

国家自然科学基金资助项目

吉南太古宙 高级变质地体及金矿床

孙晓明 徐克勤 任启江 Reid R · Keays 著



地质出版社

国家自然科学基金资助项目

吉南太古宙高级变质地体及金矿床

孙晓明 徐克勤 任启江 Reid R. Keays 著

地质出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

吉南太古宙高级变质地体及金矿床/孙晓明等著. -北京:地质出版社,1996.4
ISBN 7-116-01972-3

I. 吉… II. 孙… III. ①太古宙-变质地质学-中国-吉林 ②金矿床-矿床成因论-太古宙-中国-吉林 N. P618.510.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 20439 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:陈 磊 肖 凡

*

北京印刷学院实习印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:8 铜版图:2 页 字数:186000

1996 年 4 月北京第一版·1996 年 4 月北京第一次印刷

印数:1—500 册 定价:9.80 元

ISBN 7-116-01972-3

P·1601

前 言

太古宙地体主要由花岗—绿岩地体和高级变质地体组成。对前者及其中的金矿床，人们已进行了详尽的研究，而对后者，由于强烈的变质作用及构造变形，其中地质现象十分复杂，至今尚有许多基本地质问题未能解决。更为重要的是，长期为人们所普遍视为找金禁区的太古宙高变地体近年来也发现了许多金矿化，这是矿床学的最新进展之一。因而，加强对高变地体及其中金矿化的研究无疑具有重要的理论和实际意义。

吉南太古宙变质地体是我国重要的黄金开采基地，其中夹皮沟金矿的采金史已逾160年。从30、40年代始，许多学者和单位对本区进行了大量的研究，但在许多问题上仍存在争议，如本区的构造属性及演化、金矿床的成因等，对其中广泛发育的韧性剪切变形现象亦未能详细研究。这些问题在华北地台上其它相似地区也程度不同地存在着。作者通过数年工作，对上述问题进行了如下研究：

1. 通过对太古宙各类岩石大量的矿物学和岩石化学研究和对比，提出吉南太古宙地体不是目前所普遍认为的花岗—绿岩地体，而是一典型的高级变质地体；

2. 在较详细的构造地质背景分析基础上，提出太古宙高变地体在强烈的后期韧性变形和岩浆活动条件下亦可形成金矿化，但此类金矿床与典型绿岩带型金矿在许多方面存在差别；

3. 对夹皮沟金矿区北西向韧性剪切带的地质特征、宏观和显微构造变形、主要水岩反应和构造地球化学特征、流体地球化学等进行了较系统的研究，并探讨了韧性变形与金矿化之间的关系；

4. 对本区金矿床进行了大量的井下观测和室内同位素及成矿流体包裹体的测试研究，在此基础上，提出本区金矿床可划分为与剪切带有关的变质热液型和与海西—印支期岩浆活动有关的岩浆热液型两类，并对其各自成矿地质特征进行了详细的对比；

5. 将华北地台上一系列太古宙高变地体中的金矿床与国外典型绿岩带型金矿床进行了综合对比研究。

本书是中国和澳大利亚两国科学工作者合作科研的结晶，其国内部分工作属国家自然科学基金重大项目“中国东部重要金矿类型、成矿条件、富集规律及找矿方向（编号：9488010）”的一部分。研究工作从1988年开始，1992年结束，其间作者对吉南太古宙地体及夹皮沟金矿带进行了较多的野外工作，并对比考察了冀东和辽东前寒武纪地体及许多金矿床，此外，还考察了澳大利亚西部的一些典型太古宙花岗—绿岩地体和绿岩带型金矿床。研究过程中得到澳大利亚墨尔本大学地质系电镜室及中子活化实验室、La Trobe大学地质系包裹体实验室、澳大利亚西部地质调查所和卡尔古利金矿床、夹皮沟金矿及地质测量、吉林冶金地质勘探公司604队、吉林市板庙子金矿及三道沟金矿、天津冶金地质研究院、南京大学地科系分析中心、华东有色地勘局研究所化验室等单位及王德滋、胡受奚、刘英俊、朱金初、徐兆文、顾连兴、徐士进、张富生、赵梅芳、P. J. Mcgoldrick、Kevin Johnson、Pate

Kelly、刘松发、富民禄、来群、王良根、邓燕华、李尚勇、金昌珍、顾国华等的大力支持和帮助，在此一并表示衷心感谢！

由于时间和经费的限制，上述工作还存在一些问题未能很好解决，书中的内容及提出的一些观点也难免存在一些缺点和错误，敬希读者诸君不吝赐教。

作 者

1995.1. 于广州

目 录

第一章 地质概述.....	(1)
第一节 大地构造位置及范围.....	(1)
第二节 主要地层及岩性.....	(1)
第三节 主要岩浆活动.....	(3)
第四节 主要矿化类型.....	(4)
第五节 主要地质事件演化序列.....	(5)
第二章 太古宙变质岩主要岩石单元.....	(6)
第一节 白山镇片麻岩.....	(6)
一、麻粒岩相岩石	(6)
二、角闪岩相岩石	(17)
第二节 夹皮沟片麻岩	(27)
一、矿物学特征	(27)
二、角闪岩相变质温度的估算	(27)
三、岩石化学特征	(27)
第三节 两类片麻岩的成因及对比	(33)
第四节 条带状磁铁石英岩 (BIF)	(35)
第五节 超镁铁质岩石	(38)
第三章 太古宙地体构造属性的确定及地质意义	(40)
第一节 研究现状	(40)
第二节 本区构造属性的确定及主要证据	(43)
第三节 西澳 Yilgarn 地块太古宙绿岩带主要地质特征	(44)
第四节 太古宙高级变质地体中出现金矿化的可能性	(47)
第四章 韧性构造变形与金矿化	(49)
第一节 韧性剪切带研究历史及现状概述	(49)
第二节 本区韧性剪切带的基本地质特征	(50)
第三节 韧性剪切变形中的主要水岩反应及物质组分变化规律	(61)
第四节 韧性剪切过程中的流体地球化学及金矿化	(69)
第五章 两类不同金矿床的主要地质特征及成因	(71)
第一节 金矿床地质特征概述	(71)
第二节 太古宙地体中金矿床成因主要观点	(71)
第三节 两类金矿床的对比及成矿模式	(74)
一、两类金矿床的对比	(74)
二、本区金矿成矿模式	(101)

第四节 两类不同金矿化模式在华北地台上的普遍意义·····	(103)
第五节 本区金矿找矿方向及目标·····	(108)
第六章 华北地台太古宙高变地体中金矿化及其与绿岩带型金矿床对比	
·····	(109)
第一节 太古宙高变地体中金矿化的研究现状·····	(109)
第二节 华北地台太古宙高变地体中金矿与绿岩带型金矿之区别及原因探讨 ·····	
·····	(109)
主要结论·····	(114)
主要参考文献·····	(115)
图版说明及图版·····	(121)

省区测队将鞍山群的使用范围扩大到两省所有太古宙岩石，并由上而下划出了三个组，即四道砬子河组、杨家店组、三道沟组，它们各自的主要岩性是：

1. 四道砬子河组 主要分布在会全栈、溜河一带及其以西以南地区，岩性以各种混合岩及片麻岩为主，混合岩化程度较强，局部可见到较大的钾长石红色斑晶，并可见到众多暗色包裹体。

2. 杨家店组 主要分布在老金厂到杨家店和会全栈到老岭一带，仍主要由各种片麻岩和混合岩组成，常见许多圆形暗色包裹体，其混合岩化较四道砬子河组为弱。该组上部可见众多基性麻粒岩及紫苏花岗岩等高级变质岩。

3. 三道沟组 主要分布在三道沟到四道沟一带，主要由斜长片麻岩和斜长角闪岩组成，后者常呈暗色包裹体透镜体分布于前者之中，但二者之比例变化较大，局部见条带状磁铁矿石岩。

上述分组方案在1975年东北三省地层会议上得到正式承认。1980年，蒋国源等提出将鞍山群分为下亚群（白山镇群）和上亚群（仍采用鞍山群名称），其中下亚群包括四道砬子河组和杨家店组，而上亚群为三道沟组，两者之间为不整合接触，秦肅等（1982）支持此意见，但在鞍山群底部增加了夹皮沟组。胡安国等（1985）首次放弃了鞍山群的使用，并把本区太古宙岩石划分为灰色片麻岩、高级变质上壳岩及边缘活动带三部分（表1—1）。作者在前人工作基础上，经过大量野外踏勘和室内分析研究，认识到本区所谓太古代“鞍山群”实际上主要由TTG（奥长花岗质—英云闪长质—花岗闪长质）火成岩及拉斑玄武岩变质而来的两类双峰式灰色片麻岩及其糜棱岩带组成，因而不能作为地层对待。我们对本区太古宙岩石重新进行了划分，划出了三个主要岩石单元（见表1—1）：

表 1—1 吉南太古宙地体中太古代地层及岩石单元划分及对比

东北三省地层会议 方案(1975)			蒋国源等(1980)			秦肅等(1982)			胡安国等(1985)	本 文
鞍 山 群	三道 沟组	上含铁层	鞍山 群	三道 沟组	上含铁层	鞍山 群	三道 沟组	上含铁层	边缘活动带	夹皮沟片麻岩
		下含铁层			下含铁层			下含铁层		
								夹皮沟组		北西向糜棱岩带
	杨家 店组	上 段	白山 镇群	杨家 店组	上 段	白山 镇群	杨家 店组	上 段	高级变质的上壳岩 及基性层状杂岩体	白山镇片麻岩
		下 段			下 段			下 段		
	四道砬子河组			四道砬子河组			四道砬子河组		灰色片麻岩	

1. 白山镇片麻岩 主要分布在吉南太古宙地体西南部，相当于原四道砬子河组及杨家店组的分布区，其中混合岩化相对较强，局部可见到较大的钾长石斑晶。按其区域变质程度可分为麻粒岩相和角闪岩相两类，其中麻粒岩相者以黑云二辉麻粒岩及紫苏花岗岩为主，岩石中常见较多之黑云母等含水矿物；而角闪岩相岩石则以各类斜长片麻岩夹暗色斜长角闪岩等包裹体为主；

2. 夹皮沟片麻岩 相当于原三道沟组中上部分布区，其岩石类型相对复杂，以黑云斜长片麻岩为主，见较多斜长角闪岩暗色包裹体，有时暗色包裹体可占到30%。此外，夹皮沟片麻岩可夹有少量条带状磁铁矿石岩（BIF）和超基性岩墙。该片麻岩整体上混合岩化不强；

3. 北西向糜棱岩带 相当于原三道沟组下部或秦蒲等划分的夹皮沟组分布范围, 伴随韧性构造变形而发生的强烈退变质作用使其外观颇似绿片岩, 故在 80 年代中期以前曾有相当多研究者限于当时认识水平将其作为绿岩带的一部分。该剪切带主要由长英质和镁铁质两类糜棱岩系列岩石组成, 与夹皮沟片麻岩之间无明显的界限。

二、太古宙以后主要地层及岩性

本区太古宙变质岩上的盖层主要有:

1. 古元古界老岭群 主要分布在夹皮沟金矿带红旗沟—苇厦子一带, 出露很不完整, 以前曾当成志留—泥盆纪的呼兰群。岩性主要为白云质大理岩, 有时夹有暗色斜长角闪岩及部分云母片岩, 在底部有少量变质砂岩和砾岩;

2. 志留—泥盆系呼兰群 主要出露在夹皮沟金矿带与海西期地槽褶皱带的交接部位, 其下段岩性为中性火山岩、灰岩和砂页岩等组成的类复理石建造, 而其上段则以火山沉积为主, 局部夹有砂泥质沉积岩;

3. 侏罗系 主要见于本区北西部的挥发河深大断裂带中以及本区东南部的五间房—金银别—白水滩断裂带, 其底部为陆相中酸性火山碎屑岩, 上部为含煤的陆相碎屑沉积岩;

4. 白垩系 本区白垩系仅局部出现, 如白水滩一带, 其岩性较简单, 为红色碎屑岩系, 有时有石膏夹层存在。

第三节 主要岩浆活动

本区发生最早和规模最大的岩浆活动是太古宙中晚期的拉斑玄武岩及奥长花岗岩系列岩浆侵入, 它们以富 Na 贫 K 为特征, 在后期多次区域变质作用下, 它们变为两类双峰式灰色片麻岩, 并构成了吉南太古宙变质地体的主体。太古宙以后的主要岩浆活动有:

1. 元古宙混合花岗岩 有些文献中称为“混合质钾长花岗岩”或“钾质花岗岩”, 广泛地侵入于太古宙地体中, 在夹皮沟金矿区主要分布在北西走向大型韧性剪切带西南侧与麻粒岩相岩石之间, 在其它地区, 特别是会全棧和白山镇水库周围也有大量的分布。在岩体的边部常可见到太古宙岩石的碎块。此类岩石外貌多为肉红色, 岩石具粗粒花岗斑状结构, 有时见蠕英结构, 致密块状到条带状构造, 局部可见到片麻状构造。镜下鉴定可知主要由 50% 左右的微斜长石、20% 左右的酸性斜长石、15% 左右石英及少量黑云母和角闪石等暗色矿物组成, 有时钾长石呈巨斑状出现。胡安国等 (1985) 的分析显示其中 SiO_2 在 66.56%—74.48% 之间变化, K_2O 为 3.03%—4.93%, 而 Na_2O 为 2.14%—3.97%, Al_2O_3 为 12.33%—14.64% ($n=11$)。此类花岗岩显系本区白山镇片麻岩局部在强烈混合岩化条件下部分熔融的产物。

2. 海西期花岗岩类岩石 主要见于吉黑海西地槽褶皱带中, 在本区最主要者为木箕河岩体、黄泥河岩体及黄厘沟大顶子岩体, 它们都属于著名的“吉林花岗岩”的组成部分。这些岩体边缘相主要为黑云斜长花岗岩及花岗闪长岩, 呈似片麻状构造, 而中心相为中粗粒似斑状花岗岩及花岗闪长岩, 镜下可见中心相岩石主要由微斜长石、斜长石 ($\text{An}=30$)、石英及黑云母等组成, 而边缘相中微斜长石基本消失。胡安国等 (1985) 的分析表明这些岩体的 SiO_2 为 62.21%—73.1%, 平均为 68.49% ($n=25$), K_2O 为 2.42%—5.64%, 平均 3.55% ($n=25$), Na_2O 为 2.85%—5.09%, 平均 4.02%, 在 Q—A—F 图解上多落在正常

花岗岩及花岗闪长岩范围中,而稀土分析显示几乎所有样品均呈Eu正异常(于清义等,1986)。其一系列岩石地球化学特征表明此类花岗岩体属于徐克勤等(1982)划分的改造型花岗岩系列。

黄泥河等花岗岩体的K—Ar全岩年龄多属海西期(王义文,1978),但亦有人认为它是海西期与燕山期花岗岩的复式岩体(姚凤良等,1989),还有一些学者认为其中也包含有元古宙的花岗岩(邹祖荣等,1989)。于清义等(1987)提出夹皮沟地区所有金矿化均与这些海西期花岗岩基有关。

此外,在本区夹皮沟金矿带东部一些金矿床中,如八家子、四道岔、夹皮沟本部等均可见到大量海西—印支期的长英质岩脉,相当大部分金矿体赋存在脉岩的两侧,虽然有人认为这些脉岩的成因与黄泥河等大型花岗岩基有成因上的联系(于清义,1984),但其一系列地球化学特征显示它们属于同熔型花岗岩系列。

3. 燕山期花岗岩 本区最主要的燕山期花岗岩为吊水湖花岗岩株,其岩性为钾长花岗岩,亦有人称其为白岗岩,其中暗色矿物极少,以黑云母为主,偶见绿色角闪石,镜下可见该岩体主要由微斜长石、酸性斜长石及石英组成,常见蠕英结构,化学分析显示其 SiO_2 为71.34%—77.3%,平均为74.69%($n=3$), K_2O 为3.96%—4.69%,平均4.27%, Na_2O 为3.97%—4.17%,平均4.05%(胡安国等,1985)。该岩体中黑云母K—Ar年龄为150Ma,而全岩K—Ar年龄为130Ma(吉林冶金研究所,1977)。

此外,本区还广泛受到新生代的玄武岩喷发,一般称其为张广才岭玄武岩,其岩性属碱性橄榄玄武岩,其中常见到二辉橄榄岩—透辉岩—纯橄岩等地幔岩包裹体。

第四节 主要矿化类型

本区主要矿化类型有:

1. 金矿化 本区各类太古宙岩石中赋存了著名的夹皮沟金矿带,它由十多个大中型金矿组成,绝大多数分布在夹皮沟片麻岩中,此外还有众多金矿化点。这些金矿或金矿化点的主要矿石类型为含金硫化物石英脉或含金糜棱岩,矿体主要与北西走向的大型韧性剪切带及海西期花岗岩浆活动有关。在红旗沟—大砬子一带的古元古界大理岩中亦见到金矿化,金矿体受到大理岩中的断裂控制,金品位一般 $<3\text{g/t}$,矿体中见到较强的黄铁绢英岩化,并见较多之黄铁矿等硫化物,此外古元古界底部砾岩中亦局部有金矿化;

2. 铁矿 主要为原三道沟组现夹皮沟片麻岩中的两层条带状磁铁矿石岩(BIF),主要分布在夹皮沟金矿带中三道沟—老牛沟一带,其厚度一般为2m左右,最厚处不超过10m。50年代曾作为铁矿床进行过多年地质勘探,但结果显示其铁品位较低,且其中由于含有大量铁铝榴石及钙铁辉石等铁镁矿物,故可溶性铁低于全铁;

3. 镍矿化 仅局部出现,主要见于二道沟金矿苏长岩中,Ni主要赋存在呈浸染状分布在苏长岩中的硫化物矿物中。镍矿化苏长岩的全岩K—Ar年龄为255Ma,属海西期。

此外,夹皮沟东部许多金矿床如二道沟、八家子等中可回收较多的Cu、Pb、Zn等伴生有用元素。

第五节 主要地质事件演化序列

1. 太古宙主要地质事件 本区灰色片麻岩中广泛出露的斜长角闪岩暗色包裹体经原岩恢复为拉斑玄武岩,它是本区最早形成的古大洋壳,时代大约为 2900Ma 前,同时有 BIF 的形成。拉斑玄武岩底部不同程度的熔融形成了本区两类 TTG 质岩浆岩,它们在不同区域变质条件下变为白山镇片麻岩和夹皮沟片麻岩(详见第二章)。同位素年代学资料显示 TTG 火成岩的侵入大部分在 2500Ma 左右进行,但白山镇片麻岩的原岩侵入时代相对要早一些,因为其中多次出现 2800—2900Ma 左右同位素年龄值,甚至可高达 3100Ma,而夹皮沟片麻岩的原岩侵入则晚一些,大多在 2500—2600Ma 左右进行。在 2300—2500Ma 间,本区夹皮沟片麻岩中有一些超基性岩墙侵入。

2. 太古宙以后地质事件 本区太古宙地体形成后,又受到后期多次强烈的岩浆活动和韧性构造变形的影响。在古元古代,本区受到大规模混合岩化而形成大量混合岩、混合花岗岩;在中元古代,夹皮沟片麻岩受到韧性构造变形而形成北西向剪切带,同时形成第一期(变质热液型)金矿化,其后在海西到燕山期,均有大量中酸岩浆侵入,形成黄泥河及吊水湖等岩体及大量中酸性岩脉,同时形成第二期金矿化(详见第五章)。

在第三纪,本区受到广泛的大陆碱性橄榄玄武岩喷发。

本区主要地质事件序列见表 1—2。

表 1—2 吉南太古宙地体主要地质事件序列

序号	主要地质事件	同位素年龄(Ma)	测定方法	资料来源
1	拉斑玄武岩喷发形成古洋壳, BIF 形成	2900	全岩 Pb—Pb	黄一鸣(1985)
2	古洋壳底部部分熔融形成白山镇片麻岩原岩——TTG 类古侵入体	3100 2972 2950 2800 2444—2550	全岩 Rb—Sr 等时线 全岩 Rb—Sr 等时线 全岩 Pb—Pb 辉石 K—Ar 黑云母 K—Ar	吴加恒(1985) 吉林地矿局(1988) 刘建民(1983) 王义文(1985) 王义文(1985)
3	夹皮沟片麻岩的原岩——TTG 类古侵入体侵入	2600 2564	锆石 U—Pb 锆石 U—Pb	吴加恒(1985) 黄一鸣(1985)
4	超镁铁质岩墙侵入	2300—2500	U—Pb 等时线	吉林地矿局(1988)
5	大规模混合岩化, 花岗岩化	1900—2000	K—Ar	王义文(1978)
6	NW 向韧性变形, 强烈退变质, 形成第一期金矿化	1645—1900	野外产状	韩冰(1988) 孙晓明(1992)
7	海西期黄泥河花岗岩侵入	201—256	K—Ar	王义文(1978)
8	海西、印支期大量中酸性岩脉侵入, 形成第二期金矿化	158—268	K—Ar	王义文(1978)
9	燕山期吊水湖花岗岩侵入	130—150	K—Ar	王义文(1978)

第二章 太古宙变质岩主要岩石单元

第一节 白山镇片麻岩

白山镇片麻岩主要分布于本区的西南部(图2—1)。按区域变质程度可划分为角闪岩相和麻粒岩相两类。

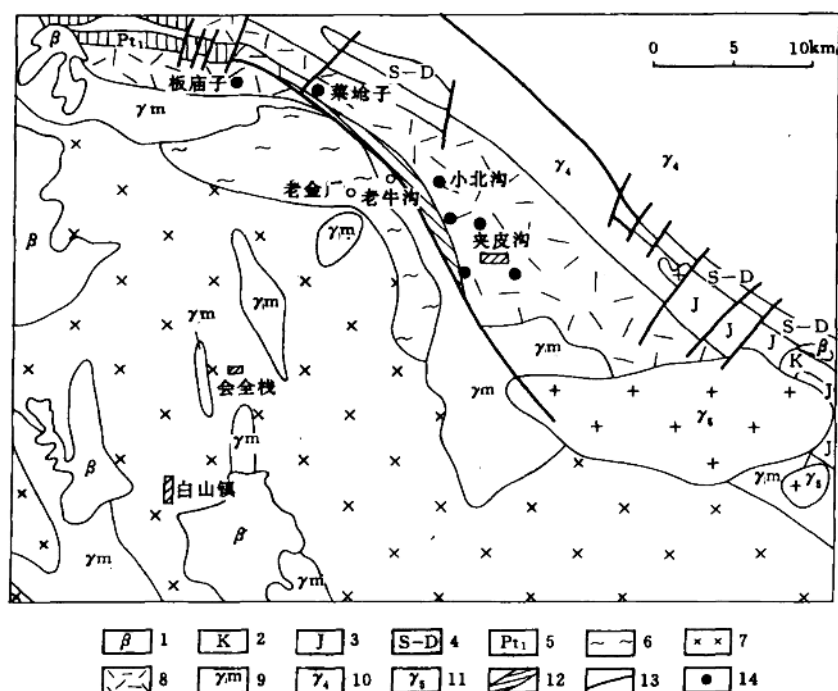


图2—1 吉南太古宙地体东北部及夹皮沟金矿带地质图

1. 第三纪玄武岩; 2. 白垩纪地层; 3. 侏罗纪地层; 4. 志留到泥盆纪地层; 5. 古元古界; 6. 麻粒岩;
7. 白山镇片麻岩; 8. 夹皮沟片麻岩; 9. 混合花岗岩; 10. 海西期花岗岩; 11. 燕山期花岗岩;
12. 北西向韧性剪切带; 13. 断层; 14. 大型金矿床

一、麻粒岩相岩石

本区麻粒岩相岩石主要分布在白山镇片麻岩最北缘(图2—1), 老牛沟一带出露稍好。以前均将其作为混合岩, 80年代初由秦鼎等人首次发现(秦鼎等, 1982)。其岩石类型较简单, 以偏基性的二辉麻粒岩为主, 岩性主要是黑云二辉麻粒岩, 个别含石榴子石较多, 局部夹一些紫苏花岗岩。老牛沟一带可见到紫苏花岗岩侵入于黑云二辉麻粒岩中。二辉麻粒

岩中锆石的 U—Pb 年龄为 2517—2600Ma^①。

(一) 矿物学特征

1. 二辉麻粒岩 主要由斜长石(50%)+紫苏辉石(20%)+透辉石(10%)+黑云母(5%)+钾长石(少量)+石英(5%)+钛铁氧化物矿物(少量)+角闪石(少量)等组成。

(1) 斜长石 大部分为中长石(表 2—1), An=30—40, 个别见反条纹长石结构。常含磷灰石针状晶体及充填有阳起石等矿物的细脉。

表 2—1 白山镇片麻岩中麻粒岩相岩石钾长石及斜长石电子探针分析结果

样品编号	P169		P170		L05		以 32 个氧原子为基础计算的结构式						
	钾长石	斜长石	钾长石	斜长石	钾长石	斜长石	Si	11.742	10.635	11.905	11.127	11.897	11.098
长石种类							Ti	0.054	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000
分析点数	1	1	2	2	1	1	Al	4.183	5.283	4.046	4.836	4.071	4.829
SiO ₂	63.54	58.86	63.09	61.78	63.86	62.58	Fe ³⁺	0.042	0.021	0.026	0.024	0.006	0.018
TiO ₂	0.39	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	Mn	0.000	0.005	0.000	0.001	0.002	0.006
Al ₂ O ₃	19.20	24.81	18.19	22.78	18.54	23.10	Mg	0.026	0.007	0.002	0.010	0.003	0.000
Fe ₂ O ₃	0.27	0.15	0.19	0.16	0.05	0.12	Ca	0.005	1.394	0.000	0.951	0.000	0.945
MnO	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.04	Na	0.250	2.622	0.126	2.933	0.312	3.112
MgO	0.09	0.03	0.01	0.04	0.01	0.00	K	3.685	0.104	3.884	0.059	3.728	0.038
CaO	0.02	7.20	0.00	4.93	0.00	4.97	Cr	0.009	0.000	0.007	0.001	0.000	0.001
Na ₂ O	0.69	7.48	0.35	8.40	0.86	9.05	Ni	0.005	0.000	0.008	0.001	0.004	0.007
K ₂ O	15.63	0.45	16.14	0.26	15.68	0.17	Ba	0.057	0.003	0.061	0.007	0.058	0.000
Cr ₂ O ₃	0.06	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00	Ab%	6.35	63.64	3.14	74.38	7.72	76.00
NiO	0.03	0.00	0.05	0.01	0.03	0.05	An%	0.12	33.83	0.00	24.12	0.00	23.08
BaO	0.79	0.04	0.83	0.09	0.80	0.00	Or%	93.53	2.53	96.86	1.50	92.28	0.92
总量	100.71	99.06	98.90	98.47	99.86	100.08							

注: P169、P170, 黑云二辉麻粒岩; L05, 紫苏花岗岩。

(2) 黑云母 一般呈红棕色, 颗粒较大, TiO₂ 含量较高, 一般大于 5% (表 2—2), 而 MnO 含量较低, 为 0.01%—0.15%, 且其 Al^{IV} 特别低 (0.000—0.101), 这正是麻粒岩相黑云母的特征, 表明它们很可能是一些原生矿物。黑云母中 Al^{IV} 特别高, Al^{IV}: Si 为 0.45 左右, 而 X_{Mg} 一般为 0.5—0.6, 其成分介于羟铁云母与金云母之间, 但更偏向金云母。

(3) 透辉石 颗粒一般较大, 自形粒状。蚀变不很强, 主要表现为沿解理及裂隙为阳起石及蛇纹石所交代, 同时可见大量细粒磁铁矿形成, 有时磁铁矿在其中呈环状 (图版 I—1)。其成分介于次透辉石及普通辉石之间 (表 2—3), 其中 Na₂O、TiO₂ 和 Al₂O₃ 含量与冀东麻粒岩相似^②, 与印度 Madras 麻粒岩相比, Na₂O 较高, 而 TiO₂ 和 Al₂O₃ 则明显偏低 (Weaver, B. L., et al., 1978)。大部分透辉石具有 Al^{IV}>Al^{VI} 的特征。

(4) 紫苏辉石 它形粒状, 大多较单斜辉石为小, 蚀变较强, 主要表现为较强阳起石化, 同时有一些磁铁矿残留下来。其矿物成分多为紫苏辉石, 但靠近铁紫苏辉石一侧, 说明其形成时 f_{O₂} 较低, Fe 有一部分呈 Fe²⁺ 进入硅酸盐晶格。其中 TiO₂、Al₂O₃ 等含量与冀东麻粒岩相似, 而 CaO 较低 (金持跃, 1989), 与印度 Madras 麻粒岩相比, 则 Al₂O₃ 和 CaO 较低。

① 黄一鸣, 1985, 吉林桦甸麻粒岩 U—Pb 年代学研究, 长春地院硕士论文。

② 金持跃, 1989, 冀东太古宙高级变质区主要岩石类型地球化学特征, 南京大学硕士论文。

表 2-2 白山镇片麻岩中麻粒岩相岩石黑云母电子探针分析结果

样品编号	P170			P169		L05	以 20 个 O 和 4 个 OH ⁻ 计算的结构式						
	170— Bi01	170— Bi02	170— Bi03	169— Bi01	169— Bi02	L05— Bi	Si	5.582	5.524	5.575	5.485	5.480	5.551
SiO ₂	37.04	36.28	36.00	36.94	36.33	36.68	Al ^{IV}	2.391	2.460	2.425	2.515	2.520	2.449
TiO ₂	5.07	5.20	4.24	5.39	5.38	5.04	Al ^{IV}	—	—	0.101	0.015	0.010	0.061
Al ₂ O ₃	13.46	13.71	13.84	14.45	14.23	14.07	Ti	0.575	0.596	0.494	0.602	0.610	0.573
FeO	15.41	15.79	14.70	18.37	18.93	15.19	Fe ²⁺	1.942	2.010	1.903	2.281	2.388	1.923
MnO	0.15	0.08	0.05	0.01	0.12	0.06	Mn	0.019	0.010	0.007	0.001	0.016	0.008
MgO	14.11	13.46	13.69	12.41	11.59	13.47	Mg	3.170	3.055	3.160	2.747	2.607	3.038
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
Na ₂ O	0.02	0.06	0.06	0.01	0.06	0.17	Na	0.007	0.018	0.017	0.003	0.017	0.05
K ₂ O	9.58	9.97	9.89	10.18	10.16	9.88	K	1.893	1.937	1.955	1.928	1.955	1.907
Cr ₂ O ₃	0.05	0.03	0.05	0.13	0.11	0.15	Cr	0.006	0.004	0.006	0.015	0.013	0.018
NiO	0.09	0.10	0.08	0.10	0.08	0.11	Ni	0.011	0.013	0.010	0.012	0.009	0.013
BaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Ba	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ O*	3.98	3.94	3.87	4.04	3.98	3.96	X _{Mg} **	0.620	0.603	0.624	0.546	0.522	0.612
总量	98.96	98.62	96.47	102.03	100.97	98.78	Al ^{IV} , Si	0.428	0.445	0.435	0.458	0.460	0.441

* H₂O 为电价平衡法计算得到；** X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe²⁺)。

表 2-3 白山镇片麻岩中麻粒岩相岩石辉石电子探针分析结果

样品编号	P165		P169				P170	以 6 个 O 为基础计算的结构式						
	单斜 辉石	紫苏 辉石	单斜 辉石	紫苏辉石		单斜 辉石	Si	1.951	1.943	1.933	1.974	1.955	1.952	
分析编号	P165 —Di	P165 —Hyp	P169 —Di	P169 —Hyp01	P169 —Hyp02	P170 —Di	Al ^{IV}	0.049	0.052	0.067	0.026	0.045	0.048	
							Al ^{IV}	0.035	—	0.020	0.023	0.006	0.034	
SiO ₂	50.75	50.36	50.10	52.05	49.33	51.38	Ti	0.008	0.002	0.007	0.003	0.003	0.006	
TiO ₂	0.26	0.08	0.23	0.09	0.11	0.21	Fe ³⁺	0.044	0.063	0.071	0.000	0.034	0.071	
Al ₂ O ₃	1.85	1.15	1.92	1.09	1.09	1.84	Cr	0.003	0.000	0.002	0.002	0.001	0.001	
Fe ₂ O ₃	1.52	2.16	2.45	0.00	1.14	2.50	Mg	0.709	1.065	0.730	1.050	1.045	0.715	
FeO	9.02	25.66	9.25	27.96	26.55	7.54	Ni	0.001	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	
Cr ₂ O ₃	0.11	0.00	0.06	0.06	0.05	0.05	Fe ²⁺	0.290	0.828	0.298	0.887	0.880	0.240	
MnO	0.18	0.57	0.25	0.55	0.49	0.37	Mn	0.006	0.019	0.008	0.018	0.017	0.012	
NiO	0.03	0.04	0.10	0.00	0.00	0.00	Ca	0.855	0.022	0.820	0.012	0.011	0.849	
MgO	12.38	18.51	12.68	18.57	17.69	12.63	Na	0.048	0.005	0.040	0.004	0.003	0.071	
CaO	20.75	0.54	19.83	0.29	0.26	20.85	K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	
Na ₂ O	0.65	0.07	0.54	0.05	0.03	0.96	Ba	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	X _{Mg} [*]	0.374	0.538	0.380	0.539	0.530	0.381	
BaO	0.00	0.00	0.00	0.12	0.02	0.00	X _{Fe} [*]	0.176	0.451	0.193	0.455	0.464	0.166	
总量	97.51	99.14	97.41	100.83	96.76	98.34	X _{Ca} [*]	0.450	0.011	0.427	0.006	0.006	0.453	

* X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe²⁺ + Fe³⁺ + Ca)；X_{Fe} = Fe/(Mg + Fe²⁺ + Fe³⁺ + Ca)；X_{Ca} = Ca/(Mg + Fe²⁺ + Fe³⁺ + Ca)。

(5) 钛铁氧化物矿物 主要有磁铁矿、含钛赤铁矿和钛铁矿等，其赋存方式有两种，一为原生者，呈较大颗粒夹于其它矿物之间，多为钛铁矿与赤铁矿之固溶体，一般赤铁矿呈条带状或叶片状分布在钛铁矿中（图版 I—2），赤铁矿分布极不均匀，即使在同一颗粒中亦如此。另一种为次生者，较少出现，自形粒状和板状到长条状沿辉石解理分布，或在其中呈圆形，其成分均为磁铁矿。有时第一种钛铁氧化物矿物受到热液蚀变后，其中 TiO₂ 析离出来，即变为较纯的磁铁矿，在钛铁矿和赤铁矿固溶体周围常见之。

(6) 角闪石 局部出现, 呈较大的自形晶, 成分以韭闪石为主 (表 2—4)。

此外, 局部还可见少量钾长石和石榴子石, 石榴子石成分以铁铝榴石为主 ($Alm > 50\%$) (阎月华等, 1988)。

表 2—4 麻粒岩相岩石中角闪石电子探针分析结果

分析编号	P170—Am01	P170—Am02	以 22 个 O, 2 个 OH ⁻ 为基础计算的结构式		
SiO ₂	42.34	43.66	Si	6.472	6.604
TiO ₂	1.79	1.60	Al ^{IV}	1.528	1.396
Al ₂ O ₃	10.14	10.02	Al ^{VI}	0.300	0.391
FeO	15.20	14.34	Ti	0.206	0.182
MnO	0.15	0.10	Fe ²⁺	1.943	1.814
MgO	11.62	11.87	Mn	0.020	0.012
CaO	11.64	11.38	Mg	2.649	2.676
Na ₂ O	1.51	1.61	Ca	1.906	1.844
K ₂ O	1.50	1.49	Na	0.449	0.472
Cr ₂ O ₃	0.04	0.12	K	0.292	0.287
NiO	0.06	0.02	Cr	0.004	0.015
BaO	0.00	0.00	Ni	0.008	0.002
H ₂ O*	1.96	1.98	Ba	0.000	0.000
总 量	97.95	98.19	X _{Mg}	0.577	0.596

* H₂O 为电价平衡法计算得到。

2. 紫苏花岗岩 镜下可见主要由斜长石 (50%) + 石英 (20%) + 钾长石 (15%) + 黑云母 (10%) + 透辉石 (少量) + 紫苏辉石 (少量) + 钛铁氧化物矿物等组成。斜长石主要为更长石, $An=20$ 左右, 反条纹结构常见。黑云母为红棕色, TiO₂ 含量为 5.04% (表 2—2), 且 MnO 和 Al^{VI} 亦特别低, 是典型麻粒岩相岩石中黑云母特征。辉石中以透辉石为主, 紫苏辉石较少, 一般一块薄片里只见到一到二个颗粒。钾长石常见条纹结构, 颗粒较大, 在钾长石和斜长石及石英之间常出现蠕英结构。钾长石中 Na₂O 含量较低, 为 0.86% (表 2—1), 与基性麻粒岩中钾长石相似, 而较世界上著名的麻粒岩如印度 Madras 麻粒岩 (其中钾长石 Na₂O 为 2% 左右) 低得多。此外, 紫苏花岗岩中亦出现大量钛铁氧化物矿物, 其特征与基性麻粒岩中相似。对钛铁矿及赤铁矿固溶体的各相成分进行了电子探针分析 (表 2—5), 可见钛铁矿中 MnO 很高, 可达 8.74%, 且变化很大。赤铁矿中均含有一些钛 (表 2—5), 事实上, 电镜观察表明赤铁矿中有一些细脉状钛铁矿存在 (图版 I—3)。

(二) 麻粒岩相变质作用的 $p-t$ 条件估算

作者对麻粒岩相岩石中主要组成矿物进行了较详细电子探针测定 (表 2—1 至 2—5), 且据此估算了麻粒岩相变质作用的温压条件。

1. 二辉石地质温度计

共生的暗色矿物 A 和 B 中 Fe²⁺ 和 Mg 的分配系数一般定义为:

$$K_{D(Fe)}^{A/B} = X_{Fe}^A(1 - X_{Fe}^B) / X_{Fe}^B(1 - X_{Fe}^A) \\ = (Fe^{2+}/Mg)^A / (Fe^{2+}/Mg)^B$$

上述中 $X_{Fe} = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg)$

据上述所求得的斜方和单斜辉石的 K_D 值见表 2—6, 可见 K_D 一般为 2 左右, 与冀东和印度 Madras 麻粒岩相似 (张儒瑗, 1981; Weaver, B. L., et al., 1978)。说明本区共生的辉石在麻粒岩相条件下已达到平衡。

表 2-5 白山镇片麻岩中麻粒岩相岩石中钛铁氧化物电子探针分析结果

矿物	钛 铁 矿			含钛赤铁矿		磁铁矿	以 6 个 O(磁铁矿为 8)为基础计算的结构式							
分析编号	L05-Ti01	L05-Ti02	P169-Ti	L05-Fe01	L05-Fe02	L05Fe								
SiO ₂ *	0.00	0.01	0.15	0.00	0.08	0.00	Si	0.000	0.001	0.008	0.000	0.005	0.000	
TiO ₂	46.98	49.30	41.26	15.39	14.94	0.07	Ti	1.799	1.840	1.625	0.663	0.659	0.004	
Al ₂ O ₃	0.00	0.01	0.12	0.26	0.01	0.59	Al	0.000	0.001	0.008	0.018	0.007	0.052	
FeO ₂	42.82	44.74	53.13	76.35	75.77	94.84	Fe ³⁺	0.403	0.317	0.736	1.774	1.743	3.908	
Fe ₂ O ₃ **	10.52	8.43	18.51	41.13	39.46	69.81	Fe ²⁺	1.420	1.541	1.590	1.885	1.976	1.992	
FeO ₃	33.36	37.15	36.48	39.34	40.26	32.02	Mn	0.377	0.296	0.020	0.069	0.053	0.003	
MnO	8.74	6.99	0.45	1.43	1.06	0.04	Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Ca	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	
CaO	0.01	0.01	0.04	0.01	0.00	0.03	Na	0.001	0.000	0.008	0.006	0.004	0.028	
Na ₂ O	0.01	0.01	0.07	0.06	0.07	0.19	K	0.001	0.000	0.002	0.000	0.004	0.009	
K ₂ O	0.00	0.00	0.03	0.03	0.01	0.01	Cr	0.000	0.000	0.002	0.028	0.011	0.024	
Cr ₂ O ₃	0.03	0.03	0.04	0.21	0.15	0.41	Ni	0.000	0.004	0.001	0.011	0.000	0.004	
NiO	0.00	0.10	0.02	0.23	0.00	0.06	Ba	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
BaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Usp%				37.33	39.99	0.20	
Sum ₁ ***	98.61	101.20	95.29	93.98	92.09	96.25	I/m%	89.93	92.12	81.68				
Sum ₂	99.67	102.04	97.15	98.10	96.04	103.24								

* 所有分析均为作者于澳大利亚墨尔本大学地质系电镜室完成; ** FeO₂ 为电子探针分析全铁值, 而 Fe₂O₃ 及 FeO₃ 则为按 Carmichael(1967)法计算值; *** Sum₁ 为电子探针分析总量, 而 Sum₂ 则为 Fe³⁺ 校正后的总量。

表 2-6 麻粒岩相岩石中共生斜方和单斜辉石 K_D 值

编号	(Fe ²⁺ /Mg) ^{opx}	(Fe ²⁺ /Mg) ^{cpx}	K _D (Fe) ^{opx-cpx}
P165	0.409	0.777	1.90
P169-01	0.408	0.845	2.07
P169-02	0.408	0.842	2.06

本区麻粒岩相岩石中共生的单斜和斜方辉石在 Wo—En—Fs 三角图(图 2-2)上的投影点的连线落在 Wo₁₀₋₈₀ 之间, 亦表明这些矿物间已达平衡 (Deer, 1966)。

运用 Wood 和 Banno(1973)(简称 WB 法)和 Wells(1977)法分别测定了共生的斜方和单斜辉石的平衡结晶温度(表 2-7), 可见 Wells 温度较 WB 温度高一些。一般认为这两种方法都会过高地估算变质温度, WB 法一般要高 70℃ 左右, 而 Wells 法要高 100℃ 左右(张儒瑗等, 1983), 因而, 本区麻粒岩相变质作用的温度为 800—850℃, 与冀东麻粒岩相似, 而略高于印度 Madras 麻粒岩(Weaver B. L., et al., 1978)。

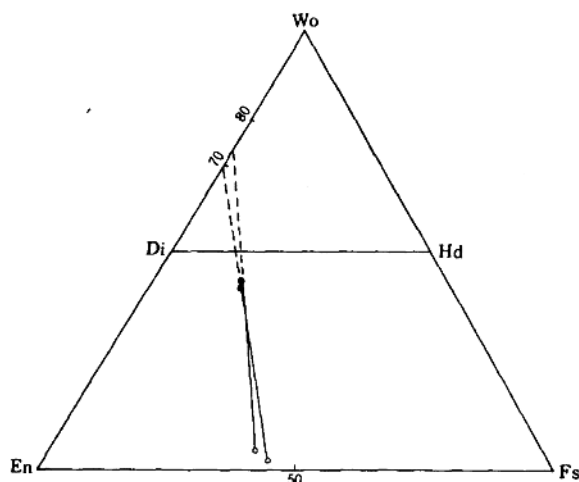


图 2-2 麻粒岩相岩石共生斜方和单斜辉石 Wo—En—Fs 图解
(图中实心圆为单斜辉石, 空心圆为斜方辉石)