

河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义*

赵太平^{1,2} 陈福坤² 翟明国² 夏斌¹

ZHAO TaiPing, CHEN FuKun, ZHAI MingGuo and XIA Bin

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2003-09-16 收稿, 2004-05-17 改回。

Zhao TP, Chen FK, Zhai MG and Xia B. 2004. Single zircon U-Pb ages and their geological significance of the Damiao anorthosite complex, Hebei Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3):685-690

Abstract The anorthosite complex in the Damiao area, Hebei Province, is the only one massif-type anorthosite intrusion in China. To date crystallization age of this complex, zircons were separated from norite and mangerite, two major rock types of the complex. Ages obtained using the single zircon U-Pb method on the norite and mangerite are 1693 ± 7 Ma and 1715 ± 6 Ma, respectively. These age data suggest that the emplacement of the Damiao anorthosite complex lasted at least 20 Ma. The Damiao anorthosite complex, associated with the Miyun rapakivi, potassic volcanic rocks of the Dahongyu formation in the Changcheng Group and wide-spreading mafic dykes, is interpreted as representing magmatic products related to the break-up event of the North China craton during about 1750 Ma to 1650 Ma.

Key words Anorthosite complex; Zircon U-Pb age; North China craton; Proterozoic

摘要 河北承德大庙斜长岩杂岩体是我国唯一的岩体型斜长岩。为了确定杂岩体的形成时代,作者从杂岩体主要组成岩石——苏长岩、纹长二长岩中选取锆石作 U-Pb 年龄测定,所获得的结晶年龄分别是 1693 ± 7 Ma、 1715 ± 6 Ma。这些锆石 U-Pb 年龄数据说明,大庙斜长岩杂岩体的侵位至少持续了约 20 Ma。大庙斜长岩杂岩体和密云奥长环斑花岗岩、长城系大红峪组钾质火山岩,以及广泛发育的基性岩墙群一起可能代表华北陆块 1750~1650 Ma 大陆裂解事件的岩浆作用产物。

关键词 斜长岩杂岩体; 锆石 U-Pb 年龄; 华北克拉通; 元古宙

中图法分类号 P597.3

1 引言

近年来,不少学者认为 Rodinia 超大陆形成之前存在一个超大陆——Columbia(Rogers and Santosh,2002)。而华北克拉通的演化历史,特别是元古宙的岩浆作用与瑞芬、北美等克拉通同期的岩浆作用(Hoffman,1989)相比,在时代和性质上十分相似(翟明国等,2001)。赵国春等(2002)认为,华北克拉通和世界上其它克拉通陆块一样,记录了导致 Columbia

超大陆拼合的 2.1~1.8Ga 全球性碰撞造山事件。

华北克拉通结晶基底形成后(1.8~1.6 Ga),最为特征的岩浆作用产物是:北京密云的奥长环斑花岗岩(宋彪,1992;Ramo 等 1995;郁建华等,1996)、河北大庙的斜长岩杂岩体、长城系钾质火山岩(陆松年和李惠民,1991;李怀坤,1995)和众多的基性岩墙(Hall 等,2000;李江海等,2001)。近年来,也报道其它地方有类似的岩浆岩,如:辽宁宽甸的奥长环斑花岗岩(葛文春等,1991),北京怀柔的斜长岩(郁建华等,1996),朝鲜妙香山的奥长环斑花岗岩、斜长岩、基性岩墙

* 国家自然科学基金项目(批准号:40072061、40272041)和中科院知识创新工程领域前沿项目(GIGCX-03-02)资助。

第一作者简介:赵太平,男,1963年9月生,研究员,岩石学专业, E-mail: tpzhao@gig.ac.cn; tp-zhao@163.com

(翟明国等, 2001)。与华北陆块比邻的蒙古也有近于同期的斜长岩 (Ashwal, 1993)。此外, 多数学者认为华北克拉通南部的熊耳群和北部的白云鄂博群、渣尔泰群火山岩也是结晶基底形成后裂谷作用的产物 (孙大中和胡维兴, 1993; 赵太平等, 2001; 王楫等, 1992)。这些岩浆岩是不是 Columbia 超大陆的裂解在华北克拉通的具体表现? 它们是同一热-构造事件的产物, 还是不同时期、不同构造体制或同一构造体制不同演化阶段的产物? 这些问题的解决, 需要准确厘定相关地质事件的年龄, 并提供充分的地质地球化学证据。

大庙斜长岩杂岩体是我国唯一的元古宙岩体斜长岩。对大庙斜长岩做深入的岩石学、地球化学和年代学工作, 有利于澄清华北克拉通 1.80 ~ 1.60 Ga 期间岩浆作用产物的年代格架和相互间可能存在的成因联系。这对揭示华北克拉通元古宙时期的演化历史, 无疑是十分必要和有益的。

2 地质概况

大庙斜长岩杂岩体位于河北省承德市以北的大庙、马营至上苍一带, 东西长约 40 km, 南北宽 2 ~ 9 km, 是我国唯一的元古宙岩体斜长岩 (解广轰, 1980)。比之于北美和欧洲的斜长岩杂岩体, 体积很小 (约 120 km²), 但岩石类型齐全 (85% 的斜长岩、11% 的苏长岩、辉长岩和 4% 的纹长二长岩、花岗岩, 以及少量的橄长岩, 相互间呈侵入接触关系, 赋存有丰富的钒钛磁铁矿-磷灰石矿床 (Ye *et al.*, 1996)。

杂岩体由东部和西部两个地表不连续的个体组成 (图 1)。西部岩体约 88 km², 呈不规则三角形; 东部岩体约 32 km², 呈东西向带状分布, 岩体遭受变质作用。本次锆石年龄样, 是从未变质的西部岩体采集的。

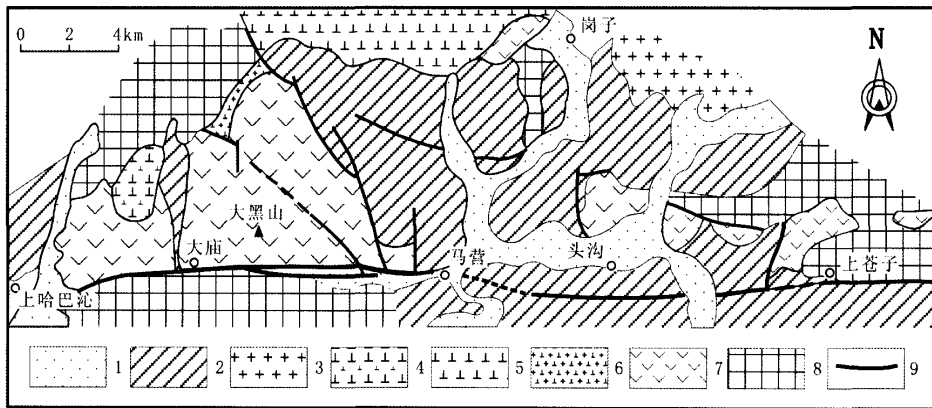


图 1 大庙斜长岩杂岩体地质略图 (据 Ye *et al.*, 1996 修改)

1-第四系; 2-侏罗系; 3-燕山期花岗岩; 4-古生代闪长岩; 5-时代不明粗粒石英正长斑岩; 6-二长岩; 7-斜长岩和苏长岩; 8-太古宙结晶基底; 9-断裂。有些地方苏长岩和斜长岩表现为渐变过渡关系, 但更多的是苏长岩侵入到斜长岩中, 因为苏长岩分布零散、体积较小, 图中没有将它们单独表示出来。

Fig. 1 Simplified geological map of the Damiao anorthosite complex (after Ye *et al.*, 1996)

西部岩体以斜长岩为主, 伴有苏长岩、辉长岩和纹长二长岩、花岗岩。苏长岩和斜长岩之间虽然有些地方表现为渐变关系, 但界限基本清楚。有些地方, 如罗锅子沟、大庙等地, 还可以明显见到二者之间的侵入关系。斜长岩中分布着不规则状和条带状的苏长岩或辉长苏长岩贯入体 (约 9.5 km²; 郁建华等, 1996)。富含铁、钛、磷和碱质的苏长质岩浆沿东北和北西向两条主要断裂侵入形成大范围低品位浸染状铁磷矿石, 之后有高品位块状铁钛矿体及铁磷矿体的贯入 (Ye *et al.*, 1996)。在接触带附近的斜长岩往往变为绿泥石化斜长岩, 而苏长岩中含有大大小小的斜长岩捕虏体和顶垂体。因此, 苏长岩的侵入晚于斜长岩。长英质岩石 (纹长二长岩、石英纹长二长岩), 与斜长岩、苏长岩等岩石的接触关系有不同的认识。解广轰 (1980) 认为大庙斜长岩杂岩体由

下而上分为三层: 下部是以斜长岩为主的辉长岩-苏长岩-斜长岩层、中部二长岩层、上部石英二长岩层, 各层互为渐变过渡关系。王关玉 (1979) ① 将杂岩体看成由上下两部分组成, 下部是基性的斜长岩-苏长岩类, 上部是酸性的纹长二长岩-正长岩类。也有的将杂岩体分成不同的相带: 内部相苏长岩, 过渡相二长苏长岩、二长岩、矿染二长苏长岩, 边缘相紫苏二长岩, 局部出现石英紫苏二长岩和纹长岩 (河北省地质矿产局, 1989)。认识分歧的原因不只是因为缺少可靠的年龄资料, 还因为对大庙斜长岩杂岩体的成因、演化过程缺少深入的研究。

① 王关玉. 河北承德地区斜长岩体的岩石学及矿床成矿特征. 河北地质情报, 1979, (4): 1-29

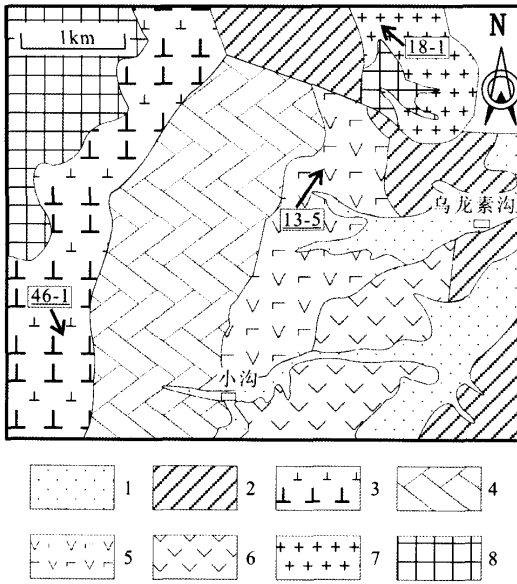


图2 大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄样品取样位置图 (原图据河北省地质局第四地质大队 1 比 2.5 万地质图, 1980) 1-第四系; 2-侏罗系; 3-纹长二长岩; 4-二长苏长岩; 5-苏长岩; 6-斜长岩; 7-花岗岩; 8-太古宙结晶基底。图中标出三个样品的编号, 箭头所指为取样位置

Fig. 2 Localities of samples of the Damiao anorthosite complex dated using the zircon U-Pb method (after 1:25000 geological map published by the Fourth Geological Team of the Hebei Geological Survey, 1980)

3 已有的年代学研究

关于大庙斜长岩杂岩体的形成时代, 迄今没有确切、可靠的年龄资料。解广轰和王俊文(1988)取未遭受强烈热液蚀变和重结晶作用的暗色斜长岩、二长岩和石英二长岩各一个样品作 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析, 获得全岩等时线年龄分别为 1686 ± 193 Ma 和 1735 ± 239 Ma。很显然的问题是, 样品数少, 误差范围大, 而且斜长岩和二长岩、石英二长岩可能共成因但不一定同源。胡世玲等(1990)取三个斜长岩样品中的斜长石作 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子定年, 获得多个坪年龄, 分别为 1656 ± 15 Ma、 1029 ± 7 Ma、 526 ± 10 Ma 和 238.2 ± 4.5 Ma; 对苏长岩, 获得 Rb-Sr 全岩等时线年龄 1004.9 ± 105.2 Ma, 其中的斜长石和辉石 K-Ar 年龄分别为 1075.9 Ma 和 1217.0 Ma, 采用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 全熔融法测得结果为 1065.0 Ma。这些年龄大多反映后期热事件的影响, 不能解释为斜长岩杂岩体的结晶年龄。鉴于此, 笔者从大庙斜长岩杂岩体主要组成岩石中选取锆石, 作 U-Pb 年龄测定并讨论相关的地质意义。

我们用以分选锆石的样品均是来自西部岩体, 所选样品的取样位置以 GPS 定点标示于图 2 中, 误差小于 50 米。三个样品的地理坐标分别是: 苏长岩 (样号 13-5): $N41^{\circ}13.747'$, $E 117^{\circ}51.639'$; 纹长二长岩 (样号 46-1): $N41^{\circ}12.957'$, $E117^{\circ}49.739'$; 花岗岩 (样号 18-1): $N41^{\circ}14.601'$, $E117^{\circ}52.556'$ 。对于样品 18-1, 有的认为是时代不明的花岗岩 (Ye *et al.*, 1996), 有的则将之划归斜长岩杂岩体的组成部分 (岩石类型有的确定为石英纹长二长岩; 解广轰, 1980)。此外, 我们也选取了两个斜长岩样品 (样量 10 公斤左右), 但没有分选出锆石 (可能因为样品量少), 其取样位置分别为马营铁矿露天采场 ($41^{\circ}9.306'$, $117^{\circ}56.187'$) 和黑山铁矿露天采场 ($41^{\circ}9.777'$, $117^{\circ}52.164'$)。样品的主量元素成分是在香港大学地球科学系 XRF 实验室测试, 精度优于 $\pm 2\%$, 结果列于表 1。

表 1 用以测定锆石 U-Pb 年龄的样品的主量元素组成

Table 1 Major element composition of rocks from which zircons were extracted and analysed for U-Pb isotopes

样号	13-5	46-1	18-1
岩石类型	苏长岩	纹长二长岩	花岗岩
SiO ₂	52.15	57.82	64.71
TiO ₂	0.60	0.29	0.48
Al ₂ O ₃	23.84	21.71	14.81
Fe ₂ O ₃	4.09	2.78	4.54
MnO	0.06	0.09	0.07
MgO	1.02	0.35	0.56
CaO	8.61	6.42	1.86
Na ₂ O	6.54	6.61	6.15
K ₂ O	0.95	2.10	5.72
P ₂ O ₅	0.35	0.36	0.10
烧失量	2.29	2.24	2.25
总量	100.50	100.78	101.23

4 分析方法

锆石的挑选程序为: 手工破碎样品 → 淘洗 → 电磁选 → 过重液 (三溴甲烷) → 获得重矿物 → 双目镜下挑选出尽可能不含包裹体、无裂纹且晶形完好的锆石。锆石 U-Pb 年龄测试是在德国图宾根大学同位素实验室完成的, Pb 同位素比值在 Finnigan MAT-262 质谱仪上测定, 分析流程及方法如下:

对每个样品分别选出几粒无裂隙的新鲜晶体进行磨蚀, 具体方法见 Krogh (1982)。磨蚀后, 将它们分别在温热的 7N HNO₃ 和 6N HCl 中清洗, 以消除表面污染物。然后对这些锆石组分加入 $^{205}\text{Pb} - ^{235}\text{U}$ 混合稀释剂。在 200°C 的 22N HF 中溶解 7 天使样品完全溶解, 然后再在 6N HCl 中再溶解 1 天, 以确保氟化物重新溶解成为氯化物。U 和 Pb 的分离和纯化, 按照 Krogh (1982) 的标准程序, 用 AG1-X8 (100 ~ 200

目)阴离子交换树脂进行。为了同位素测定,用硅胶将 Pb 装到铱灯丝上,以单灯丝模式在 1300°C 测定。U 用 1N HNO₃ 装到铱灯丝上,采用双灯丝模式测定。Pb 和 U 的全流程空白值 < 10 pg。空白 Pb 的同位素组成是 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18.6, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.5, 和 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 38.4。根据 NBS-981 标准物质的测定,对所有 Pb 同位素的分析,仪器的质量歧视系数是每个原子质量单位 1‰。扣除稀释剂和空白 Pb 之后,初始普通 Pb 的校正是以 Stacey 和 Kramers (1975) 的模式理论值

进行。测定的 U-Pb 数据和 U-Pb 不一致线回归是以 PBDAT 程序 (Ludwig, 1988) 和 ISOPLOT 程序 (Ludwig, 1994) 进行计算的。所有分析误差以 2σ 给出。

5 样品测试结果

测试结果列于表 2, 年龄结果示于图 3。

表 2 大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 2 Analytic results of U-Pb isotopes for zircons from the Damiao anorthosite complex

样 品	点 号	特 征	同位素原子比率								表面年龄 (Ma)		
			²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Pb*/U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	Error	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	Error	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	Error	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
13-5 苏 长 岩	1	长柱状	892	0.42	0.2985	0.0062	4.266	0.093	0.1037	0.0001	1684	1687	1691
	2	长柱状(细)	863	0.41	0.2959	0.0061	4.249	0.091	0.1042	0.0001	1671	1684	1700
	3	长柱状(粗)	914	0.42	0.2988	0.0061	4.267	0.089	0.1036	0.0001	1685	1687	1689
	4	短柱状	1023	0.42	0.2980	0.0062	4.263	0.092	0.1038	0.0011	1681	1686	1693
46-1 纹 长 二 长 岩	1	长柱状	2562	0.40	0.2967	0.0069	4.321	0.100	0.1056	0.0001	1675	1697	1726
	2	长柱状	7494	0.38	0.2860	0.0059	4.181	0.086	0.1060	0.0001	1621	1670	1732
	3	长柱状(粗)	2261	0.41	0.3008	0.0060	4.359	0.092	0.1051	0.0001	1695	1705	1716
	4	长柱状(细)	3102	0.38	0.2827	0.0057	4.117	0.086	0.1056	0.0001	1605	1658	1725
	5	短柱状	2182	0.40	0.2993	0.0060	4.340	0.091	0.1052	0.0001	1688	1701	1718
	6	短柱状	1783	0.40	0.2962	0.0061	4.306	0.092	0.1054	0.0001	1672	1695	1722
18-1 花 岗 岩	1	长柱状	1528	0.37	0.2787	0.0057	4.008	0.083	0.1043	0.0001	1585	1636	1702
	2	短柱状	2149	0.39	0.2939	0.0062	4.287	0.090	0.1058	0.0002	1661	1691	1728
	3	长柱状(细)	1125	0.36	0.2699	0.0057	3.843	0.091	0.1033	0.0002	1540	1602	1683
	4	长柱状(粗)	1028	0.39	0.2994	0.0064	4.337	0.105	0.1051	0.0002	1689	1701	1715
	5	长柱状(粗)	1305	0.40	0.3005	0.0061	4.353	0.091	0.1051	0.0001	1694	1704	1715

苏长岩(样号 13-5)测试的 4 颗锆石,它们的 U-Pb 表面年龄十分一致,取其平均值为 1693 ± 7 Ma。

纹长二长岩(样号 46-1)共测试 6 个锆石颗粒。6 个测试点获得的非一致线和谐和线的上交点年龄是 1715 ± 6 Ma。

花岗岩(样号 18-1)共测试 5 个锆石颗粒。5 个测试点获得的非一致线和谐和线的上交点年龄是 1730 ± 16 Ma。

本次工作获得的锆石 U-Pb 年龄资料说明,大庙斜长岩杂岩体的侵位持续了至少 20 Ma,很可能包括以下三个活动期次:(1)苏长岩形成于 1693 ± 7 Ma;(2)虽然目前还没有斜长岩形成的确切的年龄资料,但依据野外观察资料 (Ye *et al.*, 1996; 郁建华等, 1996),表明斜长岩的侵位无疑比苏长岩更早;(3)纹长二长岩的年龄是 1715 ± 6 Ma。对于年龄为 1730 ± 16 Ma 的花岗岩究竟是大庙斜长岩杂岩体的组成部分还是在比大庙斜长岩杂岩体的形成更早的另一次热-构造事件中形成的,还需要进一步的工作加以分辨。

6 地质意义讨论

从已有的锆石 U-Pb 年龄资料可以判断,大庙斜长岩地质事件的时间应该在 1693 ~ 1715 Ma ±。综合分析该时期华北陆块上的岩浆作用,对于揭示华北克拉通结晶基底的形成和演化过程,无疑是十分有益的。

在地球演化历史中唯有元古宙特别发育斜长岩和奥长环斑花岗岩 (Ashwal, 1993)。而在此时期,许多镁铁质岩石 (斜长岩、辉绿岩墙、辉长岩)常在时间和空间上与奥长环斑花岗岩密切共生并呈双峰式,如北美、北欧, Emslie (1994) 称之为 AMCG (Anorthosite-Mangerite-Charnokite-Rapakivi Granite) 组合,是一套典型的非造山岩浆岩组合。

在华北陆块中,与大庙斜长岩近于同期而且有可靠年龄资料的岩浆作用产物有奥长环斑花岗岩、大红峪组钾质火山岩。对密云奥长环斑花岗岩,先后有宋彪 (1992)、Ramo 等

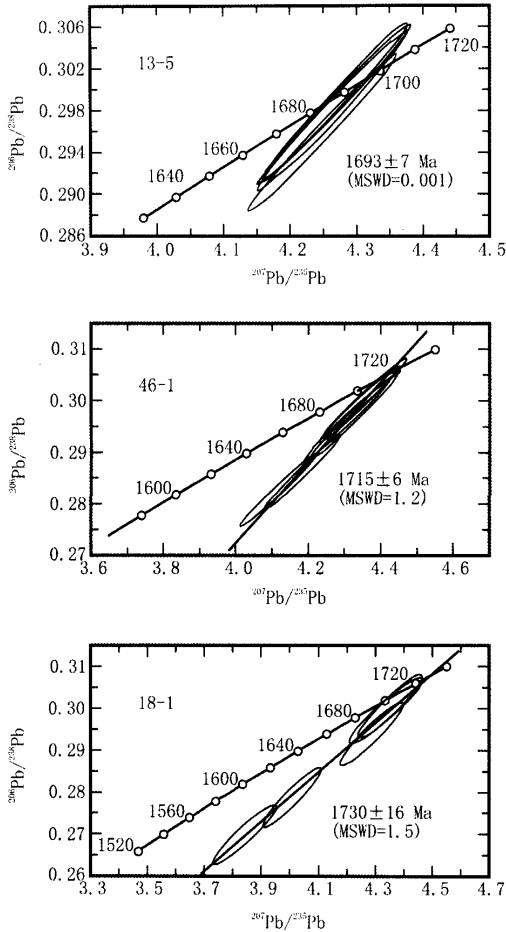


图3 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 测年结果的谐和图

Fig.3 Zircon U-Pb concordia diagrams for the Damiao anorthosite complex

(1995)、郁建华等(1996)获得多个锆石 U-Pb 年龄,都是在 1700 Ma 左右。而对长城系钾质火山岩,李怀坤(1995)测得团山子组火山岩岩浆自生锆石的年龄为 1683 ± 67 Ma,陆松年等(1991)测得大红峪组火山岩中锆石 1625.3 ± 6.7 Ma;恒山基性岩墙的 U-Pb 年龄为 1769.1 ± 2.5 Ma (Hall 等,2000)。此外,华北陆块南部的熊耳群火山岩形成时代为 1761 Ma,笔者根据新近获得的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄资料并结合已有的锆石 U-Pb 年龄(赵太平等,2001;任富根等,2002;赵太平等,2004),确定熊耳期岩浆活动的时限是 1800 ~ 1750 Ma。由此看出,大庙斜长岩杂岩体的发育和北京密云冬奥长环斑花岗岩同期,比 1800 ~ 1750 Ma 发育在华北陆块南部的熊耳群火山岩和 1760 Ma 发育在华北中部的基性岩墙略晚。

值得注意的是,上述岩浆岩在空间分布上有一定的规律

性,即为南北两个三叉裂谷系,分别沿华北陆块南北缘分布,各有一个分支向克拉通内部延伸,且这两个向克拉通内部延伸的裂谷分支走向基本一致,都是北偏东方向,和赵国春等(2002)提出的古元古代中部碰撞拼合位置基本一致。此外,上述岩浆岩都与熊耳群火山岩的地球化学特征有一定的相似性,说明这些在时间和空间上有联系的岩浆岩,在它们的缘区性质、形成的构造背景等方面,可能存在必然的关系。这些岩浆岩的发育是华北陆块碰撞聚合后在地壳应力松弛阶段伸展环境下岩浆作用的产物,还是与其时可能存在的地幔柱作用有关(翟明国等,2002),还需要做深入的研究。而无论是何种原因,上述岩浆岩的发育,都说明华北陆块在 1.80Ga 以后处于地壳发生拉伸、减薄,且很可能沿早先碰撞、缝合的薄弱部位最先发生破裂,是华北陆块裂解的产物。

致谢 倪志耀博士参加了野外工作,成文后承蒙解广轰研究员审阅。在此向他们表示衷心谢意!

References

- Ashwal L D. 1993. Anorthosites. *Minerals and Rocks*, 21, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 422
- Chen F, Hegner E, Tocht W. 2000. Zircon ages and Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: evidence for a Cambrian magmatic arc. *Int. J. Earth Sci.*, 88: 791 - 802
- Chen F, Siebel W, Satir M. 2002. Zircon U-Pb and Pb-isotope fractionation during stepwise HF-acid leaching and chronological implications. *Chem. Geol.*, 191(1-3): 155 - 164
- Emslie R F, Hamilton M A, Theriault R J. 1994. Petrogenesis of a Mid-Proterozoic anorthosite-mangerite-charnockite-granite (AMCG) complex: isotopic and chemical evidence from the Nain plutonic suit. *J. Geol.*, 102: 539 - 558
- Hall H C, Li J H, Davis D, Hou G T, Zhang B X, Qian X L. 2000. A precisely dated Proterozoic palaeomagnetic pole from the North China craton, and its relevance to palaeocontinental reconstruction. *Geophys. J. Int.*, 143: 185 - 203
- Hoffman P F. 1989. Speculations on Laurentia's first gigayear (2.0 - 1.0 Ga). *Geology*, 17: 135 - 138
- Krogh T E. 1982. Improved accuracy of U-Pb zircon ages by the creation of more concordant systems using an air abrasion technique. *Geochim. Cosmochim. Acta* 46: 637 - 649
- Li H K, Li H M, Lu S N. 1995. Grain zircon U-Pb ages for volcanic rocks from Tuanshanzi formation of Changcheng system and their geological implications. *Geochimica*, 24(1): 43 - 48 (in Chinese with English abstract)
- Li J H, Hou G T, Qian X L, Halls H C, Davis D. 2001. Single-zircon U-Pb age of initial Mesoproterozoic basic dike swarms in the Hengshan Mountain and its implication for the tectonic evolution of the North China Craton. *Geol. Rev.*, 47(3): 234 - 238 (in

- Chinese with English abstract)
- Lu S N, Yang CL, Li H K, Li H M. 2002. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton. *Gondwana Res.*, 5(1): 123 - 132
- Ludwig K R. 1988. Pbdatt for MS-Dos - a computer program for IBM-PC compatibles for processing raw Pb-U-Th isotope data. United States Geological Survey, Open-file Report 88 - 542, 37pp
- Ludwig K R. 1994. Isoplot - A plotting and regression program for radiogenic-isotope data. US Geol. Survey, Open-file Report 91 - 445, 45pp
- Ramo O T, Haapala I, Yu J H, Fu H Q. 1995. 1700 Ma Shachang complex, northeast China: Proterozoic rapakivi granite not associated with Paleoproterozoic orogenic crust. *Geology*, 23: 815 - 818
- Ren F G, Li H M, Yin Y J *et al.* 2002. Study of isotopic geochronology of the Xiong'er Group Henan Province, China. *Progress in Precamb. Res.*, 25(1): 42 - 47 (in Chinese with English abstract)
- Rogers J J W, Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Res.*, 5: 123 - 132
- Stacey J S, Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 26: 207 - 221
- Sun D Z, Hu W X (eds.). 1993. Precambrian age tectonic framework and age-crustal structure of Zhongtiao Shan. Beijing: Geol. Pub. House, 1 - 180 (in Chinese with English abstract)
- Xie G H. 1980. Petrochemical characteristics of the anorthosite suite in Damiao, Hebei Province, China. *Geochimica*, 9(3): 263 - 277 (in Chinese with English abstract)
- Xie G H, Wang J W. 1988. A preliminary study on the emplacement age of the Damiao anorthosite complex. *Geochimica*, 17(1): 13 - 17 (in Chinese with English abstract)
- Ye D H, Yang Q W, Xing J R. 1996. The Damiao anorthosite and vanadic-titano magnetite and apatite deposits associated with the anorthosite in Chengde, Hebei. Field Trip Guid T216. 30th International Geological Congress, Beijing, China, August 4 - 14, 1996
- Yu J H, Fu H Q, Zhang F L *et al.* 1996. Anorogenic rapakivi granite and related rocks in Northern part of the North China craton. Beijing: China Science and Technology Press, 1 - 182 (in Chinese with English abstract)
- Zhai M G, Guo J H, Zhao T P. 2001. Study advances of Neoproterozoic-Palaeoproterozoic tectonic evolution in the North China craton. *Progress in Precamb. Res.*, 24(1): 17 - 27 (in Chinese with English abstract)
- Zhao T P, Zhou M F, Jin C W, Guan H, Li H M. 2001. Discussion on the age of the Xiong'er Group in the Southern Margin of the North China craton. *Scientia Geologica Sinica*, 36: 326 - 334 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 葛文春, 林强, 方占仁. 1991. 宽甸环斑花岗岩的同化混染成因. *长春地质学院学报*, 21(2): 135 - 142
- 胡世玲, 王松山, 桑海清, 裘冀, 叶东虎, 崔人合, 戚长谋. 1990. 大庙斜长岩同位素地质年龄、稀土地球化学及其地质意义. *地质科学*, (4): 332 - 342
- 解广轰, 王俊文. 1988. 大庙斜长岩杂岩体侵位年龄的初步研究. *地球化学*, (1): 13 - 17
- 解广轰. 1980. 大庙斜长岩杂岩体的岩石学特征. *地球化学*, (3): 263 - 277
- 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 1995. 长城系团山子组火山岩颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球化学*, 24(1): 43 - 48
- 李江海, 侯贵廷, 钱祥麟, Halls HC, Davis D. 2001. 恒山中元古代早期基性岩墙的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其克拉通构造演化意义. *地质论评*, 47(3): 234 - 238
- 陆松年, 李惠民. 1991. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确定年. *中国地质科学院院报*, 第 22 号, 135 - 146
- 任富根, 李惠民, 殷艳杰等. 2002. 豫西地区熊耳群的地质年代学研究. *前寒武纪研究进展*, 25(1): 41 - 47
- 宋彪. 1992. 密云环斑花岗岩的同位素地质年代学、稀土地球化学特征及成因讨论. *中国地质科学院地质研究所所刊*, 第 25 号: 137 - 157
- 孙大中, 胡维兴主编. 1993. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构. 北京: 地质出版社
- 王楫, 李双庆, 王保良, 李家驹. 1992. 狼山-白云鄂博裂谷系. 北京: 北京大学出版社
- 郁建华, 付会芹, 张凤兰, 万方晓等. 1996. 华北地台北部非造山环斑花岗岩及有关岩石. 北京: 中国科学技术出版社, 1 - 182
- 翟明国, 郭敬辉, 赵太平. 2001. 新太古-古元古代华北陆块构造演化的研究进展. *前寒武纪研究进展*, 24(1): 17 - 27
- 赵国春, 孙敏, Wilde S A. 2002. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合. *中国科学, D 辑*, 32(7): 538 - 549
- 赵太平, 周美夫, 金成伟, 关鸿, 李惠民. 2001. 华北陆块南缘熊耳群形成时代讨论. *地质科学*, 36(3): 326 - 334