1000-0569/2009/025(03)-0650-58 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

华北基性岩墙群的古地磁极及其哥伦比亚超大陆重建意义*

侯贵廷[1] Henry HALLS[2] Don DAVIS[2] 黄宝玲[1] 杨默函[1] 王传成[1]

HOU GuiTing[1], Henry HALLS[2], Don DAVIS[2], HUANG BaoLing[1], YANG MoHan[1] and WANG ChuanCheng[1]

1. 北京大学地球与空间科学学院,教育部造山带与地壳演化重点实验室,北京 100871

2. 加拿大多伦多大学地球科学系,多伦多

1. *The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*

2. *Department of Geology, Universtiy of Toronto, Toronto, Canada*

2008-11-26 收稿, 2009-01-12 改回.

Hou GT, Halls H, Davis D, Huang BL, Yang MH and Wang CC. 2009. Paleomagnetic poles of mafic dyke swarms from the North China craton and their relevance to the reconstruction of the supercontinent Columbia. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3):650-658

Abstract One geomagnetic pole and two virtual geomagnetic poles (VGPs) are now available from U-Pb dated dyke swarms/individual dykes from the Eastern Block, Central Zone and Western Block of the North China craton. The precise baddeleyite U-Pb age of Hengshan GU dyke in the Central Zone is 1769 ± 3Ma and is part of the Taihang dyke swarm. This swarm has yielded a paleomagnetic pole position at Plat = 36°N, Plong = 247°E(*dp* = 2°, *dm* = 4°). A dyke at location DY in the Eastern Block of the North China craton yields a baddeleyite U-Pb age of a baddeleyite 1620.8 ± 6.9Ma, and a VGP at Plat = 6.9°N, Plong = 81.9°E (*dp* = 4.31°, *dm* = 6.09°). A nearby dyke at site LW4 gives a zircon SHRIMP U-Pb age of 1157 ± 18Ma, and a VGP at Plat = 27.1°N, Plong = 162°E(*dp* = 15.8°, *dm* = 18.7°). Although secular variation has not been removed from the Shandong data, comparison of these three paleomagnetic pole positions of the North China craton with the Mesoproterozoic APWP of the Canadian Shield allows a continental reconstruction whereby the North China craton joined the supercontinent Columbia with the Canadian Shield from 1800 to 1600Ma, and the North China craton separated from the Canadian Shield sometime between 1600 to 1200Ma in response to the final break-up of the supercontinent Columbia.

Key words Mafic dyke swarms; Paleomagnetic pole; North China craton; Canadian Shield; Supercontinent Columbia

摘 要 从华北克拉通的中西部和东部发育的基性岩墙群获得三个精确定年的实际古地磁极位置(VGPs)。华北克拉通中西部恒山GU岩墙的斜锆石U-Pb年龄为1769 ±3Ma,该岩墙的古地磁给出古地磁极位置在北纬36°,东经247°(*dp* =2, *dm* =4);华北克拉通东部DY岩墙的斜锆石U-Pb年龄为1620.8 ±6.9Ma,获得的古地磁极位置为北纬6.9°东经81.9°(*dp* =4.31, *dm* =6.09);东部另一条岩墙LW4的SHRIMP U-Pb年龄为1157 ±18Ma,获得的古地磁极位置为北纬27.1°东经162°(*dp* =15.8, *dm* =18.7)。通过将这三个从基性岩墙获得的华北克拉通古地磁极位置与加拿大地盾的中元古代视极移曲线对比,在中元古代早期(1800~1600Ma),华北克拉通与加拿大地盾一起同属哥伦比亚超大陆,而在中元古代晚期(1600~1200Ma),华北克拉通与加拿大地盾分离,响应哥伦比亚超大陆的最终裂解事件。

关键词 基性岩墙群;古地磁极;华北克拉通;加拿大地盾;哥伦比亚超大陆

中图法分类号 P597.3; P318.44

* 本文受国家自然科学基金项目(40172066, 40314141, 40772121)和国家973项目(2009CB219302)的资助.

第一作者简介:侯贵廷,男,1964年生,教授,从事岩墙群和超大陆重建研究工作,E-mail: gthou@pku.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引言

近些年来，古-中元古代哥伦比亚超大陆的重建成为国际超大陆研究的热点(Zhao *et al.*, 2002; Rogers and Santosh, 2002; Hou *et al.*, 2008a, b)。由于缺乏足够的精确定年的视极移曲线，哥伦比亚超大陆的重建仍处于模式研究阶段，很难获得较准确的哥伦比亚超大陆格局(张世红和王鸿祯，2002；吴怀春等，2005；Zhang *et al.*, 2000; Hou *et al.*, 2008a, b)。精确定年的古地磁极是获得视极移曲线(apparent polar wander path, APWP)和古大陆重建的最基础和最重要的科学数据(马醒华和张正坤，1985；Buchan *et al.*, 2000)。

华北克拉通的大部分古地磁研究工作集中在元古代以来沉积盖层的古地磁研究(张世红等，2000；吴怀春等，2005)，而对华北克拉通前寒武纪结晶基底的古地磁研究较少(Zhang and Piper, 1994)。由于强烈的变质变形作用很难利用前寒武纪变质岩的古地磁进行前寒武纪古陆块位置的恢复，而侵位于前寒武纪结晶基底内的未变形未变质的基性岩墙群具有较强的磁性，分布广泛，是前寒武纪陆块古地磁工作的理想对象。基性岩墙群是前寒武纪构造-岩浆活动事件的时代标志和构造标志，也是超大陆重建的最佳古地磁研究和对比的标志。利用岩墙群的古地磁极和视极移曲线可以深入细致地研究岩墙群所在陆块的构造-岩浆事件和不同陆块的拼贴及超大陆重建。华北克拉通与加拿大地盾一样广泛发育古-中元古代基性岩墙群。本文利用华北克拉通东、西两个陆块上精确定年的古-中元古代基性岩墙群的古

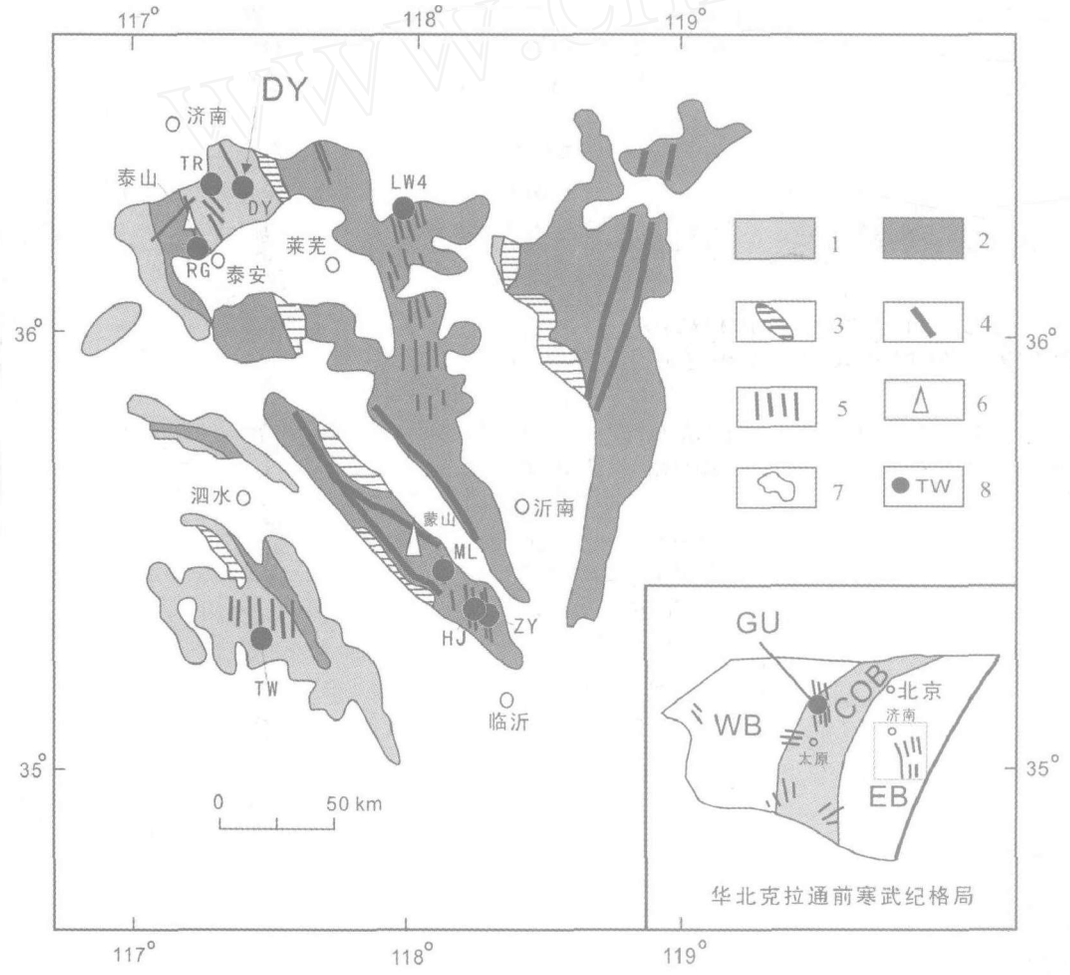


图1 华北克拉通鲁西岩墙群和恒山岩墙的古地磁样品分布图

1-新太古代 TTG 岩区；2-新太古代片麻状二长花岗岩区；3-绿岩带；4-古断裂带；5-基性岩墙群；6-山峰；7-前寒武纪结晶基底；8-采样点；WB-西部陆块；COB-中央造山带；EB-东部陆块；GU 是采自中部恒山区的岩墙群

Fig. 1 The distribution of paleomagnetic samples from Luxi dyke swarms and Hengshan dyke in the North China craton

1-Neoarchean TTG rocks; 2-Neoarchean adamillite granitoid; 3-greenstone belt; 4-paleo-fault zone; 5-mafic dyke swarm; 6-mount; 7-Pre-Cambrian crystal basement; 8-sampling spots; WB-West Block; COB-Central Orogenic Belt; EB-Eastern Block; GU sample is collected from the mafic dyke in the Hengshan

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地磁测试和分析,并对比加拿大地盾视极移曲线,探讨华北克拉通在古-中元古代对哥伦比亚超大陆形成和裂解的响应,进一步夯实所提出的哥伦比亚超大陆模式(Hou *et al.*, 2008a, b)。

2 地质概况

华北克拉通由东部陆块、西部陆块和两者夹持的中央造山带构成(Zhao *et al.*, 2002)。华北克拉通广泛发育前寒武纪基性岩墙群,主要发育时期为古-中元古代 1800 ~ 1000Ma(侯贵廷等, 2000)。华北克拉通前寒武纪基性岩墙群在东、西两个陆块和中央造山带均有广泛发育,主要发育在西部陆块和中央造山带,其次在东部陆块的鲁西地区(图 1)。这些岩墙群代表东、西两个陆块拼合在一起形成完整的统一克拉通后的伸展事件,与同时期发育的燕辽-中条拗拉谷同属华北克拉通早期伸展的产物,与华北南缘同时期的熊耳群大岩浆省及其地幔柱活动密切相关(侯贵廷等,2000, 2001;彭澎等,2004; Peng *et al.*, 2008; Hou *et al.*, 2006a, b, 2008a, b)。

华北克拉通西北部主要发育新太古代的孔兹岩系,中央造山带主要发育新太古代高级角闪岩相的恒山杂岩和恒山阜平杂岩及五台群绿岩带。东部陆块的鲁西地区早前寒武纪结晶基底主要为新太古代早期的高级角闪岩相灰色片麻岩、新太古代晚期的绿岩、TTG、片麻状二长花岗岩和古元古代二长花岗岩系列(庄育勋等,1997;侯贵廷等,2004)。侵位到以上围岩内的基性岩墙群主要以北北西向走向为主,其次为近南北向和北西向,少数岩墙为北东向和东西向(侯贵廷等,1998, 2000, 2001,2002, 2003)。

本文的研究重点是鲁西地区的北北西向和近南北向的基性岩墙群,主要发育在鲁西地块的西部 TTG 岩区和东部二长花岗岩区,如泰山和蒙山附近(图 1)(侯贵廷等,2004, 2005)。鲁西基性岩墙群绝大多数为辉绿岩,另外还有辉长辉绿岩、辉绿玢岩和辉长岩等,走向稳定,倾角一般 80°以上,近直立。这些岩墙均未变形未变质,一般宽 20*m* 左右,长 10km 左右,岩石致密均一,浅表易风化,呈黑褐色,富含镁铁和磁性矿物,具有较明显的磁性,是很好的古地磁信息载体。

华北克拉通最早的未变形未变质基性岩墙为 1841Ma(Hou *et al.*, 2006a; Wang *et al.*, 2007),代表华北克拉通最早的伸展事件。华北克拉通前寒武纪基性岩墙群侵位的高峰期为 1800 ~ 1700Ma (Halls *et al.*, 2000;彭澎等,2004; Wang *et al.*, 2007),也有部分岩墙大约侵位于 1200Ma(Hou *et al.*, 2001)。

有大量的精确年龄数据反映华北克拉通中部恒山北北西向基性岩墙群主要侵位于 1800 ~ 1700Ma,如恒山 GU 岩墙的精确年龄为斜锆石 U-Pb 年龄 1769.1 ± 2.5Ma (李江海等, 2001)。我们最近从东部陆块的鲁西地区获得了两组岩墙群精确年龄:斜锆石 U-Pb 年龄 1620.8 ± 6.7Ma 和锆石 U-Pb

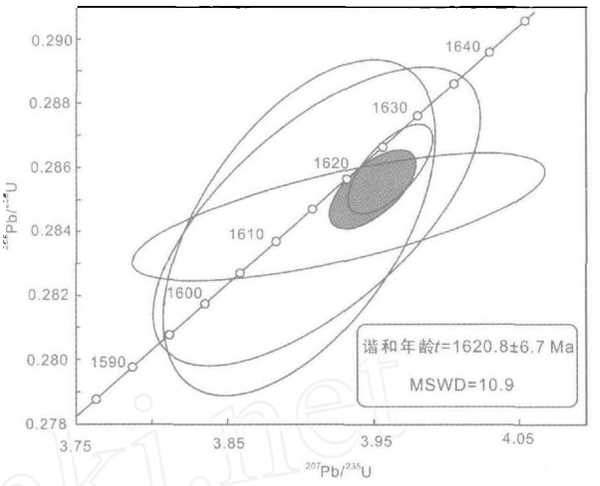


图 2 鲁西 DY 和 TW 岩墙的斜锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 2 Concordia diagram showing U-Pb data points from the analyses of baddeleyites in the mafic dykes TW and DY in the western Shandong Province

SHRIMP 年龄 1157 ± 18Ma。其中位于鲁西地区西部 TTG 岩区内的基性岩墙群形成相对较早(以 DY 和 TW 为代表的岩墙形成于 1621Ma)(图 2),而东部二长花岗岩区内的基性岩墙群形成相对较晚(以 LW4 为代表的岩墙形成于 1157Ma)(侯贵廷等,2005)。在鲁西地块西部 TTG 岩区内的基性岩墙获得的斜锆石年龄是本文的最新测年成果。斜锆石是基性侵入岩内特有的富矿物,可以精确代表基性岩墙的侵入年龄,因此,以上年龄可以代表鲁西基性岩墙群的侵位年龄(表 1 和图 2)。DY 和 TW 两个测年样品的采样位置分别位于鲁西泰安东北部(N36°22.481′, E117°24.070′)和泗水南部山区(N35°26.150′, E117°13.849′)(图 1)。从这两个样品挑选出的 5 粒斜锆石送到加拿大多伦多大学地质学系 U-Pb 定年实验室获得年龄为 1620.8 ± 6.7Ma(图 2)。

华北克拉通东西部的基性岩墙群绝大多数近直立,走向稳定,未发生任何褶曲变形,并未发生变质作用,是基性岩浆沿刚性陆块破裂系统侵位而成的,表明自古元古代华北克拉通完成克拉通化以来构造相对比较稳定。尤其,鲁西地区的灰岩近水平不整合覆盖在前寒武纪结晶基底上,普遍表现为近水平的"凿"地貌,说明鲁西前寒武纪结晶基底区构造稳定,因此侵位于鲁西前寒武纪结晶基底内的古-中元古代基性岩墙群的古地磁可以推演出古-中元古代鲁西地块的古位置和古地磁极。

3 古地磁测试结果和对比分析

华北克拉通东部和中西部发育的基性岩墙群主要以辉绿岩为主,富含镁铁质,副矿物以磁铁矿为主,在野外露头上,罗盘靠近辉绿岩岩墙 10cm 距离时可以发生较明显的磁针偏转,说明具有较强的磁性。因此,基性岩墙群可以作为华

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 鲁西 TW 岩墙和 DY 岩墙的斜锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 Results of baddeleyite U-Pb dating of dykes TW and DY in the western Shandong

样品号	锆石特征	重量 (mg)	U ($\times10^{-6}$)	$\frac{Th}{U}$	全 Pb_t (pg)	普通 Pb (pg)	$\frac{^{206}Pb}{^{204}Pb}$ 平均值	$\frac{^{207}Pb}{^{204}Pb}$ 平均值	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	2σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	2σ	Rh_0	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ 年龄(Ma)	2σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$ 年龄(Ma)	2σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$ 年龄(Ma)	2σ	误差 %
TW	暗色平板状斜锆石	0.0002	263	0.1	14.4	4.5	232.0	37.02	3.928	0.116	0.2845	0.0016	0.69408	1613.8	8.2	1619.4	23.9	1626.7	48.4	0.9
	淡黄色透明斜锆石	0.0002	332	0.2	18.8	0.8	1564.8	170.98	3.961	0.023	0.2860	0.0012	0.71978	1621.4	5.8	1626.2	4.8	1632.5	7.6	0.8
	淡黄色透明斜锆石	0.0002	131	0.1	7.2	1.2	424.5	56.14	3.912	0.091	0.2845	0.0039	0.63788	1613.4	19.3	1616.1	18.8	1619.0	33.5	0.4
DY	棕色平板状斜锆石	0.0001	352	0.1	9.6	1.3	513.5	64.92	3.899	0.077	0.2841	0.0043	0.53476	1612.0	21.7	1613.5	15.9	1615.5	32.2	0.2

由加拿大多伦多大学同位素年代学实验室测试

北克拉通前寒武纪古地磁学研究和超大陆重建研究的理想对象。

华北克拉通东、西两个陆块在新太古代末—古元古代拼合在一起，完成了克拉通化过程。从华北克拉通东、西两个陆块和中央造山带上发育的中元古代基性岩墙群走向介于 320°～330°之间，没有较大的偏差，走向非常稳定，这表明华北克拉通在中元古代形成了统一完整的克拉通后，内部各地块之间没有发生明显的转动等相对位移。我们选择华北克拉通东部的鲁西地区中元古代基性岩墙群为重点研究对象，结合在中西部的恒山-恒山地区中元古代基性岩墙群获得的古地磁数据，对比华北克拉通中元古代各时期的古地磁极。

利用测量基性岩墙群的古地磁，得到古地磁的磁偏角和磁倾角，可以分析岩墙群侵位时的陆块的古地磁极的古纬度和古经度，从而研究缺少构造行迹的早前寒武纪陆块的古板块位置和构造漂移（Halls *et al.*，2000）。

铁磁性物质在古地磁场中由高温状态冷却刚刚降至居里点温度（T_c）以下时，它就会以很大的比率被磁化，而这种磁化只有再受热到高于 T_c 时才能被消除。这样磁性物质在从高温冷却至 T_c 以下时的古地磁场被记录下来。虽然以后的地磁场对其有一些影响，但绝大多数热剩磁是降至 T_c 以下时的古地磁。我们可以通过交变退磁和热退磁方法逐步消除后期叠加的地磁场获得基性岩墙较稳定的原生剩磁古地磁数据（塔林，1978）。

在华北克拉通的恒山和鲁西两个地区的岩墙群古地磁定向样品采集全部利用太阳罗盘和磁罗盘进行两次定向，尽量消除岩墙磁性对磁罗盘的影响。恒山地区的岩墙群主要以北北西向为主，主要侵位年龄为 1800～1770Ma（Hou *et al.*，2006c）。恒山 GU 岩墙群的 19 个岩芯样品的古地磁测量结果表明通过交变退磁和热退磁可以获得稳定的原生剩磁，详细的退磁方法和过程这里略去（侯贵廷等，2000；Halls *et al.*，2000；Hou *et al.*，2001）。

华北克拉通东部的鲁西地区中元古代基性岩墙群以北北西向为主，主要分为两期，1621Ma 和 1157Ma。在鲁西隆起区西部从北至南分别在 TR、DY、RG 和 TW 岩墙样品采集点钻取定向岩芯样品（图 1），在鲁西隆起区东部从北至南依次在 LW4、ML、HJ 和 ZY 岩墙样品采集点钻取定向岩芯样品（图 1），共在 8 个岩墙古地磁采样点获得 80 个岩芯样品。其中，TW 岩墙的 12 个岩芯样品、DY 岩墙的 18 个岩芯样品、HJ 岩墙的 15 个岩芯样品、ML 岩墙的 11 个岩芯样品、TR 岩墙的 9 个岩芯样品、RG 岩墙、LW4 岩墙和 ZY 岩墙分别测试了 5 个岩芯样品。这些定向岩芯样品送到加拿大多伦多大学威尔逊古地磁实验室进行古地磁测量。所有样品在威尔逊古地磁实验室美国生产的 Schonstedt SD 交变退磁仪上首先通过逐步退磁，获得稳定的原生剩磁。每次退磁后的剩磁测量是在 DIGICO 旋转磁力仪上测量的，并置于 Helmholtz 线圈内，使这些仪器工作时出于残余磁场少于 π^{-1} A/m 的环境，使所测数据具有良好的可靠性，其中鲁西岩墙 DY 样品获得

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

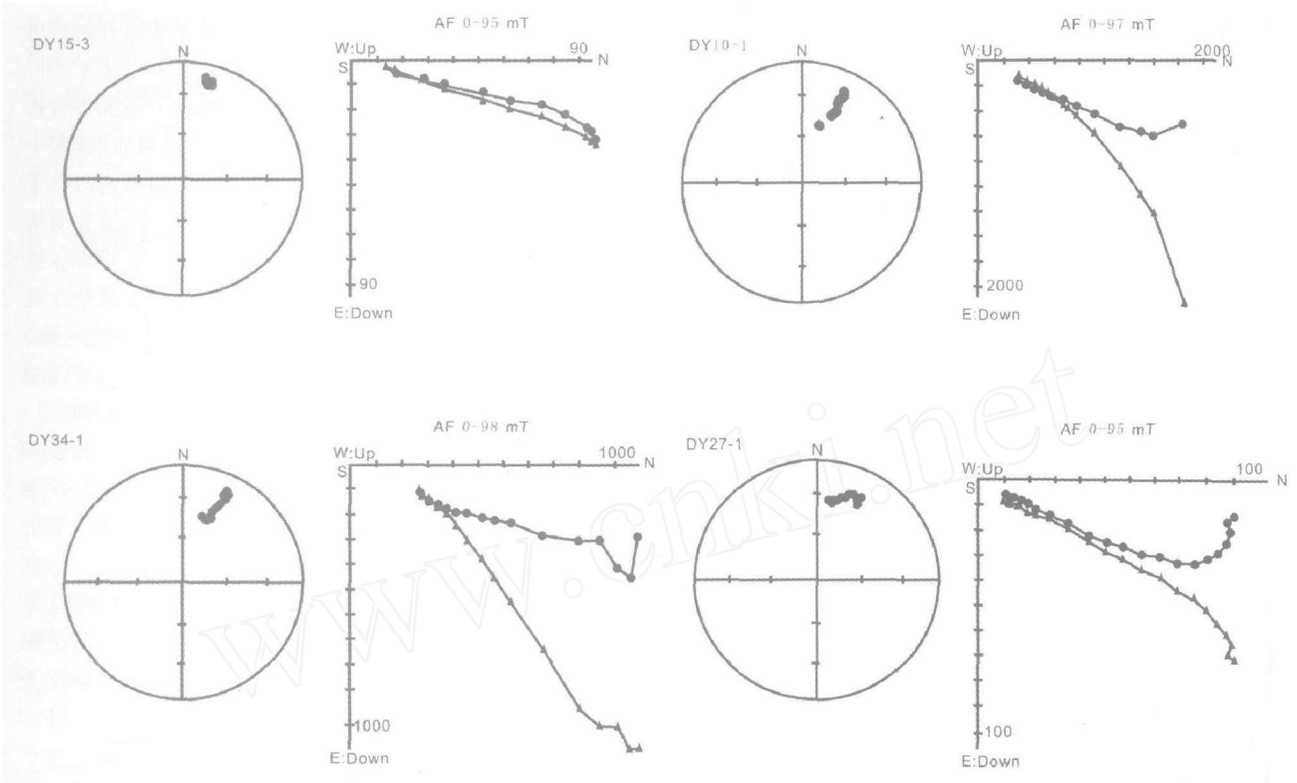


图 3 华北克拉通东部 DY 岩墙群古地磁样品的退磁过程正交投影图

投影网为等角度下半球投影网

Fig. 3 Equal-area stereonets, vector diagrams and intensity decay plots after AF demagnetization of samples DY from the dyke in the eastern North China craton

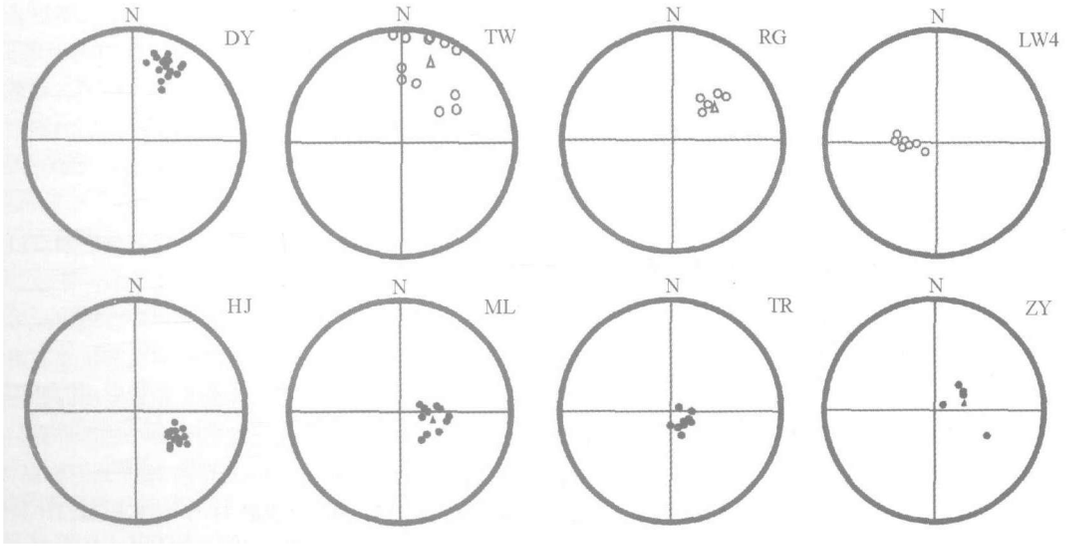


图 4 华北克拉通东部鲁西中元古代基性岩墙 0 ~ 100mT 交变退磁获得的古地磁数据等面积网投影图

等角度下半球投影网,三角形投影点为磁偏角和磁倾角的平均方向

Fig. 4 Equal-area stereonets after AF demagnetization from 0 to 100 mT for eight dykes in the western Shandong of the North China craton

Down-hemispheric equal-area stereonets, triangle is the average data of inclination and dip

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

了相对稳定的原生剩磁(图3)，并获得了斜锆石U-Pb年龄(图2)，为华北克拉通在哥伦比亚超大陆重建提供了重要的古地磁和年代学数据。

从古地磁的磁偏角和磁倾角数据的等角度下半球投影网分析(图4)，在华北克拉通东部地块，除了ZY岩墙的样品古地磁数据投影点相对比较离散外，其他岩墙的古地磁数据投影点都比较收敛，获得了较好的结果，其中TW岩墙各样品的古地磁数据投影点虽然看起来比较分散，但因围绕一个平均值分布，结果也是可信的。DY、LW4、RG、HJ、ML和TR的古地磁数据投影都有很好的收敛性(图4)。

从古地磁数据特征分析，华北克拉通的中元古代北北西向基性岩墙群可以划分为三组：第一组是山西恒山的GU岩墙群；第二组是鲁西的DY、TW和RG岩墙群；第三组是鲁西的LW4、HJ、ML、TR和ZY岩墙群。1770Ma的GU岩墙的古地磁数据与1621Ma的DY和TW岩墙的古地磁数据在投影图上有一定的可对比性(图3和图4)，表明在1770～1621Ma时期，华北克拉通比较稳定，没有较大的漂移。第三组岩墙群的古地磁数据十分相近，对于同一个地区的岩墙群具有十分相似的古地磁数据，表明第三组岩墙群可能形成于同一时期，即与LW4岩墙同时形成于1157±18Ma(表2)。

在一套年龄相似的岩墙中，稳定剩余磁性的平均磁偏角和磁倾角确定了平均地磁极的位置。由于可以假定这个平均磁极为地球的自转极，所以相对于这个古地理极计算出来的采样产地原先的古纬度可外推到该构造稳定地块的其余部分，这样，整个地块相对于古地理极的方位和纬度都能确定出来。对于同一时代两个分离的地块确定了磁极后，就可以决定它们的相对纬度和方位，但还不能确定它们的绝对经度的相互关系。然而，假定能测定出大量的各个时代古地磁极位置，使我们对每一个构造地块都能作出磁极移曲线，于是就可以确定它们的全部空间关系。对于磁极移曲线形状相同的那些时期，可以把地块移动到使它们的磁极移曲线互相重合，借以准确地定出两个不同地块之间的关系，而磁极移曲线分离的时间则标志着不同运动开始的时间，也就是两个地块发生不同方向运动的时间(塔林，1978)。

根据以上华北基性岩墙群样品的平均磁偏角和平均磁倾角以及他们的现代经纬度，利用古地磁极计算公式，我们获得由这些样品计算出的古地磁极位置(古经纬度)(表2)。这些古地磁极是华北克拉通中元古代的古地磁极，并构成一条粗略的视古地磁极移曲线，或称为古地磁极迁移趋向。华北克拉通在～1.8Ga古地磁极在北纬36°和经度247°，相对位于中低纬度(图5)。华北克拉通在～1.6Ga(依据TW和DY的斜锆石年龄)古地磁极更偏移到低纬度靠近古赤道的位置，大约在纬度－7°和经度82°，根据地球地磁极的偶极性，我们可以投映到北纬7°和东经262°的位置(图5)。

对采自蓟县剖面的蓟县系杨庄组(～1350Ma)紫红色泥质白云岩样品开展了详细的古地磁研究，成功分离出两个剩

表2 华北克拉通中元古代北北西向基性岩墙群古地磁测试结果

Table 2 Palaeomagnetic results of Mesoproterozoic NNW-trending mafic dyke swarm in the North China craton

样品位置	样品号	采样点点位 GPS Latitude (°N)	采样点点位 GPS Longitude (°E)	样品数目 N	磁偏角 D	磁倾角 I	精密参数 k	95%信任角 α95/(°)	视古地磁极 纬度 P lat.	视古地磁极 经度 P long.	95%置信椭圆 短轴 dp	95%置信椭圆 长轴 dm	年龄 (Ma)
山西恒山中元古代早期岩墙	GU	40.2	113.5	19	36	－5	63	4	36	247	2	4	1769.1＋/－2.5 斜锆石U-Pb (李江海等，2001；Halls *et al.*，2000)
山东鲁西中元古代早期岩墙	TW	35° 26.150′	117° 13.849	12	45.1	－54.9	56	9.1	－7.6	81.6	9.13	12.8	1620.8＋/－6.7 斜锆石U-Pb (本文)
	DY	36° 21.215′	117° 24.276	18	22	23.6	65	4.3	－6.9	81.9	4.31	6.09	
	RG	36° 13.209′	117° 07.759	5	55	－49.8	36.2	10	－5.6	72	8.88	13.3	
山东鲁西中元古代晚期岩墙	LW4	36° 16.645′	117° 57.966	5	271.1	－68.5	48.5	11.1	27.1	162	15.8	18.7	1157＋/－18 锆石SHRIMP U-Pb (侯贵廷等，2005)
	HJ	35° 26.816′	118° 07.558	15	125.7	54.1	135.8	3.3	－3.5	160.2	3.24	4.63	
	ML	35° 33.598′	118° 11.533	11	102	66.4	49.4	6.6	19.1	161.1	8.91	10.8	
	TR	36° 25.325′	117° 11.717	9	132.8	77.2	103.2	5.1	18.3	135.8	8.89	9.52	
	ZY	35° 20.786′	118° 10.628	5	71.8	68.2	19.9	17.6	37.7	166.7	24.8	29.6	

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

磁分量。低温分量 A 在地理坐标系下与现代地磁场方向接近,被解释为重磁化分量。高温稳定剩磁分量 B 能够在99%置信水平上通过褶皱检验(褶皱的时代为中晚侏罗世)和95%置信水平上通过倒转检验。岩石磁学实验表明其携磁矿物为赤铁矿。其平均方向在构造校正前为 D/I = 77.6°/-24.3°(κ = 5.4, α95 = 18.3°),校正后为 D/I = 72.2°/11.5°(κ = 24.6, α95 = 7.9°, N = 15),该分量被解释为原生剩磁。相应的视磁极位置为北纬 17.3°,东经 214.5°, dp/dm = 4.1°/8.0°)(吴怀春等,2005)(见图 5 中的 YZ 古地磁极点)。

华北克拉通在 ~1.2Ga 古地磁极继续在中低纬度漂移,根据本文有精确年龄数据的 LW4 样品获得的古地磁极位置为北纬 27°和东经 162°(图 5)。这些古地磁极表明在 1.8 ~ 1.2Ga 的中元古代华北克拉通的古地磁极主要位于中低纬度带,这与前人的地质和古地磁成果相一致的(Hou *et al.*, 2008a; Zhang *et al.*, 2006)。

加拿大地盾的中元古代视极移曲线相对变化较大,在 ~1.8Ga 加拿大地盾的古地磁极在中高纬度 60°左右,而到了 ~1.7Ga 加拿大地盾的古地磁极迁移到中纬度 30°左右,以后在 1.7 ~ 1.3Ga 加拿大地盾的古地磁极均在低纬度围绕现在的赤道附近漂移(图 5)。至中元古代晚期在 ~1.0Ga 加拿大地盾的古地磁极已经迁移到现在的南纬 30°左右(图 5)。

从华北克拉通和加拿大地盾中元古代的古地磁极分布和视古地磁极移曲线分析,两个克拉通有可以对比的板块运动规律。

4 华北克拉通岩墙群的超大陆重建意义

在古元古代末和中元古代早期存在一个哥伦比亚超大陆(Zhao *et al.*, 2002; Rogers and Santosh, 2002; Hou *et al.*, 2008a)。由华北克拉通、印度克拉通和加拿大地盾的 1850 ~ 1800Ma 岩墙群拼合而成的放射状大型岩墙群而恢复提出的哥伦比亚超大陆模式中华北克拉通靠近加拿大地盾同位于低纬度带(Hou *et al.*, 2008a)。1850 ~ 1800Ma 岩墙群代表超大陆的初始裂解,也代表这个时期的超大陆格局是超大陆的最大范围时期(Rogers and Santosh, 2009), ~1200Ma 华北克拉通与加拿大地盾分离,这个时期哥伦比亚超大陆最终裂解,发育巨型的放射状岩墙群麦肯齐岩墙群(*giant radiating* Mackenzie dyke swarm)和铜矿河大规模溢流玄武岩(Copper mine river flood)构成世界上著名的大岩浆省(LIPs),与地幔柱活动密切相关(Ernst *et al.*, 2005; Hou *et al.*, 2008b)。本文在华北克拉通获得的具精确年龄的各时代岩墙群的各个古地磁极为与哥伦比亚超大陆的主体加拿大地盾的视极移曲线对比提供了重要的基础数据。

华北克拉通从古元古代早期就完成了东西陆块的拼贴和克拉通化过程(Zhao *et al.*, 2002; Kusky and Li, 2003; Zhai and Liu, 2003),因此从华北克拉通中元古代精确定年

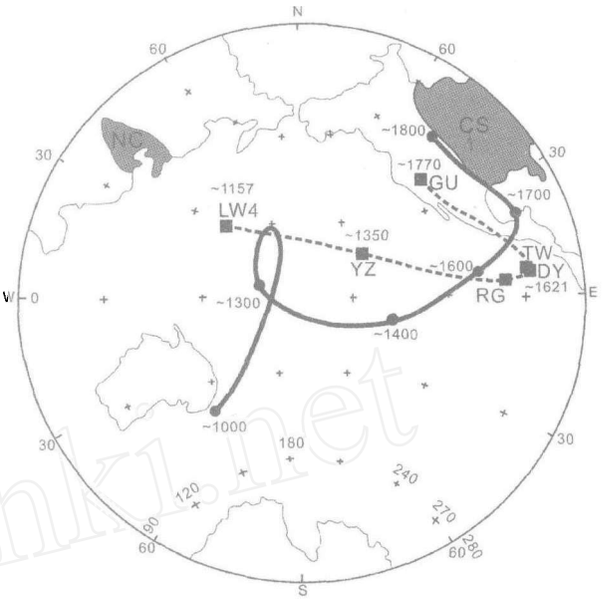


图 5 华北岩墙群古地磁极与加拿大地盾视极移曲线的对比图

阴影区古大陆:NC-华北克拉通;CS-加拿大地盾。图中的实线为加拿大地盾的中元古代视极移曲线(引自 Halls *et al.*, 2000),虚线为本文建立的华北克拉通中元古代视极移曲线,曲线上的数字为时代,单位百万年,黑色方块为华北克拉通的古地磁极,其中,GU 为华北克拉通中部恒山基性岩墙获得的古地磁极,TW、DY、RG 和 LW4 均为从华北克拉通东部鲁西基性岩墙群获得的古地磁极,1350Ma 的 YZ 杨庄组古地磁极引自吴怀春等(2005)数据

Fig. 5 The locations of the key paleomagnetic poles for the mafic dyke swarms in the North China craton and comparison with the apparent polar wander path for the Canadian Shield

Black area-paleocontinent; NC-North China craton; CS-Canadian Shield. Real line is the Mesoproterozoic apparent polar wander path for the Canadian Shield with approximate ages at points (Halls *et al.*, 2000). Dash line is the Mesoproterozoic apparent polar wander path for the North China craton with approximate ages at black squares, age unit is Ma. The black squares indicate the key paleomagnetic poles, GU is the key pole of Hengshan GU dyke, TW, DY, RG and LW4 are the key poles of the mafic dyke swarms in the western Shandong, YZ is the key pole of Yangzhuang Formation with the age of 1350Ma is after Wu *et al.* (2005)

的基性岩墙获得的视极移曲线可以代表整个华北克拉通的中元古代视极移曲线。

一般两个大陆的视极移曲线形状相似和平行的时期,表明两个大陆之间没有明显的相对运动;而两个大陆的视极移曲线分离的时间则标志着两者有明显的相对运动,代表两个大陆开始分离的时间(塔林,1978)。从 1800 ~ 1600Ma 华北克拉通的古地磁极迁移趋势基本与加拿大地盾在这个时期的视极移曲线平行,表明在中元古代早期华北克拉通与以加拿大地盾为主体的哥伦比亚超大陆聚合在一起,这进一步证

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实笔者提出的哥伦比亚超大陆模式，即华北克拉通与北美加拿大地盾在1850～1600Ma时期相连在一起，与其他克拉通构成了古-中元古代的哥伦比亚超大陆，1800Ma是其初始裂解阶段，大规模的裂解开始于1600Ma(Hou *et al.*, 2008b)；而1600～1200Ma华北克拉通的古地磁极迁移方向完全与加拿大地盾在这个时期的视极移曲线不平行而发生分离，华北克拉通向北半球漂移，而加拿大地盾向南半球漂移，这表明在中元古代晚期华北克拉通开始从以加拿大地盾为主体的哥伦比亚超大陆分离出来，响应哥伦比亚超大陆在中元古代晚期的裂解事件，也响应哥伦比亚超大陆在1200Ma左右的最终全面解体(Hou *et al.*, 2008c)。

5 结论

根据华北克拉通东部鲁西隆起区中元古代基性岩墙的精确定年和古地磁分析，结合华北克拉通中西部中元古代基性岩墙群的精确定年和古地磁分析，本文根据三个时代的基性岩墙群(1769Ma、1621Ma、1157Ma)尝试建立了华北克拉通中元古代1800～1200Ma时期的三个具有精确定年的古地磁极及其迁移趋势。与哥伦比亚超大陆的主体大陆——加拿大地盾的中元古代视极移曲线对比，在1800～1600Ma期间，华北克拉通的古地磁极迁移方向与加拿大地盾的视极移曲线是平行的，可以吻合的，说明在中元古代早期华北克拉通与加拿大地盾同为哥伦比亚超大陆的一部分，相互之间没有相对运动。而从1600Ma至1200Ma，华北克拉通和加拿大地盾的视极移曲线发生了较大的变化，华北克拉通的古地磁极向北半球迁移，而加拿大地盾的视极移曲线向南半球迁移，两个大陆分道扬镳，发生分离，这恰恰对应了哥伦比亚超大陆在中元古代晚期的超大陆裂解事件。当然，华北克拉通的古地磁极在时代上跨越仍然较大，以后还需要进一步加大古地磁研究，获得更多的具有精确定年的古地磁极，减少时代跨度，最终获得华北克拉通中元古代视极移曲线。

致谢 感谢两位匿名评审提出的建设性的宝贵意见，提高了本文的质量。感谢北京大学的华金玉硕士和山东科技大学金爱文老师参加了部分野外工作。

References

Buchan KL, Mertanen S, Elming SA, Park RG, Pesonen LJ, Bylund G and Abrahamsen N. 2000. The drift of Laurentia and Baltica in the Proterozoic: A comparison based on key paleomagnetic poles. Tectonophysics, 319: 167 – 198

Ernst RE, Buchan KL and Compbell IH. 2005. Frontiers in Large Igneous Province research. Lithos, 79: 271 – 297

Halls H, Li JH, Davis D, Hou GT and Zhang BX. 2000. A precisely dated Proterozoic palaeomagnetic pole from the North China craton and its relevance to palaeocontinental reconstruction. Geophysics Journal International, 143: 185 – 203

Hou GT, Zhang C and Qian XL *et al.* 1998. The mechanism and tectonic stress field of the Mesoproterozoic mafic dyke swarm in the North China craton. Geological Review, 44(3): 309 – 314 (in Chinese with English abstract)

Hou GT, Li JH and Qian XL. 2001. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Mesoproterozoic dyke swarm in the northern Shanxi. Acta Petrologica Sinica, 17(3): 352 – 357 (in Chinese with English abstract)

Hou GT, Li JH, Qian XL, Zhang BX and Halls H. 2001. The paleomagnetism and geological significance of Mesoproterozoic dyke swarms in the central North China Craton. Science in China (Series D), 44 (2): 185 – 192

Hou GT, Qian XL and Li JH. 2002. The simulation of Mesoproterozoic tectonic stress field forming mafic dyke swarms in the central North China Craton. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 38(4): 492 – 496(in Chinese with English abstract)

Hou GT, Li JH and Halls H *et al.* 2003. The flow structures and mechanism for emplacement of Precambrian mafic dyke swarm in the North China. Acta Geologica Sinica, 77(2): 210 – 216 (in Chinese with English abstract)

Hou GT, Li JH and Jin AW. 2004. New Comment on the Early Precambrian tectono-magmatic subdivision and evolution in the western Shandong block. Geological Journal of China Universities, 10(2): 239 – 249(in Chinese with English abstract)

Hou GT, Liu YL, Li JH and Jin AW. 2005. The SHRIMP U-Pb chronology of mafic dyke swarms: A case study of Laiwu diabase dykes in western Shandong. Acta Petrologica et Mineralogica, 3: 179 – 185(in Chinese with English abstract)

Hou GT, Wang CC, Li JH and Qian XL. 2006a. The Paleoproterozoic extension and reconstruction of paleostress field of the North China Craton. Tectonophysics, 422: 87 – 98

Hou GT, Liu YL, Li JH and Qian XL. 2006b. Evidence for ~1.8Ga extension of the Eastern Block of the North China Craton from SHRIMP U-Pb dating of mafic dyke swarms in Shandong Province. Journal of Asian Earth Sciences, 27: 392 – 401

Hou GT, Li JH and Qian XL. 2006c. The late Paleoproterozoic extension events: Aulacogens and dyke swarms. Progress in Natural Science, 16 (2): 48 – 63

Hou GT, Santosh M, Qian XL, Lister G and Li JH. 2008a. Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: Insights from radiating mafic dyke swarms. Gondwana Research, 14: 359 – 405

Hou GT, Santosh M, Qian XL, Lister G and Li J. H. 2008b. Tectonic constraints on the 1.3 ~ 1.2Ga final breakup of the Columbia supercontinent from a giant radiating dyke swarm. Gondwana Research, 14: 561 – 566

Li JH, Hou GT and Qian XL. 2001. Single-zircon U-Pb age of the initial Mesoproterozoic basic dike swarms in Hengshan moutain and its implication for the tectonic evolution of the North China craton. Geological Review, 47(3): 234 – 238 (in Chinese with English abstract)

Ma XH and Zhang ZK. 1985. Paleomagnetism and application to the tectonic plates. In: The Basic Questions on the Plate Tectonics. Beijing: Seismological Press, 119 – 142(in Chinese)

Peng P, Zhai MG and Zhang HF *et al.* 2004. Geochemistry and geological significance of the 1.8Ga mafic dyke swarms in the NCC: An example from the juncture of Shanxi, Hebei and Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 20 (3): 439 – 456 (in Chinese with English abstract)

Peng P, Zhai MG, Ernst RE, Guo JH, Liu F and Hu B. 2008. 1.78Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong'er volcanic province and the North China dyke swarm. Lithos, 101 (3 – 4): 260 – 280

Rogers JJW and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. Gondwana Research, 5: 5 – 22

Rogers JJW and Santosh. 2009. Urface effects of the supercontinent Columbia. Gondwana Research, in press

Tarling. 1978. The Principle and Application of the Paleomagnetism. Beijing: Science Press, 109

Wang YJ, Zhao GC, Fan WM, Peng TP, Sun LH and Xia XP. 2007.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic mafic dykes from western Shandong Province: Implications for back-arc basin magmatism in the Eastern Block, North China Craton. Precambrian Research, 154(1-2):107-124

Wu HC, Zhang SH, Li ZX, Li HY and Dong J. 2005. New paleomagnetic results form the Yangzhuang Formation of the Jixian System, North China, and tectonic implications. Chinese Science Bulletin, 50, 14: 1483-1489

Zhai MG and Liu WJ. 2003. Paleoproterozoic tectonic history of the North China craton: A review. Precambrian Research, 122: 183-199

Zhang JS and Piper JDA. 1994. Magnetic fabric and post-orogenic uplift and cooling magnetizations in a Precambrian granulite terrain: The Datongo-Huai'an region of the North China Shield. Tectonophysics, 234: 227-246

Zhang SH, Li ZX, Wu HC and Wang HZ. 2000. New paleomagnetic results from the Neoproterozoic successions in southern North China Block and paleogeographic implications. Science in China (Series D), 43: 233-244

Zhang SH and Wang HZ. 2002. Reviews for the paleocontinental reconstruction. Geological Review, 48(3): 198-213 (in Chinese with English abstract)

Zhang SH, Li ZX and Wu HC. 2006. New Precambrian palaeomagnetic constraints on the position of the North China Block in Rodinia. Precambrian Research, 144: 213-238

Zhao GC, Sun M and Wilde SA. 2002. Review of global 2.1~1.8Ga orogens: Implications for a Pre-Rodinia supercontinent. Earth-Science Reviews, 59: 125-162

Zhuang YX, Wang XS and Xu HL *et al*. 1997. Main geological events and crustal evolution in Early Precambrian of Taishan region. Acta Petrologica Sinica, 13(3): 313-330 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

侯贵廷,李江海,Halls HC 等. 2003. 华北晚前寒武纪镁铁质岩墙群的流动构造及侵位机制. 地质学报,77(2):210-216

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

侯贵廷,李江海,钱祥麟等. 2000. 华北克拉通中部中元古代岩墙群的古地磁学研究及其地质意义. 中国科学(D辑),30(6):602-608

侯贵廷,钱祥麟,李江海. 2002. 华北克拉通中元古代岩墙群形成的构造应力场数值模拟. 北京大学学报(自然科学版),38(4):492-496

侯贵廷,张臣,钱祥麟等. 1998. 华北克拉通中元古代基性岩墙群形成机制及构造应力场. 地质论评,44(3):309-314

侯贵廷,李江海,金爱文等. 2004. 鲁西早前寒武纪构造-岩浆活动区划和演化的新认识. 高校地质学报,10(2): 239-249

侯贵廷,刘玉琳,李江海,金爱文. 2005. 关于基性岩墙群的 U-Pb SHRIMP 地质年代学的探讨——以鲁西莱芜辉绿岩岩墙为例,岩石矿物学杂志,3: 179-185

李江海,侯贵廷,钱祥麟等. 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

马醒华,张正坤. 1985. 古地磁学及其在板块构造研究中的应用. 见:板块构造基本问题. 北京:地震出版社,119-142

彭澎,翟明国,张华峰等. 2004. 华北克拉通 1.8Ga 镁铁质岩墙群的地球化学特征及其地质意义:以晋冀蒙交界地区为例. 岩石学报,20(3):439-456

塔林. 1978. 古地磁学的原理和应用. 北京:科学出版社,109

吴怀春,张世红,李正祥,李海燕,董进. 2005. 华北地台蓟县系杨庄组古地磁新结果及其大地构造意义. 科学通报,50(13): 1370-1376

张世红,李正祥,王鸿祯,吴怀春. 2000. 华北地台新元古代古地磁研究的新成果及其古地理意义,中国科学(D辑),30 卷(增刊): 138-147

张世红,王鸿祯. 2002. 古大陆再造研究的回顾与展望. 地质论评,48(3): 198-213

庄育勋,王新社,徐洪林等. 1997. 泰山地区早前寒武纪主要地质事件与陆壳演化. 岩石学报,13(3):313-330

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net