

doi:10.3799/dqkx.2016.141

内蒙古乌拉特中旗哈达呼舒基性岩体形成的构造背景与古亚洲洋的早期俯冲历史

刘金龙¹, 孙丰月^{1*}, 王英德¹, 李良¹, 张宇婷¹, 辛未¹, 胡安新²

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 江西省纪元矿业有限公司, 江西南昌 330030

摘要: 内蒙古乌拉特中旗地区在大地构造上横跨华北板块边缘和兴蒙造山带, 区域基性岩体多以小岩株形式产出, 侵入时代缺少可靠的资料。对乌拉特中旗哈达呼舒基性岩进行锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学以及 Hf 同位素研究, 对其岩石成因和古亚洲洋板块俯冲作用的开始时间给予制约。哈达呼舒基性岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表明, 该岩体形成于晚寒武世 (513 ± 2 Ma)。在地球化学上, 它们属于钙碱性系列, 富集大离子亲石元素(如 K、Rb、Ba), 亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Zr、Ti)和 LREE。岩石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 14.15~15.03, 单阶段模式年龄(T_{DM1})为 518~556 Ma, 与岩石原岩形成时代 513 Ma 相近, 认为其原始岩浆起源于亏损岩石圈地幔。综合区域同时代火成岩的研究成果, 认为哈达呼舒基性岩体形成于古亚洲洋俯冲消减环境。

关键词: 地质年代学; 锆石 Hf 同位素; 基性岩; 乌拉特中旗; 地球化学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2016)12-2019-12

收稿日期: 2016-04-15

Tectonic Setting of Hadahushu Mafic Intrusion in Urad Zhongqi Area, Inner Mongolia; Implications for Early Subduction History of Paleo-Asian Ocean Plate

Liu Jinlong¹, Sun Fengyue^{1*}, Wang Yingde¹, Li Liang¹, Zhang Yuting¹, Xin Wei¹, Hu Anxin²

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Jiangxi Jiyuan Mining Corporation, Nanchang 330030, China

Abstract: The Urad Zhongqi area of western Inner Mongolia crosses the North China Plate margin and Xing'an-Mongolia Orogenic Belt, which distributed regional basic rock massif occurred as small stocks, and a lack of reliable data of intrusion age. This paper reports LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical and Hf isotopic data of Hadahushu mafic intrusion in Urad Zhongqi area, with the aim of constraining its petrogenesis and the beginning time of subduction of the Paleo-Asian oceanic plate. LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircons from the mafic intrusion indicate that the intrusion formed at the Late Cambrian (513 ± 2 Ma). The geochemical characteristics of these rocks indicate that they are the calc-alkaline series, and are characterized by enrichment in LILE (such as K, Ba, Rb), relatively depleted in HFSE (such as Nb, Ta, Zr, Ti) and LREE. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and one-stage model ages (T_{DM1}) of zircons from the rock vary from 14.15 to 15.03 and from 518 to 556 Ma, respectively. These characteristics suggest that the primary magma was derived from the depleted lithospheric mantle source. Based on the previous study, we conclude that the formation of mafic intrusion was related to the subduction of the Paleo-Asian oceanic plate.

Key words: geochronology; zircon Hf isotope; mafic intrusion; Urad Zhongqi; geochemistry.

中亚造山带是全球显生宙陆壳增生与改造最强烈的地区之一, 其形成与古亚洲洋的演化密切相关

(Sengör *et al.*, 1993)。兴蒙造山带位于中亚造山带的东段, 为华北板块与其北部陆块碰撞拼合的产物,

基金项目: 内蒙古乌拉特中旗图古日格金矿区及外围金、铂、镍成矿潜力评价。

作者简介: 刘金龙(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事矿床学研究。E-mail: liujinlong0815@yeah.net

* 通讯作者: 孙丰月, E-mail: sfy@jlu.edu.cn

引用格式: 刘金龙, 孙丰月, 王英德, 等, 2016. 内蒙古乌拉特中旗哈达呼舒基性岩体形成的构造背景与古亚洲洋的早期俯冲历史. 地球科学, 41(12): 2019-2030.

具复杂的演化历史,存在波及面广且持续时间较长的构造—岩浆活动,经历了多阶段的地质演化和强烈的大陆改造过程,具有复杂多样的地壳物质组成和结构构造,蕴藏丰富的矿产和油气资源,成为国内外学者研究的热点地区之一(洪大卫等,2000;肖文交等,2008)。研究人员近年来通过对区域变质和变形作用、碎屑锆石等研究,认为古亚洲洋构造体系开始的时间主要集中于 518~500 Ma(徐备和陈斌,1997;Jian *et al.*, 2008;周志广等,2009;柳长峰,2010;谷丛楠等,2012;Xu *et al.*, 2013)。

内蒙古乌拉特中旗地区在大地构造上横跨华北板块边缘和兴蒙造山带。区域基性岩体多以小岩株形式产出,侵入时代缺少可靠的资料:以往人们通过野外接触关系推断大量基性岩的侵入时代为古元古代或早二叠世(周志广等,2009;胡安新,2014);根据大区域 1:5 万矿调岩体形成时代为早古生代;区域

特额格日图超基性岩体 Sm-Nd 同位素年代测试结果年龄为 413 ± 13 Ma,但缺少可信的数据资料(马娟,2010)。鉴于此,本文对哈达呼舒岛弧基性岩体进行了详细的年代学、地球化学及 Hf 研究同位素研究,旨在揭示其形成时代及构造背景。

1 地质背景及样品描述

研究区地处内蒙古西部乌拉特中旗,大地构造位置位于中亚造山带中段(图 1a),西拉木伦断裂以北,索伦—林西断裂一线以南,华北板块北部陆缘白乃庙—温都尔庙早古生代陆缘增生带,具有华北古板块基底(Xiao *et al.*, 2009)(图 1b),古生代受古亚洲洋构造域控制,在早古生代发生了多次洋壳俯冲事件,苏尼特右旗以南的温都尔庙—图林凯地区形成温都尔庙俯冲增生杂岩带,其南侧出现白乃庙

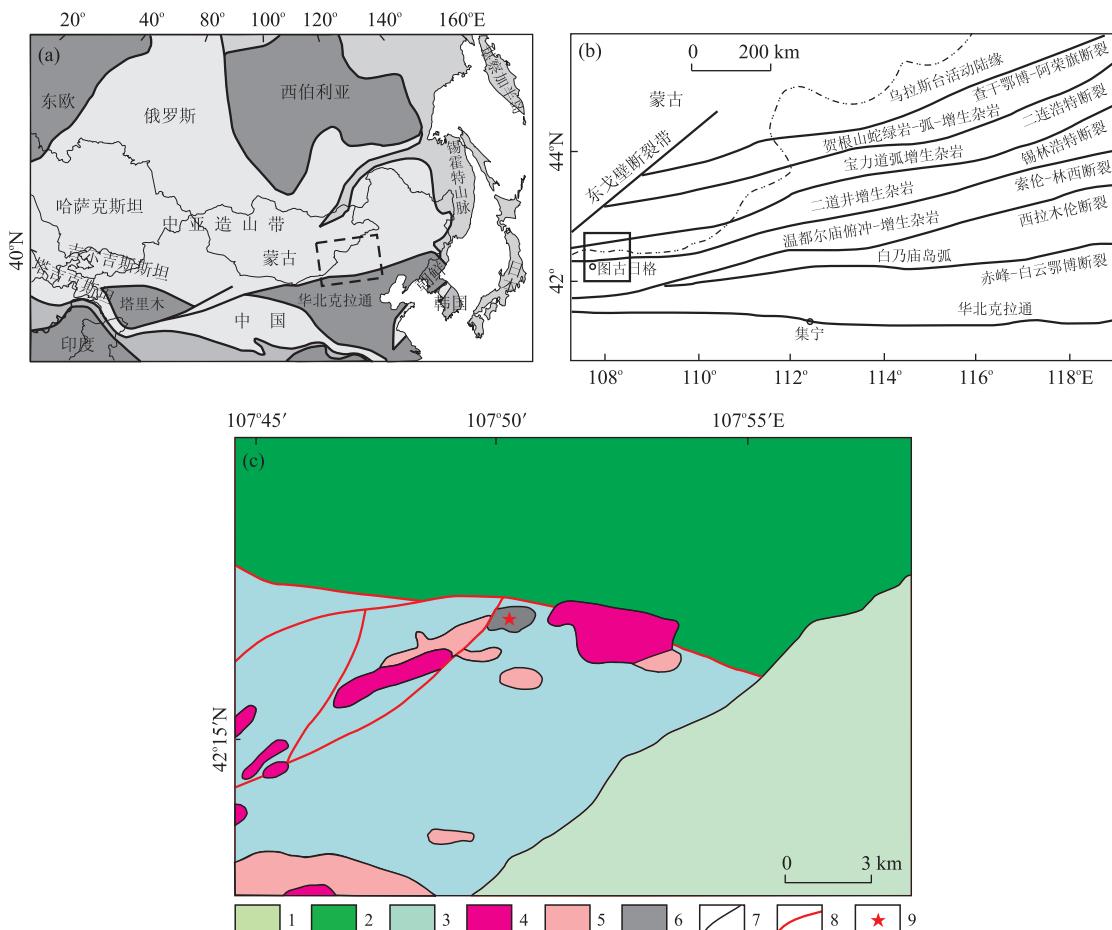


图 1 研究区地质略图

Fig. 1 Geological sketch of the studied area

图 a 据 Safonova and Santosh(2014);图 b 据 Xiao *et al.* (2009);图 c 据矿区资料;胡安新(2014)。1. 上白垩统;2. 温都尔庙群;3. 中元古界宝音图群;4. 下志留统花岗闪长岩;5. 下志留统钠长花岗岩;6. 寒武系基性岩体;7. 地层界限;8. 断层;9. 取样点

岛弧岩系; 芒和特一二道井—红格尔一线形成二道井增生杂岩带, 其北侧为宝力道岛弧增生杂岩带(Xiao *et al.*, 2003). 前人则称之为南、北“双俯冲”造山带(Xu *et al.*, 2013; 徐备等, 2014). 其间还经历了若干微陆块之间以及微陆块与南北主板块之间的碰撞拼贴(胡安新, 2014; 王键等, 2016; 王树庆等, 2016).

区内出露地层包括宝音图群、温都尔庙群及白垩系(图 1c). 中元古界宝音图群广泛出露于研究区东北部, 变质程度为绿片岩相到角闪岩相(杜理科和葛梦春; 2010), 自下而上分别为: 石英岩变粒岩组、石榴子石片岩组及石英岩大理岩组. 孙立新等(2013)对宝音图地块中变质侵入体和变质地层中石英岩进行锆石 U-Pb 研究, 获得变质侵入体年龄为 1672 ± 10 Ma, 宝音图群石英岩的沉积下限为 1426 Ma.

温都尔庙群零星出露于区内东北部, 包括绿片岩组和变质砂岩组. 该群变质基性火山岩中锆石来源复杂, 年龄变化从晚太古代到早中生代, Chu *et al.* (2013)对此进行过深入研究: 岩石中 $2734 \sim 1600$ Ma 的锆石可能来自华北克拉通捕获锆石(Zhao *et al.*, 2000); $1000 \sim 700$ Ma 的锆石可能与中亚造山带东段新元古代的岩浆岩有关(Zhou *et al.*, 2012); $494 \sim 300$ Ma 岩浆锆石应来自早古生代岛弧带中的中酸性岩浆岩(Chen *et al.*, 2000); 最年轻锆石年龄为 $261 \sim 246$ Ma, 可能与该时段广泛发育的花岗岩相关(施光海等, 2004). 由此可知温都尔庙群变质基性火山岩原岩的形成年龄应该在晚二叠世—早三叠世或之后.

上白垩统为一套砖红色泥岩、砂岩、砂砾岩层, 不整合覆盖于中元古界宝音图群. 研究区内断裂主要为北东东和近东西向两组. 区内侵入岩发育, 主要

有下志留统花岗闪长岩、下志留统钠长花岗岩(王英德, 2016).

哈达呼舒基性岩变质为角闪岩, 该基性岩以岩体形式产出, 与围岩接触界线明显, 笔者野外未发现侵入接触现象(如冷凝边、变质晕等). 本次研究样品取样位置为 $N42^{\circ}17'10''$, $E107^{\circ}50'44''$. 样品为定向构造, 柱状变晶结构. 角闪石($\pm 70\%$)粒度不均匀, 大的可达到 2.5 mm, 他形粒状、半自形板状、浑圆状; 小者不足 0.5 mm, 定向性明显, 半自形—他形柱状、细柱状. 黜帘石集合体($15\% \sim 20\%$), 笔者推测可能由斜长石蚀变而来. 斜长石含量较少($\pm 5\%$), 副矿物为榍石、锆石、不透明矿物等(图 2).

2 分析方法

2.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学

锆石挑选由河北省廊坊区域地质调查研究所实验室利用标准重矿物分离技术分选完成. 经过双目镜下仔细挑选, 将不同特征的锆石粘在双面胶上, 并用无色透明的环氧树脂固定; 待其固化之后, 将表面抛光至锆石中心. 在测试前, 通过反射光和 CL 图像仔细研究锆石的晶体形态与内部结构特征, 以选择最佳测试点. 锆石制靶、反射光、阴极发光以及锆石 U-Pb 年龄测定和痕量元素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行. 本次测试采用的激光剥蚀束斑直径为 $32 \mu\text{m}$, 激光剥蚀样品的深度为 $20 \sim 40 \mu\text{m}$; 实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气. 锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标, 元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标元素(锆石中 SiO_2 的质量分数为 32.8%(袁洪林等, 2003)), 分析方法见 Yuan *et al.* (2004); 普通铅

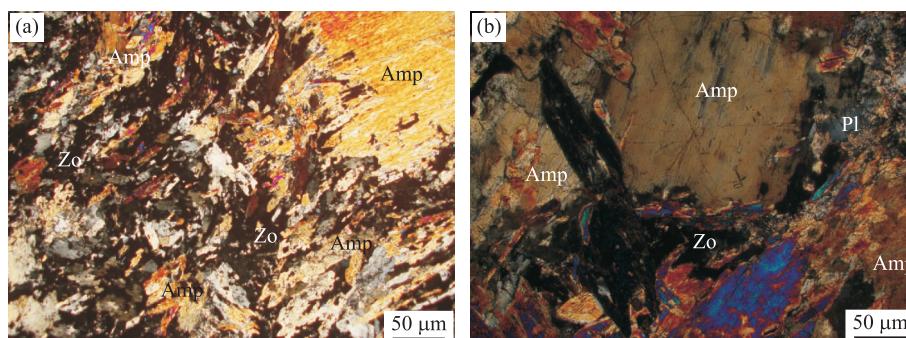


图 2 岩石显微照片

Fig. 2 Microphotographs of the rocks

Amp. 角闪石; Pl. 斜长石; Zo. 黜帘石

校正采用 Anderson(2002)推荐的方法;样品的同位素比值及元素含量计算采用 ICP-MS-DATACAL 程序(Liu *et al.*, 2008, 2010),年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot 程序(Ludwig, 2003).

2.2 岩石地球化学测试

研究样品的主量及微量元素的分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,主量元素使用 X-射线荧光光谱仪(飞利浦 PW2404)完成,其中 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MgO 、 Na_2O 检测限为 0.015%, CaO 、 K_2O 、 TiO_2 检测限为 0.01%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 MnO 、 P_2O_5 检测限为 0.005%; FeO 用容量法完成(检测限为 0.1%).微量元素及稀土元素使用电感耦合等离子体质谱 Finnigan MAT HR-ICP-MS(Element I型)完成,详细分析流程见 Rudnick *et al.* (2004).

2.3 锆石 Hf 同位素测试

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成.激光剥蚀系统为 GeoLas 2005(Lambda Physik, 德国), MC-ICP-MS 为 Neptune Plus (Thermo Fisher Scientific, 德国).采用单点剥蚀模式,斑束固定为 44 μm .详细仪器操作条件和分析方法可参照(Hu *et al.*, 2012).

$^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 和 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb} = 1.132685$ 被用于计算 Hf 和 Yb 的质量分馏系数 β_{Hf} 和 β_{Yb} (Fisher *et al.*, 2014). $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}$ 的比值被用于计算 $\text{Hf}(\beta_{\text{Hf}})$ 和 $\text{Yb}(\beta_{\text{Yb}})$ 的质

量偏差. 使用 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 0.79639$ 来扣除 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同量异位干扰(Fisher *et al.*, 2014). 使用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02656$ (Janne *et al.*, 1997) 来扣除干扰程度相对较小的 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同量异位干扰. 分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)采用软件 ICP-MS Data Cal(Liu *et al.*, 2010)完成.

3 分析结果

3.1 锆石 LA-ICP-MS 年代学

岩石中锆石主要为短柱状或粒状,锆石晶面较干净,内部构造均匀,部分不发光,具岩浆结晶锆石特征(图 3a).它们的 U 含量为 $160 \times 10^{-6} \sim 2303 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $111 \times 10^{-6} \sim 1875 \times 10^{-6}$ (表 1), $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 比值为 0.46~0.97,符合岩浆锆石特征(Weaver, 1991).其中有 12 个锆石点位数据均落在谐和线上及其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据的加权平均年龄为 513 ± 2 Ma(MSWD=0.4, 图 3b).

此外,有两个锆石 U 含量分别为 296×10^{-6} 、 178×10^{-6} , Th 含量分别为 0.33×10^{-6} 、 0.06×10^{-6} (表 1), $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 比值分别为 0.001、0.0004(<0.1),为变质锆石(Weaver, 1991).两个锆石点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 386 Ma、385 Ma,代表变质年龄.

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

岩石 SiO_2 含量为 47.02%~

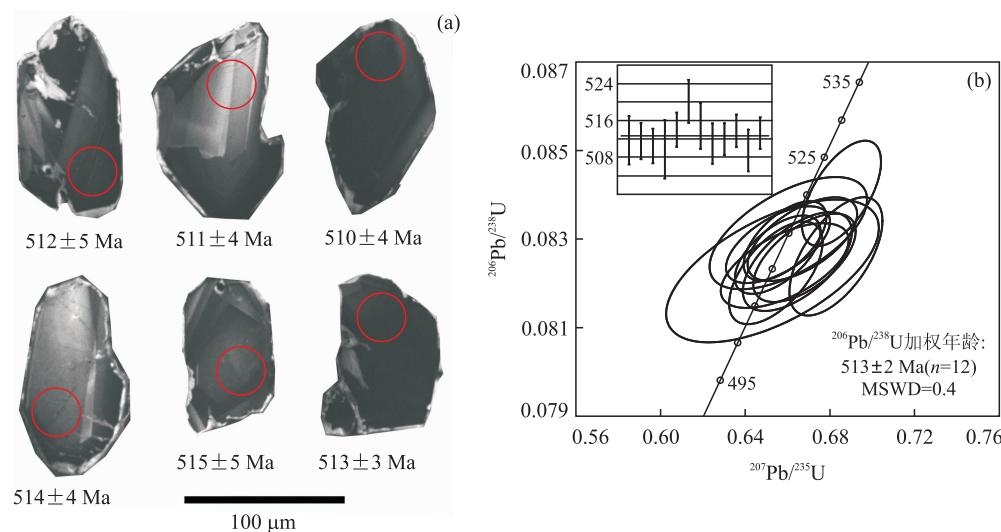


图 3 岩石锆石 CL 图像和 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 CL images and U-Pb concordia diagram of zircons

表1 岩石中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICPMS zircon U-Pb analyses of the rocks

样品	Th (10^{-6})	U (10^{-6})	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				Ratio	1σ	Ratio	1σ	Ratio	1σ	$t(\text{Ma})$	$1\sigma(\text{Ma})$
HDHS-1	1 143	1 899	0.602 17	0.059 68	0.001 29	0.682 87	0.014 49	0.082 61	0.000 88	512	5
HDHS-2	1 089	1 462	0.744 48	0.058 33	0.001 42	0.668 02	0.015 97	0.082 57	0.000 66	511	4
HDHS-3	231	311	0.742 66	0.057 96	0.001 85	0.658 70	0.019 94	0.082 40	0.000 63	510	4
HDHS-4	111	160	0.691 17	0.058 39	0.002 97	0.652 92	0.033 17	0.082 28	0.001 06	510	6
HDHS-5	380	505	0.753 24	0.058 19	0.001 53	0.667 03	0.017 08	0.083 00	0.000 62	514	4
HDHS-6	1 875	2 303	0.814 27	0.059 12	0.001 16	0.685 50	0.012 32	0.084 03	0.000 78	520	5
HDHS-7	555	572	0.970 06	0.059 45	0.003 97	0.660 37	0.024 56	0.083 13	0.000 84	515	5
HDHS-8	421	803	0.523 82	0.058 09	0.001 47	0.664 64	0.016 99	0.082 49	0.000 74	511	4
HDHS-9	717	1 553	0.461 97	0.057 11	0.001 17	0.655 38	0.013 37	0.082 64	0.000 58	512	3
HDHS-10	679	1 396	0.486 04	0.057 13	0.001 11	0.658 81	0.012 88	0.082 96	0.000 59	514	4
HDHS-11	781	1 380	0.565 63	0.057 28	0.001 26	0.654 49	0.014 57	0.082 23	0.000 76	509	5
HDHS-12	769	1 205	0.638 25	0.056 86	0.001 44	0.655 49	0.016 22	0.082 87	0.000 57	513	3
HDHS-13	0.33	296	0.001 12	0.063 42	0.002 08	0.538 65	0.016 47	0.061 68	0.000 64	386	4
HDHS-14	0.06	178	0.000 36	0.057 24	0.002 76	0.484 91	0.023 21	0.061 55	0.000 71	385	4

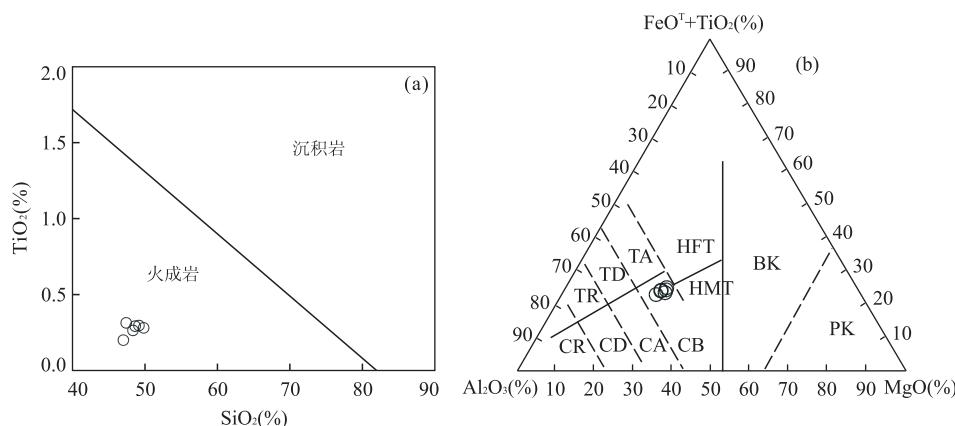


图4 岩石的 TiO_2 - SiO_2 图解(a)和 $(\text{FeO}^T + \text{TiO}_2)$ - Al_2O_3 - MgO 三角图(b)

Fig. 4 TiO_2 - SiO_2 diagram (a) and $(\text{FeO}^T + \text{TiO}_2)$ - Al_2O_3 - MgO diagram (b) of the amphibolite rocks

PK. 橄榄质科马提岩; BK. 玄武质科马提岩; HMT. 高镁拉班玄武岩; HFT. 高铁拉班玄武岩; TA. 拉斑质安山岩; TD. 拉斑质英安岩; TR. 拉斑质流纹岩; CB. 钙碱性玄武岩; CA. 钙碱性安山岩; CD. 钙碱性英安岩; CR. 钙碱性流纹岩; 图 b 据 Jensen(1976)

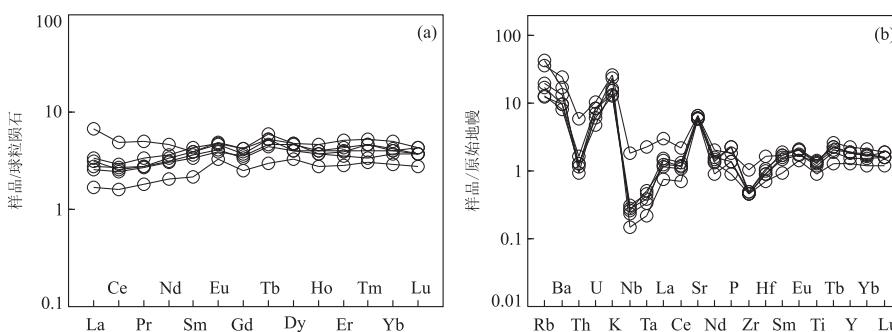


图5 岩石稀土元素球粒陨石标准化配分图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of amphibolite

a. 标准化值据 Boynton(1984); b. 标准化值据 Sun and McDonough(1989)

49.82%, Al_2O_3 含量为 16.70%~17.65%, CaO 含量为 11.35%~13.29%, TiO_2 含量为 0.20%~

0.31%; MgO 和 $\text{Mg}^{\#}$ 分别为 8.29%~9.63% 和 6.6.92~68.46(表2). 在 SiO_2 - TiO_2 图解上显示原

表 2 岩石主量元素(%)、微量元素和稀土元素(10^{-6})含量及有关参数Table 2 Major (%), trace and rare element (10^{-6}) content and parameter of the rocks

样品	HDHS-Y1	HDHS-Y2	HDHS-Y3	HDHS-Y4	HDHS-Y5	HDHS-Y6
SiO ₂	48.64	48.35	47.40	49.82	47.02	49.17
TiO ₂	0.29	0.26	0.31	0.28	0.20	0.30
Al ₂ O ₃	16.88	16.70	16.83	17.31	17.65	17.11
Fe ₂ O ₃	1.34	1.40	1.46	1.23	1.29	1.37
FeO	6.40	6.55	6.82	6.00	6.75	6.39
MnO	0.16	0.16	0.18	0.15	0.16	0.15
MgO	8.63	9.16	9.28	8.29	9.63	8.71
CaO	12.77	12.44	13.29	11.57	12.17	11.35
Na ₂ O	2.04	1.92	1.48	2.62	1.90	2.18
K ₂ O	0.39	0.50	0.40	0.46	0.72	0.80
P ₂ O ₅	0.02	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04
LOI	1.68	1.71	1.68	1.55	1.69	1.69
Mg [#]	67	68	67	68	68	67
La	0.79	0.98	0.87	1.05	0.53	2.09
Ce	1.95	2.08	2.16	2.36	1.28	3.94
Pr	0.33	0.34	0.34	0.41	0.22	0.61
Nd	1.84	1.89	2.01	2.15	1.24	2.82
Sm	0.66	0.70	0.76	0.84	0.42	0.76
Eu	0.29	0.30	0.36	0.35	0.24	0.34
Gd	0.92	0.87	1.10	1.10	0.65	0.97
Tb	0.22	0.21	0.25	0.28	0.14	0.25
Dy	1.48	1.29	1.30	1.54	1.07	1.54
Ho	0.29	0.27	0.29	0.33	0.20	0.27
Er	0.84	0.75	0.90	1.08	0.60	0.82
Tm	0.13	0.11	0.15	0.17	0.10	0.15
Yb	0.83	0.77	0.84	1.05	0.60	0.87
Lu	0.14	0.12	0.12	0.14	0.09	0.12
Y	8.78	7.01	8.45	10.50	5.91	8.83
ΣREE	10.70	10.70	11.40	12.90	7.37	15.50
LREE	5.85	6.29	6.49	7.16	3.92	10.57
HREE	4.84	4.39	4.94	5.69	3.45	4.98
LREE/HREE	1.21	1.43	1.31	1.26	1.14	2.12
La _N /Yb _N	0.69	0.91	0.74	0.72	0.63	1.73
δEu	1.14	1.18	1.20	1.10	1.42	1.23
Rb	8.26	12.60	7.99	10.80	27.40	23.10
Ba	56.4	94.7	68.0	68.4	120.0	171.0
Th	0.11	0.11	0.10	0.14	0.08	0.51
U	0.13	0.10	0.18	0.18	0.15	0.22
Nb	0.186	0.171	0.202	0.220	0.106	1.310
Ta	0.021	0.014	0.016	0.019	0.009	0.094
Sr	124	128	124	142	127	140
Zr	5.17	5.20	5.58	5.55	5.19	11.70
Hf	0.285	0.283	0.333	0.315	0.217	0.506
Li	13.4	14.1	16.8	14.3	19.3	18.1
Be	0.28	0.30	0.97	0.33	0.26	0.36
Sc	36.5	37.7	41.8	36.5	35.7	35.1
V	151	153	184	151	135	158
Cr	146	165	179	139	150	150
Co	41.9	46.4	52.0	43.3	51.7	48.7
Ni	64.1	74.7	84.3	70.8	88.2	77.9
Cu	34.0	24.9	27.0	26.9	20.2	23.2
Zn	34.8	40.7	50.0	36.1	41.3	41.1
Ga	8.47	8.37	8.98	8.33	9.15	10.20
Mo	0.28	0.20	0.24	0.27	0.16	0.26
Cd	0.07	0.08	0.11	0.06	0.06	0.07
In	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03
Sb	0.15	0.17	0.16	0.19	0.18	0.20
Cs	0.36	0.58	0.36	0.49	1.36	0.75
W	0.60	0.17	0.19	0.17	0.14	0.24
Tl	0.08	0.12	0.10	0.11	0.27	0.19
Pb	4.11	5.11	5.45	4.99	5.05	6.60
Bi	0.13	0.17	0.29	0.09	0.18	0.19
Nb/U	1.48	1.80	1.10	1.21	0.70	6.09
Ta/U	0.17	0.15	0.09	0.10	0.06	0.44
Nb/La	0.23	0.18	0.23	0.21	0.20	0.63
Ce/Pb	0.47	0.41	0.40	0.47	0.25	0.60
La/Sm	1.21	1.40	1.14	1.25	1.26	2.75
Zr/Y	0.59	0.74	0.66	0.53	0.88	1.33
La/Nb	4.26	5.71	4.28	4.77	4.95	1.60
(Th/Nb) _N	9.26	10.74	8.13	9.95	12.76	6.31
Ta/Yb	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.11
Zr/Nb	27.80	30.40	27.60	25.20	49.00	8.93

注: Mg[#] = 100 × (MgO/40.31)/(MgO/40.31 + Fe₂O₃^T × 2/159.7).

表 3 岩石中锆石 Hf 同位素分析结果
Table 3 LA-ICPMS zircon U-Pb analyses of the rocks

样品	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$1\sigma m$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	$T_{\text{DMI(Hf)}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
HDHS-1	513	0.100 76	0.002 605	0.282 902	0.000 020	4.60	15.03	0.90	518	-0.92
HDHS-2	513	0.089 36	0.002 711	0.282 894	0.000 029	4.30	14.69	1.23	532	-0.92
HDHS-3	513	0.082 90	0.002 103	0.282 882	0.000 023	3.90	14.50	0.99	540	-0.94
HDHS-4	513	0.089 07	0.002 370	0.282 882	0.000 022	3.88	14.39	0.98	545	-0.93
HDHS-5	513	0.109 52	0.002 791	0.282 901	0.000 026	4.56	14.92	1.09	523	-0.92
HDHS-7	513	0.079 52	0.001 900	0.282 892	0.000 016	4.25	14.92	0.79	523	-0.94
HDHS-8	513	0.064 13	0.001 874	0.282 883	0.000 022	3.93	14.61	0.99	535	-0.94
HDHS-9	513	0.127 54	0.003 184	0.282 883	0.000 027	3.91	14.15	1.13	556	-0.90
HDHS-10	513	0.048 34	0.001 260	0.282 882	0.000 021	3.89	14.77	0.94	528	-0.96

岩为火成岩(图 4a)(王仁民等, 1987). 根据($\text{FeO}^{\text{T}} + \text{TiO}_2$) $-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ 图解判断原岩成分相当于为钙碱性玄武岩(图 4b).

3.2.2 微量元素 岩石稀土总量 $\sum \text{REE} = 7.37 \times 10^{-6} \sim 15.55 \times 10^{-6}$ (表 2), 轻稀土弱亏损(图 5a), $(\text{La/Yb})_N$ 为 $0.63 \sim 7.13$. Eu/Eu^* 值为 $1.10 \sim 1.42$, 具有弱正 Eu 异常, 笔者结合主量元素特征认为岩石可能发生斜长石和斜方辉石堆晶作用. 在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 5b), 岩石富集大离子亲石元素(如 K、Rb、Ba、Sr), 亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Zr、Ti).

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

基性岩中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\ 882 \sim 0.282\ 902$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $14.15 \sim 15.03$, Hf 同位素单阶段模式年龄(T_{DMI})为 $518 \sim 556$ Ma(表 3).

4 讨论

4.1 岩浆源区

不相容元素因其具有相似的分配系数不受分离结晶作用影响, 且在地幔物质部分熔融过程中只有微小变化, 因此用来指示源区特征(Taylor and McClenann, 1985). 岩石 Th/La 平均值为 0.15, 而原始地幔和大陆壳分别是 0.125、0.204(Weaver, 1991). $\text{La/Sm}=1.14 \sim 2.75$ (受到岩石圈地幔混染后 >25 , 受地壳物质混染 $\text{La/Sm}>5$)(Rudnick and Gao, 2003). 由于玄武质岩浆的结晶分异作用可导致 SiO_2 含量升高, 但同时 Th/La 和 La/Sm 的增加程度较小; 而地壳物质中 SiO_2 含量、Th/La 和 La/Sm 均比原始玄武质岩浆偏高. 哈达呼舒基性岩 SiO_2 与 Th/La、La/Sm 变化性均不明显. 此外, 笔者未见到捕获锆石, 同样说明该基性岩浆未受到地壳明显混染.

哈达呼舒基性岩 SiO_2 弱饱和($47.02\% \sim$

49.82%)、富 MgO ($8.29\% \sim 9.63\%$)、高 $\text{Mg}^\#$ 值($67 \sim 68$), Cr、Ni、Co、Sc 和 V 含量分别为 $139 \times 10^{-6} \sim 179 \times 10^{-6}$ 、 $64.1 \times 10^{-6} \sim 88.2 \times 10^{-6}$ 、 $41.9 \times 10^{-6} \sim 52.0 \times 10^{-6}$ 、 $35.1 \times 10^{-6} \sim 41.8 \times 10^{-6}$ 和 $135 \times 10^{-6} \sim 184 \times 10^{-6}$, 显示岩石具有幔源属性(邓晋福等, 1999). 岩石 Nb/La 值为 $0.18 \sim 0.63$, 来自软流圈的玄武岩质岩浆的 Nb/La 比值较高(通常大于 1), 而来自岩石圈的比值相对较低(一般小于 0.5)(Smith *et al.*, 1999). 除火成岩的 Sr-Nd 同位素外, 锆石 Hf 同位素对岩浆源区性质也给出了很好的制约(Amelin *et al.*, 1999, 2000; Griffin *et al.*, 2002). 哈达呼舒基性岩中岩浆锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $14.15 \sim 15.03$ (均 >0), 在 $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解上位于亏损地幔演化线上(图 6). 原岩年龄 513 ± 2 Ma, Hf 模式年龄为 $556 \sim 518$ Ma, 对于幔源玄武岩而言, 如果 Hf 模式年龄与其形成年龄相近, 表明该玄武质岩石来源于亏损地幔(吴福元等, 2007). 与前人研究发现古亚洲洋地幔曾经历了大比例的玄武岩浆熔融和抽提作用, 并造成了地幔储库

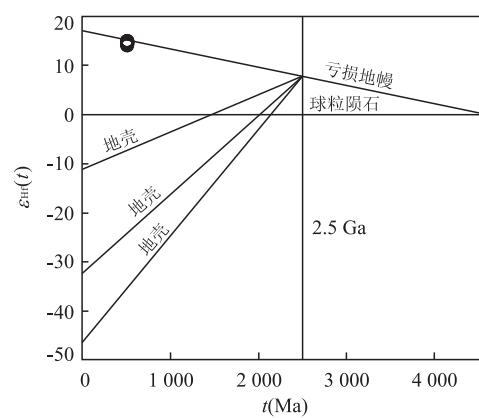


图 6 岩石中锆石 Hf 同位素特征
Fig. 6 Zircon Hf isotopic compositions of the rocks
吴福元等, 2007

长期亏损 LREE 和其他不相容元素 (Jian *et al.*, 2008; Miao *et al.*, 2008; 郭峰等, 2009) 等认识一致。

4.2 岩石成因及构造背景

哈达呼舒基性岩成分跟钙碱性玄武岩相当, 结合前人资料发现, 该时期区域存在一套岛弧岩石组合, 为玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩 (刘敦一等, 2003; Jian *et al.*, 2008; 李承东等, 2012)。在地球化学方面, 岩石 Al_2O_3 含量为 $16.70\% \sim 17.65\%$ ($>16.5\%$), 低 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量 ($1.88\% \sim 3.08\%$), 与典型的高铝玄武岩一致 (祁生胜等, 2012)。微量元素上, 岩石富集大离子亲石元素 (如 K、Rb、Ba、Sr), 亏损高场强元素 (如 Nb、Ta、Zr、Ti)。研究表明 Ti、Nb、Ta 的亏损 (TNT 异常) 成为岛弧构造环境的重要标志之一: 一方面俯冲洋壳在发生脱水作用时形成俯冲带流体, 由于 Nb、Ta、Ti 等高场强元素在流体中溶解度很低, 当这种流体上升交代地幔楔时, 流体中的 Nb、Ta、Ti 进入角闪石 (Sun and McDonough, 1989); 另一方面岩浆源区残留有富 Nb、Ta 和 Ti 的矿物 (金红石、钛铁矿等) 也可造成“TNT”亏损 (McKenzie, 1989)。岩石 Zr 含量为 $5.17 \times 10^{-6} \sim 11.70 \times 10^{-6}$ ($<130 \times 10^{-6}$), Zr/Y 比值为 $0.53 \sim 1.33$ (<4); La/Nb 比值为 $1.60 \sim 5.71$ (>1), $(\text{Th}/\text{Nb})_N$ 值为 $6.31 \sim 12.76$ (>1) (夏林圻等, 2007); Ta/Yb 比值为 $0.02 \sim 0.11$ (大多数小于 0.1), 与活动陆缘环境 (大陆边缘弧) 钙碱性玄武岩 (>0.2) 明显不同 (Peacock, 1982); Zr/Nb 比值为 $8.93 \sim 49.00$ (总体 >25) (Elliott *et al.*, 1997)。结合图 7, 笔者认为岩石原岩相当于典型岛弧玄武岩。

晚前寒武世—早中寒武世, 华北地块北缘的渣

尔泰山—白云鄂博处于稳定大陆边缘, 在古亚洲洋扩张中脊形成了温都尔庙群蛇绿岩 (Xiao *et al.*, 2003)。位于南方造山带哈达呼舒岩体的地球化学特征显示其为岛弧岩浆岩 (513 ± 2 Ma), 说明其在温都尔庙洋盆中可能开始洋—洋俯冲。上述认识得到南带温都尔庙群洋内弧变质安山岩 (470 ± 2 Ma) (李承东等, 2012)、达茂旗北部岛弧花岗岩 ($452 \sim 446$ Ma) (张维和简平, 2008)、温都尔庙地区白乃庙群及侵入岩 ($474 \sim 437$ Ma) (Jian *et al.*, 2008)、正镶白旗二长花岗岩 457 ± 11 Ma (秦亚等, 2013) 等证实。有关北方造山带已有大量的研究: 四子王旗哈达敖包岩体为岛弧岩浆岩 (508 ± 10 Ma)、苏左旗岛弧花岗岩 (Chen *et al.*, 2000; 周志广等, 2009; 柳长峰, 2010); 白乃庙地区白音都西群碎屑锆石 ($518 \sim 294$ Ma) (谷丛楠等, 2012); 西林霍特变质杂岩捕获锆石年龄 ($530 \sim 370$ Ma) (Shi *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2009)、图古日格地区包尔汉图群及侵入岩 $453 \sim 425$ Ma (Xu *et al.*, 2013) 等。说明在空间上, 南北造山带可能同时存在, 岩浆活动强烈, 形成多条俯冲带, 构成多岛弧盆系的构造格局。

在晚志留世—泥盆纪, 内蒙古中部发生了一次重要的洋盆闭合或碰撞造山事件, 至少使温都尔庙岩浆弧拼贴于华北克拉通北缘 (Xiao *et al.*, 2003)。哈达呼舒基性岩变质年龄为 386 Ma、 385 Ma, 与围岩中元古界宝音图群变质年龄 ($399 \sim 385$ Ma) 一致 (李文博等, 2008; 陈亚平等, 2014), 认为其变质作用由亚洲洋闭合有关碰撞造山运动导致的 (陈亚平等, 2014)。而该构造运动也可能是导致具有具岛弧玄武岩特征的哈达呼舒岩体产于中元古界宝音图群的原因。

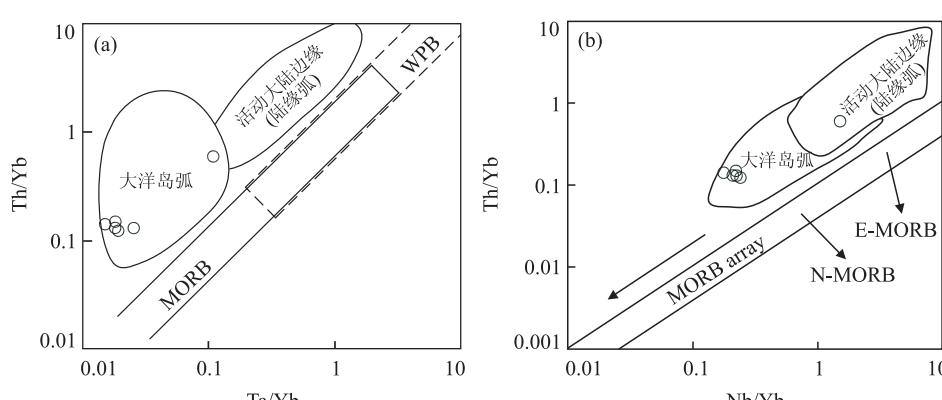


图 7 岩石的 Ta/Yb - Th/Yb 图解(a)和 Nb/Yb - Th/Yb 图解(b)

Fig. 7 Ta/Yb - Th/Yb diagram (a) and Nb/Yb - Th/Yb diagram (b) of the amphibolite rocks

据 Pearce(1982)

5 结论

(1) 哈达呼舒基性岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄值为 513 ± 2 Ma (晚寒武世), MSWD=0.4, 代表其原岩成岩时代。

(2) 岩石属于钙碱性系列, 富集大离子亲石元素 (如 K、Rb、Ba), 亏损高场强元素 (如 Nb、Ta、Zr、Ti). $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 14.15~15.03, 单阶段模式年龄 (T_{DM1}) 为 518~556 Ma, 笔者认为其原始岩浆起源于亏损岩石圈地幔。

(3) 哈达呼舒基性岩体具有岛弧玄武岩特征, 形成于古亚洲洋向南俯冲的岛弧环境。

References

- Amelin, Y. , Lee, D. C. , Halliday, A. N. , et al. , 1999. Nature of the Earth's Earliest Crust from Hafnium Isotopes in Single Detrital Zircons. *Nature*, 399(6733): 252—255.
- Amelin, Y. , Lee, D. C. , Halliday, A. N. , 2000. Early-Middle Archaean Crustal Evolution Deduced from Lu-Hf and U-Pb Isotopic Studies of Single Zircon Grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (24): 4205—4225. doi: 10.1016/s0016-7037(00)00493-2
- Andersen, T. , 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1—2): 59—79. doi: 10.1016/s0009-2541(02)00195-x
- Boynton, W. V. , 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P. , ed. . Rare Earth Elements Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63—114.
- Chen, B. , Jahn, B. M. , Tian, W. , 2009. Evolution of the Solonker Suture Zone: Constraints from Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopic Ratios and Whole-Rock Nd-Sr Isotope Compositions of Subduction- and Collision-Related Magmas and Forearc Sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34 (3): 245—257. doi: 10.1016/j.jseaes.2008.05.007
- Chen, B. , Jahn, B. M. , Wilde, S. , et al. , 2000. Two Contrasting Paleozoic Magmatic Belts in Northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 328(1—2): 157—182. doi: 10.1016/s0040-1951(00)00182-7
- Chen, Y. P. , Wei, C. J. , Zhang, J. R. , et al. , 2014. Metamorphism and Zircon U-Pb Dating of Garnet Amphibolite in the Baoyintu Group, Inner Mongolia. Annual Meeting of Chinese Geoscience Union, Beijing, 2152 (in Chinese).
- Chu, H. , Zhang, J. R. , Wei, C. J. , et al. , 2013. A New Interpretation of the Tectonic Setting and Age of Meta-Basic Volcanics in the Ondor Sum Group, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 58(28—29): 3580—3587. doi: 10.1007/s11434-013-5862-7
- Deng, J. F. , Mo, X. X. , Luo, Z. H. , et al. , 1999. Igneous Petrotectonic Assemblage and Crust-Mantle Metallogenetic System. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 259—270 (in Chinese with English abstract).
- Du, L. K. , Ge, M. C. , 2010. Geochemical Tracing on Protolith Reconstruction of Amphibolite of Baoyintu Group in Xilinhot, Inner Mongolia. *Xinjiang Geology*, 28(2): 200—203 (in Chinese with English abstract).
- Elliott, T. , Plank, T. , Zindler, A. , et al. , 1997. Element Transport from Slab to Volcanic Front at the Mariana Arc. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B7): 14991—15019. doi: 10.1029/97jb00788
- Fisher, C. M. , Vervoort, J. D. , Hanchar, J. M. , 2014. Guidelines for Reporting Zircon Hf Isotopic Data by LA-MC-ICPMS and Potential Pitfalls in the Interpretation of These Data. *Chemical Geology*, 363: 125—133. doi: 10.1016/j.chemgeo.2013.10.019
- Griffin, W. L. , Wang, X. , Jackson, S. E. , et al. , 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61 (3—4): 237—269. doi: 10.1016/s0024-4937(02)00082-8
- Gu, C. N. , Zhou, Z. G. , Zhang, Y. K. , et al. , 2012. Zircon Dating of the Baiyinduxi Group in Inner Mongolia and Its Tectonic Interpretation. *Geoscience*, 26(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Guo, F. , Fan, W. M. , Li, C. W. , et al. , 2009. Early Paleozoic Subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and Geochemical Evidence from the Dashizhai Basalts, Inner Mongolia. *Science in China (Series D)*, 39 (5): 569—579 (in Chinese).
- Hong, D. W. , Wang, S. G. , Xie, X. L. , et al. , 2000. Genesis of Positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ Granitoids in the Da Hinggan Mts-Mongolia Orogenic Belt and Growth Continental Crust. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441—456 (in Chinese with English abstract).
- Hu, A. X. , 2014. Study on the Enrichment Regularities of Mineralization of Tugurige Gold Deposit in Urad Zhongqi, Inner Mongolia (Dissertation). Jilin University, Changchun, 1—99 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. C. , Liu, Y. S. , Gao, S. , et al. , 2012. Improved In Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combi-

- nation with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9):1391–1399.
- Janne, B. T., Catherine, C., Frances, A., 1997. Separation of Hf and Lu for High-Precision Isotope Analysis of Rock Samples by Magnetic Sector-Multiple Collector ICP-MS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127: 248–260.
- Jesen, L. S., 1976. A New Cation Plot for Classifying Subalkaline Volcanic Rocks. Ontario Department of Mines, Miscellaneous Paper 66.
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, 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. *Lithos*, 101 (3–4):233–259. doi:10.1016/j.lithos.2007.07.005
- Li, C. D., Ran, H., Zhao, L. G., et al., 2012. LA-MC-ICPMS U-Pb Geochronology of Zircons from the Wenduermiao Group and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3705–3714 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. B., Chen, Y. J., Lai, Y., et al., 2008. Metallogenic Time and Tectonic Setting of the Bainaimiao Cu-Au deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 890–898 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2):537–571. doi:10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2):34–43. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Liu, C. F., 2010. Paleozoic-Early Mesozoic Magmatic Belts and Tectonic Significance in Siziwangqi Area, Inner Mongolia (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. Y., Jian, P., Zhang, Q., et al., 2003. SHRIMP Dating of Adakites in the Tulinkai Ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic Subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77(3):317–327 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. No. 4. Berkeley Geochronology Center Special Publication.
- McKenzie, D., 1989. Some Remarks on the Movement of Small Melt Fractions in the Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 95(1–2): 53–72. doi:10.1016/0012-821x(89)90167-2
- Ma, J., 2010. Tepogeritu Ultrabasic Rock Bodies Characteristics and Metallogenetic Potentiality, Inner Mongolia (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Miao, L. C., Fan, W. M., Liu, D. Y., et al., 2008. Geochronology and Geochemistry of the Hegenshan Ophiolitic Complex: Implications for Late-Stage Tectonic Evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5–6): 348–370. doi:10.1016/j.jseae.2007.11.005
- Pearce, J. A., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In: Thorps, R. S., ed., Andesites. John Wiley and Sons, New York, 525–548.
- Qi, S. S., Deng, J. F., Zhang, L., et al., 2012. Discovery and Significance of the Late Devonian High-Alumina Basalt in the Tuotuo River Region of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 19(5):177–186 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Liang, Y. H., Xing, J. L., et al., 2013. The Identification of Early Paleozoic O-Type Adakitic Rocks in Zhengxiangbaiqi Area, Inner Mongolia and Its Significance. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 106–114 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. The Composition of Continental Crust. In: Rudnick, R. L., ed., Treatise on Geochemistry, Vol. 3. the Crust. Elsevier, Oxford.
- Rudnick, R. L., Gao, S., Ling, W. L., et al., 2004. Petrology and Geochemistry of Spinel Peridotite Xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton. *Lithos*, 77: 609–637.
- Safonova, I. Y., Santosh, M., 2014. Accretionary Complexes in the Asia-Pacific Region: Tracing Archives of Ocean Plate Stratigraphy and Tracking Mantle Plumes. *Gondwana Research*, 25(1): 126–158. doi:10.1016/j.gr.2012.10.008
- Sengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altai Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299–307. doi:10.1038/364299a0
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. doi:10.

- 1144/gsl. sp. 1989, 042, 01, 19
- Smith, E. I., Sánchez, A., Walker, J. D., et al., 1999. Geochemistry of Mafic Magmas in the Hurricane Volcanic Field, Utah: Implications for Small- and Large-Scale Chemical Variability of the Lithospheric Mantle. *The Journal of Geology*, 107(4): 433—448. doi: 10.1086/314355
- Shi, G. H., Liu, D. Y., Zhang, F. Q., et al., 2003. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology and Its Implications on the Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 48(24): 2742—2748. doi: 10.1007/bf02901768
- Shi, G. H., Miao, L. C., Zhang, F. Q., et al., 2004. The Age and Regional Tectonic Significance of A-Type Granite in Xilinhot, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 49(4): 384—389 (in Chinese).
- Sun, L. X., Zhao, F. Q., Wang, H. C., et al., 2013. Zircon U-Pb Geochronology of Metabase Rocks from the Baoyintu Block in the Langshan Area, Inner Mongolia, and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 87(2): 197—207 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publication, Boston, 209—230.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1995. The Geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241. doi: 10.1029/95rg00262
- Weaver, B. L., 1991. The Origin of Ocean Island Basalt End-Member Compositions: Trace Element and Isotopic Constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2—4): 381—397. doi: 10.1016/0012-821x(91)90217-6
- Wang, J., Sun, F. Y., Li, B. L., et al., 2016. Age, Petrogenesis and Tectonic Implications of Permian Hornblendite in Tugurige, Urad Zhongqi, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(5): 792—808 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. M., He, G. P., Chen, Z. Z., et al., 1987. Metamorphic Protolith Graphical Criterion. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, S. Q., Xin, H. T., Hu, X. J., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Early Paleozoic Wulanapbaotu Intrusive Rocks, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(4): 555—569 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. D., 2016. Metallogenesis of Gold Deposits in Tugurige of Urad Zhongqi, Inner Mongolia (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Charvet, J., Chen, Y., et al., 2013. Middle Paleozoic Convergent Orogenic Belts in Western Inner Mongolia (China): Framework, Kinematics, Geochronology and Implications for Tectonic Evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 23(4): 1342—1364. doi: 10.1016/j.gr.2012.05.015
- Xu, B., Chen, B., 1997. Framework and Evolution of the Middle Paleozoic Orogenic Belt between Siberian and North China Plates in Northern Inner Mongolia. *Science in China (Series D)*, 27(3): 227—232 (in Chinese).
- Xu, B., Zhao, P., Bao, Q. Z., et al., 2014. Preliminary Study on the Pre-Mesozoic Tectonic Unit Division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB). *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1841—1857 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Shu, L. S., Gao, J., et al., 2008. Continental Dynamics of the Central Asian Orogenic Belt and Its Metamorphism. *Xinjiang Geology*, 26(1): 4—8 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., et al., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 1069—1088. doi: 10.1029/2002tc001484
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Huang, B. C., et al., 2009. End-Permian to Mid-Triassic Termination of the Accretionary Processes of the Southern Altaiids: Implications for the Geodynamic Evolution, Phanerozoic Continental Growth, and Metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189—1217. doi: 10.1007/s00531-008-0407-z
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Xu, X. Y., et al., 2007. The Discrimination between Continental Basalt and Island Arc Basalt Based on Geochemical Method. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77—89 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353—370. doi: 10.1111/j.1751-908x.2004.tb00755.x
- Yuan, H. L., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2003. Determination of U-Pb Age and Rare Earth Element Concentrations of Zircons from Cenozoic Intrusions in Northeastern China

- by Laser Ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511—1520 (in Chinese).
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2000. Metamorphism of Basement Rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 103(1—2): 55—88. doi: 10.1016/s0301-9268(00)00076-0
- Zhang, W., Jian, P., 2008. SHRIMP Dating of Early Paleozoic Granites from North Damaoqi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 778—787 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. G., Zhang, H. F., Liu, H. L., et al., 2009. Zircon U-Pb Dating of Basic Intrusions in Siziwangqi Area of Middle Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1519—1528 (in Chinese with English abstract).

- Zhou, J. B., Wilde, S. A., Zhang, X. Z., et al., 2012. Detrital Zircons from Phanerozoic Rocks of the Songliao Block, NE China: Evidence and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 21—34. doi: 10.1016/j.jseae.2011.05.004

附中文参考文献

- 陈亚平, 魏春景, 张晋瑞, 等, 2014. 内蒙古西部地区宝音图群变质作用和年代学研究. 北京: 中国地球科学联合学术年会, 2152.
- 邓晋福, 莫宣学, 罗照华, 等, 1999. 火成岩构造组合与壳—幔成矿系统. 地学前缘, 6(2): 259—270.
- 杜理科, 葛梦春, 2010. 内蒙古锡林浩特宝音图群斜长角闪岩原岩恢复的地球化学示踪. 新疆地质, 28(2): 200—203.
- 谷丛楠, 周志广, 张有宽, 等, 2012. 内蒙古白乃庙地区白音都西群的碎屑锆石年龄及其构造意义. 现代地质, 26(1): 1—9.
- 郭锋, 范蔚茗, 李超文, 等, 2009. 早古生代古亚洲洋俯冲作用: 来自内蒙古大石寨玄武岩的年代学与地球化学证据. 中国科学(D辑), (5): 569—579.
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 等, 2000. 兴蒙造山带正 ϵ_{Nd} (t)值花岗岩的成因和大陆地壳生长. 地学前缘, 7(2): 441—456.
- 胡安新, 2014. 内蒙古乌拉特中旗图古日格金矿床矿化富集规律研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学, 1—99.
- 李承东, 冉皞, 赵利刚, 等, 2012. 温都尔庙群锆石的 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄及构造意义. 岩石学报, 28(11): 3705—3714.
- 李文博, 陈衍景, 赖勇, 等, 2008. 内蒙古白乃庙铜金矿床的成矿时代和成矿构造背景. 岩石学报, 24(4): 890—898.
- 柳长峰, 2010. 内蒙古四子王旗地区古生代—早古生代岩浆岩带及其构造意义(博士学位论文). 北京: 中国地

质大学.

- 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. 地质学报, 77(3): 317—327.
- 马娟, 2010. 内蒙古特顿格日图超基性岩特征及成矿潜力研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 祁生胜, 邓晋福, 张林, 等, 2012. 青藏高原沱沱河地区晚泥盆世高铝玄武岩的发现及意义. 地学前缘, 19(5): 177—186.
- 秦亚, 梁一鸿, 邢济麟, 等, 2013. 内蒙古正镶白旗地区早古生代 O型埃达克岩的厘定及其意义. 地学前缘, 20(5): 106—114.
- 施光海, 苗来成, 张福勤, 等, 2004. 内蒙古锡林浩特 A型花岗岩的时代及区域构造意义. 科学通报, 49(4): 384—389.
- 孙立新, 赵凤清, 王惠初, 等, 2013. 内蒙古狼山地区宝音图地块变质基底的锆石 U-Pb 年龄及构造意义. 地质学报, 87(2): 197—207.
- 王键, 孙丰月, 李碧乐, 等, 2016. 内蒙古乌拉特中旗图古日格二叠纪角闪石岩年龄、岩石成因及构造背景. 地球科学, 41(5): 792—808.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等, 1987. 变质岩原岩图解判别法. 北京: 地质出版社.
- 王树庆, 辛后田, 胡晓佳, 等, 2016. 内蒙古乌兰敖包图早古生代侵入岩年代学、地球化学特征及地质意义. 地球科学, 41(4): 555—569.
- 王英德, 2016. 内蒙古乌拉特中旗图古日格一带金矿成矿作用研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185—220.
- 徐备, 陈斌, 1997. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中古生代造山带的结构及演化. 中国科学, 27(3): 227—232.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等, 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探. 岩石学报, 30(7): 1841—1857.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等, 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩. 岩石矿物学杂志, 26(1): 77—89.
- 肖文交, 舒良树, 高俊, 等, 2008. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用. 新疆地质, 26(1): 4—8.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等, 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48(14): 1511—1520.
- 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. 地质学报, 82(6): 778—787.
- 周志广, 张华峰, 刘还林, 等, 2009. 内蒙中部四子王旗地区基性侵入岩锆石定年及其意义. 岩石学报, 25(6): 1519—1528.