

大陆科学钻探工程 CCSD 主孔中发现的 大量流体交代脉体

徐 珏¹, 陈振宇¹, 陈毓川², 王登红¹, 李纯杰¹, 余金杰¹, 王平安³

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. 中国地质调查局发展与研究中心, 北京 100037

摘要: 在对位于苏北榴辉岩分布区中国大陆科学钻探工程 CCSD 5 000 多 m 主孔岩心进行岩矿鉴定的过程中, 普查发现存在各种各样的脉体, 可大致分为四大系列: (1) 与超高压/高压变质阶段有关的脉体系列; (2) 与减压部分熔融阶段有关的脉体系列; (3) 与退变质(主要绿帘角闪岩相和绿片岩相)有关的脉体系列; (4) 折返晚期超低压-低温热液脉体。尤其特别的是于 3 578.5~4 006 m 深度发现了大量特殊的富含稀土矿物的脉体。CCSD 主孔岩心的脉体分布广泛、类型繁多, 有的与矿化作用密切有关, 在成因上可能属于大规模地质流体交代的结果。

关键词: CCSD; 脉体; 流体; 交代; 富稀土矿物。

中图分类号: P 588.3 **文章编号:** 1000—2383(2006)04—0551—06 **收稿日期:** 2006—04—09

Large Numbers of Fluid Metasomatic Veins in CCSD Main Hole

XU Jue¹, CHEN Zhenyu¹, CHEN Yuchuan², WANG Denghong¹, LI Chunjie¹,
YU Jinjie¹, WANG Pingan³

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
3. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

Abstract: A variety of veins were discovered during the observation and identification of rocks from the main hole of CCSD (the China Continental Scientific Drilling Project), which is located at the eclogite area in North Jiangsu. These veins can be divided into four series: ① related to the UHP/HP stage; ② related to the decompression and partial melting stage; ③ related to the retrograde metamorphism stage; ④ related to the late exhumation stage. Especially, large numbers of REE-mineral-rich veins were found at depths of 3 578.5–4 006 m. These veins from the CCSD main hole were widely distributed and some were closely related to mineralization. In genesis, they may be the result of geological fluid metasomatism on a large scale.

Key words: CCSD; veins; fluid; metasomatism; REE-rich mineral.

脉体是变质岩中最容易识别的结构之一, 是流体在裂隙内的沉淀产物, 是变质条件下变质流体流动的主要证据和标志之一(郑永飞等, 1999; 游振东等, 2001)。除了常见的石英脉之外, 脉体还可由与寄主岩石变质程度一致的矿物组成(Cox and Etheridge, 1989), 可以产于高压蓝片岩相(Essene and Fyfe, 1967)和榴辉岩相(Jamtveit et al., 1990)地体中(郑永飞等, 1999)。中国大陆科学钻探(CCSD)已经终孔, 并在对主孔 5 000 多 m 岩心所开展的多方面研究中取得了重要进展(许志琴等, 2005)。但对于岩心中的脉体, 目前还缺少更多的关注(王登红等, 2003)。作者在对 CCSD 主孔岩心进行

编录的过程中,普查发现存在大量各种各样的脉体,并对这些脉体进行了一些初步的岩矿鉴定和矿物分析.本文是其中部分工作的初步报道.

1 CCSD 主孔中脉体的主要类型

脉体在主孔中的分布,一方面决定于其生成的地质阶段,另一方面则决定于它在钻孔中所处的构造位置,尤其是围岩的成分.按照脉体出现的地质背景,CCSD-1 中脉体可大致分为四大系列:(1)与超高压/高压变质阶段有关的脉体系列;(2)与减压部分熔融阶段有关的脉体系列;(3)与退变质(主要是绿帘角闪岩相和绿片岩相)有关的脉体系列;(4)折返晚期超低压-低温热液脉体.

1.1 与超高压/高压变质阶段有关的脉体系列

高压/超高压阶段以出现高压、超高压变质矿物为特征,可进一步分为 2 类:(1)与变质分异或变质作用有关的脉体系列.包括:①绿辉石脉;②金红石-石榴子石-石英脉;③多硅白云母-石榴子石脉;④团块状一条带状的榴辉岩脉;⑤超镁铁质岩中的石榴橄榄岩脉和纤闪石化辉石岩脉;⑥蓝晶石-铬透辉石-阳起石脉;⑦绿帘石-多硅白云母-石榴子石-钛铁矿-黄铁矿脉,等.(2)与高压-超高压作用有关的高压热液脉.以出现高压矿物组合为特征,包括:①铬透辉石-滑石-蛇纹石脉;②蛭石-滑石-绿帘石脉;③金云母-阳起石-绿泥石脉;④绿帘石-金红石-石榴子石-角闪石-石英脉;⑤黄铁矿-钛铁矿-石榴子石-石英脉;⑥金云母-黑云母脉;⑦金红石-石英脉.

1.2 与减压部分熔融相关的脉体系列

在超高压变质峰期过后是近等温的减压部分熔融阶段,这一阶段形成的脉体往往呈伟晶岩相或与角闪岩相有关.据李曙光(2004)研究,从超高压峰期到绿片岩相退变质,有 2 个退变质降温过程:(1)从超高压榴辉岩至角闪岩相(220~219 Ma);(2)从绿帘角闪岩至绿片岩相(180~170 Ma).这 2 个阶段之间有近 40 Ma 的时间处于 600℃ 恒温阶段,主要处在中下地壳环境,即角闪岩相退变质和含水部分熔融(减压部分熔融)阶段.与此过程相关的是形成了一些伟晶状脉体或在长英质脉体中常常出现多硅白云母、石榴子石等变质矿物.

这一阶段形成的脉体也是一系列的,类型繁多,包括:(1)钾长石-黑云母-石英脉、黑云母-长英

质脉;(2)角闪石脉、阳起石-角闪石-石英脉;(3)石榴子石-钾长石-石英脉;(4)斜长石-石英脉;(5)黑云母-金云母-石英脉;(6)磷灰石-磁铁矿-黑云母-钾长石-氟碳钙铈矿-锆石-石英脉;(7)褐帘石-金红石-钾长石-钠长石-氟碳钙铈矿-锆石-石英脉;(8)黑云母-钾长石-钠长石-氟碳钪钙矿-石英脉.

1.3 退变质阶段热液脉系列

退变质阶段所形成的脉体极其复杂,根据主要矿物组合可识别出 30 多种类型,主要包括:(1)绿帘石-绿泥石-角闪石-石英脉;(2)角闪石-石棉-石英脉;(3)蛭石-蛇纹石脉;(4)钛铁矿-石英脉;(5)石棉-石英脉;(6)蛇纹石脉、蛇纹石-碳酸盐脉;(7)角闪石-石棉-石英脉;(8)钠长石-黄铁矿-钛铁矿-角闪石脉、钛铁矿-绿帘石-钠长石脉;(9)磁铁矿-石英脉;(10)磁铁矿-黄铁矿-赤铁矿-石英脉;(11)绿帘石-黑云母-白云母-钾长石-磷灰石-磁铁矿-黄铁矿-氟碳钙铈矿-锆石-石英脉;(12)多硅白云母-绿泥石-绿帘石-石英-方解石脉;(13)白云母/绢云母脉;(14)黄铁矿-磁铁矿-钠长石-钾长石-重晶石-氟碳钙铈矿-氟碳钪钙矿-含镁、铁碳酸盐脉;(15)黑云母-钾长石-钠长石-氟碳钪钙矿-碳酸盐脉;(16)绿泥石-绿帘石脉、褐帘石脉;(17)黑云母-绿帘石脉;(18)绿泥石脉、钠长石-绿泥石脉、绢云母-绿泥石脉;(19)滑石-方解石脉;(20)菱铁矿-石英脉;(21)绢云母-碳酸盐脉、绿泥石-碳酸盐脉、黑云母-碳酸盐脉;(22)黄铁矿-角闪石-榍石-碳酸盐脉、赤铁矿-碳酸盐脉;(23)钛磁铁矿细脉;(24)沥青-方解石脉;(25)绿泥石-红色玉髓脉;(26)后成合晶细脉;(27)阳起石-角闪石-石英脉.

1.4 折返晚期超低压-低温阶段的热液脉体

这阶段的热液脉体包括:(1)绿泥石脉;(2)碳酸盐(主要是方解石)脉;(3)微晶石英脉;(4)含毛发状金红石-水晶脉;(5)磁铁矿-黄铁矿-水晶脉.

2 脉体的分布状况

据 CCSD-1 主孔岩心编录和光薄片观察,统计了全孔各岩段中各种脉体 14 500 余条,其中尚不包括显微脉体.上述 49 种脉体主要是根据不同阶段、不同矿物成分从 14 500 余条脉体中加以区别、归纳出来的常见类型,其中数量最多的 13 种脉体分别为:(1)石英

脉(占全部脉体的 17.5%);(2)绿帘—绿泥—角闪石脉(占 10%);(3)黄铁矿—角闪石脉(占 9.5%);(4)碳酸盐脉(占 9%);(5)绿泥石脉(占 5.5%);(6)磁铁矿—黄铁矿—赤铁矿—石英脉(占 5.3%);(7)长英岩脉(占 4.5%);(8)绿辉石脉(占 4.2%);(9)蛇纹石(石榴子石)脉(占 4.1%);(10)金红石—石榴子石脉(占 3.7%);(11)黑云—石英—钾长石脉(占 3.1%);(12)钛铁矿—石英脉(占 1.35%);(13)磁铁矿—石英—碳酸盐脉(占 1.35%)。

在 CCSD-1 主孔中的各种榴辉岩(包括退变榴辉岩)内,穿切有各个阶段的脉体,主要包括:(1)与超高压/高压变质阶段有关的脉体,如:金红石—石榴子石—石英脉、多硅白云母—石榴子石脉、超铁镁质岩脉、斑团状绿帘—绿泥—斜长—角闪—辉石岩脉、绿辉石脉、榴辉岩团条、绿帘石—多硅白云母—石榴子石—钛铁矿—黄铁矿脉;(2)与高压/超高压有关的高压热液阶段有关的脉体,如:绿帘石—金红石—石榴子石—角闪石—石英脉、黄铁矿—钛铁矿—石榴子石—石英脉、金红石—石英脉、金云母—黑云母脉;(3)与角闪岩相和减压部分熔融相关的脉体,如:钾长石—黑云母—石英脉、角闪石脉、阳起石—角闪石—石英脉、石榴子石—钾长石—石英脉、斜长石—石英脉、黑云母—金云母—石英脉;(4)与退变质阶段有关的热液脉体,如:绿帘—绿泥石—角闪石—石英脉、阳起石—角闪石—石英脉、钛铁矿—石英脉、黄铁矿—钛铁矿—角闪石—钠长石脉、钛铁矿—绿帘石—钠长石脉、绿帘石—黑云母—黄铁矿—石英脉、多硅白云母—绿泥石—绿帘石—石英—碳酸盐脉、绿泥石—碳酸盐脉、磁铁矿—黄铁矿—水晶脉、后成合晶(主要是显微角闪石—钠长石)细网脉。

在 CCSD-1 主孔各种超铁镁质岩性段中,穿切的各阶段脉体主要有:(1)与变质分异或变质作用有关的脉体,如:石榴橄榄岩脉、金红石—榴辉岩脉、蓝晶石—铬透辉石—阳起石脉、辉石脉;(2)与高压超高压有关的高压热液脉体,有:铬透辉石—滑石—蛇纹石脉、蛭石—滑石—绿帘石脉、金云母—阳起石—绿泥石脉、金云母—黑云母脉;(3)与伟晶岩或角闪岩相和减压部分熔融阶段相关的脉体,有:阳起石—角闪石—石英脉、黑云母—金云母—石英脉;(4)与退变质阶段有关的热液脉体,有:角闪石—石棉—石英脉、蛭石—蛇纹石脉、石棉—石英脉、蛇纹石脉、蛇纹石—碳酸盐脉、角闪石—石棉—石英脉、滑石—方解石脉以及在强退变纤闪石岩(原岩为石榴辉石岩)

中的黄铁矿—角闪石—榴石—碳酸岩脉、赤铁矿—碳酸盐脉。

在斜长片麻岩夹角闪岩及黑云片岩中,主要出现钠长石脉、长石—碳酸盐脉、白云母脉、绿泥石—石英—碳酸盐脉、石榴子石脉和磁铁矿—褐铁矿脉。

在正片麻岩的长英质片麻岩中,多发育伟晶岩脉、长英岩脉、磁铁矿—黄铁矿—钠长石—钾长石—重晶石—氟碳钙铈矿—氟碳钇钙矿—含镁—铁的碳酸盐脉、黑云母—钾长石—钠长石—氟碳钙铈矿—石英—碳酸盐脉、微晶石英脉、黑云母—碳酸盐脉和黄铁矿—二云—绿泥石脉。

在二长片麻岩中,发育长英质脉、伟晶状长英脉、绿泥—碳酸盐脉、绿帘—黑云母脉、白云母脉、白云母—碳酸盐脉、黄铁矿—黄铜矿—钛磁铁矿—绿泥石脉、黄铁矿—磁铁矿脉、绿帘—黑云—白云母—磷灰石—磁铁矿—氟碳钙铈矿—锆石—石英脉、褐帘石—金红石—钾长石—钠长石—氟碳钙铈矿—锆石—碳酸盐脉。

在各类片麻岩与超铁镁质岩或榴辉岩相接触带附近的破碎带或破裂—糜棱岩带中,往往发育绿泥石脉、碳酸盐(主要为方解石)脉、含毛发状金红石—水晶脉、磁铁矿—黄铁矿—水晶脉。这些脉体是在本区折返后期的超低压—低温阶段形成的,但在其接触破碎带的片麻岩一侧可见含金红石—石榴子石脉和小透镜状含金红石—榴辉岩脉及斑团状含金红石—角闪—辉石脉。

3 含稀土矿物的特殊类型脉体

在众多的脉体中,最为特殊的是在 3 578.5~4 006 m 深度发现的富含稀土矿物的脉体(图 1)。其稀土矿物组合包括:褐帘石、氟碳钙铈(钇)矿和氟钇钙矿。

主要稀土矿物的电子探针分析成分见表 1。

4 脉体的形成与矿化

CCSD-1 中各类脉体的物质成分主要取自于附近围岩,脉体的形成过程也是元素迁移富集的过程。例如,受过应变的金红石由于储集了大的应变能而最容易迁移。因此,在金红石榴辉岩层的上下常见金红石—多硅白云母—石英脉。在退变榴辉岩中金红石变小变少,而在脉体中金红石加大,这有利于金红

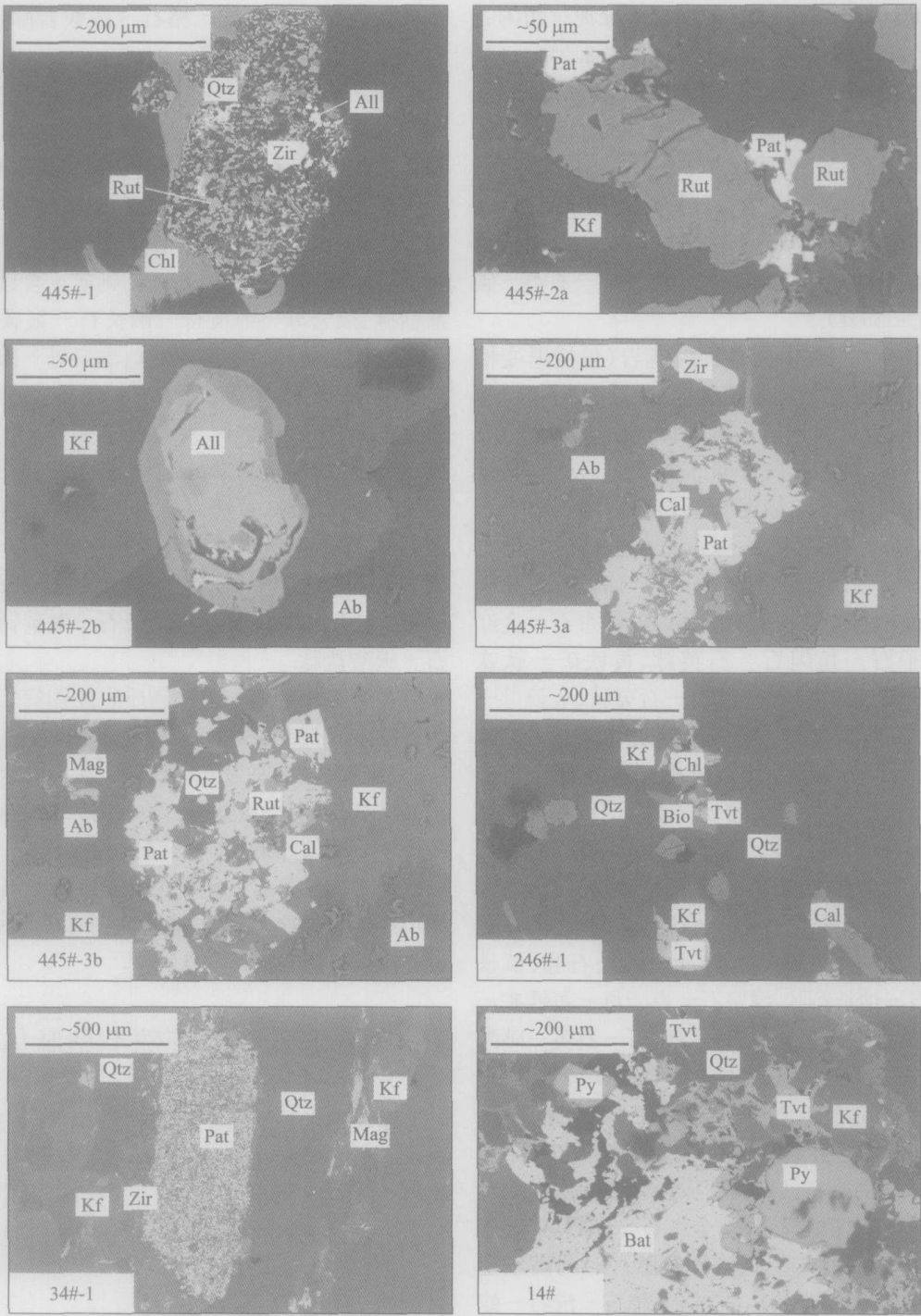


图 1 富含稀土矿物的脉体的背散射电子图像

Fig. 1 Back scattering electron image of REE-mineral rich veins

Ab·钠长石;All·褐帘石;Bat·重晶石;Bio·黑云母;Cal·方解石;Kf·钾长石;Mag·磁铁矿;Qtz·石英;Pat·氟钇钙铈(钇)矿;Py·黄铁矿;Rut·金红石;Tvt·氟钇钙铈矿;Zir·锆石

石的富集成矿(徐珏等,2004).同时,退变质作用可使金红石转变为钛铁矿和榍石,钛矿物中钛的百分含量减少,趋于分散、流失,又使钛矿化变贫,甚至可迁移到榴辉岩段上下的各类片麻岩和角闪岩中形成伟晶状含板钛矿—长石—绿泥石脉和钛铁矿—榍石—碳酸盐脉.含钛矿物在超高压—高压变质、折

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

表 1 CCSD 主孔 3 578.5~4 006 m 岩心段主要稀土矿物的电子探针分析成分结果
Table 1 Results of electron probe analysis of REE minerals from CCSD at the depth of 3 578.5~4 006 m

矿物 样品号	褐帘石		氟碳钙铈(钇)矿		褐帘石 1		褐帘石 2		氟碳钙铈矿			氟钇钙矿			氟碳钙铈(钇)矿			氟钇钙矿		
	445#-1	445#-2	445#-1	445#-2	445#-1	445#-2	445#-1	445#-2	445#-1	445#-2	445#-3	246#-1	246#-2	246#-3	34#-1	34#-2	34#-3	14#-1	14#-2	14#-3
MgO	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	0.81	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.94	0.75
Al ₂ O ₃	16.67	0.00	0.02	14.74	18.23	0.00	0.00	0.36	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	31.75	0.04	3.35	31.32	33.67	0.22	0.13	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	2.45	0.06	0.24	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.02	0.10	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.04	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.01	0.12	0.09	0.04	0.12	0.01	0.03	0.04	0.05	0.02	0.05	0.02	0.05	0.11	0.57	0.00	0.14	0.09	0.02	0.02
CaO	11.96	18.64	18.90	10.79	16.34	17.70	17.61	17.70	17.54	17.70	17.54	18.84	19.34	18.37	12.75	18.83	17.28	19.94	20.03	20.03
TiO ₂	0.41	0.48	0.87	0.23	0.16	0.12	0.17	0.20	0.13	0.00	0.13	0.00	0.00	0.32	3.26	0.04	0.13	0.06	0.07	0.07
MnO	0.24	0.00	0.00	0.43	0.17	0.00	0.03	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.05	0.20	0.00	0.00	0.00
FeO	12.33	0.00	0.00	15.65	13.04	0.08	0.00	0.03	0.02	0.15	0.02	0.15	0.00	0.32	1.03	0.54	2.19	0.12	0.05	0.05
Y ₂ O ₃	0.451	1.579	6.998	0.122	0.313	0.44	4.315	0.862	1.041	24.659	23.405	1.199	1.649	1.199	1.649	4.449	3.717	32.989	28.995	28.995
La ₂ O ₃	4.19	12.20	22.05	5.08	6.74	12.67	14.43	13.21	12.75	2.13	2.40	2.13	2.40	10.05	11.55	12.35	12.12	0.47	0.36	0.36
Ce ₂ O ₃	9.61	22.62	22.62	11.07	5.17	23.78	24.95	24.38	24.52	5.30	5.12	5.30	5.12	19.03	22.44	23.87	22.31	1.08	0.84	0.84
Pr ₂ O ₃	1.28	2.63	1.73	1.29	0.54	2.57	2.15	2.42	2.53	0.73	0.35	0.73	0.35	1.98	2.04	2.16	1.85	0.12	0.29	0.29
Nd ₂ O ₃	4.80	9.62	7.45	3.52	2.78	9.47	8.31	9.17	9.62	3.50	2.86	3.50	2.86	7.37	6.84	7.46	6.43	1.11	0.98	0.98
Sm ₂ O ₃	0.68	2.11	2.83	0.27	0.66	1.86	0.64	1.36	1.27	1.82	1.34	1.82	1.34	1.29	1.01	1.35	1.24	1.49	1.42	1.42
Gd ₂ O ₃	0.41	2.08	2.72	0.00	0.49	1.54	0.99	1.30	0.54	3.64	3.61	3.64	3.61	1.19	0.74	1.07	1.46	3.35	3.08	3.08
Dy ₂ O ₃	0.40	0.71	1.98	0.00	0.18	0.65	0.07	0.26	0.18	3.65	3.76	3.65	3.76	0.65	0.47	0.46	0.69	4.07	3.93	3.93
ThO ₂	0.94	0.11	0.00	0.72	0.55	0.09	0.17	0.12	0.48	0.49	1.36	0.49	1.36	7.74	0.49	0.06	0.48	0.31	0.16	0.16
Total	96.27	72.46	74.68	97.08	94.78	71.20	74.00	71.54	70.94	65.72	64.41	65.72	64.41	70.47	68.38	72.88	70.55	66.14	60.98	60.98

注:电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成.仪器型号:JXA-8800R;加速电压:20 kV;电流:2×10⁻⁸ A;束斑:5 μm.

返、退变质的各阶段中都呈活跃可变状态,可形成各阶段含钛流体相,并形成不同的钛矿物相.如,由超高压前的钛铁矿转变为超高压时的金红石,到退变质时又变为钛铁矿—榍石,到折返后期则形成板钛矿—锐钛矿,一直到晚期区域快速抬升,钛矿物又可变成副矿物状态的钛铁矿和金红石.

至于在 3 578.5~4 006 m 深度发现的富含稀土矿物的脉体,对其成因机制的探索无疑具有重要的科学意义,限于目前研究程度,仅作报道,以期下一步的深入研究.

致谢:在研究过程中,得到了许志琴院士及 CCSD 指挥部杨经绥总地质师、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、唐泽民副研究员、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,矿产资源研究所袁忠信研究员、邹天人研究员等给予了岩矿鉴定等方面的细心指导,在此一并致谢.

References

- Cox, S. F., Etheridge, M. A., 1989. Coupled grain scale dilatancy and mass transfer during deformation at high fluid pressures: Examples from Mount L. Yell, Tasmania. *J. Struct. Geol.*, 11: 147—162.
- Essene, E. J., Fyfe, W. S., 1967. Omphacite in Californian metamorphic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 12: 1—23.
- Jamtveit, M. K., Bucher-Nurminen, K., Austrheim, H., 1990. Fluid controlled eclogitization of granulites in deep crustal shear zones, Bergen arcs, western Norway. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 104: 184—193.
- Li, S. G., 2004. Exhumation mechanism of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie mountains and continental collision process between the North and South China blocks. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 63—70 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Xu, J., Chen, Y. C., et al., 2003. Datine on the eclogite hosted quartz crystal and its significance for tracing the exhumation history of the UHP belt in North Jiangsu Province. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 544—548 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Chen, Y. C., Wang, D. H., et al., 2004. Titanium mineralization in the ultrahigh pressure metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling 100—2 000 m main hole. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 119—126 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Zhang, Z. M., et al., 2005. Completion and achievement of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project. *Chinese Geology*, 32(2): 177—183 (in Chinese with English abstract).
- You, Z. D., Zhong, Z. Q., Zhou, H. W., 2001. The role of fluid flow in regional metamorphism. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 157—164 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Fu, B., Wei, C. S., 1999. Geochemistry of metamorphic fluids: From static qualitative analysis to dynamic quantitative study. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 564—575 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李曙光, 2004. 大别山超高压变质岩折返机制与华北—华南陆块碰撞过程. *地学前缘*, 11(3): 63—70.
- 王登红, 徐珏, 陈毓川, 等, 2003. 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. *地质学报*, 77(4): 544—548.
- 徐珏, 陈毓川, 王登红, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 超高压变质岩中的钛矿化. *岩石学报*, 20(1): 119—126.
- 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 等, 2005. 中国大陆科学钻探终孔及研究进展. *中国地质*, 32(2): 177—183.
- 游振东, 钟增球, 周汉文, 2001. 区域变质作用中的流体. *地学前缘*, 8(3): 157—164.
- 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(4): 564—575.