

# 云南勐野井钾盐矿床石盐包裹体特征及古环境意义

董娟<sup>1</sup>, 高翔<sup>1</sup>, 方勤方<sup>1</sup>, 彭强<sup>1</sup>, 马宏伟<sup>2</sup>, 刘广耀<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 科学研究院, 北京 100083; 2. 北京理工大学 化学学院, 北京 100081)

**摘要:** 云南江城勐野井钾盐矿床是我国唯一的一个古代氯化物型固体钾盐矿床, 主要盐类矿物是石盐, 其次是钾石盐和光卤石, 其中钾石盐是该矿床主要的钾盐矿物。本文采用流体包裹体冷冻-加热法, 对该矿床含矿层中的原生单一液相石盐包裹体进行了均一温度测定, 以期获得该矿床钾盐成矿和盐湖古水温方面的信息。实验结果表明, 从白色石盐层→青灰色钾石盐层→含光卤石的青灰色钾石盐层, 均一温度的均值呈现逐渐升高的趋势, 即由 23.8℃→27.7℃→38.6℃, 这与盐类矿物晶出的顺序一致, 即由石盐→钾石盐→光卤石。可见, 上部含光卤石的钾石盐层的蒸发强度明显高于其下部的钾石盐层和底部的石盐层, 说明钾盐矿层的形成是湖盆卤水不断浓缩咸化的结果, 这种咸化是缘于湖盆卤水温度的不断升高。湖盆卤水温度的变化是环境气候变化的结果。因此, 原生包裹体均一温度可直接反映矿床形成时湖盆的古水温, 同时可推测当时的气温。

**关键词:** 原生纯液相流体包裹体; 均一温度; 石盐; 古水温; 勐野井; 钾盐矿床

中图分类号: P578.3<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)02-0227-10

## The characteristics of halite inclusions in the Mengyejing potash deposit, Yunnan Province, and their palaeoenvironmental significance

DONG Juan<sup>1</sup>, GAO Xiang<sup>1</sup>, FANG Qin-fang<sup>1</sup>, PENG Qiang<sup>1</sup>, MA Hong-wei<sup>2</sup> and LIU Guang-yao<sup>1</sup>

(1. Science Research Institute, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Chemistry, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The Mengyejing potash deposit in Jiangcheng area of Yunnan Province is the unique ancient chloride type solid potash deposit in China. The main salt minerals include halite, sylvite and carnallite, with sylvite being the most important potassium-bearing mineral. In this paper, the authors used cooling-heating methods to study the homogenization temperatures of primary halite fluid inclusions in order to obtain the information concerning the deposit formation and ancient temperature of the salt lake. The result shows that, in order of white halite layer → grayish sylvite layer → carnallite-bearing grayish sylvite layer, the homogenization temperatures increase gradually in order of 23.8℃→27.7℃→38.6℃. This trend is consistent with the crystallization sequence of salt minerals, i. e., halite→sylvite→carnallite. Therefore, the evaporative intensity for the carnallite-bearing upper sylvite layer is obviously higher than that of the lower sylvite layer and the halite layer, implying that the formation of potash deposit might have resulted from the continuous concentration and salinization of the lake brine, and this salinization trend was probably caused by the rise of the brine temperature in the lake. Moreover, the change of brine temperature was influenced by atmospheric temperature. Therefore, the homogenization temperature of primary fluid inclusions in different layers of the deposit can not only reflect the ancient

收稿日期: 2014-11-25; 修订日期: 2015-02-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403004)

作者简介: 董娟(1989-), 女, 汉族, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为成因矿物学和找矿矿物学, E-mail: dongjuan0306@aliyun.com; 通讯作者: 高翔(1971-), 女, 汉族, 副教授, E-mail: xgao@cugb.edu.cn。

water temperature directly during the formation of the deposit but also indicate environmental atmospheric temperature of that time.

**Key words:** primary fluid inclusion; homogenization temperature; halite; ancient water temperature; Mengyejing; potash deposit

原生流体包裹体,为晶体形成过程中捕获于晶体晶格缺陷或空隙中的显微流体样品,它可以反映出晶体赖以生长的母液的捕获压力( $p$ )和温度( $t$ ),估测摩尔体积( $V$ )及流体组成( $X$ )(Roedder, 1963)。蒸发岩中的主要矿物石盐形成于表生环境,在各个时代均有广泛分布(袁见齐等,1991;魏东岩,1999;王弭力等,2001;刘成林等,2010)。石盐中的包裹体,是海洋的泻湖或陆地湖盆环境下,通过蒸发作用结晶析出而捕获的流体(液体和/或气体)(Roedder, 1984; Goldstein and Barker, 1990; Goldstein and Reynolds, 1994)。蒸发岩矿物中存在的流体包裹体,特别是石盐中的流体包裹体,所捕获到的液体和气体的成分,由于可以保存地质时期古环境的水圈、大气圈还有生物圈的信息(Petichenko, 1979; Knauth and Beeunas, 1986; Goldstein, 2001; Siemann and Ellendorf, 2001; Petrychenko *et al.*, 2005),近年来引起了人们的极大兴趣,成为国际地质界的一个研究热点(Lowenstein *et al.*, 2001; Timofeeff *et al.*, 2006; Kovalevych *et al.*, 2006)。

蒸发浓缩过程中析出的石盐形成于气-水界面附近,因此,石盐中捕获的流体包裹体的成分及温度会随着捕获位置的不同而有所差异。在气-水界面周围,常会捕获到水体和大气,形成气液两相包裹体(葛晨东等,2007)。前人对石盐包裹体的显微测温研究,主要侧重于这种非均一捕获方式、在室温下为气液两相的包裹体,获得的均一温度在30~100℃之间(Dreyer *et al.*, 1949; Dellwig, 1955; McCulloch, 1959; 袁见齐等,1991; 杨吉根,1994; 张芳等,2001; 刘成林等,2005)。由于该数据远远高于现代盐湖表面卤水的温度,所以不能代表石盐沉积时的温度。而在气-水界面以下捕获的流体包裹体是纯液相的,这种纯液相的流体包裹体沿石盐晶面分布(刘成林等,2005; 王春连等,2013)。通过对这种原生纯液相流体包裹体进行长时间的低温冷冻,令其产生气泡,然后再逐渐升温得到的均一温度,可以直接反映当时湖水的温度,进而反映出古气候的温度(Petichenko, 1979; Roberts and Spencer, 1995),该方法(即 Benison 均一温度测定方法)在现代沉积的

盐湖和实验室合成的石盐中,均已得到了验证(Lowenstein *et al.*, 1998; 孟凡巍等,2011),并成为国际公认的石盐流体包裹体均一温度测定的方法(Roberts and Spencer, 1995; Benison and Goldstein, 1999; Satterfield *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007; 葛晨东等,2007)。但即使采用该方法,相同层位甚至同一样品中不同石盐包裹体的均一温度也不完全相同(Lowenstein *et al.*, 1998; Benison and Goldstein, 1999),造成这种现象的原因,可能是季节变化或昼夜温差的变化(Roberts and Spencer, 1995; Benison and Goldstein, 1999)。

本文研究对象是位于兰坪-思茅盆地东南部的江城勐野井钾盐矿床,在行政区划上隶属于云南省江城县宝藏乡。钾盐分布面积约2.8 km<sup>2</sup>,属大型钾盐矿床。本文以勐野井钾盐矿区3个水平巷道内典型含钾剖面为研究对象,对其盐岩样品里的原生单一液相石盐包裹体进行国际公认的均一温度方法(即 Benison 均一温度测定方法,1999)测定,通过对样品进行冷冻及显微测温实验,可获得当时石盐沉积时的古水温资料。同时,对比不同盐层中石盐包裹体均一温度的差异,探讨钾盐成矿温度,并推测成矿时的古气温。

## 1 矿区地质特征

勐野井钾盐矿床位于兰坪-思茅盆地东南部,北与昌都盆地相接,向南延入老挝、泰国境内,与泰国呵叻盆地毗邻,它们共同组成一个规模巨大的裂谷盆地系(曲懿华等,1998)。

### 1.1 地层

兰坪-思茅盆地沉积建造主要由三叠系、侏罗系、白垩系组成,其上局部叠加覆盖新生代地层,有些层系有不同程度的缺失(廖宗庭等,2005)。本文根据云南省地质调查院(2006)的划分,将矿区地层划分为白垩系、第三系及零星分布的第四系,具体岩性特征描述见图1。本文的研究对象为上白垩统勐野井组上段(K<sub>2</sub>me<sup>3</sup>)深部的盐层,这是钾盐的主要赋存层位。

| 地 层   |     |                            |                                                               | 剖面 | 地 层 简 表                                                                                                                     | 成 矿 层 |
|-------|-----|----------------------------|---------------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 系     | 统   | 组                          | 段                                                             |    |                                                                                                                             |       |
| 第四系 Q |     |                            |                                                               |    | 洪积、冲积、坡积残层，岩性为砂、砾、泥土。                                                                                                       |       |
| 第三系 N |     |                            |                                                               |    | 上部为灰白色石英砂岩，在灰白色粘土岩中夹3~30 cm厚的煤线，下部为棕红色、灰白色石英砂岩、砂砾岩与下伏勐野井组呈不整合接触。                                                            |       |
| 白 垩 系 | 下 统 | 勐野井组                       | 上<br>(K <sub>2</sub> me <sup>3</sup> )                        |    | 上部为棕红色砂岩、粉砂岩的不等厚互层，下部以粉砂岩、角砾状粉砂岩为主，底部有一层厚约10~30 m棕红色、杂色泥砾岩，勐野井坝区一带是成盐中心，地表以盐溶泥砾岩为主，深部为厚层石盐夹多层钾盐，为主要含盐层，盆地中心与边缘区岩性相变剧烈，差异较大。 |       |
|       |     |                            | 中<br>(K <sub>2</sub> me <sup>2</sup> )                        |    | 棕红色钙质泥岩与粉砂岩的不等厚互层，夹少量薄层细砂岩，局部含白色纤维状石膏，常见不规则波状层理，微斜波状层理与龟裂。                                                                  |       |
|       |     |                            | 下<br>(K <sub>2</sub> me)<br>(K <sub>2</sub> me <sup>1</sup> ) |    | 上部为棕红色钙质粉砂质泥岩夹杂色泥砾岩透镜体，下部为棕红色、杂色泥砾岩，泥砾岩底部时见灰黑色白云质泥灰岩透镜体或青石膏层。                                                               |       |
|       |     | 扒沙河组<br>(K <sub>1</sub> p) |                                                               |    | 全组灰紫色、浅紫色厚层或块状中、细粒长石石英砂岩为主，顶部为灰白色细粒石英砂岩。该组岩性较硬，以硅质胶结为主，部分为钙质，发育大型斜层理及小型交错层理及波痕，地表风化面上见蓝铜矿、孔雀石，石英砂岩顶部受侵蚀。与上覆地层的接触关系为假整合接触。   |       |
|       |     | 曼岗组                        | 上<br>(K <sub>1</sub> m <sup>2</sup> )                         |    | 砂岩、粉砂岩互层，层厚一般10~20 m，层间可见小型冲刷面斜交层理，虫管等。                                                                                     |       |
|       |     |                            | 下<br>(K <sub>1</sub> m)<br>(K <sub>1</sub> m <sup>1</sup> )   |    | 上部以砂岩为主夹粉砂岩，层厚约10~20 m，有时可见由粗到细的韵律沉积。下部砂岩层逐渐增厚，底部时有含砾砂岩。                                                                    |       |
|       |     | 景星组                        | 上<br>(K <sub>1</sub> j <sup>2</sup> )                         |    | 紫红色灰绿色泥岩、粉砂质泥岩夹少量灰白色砂岩。含较多的炭质或炭化植物碎片，局部见煤线。                                                                                 |       |
|       |     |                            | 下<br>(K <sub>1</sub> j)<br>(K <sub>1</sub> j <sup>1</sup> )   |    | 灰白、灰黄色石英砂岩夹紫红色粉砂质泥岩，岩石中含铜，下部灰色泥岩中含煤线，另含一层深灰色砾状灰岩（层厚0.3 m），砾石为泥灰岩。                                                           |       |

图 1 云南勐野井钾盐矿区地层简表(云南省地质调查院,2006)

Fig. 1 Strata of the Mengyejing potash deposit, Yunnan Province (after Yunnan Institute of Geology, 2006)

1.2 构造

勐野井钾盐矿区主要构造由褶皱、断层和飞来峰组成(图2)。主要褶皱为轴向北西-南东的勐野井向斜,含盐层即分布于此构造范围内。褶皱构造简单,而断裂构造较复杂,基底断层对成盐控制作用明显,后期断层对盐体作用强烈。飞来峰构造起到了保护下伏盐层少受溶蚀的作用(云南省地质矿产局八一四队,1985)。

2 样品的采集、制备及测试方法

2.1 样品的采集与制备

样品采于勐野井矿区水平巷道(628-S1、580N和535中段)内的白色石盐岩层及青灰色钾石盐矿层,巷道盐层的柱状图见图3。由图可见,成钾期经历了4个阶段,即:棕红色泥砾质钾石盐→灰绿色泥

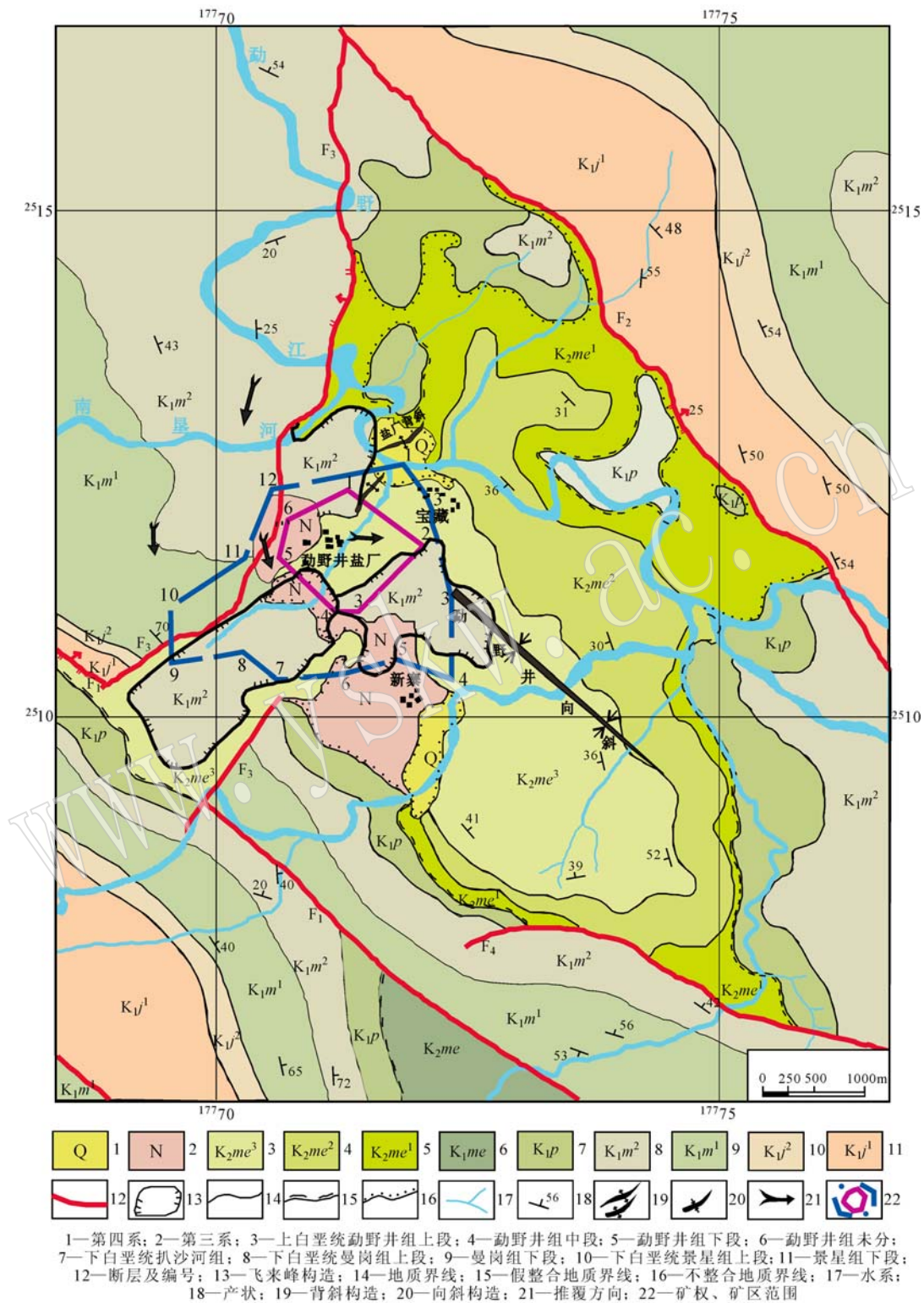


图2 云南勐野井盐矿区地质图(据云南省地质调查院,2006)

Fig. 2 Geological map of the Mengyejing potash deposit, Yunnan Province (after Yunnan Institute of Geology, 2006)

砾质钾石盐→白色石盐→青灰色钾石盐(该阶段下部夹桔红色钾盐透镜体,上部夹光卤石脉)。

矿体岩性有6种类型:白色石盐岩、青灰色钾盐矿石、桔红色钾盐岩(呈透镜体产出)、灰绿色泥砾质



钾盐岩、棕红色泥砾质钾盐岩和灰绿色泥砾质光卤石岩。选择透明度高的原生(未发生重结晶的)白色石盐岩(图 4a)和青灰色钾盐矿石(图 4b)做包裹体测温学研究。

因石盐矿物易溶解,在磨制薄片申即使使用饱和氯化钠水也会造成石盐的部分溶解或重结晶,且其硬度低,在磨片过程中,易发生塑性变形而弯曲。因此,根据石盐在(100)方向有 3 组完全解理的矿物

学特征,采用金属小刀剥离解理片,可获得理想的样片厚度,即 0.3 mm(图 4c)。这样制备的样品薄片规格一般在 2 mm×2 mm 以下,在其上能找到合适的包裹体,可将其直接放在显微镜载物台上进行测试。

2.2 测试仪器及方法

采用国际通行的冷却成核技术(cooling nucleation method)(Roberts and Spencer, 1995; Benison

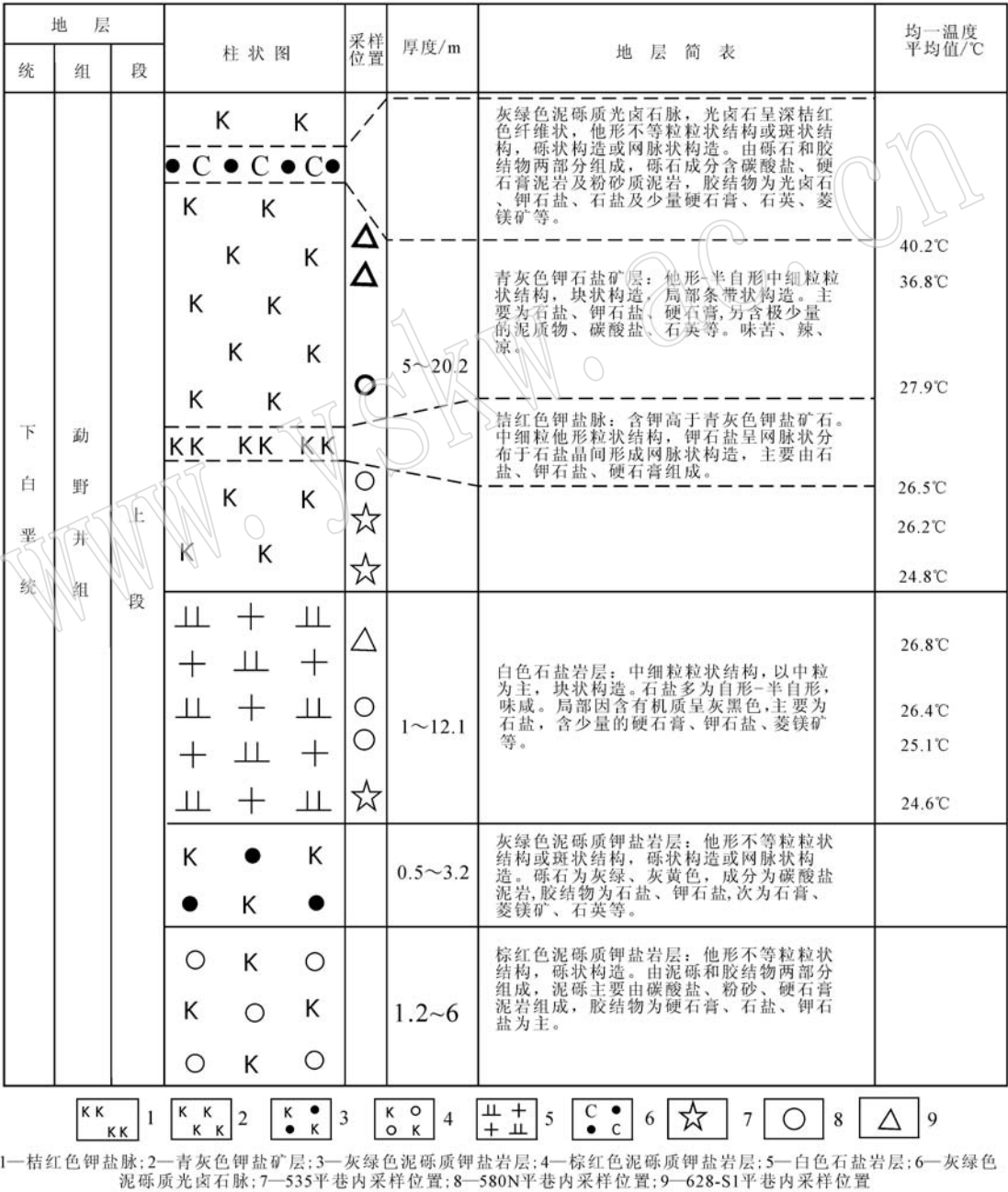


图 3 研究区矿体柱状图及采样位置图

Fig. 3 Orebody columnar section and sampling positions of the study area

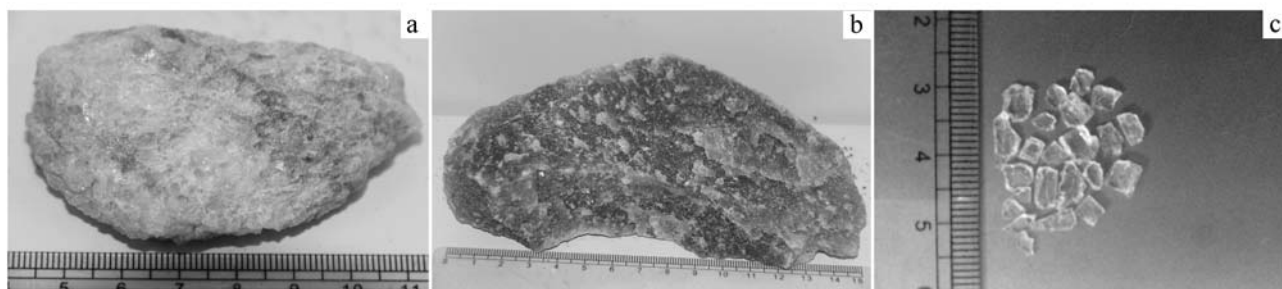


图4 样品及石盐解理片照片

Fig. 4 Samples and cleavage flakes of halite

a—白色石盐岩手标本; b—青灰色钾盐矿石手标本; c—石盐解理片

a—sample of white salt rock; b—sample of grey potash rock; c—the cleavage flake of halite

and Goldstein, 1999; Satterfield *et al.*, 2005) 对于石盐包裹体进行均一温度的测定。使用的仪器为英国 Linkam Thms600 型冷热台, 冷热台的温度范围为  $-196 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 。其精度在  $< 0^{\circ}\text{C}$  范围内, 误差  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ; 在  $0 \sim 50^{\circ}\text{C}$  区间误差  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。测试单位为中国地质大学(北京)实验中心。测试对象是: 冷冻前为单一液相、冻后变为气液两相的包裹体(图 5a、5b)。在室温小于  $24^{\circ}\text{C}$  的条件下, 首先在显微镜下仔细查找薄片用于测定均一温度的原生单一液相石盐包裹体, 照相并做记录(图 5a)。其次, 将待测薄片置于冷热台上进行立即降温至  $-18^{\circ}\text{C}$  (未进行长时间冷冻), 在不结冰、不改变石盐包裹体大小与形态的条件下, 有部分单一液相的石盐包裹体由于冷凝收缩出现气泡, 形成气液两相包裹体(图 5b)。若将包裹体冷冻至  $-80^{\circ}\text{C}$ , 石盐包裹体会发生部分甚至完全结冰的现象(图 5c), 使包裹体体积膨胀, 这种完全结冰导致的体积膨胀是不可逆的, 所测出的均一温度数据会出现偏差。因此, 本文仅选择了在冷冻至  $-18^{\circ}\text{C}$  后即刻出现气泡的原生石盐包裹体进行测温工作。最后, 对原为单一液相、后经降温而成为气液两相的石盐包裹体进行测温。为获得准确的均一温度, 采取分段加热测温方法, 即  $15^{\circ}\text{C}$  以下, 使用  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率升温;  $15^{\circ}\text{C}$  以上以  $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率升温(Benison and Goldstein, 1999), 直至气泡消失完全均一, 从而测出石盐包裹体的均一温度。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 矿区包裹体特征

通过对勐野井钾盐矿床含矿层内盐岩中的石盐

包裹体的显微镜下观察, 发现石盐包体发育, 常成包体群出现(图 5d), 但由于该地区地质环境复杂, 构造运动频繁, 且石盐本身具有易潮解、可塑性高、易漏失的特点, 因此石盐包裹体大多发生了强烈的变形。原生石盐包裹体数量较少, 其特征是包裹体的形态与主矿物相似, 为规则的正方形或矩形, 且均为单一液相包裹体(詹礼行等, 1981)。

矿区内石盐包裹体可见 3 种类型。第 1 类是纯液相包裹体(图 5d)。其形态为规则的正方形或长方形, 是石盐的负晶形。包裹体群基本上沿着或平行结晶面生长, 呈片状、条带状、线状展布, 大小为  $3 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  至  $20 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$  不等, 属于原生石盐包裹体。这种单一相液体包裹体冷冻后一般都出现气相, 气液比约为 5% (图 5b), 只有这种类型的包裹体可以代表当时湖盆卤水蒸发结晶时的温度。第 2 类为气相两相包裹体。这类包裹体分布最多, 形态多为矩形, 少数正方形, 大小为  $2 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$  至  $20 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$ , 气液相比相差非常大, 小的为 5% 左右, 而大的可以达到 90% 以上(图 5e), 黑色的气泡几乎占据了整个包体腔, 形成这种富气包裹体的原因可能是石盐包裹体在水体表面结晶时捕获了大量的大气。无论其气液比如何, 由于石盐在湖水表面沉积捕获流体的状态不均一, 其均一温度不能与湖水蒸发浓缩时的温度联系起来。有些气液两相的石盐包裹体甚至发生了变形, 稍呈浑圆状, 可能与后期的构造变形有关。第 3 种是含钾石盐子晶的固液两相包裹体(图 5f)。钾石盐子晶呈立方体, 颗粒较小。这种石盐包裹体由于捕获流体时的状态不均一, 因此也不能代表成矿温度。

#### 3.2 原生纯液相石盐包裹体测温结果及地质意义

对勐野井钾盐矿床的白色石盐岩和青灰色钾盐

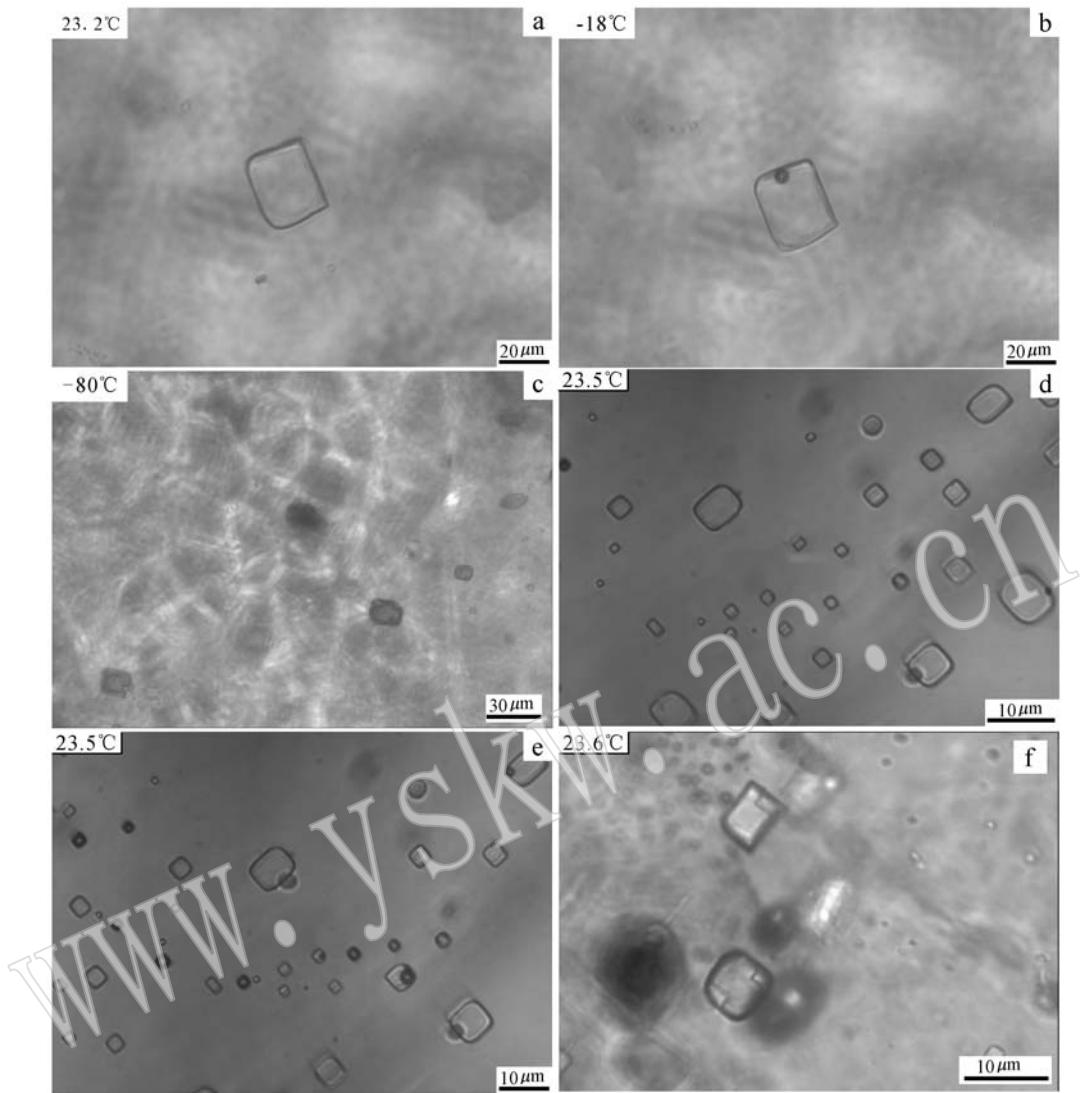


图 5 勐野井钾盐矿体内石盐包裹体显微照片

Fig. 5 Microphotograph of halite inclusions in Mengyejing potash orebody

a—室温下单一液相的石盐流体包裹体；b—冷冻至 $-18^{\circ}\text{C}$ ，原单一液相的石盐包裹体出现了气泡成为气液两相包裹体；  
c—单一液相的石盐包裹体冷冻至 $-80^{\circ}\text{C}$ ；d—单一液相的石盐包裹体群；e—气液两相石盐包裹体群；f—含子晶的石盐包裹体  
a—pure liquid phase fluid inclusions of halite at room temperature; b—bubble in the single liquid phase inclusion with freezing temperature at $-18^{\circ}\text{C}$ ; c—single liquid halite inclusions under $-80^{\circ}\text{C}$  freezing condition; d—pure liquid phase fluid inclusion group; e—liquid and gas phase halite inclusion group; f—solid and liquid inclusions of halite

矿石 10 个样品中的 139 个原生单一液相石盐包裹体冷冻至 $-18^{\circ}\text{C}$ ，使其成为气液两相包裹体，进行显微测温，并将均一温度测定结果分别按不同盐岩层的不同位置进行统计，结果见表 1。

石盐包裹体形成于表生环境的气-水界面处，因其晶格缺陷中捕获的流体包裹体与在较深的地质环境中形成的流体包裹体不同，所测定出的均一温度无需经过压力校正就可以代表当时盐湖水体的温

度。因此，结合盐类矿物晶出的顺序：石盐→钾石盐→光卤石，勐野井钾盐矿床从白色石盐层→青灰色钾盐层下部，包裹体均一温度均值由 $23.8^{\circ}\text{C}$ 升至 $27.7^{\circ}\text{C}$ ，表明古水温呈缓慢升高的趋势，但湖盆卤水的温度普遍低于 $30^{\circ}\text{C}$ 。之后，由于强烈的蒸发作用，加之外界补给的不断减少，古水温迅速升高，至含光卤石的青灰色钾盐层上部，其包裹体均一温度最高值达 $48.3^{\circ}\text{C}$ ，均值亦升至 $38.6^{\circ}\text{C}$ 。由此可见，上部

含光卤石的青灰色钾盐层的蒸发强度明显高于其下部的青灰色钾盐层和底部的白色石盐层，且光卤石在该层的晶出也表明，此为湖盆水体演化的最高阶段。

表 1 石盐包裹体均一温度分布统计表  
Table 1 Statistics of homogenization temperatures of halite inclusions

| 盐层     | 位置 | 均一温度范围/℃  | 均一温度均值/℃ | 样品号       | 包裹体测点数 | 备注                          |
|--------|----|-----------|----------|-----------|--------|-----------------------------|
| 青灰色钾盐层 | 上部 | 31.3~48.3 | 38.6     | 628-S1-13 | 17     | 有光卤石析出，并胶结灰绿色泥砾形成灰绿色泥砾质光卤石脉 |
|        |    |           |          | 628-S1-7  | 13     |                             |
|        | 下部 | 23.4~31.9 | 27.7     | 580N-12   | 14     |                             |
|        |    |           |          | 580N-8    | 13     |                             |
|        |    |           |          | 535-7     | 13     |                             |
|        |    |           |          | 535-4     | 11     |                             |
|        |    |           |          | 628-S1-5  | 16     |                             |
| 白色石盐层  |    | 21.8~30.7 | 23.8     | 580N-15   | 13     |                             |
|        |    |           |          | 580N-13   | 16     |                             |
|        |    |           |          | 535-15    | 13     |                             |

由包裹体的均一温度可知，随着水温的逐渐升高，湖泊卤水不断浓缩咸化，导致石盐、钾石盐和含光卤石的钾石盐的逐步析出，即钾盐矿物是湖泊温度不断升高的产物。因此，勐野井钾盐矿床中石盐包裹体的均一温度可直接反映该钾盐矿床形成时的古水温特征。

3.3 矿床形成过程中的湖盆水温与气温的关系

因盐岩中原生纯液相石盐包裹体的均一温度可代表成盐期的古卤水温度。古水温如何反映当时的气温呢？Roberts 和 Spencer(1995)在对现代短暂性湖泊 Death Valley 的研究后发现，气温与水温之间有较好的相关性，一般水温低于气温约 5℃。根据勐野井钾盐矿床矿体内的原生石盐包裹体均一温度的测试结果，可以推测：在底部白色石盐层(23.8℃)→青

灰色钾盐层(27.7℃)→含光卤石的钾石盐层(38.6℃)的形成过程中，当时的古气温变化由 28.8℃→32.7℃→43.6℃左右。这与焦建(2013)对勐野井组沉积物中指示气候干热程度的 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/w(\text{FeO})$ 数据(表 2)相吻合，干热条件下的沉积物具有很强的氧化性，变价元素 Fe 对应的氧化物 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/w(\text{FeO})$ 比值会升高，表 3 中绝大部分数据都高于指示干热与半湿润气候的分界值 1.8 左右。此外，袁秦等(2013)给出勐野井钾盐矿床含盐系地层的孢粉组合为 Psophophaera-Exesipollenites-Classopollis，反映了该研究区为干旱的热带-亚热带气候。因此，成盐过程中石盐包裹体的均一温度不但能指示古卤水温度，还能较好地推测当时气温，即钾盐矿床形成时的气温范围在 28℃~43℃。

表 2 思茅盆地勐野井组 Fe 丰度(%)及 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/w(\text{FeO})$ 比值(引自焦建, 2013)

Table 2 Abundance of Fe and  $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/w(\text{FeO})$  ratio of the Mengyejing Formation in Simao basin (after Jiao Jian, 2013)

| 样品号                                      | J1      | J2      | J3      | J4      | J5      | J6   | J7      | J8      |
|------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 2.32    | 3.54    | 5.08    | 4.75    | 1.9     | 3.15 | 2.23    | 4.3     |
| FeO                                      | 1.26    | 2.08    | 1.78    | 0.9     | 0.56    | 0.9  | 1.58    | 1.89    |
| $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/w(\text{FeO})$ | 1.841 3 | 1.701 9 | 2.853 9 | 5.277 8 | 3.392 9 | 3.5  | 1.411 4 | 2.275 1 |

4 结论

对云南思茅盆地勐野井钾盐矿床含矿层不同盐岩层中石盐包裹体均一温度的研究，获得该矿床含矿层原生纯液相石盐包裹体的均一温度范围为 21.8~48.3℃，从石盐层→钾盐层→含光卤石的钾盐层，

包裹体的均一温度均值由 23.8℃→27.7℃→38.6℃，呈逐渐上升的趋势，该趋势与盐类矿物晶出的顺序一致。可见，钾盐层上部的蒸发强度明显高于其中、下部，钾盐富集成层成矿是湖泊卤水强烈持续蒸发作用的结果。矿层包裹体温度即为矿床形成时的古水温度，并由此可推测矿床形成时的古气温，这对研究盐湖不同阶段的卤水演化和探知矿床形成

过程中的气候变化具有一定的指示意义。

**致谢** 本文在野外地质工作期间得到了云南江城泰裕钾肥有限公司的大力支持,特别是苏彦波、张兴寿、叶光辉工程师在采样过程中给予了很大帮助,评审专家、编辑及中国地质大学蔡克勤教授在文章修改中提供了许多建设性意见,在此表示衷心感谢!

## References

- Benison K C and Goldstein R H. 1999. Permian paleoclimate date from fluid inclusions in halite[J]. *Chemical Geology*, 195(4): 113~132.
- Dellwig L F. 1955. Origin of the salina salt of Michigan[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 25(2): 83~10.
- 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): 2063~2068(in Chinese with English abstract).
- Goldstein R H. 2001. Clues from fluid inclusions [J]. *Science*, 294(2): 1009~1011.
- Goldstein R H and Reynolds T J. 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals[J]. *SEPM Short Course*, 31: 199.
- 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): 1003~1006.
- Jiao Jian. 2013. Study on the regional salt- and potash- forming in Jurassic strata, Simao basin[D]. China University of Mining and Technology, Beijing(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.
- Kovalevych V M, Marshall T, Peryt T M, *et al.* 2006. Chemical composition of seawater in Neoproterozoic: Results of fluid inclusion study of halite from Salt Range(Pakistan) and Amadeus Basin(Australia)[J]. *Precambrian Research*, 144(1~2): 39~51.
- Liao Zongting and Chen Yuekun. 2005. Nature and evolution of Lanping-Simao Basin prototype[J]. *Journal of Tongji University(Nature Science)*, 33(11): 1527~1531(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 Xingqi, Ni Pei, Dong Hailiang, *et al.* 2007. Homogenization temperature and its significance for primary fluid inclusion in halite formed in Chaka salt lake, Qadam basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 113~116.
- Lowenstein T K, Timofeeff M N, Brennan S T, *et al.* 2001. Oscillations in Phanerozoic seawater chemistry: Evidence from fluid inclusions[J]. *Science*, 294: 1086~1088.
- 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.
- McCulloch D S. 1959. Vacuole disappearance temperatures of laboratory grown hopper halite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 64: 849~854.
- Meng Fanwei, Ni Pei, Ge Chendong, *et al.* 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).
- Petichenko J 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.
- Qu Yihua, Yuan Pinquan, Shuai Kaiye, *et al.* 1998. Mineralgenesis Law and Prediction of Potash Deposit in Lanping-Simao Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Roberts S M and Spencer R J. 1995. Paleotemperatures preserved in fluid inclusion in halite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19): 3929~3942.
- Roedder E. 1963. Fluid inclusions[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.
- Satterfield C L, Lowenstein T K, Vreeland R H, *et al.* 2005. Paleo-



- brine Temperatures, Chemistries, and Palaeoenvironments 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.
- The 814 Team of Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1985. The Study of the Mengyejing Potash Deposit in Jiangcheng, Yunnan[M]. 1~139(in Chinese).
- Timofeeff M N, Lowenstein T K, Da Silva MAM, *et al.* 2006. Secular variation in the major - ion chemistry of seawater: Evidence from fluid inclusions in Cretaceous halites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(8): 1977~1994.
- Wang Chunlian, Liu Chenglin, Xu Haiming, *et al.* 2013. Homogenization temperature study of salt inclusions from the upper section of Shashi Formation in Jianglin depression[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(3): 383~392(in Chinese with English abstract).
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2001. Saline Lake Potash Resources in Lop Nur, Xinjiang[M]. Beijing: Geological Press(in Chinese with English abstract).
- Wei Dongyan. 1999. Classification of China's halite deposits[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 21(4): 201~208(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 Keqin, 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).
- Yuan Qin, Qin Zhanjie, Wei Haicheng, *et al.* 2013. The ore-forming age and palaeoenvironment of the Mengyejing Formation in Jiangcheng, Yunnan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 5: 631~637(in Chinese with English abstract).
- Yunnan Institute of Geology. 2006. Report of Resources Reserves in Mengyejing Potash Mine at Jiangcheng, Yunnan[M]. 5~19(in Chinese).
- Zhan Lixing and Zhang Yunzhen. 1981. The characteristics of halite inclusions and the study of genesis from Mengyejing potash deposit in Yunnan Province[J]. *Journal of Chengdu Institute of Geology*, 2: 104~111(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fang, Geng Wenhui and Wang Ziping. 2001. Studying of salt-mineral fluid inclusion at salt evaporate 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.
- 焦建. 2013. 思茅盆地侏罗纪区域成盐找钾研究[D]. 中国矿业大学(北京).
- 廖宗延, 陈跃昆. 2005. 兰坪-思茅盆地原型的性质及演化[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 33(11): 1527~1531.
- 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, 王弭力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. *矿床地质*, 29(4): 581~592.
- 孟凡巍, 倪培, 葛晨东, 等. 2011. 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.
- 曲懿华, 袁品泉, 帅开业, 等. 1998. 兰坪-思茅盆地钾盐成矿规律及预测[M]. 北京: 地质出版社, 9~55.
- 王春连, 刘成林, 徐海明, 等. 2013. 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.
- 王弭力, 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*, 6(2): 137~143.
- 袁秦, 秦占杰, 魏海成, 等. 2013. 云南江城勐野井组钾盐成矿时代及其古环境研究[J]. *地球学报*, 5: 631~637.
- 云南省地质矿产局八一四队. 1985. 云南省江城勐野井钾盐矿床研究报告[M]. 1~139.
- 云南省地质调查院. 2006. 云南省江城勐野井钾盐矿区资源储量核实报告[M]. 5~19.
- 詹礼行, 张云震. 1981. 云南勐野井钾盐矿床包裹体特征及矿床成因初探[J]. *成都地质学院学报*, 2: 104~111.
- 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.