

内蒙古达茂旗北部闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb、 角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学及其地质意义

李建锋, 张志诚, 韩宝福

(北京大学 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 内蒙古达茂旗北部的早古生代闪长岩侵入体产于包尔汉图-白乃庙岛弧带的西部, 采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年对其进行了精确的年代学研究。两件闪长岩样品分别获得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 453 ± 3 Ma 和 446.8 ± 5.3 Ma, 角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 459.2 ± 2.4 Ma 和 442.9 ± 4.2 Ma。这为研究该时期弧岩浆作用提供了新的年代学证据, 并表明该岩浆侵入后, 经历了结晶并快速冷却的过程, 可能揭示了本区岛弧带和华北板块碰撞的构造意义。

关键词: 内蒙古达茂旗; SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学; ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学; 奥陶纪

中图分类号: P588.12⁺2; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)06-0732-09

Ar-Ar and zircon SHRIMP geochronology of hornblende and diorite in northern Darhan Muminggan Joint Banner, Inner Mongolia, and its geological significance

LI Jian-feng, ZHANG Zhi-cheng and HAN Bao-fu

(MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution; School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The northern Darhan Muminggan Joint Banner of Inner Mongolia, geotectonically crossing two geological-structural units, is divided into two parts by Bayan Obo-Chifeng deep fault (plate boundary fault). To the south of the deep fault is the North China block, and to the north is the accretion zone at the northern edge of North China plate. An important magmatic arc belt mainly composed of diorite, quartz diorite, tonalite and granodiorite is developed near Bart-Obo on the north side of Bayan Obo-Chifeng deep fault. In this paper, precise SHRIMP zircon U-Pb dating and hornblende ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating defining the emplacement age of the intrusion and its thermal evolution history were conducted for inclusions of diorite and hornblende hosted in granodiorite, and the constraints on Early Paleozoic subduction-collision event of the Paleo-Asian Ocean in central Inner Mongolia were provided from isotope geochronology. SHRIMP U-Pb zircon ages of the two diorite samples are 453 ± 3 Ma and 446.8 ± 5.3 Ma, and hornblende ⁴⁰Ar/³⁹Ar plateau ages are 459.2 ± 2.4 Ma and 442.9 ± 4.2 Ma. SHRIMP zircon U-Pb dating results indicate that the island arc intrusive rocks were formed around 450 Ma, resulting from the Middle-Late Ordovician (or earlier) oceanic subduction event. The results of SHRIMP zircon U-Pb dating are basically in accordance with those of hornblende conventional ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating method, which suggests the crystallization and rapid cooling after the emplacement of the magma and may reveal collision between the Baoerhantu-Bainaimiao island arc zone and the North China plate. The dating results of the diorite

收稿日期: 2010-03-15; 修订日期: 2010-07-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672146); 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411305)

作者简介: 李建锋(1978-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业, 主要从事热年代学研究; 通讯作者: 张志诚(1963-), 男, 博士, 副教授, 主要从事构造地质及其热年代学研究和教学, E-mail: zczhang@pku.edu.cn.

imply that tectonic heat events after the emplacement and the cooling of the intrusive body did not affect the hornblende Ar-Ar closed system, and hence strong tectonic heat events did not occur later.

Key words: Darhan Muminggan Joint Banner of Inner Mongolia; SHRIMP zircon U-Pb dating; ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology; Ordovician

内蒙古达茂旗北部地区,在大地构造位置上横跨两大地质构造单元,在以白云鄂博-赤峰深大断裂(板块边界断裂)为界,南为华北陆块,北为华北陆块北缘增生带(内蒙古地质矿产局,1991;张振法,1994;李双庆,1997;邵积东,1998;陶继雄等,2003),白云鄂博-赤峰深大断裂北侧的巴特敖包一带发育一条重要的岛弧岩浆岩带(陶继雄等,2003),主要由闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩组成。

前人对该岩浆岩带的火成岩曾经进行了岩石学、岩石化学和地球化学研究,认为该套侵入岩具有正常岛弧和埃达克岩的双重地球化学性质(许立权等,2003a,2003b;陶继雄等,2005;张维等,2008)。尚恒胜等(2003)分别在白云鄂博地区、巴特敖包地区的岛弧深成岩组合闪长岩及斜长花岗岩中获得一系列锆石 U-Pb 表面年龄:447.5、456.4、469.2、473.4 和 493.5 Ma,结合其野外地质关系,确定本区岛弧岩系的形成时代为晚奥陶世。许立权等(2003b)结合区域地质背景,认为该套花岗岩类为与洋壳消减有关的岛弧型花岗岩,岩浆起源于加厚陆壳的底部,岩体锆石 U-Pb 年龄分别为 472、427 和 450 Ma,时代归属于中奥陶世末至晚奥陶世。陶继雄等(2005)应用混合锆石 U-Pb 法测得英云闪长岩年龄为 345.046、447.535、456.353、552.671 和 345.3 Ma,石英闪长岩的年龄为 493.485 和 473.4 Ma,花岗闪长岩的年龄为 536.2 Ma,闪长岩的年龄为 469.2 Ma,表面年龄值范围为 345~553 Ma,认为其反映了本区大洋板块消减事件的年龄。张维等(2008)应用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年方法,得出这套侵入岩中的闪长岩形成于 452 ± 3 Ma 和 440 ± 2 Ma,石英闪长岩形成于 446 ± 2 Ma,花岗闪长岩形成于 440 ± 2 Ma,认为它们记录了晚奥陶世末的洋壳消减事件,岛弧与华北大陆边缘的碰撞可能发生于约 417 Ma。

以前人这些研究为基础,本文对这套岛弧侵入岩进行了进一步的研究,精确地测定了花岗岩中闪长岩及其角闪石岩包体中锆石 SHRIMP U-Pb 和角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄,旨在厘定该岩体的侵位时代及其热演化历史,为内蒙古中部古亚洲洋早古

生代俯冲碰撞事件提供同位素地质年代学制约。

1 地质背景与样品采集

研究区位于内蒙古中部的达茂旗北部,构造上处于白云鄂博-赤峰断裂以北,属于华北板块北缘增生带包尔汉图-白乃庙岛弧带的西段(唐克东,1992;Jian *et al.*, 2008)。区内出露的地层主要有奥陶系包尔汉图群(Obr²)、上志留统西别河组(S_{3x})、石炭系阿木山组(C_{3a})和中新界地层。研究区域北部早古生代侵入岩侵入奥陶系包尔汉图群,其上被上志留统西别河组不整合覆盖;研究区中南部发育晚古生代花岗岩类侵入岩。

本文研究的闪长岩、角闪石岩采样位置如图1所示,介于北纬 42°07'00" 到 42°07'03" 之间,东经 110°25'48" 和 110°25'58" 范围内。闪长岩和角闪石岩包体的寄主花岗闪长岩体近东西向展布,由于地表第四系松散沉积物覆盖,露头较差。岩体侵入于包尔汉图群,并被上志留统西别河组碎屑岩不整合覆盖。闪长岩和角闪石岩呈长条状出露在花岗闪长岩体内,宽约 20~30 m,长约 100 m,并具有一定的分带现象,中间部分为角闪石岩,向外渐变为闪长岩,可能为花岗闪长岩侵入时形成的包体。年代学测试的样品 NM08-14 为闪长岩,花岗结构,主要由角闪石(25%~30%)、斜长石(60%~65%)组成,角闪石半自形,具轻微绿泥石化,斜长石绢云母化、绿帘石化。样品 NM08-13、NM08-17 为角闪石岩,岩石为中细粒结构,主要由角闪石(75%~80%)、斜长石(10%~15%)组成,角闪石半自形,轻微绿泥石化;斜长石不同程度绢云母化。

2 同位素年代学

2.1 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

2.1.1 分析方法

在廊坊诚信地质技术服务公司用常规方法从样品中分选出锆石。按照宋彪等(2002)描述的方法制靶,测试前在北京大学造山带与地壳演化教育部重

点实验室和北京大学环境扫描电子显微镜实验室进行了反射光和阴极发光(CL)照相(图2)。样品NM08-13的锆石U-Pb年龄数据是在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的网络虚拟实验室通过SHRIMP远程共享控制系统(SHRIMP Remote Operation System, SROS)远程控制位于澳大利亚Curtin理工大学(Curtin University of Technology)的SHRIMP II仪器而获得的。样品NM08-17的锆石SHRIMP U-Pb分析在中国地质科学院北京离子探针中心的SHRIMP II上完成。分析流程和方法

见文献Compston等(1992)和宋彪等(2002),使用标准样品M257(Nasdala *et al.*, 2008)标定标样TEMORA1(417 Ma)和待测锆石的U、Th、Pb含量,而锆石U-Th-Pb同位素比值用TEMORA1标定。测试过程中,每测定1个标准样品点后,测定4个未知样品点,单次测量误差为 1σ 。普通Pb采用 ^{204}Pb 校正(假设 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{208}\text{Pb}/^{232}\text{U}$ 年龄一致)。数据处理、年龄计算和绘图使用ISOPLOT程序(Ludwig, 2003), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄的误差为95%置信度的结果。

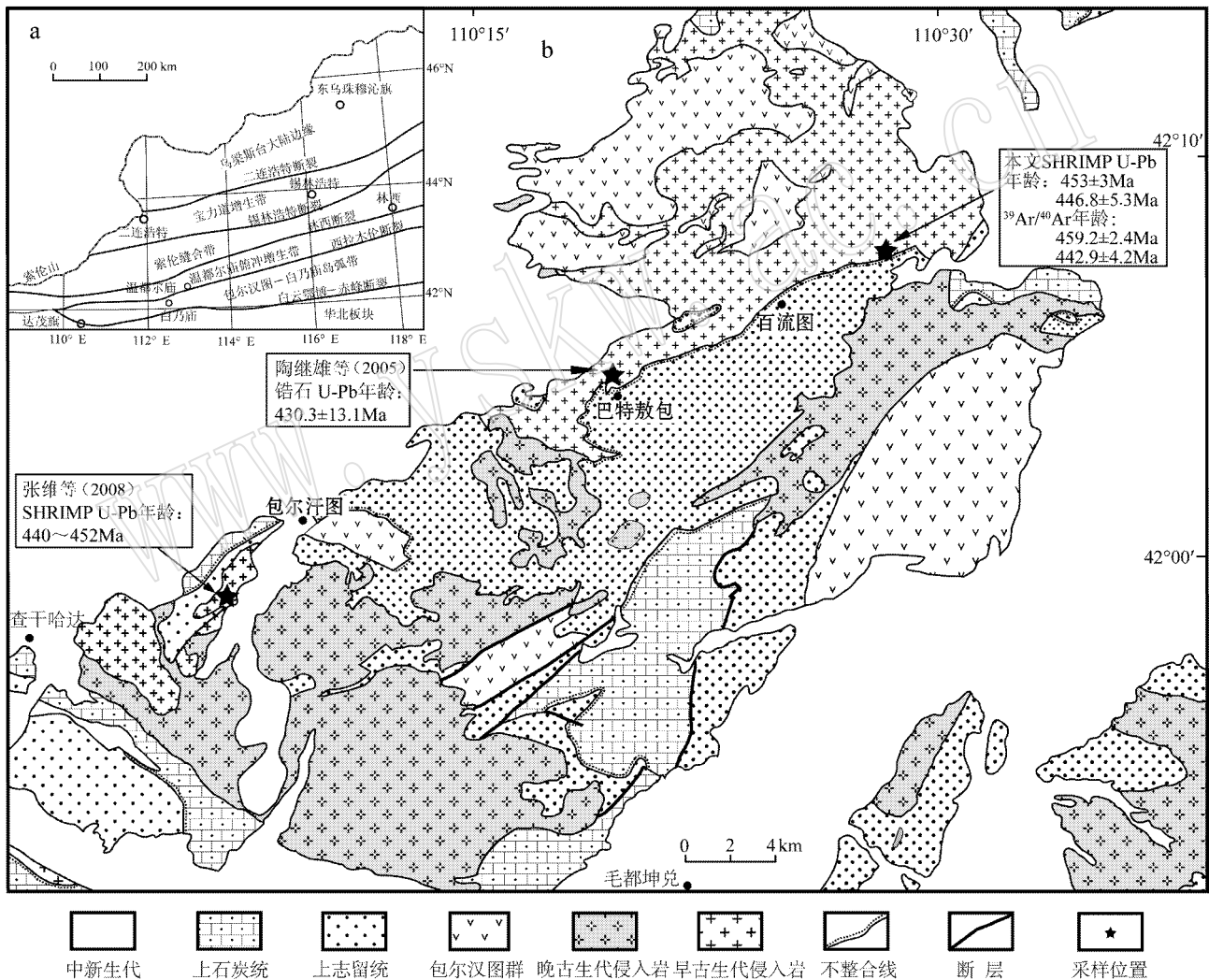


图1 内蒙古达茂旗北部地区地质简图、研究区位置(a, 据张维等, 2008)和采样位置(b, 据查干哈达幅^①和达茂旗幅1:20万地质图^②改绘)

Fig. 1 Geological sketch map of northern Darhan Muminggan Joint Banner area, Inner Mongolia, showing the study area (a, after Zhang Wei *et al.*, 2008) and sampling sites (b, after 1:200 000 Geological Map of Chaganhada^① and Darhan Muminggan Joint Banner Sheets^②)

① 内蒙古自治区地质局, 1982. 1:20万查干哈达幅地质图(K-49-XV).

② 内蒙古自治区地质局, 1968. 1:20万安达罕罕茂安联合旗幅地质图(K-49-XXI).

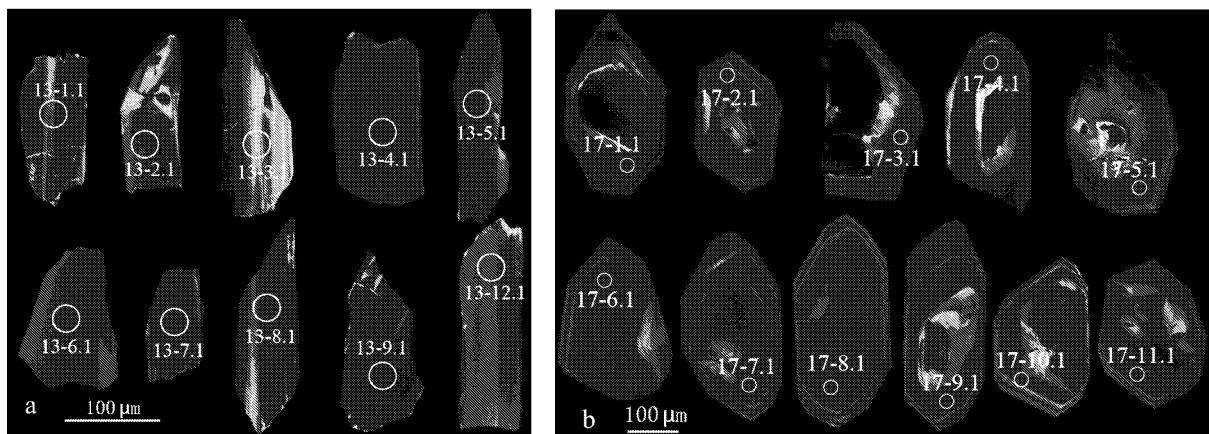


图2 达茂旗北部角闪岩样品 NM08-13(a)和 NM08-17(b) 锆石阴极发光照片及 SHRIMP 测点位置

Fig. 2 CL images and dating spots of zircons from samples NM08-13(a) and NM08-17(b) in northern Darhan Muminggan Joint Banner

2.1.2 锆石特征和 SHRIMP U-Pb 定年结果

样品 NM08-13 中分选出来的锆石, 颗粒不规则, 大部分为棱角状, 少部分呈柱状, 粒度在 0.1~0.2 mm 之间, 长宽比 1:1~3:1 之间, 晶型为半自形, 少数自形。在阴极发光照片上, 样品 NM08-13 大多数锆石显示板条状结构, 少数呈现出环带结构(图 2a)。从样品 NM08-17 中分选出来的锆石, 呈柱状, 粒度在 0.2~0.3 mm 之间, 长宽比 1.5:1~2:1 之间, 晶型大部分为自形, 少数半自形。在阴极发光照片上, 样品 NM08-17 的锆石韵律环带结构清晰, 多数有明显核部(图 2b), 这表明它们具有比较复杂的成因, 可能是由岩浆结晶过程中次生加大形成的。

表 1 列出了样品 NM08-13 和 NM08-17 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析数据。从表 1 中可见, 样品 NM08-13 的 10 个颗粒中, 锆石 U 含量为 338×10^{-6} ~ 1631×10^{-6} , 平均为 921×10^{-6} , Th/U 比值大部分在 0.45~0.80 之间, 只有颗粒 NM08-13.6 的 Th/U 比为 0.22, 颗粒 NM08-13.3 的 Th/U 比为 0.35。10 个分析点给出狭窄的年龄范围, 集中在 447~461 Ma 之间。在谐和图上, 所有的年龄落在谐和曲线上及其附近, 10 个点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 453 ± 3 Ma, MSWD=0.77, 解释为侵位年龄。样品 NM08-17 的 11 个颗粒中, 所有测点均位于锆石次生加大边部, 锆石 U 含量为 644×10^{-6} ~ 1642×10^{-6} , 平均为 932×10^{-6} , Th/U 比值较低, 在 0.03~0.10 之间。分析年龄值集中在 432~459 Ma 之间, 在谐和图上, 所有的年龄落在谐和曲线上, 11 个点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为

446.8 ± 5.3 Ma, MSWD = 0.88, 该年龄与样品 NM08-13 年龄在误差范围内一致, 同样解释为侵位年龄。图 2b 显示多数锆石具有明显的核部, 可能反映其核部为早期的继承性锆石, 岩浆作用过程中次生加大, 其 Th/U 比值可能继承了早期锆石的特征, 比较低。次生加大具有明显的同心圆韵律环带结构, 仍然为岩浆锆石(Belousova *et al.*, 2002; 吴元保等, 2004)。

2.2 常规⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学

SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄确定了岩体的结晶年龄, 为了解这套侵入岩冷却过程, 确定其侵位后的演化, 从而推测本区早古生代构造演化过程, 从样品 NM08-14 和 NM08-17 中挑选角闪石进行了 ⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究。

2.2.1 测试方法及流程

样品测试由北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室常规⁴⁰Ar/³⁹Ar定年系统完成。用纯铝铂纸将 0.18~0.28 mm 粒径的样品包装成直径约 6 mm 的球形, 封闭于石英玻璃瓶中, 置于中国原子能科学研究院 49-2 反应堆进行中子照射, 照射时间为 23 h 55 min, 快中子通量为 2.2386×10^{18} 。用于中子通量监测的样品是我国周口店 K-Ar 标准黑云母(ZBH-25, 年龄为 132.7 Ma)。同时对纯物质 CaF₂ 和 K₂SO₄ 进行同步照射, 得出的校正因子为: (³⁶Ar/³⁷Ar)_{ca}=0.000271 (³⁹Ar/³⁷Ar)_{ca}=0.000652, (⁴⁰Ar/³⁹Ar)_k=0.00703。

测定采用钨(Ta)熔样炉对样品进行阶步升温熔样, 每个样品分为 9~14 步加热释气, 温阶范围为

表 1 内蒙古达茂旗北部闪长岩和角闪石岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果
Table 1 SHRIMP U-Pb data of diorite and hornblende from northern Darhan Muminggan Joint Banner, Inner Mongolia

分析点	$(^{206}\text{Pb})^a)$		Th	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	年龄 $M_a(1\sigma)$		比值		误差相 关系数			
	$w_B/\%$	$w_B/10^{-6}$			$(^{206}\text{Pb}^*)^a)$	$(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})^b)$	$(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})^c)$	$(^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U})^d) \pm \%$		$(^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U})^d) \pm \%$		
NM08-13.1	0.10	401	765	48.8	461.1 ± 5.3	461.3 ± 5.4	461.9 ± 5.8	0.572	1.9	0.0742	1.2	0.81
NM08-13.2	—	246	547	34.0	450.7 ± 5.3	450.3 ± 5.3	450.1 ± 5.7	0.566	1.6	0.0724	1.2	0.74
NM08-13.3	—	114	338	21.3	456.6 ± 5.6	455.8 ± 5.6	456.5 ± 5.9	0.583	1.8	0.0734	1.3	0.68
NM08-13.4	0.06	1267	1631	103.0	456.3 ± 5.1	456.4 ± 5.2	457.0 ± 5.8	0.565	1.4	0.0734	1.2	0.88
NM08-13.5	0.08	1221	1617	101.0	451.1 ± 5.0	451.3 ± 5.1	451.8 ± 5.7	0.556	1.4	0.0725	1.2	0.88
NM08-13.6	0.58	453	453	28.2	448.3 ± 5.4	449.4 ± 5.4	450.9 ± 5.5	0.534	2.9	0.0720	1.2	0.73
NM08-13.7	—	1387	792	86.1	450.1 ± 5.1	449.9 ± 5.1	450.4 ± 5.6	0.562	1.4	0.0723	1.2	0.86
NM08-13.8	—	952	411	58.8	447.3 ± 5.1	447.3 ± 5.2	448.0 ± 5.5	0.554	1.4	0.0719	1.2	0.83
NM08-13.9	0.03	914	608	57.0	451.3 ± 5.1	451.2 ± 5.2	452.4 ± 5.8	0.561	1.5	0.0725	1.2	0.83
NM08-13.12	—	605	275	38.3	458.3 ± 5.5	458.1 ± 5.5	458.7 ± 5.9	0.575	1.7	0.0737	1.2	0.78
NM08-17.1	0.29	723	54	43.8	438.3 ± 8.6	438.1 ± 8.8	437.8 ± 8.8	0.545	2.4	0.0704	2.0	0.83
NM08-17.2	0.30	813	81	50.1	446.1 ± 8.8	445.8 ± 9.0	445.4 ± 9.0	0.556	2.4	0.0716	2.0	0.85
NM08-17.3	0.17	694	43	43.0	448.7 ± 8.9	447.8 ± 9.0	448.3 ± 9.0	0.574	2.9	0.0721	2.1	0.71
NM08-17.4	—	1339	48	80.7	437.3 ± 8.5	437.0 ± 8.6	437.3 ± 8.6	0.544	2.2	0.0702	2.0	0.91
NM08-17.5	0.21	738	35	46.4	454.0 ± 9.1	454.1 ± 9.3	454.0 ± 9.2	0.562	2.6	0.0730	2.1	0.80
NM08-17.6	0.27	787	31	49.3	452.3 ± 8.9	451.8 ± 9.0	451.9 ± 9.0	0.571	2.5	0.0727	2.0	0.80
NM08-17.7	0.17	791	34	49.8	455.4 ± 8.9	454.6 ± 9.1	455.0 ± 9.0	0.582	2.4	0.0732	2.0	0.86
NM08-17.8	0.13	1642	70	97.9	432.3 ± 8.4	431.8 ± 8.5	432.0 ± 8.5	0.539	2.2	0.0694	2.0	0.91
NM08-17.9	0.16	1179	37	73.4	450.4 ± 9.2	450.7 ± 9.3	450.3 ± 9.2	0.554	2.4	0.0724	2.1	0.88
NM08-17.10	0.27	899	33	55.9	449.5 ± 8.8	449.7 ± 8.9	449.0 ± 8.9	0.553	2.5	0.0722	2.0	0.80
NM08-17.11	0.33	644	27	40.9	459.5 ± 9.1	458.2 ± 9.3	458.0 ± 9.2	0.595	2.4	0.0739	2.1	0.85

注: a) Pb_0 和 Pb^* 分别指普通铅和放射成因铅。标准标定的误差为 0.50%, 但不包括在上述误差中, 只在比较不同靶的数据时使用; b) 以实测 ^{204}Pb 校正的普通铅; c) 假设 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄一致的普通铅; d) 假设 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄一致校正的普通铅。

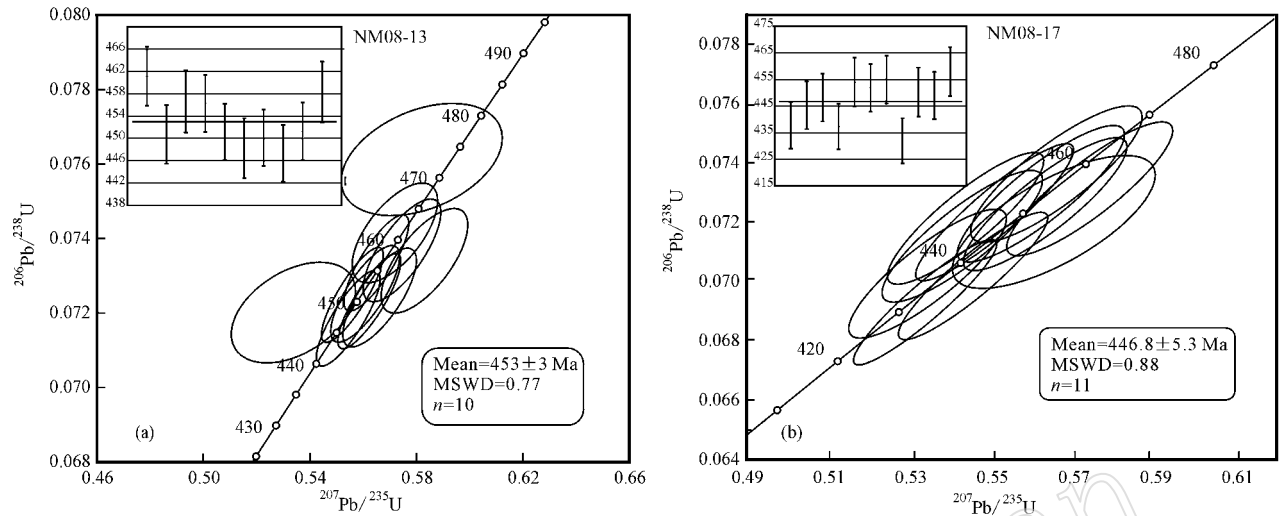


图 3 样品 NM08-13 (a) 和 NM08-17 (b) 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 U-Pb concordia diagrams of SHRIMP U-Pb for zircons from samples NM08-13 (a) and NM08-17 (b)

850~1 500℃,每个加热点在恒温状态下保持 20 min。系统分别采用海绵钛炉、活性炭冷井及锆钒铁吸气剂炉对气体进行纯化,海绵钛炉的纯化时间为 20 min,活性炭冷井的纯化时间为 10 min,锆钒铁吸气剂炉的纯化时间为 15 min。使用 RGA10 型质谱仪记录 5 组 Ar 同位素信号,信号强度以毫伏 (mV) 为单位记录。质谱峰循环测定 9 次,用峰顶值减去前后基线的平均值来获得 Ar 同位素的数据。

数据处理时,采用北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室编写的⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating 1.2 数据处理程序对各组 Ar 同位素测试数据进行校正计算,再采用 Isoplot 3.0 计算坪年龄及等时线年龄(Ludwig, 2003)。

2.2.2 测试结果

表 2 列出了 NM08-14 和 NM08-17 样品的角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段加热分析同位素数据测定结果。图 4 和图 5 列出了坪年龄和等时线年龄图谱。从表 2 和图 4 可看出,样品 NM08-14 角闪石年龄坪占³⁹Ar 总释出量的约 75.8%,坪年龄是 459.2 ± 2.4 Ma,年龄谱在最初的释气阶段(约占 20%的³⁹Ar)显示出异常的低年龄值,说明放射性⁴⁰Ar* 在矿物颗粒的边缘曾丢失过(图 4),可能是样品遭受蚀变所致,而在高温阶段(占约 8%的³⁹Ar)的低年龄值可能是其他微量组分(如斜长石)混入所致。拟合的等时线年龄 457.8 ± 4.6 Ma,坪年龄与等时线年龄具有良好的一致性,初始 Ar 同位素组成为 260 ± 52 ,在误差

范围内和大气值没有差别,说明样品冷却生成以来封闭良好,所得年龄可靠。从表 2 和图 5 可看出,角闪石样品 NM08-17 的坪年龄是 442.9 ± 4.2 Ma,年龄坪占³⁹Ar 析出总量的 74%。年龄谱在最初的释气阶段(约占 20%的³⁹Ar)显示出异常的低年龄值,说明放射性⁴⁰Ar* 在矿物颗粒的边缘曾丢失过(图 5),可能是样品遭受蚀变所致。拟合的等时线年龄 432.8 ± 8.0 Ma,坪年龄与等时线年龄在误差范围内一致,具有接近大气组成的初始比值说明矿物封闭时可能无过剩 Ar 的混入。

3 讨论

内蒙古中部早寒武世时,古蒙古洋壳处于拉张环境,区域上形成东西向洋盆,到奥陶纪,洋盆由拉张转变为挤压,古蒙古洋板块向华北板块下插俯冲,沿华北板块北缘形成一系列单型火山岛弧链,如白乃庙火山岛弧-乌德火山岛弧(尚恒胜等,2003)。

前人应用 TIMS 锆石 U-Pb 法(尚恒胜等,2003;许立权等,2003b;陶继雄等,2005)和 SHRIMP 锆石 U-Pb 法(张维等,2008)对该套岛弧侵入岩石的定年结果表明,大部分年龄在中晚奥陶世时期,为 440~474 Ma。本文对达茂旗北部的角闪石岩样品进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,获得年龄为 453 ± 3 Ma 和 446 ± 5.3 Ma,与前人在该岛弧带获得的年龄非常接近,可能记录了晚奥陶世末的洋壳消减事件。

表 2 达茂旗北部样品 NM08-13 和 NM08-17 激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学测试结果
Table 2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar data of samples NM08-13 and NM08-17 from northern Darhan Muminggan Joint Banner

Run ID	Age /Ma	$\pm(\text{Ma})$	$^{40}\text{Ar}^*/\%$	^{39}Ar (Mols)	^{40}Ar	$\pm^{40}\text{Ar}$	^{39}Ar	$\pm^{39}\text{Ar}$	^{38}Ar	$\pm^{38}\text{Ar}$	^{37}Ar	$\pm^{37}\text{Ar}$	^{36}Ar	$\pm^{36}\text{Ar}$
J=0.005 997														
NM08-14														
01	12.57	15.2	17.57	1.42E-14	5.898 8	1.037 4	0.891 6	0.000 4	0.218 8	0.002 9	3.566 9	0.001 2	0.017 4	0.002 5
02	52.34	3.09	25.89	7.88E-15	9.320 6	0.107 9	0.493 1	0.006 7	0.106 7	0.001 1	2.386 7	0.002 9	0.024 0	0.000 8
03	289.56	4.06	61.91	1.56E-14	45.551 0	0.514 5	0.975 0	0.017 0	0.352 0	0.002 5	5.573 0	0.001 4	0.060 2	0.002 2
04	459.2	0.69	96.03	7.80E-14	244.906 9	0.821 3	4.880 7	0.015 4	1.889 7	0.009 4	22.718 6	0.005 9	0.038 9	0.001 5
05	459.05	4.39	93.56	2.85E-14	91.775 8	1.250 2	1.783 4	0.012 5	0.709 9	0.007 4	9.445 0	0.005 7	0.022 5	0.002 6
06	460.6	3.97	96.55	7.19E-14	225.255 9	1.813 9	4.498 3	0.078 2	1.849 2	0.087 4	21.576 6	0.007 5	0.032 0	0.001 8
07	395.92	6.03	96.11	9.77E-15	25.949 5	0.468 1	0.611 5	0.007 5	0.224 5	0.003 6	3.202 0	0.000 8	0.004 3	0.001 4
08	302.53	6.24	70.38	5.22E-15	14.079 2	0.312 3	0.326 5	0.002 1	0.120 9	0.001 5	1.517 7	0.001 5	0.014 5	0
09	307.22	5.97	89.26	4.19E-15	9.084 7	0.345 9	0.262 5	0.007 8	0.080 8	0.003 4	0.800 8	0.004 2	0.003 5	0.000 6
NM08-17														
01	75.42	3.35	42.66	9.87E-15	10.293 5	0.584 8	0.6179	0.023 2	0.105 9	0.002 6	1.831 7	0.003 5	0.020 5	0.000 7
02	172.25	2.36	59.74	7.03E-15	12.269 9	0.217 2	0.440 0	0.005 0	0.062 2	0.003 8	1.894 3	0.007 0	0.017 2	0.000 4
03	378.20	4.62	89.29	1.61E-14	43.635 4	0.581 7	1.009 1	0.024 7	0.174 1	0.004 3	11.379 6	0.013 1	0.018 9	0.001 2
04	443.41	7.51	91.31	3.36E-14	106.315 0	1.620 5	2.103 2	0.046 9	0.419 4	0.011 3	21.591 8	0.003 8	0.037 1	0.006 6
05	442.08	24.61	86.94	5.71E-15	18.934 8	0.060 1	0.357 3	0.020 5	0.065 9	0.005 7	2.735 2	0.009 2	0.009 1	0
06	441.28	13.02	94.73	1.40E-14	42.606 3	1.122 0	0.878 7	0.049 5	0.155 3	0.004 6	8.244 9	0.010 6	0.009 8	0.002 0
07	444.00	8.89	95.79	2.28E-14	68.956 9	0.4677	1.429 8	0.031 2	0.200 3	0.086 2	15.970 5	0.177 6	0.014 1	0.004 0
08	440.03	8.42	95.94	1.32E-14	39.326 8	0.311 2	0.824 3	0.017 1	0.142 5	0.001 1	8.103 7	0.003 9	0.007 6	0.002 3
09	443.99	5.93	95.75	4.44E-15	13.415 8	0.348 4	0.277 7	0.006 7	0.062 1	0.007 2	2.514 2	0.003 5	0.002 6	0.000 7

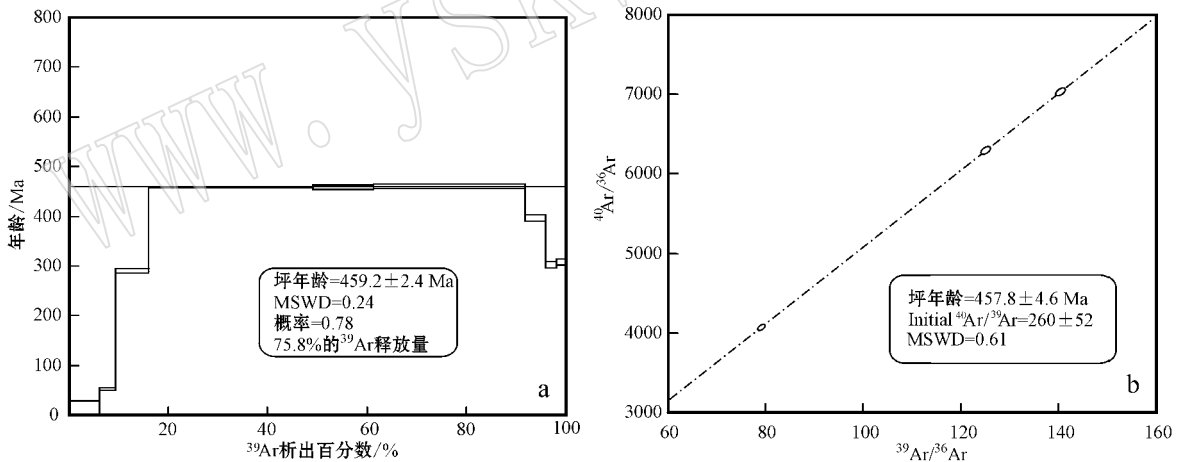


图 4 达茂旗北部样品 NM08-14 的角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄和等时线年龄图谱

Fig. 4 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar plateau age spectrum and isochron age of hornblende from sample NM08-14 of northern Darhan Muminggan Joint Banner

这一结果为古亚洲洋在巴特敖包岛弧岩浆岩带这一早古生代褶皱带的消减不晚于 453 ± 3 Ma 提供了证据。而刘敦一等(2003)对本研究区东部同属这一早古生代褶皱带的温都尔庙林凯蛇绿岩中包含石英闪长岩、奥长花岗岩、斜长岩和英安岩的埃达克岩进行精确的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年表明,温都尔庙古洋壳的消减可能始于约 467 ± 13 Ma 或更早。

另外,来自古生物和地层方面的证据也为这一

岩浆岛弧带提供了时代上的制约。达茂旗北部岛弧带北侧的乌德蛇绿混杂岩带内变形的大量岛弧火山岩与之相伴生的泥质岩石中产笔石 *Callograptus* sp.、*Desmograptus* sp.、*Dictyonema* sp.(地矿部内蒙古地质矿产勘查开发局,1997),其时代为早中奥陶世。而上志留统西别河组(S_{3x})以角度不整合覆盖在混杂带和岛弧带上表明,该岛弧带形成的时间要早于晚志留统西别河组的沉积时代。

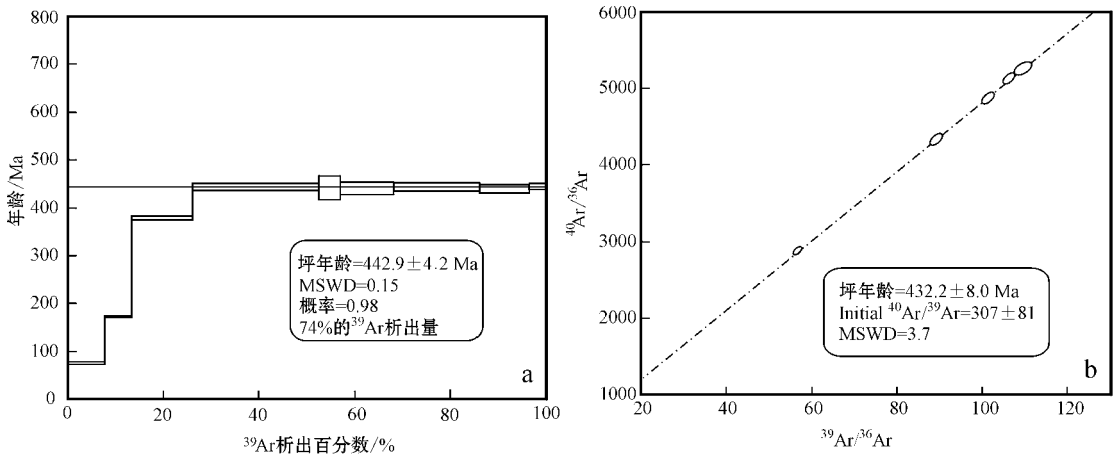


图5 达茂旗北部样品 NM08-17 的角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄和等时线年龄图谱

Fig. 5 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age spectrum and isochron age of hornblende from sample NM08-17 of northern Darhan Muminggan Joint Banner

根据 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年原理,在高温阶段所获得的坪年龄代表样品早期结晶时代。采用常规 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年系统对样品 NM08-14 和 NM08-17 进行角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年获得年龄:坪年龄 459.2 ± 2.4 Ma 和 442.9 ± 4.2 Ma,与 SHRIMP U-Pb 定年结果基本一致。而角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 体系的封闭温度是 $350 \pm 50^\circ\text{C}$,SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄在误差范围内一致,这显示岩浆结晶并快速冷却的一个过程,其侵位结晶并冷却到角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 体系封闭温度在 $450 \sim 440$ Ma 之间完成。岩浆结晶并快速冷却可能有两方面的原因:一方面是岩浆岩就位的深度较浅,形成于地壳的较浅层次,结晶冷却速度较快;另一方面,可能是岩体侵位于较深的部位,后期快速抬升所致。考虑到本区岩浆岩具有正常岛弧和埃达克岩的双重地球化学性质(许立权等,2003a,2003b;陶继雄等,2005;张维等,2008),其形成时深度可能较大(张旗,2010^①)。若其侵位深度也较大,那么其快速抬升可能是由于岛弧带和华北板块北缘碰撞所引起的,暗示这一碰撞事件发生在 440 Ma 左右,早于张维等(2008)推测的 417 ± 2 Ma 以及刘敦一等(2003)认为的 429 Ma。这是一个值得进一步研究的问题,需要后续工作来解决。角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄还表明:早古生代岩体侵位并冷却之后,后期的构造热事件未影响到角闪石的 Ar-Ar 封

闭体系,暗示后期构造热事件强度不高,或者未发生强烈的构造热事件。

4 结论

(1)达茂旗北部,产于华北板块北缘白乃庙岛弧带西段的花岗闪长岩中闪长岩和角闪石岩包体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果表明其形成于 450 Ma 左右,是中晚(或更早)奥陶世洋壳消减事件的产物。

(2)闪长岩和角闪石岩常规角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学测试结果为 459.2 ± 2.4 Ma 和 442.9 ± 4.2 Ma,与 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果基本一致,这表明岩浆经历了快速冷却结晶过程,这一过程可能暗示本区岛弧带和华北板块的碰撞事件。

(3)角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄表明早古生代岩体侵位并冷却之后,后期的构造热事件未影响到角闪石的 Ar-Ar 封闭体系,暗示后期未发生强烈的构造热事件。

致谢 感谢 Nasdala 博士提供实验所需的“锆石标准 M257”,感谢 Curtin 理工大学的高旻研究员在装载样品、仪器调试和仪器监控方面所提供的帮助及北京离子探针中心的苗来成、董春艳博士在远程实验协助和数据处理方面所提供的帮助。

① 张旗. 2010. 花岗岩与地质厚度的关系——花岗岩讨论(10)(2010.04.22). <http://www.ysxb.ac.cn/ysxb/ch/index.aspx>.

References

- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143: 602~622.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia, Department of Geology and Mineral Resources. 1997. Regional geological survey map directions (1:50 000) WuLanbulage (K49E013008) [R]. Hohhot: Institute of geological survey, Inner Mongolia (in Chinese).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia. 1991. Regional geology of Inner Mongolia Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale [J]. *Journal of Geological Society of London*, 149: 171~184.
- Jian P, Liu D Y, Kroner A, *et al.* 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth [J]. *Lithos*, 101: 233~259.
- Li Shuangqing. 1997. Early Paleozoic Era of terrane pieced together and accreted in Middle of Inner Mongolia [J]. *Inner Mongolia Geology*, (1): 18~23 (in Chinese with English abstract).
- Liu Duni, Jian Ping, Zhang Qi, *et al.* 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic subduction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 317~327 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.0, a geochronological toolkit for Microsoft Excel [A]. Berkely: Berkely Geochronological Center Special Publication [C], 4: 35~32.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257-a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32: 247~265.
- Shang Hengsheng, Tao Jixiong, Bao J, *et al.* 2003. The arc-basin system and tectonic significance of Early Paleozoic in Baiyunebo area Inner Mongolia [J]. *Geological Survey and Research*, 26(3): 160~168 (in Chinese with English abstract).
- Shao Jidong. 1998. Tectonic subarea and its characteristics in Inner Mongolia [J]. *Inner Mongolia Geology*, (2): 1~23 (in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating [J]. *Geological Review*, 48 (Suppl.): 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Tang Kedong. 1992. Tectonic Evolution and Minerogenetic Regularities of the Fold Belt along the Northern Margins of Sino-Korean Plate [M]. Beijing: Peking University Press (in Chinese).
- Tao Jixiong, Bai Libing, Bao J, *et al.* 2003. Rock record of Permian subducting orogenic process in Mandala, Inner Mongolia [J]. *Geological Survey and Research*, 26(4): 241~249 (in Chinese with English abstract).
- Tao Jixiong, Xu Liqian, He Feng, *et al.* 2005. Petrological evidence for subduction of the Early Paleozoic oceanic crust in Bart-Obo, Inner Mongolia [J]. *Geological Survey and Research*, 28(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Study method on the zircon genesis mineralogy and its constraint on interpretation of the U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1 589~1 604 (in Chinese with English abstract).
- Xu Liqian, Deng Jinfu, Chen Zhiyong, *et al.* 2003a. The identification of Ordovician adakites and its significance in Northern Damaoqi, Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 17(4): 428~434 (in Chinese with English abstract).
- Xu Liqian and Tao Jixiong. 2003b. Characteristics and tectonic significance of Ordovician granites in northern Damaoqi, Inner Mongolia [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 17~22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei and Jian Ping. 2008. SHRIMP dating of Early Paleozoic granites from north Damaoqi, Inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 778~787 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenfa. 1994. Boundary of geosyncline and platform redivided according to deep geophysical data and old plate of structural framework [J]. *Inner Mongolia Geology*, (suppl.): 1~15 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 地矿部内蒙古地质矿产勘查开发局. 1997. 区域地质调查图幅说明书 (1:5万) 达茂旗地区乌兰布拉格幅 (K49E013008) [R]. 呼和浩特: 内蒙古自治区地质调查院.
- 李双庆. 1997. 内蒙古中部早古生代地体的拼合与增生 [J]. *内蒙古地质*, (1): 18~23.
- 刘敦一, 简平, 张旗, 等. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据 [J]. *地质学报*, 77(3): 317~327.
- 内蒙古地质矿产局. 1991. 内蒙古区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.
- 尚恒胜, 陶继雄, 宝音乌力吉, 等. 2003. 内蒙古白云鄂博地区早古生代弧-盆地系及其构造意义 [J]. *地质调查与研究*, 26(3): 160~168.
- 邵积东. 1998. 内蒙古大地构造分区及其特征 [J]. *内蒙古地质*, (2): 1~23.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论 [J]. *地质评论*, 48(增刊): 26~30.
- 唐克东. 1992. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律 [M]. 北京: 北京大学出版社.
- 陶继雄, 白立兵, 宝音乌力吉, 等. 2003. 内蒙古满都拉地区二叠纪俯冲造山过程的岩石记录 [J]. *地质调查与研究*, 26(4): 241~249.
- 陶继雄, 许立权, 贺锋, 等. 2005. 内蒙古巴特敖包地区早古生代洋壳消减的岩石证据 [J]. *地质调查与研究*, 28(1): 1~8.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. *科学通报*, 49(16): 1 589~1 604.
- 许立权, 邓晋福, 陈志勇, 等. 2003a. 内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义 [J]. *现代地质*, 17(4): 428~434.
- 许立权, 陶继雄. 2003b. 内蒙古达茂旗北部奥陶纪花岗岩类特征及其构造意义 [J]. *华南地质与矿产*, (1): 17~22.
- 张维, 简平. 2008. 内蒙古达茂旗北部早古生代花岗岩类 SHRIMP U-Pb 年代学 [J]. *地质学报*, 82(6): 778~787.
- 张振法. 1994. 根据深部地球物理资料和古板块构造格架重新厘定槽台界线 [J]. *内蒙古地质*, (增刊): 1~15.