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*

沈昆[1] 张泽明[2**] 孙晓明[3] 徐莉[3]

SHEN Kun, ZHANG ZeMing, SUN XiaoMing and XU Li

1. 山东省地质科学实验研究院，济南 250013
2. 中国地质科学院地质研究所，北京 100037
3. 中山大学地球科学系，广州 510275

1. *Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences*, *Jinan* 250013, *China*
2. *Institute of Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*
3. *Department of Earth Science*, *Zhongshan Unuversity*, *Guangzhou* 510275, *China*

2005-01-28 收稿，2005-03-02 改回.

Shen K, Zhang ZM, Sun XM and Xu L. 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**

Abstract The main hole of the Chinese continental scientific drilling project is located in Donghai county in the east segment of the Dabie-Sulu ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt. With a depth of 5100 m, the lithology of the upper part 2050 m of the hole consists mainly of eclogite, ortho- and paragneisses, garnet peridotite (pyroxenite) and some schist and quartzite. These rocks have experienced UHP metamorphism and later amphibolite-facies retrogression. Five types of fluid inclusions with different compositions are found in the rocks by detailed petrographic observation and Raman analysis of fluid inclusions. They are: (1) aqueous inclusions of medium-low salinity (type I) which occur either as primary inclusions in the magmatic cores and UHP-metamorphic rims of zircon grains of eclogite and gneisses, in omphacite, zoesite and in calcite- and quartz blebs encompassed by omphacite, or as exsolution inclusions in apatite, or mainly as secondary inclusions along transgranular fractures in omphacite, garnet, kyanite, zoesite and quartz of eclogite; aqueous inclusions also occur in isolation or cluster in calcite veins crosscutting eclogite, in recrystallized garnet and epidote in gneiss; (2) CO_2(CH_4)-H_2O inclusions (type II) which are present in both magmatic cores and metamorphic rims of zircon and are distributed along quartz fractures; (3) complex saline inclusions containing halite ± SiO_2 ± $CaCO_3$ which either occur as primary inclusions in omphacite of eclogite, coexisting with quartz rods and paralleling to the c-axis of omphacite, or distributed along intragranular fractures in diopside of garnet pyroxenite; (4) CO_2 rich inclusions (type IV) which are distributed randomly in quartz of eclogite; and (5) monophase gas inclusions (type V) which occur randomly or along fractures of various minerals. The occurrence of fluid inclusions and their relative chronology suggest that the inclusions of types I and II occurred in the protoliths, in the peak- and retrograde stages of UHP metamorphic rocks but the type III was present primarily in the early decompression-retrogression stage of UHP rocks, whereas types IV and V were trapped mainly in the amphibolite-facies or later stages.

This study gains the following understanding: (1) The low-salinity H_2O and CO_2 fluids are present in all the prograde-, peak- and retrograde metamorphic stages, suggesting that the fluids were inherited during the entire UHP metamorphic evolution. (2) While fluid inclusions are abubdant in the protoliths of UHP rocks and in the amphibolite-facies rocks those trapped in the peak stage are rare, implying that abundant fluids contained in the protoliths were removed from the rock system or entered into UHP hydrous minerals or nominally anhydrous minerals. (3) The identification of primary inclusions with complex composition demonstrates that a melt-like fluid was present in the early decompression-retrograde stage after the peak UHP metamorphism and nominally anhydrous minerals

* 本文得到了国家重点基础研究发展规划项目(973 计划：2003CB716501)和国家自然科学基金重大项目(40399142)，国土资源部科技项目(2002207)资助.

第一作者简介：沈昆，男，1939 年生，教授级高级工程师，矿物岩石学专业，E-mail：shenkun@sdu.edu.cn

** **通讯作者**：张泽明，E-mail：zzm@ccsd.org.cn

might hold a significant amount of fluids under UHP conditions and released in retrograde process, resulting in fluid-rock interactions. (4) Fluid inclusions trapped in the amphibolite-facies stage have various compositions and they are concentrated locally and may partly derived from external fluids. (5) Great differences in type, abundance and composition of fluid inclusions exist in different lithologies and depths of the drill hole, suggesting that there was no large-scale pervasive fluid flow during UHP metamorphism. (6) The pressures obtained from the isochores of the fluid inclusions trapped during the peak of UHP metamorphism are mush less than the peak metamorphic pressures as derived from the mineral thermobarometers, indicating density changes of the fluid inclusions due to fluid leakage, partial decrepitation and fluid-rock interactions, etc.

Key words Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD), Ultrahigh-pressure metamorphic rock, Fluid inclusion, Composition and evolution of metamorphic fluids, Microthermometry

摘 要 中国大陆科学钻探工程主孔位于大别-苏鲁超高压变质带东段的江苏东海县,孔深为5100m,其上部2050m钻遇的岩石主要为榴辉岩,其次是正、副片麻岩、石榴橄榄(辉石)岩以及少量片岩和石英岩。它们经历了超高压变质作用和随后的角闪岩相退变质作用。通过对上述各种岩石的详细流体包体观察和RAMAN光谱分析,发现了五种不同成分的流体包裹体:(1)中-低盐度水溶液包裹体(I型),呈原生的孤立和小群存在于榴辉岩和片麻岩锆石的岩浆核和超高压变质边缘,或存在于绿辉石、黝帘石和被绿辉石包裹的方解石和石英中,偶尔呈出溶包裹体产于磷灰石中,而主要沿绿辉石、石榴石、蓝晶石、黝帘石和石英等矿物的穿颗粒裂隙分布;也呈孤立和小群产于切穿榴辉岩的方解石脉和片麻岩重结晶石榴石和绿帘石中;(2) $CO_2(\pm CH_4)-H_2O$ 包裹体(II型),存在于锆石的岩浆核和变质边缘,或沿石英裂隙分布;(3)含石盐 $\pm SiO_2 \pm CaCO_3$ 的复杂盐水包裹体(III型),呈原生流体包裹体产在榴辉岩的绿辉石中,与石英出溶棒一起平行于绿辉石的C轴分布,或产在石榴辉石岩透辉石的晶内裂隙中;(4)富 CO_2 包裹体(IV型),在榴辉岩的石英中随机分布;(5)单气相包裹体(V型),沿各种矿物穿颗粒裂隙分布。流体包裹体产状及其与捕获时代关系表明,I型和II型包裹体可以出现在超高压变质岩原岩、峰期变质和退变质各阶段。III型包裹体出现在超高压变质岩的早期减压退变质阶段。而IV型和V型包裹体主要形成于角闪岩相及更晚的退变质阶段。

本研究的主要认识是:(1)低盐度 H_2O 和 CO_2 流体在进变质、超高压变质和退变质作用各阶段均有存在,这表明在整个超高压变质演化过程中流体具有继承性。(2)超高压变质岩原岩和角闪岩相退变质岩中存在较丰富的流体包裹体,但在超高压峰期捕获的流体包裹体却很少见,这表明丰富的原岩流体或在超高压进变质过程中被排出岩石体系,或进入含水超高压矿物和结合进名义无水矿物。(3)复杂成分原生流体包裹体的发现证明在超高压变质峰期后的早期减压退变质阶段存在一种高盐度似熔体流体,名义上的无水矿物在超高压条件下可以保存相当量的流体,并在退变质过程中分离出来,产生流体-岩石相互作用。(4)角闪岩阶段的流体包裹体具有各种不同的化学组成,且在局部富集,推测可能有部分外部加入的流体。(5)流体包裹体类型、丰度和成分在不同岩石类型中和不同钻孔深度都存在明显差异,表明超高压变质作用过程中没有大规模的透入性流体活动。(6)根据超高压变质峰期包裹体等容线得到的压力值大大低于根据矿物温压计获得的近峰期变质压力,这表明包裹体的密度在捕获后发生了改变。这些改变是由于流体渗漏、部分爆裂和流体-岩石相互作用所引起。

关键词 中国大陆科学钻探;超高压变质岩;流体包裹体;变质流体组成与演化;显微测温

中图法分类号 P588.348;P594.1

1 引言

大量研究表明,在洋壳俯冲、陆-陆碰撞和俯冲环境中发生的高压-超高压变质过程中存在着流体,这些流体可以是表生沉积物在埋藏和压实期间脱水-脱挥发分的产物,或是进变质期间含水矿物分解释放出来的,这些流体活动对于超高压变质矿物的生长演化、变质反应的温压条件、元素的迁移和富集、岩石构造变形和部分熔融作用都有着重要影响(Bebout,1991; Bebout,1996; Peacock,1990,1993; Phillipot and Selverstone,1991; Philippot,1993; 郑永飞等,1999,2004)。

对俯冲带高压-超高压变质岩中流体的组成、性质、来源和演化已有许多报道(Holland,1979; Andersen *et al.*,1989,1991,1993; Klemd *et al.*,1992; Liou *et al.*,1995; You *et al.*,1996; Shen *et al.*,1996; Scambellury and Philippot,2001; Touret,1992,2001; Xiao *et al.*,2000,2001; Franz *et al.*,2001; Fu *et al.*,2001,2003; 沈昆等,2003; 刘福来和许志琴,2004; Zhang *et al.*,2004)。与下地壳相对"干"的环境中形成的麻粒岩不同,产在板块俯冲带的超高压岩石(榴辉岩等)是在水活度相对增高的条件下形成的。Andersen *et al.*(1989,1993)基于对挪威加里东造山带榴辉岩和高压麻粒岩及其退变质产物中流体包裹体的研究,提出流体组成与变质程度之间存在着一定关系:麻粒岩相原岩含纯 CO_2 或 CO_2 为主的流体,榴辉岩和高压麻粒岩以含有氮流体(纯 N_2 或 N_2 与 H_2O/CO_2 的混合物)为特征;有时,CO_2-N_2 包裹体与盐水包裹体共存,代表了峰期存在的不混溶流体;而角闪岩相退变质岩石主要含 $H_2O-NaCl$ 流体。Klemd *et al.*(1992)在德国Munberg榴辉岩相变沉积岩中也发现了密度极高的 CO_2-N_2 包裹体。然而,欧洲阿尔卑斯造山带的一些高压岩石是在高水活度条件下形成的(Holland,1979)。Phillipot *et al.*(1991,1995)、

Philippot(1993,1996)报道了这些高压岩石和脉体中主要含具有不同盐度的水流体(特别是含多种子矿物的高盐度包裹体),而 $H_2O-CO_2-N_2$ 流体仅局部出现。对大别-苏鲁造山带超高压岩石流体包裹体的研究(You *et al.*,1996; Shen *et al.*,1996,2003; Xiao *et al.*,200,2001; Franz *et al.*,2001; Fu, *et al.* 2001, 2003; Zhang *et al.*,2004; Liu *et al.*)揭示,在不同地点和不同类型岩石中存在着不同类型流体包裹体,即含 N_2 -、富 CO_2 -、CO_2-H_2O 包裹体、高盐度和中低盐度水溶液包裹体。Xiao *et al.*(2000)、Fu *et al.*(2001, 2003)认为,N_2 -和高盐度水溶液包裹体是捕获了超高压变质流体的残余,它们最初可能源于进变质脱挥发分作用。而 Franz *et al.*(2001)基于对大别山榴辉岩相石英脉的流体包裹体研究认为,蓝晶石中的原生低盐度 H_2O 包裹体是进变质脱水反应产生的水流体在峰期变质条件下被捕获的。Liu *et al.*(2004)报道了中国大陆科学钻探工程主孔榴辉岩和片麻岩分离锆石中与峰期变质有关的 CO_2-H_2O 和 H_2O 包裹体。上述流体组成和密度的不同反映了在变质峰期和随后折返过程中流体体制存在着差别,那么是那些因素制约了这种差别,其规律性又如何?

在大别-苏鲁高压-超高压变质带东段江苏省东海实施的中国大陆科学钻探工程项目(CCSD),吸引了国内外地学界的广泛兴趣和注意力。在超高压岩石(榴辉岩)中存在各种含水、含挥发分矿物(如多硅白云母、黝帘石、绿帘石、原生角闪石,以及菱镁矿和滑石)以及名义上无水矿物中结构水(羟基)的发现,证明在地壳深俯冲环境发生的高压-超高压变质作用有流体的积极参与。由于矿物中的流体包裹体是矿物生长和随后发生破裂和裂隙再愈合时捕获的古流体残余,因此对于超高压岩石中流体包裹体的研究可以直接提供变质流体组成、性质和演化的信息。本文拟通过对中国大陆科学钻探工程主孔 2000m 以上连续剖面岩心中的流体包裹体研究,深入探讨本区超高压变质流体组成、性质及其大地构造意义。

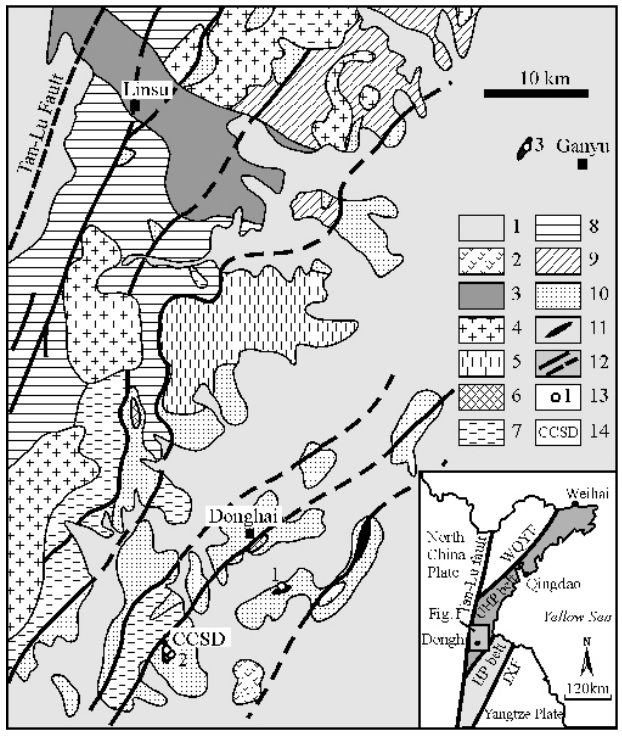


图 1 东海地区地质略图。

1. 第四系; 2. 第三系玄武岩; 3. 白垩系盆地; 4. 花岗岩; 5. 含霓石角闪片麻岩; 6. 角闪黑云片麻岩; 7. 含石榴黑云片麻岩; 8. 含黑云片麻岩; 9. 混合质钾长石片麻岩; 10. 表壳岩; 11. 榴辉岩或超镁铁岩; 12. 韧性剪切带或断层; 13. CCSD 预先导孔及编号; 14. CCSD 主孔。插图: WQYF-五莲-青岛-烟台断裂; JXF-嘉山-响水断裂

Fig. 1 Geologic sketch map of the Donghai area in the SuLu UHP metamorphic belt.

1. Quaternary; 2. Tertiary basalt; 3. Cretaceous basin; 4. granite; 5. Aegirine-Hb gneiss; 6. Hb-Bt gneiss; 7. Grt-Bt gneiss; 8. Bt-bearing gneiss; 9. migmatitic Kf s gneiss; 10. supercrustal rocks; 11. eclogite or ultramafics; 12. ductile shear zone or fault; 13. CCSD Prepilot holes and number; 14. CCSD Main hole. Insert: WQYF- Wulian-Qingdao-Yantai fault; JXF-jiashan-xiangshui fault

2 超高压变质岩的岩相学

中国大陆科学钻探工程主孔位于江苏省东海县东南 17 km 的毛北村附近(34°25′N, 118°40′E),构造上位于苏鲁超高压变质带的南部(图 1),设计井深为 5000m,实际钻进到 5100 m。本文仅研究了该钻孔 2050m 以上井段的岩心。该井段主要由榴辉岩组成,累积厚度达 1200m,其他岩石类型包括正片麻岩、副片麻岩、石榴石橄榄岩和少量的片岩和石英岩。根据岩石的空间组合及岩石化学成分特征,可将该井段划分成六个岩石单元(图 2)。第一单元从 0 ~ 248 m,主要由含石英或多硅白云母榴辉岩组成,夹薄层状的黑云母片麻岩和石榴石二云片麻岩; 第二单元从 248m 至 600m,由三层含石英榴辉岩和三层金红石榴辉岩组成,具有少量黑云斜长片麻岩和二云片麻岩夹层; 富金红石榴辉岩中金红石含量可达 8 ~ 10 %; 第三单元从 600m 到 695 m,主要由石榴石橄榄岩(和石榴辉石岩)组成,含少量榴辉岩薄层体或透镜体; 第四单元从 695m 到 1160 m,榴辉岩与片麻岩呈互层状产出; 第五单元从 1160m 到 1600m,主要由长英质片麻岩组成,夹少量的榴辉岩或斜长角闪岩薄层; 第六单元从 1600m 到 2050 m,主要是榴辉岩,含黑云斜长片麻岩和黑云二长片麻岩夹层。

榴辉岩的矿物组成主要是石榴石和绿辉石,含少量石英(或柯石英)、多硅白云母、蓝晶石、角闪岩、黝帘石(绿帘石),以及金红石、磷灰石和锆石。温、压计算结果表明,榴辉岩的峰期变质 *P-T* 条件是 678 ~ 816 ℃ 和 3.1 ~ 4.4GPa (Zhang *et al.*, 2005)。在部分榴辉岩中绿辉石富集呈透镜状、囊状或条带状,其中仅含少量的石榴石、金红石和磷灰石,而其中的绿辉石较其它榴辉岩中的结晶粗大。部分榴辉

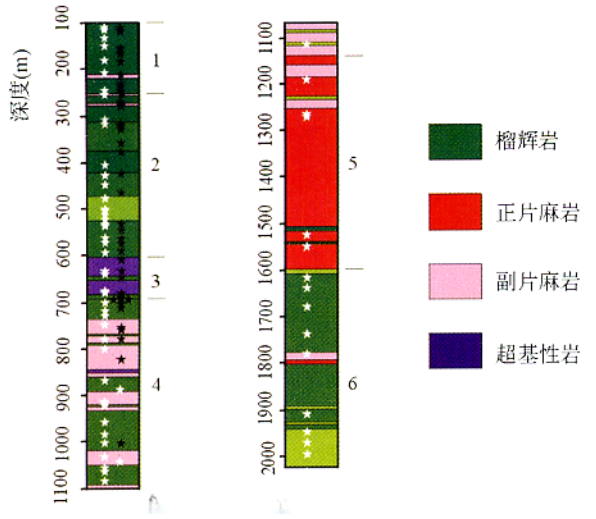


图 2 CCSD 主孔深度 100m ~ 2050m 岩性剖面。

1. 含石英或多硅白云母榴辉岩,夹有薄层状黑云母片麻岩、石榴石二云片麻岩夹层; 2. 石英榴辉岩与金红石榴辉岩互层,含少量黑云斜长片麻岩和二云片麻岩夹层; 3. 超基性岩(石榴石橄榄岩、石榴辉石岩),含少量榴辉岩薄层体或透镜体; 4. 榴辉岩与副片麻岩呈互层; 5. 正变质长英质片麻岩,夹少量榴辉岩或斜长角闪岩薄层; 6. 榴辉岩,含片麻岩夹层

Fig. 2 Lithologic profile of the Main hole from 100m to 2050m.

1. quartz- or phengite-bearing eclogite with thin-layers of Bt gneiss and Grt-two-mica gneiss; 2. intercalations of Qtz eclogite and Rt eclogite with minor Bt-Pl gneiss and two-mica gneiss; 3. ultrabasic rocks (garnet peridotite, garnet pyroxinite) containing some eclogite thin-layers or lens; 4. intercalations of eclogite and paragneiss; 5. felsic orthogneiss; 6. eclogite with gneiss intercalations

岩遭受退变质作用改造:石榴石被角闪石、黑云母和斜长石后成合晶替代,绿辉石被钠长石 + 角闪石或透辉石后成合晶替代,多硅白云母被黑云母 + 斜长石后成合晶替代,金红石转变为钛铁矿和(或)榍石。钻孔中的片麻岩由角闪岩相变质矿物组成,主要有石英、钾长石、斜长石、黑云母和白云母,部分片麻岩含有数量不等的石榴石、绿帘石和角闪石。但是,大多数片麻岩的锆石中含有柯石英,石榴石、绿辉石和多硅白云母包体,表明它们经历了早期的超高压变质作用(详见另文)。除 Amp 为角闪石以外,文中其他矿物代号据 Kretz(1983)。

3 研究样品和测试方法

研究样品采自 CCSD 主孔 2000m 以上连续剖面岩心。通过磨制双面抛光片和分选单矿物锆石,我们对钻孔中的变质岩进行了详细的流体包裹体显微镜观察,除石榴橄榄岩外,在其它各种岩石,包括各种榴辉岩、退变质榴辉岩(石榴角闪岩)、片麻岩、片岩和石英脉中均发现了流体包裹体。对代表性包裹体的显微测温是在中国地质大学(北京)和中山大学地球科学系包裹体实验室的 Linkam THM600 型冷热台上进行。用纯 CO_2 包裹体(熔点为 -56.6℃)、纯水(熔点为 0℃)和重铬酸钾(熔点为 398℃)对冷热台进行了温度校正。在 ≤ -56.6℃ ~ 0℃ 区间内精度为 0.1 ~ 0.2℃; 在 200 ~ 600℃之间精度好于 5℃。矿物和单个包裹体的成分是在中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室的 RENISHAW 拉曼探针仪上测定的。

4 流体包裹体的岩相学

与进变质和超高压变质峰期有关的原生包裹体主要见于榴辉岩。片麻岩和退变质榴辉岩因遭受角闪岩相退变质和矿物重结晶作用,仅保存与退变质有关的富水流体包裹体,例外的是其中的锆石(见后)。超基性岩一般不含流体包裹体。赋存流体包裹体的矿物有石英、石榴石、单斜辉石(绿辉石、透辉石)、蓝晶石、(斜)黝帘石、绿帘石、方解石、磷灰石和锆石。虽然石英是含包裹体最多的矿物,但石英中绝大多数包裹体均沿裂隙分布,而且石英容易发生变形-重结晶,故所含包裹体在高压-超高压岩石变质演化中的位置不易确定; 而锆石含有反映进变质和超高压变质的矿物包体和相关的流体包裹体。通过系统显微镜观察,确定各种岩石中流体包裹体的类型、丰度、产状和分布特征,并确立流体包裹体世代。深度在 2000 米以上的岩心中流体包裹体类型、丰度和分布见表 1。

根据室温时包裹体的相组成和产状,可将 CCSD 主孔岩心样品中所见流体包裹体分为以下几大类型:(1)中-低盐度水溶液包裹体(Ⅰ型),可进一步区分为单液相包裹体和气液两相包裹体; (2)$CO_2 - H_2O$ 包裹体(Ⅱ型),可进一步区分为富水型和富 CO_2 型,以富水型为主; (3)高盐度盐水包裹体(Ⅲ型),可进一步细分为高盐度复杂盐水包裹体(Ⅲa 型)和简单盐水包裹体(Ⅲb 型):前者在室温下通常含一个气泡,一液相,以及若干固相(石盐立方体 ± 石英 ± 碳酸盐 ± 硫酸盐 ± 硅酸盐); 后者仅含石盐晶体、一气泡和一液相; (4)$CO_2 \pm CH_4$ 包裹体(Ⅳ型),室温时为单液(气)相或气液两相包裹体; (5)单气相包裹体或空包裹体(Ⅴ型)。

(1)中-低盐度水溶液包裹体(Ⅰ型)是分布最广、丰度最高的包裹体类型,按照产状可分为:(Ⅰ)呈孤立或小群分布于锆石核部(图 3a); (Ⅱ)呈孤立或小群分布于被绿辉石包裹的石英或方解石中(图 3b),为气液包裹体; (Ⅲ)呈孤立或小群分布于榴辉岩的绿辉石、石英和黝帘石中,为单液相包裹体(图 3c)或两相气液包裹体(图 3d); (Ⅳ)在磷灰石中与杆状出溶矿物连生(图 3e); (Ⅴ)呈孤立或小群分布于退变质榴辉岩(石榴绿帘黑云斜长片麻岩)的重结晶石榴石和绿帘石中(图 3f),或切穿榴辉岩的方解石细脉中,常为浑圆 ~ 负晶形气液包裹体; (Ⅵ)沿石英、绿辉石、黝帘石、石榴石和蓝晶石裂隙成群分布的单液相或两相气液包裹体,其大小、形态变化很大,从负晶形到浑圆 ~ 不规则形状。

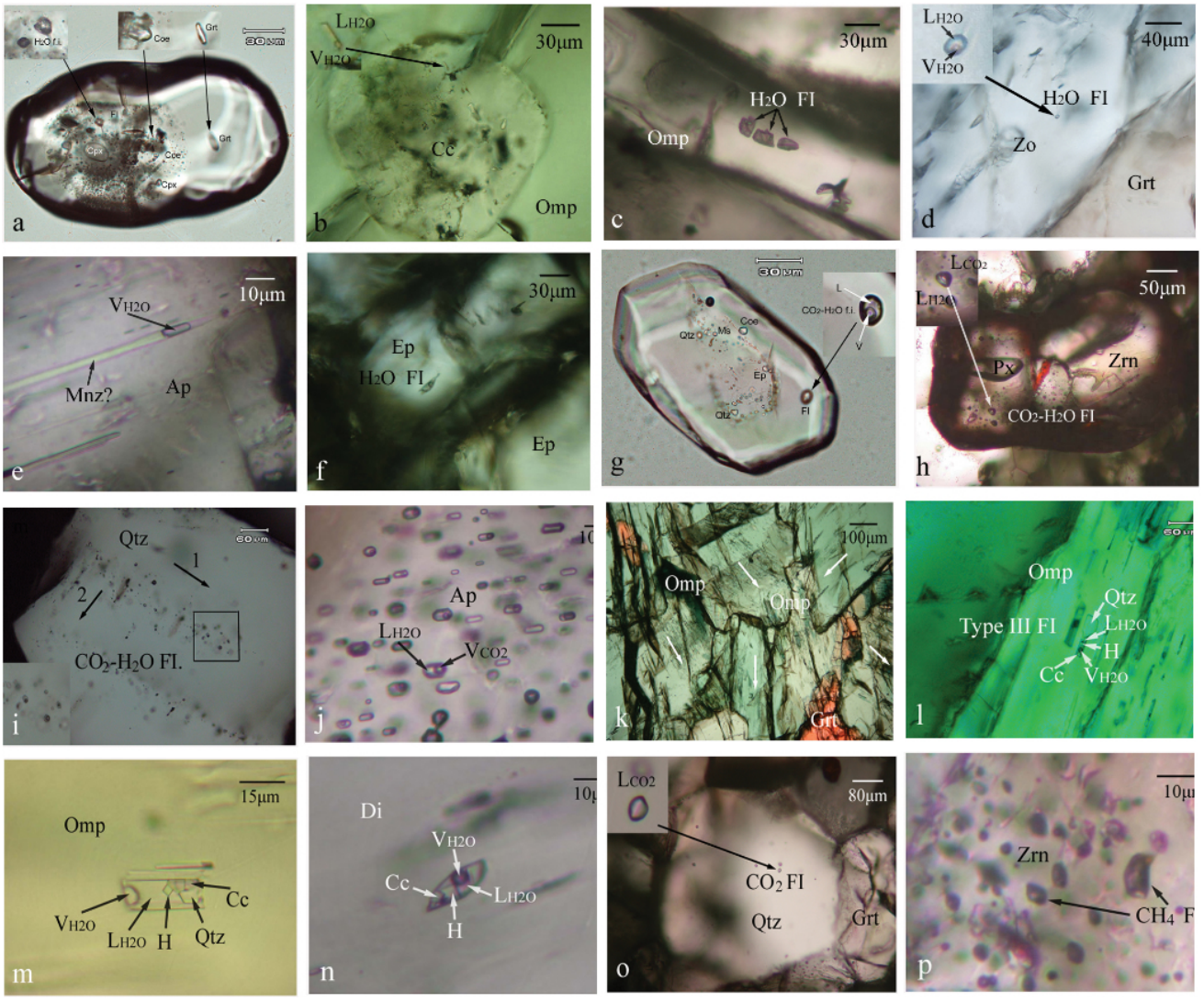


图 3　CCSD 主孔超高压岩石不同矿物中流体包裹体的显微照片。

a. 退变质榴辉岩锆石核部与柯石英(Coe)、辉石(Cpx)共存的 H_2O 包裹体(5μm, B88R83P2aA-249. 5m); b. 被绿辉石(Omp)包裹的方解石(Cc)含气液两相 H_2O 包裹体(7μm, B218R192P1c-463m); c. 绿辉石中呈小群分布的单液相 H_2O 包裹体,冷冻时因结冰膨胀而爆裂,流体全部渗漏并析出微小盐晶(浅蓝灰,突起)(18 ~ 20μm, B926R613P12n-1777. 7m); d. 黝帘石(Zo)中呈孤立分布的两相 H_2O 包裹体(4. 5μm, B132R114P1a-320m); e. 榴辉岩磷灰石(Ap)中与杆状出溶矿物(独居石?)连生的 H_2O 包裹体(气泡长径 10μm, B250R212P1cA-511. 2m); f. 绿帘石(Ep)中呈孤立分布的两相 H_2O 包裹体(B6R9P6-110. 01 m); g. 片麻岩的分离锆石中,孤立的 CO_2 – H_2O 包裹体与柯石英(Coe)同产于变质环带(B616R436P1aL-1109. 3m); h. 退变质榴辉岩锆石(Zrm)中的辉石(Px)和 CO_2 – H_2O 包裹体,后者沿晶内裂隙分布(12μm; B231R202P2m-483. 75m); i. 榴辉岩石英中原来沿早期裂隙(1)分布的 CO_2 – H_2O 包裹体,在后期应力作用下发生局部转位,沿短裂隙(2)定向(B218R192P1c-463m); j. 富石榴黑云斜长片麻岩(B488R369P1h-901. 9m)中,II 型包裹体(含 CO_2 气相 + CO_2 液相 + H_2O 液相)沿磷灰石 c 轴密集成群分布; k. 在不同方位绿辉石颗粒内部出溶矿物和流体包裹体均平行绿辉石的 c 轴(箭头所示)分布,且颗粒边缘较干净(B287R235P1a-572m); l. 绿辉石中的多相包裹体,含气相(V_{H2O})、液相(L_{H_2O})、石盐(H)和若干固相(Qtz、Cc 等)(B287R235P1a-572m); m. 绿辉石中的多相包裹体(B287R235P1a-572m); n. 透辉石中的多相包裹体,含一气泡(V_{H_2O})、液相(L_{H_2O})、石盐(H)和碳酸盐(Cc)(Z52-685m); o. 榴辉岩石英中随机分布的单液相 CO_2 包裹体,常呈负晶形,4 ~ 8μm(Z83-1778m); p. 榴辉岩锆石中沿裂隙成群分布的 CO_2 – CH_4 包裹体, ≤5 ~ 10μm (B250R212P1cA-511. 2m)

Fig. 3　Microphotographs of fluid inclusions in various minerals of UHP rocks from CCSD main hole.

通常前四种产状的包裹体很少见,绝大部分 I 型包裹体均沿各种矿物裂隙(晶内裂隙或穿颗粒裂隙)分布,它们是早期包裹体因破裂而渗漏的流体被重新捕获的结果,或者代表了后期退变质阶段存在的流体。

(2) CO_2 – H_2O 包裹体(II 型) 少量呈孤立或小群分布于榴辉岩和片麻岩锆石核部或幔部(图 3g),或沿锆石晶内裂隙分布(图 3h,图 4a,4b)。

表 1　CCSD 主孔 2000m 以上代表性超高压岩石中流体包裹体分布和相对丰度

Table 1　Distribution and ralative abundance of fluid inclusions in UHP rocks from CCSD main hole (above 2000m)

样　品	深　度 (m)	岩石名称	矿物组合	流体包裹体类型和相对丰度				
				Ⅰ型	Ⅱ型	Ⅲ型	Ⅳ型	Ⅴ型
Y1	B6R9P6	110.01	退变质榴辉岩(石榴绿帘黑云斜长片麻岩)	Grt + Ep + Qtz + Bt + Amp + Pl + Ap + Zrn + Cc	＊＊☆■	●●●		
S2	B10R15P1b	118.6	榴辉岩, 含 Rt – Ap – Qz 脉	Grt + Omp(Sym) + Phn + Qtz + Rt + Ap + Zrn	＊＊◇＋	＋?	●		＊☆
S6	B66R63P1	215.1	金红石石英榴辉岩,含 Cc 脉	Grt + Omp + Qtz + Rt + Ap + Zrn	＊＊◇	＊			
S13	B128R111P1nL	315.0	金红石多硅白云母榴辉岩(微退变质)	Grt + Omp + Phn + Qtz + Rt + Ap ± Coe	＊＊				＊
Y11	B132R114P1a	319.99	含蓝晶石黝帘石榴辉岩	Grt + Omp + Ky + Zo + Qtz + Phn + Rt + Ap	＊＊□				
S20	B218R192P1c	463.11	黄铁金红多硅白云母榴辉岩	Grt + Omp + Qtz + Rt + Ap + Cc + Coe	＊＊◇				
Z36	B231R202P2m	483.75	强退变质榴辉岩	Grt + Amp + Pl + Qtz + Bt + Rt + Ap + Zrn	＊＊＊	＊＋＋			
Z38	B250R212P1cA	511.2	石英榴辉岩	Grt + Omp + Qtz + Rt + Ap + Zrn ± Coe	＊●	＊□＋		＋	＊
Z41	B261R222P1a	531.5	含绿辉石集合体榴辉岩	Grt + Omp + Qtz + Rt + Amp + Zr	＊▲		▲▲		△
Z46	B287R235P1a	572.15	含绿辉石集合体榴辉岩	Grt, Omp, Rt, Zr	▲▲		▲▲		
Z48	B292R239P1aL	581.9	强退变质榴辉岩	Cpx + Amp + Ep + Pl + Rt + Ap	＊＊△△		△△		
S27	B319R262P1bA	631.34	榴辉岩(绿辉石分凝脉围绕石榴石)	Grt + Omp(Amp) + Qtz + Rt + Ap + Zr	▲▲		▲▲		
Z52	B353R283P1g	685.4	石榴辉石岩	Grt, Omp, Di, Phn?, Ky, Zr	＊＊		△		＊
S30	B355R283P1o	687.5	蓝晶石多硅白云母榴辉岩	Grt, Om, Phn, Otz, Ky, Zo, Rt, Ap	｜☆	＊			☆
S31	1356R284P1e	690.1	含蓝晶石黝帘石榴辉岩	Grt + Om + Qtz + Ky + Zo + Rt + Ap	＊＊			＊	
S35	B367R291P1b	708.6	蓝晶石多硅白云母榴辉岩	Grt + Om + Qtz + Ky + Zo + Rt + Ap + Cc	＊□◇	｜			
S36	B382R299P3g	731.95	石英榴辉岩	Grt + Omp + Rt + Qtz + Ap + Zr + Amp + Pl	＊＊＊		▲	＊	
S38	B398R312P1jL	754.45	绿帘黑云斜长片麻岩	Ep + Bt + Amp + Pl + Qtz + Ttn + Ap + Zr	＊＊＊				
Z63	B488R369P1h	901.9	石榴黑云片麻岩	Grt + Bt + Pl + Ep + Ms + Qtz + Zr	＊＊☆■●	●●			
Z64	B505R377P3l	928.2	富石榴黑云片麻岩	Grt + Bt + Pl + Ep + Qtz + Zr	＊＊☆■●	●●●			＊＊
	B551R399P3	1001.8	蓝晶石多硅白云母片麻岩	Ky + Ep + Amp + Pl + Qtz + Phn + Bt + Zr	＊＊＊｜■■		■		
Z67	B552R399P11	1003.4	多硅白云母榴辉岩	Grt + Amp + Pl(Omp) + Phn + Ky + Zo – Ep + Qtz + Zr	＊＊■□	□｜			＊□
Z76	B695R483P6g	1262.1	二云母片麻岩	Pl + Kfs + Phn + Bt + Qtz + Ep + Grt + Ap	＊＊				
Z80	B847R577P3	1632.05	绿帘黑云斜长片麻岩	Amp + Ep + Bt + Pl + Qtz + Ap + Cc + Chl	＊＊＊■●				
Z83	B926R613P12n	1777.7	石英榴辉岩	Grt + Omp + Qtz + Rt + Ap + Zr	＊＊▲	＊?		＊	＊＊
Z88	B1046R647P50	1985.97	石英榴辉岩	Grt + Omp(Amp – Pl) + Qtz + Rt + Ap + Zr	＊＊＊☆				☆

注:包裹体寄主矿物:＊-石英; ◇-方解石; ☆-石榴石; ▲-绿辉石; △-透辉石; □-黝帘石; ■-绿帘石; ｜-蓝晶石; ●-磷灰石; ＋-锆石

II 型包裹体主要呈小群或沿裂隙分布于榴辉岩、退变质榴辉岩和片麻岩石英中,通常具有负晶形,由 H_2O 液相和富 CO_2 气(液)相组成。注意到沿早期裂隙(1)分布的包裹体,由于后期应力作用而发生转移(transposition),沿另一方向短裂隙(2)定向(图 3i)。

在退变质榴辉岩(B6R9P6-110m)和富石榴黑云斜长片麻岩(B488R369P1h-901.9m)中,II 型包裹体(含 H_2O 液相 + CO_2 液相 ± CO_2 气相)也沿磷灰石的 c 轴密集成群分布(图 3j),它们多呈管状,即柱状磷灰石的负晶形。

(3)高盐度复杂盐水包裹体(IIIa 型)主要产于榴辉岩的绿辉石分凝条带中,其次是石榴辉石岩的透辉石条带(细脉)中。在绿辉石条带(531.5m 和 572m)中,原生 III 型包裹体呈孤立或小群平行绿辉石结晶学 c 轴分布,往往局限于绿辉石颗粒核部;当具有不同方位的若干绿辉石颗粒接触时,各颗粒中包裹体均沿绿辉石柱面定向排列而不越出颗粒边界(图 3k),并且绿辉石还含有平行 c-轴的出溶杆状石英、方解石和角闪石等矿物包体,表明流体包裹体的捕获与绿辉石生长、矿物出溶或重结晶有关。这些包裹体具有管状~负晶形态,通常含一气泡,一液相和一至多个固相(图 3l,3m),据拉曼探针分析,固相包括石盐、石英、方解石和未知硅酸盐矿物(图 4c 和 4d);有些包裹体所含固相较少或不含气泡,推测是处于亚稳平衡。

在石榴透辉岩(682.4m)的透辉石细脉中,高盐度多相包裹体平行透辉石 c 轴和沿晶内裂隙分布(图 3n)。它们通常含一气相、液相和 1~3 个固相,固相有石盐、硬石膏、方解石和菱锰矿(图 4e 和 4f)。另外一些盐不饱和的两相气液包裹体多呈细长管状,也沿透辉石晶内裂隙分布,可与高盐度多相包裹体共存。

由榴辉岩退变质的辉石角闪岩(含透辉石 + 角闪石 + 绿帘石 + 黑云母 + 斜长石组合)中,高盐度气相 + 液相 ± 石盐包裹体(IIIb 型)呈管柱状平行透辉石的长轴(解理)杂乱分布。与 IIIa 型包裹体不同的是 IIIb 包裹体的管壁往往不规整,显示流体-矿物反应特征。

此外,在穿过榴辉岩的石英脉所含磷灰石中存在含固相的盐水包裹体,呈细长管状,孤立产出,沿磷灰石 c 轴分布。

(4)$CO_2 \pm CH_4$ 包裹体(IV 型)。单液相富 CO_2 包裹体见于 732m 和 1778m 深处的新鲜榴辉岩石英中,呈孤立或随机分布,多具负晶形态(图 3o)。在榴辉岩(511m)所含副矿物锆石中,发现含 CH_4 的包裹体沿裂隙成群分布,多为浑圆-负晶形(图 3p)。另外,少量富 CH_4 包裹体沿蓝晶黝帘榴辉岩(S31~690 m)中的石英裂隙分布。

(5)单气相包裹体或空包裹体(V 型)常沿不同矿物(绿辉石、黝帘石、石英)裂隙成群分布或孤立分布。例如在石榴石包裹的呈柯石英假象石英中,发现不规则单气相包裹体沿裂隙产出,它们可能是柯石英转变为石英时,早先捕获于柯石英中的原生包裹体因体积膨胀,发生爆裂和渗漏所致。

5 流体包裹体的相对年代

确定流体包裹体的相对年代是讨论变质流体演化的基础。为此,需要确定含包裹体主矿物的变质演化顺序和包裹体在主矿物中的产状。一般认为(Hollister 和 Burruss,1976; Touret,1981,1990),呈孤立和/或小群分布的包裹体形成较早,当它们产于未变形的主矿物,而且主矿物被包裹于另一矿物中可认为是原生的;在延伸性不同的裂隙中,矿物颗粒内裂隙中的包裹体早于切穿颗粒边界裂隙中的包裹体;当两组裂隙相交时,被切穿裂隙中的包裹体形成较早,并发生相对位移;其组分常被较晚裂隙中的包裹体置换。

在实际研究中运用这些准则并不总是有效,因为大多数高压-超高压变质岩石在变质峰期后经历了缓慢冷却和快速抬升-减压过程,过高的内压力常常导致变质峰期捕获的原生包裹体发生渗漏、爆裂;当矿物发生变形-动力重结晶时,流体包裹体往往变换位置(transposition)或被驱赶到矿物颗粒边界;另外,受温度和浓度梯度影响,由包裹体流体引起的溶解-再沉淀作用,可使包裹体在主矿物中发生位移、颈缩(necking down)。因此,在高压-超高压变质岩中所见绝大多数流体包裹体均受到改造。然而,近年来的一些研究表明(Philippot *et al.*,1995; Xiao *et al.*,2000; 沈昆等,2003; Fu *et al.*,2003),榴辉岩和变沉积岩可以保存与峰期变质、甚至前进变质作用有关的流体(包裹体),它们多数赋存于石榴石中或被石榴石等强硬矿物包裹的矿物(如石英、蓝晶石)中。

包裹体岩相学观察表明,呈孤立或小群分布于锆石核-幔部的 H_2O(I 型)和 CO_2-H_2O(II 型)包裹体可能形成于进变质-峰期变质阶段。刘福来和许志琴(2004)在片麻岩和退变质榴辉岩中发现,CO_2-H_2O 包裹体(及少量 H_2O 包裹体)与柯石英等超高压矿物共存于同一变质增生锆石微区中,认为它们代表了超高压变质期间存在的流体。我们对榴辉岩和片麻岩中分离锆石的矿物学和流体包裹体研究也证实,在一些锆石核部和幔部存在超高压矿物包体和相伴生的 H_2O 包裹体和 CO_2-H_2O 包裹体,甚至超高压变质前的 CO_2-H_2O 包裹体,因为这些锆石核-幔部或是含有石英、云母 ± 长石,或是含有指示超高压变质条件的柯石英以及辉石、石榴石等矿物包体。同样,榴辉岩基质绿辉石和黝帘石中呈孤立和小群分布的原生 I 型包裹体形成较早,它们可能代表了超高压变质峰期捕获的流体。另外,被绿辉石包裹的锆石、石英和方解石所含 I 型包裹体可能捕获有近峰期变质流体,因为绿辉石无任何蚀变,无外部流体沿裂隙进入锆石、石英和方解石的任何迹象:在超高压条件下被绿辉石包裹的霰石和柯石英,在随后的减压过程中分别转变(重结晶)成方解石(图 3b)和石英,原先存在于其中的 I 型包裹体即使经历了流体渗漏和重新被捕获,虽然密度大大降低,但还大体保持其原有组成。

在榴辉岩锆石和石英中,也观察到部分 II 型包裹体沿晶内裂隙分布和局部发生转移特征(图 3i),推测它们是早期流

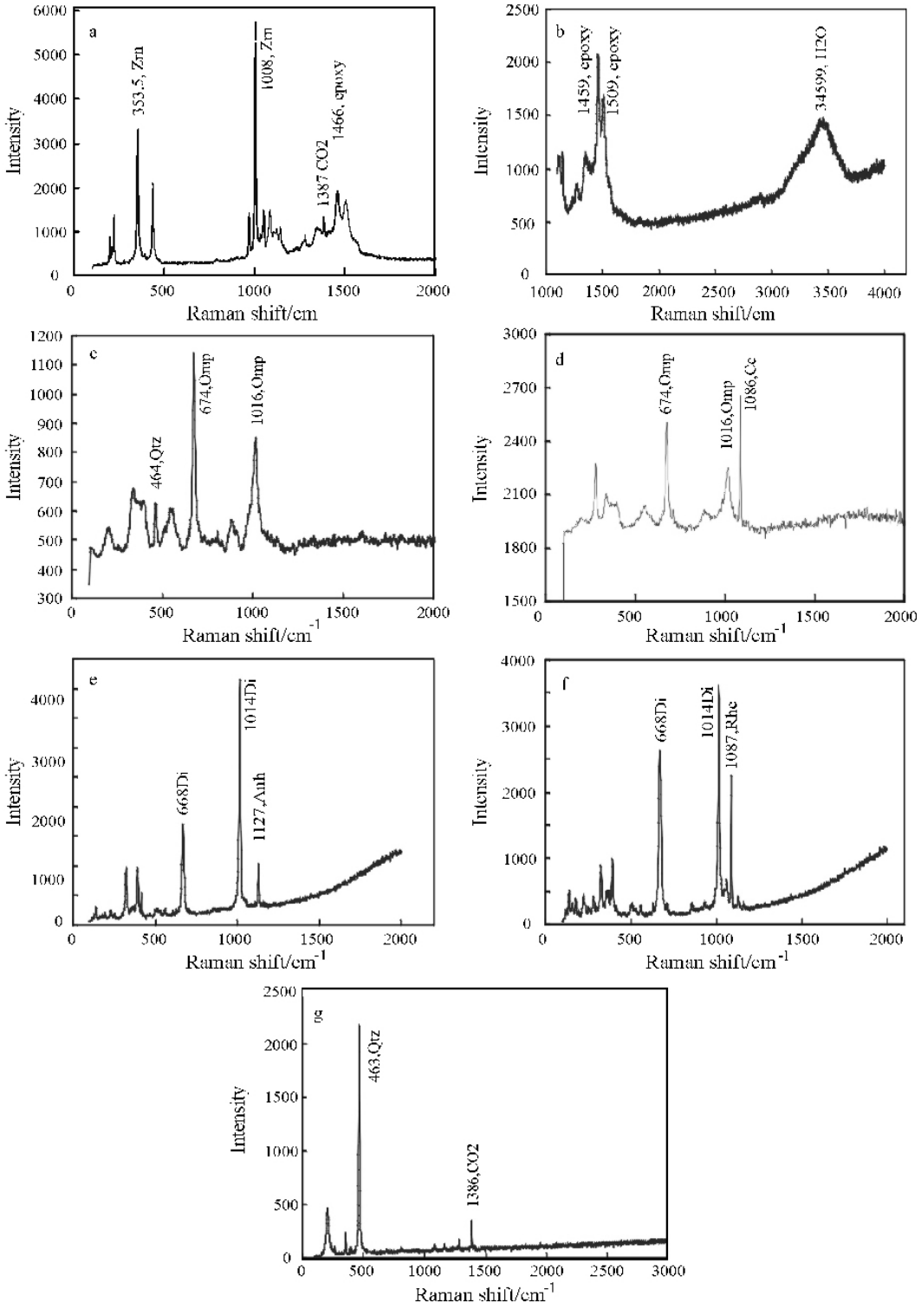


图 4 矿物和流体包裹体的 Raman 图谱

a 和 b. 锆石中 II 型包裹体 CO_2 相和 H_2O 相的 Raman 图谱(B231R202P2m); c 和 d. 绿辉石所含 III 型包裹体中石英和方解石的 Raman 图谱(B287R235P1a); e 和 f. 透辉石所含 III 型包裹体中硬石膏(Anh)和碳酸盐(菱锰矿?, Rhc)的 Raman 图谱(B353R283P1g); g. 榴辉岩石英中 CO_2 包裹体的 Raman 图谱(B926R613P12n)

Fig. 4 Raman spectra of mineral and fluid inclusions. a and b.

Raman spectra for CO_2 and H_2O phase of $CO_2 - H_2O$ f. i. in zircon; c and d. Raman spectra of quartz and calcite in type III f. i. in omphacite; e and f. Raman spectra for anhydrite and carbonate (rhodochrosite) in diopside of garnet pyroxenite; g. Raman spectrum for monophase CO_2 f. i. in Qtz of eclogite.

表 2　CCSD 主孔超高压岩石中流体包裹体显微测温结果

Table 2　Microthermometric measurements of fluid inclusions in UHP metamorphic rocks from CCSD main hole

包裹体类型	岩石类型	主矿物	$T_{m_{CO_2}}$ *（℃）	T_e（℃）	T_{mi}（℃）	T_{mcl}（℃）	$T_{h_{CO_2}}$（℃）	T_h（℃）	T_s（℃）	盐度（wt%）	密度（g/cm^3）
Ⅰ型（原生）	Rt-Phn 榴辉岩	方解石		-21	-0.7 ~ -1			≤120		1.23 ~ 1.74	0.96
Ⅰ型（原生）	Rt-Phn 榴辉岩	石　英		-21	-3.1 ~ -3.2			114		5.1 ~ 5.3	0.98
Ⅰ型（原生）	Qz-榴辉岩	绿辉石						≤50 ~ 80			≥1.0
Ⅰ型（原生）	Qz-榴辉岩	石　英			-4.8			≤50 ~ 80		7.59	~1.01
Ⅰ型（原生）	Ky-Zo 榴辉岩	（斜）黝帘石		-21	-5.1			142		8	0.98
Ⅰ型（假次生）	Rt-Qtz（Phn）榴辉岩	石　英		≤ -35 ~ -25	-8.4 ~ -14.3			93 ~ 155		12.16 ~ 18.04	0.987 ~ 1.024
Ⅰ型（假次生）	Rt-Qtz（Phn）榴辉岩	绿辉石			-7.2 ~ -7.69			156 ~ 157		10.73 ~ 11.3	0.983 ~ 0.985
Ⅰ型（次生）	Rt-Qtz 榴辉岩	石　英			-0.2 ~ -4.6			116 ~ 370		0.35 ~ 7.31	0.566 ~ 0.954
Ⅰ型	Rt-Qtz 榴辉岩	方解石			-0.8 ~ -4			143 ~ 180		1.40 ~ 6.45	0.918 ~ 0.937
Ⅱ型（原生）	Rt-Phn 榴辉岩	石　英	-56.6			2.2 ~ 2.9	~15（v）**	335 ~ 342		（1）***	0.669 ~ 0.776
Ⅱ型（原生）	退变质榴辉岩	锆　石	-56.7				25.6	≥300		（2）***	0.938
Ⅱ型（原生）	石榴黑云片麻岩	磷灰石	-56.6			6.6 ~ 8.4	25.3 ~ 30.2			（3）***	0.967
Ⅲ型（原生）	绿辉石条带	绿辉石		≤ -40 ~ -35				286 ~ 420	224 ~ 408	33.14 ~ 53.26	0.543 ~ 1.042
Ⅲ型（原生）	透辉石细脉	透辉石						226 ~ ≥300	247 ~ 293	34.49 ~ 37.63	1.008 ~ 1.087
Ⅲ型（假次生）	透辉石细脉	透辉石		≤ -30 ~ -23	-9.8 ~ -22.7			194 ~ 250		13.7 ~ ≥23.2	0.963 ~ 1.012
Ⅳ型 CO_2	Qz-榴辉岩	石　英	-56.6					-26.4 ~ 5.6			0.9 ~ 1.061
$CO_2 - CH_4$	Qz-榴辉岩	锆　石	未测				未测				
CH_4（次生）	Ky-Zo 榴辉岩	石　英	未测					Th_{CH_4} = -92（v） ~ -130（l）**			0.065 ~ 0.371
Ⅴ型（次生）	Qz-榴辉岩	Grt、Qtz、Omp、Zo	未测				未测	未测			

注：* T_{mco_2}-CO_2 熔化温度；Th_{CH_4}-CH_4 熔化温度；*Te*-初熔温度；T_{mi}-冰点；T_{mcl}-气体水合物（笼合物）分解温度；Th_{co_2}-CO_2 液气均一温度；T_h-完全均一温度；T_s-石盐熔化温度；*wt%*-相当于 NaCl 的重量百分比

** v-均一到气相；*l*-均一到液相

*** （1）X_{H_2O} = 0.931，X_{CO_2} = 0.059，X_{NaCl} = 0.01；（2）X_{H_2O} = 0.864，X_{CO_2} = 0.136；（3）X_{H_2O} = 0.868 ~ 0.869，X_{CO_2} = 0.095 ~ 0.113；X_{NaCl} = 0.017 ~ 0.036

体包裹体受到晚期不同方向应力作用而重新定位的结果。主孔岩心中常见切穿新鲜榴辉岩的碳酸盐细脉,也反映了稍晚期 CO_2-H_2O 流体活动,其中所含孤立和小群分布的 H_2O 包裹体代表了方解石从富 CO_2-H_2O 流体中结晶时捕获的残余 H_2O 流体。与榴辉岩基质中的绿辉石很少含包裹体不同,在榴辉岩的绿辉石分凝(异)条带中,绿辉石含较多的原生 IIIa 型包裹体。鉴于这些包裹体与绿辉石中的出溶矿物伴生,应是超高压变质峰期后的减压过程中形成的,因此认为,它们稍晚于 I 型和 II 型包裹体。从榴辉岩转变来的辉石角闪岩所含 IIIb 型包裹体应是角闪岩相退变质早期捕获;石榴绿帘黑云斜长片麻岩的石榴石和绿帘石在角闪岩相退变质阶段发生重结晶,其中孤立或小群分布的 I 型包裹体也应于此阶段捕获。绝大多数沿石英、绿辉石、石榴石和黝帘石裂隙分布的 I 型包裹体形成较晚;在有的石英颗粒中,当含包裹体裂隙达到颗粒边界时,相邻绿辉石部分或全部被角闪石+斜长石后成合晶置换,从而表明绿辉石的退变质反应和 I 型包裹体被捕获与 H_2O 流体活动有关。

榴辉岩石英中随机分布的近于纯 CO_2(IV 型)包裹体的成因还不十分清楚。一种可能是,在超高压变质峰期捕获的 CO_2-H_2O 包裹体,在随后退变质减压过程中发生 H_2O 的选择性渗漏(Hollistar,1990; Johnson 和 Hollister, 1995),仅留下了 CO_2 相,而且密度降低;另一种可能是,在超高压变质峰期,由于含水矿物结晶,水活度降低,残余流体中 CO_2 相对富集,随后石英重结晶时捕获了富 CO_2 流体。榴辉岩中沿锆石晶内裂隙分布的 CH_4 包裹体,具有很低的密度和极平缓的等容线,它们或是由 CO_2-H_2O 包裹体改造的产物,或是晚期捕获的含碳流体(carbonic fluid)。

绿辉石、黝帘石,以及石榴石包裹的呈柯石英假象石英中所含 V 型包裹体可能曾经捕获了超高压变质峰期流体,但在随后的构造-变质演化过程中发生爆裂和渗漏,现在只含低密度气相或为空包裹体(参见 Touret,1981,2001; Fu *et al.*,2003)。

6 显微测温及包裹体成分和等容线计算

对 I 型和 III 型包裹体测定了共结温度(T_e)、冰最后熔化温度(冰点,T_{mi})、盐熔化温度(T_{ms})和均一温度(T_h);对 II 型和 IV 型包裹体测定了 CO_2 熔化温度($T_{m_{CO_2}}$)、CO_2 水合物分解温度(T_{mcl})、CO_2 液气均一温度($T_{h_{CO_2}}$)和完全均一温度(T_h)。包裹体的显微测温结果见表 2 和图 5。

被绿辉石包裹方解石和石英中的 H_2O 包裹体的 $T_e\approx-21$℃,T_{mi} 分别为 $-0.7\sim-1$℃和 $-3.1\sim-3.2$℃,相应的盐度分别为 1.23~1.74 和 5.1~5.3wt% NaCl(即相当于 NaCl 的重量百分比,下同);黝帘石中气液包裹体的 $T_e\approx-21$℃,属于 $NaCl-H_2O$ 体系;$T_{mi}=-5.1$℃,$T_h=142$℃;绿辉石中的原生单液相包裹体在冷却到 −45℃时流体冻结,回温到 +6℃时出现一气泡并逐渐变大,最后充满包裹体,并析出微小盐晶,即流体完全渗漏,由此推测包裹体含有高密度、低盐度水溶液(表 2)。石英中沿环带分布的单液相包裹体冷冻到 −30℃时结冰,回温到 −4.8℃时,个别包裹体中可见冰在无气泡的条件下最后熔化,同样说明包裹体流体密度很高而盐度较低。

石英榴辉岩(511.2m)绿辉石所含(假)次生包裹体的 $T_{mi}=-7.6\sim7.2$℃,$T_h=156\sim157$℃;金红石榴辉岩(215.1m、315m)所含石英晶内裂隙中的 H_2O 包裹体的 $T_{mi}=-14.3\sim-8.4$℃;而多数沿石英穿颗粒裂隙分布的次生包裹体的 $T_{mi}=-5\sim0$℃,集中在 $-2\sim-0.2$℃,$T_h=116\sim150$℃左右(图 5e,f)。

切过榴辉岩的方解石细脉(215.1m)中含孤立和小群分布的 I 型 H_2O 包裹体,其 $T_{mi}=-4\sim-0.8$℃,$T_h=143\sim180$℃。退变质榴辉岩和片麻岩的重结晶石榴石和绿帘石中 I 型 H_2O 包裹体的 T_e 一般为 −21℃,少数为 −25~−23℃,$T_{mi}=-1.2\sim-2.2$℃,相应的盐度为 2.07~3.71wt% NaCl;均一温度集中在 178~220℃,个别高达 266~306℃。

由于锆石很高的折射率,显微测温时很难准确测定其中 CO_2-H_2O 包裹体的相变温度,仅对样品 B231R202P2m(~484m)中一个较大包裹体测得 CO_2 固相熔化温度为 −56.7℃,表明其成分为纯 CO_2,均一温度为 25.6℃,其激光 Raman 图谱显示 CO_2 典型的 1387 和 1285cm^{-1} 峰(图 4a)和 H_2O 峰(图 4b);结合室温变化时(25~30℃)分离锆石中多数 II 型包裹体为富 H_2O 液相+富 CO_2 液相±富 CO_2 气相推测,它们的均一温度从≤25℃到~30℃。榴辉岩石英中的 II 型(H_2O 液相+CO_2 气相)包裹体在 −35~−40℃冻结,回温时,大多数包裹体中笼合物(clathrate)在 2.4~3℃熔化;由于 CO_2 气相密度低,未能测得 CO_2 相液气均一温度;CO_2/H_2O 完全均一温度为 335~342℃。片麻岩磷灰石中 CO_2 固相熔化温度为 −56.6℃,CO_2 笼合物的分解温度范围在 6.6~8.4℃,CO_2 部分均一温度为 26.2~30.3℃(多数均一到液相),根据相比例估计完全均一温度高于 300℃。

冷冻绿辉石中的 III 型包裹体时,流体在 −65~−100℃区间冻结;回温到 −45~−30℃时,包裹体变暗,石盐开始与最初产生的液相反应形成水石盐($NaCl\cdot2H_2O$),直到石盐完全消失,表明流体以富 NaCl 盐水为主,并含少量其它可溶盐离子(Ca^{2+}、Mg^{2+})。继续升温到 0~10℃,水石盐不一致分解为石盐和水。加热时,石盐在 224~431℃(多数在 280~330℃)之间熔化。液气均一温度(T_h)从 280~≥400℃,而主要集中在 286~314℃。

类似地,冷冻时透辉石中的多相包裹体在很低的温度(≤80℃)下冻结,低温相变与绿辉石中的含石盐包裹体相同;加热时,石盐在 247~293℃区间熔化,液气均一温度(T_h)从 226~≥300℃。另外,盐不饱和的两相气液包裹体也沿透辉石晶内裂隙分布,可与高盐度多相包裹体共存,它们多呈细长管状。冷却时,这些包裹体一般要到 −50~−60℃冻结,$T_e\leq-30\sim-23$℃,表明除 NaCl 以外,流体中还

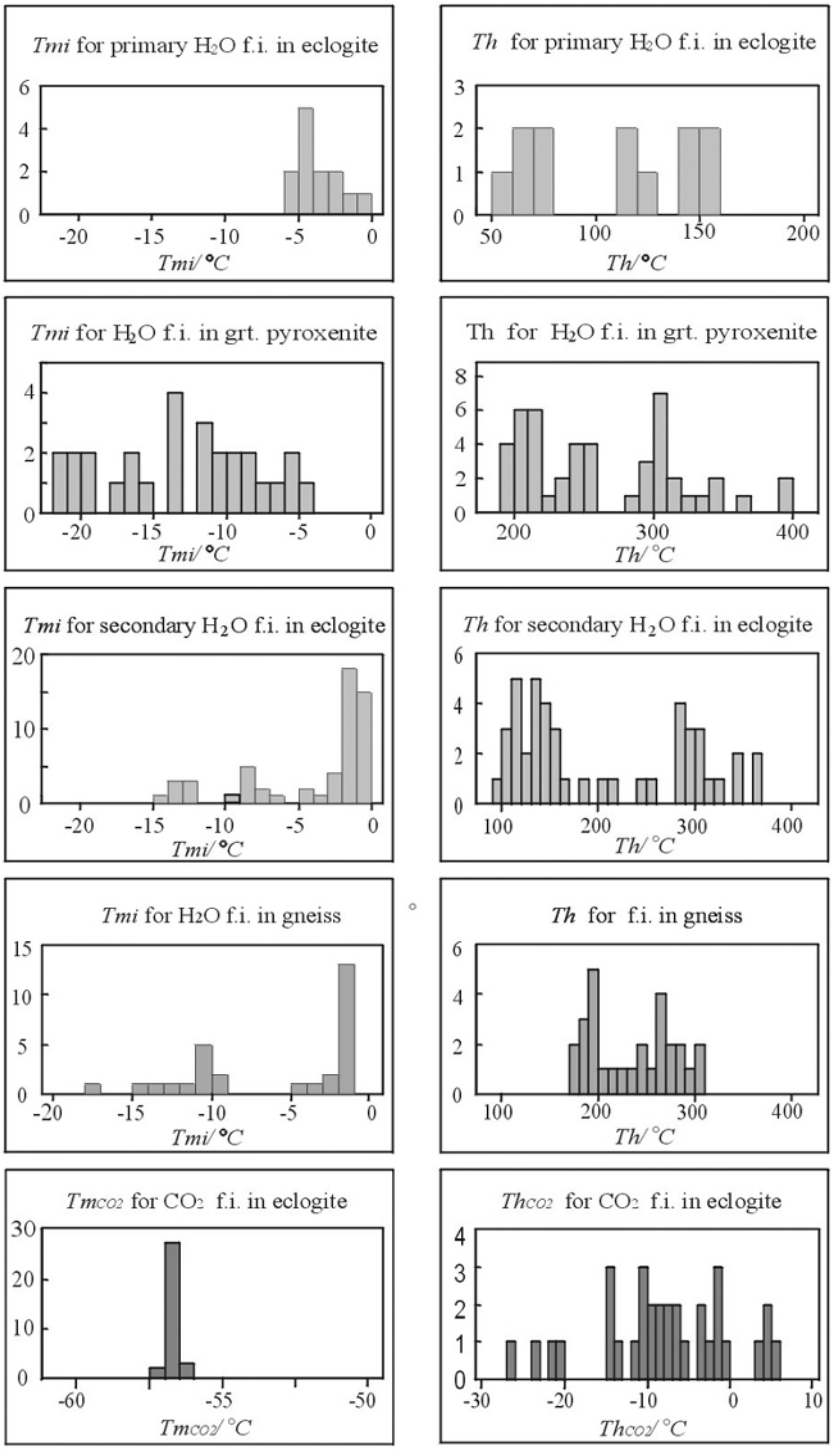


图 5　I 型包裹体的冰点和均一温度直方图。

a 和 b. 榴辉岩中原生 I 型包裹体的冰点和均一温度直方图; c 和 d. 石榴辉石岩中盐水包裹体的冰点和均一温度直方图;
e 和 f. 榴辉岩中次生 I 型包裹体的冰点和均一温度直方图; g 和 h. 片麻岩中 I 型包裹体的冰点和均一温度直方图;
i 和 j. 榴辉岩石英中 IV 型包裹体的 $T_{m_{CO_2}}$ 和 $T_{h_{CO_2}}$ 直方图

Fig. 5　Histograms for the microthermometric measurements of fluid inclusions.

a and b. Histograms of T_{mi} and T_h for primary type I inclusions in eclogite; c and d. Histograms of T_{mi} and T_h for brine inclusions in garnet pyroxenite; e and f. Histograms of T_{mi} and T_h for secondary type I inclusions in eclogite; g and h. Histograms of T_{mi} and T_h for type I inclusions in gneisses; i and j. Histograms of $T_{m_{CO_2}}$ and $T_{h_{CO_2}}$ for Type IV inclusions in eclogite

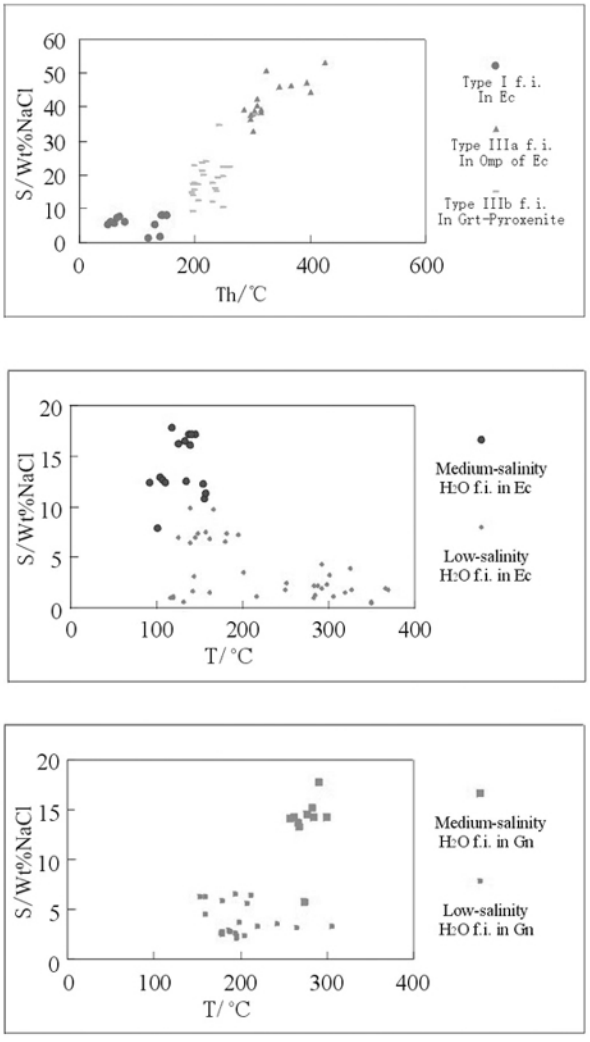


图6 超高压岩石中水溶液包裹体的盐度(S)-均一温度(T_h)关系。

a. 榴辉岩和石榴辉石岩中的I型和III型包裹体; b. 榴辉岩中的次生包裹体; c. 片麻岩中的I型包裹体。见正文解释

Fig. 6 Salinity vs. T_h diagram for aqueous fluid inc-lusions in the UHP rocks.

a. Type I and III inclusions in eclogites and garnet pyroxenite; b. secondary inclusions in eclogites; c. Type I inclusions in gneiss

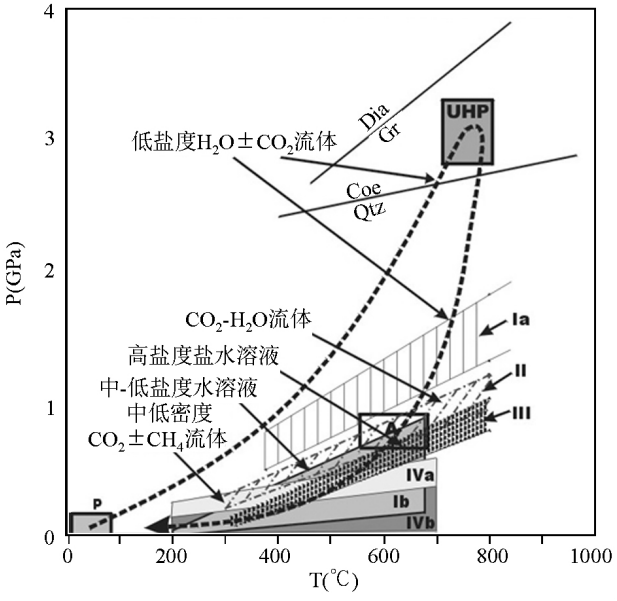


图7 CCSD主孔超高压岩石的P-T-流体演化轨迹

P-俯冲前近地表条件; UHP-超高压榴辉岩相阶段; A-角闪岩相退变质阶段(矿物温压计根据 Liu, *et al.*, 2001; Zhang, *et al.*, 2003)。图中并表示了I型、II型、III型和IV型包裹体的等容线范围及矿物的稳定域。矿物代号:Di:金刚石; Gr:石墨; Coe:柯石英:Qtz:石英

Fig. 7 P-T-fluid path for the UHP metamorphic rocks (the eclogites, garnet pyroxenite and gneisses) in CCSD Main Drill Hole.

P near surface conditions before subduction; UHP eclogite stage; A amphibolite retrograde stage (mineral thermobarometers are based on the data of Liu, *et al.*, 2001 and Zhang, *et al.*, 2003). In the diagram the ranges of isochores for types I, II and III inclusions, as well as mineral stability fields are shown. Mineral abbr.: Di diamond; Gr graphite; Coe coesite; Qtz quartz

含有少量 Ca^{2+}、Mg^{2+} 等阳离子; T_{mi} = -9.8 ~ -22.7℃, 具有中-高盐度(13.7 ~ 23.2wt% NaCl eq.); T_h 范围为194 ~ 250℃。

显微测温表明,IV型包裹体的 T_{mCO_2} = -56.6℃,相当于纯 CO_2 流体,这与拉曼探针分析结果吻合(图4g); T_{hCO_2} 范围较宽,从-26.4 ~ +4.5 ℃,相应的流体密度为1.06 ~ 0.90 g/cm^3(Angus *et al.*, 1976)。测得富 CH_4 包裹体的 T_h = -130 ~ -92℃(均一到液相或气相),相应的流体密度为0.065 ~ 0.37g/cm^3。

根据显微测温数据和有关公式和程序(Bischoff, 1991; Bodnar, 1993; Bakker, 2003)计算了I型和III型包裹体的盐度、密度和等容线(表2,图6和图7)。

从流体包裹体的盐度-均一温度图(图6a)看出,早期I型原生包裹体具有较低的盐度(≤10wt% NaCl)和均一温度(≤160℃),而原生III型包裹体的盐度(30 ~ ≥50wt% NaCl)和均一温度(200 ~ ≥400℃)较高。在图6b中,沿榴辉岩晶内裂隙分布的次生包裹体具有中等盐度(为8 ~ 18 wt% NaCl)和较低的均一温度,而沿穿颗粒裂隙分布的晚期次生包裹体具低盐度和宽广而离散的均一温度范围,反映这些包裹体可能经受了后期改造。在图6c中,角闪岩相阶段重结晶的石榴石、绿帘石和磷灰石中所含水溶液包裹体显示了与图6b中相反的演化趋势,即随着均一温度的降低,盐度也相应降低。

根据绿辉石、黝帘石和被绿辉石包裹方解石、石英中原生I型包裹体的盐度(1.23 ~ 8wt% NaCl)和密度(0.96 ~ ≥1.0g/cm^3)计算的等容线,在榴辉岩相变质温度(750 ~ 800 ℃)通过了约1.3 ~ 1.9GPa的压力范围;原生III型包裹

体的盐度从 30 ~ ≥50 wt% NaCl,密度一般为 0.7 ~ 1.0 g/cm^3,个别低达 0.5g/cm^3,它们的等容线通过了 0.86 ~ 1.0GPa的压力区间。这些压力值明显低于根据柯石英稳定性估计的峰期变质压力(图7)。由此表明,原生I型和III型包裹体在后期的减压过程中必定发生了再平衡,从而密度降低。锆石中II型包裹体成分可近似用 $CO_2 - H_2O$ 体系来表征,根据显微镜下估计含 H_2O 相和 CO_2 相的体积百分比、CO_2 相部分均一温度,近似计算了 $CO_2 - H_2O$ 流体等容线;而石英中的IV型包裹体相当于纯 CO_2 流体,它们的等容线在600℃和800 ℃时的压力分别为 0.8 ~ 1.06GPa 和 0.35 ~ 0.56GPa,同样大大低于超高压峰期变质压力。榴辉岩和片麻岩中的次生I型包裹体是在角闪岩相退变质阶段捕获的,它们的等容线通过了 550 ~ 600 ℃和 0.14 ~ 0.56GPa 的 P-T 条件。富 CH_4 包裹体的等容线非常平缓,通过了极低的压力范围,它们可能是由于 $CO_2 - H_2O$ 包裹体受到改造和流体重新捕获的结果,或是在变质 P-T 演化的很晚期捕获的变质流体。

超高压岩石中,从原生包裹体等容线推断的 P-T 条件与根据变质矿物组合得到的变质 P-T 条件不一致是一个很普遍现象。这是由于超高压岩石形成后经历了明显的近等温降压过程,包裹体的内压力大大高于围压而发生爆裂和流体渗漏、流体在原来包裹体附近被重新捕获而成为较低密度的包裹体;另外,包裹体流体与其直接围岩的相互作用也导致流体密度降低(沈昆等,2003)。这些现象在 CCSD 主孔的岩石中同样普遍存在。

7 讨论与结论

7.1 与进变质-超高压峰期变质有关的流体

进变质-超高压变质峰期流体组成以低盐度 $H_2O \pm CO_2$ 为主,这可以从以下三方面得到证实:(1)超高压矿物绿辉石、黝帘石含有孤立或小群产出的I型包裹体(单液相或气液两相);(2)被绿辉石包裹的石英和方解石中的低盐度 H_2O 包裹体,分别代表了石英和方解石的高压相结晶时捕获的残余流体相。Wang and Liou (1993)、Zhang and Liou (1996) 分别描述了大别山大理岩的石榴石和绿辉石中的方解石假象包体和大别山含白云石榴辉岩的石榴石中含方解石 + 石英的复合包体,认为它们分别是超高压条件下形成的霰石和柯石英假象;(3)在榴辉岩、退变质榴辉岩和片麻岩所含锆石中,发现 H_2O 包裹体和 $CO_2 - H_2O$ 包裹体或者存在于岩浆锆石核部,或者与柯石英等超高压矿物共存于同一变质增生环带(刘福来和许志琴,2004;本文图 3a 和图 3g)。我们曾在 CCSD-PP1 孔的蓝晶石英岩黄玉中和片麻岩被绿帘石包裹的锆石中发现有 $CO_2 - H_2O$ 包裹体(沈昆等,2003;Zhang *et al.*,2004),认为在大陆板块俯冲期间,$H_2O \pm CO_2$ 流体被表生沉积物带到地壳深处,在前进变质作用期间可结合到含羟基矿物中或以包裹体形式被锆石捕获。本区超高压岩石中普遍含黝帘石、多硅白云母等羟基矿物和少量碳酸盐也间接证明变质峰期流体组成应以 $H_2O \pm CO_2$ 为主。由此表明,低盐度 $H_2O - CO_2$ 流体在进变质、超高压变质和退变质作用各阶段均有存在,反映在整个超高压变质演化过程中流体具有继承性。

7.2 与绿辉石(透辉石)脉形成有关的早期高压退变质流体

在榴辉岩中局部出现绿辉石分凝脉(条带),其中含许多出溶矿物页片(由柯石英转变的石英)或固体矿物包体(由霰石转变的方解石以及未知硅酸盐)。有关超高压矿物中的出溶页片已有许多报道,如单斜辉石中的钛铁矿长条颗粒(Zhang and Liou,1998)、单斜辉石中的钾长石页片(Sobolev and Shatsky,1990; Zhang *et al.*, 1997)、单斜辉石中的出溶杆状石英(Zhang and Liou,1998; Tsai,1998,苏文等,2001),以及磷灰石中的独居石等(Zhang *et al.*,1997a)。Zhang and Liou(1998)和 Tsai(1998)认为,苏鲁地区榴辉岩和北大别退变质榴辉岩中绿辉石核部含定向排列的杆状石英是在超高压峰期变质条件下含过量 SiO_2 的单斜辉石的出溶产物。苏文等(2001)发现大别山北部石榴辉石岩透辉石中页片状石英和单斜顽火辉石的出溶现象,也认为是超高压单斜辉石由于压力降低造成的。

然而与这些出溶矿物相伴产出的流体包裹体还少有报道。本区绿辉石分凝条带中的绿辉石的结晶粒度较粗大,应是超高压变质峰期稍晚阶段流体活度相对增高条件下形成的,绿辉石中的III型包裹体除含石盐子晶外,还含有与出溶矿物页片(包体)相同成分的固体相(图 3l),反映原先含有这些组分(如 SiO_2)、且成分均一的绿辉石是在超高压条件下结晶的,随着压力降低,位于绿辉石晶体结构中的这些成分变得不稳定而析出[研究还表明绿辉石中的羟基含量与 SiO_2 相关(Smyth *et al.*,1991)],而早先捕获的原生流体包裹体提供了这些组分沉淀的场所。III型包裹体很可能代表了绿辉石结晶时存在的一种含硅酸盐和碳酸盐的高盐度熔体-流体(详见另文讨论)。Andersen *et al.* (1991) 报道,在挪威西部加里东造山带的高压榴辉岩中含张性长英脉。他们认为,在峰期高压变质条件下,具有高水活度流体沿剪切带带入将引起榴辉岩相岩石部分熔融,由此产生的深熔熔体将会结晶出花岗岩脉。Philippot(1996)指出,在阿尔卑斯高压脉的流体包裹体含大量子矿物,包括氯化物(石盐、钾盐)、碳酸盐(方解石、白云石)、硫酸盐(硬石膏、重晶石)、硅酸盐(云母、黝帘石、蓝晶石、绿辉石等)和 Fe-Ti 氧化物等,结合有关高压流体的实验资料认为,在高压条件下,富 NaCl 水溶液可以溶解大量主元素(Si、Al、Mg、Fe、Ca、Na、K)和微量元素(Zr、Ti、Ba、Ce、La)。压力升高和流体中可溶盐离子增加将大大提高主元素和微量元素的溶解度(Ayers 和 Eggler,1995)。另外,在榴辉岩磷灰石中的出溶矿物(独居石?) + 流体包裹体、石榴透辉岩中的III型包裹体的捕获机制可能也与此类似。这些现象提供了超高压条件下变质流体性质受局部流体-熔体-岩石相互作用影响的有力证据。

7.3 关于非水流体(non-aqueous fluids)

变质岩中的非水流体主要指含碳流体 CO_2、CH_4、CO_2-CH_4、CO_2-N_2、CH_4-N_2及其混合物,偶尔还有含 H_2S 体系流体。Andersen *et al.*(1989,1993)通过对挪威加里东造山带高级变质岩中流体包裹体的研究认为,麻粒岩相岩石中变质流体以富 CO_2为特征,而榴辉岩相岩石中以富 N_2流体为特征。Klemd *et al.*(1992)在德国 Müncheberg 片麻岩杂岩的榴辉岩相变沉积岩中也发现了密度极高的 CO_2-N_2流体包裹体。Shen *et al.*(1996)、Xiao *et al.*(2001)和 Fu *et al.*(2001,2003)分别报道了山东胶南榴辉岩和超镁铁岩,大别山碧溪岭、双河、饶八寨等地榴辉岩、麻粒岩和硬玉石英岩中的含碳包裹体。

然而在 CCSD 钻孔岩心中,非水(含碳)包裹体的丰度较低,且主要是 $CO_2\pm CH_4$包裹体,大多数 CO_2(以及 CO_2-H_2O)包裹体的 $T_{mCO_2}=-56.6℃$,相当于纯 CO_2流体。在本钻孔样品中很少见到含 N_2包裹体(最近,中山大学翟伟在 CCSD 主孔切穿榴辉岩的石英脉中发现了含 N_2包裹体);类似地,虽然榴辉岩中常见黄铁矿组分,但在流体包裹体中也未检测到 H_2S,这可能与本区超高压岩石形成于高水活度条件有关,N_2在矿物和流体之间的分配取决于水活度(a_{H_2O})和氧逸度(f_{H_2O}),在低水活度和高氧逸度条件下 N_2进入流体相。在富 H_2O(盐水)流体中 CO_2、CH_4、N_2和 H_2S 组分被明显稀释。另外,Touret(1992)在讨论俯冲带岩石中的流体包裹体时指出,假如保存在十分少见的包裹体中的同变质流体是均匀的水溶液-气体混合物的话,那么纯气体(CO_2、N_2、CH_4)或其混合物(主要是 CO_2+N_2、CH_4+N_2)可以通过在变质后隆起期间反复的流体不混溶作用而形成。

前面已提到,在超高压变质峰期以低盐度富 H_2O 流体为主,CO_2-H_2O 流体仅局部存在(如锆石中的 CO_2-H_2O 包裹体、绿辉石中的少量碳酸岩矿物包体),随着含羟基矿物结晶,流体中 H_2O 被消耗,CO_2活度增高,当达到一定浓度便引起岩石碳酸岩化。在榴辉岩石英中的 CO_2-H_2O 包裹体和 CO_2包裹体可能反映了这一流体作用事件,且不排除超高压变质峰期后曾发生流体不混溶作用。

7.4 与角闪岩相退变质作用有关的退变质流体

辉石角闪岩中的含石盐盐水包裹体代表了角闪岩相退变质早期带入的 H_2O 流体与矿物相互作用的产物,可能的反应如下:

$$Omp + Grt + Qtz + H_2O(\text{流体相含 } K^+) = Di + Amp + Pl + H_2O(\text{流体相含 } Na^+ \text{ and } Ca^{2+})$$

$$Phn + Omp + H_2O(\text{流体相含 } Na^+) = Bt + Pl \pm Amp + H_2O(\text{流体相含 } K^+ + Ca^{2+})$$

$$Grt + H_2O(\text{流体相含 } Na^+ + K^+) = Amp \pm Ep(Czo) \pm Chl$$

在中强退变质榴辉岩的石英中,普遍可见 H_2O 和 CO_2-H_2O 包裹体沿裂隙分布,包裹体轨迹终止于(与黑云母或角闪石相邻的)石英颗粒边缘,并且流体包裹体的丰度随退变质程度加强而增大,同样也表明这些 H_2O 和 CO_2-H_2O 包裹体的捕获应与角闪岩相退变质事件有关;在片麻岩重结晶石榴石和绿帘石中则以中-低盐度 H_2O 包裹体为主。可以设想,随着超高压岩石折返进入中上部地壳和减压作用,"名义上"无水矿物(绿辉石、石榴石、蓝晶石)所含结构水将发生出溶(Zheng,2004; Chen *et al.*,2004),加上外部富 $H_2O\pm CO_2$流体的带入,这些岩石遭受角闪岩相退变质作用,通过无水矿物(石榴石、辉石)的水化反应形成角闪石、黑云母等含水矿物,变质流体中的 H_2O 被大量消耗,局部提高了水溶液的盐度和/或 CO_2浓度,赋存在退变质榴辉岩(角闪岩)石英裂隙中的 CO_2-H_2O 包裹体和具不同盐度的 H_2O 包裹体可能反映了这次流体作用事件。

8 结论

综合以上有关流体包裹体的资料,可以得出以下几点认识。

(1)在 CCSD 主孔超高压岩石中存在不同成分的流体,包括中-低盐度的富水溶液和 CO_2-H_2O 流体、含 CO_2和 SiO_2的高盐度复杂盐水,以及含 $CO_2\pm CH_4$流体等。进变质-峰期变质阶段变质流体以低盐度 $H_2O\pm CO_2$流体为特征。早期高压退变质阶段,随着压力降低,在超高压条件下形成的单斜辉石捕获含 CO_2和 SiO_2的高盐度复杂盐水包裹体,并发生石英等矿物和流体的出溶;而含在蓝晶石和磷灰石晶体结构中的羟基或 H_2O 分子也发生出溶,形成低盐度 H_2O 包裹体。随着高压岩石的折返进入中上部地壳,名义上无水矿物(绿辉石、石榴石、蓝晶石)所含结构水被大量释放,加上外部流体的带入,在角闪岩相退变质阶段有大量中-低盐度的 H_2O 和 CO_2-H_2O 包裹体被捕获,同时早期包裹体受到改造。中-低盐度的 $H_2O(\pm CO_2)$包裹体存在于进变质、超高压变质(锆石、绿辉石、蓝晶石和黝帘石)和退变质作用(石英、重结晶石榴石、绿帘石、方解石)各阶段的矿物中,这表明变质流体具有继承性演化。

(2)超高压变质岩原岩和角闪岩相退变质岩中存在较丰富的流体包裹体,但在超高压峰期捕获的流体包裹体却很少见。这表明丰富的原岩流体或在超高压进变质过程中被排出岩石体系,或进入含水超高压矿物和结合进名义上无水矿物。而原生流体包裹体与出溶矿物的共生,表明在超高压变质峰期后的减压过程中从名义上无水矿物出溶的组分(SiO_2、H_2O 等)可以进入这些流体包裹体中,并产生流体-岩石相互作用。角闪岩相阶段的流体包裹体具有复杂的化学组成,且在局部富集,表明有外部加入的流体。

(3)流体包裹体类型、丰度和成分在不同类型岩石、主矿物中和不同钻孔深度都存在明显差异,这既与原岩类型

及其所含流体数量有关,也与岩石经历不同变质阶段所记录的流体-矿物相互作用有关。反映超高压变质峰期流体受到局部矿物-流体平衡的制约,在超高压变质作用过程中没有大规模的透入性流体活动和均匀化现象,这也与岩石氧同位素研究结果相符。

(4)根据超高压变质峰期包裹体等容线得到的压力值大大低于根据矿物温压计获得的近峰期变质压力,这表明包裹体的密度在捕获后发生了不同程度改变。这些变化包括渗漏、部分爆裂和流体-岩石相互作用等。

致谢 作者真诚感谢中国大陆科学钻探工程项目众多参加者的支持和帮助,并对中国地质大学(北京)和中山大学地球科学系包裹体实验室的张文淮、翟伟老师、国土资源部大陆动力学实验室阎玲同志对包裹体显微测温和 Raman 探针分析所给予的帮助特别致谢。

References

Andersen T, Burke E A J and Austrheim H. 1989. Nitrogen-bearing, aqueous fluid inclusions in some eclogites from the Western Gneiss Region of the Norwegian Caledonides. Contrib. Mineral. Petrol., 103: 153 – 165

Andersen T, Austrheim H and Burke E A J. 1991. Mineral-fluid-melt interactions in high-pressure shear zones in the Bergen Arcs nappe complex, Calidonides of W. Norway: Implications for the fluid regime in Caledonian eclogite-facies metamorphism. Lithos, 27: 187 – 204

Andersen T, Austrheim H, Burke E A J and Elvevold S. 1993. N_2 and CO_2 in deep crustal fluids: evidence from the Caledonides of Norway. Chem. Geol., 108: 113 – 132

Andersen T, Burke E A J and Austrheim H. 1989. Nitrogen-bearing, aqueous fluid inclusions in some eclogites from the Western Gneiss Region of the Norwegian Caledonides. Contrib. Mineral. Petrol., 103:153 – 165

Ayers J C, Eggler D H. 1995. Partition of elements between silicate melt and H_2O-NaCl fluids at 1.5 and 2.0 GPa pressure: Implications for mantle metasomatism. Geochim. Cosmochim. Acta, 59: 4237 – 4246

Bakker R J. 2003. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modeling bulk fluid properties. Chem. Geol., 194: 3 – 23

Bebout G E. 1991. Field-based evidence for devolatization in subduction zones: implications for arc Magmatism. Science, 251: 413 – 416

Bebout G E. 1996. Volatile transfer and recycling at convergent margins: mass-balance and insights from high P/T metamorphic rocks. In: Bebout G E, Scholl D W, Kirby S H *et al*. (eds.). Subduction: Top to Bottom. Geophys. Momograph, 96: 179 – 193

Bischoff J L. 1991. Densities of liquids and vapors in boiling NaCl-H_2O solutions: a PVTX summary from 300° to 500℃. Amer. J. Sci. 291: 309 – 338

Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O-NaCl solutions. Geochim. Cosmochim. Acta, 49:1861 – 1873

Chen B, Zheng Y F, Wu Y B. 2004. A study of oxygen isotopes and hydroxyl content in minerals of UHP metamorphic rocks from CCSD core 734 to 933m. Acta Petrolgica Sinica, 20(5): 1116 – 1132 (in Chinese with English abstract)

Franz L, Romer R L, Klemd R, Schmid R, Oberh nsli R, Wagner T and S Dong. 2001. Eclogite-facies quartz veins within metabasites of the Dabie Shan (eastern China): pressure-temperature-time-deformation path, composition of the fluid phase and fluid flow during exhumation of high-pressure rocks. Contrib. Mineral. Petrol., 141: 322 – 346

Fu B, Touret J L R and Zheng Y F. 2001. Fluid inclusions in coesite-bearing eclogites and jadeite quartzite at Shuanghe, Dabie Shan (China). J. Metamorphic Geol., 19: 529 – 545

Fu B, J L R Touret, Zheng Y F. 2003. Remnants of premetamorphic fluid and oxygen isotopic signatures in eclogites and garnet clinopyroxenite from the Dabie-Sulu terranes, eastern China. J. Metamorphic Geol., 21: 561 – 578

Holland T J B. 1979. Experimental determination of the reaction paragonite = jadeite + kyanite + water, internally consistent thermodynamic data for part of the system $Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$, with application to eclogites and blueschists. Contrib. Mineral. Petrol., 68: 293 – 301

Hollistar L S. 1990. Enrichment of CO_2 in fluid inclusions in quartz by removal of H_2O during crystal-plastic deformation. J. Structural Geology, 7: 895 – 901

Johnson E L and Hollister L S. 1995. Syndeformational fluid trapping in quartz: determining the pressure-temperature conditions of deformation from fluid inclusions and the formation of pure CO_2 fluid inclusions during grain boundary migration. J. Metamorphic Geol., 13: 239 – 249

Kerrick D M. 1990. The Al_2SiO_5 polymorphs. In: Robie P H (ed.). Reviews in Mineralogy, vol. 22, Mineral. Soc. Am., Washington, DC, pp 406

Klemd R, van der Kerkhof A M and Horn E E. 1992. High-density $CO_2 - N_2$ inclusions in eclogite-facies metasediments of the Muncheberg gneiss complex, SE Germany. Contrib. Mineral. Petrol., 111: 409 – 419

Liou J G, Zhang R Y, Ernst W G. 1995. Occurrence of hydrous and carbonate phases in ultrahigh-pressure rocks from east-central China: Implications for the role of volatiles deep in cold subduction zones. Island Arc, 4: 362 – 375

Liou J G, Zhang R Y, Ernst W G, Rumble D, Maruyama S. 1998. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks. In: Ultrahigh-pressure Mineralogy (Eds.) Reviews In Mineralogy, 33 – 96

Lui F L, Xu Z Q. 2004. Fluid inclusions in coesite-bearing zircons from UHP rocks in southern Su-Lu terrain. Chinese Science Bulletin, 49 (2): 181 – 189 (in Chinese)

Liu J, Bohlen S R, Ernst W G. 1996. Stability of hydrous phases in subducting oceanic crust. Earth Planet. Sci. Lett., 143: 161 – 171

Peacock S M. 1990. Fluid processes in subduction zones. Science, 248: 329 – 337

Peacock S M. 1993. Large scale hydration of the lithosphere above subducting slabs. In: J L R Touret and A B Thompson (Guest eds.) Fluid-Rock Interactions in the Deeper Continental Lithosphere. Chem. Geol., 108: 49 – 59

Philippot P. 1993. Fluid-melt-rock interaction in mafic eclogites and coesite-bearing metasediments: constraints on volatile recycling during subduction. Chem. Geol., 108: 93 – 112

Philippot P. 1996. The Chemistry of high-pressure fluids (1 to 3 GPa): natural observations vs. experimental constraints. Earth Sci. Front., China Univ. Geosci., Beijing, 3: 39 – 52

Philippot P, Chevallier P, Chopin C and Dubessy J (1995) Fluid composition and evolution in coesite-bearing rocks (Dora-Maira massif, Western Alps): implications for element recycling during subduction. Contrib. Mineral. Petrol., 121: 29 – 44

Philippot P and Selverstone J. 1991. Trace element-rich brines in

eclogitic veins: implications for fluid composition and transport during subduction. Contrib. Mineral. Petrol., 106: 417 – 430

Scambellury M, Philippot P. 2001. Deep fluids in subduction zones. Lithos, 55:213 – 227

Shen K, Xu H F, Xu Z Q, 1996. Characteristics of metamorphic fluids in the eclogites and its country rocks from the ultrahigh-pressure metamorphic belt in Jiaonan terrain, Shandong (China). In: Proc. of Researches on the Geology and Mineral Resources in Shandong Province (China), Shandong Sci. & Tech. Publishing House, Jinan, 62 – 80 (in Chinese with English abstract)

Shen K, Zhang Z, van den Kerkhof A M, Xiao Y, Xu Z and Hoefs J. 2003. Unusual high-density and saline aqueous inclusions in ultra-high pressure metamorphic rocks from Su-Lu terrane, in eastern China. Chinese Sci. Bull., 48(18):2018 – 2023

Shen K, Zhang Z M, A M van den Kerkhof, Xiao Y, Joefs J. 2003. Metamorphic fluids and evolution in the UHP rocks from the pre-pilot hole of Jiangsu province, China. Acta Geologica Sinica, 77(4): 522 – 532 (in Chinese)

Smyth J R, Bell R D and Rossman G R. 1991. Incorporation of hydroxyl in upper mantle clinopyroxene. Nature, 351: 732 – 735

Sobolev N V and Shatsky V S. 1990. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks. Nature, 343: 742 – 746

Su W, You Z D, Wang R C, Liu X W. Exsolution of quartz and clinnoenstatite from diopside in garnet pyroxinite. Chinese Science Bulletin, 46(10): 850 – 853 (in Chinese)

Touret J L R. 1981. Fluid inclusions in high-grade metamorphic rocks. In: Hollister L S & Crawford M L (eds.) Short course in fluid inclusions: Applications to petrology. 182 – 208. Mineral. Assoc. Canada, Calgary

Touret J L R. 1992. Fluid inclusions in subducted rocks. Proc. Kon. Ned. Akad. V. Wetensch, 95(3): 385 – 403

Touret J L R. 2001. Fluids in metamorphic rocks. Lithos, 55: 1 – 25

Tsai C H. 1998. Petrology and geochemistry of mafic-ultramafic rocks in the north Dabie omplex, central-eastern China. Ph D dissertation, Stanford Univ, Stanford, CA

Wang X and Liou J G. 1993. Ultrahigh-pressure metamorphism of carbonate rocks in the Dabie moutains, central China. J. Metamorphic Geol., 11: 575 – 588

Xiao Y, Hoefs J, van den Kerkhof A M, Fiebig J and Zheng Y. 2000. Fluid history of UHP Metamorphism in Dabie Shan, China: a fluid inclusion and oxygen isotope study on the coesite-bearing eclogite from Bixiling. Contrib. Mineral. Petrol., 139: 1 ~ 16

Xiao Y, Hoefs J, van den Kerkhof A M and Li S G. 2001. Geochemical constraints of the eclogite and granulite facies metamorphism as recognized in the Raobazhai complex from North Dabie Shan, China. Journal Petrology 19: 3 – 19

You Z D, Han Y J, Yang W R, Zhang Z M, Wei B Z, Liu R. 1996. The high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic belt in the east Qinling and Dabie Mountains, China. University of Geoscience Press, Wuhan, China

Zhang R Y and Liou J G. 1996. Significance of coesite inclusions in dolomite from eclogite in the southern Dabie mountains, China. Am. Mineral., 80: 181 – 186

Zhang R Y and Liou J G. 1997. Partial transformation of gabbro to coesite-bearing eclogites from Yangkou, the Sulu terrane, eastern China. J. Metamorpic Geol., 12: 169 – 186

Zhang R Y and Liou J G. 1998. Ultrahigh-pressure metamorphism of the Sulu terrane, eastern China: A prospective view. Continental Dynamics

Zhang R Y, Hacker B and Liou J G. 1997. Exsolution in ultrahiag-P minerals from the Dabie-Sulu (China) and Kokchetav (Kazakhstan) terranes. Terra Nova, 9: 43

Zhang Z, Shen K, Xiao Y, van den Kerkhof A M, Hoefs J Jochen and Liou J G. 2004. Fluid composition and evolution attending UHP metamorphism: Study of fluid inclusions from drill cores, southern Sulu belt, eastern China. Inter. Geol. Rev., 46: (in press)

Zhang Z M, Zhang J F, You Z D, Shen K. 2005. Ultrahigh-pressure metamorphic P-T-t path of the Sulu orogenic belt, eastern central China. Acta Petrogica Sinica, 21(2)257 – 270 (in Chinese with English abstract)

Zhang Z M, Xiao Y L, Hoefs J, Jahn B M, Liou J G. Petrology of UHP rocks from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (in preparation).

Zheng Y F. 2004. Fluid activities during the exhumation of deep-subducted continental plates. Chinese Science Bulletin 49(10): 917 – 929 (in Chinese)

Zheng Y F, Fu B, Wei C S. 1999. Geocheistry of metamorphic fluids: from static qualitative flow to dynamic quantification. Acta Petrologica Sinica, 15: 564 – 575 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈斌,郑永飞,吴元保. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔 734 ~ 933m 岩芯矿物的氧同位素和羟基含量研究. 岩石学报 20(5): 1116 – 1132

刘福来,许志琴. 2004. 南苏鲁超高压岩石含柯石英锆石中的流体包裹体. 科学通报,49(2):181 – 189

沈昆,张泽明, A. M. van den Kerkhof 等. 2003. 江苏东海中国大陆科学钻探工程预先导孔(CCSD – PP1)超高压岩石变质流体及其演化. 地质学报,77(4):522 – 532

苏文,游振东,王汝成,刘祥文. 2001. 石榴辉石岩透辉石中石英和单斜顽火辉石的出溶. 科学通报,46(10):850 – 853

张泽明,张金凤,游振东,沈昆. 2005. 苏鲁造山带超高压变质作用及其 P-T-t 轨迹. 岩石学报, 21(2):257 – 270

郑永飞,傅斌,魏春生. 1999. 变质流体地球化学: 从静态定性"流"向动态定量. 岩石学报,15:564 – 575

郑永飞. 2004. 深俯冲大陆板块折返过程中的流体活动. 科学通报, 49(10):917 – 929

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

万方数据 WANFANG DATA 文献链接

作者: 沈昆， 张泽明， 孙晓明， 徐莉， SHEN Kun， ZHANG ZeMing， SUN XiaoMing， XU Li

作者单位: 沈昆,SHEN Kun(山东省地质科学实验研究院,济南,250013)， 张泽明,ZHANG ZeMing(中国地质科学院地质研究所,北京,100037)， 孙晓明,徐莉,SUN XiaoMing,XU Li(中山大学地球科学系,广州,510275)

刊名: 岩石学报 ISTIC SCI PKU

英文刊名: ACTA PETROLOGICA SINICA

年，卷(期): 2005，21(2)

被引用次数: 40次

参考文献(60条)

1. Andersen T. Burke E A J. Austrheim H Nitrogen-bearing, aqueous fluid inclusions in some eclogites from the Western Gneiss Region of the Norwegian Caledonides 1989

2. Andersen T. Austrheim H. Burke E A J Mineral-fluid-melt interactions in high-pressure shear zones in the Bergen Arcs nappe complex, Calidonides of W. Norway: Implications for the fluid regime in Caledonian eclogite-facies metamorphism 1999

3. Andersen T. Austrheim H. Burke E A J. Elvevold S N2 and CO2 in deep crustal fluids: evidence from the Caledonides of Norway 1993

4. Andersen T. Burke E A J. Austrheim H Nitrogen-bearing, aqueous fluid inclusions in some eclogites from the Western Gneiss Region of the Norwegian Caledonides 1989

5. AYERS J C. Eggler D H Partition of elements between silicate melt and H2 O-NaCl fluids at 1.5 and 2.0 GPa pressure: Implications for mantle metasomatism 1995

6. Bakker R J Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modeling bulk fluid properties 2003

7. BEBOUT G E Field-based evidence for devolatization in subduction zones: implications for arc Magmatism 1991

8. BEBOUT G E Volatiletransferandrecyclingatconvergentmargins:mass-balanceandinsightsfromhighP/Tmetamorphicrocks 1996

9. Bischoff J L Densities of liquids and vapors in boiling NaCl-H2Osolutions: a PVTX summary from 300° to 500℃ 1991

10. BODNAR R J Revised equation and table for determining the freezing point depression of H2 O-NaCl solutions 1993

11. CHEN B. Zheng Y F. Wu Y B A study of oxygen isotopes and hydroxyl content in minerals of UHP metamorphic rocks from CCSD core 734 to 933m(in Chinese with English abstract0)[期刊论文]-Acta Petrolgica Sinica 2004(05)

12. FRANZ L. Romer R L. Klemd R. Schmid R, Oberh nsli R, Wagner T S Dong Eclogite-facies quartz veins within metabasites of the Dabie Shan (eastern China):pressure-temperature-timedeformation path, composition of the fluid phase and fluid flow during exhumation of high-pressure rocks 2001

13. Fu B. Touret J L R. Zheng Y F Fluid inclusions in coesitebearing eclogites and jadeite quartzite at

Shuanghe,Dabie Shan (China) 2001

14. Fu B. J L R Touret. Zheng Y F Remnants of premetamorphic fluid and oxygen isotopic signatures in eclogites and garnet clinopyroxenite from the Dabie-Sulu terranes,eastern China 2003

15. Holland T J B Experimental determination of the reaction paragonite = jadeite + kyanite + water, internally consistent thermodynamic data for part of the system Na2 O - Al2 O3 - SiO2 -H2 O, with application to eclogites and blueschists 1979

16. Hollistar L S Enrichment of CO2 in fluid inclusions in quartz by removal of H2 O during crystal-plastic deformation 1990

17. Johnson E L. Hollister L S Syndeformational fluid trapping in quartz:determining the pressure-temperature conditions of deformation from fluid inclusions and the formation of pure CO2 fluid inclusions during grain boundary migration 1995

18. KERRICK D M The Al2 SiO5 polymorphs 1990

19. Klemd R. van der Kerkhof A M. Horn E E High-density CO2 - N2 inclusions in eclogite-facies metasediments of the Muncheberg gneiss complex, SE Germany 1992

20. Liou J G. Zhang R Y. Ernst W G Occurrence of hydrous and carbonate phases in ultrahigh-pressure rocks from east-central China: Implications for the role of volatiles deep in cold subduction zones 1995

21. Liou J G. Zhang R Y. Ernst W G. Rumble D,Maruyama S High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks 1998

22. Lui F L. Xu Z Q Fluid inclusions in coesite-bearing zircons from UHP rocks in southern Su-Lu terrain(in Chinese)[期刊论文]-科学通报 2004(02)

23. Liu J. Bohlen S R. Ernst W G Stability of hydrous phases in subducting oceanic crust 1996

24. Peacock S M Fluid processes in subduction zones 1990

25. Peacock S M Large scale hydration of the lithosphere above subducting slabs 1993

26. Philippot P Fluid-melt-rock interaction in mafic eclogites and coesite-bearing metasediments: constraints on volatile recycling during subduction 1993

27. Philippot P The Chemistry of high-pressure fluids (1 to 3 GPa):natural observations vs. experimental constraints. Earth Sci. Front 1996

28. Philippot P. Chevallier P. Chopin C. Dubessy J Fluid composition and evolution in coesite-bearing rocks (Dora-Maira massif, Western Alps): implications for element recycling during subduction 1995

29. Philippot P. Selverstone J Trace element-rich brines in eclogitic veins: implications for fluid composition and transport during subduction 1991

30. Scambellury M. Philippot P Deep fluids in subduction zones 2001

31. Shen K. Xu H F. Xu Z Q Characteristics of metamorphic fluids in the eclogites and its country rocks from the ultrahigh-pressure metamorphic belt in Jiaonan terrain,Shandong (China).(in Chinese with English abstract) 1996

32. Shen K. Zhang Z. van den Kerkhof A M. Xiao Y,Xu Z Hoefs J Unusual high-density and saline aqueous

inclusions in ultrahigh pressure metamorphic rocks from Su-Lu terrane, in eastern China[期刊论文]-Chinese Science Bulletin 2003(18)

33. Shen K. Zhang Z M. A M van den Kerkhof. Xiao, Y, , Joefs, J Metamorphic fluids and evolution in the UHP rocks from the pre-pilot hole of Jiangsu province, China(in Chinese)[期刊论文]-Acta Geologica Sinica 2003(04)

34. Smyth J R. Bell R D. Rossman G R Incorporation of hydroxyl in upper mantle clinopyroxene 1991

35. Sobolev N V. Shatsky V S Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks 1990

36. Su W. You Z D. Wang R C. Liu X W Exsolution of quartz and clinnoenstatite from diopside in garnet pyroxinite

37. Touret J L R Fluid inclusions in high-grade metamorphic rocks 1981

38. Touret J L R Fluid inclusions in subducted rocks 1992

39. Touret J L R Fluids in metamorphic rocks 2001

40. Tsai C H Petrology and geochemistry of mafic-ultramafic rocks in the north Dabie omplex, central-eastern China 1998

41. WANG X. Liou J G Ultrahigh-pressure metamorphism of carbonate rocks in the Dabie moutains, central China 1993(11)

42. XIAO Y. Hoefs J. van den Kerkhof A M. Fiebig J Zheng Y Fluid history of UHP Metamorphism in Dabie Shan, China: a fluid inclusion and oxygen isotope study on the coesite-bearing eclogite from Bixiling 2000

43. XIAO Y. Hoefs J. van den Kerkhof A M. Li S G Geochemical constraints of the eclogite and granulite facies metamorphism as recognized in the Raobazhai complex from North Dabie Shan, China 2001

44. YouZD. HanYJ. YangW R. ZhangZ M, WeiB Z, Liu R The high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic belt in the east Qinling and Dabie Mountains, China 1996

45. Zhang R Y. Liou J G Significance of coesite inclusions in dolomite from eclogite in the southern Dabie mountains, China 1996

46. Zhang R Y. Liou J G Partial transformation of gabbro to coesite-bearing eclogites from Yangkou, the Sulu terrane, eastern China. J 1997

47. Zhang R Y. Liou J G Ultrahigh-pressure metamorphism of the Sulu terrane, eastern China: A prospective view 1998

48. Zhang R Y. Hacker B. Liou J G Exsolution in ultrahiag-P minerals from the Dabie-Sulu (China) and Kokchetav (Kazakhstan)terranes 1997

49. Zhang Z. Shen K. Xiao Y. van den Kerkhof A M, Hoefs J Jochen Liou J G Fluid composition and evolution attending UHP metamorphism: Study of fluid inclusions from drill cores, southern Sulu belt, eastern China (in press) 2004

50. Zhang Z M. Zhang J F. You Z D. Shen K Ultrahigh-pressuremetamorphicP-T-tpathoftheSuluorogenicbelt, easterncentralChina(inChinesewithEnglishabstract)[期刊论文]-Acta Petrogica Sinica 2005(02)

51. Zhang Z M. XiaoYL. Hoefs J. Jahn B M, Liou J G Petrology of UHP rocks from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (in preparation)

52. Zheng Y F Fluid activities during the exhumation of deepsubducted continental plates (in Chinese) [期刊论文]-科学通报 2004(10)

53. Zheng Y F. Fu B. Wei C S Geocheistry of metamorphic fluids:from static qualitative flow to dynamic quantification(in Chinese with English abstract) 1999

54. 陈斌. 郑永飞. 吴元保 中国大陆科学钻探工程主孔734～933m岩芯矿物的氧同位素和羟基含量研究[期刊论文]-岩石学报 2004(05)

55. 刘福来. 许志琴 南苏鲁超高压岩石含柯石英锆石中的流体包裹体[期刊论文]-科学通报 2004(02)

56. 沈昆. 张泽明. A M van den Kerkhof 江苏东海中国大陆科学钻探工程预先导孔(CCSD-PP1)超高压岩石变质流体及其演化[期刊论文]-地质学报 2003(04)

57. 苏文. 游振东. 王汝成. 刘祥文 石榴辉石岩透辉石中石英和单斜顽火辉石的出溶[期刊论文]-科学通报 2001(10)

58. 张泽明. 张金风. 游振东 苏鲁造山带超高压变质作用及其P-T-t轨迹[期刊论文]-岩石学报 2005(02)

59. 郑永飞. 傅斌. 魏春生 变质流体地球化学:从静态定性"流"向动态定量[期刊论文]-岩石学报 1999

60. 郑永飞 深俯冲大陆板块折返过程中的流体活动[期刊论文]-科学通报 2004(10)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 徐莉. 孙晓明. 翟伟. 梁金龙. 梁业恒. 沈昆. 张泽明. 汤倩. XU Li. SUN XiaoMing. Zhai Wei. LIANG JinLong. LIANG YeHeng. SHEN Kun. ZHANG ZeMing. Tang Qian 中国大陆科学钻探(CCSD)高压超高压变质岩中石英脉流体包裹体初步研究 -岩石学报2005, 21(2)

初步的岩相学和冷热台显微测温表明,CCSDHP-UHP岩石中石英脉和后期碳酸盐脉中含有3种流体包裹体:盐水溶液(NaCl-H0)包裹体(Ⅰ类)、NaCl-CaCl2-H2O(Ⅱ类)和N2-CH4纯气相(Ⅲ类)包裹体,其中Ⅰ类盐水溶液包裹体可进一步分为中高盐度盐水溶液包裹体(Ⅰa)、中等盐度盐水溶液包裹体(Ⅰb)和低盐度盐水溶液包裹体(Ⅰc),而Ⅲ类为CCSD中首次发现;Ⅰa、Ⅰb和Ⅱ型流体包裹体主要以原生或假次生形式赋存在榴辉岩的石英脉或石英颗粒中,在角闪岩相的片麻岩及其石英脉中均未观察到,显示它们可能主要被捕获于榴辉岩的减压重结晶或退变质阶段,而Ⅰc型包裹体分布广泛,表明其主体可能是在超高压变质岩折返过程的最晚阶段捕获的;N2-CH4纯气相包裹体均为原生包裹体,主要呈孤立和小群状与Ⅰa和Ⅰb类包裹体分布于榴辉岩中条带状石英脉中,可能主要是在高压-超高压榴辉岩相变质条件下被捕获的;CCSD榴辉岩中石英脉的主体形成于板块折返有关的减压重结晶和退变质,而片麻岩中石英脉则主要来源于角闪岩相及其后期退变质作用;榴辉岩和片麻岩中石英脉流体包裹体的组成和地球化学特征存在明显区别,但它们各自相似于其寄主岩石中的石英颗粒中包裹体,说明CCSD中HP-UHP岩石在板块折返过程中释放出的变质流体没有经过大规模的迁移.

2. 期刊论文 董锋. 李曙光. 李秋立. 刘贻灿. 陈福坤. DONG Feng. LI ShuGuang. LI QiuLi. LIU YiCan. CHEN FuKun 中国大陆科学钻探100～2000m超高压变质岩普通Pb同位素地球化学初步研究——俯冲陆壳内脱耦的证据 -岩石学报 2006, 22(7)

本文首次对中国大陆科学钻探工程100～2000m榴辉岩中的绿辉石和片麻岩中的长石进行了普通Pb同位素研究.钻孔上部岩段(0～800m)样品放射成因Pb同位素含量比较高且变化幅度较小(206Pb/204Pb=16.81～17.29,207Pb/204Pb=15.37～15.45,208Pb/204Pb=37.20～37.66),说明其原岩的U/Pb和Th/Pb或者初始Pb同位素比值比较高.钻孔中部岩段(800～1600m)发育有韧性剪切带,相应的Pb同位素比值开始降低且有起伏(206Pb/204Pb=16.26～16.72,207Pb/204Pb=15.27～15.38,208Pb/204Pb=36.73～37.40).钻孔下部岩段(800～1600m)样品放射成因Pb同位素含量低但变化幅度较小(206Pb/204Pb=16.05～16.46,207Pb/204Pb=15.22～15.29,208Pb/204Pb=36.68～37.48),说明其原岩的/Pb和Th/Pb或者初始Pb同位素比值比较低.实测数据同模拟数据对比表明,钻孔上、下两岩段样品普通Pb同位素不同一方面是由于继承了原岩初始Pb同位素不同,另一方面是由它们的μ值不同所致.结合氧同位素研究,本文认为800m以上和1600m以下分属上地壳和中地壳,前者是从俯冲大陆岩石圈解耦的上地壳,在大陆岩石圈俯冲过程中,上部岩片同俯冲的大陆岩石圈发生挤离,率先沿着这一个挤离面逆冲折返至浅部.下岩片是随后从俯冲岩石圈解耦的中地壳岩片,并折返至浅部下伏在先期折返的上部岩片之下.考虑到中部岩段(800～1600m)既发育有韧性剪切带又具有异常低180峰值(Xiao et al.,2006),挤离面是在地壳内部晚元古代的断裂带及冷水活动通道基础上发育起来的.

3. 期刊论文 张红杰. 潘和平. 骆淼. 李清松. 赵卫平. ZHANG Hong-jie. PAN He-ping. LUO Miao. LI Qing-song. ZHAO Wei-ping 中国大陆科学钻探主孔100～2 000 m测井磁化率和磁三分量分析 -现代地质2005, 19(4)

对比分析了中国大陆科学钻探(CCSD)主孔100～2 000 m测井磁化率与岩心样本磁化率的测量结果,二者具有较好的一致性.测井磁化率统计结果表明CCSD主孔100～2 000 m超高压变质岩的磁化率从高至低依次为:蛇纹岩、石英榴辉岩、金红石榴辉岩、正片麻岩、退变质榴辉岩、多硅白云母榴辉岩、副片麻岩、绿泥石角闪岩、角闪岩.由CCSD主孔100～2 000 m磁三分量测量数据得到磁异常的△Bz、△BH和△BT值,结合前人所做的岩石学研究分析发现:主孔530～575 m的磁异常主要由岩石的金红石矿化、钛磁铁矿化和磁铁矿化引起,604～643 m和652～678 m的磁异常主要由岩石的蛇纹石化引起;钻孔中岩层的磁化率对磁三分量异常起着主要的决定作用,高磁化率岩层都表现出较大的磁三分量异常.

4. 期刊论文 嵇少丞. 王茜. 王勤. 许志琴. JI ShaoCheng. WANG Qian. WANG Qin. XU ZhiQin 苏鲁-大别超高压变质岩的弹性力学性质与密度的关系 -岩石学报2007, 23(12)

我们采集了31块来自中国大陆科学钻探(CCSD)主孔和预先导孔岩芯以及29块苏鲁-大别地区地表露头的典型超高压变质岩,在10～850 MPa的静水压力

和室温下测量了60块标本的P波与S波速度,分别建立了纵横波速和围压之间的定量关系,并在此基础上计算了不同压力下各岩石标本的弹性参数即杨氏模量(E)、剪切模量(G)、体模量(K)和泊松比(v),着重探讨了超高压变质岩的弹性力学性质与密度之间的关系.这些最新成果将为超高压变质岩地区以及新老俯冲带地震波资料的解释提供关键的理论和实验基础.

5.学位论文 曾冲 中国大陆科学钻探井中磁热资料处理与分析 2005

中国大陆科学钻探(CCSD)工程是利用现代深部钻探技术，在具有全球地学意义的中朝和扬子板块之间于中生代碰撞形成的大别-苏鲁超高压变质岩(UHPM)带的东段实施中国第一口5000m科学深钻。中国大陆科学钻探对我国地球科学的研究具有十分重要的意义，其对解决中国大陆的许多关键性科学问题起着重要的作用。地球物理测井是其重要组成部分。测井可提供的井温、压力等参数和磁场、重力场、热场、自然电场等丰富的高精度原位信息，有利于获取和推测原始条件下的岩石参数，为研究超高压变质岩的形成与折返机理、深部物质组成与结构、地球动力学过程和壳-幔相互作用、资源的开发及地震发生机制等方面的提供基础性资料及数据。

中国大陆科学钻探(CCSD)先后进行了两口预先导孔(CCSD-PP1和CCSD-PP2)的试钻，其主孔CCSD-1井于2001年6月试钻，截止于2005年4月停钻，终孔深度5118.20m。期间先后进行了多次测井工作，获取了大量宝贵的地质与地球物理资料。

本文根据100～3600m的井中温度测量和井中磁化率、井中磁三分量测量资料，进行了一系列数据处理和分析工作，计算了大量的井中磁场、热场及岩石物性等参数，得出了许多宝贵的基础性数据，解释了井中地磁场、地热场的主要异常，对岩石物性与井中磁、热场的关系加以讨论，并提出了一些有待深入研究的问题。

主要的处理工作包括：

(1)测井数据的预处理。主要包括100～2000m测井数据的深度标定，0～3600m的测井资料的拼接以及全井数据点距的统一。

(2)井中热场参数的计算。包括温度资料的圆滑滤波、地温梯度的计算、岩石热产率的计算、井中岩石热导率的计算井中热流的计算等。

(3)井中磁场参数的计算。包括计算井中岩石磁化率分布，井中地磁总场及其垂直分量和水平分量的模量。

(4)井中磁场、热场及岩石物性的统计。包括按照CCSD工程中心提供的岩性分层表进行按层位统计，按岩性的不同进行按厚度加权平均统计等。

主要的分析工作包括：

(1)井中温度、温梯、热流及岩石热物性的基本特征分析，井中温度和温梯的统计分析，温度与温梯异常的解释等。

(2)井中磁场的基本特征与统计分析，井中岩石磁化率随深度的分布特征分析，产生负磁化率的原因，岩石磁化率的统计分析，岩石磁化率与其密度、钾(K)和铀(U)含量的关系讨论，主要的榴辉岩类特性分析等。

下面是本文得出的主要结论和问题：

(1)井中温度随深度基本呈线性变化，该井2000m和3600m左右温度与KTB的结果接近。100～3600m段平均地温梯度约为20.0℃/km，远低于中国大陆地区的平均地温梯度值(25℃/km～36℃/km)，也低于苏北盆地的平均地温梯度值。全井平均热流密度约为58.4mW/m2，亦远低于苏北地区平均热流值(68mW/m2)。这在很大程度上归因于全井较低的平均地温梯度值。100～3600m井段的测温曲线总体上与深度保持分段线性关系，但2000～3600m井段的实测温度曲线与地温梯度曲线波动较剧烈，表明一些浅层干扰因素，如地下水的活动一定程度上影响了地温的稳态热传导。地下不同深度上温梯及热流的变化主要是由于岩石热导率差异导致热流侧向不均匀传递和地下水活动的结果。但实测地温梯度和估计的热流所代表的是地壳浅层现今的热状态，与超高压变质岩形成时的环境已相去甚远，其与古气候的变迁关系尚不清楚。另外，岩石热物性随深度和压力的变化而对地温梯度和大地热流的影响、低铀(U)的正片麻岩和温度负异常的关系等也需要进一步的研究。

(2)根据磁化率测井资料统计，井中主要岩类磁化率由强到弱顺序大致为：蛇纹岩类、多硅白云母金红石榴辉岩、正片麻岩、金红石榴辉岩类、退变质榴辉岩、副片麻岩、角闪岩类、多硅白云母榴辉岩。破碎带中岩石磁性一般会有一定程度的降低。几乎所有岩石层段上的磁化率都有较大的统计方差，表明同一类岩石在性质上的存在差异。几类主要的榴辉岩的磁性差异并不明显。从钾(K)和密度的交汇结果来看，几乎所有榴辉岩类的钾(K)含量都不同程度地有随密度的增加而降低的趋势。从岩石成分来看，高硅质岩石的钾(K)含量普遍较高。对于一般岩石，较高的钾(K)含量一般对应着较低的磁化率和较小的密度。井中岩石的磁性对井中磁场的影响多反映在局部，且异常值通常较小(铁磁性矿体除外)。井中磁场的总体变化受井周大规模磁性体影响较大。

本文得出的大量基础性数据为研究超高压变质岩的折返机理、地球壳幔相互运动及演化规律等提供了许多宝贵的信息，对解决中国大陆地区的许多关键性地球科学问题具有十分重要的基础性意义。另外，本文还针对中国大陆科学钻探的特殊性，将其一系列数据处理与分析方法集成到了一套完善的计算机软件中，为后续的科研工作提供了方便的工具。

6.期刊论文 张泽明.肖益林.赵旭东.石超.ZHANG ZeMing.XIAO YiLin.ZHAO XuDong.SHI Chao 大陆深俯冲过程中的流体-岩石相互作用——中国大陆科学钻探主孔氧同位素剖面 -岩石学报2006,22(7)

中国大陆科学钻探工程主孔深5158m,位于苏鲁超高压变质带南部.该钻孔钻进了一个超高压变质岩片,其主要榴辉岩、片麻岩、超基性岩和少量石英和片岩组成.基于连续样品的详细氧同位素分析可得出下列认识:(1)各种变质矿物的氧同位素成分具有很大的变化,其中石榴石为-7.4～+6.2‰,绿辉石为-5.2～+6.5‰,白云母为-4.4～+7.1‰,斜长石为-3.1～+7.6‰,钾长石为4.8～8.3‰,石英为-2.8～+9.6‰.(2)整个钻孔剖面的氧同位素成分是连续和逐渐的变化的,而且与岩石类型无关,氧同位素亏损岩石产出的最大深度为3320m.这个深度之下的岩石均具有正常变质岩的氧同位素值.(3)氧同位素明显亏损的变质岩大多出现在正、副片麻岩及其与榴辉岩的互层带.(4)榴辉岩矿物大多具有平衡的氧同位素分异,大多数高压和低压石英脉体具有与它们的围岩类似的氧同位素成分.(5)利用石英-石榴石氧同位素温度计,所获得的榴辉岩变质温度为598～909℃,片麻岩的变质温度为550～786℃.基于这些事实,并结合氧同位素亏损变质岩在地表和浅钻孔中的广泛分布,可以得出以下重要结论:(1)在苏鲁造山带,有大量的表壳岩石与巨量的寒冷气候下的大气降水发生过交换作用,这为新元古代全球冰期的存在提供了重要证据.(2)许多呈厚层产出的花岗质片麻岩具有正常变质岩的氧同位素成分,并缺少超高压变质作用证据.(3)在大陆深俯冲和折返过程中,只存在通道式的水-岩相作用和非常有限的流体活动,与高压退变质有关的流体是原地形成的.(4)新元古代Rodinia超大陆裂解环境下形成的双峰式岩浆活动为大气降水与表壳岩之间的热液蚀变提供了热源.

7.期刊论文 嵇少丞.王茜.Denis MARCOTTE.许志琴.夏斌.Jacques MARTIGNOLE.Matthew SALISBURY.JI Shaocheng.WANG Qian.Denis MARCOTTE.XU Zhiqin.XIA Bin.Jacques MARTIGNOLE.Matthew SALISBURY 苏鲁超高压变质岩中地震波速随围压的变化规律 -地质学报2006,80(12)

我们在10～800 MPa的静水压力下测量了中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔岩心和采自苏鲁地区地表露头上的共68块典型超高压变质岩试样的地震波速,并建立了波速和围压的定量关系,成功地解释了描述这一定量关系方程中4个参数的物理意义.笔者相信,本文将为超高压变质岩地区以及新老俯冲带地震波资料的解释提供必不可少的理论和实验支撑.

8.期刊论文 饶竹.罗立强.方家虎.詹秀春.杨柳.苏劲.RAO Zhu.LUO LiQiang.FANG JiaHu.ZHAN XiuChun.YANG Liu.SU Jing 中国大陆科学钻探主孔0～2000米超高压变质岩中有机质的检出及成因研究 -岩石学报2006,22(7)

前期研究表明大陆深钻孔区超高压变质岩经历了多期变质作用,岩石的峰期变质温度达680～850℃,压力高达1～3GPa,如此高温、高压,理论上已接近和超过传统意义上的石油死亡线,也就是说大陆深钻孔区超高压变质岩存在有机质的可能性比较小.然而,本课题通过排除大量钻井液、泥浆、添加剂以及样品分析等过程的污染,建立起特殊样品制备和检测方法,从大陆深钻孔区0～2000米超高压变质岩中检测到了微量可溶有机质和不可溶有机质.从而为大陆深钻孔区超高压变质岩中存在有机质提供了有力证据.本文还通过对可溶有机质、不可溶有机质的特征研究如生物标志物姥姣烷、植烷和干酪根、岩心样品的Rock-Eval热解分析和有机碳分析,以及与无机成因假说对比研究认为超高压变质岩中有机质的成因为有机成因.

9.会议论文 陈仁旭.郑永飞.赵子福 中国大陆科学钻探样品超高压变质岩锆石U-Pb和Lu-Hf同位素研究 2007

过去二十年来，许多科学家已经对大别-苏鲁造山带地表样品进行了详细的岩石学、矿物学、地质年代学和地球化学研究。结果表明超高压变质岩的原岩主要是新元古代中期火成岩及其相应的沉积物，同时还有少量的古元古代和太古代残余地壳。因为变火成岩具有双峰式的特点，一般认为它们的原

岩形成于新元古代中期沿华南陆块北缘的裂谷岩浆活动。进一步，一般认为扬子陆块其它边缘在740～830 Ma的同时期岩浆活动是对Rodinia超大陆裂解的响应。对地表样品的研究虽然已经取得这些显著的成果，但对这些超高压变质岩形成的构造背景还缺乏认识。本文论述了笔者对主孔两段连续岩芯样品进行了锆石U-Pb和Hf同位素分析，以期对超高压变质岩的原岩性质作出进一步的制约。

10.学位论文 陈仁旭 深俯冲陆壳地球化学性质与折返过程中流体活动：来自苏鲁造山带中国大陆科学钻探主孔样品的研究结果 2009

大陆深俯冲和折返的研究已经成为21世纪发展和完善板块构造理论的前沿和核心课题。位于中国中东部的大别-苏鲁造山带出露有世界上规模最大的超高压变质构造单元，是超高压变质和大陆碰撞研究的典型地区。本文利用中国大陆科学钻探(CCSD)工程岩芯样品连续取样的优势，对深钻主孔200～4000m的超高压变质岩，特别是不同岩性接触带，进行了系统的地球化学分析，包括全岩主量和微量元素、Rb-Sr、Sm-Nd和Lu-Hf同位素、矿物氢氧同位素、单矿物结构水含量和全水含量、锆石微量元素、U-Pb和Lu-Hf同位素。结果为大陆俯冲带变质的化学地球动力学提供了新的制约，特别是地表露头样品研究难以解决的科学问题。

在锆石岩相学研究的基础上，对不同锆石区域进行了微量元素、U-Th-Pb和Lu-Hf同位素同时原位分析；在对变质锆石进行U-Pb定年分析时，第一次直接将微量元素和Lu-Hf同位素联系起来。通过这种联合研究，我们区分出大陆俯冲带变质过程中原岩锆石的固态重结晶、交代重结晶和溶解重结晶以及变质新生长。榴辉岩相条件下变质生长锆石以谐和的变质作用年龄，典型石榴石效应的平坦HREE配分，低的REE(特别是HREE)、Y、Nb+Ta和Th+U含量，高的Hf含量，低的(Lu/Gd)N、Lu/Hf和Th/U(<0.1)比值，以及升高的176Hf/177Hf比值为特征。这说明变质锆石生长过程中同时存在石榴石效应和流体效应。相反地，变质重结晶不同程度的再造原岩锆石，具体取决于变质过程中流体活动的程度。固态重结晶锆石被再造的程度最小，几乎继承了原岩锆石的所有地球化学特征。它们以不一致线上不谐和的U-Pb年龄，典型的岩浆锆石陡峭的MREE-HREE配分，高的微量元素含量和比值，以及低的176Hf/177Hf比值为特征。另一方面，溶解重结晶锆石显示出最大程度的再造，具有近谐和或谐和的变质作用年龄，陡峭的MREE-HREE配分，相比原岩锆石降低的微量元素含量如REE、Th、U、Y、Nb、Ta和Ti，几乎不变的Hf同位素比值。交代重结晶锆石被再造的程度介于这两者之间，结果具有介于它们之间的元素和同位素特征。石榴石和富水流体同时存在条件下的变质生长以亏损HREE平坦配分和低的微量元素含量为特征，富水流体存在条件下的变质重结晶则表现出MREE到HREE逐渐降低而不是平坦的HREE配分。因此，变质锆石的多指标同时原位分析比单独分析在区分变质新生长与不同类型变质重结晶之间具有优势。在变质锆石学研究的基础上，通过识别锆石的形成条件，能够对深钻主孔超高压变质岩锆石U-Pb年龄的地质意义进行制约。深钻主孔超高压变质岩锆石U-Pb不一致线定年得到的上交点年龄为780±22Ma，对应于原岩形成年龄。在超高压变质岩中得到两组变质年龄242±9Ma和221±2Ma，分别对应于进变质高压-超高压转变和退变质榴辉岩相再造过程中流体存在条件下的生长和重结晶。

对CCSD深钻主孔200～4000m超高压变质岩系统的岩相学、氧同位素、氢同位素、矿物水含量(结构水和全水)联合研究发现，超高压变质岩原岩在俯冲之前经历了大气降水的高温热液蚀变甚至局部低δ18O岩浆作用。深钻主孔18O亏损深度达3300m，结合地表露头岩石达～30000km³的18O亏损，表明扬子陆块北缘曾发生三维空间巨量物质(>100000km3)的18O亏损。深钻主孔超高压变质岩中各矿物显示出巨大的氢氧同位素变化，共存矿物之间的氢氧同位素分馏既有平衡也有不平衡，相同矿物氢氧同位素也表现出不同的行为，指示了超高压变质矿物和同位素在折返过程中不同的退变质效应。根据相邻样品之间的距离、岩相学和δ18O值，确定出不同岩性之间O同位素不均一性的尺度为20到50cm，对应于大陆碰撞过程中流体活动的最大尺度。TC/EA-MS和FTIR分析都发现，超高压变质岩中名义上无水矿物都含有大量的水以结构羟基和分子水的形式存在。不同岩性接触带的矿物O同位素、H同位素、全水含量以及羟基含量的研究表明，尽管超高压变质岩经历了广泛的退变质作用，退变质流体在稳定同位素组成上是内部缓冲的，且退变质流体主要来自名义上无水矿物中结构羟基和分子水的出溶以及含水矿物的分解。在不同岩性接触带，稳定同位素、水含量及岩相学上出现同步变化，表明不同岩性接触带可能是流体流动最活跃的地方。对于远离榴辉岩-片麻岩接触带的榴辉岩，退变质流体主要来自榴辉岩内部名义上无水矿物中结构羟基和分子水的降压出溶以及含水矿物的分解。对于靠近接触带的榴辉岩，则可能主要受来自比榴辉岩更富水的片麻岩中矿物的脱水作用。定量计算表明，在折返过程中，1m3体积由石榴石和绿辉石组成的榴辉岩结构羟基降压出溶能释放出3.07～3.44kg水，这能形成139.58～156.28kg角闪石。这能为超高压榴辉岩的角闪岩化提供大量的流体来源。系统的矿物水含量测定和计算表明，片麻岩具有比榴辉岩较高的全水含量，在深俯冲陆壳的初期折返过程中，片麻岩能比榴辉岩释放出更多的水。在榴辉岩和片麻岩接触带的降压脱水，所释放的水会从片麻岩流向榴辉岩导致邻近片麻岩的榴辉岩发生显著的水化。

对CCSD深钻主孔连续岩芯段超高压变质岩系统的主微量元素和Sr-Nd-Hf同位素研究发现，大陆俯冲带变质过程中确实存在显著的元素活动，特别是水溶性元素LILE和LREE。深钻主孔超高压变质岩连续岩芯段显示出主量和一些微量元素如LILE(K、Rb、Ba、Th和U)和LREE的巨大变化，但水不溶性元素如HFSE和HREE变化较小。虽然富水流体活动可以导致LILE巨大的变化，但一些榴辉岩和角闪岩中SiO2、LILE和LREE的巨大变化指示，它们受到了深俯冲陆壳折返过程中与长英质超高压片麻岩相关的部分熔融形成的花岗质熔体的交代作用。岩相学观察也显示了部分熔融熔体的存在。在不同岩性接触带发现有元素和岩相学的同步变化，表明超高压岩石折返过程中不同板片组分之间富水流体和/或含水熔体及其相关元素活动的出现。同一岩性的局部某些样品存在部分熔融现象。对有些变质岩，岩相学观察到部分熔融的现象，但是在化学组成上没有反映，指示一种原地的深熔混合岩化。因此，在超高压板片“热”折返过程中，大陆地壳在局部会发生部分熔融，导致俯冲板片内显著的质量传输。然而，元素的运移只发生在很小的尺度内，在不同岩性接触带和裂隙带的有限开放体系中。

CCSD深钻主孔锆石U-Pb和Hf同位素研究显示，深钻主孔超高压变质岩原岩记录了两种不同的双峰式岩浆活动。第一种双峰式岩浆活动为中元古代晚期新生地壳的裂谷再造，而第二种双峰式岩浆活动则为古元古代中期古老地壳的裂谷深熔作用。不管怎样，它们的原岩都是由华南陆块北缘新元古代中期不同来源的双峰式岩浆活动所形成，裂谷熔融作用发生在罗迪尼亚超大陆裂解之前或之中。造山带岩石圈的熔融能够产生具有不同来源的双峰式岩浆活动。弧陆碰撞带是聚集新生和古老地壳最好的地方，这两种不同来源的双峰式岩浆活动在超大陆裂解期间沿着华南陆块北缘的弧陆碰撞带出现，裂谷熔融作用是对罗迪尼亚超大陆在780Ma开始裂解的响应。作为大陆岩石圈中的薄弱带，它们会进一步发展成超大陆裂谷，最终导致超大陆在750Ma时裂开。从超大陆裂谷到超大陆裂开的构造演化期间，上涌的镁铁质岩浆会导致大气降水热液蚀变的新生地壳和古元古代地壳的再造。因此，CCSD主孔超高压变质岩原岩的双重双峰式组成有力地支持了华南新元古代中期岩浆岩成因的板块-裂谷模型。

引证文献(40条)

1.范宏瑞.刘爽.胡芳芳.杨奎锋.金成伟 苏鲁超高压变质带桃行榴辉岩及高压脉体中流体包裹体研究[期刊论文]-岩石学报 2008(9)

2.范宏瑞.刘爽.胡芳芳.杨奎锋.金成伟 苏鲁超高压变质带桃行榴辉岩及高压脉体中流体包裹体研究[期刊论文]-岩石学报 2008(9)

3.沈昆.张泽明.石超.王金丽 江苏东海榴辉岩相变质脉体的流体包裹体研究[期刊论文]-岩石学报 2008(9)

4.陈振宇.孟丽娟 榴辉岩磷灰石中出溶体成因的一种新解释[期刊论文]-矿物岩石地球化学通报 2008(z1)

5.梁业恒.孙晓明.徐莉.翟伟.梁金龙.汤倩.李爱菊 CCSD(0～5158m)HP-UHP变质岩中石英脉流体包裹体研究[期刊论文]-岩石学报 2007(12)

6.梁业恒.孙晓明.徐莉.翟伟.梁金龙.汤倩.李爱菊 CCSD(0～5158m)HP-UHP变质岩中石英脉流体包裹体研究[期刊论

文]-岩石学报 2007(12)

7. 朱永峰. H.-J. Massonne 中国大陆科学钻探主孔中磷灰石的磁黄铁矿出溶结构[期刊论文]-岩石学报 2007(12)

8. 朱永峰. H.-J. Massonne 中国大陆科学钻探主孔中磷灰石的磁黄铁矿出溶结构[期刊论文]-岩石学报 2007(12)

9. 曾令森. 张泽明. 刘福来. 梁凤华 非保守元素在苏鲁超高压榴辉岩退变质作用中有限迁移和近原地重新分布[期刊论文]-岩石学报 2007(12)

10. 曾令森. 张泽明. 刘福来. 梁凤华 非保守元素在苏鲁超高压榴辉岩退变质作用中有限迁移和近原地重新分布[期刊论文]-岩石学报 2007(12)

11. 张泽明. 沈昆. 刘勇胜. 游振东. 石超. 王金丽 南苏鲁造山带毛北超高压变质岩体的成因与成矿作用[期刊论文]-岩石学报 2007(12)

12. 张泽明. 沈昆. 刘勇胜. 游振东. 石超. 王金丽 南苏鲁造山带毛北超高压变质岩体的成因与成矿作用[期刊论文]-岩石学报 2007(12)

13. 许志琴 深俯冲和折返动力学:来自中国大陆科学钻探主孔及苏鲁超高压变质带的制约[期刊论文]-岩石学报 2007(12)

14. 许志琴 深俯冲和折返动力学:来自中国大陆科学钻探主孔及苏鲁超高压变质带的制约[期刊论文]-岩石学报 2007(12)

15. 朱霞. 倪培. 黄建宝. 王天刚 显微红外测温技术及其在金红石矿床中的应用[期刊论文]-岩石学报 2007(9)

16. 朱霞. 倪培. 黄建宝. 王天刚 显微红外测温技术及其在金红石矿床中的应用[期刊论文]-岩石学报 2007(9)

17. 曾令森. 刘福来. 梁凤华. 陈方远 苏鲁榴辉岩钾长石+石英聚合体中重晶石矿物及其意义[期刊论文]-科学通报 2007(19)

18. 翟伟. 孙晓明. 梁金龙. 徐莉. 汤倩. 梁业恒. 苏丽薇 青龙山超高压变质榴辉岩绿帘石化学成分与流体包裹体特征[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

19. 翟伟. 孙晓明. 梁金龙. 徐莉. 汤倩. 梁业恒. 苏丽薇 青龙山超高压变质榴辉岩绿帘石化学成分与流体包裹体特征[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

20. 徐莉. 孙晓明. 翟伟. 梁业恒. 汤倩. 梁金龙. 沈昆 中国大陆科学钻探(CCSD)HP-UHP变质岩中石英脉流体包裹体δD-δ18O同位素组成及其意义[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

21. 徐莉. 孙晓明. 翟伟. 梁业恒. 汤倩. 梁金龙. 沈昆 中国大陆科学钻探(CCSD)HP-UHP变质岩中石英脉流体包裹体δD-δ18O同位素组成及其意义[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

22. 孙晓明. 徐莉. 翟伟. 汤倩. 梁业恒. 梁金龙. 张泽明. 沈昆 CCSD HP-UHP变质岩中石英脉和东海水晶流体包裹体惰性气体同位素组成及其成因指示意义[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

23. 孙晓明. 徐莉. 翟伟. 汤倩. 梁业恒. 梁金龙. 张泽明. 沈昆 CCSD HP-UHP变质岩中石英脉和东海水晶流体包裹体惰性气体同位素组成及其成因指示意义[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

24. 张泽明. 沈昆. 赵旭东. 石超 超高压变质作用过程中的流体——来自苏鲁超高压变质岩岩石学、氧同位素和流体包裹体研究的限定[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

25. 张泽明. 沈昆. 赵旭东. 石超 超高压变质作用过程中的流体——来自苏鲁超高压变质岩岩石学、氧同位素和流体包裹体研究的限定[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

26. 沈昆. 张泽明. 黄太岭. 赵旭东 中国大陆科学钻探(CCSD)主孔超高压变质岩副矿物锆石中的流体包裹体研究[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

27. 沈昆. 张泽明. 黄太岭. 赵旭东 中国大陆科学钻探(CCSD)主孔超高压变质岩副矿物锆石中的流体包裹体研究[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

28. 张斌辉. 刘勇胜. 宗克清. 高山 榴辉岩退变质过程中的微量元素地球化学行为:对CCSD主孔退变质榴辉岩的研究[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

29. 张斌辉. 刘勇胜. 宗克清. 高山 榴辉岩退变质过程中的微量元素地球化学行为:对CCSD主孔退变质榴辉岩的研究[期刊论文]-岩石学报 2006(7)

30. 徐薇. 刘祥文. 金振民 CCSD超高压榴辉岩中的水:红外光谱分析[期刊论文]-地球科学-中国地质大学学报 2006(6)

31. 徐薇. 刘祥文. 金振民 CCSD超高压榴辉岩中的水:红外光谱分析[期刊论文]-地球科学-中国地质大学学报 2006(6)

32. 孙晓明. 徐莉. 梁金龙. 汤倩. 梁业恒. 翟伟. 沈昆 CCSD中HP-UHP岩石稀有气体同位素地球化学及其对板块折返过程的示踪意义[期刊论文]-地质学报 2006(12)

33. 孙晓明. 徐莉. 梁金龙. 汤倩. 梁业恒. 翟伟. 沈昆 CCSD中HP-UHP岩石稀有气体同位素地球化学及其对板块折返过程的示踪意义[期刊论文]-地质学报 2006(12)

34. 陈振宇. 曾令森. 梁凤华. 张泽明 CCSD主孔榴辉岩中磷灰石的矿物化学特征及对榴辉岩中F、Cl、Sr等元素地球化学行为的影响[期刊论文]-地质学报 2006(12)

35. 陈振宇. 曾令森. 梁凤华. 张泽明 CCSD主孔榴辉岩中磷灰石的矿物化学特征及对榴辉岩中F、Cl、Sr等元素地球化学行为的影响[期刊论文]-地质学报 2006(12)

36. 范宏瑞. 郭敬辉. 胡芳芳. 储雪蕾. 金成伟 鲁东南岚山头超高压变质岩流体包裹体特征与板片折返史[期刊论文]-岩石学报 2005(4)

37. 范宏瑞. 郭敬辉. 胡芳芳. 储雪蕾. 金成伟 鲁东南岚山头超高压变质岩流体包裹体特征与板片折返史[期刊论文]-岩石学报 2005(4)

38. 徐莉. 孙晓明. 翟伟. 梁金龙. 梁业恒. 沈昆. 张泽明. 汤倩 中国大陆科学钻探(CCSD)高压超高压变质岩中石英脉流体包裹体初步研究[期刊论文]-岩石学报 2005(2)

39. 徐莉. 孙晓明. 翟伟. 梁金龙. 梁业恒. 沈昆. 张泽明. 汤倩 中国大陆科学钻探(CCSD)高压超高压变质岩中石英脉流体包裹体初步研究[期刊论文]-岩石学报 2005(2)

40. 翟伟. 孙晓明. 徐莉. 张泽明. 梁金龙. 梁业恒. 沈昆 苏北青龙山超高压变质榴辉岩流体包裹体特征与流体演化[期刊论文]-岩石学报 2005(2)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ysxb98200502023.aspx
授权使用：西北大学(xaxbdx)，授权号：81ae7d9b-7d2c-442b-9402-9dfc00c48d8b

下载时间：2010年9月25日