

# 高温高压下 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系的 Raman 光谱分析： 一种新的流体包裹体盐度测定方法<sup>\*</sup>

杨玉萍<sup>1</sup> 郑海飞<sup>1\*\*</sup> 张立飞<sup>1</sup> 刘曦<sup>1</sup> 邓松涛<sup>2</sup>

YANG YuPing<sup>1</sup>, ZHENG HaiFei<sup>1\*\*</sup>, ZHANG LiFei<sup>1</sup>, LIU Xi<sup>1</sup> and DENG SongTao<sup>2</sup>

1. 北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

2009-03-02 收稿, 2009-05-22 改回。

Yang YP, Zheng HF, Zhang LF, Liu X and Deng ST. 2009. Raman spectroscopic analysis of the NaCl-H<sub>2</sub>O systems at high pressure and high temperature: A new method of determining the salinity of fluid inclusion. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 2023–2028

**Abstract** Raman spectra of different salinities (0.0%, 5.0%, 10.0% and 20.0%) of the NaCl-H<sub>2</sub>O systems is studied at high pressure and high temperature using hydrothermal diamond-anvil cell (HDAC). It is shown that the frequency shift ( $\Delta\nu_{(O-H)}$ ) of Raman band in the region of OH stretching vibration increases with increasing temperature at a given pressure for the same salinity of NaCl-H<sub>2</sub>O system; at different pressures, the relationship between  $\Delta\nu_{(O-H)}$  and temperature is influenced by the salinity, not the pressure. This property has an important application on the determination of the salinity of fluid inclusion, and the calculated equation is described by:  $W = 123.25S^2 - 128.11S + 32.40$ , the uncertainty is 0.46%.

**Key words** Fluid inclusion; Salinity; High pressure and high temperature; Raman; NaCl-H<sub>2</sub>O

**摘要** 利用水热金刚石压腔研究了高温高压下 0.0%、5.0%、10.0% 和 20.0% 的 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系的 Raman 光谱, 研究发现: 对于盐度一定的 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系, 当压力不变时, 水的 Raman 伸缩谱峰的波数变化量  $\Delta\nu_{(O-H)}$  随温度的升高而不断增加; 当压力不同时,  $\Delta\nu_{(O-H)}$  随温度的变化关系 (偏移斜率  $S$ ) 不受压力的影响, 而只与盐度相关。利用该性质可以用来确定流体包裹体的盐度 ( $W$ ), 其计算公式如下:  $W = 123.25S^2 - 128.11S + 32.40$ , 误差为 0.46%。

**关键词** 流体包裹体; 盐度; 高温高压; Raman; NaCl-H<sub>2</sub>O

中图法分类号 P599

## 1 引言

流体在各种地质作用过程中所起的作用已引起越来越多的学者们的关注, 是目前地球科学研究的前沿领域 (Zheng *et al.*, 1998; Tourret, 2001; Scambelluri and Philippot, 2001; Fan *et al.*, 2005; 沈昆等, 2005; 曹淑慧等, 2006; Zhang *et al.*,

2008)。流体包裹体作为唯一保存下来的地壳和上地幔中的流体样品, 它的深入研究对于探讨壳幔演化及其相互作用有着非常重要的意义。从流体包裹体的研究资料可知, 水-盐体系是包裹体中最主要的体系之一, 在各种体系中, 以 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系最为常见, 普遍存在于热液矿床、岩浆岩、变质岩等各种地质环境, 是各种地质作用过程中最重要的二元流体体系之一 (Roedder, 1984; Shepherd *et al.*, 1985; Bodnar, 2003; 倪

\* 本文受国家重点基础研究发展计划 (2009CB825007 和 2006CB403508) 和国家自然科学基金 (40821002 和 40730314) 的联合资助。

第一作者简介: 杨玉萍, 女, 1982 年生, 博士, 主要从事高温高压实验地球化学和实验岩石学研究, E-mail: yypyang@pku.edu.cn

\*\* 通讯作者: 郑海飞, E-mail: hfzheng@pku.edu.cn

培等,2003;卢焕章等,2004;Ni *et al.*,2006)。而包裹体盐度是流体包裹体的重要参数之一,它的准确测定是应用盐水体系的PVT关系进行相关地质动力学过程研究的基础。目前,激光拉曼光谱技术是单个包裹体研究的一种重要研究手段,澳大利亚学者Mernagh and Wilde(1989)提出了通过计算溶液拉曼谱峰的偏移参数来测定包裹体盐度的方法,根据这种方法,吕新彪等(2001)、丁俊英等(2004)报道了包裹体溶液的盐度测定方面的工作。Ni *et al.* (2006)在50MPa/100MPa,500~600℃范围内合成了纯H<sub>2</sub>O体系及NaCl-H<sub>2</sub>O体系的包裹体,原位测量了其低温时的Raman光谱,利用盐水化合物和冰的Raman谱峰的相对强度和截面之比来指示流体包裹体盐度的相对大小。

本文研究了高温高压下不同盐度的NaCl-H<sub>2</sub>O体系的Raman光谱,发现溶液的Raman谱峰随温度的变化关系与盐度具有确定的关系,报道了一种新的测定流体包裹体盐度的方法。

## 2 实验方法

实验采用的高压装置为水热金刚石压腔(图1;Fang *et al.*,1999;周兴志等,2006),压砧顶面直径为0.8mm,垫片为0.8mm厚的铌片,样品室直径为0.4mm。实验样品分别为

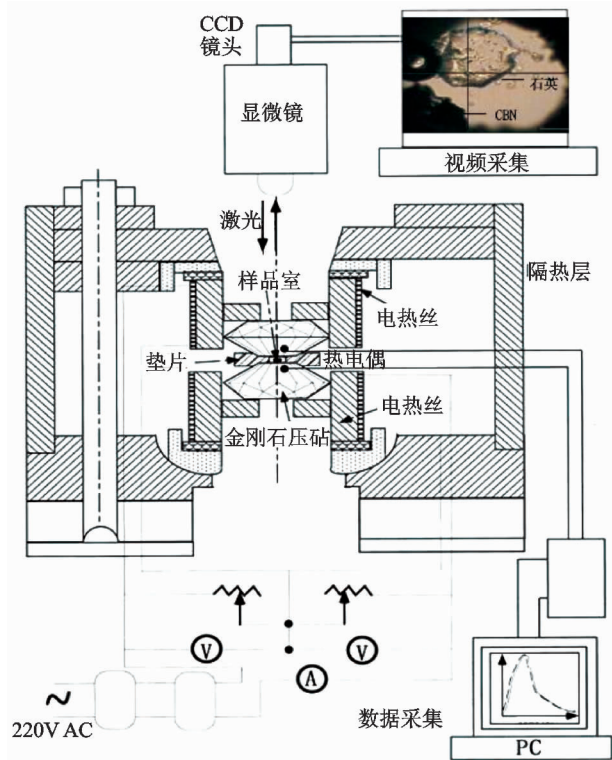


图1 Bassett式水热金刚石压腔和实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Bassett-type hydrothermal diamond anvil cell and experimental assembly

0.0%、5.0%、10.0%和20.0%的NaCl-H<sub>2</sub>O体系(电阻为18.2MΩ的水配置),压力标定物质为石英(约0.1mm)(Schmidt and Ziemann,2000)和立方氮化硼(CBN)(第二压标,约0.1mm)(Kawamoto *et al.*,2004a)。采用四种物质进行温度校正:1-萘酚(369K),水杨酸(432K),马尿酸(461K)和酚酞(538K)。在整个实验的温度范围内,误差不超过1K。

Raman光谱的采集在北京大学地球与空间科学学院的英国产RM1000型激光拉曼光谱仪上进行。用514cm<sup>-1</sup>氩离子激光器激发样品,实验功率为50mW,样品的接受功率约为5mW,入射狭缝为50μm,20倍的长焦距物镜。扫描范围2000~4000cm<sup>-1</sup>,扫描时间为30s,扫描1次,分辨率为1cm<sup>-1</sup>。

测量得到的Raman光谱数据利用JANDEL SCIENTIFIC PEAKFIT V4.04软件进行拟合,为了减少误差,截取在2800~3800cm<sup>-1</sup>波数范围内的Raman谱峰数据,基线采用直线,整个数据的处理过程中所有拟合参数保持一致。

## 3 实验结果和讨论

图2是高温高压下0.0%、5.0%、10.0%和20.0%的NaCl-H<sub>2</sub>O体系在波数为2700~3900cm<sup>-1</sup>范围内的Raman伸缩振动谱峰(以下简称:水峰)。从图中可以看到,对于盐度一定的NaCl-H<sub>2</sub>O体系,当压力不变时,水峰随着温度的升高略微向高波数方向移动;而随着盐度和温度的升高,谱峰在整体的轮廓上逐渐变窄,低频处肩峰逐渐消失。

目前,关于NaCl-H<sub>2</sub>O体系的H-O振动的Raman谱峰(2800~3800cm<sup>-1</sup>范围,图2)的解释仍存在着争议。对于纯水,该区域内的谱峰是由O-H伸缩振动造成的,它是由无数个谱峰叠加而成的,一般认为,其中的单个谱峰代表了水中某种具有一定氢键类型的分子构型(Abe and Ito,1978;Kawamoto *et al.*,2004b)。对于NaCl水溶液,不太可能发生O与Cl<sup>-</sup>之间直接的相互作用,而是通过一种特殊的化学键O—H...Cl<sup>-</sup>键产生联系,这种键也可以称之为氢键(Bondarenko *et al.*,2006)。类似于纯水中的氢键的作用,NaCl水溶液中的氢键(O—H...Cl<sup>-</sup>)可能对谱峰的宽化及谱峰的形状起到了关键作用。

在前人的工作中,对于NaCl-H<sub>2</sub>O体系的Raman光谱研究,传统的水峰处理方法一般都采用两个或两个以上的Gauss峰进行拟合,其主要研究目的是探讨高温高压下水的结构变化以及氢键的相互作用(Kawamoto *et al.*,2004b;Okada *et al.*,2005;杨玉萍等,2006,2009)。而本文的目的是为了研究溶液的Raman谱峰在流体包裹体盐度测定方面的应用,为了使这种方法能够更加的实用而且精确度更高(Yang and Zheng,2009),因此,作者选择用单个Gauss峰对谱峰进行了拟合,其各温度和压力数据的拟合结果如图3所示。

需要说明的是,在本文的讨论中,为了更准确描述水的

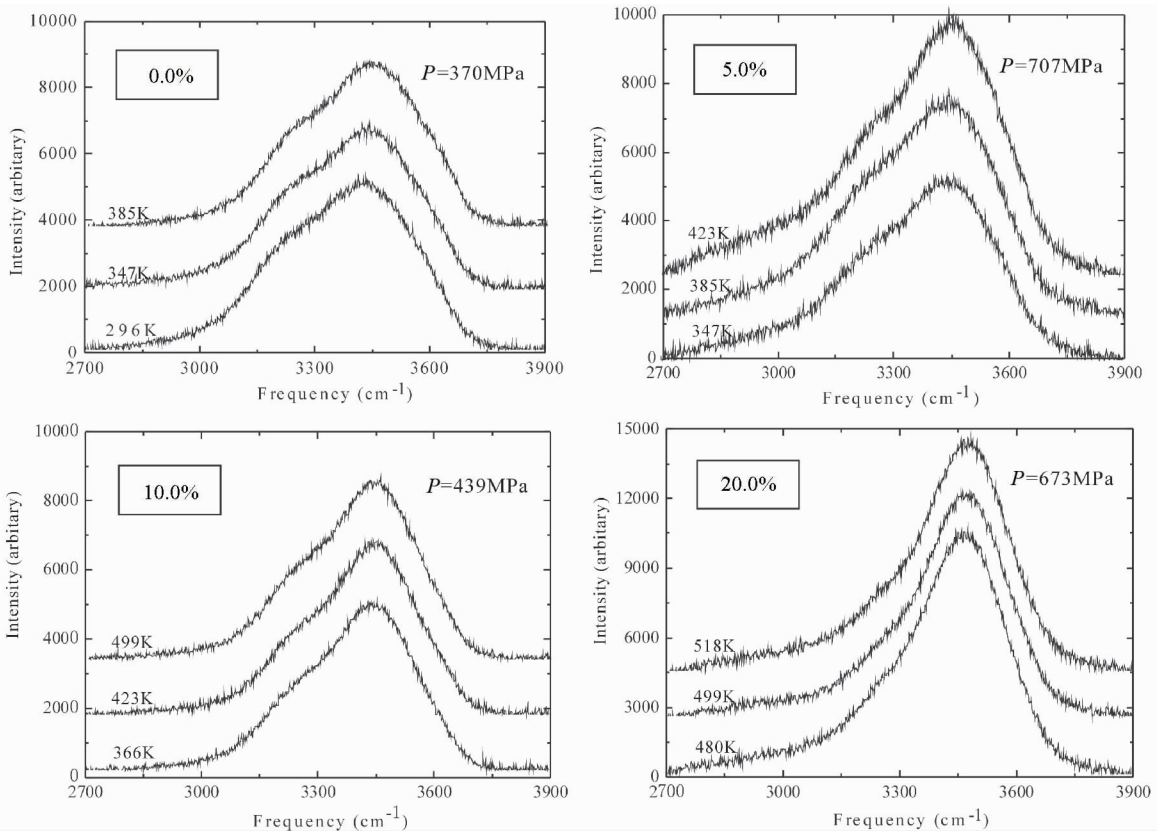


图2 高温高压下 0.0%、5.0%、10.0% 和 20.0% 的 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系的 Raman 谱峰

Fig.2 Raman spectra of the OH stretching bands of 0.0% , 5.0% , 10.0% and 20.0% NaCl-H<sub>2</sub>O system measured at high temperatures and pressures

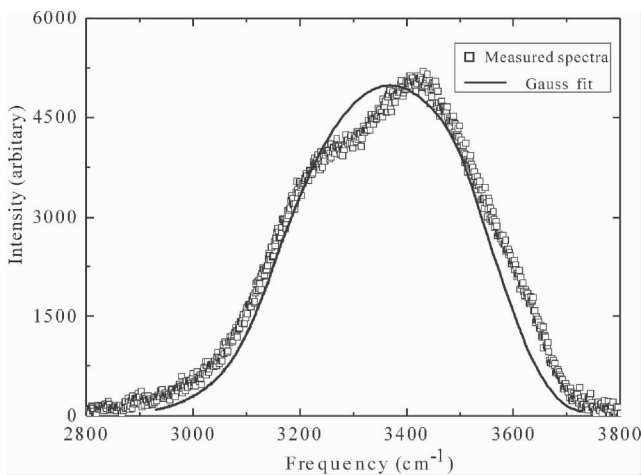


图3 温度 296K 和压力 370MPa 时测得的纯水的 Raman 谱峰及其拟合峰

Fig.3 Example of band component analysis on the Raman spectrum of pure water obtained at 296K and 370MPa

Raman 谱峰与压力之间的关系, 采用水峰的波数标准化差值  $\Delta\nu_{(0-H)}$  代替该温压条件下谱峰  $\nu_{0-H}$  的实测波数值 (Schmidt and Ziemann, 2000):

$$\Delta\nu_{(0-H)}(P_i, T_i) = \nu_{0-H}(P_i, T_i) - \nu_{0-H}(P_{ref}, T_{ref}) \quad (1)$$

其中  $\Delta\nu_{(0-H)}(P_i, T_i)$  为波数标准化差值,  $\nu_{0-H}(P_i, T_i)$  为不同温压条件下所测得谱峰的波数值,  $\nu_{0-H}(P_{ref}, T_{ref})$  为标准状态下该谱峰的基准值。本文的基准值采用常温常压 (296K, 0.1MPa) 时不同体系水的 Raman 伸缩谱峰的波数值, 对于本次实验及其采用的拟合参数, 0.0%、5.0%、10.0% 和 20.0% NaCl-H<sub>2</sub>O 体系的水峰基准值  $\nu_{0-H}(P_{ref}, T_{ref})$  分别为  $3400\text{cm}^{-1}$ 、 $3406\text{cm}^{-1}$ 、 $3416\text{cm}^{-1}$  和  $3440\text{cm}^{-1}$ 。采取这种数据处理方法可以有效降低可能存在的系统误差, 例如, 不同仪器测量的 Raman 位移的数值差异或不同学者在谱峰处理时采用的拟合参数差异。

图 4 是不同压力下 0.0%、5.0%、10.0% 和 20.0% NaCl-H<sub>2</sub>O 体系的波数标准化差值  $\Delta\nu_{(0-H)}$  与温度的关系图。由图可以看到: 对于盐度一定的 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系, 当压力不变时, 水的 Raman 伸缩谱峰 (水峰) 的  $\Delta\nu_{(0-H)}$  随温度的升高而不断增加, 且压力不同时,  $\Delta\nu_{(0-H)}$  随温度的增加的斜率基本相同。利用  $y = a + bx$  模型拟合不同压力下的数据, 其结果和相关数据见表 1。

结合图 4 和表 1 中的数据可以看到: 对于一定盐度的 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系, 不同压力下的拟合直线基本平行, 直线回归高度显著, 拟合结果可信度较高 (即置信水平  $\alpha$  为 0.01 时,

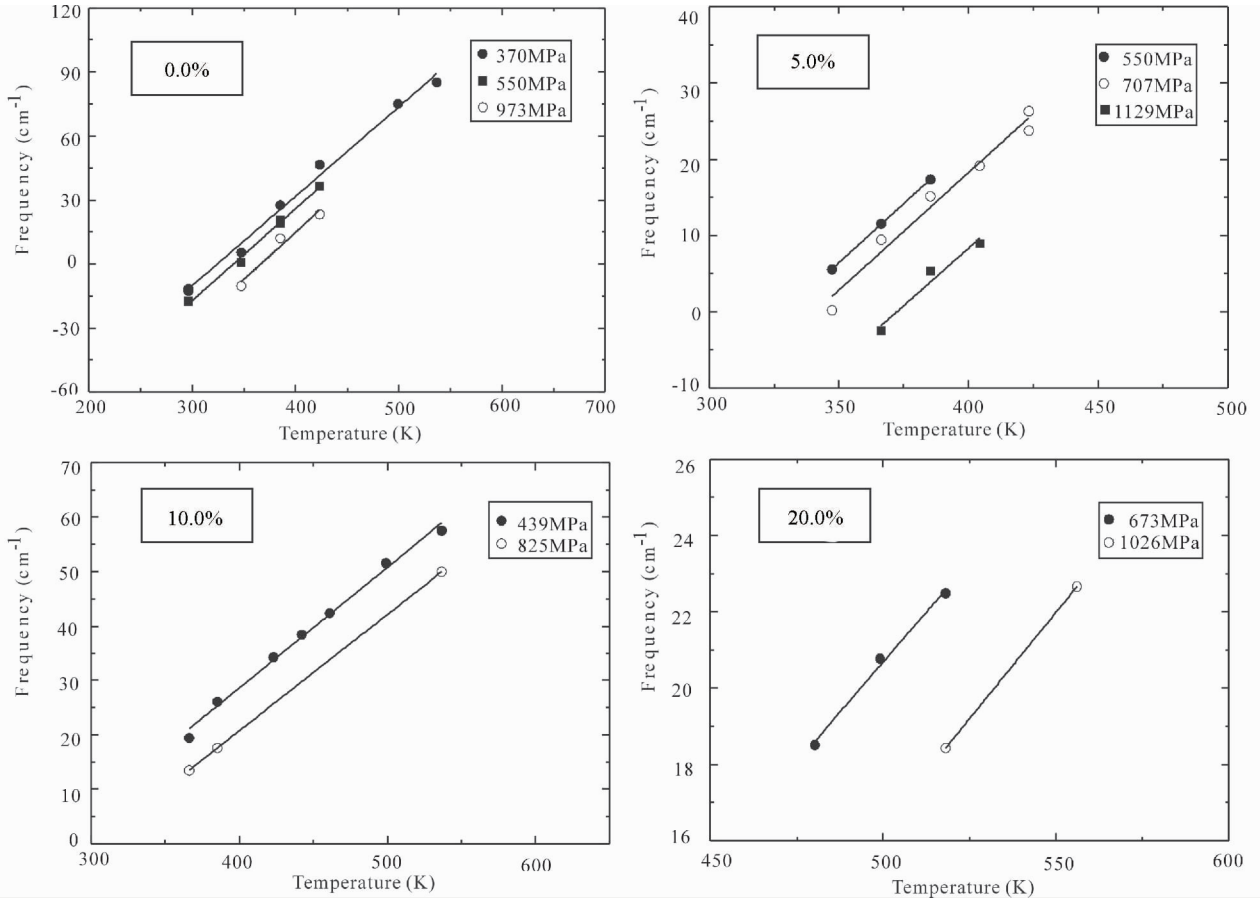


图4 不同压力下0.0%、5.0%、10.0%和20.0% NaCl-H<sub>2</sub>O体系的Raman伸缩谱峰的波数标准化差值 $\Delta\nu_{(O-H)}$ 与温度的关系图

Fig.4 Temperature dependence of frequency shift of the stretching vibration of 0.0%, 5.0%, 10.0% and 20.0% NaCl-H<sub>2</sub>O system at high pressures

表1 不同压力下0.0%、5.0%、10.0%和20.0% NaCl-H<sub>2</sub>O体系的Raman伸缩谱峰的波数标准化差值 $\Delta\nu_{(O-H)}$ 与温度( $T$ )的拟合方程及其偏移斜率的平均值

Table 1 The functions between temperature and frequency shifts of the stretching vibration of 0.0%, 5.0%, 10.0% and 20.0% NaCl-H<sub>2</sub>O system and their global slopes at high pressures

Salinity(wt%)	$P(\pm P)$ (MPa)	Fitting Function	$R^2$	Global Slope(Error)
0.0	370 ( $\pm 14$ )	$\Delta\nu_{(O-H)} = 0.419T - 135.874$	0.991	0.431 ( $\pm 0.0082$ )
	550 ( $\pm 13$ )	$\Delta\nu_{(O-H)} = 0.430T - 146.036$	0.992	
	973 ( $\pm 44$ )	$\Delta\nu_{(O-H)} = 0.443T - 162.406$	0.929	
5.0	550 ( $\pm 17$ )	$\Delta\nu_{(O-H)} = 0.301T - 112.468$	0.914	0.307 ( $\pm 0.0175$ )
	707 ( $\pm 16$ )	$\Delta\nu_{(O-H)} = 0.309T - 105.321$	0.969	
	1129 ( $\pm 26$ )	$\Delta\nu_{(O-H)} = 0.310T - 102.212$	0.999	
10.0	439 ( $\pm 16$ )	$\Delta\nu_{(O-H)} = 0.222T - 60.420$	0.992	0.218 ( $\pm 0.0041$ )
	825 ( $\pm 22$ )	$\Delta\nu_{(O-H)} = 0.214T - 64.974$	0.999	
20.0	673 ( $\pm 26$ )	$\Delta\nu_{(O-H)} = 0.105T - 31.957$	0.988	0.109 ( $\pm 0.0033$ )
	1026 ( $\pm 47$ )	$\Delta\nu_{(O-H)} = 0.112T - 39.532$	1	

相关系数大于临界值),表明该直线的斜率与压力无关。因此,不同压力下拟合直线斜率的平均值可以作为该体系在一定压力下 $\Delta\nu_{(O-H)}$ 随温度变化的斜率(即偏移斜率 $S$ )。

图5是不同盐度(0.0%、5.0%、10.0%和20.0%) NaCl-H<sub>2</sub>O体系的偏移斜率( $S$ )与溶液盐度( $W$ )的关系图。由图可以看到,随着盐度的增加,水峰的偏移斜率逐渐降低。这可

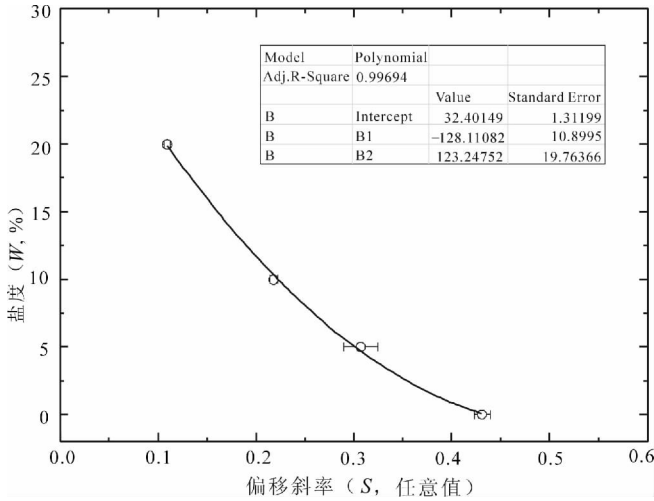


图5 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系的偏移斜率(S)与溶液盐度(W ≤ 20.0%)的关系

Fig.5 The relation between offset-slope(S) and salinity(W ≤ 20.0%) of NaCl-H<sub>2</sub>O system

以解释为盐度的增加使得温度对水分子中 H-O 振动的的影响减弱所致。偏移斜率(S)与溶液盐度(W)之间的二次多项式拟合结果为:  $W = 123.25S^2 - 128.11S + 32.40$ 。作者选取了一些实际测量的不同数据(可视为人工合成的流体包裹体样品)进行检验,结果表明其误差为 ±0.46%。

上述 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系水峰波数的标准化差值  $\Delta\nu_{(0-H)}$  对温度变化的斜率与盐度的关系可以用于确定天然流体包裹体的盐度,但条件是必须具有气-液两相的流体包裹体。另外,根据等压下水峰波数与温度关系的斜率为常数,因此需要获得压力不变但不同温度条件下的流体包裹体中水的 Raman 光谱波数值。

图6是利用水峰的偏移斜率测定流体包裹体盐度的示

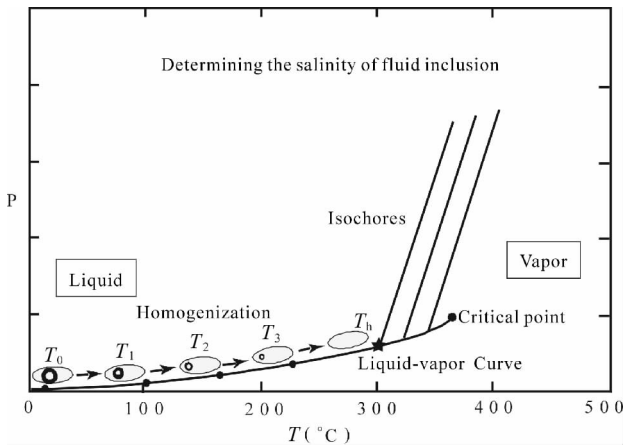


图6 水峰确定流体包裹体盐度的示意图  
Fig.6 Schematic diagram of the determination of salinity of fluid inclusion

意图。从图中可以看到,加热天然流体包裹体时,包裹体的状态沿气液平衡线变化,因此相对于均一温度以后的等容线变化,其内压变化很小。一般情况下,如果均一温度在 400°C 以下,包裹体的内压变化不会超过 10MPa,因此在均一温度之前的温度范围内可以视为等压条件。实际测量所需的仪器设备为一台显微热台和一台显微激光拉曼光谱仪,以下是液-气两相流体包裹体盐度测定的具体流程(图6):

(1) 包裹体中水峰的基准值测定

选择带有较大气泡的流体包裹体,测量此时包裹体中液相的 Raman 谱峰,得到流体的 Raman 伸缩谱峰的基准值,即:  $\nu(P_0, T_0)$ 。

(2) 包裹体均一温度前水峰的拉曼光谱测量

对包裹体样品进行缓慢加温,测量不同温度时包裹体液相部分的 Raman 谱峰( $\nu(P_1, T_1)$ ,  $\nu(P_2, T_2)$ ,  $\nu(P_3, T_3)$ , ……),直到包裹体完全均一到液相( $\nu(P_h, T_h)$ )。

(3) 包裹体盐度的计算

(a) 包裹体中水峰的波数标准化差值( $\Delta\nu$ )计算

将得到  $\nu(P, T_1)$ ,  $\nu(P_2, T_2)$ ,  $\nu(P_3, T_3)$  …… $\nu(P_h, T_h)$  分别减去基准值  $\nu(P_0, T_0)$ , 即可得到谱峰的波数标准化差值  $\Delta\nu(P_1, T_1)$ ,  $\Delta\nu(P_2, T_2)$ ,  $\Delta\nu(P_3, T_3)$  …… $\Delta\nu(P_h, T_h)$ 。

(b) 水峰的偏移斜率(S)拟合计算

利用该包裹体两个以上的波数标准化差值( $\Delta\nu$ )及其对应的温度(T)即可确定一条等压线( $\Delta\nu = A \cdot T + B$ ),其斜率A即水峰的偏移斜率S。

(c) 包裹体盐度的计算

根据偏移斜率与盐度的关系式( $W = 123.25S^2 - 128.11S + 32.40$ )即可得到流体包裹体的盐度。

对比已有的 Raman 光谱盐度测量方法,本方法不需要考虑流体包裹体溶液的谱峰形状,只要能够获得不同温度下包裹体溶液的 Raman 谱峰的波数标准化差值,即可获得盐度,且数据计算和处理简便,精度和可靠性较高。

## 4 结论

本文利用水热金刚石压腔(HDAC)研究了高温高压下 0.0%、5.0%、10.0% 和 20.0% 的 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系的拉曼光谱,提出了利用水的 Raman 谱峰的偏移斜率测定流体包裹体盐度的方法。主要结论如下:

(1) 对于盐度一定 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系,在等高压的条件下,其水峰的波数标准化差值  $\Delta\nu_{(0-H)}$  随温度变化的斜率只与盐度相关而与压力无关。

(2) 利用结论(1)可以用来确定流体包裹体的盐度,计算公式如下:

$W = 123.25S^2 - 128.11S + 32.40$ , 其测量误差为 ±0.46%。

## References

- Abe N and Ito M. 1978. Effects of hydrogen bonding on the Raman intensities of methanol, ethanol and water. *Journal of Raman Spectroscopy*, 7: 161 – 167
- Bodnar RJ. 2003. Introduction to aqueous-electrolyte fluid inclusions. In: Samson I, Anderson A and Marshall D (eds.). *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineral Assoc. Canada, Short Course, 32: 1 – 8, 81 – 99
- Bondarenko GV, Gorbaty YE, Okhulkov AV *et al.* 2006. Structure and hydrogen bonding in liquid and supercritical aqueous NaCl solutions at a pressure of 1000 bar and temperatures up to 500 degrees C; A comprehensive experimental and computational study. *The Journal of Physical Chemistry A*, 110: 4042 – 4052
- Cao SH, Zhang LF, Sun Q *et al.* 2006. A Raman spectroscopic study of phengite under high pressure. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1: 71 – 76 (in Chinese with English abstract)
- Ding JY, Ni P, Rao B *et al.* 2004. Evaluation of the laser Raman microprobe method for the determination of salinity in a single fluid inclusion by using synthetic fluid inclusions. *Geological Review*, 50 (2): 203 – 209 (in Chinese with English abstract)
- Fan HR, Guo JH, Hu FF *et al.* 2005. Fluid inclusions evidence for differential exhumation of ultrahigh pressure metamorphic rocks in the Sulu terrane. *Chinese Science Bulletin*, 50(11): 1139 – 1148
- Fang Z, Smith RL, Inomata H *et al.* 1999. Phase behavior and reaction of polyethylene terephthalate water systems at pressures up to 173 MPa and temperatures up to 490°C. *The Journal of Supercritical Fluids*, 15: 229 – 243
- Kawamoto T, Matsukage KN, Nishimura K *et al.* 2004a. Raman spectroscopy of cubic boron nitride under high temperature and pressure conditions: A new optical pressure marker. *Review of Scientific Instruments*, 75(7): 2451 – 2454
- Kawamoto T, Ochiai S and Kagi H. 2004b. Changes in the structure of water deduced from the pressure dependence of the Raman OH frequency. *Journal of Chemical Physics*, 120(13): 5867 – 5870
- Lu HZ, Fan HR, Ni P *et al.* 2004. *Fluid Inclusion*. Beijing: Science Press, 52 – 58 (in Chinese)
- Lü XB, Yao SZ and He MC. 2001. The determining of the salinity of the ore-forming fluid inclusions using MLRM. *Earth Science Frontiers*, 8 (4): 429 – 413 (in Chinese with English abstract)
- Mernagh TP and Wilde AR. 1989. The use of the laser Raman microprobe for determination of salinity in fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 765 – 771
- Ni P, Ding JY, Rao B *et al.* 2003. Studies on the synthetic fluid inclusions and their application to laser Raman spectrum analysis field. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 319 – 326 (in Chinese with English abstract)
- Ni P, Ding JY and Rao B. 2006. In situ cryogenic Raman spectroscopic studies on the synthetic fluid inclusions in the systems H<sub>2</sub>O and NaCl-H<sub>2</sub>O. *Chinese Science Bulletin*, 51(1): 108 – 114
- Okada T, Komatsu K, Kawamoto T *et al.* 2005. Pressure response of Raman spectra of water and its implication to the change in hydrogen bond interaction. *Spectrochim Acta A*, 61(10): 2423 – 2427
- Roedder E. 1984. Fluid inclusion. *Reviews in Mineralogy, Mineral Soc. Amer.*, 12: 644
- Scambelluri M and Philippot P. 2001. Deep fluids in subduction zones. *Lithos*, 55: 213 – 227
- Schmidt C and Ziemann MA. 2000. In-situ Raman spectroscopy of quartz: A pressure sensor for hydrothermal diamond-anvil cell experiments at elevated temperatures. *American Mineralogist*, 85: 1725 – 1734
- Shen K, Zhang ZM, Sun XM *et al.* 2005. Composition and evolution of ultrahigh-pressure metamorphic fluids: A fluid inclusion study of the drill cores from the main hole of Chinese Continental Scientific Drilling Program. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 489 – 504 (in Chinese with English abstract)
- Shepherd TJ, Rankin AH and Alderton DHM. 1985. *A practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. London: Blackie and Son Lim., 1 – 20
- Touret JL.R. 2001. Fluids in metamorphic rocks. *Lithos*, 55: 1 – 25
- Yang YP, Zheng HF and Sun Q. 2006. Evidence of discontinuities in the Raman spectra of water at high pressure. *Progress in Natural Science*, 16(1): 116 – 119 (in Chinese)
- Yang YP and Zheng HF. 2009. Pressure determination by Raman spectra of water in hydrothermal diamond-anvil cell experiments. *Applied Spectroscopy*, 63(1): 120 – 123
- Yang YP, Zheng HF and Sun Q. 2009. Evidence of discontinuities in the Raman spectra of aqueous NaCl solution at high pressure. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 29(6): 1573 – 1576 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LF, Lü Z, Zhang GB *et al.* 2008. The geological characteristics of oceanic-type UHP metamorphic belts and their tectonic implications: Case studies from southwest Tianshan and North Qaidam in NW China. *Chinese Science Bulletin*, 53(20): 3120 – 3130
- Zheng YF, Fu B, Gong B *et al.* 1998. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China; Implications for geodynamics and fluid regime. *Ear. Sci. Rev.*, 62, 105 – 161
- Zhou XZ, Zheng HF and Sun Q. 2006. In-situ Raman spectroscopic study of phase transition at high temperature and high pressure. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 3047 – 3051 (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

- 曹淑慧, 张立飞, 孙檣等. 2006. 高压下多硅白云母的拉曼光谱研究. *岩石矿物学杂志*, 1: 71 – 76
- 丁俊英, 倪培, 饶冰等. 2004. 显微激光拉曼光谱测定单个包裹体盐度的实验研究. *地质评论*, 50(2): 203 – 209
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培等. 2004. *流体包裹体*. 北京: 科学出版社, 52 – 58
- 吕新彪, 姚书振, 何谋春. 2001. 成矿流体包裹体盐度的拉曼光谱测定. *地学前缘*, 8(4): 429 – 413
- 倪培, 饶冰, 丁俊英等. 2003. 人工合成包裹体的实验研究及其在激光拉曼测定方法的应用. *岩石学报*, 19(2): 319 – 326
- 沈昆, 张泽明, 孙晓明等. 2005. 超高压变质流体的组成与演化: 中国大陆科学钻探工程主孔岩心的流体包裹体研究. *岩石学报*, 21(2): 489 – 504
- 杨玉萍, 郑海飞, 孙檣. 2006. 高压下水的 Raman 光谱不连续性的发现. *自然科学进展*, 16(1): 116 – 119
- 杨玉萍, 郑海飞, 孙檣. 2009. 高压下 NaCl 水溶液的不连续性的 Raman 光谱证据. *光谱学与光谱分析*, 29(6): 1573 – 1576
- 周兴志, 郑海飞, 孙檣. 2006. 高温高压下石膏脱水相变的原位拉曼光谱研究. *岩石学报*, 22(12): 3047 – 3051