

跨世纪
科技文库

国家自然科学基金资助项目

中国北方 早前寒武纪孔兹岩系

● 卢良兆
● 徐学纯
● 刘福来 著
● 长春出版社

跨世纪科技文库

中国北方 早前寒武纪孔兹岩系

卢良兆 徐学纯 刘福来 著

长春出版社

(吉)新登字10号

中国北方早前寒武纪孔兹岩系

卢良兆 徐学纯 刘福来 著

责任编辑:毕素香 陈凤和

封面设计:王爱宗

长春出版社出版

长春出版社发行

(长春市建设街43号)

四平恒盛印务有限公司印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16

1996年7月第1版

印张:18 插页:4

1996年7月第1次印刷

字数:427000

印数:1—5000册

ISBN 7-80604-482-5/P·1

定价:23.00元

内 容 提 要

国内外对全球早前寒武纪高级区有重要意义的孔兹岩系(Khondalite Series)尚无系统研究。本书首次以变质地质动力学观点,应用大量最新资料对我国北方的孔兹岩系进行系统研究。详细阐述它们在各地区的区域地质背景、变质岩石组合、原岩建造和沉积环境、花岗质岩石类型、变质和变形作用历史及其 PTt 轨迹样式。在此基础上进一步探讨了它们的成因类型和构造环境及地球动力学过程,还分析了含矿远景。本书开拓了前寒武纪变质地质学研究的新领域,并对华北陆台早前寒武纪构造演化提出一些新的学术见解。

本书可供从事前寒武纪地质、变质岩、矿物、地球化学和矿床等专业的生产、科研人员及大专院校师生阅读参考。

前 言

孔兹岩系(Khondalite Series)是地壳发展早期高级变质地区一类较特征的变质杂岩,主要由普遍含夕线石和石榴石等富铝矿物的高级变质表壳岩和钾质花岗岩类组成,并常与各种麻粒岩及紫苏斜长花岗质片麻岩等伴生。它们出现于全球各大陆,且在变质岩石组合、原岩建造、变质作用、花岗质岩浆作用及含矿性等方面均有很大的相似性。其特征和成因研究对查明这类地区早期地壳形成和演化过程,探讨麻粒岩相变质作用的成因机制及其地球动力学均有重要科学意义。但近年来国内外对高级变质地区的研究主要集中于 TTG 系列侵入杂岩,而对变质表壳岩的成因则注意不多,所以开展这方面的科研工作十分必要,而且这项研究也有助于开发孔兹岩系中赋存的石墨、磷灰石、夕线石和云母等非金属矿产资源。

早前寒武纪孔兹岩系发育于我国北方和华中的若干地区,其中以内蒙古东南部集宁地区最为典型,且分布面积最广。近年已有不少学者在此进行研究工作。作者于 1987 年开始在该区开展以孔兹岩系成因和大地构造环境为主题的研究工作,取得良好成果,已出版专著《内蒙古东南部早前寒武纪孔兹岩系成因及其含矿性》。在此基础上,为了进一步总结我国北方和华中各地区孔兹岩系的特征和成因类型,查明它们所反映的华北陆台早前寒武纪大地构造演化特征,由国家自然科学基金资助,立题“中国孔兹岩系成因、矿物成分环带及含矿性”进行研究(项目编号 48970102)。本专著和已出版的专著《中国北方孔兹岩系矿物的成分环带》均为该项目的最终成果。

这项研究工作以区域地质背景研究为基础,着眼于孔兹岩系形成的全过程,首先是它们的变质岩石组合和原岩建造的岩相学、岩石化学及地球化学的研究,借以查明变质作用起始前的大地构造环境。研究重点是各地区孔兹岩系的变质作用演化样式和 PTt 轨迹,并将其与区域构造变形作用演化史及花岗质岩浆作用的成因类型紧密联系起来,再结合同位素年代学资料建立起各地区孔兹岩系的成因模式,并探讨其所反映的大地构造环境和地球动力学。对于重点地区,还同时注意研究其中石墨等主要矿产的成矿控制因素和找矿远景。

研究工作于 1990~1992 年之间进行,以内蒙集宁地区(集宁群)和黑龙江省鸡西地区(麻山群)为重点,进行了广泛的野外区域地质考察和若干关键地段的大比例尺地质制图和变质变形的深入研究,室内则进行了详细的岩石学、矿物学和岩石化学等方面的研究。其次对内蒙乌拉山一大青山、千里山和贺兰山北段,吉林省南部和辽东的南辽河群和集安群,胶东的荆山群中的孔兹岩系也都进行了野外和室内的补充研究。并充分利用了前人研究资料。根据研究中取得的新认识,对各地区孔兹岩系的地质和岩石学特征、原岩建造及其形成

时的构造环境、变质作用全过程的矿物共生和演化及其与变形史之间的关系都进行了较系统总结。并在此基础上区分出我国太古代和早元古代孔兹岩系属于不同变质作用成因类型,探讨了它们所反映的构造体制和变质地质动力学过程。此外也对孔兹岩系中晶质石墨和磷矿等矿床的主要成矿控制因素进行了分析。

作为项目成果的本专著共分九章,以第二章(集宁群)和第五章(麻山群)为重点,由卢良兆、徐学纯和刘福来共同编写,第三章由徐学纯编写,其余各章由卢良兆编写,全文由卢良兆统编定稿。在本项目研究过程中,曹熹参加了集宁地区的野外地质研究工作,并对各地区孔兹岩系的构造变形研究进行了指导,博士研究生胡大千和硕士研究生周文林、孙志明和董永胜等及部分高年级大学生先后参加了本项目的野外和室内研究工作,都为这项科研成果做出了贡献。本书中引用了一些单位和作者未公开发表或内部出版的科研报告和学位论文中的资料。在各地区进行野外工作时,得到许多有关单位和个人在业务或生活方面的支持和帮助,在此一并致以衷心地感谢!

由于本文所涉及地区较多,对许多变质地质学问题,尤其是孔兹岩系时代及其与其它变质岩系的相互关系等问题,长期存在多种意见。本文只是作者通过这次研究所获得的认识,供进一步研究者参考。由于认识水平所限,文中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

1995年9月

目 录

第一章 孔兹岩系的特征和研究现状	(1)
第一节 孔兹岩系的概念和基本特征.....	(1)
第二节 孔兹岩系的地质产状和时代.....	(2)
第三节 孔兹岩系的原岩建造及其大地构造环境.....	(7)
第四节 孔兹岩系的变形和变质作用.....	(9)
第五节 中国北方孔兹岩系的分布和研究现状	(13)
第二章 内蒙古集宁及相邻地区的孔兹岩系	(16)
第一节 区域变质地质概述	(16)
第二节 区域变质岩的岩石学特征	(23)
第三节 原岩建造及其大地构造环境	(30)
第四节 变质作用过程中矿物和流体演化	(39)
第五节 变质作用 PTt 演化及其构造环境探讨	(59)
第六节 本区孔兹岩系的含矿性	(68)
第三章 内蒙古乌拉山地区的孔兹岩系	(70)
第一节 区域变质地质概述	(70)
第二节 孔兹岩系的岩石学特征	(75)
第三节 孔兹岩系的原岩建造	(78)
第四节 孔兹岩系的变质变形作用演化及其大地构造环境	(86)
第五节 孔兹岩系的含矿性.....	(100)
第四章 贺兰山北段和千里山地区的孔兹岩系	(103)
第一节 贺兰山北段早前寒武纪孔兹岩系.....	(103)
第二节 千里山地区早前寒武纪孔兹岩系.....	(118)
第五章 黑龙江省佳木斯地块的孔兹岩系	(126)
第一节 区域变质地质概述.....	(126)

第二节 孔兹岩系的变质岩石学及原岩建造·····	(133)
第三节 孔兹岩系变形和变质作用过程的矿物演化·····	(157)
第四节 孔兹岩系变质作用的 PTt 轨迹及其构造环境探讨·····	(173)
第五节 麻山群孔兹岩系的含矿性·····	(183)
第六章 辽东和吉林省南部地区的孔兹岩系·····	(195)
第一节 区域变质地质概述·····	(195)
第二节 孔兹岩系的变质岩石学及原岩建造特征·····	(200)
第三节 孔兹岩系变形和变质作用过程的矿物演化·····	(207)
第四节 孔兹岩系变质作用的 PTt 演化及其构造环境探讨·····	(210)
第七章 胶北地区的孔兹岩系·····	(219)
第一节 区域变质地质概述·····	(219)
第二节 孔兹岩系的变质岩石学和原岩建造特征·····	(224)
第三节 孔兹岩系变形和变质作用过程的矿物演化·····	(226)
第四节 孔兹岩系变质作用的 PTt 演化及其构造环境探讨·····	(230)
第八章 豫鄂地区的孔兹岩系·····	(235)
第一节 鄂西黄陵地区早元古代崆岭群中的孔兹岩系·····	(235)
第二节 陕豫小秦岭—河南鲁山地区太华群中的孔兹岩系·····	(245)
第三节 河南桐柏地区的早元古代麻粒岩-孔兹岩系·····	(251)
第九章 中国北方早前寒武纪孔兹岩系成因及含矿性探讨·····	(258)
第一节 孔兹岩系的成因类型·····	(258)
第二节 孔兹岩系的含矿远景·····	(262)
主要参考文献·····	(265)
矿物缩写代号·····	(274)
图版说明·····	(275)
图 版·····	(277)

第一章 孔兹岩系的特征和研究现状

第一节 孔兹岩系的概念和基本特征

孔兹岩(Khondalite)这一术语最早是由 Walker(1902)提出,用以描述印度奥里萨邦太古宙东高茨群(Eastern Ghats Group)中一种很特征的石榴石-夕线石-(石墨)片岩。它们一般为片状,主要由石榴石、夕线石和石英组成,常含石墨鳞片,但无长石。作者指出他应用“孔兹岩”这一名词只是为了简化石墨石榴石夕线石片岩这一过于繁琐的描述性岩石名称,并无其它特殊含义,同时通过这一命名“对诚实的 Khonds 山区居民表示敬意”。后来 Adams(1929)和 Krishnan(1935)在斯里兰卡中部和缅甸的 Mogoke 地区也广泛发现岩性基本相同的变质岩,但其中常含长石。Pascoe(1950)认为孔兹岩基本上是“石榴夕线石片岩,可含不定量的石墨和若干石英及长石……条纹长石和更长石-中长石是常见的次要矿物成分。”

在东高茨地区,后来由于地质制图工作的需要逐渐将孔兹岩这一术语用于一套经常共生的特征岩石组合,在此基础上 Narayanaswamy(1975)建议将下列各种岩石均归于孔兹岩套(Khondalite Suite):(1)含或不含石榴石的花岗片麻岩,混合片麻岩及混合岩,(2)含或不含石榴石的长英质浅粒岩和副片麻岩,(3)石榴黑云片麻岩,(4)石榴夕线石墨片岩和片麻岩(狭义的孔兹岩),(5)大理岩、钙硅酸盐岩石和钙质麻粒岩,(6)石英岩、含石榴石的石英岩、麻粒岩和磁铁石英岩。后来印度的地质学家倾向于接受这种概念,将孔兹岩系视为一套麻粒岩相变质的沉积表壳岩及花岗质岩石组合,它们以含极富铝的夕线石榴片麻岩-石英岩(狭义孔兹岩)及岩石中普遍含晶质石墨为特征,但仍无确切的定义。与此同时, Walton 等(1983)出版的岩石学辞典中只将孔兹岩系定义为“一套变质的铝质沉积岩,由石榴石-石英-夕线石和石榴石石英岩、石墨片岩及大理岩组成。”

性质与上述相似的变质岩系在全球各大陆的前寒武纪变质岩区都可见到,其中著名者除印度南部之外,还有如斯里兰卡的高地系,芬兰 Lapland 的早元古代麻粒岩带,俄罗斯阿尔丹地盾的太古界英格尔群及非洲南部 Limpopo 带中部的太古界等等。它们的共同特征是:(1)变质表壳岩占有重要或主导地位,其中以普遍含不同数量 Gt 和(或)Sil,但 Bt 相对次要(或不出现)的浅粒岩-变粒岩-片麻岩为主,有些文献中称之为浅色长英质片麻岩。其中

夹有极富含 Gt + Sil + Crd 的钾长片麻岩或只由这些富铝矿物和少量石英组成的岩石。石英岩和大理岩及钙硅酸盐岩石夹层也经常存在。(2)原岩为硅铝壳内古陆棚环境的细陆屑和粘土质化学沉积的混杂堆积。(3)变质作用一般属于麻粒岩相,小部分地区以高角闪岩相为主,故常存在一定数量的麻粒岩和紫苏(斜长)花岗质岩石。(4)经常发育多期褶皱和复杂的韧性变形带。(5)含 Sil 和 Gt 等的同变质和变质期后的 S 型花岗岩及混合片麻岩经常广泛发育,有时在全区占有主导地位。(6)普遍含不同规模的晶质石墨、磷灰石、夕线石、刚玉及云母等非金属矿产。

综上所述,孔兹岩系和一般以灰色片麻岩为主的高级区及花岗岩-绿岩带一样,各自代表前寒武纪一类特征的变质地区,它们反映特定的大地构造环境和地壳演化过程,所以孔兹岩系的特征和成因研究有重大的地质意义。但目前这方面的研究工作在国内外都比较薄弱,研究中涉及的问题都还存在不同认识,有待于进一步的深入工作和系统总结。

第二节 孔兹岩系的地质产状和时代

全球多数早前寒武纪高级变质地区主要由三大类变质岩系组成:(1)麻粒岩-紫苏(斜长)花岗岩系,(2)孔兹岩系,(3)含黑云母和角闪石为主的灰色片麻岩系(TTG 岩系)。查明这三大类岩系之间的关系是孔兹岩系变质地质研究的主要内容之一。

印度半岛南部的紫苏花岗岩区由紫苏花岗岩系、孔兹岩系和相当于灰色片麻岩系的“半岛片麻岩”组成。分布于奥里萨邦的东高茨群以孔兹岩系为主,下部夹有较多的紫苏花岗岩系岩石,彼此为似层状整合接触。在安得拉邦孔兹岩系成厚度较大的岩性单元与紫苏花岗岩系互层。在南部的泰米尔纳德邦则以紫苏花岗岩系为主,孔兹岩系成次要夹层。许多研究表明这些地区的紫苏花岗岩系是同变质期侵入孔兹岩系中的岩浆岩,两者一起经历了麻粒岩相变质作用。过去都认为半岛片麻岩是孔兹岩系-紫苏花岗岩系的基底,其时代最老,可能 >3100Ma,但近年来出现多种不同观点,有些人认为紫苏花岗岩系是已存在的半岛片麻岩经另一次麻粒岩相变质作用所成;另一些人相反认为半岛片麻岩是紫苏花岗岩系退变质的产物;还有人认为两者基本同时,紫苏花岗岩系形成于地壳较深部,而属于角闪岩相的半岛片麻岩则形成于地壳较浅部。总之,他们都不认为半岛片麻岩是最老的基底,可能时代最老的是属于太古宙的孔兹岩系中的变质表壳岩(Narayanaswamy, 1975; Mukherjee *et al.*, 1986)。

据该区紫苏花岗岩和孔兹岩中不少 Rb-Sr 等时线和锆石的 Pb-Pb 年龄资料(Grew, 1982),它们的变质年龄为 2500~2600Ma。Sarkar(1980)认为东高茨群的孔兹岩系原岩形成于 3100Ma 之前,在 2900~3065Ma 之间和 2600Ma 左右遭受两期麻粒岩相变质作用和紫苏花岗岩侵入。但近年来也取得不少较新的年龄资料,因此有人认为该区的孔兹岩系是形成于早一中元古宙(1500~2600Ma)陆壳内的活动带中(Naqvi *et al.*, 1978, 1981; Chadwick *et al.*, 1981; Chacko *et al.*, 1987)。或认为不同地区存在不同时代的孔兹岩-紫苏花岗岩系,如南喀拉拉邦的孔兹岩系即可能属于早元古宙。

斯里兰卡中部的高地系(Highland Series)是由典型的孔兹岩系和紫苏花岗岩系组成。其最大特征是富含夕线石和石榴石的片麻岩、石英岩及大理岩等和麻粒岩及紫苏斜长花岗岩经常紧密地互层,其互层厚度从1~2cm到1000余米不等,多数在0.3~1.5m左右,接触面十分规则平直。有时麻粒岩和紫苏花岗岩质岩石成层状,厚仅1~2cm,但沿走向可追索数十米,保持不变,或与孔兹岩系围岩一起形成极复杂的揉皱。这些特征使早期研究者(如Cooray, 1962)认为其中的紫苏斜长花岗岩质岩石可能多数属于沉积变质,后又经混合岩化改造所成。但近年来根据岩相学和地球化学方面的研究,不少人认为其中多数紫苏斜长花岗岩质岩石属于同变质期的层状侵入体,上述现象是早期顺层剪切变形的结果。

高地系东西两侧均与Vijayan系相邻,后者主要由含黑云母和角闪石的花岗质片麻岩和混合片麻岩及花岗岩组成,属于TTG岩系。其中可偶见少量与高地系相似的变质沉积岩,但无紫苏花岗岩或紫苏黑云片麻岩。高地系的构造样式以S—N延伸的平卧褶皱为特征,呈明显的线状构造,东Vijayan系中则有多期构造叠加,样式极不规则,还出现不少卵形构造。在高地系和东Vijayan系之间存在宽3~5km的过渡带,其中以花岗闪长质-花岗质片麻岩及紫苏黑云片麻岩为主,夹有次要的孔兹岩和紫苏花岗岩。

Dissanayake等(1985)认为高地系和东Vijayan系之间的边界可能为穿过地壳的大型逆掩断层;Sandiford *et al.*, (1988)主张彼此边界是右行的走滑剪切带,其中发育大量糜棱岩。Cooray(1962)认为东Vijayan系岩石是高地系区域性退变质作用的产物,两者的边界是代表退变质作用在空间上的一个极限。Katz(1972)主张Vijayan系是结晶基底,高地系的孔兹岩是不整合覆盖于其上,现在彼此之间的界面是代表受后来构造和岩浆作用影响而活化的原来不整合面。Dissanayake等(1985)根据地球物理资料及边界附近出露一系列蛇纹岩等现象,认为目前两者的边界是代表古地壳缝合线,即高地系代表古大陆边缘沉积, Vijayan系代表古岛弧区,在板块俯冲过程中彼此拼合成为一个整体。

过去一般认为高地系孔兹岩的原岩形成于太古宙,变质作用发生于晚太古或早元古宙, Vijayan系则与其同时或更老。但根据Kroner等(1987)的锆石U-Pb同位素年龄资料,这两套变质岩系主要都是受1100Ma和500Ma这两期高温变质作用的影响,而孔兹岩系的原岩沉积年龄可能<2000Ma,晚元古宙的构造旋回才使这两个不同性质的变质地体拼合成为一个整体。

南极洲东北部Enderby Land大面积分布的太古宙Napier杂岩是近年研究较多的麻粒岩相地区,该区由两套具明显不同特征的变质岩系组成。其中占主要地位的Tula系相当于孔兹岩系,它们成层性良好,主要为石榴石长英质粒状岩石(副片麻岩)和麻粒岩-紫苏(斜长)花岗质正片麻岩互层,夹富铝片麻岩和石英岩、含石榴和斜方辉石的副片麻岩及少量极富铝和镁的副片麻岩,后者可含假蓝宝石-石英、紫苏辉石-夕线石组合和大隅石等矿物(Ravich和Kamenev, 1975)。另一套为块状的正片麻岩系,称为Raggatt系,由各种紫苏(斜长)花岗岩及中基性麻粒岩组成,并有少量超基性辉石岩透镜体。这两套岩系之间通常为强烈的韧性变形带,但有些野外侵入接触关系和同位素年龄资料表明Raggatt系的块状正片麻岩是以层状形式侵入Tula系的副片麻岩中(Black和James, 1983; Sandiford和Wilson, 1983)。Harley(1985)认为Tula系的沉积年龄为3700~3800Ma,属于早太古宙, Raggatt系的紫苏斜长花岗岩等在3100Ma之前侵入。第一期麻粒岩相变质作用发生于3000~

3100Ma,第二期变质作用发生于2500Ma左右,所以该区孔兹岩无疑属于太古宙,是最老的表壳岩。

孔兹岩系也发育于澳大利亚一些早前寒武纪高级区,如其中部的Arunta地块即由早元古宙(1800Ma)孔兹岩系组成,变质作用达麻粒岩相。主要组成岩石为富铝片麻岩(变泥质岩),钙硅酸盐岩石,长英质粒状岩石(变砂质岩石),镁质片麻岩及少量富Mg和Al而SiO₂不饱和的变质岩,后者之中可含假蓝宝石、堇青石、尖晶石和夕线石等矿物。

非洲南部的Limpopo高级变质地带内部可划分为三个带,其中带以麻粒岩相变质表壳岩为主,属于孔兹岩系,称为Beit Bridge杂岩。它们成走向S—N的线性褶皱,由含石榴石长英质副片麻岩、石英岩、磁铁矿石岩、富夕线石榴钾长片麻岩、钙硅酸盐片麻岩及大理岩等组成,在极富Al-Mg的夹层中可出现含刚玉、尖晶石和假蓝宝石等矿物或具有夕线石-斜方辉石组合的岩石。此外也有一些基性角闪二辉麻粒岩夹层。这套表壳岩是在硅铝壳内沉积,基底为Sand River片麻岩和Macuville群。沉积建造形成于3270~3570Ma之间,接着出现斜长岩-辉长岩-橄辉岩组合的层状侵入体,在3150~2700Ma之间,它们经受了多期变形和麻粒岩相变质作用。

Limpopo带的南北两侧边缘带主要由英云闪长质片麻岩等TTG系列的岩石组成,中央基性岩的透镜体,构造线呈ENE延伸。它们分别是卡普瓦克拉通和津巴布韦克拉通中花岗岩-绿岩地体的一部分,后来卷入Limpopo期的高温变质和复杂变形作用,它们与由孔兹岩系组成的中带之间目前均以大型韧性变形带为边界。近来多数研究者(Horrocks, 1980; Droop, 1989; Roering, 1992; Ashwal, 1992)认为Limpopo带是典型的太古宙碰撞造山带,在卡普瓦尔和津巴布韦这两个克拉通碰撞过程中同时夹带来一些陆壳碎块。孔兹岩组成的中带可能即为这样成因的外来地体。

马达加斯加岛是非洲太古宙孔兹岩系的另一典型地区, Nicollet (1988)的研究结果表明它们的主要组成岩石为富铝片麻岩和变粒岩,普遍含不同数量的石榴石、夕线石、黑云母和石墨,有些还含Grd-Gt-Opx, Sap-Qz组合。其次是石英岩、大理岩和钙硅酸盐岩石,后者之中偶见假蓝宝石、黑复铝钛石(Hibonite),蓝硅硼钙石(Serendibite)等特殊矿物。这套变质表壳岩中还普遍夹有基性-中酸性麻粒岩及紫苏花岗岩,其原岩为辉长岩-紫苏花岗岩系列侵入杂岩,它们具有同构造、同变质期侵入的特征。该区孔兹岩系原岩形成于3200Ma左右,属于太古宙,其麻粒岩相变质作用发生于2500Ma,但又受950~1200Ma和560Ma这两期角闪岩相变质作用和复杂变形作用的叠加。这个地区和前述Limpopo带同属Mozambic碰撞造山带,两者的大地构造环境和地壳演化过程可能相似。

北部非洲的前寒武纪高级区的概况如下(Boullier *et al.*, 1988): (1)大面积的太古宙(2600~3200Ma)麻粒岩地区,它们主要由紫苏斜长花岗岩和紫苏花岗岩组成,其中有残留的麻粒岩相表壳岩,后者在有些地区属于孔兹岩系,另一些地区则相当于深变质的“绿岩带地层”。(2)早元古宙(1900~2100Ma)的局部性麻粒岩地体,一般分布面积较小,主要见于泛非造山带,其岩性具有多样性,但多数地区为地台型变质沉积岩,相当于孔兹岩系,如泛撒哈拉带和北部喀麦隆。(3)元古宙末期(600Ma)的麻粒岩地体,发育于泛非陆壳碰撞造山带,其中有一部分地区以变质的浅海相表壳岩为主,相当于孔兹岩系,如喀麦隆南部的Yaounde片麻岩。

芬兰北部 Lapland 也是孔兹岩系的典型地区,该区由北东向南西可划分为四个变质-构造单元(Barbey, 1986; Bernard - Griffiths *et al.*, 1984): (1) 太古宙 Inari 克拉通(花岗岩-片麻岩-绿岩带)。(2) 早元古宙麻粒岩带, 宽 50~80km, 主要由孔兹岩系组成。(3) 早元古宙 Tana 带, 宽 10 余公里, 由角闪质岩石组成。(4) 太古宙南 Lapland 克拉通(花岗岩-片麻岩-绿岩带)。孔兹岩系占麻粒岩带出露岩石的 80% 左右, 以夕线石榴片麻岩和含石榴石的长英质粒状岩石(变粒岩、浅粒岩)为主, 夹有较次要的钙硅酸盐岩石和大理岩。麻粒岩和紫苏花岗岩类岩石虽到处可见, 但总量不高, 且主要集中于此带的西侧, 常见为基性麻粒岩和紫苏斜长花岗岩类。多数情况下, 它们与变质沉积岩成规则的互层。彼此片麻理一致, 只少数具有穿切片麻理现象, 并存在变余的侵入岩结构。因此过去的研究者认为它们的原岩主要是中基性火山岩, 但近年来更多人主张它们是钙碱性的层状侵入岩。

上述麻粒岩带和属于角闪岩相的 Tana 带之间为渐变过渡关系, 属于同期的进变质带性质, 但后者的原岩建造为火山-沉积型。它们和两侧太古宙地体之间均以逆掩性质的韧性变形带为边界。Barbey 等(1988)认为该区这套孔兹岩系形成于早元古宙。而变质和变形作用的峰期则在早元古宙末 1900~2000Ma 左右。

西伯利亚陆台的阿尔丹地盾可分为四个构造单元(Perchuk 等, 1985), 即东、中、西阿尔丹带和 Sutam 地块。它们都由太古宙紫苏斜长花岗岩-孔兹岩系组成, 其中的东和西阿尔丹这两个带的主要岩层是含 Sil、Gt、Crd 等的富铝片麻岩、石榴黑云片麻岩-变粒岩夹钙硅酸盐岩石和花斑大理岩, 但也有若干细粒紫苏斜长花岗岩在其中成互层状产出。位于南部的 Sutam 地块约 2/3 面积为层状细粒紫苏斜长花岗岩及局部分布(但有一定规模)的基性石榴辉石麻粒岩, 其余为孔兹岩系。后者的岩性与阿尔丹带相似, 但夹较多石英岩, 并出现含 Sil、Gt、Hy, 有时还有 Sep 等高温组合的钾长(二长)片麻岩。中阿尔丹带则紫苏斜长花岗岩和孔兹岩系含量相似。

由于本区的紫苏斜长花岗岩成层性很好, 常具细均粒变晶结构, 有时单层厚度仅数十公分, 与变质表壳岩成很规则的互层, 且界面平直, 很少见到彼此有穿切关系, 故原苏联西伯利亚的不少学者均主张它们属于副片麻岩, 原岩为长石质砂岩。但近来一些研究者认为它们和南极 Enderby Land 的紫苏斜长花岗岩(Enderbyte)完全可以对比, 应为钙碱性花岗质岩顺层侵入所成, 目前与围岩的片麻理产状一致及整合互层关系是构造变形作用的结果。以上研究表明四个构造单元的组成岩石基本相同, 但构造变形样式和期次有明显不同, 如东阿尔丹为 NW—SE 延伸的线状构造带, 西阿尔丹则显示穹窿构造, 说明全区的大地构造演化过程基本相同, 但构造-变形历史有差异。

大量同位素年龄资料表明这套表壳岩的沉积年龄可能在 3000~3500Ma 之间, 它们经受了晚太古宙的多期变质作用, 南部地区还有明显的早元古宙变质-变形作用叠加。Perchuk 等(1985)认为本区孔兹岩系的原岩是中太古宙沉积于东部西伯利亚陆台南侧的边缘浅海盆地中, 它们在晚太古-早元古之间的变质和变形作用的演化历史是和其南侧的蒙古-鄂霍茨克板块的俯冲作用及 Stanovoy 造山带形成过程的地质动力学机制有关。

孔兹岩系在加拿大地盾发育较差, 格林维尔构造省是著名的晚元古宙麻粒岩地体, 但在 Adirondack 地区均以变质中-酸性岩浆岩为主, 表壳岩次要(Buddington, 1963; De Waard, 1965; Engle, 1962), 只在魁北克地区(Kretz, 1954)和威斯特波特地区(Reinhardt 和 Skip-

pen, 1970)有麻粒岩相富铝片麻岩的报导,此外 Labrador 构造区 Main Province 的太古界 Uivak 片麻岩中也存在富铝的变质表壳岩,但它们都未能构成一定规模的孔兹岩系。

在南美洲,巴西的南 Bahia 早前寒武纪麻粒岩区是 San Francisco 克拉通的一部分,也是世界最大的麻粒岩地区之一。其中的 Jequié-Mutuipe 区即由紫苏斜长花岗岩-紫苏花岗岩系及部分相当于孔兹岩系的变质表壳岩组成(Barbosa, 1988)。

综上所述,可将孔兹岩系的变质岩石组合特征、地质产状和形成时代归纳如下:

(1)孔兹岩系以麻粒岩相变质的沉积表壳岩为主,其基本岩石组合为含石榴石和(或)黑云母的变粒岩-浅粒岩-长石石英岩夹富铝片麻岩、石英岩、大理岩及钙硅酸盐岩石(钙质片麻岩)。极富含 Sil、Gt、Crd 等的片麻岩和石英岩(狭义孔兹岩)的较普遍存在和岩石中普遍含晶质石墨,并形成工业矿床是孔兹岩系的最大特征。

高级区另一类型变质表壳岩以互层状黑云变粒岩-斜长片麻岩为主,绝大多数岩层不含石榴石,相反可含少量角闪石或辉石。夕线石片麻岩夹层极少或不出现,极富铝岩石也不出现,其原岩为硬砂岩型复理石建造或为基性-中酸性火山-沉积岩系。以上两类变质表壳岩之间存在各种过渡类型,可形成各种非典型的孔兹岩系。

(2)孔兹岩系和麻粒岩-紫苏花岗岩系经常紧密共生,彼此相对含量各地区极不相同。以孔兹岩系为主地区一般都有次要或少量基性麻粒岩和中酸性紫苏斜长花岗质岩石,它们都成似层状或透镜状产出;相反以后者为主地区,通常也都有少量富铝片麻岩等孔兹岩系岩石夹层;还有些地区,两者含量相似,成互层状产出。因此孔兹岩系-麻粒岩-紫苏(斜长)花岗岩系代表早前寒武纪高级区一种特征的变质杂岩成因系列,可能具有特定的大地构造成因意义。

(3)一个地区的孔兹岩系和麻粒岩-紫苏(斜长)花岗岩系一般时代都相同,且具有彼此相同的变质和变形作用演化历史。彼此之间常见的互层状整合接触关系曾使不少学者过去认为后者也是沉积变质岩层。但近年来构造变形作用和岩相学及地球化学方面的研究表明大多数情况下它们是同构造和变质期顺层侵入的岩浆岩,与围岩的片麻理一致是构造变形和重结晶作用的结果。但也不能排除有少数在孔兹岩系表壳岩中成薄层互层状的麻粒岩可能属于副变质岩。

另一方面不少地区孔兹岩系-麻粒岩-紫苏花岗岩系与以灰色片麻岩(TTG 岩系)为主的大面积角闪岩相高级地体或花岗岩-片麻岩-绿岩带相邻,其边界目前常是大型韧性变形带,但彼此之间原始的地质关系只在少数地区较明确,如前述 Lapland 的孔兹岩系是在太古宙克拉通之间的早元古活动带中形成。但多数地区彼此的时代和地质关系往往存在多种不同认识,如印度南部、斯里兰卡等地都是如此,但近年来的研究趋势常认为它们分别是不同大地构造背景下形成的变质地体,其地质时代既可相近,也可完全不同;既可代表原地的相邻大地构造单元,也可是异地的变质地体的后期拼合结果,如 Limpopo 带的中部带所示。

(4)孔兹岩系出现于全球各大陆,它们可形成于前寒武纪各地质时代。Limpopo 带中部的 Beit Bridge 杂岩,马达加斯加的含石墨岩系,南极 Enderby Land 的 Tula 系,阿尔丹地盾的英格尔群等孔兹岩系无疑属于太古宙,其原岩建造可能形成于 3000~3500Ma 之间。另一方面如 Lapland 的孔兹岩系显然属于早元古宙。印度南部的孔兹岩系可能大部仍属太古宙,但不排除部分属于早元古宙,或受元古宙变质作用的叠加。斯里兰卡的孔兹岩系(高地

系)也属于早元古宙。此外还有中晚元古的孔兹岩系,如北非一些地区的报导。值得指出的是不少地区的孔兹岩系自其原岩建造形成之后,曾经历了长达 500~1000Ma 以上的多次变质和变形作用,因此对它们的形成时代的概念应有明确含义,一般应将原岩形成及主期麻粒岩相变质作用峰期视为其形成时代。各时代孔兹岩系的特征并无明显不同,但太古宙的孔兹岩系往往呈面状分布,规模较大,常夹有一定量的麻粒岩-紫苏花岗岩系岩石,或可过渡为后者为主的地区;相反元古宙的孔兹岩系往往面积较局限,原岩建造更接近于稳定陆棚沉积物的特征,麻粒岩含量少,较大规模的紫苏花岗质岩石很少出现。

第三节 孔兹岩系的原岩建造及其大地构造环境

孔兹岩系形成于中太古宙以来前寒武纪的各地质时代,其原岩建造的研究对于阐明早期地壳的物质成分和构造演化过程有重要意义。过去一般认为太古宙时期地壳的构造环境极不稳定,火山活动频繁,应形成大量火山岩系和活动构造环境下的沉积建造,而孔兹岩系的原岩却显示曾存在稳定陆壳内的浅海相沉积,与上述概念很不协调,因此更有必要对它们的原岩岩相学和地球化学特征及其形成时的构造环境进行研究。

孔兹岩系的原岩无疑主要是泥砂质沉积岩,最主要的变质岩常是含石榴石和(或)黑云母的浅粒岩-变粒岩-长石石英岩,其原岩是含少量粘土质杂质的长石质砂岩-长石质杂砂岩。它们不同于一般硬砂岩(基性杂砂岩)之处主要是总化学成分较酸性,以长英质碎屑矿物为主,杂质总含量低,且富铝,贫钙和钾钠。故相应变质岩中铁镁矿物总量低,且常黑云母 $\leq$ 石榴石,钙质辉石和角闪石则不出现。

(富)含夕线石、石榴石和堇青石等的钾长(二长)片麻岩是孔兹岩系的常见代表性岩石,原岩为粘土质岩石(页岩、粘土质粉砂岩等),其中常夹一些极富 Al 或 Mg-Al 的片麻岩(狭义孔兹岩),其化学成分中 Al_2O_3 可高达 30% 以上,钾钠钙极少,不含长石。它们是孔兹岩系的标志岩石。过去有些研究者曾认为它们是铁铝质古风化壳(古土壤)的变质产物。又由于这类变质岩有时成似层状或透镜状赋存于重熔成因的花岗质片麻岩或混合岩中,所以另有些研究者认为它们是长英质岩石在深熔过程中,钠、钾、硅等组分被提取后残留的固体相,但稀土元素地球化学和详细的岩相学研究往往未能证实这种成因机制。目前多数人相信它们主要是局部的铝土质、铁质和硅质化学沉积夹层经变质重结晶作用所成,证据是它们既可在花岗质岩石中,也可在副片麻岩中成整合的夹层或透镜体产出,且可与石英岩呈渐变过渡关系。其次是它们普遍具有良好的细纤维状或粒状变晶结构和片状构造。

石英岩是孔兹岩系的特征岩石之一,有些是纯石英岩,除石英外只含微量石榴石、黑云母或辉石,有些则含若干长石,并与浅粒岩及长石石英岩呈韵律式互层,还有些含铬云母或磁铁矿,后者可过渡为磁铁石英岩。石英岩的含量各地区变化很大,如在 Limpopo 带中部,它们厚达 3000m,和大理岩紧密互层(Sohnge, Le Roex 和 Nel, 1948)。在阿尔丹地盾,其总厚度达 2800m(Salop 和 Scheinmann, 1969)。在挪威西北的 Lofoten 岛、马达加斯加岛的石墨岩系,印度南部和斯里兰卡中部等地孔兹岩系中也成多层的厚层状产出,夹在富铝片麻岩

和变粒岩中,有时延伸很远,且岩性十分稳定。这些石英岩通常是厚层块状构造,层理不明显,属于经变质的正石英岩,无疑应形成于稳定的浅海环境。

所有孔兹岩系中均含有不同数量的大理岩和钙硅酸盐岩石,它们一般较富镁,原岩为白云质石灰岩和泥灰岩类。本类变质岩中有时还含大量方柱石或还发现含石膏夹层,如在印度南部,这些表明它们形成于含盐度较高的半封闭海盆中。大理岩夹层的厚度一般为数米至数十米,常与石英岩互层,个别地区如印度南部的 San Karidrug 区,其总厚度达 250m,沿走向延伸 30km。

孔兹岩系另一重要特征是各类岩石中普遍含鳞片状晶质石墨,尤其在片麻岩和钙硅酸盐岩石中,其含量更高,可形成各种规模的工业矿床。矿体产状及碳同位素的研究证明它们是有机成因,这也反映这套沉积物应形成于浅海环境。

上述沉积物的岩相学特征使目前多数研究者认为孔兹岩系原岩建造应形成于构造环境较稳定的古大陆边缘,有人认为相当于陆台(陆棚)沉积,或部分属于半封闭海盆性质。它们明显不同于以硬砂岩型复理石为代表的浊流沉积,后者代表构造不稳定的海沟区(优地槽)。但在不同地区仍常有不同认识,如 Sarker(1980)认为印度南部东高茨群孔兹岩系的原岩为硅铝壳内拗拉槽中形成的浅海砂岩-页岩-石灰岩-蒸发岩沉积序列。Boullier 和 Barbey 则主张北部非洲一些地区的早元古宙孔兹岩系原岩属于陆台盖层性质的沉积物。Barbey 等(1982, 1984, 1988)认为 Lapland 的早元古宙麻粒岩带是典型的板块碰撞造山带,该区孔兹岩系的原岩是一套以页岩和各种硬砂岩(夹砂岩和钙质粉砂岩)反复互层为特征的典型复理石浊流沉积,它们形成于该区地壳拉张和分裂时期的被动大陆边缘,沉积物来源于东侧的 Inari 克拉通。其中麻粒岩-紫苏花岗岩系列岩石的侵入和变质-变形作用则与板块的消减及陆壳碰撞作用有关。

Dissanayake 等(1985)认为斯里兰卡中部元古宙孔兹岩系的原岩为泥质岩、长石质砂岩、石英岩和白云质石灰岩等。在西部石英岩和大理岩厚度巨大,岩性均匀,且延伸很远,呈面型分布,说明其具有陆棚沉积的特征。但其东侧及与东 Vijayan 系相邻的过渡带内,石英岩和大理岩减少,硬砂岩变质所成的副片麻岩增加,过渡带还有一系列变质基性-超基性岩出现,它们可能相当于早元古代时期的板块俯冲带,因此也将孔兹岩的成因与板块碰撞模式相联系。

Limpopo 带中部的孔兹岩系虽属中太古宙(3200~3500Ma),但原岩亦为泥质岩、长石质砂岩、石英岩及白云质石灰岩等。石英岩厚度达 3000m,并与石灰岩互层。它们不整合于 Sand River 片麻岩和 Macuville 群之上,说明具有花岗质基底,无疑属于较稳定构造环境下的陆棚浅海沉积。

阿尔丹地盾太古宙孔兹岩系的原岩也以长石质砂岩、泥质岩、石英岩和碳酸盐岩为主,夹基性侵入岩。Perchuk 等(1985)认为它们是在早中太古时期沉积于西伯利亚古陆台南缘的大面积浅海盆地中,其周围为火山链所环绕,即类似于弧后盆地的沉积物。

孔兹岩系的主要岩石是长英质粒状岩类(副片麻岩)和富铝片麻岩类。与硬砂岩类变质所成的黑云变粒岩-斜长片麻岩比较,其化学成分特点是硅铝含量高,碱金属含量则偏低,且通常是 $K_2O > Na_2O$, CaO 含量低,一般 $MgO > CaO$ 。Cr、Ni 含量一般也偏低,其主要元素和痕量元素含量变化较大, Al_2O_3 含量尤其如此,在仅含少量夕线石或石榴石的长石石英岩和

部分浅粒岩中, Al_2O_3 偏低, 通常 $<10\%$ 。相反在极富含石榴石和夕线石的片岩中, 则 Al_2O_3 可高达 $30\sim40\%$, 所以并非孔兹岩系中大多数岩石均富铝。有些研究还发现孔兹岩系的 $\text{Al}/(\text{K}+\text{Na})$ 比值明显高于地槽区的硬砂岩型复理石建造。

目前文献中尚未见到对孔兹岩系岩石中稀土和微量元素特征的系统研究资料。根据一些零星资料分析, 多数富铝片麻岩和长英质粒状岩石中 REE 总量高, 有负的铕异常, LREE 有明显的, 甚至高度的富集, 且变化大; 而 HREE 则亏损。它们的 REE 分布型式常不同于太古宙沉积岩, 而是和元古宙甚至显生宙陆台区的泥质岩石相似。它们的微量元素分布特征常表现为大离子造岩元素 (LIFE) 富集和过渡组微量元素亏损, 也表现出太古代以后沉积的典型特征。这些特征的原因目前尚无深入研究和合理解释。Barbey (1982) 曾对 Lapland 麻粒岩系的 LIFE 特征进行研究, 结果认为孔兹岩系表壳岩中 K、Ba、Sr 和 Th 的含量与陆壳的平均成分相似, 而 Rb 和 U 则不均匀地亏损, 如在含石墨的富铝片麻岩和钙硅酸盐岩石中铀的亏损不明显。总的来看, 它们的含量主要和岩石类型有关, 其基本特征反映这些沉积物来源于古陆壳的剥蚀作用。

第四节 孔兹岩系的变形和变质作用

孔兹岩系经常遭受多幕变形作用, Sinha-Roy (1983, 1984) 查明印度南喀拉拉邦孔兹岩带的构造变形事件可分为四幕 (D_1-D_4)。 D_1 形成由区域性片麻理及岩石的次生成分层所显示的早期片理 S_1 , 后者表现为长英质片麻岩中浅色长英质条带和较富含 Gt 和 Bt 的暗色条带互层现象。 S_1 的走向一般为 WNW—ESE 到 NW—SE。因有些夹层中还存在层间无根褶皱或由夕线石和黑云母组成的更早期叶理, 它们表明可能还存在上述次生成分层形成之前的变形作用。 D_2 使 S_1 片理再褶皱, 形成轴向为 NW—SE 的同斜褶皱, 并由夕线石及长石石英变斑晶的长轴定向形成 D_2 的线理, 但轴面劈理 S_2 一般发育较差, 仅局部可见。 D_3 表现为 S_1 和 S_2 再次褶皱形成大型开阔或直立褶皱, 其轴向近 S—N。 D_4 表现为走向滑移断裂及剪切破碎带, 并伴有定向的岩墙侵入。

Berger 等 (1978) 将斯里兰卡高地系的变形作用划分为三幕, 第一幕形成轴向 NW 的中型同斜及横卧褶皱, 第二幕为不对称的平卧褶皱, 第三幕形成直立的开阔褶皱。他认为前两幕变形作用发生于 2200Ma 之前, 而第三幕变形作用则出现在 1200Ma 之前。

南极 Enderby Land 太古宙 Tula 系中也存在三幕主要的变形作用 (D_1-D_3)。 D_1 发生于 3000Ma 左右, 形成平卧褶皱和区域性片麻理及平行于岩性层的叶理, 并发育延伸线理, 在褶皱枢纽部位显示轴面组构。 $D_2 > 2900\text{Ma}$, 形成不对称的紧闭褶皱, 附加褶皱常见, 褶皱轴面倾斜, 片理 S_2 属于非透入性, 仅局部发育。杆状构造, 夕线石定向所成的线理及布丁构造常见。 D_3 出现于 2500Ma 左右, 形成轴面近直立的紧闭或开阔褶皱, 大型的穹窿和盆形构造, 可见微弱的直立叶理 (S_3), 并局部发育强烈的韧性变形带。

剪切应变和韧性变形带在孔兹岩系中通常很发育, 如 Roering 等 (1992) 的研究结果认为 Limpopo 带中部孔兹岩带是外来地体, 它们在就位之前已遭受复杂的变形作用, 但这些