

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

苏北榴辉岩中水晶的形成时代及其对超高压变质岩折返的示踪意义

王登红¹⁾ 徐珏¹⁾ 陈毓川²⁾ 李华芹³⁾ 余金杰¹⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037; 2) 中国地质科学院, 北京, 100037

3) 中国地质调查局宜昌地质矿产研究所, 443003

内容提要 江苏东海水晶以其晶体粒大和产量巨大而闻名,在地质上也因其产于高压超高压变质带而独具特色。在对大别—苏鲁超高压变质带的区域成矿作用进行研究和对中国大陆科学钻探工程(CCSN)主孔岩心进行编录的过程中,认识到超高压带存在着超低压成矿现象,包括中国最主要的水晶矿床成矿带在内的许多矿床可能是在超高压变质之后退变质结束阶段的超低压环境中形成的,对水晶进行流体包裹体的 Rb-Sr 等时线年代学研究,获得208 Ma 的等时线年龄,表明成矿时代为印支期。该年代可视为超高压变质带折返并经历了退变质之后而“稳定”下来的时间。

关键词 水晶矿床 同位素定年 江苏东海 大别—苏鲁变质带 CCSN

大别—苏鲁超高压变质带是中国中东部,也是世界上最重要的一条超高压变质带(许志琴,2002,杨天南等,2002;刘福来等,2003)。为了查明超高压变质带的成因机制及演化历史,中国第一个5000 m 深度的大陆科学钻探工程正在大别—苏鲁超高压变质带的东部(江苏东海县毛北村)进行。笔者在对深孔岩心样品进行编录及区域成矿作用进行对比研究的过程中注意到超高压变质带存在着低压成矿现象(指在晶洞中晶体可以自由生长),并从成矿年代学等方面进行了研究,以期对超高压变质带的成因及其地球动力学背景有一个客观的认识。

东海水晶矿是大别—苏鲁超高压变质带东部苏北成矿带中最重要的矿床。这里不但出产了目前保存于中国地质博物馆的重达3.5 t 的“水晶王”晶体、为国家贡献了大量的水晶资源,而且给当地经济发展提供了很好的资源条件。据2002年12月27日《扬子晚报》报道,目前仅东海县每年由水晶矿产品带来的经济效益就至少达2亿元人民币。另一方面,东海水晶矿产于著名的大别—苏鲁超高压变质带,水晶矿的直接围岩常常是榴辉岩,而榴辉岩通常又是在造山带高压—超高压变质过程中形成的。那么,晶体粗大(长度可超过1 m)的水晶又是如何形成的?与超

高压变质作用有什么关系?代表了造山带演化的什么构造意义呢?这些科学问题尚未很好解决。因此,水晶矿不但具有重要的经济价值,而且通过对水晶矿成因的研究可以为揭示超高压变质带的演化历史提供依据,也具有科学的意义。

1 地质背景

大别—苏鲁超高压变质带是中国中央造山带的一个重要组成部分,其东段的苏北—胶南地体与胶北地体被认为在印支期发生陆内俯冲碰撞,形成了复杂的造山带(樊金涛等,1998)。苏北新沂—东海—赣榆高压—超高压变质带通常被认为是俯冲碰撞造山的结果,其中榴辉岩分布广泛,水晶矿脉常常产于榴辉岩之中(图1)或榴辉岩与片麻岩的过渡带。东海式的水晶矿床主要产于大别—苏鲁变质带的东部即苏北地区并以东海最集中,其他地区少见。根据前人调查,水晶矿脉形成了两条矿带,均呈北东向延伸。其中,南矿带主要集中在东海县的池庄、曹庄、白石山、张谷、牛山、房山、柘塘、红土山、博湖、马小埠等地,北矿带集中在朱沟等地。目前正在进行的中国大陆科学钻探工程的5000 m 超深钻(CCSN 主孔)位于南水晶矿带的西部,这里同时也是毛北大型

注:本文为中国大陆科学钻探工程综合研究项目“超高压变质带的成矿作用及其动力学背景”和国家“973项目”(编号 G19990432)的成果。

收稿日期:2003-06-12;改回日期:2003-08-22;责任编辑:章雨旭。

作者简介:王登红,男,1967年生。1995年在中国地质科学院获得博士学位。现为中国地质科学院创新基地研究员,主要从事矿产资源及其相关领域的研究工作。通讯地址:100037,北京市西城区百万庄路26号。

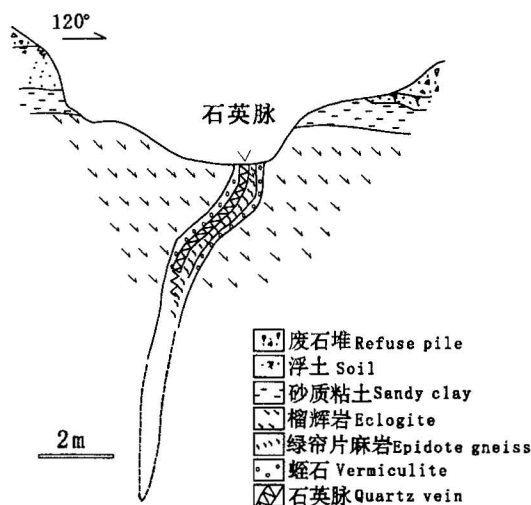


图1 东海水晶矿代表性矿脉 Qv31剖面图

(据1:20万区域地质报告新沂幅略修改)

Fig. 1 Sketch profile of the representative quartz crystal-bearing vein (Qv31) in Donghai, Jiangsu

金红石矿床的产地。水晶矿脉一般呈单式单晶洞脉,透镜状、扁豆状和脉状产出,规模一般不大,所含晶体大小不一,最大的晶体即是产于柘塘矿区3.5 t重的水晶王。位于东海红土山矿区的 Qv31 矿脉(图1)具有代表性,矿区均为第四系覆盖,含矿围岩为片麻岩、钾长混合岩、角闪片岩及榴辉岩岩体等,含水晶的石英脉受到 NE25°走向断裂控制,含水晶的石英脉及含云母的伟晶岩脉、长石石英脉、长石脉均分布在榴辉岩的节理裂隙及与其他岩石的接触带上。

由于在5000 m 超深钻孔中尚未见到规模较大、保留很好的晶洞(岩心采取率低并且有泥浆大量渗漏的地段也不排除存在晶洞的可能性),在提取上来的岩心中偶然见到的晶洞或张性裂隙中的水晶

晶簇(图2)由于样品保存之需要,尚无法用于分析测试。因此,前期的研究工作主要采用了相同地质条件下的地表样品。

2 同位素年代学研究

由于在 CCSD 主孔中尚未见到具有一定规模的水晶矿,而钻孔周边地区相同地质环境下水晶矿广泛分布,因此采取了同一变质岩带新沂小焦金红石矿区金红石榴辉岩中的石英脉样品,在中国地质调查局宜昌地质矿产研究所进行了石英流体包裹体 Rb-Sr 同位素组成的测定,其结果见表1和图3。所分析的石英样品采自含水晶的石英脉,脉体呈不规则状产于含金红石的榴辉石中,地质情况与产“水晶王”的柘塘矿区可以类比。图3显示,产于金红石榴辉岩中4个石英样品的流体包裹体的 Rb、Sr 同位素组成构成一条等时线,其截距为 0.7088 ± 0.0002 (95% 的置信度),斜率 0.00296 ± 0.00005 ,用 Isoplot 通用软件计算得到的等时线年龄为 208 ± 22 Ma (95% 的置信度)。该年龄代表了石英中流体被矿物圈闭后同位素体系封闭的年龄,也代表了水晶矿的形成时代。因此,江苏东海一带的水晶矿形成于印支晚期。另外,锶同位素初始值 0.70880,表明成矿流体可能来自于地幔。

表1 东海小焦金红石榴辉岩中石英流体包裹体 Rb、Sr 同位素组成

Table 1 Rb and Sr isotopic composition of fluid inclusions in quartz separated from eclogite in Xiaojiao, Donghai

编号	测试对象	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
E-12-1	石英	0.07234	0.2104	0.9915	0.71173
E-12-2	石英	0.01365	0.5576	0.0706	0.70901
E-12-3	石英	0.02099	0.2782	0.2176	0.70941
E-12-4	石英	0.02201	0.1901	0.3338	0.70983

注:样品由中国地质调查局宜昌地质矿产研究所李华芹测试。

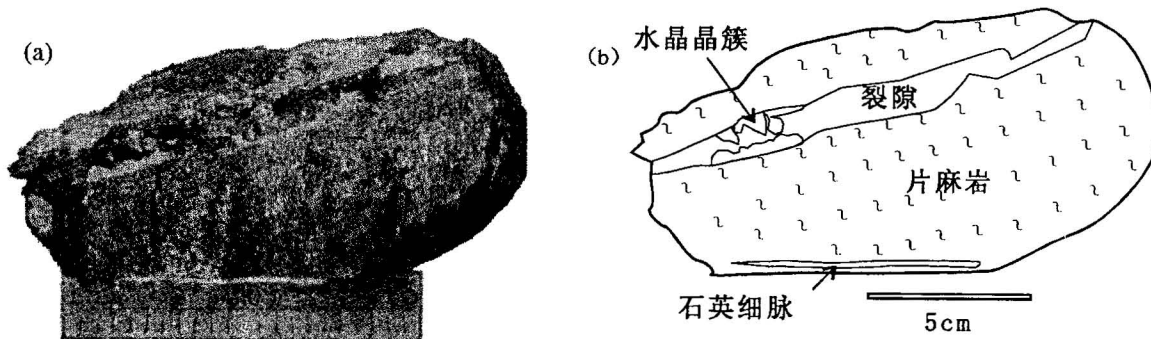


图2 CCSD 超深钻孔476 m处的张裂隙及其中的水晶(右图为左边照片之素描)

Fig. 2 Tension fissure filled with quartz crystals at the depth of 476 m in the CCSD borehole

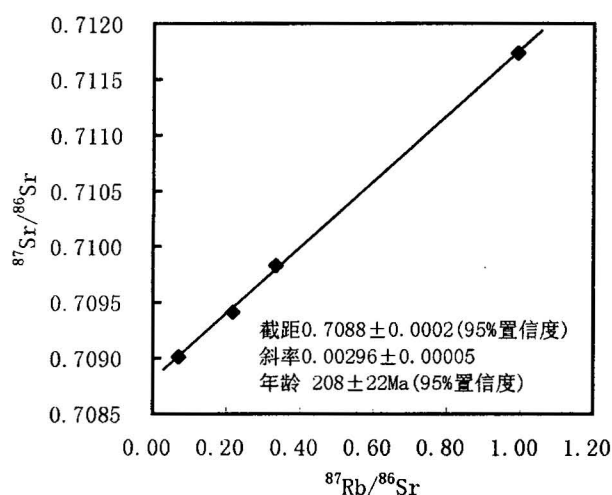


图 3 小焦金红石榴辉岩中石英样品流体包裹体的 Rb-Sr 等时线

Fig. 3 Rb-Sr isochron for fluid inclusions of quartz

3 成矿流体的成分

对石英样品进行了流体包裹体成分的测定,其结果见表2。从表2可见,石英样品中流体包裹体的成分比较均匀,各项组分的变化不大。其中最主要的成分是 H_2O 和 CO_2 ,其次是少量的 CO 、 CH_4 和 H_2 。

液相中的主要阳离子是 Na^+ ,其次是 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ;阴离子主要是 Cl^- ,其次是 F^- 和 SO_4^{2-} ,几乎不含 HCO_3^- 。6个样品流体包裹体成分中阴离子数与阳离子数基本相等,其 Δ 值(阴、阳离子所带电荷数差的绝对值与阴阳离子数所带电荷总数的百分比。详见王登红,1995) $< 7.5\%$,平均 5.88% ,可以认为流体包裹体中阴、阳离子达到电平衡,因此,石英(水晶)是在达到物理化学平衡的条件下形成的,意味着

水晶矿脉形成于超高压变质带形成之后。

4 讨论与结论

4.1 水晶矿的成矿环境

从水晶矿形成的地质环境看,呈巨大矿物晶体产出的石英(即水晶)是在稳定的构造背景中形成的,它本身没有被破碎、变形;容矿的围岩虽然可以是片麻岩也可以是榴辉岩,但水晶矿本身又具有晶洞成因的特点。很难想像,晶洞中长达几十厘米甚至超过1m的结晶完好的水晶矿物是在变质变形过程中形成的。一般地,变质金红石形成于 $520 \sim 600^\circ C$ 、 $0.6 \sim 1.1$ GPa 的高温高压条件下(刘源骏,1996),而水晶形成于低温低压条件下,这两种条件不可能同时存在,考虑到水晶矿床没有发生变形,因此,水晶矿床必然晚于含金红石的围岩,也就是说,水晶矿床不可能形成于高温高压的变质条件下。因此,水晶矿显然是在超高压变质带经过折返之后形成的。这一认识与同位素年代学的资料是一致的。前人根据锆石 U-Pb 年龄确定的峰变质作用发生在 219 Ma (Armes et al., 1996; Rowley et al., 1997)、或 228 Ma (李曙光等, 1997)、或 240 Ma (Hacker et al., 1998)。由多硅白云母 Rb-Sr 等时线法给定的变质年龄在大别山为 219 ± 5 Ma (Li et al., 2000) 或 210 ± 10 Ma (Chavagnac et al., 1996;) 或 198 Ma (Chavagnac et al., 1998)。李秋立等(2001)用金红石 U-Pb 法获得峰期变质之后冷却到 $470^\circ C$ 时的年龄为 218 Ma。本次工作获得江苏东海一带 CCSD 孔附近水晶矿形成于 208 Ma,这可能是超高压变质岩进一步退变质到稳定状态的时代,也可以理解为榴辉岩构造定位之后的时代。因此,208 Ma 可能是榴辉岩折返到地壳浅部之后“安定”下来的年代,代表

表 2 小焦金红石榴辉岩中石英样品流体包裹体成分

Table 2 Chemical composition of fluid in clusions in quartz

样号	H_2O	CO_2	CO	CH_4	H_2	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Li^+	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	pH
E-12-1	795.56	161.50	0.50	0.55	0.22	0.68	6.22	0.46	0.125	0.010	0.25	10.01	0.50	0.00	6.70
E-12-2	710.20	189.80	0.80	0.47	0.17	0.38	5.99	0.01	0.145	0.008	0.01	9.56	0.50	0.00	6.60
E-12-3	770.10	150.10	0.70	0.65	0.20	0.38	6.45	0.28	0.052	0.010	0.15	9.90	0.25	0.00	6.60
E-12-4	885.45	110.56	0.50	0.57	0.19	0.35	6.76	0.19	0.038	0.002	0.05	10.50	0.00	0.00	6.60
E-12-5	750.45	120.80	0.60	0.55	0.18	0.09	6.14	0.39	0.021	0.001	0.15	9.80	0.00	0.00	6.60
E-12-6	425.90	75.25	0.65	0.15	0.16	0.19	2.87	0.42	0.068	0.001	0.20	5.05	0.25	0.00	6.60

单位: $\times 10^{-6}$,指每克单矿物样品里包裹体爆裂(爆裂温度 $100 \sim 600^\circ C$)后释放出每项组分的微克量。 H_2O (10^{-6})指包裹体加热爆裂释放出的水蒸汽的微克量。分析者:中国地质科学院宜昌地质矿产研究所李桃叶。分析方法:热爆—超声波提取法。测定仪器:液相成分中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 采用原子吸收光谱法(日立180-80AAS), F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 采用光度分析法(日立220A 紫外/可见光光度计), pH(超声波提出溶液的 pH 值)采用酸度计(上海25型);气相成分采用气相色谱仪(SP-3420气相色谱仪)。仪器灵敏度: K^+ 、 Na^+ 为 0.01 mg/L, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 为 0.001 mg/L, F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为 0.01 mg/L。

了一个深俯冲与快速折返事件的结束。自208 Ma以后可能是地壳的整体抬升或区域性隆起,导致含(水晶)矿的榴辉岩进一步抬升并长期遭受剥蚀,在夷平化过程中最终出露地表。

4.2 超深钻中的其他低压现象

在CCSD超深钻0~2400 m的部位见到的岩石类型主要是片麻岩和角闪岩、榴辉岩,它们无疑是高温高压变质的产物,但其中也不乏温度压力降低条件下发生的退变质现象。另外,在退变质作用完成以来还出现一些非高压状态下出现的地质现象,如张性的裂隙、网脉状裂隙、长有水晶的裂隙、各种大小的空洞和晶洞。如果说张裂隙在岩心上还可以看到的话,则空洞(及晶洞)特别是比较大的空洞可能由于岩心的不连续和钻探过程中的破坏而难以看到;但另一方面,钻探循环液(及泥浆)的大量渗漏(同时伴随有岩心采取率的异常偏低和气体异常)可能正是空洞或晶洞存在的结果。在476.0~476.5 m处见到平行于岩心壁(即铅垂方向)宽达1~2 cm的张裂隙,裂隙中有石英小晶簇从空隙边向中心生长(图2)。

再比如,在2268~2278 m大约10 m的范围内出现岩石主要是片麻状斜长角闪岩,岩心采取率仅约60%,钻进过程中大约有80 m³以上的钻探循环液发生了渗漏。同时,在该深度岩心上可见到至少4个方向的张裂隙和剪切裂隙,但这些裂隙均已经被长英质脉和铁质氧化物脉充填,渗透性差,不足以引起大规模的钻探循环液(泥浆)渗漏。存在空洞的可能性较大,根据泥浆渗漏推测的空洞体积可能大于80 m³。这种空洞可能类似于晶洞,但其中是否存在水晶矿,尚不得而知,尽管在提取上来的岩心中可以见到不规则的石英细脉。其他岩心采取率低于65%或泥浆渗漏体积达20 m³以上的部位仅2200~2400 m段就至少还有8处,如根据现场记录,2292.84~2300.11 m深度的漏浆体积为89 m³,2303.91~2311.52 m深度为90 m³。

如果说导致泥浆大规模渗漏的原因可能是多方面的,那么,常常见到各种角砾化现象、各种网脉状裂隙和角砾状“隐爆”现象,则是超高压变质之后流体继续活动的直接纪录。角砾的成分比较复杂,没有发生磨圆而是棱角状,伴随有各种方向的张性裂隙,裂隙的宽度一般在1 mm左右,但在大致平行岩心壁的方向上延伸可达1 m以上,即存在铅垂方向上的张性裂隙,并且没有见到任何变形现象,其中的主要充填物是褐色的铁质氧化物和碳酸盐矿物及石

英。考虑到裂隙方向的多样性和复杂性,这种张性裂隙发育的角砾岩化现象也是超高压变质之后形成的。在角砾化岩带中(如2306.5 m的深度)偶尔还可见在空洞中充填有约3 cm×1.5 cm大小的黄铁矿集合体,这些黄铁矿没有变形。在有的晶洞中虽然没有水晶,但石英也呈透明的块状构造,与围岩之间的界线是截然的,其中含有自形晶的黄铁矿。块状石英又被更晚期的石英细脉穿切,说明含硅质流体的活动也是多期次的。

天然空洞不只是存在于片麻岩中或断裂裂隙的交汇部位,在块状构造的完整的榴辉岩中同样可以见到。如在1993.3 m深度的榴辉岩中,出现小型晶洞,晶洞的周边是不规则的,没有挤压、张裂或其他应力作用的迹象,其中除了少量绿帘石之外并无石英脉或水晶充填,反映榴辉岩形成之后有物质的流失。这些空洞可以成为后期热液成矿的空间。

4.3 结论

上述现象表明,在CCSD岩心中记录的不只是超高压变质作用现场的各种变质岩和强烈的变形,还存在有超高压变质带在退变质作用之后、主要是折返过程结束之后发生的一系列构造、岩浆事件及伴随的流体成矿作用的记录。变质块体在深部变质之后折返过程中,由于温度、压力的降低,有可能出现体积之膨胀,其结果导致晶洞或张裂隙的形成也不足为怪,但是否还有其他的地质应力在起作用还需要探讨。在变质岩体从超高压状态折返到地壳浅部环境之后,所发生的低压流体成矿现象是普遍的,其中水晶矿脉的形成发生在208 Ma左右的印支期。因此,208 Ma也代表了榴辉岩等超高压变质地体折返过程已经结束和一个新的构造阶段已经开始。东海水晶矿床的集中产出,表明苏北地区尽管属于大别—苏鲁超高压变质带的一部分,但有其自身的特殊性,也表明高质量水晶矿床的产生具有局域性特点,即形成了成矿集中区。这种特殊性除了表现为水晶矿床的大量产出之外,还有一系列的幔源基性超基性岩和幔源流体活动,由石英脉记录的流体锆同位素初始值为0.7088。这种特点与国外同类大型—特大型水晶矿床的形成是相似的。

致谢:工作中得到了大陆科学钻探工程指挥部及项目首席科学家许志琴院士、杨经绥总地质师、张泽明副总地质师的关心,得到了岩性构造编录室刘福来主任、李天福副主任、陈世忠副研究员、唐哲民副研究员、黄尧工程师和孙立文工程师以及游振东教授和沈昆研究员等的指导与帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 樊金涛, 程振香, 贾根. 1998. 苏北高压超高压变质成矿系列. 矿床地质, 17(增刊): 535~538.
- 李曙光, 李惠民, 陈移之, 肖益林, 刘德良. 1997. 大别山—苏鲁地体超高压变质年代学(Ⅰ)—锆石 U-Pb 同位素体系. 中国科学(D 辑), 27(3): 200~206.
- 李秋立, 李曙光, 周红英, 李惠民, 洪吉安, 王清晨, Massonne H J. 2001. 超高压榴辉岩中金红石 U-Pb 年龄: 快速冷却的证据. 科学通报, 46(19): 1655~1658.
- 刘源骏. 1996. 再论金红石矿床在变质过程中的成矿机制. 湖北地质, 10(1): 26~37.
- 王登红. 1995. 试论非平衡热液成矿. 矿物岩石地球化学通讯, (2): 130~131.
- 许志琴. 2002. 中国大陆科学钻探工程进展. 地质通报, 21(1): 9~10.

References

- Armes L, Zhou G Z, Xiong B C. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze craton, central China. Tectonic, 15(2): 472~489.
- Chavagnac V, Jahn B M. 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling complex Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, Geochemical characteristics and tectonic implications. Chem. Geol., 133: 29~51.
- Chavagnac V, Jahn B M. 1998. Geochronological evidence for the in situ tectonic relationship in the Dabie UHP metamorphic terrane, central China. Mineral Magazine, 62A: 312~313.
- Fan Jintao, Chen Zhengxiang, Jia Gen. 1998. Minerogenic series of ultrahigh-pressure metamorphism in Northern Jiangsu Province. Mineral Deposits, 17(Supp.): 535~538(in Chinese).
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D, Shunten D. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China. Earth Planet Sci. Lett., 161: 215~230.
- Li Qiuli, Li Shuguang, Zhou Hongying, Li Huimin, Hong Ji'an, Wang Qingchen, Massonne H J. 2001. U-Pb age of rutile from ultra-pressure eclogite: evidence for quick cooling. Chinese Science Bulletin, 46(19): 1655~1658 (in Chinese).
- Li S, Wang S, Chen Y, Li Huimin, Hong Ji'an, Wang Qingchen, Massonne H J. 2000. Excess argon in phengite from eclogite: evidence from dating of eclogite minerals by Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ methods. Chem. Geol., 112: 343~350.
- Li Shuguang, Li Huimin, Chen Yizhi, Xiao Yilin, Liu Deliang. 1997. Geochronology of the Dabie-Sulu ultra-pressure metamorphic belt (II): U-Pb isotopic system of zircon. Science in China (D), 27(3): 200~206 (in Chinese).
- Liu Yuanjun. 1996. Further discussion on the mineralization of rutile in metamorphic process. Hubei Geology, 10(1): 26~37 (in Chinese with English abstract).
- Rowley D B, Xue F, Tucker R D, Peng Z X, Baker J, Davis A. 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb Zircon geochronology. Earth Planetary Sci. Lett., 151: 191~203.
- Wang Denghong. 1995. Discussion on non-equilibrium hydrothermal mineralization. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, (2): 130~131(in Chinese).
- Xu Zhiqin. 2002. Progress in the Chinese continental scientific drilling Project. Geological Bulletin of China, 21(1): 9~10(in Chinese).

Dating on the Eclogite-hosted Quartz Crystal and Its Significance for Tracing the Exhumation History of the UHP Belt in North Jiangsu Province

WANG Denghong¹⁾, XU Jue¹⁾, CHEN Yuchuan²⁾, LI Huaqin³⁾, YU Jinjie¹⁾

1) Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037; 2) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

3) Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Geological Survey of China, Yichang, 443003

Abstract

The quartz crystals mined from Donghai, Jiangsu Province, are famous for its large size of crystal, large amount of production, which occupy half of the total production in China. It is also unique for its occurrence within ultra-high pressure metamorphic belt. Based on the logging for the Chinese Continental Scientific Drilling cores and the comparison study on the regional metallogenic regularity, this paper suggests that there exists ultra-low pressure mineralization in the Sulu-Dabie high-ultrahigh pressure metamorphic belt. The existing of vugh within eclogite, quartz vein infilling tension fissures, and the leaking of slurry during the drilling process indicate that there exists ultra-low pressure condition for mineralization. Geochronological study on fluid-inclusions within quartz from eclogites by Rb-Sr method gives a 208 ± 22 Ma isochron age, favoring for the idea that most of the famous quartz crystals in Donghai, China, were formed at Triassic and under the ultra-low pressure condition after the UHP metamorphic belt forming and exhumation.

Key words: quartz crystal; geochronology; Donghai; Jiangsu Province; Dabie-Sulu UHP metamorphic belt; CCSD