

华北晚前寒武纪镁铁质岩墙群的流动构造及侵位机制

侯贵廷¹⁾ 李江海¹⁾ H C HALLS²⁾ 钱祥麟¹⁾

1) 北京大学地质学系, 100871; 2) 多伦多大学地球科学系, 加拿大多伦多

内容提要 华北克拉通中部广泛发育晚前寒武纪镁铁质岩墙群。这些岩墙群未变形和未变质, 保存了清晰完好的流动构造, 完整地反映了前寒武纪岩浆活动的特征和流动构造, 这在上是罕见的。通过对晚前寒武纪镁铁质岩墙群的形态和流动构造研究, 如: 流动线理、矿物组构和磁组构等, 提出岩墙群的侵位方向和侵位方式。结合本区岩墙群与燕辽—中条拗拉槽系的关系以及岩墙群的力学性质, 探讨本区岩墙群的侵位机制。

关键词 镁铁质岩墙群 水平侵位 华北克拉通 燕辽—中条拗拉槽系

1 地质背景

晚前寒武纪镁铁质岩墙群广泛发育在华北克拉通中部, 分布在晋北地区、五台—恒山地区、太行地区、吕梁地区和中条山地区, 中条拗拉槽的东南侧有少量发育(图1)(陈孝德等, 1983, 1992, 1994; 陈亚平等, 1987; 侯贵廷等, 1992)。围岩是太古宙片麻岩和麻粒岩、古元古代石英岩和中元古代长城系岩石(李江海等, 1997a)。在华北克拉通中部高变质岩区的绝大多数镁铁质岩墙群是辉绿岩, 包括两组: 北北西向岩墙和北西西向岩墙。刚性板块伸展引起的大陆裂谷内的拉斑质岩浆沿着先存破裂侵位于太古宙岩石内, 绝大多数中元古代岩墙群具有垂直的稳定走向, 未变形和未变质(Qian et al., 1987; Krogh et al., 1987; 陈孝德等, 1992, 1994; Ernst et al., 1995)。

根据山西全区64个岩墙 K-Ar 年龄的直方图正态统计分析, 岩墙群主要形成于晚前寒武纪的中元古代(1800~1000 Ma), 包括两个侵位高峰期: 1700~1400 Ma 和 1200~1000 Ma(侯贵廷等, 1994)。在燕辽拗拉槽以西北地区, 大部分镁铁质岩墙群形成比较早, 以北北西向镁铁质岩墙群为主, 如: 接近燕辽拗拉槽的五台—恒山地区, 北北西向镁铁质岩墙的形成时代为锆石 U-Pb 年龄 1769 Ma(李江海等, 2001), 进一步证实了以上的分析。而位于燕辽拗拉槽和中条拗拉槽两个拗拉槽交汇处及以西地区, 如:

吕梁地区, 以北西西向岩墙群为主, 大部分岩墙群形成较晚, 既有基性的, 也有酸性的(侯贵廷等, 1994)。

镁铁质岩墙群的侵位时代与燕辽—中条拗拉槽内的火山沉积岩年代一致。根据岩石化学成分分析, 镁铁质岩墙群是大陆裂谷伸展环境的拉斑玄武岩系列, 其成因可能与燕辽—中条拗拉槽的伸展有一定的联系(Qian et al., 1987)。岩墙群在燕辽—中条拗拉槽的交汇处聚集并向西发散(侯贵廷等, 1992)。从燕辽—中条拗拉槽的交汇处, 镁铁质岩浆向西和西北方向侵位, 这表明位于不同地块的镁铁质岩墙群形成于一个与燕辽—中条拗拉槽伸展作用相关的统一构造应力场(张臣等, 1994; 侯贵廷等, 1998)。

2 岩墙群的流动构造

华北克拉通内部的晚前寒武纪镁铁质岩墙群保存了岩墙群侵位时完整的岩浆流动构造。这些反映岩浆活动状态的流动构造在世界前寒武纪地质中是不多见的, 因此, 前寒武纪岩墙群的流动构造研究对于研究前寒武纪岩浆活动和构造运动以及前寒武纪板块构造理论提供了最直接的证据, 具有重要的理论意义。

2.1 形态分析——分枝和分叉

华北克拉通中部的岩墙群基本上走向稳定、产状直立, 平面上为线形, 在晋北大同北部的天镇县北山剖面上岩墙截面出露为透镜状, 向下尖灭, 底部并

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40172066)资助成果。

收稿日期: 2002-04-23; 改回日期: 2002-09-29; 责任编辑: 刘淑春。

作者简介: 侯贵廷, 男, 1964年生。1990年在北京大学地质学系构造地质学专业获硕士学位, 1999年在北京大学地质学系构造地质学专业获博士学位。现为北京大学地质学系副教授, 从事构造地质学和前寒武纪地质学的科研和教学工作。通讯地址: 100871, 北京大学地质学系。

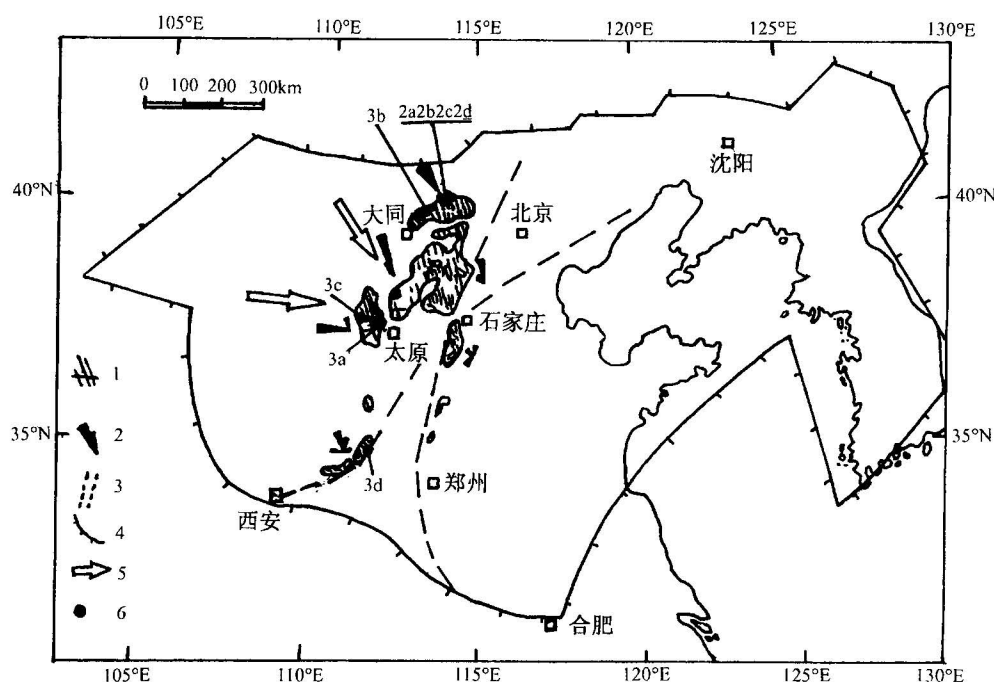


图1 华北克拉通晚前寒武纪岩墙群分布图

(据 Qian Xianglin 等, 1987, 略修改)

Fig. 1 The distribution of Late Precambrian mafic dyke swarms in the central North China Craton (NCC)

(modified Qian Xianglin et al., 1987)

1—镁铁质岩墙群; 2—岩墙群走向玫瑰图; 3—燕辽—中条拗拉槽; 4—华北克拉通边界; 5—最大主压应力方向; 6—流动构造点

1—Mafic dykes swarms; 2—rose chart of dyke swarms; 3—Yanliao—Zhongtiao aulacogens; 4—the margin of NCC;

5—maxim major compressive stress direction; 6—location of flow structures

不是大面积的岩基或岩株。这表明本区的岩墙群可能与北美大陆的元古宙岩墙群一样,不是垂直向上侵位的,岩浆源可能不是来自岩墙群的正下方,而是来自较远处的岩浆源,岩墙一般最深可达脆性破裂的底部,约10~15 km。目前看到的岩墙露头是侵位于上地壳的岩墙后来抬升到地表的结果。

根据岩墙的宽度变化和分枝分叉情况,可以推测岩浆的流动方向。华北克拉通的晚前寒武纪镁铁质岩墙群的宽度一般都在数米至百米,长度一般都在数百米至数公里,有的甚至达到数十公里,长宽比达到100:1以上。绝大多数具有向北北西或向北西西岩墙的宽度由宽变窄而逐渐尖灭的特点。本区的多数岩墙都向北北西或北西西方向分枝分叉或向西北方向发散(侯贵廷等,1994,1998)。一般岩墙的侵位都是沿着岩浆的流动方向侵位,在侵位时使先存的破裂进一步扩展,造成分枝分叉,宽度由宽变窄,因此,岩墙的宽度变化和形态可以反映岩墙侵位时的岩浆流动方向。

根据华北克拉通晚前寒武纪镁铁质岩墙群的分

布规律分析,岩墙群几乎贯穿整个克拉通中部,总体上是由横贯华北克拉通的燕辽—中条拗拉槽西边界出发,向西北发散。岩墙群的高密度区主要集中在燕辽—中条拗拉槽西边界,即主要集中在山西省境内,东西分布约300 km,南北分布约上千公里。岩墙群向西北发散,而收敛于燕辽—中条拗拉槽西边界,说明华北克拉通的岩墙群的岩浆源可能来自燕辽—中条拗拉槽的底部,是裂谷作用的产物,岩墙群的侵位方向是向北北西或北西西。大规模线形的未变形又未变质的岩墙群分布在稳定的克拉通内部,显示在晚前寒武纪华北克拉通已具有刚性板块的特性。因此,这些大规模的线形构造是克拉通板块崩裂伸展的结果(陈孝德等,1994; 侯贵廷等,1998)。

2.2 流动线理

岩墙群侵位于围岩中的破裂内,岩浆流动过程中由于边界的阻力,常常在岩墙群的边部和围岩接触带保留一些流动构造,反映岩墙群侵位时的流动状态。常见的流动构造有流动擦痕、冲痕、矿物线理、定向排列的气孔、定向的捕虏体和矿物组构,以及磁

组构等等。岩墙边界上保存下来的流动构造是指示岩浆流动方向的最直接的证据(Smith, 1987)。

2.2.1 冲痕构造

在岩墙侵位的时候,中部的岩浆冷却较慢,而边部的岩浆冷却较快,这样先冷却的岩浆对后冷却的岩浆有一个阻碍,会在岩墙的内壁上留下冲痕构造,为楔状或板状的凹槽,一般不光滑,头部指示岩浆的流动方向。有的也对围岩壁产生冲击,留下擦痕构造。这在晋北地区的岩墙群边部均可见到(图2a)。如:晋北地区新平镇北山岩墙壁上的冲痕产状为 $240^{\circ}/70^{\circ}$,侧伏方向为右侧伏,侧伏角为 20° (出露地点如图1的2a点),这表明岩浆以小于 20° 的倾伏角近水平向北北西流动。大同市孤山的一条岩墙壁上保留的流动擦痕产状为 $60^{\circ}/70^{\circ}$,侧伏方向为左侧伏,侧伏角为 36° 。这些冲痕构造比较粗糙,不像后期构造作用的产物,后期构造作用常产生断层和阶步,断层擦痕一般比较光滑,并具有硅质或钙质薄膜。另外,以上的冲痕构造与其他流动构造,如气孔拉长方向和矿物线理等方向基本一致,也说明这些冲痕构造是原生构造。

2.2.2 定向的气孔

本区发育的镁铁质岩墙群是基性岩墙群,一般气孔不发育,只有少数岩墙在边部发育定向排列的拉长的气孔,如晋北地区新平的一条岩墙,就保留了拉长的气孔,长宽比 $5:1\sim 10:1$ 。气孔的大头指示岩浆流动方向,与岩墙向北北西侵位的方向是一致的(图2b)(出露地点如图1的2b点)。

2.2.3 定向的矿物线理

在岩墙的边部一般比中部结晶小,但也有一些矿物结晶较大,在岩墙的边部定向排列,肉眼也可以观察到,可以指示岩浆流动方向。在吕梁地区有一条岩墙的壁上保留的矿物定向排列线理产状为 $10^{\circ}/80^{\circ}$,倾伏方向为左侧伏,倾伏角为 23° ,这说明吕梁地区的岩浆是近水平以 20° 左右的倾伏角向北西西流动。在晋北地区,由于岩墙中部岩浆流速快,快速流动的岩浆携带一些较大的斑晶堆积在岩墙分枝分叉处,这些大斑晶的堆积指示岩墙流动方向与分枝分叉方向一致。例如晋北地区新平北山一条岩墙的一个分支的分叉部位就存在斑晶堆积现象(图2c)(出露地点如图1的2c点)。

2.2.4 碎裂斑晶不对称褶皱

在晋北地区新平北山上有一条镁铁质岩墙的边部发育由碎裂斑晶形成的不对称褶皱(图2d)(出露地点如图1的2d)。这是岩墙烘烤边内的长石斑晶由

于岩墙侵位时围岩烘烤边受岩墙侵位的拖曳作用,使长石斑晶撕裂并形成小型的拖曳褶皱,褶皱的长轴指示岩墙的侵位方向是北北西向。这些被拖曳变形的长石斑晶均位于围岩的烘烤边,与岩墙走向基本一致,而与围岩的片麻理的方向不一致。因此,应为岩墙群侵位时由于岩浆的烘烤加热使围岩的烘烤边表现出塑性流动的变形特征,说明这些流动构造是原生的,而不是后期区域构造作用的产物。

2.2.5 定向的捕虏体

岩浆往往是侵位于先存的破裂中,因此在岩浆侵位过程中,会将破裂中的围岩碎片捕虏到岩墙内。在岩浆侵位过程中,由于边缘的阻力大,导致捕虏体的长轴和头部顺着岩浆流动方向,靠近岩墙中部的高流速带,因此捕虏体是最直接的指示岩墙侵位方向的流动构造。在晋北地区和吕梁地区的岩墙中发育大量的围岩捕虏体(图3a)(出露地点如图1的3a点)。

2.2.6 定向的斑晶

对于缺乏直观流动构造的岩墙,可以利用岩墙边部矿物组构的显微构造来分析岩浆的流动方向和特征。岩墙流动构造的矿物组构分析主要利用岩墙边部的长柱状或板状矿物(如斜长石斑晶等)斑晶的定向排列来分析岩浆流动的方向和状态。斑晶的长轴一般顺流向一端靠近岩墙的中部高流速带,另一端则靠在边部低流速带。斑晶长轴与岩墙边界的锐夹角与岩浆流向相反,这种定向排列方式正是岩浆侵位过程中岩墙中部和边部存在流速差的结果(Halls et al., 1995)。吕梁地区娄烦镇的一条北西西向的岩墙边部定向排列的斜长石斑晶长轴指示岩浆流动方向为北西西,与同时存在的捕虏体构造指示的流向一致(图3a)(出露地点如图1的3a点)。晋北地区有许多较窄岩墙的边部发育定向排列的斑晶,其矿物组构分析结果表明晋北地区的岩浆流动方向是近水平朝北北西方向流动(图3b)(出露地点如图1的3b点)。这些显微流动构造没有后期构造作用的痕迹,致密的基质和其中的定向排列斑晶及呈流动样式分布的微晶都反映了岩墙侵位时的流动状态。

2.2.7 磁组构分析

研究晚前寒武纪镁铁质岩墙群的侵位机制一定要以岩墙群的流动构造研究为基础。但是并不是所有的岩墙都具有明显的流动构造,有的甚至不发育明显的显微流动构造。因此,必须寻找新方法进行研究。岩墙的磁组构分析是研究岩墙群侵位机制的新

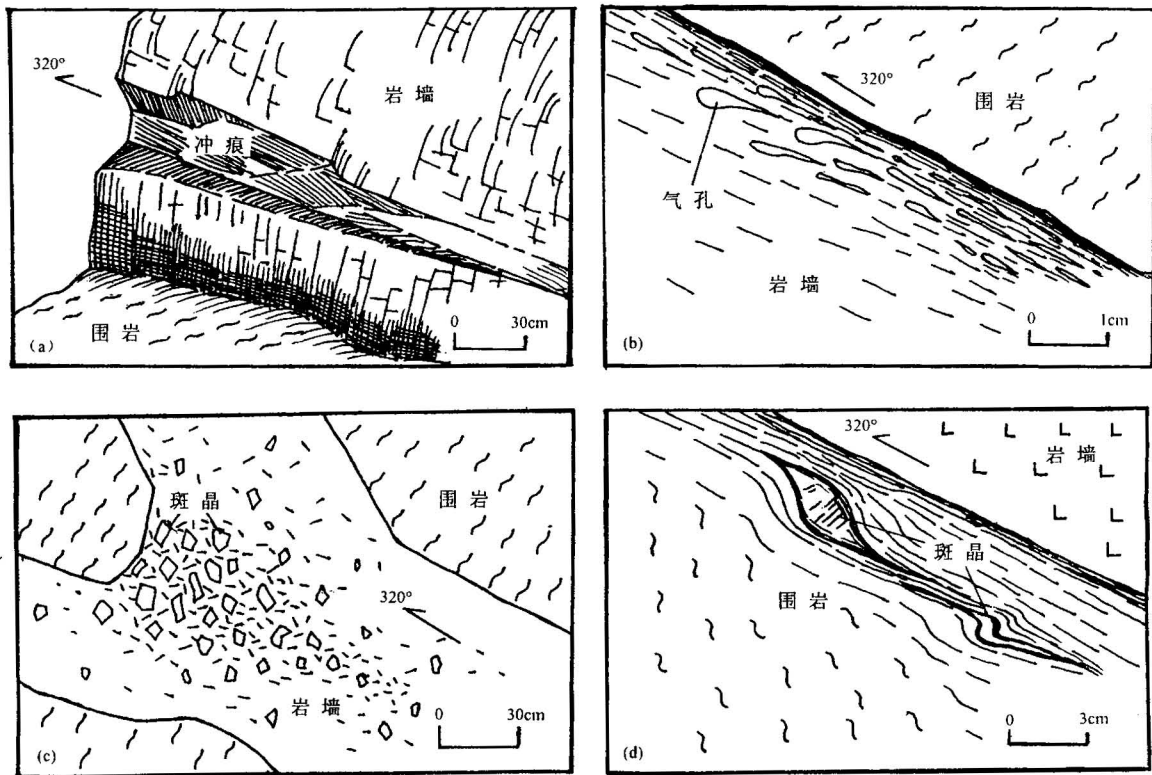


图2 华北克拉通晚前寒武纪岩墙群宏观流动构造

Fig. 2 Flow macrostructure of Late Precambrian mafic dyke swarms in NCC

(a)—冲痕构造;(b)—气孔构造;(c)—聚集斑晶;(d)—褶皱斑晶

(a)—Scour marks; (b)—aligned vesicles; (c)—assemblage phenocrysts; (d)—asymmetric folds of phenocrysts

方法。磁组构是含磁性矿物岩石的一种磁性表征。这种磁性表现为磁各向异性。岩石的磁各向异性是由岩石中的磁性矿物的形状或结晶轴的净排列所引起的,是一种组构,并不是古地磁强度。在未变形的火成岩中,长形磁性矿物的定向排列是岩浆呈液态流动时形成的,而变形的岩石的磁组构各向异性是应变引起的。因此,对于华北克拉通内部的晚前寒武纪镁铁质岩墙群来说,由于未变形和未变质,富含磁性矿物,岩墙群的磁组构特征可以反映岩墙侵位时岩浆的流动状态。

吕梁地区和中条地区的镁铁质岩墙群的磁组构分析结果表明,磁组构的长轴和岩墙边界的锐夹角与岩浆流向相反,即长轴的排列是顺岩浆的流动方向排列。因此,磁组构可以清晰地反映岩墙群侵位时岩浆贯入破裂流动过程中磁性矿物定向排列的状态,由于岩浆的冷却而保留下来。研究结果表明主磁化率长轴倾伏角较缓,一般在 20° 左右,主磁化率长轴与岩墙边界的夹角指示岩墙侵位方向与其他流动构造一致(侯贵廷等,1992;张臣等,1994)。吕梁地区

岩墙的磁组构分析表明岩浆流动方向为北西西向(图3c)(出露地点如图1的3c点),中条地区岩墙的磁组构分析表明岩浆流动方向为北北西向(图3d)(出露地点如图1的3d点)。吕梁地区岩墙的古地磁结果为北偏西 32.4° ,中条山地区岩墙的古地磁结果为北偏西 17° ,可见与磁组构的长轴方向明显不一致,说明这些磁组构结果是岩墙侵位时岩浆流动作用的结果,古地磁场的影响较小。本区的岩墙群磁组构长轴的产状与围岩片麻理的产状并不一致,说明不是后期区域构造作用的产物。

3 岩墙群的侵位机制

3.1 侵位方式

通过对岩墙群流动构造的研究,可以看出岩墙群的侵位方式与一般的岩株或岩基完全不同,而是有其独特的侵位方式,即水平侵位方式。世界上各大克拉通内发育的前寒武纪岩墙群绝大多数是水平侵位的,并与裂谷活动和伸展作用密切相关。华北克拉通内部的晚前寒武纪镁铁质岩墙群的各种流动构造

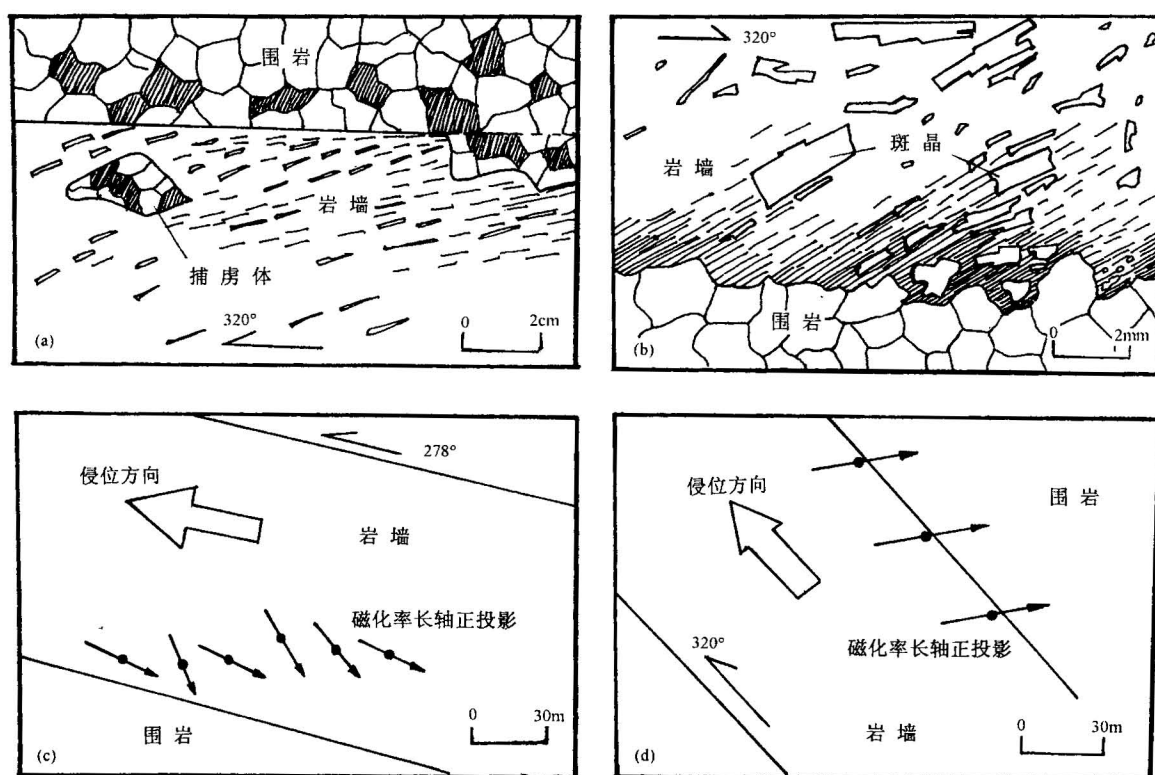


图 3 华北克拉通晚前寒武纪岩墙群显微流动构造

Fig. 3 Flow microstructure of Late Precambrian mafic dyke swarms in NCC

(a)—定向捕虏体; (b)—定向斑晶; (c)—吕梁地区定向磁组构; (d)—中条地区定向磁组构

(a)—Aligned xenolith; (b)—aligned phenocrysts; (c)—aligned magnetic fabric of the Liliang area;

(d)—aligned magnetic fabric of the Zhongtiao area

的研究表明,这些岩墙群绝大多数是以 20° 左右的仰角近水平由东南向西北方向发散,在晋北地区向北北西侵位,在吕梁地区则向北西西侵位。

从华北克拉通内部发育的晚前寒武纪镁铁质岩墙群的几何形态和表现出的先存破裂的力学特征分析,晋北地区的岩墙群保留完整的张剪性先存破裂的特征,也就是说在岩浆侵位前先存的破裂(或节理)是张剪性的,表现为总体上近直立、边界平直、走向稳定,产状不受地形的影响,有的还表现为右行转折和雁列状收尾等张剪特征(侯贵廷等,1998)。在吕梁地区则多表现为追踪张和不规则的边界等张性特征,表明岩浆侵位前先存破裂具有张性(侯贵廷等,1998)。从岩墙群完整地保留先存破裂的力学特征分析,这些岩墙群是岩浆近水平快速贯入先存破裂(或节理),并使破裂沿走向进一步扩展,岩浆侵位并冷却而成。

3.2 侵位机制

在地表出露的岩墙特征仅反映了岩墙侵位的浅

层次特点,在地壳深部岩墙群侵位的直接证据极少,只能从下地壳岩石区出露的岩墙群分析。加拿大地盾南部苏必利尔省前寒武纪镁铁质岩墙群全部发育在上地壳的苏必利尔省,而未切过下地壳的Kapusking构造带。这可能是岩墙群在两个地块的界线处由于韧性剪切带作用才被抬升出露到地表的。这说明岩墙群不是直接从地幔向上刺穿下地壳而到达上地壳的,而是在裂谷附近在地壳深部侵位生成岩墙群,在上地壳与下地壳的过渡带由于伸展作用沿韧性剪切带被剥离出露到地表(Condie et al., 1987)。

根据华北克拉通内发育的晚前寒武纪镁铁质岩墙群的分布分析,岩墙群由北北东向的燕辽—中条拗拉槽系向北西发散,收敛于拗拉槽西界(图1)。流动构造表明岩墙群的侵位方向为北西西或北北西,表明岩浆源可能来自岩墙群收敛区的燕辽—中条拗拉槽系。这些未变形未变质岩墙的单体形态表明岩浆贯入之前的先存破裂空间为张性或张剪性,华北

克拉通中元古代构造应力场的分析结果也说明在华北克拉通的中部处于北西向挤压和北东向伸展拉张的环境(侯贵廷等,1998)。这表明当时是一个伸展的构造环境。这些岩墙群的岩石化学分析也表明华北克拉通晚前寒武纪岩墙群是形成于板内大陆裂谷伸展拉张构造环境下的拉斑玄武岩系列的构造—热事件(侯贵廷等,2001)。地质年代学和岩石化学对比分析结果表明,华北克拉通中部发育的晚前寒武纪镁铁质岩墙群与燕辽一中条拗拉槽系有一定的成生联系(孙枢等,1985;张文佑等,1986;李江海等,1997b,2001;侯贵廷等,2001)。岩墙群的岩浆可能来自燕辽一中条拗拉槽系底部,是板内大陆裂谷拉张伸展的结果。

综上所述,晚前寒武纪华北克拉通内发生广泛的裂谷活动和伸展作用,燕辽一中条拗拉槽系底部的拉斑玄武岩浆以一定的仰角近水平向西北方向侵位于先存的张性或张剪性破裂空间内形成广泛的镁铁质岩墙群。

4 结语

克拉通内广泛发育的大规模岩墙群表明岩墙群侵位时期克拉通处于伸展构造环境。华北克拉通内广泛发育的晚前寒武纪镁铁质岩墙群表明在晚前寒武纪华北克拉通发生了大规模的伸展作用,镁铁质岩浆的侵位过程是华北克拉通在这一时期的重要的构造—热事件。未变形、未变质的镁铁质岩墙群较好地保留了晚前寒武纪华北克拉通内部构造—热事件的岩浆活动状态,尤其明显的流动构造有利于了解晚前寒武纪的构造—岩浆活动及其关系。这些岩墙群的未变形和未变质的特征也表明晚前寒武纪镁铁质岩墙群侵位时,华北克拉通中部在晚前寒武纪已经具有刚性和稳定性。

通过对晚前寒武纪镁铁质岩墙群的形态和流动构造研究,如:流动线理、矿物组构和磁组构等,华北克拉通内部的晚前寒武纪镁铁质岩墙群绝大多数是以20°左右的仰角近水平由东南向西北方向发散,在晋北地区向北北西侵位,在吕梁地区则向北西西侵位。结合本区岩墙群与燕辽一中条拗拉槽系的关系以及岩墙群的力学性质分析,华北克拉通内部晚前寒武纪镁铁质岩墙群的形成机制是在华北克拉通崩裂伸展的大地构造环境下,燕辽一中条拗拉槽系底部的拉斑玄武岩浆以一定的仰角近水平向西北方向侵位于先存的张性或张剪性破裂空间内形成广泛的镁铁质岩墙群。岩墙群的形成与燕辽一中条拗拉槽

系密切相关,有一定的成生联系。

参 考 文 献

- 陈孝德,史兰斌. 1983. 五台—太行辉绿岩岩墙群的初步研究. 科学通报, (16):1002~1005.
- 陈孝德,史兰斌,贾三发. 1992. 华北元古代基性岩墙群研究. 地震地质, 14(4):351~357.
- 陈孝德,史兰斌. 1994. 伸展构造中的基性岩墙群. 见:钱祥麟主编. 伸展构造研究. 北京:地质出版社,71~74.
- 陈亚平,钱祥麟. 1987. 山西吕梁地区晚前寒武纪镁铁质岩墙群的古地磁学研究. 北京大学学报(自然科学版), 2:87~97.
- 侯贵廷,钱祥麟. 1992. 山西镁铁质岩墙群侵位的古地磁学证据. 山西地质, 7(4):416~422.
- 侯贵廷,穆治国. 1994. 华北克拉通晚前寒武纪镁铁质岩墙群的 K-Ar 年龄及其地质意义. 华北矿产地质杂志, 9(3):267~270.
- 侯贵廷,张臣,钱祥麟. 1998. 华北克拉通中元古代镁铁质岩墙群的形成机制及其构造应力场. 地质论评, 44(3):309~314.
- 侯贵廷,李江海,钱祥麟. 2001. 晋北地区中元古代岩墙群的地球化学特征和大地构造背景. 岩石学报, 17(3):352~357.
- 李江海,何文渊,钱祥麟. 1997a. 元古代岩墙群的成因机制和大地构造背景及其古板块重建的意义. 高校地质学报, 3(3):272~281.
- 李江海,钱祥麟,翟明国. 1997b. 华北麻粒岩相构造分区及其早前寒武纪构造演化. 地质科学, 32:254~266.
- 李江海,侯贵廷,钱祥麟, Halls H C, Davis D. 2001. 恒山中元古代早期基性岩墙群的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其克拉通构造演化意义. 地质论评, 47(3):234~238.
- 孙枢,陈国伟,陈志明. 1985. 豫陕中晚元古代边缘裂陷槽的形成与发展. 见:孙枢主编. 华北断块南部前寒武纪演化. 北京:地震出版社, 176~184.
- 张臣,侯贵廷,钱祥麟. 1994. 晋北和吕梁地区晚前寒武纪镁铁质岩墙群侵位的古地磁证据. 地质论评, 40(3):245~251.
- 张文佑,钱祥麟,马福臣,等. 1986. 中国及邻区海陆大地构造. 北京:科学出版社, 575.

References

- Chen Xiaode, Shi Lanbin. 1983. The initial research of diabase dyke swarms in Wutai-Taihang area. Chinese Science Bulletin, 16: 1002~1005 (in Chinese).
- Chen Xiaode, Shi Lanbin, Jia Lanfa. 1992. Study on the proterozoic dyke swarm in North China. Seismology and Geology, 14(4): 351~357 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaode, Shi Lanbin. 1994. Mafic dyke swarms in extensional structures. In: Qian Xianglin, ed. Research on Extensional Structures. Beijing: Geological Press, 71~74 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yaping, Qian Xianglin. 1987. The paleomagnetic study on the late Precambrian mafic dyke swarms in Luliang area of Shanxi. Acta Scientiarum Naturalium, Univeritatis Pekinensis, 2:87~97 (in Chinese with English abstract).
- Condie C K, Bobrow D J, Card K D. 1987. Geochemistry of Precambrian Mafic Dykes from the Southern Superior Province; in Mafic Dyke Swarms. In: Halls H C, Fahrig W F, ed. Geological Association of Canada Special Paper 34, 95~108.
- Ernst R E, Head J W, Partfitt E, et al. 1995. Giant radiating dyke swarms on Earth and Venus. Earth Science Review, 4:229~

- 258.
- Halls H C, Zhang B. 1995. Magnetic polarity domains in the early Proterozoic Matachewan dyke swarm, Canada; A novel method for mapping major faults. In: Baer et al., ed. *Physics and Chemistry of Dykes*. Balkema, Rotterdam, 165~170.
- Hou Guiting, Qian Xianglin. 1992. The magnetic fabric evidence of late Precambrian mafic dyke swarms emplacement, Shanxi. *Shanxi Geology*, 7(4): 416~422 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Mu Zhiguo. 1994. K-Ar ages and their geological significance of late Precambrian mafic dyke swarms in North China Craton. *Journal of Geology and Mineral Resources of North China*, 9(3): 267~270 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Zhang Chen, Qian Xianglin. 1998. The formation mechanism and tectonic stress field of the Mesoproterozoic mafic dyke swarms in the North China Craton. *Geological Review*, 44(3): 309~314 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Li Jianghai, Qian Xianglin. 2001. Geochemical characteristics and tectonic setting of Mesoproterozoic dyke swarms in northern Shanxi. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 352~357 (in Chinese with English abstract).
- Krogh T E, Corfu F, Davis D W, et al. 1987. Precise U-Pb isotopic ages of Diabase dykes and mafic to ultramafic rocks using trace amounts of baddeleyite and zircon. In: Halls H C, Fahrig W F, ed. *Mafic dyke swarms*. Geological Association of Canada Special Paper 34, 147~152.
- Li Jianghai, He Wenyuan, Qian Xianglin. 1997a. Genetic mechanism and tectonic setting of Proterozoic mafic dyke swarms: its implication for paleoplate reconstruction. *Geological Journal of China Universities*, 3(3): 272~281 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianghai, Qian Xianglin, Zhai Mingguo. 1997b. Tectonic division and early Precambrian evolution of granulite belts in North China Craton. *Scientia Geologica Sinica*, 32: 254~266 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianghai, Hou Guiting, Qian Xianglin, Halls H C, Davis D. 2001. Single-zircon U-Pb age of initial Mesoproterozoic basic dike swarms in Hengshan Mountain and its implication for the tectonic evolution of the North China Craton. *Geological Review*, 47(3): 234~238 (in Chinese with English abstract).
- Qian Xianglin, Chen Yaping. 1987. Late Precambrian mafic swarms of the North China Craton. In: Halls H, Fahrig W F, ed. *Mafic Dyke Swarms*. Geological Association of Canada, Special Paper 34, 385~391.
- Smith R P. 1987. Dyke emplacement at Spanish Peaks, Colorado. In: Halls H C, Fahrig W F, ed. *Mafic Dyke Swarms*. Geological Association of Canada Special Paper 34, 273~278.
- Sun Shu, Chen Guowei, Chen Zhiming. 1985. The origin and development of late Mesoproterozoic marginal aulacogens in Henan and Shanxi. In: Sun Shu, ed. *Precambrian Evolution in the Southern North China Block*. Beijing: Geological Press, 176~184 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenyuan, Qian Xianglin, Ma Fuchen, et al. 1986. *The Marine and Continental Tectonics of China and Its Environs*. Beijing: Science Press, 575 (in Chinese).
- Zhang Chen, Hou Guiting, Qian Xianglin. 1994. The magnetic fabric evidence of late Precambrian mafic dyke swarms emplacement in northern Shanxi and Luliang area. *Geological Review*, 40(3): 245~251 (in Chinese with English abstract).

The Flow Structures and Mechanics of Late Precambrian Mafic Dyke Swarms in North China Craton

HOU Guiting¹⁾, LI Jianghai¹⁾, H C HALLS²⁾, QIAN Xianglin¹⁾

1) Department of Geology, Peking University, Beijing, 100871

2) Department of Geoscience, University of Toronto, Canada

Abstract

Late Precambrian mafic dyke swarms are extensively developed in the central North China Craton. These dyke swarms are undeformed and unmetamorphosed with beautiful flow structure to show the characteristics of Precambrian magma activity, which is rare in the world. The direction and way of the dyke emplacement are proposed based on the study of the shape and flow structures of Late Precambrian mafic dyke swarms; for example, flow lineation, mineral fabric and magnetic fabric. The origin of dyke emplacement is discussed according to the relation between the dykes and the Yanliao—Zhongtiao aulacogens as well as the mechanics of the dykes.

Key words: mafic dyke swarms; horizontal emplacement; Yanliao—Zhongtiao aulacogens; North China Craton