

中国大陆科学钻探（CCSD）主孔 流体地球化学和矿化特征

ZHONGGUO DALU KEXUE ZUANTAN ZHUKONG LIUTI
DIQIUHUAXUE HE KUANGHUA TEZHENG

徐 莉 孙晓明 翟 伟 汤 倩 梁金龙 著



地质出版社

国家自然科学基金重点项目和国家重点基础研究发展规划(973)项目资助

中国大陆科学钻探(CCSDB)主孔 流体地球化学和矿化特征

徐 莉 孙晓明 翟 伟 汤 倩 梁金龙 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

中国大陆科学钻探 (CCSD—Chinese Continental Scientific Drilling) 具有重要的理论和现实意义。建立“超高压变质岩形成与折返机制”的模式及研究“超高压变质作用过程中流体和岩石的相互作用”是 CCSD 的主要目的之一。本书选取 CCSD 钻孔中长英质脉体、东海水晶巨晶、榴辉岩中金红石、磷灰石、绿帘石等副矿物作为主要研究对象,采取一系列的现代分析测试方法,进行了矿物学、流体地球化学及矿物定年等方面的研究。研究结果显示,板块发生了快速的俯冲和折返,其中流体未发生大规模的流动和迁移;石英脉和水晶可能主要是由俯冲板块折返和减压过程中释放的富 SiO_2 流体结晶而成。这种高氧逸度和富 SiO_2 的流体在以隧道式上升过程中可作为一种有效的氧化剂,导致汇聚板块具有较高的氧逸度,从而较好地解释了为何汇聚板块具有高氧逸度的国际难题。

本书可供从事流体地球化学、矿物学、岩石学和矿床学教学和科研人员以及相关专业的研究生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔流体地球化学和矿化特征 / 徐莉等著. —北京:地质出版社, 2009. 6

ISBN 978-7-116-06133-0

I. 中… II. 徐… III. ①大陆—地球化学—研究—中国
②大陆—矿物学—研究—中国 IV. P5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 100285 号

责任编辑:蔡卫东

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324519 (办公室); (010) 82324571 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787 mm × 1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张:12.75; 图版:11 面

字 数:300 千字

印 数:1—800 册

版 次:2009 年 6 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:50.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-06133-0

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前言

“上天、入地、下海”是人类向自然界挑战的三大壮举。被誉为伸入地球内部“望远镜”的大陆科学钻探是当代地球科学领域内具有划时代意义，能带动 21 世纪地球科学和相关科学技术发展的大科学工程，同时，也是解决人类社会所面临的资源、环境、灾害等问题的重要途径之一，是继人类登月之后向地球的另一挑战。

实践表明，通过大陆科学钻探对岩石圈进行直接取样和观测，可以了解和认识大洋及大陆的板块运动、地壳应力与地震活动、火山作用、深部资源、生命起源以及全球环境与气候变化，解决一系列重大基础科学问题。

在世界上，大陆科学钻探计划已经实施了 30 余年。迄今为止，全球已有 13 个国家打了 100 多口科学钻井，其中超过 4 000 m 的深井 22 口。最早进行大陆科学钻探的国家是前苏联，其中科拉 SG-3 钻孔的钻探时间最长（1970 ~ 1989 年），进尺 12 262 m，为目前世界上最深的钻孔，并成为世界第一个与深钻有关的地学实验室；德国于 1987 ~ 1994 年间，在德国中部的 Windischeschenbach 镇进行了科学钻探，即举世闻名的 KTB 钻探项目，原设计孔深 14 000 m，实际主孔的终孔孔深 9 101 m，为世界第二深井，其目的是探测海西碰撞造山带深部结构及其动力学；以德国、美国和中国为三大发起国的国际大陆科学钻探组织于 1996 年正式成立，它标志着大陆科学钻探进入了新的发展阶段，全球范围的整合的大陆科学钻探计划正在逐步形成。中国大陆科学钻探（CCSD——Chinese Continental Scientific Drilling）工程 5 158 m 终孔，为亚洲第一深井；美国已实施钻探了 13 口井，目前正在夏威夷现代火山玄武岩及圣安德烈斯断裂中实施科学钻探；瑞典、法国及加拿大等国正在制定新的大陆科学钻探计划；日本跃跃欲试，正在制定为期 10 年的超深钻计划，拟定在太平洋、菲律宾及亚洲板块结合带上打超深井。图 1 显示了目前正在实施和计划中的国际大陆科学钻探工程项目（ICDP）以及相关的科学目标（许志琴等，2004a）。

中国大陆科学钻探（CCSD）工程是利用现代深部钻探高新技术，在具有全球地学意义的大别-苏鲁超高压变质带实施的中国第一口 5 158 m 深的科学深钻（图 2，图版 I-1），利用从钻孔中获取的岩心及液气态样品及原位测量数据，进行多学科综合研究。通过大陆科学钻探对岩石圈进行直接观测，可以揭示大陆地壳的物质组成与结构构造，校正地球物理对地球深部的遥测结果，探索地球深部流体系统和地热结构，监测地震活动，揭示地震发生规律，研究全球气候变化及环境变迁，探索地下微生物的分布及潜育条件，预防环境及地下

水污染，处理核废料，长期观察地球变化等等，可以解决一系列重大基础科学问题。

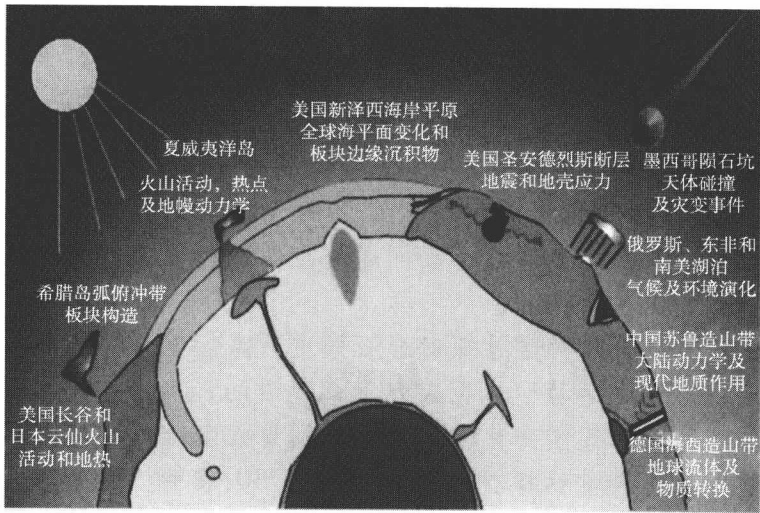


图 1 国际大陆科学钻探工程项目 (ICDP) 的科学目标
(据 CCSD, 2003)

Fig. 1 Scientific themes of ICDP
(from CCSD, 2003)

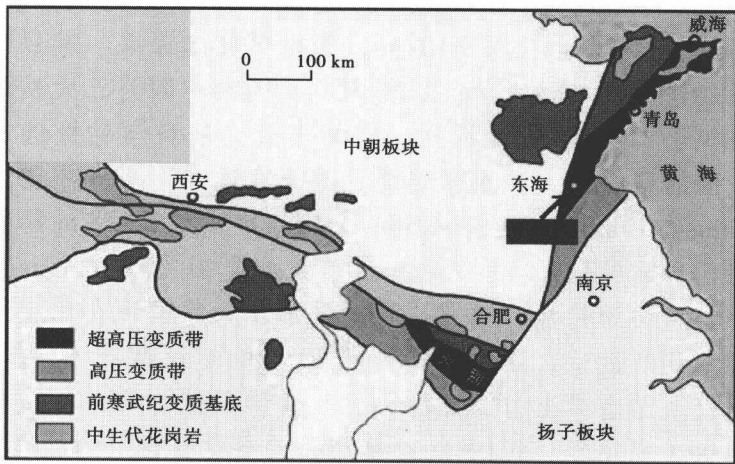


图 2 大别-苏鲁造山带简图和大陆科学钻探所在位置
(据 CCSD, 2001)

Fig. 2 The tectonic map of Dabie-Sulu orogenic belt and the situation of CCSD
(from CCSD, 2001)

建立“超高压变质岩石形成与折返机制”的模式及研究“超高压变质作用过程中流体和岩石相互作用与成岩成矿机理”，是 CCSD 的主要目标（许志琴等，2004a）。板块俯冲和折返过程中的流体活动是碰撞造山带变质作用、岩浆

作用乃至成矿作用研究的重要内容。流体活动程度和总量多少不仅影响造山带的地球动力学过程,而且对壳幔物质再循环及其有关的弧岩浆具有重要意义。岩石中的流体在变质作用及成岩成矿过程中起着至关重要的作用。变质流体在地壳中广泛存在,它是地壳构造作用水/岩反应的产物,同时亦对地质构造作用、成岩成矿作用产生广泛的影响。此外,变质流体在地壳构造系统演化中是一个复杂的热动力学系统,因此,当前研究者对变质流体的研究已成为地质学科前缘性研究课题。沉积岩在构造变质过程,岩石矿物中粒间流体、矿物中吸附水、结晶水及挥发分可以释放聚合形成变质流体,可以有深部地幔分异熔体出熔作用形成的地幔流体加入。变质流体不但在变质过程中对不同变质相带矿物组合形成起着重要作用,而且促使沉积岩中金属元素产生活化转移、富集成矿(李兆麟等,1996)。

近几年来,超高压变质岩的岩石学、矿物学、地球化学、年代学和构造地质学研究取得了许多重要进展,但到目前为止,对大别-苏鲁超高压变质带还没进行系统的流体研究,尤其对于中国大陆科学钻探(CCS D)工程钻孔岩石中石英脉的研究还未见有专门研究,对超高压变质条件下是否存在大规模的重熔作用和流体活动仍是一个争论很大的问题。事实上,在CCSD的5 158 m的岩心和地表HP-UHP岩石中已发现大量长英质脉体,且流体包裹体研究证明,CCSD中岩石在超高压变质及其退变质过程中有大量流体存在,一些学者对超高压变质岩进行了流体方面的研究。脉体是高压、超高压变质岩中最容易识别的结构之一,它是由从溶液中沉淀出来并且填充裂隙的矿物所组成的。石英脉记录了沿着温度降低方向出现裂隙流动的变质流体体系。在CCSD主孔榴辉岩、角闪岩和片麻岩中普遍出现呈透镜状、团块状、囊状和条带状产出的石英脉(图版I-4,5,6)。而且,东海境内还出现大量出露地表的石英脉和水晶矿(图版I-3,2)。水晶,作为工业用品及宝石,具有很多的用途和极大的观赏及经济价值,目前,江苏也已成为全国最大的水晶集散地。

榴辉岩型金红石是当地最重要的矿产,以金红石为主要矿石矿物(少量钛磁铁矿)的钛矿化层累计厚度超过1 000 m(徐珏等,2004),并且,金红石中也存在大量的结构水。据目前已查明的储量,苏北已成为全国最大的金红石生产基地。在地表,与钻址近邻的新沂市小焦村已经发现目前国内规模最大,总储量超千万吨的榴辉岩型金红石矿床。钛作为一种稀缺金属,在国防和航天科技领域有极其重要的战略资源地位,本地区的金红石矿床的巨大经济价值是不言而喻的。

那么,CCSD钻孔中的石英脉形成于什么时代,矿化机理是什么?它们与东海境内广泛分布而成因未明的水晶巨晶矿床间有无成因上的联系?金红石矿的形成与本地区三叠纪发生的扬子与华北板块的对接碰撞引发的巨量陆壳物质

超深俯冲事件有无成因的联系？其具体的形成时间和成矿机理是什么？水晶矿与钛矿其中是否包含与变质流体演化有关的超高压变质岩折返的信息？它们能否为变质流体-岩石相互作用与成岩成矿机理的建立提供重要的信息？

针对上述情况和问题，作者选取 CCSD 主孔中的石英脉、东海地表石英脉及水晶巨晶、榴辉岩样品中的副矿物金红石作为主要研究对象，同时，还对 CCSD 钻孔及地表变质岩中的磷灰石、绿帘石等副矿物做了研究，通过对矿物学和元素地球化学、流体包裹体和流体地球化学、地质年代学和成岩成矿机制等方面的研究，期望能对上述问题提出我们的见解。

本书研究工作由国家自然科学基金重点项目（编号：40399142）、国家重点基础研究发展规划（973）项目（编号：2003CB716501）、中国科学院同位素年代学和地球化学实验室合作基金（GIGIso-0504）和中国地质大学（北京）地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金（编号：2003015）的联合资助。参加本项目研究的还有中国地质科学院地质研究所张泽明研究员、山东省地质科学实验研究院沈昆高级工程师、中山大学地球科学系博士生梁业恒、硕士生李爱菊、刘珊珊等。在研究过程中，中山大学地球科学系李兆麟教授和彭明生教授，以及中国科学院广州地球化学研究所孙卫东研究员给予了许多指导；中国大陆科学钻探现场指挥部蔡慈研究员和孙立文工程师在样品的采集中提供了诸多方便和大力帮助；中国地质科学院矿产资源研究所万德芳研究员、中国科学院兰州地质研究所叶先仁研究员、南京大学成矿作用国家重点实验室王汝成教授、陆建军教授、高剑峰高级工程师、张文兰高级工程师、中国科学院地质与地球物理研究所朱和平研究员、陈福坤研究员、储著银助理研究员、中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室刘德汉研究员、激光拉曼室王英女士、华南理工大学测试中心江山高级工程师、西北大学动力学国家重点实验室的柳小明老师、第五春荣老师、中山大学测试中心赵文霞研究员、张卫红工程师、中山大学物理系唐强副教授、熊正烨工程师等对本书中样品测试分析给予了大力支持和帮助，在此一并致谢！

作 者

2008 年 12 月于广州中山大学康乐园

目 次

前 言

1 区域地质概况和岩石地球化学	(1)
1.1 中国大陆科学钻探 (CCSD) 地质概况	(1)
1.2 石英脉和东海水晶矿	(9)
1.3 金红石矿	(11)
2 CCSD 主孔石英脉及主要副矿物矿物学和地球化学	(15)
2.1 引 言	(15)
2.2 石英脉	(15)
2.2.1 石英脉中矿物组成	(15)
2.2.2 石英脉热释光分析	(15)
2.2.3 石英脉微量元素和稀土元素地球化学	(20)
2.2.4 石英脉及长石 Rb-Sr 和 Pb 同位素地球化学	(29)
2.3 金红石	(35)
2.3.1 金红石的岩相学及成分特征	(35)
2.3.2 金红石主量、微量和稀土元素地球化学	(35)
2.3.3 金红石中的结构水	(59)
2.4 磷灰石	(64)
2.4.1 磷灰石中的出溶矿物	(64)
2.4.2 磷灰石主量、微量和稀土元素地球化学	(68)
2.5 绿帘石	(79)
2.5.1 绿帘石形成阶段	(80)
2.5.2 绿帘石主量、微量和稀土元素地球化学	(85)
2.6 小 结	(96)
3 CCSD 主孔流体地球化学	(98)
3.1 引 言	(98)
3.2 石英脉流体地球化学特征	(98)
3.2.1 流体包裹体成分	(98)
3.2.2 流体包裹体特征和显微测温结果	(110)
3.2.3 流体包裹体 H-O 同位素	(122)
3.2.4 流体包裹体惰性气体同位素	(128)
3.3 绿帘石流体地球化学	(137)
3.4 高压-超高压变质岩惰性气体同位素地球化学	(142)
3.5 小 结	(149)
4 CCSD 主孔长英质脉体和矿化地质年代学	(151)
4.1 引 言	(151)
4.2 石英脉 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar 同位素定年	(152)

4.3 磷灰石中独居石 U - Th - Pb 定年 (154)

4.4 金红石 U - Pb 定年 (158)

4.5 小 结 (161)

5 矿化特征和成矿机制 (162)

5.1 石英脉（水晶）矿化特征与成因模式 (162)

5.2 金红石矿化特征与成因机制 (164)

6 主要结论 (166)

参考文献 (169)

英文摘要 (185)

图版说明及图版 (190)

Contents

Introduction

1 Geological Setting and Outline of Lithogeochemistry	(1)
1.1 General geology of CCSD main drill hole	(1)
1.2 Quartz veins and Crystals deposits	(9)
1.3 Rutiles deposits	(11)
2 Mineralogy and Geochemistry of Quartz Veins and Main Accessory Mineral of CCSD Main Drill Hole	(15)
2.1 Introduction	(15)
2.2 Quartz veins	(15)
2.2.1 Mineral components of quartz veins	(15)
2.2.2 Thermoluminescence of quartz veins	(15)
2.2.3 Trace and rare earth element compositions of quartz veins	(20)
2.2.4 Rb – Sr and Pb isotopic compositions of quartz veins and feldspars	(29)
2.3 Rutiles	(35)
2.3.1 Petrography and composition characteristics of rutiles	(35)
2.3.2 Major, trace and rare earth element composition of rutile	(35)
2.3.3 Structural hydroxyl of rutiles	(59)
2.4 Apatites	(64)
2.4.1 Exsolutions of apatites	(64)
2.4.2 Major, trace and rare earth elements of apatite	(68)
2.5 Epidotes	(79)
2.5.1 Metamorphic stages of epidotes	(80)
2.5.2 Major, trace and rare earth elements of epidote	(85)
2.6 Summary	(96)
3 Ore Forming Fluid Geochemistry of CCSD Main Drill Hole	(98)
3.1 Introduction	(98)
3.2 Fluid geochemistry of quartz veins	(98)
3.2.1 Compositions of fluid inclusions	(98)
3.2.2 Petrography and microthermometric measurements of fluid inclusions	(110)
3.2.3 H – O isotopic compositions of fluid inclusions	(122)
3.2.4 Noble gas isotopic compositions of fluid inclusions	(128)
3.3 Fluid geochemistry of epidotes	(137)
3.4 Noble gas isotopic compositions of HP – UHP metamorphic rocks	(142)
3.5 Summary	(149)

4	Geochronology of Quartz Veins and Major Mineralization in CCSD	
	Main Drill Hole	(151)
4.1	Introduction	(151)
4.2	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of quartz veins	(152)
4.3	U – Pb dating of rutiles	(154)
4.4	U – Th – Pb dating of apatites	(158)
4.5	Summary	(161)
5	Genesis and Metallogenic Model of Quartz Veins and Rutile Deposit	(162)
5.1	Genesis of quartz veins and crystals	(162)
5.2	Genesis of rutile	(164)
6	Concluding Remarks	(166)
	References	(169)
	Abstract	(185)
	Plates Explanation and Plates	(190)

1 区域地质概况和岩石地球化学

1.1 中国大陆科学钻探 (CCSD) 地质概况

全球的碰撞造山带中已发现 16 个超高压变质带, 位于中国南北两大板块——扬子板块与华北板块汇聚边界的大别-苏鲁造山带发现含有罕见的柯石英和金刚石等超高压变质矿物, 被认为是目前世界上已知的规模最大的中央超高压变质带 (Xu et al., 1992; Cong et al., 1996; Wallis et al., 1999; Liou et al., 2001), 它西起阿尔金, 经祁连、秦岭、大别, 东到苏鲁, 延绵有 4 000 多公里。超高压变质岩是板块俯冲-碰撞作用的产物, 是研究板块汇聚边界组成、结构及地球动力学的重要窗口之一, 中国大陆科学钻探工程的主要科学目的就是研究超高压变质岩的形成与折返机制及研究超高压变质作用过程中流体和岩石相互作用。超高压变质岩原岩是地壳表层, 它们是怎样下插到地下 100 多公里深处, 然后又是如何返回地球表面的? 对地质学家来说仍是一个谜, 因而引起国际地学界的广泛关注, 是当今地学研究的前沿与热点。

中国大陆科学钻探 (CCSD) 选址在具有全球地学意义的大别-苏鲁超高压变质带的东部——江苏省连云港市东海县 (图 1.1), 是经过有关专家多年考证, 认为这里是最理想的地区 (图 1.2), 其原因在于:

- 1) 该地区位于造山带的构造最深部位, 可以通过最短的钻孔深度最大程度地揭示大陆板块汇聚边缘最深部的垂直方向的变化;
- 2) 该地区构造相对简单, 岩层倾角较缓, 5 000 多米钻孔可穿过更多的岩层;
- 3) 该地区超高压变质岩分布广泛、岩石类型多种多样, 并且发现了金刚石等特征性超高压变质矿物;
- 4) 在该地区地下 3 000 ~ 5 000 m 深普遍存在高波速、高密度、高电阻和强反射层, 有待于通过钻探对其进行直接探测;
- 5) 该地区矿产资源丰富, 有水晶矿、金红石矿等矿产资源, 是研究超高压成矿机理的理想地点;
- 6) 该地区地温梯度较低, 适合于钻探施工;
- 7) 钻孔选区位于我国东部最大的活动断层——郯庐深大断裂带附近, 是监测地震动带的较好地点。

中国大陆科学钻探位于江苏省东海县毛北村附近, 地理坐标东经 118°40', 北纬 34°24' (张泽明等, 2004a)。在地质构造上属于苏鲁地体的超高压变质带。该超高压变质带的地层主要由长英质片麻岩、角闪岩、蓝晶石石英片岩、大理岩、榴辉岩以及橄榄岩等组成 (许志琴等, 2003a)。在该区片麻岩和榴辉岩中已发现柯石英, 在毛北榴辉岩中发现了金刚石晶体 (Xu et al., 2003), 说明该地区的岩石普遍经历了最大压力可达 3.3 GPa 的超高压变质作用。5 158 m 深的 CCSD 主孔就位于毛北剪切构造岩片西南部的毛北榴辉岩杂岩体

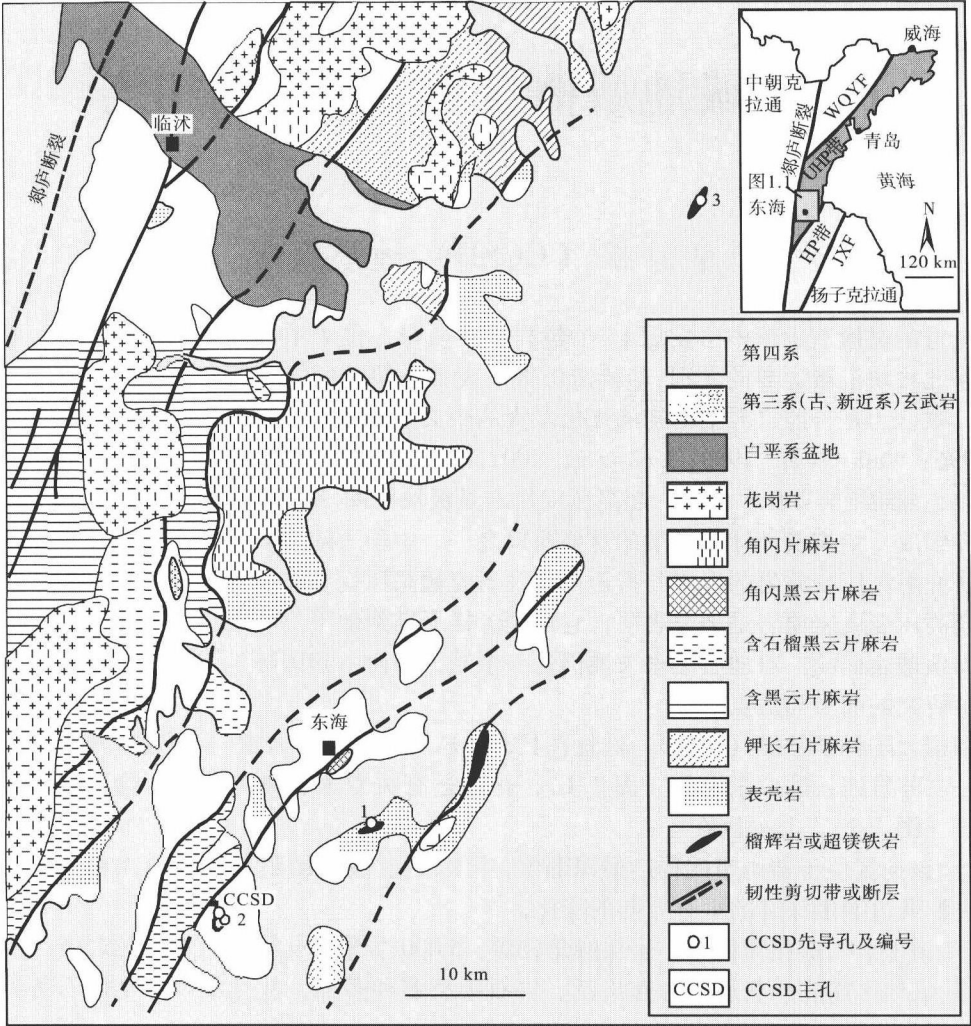


图 1.1 东海地区地质略图及 CCSD 所在位置

(据沈昆等, 2005)

Fig. 1.1 Geologic sketch map of the Donghai area and the situation of CCSD

(from Shen et al., 2005)

上。CCSD 主孔 5 000 多米岩性剖面揭示了 50 多种岩石类型，主要的岩石类型包括榴辉岩、角闪岩、橄榄岩、正副片麻岩等（许志琴等, 2004a, 2004b, 2005b）（图 1.3）。

1.1.1 苏鲁造山带超高压变质作用

张泽明等（2005a）基于超高压变质岩岩石学，特别是超高压矿物生长成分环带、扩散环带和蚀变作用的研究，综合前人的岩石学和年代学研究成果，对苏鲁造山带超高压变质作用及其 $P-T-t$ 轨迹进行了较详细的阐述（张泽明等, 2002; Zhang et al., 2000, 2005a, 2005b, 2005c）。研究认为苏鲁造山带的超高压变质岩的原岩主要由 4 种不同原岩的岩石类型

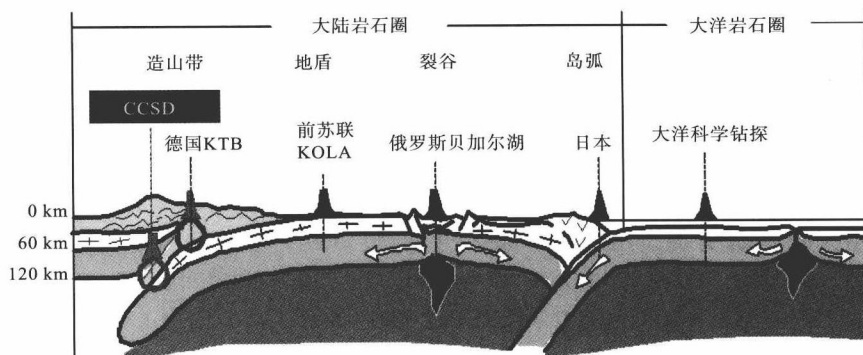


图 1.2 CCSD 与其他 ICDP 项目相对大地构造位置示意图

(据 CCSD, 2003)

Fig. 1.2 Tectonic locations of CCSD comparing with other ICDP projects in the world

(from CCSD, 2003)

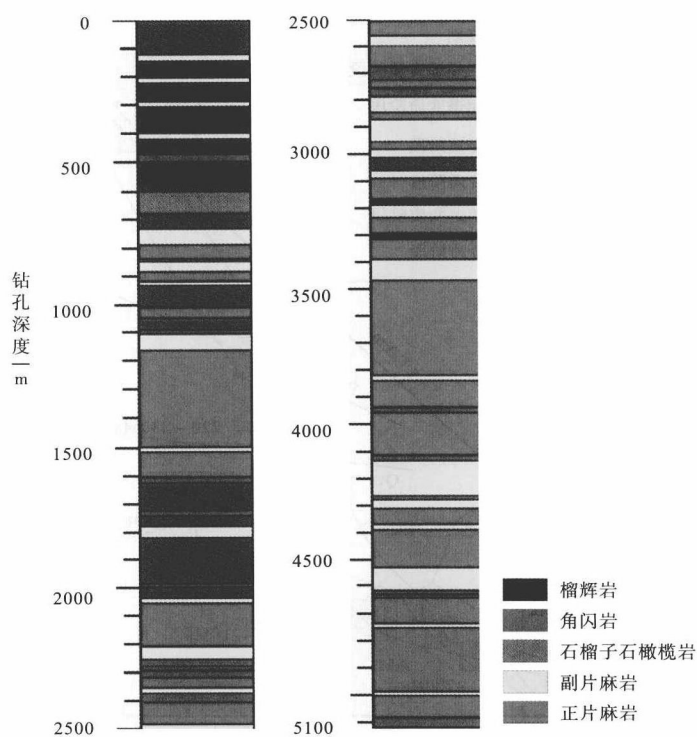


图 1.3 中国大陆科学钻探主孔 0 ~ 5158 m 岩性剖面图

(据 CCSD, 2005)

Fig. 1.3 Simplified lithological profile of the main drill hole (CCSD - MH) (0 ~ 5158 m)

(from CCSD, 2005)

组成，即表壳岩、花岗质侵入岩、基性-超基性侵入岩和少量的地幔橄榄岩。表壳岩是副片麻岩、片岩、石英岩、大理岩和石榴辉岩的原岩；花岗质侵入岩是造山带核部大面积分布的长英质片麻岩的原岩；基性-超基性侵入岩主要是榴辉岩和少量夹于其中的石榴子石橄榄岩的原岩；而地幔橄榄岩起源于俯冲带之上的地幔楔状体，具有典型地幔岩的岩石学与地球化学特征。

在苏鲁超高压变质带识别出了 8 期变质作用，由早至晚先后为绿帘角闪岩相进变质阶段、超高压变质峰期、柯石英榴辉岩相退变质阶段、石英榴辉岩相退变质阶段、麻粒岩相退变质阶段、角闪岩相退变质阶段、绿帘角闪岩相退变质阶段和绿片岩相退变质阶段（图 1.4），其相应的 8 期变质作用的温压条件分别是：500 ~ 600℃ 和 1.0 ~ 1.2 GPa；1 000 ~ 1 100℃ 和 6 ~ 7 GPa；700 ~ 820℃ 和 3.0 ~ 4.0 GPa；720 ~ 800℃ 和 2.2 ~ 2.7 GPa；700 ~ 800℃ 和 1.0 GPa；580 ~ 670℃ 和 0.9 ~ 1.1 GPa；400 ~ 500℃ 和 0.5 GPa；300 ~ 400℃ 和 0.2 ~ 0.3 GPa。在超高压变质岩的岩石学，特别是超高压矿物生长成分环带、扩散环带和蚀变作用研究的基础上，提出苏鲁造山带超高压变质作用峰期发生在 1 000 ~ 1 100℃ 和 6 ~ 7 GPa 条件下俯冲深度相当于 200 km，形成年代为 240 ~ 250 Ma。

超高压变质岩的折返过程可分为 3 个阶段：第一阶段是超高压变质岩从 200 km 快速折

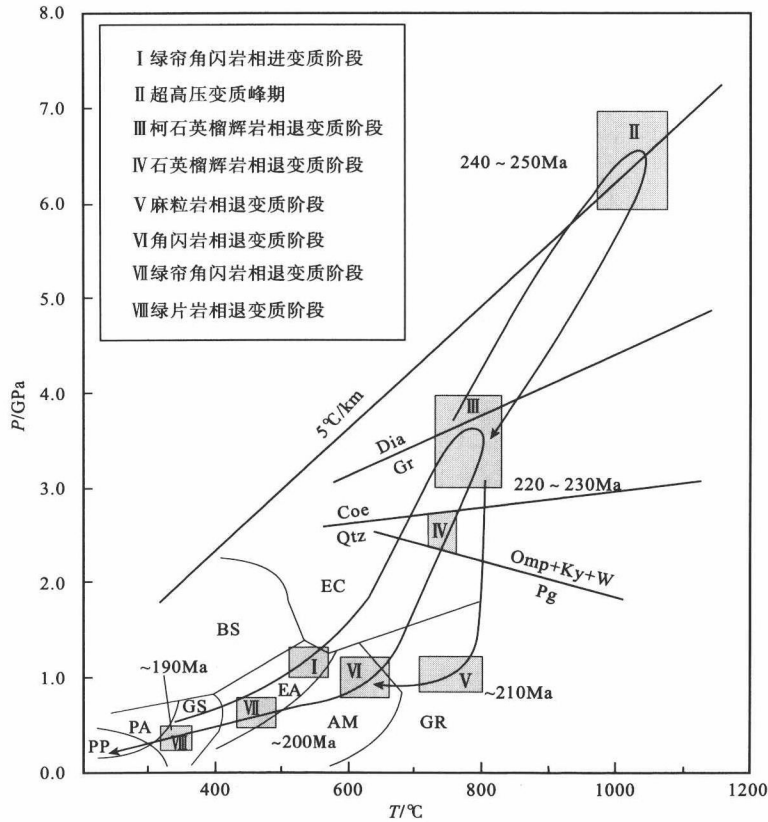


图 1.4 苏鲁地区超高压变质作用 $P-T-t$ 轨迹
(据张泽明等, 2005a)

Fig. 1.4 Metamorphic $P-T-t$ path of UHP rocks from the Sulu orogenic belt
(from Zhang et al., 2005a)

返到 100 km 深度, 抬升速率为 5 km/Ma, 冷却速率为 10℃/Ma; 第二阶段是超高压变质岩从 100 km 快速抬升约至 30 km, 抬升速率为 4 km/Ma; 第三阶段为缓慢降压和快速降温过程, 抬升速率为 1 km/Ma, 冷却速率可达 20℃/Ma。

另外, 据范宏瑞等 (2005) 对苏鲁超高压变质带北部榴辉岩中流体包裹体的研究显示, 苏鲁高压-超高压变质带南带和北带变质流体组成和性质的差异反映了超高压变质岩的差异折返过程和流体体制的不同, 主要表现为在北部榴辉岩中有麻粒岩相叠加变质作用。

1.1.2 CCSD 主孔变质岩主要岩石地球化学特征

1.1.2.1 榴辉岩相岩石

根据榴辉岩的不同矿物组合和全岩化学成分, 张泽明等 (2004a, 2005b) 将榴辉岩划分为高硅型榴辉岩、高铝型榴辉岩、高钛型榴辉岩、高钛铁型榴辉岩、高镁型榴辉岩和正常型榴辉岩。这 6 个成分类型与榴辉岩的岩石类型大致对应关系: 高硅型对应石英榴辉岩; 高铝型对应多硅白云母榴辉岩; 高钛型和高钛铁型对应金红石榴辉岩; 高镁型和正常型对应普通榴辉岩。正常型榴辉岩 SiO_2 含量为 55% ~ 43%, $\text{TiO}_2 < 2\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 18\%$, $\text{MgO} < 11\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 1.5% ~ 8.2%, CaO 为 4.2% ~ 13.1% 和 FeO^T 为 5.3% ~ 18.1%, 多呈 LREE 富集的 REE 型式; 高硅型榴辉岩具较高 SiO_2 (55% ~ 63%) 和 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (2.9% ~ 7.8%) 含量, REE 配分型式为 LREE 富集的正 Eu 异常型; 高镁型榴辉岩与石榴子石榴辉岩共生, 特征是富 MgO (12.2% ~ 17.1%), 贫 Na_2O 和 K_2O , 具有较低的 REE 含量; 高铝型榴辉岩的 Al_2O_3 含量大于 18%, REE 配分型式为 LREE 富集型, 且多具有正 Eu 异常; 高钛型榴辉岩具有较低的 SiO_2 (<45%), 较高的 TiO_2 (3% ~ 6%) 含量; 高钛铁型榴辉岩具异常的化学成分, 具有较低的 SiO_2 含量和较高的 TiO_2 和 FeO^T 含量, 以及很低的 REE 总量, 并呈 LREE 和 HREE 亏损, MREE 富集的配分型式。研究认为榴辉岩的原岩是多成因的, 很可能起源于不均匀的地幔源区, 而且强烈的结晶分异作用又使其成分发生明显的变化。同时, 很可能存在的变质分异作用和变质交代作用也对部分榴辉岩的成分再次进行了改造。大多数榴辉岩总体上具有大陆玄武岩的构造亲缘性。

游振东等 (2004, 2005) 按照榴辉岩起源将其分为壳源和幔源两类。壳源包括变质前是长期居留于陆壳的基性至中性岩浆岩的超高压变质产物。壳源榴辉岩在钻孔中分布较广泛, 上部最为集中, 它的矿物成分复杂, 常见多硅白云母、帘石类、蓝晶石、石英等硅质成分, 含金红石、磷灰石, 岩石化学上多表现为高硅高铝, ΣREE 较高, 其分布不受橄榄岩体的支配; 幔源榴辉岩指的是直接与地幔有关的基性岩类在深俯冲过程中加入俯冲板片, 以致遭受超高压变质的叠加, 其矿物成分相对简单, 以石榴子石和绿辉石或者单斜辉石为主, 含少量钛斜硅镁石, 有时含少量金红石或钛磁铁矿, 岩石化学上多表现为高镁 (MgO 含量为 12.2% ~ 17.1%), REE 丰度较低。幔源榴辉岩集中出现于石榴橄榄岩体的上、下盘, 在地表也有零星露头, 在空间上与超镁铁岩有密切的共生关系。

刘福来等 (2004b, 2004c, 2005a, 2006) 对 CCSD 主孔岩心及苏鲁变质岩石锆石中包体矿物进行了详细研究, 发现榴辉岩锆石中保存的典型超高压包体矿物组合为柯石英 + 石榴子石、柯石英 + 石榴子石 + 绿辉石 + 金红石和柯石英 + 多硅白云母 + 磷灰石, 斜长角闪

岩锆石中保存的超高压矿物组合为柯石英 + 石榴子石 + 绿辉石、柯石英 + 石榴子石 + 多硅白云母和柯石英 + 绿辉石 + 金红石，与榴辉岩所保存的超高压矿物组合十分相似，表明该类斜长角闪岩是超高压榴辉岩在折返过程中退变质而成的。以柯石英为代表的标志性超高压矿物在榴辉岩和片麻岩中普遍发现，表明南苏鲁地区由榴辉岩及其围岩原岩所组成的巨量（方圆 $>5\,000\text{ km}^2$ ，厚度超过 4.5 km ）陆壳物质曾整体发生俯冲，并经历了超高压变质作用。

1.1.2.2 片麻岩相岩石

游振东等（2004）对 CCSD 主孔片麻岩的研究认为，在 $683 \sim 1\,130\text{ m}$ 间的榴辉岩质片麻岩，即副片麻岩，是受到超高压变质的中酸性成分的岩石，矿物成分有绿帘石 + 黑云母 + 角闪石 + 钠长石 + 石英 + 榍石（包金红石），有时还可见石榴子石的残余，矿物组合与退变质的榴辉岩相似，石英含量较高（ $>20\%$ 体积），岩石退变以后出现大量糖粒状的钠长石和角闪石的集合体，而原先的多硅白云母则退变成黑云母、斜长石，有时有绿帘石，整体具有绿帘角闪片麻岩的成分。但其中往往还能够识别绿辉石的晶形轮廓。这类片麻岩中的绿帘石常见成分环带，中心部分为褐帘石。在 $1\,130 \sim 1\,600\text{ m}$ 间的片麻岩为二长片麻岩，其中偶见石榴子石，其 MnO 含量较高，多呈骸晶状晶形；绿帘石亦多具褐帘石环带中心；钾长石斜长石并存，钾长石相对他形，常包裹细粒斜长石，在相邻的斜长石中出现净边结构和蠕英石，说明这些二长片麻岩是在斜长片麻岩的基础上发育起来的，而许多斜长片麻岩是榴辉岩质片麻岩退变质的产物。榴辉岩质片麻岩折返进入中下地壳时在地壳中富钾流体的作用下，进行混合岩化作用。

CCSD 主孔 $2\,000 \sim 3\,000\text{ m}$ 深度范围内出现的岩心以正副片麻岩为主。刘福来等（2004a, 2005b）对该段片麻岩的地球化学研究结果表明：正片麻岩的 SiO_2 含量普遍偏高，为 $73.26\% \sim 78.17\%$ ，平均值 76.40% ， Al_2O_3 含量为 $11.30\% \sim 13.66\%$ ， TiO_2 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MnO 和 MgO 含量则明显偏低，稀土元素配分型式均见程度不同的 Eu 负异常。正片麻岩具有多成因的特点，部分具 A 型花岗岩的地球化学特征，反映它们有可能形成于板内的构造环境；而另一部分的原岩则可能形成于陆缘火山弧的构造环境。副片麻岩的 SiO_2 含量明显低于正片麻岩， Al_2O_3 、 Fe_2O_3 + FeO 、 MgO 和 CaO 含量则明显偏高，而 Na_2O 和 K_2O 含量则与正片麻岩大体相当，REE 配分模式表现出一定程度的轻（LREE）和重稀土（HREE）元素分馏，大多数样品具 Eu 负异常，但远不及正片麻岩明显。副片麻岩的原岩可能是形成于被动大陆边缘的一套典型的沉积岩或变沉积岩。同时，SHRIMP U - Pb 定年结果表明，主孔副片麻岩锆石微区记录了十分复杂的年代学信息。综合研究进一步证明了 CCSD 主孔中的正副片麻岩的原岩曾一起发生深俯冲，并经历了晚三叠世的超高压变质作用。

刘福来等（2004c, 2005a）对 CCSD 主孔岩心片麻岩锆石中包体矿物进行了详细研究。在副片麻岩如石榴绿帘黑云二长片麻岩锆石中，代表性的超高压包体矿物组合为柯石英 + 多硅白云母和柯石英 + 石榴子石等；而在石榴黑云角闪钠长片麻岩锆石中，则保存柯石英 + 硬玉 + 石榴子石 + 磷灰石、柯石英 + 硬玉 + 多硅白云母 + 磷灰石和柯石英 + 石榴子石 + 磷灰石等超高压矿物包体。在正片麻岩锆石中，标志性的超高压矿物包体为柯石英、柯石英 + 多硅白云母、柯石英 + 蓝晶石 + 磷灰石和柯石英 + 蓝晶石 + 榍石等。以柯石英为代表的标志性超高压矿物在片麻岩中普遍发现，表明在南苏鲁地区片麻岩原岩所组成的巨