

# 太古宙克拉通型下地壳剖面： 华北怀安-丰镇-尚义的麻粒岩-角闪岩系<sup>\*</sup>

## An Oblique Cross Section of Archaean Continental Crust in Shanxi-Hebei-Nei Mongol Jnnctnve Area, North China Craton

翟明国<sup>1</sup> 郭敬辉<sup>1</sup> 阎月华<sup>1</sup> 李永刚<sup>1</sup> 李江海<sup>2</sup> 张雯华<sup>1</sup>  
Zhai Mingguo<sup>1</sup>, Guo Jinghui<sup>1</sup>, Yan Yuehua<sup>1</sup>, Li Yongguang<sup>1</sup>,  
Li Jianghai<sup>2</sup> and Zhang Wenhua<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地质研究所, 北京 100029; 2. 北京大学地质系, 北京 100871)

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;*

*2. Department of Geology, Peking University, Beijing, 100871*)

**摘要** 华北克拉通北缘晋冀内蒙交界地区有变质程度连续变化、从高压基性麻粒岩、麻粒岩到角闪岩相的变质岩系出露。它们的古变质压力由 $>1.4$  GPa(50km)变化到 $0.5$  GPa(15km); 岩石类型从变辉长岩、中酸性正片麻岩到表壳岩变化; 变质矿物组合由不含水的耐火组合变为富含云母和角闪石的组合; 地球化学性质表现出从贫 Si 和 Al、轻度亏损生热元素到具有正常的化学成分的变化; 包裹体流体性质在轻度亏损生热元素的麻粒岩中均为 $\text{CO}_2$  流体, 而在麻粒岩相的表壳岩和角闪岩系中 $\text{H}_2\text{O}$  流体逐渐增加。上述变质岩系剖面的组成和特点符合大陆下地壳的定义, 可能代表了包括最下部地壳在内的华北地块太古宙克拉通型大陆下地壳。据此本文建立了我国第一条克拉通型大陆下地壳剖面, 并讨论其地质意义以及相关的问题。

**Abstract** Metamorphic rocks of granulite-amphibolite facies are distributed in Shanxi-Hebei-Nei Mongol juncture region, the middle part of North China Archaean craton. An oblique cross-section of the early Precambrian lower continental crust is exposed in Manjinggou-Shangyi zone. The different metamorphic rock units occur, they are successively high-pressure basic granulites, tonalitic (intermediate-felsic) granulites, metasediments (Khondalites), metavolcanic-sedimentary rocks. Their metamorphic grades are gradually decreased from high-pressure granulite, granulite to amphibolite facies. Their paleopressure are  $>1.4$  GPa,  $0.9$  GPa,  $0.6\sim 0.7$  GPa and  $0.5$  GPa respectively. Their petrological compositions show a change from gabbroic granulite, intermediate-felsic granulitic orthogneiss with a minor amount of supracrustals, to supracrustal se-

\* 本文于1995年12月15日收到, 1996年1月20日改回。

本文为国家自然科学基金委资助项目成果之一。

第一作者简介: 翟明国 男 1947年出生 副研究员 变质岩石学专业

quence. The lowermost part (gabbroic and intermediate-felsic granulites) is geochemically characterized by poorer Si and Al compositions than those of the middle and upper crust, and shows a depletion trend of heat-producing elements, such as Th, U, K, Rb and Sr. They contain CO<sub>2</sub> fluid inclusions rather than H<sub>2</sub>O fluid inclusions which generally are in middle-upper crust rocks. These rock sequences of lower crust and their metamorphism and, geochemical characteristics are comparable to those of typical cross-section of the continental lower crust in the world, such as Ivrea zone in southern Alps of Italy, Archaean Kapuskasing zone in Ontario of Canada and Archaean Dharwar zone in India. It is evident to establish a first exposed cross section of early Precambrian in North China craton. This paper deals also with some subjects and problem related to the lower continental crust.

**主题词** 高压麻粒岩 角闪岩 下地壳剖面 华北克拉通

**Key word:** High-pressure granulite; Amphibolite; Lower continental crust section; North China craton

**分类号:** P588.34

**Classific. code:** P588.125

## 1 前言

大陆下地壳深埋于地表 15~17km 以下,难以直接观察,对于它的物质组成和结构一般是用地球物理资料推断的。传统上认为大陆地壳具有双层结构,上层为花岗岩层,下层为玄武岩(辉长岩)层。新的地球物理和地质资料已证明上层主要岩石为花岗岩、花岗闪长岩和变质或未变质的沉积-火山岩、以及约 10% 的基性或超基性火成岩的混合物。而下层也不是仅由辉长岩组成,可能包括了大量的奥长花岗岩在内的平均成分为石英闪长岩的麻粒岩相岩石(Bohlen and Mazger 1989)。这些新认识的地质依据主要有两个,就是被称为大陆下地壳窗口的暴露于地表的下地壳剖面以及出露于金伯利岩和碱性玄武岩中的下地壳捕虏体(Rundnick 1992; Percival et al. 1992)。

Percival et al. (1992)将大陆下地壳剖面划分为四种构造抬升类型:(1)挤压抬升型(compressional uplift),如意大利 Ivrea 带、日本日高带、加拿大太古宙 Kapuskasing 带等,其特点是剖面中有镁铁质或斜长质部分,或者莫霍面及上地幔的岩石有少量出露;(2)宽缓的扭压掀斜型(wide, oblique transitions),如印度的太古宙 Dharwar 带、澳大利亚的 Yilgarn 带等,特点是缺乏镁铁质部分,如 Dharwar 带由麻粒岩相的二辉紫苏花岗岩到角闪岩相的灰色片麻岩,然后是绿片岩相的表壳岩;(3)撞击抬升型(Impactogenic uplift),即认为与陨石撞击有关的类型;(4)转变压力抬升型(transpressional uplift)。以前两种更有代表性。据报道,所有典型下地壳剖面的不同岩石单元之间均为断层接触(Fountain et al. 1992)。

对挤压抬升型下地壳的地质分析,认为这种下地壳是形成于活动大陆边缘或岛弧环境的岩石组合(Weber and Meger 1988)。第二种下地壳的组成特点与第一种相似,并推断有相似的成因(Newton 1988)。对各前寒武纪下地壳的描述,除了被认为是撞击抬升型的南非 Vredefort 穹隆和 Superior 省的 Levack 杂岩外,都是由高级麻粒岩-片麻岩地体到绿岩带的剖面构成的。不同的岩石单元之间都呈断层接触。

我国华北有世界著名的太古宙克拉通。翟明国等(1992a)报道在怀安发现高压基性麻粒

岩地体, 提出它可能代表了最下部大陆地壳, 而后提出建立一个从蔓菁沟-瓦窑口-马市口-商义的太古宙下地壳剖面(翟明国等 1992b)的初步设想。随着研究程度的深入, 我们积累了岩石学、矿物学、区域构造和地球化学的大量资料, 并与世界上一些典型的早前寒武纪或显生宙的大陆下地壳剖面作了实地考察和对比研究。本文将着重讨论在晋冀内蒙地区建立华北克拉通型大陆下地壳剖面的依据, 并对有关问题加以讨论。

## 2 建立大陆下地壳剖面的一般原则

Fountain et al. (1992) 对下地壳剖面所作的定义是: “下地壳剖面应包括下列特征: 有递增的变质度, 通常是绿片岩相到麻粒岩相; 它们的古压力 (paleopressure) 对应在 15~30km; 与此相应的有一个由上而下的由长英质、中性到镁铁质 (或斜长质) 的成分变化; 密度和地震波的相应变化; 化学特征包括生热元素的变化; 以及表壳岩数量的递减和以岩浆岩为主的物质组成。”从这个定义出发, 我们认为建立大陆下地壳剖面的基本原则最主要的是要有麻粒岩相到依次变低的变质岩系出露, 变质压力达到至少 15~30km, 越向下岩浆岩数量越多。其它如地震波、密度、地化特征等也会随之出现规律性变化。至于下地壳剖面的物质成分从上到下有长英质→中性→镁铁质的变化, 是一个有争议的指标。Bohlen (1987) 提出高压的石榴基性麻粒岩是最下部大陆地壳的代表性岩石类型。然而在一些典型的下地壳剖面中, 并没有发现镁铁质部分 (Newton 1988)。如印度的 Dharwar 太古宙大陆下地壳剖面的最下部是麻粒岩相的紫苏花岗岩, 而后变为角闪岩相的灰色片麻岩和角闪岩相—绿片岩相的变质火山—沉积岩。Rudnick (1990) 强调麻粒岩相的奥长花岗岩也具有与辉长岩层相同的地震波, 因此提出了大陆最下部地壳是包括麻粒岩相的奥长花岗岩在内的平均成分为石英闪长岩的岩石而不是高压基性麻粒岩的意见。

Weaver and Tarney (1983) 总结了不同深度的下地壳岩石的岩石学、地球化学和变质作用特征, 认为组成下地壳的岩石层次自上而下是: (1) 生热元素亏损的麻粒岩相片麻岩层; (2) 交代和混合的麻粒岩相片麻岩层; (3) 交代和混合的角闪岩相片麻岩层; (4) 具正常化学成分的角度岩相片麻岩层。

## 3 区域地质背景

钱祥麟 (1985) 和陈亚平等 (1990) 将晋冀内蒙交界地区的早前寒武系划分为两套主要的岩石, 即葛胡窑灰色片麻岩和丰镇群沉积岩。前者代表了以大面积出露的灰色片麻岩为主的成熟的太古宙地壳, 后者代表了稳定的克拉通盆地沉积。赵宗溥 (1988) 和刘宇光 (1989) 称张家口-宣化太古宙地区为怀安古陆, 其基底麻粒岩-片麻岩系代表了与冀东曹庄杂岩相当的早太古宙陆块, 上覆的麻粒岩相和角闪岩相变质沉积岩系是与冀东迁西群和单塔子群在时代上相当而沉积相不同的组合 (赵宗溥等 1993)。笔者 (翟明国等 1994) 将晋冀蒙交界地区的太古代变质岩划分为三个基本的岩石构造单元, 即怀安陆块, 恒山陆块以及桑干构造带, 后者将前二者分隔开 (图 1)。

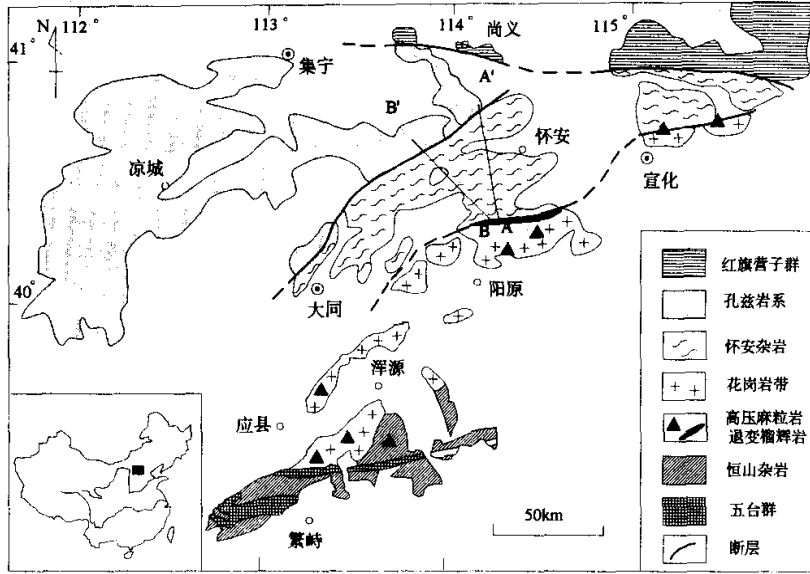


图 1 研究区早前寒武纪地质略图

Fig. 1 Sketch map of Precambrian geology in studied area

怀安陆块系指张家口-宣化地区和大同-集宁一带的前寒武纪变质岩区。从岩性组合来看，它们大致可分为长英质麻粒岩组合（怀安杂岩）、孔兹岩系（丰镇群）和角闪质-长英质岩系（红旗营子群）。长英质麻粒岩组合主要包括英云闪长岩系列的中酸性麻粒岩和片麻岩，还有少量暗色麻粒岩和表壳岩透镜体和包块，在地层上相当于葛胡窑组、瓦窑口组和马市口组，构成怀安陆块的变质基底。孔兹岩系是一套富铝质的和富硅质的麻粒岩相变质沉积岩组合，相当于黄土窑组和下白窑组，代表了一套形成于早太古代钠质克拉通盆地内的沉积盖层。孔兹岩系的北面是红旗营子群角闪质-长英质岩系，二者以尚义-赤城断裂相隔。红旗营子群是一套角闪岩相变质的火山-沉积岩系，并遭受较强的混合岩化。它主要由斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩、云母片麻岩和片岩组成，还有少量的磁铁石英岩和大理岩。基底变质岩有  $3454 \pm 52 / -55$  Ma 的 Pb-Pb 等时线年龄（郭敬辉等 1991）和  $3323 \pm 44$  Ma 的单颗粒锆石年龄（Kroner et al. 1987），证明了它是该区最古老的岩石单元。基性麻粒岩的 2400~2600Ma 的 Sm-Nd 等时线年龄，说明那时曾有强烈的麻粒岩相变质事件。

恒山陆块可划分出作为基底的恒山杂岩和作为盖层的表壳岩系。恒山杂岩主体为灰色片麻岩，具英云闪长岩-奥长花岗岩质岩石并局部变为花岗质正片麻岩的特征。岩石具片麻构造或条带构造，受到角闪岩相变质，与葛胡窑灰色片麻岩在变质程度上有较大不同。灰色片麻岩中含有大量斜长角闪岩包体或条带，它们与灰色片麻岩一起经历褶皱变形。灰色片麻岩中也含少量麻粒岩包体。晚太古代朱家坊表壳岩盖层（相当于五台群）不整合于恒山杂岩之上，代表了该区早期地壳演化中的重要构造事件（李江海和钱祥麟 1995）。朱家坊表壳岩的变质作

用、变质历史和岩石组合均与恒山杂岩不同。它们是成层性良好的变质陆源碎屑岩系,以及斜长角闪岩和云母片岩,并被义兴寨岩体和温庄岩体侵入。恒山杂岩中的斜长角闪岩包体有2800Ma的Sm-Nd等时线年龄,灰色片麻岩有约2500~2600Ma的锆石年龄(田水清1991)。朱家坊表壳岩因为有义兴寨岩体的2500Ma的锆石年龄,认为属晚太古代,无争议。

桑干构造带总体长约220km,在蔓菁沟一带宽约20km,大致NEE-NE向展布,是太古代末怀安陆块和恒山陆块之间强烈构造作用形成的一条独立的大型复杂剪切构造带,并具有不同岩块混杂的特征。其北部亚带是由不同尺度的高压基性麻粒岩、英云闪长片麻岩和孔兹岩的构造层状体和透镜体构成。其南部亚带由红色的花岗质片麻岩,花岗岩和许多规模不大的高压基性麻粒岩、退变榴辉岩(翟明国等1995)和英云闪长岩以及夕线石榴片麻岩或石墨片麻岩的岩块或构造透镜体组成,偶见变质的超基性岩透镜体。高压基性麻粒岩有 $2647 \pm 115$ Ma的Sm-Nd等时线年龄,含有高压麻粒岩包体的花岗岩有2.4~2.5Ga的锆石年龄(郭敬辉等1993)。该岩带有如下不同于南北两侧怀安杂岩和恒山杂岩的特点(郭敬辉等1995):(1)高压麻粒岩和退变榴辉岩集中成群,断续成带;(2)钾质花岗岩广泛出露,并与高压变质岩的产出关系密切;(3)剪切构造和糜棱岩非常发育;(4)岩带内不同类型的岩块(片)复杂多样。这种出露于古老克拉通的特殊组合近两年来也受到国外研究者的高度重视(Smelov et al. 1993; Williams et al. 1994)。

总之,本区地质格局的基本特点是两个古陆一个构造带。两个古陆在地质时代、岩石组合、变质作用、构造型式上都不相同。桑干构造带含有高压变质岩和超基性岩的岩块。该带被推测为两个古陆间的碰撞带(翟明国等1992)或壳内不同构造单元之间的拆离带(郭敬辉等1995)。下文讨论的较为完整的太古代克拉通型下地壳剖面就是由与此有关的构造掀斜作用而出露地表的,即暴露于地表的太古代末怀安陆块的麻粒岩相基底和麻粒岩相-角闪岩相的变质盖层,它自南向北跨越了怀安杂岩、孔兹岩系和角闪质-长英质岩系。该下地壳剖面的最下部是桑干构造带的高压基性麻粒岩,它可能是在怀安与恒山陆块之间的某种构造的作用下,在怀安陆块的基底被掀斜的过程中,增生在下地壳底部的过渡型地壳岩石。这个太古代下地壳剖面的性质及地质意义将在本文的最后一节加以讨论。

#### 4 晋冀内蒙交界地区下地壳剖面

本区出露的变质岩在变质程度上显示从麻粒岩相到角闪岩相的连续变化。代表性的地质剖面出露在蔓菁沟-瓦窑口-马市口-下白窑-尚义(图1中A-A'剖面,图2)和蔓菁沟-瓦窑口-丰镇-集宁(图1中B-B')一带。其中蔓菁沟出露的是桑干构造带的高压麻粒岩,从瓦窑口到集宁和尚义出露的是怀安杂岩的基底和盖层变质岩系。瓦窑口的岩石是典型的英云闪长质麻粒岩,其特点是成分均一,灰色中酸性麻粒岩中较均匀地分布有基性麻粒岩的条痕、条带和透镜体。没有表壳岩的包体,也没有钾质混合岩条带。其中英云闪长质麻粒岩约占75%,基性麻粒岩约占15%,闪长质麻粒岩约占10%。它们具有近于水平的片麻理,而且可以识别出现在的构造是多期变形叠加的结果,其构造复杂程度是本区最高的(刘宇光1989)。在瓦窑口以北的马市口和葛胡窑,英云闪长质麻粒岩含有较多的基性条带和透镜体,约占10%~20%。还含有约5%的包括条带状铁建造(BIF)的表壳岩透镜体。局部地段也有较多的钾质混合岩

化现象，以及少量紫苏花岗岩侵入体。在更北面的下白窑和黄土窑出露的是变质的麻粒岩相孔兹岩系和由孔兹岩原地重熔的 S-型壳熔花岗岩。再向北的尚义是角闪岩相的角闪岩-长英质岩系（红旗营子群）。该岩系由斜长角闪岩、角闪或云母斜长片麻岩、BIF 及大理岩组成，混合岩化较强。

这些岩石分别相当于 Weaver and Tarney (1984) 定义的非混合岩化的麻粒岩地壳，混合岩化的麻粒岩地壳和混合岩化的角闪岩地壳。瓦窑口的南面是蔓菁沟高压基性麻粒岩地体，它为一近东西向展布的岩带，宽约 2~3km，相当于 Bohlen and Mezger (1989) 推测的大陆最下部由基性高压麻粒岩组成的地壳。这样，由蔓菁沟向北，经瓦窑口、马市口、下白窑（集宁）到尚义代表了一条由下而上的下地壳剖面。图 2 是本区由蔓菁沟向北至下白窑的综合下地壳示意剖面。

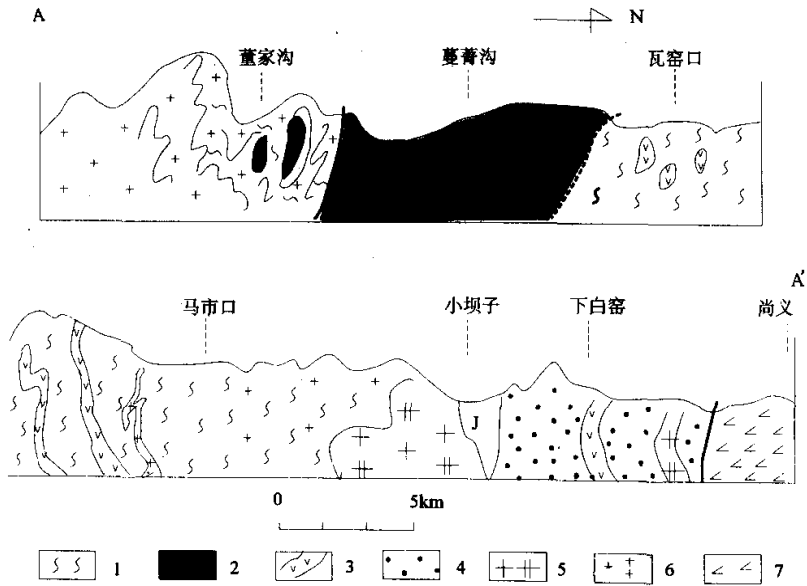


图 2 蔓菁沟-下白窑下地壳综合示意剖面(A-A')图

1. 中酸性麻粒岩；2. 高压麻粒岩；3. 基性麻粒岩；4. 孔兹岩；5. 紫苏花岗岩；6. 花岗岩；7. 角闪-长英岩系

Fig. 2 Cross-section of the lower crust in Manjinggou-Xiabayao zone

下面将进一步阐明建立该剖面的主要依据。

#### 4.1 岩性的递变

本区下地壳剖面各岩石单位的岩性最主要的变化就是从下（南）而上（北）由基性变为酸性，由岩浆岩为主变为表壳岩为主。它们可以分为四个岩性段，即在蔓菁沟出露的高压基

性麻粒岩；在瓦窑口-马市口出露的中酸性麻粒岩（正片麻岩）；在下白窑（集宁）出露的麻粒岩相变质沉积岩（孔兹岩系）；在尚义出露的角闪岩相变质火山-沉积岩（红旗营子群）（图2）。

蔓菁沟高压基性麻粒岩的片麻理总体南倾。北面在水沟口与英云闪长质麻粒岩相接，南面在大平沟水库附近出露大钾质花岗岩席。高压基性麻粒岩主要由石榴石和辉石组成。石榴石通常具白眼圈构造，即有由斜长石，斜方辉石，单斜辉石和角闪石组成的后生合晶。在构造较强的部位，石榴石渐少，逐步全部被后生合晶取代，斜长石和辉石及角闪石的颗粒也更粗大，片麻理发育，成为辉长质麻粒岩和辉石角闪斜长片麻岩。在高压基性麻粒岩体的北缘，基性麻粒岩变为极细粒的（小于1mm）定向构造很强的变余深位糜棱岩（郭敬辉等1993），与中酸性麻粒岩构造接触。高压基性麻粒岩的成分偏向超基性， $\text{SiO}_2$  不饱和，标准矿物石英为0。退变的辉长质麻粒岩，成分上从相当于辉长岩过渡到闪长岩。根据地球化学性质，高压基性麻粒岩成分上是橄榄辉长岩，略向辉石岩过渡；辉长质麻粒岩成分上由辉长岩过渡到闪长岩（郭敬辉等1994）。高压基性麻粒岩稀土元素多呈较平坦的分配型式。我们推测基性麻粒岩的原岩是幔源基性岩浆经壳下垫托作用（underplating）加入早期大陆壳底部的，并随后在那里经历高压麻粒岩相变质作用，形成一个特殊的层（翟明国等1992；郭敬辉等1993；阎月华1994），即相当于Bohlen and Mezger（1989）定义的最下部大陆地壳。蔓菁沟还出露有斜长岩岩墙，这种斜长岩岩墙只在深部地壳中出现岩（Fountain 1992）。

瓦窑口、马市口和葛胡窑一带出露的是以中酸性麻粒岩为主的麻粒岩-片麻岩系。岩石类型有三种：英云闪长质-花岗闪长质或闪长质的麻粒岩、辉长岩岩墙或岩体变质的基性麻粒岩透镜体或条带和含有BIF的表壳岩透镜体。三类岩石出露面积的比例分别是80%、10%~15%、5%。在瓦窑口一带没有表壳岩。在更北面的葛胡窑和马市口一带有少量紫苏花岗岩和轻微的钾质混合岩化。中酸性麻粒岩在地球化学上有大陆奥长花岗岩的演化趋势，以高Na低K为特点，据O'Connor（1965）的An-Ab-Or分类，大多数属英云闪长岩，少数是闪长岩或石英闪长岩。变质的辉长岩岩墙或岩体推测有至少两期（刘宇光1989），都表现出板内大陆辉长岩的地球化学特征。

孔兹岩系出露于下白窑、四方墩、浑源窑和孤山及其以北地区，在黄土窑它们作为麻粒岩中的残留层出现。这是一套以富含夕线石、堇青石、石榴石、石英，以及含石墨、云母、条纹长石的各种片麻岩、片岩为主，其次是变质的钙硅酸盐岩、基性麻粒岩，偶见紫苏花岗岩脉顺层产出。在凉城-土贵乌拉等地发育大型韧性剪切带，并伴随部分熔融形成石榴石花岗岩带。孔兹岩系在地球化学上明显高 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (>14%~24%)，低碱质( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}<2.7\%$ )。REE总量为87~740 $\mu\text{g/g}$ ，(La/Lu)<sub>N</sub>为5~48，分馏较强，LREE富集。含石榴石的石英岩和长石石英岩的稀土元素分布曲线有正铈异常，石榴黑云片麻岩类多无铈异常，而夕线石榴片麻岩则有负铈异常，反映了原岩的沉积分选和分异作用。该套岩石的总体稀土元素的分布曲线与太古代沉积岩类相似，属克拉通盆地内的稳定浅水相沉积组合（刘宇光1989；Condie 1993）。

分布于赤城-尚义断裂以北的角闪岩相变质岩系通称红旗营子群，局部被各类花岗岩肢解成残片，并受到较强的混合岩化。斜长角闪岩是主要岩石，约占65%，常与长英质岩石互层状产出。其次的岩石是角闪或云母斜长片麻岩、二长片麻岩、磁铁石英岩、大理岩、含十字石的变质沉积岩等，原岩是火山-沉积岩。

#### 4.2 变质程度的递变

该剖面四个岩性段的变质压力从 $>1.4\text{GPa}$ ,递降到 $0.9\text{GPa}$ 、 $0.7\text{GPa}$ 和 $0.5\text{GPa}$ ,变质程度由下(南)到上(北)分别是高压麻粒岩相、麻粒岩相到绿帘角闪岩相。

高压基性麻粒岩的突出标志是广泛发育石榴石变斑晶,常有斜长石和紫苏辉石等矿物形成的后成晶反应边环绕在斑晶周围构成淡色的冠状环。单斜辉石分解为具有其假象的由斜方辉石、单斜辉石和长石组成集合体或被角闪石交代。根据矿物的包裹、反应和穿插关系可以区分出早期高压组合及晚期退变质组合以及更晚些的角闪石。早期高压矿物组合由石榴石斑晶和其中的包体矿物组成,也包括基体中单斜辉石组合。包体矿物的颗粒一般比较小,主要是单斜辉石和石英。石榴石通常具有成分环带。镁铝榴石组分(Pyrr)含量从核心到边缘有轻度降低,铁铝榴石组分(Alm)和锰铝榴石组分(Sps)含量在斑晶的边部有所增高,而钙铝榴石组分(Grs)含量从核心到边缘表现为降低 $\rightarrow$ 增高 $\rightarrow$ 再降低的变化。在(Alm+Sps)-Grs-Py图解中,石榴石斑晶的成分投点落于麻粒岩和榴辉岩的重叠区(Carswell 1990),其化学成分与山东威海麻粒岩相退变质榴辉岩中含柯石英包体的石榴石和大别山双河柯石英榴辉岩中石榴石的化学成分极为相近(Cong et al. 1991)。Cpx+Grt+Qz组合缺少斜长石和斜方辉石,标志着在早期高压矿物组合中这两种矿物不稳定。根据斜长石和斜方辉石的有关矿物反应式、岩石成因格子以及矿物温度计和压力计的计算,变质温度压力为约 $800^\circ\text{C}$ 、 $>1.4\text{GPa}$ (翟明国等 1992a),以石榴石的后生合晶及辉石分解的晚期矿物组合为代表的变质温度压力是 $820^\circ\text{C}$ 、 $0.7\sim 0.9\text{GPa}$ ,表现出近等温的降压过程。

瓦窑口中酸性麻粒岩典型的矿物组合是紫苏辉石+单斜辉石+斜长石+石英。其他地段的样品中还有棕红色黑云母和褐色角闪石。粒状紫苏辉石与周围其他矿物呈三连点结构。二辉麻粒岩中含有少量石榴石,其端元分子以铁铝榴石为主( $56\%\sim 58\text{mol}\%$ ),次为钙铁榴石( $19\%\sim 23\text{mol}\%$ )。常见的退变现象是单斜辉石、绿色角闪石、褐色黑云母交代紫苏辉石或早期的单斜辉石。刘宇光(1989)计算的高峰变质温度和压力是 $838\pm 60^\circ\text{C}$ 和 $0.91\pm 0.13\text{GPa}$ 。

孔兹岩典型的矿物组合是石榴石+夕线石+堇青石+石英+斜长石+云母+石墨。石榴石是富含镁铝榴石分子( $38\%\sim 42\text{mol}\%$ )的铁铝榴石( $53\%\sim 57\text{mol}\%$ )。堇青石有较高的MgO含量。据计算(刘宇光 1989; 阎月华 1995),孔兹岩系高峰变质作用的温度和压力,在整个华北地台麻粒岩相带的同类岩石中是最高的。它们的矿物平衡温度平均为 $700^\circ\text{C}$ 左右,压力约 $0.6\sim 0.7\text{GPa}$ 。

红旗营子群的斜长角闪岩典型的矿物组合是蓝绿色角闪石+斜长石+石英+黑云母,有些样品含透辉石,有些含绿帘石。部分岩石含细粒石榴石。变质沉积岩中含有十字石。它们明显受到退变质和晚期韧性剪切形变的影响。不同样品变质作用温度压力计算的结果有较大的差别,总体是高压角闪岩相到绿帘角闪岩相,变质温度 $500\sim 600^\circ\text{C}$ ,压力约近 $0.5\text{GPa}$ (刘宇光 1989)。

#### 4.3 地球化学性质的变化

该剖面不同类型的岩石在地球化学性质上表现出规律性变化。蔓菁沟和瓦窑口的基性高压麻粒岩和中酸性麻粒岩的矿物组成是耐火的,不含角闪石、黑云母等含水矿物。中酸性麻



粒岩与一般的太古宙灰色片麻岩地体相比明显低 Si 和 Al, 它们的  $\text{SiO}_2$  含量从 56% 到 70%, 但绝大多数样品为 66%~63%。在 An-Ab-Or 图解上大多数为英云闪长岩, 少数为石英闪长岩和闪长岩, 没有样品落到奥长花岗岩区(阎月华 1994)。瓦窑口的岩石以中酸性麻粒岩占 85%, 基性麻粒岩占 15% 计算, 得出的  $\text{SiO}_2$  平均含量是 61.85%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 15.49%。这与 Kapuskasing 最下部地壳类似。后者包括辉长岩层在内,  $\text{SiO}_2$  含量是 57.783%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  是 15.769%。若将蔓菁沟基性麻粒岩与瓦窑口的中酸性麻粒岩一起计算, 则可以得出与 Kapuskasing 相同的下地壳化学成分。基性麻粒岩和中酸性麻粒岩的另一特点是总体上表现出生热元素亏损的趋势。它们有低的  $\text{K}_2\text{O}$  和 Rb 含量(6~60 $\mu\text{g/g}$ )。高压麻粒岩的 K/Rb 比值在 250~1000 之间。U 含量是 0.06~1.7 $\mu\text{g/g}$ , Th 含量是 0.4~6 $\mu\text{g/g}$ 。中酸性麻粒岩的 K/Rb 比值在 200~550 之间(图 3a), Rb/Sr 比值为 0.02~0.049(图 3b), U 含量是 0.06~1.7 $\mu\text{g/g}$ , Th 含量是 0.4~6 $\mu\text{g/g}$ 。麻粒岩的 Th/U 平均为 2.5(图 4)。Dharwar 麻粒岩带的 U 含量是 0.17~74 $\mu\text{g/g}$ , Th 含量是 0.2~50 $\mu\text{g/g}$ , Th/U 比值是 0.1~11.3, 平均为 3.1(Atall et al. 1978), 比我们研究的麻粒岩略高。孔兹岩和角闪岩相岩石的生热元素及其比值也表示在图 3 中, 它们的生热元素含量逐步升高, 不具亏损的趋势。本区麻粒岩的流体包裹体为  $\text{CO}_2$ , 而不是  $\text{H}_2\text{O}$ , 在孔兹岩中则含有较多的  $\text{H}_2\text{O}$  流体包裹体, 这是本区麻粒岩地球化学性质的第三个特点。这种性质在 Dharwar 下地壳剖面中已有较为充分的研究, 并被作为下地壳的重要特征之一。

华北怀安-丰镇-尚义的麻粒岩-角闪岩系在岩性、变质程度和地球化学特征诸方面, 都符合下地壳定义和建立下地壳剖面的原则, 所以我们有理由在华北建立一个太古宙克拉通型下地壳剖面。

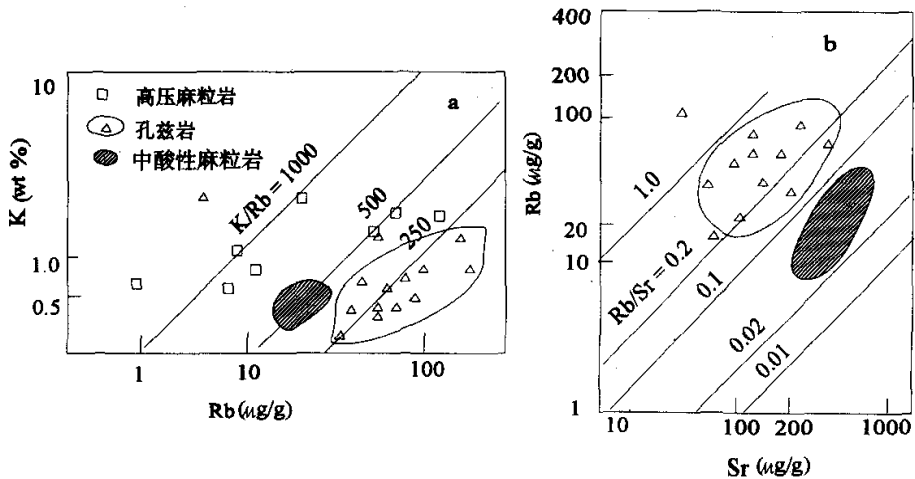


图 3 变质岩石的 K-Rb(a)和 Rb-Sr(b)图解

Fig. 3 Diagram of K-Rb(a) and Rb-Sr(b) for metamorphic rocks

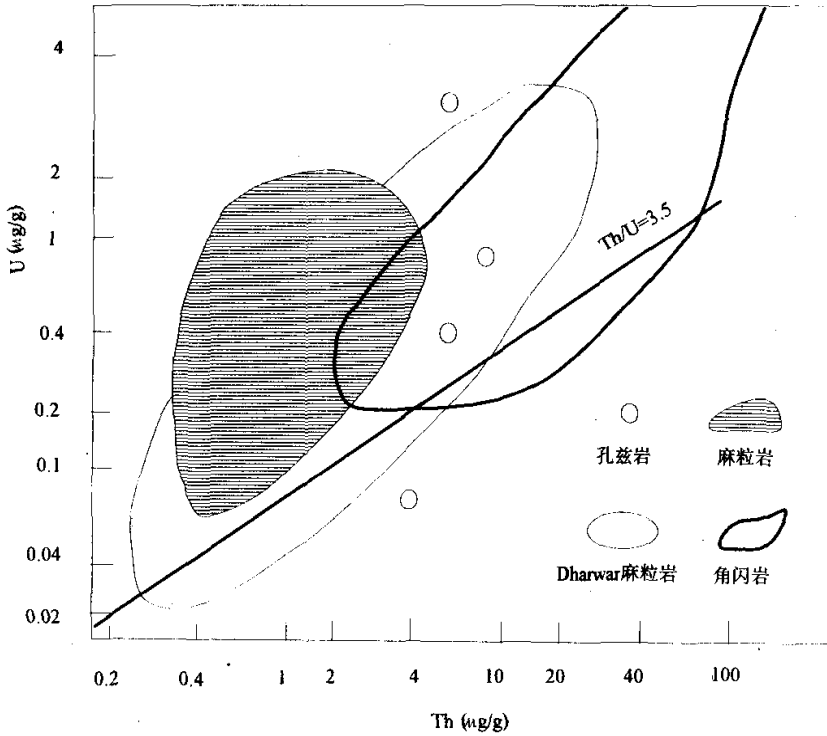


图4 变质岩石的 U-Th 图

Fig. 4 Diagram of U-Th in metamorphic rocks

## 5 与世界其他典型大陆下地壳剖面的对比

从以上描述可以看出,本区的下地壳剖面与经典的意大利 Ivrea 带有一定程度的相似性,与两种太古宙下地壳剖面(Kapuskasing 挤压抬升型和 Dharwar 扭压掀斜型)有更大的可比性(图5)。Ivrea 带是世界上第一个被确立的大陆下地壳剖面(Percival et al. 1992)。在那里从北和北西到南东出露麻粒岩相到角闪岩相的变质岩石。在麻粒岩地体北缘出露的超镁铁质岩石是地幔岩片,与其相邻的镁铁质麻粒岩(石榴辉长片麻岩)是大陆壳最下部岩石,二者之间的界限被认为是代表了出露于地表的大陆莫霍面。镁铁质麻粒岩的矿物组合是石榴石+单斜辉石+斜长石+紫苏辉石。变质温度为 700~800℃,压力为约 0.8~1.1GPa。再向东南为高级变质的副片麻岩,包括互层的大理岩和角闪岩。副片麻岩的变质温度压力是 750℃, 0.6GPa。Ivrea 剖面的变质压力变化与本区的下地壳剖面类似,而蔓菁沟高压麻粒岩的压力比 Ivrea 基性麻粒岩更高些。Dharwar 和 Kapuskasing 两个太古宙下地壳剖面都没有高压麻粒岩

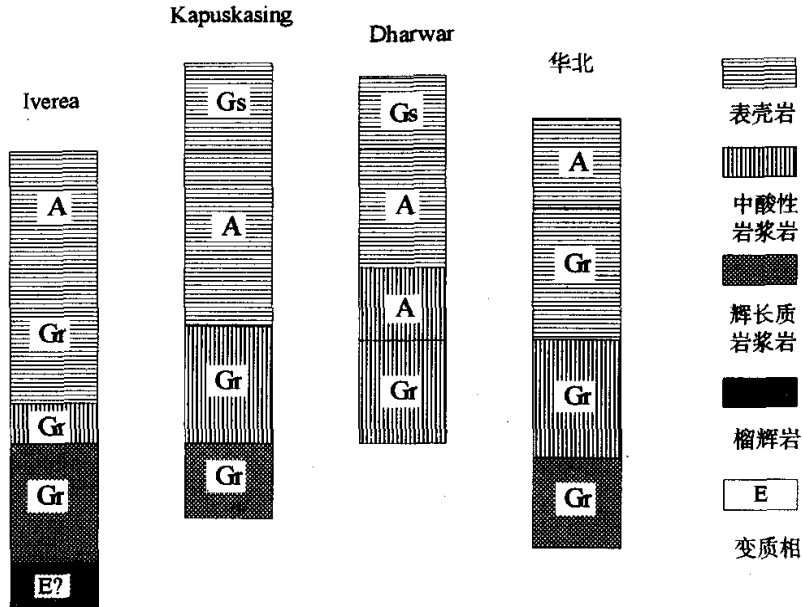


图5 下地壳柱状示意剖面对比图

Gs为绿片岩相; A为角闪岩相; Gr为麻粒岩相; E为榴辉岩相

Fig. 5 Comparison of vertical sections of the lower crust

层,而且 Dharwar 下地壳还缺乏辉长质岩石单元。它的最下部单元是麻粒岩相二辉紫苏花岗岩(英云闪长质麻粒岩),然后变为 Sargar 麻粒岩相灰色(英云闪长质)片麻岩和角闪岩相灰色片麻岩,最上部是 Dharwar 角闪岩-绿片岩相绿岩带。变质压力从 1.0GPa、0.8~0.7GPa、变为 0.6GPa。在矿物流体包裹体和微量元素的变化上也有明显的规律,即最下部为 CO<sub>2</sub> 流体包裹向上体变为 H<sub>2</sub>O 流体包裹体增多,生热元素由上向下有亏损的趋势。Kapuskasing 剖面最下部是麻粒岩相变质的镁铁质麻粒岩和斜长岩,矿物组合是石榴石+单斜辉石+斜长石+角闪石,有时含斜方辉石和石英,温度 700~800℃,压力 0.8~0.9GPa。然后是麻粒岩相的英云闪长岩及副片麻岩,变质压力 0.5~0.6GPa。最上部是角闪岩相-绿片岩相的表壳岩,变质压力 0.2~0.3GPa。与 Kapuskasing 挤压抬升型下地壳比较,本区剖面也有镁铁质部分。Kapuskasing 的镁铁质部分,是由麻粒岩相变质的辉长岩-斜长岩层状岩体组成的(Percival 1988; 1992)。本区的基性高压麻粒岩的原岩是变质的辉长岩(郭敬辉等 1993)。它们很可能就是本区最下部地壳的代表。可惜的是在其东面,由于受到晚期构造的影响,它们与涧沟河组变质火山沉积岩系、孔兹岩系和怀安杂岩构造交汇的常峪口和葛峪口一带以及在二道岭一带,被元古界覆盖和晚期花岗岩侵蚀;在它的西面,受大同坳陷的影响,被新生代盆地截断,

因此我们至今尚未完全查清它们在横向上的延展规模。本区剖面与其他剖面一样各部分之间均呈断层接触。

## 6 几个有关问题的讨论

本文建立的大陆下地壳剖面包括了最下部的高压基性麻粒岩到上部的角闪岩相表壳岩。这是符合 Bohlen (1987) 设想的完整的下地壳剖面的。然而世界上大多数下地壳剖面缺失或不包括高压基性麻粒岩部分, 新的地球物理资料证明麻粒岩相的奥长花岗岩具有与基性麻粒岩相同的地震波, 由此 Rudnick (1990) 提出稳定的大陆下地壳的最下部岩石是麻粒岩相的中酸性岩石而不是高压基性麻粒岩。本文的下地壳剖面除了高压基性麻粒岩段是属于桑干构造带之外, 其余各岩性段都属于怀安古陆。那么真正代表本区稳定大陆下地壳的是否仅仅是由跨越瓦窑口(中酸性麻粒岩)到尚义(角闪岩相表壳岩)的剖面(即被构造掀斜露出地表的怀安古陆的基底)? 高压基性麻粒岩的地质意义是什么? 这就引出了对下列问题的讨论和思考。

### 6.1 暴露于地表的下地壳剖面能代表本区现存的稳定大陆的下地壳吗?

被某种构造机制掀斜并抬升于地表的下地壳剖面, 包括前寒武纪和显生宙的, 以及不同类型的, 都是出露于重要的大地构造位置的。如 Ivrea、日高、Kohistan 等 (Percival et al. 1992), 被认为是活动大陆边缘 (Andean-Cordilleran 型) 的增生柱 (accretionary prisms) 或岛弧带的增生楔 (accretionary wedges)。有争议的前寒武纪剖面, 也有同样的构造模式。如 Newton (1988) 推测 Dharwar 带是 Andean 型大陆边缘, Hoffman (1988) 推测所有的太古宙麻粒岩带都是大陆碰撞带。在这种构造带中, 不仅可以看到如上述几个例子中的代表下地壳的变质岩, 甚至可以看到更高压的变质岩, 如最近在巴基斯坦喜马拉雅带发现了榴辉岩 (Tonarini et al. 1993), 在 Ivrea 带的西南侧与麻粒岩带相连的部位被确定为榴辉岩带 (DalPlaz 1991) 等。一个疑问是在该部位出露的高压变质岩能够代表稳定大陆的下地壳吗? 它们或许只是某种构造机制下, 特别是地壳构造加厚过程中, 在特定的构造环境形成的, 并且是不稳定的、难以保存的最下部地壳岩石, 在以后的构造过程中变化, 多以残留体的型式出露于花岗岩或其他岩浆岩中。蔓菁沟高压麻粒岩地体和桑干构造带其他地段的花岗片麻岩中的高压麻粒岩和退变榴辉岩包体可能也具有这样的地质意义。这样就存在两种可能, 一是蔓菁沟高压麻粒岩代表的是华北克拉通下地壳的最下部岩石组成; 另一种可能是高压基性麻粒岩只形成和存在于特定的构造部位, 是板底垫托形成的过渡性地壳单元。华北稳定的克拉通下地壳剖面是相当于出露于瓦窑口到尚义的由中酸性麻粒岩到角闪岩相表壳岩的岩石单元。

### 6.2 火山岩中的下地壳捕虏体能代表本区稳定大陆下地壳的岩石吗?

一些研究者认为碱性玄武岩或金伯利岩中的麻粒岩和榴辉岩捕虏体代表了稳定大陆下地壳的岩石。此类捕虏体主要有榴辉岩 (Ec), 石榴基性麻粒岩 (MGG), 基性麻粒岩 (MG), 长英质麻粒岩 (FG), 角闪岩 (Am), 少量副片麻岩 (PG) 和斜长岩 (An)。这些捕虏体的数量大大少于地幔岩捕虏体。作为一种旁证, 如果碱性玄武岩中的麻粒岩或榴辉岩捕虏体能代表下地壳, 那么出露于本文研究区内的大同-内蒙丰镇, 以致张家口的新生代玄武岩中应有

与桑干构造带中的高压麻粒岩相当的捕虏体。然而在研究很详细的资料中,几乎所有的捕虏体都是地幔捕虏体。樊祺诚(私人交流)最近在张家口地区汉诺坝和阳原采集的碱性玄武岩中的麻粒岩捕虏体样品有石榴辉石岩,二辉麻粒岩和长英麻粒岩。石榴辉石岩由单斜辉石和石榴石组成。单斜辉石的组分主要是透辉石,与本区高压麻粒岩的辉石类似,石榴石则含有较高的镁铝榴石组分(>50%)。有可能是与地幔有关的变质堆晶岩,而不是和蔓菁沟高压麻粒岩相当的岩石。可惜的是我们还未在这些样品中获得同位素年龄。据岩相学推测它们可能比蔓菁沟麻粒岩要年轻得多。它们的石榴石的后成合晶由尖晶石、斜长石和辉石组成,与世界其他地区麻粒岩捕虏体的变质作用完全相同,是麻粒岩捕虏体在金伯利岩和碱性玄武岩中烘烤的结果。因此我们初步推测在阳原-张家口地区,由捕虏体代表的最下部地壳岩石与蔓菁沟基性麻粒岩代表的最下部地壳岩石是不同的。由捕虏体岩石来代表本区稳定大陆最下部地壳的物质组成仍然是有疑问的。由数量相对较多的榴辉岩和石榴基性麻粒岩捕虏体计算的变质压力多高于1.4~1.8GPa,由此推算的地壳厚度大于50km甚至达100km,这个厚度已大大超过了由地球物理方法得出的地壳厚度。而且在克拉通和稳定大陆内形成的基性玄武岩或金伯利岩也是线状分布的岩带,推测应是由于地幔热柱或其他构造因素形成的特定构造环境的产物,由这类捕虏体推断整个大陆存在一个榴辉岩或镁铁质麻粒岩壳仍然依据不足。这类捕虏体岩石很可能是在某种壳幔作用机制,包括板底垫托作用的产物(Kay et al. 1992)。

### 6.3 稳定大陆区下地壳最下部的代表性岩石是什么?

越来越多的数据表明,如果用太古宙克拉通内的麻粒岩相岩石代表下地壳,它们也与用地球物理方法得到的下地壳的各种指标相符合(Rudnick 1990),即麻粒岩相的奥长花岗岩、英云闪长岩和石英闪长岩类也具有镁铁质岩石的地震波速。由此一些研究者认为出露于地表的中-酸性麻粒岩地体,应为最下地壳岩石的真正代表。它们的平均或典型成分是石英闪长岩。

如果蔓菁沟高压麻粒岩体和桑干构造带中的高压麻粒岩和退变榴辉岩的确是在华北克拉通太古宙特定构造带内形成的,那么它们之所以能够保存下来并得以出露,是因为它们在太古宙末的构造热事件中沿桑干带进入了中部地壳,它们所代表的下地壳并未持续保存到现代。而该区碱性玄武岩中的麻粒岩辉石岩和石榴辉石岩的捕虏体不同于太古宙麻粒岩地体中的高压麻粒岩和退变榴辉岩,可能是显生宙地质作用在特定构造环境形成的新的最下地壳岩石。太古宙的下地壳早已不复存在。

本区的稳定大陆区下地壳最下部岩石是什么,我们把注意力集中于瓦窑口中酸性麻粒岩。瓦窑口中酸性麻粒岩的变质变形、地球化学、流体包裹体特征,以及岩性均匀,缺乏表壳岩等,都似乎是下地壳的标志。它们的矿物组成是耐火的,不含角闪石、黑云母等含水矿物;它们具有生热元素和大半径离子造岩元素(K, U, Th等)低含量的地化特征,它们与一般的太古宙灰色片麻岩相比明显低Si和Al,为近于中性的化学成分;它们的流体包裹体为CO<sub>2</sub>;它们没有混合岩化现象,不含表壳岩包体;它们在构造上表现出应变硬化的特征。刘宇光(1989)计算的高峰标志条件是838±60℃,压力平均是0.97±0.13GPa,地壳厚度在30~35km。地热梯度约为30℃/km。这可能代表了比较稳定的大陆壳厚度。若以同样的地热梯度计算,下延至35~40km或更深,温度将升至1050~1200℃或更高,对于中酸性麻粒岩来说已达到熔融温度。若在这样的地壳深度,其物质组成应为辉长岩质或超基性。但这样的地壳厚

度已经大大超过正常的稳定克拉通大陆壳的厚度。

有关太古宙和后太古宙麻粒岩相地体之间以及由此推论的太古宙和后太古宙下地壳之间是否存在差异的问题,近年来也得到重视。Rudnick et al. (1990)通过元素和元素对的直方图研究,认为除 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{MgO}$ 有轻微差别外,在成分上无实质差别。孙勇和 Bourne (1995)在进一步建立全球麻粒岩地球化学数据库后,用判别分析得出更为明确的结论,即二者不存在有意义的差别,Rudnick et al. (1990)的个别元素有轻微差别的原因是样品仍不够全面的原因。在主元素地球化学上,大陆下地壳类似贫铝的石英闪长岩。

#### 6.4 太古宙地壳的地热梯度和下地壳流变

一般认为前寒武纪变质地热较高,变质压力相对较低。然而对太古宙地热梯度的计算多用麻粒岩样品。如果用绿岩带中低变质的岩石就得出这样的结论。用麻粒岩来计算的世界大多数太古宙克拉通和我国华北麻粒岩的计算结果是在 $20\sim 29^\circ\text{C}/\text{km}$ (赵宗溥 1994)。麻粒岩相变质作用是在热异常的条件下发生的,与大量花岗岩形成一样,是大陆地壳形成和演化中的一种地质过程。用它来推演地热梯度是可疑的。即使假定全球热流量在前寒武纪比现代高,对其相应的地质构造仍不清楚。Burke et al. (1978)和 Bickle et al. (1978)认为高热量可被海洋岩石圈的加速生成和冷却耗散,而不影响大陆地质热流。如是,则可能存在厚而稳定的早前寒武纪地壳。

假如以下两个假设能成立,即(1)太古宙地热梯度并不异常高和(2)太古宙麻粒岩代表实际的大陆下地壳,那么太古宙麻粒岩的变形特征即代表下地壳的变形特征,可以通过麻粒岩的变形来讨论下地壳的流变性质。

本区下地壳剖面麻粒岩的韧性变形和剪切是很发育的。深层次的中酸性和基性成分岩石的高温糜棱岩很典型,新生晶矿物组合可达到角闪岩相和麻粒岩相。这些与显生宙暴露于地表的下地壳的流变学特征相同(Rutter et al. 1992)。桑干构造带和凉城-土贵乌拉剪切带都是难得的研究实体。

#### 6.5 早前寒武纪是否存在大陆碰撞以及桑干构造带的形成和下地壳剖面的抬升

高压麻粒岩和退变榴辉岩的存在为我们研究该区太古宙地壳演化以及晚太古代至早元古代克拉通化的构造过程提供了新的看法。Smelov et al. (1993)将退变榴辉岩作为早前寒武纪存在大陆基底逆冲作用的证据。Ellis (1992)提出的构造模式是:大陆岩石圈的拆离和A型俯冲。Williams et al. (1994)则将含退变榴辉岩的加拿大地盾晚太古代 Striding-Athabasca 构造带解释为 Hearne 和 Rae 岩石构造省之间的古老碰撞带。现在许多岩石学研究表明,许多所谓的太古宙低压麻粒岩是高压组合的退变产物(Carswell et al. 1990),尤其是前寒武纪高压麻粒岩和退变榴辉岩的不断发现,更证实了这一论点。Kroner (1982)曾提出,虽然太古宙全球的地热梯度相当高,但麻粒岩地体的矿物组合表明大陆壳的平均地热梯度仍是正常的,并不明显高于显生宙。还有证据显示,大陆克拉通地区在太古宙中晚期已经形成了有一定厚度和规模的刚性大陆岩石圈板块(Wells 1979; 钱祥麟 1985)。本文研究区含高压麻粒岩-退变榴辉岩的桑干构造带很明显是怀安杂岩和恒山杂岩之间构造作用的产物,它的形成过程直接反映太古宙末至早元古代怀安杂岩和恒山杂岩之间构造作用的性质。翟明国等(1992)曾推测该

带可能是怀安杂岩和恒山杂岩之间的碰撞带。然而,这种观点成立与否尚需要切实的证据和充分的论证。同位素年代学资料显示高压麻粒岩的形成时间(2650Ma)明显早于这条构造带的形成年代(2500Ma),并且高压麻粒岩的分布并不局限于该带。由此郭敬辉(1995)最近假设桑干带更有可能是壳内不同构造单元之间的拆离带。

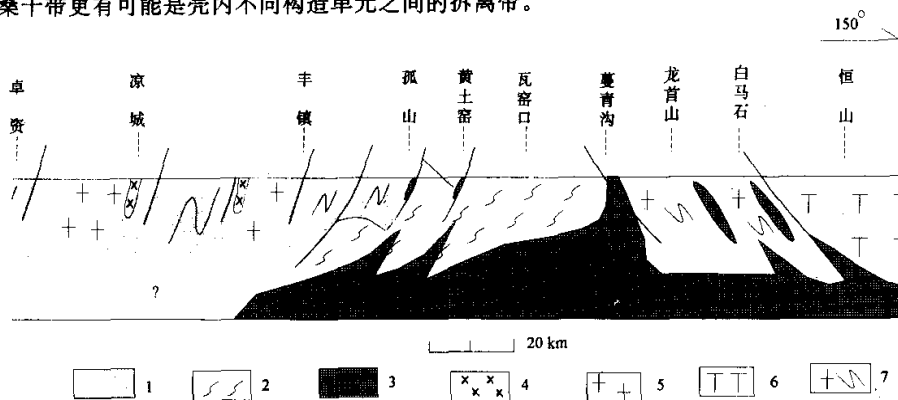


图6 晋冀内蒙交界地区早前寒武纪构造示意图

1. 孔兹岩; 2. 怀安杂岩; 3. 高压基性麻粒岩; 4. 变辉长岩; 5. 花岗岩; 6. 恒山杂岩; 7. 花岗片麻岩

Fig. 6 Sketch Precambrian tectonic map of Hebei-Shanxi-Nei Mongol juncture region

图6是本区早前寒武纪构造示意图,表示了南从恒山,北偏东向到卓资山(图1中B-B')的岩石组合和构造特征。在恒山和瓦窑口之间的白马石-龙首山-蔓菁沟即为桑干构造带,它分割了恒山陆块和怀安陆块。桑干构造带总体上南倾,可以假设它代表了太古宙末大陆岩石圈的陆内拆离构造及随后发生的怀安陆块仰冲于恒山陆块之上和基底逆掩。以蔓菁沟高压基性麻粒岩为代表的辉长岩以板底垫托的方式附加于以瓦窑口中酸性麻粒岩为代表的下地壳之下。构造掀斜作用出露了蔓菁沟-瓦窑口-丰镇-卓资的下地壳剖面。在瓦窑口,中酸性麻粒岩的片麻理平缓,然后变为北倾。伸展-滑拖作用形成不同岩片的叠置,并导致高压麻粒岩在黄土窑-孤山地区的孔兹岩系和麻粒岩-片麻岩系结合部位的出露。

## 参 考 文 献

- 田永清. 1991. 五台山-恒山绿岩带地质及金的成矿作用. 太原: 山西科技出版社, 13~101
- 刘宇光. 1988. 冀西北及相邻地区的早前寒武纪地质及地壳演化. 博士论文. 北京: 中国科学院地质所
- 孙勇, J. H. Bourne. 1995. 太古代和后太古代麻粒岩相地体成分判别分析及大陆下地壳成分模型. 西北大学学报(出版中)
- 李江海, 钱祥麟. 1995. 恒山太古宙末期不整合界面及其克拉通演化意义. 地质科学(出版中)
- 赵宗溥等著. 1994. 中朝准地台前寒武纪地壳演化. 北京: 科学出版社, 30(1): 19~28
- 赵宗溥. 1995. 再论陆内型造山作用. 地质科学(出版中)
- 钱祥麟, 崔文元, 王时麒. 1985. 内蒙冀东太古界麻粒岩相带的演化. 地质研究论文集. 北京大学出版社, 20~29

- 郭敬辉, 刘宇光, 夏毓亮. 1991. 中期准地台最古陆核下太古界怀安杂岩: Pb 同位素年代学证据. 中国科学院地质所岩石圈开放实验室 89~90 年报. 北京: 中国科学技术出版社, 115~118
- 郭敬辉, 翟明国, 李江海, 叶发广, 李永刚. 1995. 华北克拉通早前寒武纪桑干构造带的岩石组合特征和构造性质. 岩石学报, 12 (2): 193~207
- 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 李永刚, 阎月华, 张雯华. 1993. 怀安蓟青沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学 and 同位素年代学. 岩石学报, 9 (4): 1~13
- 阎月华. 1994. 大同孤山含石榴石麻粒岩的成因讨论. 见: 钱祥麟和王仁民主编, 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 199~209
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 李永刚, 张雯华. 1992a. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及其初步研究. 中国科学 (B) (12): 1325~1300
- 翟明国, 郭敬辉, 涂湘林. 1992b. 中国国华北高压麻粒岩及其对深部地壳研究的意义. 地球科学进展, (6): 60~63
- 翟明国, 郭敬辉, 李永刚. 1994. 华北晋冀蒙交界地区高压麻粒岩带和相邻岩石组合的性质. 见: 钱祥麟和王仁民主编, 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 21~30
- 翟明国, 郭敬辉, 李江海, 阎月华, 李永刚, 张雯华. 1995. 华北太古宙克拉通发现退变榴辉岩. 科学通报, 40 (17): 1590~1594
- Atal B S, Bhalla N S, Lall Y, Mahadevan T M and Udas G B. 1978. Radioactive elemental distribution in the granulite terrains and Dharwar schist belts of Peninsular India. In: *Archaean Geochemistry* (Eds. Windley B F and Naqvi S M), Elsevier, 205~220
- Bickle M J. 1988. Heat loss from the Earth; a constrain on Archaean tectonics from the relation between geothermal gradients and the rate of plate production. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 40: 301~315
- Burke K and Kidd W S F. 1978. Were Archaean continents geothermal gradient much steeper than those of today. *Nature*, 272: 240~241
- Bohlen S R. 1987. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. *J. Geol.*, 95: 617~632
- Bohlen S R and Mezger K. 1989. Origin of granulite terranes and the formation of the lowermost continental crust. *Science*, 244: 326~329
- Carswell D A. 1990. Eclogites and eclogite facies: definitions and classifications. In: *Eclogite Facies Rocks* (Ed. Carswell D A), Blackie, New York, 1~13
- Condie K C, Boryta M D, Liu J Zh and Qian X L. 1993. The origin of khondalites: geochemical evidence from the Archaean to Early Proterozoic granulite belt in the North China craton. *Precambrian Res.*, 59: 207~223
- Cong B, Zhai M, Carswell D A, Wilson R N, Wang Q, Zhao Z and Windley B F. 1995. P etrogenesis of ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabieshan, central China. *J. Eur. Mineral.*, (7): 119~138
- Dal Plaz G D, Gosso G, Lardeaux J M et al. 1991. Pressure and Temperature Evolution of Orogenic Belts. *Siena*, 39~109
- Ellis D J and Maboko M A H. 1992. Precambrian tectonics and the physicochemical evolution of the continental crust. I. The gabbro-eclogite transition revisited. *Precambrian Res.* 55: 507~524
- Fountain D M, Percival J and Salisbury M H. 1990. Exposed cross sections of the continental crust-synopsis. In: Salisbury M H and Fountain D M (eds), *Exposed Cross-sections of the Continental Crust*, 653~662
- Hoffman P F, United plates of America, the birth of a craton. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 16: 543~603
- Kay R W, Kay Mahlbulg S and Arculus R J. 1992. Magma genesis and crustal processing. In: *Continental Lower Crust* (Eds, Fountain D M, Aratius K and Kay R W), Elsevier, 423~445
- Kroner A, Compston W, Zhang G, Guo A and Wenyuan. 1987. Single grain zircon ages for Archaean rocks from Henan, Hebei and Inner Mongolia, China, and tectonic implication (Abstract). *Proceeding of the International Symposium on Tectonic Evolution and Dynamics of Continental Lithosphere*, Beijing.
- Newton R C. 1988. The late Archaean high-grade terrain of south India and the deep structure of the Dharwar craton. In: *Exposed Cross-Sections of the Continental Crust* (Eds. Salisbury M H and Fountain D M), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 305~326



- O'Connor J T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratio. US Geol. Surv. Prof. Pap., 525B: 79~84
- Percival J A. 1988. A field guide to the Kapuskasing uplift: a cross section through the Archaean Superior province. In: Exposed Cross-Sections of the Continental Crust (Eds., Salisbury M H and Fountain D H), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 227~286
- Percival J A, Fountain D M and Salisbury M H. 1992. Exposed crustal cross-sections as windows of the lower crust. In: Continental Lower Crust (Eds., Fountain D M, Arculus R, Kay R W), Elsevier, 317~319
- Rudnick L R and Presper T. 1990. In: Granulites and Crustal Evolution (Eds., Vielzeuf D et al.), Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, 523~550
- Rutter E H and Brodie K H. 1992. Rheology of the lower crust. In: Continental Lower Crust (Eds., Fountain D M, Arculus R, Kay R W), Elsevier, 201~257
- Smelov A P and Beryozkin V I. 1993. Retrograded eclogites in the Olekma granite-greenstone region, Aldan Shield, Siberia. Precamb. Res., 62: 419~430
- Tonarini S, Spencer D A and Pognante U. 1991. Geochemical and isotopic characterization of high Himalayan eclogites. Terra, 4 (5): 26
- Weaver B L and Tarney J. 1983. Elemental depletion in Archaean granulite facies rocks. In: Migmatite, Melting and Metamorphism (Eds. Atherton M P and Gribble C D), Shiva Publ., Nantwich, Cheshire, 250~263
- Weber W and Meger K. 1988. An oblique cross section of Archaean continental crust at the northwestern margin of Superior Province, Manitoba, Canada. In: Exposed Cross-Sections of the Continental Crust (Eds., Salisbury M H and Fountain D M), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 327~341
- Wells P R A. 1979. Chemical and thermal evolution of Archaean sialic crust, southern West Greenland. J. Petrol., 20: 187~226
- Williams M L, Hanmer S, Snoeyenbos D and Kopf C. 1994. Structural, petrologic, and tectonic setting of high and very high pressure metamorphic rocks, Striding-Athabasca mylonite zone, northern Saskatchewan. In: First Workshop on UHP Metamorphism and Tectonics (Abstract), Stanford University, A13~A15