

泥质岩脱水作用的高压差热实验研究*

李莹^{1,2} 唐红峰¹ 刘丛强¹ 侯广顺^{1,2}

LI Ying^{1,2}, TANG HongFeng¹, LIU CongQiang¹ and HOU GuangShun^{1,2}

1. 中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用地球化学研究室, 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

1. Laboratory for Study of Earth's Interior and Geofluids, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

2004-06-03 收稿, 2005-02-16 改回.

Li Y, Tang HF, Liu CQ and Hou GS. 2005. Experimental study on dehydration of pelite by high-pressure differential thermal analysis. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):986-992

Abstract Metamorphic dehydration in subduction zones plays a significant role in the genesis of slab-derived fluids and the generation and evolution of arc magmas. Because pelite is the typical representation of sediments within the upmost part of subducted slabs, it has been chosen as the starting materials for the experimental studies on the dehydration temperatures under high pressures from 1.5 to 4.0GPa by high-pressure differential thermal analysis (HP-DTA). The result shows that the dehydration temperatures have a closely negative linear correlation with the corresponding pressures. The comparison between this result and the general geothermal gradients in subduction zones worldwide suggests that the depth at which the metamorphic dehydration of pelite occur in subduction zones varies mostly in the range from 75 to 145km, which provides further experimental evidence for the location of arc magma origin.

Key words Pelite, Metamorphic dehydration, High-pressure differential thermal analysis

摘要 俯冲带变质脱水作用对俯冲带的流体形成、岩浆起源和演化起着重要的控制作用。泥质岩是俯冲板块表层沉积物的典型代表,本文以天然泥质岩为对象,成功运用高压差热分析(HP-DTA)方法对其在1.5~4.0GPa下的脱水温度进行了实验研究。结果表明,泥质岩的脱水温度与压力呈很好的负相关关系。通过与冷、热俯冲带地热梯度线比较,确定了泥质岩在俯冲带深部发生变质脱水作用的深度范围(75~145 km),为岛弧岩浆源区位置的解释提供了实验证据。

关键词 泥质岩; 变质脱水作用; 高压差热分析

中图分类号 P589.1

1 引言

大量研究证实,由于俯冲带流体对元素的分异作用,与洋壳俯冲作用相关的岛弧玄武岩相对于大洋中脊玄武岩,有明显富集 LILEs、LREEs 而亏损 HFSEs 的元素地球化学特征 (Kushiro, 1983; Tatsumi, *et al.*, 1986; Wilson, 1989; Peacock, 1993; Hawkesworth, *et al.*, 1994)。在洋壳俯冲带,尽管俯冲带流体主要来源于俯冲的蚀变洋壳,但越来越多的研究证实,随蚀变洋壳一起发生俯冲而进入俯冲带深部的大

洋沉积物,对俯冲带流体的形成同样起着不容忽视的作用 (Hawkesworth, *et al.*, 1997; You, *et al.*, 1996)。根据 Peacock (1990a) 的估算,俯冲带大洋沉积物通过变质脱水作用每年释放的变质流体量达 2.3×10^{11} kg,约占俯冲带流体总量 (10.9×10^{11} kg) 的 20%。在陆壳俯冲带,其岩浆产物也具有与洋壳俯冲带相似的元素特征和成因机制 (李曙光, 1999),但大陆玄武质岩石并未像大洋的那样,受到过海水蚀变作用而富含挥发分,因此陆壳沉积岩更是陆壳俯冲带流体的重要来源。

对大范围内深海沉积物的系统研究表明,全球发生俯冲

* 本文受中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-SW-124) 和国家自然科学基金项目 (40272038) 的资助。

第一作者简介: 李莹, 男, 1978 年生, 博士生, 流体地球化学和实验地球化学专业, E-mail: tracelement@sohu.com

的沉积物以陆源物质为主体(占76%),其组成与上部陆壳接近(Plank, *et al.*, 1998)。而泥质岩作为分布最广的一种沉积岩(占沉积岩总量的45%以上),不仅是大洋沉积物的主要物源,而且也具有与平均上陆壳相似的化学组成。同时,泥质岩的矿物组成中富含伊利石、绢云母、绿泥石和高岭石等粘土矿物,它们在一定的温度-压力条件下将发生脱水作用而产生自由的流体相,如含水的泥质岩在500℃、5kbar条件下的变质脱水作用过程中可以产生约12vol%(或5wt%)的H₂O和CO₂(Walther, *et al.*, 1982)。因此,泥质岩代表了在洋壳俯冲带发生俯冲作用的沉积物和在内陆俯冲带发生俯冲作用的沉积岩石。这就意味着俯冲带来自俯冲沉积物(岩)的流体主要来源于泥质岩。随着俯冲作用的进行,俯冲板块上部岩石所经历的温度和压力不断升高的过程,实际上是一个区域进变质过程(Wyllie, 1982),在此过程中泥质岩不断地发生变质脱水作用,所产生的流体构成了俯冲带流体的重要来源。

然而,已有的对俯冲带流体产生过程的认识,主要是基于对玄武质蚀变洋壳的研究。通过对蚀变玄武岩及其含水矿物的实验研究,揭示了来自蚀变洋壳的流体的产生过程、形成深度及流体对上覆楔形地幔的作用(Tatsumi, *et al.*, 1986; Tatsumi, 1989; Ulmer, *et al.*, 1995; Schmidt, *et al.*, 1998; Forneris, *et al.*, 2003)。而对起源于俯冲沉积物(岩)的流体的研究,尤其是实验研究还很薄弱,也就对这部分流体的形成机制、过程和深度等规律认识不足。为此,我们利用高温高压实验手段,以天然泥质岩为对象,研究其在相当于俯冲带榴辉岩相压力条件下的变质脱水作用,以阐明俯冲带沉积物(岩)的变质脱水过程、探讨俯冲带深度(即压力)与脱水反应温度的关系、俯冲带沉积物及含水矿物的稳定条件等,并对已有推论进行实验验证。本文报道的是我们对泥质岩在榴辉岩相条件下进行高压差热实验研究的结果。实验是在中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用地球化学研究室的大腔体高压设备上完成的,具体实验方法在后面详述。该研究室已在此设备上运用高压差热法成功地获得了单矿物-硬水铝石的高压差热曲线(王筑明等, 1991; 谢鸿森, 1997),本研究是在此基础上对实验方法进行了一定的改进后,将其成功地应用到岩石,获得了天然泥质岩石在1.5~4.0GPa压力范围内的脱水温度,进而讨论其地质意义。

2 实验

实验样品(LS-26)是采自庐山地区双桥山群的变泥质岩,该岩石在紧临大别山超高压变质带的赣北地区广泛分布,其形成时代为中元古代。岩石经历了浅变质作用,岩相学观察和X射线粉晶衍射分析结果表明,它主要由石英(12%)、斜长石(4%)、绿泥石(16%)、伊利石和绢云母(65%)组成。其矿物组成、主量元素(表1)和微量元素组成

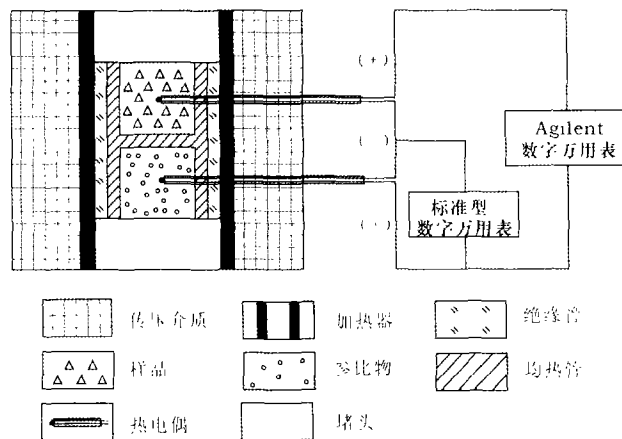


图1 样品组装剖面图

Fig. 1 Sketch of sample assembly for high-pressure differential thermal analysis.

与其它地区的后太古代泥质岩(如澳大利亚后太古代页岩)接近。实验前将样品研磨成细于200目的粉末,然后置于100~120℃的烘箱内烘烤24小时以除去吸附水。

表1 实验初始物的主量元素组成(%)

Table 1 Major element composition of starting material (%)

氧化物	含量	氧化物	含量
SiO ₂	63.31	CaO	0.60
TiO ₂	0.63	Na ₂ O	1.60
Al ₂ O ₃	17.89	K ₂ O	2.85
<FeO>	7.00	P ₂ O ₅	0.10
MnO	0.09	烧失量	4.28
MgO	1.50	总量	99.85

注:数据引自唐红峰等(2000), <FeO>表示全铁。

高压差热分析实验在YJ-3000吨紧装式六面顶压机上进行,图1为该方法的样品组装图。将样品和参比物分别装入均热管的上部和下部,再将校正过的两对热电偶分别插入样品和参比物中,实验过程中同步监测样品和参比物的温度。当样品发生脱水反应时,必然会引起热效应(一般会吸热),导致温度波动,如果所选择的参比物在此时不发生任何物理化学变化,不引起热效应,那么样品和参比物的温差 $\Delta T < 0$,差热曲线出现吸热谷,此时通过参比物中热电偶所记录的温度就是样品发生脱水反应的温度。该方法在YJ-3000吨紧装式六面顶压机上的应用始于20世纪80年代末期(谢鸿森等, 2003),本文在已有方法的基础上稍做改进,同样采用了Cu均热管,但样品管中间不打通,这样在使样品和参比物均匀受热的同时,又可以使两者分离,避免样品脱水过程中产生的流体进入参比物中,影响实验结果。此外还在实验中采用了Pt-Rh₁₀Pt热电偶,防止实验过程中由于热电偶被氧化造成的影响。两对热电偶分别插入样品和参比物中,两

结点位置对称,其距离为8mm,处于由均热管形成的等温区中。传压介质采用叶蜡石立方块,其规格为:32mm×32mm×32mm,为避免外界吸附水和结晶水对实验结果的影响,将叶蜡石立方块焙烧至600℃。叶蜡石堵头、绝缘用的氧化铝管和氧化铝参比物都焙烧至1000℃,以完全除去结晶水和吸附水。实验时将两对热电偶正极连接到Agilent数字万用表上,记录样品和参比物之间的热电势差,该万用表与计算机连接实现自动实时记录,记录精度达到 10^{-9} V。同时利用另一万用表记录参比物中的温度。

实验中先将压力缓慢升到预定值,然后将温度控制程序输入到压机的温度控制系统中,以20℃/min的速度匀速升温。热电势差和温度同步记录,记录速度为每2秒钟一次。运用上述方法先进行了氧化铝的空白实验,获得较平直的差热曲线,表明被焙烧过的氧化铝在1.5~4.0GPa,室温~1200℃条件下没有热效应产生,是理想的参比物材料。实验过程中温度和压力的测量误差分别为 $\pm 5^\circ\text{C}$ 和 $\pm 0.1\text{GPa}$ 。

3 结果及讨论

对天然泥质岩分别进行了1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0GPa条件下的高压差热分析实验,分别获得了对应压力下的差热曲线(图2),以各曲线上吸热谷谷底位置所对应的温

度作为泥质岩的脱水温度,结果见表2。

为了获得样品较完整的差热曲线,在高压差热实验中单次实验的最后温度都超过了1000℃,这样最后的实验产物已经发生了强烈的部分熔融,不能用作矿物相变研究,为此另外对泥质岩进行了脱水作用恒温恒压实验。为了使样品的脱水作用进行得更加完全而有利于相变研究,设定恒温恒压实验的温度略高于差热实验所确定的脱水温度,并且在恒定的温度压力下保持10小时以上,从而能够使产物中矿物晶体尽可能生长的大些。对比恒温恒压实验产物与实验初始岩石的X射线粉晶衍射图谱可以看到,原岩中的含水矿物绿泥石、伊利石和绢云母的衍射峰消失,而在产物中出现了石榴子石、蓝晶石等无水矿物和新的含水矿物黑云母,部分产物中出现了很好的柯石英衍射峰(表3,图3)。这些实验产物的矿物组合说明实验过程中样品发生了后面所述的变质脱水反应(I)和(II)。

表2 1.5~4.0GPa下泥质岩脱水温度

Table 2 Dehydration temperatures of pelite under pressures from 1.5 to 4.0GPa

压力(GPa)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
脱水温度(℃)	800	740	720	660	640	625

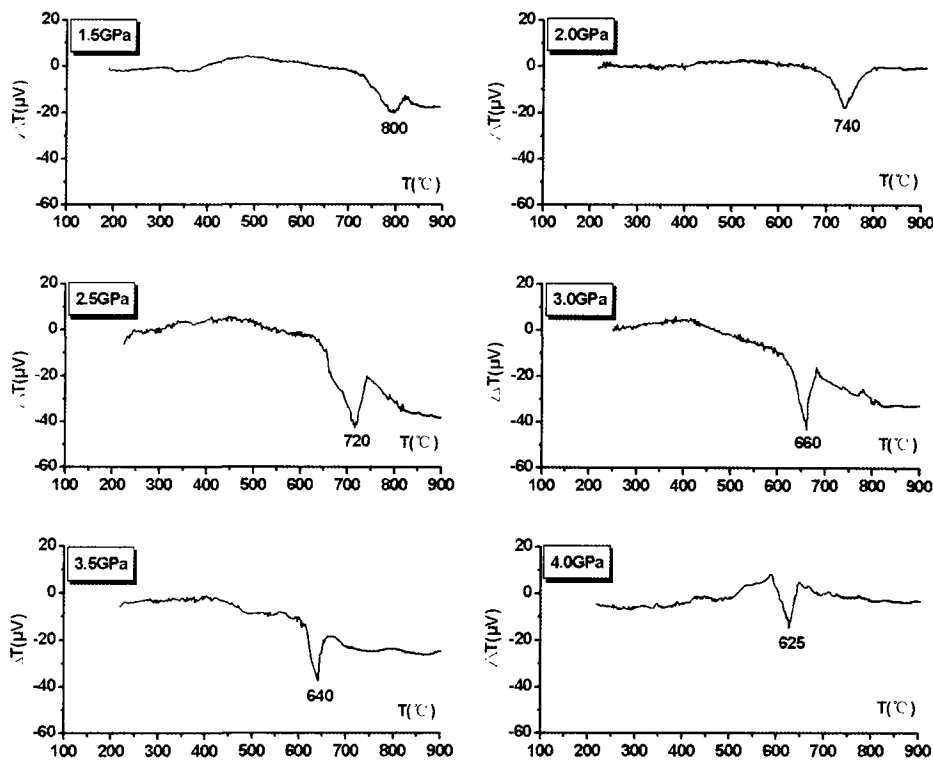


图2 1.5~4.0GPa下泥质岩差热曲线

Fig. 2 High-pressure differential thermal curves of pelite at 1.5~4.0 GPa.

表3 原岩和部分恒温恒压实验产物的矿物相组成

Table 3 Mineral composition of the starting material and run products under constant P-T conditions

样品号	实验条件			矿物组成
	P (GPa)	T (°C)	T (hour)	
LS-26	原岩			石英, 伊利石(绢云母), 绿泥石, 斜长石
Run 18	1.5	820	40	石英, 石榴子石, 黑云母, 蓝晶石
Run 25	2.8	930	10	石英, 石榴子石, 黑云母, 蓝晶石
Run 26	3.0	900	10	石英, 石榴子石, 黑云母, 蓝晶石, 斜长石
Run 16	3.5	840	11	柯石英, 石榴子石, 黑云母

注: 矿物组成为 X 射线衍射分析结果.

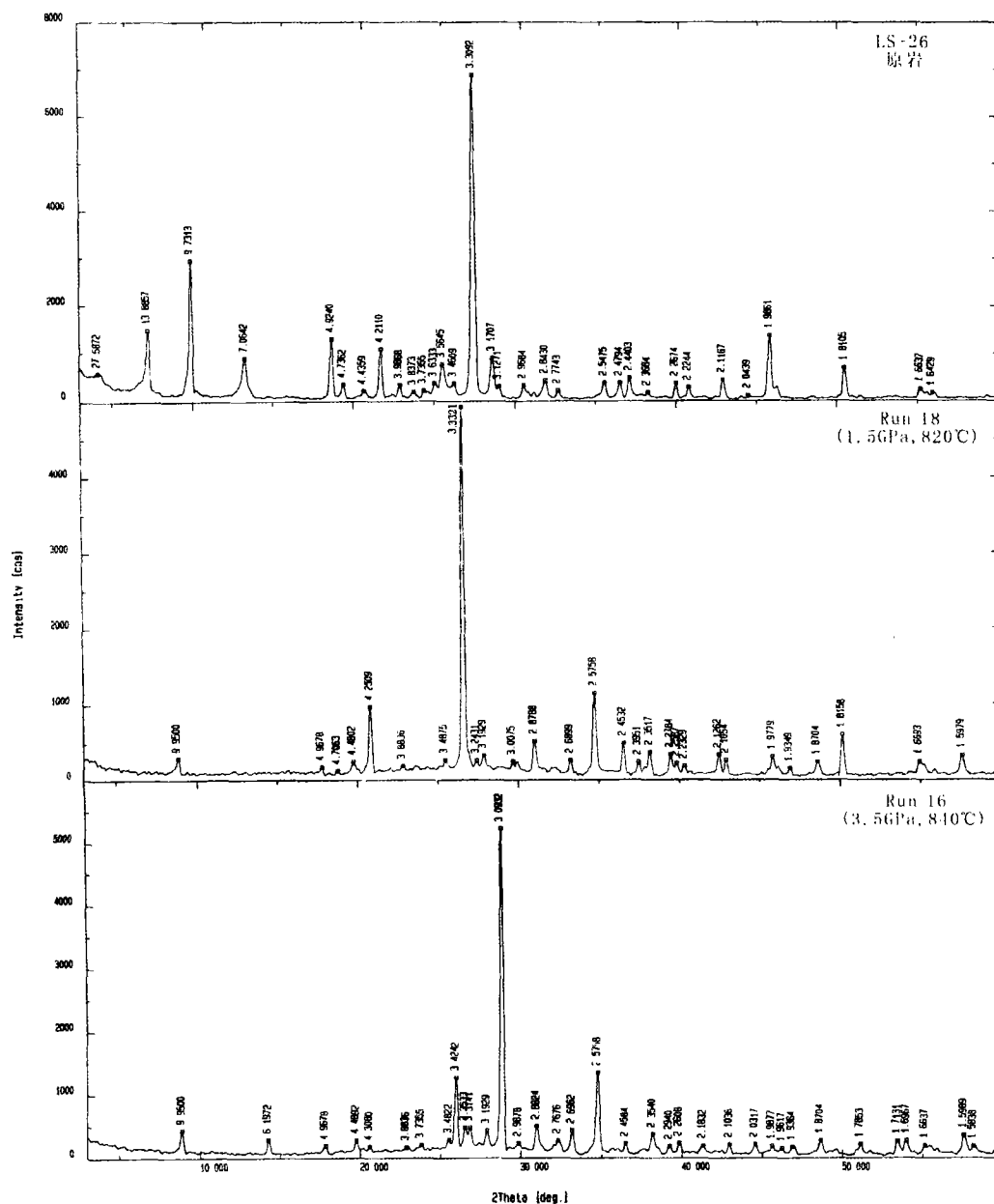


图3 泥质岩及部分恒温恒压实验产物的 X 射线粉晶衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of pelite and run products under constant P-T conditions

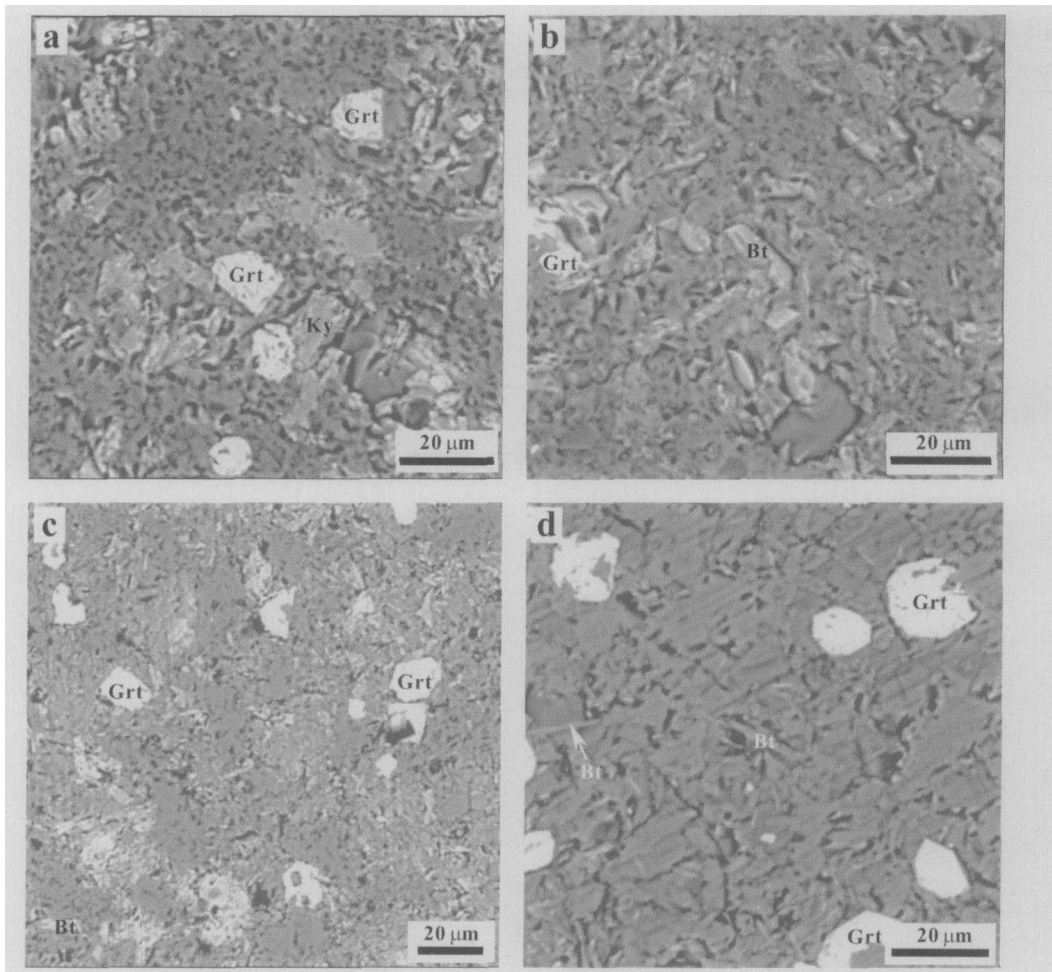


图4 部分泥质岩恒温恒压实验产物的背散射电子像(实验条件:(a)和(b) 1.5GPa, 820°C, (c)2.5GPa, 780°C, (d) 3.0GPa, 900°C, Grt-石榴子石, Ky-蓝晶石, Bt-黑云母)

Fig. 4 BSE images of some run products under constant P-T conditions.

表4 部分恒温恒压实验产物的矿物化学组成(%)

Table 4 Chemical composition of minerals from some run products under constant P-T conditions (%)

Run No.	石榴子石 18	蓝晶石 18	石榴子石 25	蓝晶石 25	石榴子石 23	黑云母 23	石榴子石 26
P (GPa)	1.5	1.5	2.8	2.8	2.5	2.5	3.0
T (°C)	820	820	930	930	780	780	900
SiO ₂	36.98	25.75	37.78	36.28	36.23	39.01	37.06
TiO ₂	0.26	0.61	0.41	0.27	0.56	1.49	0.32
Al ₂ O ₃	20.90	52.57	21.30	60.23	20.43	21.06	21.82
Cr ₂ O ₃	0.06	0.04	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00
FeO	31.55	15.30	30.01	2.19	33.80	15.43	30.80
MnO	2.82	0.21	0.64	0.00	1.50	0.00	0.31
MgO	4.80	2.52	8.42	0.28	4.09	8.76	8.00
CaO	1.92	0.05	1.98	0.00	2.84	0.01	1.07
Na ₂ O	0.03	0.01	0.08	0.00	0.18	0.63	0.12
K ₂ O	0.01	0.03	0.04	0.04	0.03	8.19	0.02
NiO	0.04	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.01
总量	99.37	97.09	100.73	99.29	99.67	94.62	99.53

注:矿物化学组成由中国科学院地质与地球物理研究所的SX-51电子探针分析.

所完成的高压差热实验结果(表2,图2)显示,赣北双桥山群泥质板岩的脱水温度与压力呈较好的线性关系,其最小二乘法拟合的脱水温度-压力的线性方程为:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 892(\pm 22) - 70.6(\pm 7.6)P(\text{GPa})(r = -0.98),$$

式中 T 为脱水温度、 P 为压力、 r 为相关系数。由上述拟合结果可见该泥质岩的脱水温度与压力呈很好的负相关关系(图5),即脱水温度随压力升高而降低,这一结果的机制可以从以下几方面考虑。

(1) 泥质岩变质脱水反应的产物中含有一定量的水,由 Maxwell 关系式:

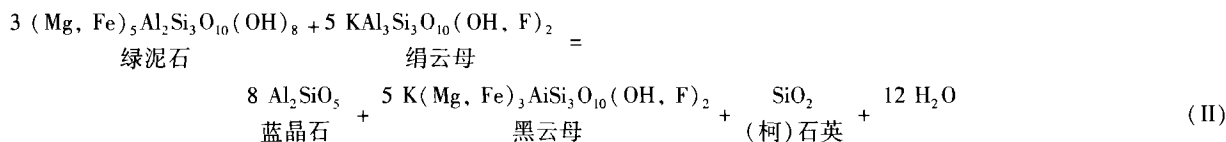
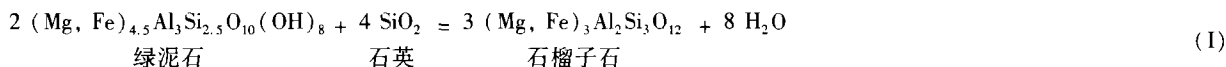
$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{\Delta G=0} = \frac{\Delta S}{\Delta V_s + \Delta V_f} = \frac{\Delta S}{\Delta V}$$

(G -吉布斯自由能, T -温度, P -压力, V_s -固相体积, V_f -液相体积, ΔS -反应过程中熵变, ΔV -反应过程中体积变化)可知,某一反应发生的温度与压力间的关系取决于反应

的 ΔS 和 ΔV 。一般脱水反应为吸热反应, $\Delta S > 0$, 而 ΔV 则主要取决于 ΔV_f , 不同压力条件下水的物理化学性质, 尤其是体积会发生很大变化 (Brodholt, *et al.*, 1993), 该变化导致等式右端 ΔV 随压力变化而变化 (Tatsumi, *et al.*, 1995), 因此, 等式左端反应发生的温度也将随压力变化而改变。

(2) 实验初始物-泥质岩主要由绢云母、绿泥石等层状硅酸盐矿物组成, OH^- 存在于这些矿物中的四面体层和八面体层之间, 压力的改变会导致矿物晶胞参数改变, 四面体层和八面体层间距也会改变, OH^- 的稳定性也就随之变化 (Tatsumi, 1989), 这也必将导致整个泥质岩石体系脱 OH^- 的温度随压力的变化而改变。

(3) 岩石相对于单个矿物属于复杂体系, 不同的温压条件下岩石中各种矿物会发生一系列的变质反应, 各反应之间又会相互影响。随温度压力不断升高, 俯冲带沉积物中发生的两个典型的变质脱水反应为 (Tatsumi, *et al.*, 1995):



本实验初始物主要有含水矿物绢云母和绿泥石(含量超过了80%),并含一定量的石英(12%),恒温恒压实验产物中生成了石榴子石、蓝晶石、柯石英和黑云母(表3),所以该岩石在变质脱水作用过程中将主要发生以上两个变质脱水反应,部分实验产物的电子探针分析结果也证实如此(图4,表4)。根据热力学计算,这两个反应在1.5GPa以上发生的温度与压力均呈负相关关系(Banno, *et al.*, 1986; Delany, *et al.*, 1978),受其控制,泥质岩体系在高于1.5GPa条件下,其脱水温度将随着压力升高而降低。

在板块俯冲带,由于受剪切热(shear heating)、俯冲角(subduction angle)、俯冲速率(rate of subduction)、岩石密度等因素影响,不同的俯冲带有着不同的地热梯度。一般在年轻的、热的俯冲带,地热梯度最大值约为10°C/km(Ahrens, 1989),在成熟的、冷的俯冲带,地热梯度约为4°C/km(Ahrens, 1989; Peacock, 1990b),根据这两个地热梯度值分别得出冷俯冲带和热俯冲带的地热梯度线(图5)。它们与本文所获泥质岩脱水温度-压力线的交点是:(4.3GPa, 587°C)和(2.2GPa, 740°C),这两个交点的压力值分别对应的深度约为145km和75km。由于4°C/km~10°C/km代表了地球上俯冲带的热结构范围,所以一般俯冲带的地热梯度线与泥质岩脱水温度-压力线的交点所对应的深度将在75~145km之间,它代表了泥质岩在板块俯冲带发生脱水作用的大致深度范围。这一结果与前人通过实际地质观察和从

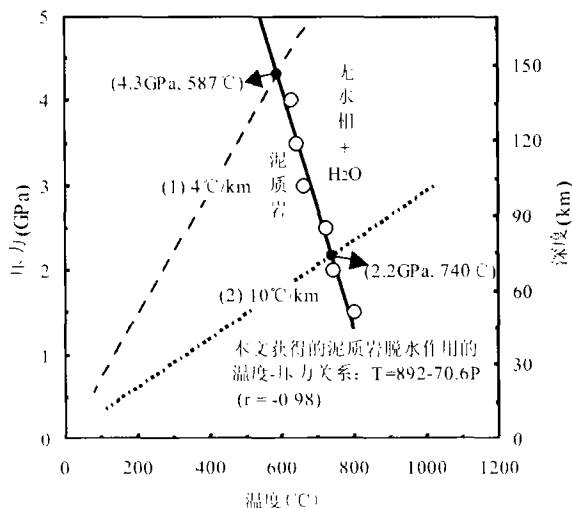


图5 泥质岩变质脱水温压范围及其与地热梯度线的比较(俯冲带地热梯度据 Ahrens, 1989; Peacock, 1990b)
Fig. 5 Comparison between the results of this study and the geothermal gradients of cold and hot subduction zones

玄武岩体系实验研究得到的,岛弧岩浆源区位于俯冲板片约90~150km深度范围(Tatsumi, 1989; Saunders, *et al.*, 1991)的结论相一致。因此,本文从沉积物的角度,为俯冲带流体形成和岩浆起源提供了进一步的实验证据。

致谢 谢鸿森教授和周文戈研究员在实验过程中给予了悉心指导,在此深表谢意。

References

- Ahrens T J. 1989. Water storage in the mantle. *Nature*, 342: 122 - 123
- Banno S, Sakai C and Higashino T. 1986. Pressure-temperature trajectory of the Sanbagawa metamorphism deduced from garnet zoning. *Lithos*, 19: 51 - 63
- Brodholt J and Wood B. 1993. Simulations of the structure and thermodynamic properties of water at high pressure and temperatures. *J. Geophys. Res.*, 98(B1): 519 - 536
- Delany J M and Helgeson H C. 1978. Calculation of the thermodynamic consequences of dehydration in subducting oceanic crust to 100 KB and >800°C. *American Journal of Science*, 278: 638 - 686
- Forneris J F and Holloway J R. 2003. Phase equilibria in subducting basaltic crust: implications for H₂O release from the slab. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 214: 187 - 201
- Hawkesworth C J, Gallagher K, Hergt J M and McDermott F. 1994. Destructive plate margin magmatism: Geochemistry and melt generation. *Lithos*, 33: 169 - 188
- Hawkesworth C J, Turner S P, McDermott F, Peate D W and van Calsteren P. 1997. U-Th isotopes in arc magmas: Implications for element transfer from the subducted crust. *Science*, 276: 551 - 555
- Kushiro I. 1983. On the lateral variation in chemical composition and volume of Quaternary volcanic rocks across Japanese arcs. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 18: 435 - 447
- Li S G. 1999. Geodynamics of the continental subduction chemistry. In: Zheng Yongfei. *Chemical geodynamics*. Beijing: Science Press, 334 - 357. (in Chinese)
- Peacock S M. 1993. The importance of blueschist-eclogite dehydration reactions in subducting oceanic crust. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 105: 684 - 694
- Peacock S M. 1990a. Fluid processes in subduction zones. *Science*, 248: 329 - 337
- Peacock S M. 1990b. Numerical simulation of metamorphic pressure-temperature-time paths and fluid production in subducting slabs. *Tectonics*, 9: 1197 - 1211
- Plank T and Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chem. Geol.*, 145: 325 - 394
- Saunders A D, Norry M J and Tarney J. 1991. Fluid influence on the trace element compositions of subduction zone magmas. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A335: 377 - 392
- Schmidt M W and Poli S. 1998. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 163: 361 - 379
- Tang H F and Liu C Q. 2000. Mass transfer and element mobility of rocks during regional metamorphism - a case study of metamorphosed pelites from the shuangjiaoshan group in Lushan. *Geological Review*, 46(3): 245 - 254. (in Chinese with English abstract)
- Tatsumi Y, Hamilton D L and Nesbitt R W. 1986. Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: Evidence from high-pressure experiments and natural rocks. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 29: 293 - 309
- Tatsumi Y. 1989. Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones. *J. Geophys. Res.*, 94(B4): 4697 - 4707
- Tatsumi Y and Eggins S. 1995. *Subduction Zone Magmatism*. USA: Blackwell Science, Inc., 100 - 105
- Ulmer P and Trommsdorff V. 1995. Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism. *Science*, 268: 858 - 861
- Walther J V and Orville P M. 1982. Volatile production and transport in regional metamorphism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 79: 252 - 257
- Wang Z M, Xie H S, Zhang Y M and Xu H G. 1991. Ultra-pressure differential thermal determination of diasporite. *Chinese Science Bulletin*, 36(18): 1545 - 1548
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis: a global tectonic approach*. London: Unwin Hyman, 466pp
- Wyllie P J. 1982. Subduction products according to experimental prediction. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 93: 468 - 476
- Xie H S. 1997. *An Introduction to Material Science in the Earth's Interior*. Beijing: Science Press, 69 - 70. (in Chinese)
- Xie H S, Zhou W G, Liu Y G, Guo J and Hou W. 2003. Some experimental methods for determining physical properties of materials in the Earth's interior. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 357 - 365. (in Chinese with English abstract)
- You C F, Castillo P R, Gieskes J M, Chan L H and Spivack A J. 1996. Trace element behavior in hydrothermal experiments: Implications for fluid processes at shallow depths in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 140: 41 - 52

附中文参考文献

- 李曙光. 1999. 大陆俯冲化学地球动力学. 见:郑永飞主编,化学地球动力学,北京:科学出版社,334 - 357
- 唐红峰,刘丛强. 2000. 区域变质作用中岩石的质量迁移和元素活动—以庐山双桥山群变泥质岩为例. *地质论评*, 46(3): 245 - 254
- 王筑明,谢鸿森,张月明,徐惠刚. 1991. 硬水铝石的超高压差热测量. *科学通报*, 36(6): 451 - 453
- 谢鸿森,周文戈,刘永刚,郭捷,侯渭. 2003. 地球深部物质的某些物性测量方法研究. *地学前缘*, 10(2): 357 - 365
- 谢鸿森. 1997. *地球深部物质科学导论*. 北京:科学出版社,69 - 70