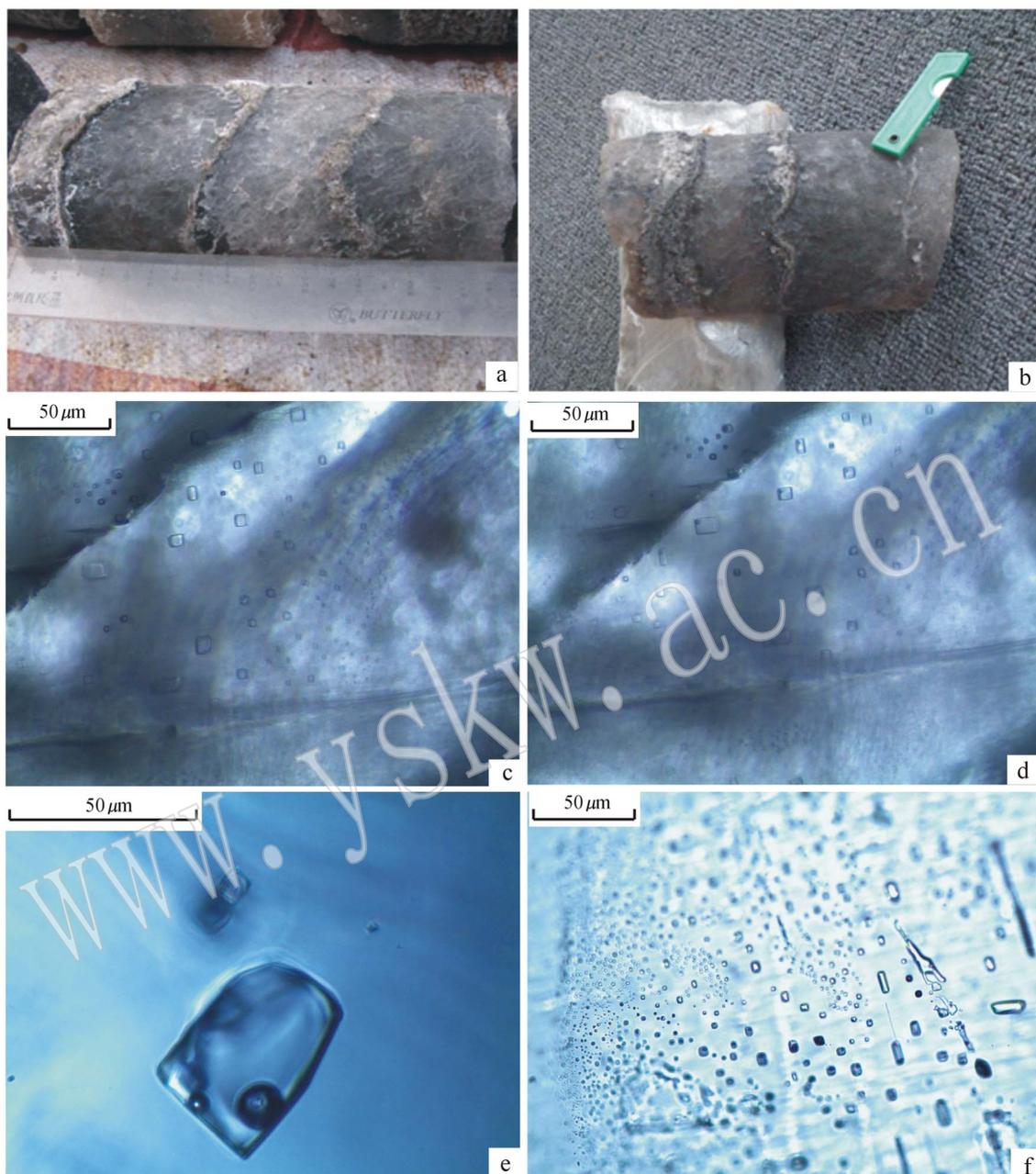


图 3 江陵凹陷古新统石盐的年韵律和石盐包裹体显微照片

Fig. 3 Annual rhythm of Paleocene halite and microphotograph of halite inclusions in Jiangling depression

a、b—原生石盐的年韵律，暗层形成于夏季和秋季有机质含量较高的时期，亮层形成于冬季和春季有机质含量较低的时期；c—冷冻前，石盐中的单液相流体包裹体；d—冷冻后，部分石盐中原来的单液相包裹体出现了气泡；e—固、液、气三相包裹体；f—一条带状、线状和串珠状排列的包裹体

a, b—annual rhythm of primary halite, the dark layer was formed in summer and autumn, when the organic content was relatively high; bright layer was formed in winter and spring, when the organic content was relatively low; c—single liquid phase inclusions of halite before freezing; d—bubble in some single liquid phase inclusions after freezing; e—solid, liquid and gas phase inclusions; f—stripped, linear and beaded inclusions

验将石盐样品沿解理面分成小的薄片。

实验选择单相原生流体包裹体进行冷冻，使原来单一液相的包裹体出现气泡(图 3c、3d)。因为盐

水包裹体一般较小，液体常处于亚稳定状态不太容易产生气泡，所以在较低的温度下进行冷冻，以加速气泡的产生。一般选择不低于  $-50^{\circ}\text{C}$  的温度进行冷

冻大约 1~2 h,一部分包裹体开始出现气泡。当有大量的包裹体出现气泡后,便开始测温工作。在加热过程中注意加热速率不能过快,采用分段加热的方法,在 15℃ 以下,升温速率为 0.5℃/min,在 15℃ 以上,升温速率为 0.1℃/min,直到均一,这样才能使测得的数据比较准确(Lowenstein *et al.*, 1998)。

由于石盐包裹体在升温的过程中极易与包裹体壁发生物质交换,因此在测温过程中要尽量避免反复升温和降温,最好保证一次成功。

温度测定使用英国产 LINKAM THMS600 型冷热台,采用液氮进行冷冻。冷热台的温度范围为 -196~600℃,精度: <0℃ 范围内,误差 ±0.2℃; 0℃~50℃ 区间,误差 ±0.5℃。测试单位为中国地质科学院矿产资源研究所。

### 2.3 石盐包裹体氢氧同位素的测定

选取原生石盐样品各若干,首先用无水乙醇冲洗至清洁,晒干,在显微镜下挑选纯净、特征明显而且包裹体数量多的分析样品 10 g,再用无水乙醇冲洗一遍,晒干,粉碎至毫米级后过筛(40~120 目)放置于干燥器中贮备待用。

氢氧同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,所用仪器为 Finnigan MAT253EM 型质谱仪。包裹体水的氢同位素分析采用爆裂法取水、锌法制氢,爆裂温度为 550℃。氢同位素分析精度为 ±2‰,分析结果均以 SMOW 为标准。氧同位素分析在制样装置达到 10<sup>-3</sup> Pa 真空条件下进行,不含氧矿物包裹体中的水与 BrF<sub>5</sub> 在 300℃ 恒温条件下反应 20 min 产生 O<sub>2</sub>,用冷冻法提纯 O<sub>2</sub>,并在铂催化剂的条件下,与石墨 700℃ 恒温反应生成并收集 CO<sub>2</sub>,用 MAT253 气体同位素质谱分析样品的 O 同位素组成。测量结果以 SMOW 为标准,记为 δ<sup>18</sup>O<sub>V-SMOW</sub>,分析精度优于 ±0.2‰。氧同位素参考标准为 GBW-04409、GBW-04410 石英标准,其 δ<sup>18</sup>O 分别是 11.11 ± 0.06‰ 和 -1.75 ± 0.08‰。

## 3 石盐包裹体特征

江陵凹陷沙市组上段石盐中包裹体类型以单一液相包裹体为主,有少量气液两相包裹体、气相包裹体及多相包裹体(图 3c、3d、3e、3f),形态呈长条弯管状、纺锤状、米粒状、浑圆状、菱形及不规则状等。单个包裹体大小变化很大,从 3 μm × 2 μm ~ 12 μm ×

10 μm 不等。包裹体群主要呈片状、条带状、线状和串珠状等展布或排列(图 3f),基本上沿着或平行结晶面生长。实验晶体中的单一相液体包裹体冷冻后一般都出现气相,气液比约为 5%,这使测定均一温度成为可能。

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 均一温度所指示的地质意义

江陵凹陷沙市组上段 3 个钻孔岩芯的石盐中单一液相流体包裹体冷冻后产生的气液两相包裹体均一温度测定结果见图 4。将图 4 测定的均一温度结果按石盐沉积阶段分开来统计:石盐沉积早、中期(石盐层中下部)测温统计结果见图 5,石盐沉积晚期(石盐层最顶部)测温统计结果见图 6。

单一液相包裹体的均一温度测试结果显示,江陵凹陷古新统沙市组上段各石盐样品包裹体均一温度分布范围为 18~50℃,均值为 31.8℃(图 4);中、下部石盐层包裹体的均一温度(均值 33.6℃)(图 5)高于石盐层的顶部包裹体的均一温度(29.2℃)(图 6),说明单层石盐沉积早、中期的总体气温比石盐沉积的晚期(石盐沉积趋于结束)总体气温要高。石盐沉积晚期,水体变淡或者水体被蒸干是石盐结束沉积的两种方式。而江陵凹陷沙市组上段石盐层顶部多为暗色泥岩层,表明盐湖水体当时是较深的,或者说水体没有被蒸发干涸。这就只有一种解释:淡水的补给使石盐浓度低于其结晶饱和度,石盐从水体中停止析出而开始碎屑岩沉积过程。

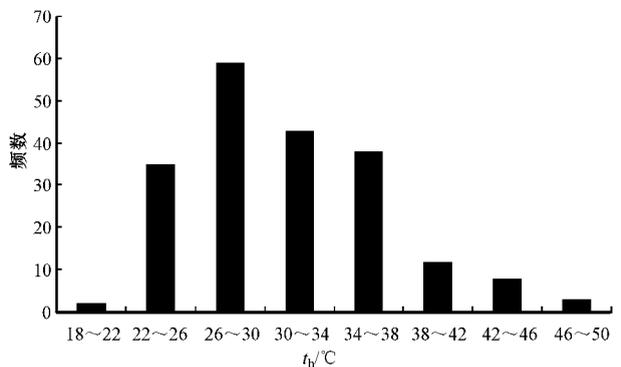


图 4 江陵凹陷古新统沙市组上段石盐包裹体均一温度直方图

Fig. 4 Homogenization temperature histogram of halite inclusions in the upper section of Paleocene Shashi Formation, Jiangling depression

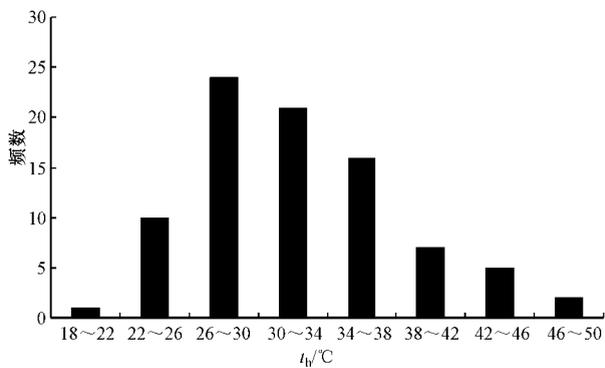


图 5 石盐层的中下部包裹体的均一温度分布图

Fig. 5 Homogenization temperature of halite inclusions in the middle-lower layer

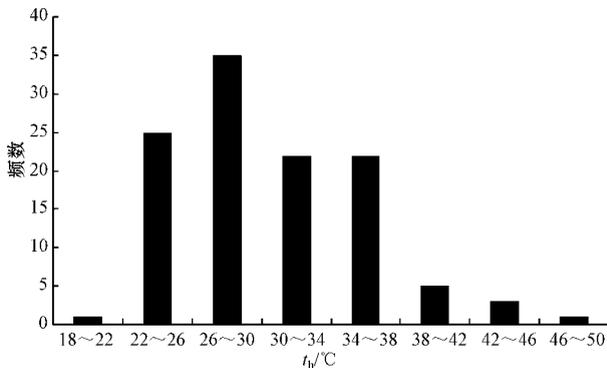


图 6 石盐层最顶部包裹体均一温度分布图

Fig. 6 Homogenization temperature of halite inclusions in the top layer

### 4.2 湖水温度与气温的关系

水温能否真实反映气温的高低呢？在经过对现代暂时性湖泊的研究发现之后，水温与气温有着良好的相关性。Roberts 和 Spencer(1995)在 Death Valley 的研究表明，气温与水温一般相差 5℃，即气温低于水温 5℃左右。而江陵凹陷古新统沙市组上段原生石盐包裹体平均均一温度为 31.8℃，据此可以得出当时的古气温在 26.8℃左右。这与王春连等(2012)根据沙市组晚期典型暖相盐类矿物原生钙芒硝层发育广泛和指示气候干旱程度的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO 比值等指标推断出的暖旱型气候是一致的。

### 4.3 氢氧同位素所指示的地质意义

江陵凹陷古新统沙市组上段包裹体氢氧同位素组成见表 2。由表 2 可知，包裹体 δ<sup>18</sup>O 同位素值变化范围为 -1.2‰~9.7‰，均值 5.1‰；δD 同位素值变化范围 -91.5‰~-63.5‰，均值 -79.4‰。氢氧同位素值位于全球大气降水线的右下方(图 7)，处于强烈蒸发的区段，这与当时的古气候整体具有热的特点是相吻合的。从图 7 中可以看出，氢氧同位素值的分布被分成 3 个区域：处于中间区域的样品来自石盐层下部；处于偏高区域的样品来自石盐层的中部；处于偏低区域的样品来自石盐层的顶部。这是由于水体里氢氧同位素的值是随着石盐的沉积逐渐增加的，到石盐沉积晚期，淡水的注入，使水体中同位素组成发生较大的变化。一般来说淡水的同位素值较小，混合后同位素值势必会减少。当然从均一温度也可以看出，石盐每次结束沉积时的古水温也是有所降低的。这种古水温的降低与区域气候变化有关，与全球气候事件并无关系。沙市组上段时期大部分时间湖水的蒸发量大于注入量，但在少

表 2 江陵古新统沙市组上段原生石盐包裹体氢氧同位素组成

Table 2 H-O isotope composition of halite inclusions in the upper section of Paleocene Shashi Formation in Jiangling depression

序号	编号	名称	在盐层中的位置	δ <sup>18</sup> O <sub>SMOW</sub> /‰	δD <sub>SMOW</sub> /‰
1	SK3-K8	原生石盐	中部	5.2	-82.9
2	SK3-K1	原生石盐	中部	4.3	-85.2
3	SK3-K3	原生石盐	中部	4.8	-88.2
4	SK3-K2	原生石盐	底部	9.2	-80.1
5	SK3-K9	原生石盐	底部	4.4	-70.6
6	SK3-K11	原生石盐	底部	7.6	-71.3
7	SK3-K19	原生石盐	顶部	1.9	-87.4
8	SK3-K21	原生石盐	底部	5.7	-74.1
9	SK3-K27	原生石盐	底部	9.4	-81.2
10	GK2-B98	原生石盐	顶部	-1.2	-89.6
11	GK2-B111	原生石盐	中部	9.7	-91.5
12	GK2-B119	原生石盐	中部	3.6	-81.3
13	GK2-B86	原生石盐	底部	4.5	-68.5
14	B103-T(2)18	原生石盐	中部	2.4	-81.3
15	B103-T(2)40	原生石盐	中部	1.7	-80.1
16	B103-T(2)41	原生石盐	底部	3.6	-63.5
17	B103-T(2)17	原生石盐	底部	9.7	-72.5
均值				5.1	-79.4

数时期蒸发量小于注入量，当石盐浓度小于溶解度时，就会停止析出，这种蒸发量变小的情形往往与气温降低是同时发生的。

## 5 结论

(1) 江陵凹陷古新统沙市组上段石盐包裹体均一温度范围为 18~50℃，主要集中在 22~38℃，说

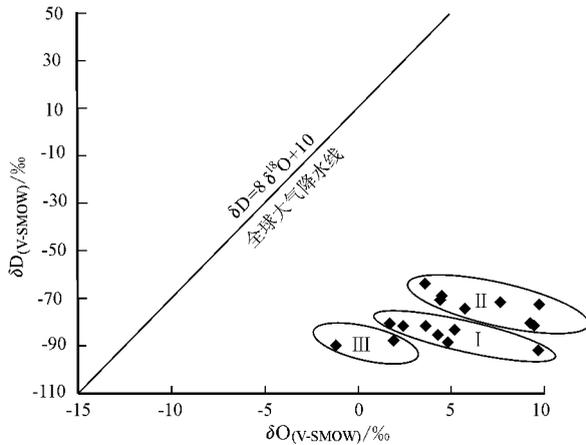


图 7 原生石盐包裹体早( I )中期( II )晚期( III )  
氢氧同位素组成关系图

Fig. 7 The relationship of H-O isotope composition between Early( I ), middle( II ) and late( III ) stage primary halite inclusions

明当时古盐湖水的温度较高,蒸发浓缩强烈。这一认识对研究盐湖演化阶段、石盐成因以及预测钾盐成矿的地质时代和层位都有极为重要的意义。

(2) 石盐包裹体氢氧同位素值位于全球大气降水线的右下方,处于强烈蒸发的区段。氢氧同位素数据说明随着石盐的沉积,水体里的氢氧同位素值是逐渐增加的,到石盐沉积晚期,淡水的注入,使水体中同位素值减小。

(3) 每层石盐沉积的结束是古水温降低和淡水的混入双重作用的结果,而不是水体被蒸干的原因。

**致谢** 本文采样过程中得到了原地矿部曲懿华教授的指导,野外地质工作期间得到了锦辉(荆州)精细化工有限公司的大力支持,中国地质科学院矿产资源研究所海洋与非金属室的赵艳军博士后在实验过程中给予了热情的指导和帮助,审稿专家给论文提出了许多建设性的意见,在此一并致谢!

## References

Benison K C and Goldstein R H. 1999. Permian paleoclimate date from fluid inclusions in halite [ J ]. *Chemical Geology*, 1954 : 113~132.  
Dellwig L F. 1955. Origin of the salina salt of Michigar [ J ]. *Journal of Sedimentary Research*, 25( 2 ) : 83~110.  
Dreyer R M, Garrels R M and Howland A L. 1949. Liquid inclusions in

halite as a guide of geologic thermometry [ J ]. *American Mineralogist*, 34 : 26~34.

Ge Chendong, Wang Tiangang, Liu Xingqi, *et al.* 2007. Paleoclimatic information recorded in fluid inclusions in halite from Chaka salt lake, Qinghai Province [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 23( 9 ) : 2 063~2 068 ( in Chinese with English abstract ).  
Goldstein R H. 2001. Clues from fluid inclusions [ J ]. *Science*, 294( 2 ) : 1 009~1 011.  
Goldstein R H and Barker C E. 1990. Fluid inclusion technique for determining maximum temperature in calcite and its comparison to the vitrinite reflectance geothermometer [ J ]. *Geology*, 18( 10 ) : 1 003~1 006.  
Hu Zuwei, Huang Sijing, Gao Xiaoyong, *et al.* 2008. Clay minerals in the clay beds near the Permian/Triassic boundary at Huaying Mountain, eastern Sichuan, China : their types and origin [ J ]. *Geological Bulletin of China*, 27( 3 ) : 374~379 ( in Chinese with English abstract ).  
Ke Xiaoping, Qin Jianxiong, Li Yusheng, *et al.* 2009. Characteristics and genesis of the inter-salt dolostones in the Jiangnan Basin [ J ]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 29( 3 ) : 1~8 ( in Chinese with English abstract ).  
Knauth L P and Beeunas M A. 1986. Isotope geochemistry of fluid inclusions in Permian halite with implications for the history of ocean water and the origin of saline formation water [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50 : 419~433.  
Li Shuangjian, Zhang Ran and Wang Qingchen. 2006. Implications of the color of sediments and clay minerals for Tertiary climatic changes of Kuqa depression [ J ]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24( 4 ) : 521~530 ( in Chinese with English abstract ).  
Liu Chenglin. 2003. Research and evaluation of potash resources in potassium mine of Lop Nor [ J ]. *Mineral Deposit*, 22( 3 ) : 286~286 ( in Chinese with English abstract ).  
Liu Chenglin, Chen Yongzhi, Chen Weishi, *et al.* 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 Chenglin, Chen Yongzhi, Jiao Pengcheng, *et al.* 2005. The research on the homogenous temperatures of inclusions in halite from the isothermal evaporation of brine and natural halite from Lop Nor Playa, Xinjiang, China [ J ]. *Journal of East China Institute of Technology*, 28( 4 ) : 306~312 ( in Chinese with English abstract ).  
Liu Chenglin, Jiao Pengcheng and Wang Mili. 2010. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China [ J ]. *Mineral Deposit*, 29( 4 ) : 581~592 ( in Chinese with English abstract ).  
Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili, *et al.* 2007. Sedimentation of glauberite and its effect on potash deposits formation in Lop Nur salt lake,

- Xinjiang, China [ J ]. *Mineral Deposit*, 26( 3 ): 322 ~ 329 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng, *et al.* 2006. Features and Formation Mechanism of Faults and Potash-forming Effect in the Lop Nur Salt Lake, Xinjiang, China [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 80( 6 ): 936 ~ 943.
- Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng, *et al.* 2009. The probing of regularity and controlling factors of potash deposits distribution in Lop Nur salt lake, Xinjiang [ J ]. *Acta Geoscientia Sinica*, 30( 6 ): 796 ~ 803 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu Xingqi, Ni Pei, Dong Hailiang, *et al.* 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.
- 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 [ J ]. *Chemical Geology*, 150: 223 ~ 245.
- Lowenstein T K, Timofeeff M N, Brennan S T, *et al.* 2001. Oscillations in Phanerozoic seawater chemistry: Evidence from fluid inclusions [ J ]. *Science*, 294: 1 086 ~ 1 088.
- Meng Fanwei, Liu Chenglin and Ni Pei. 2012. To forecast sylvite deposits using the chemistry of fluid inclusions in halite [ J ]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 29( 1 ): 62 ~ 69 ( in Chinese with English abstract ).
- Meng Fanwei, Ni Pei, Ge Chendong, *et al.* 2011a. Homogenization temperature of fluid inclusions in laboratory grown halite and its implication for paleotemperature reconstruction [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 27( 5 ): 1 543 ~ 1 547 ( in Chinese with English abstract ).
- Meng Fanwei, Ni Pei, Yan Xianqin, *et al.* 2011b. Chemical composition of the ancient lake at Jintan salt mine: Evidence from fluid inclusions in halite [ J ]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 28( 3 ): 324 ~ 328 ( in Chinese with English abstract ).
- Meng Fanwei, Ni Pei, Yuan Xunlai, *et al.* 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*, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2013.02.008.
- McCulloch D S. 1959. Vacuole disappearance temperatures of laboratory grown hopper halite [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 64: 849 ~ 854.
- Petichenko I O. 1979. Methods of study of inclusions in minerals in saline deposits [ J ]. *Fluid Inclusion Research*, 12: 114 ~ 274.
- Petrychenko O Y, Peryt T M and Chechel E I. 2005. Early Cambrian seawater chemistry from fluid inclusions in halite from Siberian evaporates [ J ]. *Chemical Geology*, 219: 149 ~ 161.
- Roberts S M and Spencer R J. 1995. Paleotemperatures preserved in fluid inclusion in halite [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59( 19 ): 3 929 ~ 3 942.
- Roedder E. 1963. Fluid inclusion [ J ]. *Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy*, 12: 1 ~ 644.
- Roedder E. 1984. The fluids in salt [ J ]. *American Mineralogist*, 69( 5 ~ 6 ): 413 ~ 439.
- Roedder E and Belkin H E. 1979. Application of studies of fluid inclusions in Permian Salado, NM, to problems of siting the waste isolation pilot-plant. NM [ A ]. McCarthy G J. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management* [ C ], 1( Plenum ): 313 ~ 321.
- Satterfield C L, Lowenstein T K, Vreeland R H, *et al.* 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 [ J ]. *Journal of Sedimentary Research*, 75( 4 ): 534 ~ 546.
- Siemann M G and Ellendorf B. 2001. The composition of gases in fluid inclusions of late Permian (Zachstein) marine evaporates in Northern Germany [ J ]. *Chemical Geology*, 173: 31 ~ 44.
- Tong Guobang, Liu Zhiming, Zheng Mianping, *et al.* 2002. Primary study on quantitative reconstruction of Middle-Late Eocene climate in Jianghan basin [ J ]. *Earth Science*, 27( 4 ): 446 ~ 451 ( in Chinese with English abstract ).
- Wang Chunlian, Liu Chenglin, Hu Haibing, *et al.* 2012. Sedimentary characteristics and its environmental significance of salt-bearing strata of the Member 4 of Paleocene Shashi Formation in southern margin of Jiangling Depression, Jianghan Basin [ J ]. *Journal of Palaeogeography*, 14( 2 ): 233 ~ 243 ( in Chinese with English abstract ).
- Wang Dianfu and Wang Shizhong. 1998. *Salt Lake Oil & Gas Geology* [ M ]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1 ~ 35 ( in Chinese with English abstract ).
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2001. *Saline Lake Potash Resources in Lop Nur, Xinjiang* [ M ]. Beijing: Petroleum Industry Press ( in Chinese ).
- Wei Dongyan. 1999. Classification of China's halite deposits [ J ]. *Geology of Chemical Minerals*, 21( 4 ): 201 ~ 208 ( in Chinese with English abstract ).
- Yang Changqing, Chen Kongquan, Chen Zhiqiang, *et al.* 2003. Constituent evolution and exploration potential in Jiangling depression [ J ]. *Natural Gas Industry*, 23( 6 ): 51 ~ 54 ( in Chinese with English abstract ).
- Yang Jigen. 1994. The preliminary study of fluid inclusions in salt from five halite deposits of four Provinces in southeast China [ J ]. *Journal of Salt Lake Science*, 2( 3 ): 1 ~ 9 ( in Chinese with English abstract ).
- Yuan Jianqi, Cai Kejin, Xiao Rongge, *et al.* 1991. The characteristics and genesis of inclusions in salt from Mengyejing potash deposit in Yunnan Province [ J ]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 16( 2 ): 137 ~ 143 ( in Chinese with English abstract ).
- Zachos J, Pagani M, Sloan L, *et al.* 2001. Trends, rhythms, and aberration in global climate 65Ma to present [ J ]. *Science*, 292: 686 ~ 693.
- Zhang Fang, Geng Wenhui and Wang Ziping. 2001. Studying of salt mineral

fluid inclusion at salt evaporite deposits in Lanpin-Simao basin[J]. Mineral Resources and Geology, 15(2): 113~115( in Chinese with English abstract ).

## 附中文参考文献

- 葛晨东, 王天刚, 刘兴起, 等. 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.
- 胡作维, 黄思静, 郜晓勇, 等. 2008. 川东华蓥山二叠系/三叠系界线附近粘土层中粘土矿物的类型及成因[J]. 地质通报, 27(3): 374~379.
- 柯小平, 覃建雄, 李余生, 等. 2009. 江汉盐湖盆地盐间白云岩特征及成因分析[J]. 沉积与特提斯地质, 29(3): 1~8.
- 李双建, 张然, 王清晨. 2006. 沉积物颜色和黏土矿物对库车坳陷第三纪气候变化的指示[J]. 沉积学报, 24(4): 521~530.
- 刘成林. 2003. 罗布泊钾矿区外围盐湖钾盐资源研究与评价新进展[J]. 矿床地质, 23(3): 286~286.
- 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[J]. 矿物学报, 26(1): 93~98.
- 刘成林, 陈永志, 焦鹏程, 等. 2005. 罗布泊卤水室内蒸发及天然石盐包裹体均一温度分析探讨[J]. 东华理工学院学报, 28(4): 306~312.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 581~592.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力, 等. 2007. 罗布泊盐湖巨量钙芒硝沉积及其成钾效应分析[J]. 矿床地质, 26(3): 322~329.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程, 等. 2009. 罗布泊盐湖钾盐矿床分布规律及控制因素分析[J]. 地球学报, 30(6): 796~803.

- 孟凡巍, 刘成林, 倪培. 2012. 全球古海水化学演化与世界主要海相钾盐沉积关系暨中国海相成钾探讨[J]. 微体古生物学报, 29(1): 62~69.
- 孟凡巍, 倪培, 葛晨东, 等. 2011a. 实验室合成石盐包裹体的均一温度以及古气候意义[J]. 岩石学报, 27(5): 1543~1547.
- 孟凡巍, 倪培, 严贤勤, 等. 2011b. 江苏金坛盐矿形成时期盐湖水体成分: 来自石盐包裹体的证据[J]. 微体古生物学报, 28(3): 324~328.
- 董国榜, 刘志明, 郑绵平, 等. 2002. 江汉盆地始新世中、晚期古气候定量重建初探[J]. 地球科学, 27(4): 446~451.
- 王春连, 刘成林, 胡海兵, 等. 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[J]. 古地理学报, 14(2): 233~243.
- 王典敷, 汪仕忠. 1998. 盐湖油气地质[M]. 北京: 石油工业出版社: 1~35.
- 王弼力, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京: 地质出版社.
- 魏东岩. 1999. 中国石盐矿床的分类[J]. 化工矿产地质, 21(4): 201~208.
- 杨长清, 陈孔全, 程志强, 等. 2003. 江陵凹陷形成演化与勘探潜力[J]. 天然气工业, 23(6): 51~54.
- 杨吉根. 1994. 我国东南四省五个岩盐矿床石盐中流体包裹体的初步研究[J]. 盐湖研究, 2(3): 1~9.
- 袁见齐, 蔡克勤, 肖荣阁, 等. 1991. 云南勐野井钾盐矿床石盐中包裹体特征及其成因的讨论[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 16(2): 137~143.
- 张芳, 耿文辉, 王滋平. 2001. 兰坪-思茅盆地石盐矿床盐矿物包裹体特征[J]. 矿产与地质, 15(2): 113~115.