

太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩 Nd、Sr、Pb 同位素特征及物质来源探讨*

蔡剑辉^{1,2} 阎国翰¹ 肖成东³ 王关玉¹ 牟保磊¹ 张任祜⁴

CAI JianHui^{1,2}, YAN GuoHan¹, XIAO ChengDong³, WANG GuangYu¹, MU BaoLei¹ and ZHANG RenHu⁴

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

3. 天津华北地质勘探局, 天津 300181

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. Faculty of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. North China Bureau of Exploitation of Geology, Tianjin 300181, China

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

2004-03-30 收稿, 2004-08-13 改回.

Cai JH, Yan GH, Xiao CD, Wang GY, Mu BL and Zhang RH. 2004. Nd, Sr, Pb isotopic characteristics of the Mesozoic intrusive rocks in the Taihang – Da Hinggan Mountains Tectonomagmatic Belt and their source region. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5):1225 – 1242

Abstract The Taihang – Da Hinggan Mountains Tectonomagmatic Belt is the Mesozoic magmaeric activities concentrating area in eastern China, which passes through the two tectonic units of the North China Craton and the Inn Mongolian Orogenic Zone. In this paper a systematic geochemical study on Nd, Sr and Pb isotopic characteristics from more than 40 typical complexes along the tectonomagmatic belt is presented to indicate that the Mesozoic intrusives in different sections of this belt (mainly the north, south Taihang Mountains and the middle-south Da Hinggan Mountains), even those of different stages (mainly three stages) in the same section have entirely different Nd, Sr and Pb isotopic characteristics, which reveals that their source regions are different. The source rocks in the southern section of Taihang Mountains are related to materials from the enriched mantle reservoir. In the northern section the early stage basic-intermediate rocks are mainly formed by the partial melting of materials from the enriched mantle, the main stage intermediate-acid ones have a close connection to materials from the lower crust, while the late stage alkali-rich ones are even derived from those from the lower-middle crust. And the intermediate-acid magma in the middle-south Da Hinggan Mountains is mainly originated from depleted mantle materials. These also reveal that the lithospheric mantle below the North China Craton is enriched and that below the Inner Mongolia Orogenic Zone is depleted. In addition, implicated by Nd depleted mantle model ages (T_{DM}), 2543 ~ 1485Ma probably represents the time for mantle enrichment beneath the North China Craton, and 983 ~ 540Ma (Proterozoic to early Palaeozoic period) suggests one of the main stages for the crust growth in Da Hinggan Mountains area.

Key words Sr, Nd, Pb isotopes, Source region, Intrusive rocks, Mesozoic, Taihang – Da Hinggan tectonomagmatic belt

摘要 太行山-大兴安岭构造岩浆带是中国东部中生代大规模岩浆活动的集中区,它纵跨华北克拉通和兴蒙海西造山带两个大地构造单元,既是我国东部规模最大的北北东向深大断裂带之一,又是我国东部北北东向延伸的地壳厚度陡变带与重力异常高梯度带,因而具有十分重大的地质意义。本文针对研究区在中生代岩浆活动物质来源认识方面的不足,首次对太行山-大兴安岭整个构造岩浆带40余个代表性岩体的Nd、Sr、Pb同位素地球化学特征进行了全面系统的研究,发现不同区段(南、北太行山地区、大兴安岭中-南地区)、不同侵入期次(早、中、晚)岩石具有明显不同的Nd、Sr、Pb同位素特征,可以推断其岩浆源区性质各不相同:南太行山地区基-中性岩浆均来源于富集地幔慢库;北太行山地区早期基-中性岩浆主要来源于

* 地矿部直管局项目和国家教委博士点基金(99000141)资助项目

第一作者简介:蔡剑辉,女,1966年出生,博士,副研究员,矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: caijh_cags@163.com

富集地幔的部分熔融;中期中-酸性岩浆来源与下地壳关系密切;晚期富碱质中-酸性岩浆来源可能与下地壳、甚至中地壳物质有关;大兴安岭地区中-酸性岩浆来源与亏损地幔关系密切,可能源自与亏损地幔有联系的年轻的下地壳。由此表明,中生代华北克拉通地区岩石圈地幔为富集地幔,而兴蒙造山带地区岩石圈地幔则为亏损地幔。此外,根据岩石的 Nd 模式年龄,初步认为 2543 ~ 1485 Ma 可能指示华北克拉通岩石圈地幔发生富集作用的时间,而 983 ~ 540 Ma 则可能为大兴安岭地区地壳生长的一个重要时期。

关键词 Sr、Nd、Pb 同位素特征;物质来源;侵入岩;中生代;太行山-大兴安岭构造岩浆带

中图法分类号 P588.14; P595; P597.3

1 前言

太行山-大兴安岭构造岩浆带是中国东部极具代表性的中生代岩浆活动带,其岩浆侵入活动规模大,岩石种类繁多,成因关系错综复杂,多年来许多学者先后就该带侵入岩的岩石学和地质学特征进行了较深入的研究探讨(何国琦等,1982;吴利仁,1985;穆克敏等,1989;阎国翰等,1991;王式洸等,1994;许保良等,1999;邓晋福,1996,2000;刘凤山等,1998;邵济安等,1999;罗照华等,1999;吴福元等,1999;洪大卫等,2000;陈斌等,2002;Chen *et al.*, 2003a),对该带中生代岩浆活动的认识取得了许多新的进展,但是在岩浆源区等岩石成因学问题上仍然存在不尽相同的认识乃至重大的分歧。到目前为止,关于该带岩浆源区性质的探讨仅局限于部分侵入岩中深源捕虏体的研究(徐永生,1983;黄福生,1990;许文良,1993;邵济安等,1999a;钱青等,2002)和少数岩体的同位素研究工作(张德全等,1988;李培忠等,1993;王季亮等,1994;郁建华,1995;牛树银等,1994;许保良等,1996;王一先等,1997;阎国翰等,2001;蔡剑辉,2003;Zhang *et al.*, 2004)。阎国翰等(Yan *et al.*, 2000)对太行山-大兴安岭东麓主要的代表性碱性岩体的钐、铈、铅同位素特征进行了较全面的探讨,但关于整个构造岩浆带中生代其它类型侵入岩的钐、铈、铅同位素特征的系统性研究工作一直尚未开展。所以,关于整个构造岩浆带中生代岩浆活动物质来源的总体认识至今仍然是本区地质研究中的一个薄弱环节。

本文拟在对整个构造岩浆带三个区段内 40 余个侵入岩体中各主要类型岩石的钐、铈、铅同位素特征进行全面的、系统性的对比研究基础上,获得关于整个构造岩浆带中生代岩浆活动物质来源方面的总体新认识。

2 地质概况

太行山-大兴安岭构造岩浆带在大地构造位置上位于太平洋构造带上。由数条北北东向深大断裂及其两侧密集的岩浆岩体组成,宽达一百多公里(图 1)。

研究区中生代岩浆活动时间跨度较大,综合大量的同位素年龄和地质事实文献资料(河北省地质矿产局,1989;

内蒙古自治区地质矿产局,1991;山西地质矿产局,1991;许文良,1989;白志民等,1990;牟德贵等,1990;赵一鸣等,1994;郑学正,1995;许保良等,1998;Davis *et al.*, 1998;Yan *et al.*, 2000;蔡剑辉等,2003 等),基本上认为本区中生代岩浆活动可分为早、中、晚三期,三期侵入岩的岩石类型各不相同。早期以基-中性岩浆侵入活动为主,主要发生于早-中侏罗世;中期为中生代岩浆活动的高峰期,主要为中-酸性岩浆活动,发生于晚侏罗世;晚期则以酸性及偏碱-碱性岩浆活动为特征,时间为早白垩世。

研究区中生代岩浆侵入活动空间分布十分广泛(北纬 35 ~ 50°,东经 113 ~ 125°之间),岩浆活动的密集区基本上以石家庄和康保-围场断裂为界分布在以下三个地区:南太行山地区、北太行山地区和大兴安岭中-南地区。

南太行山地区中生代侵入岩主要分布于河北的邯邢地区、山西的平顺西安里地区和河南的安阳-林县地区,主要岩体有符山、固镇、綦村、矿山村、洪山、西安里、东冶、黄龙脑-塔山和九龙山岩体,除洪山岩体明显切穿二叠系地层外,其它岩体主要侵入中奥陶统。早、中、晚期岩石组成基本上分别以辉长岩-闪长岩(基-中性岩)、闪长岩-二长岩(中性岩)和正长岩(富碱中性岩)构成的组合为特征。

北太行山地区中生代侵入岩主要分布于阜平-涞源地区和燕山地区东南部,大多为多期次侵入的复式岩体,由南至北代表性岩体有麻棚、赤瓦屋、涞源、大河南、房山、八达岭、大海沱、雾灵山岩体。侵入于元古界白云岩、太古界片麻岩和寒武、奥陶纪地层。早、中晚期岩石类型分别为辉长岩-角闪石岩-闪长岩(基-中性岩)、花岗闪长岩-二长花岗岩(中-酸性岩)和石英二(正)长岩-钾长花岗岩-碱性花岗岩(富碱中-酸性岩)。

大兴安岭中南地区中生代主要侵入岩体总体上沿北北东向黄岗-甘珠尔庙大断裂带及北延部分分布,本文研究的代表性岩体有黄岗,朝阳沟,白音诺,马勒根坝、浩布高、敖璐达坝、海苏坝、乌兰坝、乌兰楚特、布敦化、莲花山、巴尔哲和碾子山岩体等。出露地层包括上太古界翁牛特群、下古生界志留-泥盆系、石炭-二叠系,中生界侏罗系和白垩系。早、中、晚期主要岩石类型依次为闪长岩-花岗闪长岩(中-酸性岩)、二长花岗岩-石英正(二)长岩-钾长花岗岩(酸性岩-富碱中酸性岩)和碱性花岗岩(富碱酸性岩)。

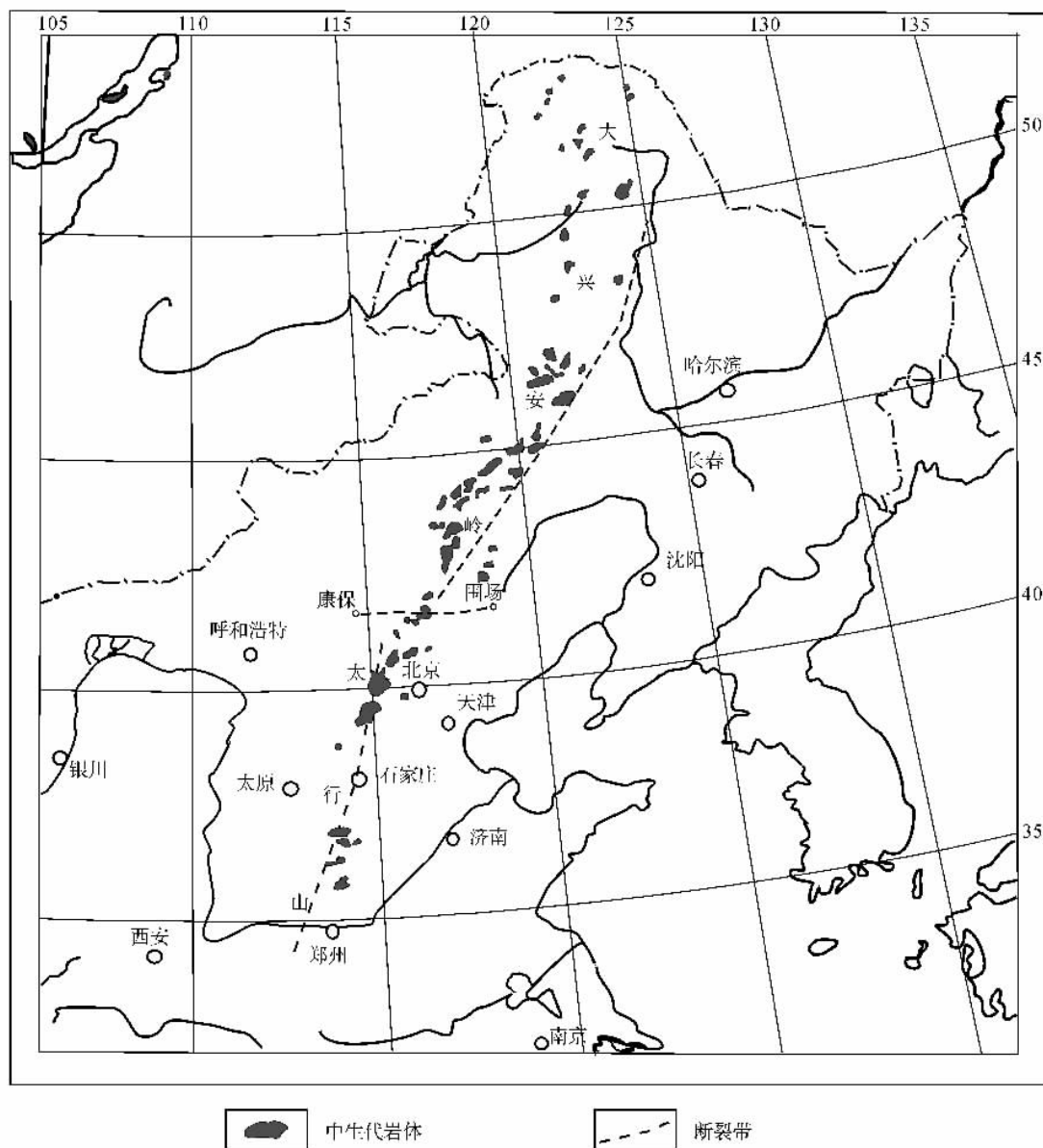


图1 太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩岩体分布图

Fig.1 Distribution of Mesozoic intrusives from the Taihangshan - Da Hinggan Mountains Tectonomagmatic Belt

3 侵入岩 Nd, Sr 和 Pb 同位素特征

研究区中生代侵入岩的 Nd, Sr 和 Pb 同位素测试数据及其计算结果列于表 1.2 和 3 中,其中本文数据是在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室的 VG354 质谱仪上测定的,分析流程见有关文献 (Qiao, 1998; Yang *et al.*, 2001)。

3.1 Nd 同位素特征

3.1.1 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值

太行山地区中生代各期次侵入岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值均小于零。

其中南太行山地区早期基-中性岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的变化范围为 $-16.50 \sim -10.74$, 14 个样品平均值为 -14.25 ; 中期 1 个中性岩石样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -15.55 ; 晚期富碱质中性岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的变化范围为 $-22.89 \sim -7.83$, 4 个样品平均值为 -16.21 。

北太行山地区早期基-中性岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的变化范围为 $-17.37 \sim -8.10$, 25 个样品平均值为 -13.68 ; 中期中-酸性岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化范围为 $-20.20 \sim -7.44$, 20 个样品平均值为 -14.88 ; 晚期富碱质中-酸性岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的变化范围为 $-16.25 \sim -8.14$, 3 个样品平均值为 -12.46 。该区中期岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值最低。

表 1 太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩 Sm-Nd 同位素分析结果

Table 1 Sm, Nd isotope data and parameters of Mesozoic intrusive rocks in the Taihang-Da Hinggan tectonomagmatic belt

区段	侵入期次	岩体名称	岩石名称	样品号	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($\pm 2\sigma$)	f_{Sm}/Nd	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM} (Ma)	年龄 (Ma)	资料来源
大兴安岭中-南地区	早期	白音诺	花岗闪长斑岩	991304	5.114	24.260	0.12750	0.512670 \pm 08	-0.35	+0.62	+1.85	859	171.0	本文
		浩布高	花岗岩	III-10	8.264	38.060	0.13130	0.512650 \pm 10	-0.33	+0.23	+1.53	930	158.0	本文
		哈达吐	花岗闪长岩	88103	8.823	47.200	0.11300	0.512750 \pm 11	-0.43	+2.18	+3.73	613	150.0	
	中期	黄岗	花岗岩	H92-510	0.917	5.057	0.10960	0.512938 \pm 12	-0.44	+5.85	+8.12		142.0	
		富林	花岗岩	8885	15.000	86.640	0.10470	0.512590 \pm 14	-0.47	-0.94	+0.75	983	140.0*	
		东山湾	花岗斑岩	991304	10.610	55.780	0.11500	0.512720 \pm 11	-0.42	+1.60	+3.12	658	135.0	本文
	晚期	乌兰楚特	花岗岩	8854	6.813	33.120	0.12440	0.512740 \pm 13	-0.37	+1.21	+2.47	771	136.0	
		乌兰坝	花岗岩	I-13	2.076	9.010	0.13940	0.512730 \pm 10	-0.29	+1.79	+2.57	865	132.2	
		大井	闪长玢岩	ZK46-2	3.506	21.330	0.09942	0.512730 \pm 07	-0.49	+1.79	+3.45	563	134.0*	
		巴尔哲	钠闪石花岗岩	6个样品	18.700~ 172.400	71.300~ 531.600	0.15870~ 0.20430	0.512706~ 0.512761	-0.02~ -0.19	+1.33~ +2.40	+1.88~ +2.47		125.0	王一先等, 1997
		碾子山	正长斑岩	1个样品	8.510	40.680	0.12600	0.512701	-0.36	+1.23	+2.40	781	135.0	李培忠等, 1993
			碱性花岗岩	1个样品	13.440	64.840	0.12450	0.512720	-0.37	+1.60	+2.47	735	123.0	1993
北太行山地区	早期	王安镇	角闪石岩	20-3	2.725	12.950	0.127300	0.511977 \pm 9	-0.35	-12.89	-10.92	2066	223.1*	蔡剑辉等, 2003
			闪长岩	20-21	6.189	35.950	0.104100	0.511668 \pm 9	-0.47	-18.92	-17.37	2057	186.9*	
		涞源	辉长岩	23个样品	1.890~ 6.750	9.510~ 38.970	0.09650~ 0.15900	0.511699~ 0.512038	-0.50~ -0.19	-18.32~ -11.70	-16.60~ -10.90	2245	140.0*	Zhang <i>et al.</i> , 2004
	中期	八达岭	辉长岩-石英闪长岩	3个样品	8.450~ 12.200	56.500~ 77.300	0.089080~ 0.104200	0.511963~ 0.512127	-0.55~ -0.47	-13.17~ -9.97	-11.30~ -8.10		163.9	王焰等, 2001; 郁建华等, 1995
		王安镇	花岗闪长岩	97-52	5.582	41.460	0.096000	0.511711 \pm 08	-0.51	-18.08	-16.29		145.7	蔡剑辉等, 2003
			花岗岩	20-33	3.340	24.330	0.083050	0.511804 \pm 08	-0.58	-16.27	-14.27		137.8	
	中期	八达岭	花岗闪长岩-二长花岗岩	4个样品	3.36~ 4.31	23.500~ 28.000	0.081990~ 0.093390	0.511512~ 0.511808	-0.53~ -0.58	-21.96~ -16.19	-20.20~ -14.50		145.0	王焰等, 2001;白志 民等,1990
		房山	石英闪长岩	$\varphi\delta$	6.660	37.010	0.108800	0.511858 \pm 11	-0.45	-15.22	-13.60		133.0	蔡剑辉等 (待发表)
		大海花	花岗闪长岩	$\gamma\delta 3$	6.490	38.280	0.102500	0.511819 \pm 11	-0.48	-15.98	-14.20		133.0	许保良等, 1996
			花岗岩	936D2	4.590	31.560	0.046138	0.512123	-0.77	-10.05	-7.44		145.5*	

续表 1

Continued Table 1

区段	侵入期次	岩体名称	岩石名称	样品号	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($\pm 2\sigma$)	f_{Sm}/Nd	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM} (Ma)	年龄 (Ma)	资料来源
北 大 行 山 地 区	晚 期	紫荆关 (王安镇)	石英正长岩	98-30	7.031	50.980	0.083420	0.511712 ± 15	-0.58	-18.06	-16.25		126.4	Yan <i>et al.</i> , 2000
				BB9	4.810	35.800	0.082780	0.511876	-0.58	-14.86	-13.00		116.1	王焰等, 2001; 郁建华等, 1995
				WLS3	5.560	35.100	0.113024	$0.512063 \pm 15\text{V}$	-0.43	-11.22	-8.14	1642	122.5	许保良 等, 1996
南 大 行 山 地 区	早 期	符山	暗色闪长岩	F026	4.740	23.670	0.121100	0.511719 ± 09	-0.38	-17.93	-16.29	2345	171.0*	本文
				18128-2	5.041	27.300	0.111500	0.511721	-0.43	-17.89	-16.04	2123		迟效国等,
				18233	4.198	23.730	0.106900	0.511734	-0.46	-17.63	-15.68	2014		1994
中 期	矿山村	角闪二长岩	FS10	3.890	18.260	0.128800	0.511726	-0.35	-17.79	-16.50	2543	155.0*	Zhang <i>et al.</i> , 2004	
			K002	4.950	24.230	0.123400	0.511776 ± 09	0.37	-16.81	-15.55		136.0	本文	
			H-7	4.920	24.920	0.119200	0.511962 ± 13	0.39	-13.19	-12.10		110	本文	
晚 期	九龙山	霞霓正长岩	C-12	1.060	5.630	0.114000	0.512177 ± 13	-0.42	-8.99	-7.83	1485	126.8	Yan <i>et al.</i> , 2000	
			96-2	1.181	8.510	0.084100	0.511428 ± 13	-0.57	-23.60	-22.03		132.4		
			J-2	1.368	11.140	0.074260	0.511359 ± 12	-0.62	-24.95	-22.89		132.4	本文	

注: *代表 K-Ar 法年龄, 其余为全岩 Rb-Sr 等时线年龄或锆石 U-Pb 年龄。本文数据由中国科学院地质研究所同位素实验室采用 VG354 质谱仪测定

Table 2. Rb, Sr isotope data and parameters of Mesozoic intrusive rocks in the Lamang Da Ringgan tectonomagmatic belt

区段	侵入 期次	岩体名称	岩石名称	样品号 (数)	Rb($\mu\text{g/g}$)	Sr($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($\pm 2\sigma$)	年龄 (Ma)	资料来源	
大兴安岭中 南地区	早 期	召庙	钾长花岗岩		0.10853		0.70625	0.70598	172.6	郑学正, 1995	
		白音诺	花岗闪长斑岩		0.11654		0.70678	0.70650	171.0	张德全等, 1988	
		布敦化	花岗闪长斑岩		0.10087		0.70573	0.70550	166.0	张德全等, 1998	
	中 期	浩布高	钾长花岗岩		0.18241		0.71120	0.71079	158.1	张新安, 1988	
		马鞭子	钾长花岗岩		0.08684		0.70479	0.70460	155.9	鲍修坡等, 1989	
		龙头山	二长花岗岩- 花岗闪长岩		0.06828		0.70355	0.70340	152.4	王关玉, 1995	
	晚 期	敖麟达坝	花岗闪长岩		0.13906		0.70829	0.70800	148.3	李殿超, 1991	
		黄岗	花岗闪长岩		0.05890		0.70292	0.70280	142.0	沈逸民等, 1984	
		小罕山	钾长花岗岩 角闪石英二长岩		0.10205		0.70581	0.70561	139.1	张新安, 1988	
	北太行山 地区	早 期	东山湾	花岗闪长岩		0.16321		0.70991	0.70960	134.7	张德全等, 1988
			乌兰楚特	钾长花岗岩	8854	0.08411		0.70461	0.70445	133.1	本文
			乌兰坝	钾长花岗岩	I-13	0.17396		0.71063	0.71038	102.3	本文
		中 期	巴尔哲	碱性花岗岩	6 个样品	0.13396		0.70795	0.70770	132.2	张德全等, 1988
			碾子山	钠闪石花岗岩	16 个样品	0.12462		0.70732	0.70710	127.0	张敏等, 1988
			碾子山	碱性花岗岩	16 个样品	131~421		0.92987 \pm 6~ 1.43636 \pm 7	0.69800	125.2	王一等, 1997
晚 期		碾子山	碱性花岗岩	6 个样品	38.152~ 116.56		0.7677~ 0.9066	0.69510	123 \pm 8.6	李培忠等, 1993	
		碾子山	正长斑岩	6 个样品	1.1162~ 17.596		0.7065~ 0.7382	0.70400	135.0		
		王安镇	闪长岩	4 个样品	41.04~ 217.90	860.70~ 1778.00	0.1376~ 0.4084	0.7052~ 0.7057	186.4	蔡剑辉等, 2003	
早 期		涑源	辉长岩	20 个样品	1.72~ 95.40	326.70~ 2330.00	0.0021~ 0.3086	~0.706457 \pm 18 0.705824~ 0.706486	140.0*	Zhang <i>et al.</i> , 2004	
		八达岭	辉长岩-石英 闪长岩	3 个样品	19.00~ 77.00	1191.00~ 1875.00	0.03191~ 0.18340	0.705175~ 0.705658	163.9	王焰等, 2001; 郁建华等, 1995	
		王安镇	花岗闪长岩	8 个样品	111.70~ 224.10	440.50~ 930.70	0.3745~ 1.4700	0.7059~ ~0.709457 \pm 14	145.7	蔡剑辉等, 2003	
中 期		八达岭	花岗岩 花岗闪长岩- 二长花岗岩	20-33 4 个样品	70.88~ 104.00	354.00~ 778.00	0.2541~ 0.7463	0.706751~ 0.708114	137.8 145.0	王季亮等, 1994 王焰等, 2001	
		房山	石英闪长岩 花岗闪长岩	4 个样品	78.900 66.600	1113.30 1287.30	0.20500 0.14960	0.705858 0.705671	132.8	白志民等, 1990 蔡剑辉等(待发表)	
		大海陀	石英二长岩- 花岗岩	4 个样品	87.92~ 127.80	295.80~ 859.10	0.29548~ 1.24752	0.707146~ 0.708554	145.5 135.2	王季亮等, 1994	
晚 期	赤瓦屋	花岗闪长岩					0.7065	135.1			
	麻棚	花岗闪长岩 斑状花岗闪长岩					0.7068 0.7059	135.0			

续表 2

Continued Table 2

区段	侵入期次	岩体名称	岩石名称	样品号(数)	Rb(μg/g)	Sr(μg/g)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(±2σ)	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	年龄(Ma)	资料来源
北太行山地区	晚期	王安镇	石英正长岩	4 个样品	158.10~	107.00~	0.8584~	0.707534±24	0.7057~	126.7	Yan <i>et al.</i> , 2000
					265.10	608.40	6.8740	~0.718539±15	0.7064		
					118.000	13.000	10.13000	0.750406	0.7317	116.1	王焰等, 2001; 郁建华等, 1995
	雾灵山	碱性石英正长岩	4 个样品	87.41~	7.38~	0.5436~	0.707051~	0.7060~	122.5	许保良等, 1998	
				320.70	521.00	128.1870	0.929126	0.7110			
	符山	暗色闪长岩	3 个样品	22.84~	646.10~	0.0925~	0.705240~	0.7050~	171*	迟效国等, 1994	
				47.80	745.00	0.1546	0.706428	0.7061			
				47.30	833.00	0.1663	0.706500	0.7061	170*	薛绥洲, 1984	
				41.40	927.30	0.1308	0.707000	0.7067	170*		
				6.14	715.10	0.0248	0.706452	0.7064	155*	Zhang <i>et al.</i> , 2004	
早期	东冶	暗色闪长岩	9 个样品	11.40~	647.60~	0.0505~	0.704550~	0.7042~	180*	迟效国等, 1994	
				60.75	899.90	0.2345	0.705747	0.7056			
				3.94~	523.30~	0.0440~	0.705382~	0.7052~	166*		
西安里	暗色闪长岩	7 个样品	40.69	876.00	0.1711	0.706502	0.7063				
							0.7068	238	蔡新平, 1981		
南太行山地区	中期	固镇	石英辉长辉绿岩	G010	54.30	856.70	0.1826	0.705740	0.7053	178*	薛绥洲, 1984
					149.10~	479.20~	0.5452~	0.707110±23~	0.7061~	126.8	Yan <i>et al.</i> , 2000
					248.50	980.40	1.2140	0.708372±	0.7062		
晚期	九龙山	霓霞正长岩	4 个样品	89.65~	224.10~	0.5335~	0.706722±20	0.7056~	132.4		
				145.80	487.90	1.8790	~0.709233±	0.7057			

注: * 代表 K-Ar 法年龄, 其余为全岩 Rb-Sr 等时线年龄或锆石 U-Pb 年龄。本文数据由中国科学院地质研究所同位素实验室采用 VG354 质谱仪测定

表 3 太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩钾长石 Pb 同位素分析结果

Table 3 Characteristics of K-feldspar Pb composition from Mesozoic intrusive rocks in the Taihang-Da Hinggan tectonomagmatic belt

侵入 期次	岩体名称	岩石名称	样品号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}\%$	$^{206}\text{Pb}\%$	$^{207}\text{Pb}\%$	$^{208}\text{Pb}\%$	资料来源
早期	白音诺	花岗岩长岩	991102	18.3472	15.5215	38.0931	1.371	25.146	21.274	52.21	本文
		花岗岩长斑岩		18.2480	15.5370	38.0750					牟保磊等,1991
	土木富州	花岗岩长岩	8904	18.3627	15.7119	38.3648	1.362	25.004	21.394	52.240	本文
	浩布高	钾长花岗岩	III-10	18.3490	15.5880	38.2370					张新安,1988
中期			III-5	18.5630	15.6000	38.5010					
	马鞍子	钾长花岗岩		18.3010	15.5050	37.9590	1.374	25.137	21.297	52.193	本文
	哈达吐	花岗岩长岩	88103	18.3674	15.5784	38.2158	1.367	25.105	21.293	52.235	
	黄岗	钾长花岗岩		18.3510	15.4690	38.0050	1.373	25.199	21.241	52.187	
			H92-510	18.4948	15.6019	38.3246	1.362	25.190	21.250	52.20	
	富林	钾长花岗岩	8885	18.3671	15.5979	38.2973	1.365	25.070	21.291	52.274	
	查木罕	钾长花岗岩		18.2830	15.4620	37.9520	1.376	25.149	21.269	52.206	
	小罕山	石英二长岩	I-20	18.2150	15.4920	37.9620					张新安,1988
晚期	乌兰坝	钾长花岗岩	I-10	18.3150	15.5310	38.1250					本文
	乌兰楚特	钾长花岗岩	8854	18.2328	15.4657	37.9156	1.377	25.109	21.299	52.215	
			II-2	18.4160	15.4950	38.0600					张新安,1988
			II-10	18.4500	15.5790	38.2630					
	碾子山	碱性花岗岩	9个样品	18.1920~	15.4840~	37.9940					李培忠等,1993
				18.2760	15.5460	~38.2220					
	嫩江	碱性花岗岩	3个样品	18.1030~	15.4060~	37.8230~					张理刚等,1995
				18.3190	15.5330	38.3260					

大兴安岭中南部地区

Continued Table 3

侵入 区段	岩体名称	岩石名称	样品号	$^{205}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}\%$	$^{205}\text{Pb}\%$	$^{207}\text{Pb}\%$	$^{208}\text{Pb}\%$	资料来源	
早期	涞源	辉长岩	18 个样品	16.5790~ 17.0310	15.0890~ 15.2840	36.4440~ 37.5110					Zhang <i>et al.</i> , 2004	
	王安镇	花岗闪长岩	97-52	16.4834	15.2038	36.5042	1.445	23.823	21.974	52.758	本文	
中 期	房山	二长花岗岩	20-33	16.4370	15.1340	36.3810	1.450	23.838	21.949	52.763	蔡剑辉等, 2003	
		石英闪长岩	关地 $\varphi\delta$	16.6792	15.1389	36.4453	1.442	24.081	21.857	52.618	蔡剑辉等(待发表)	
	大海陀	花岗闪长岩	东山口 $\varphi\delta$	16.5388	15.2100	36.5082	1.444	23.880	21.962	52.714		
		斑状花岗岩	762	16.5780	15.2051	35.4832	1.406	23.303	21.404	52.806		
		斑状二长	763	15.5207	15.2664	36.6057	1.441	23.808	22.000	52.751		
		花岗岩	765	16.6718	15.0672	36.5131	1.444	23.934	21.952	52.671	喻学惠等, 1996	
	大河南	二长斑岩		16.6800	15.3100	36.9400						张理刚等, 1995
		二长斑岩		16.4900	15.4700	37.4200						
	晚期	紫荆关	石英正长岩	98-30	17.1780	15.2970	37.1380					Yan <i>et al.</i> , 2000
		雾灵山	石英正长岩	wls3	16.6220	15.2400	36.5770					
早 期	符山	辉长岩	FS10	16.9680	15.2100	37.0390					Zhang <i>et al.</i> , 2004	
	矿山村	二长岩	BGXT	17.2540	15.3860	37.3410	1.409	24.308	21.676	52.607	本文	
		二长岩	BGXS	17.1530	15.3450	37.2090	1.414	24.260	21.702	52.624		
		二长岩	BGSJ	17.0970	15.3440	37.2200	1.415	24.196	21.715	52.674		
		正长岩	BGCJ	16.9690	15.1660	36.6380	1.433	24.320	21.737	52.510	张理刚等, 1995	
	白沙北	二长岩	HEB003-1	17.7720	15.4810	38.0220						张理刚等, 1995
		二长岩	HEB004-1	17.8600	15.5010	38.0690						
	贾庄东	正长岩	HEB005-1	17.8040	15.4170	37.9200						张理刚等, 1995
	北安东	正长岩	HEB006-1	17.7100	15.4590	38.0460						
	洪山	正长岩	C-12	17.7060	15.4480	37.7640						Yan <i>et al.</i> , 2000
九龙山	霞石正长岩	96-2	17.8470	15.4020	37.7570							

注: 本文样品由中国科学院地质研究所同位素实验室采用 VG354 质谱仪测定

大兴安岭中-南地区中生代侵入岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为正值, 早期中-酸性岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 +1.85; 中期酸性岩-富碱质中酸性岩石 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的变化范围为 +0.75 ~ +8.12, 5 个样品平均为 +3.20; 晚期富碱质酸性岩石的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的变化范围为 +1.88 ~ +3.45, 13 个样品平均为 +2.50。

3.1.2 Nd 同位素模式年龄 T_{DM}

Nd 同位素模式年龄 T_{DM} 是研究岩石 Nd 同位素特征的重要参数, 考虑到不同岩石的 Sm/Nd 分馏情况, 一般认为 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值介于 -0.50 ~ -0.20 之间, 其模式年龄才具有地质意义(吴福元等, 1997)。

表 1 显示南太行山地区岩石的 Nd 模式年龄 T_{DM} 集中于 2543 ~ 1485 Ma, 8 个样品平均值为 2059 Ma, 其余样品的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值略小于 -0.50, 其 Nd 模式年龄不太可靠; 北太行山地区岩石的 Nd 模式年龄 T_{DM} 变化于 2245 ~ 1642 Ma 之间, 6 个样品平均值为 1947 Ma; 大兴安岭地区岩石的 Nd 模式年龄 T_{DM} 为 983 ~ 540 Ma, 11 个样品平均年龄为 754.3 Ma(由于其中 6 个样品的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值大于 -0.20, 其模式年龄不可靠, 故没有计算)。

由于 Nd 同位素模式年龄的地质意义存在多重解释, 所以至今仍是学术界较为棘手的一个难题, 如果缺乏有利事实的支持, 恐难较明确地对其地质含义进行定论。本文在此仅结合本研究区的一些实际情况对其中一种可能性进行推测, 相关的深入研究尚待进行。我们注意到, 太行山地区中生代侵入岩具有基本一致的 Nd 模式年龄, 其模式年龄主要集中于 2543 ~ 1485 Ma 之间, 大约相当于早-中元古代。由于华北地区岩浆岩及深源包体的地球化学研究成果明确显示, 古生代-中生代华北克拉通岩石圈地幔具富集性特征(池际尚等, 1996; 王德滋等, 1996; 阎国翰等, 2000; 周新华等, 2001), 故初步认为该区侵入岩的 Nd 模式年龄 2543 ~ 1485 Ma 可能指示华北克拉通下岩石圈地幔发生富集作用的时间。

大兴安岭中-南地区各侵入期岩石均具有较年轻的 Nd 模式年龄, 983 ~ 540 Ma 大约相当于晚元古代-早古生代。关于这种年轻模式年龄的意义, 目前代表性的认识有两种。本文倾向于认为晚元古代-早古生代是该区地壳生长的一个重要时期(洪大卫等, 2000)。因为本区侵入岩所具有的低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值和正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的特性与美洲西海岸部分晚中生代-早新生代与俯冲有关的花岗岩(Depaolo D J *et al.*, 1991) 极其相似, 且其 Nd 模式年龄(983 ~ 540 Ma) 又与古亚洲洋扩张的时间(800 ~ 600 Ma, Dobretsov *et al.*, 1995) 基本一致, 故可以推测该区岩石可能来源于古亚洲洋俯冲的洋壳转化而成的年轻下地壳, 而该年轻的地壳物质主要衍生自亏损地幔。

3.2 Sr 同位素特征

南太行山地区早期基-中性侵入岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值变化范围为 0.7042 ~ 0.7068, 24 个样品平均值为 0.7055; 中期中性岩岩石样品的比值为 0.7053; 晚期富碱质中性岩的比

值为 0.7056 ~ 0.7062, 11 个样品平均值为 0.7060。

北太行山地区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值变化范围较大。早期基-中性岩石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值偏低, 介于 0.7051 ~ 0.7063 之间, 27 个样品平均值为 0.7058; 而中期中-酸性岩石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值略高, 介于 0.7054 ~ 0.7068 之间, 25 个样品平均值为 0.7060; 晚期富碱质中-酸性岩石的比值最高, 变化范围为 0.7057 ~ 0.7317 之间, 10 个样品平均值为 0.7095。

大兴安岭地区侵入岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值的区间很大, 范围为 0.7006 ~ 0.7133。早期中-酸性岩石的初始比值介于 0.7055 ~ 0.7065 之间, 3 个样品平均值为 0.7060; 中期中-酸性和富碱质中-酸性岩石的初始比值介于 0.7028 ~ 0.7108 之间, 6 个样品平均值为 0.7059; 晚期富碱质酸性岩石的初始比值介于 0.6951 ~ 0.7104 之间, 33 个样品平均值为 0.7045。

3.3 Pb 同位素特征

本次工作获得研究区内 20 余个岩体共 69 个岩石样品的钾长石 Pb 同位素组成(其中 14 个为本文分析数据)(表 3)。

太行山地区侵入岩钾长石 Pb 同位素组成以低比值为特征。其中南太行早期岩石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.968$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.210$; 中期岩石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.969 \sim 17.860$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.166 \sim 15.501$, 6 个样品平均值分别为 17.3508 和 15.3705; 晚期岩石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.7060 \sim 17.8470$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.4020 \sim 15.4590$, 4 个样品平均值分别为 17.7668 和 15.4315。

北太行早期岩石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.579 \sim 17.031$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.089 \sim 15.284$, 18 个样品平均值分别为 16.757 和 15.224; 中期岩石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.4370 \sim 16.8490$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.1340 \sim 15.4700$, 10 个样品平均值分别为 16.4831 和 15.2400; 晚期岩石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.6220 \sim 17.1780$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.2400 \sim 15.2970$, 2 个样品平均值分别为 16.9000 和 15.2685。其 Pb 同位素比值均略小于南太行岩石的同一比值。

大兴安岭地区早期岩石的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.2480 \sim 18.3627$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.5215 \sim 15.5370$, 3 个样品平均值分别为 18.2976 和 15.5293; 中期岩石的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.2150 \sim 18.5630$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.4620 \sim 15.6019$, 9 个样品平均值分别为 18.3619 和 15.5438; 晚期岩石的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.1030 \sim 18.4500$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.4060 \sim 15.5790$, 16 个样品平均值分别为 18.2215 和 15.5053。与太行山地区同期岩石相比, 大兴安岭地区侵入岩的 Pb 同位素比值均较高, 而且比值的范围较大。

4 太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩的物质来源

在岩浆形成过程中,可以认为高温下同位素均达到平衡,岩浆一般都能继承源岩的同位素成分,并且在岩浆形成后封闭体系内发生分异作用过程中保持不变。所以,通过岩浆岩可以了解地球深部同位素特征。由于地壳和地幔两大地球化学储库中 Nd、Sr、Pb 等稳定同位素比值存在显著的差异,所以运用不同的同位素体系,利用岩浆岩的同位素地球化学特征可以推测其源区的性质。

4.1 Nd 同位素

如表 1 所示,太行山地区各期次岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值均小于零,而大兴安岭地区各期次岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值均为正值,反映两大区域内中生代侵入岩具有截然不同的岩浆源区。由于太行山地区中生代侵入岩源区物质 Sm/Nd 比值小于 1,推测岩石源于轻稀土富集的物质,即地壳或富集地幔物质,或至少于形成过程中与地壳物质发生过明显的混染作用。各期次不同类型岩石 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的差异与太行山地区不同时期形成的不同类型岩石的源区深度不同有关,也可能与不同程度的地壳物质混染作用有关。而大兴安岭中-南地区岩石的正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值则表明其来源于亏损地幔,但是由于其 $\epsilon_{Nd}(t)$ 正值较小,所以其源区为轻稀土亏损程度较低的地幔源区。

在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 关系图(图 2)上,南、北太行山地区侵入岩投影点主要分布于 EM I 型地幔区及附近,表明太行山地区岩体物质来源与富集地幔储库关系密切,并暗示中生代太行山-大兴安岭构造岩浆带南段华北克拉通的上地幔具有富集性。

大兴安岭地区岩石投影点的分布与太行山地区明显不同,除 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值较高外,基本上沿水平方向分布。这种分布特点可能与该区岩石具高 Rb/Sr 比值有关,研究(Jahn B. M. *et al.*, 2000)表明,Rb/Sr 比值大的样品在测试过程中的微小误差将会引起 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的较大变化。该区岩石投影点基本上趋近于原始地幔区,而与 EM I 型地幔区相距较远,暗示该区岩石的物质来源可能与原始地幔关系较近,而与富集地幔关系不大。

4.2 Sr 同位素

南太行山地区各侵入期基-中性岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值差别不大,变化范围为 0.7042 ~ 0.7068,接近现代大洋玄武岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值 0.7020 ~ 0.7060,表明该区基-中性岩浆主要来源于上地幔源区,基本上没有或个别受到地壳

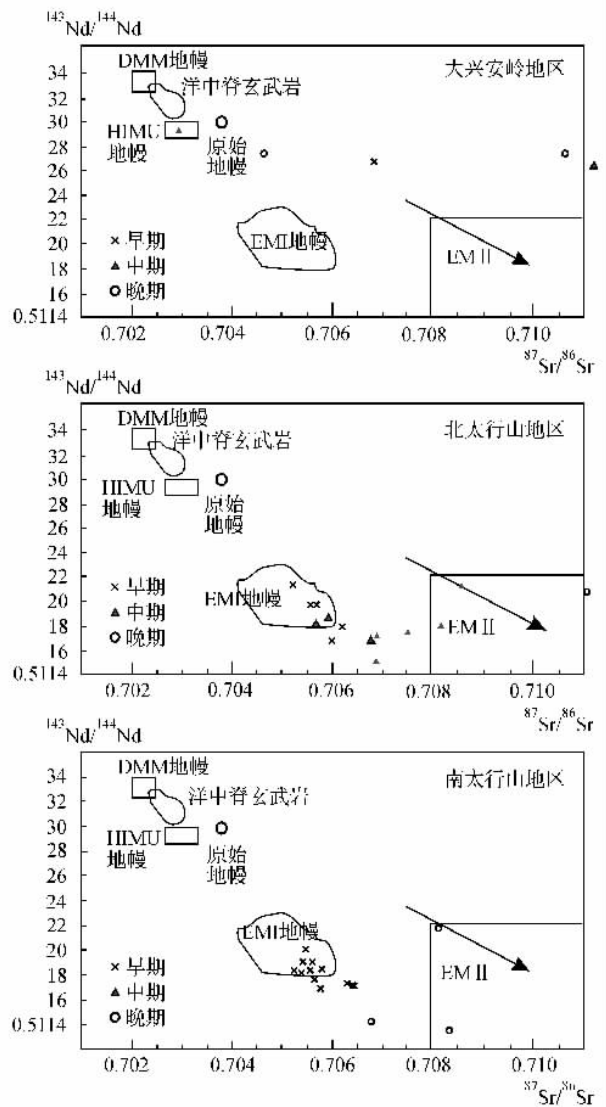


图 2 太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 关系图 (DMM、EM I、EM II、HIMU 和原始地幔为 Hart(1984)与 Zindler(1986)定义的地幔端元)

Fig. 2 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ correlation diagrams of Mesozoic intrusives from the Taihang - Da Hinggan Mountains Tectonomagmatic Belt (DMM、EM I、EM II、HIMU and primary mantle are mantle end-members defined by Hart and Zindler, 1984; 1986)

的混染。

北太行山地区各类型岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值差别较明显。早期基-中性岩石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值与现代大洋玄武岩相近,表明其物质来源与上地幔物质关系密切;而中期中-酸性岩石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值较高,接近现代地幔(0.7060),说明其物质来源与上地幔和下地壳物质均有关;晚期中-酸性岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值变化范围广,平均值高

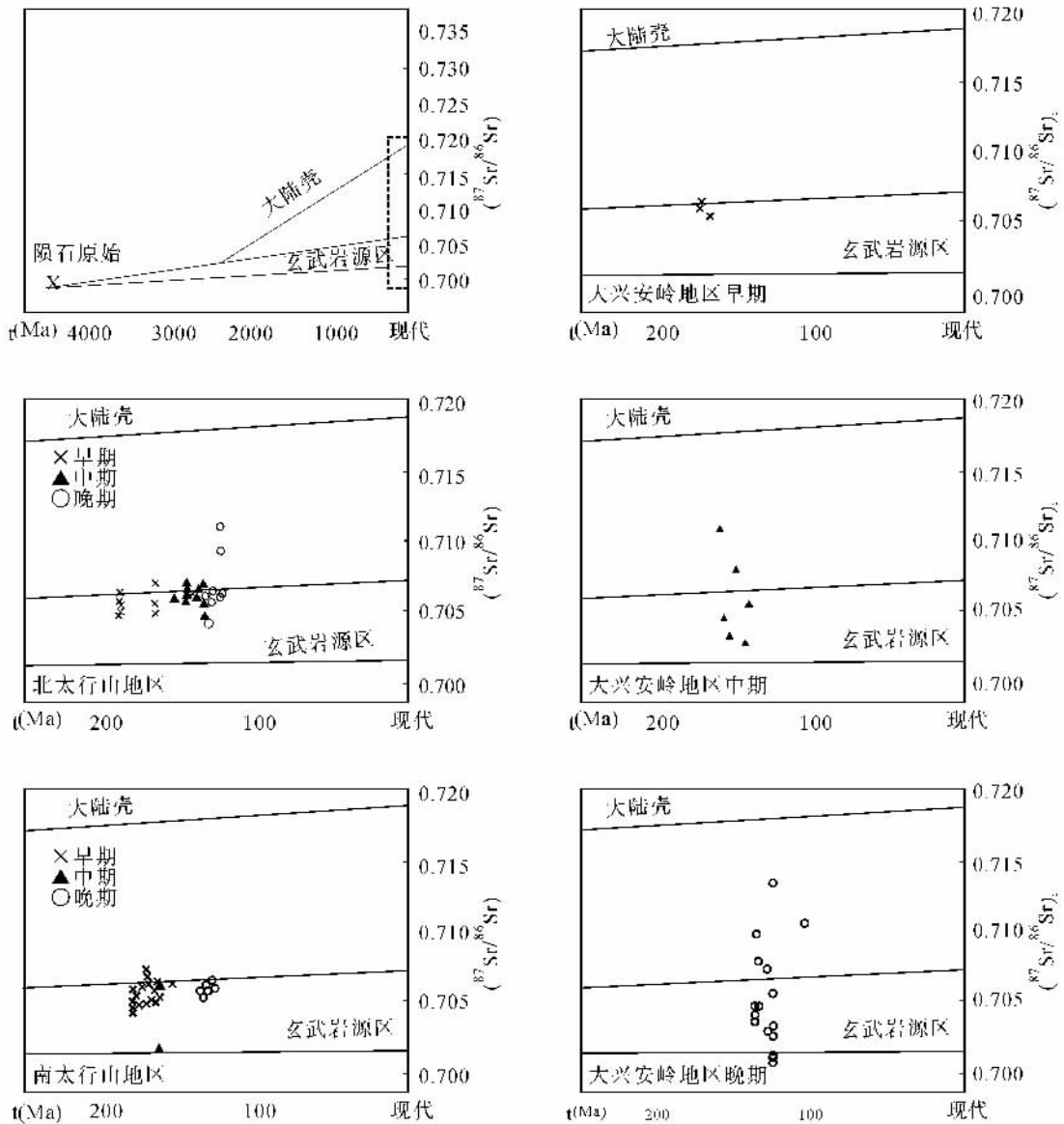


图3 太行山—大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩锶同位素演化图(图式引自 Faure 和 Powell, 1972)

Fig. 3 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and t (Ma) diagrams of Mesozoic intrusives from the Taihang - Da Hingan Mountains Tectonomagmatic Belt (after Faure and Powell, 1972)

达 0.7090, 其岩浆来源应主要与地壳物质关系密切。由此可见, 北太行山地区不同侵入期形成的不同类型侵入岩其源区性质各不相同, 从早期-中期-晚期, 岩浆来源具有由幔源趋于壳源的变化趋势。

大兴安岭地区侵入岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值具有较宽的变化范围, 尤其是中期酸性岩-富碱中酸性岩和晚期富碱酸性岩(图3), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值或趋近于球粒陨石(0.6980 ~ 0.7000), 或趋近于大陆壳硅铝质岩石的平均值 0.719(肖庆辉等, 2002), 似乎难以判断其源区性质。但是从总体上来看, 其平均值并不高(≤ 0.7060), 而且由早期而晚期呈现出

逐渐降低的变化趋势, 结合该区侵入岩的 Nd 同位素特征, 可以推断该区岩浆来源应与幔源衍生物关系密切。岩石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值的变化可能与壳源物质混染作用的程度变化有关。早期中-酸性岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值均接近 0.7060, 其源岩浆没有或极少受到地壳物质的混染; 而中、晚期岩石形成过程中地壳锶的混染作用十分明显。

在锶同位素随时间演化图解上(图3), 南太行山地区各期岩石投影点基本集中于玄武岩浆源区及玄武岩演化线上, 说明岩石主要起源于地幔, 但不排除极少量地壳物质的混染。

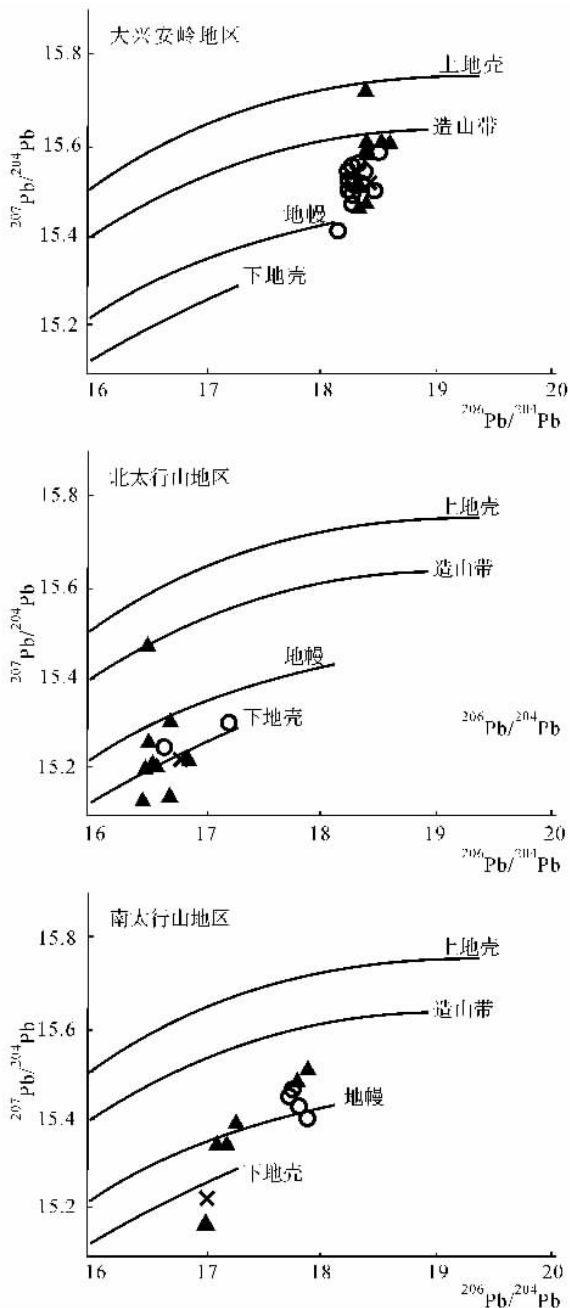


图4 地球不同区域铅的结构模式图解(据 Zartman 等, 1981, 图例同图2)

Fig. 4 Diagrams of Pb isotopic composition of K-feldspar of Mesozoic intrusives from the Taihang - Da Hinggan Mountains Tectonomagmatic Belt (after Zartman *et al.*, 1981)

北太行山地区早期基-中性岩石投影点基本上全部落在玄武岩浆源区, 中期中-酸性岩石的投影点则主要落在玄武岩演化线及其与大陆壳演化线之间的区域; 晚期富碱质中-酸性岩石投影点较分散, 基本上落在大洋玄武岩演化线和大陆壳演化线之间, 与中期相比, 较趋近于大陆壳演化线, 由此说明北太行山地区基-中性岩石可能主要来源于岩石圈

地幔, 中-酸性岩石可能起源于地幔或与地幔物质相关的下地壳; 富碱质中-酸性岩石来源可能与地壳物质关系更密切。

大兴安岭地区岩石投影点更为分散, 早期中-酸性岩石投影点基本位于大洋玄武岩演化线上; 中期中-酸性和富碱质中-酸性岩石投影点主要落于玄武岩源区及大陆壳演化线以下的区域内; 晚期富碱质酸性岩石投影点分布范围较大, 基本上遍及大陆壳演化线以下的区域。从总的分布情况来看, 该区岩石物质来源与地幔关系密切, 但地壳物质的参与也非常重要, 尤其是对于中、晚期岩石, 其地壳锶的混染非常明显, 相比之下, 早期幔源岩浆较少受到地壳物质的干扰。

4.3 Pb 同位素

在铅构造模式图上(图4), 南太行山地区中性岩石投影点主要沿地幔模式线分布, 表明其岩浆来源较深, 与地幔关系密切。北太行山地区中、晚期中-酸性岩石投影点则主要沿下地壳模式曲线分布, 个别投影点落在地幔模式线和造山带演化线上, 反映其物质来源可能与下地壳关系较为密切, 混有少量地幔物质铅。大兴安岭地区三期岩石的钾长石 Pb 同位素组成主要投影于地幔演化线之上、造山带演化线之下的区域内, 推测该区侵入岩主要属于亏损幔源型花岗岩类, 但壳源物质的参与作用也十分明显。

据不同地幔端元的 Nd 和 Pb 同位素组成图解(图5), 南、北太行山地区中生代侵入岩投影点主要分布于 EM I 型地幔区及附近, 而大兴安岭地区侵入岩 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值均较高, 其投影点基本上均趋近于原始地幔区。再一次表明, 太行山地区中生代侵入岩体物质来源与富集地幔储库关系密切, 而大兴安岭中-南地区中生代侵入岩的物质来源可能与原始地幔关系较近。

综合上述研究成果, 可以看出太行山-大兴安岭构造岩浆带不同区段、不同侵入期次、不同类型岩石具有明显不同的 Nd、Sr、Pb 同位素特征, 这种差异分别代表了不同的岩浆源区性质。

位于华北克拉通的南太行山地区主要为基-中性岩浆活动, 岩石的 ϵ_{Nd} 值均为负, 表明其物质来源与富集地幔或地壳有关。由于早期基-中性岩、中期中性岩以及晚期富碱中性岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值均接近现代大洋玄武岩, 故其岩浆均主要来自于上地幔源区, 乃岩石圈地幔部分熔融的产物。该区岩石的 Pb 同位素特征也进一步表明其岩浆来源以富集地幔部分熔融为主, 早、中期岩浆形成中较少遭受地壳物质的混染, 而晚期地壳物质的混染程度略高。

同样位于华北克拉通的北太行山地区早期主要为基-中性岩浆活动, Nd、Sr、Pb 同位素特征均类似于南太行山地区同期侵入岩, 其岩浆主要来源于富集地幔的部分熔融; 中期以中-酸性岩浆活动为主, 岩石的负 ϵ_{Nd} 值和与现代大洋玄武

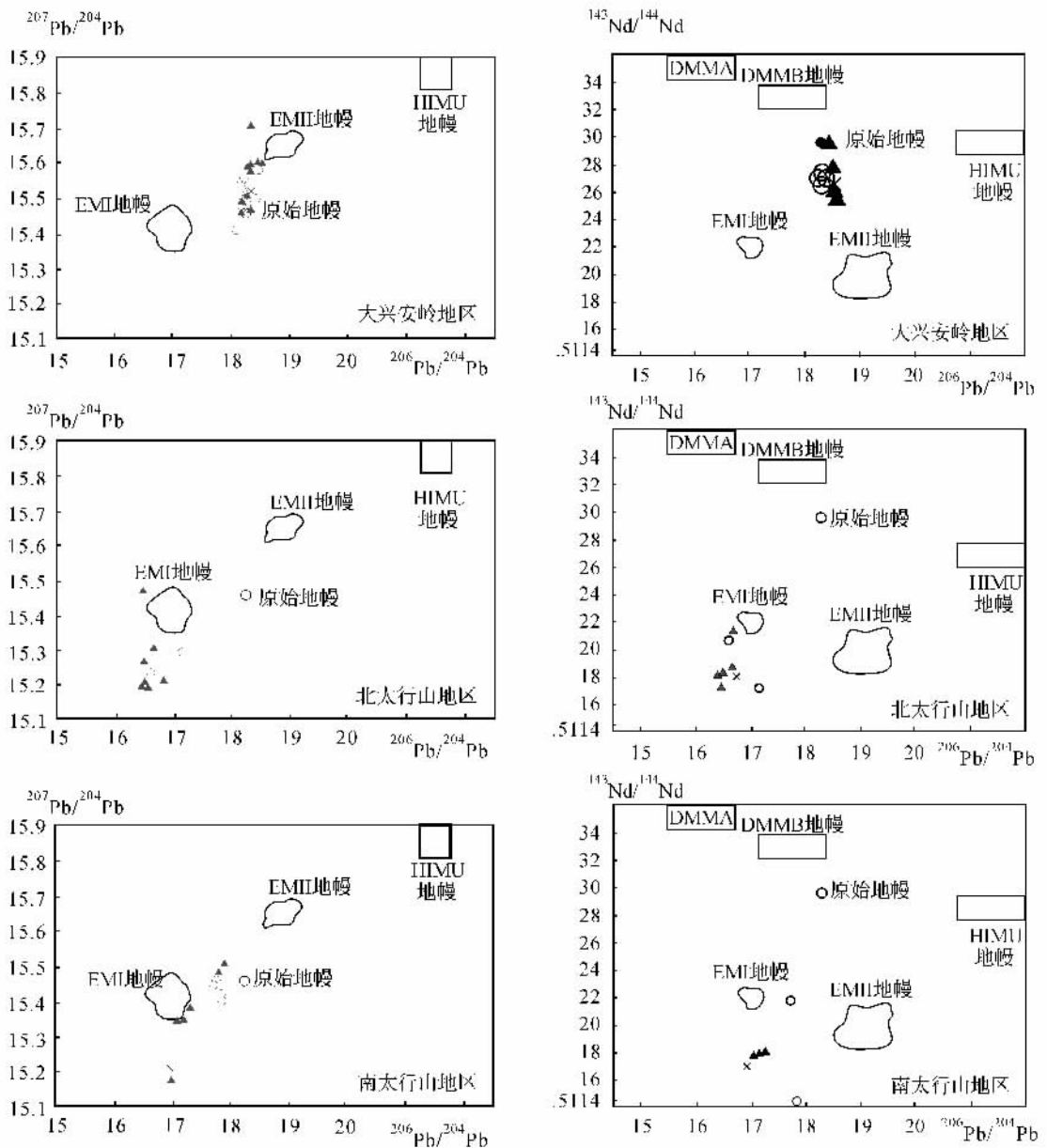


图5 太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (左)和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (右)图解
(DMM、EM I、EM II、HIMU 和原始地幔为 Hart(1984)和 Zindler(1986)定义的地幔端元,图例同图2)

Fig.5 Diagrams of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (left) and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (right) of Mesozoic intrusives from the Taihang - Da Hinggan Mountains Tectonomagmatic Belt

岩相近的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值均暗示其物质来源与地壳或富集地幔有关。根据该期岩石的 Pb 同位素特征可以推测其岩浆物质来源与下地壳的低度熔融关系更为密切,由此认为该期中-酸性岩可能是玄武质下地壳局部熔融的产物(蔡剑辉等, 2003)。晚期富碱质中-酸性岩的 ϵ_{Nd} 值虽然也为负值,但 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值较高,平均值达 0.7090,其岩浆来源应主要是壳源的。地球不同区域铅模式图上,其 Pb 同位素投影点基本沿下地壳铅模式线及其附近分布,说明其岩浆形成深度较

浅,岩浆来源可能与下地壳、甚至中地壳物质密切相关。

大兴安岭中-南地区中生代侵入岩主要呈中-酸性,晚期形成的酸性岩富碱质。与太行山地区侵入岩相比,该区岩石最显著的差异是 ϵ_{Nd} 值均为正,表明其岩浆来源与亏损地幔储库有关,其 Pb 同位素特征也证实该区岩浆与富集地幔物质关系不大,暗示该区所在的兴蒙造山带上地幔为亏损地幔。虽然该区岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值变化区间较大,但平均值偏低(≤ 0.7060),代表源岩主要与地幔源区关系密切,

在形成过程中有地壳物质的参与。一般均认为,由地幔部分熔融直接形成中-酸性岩的可能性极小(Green *et al.*, 1980; Martin, 1999),因此推测该区中-酸性岩石更有可能是直接来源于与亏损地幔有联系的年轻下地壳。

总之,太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩的 Nd、Sr、Pb 同位素特征和物质来源不仅因岩石类型不同而不同,更因所处大地构造位置不同而呈现出十分显著的差异,这种差异蕴含着更深层次的内涵:即表明中生代该构造岩浆带所纵跨的两个大地构造单元-华北克拉通和兴蒙造山带下岩石圈地幔的性质截然不同,前者为富集性而后者则具亏损性。这对于认识中国北方大陆岩石圈地幔的非均一性特征具有十分重要的意义。

References

- Bai Zhimin, Xu Shuzhen, Ge Shiwei. 1991. The Badaling Granitoids. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region. 1989. Regional Geology of Inner Mongolia Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Cai J H, Yan G H, Chang Z S *et al.* 2003. Petrological and geochemical characteristics of the Wanganzhen complex and discussion on its genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 81 ~ 92 (in Chinese with English abstract)
- Cai X P. 1981. Preliminary study on igneous petroectonic assemblage and its geotectonic implication: petrochemical characteristics and magma evolution rule. Master Dissertation of Peking University(in Chinese)
- Chen B and Zhai M G. 2003a. Geochemistry of late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, north China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle. *Geol. Mag.*, 140(1): 87 - 93
- Chen B, Zhai M G and Shao J A. 2003b. Petrogenesis and significance of the Mesozoic North Taihang complex: major and trace element evidence. *Science in China (Series D)*: 46(9): 941 - 953
- Chi J S, Lu F X, Zhao L *et al.* 1996. Kimberlite and Paleozoic lithospheric mantle of North China Platform. Beijing: . Sciences Press: 215 - 275. (in Chinese with English abstract)
- Chi X G, Xu W L, Lin J Q *et al.* 1994. Genesis of Mesozoic dioritic rocks on North China Platform : Sr-Nd isotopic evidences. In: Lin JQ and Tan DJ (eds.) *Mesozoic potassic magma province on North China Platform*. Beijing: Seismic Publishing House (in Chinese)
- Deng J F, Zhao H L, Mo XX *et al.* 1996. Continental root-plume tectonics of China: Key to the Continental dynamics. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Deng J F, Zhao G C, Zhao H L *et al.* 2000. Yanshanian igneous petroectonic assemblage and orogenic-deep processin east China. *Geol. Rev.*, 46:41 - 48 (in Chinese with English abstract)
- Depaolo D J, Linn A M *et al.* 1991. The continental crustal age distribution: methods of determining mantle separation age from Sm-Nd isotopic data and application to the Southwestern United States. *J. Geophys. Res.*, 96(B2): 2071 - 2088
- Dobretsov N L, Berzin N A and Buslov M. 1995. Opening and tectonic evolution of Paleo-Asian Ocean. *Inter. Geol. Rev.*, 37: 335 - 360
- Faure G. and Powell J L. 1972. Strontium isotope geology. Berlin, Spring-Verlag
- Green T H. 1980. Island arc and continent-building magmatism: IA review of petrogenetic models based on experimental petrology and geochemistry. *Tectonophysics*, 63: 367 - 385
- Hart S R. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*. 309: 753 - 757
- He G Q, Wang T Y, Wang S G. 1982. On the geotectonic feature of the late Mesozoic granitic intrusions in the Northern part of Taihang Mountain. *The Record of geological Research*: 21 - 29. Beijing: Publishing House of Peking University (in Chinese with English abstract)
- Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. Regional Geology of Beijing, Tianjin and Hebei Province. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Hong D W, Wang S G, Xie X L *et al.* 2000. Genesis of positive $\epsilon_{Nd}(t)$ granitoids in the Da Hinggan Mountains - Mongolia orogenic belt and growth of continental crust. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441 - 456(in Chinese with English abstract)
- Huang F S, Xue S Z. 1990. The petrographical and geochemical characteristics and genesis of the Han Xing intrusive complex. *Acta Petrologica et Mineralogica Sinica*, 1(3): 203 - 212 (in Chinese with English abstract)
- Jahn B M, Wu F Y and Hong D. 2000. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*, 109(1): 5 - 20
- Li P Z and Yu J S. 1993. Age of Nianzishan miarolitic alkaline granite in Heinongjiang Province and their significance. *Geochemistry*, 4: 389 - 397(in Chinese)
- Liu F S, Shi Z L. 1998. Dynamic mechanism about generation of Mesozoic granites in Taihang Shan-Yan shan area and intracontinental orogeny. *Acta Geoscientia Sinica - Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 19(1): 12 - 18 (in Chinese with English abstract)
- Luo Z H, Deng J F, Han X Q. 1999. On characteristics of magmatic activities and orogenic process of Taihangshan intraplate orogen. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46: 411 - 429
- Mu K M, Lin J Q, Zhou Z R *et al.* 1989. Genesis of the granitoids of North China Platform. Jinlin: Jinlin Science and Technology Press (in Chinese)
- Niu S Y, Chen L, Xu C S *et al.* 1994. The crustal evolution and metallogenic regularity of the Taihangshan area. Beijing: Seismic Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Qian Q, Chung S L, Lee T Y *et al.* 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Badaling high Ba-Sr granitoids: a comparison of igneous rocks from North China and the Dabie-Sulu Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 275 - 292 (in Chinese with English abstract)
- Qiao G S. 1998. Normalization of isotopic dilution analysis. *Scientia Sinica (Series A)*, 31(10): 1263 - 1268
- Ren J S *et al.* 1979. Preliminary study on the rift tectonic frameworks in

- China from satellite photos. *Geological Review*, 25(2): 10–15 (in Chinese)
- Shanxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. Regional Geology of Shanxi Province. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Shao J A, Han QJ, Zhang LQ *et al.* 1999a. Cumulate complex xenoliths in the Early Mesozoic in eastern Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 44(14): 1272–1279 (in Chinese)
- Shao J A, Zhang LQ, Mu BL. 1999b. Magmatism in the Mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan Mountains. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 339–345 (in Chinese with English abstract)
- Wang D Z, Ren Q J, Qiu J S, Chen K R, Xu Z W and Zen J H. 1996. Characteristics of volcanic rocks from shoshonite province in eastern China and its mineralization. *Acta Geologica Sinica*. 70(1): 23–34 (in Chinese with English abstract)
- Wang J L, Li B Z, Zhou D X *et al.* 1994. Geological characteristics and related mineralization of the granitoids complex in Hebei Province: 6–172. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Wang S G, Han B F, Li R *et al.* 1994. A study on geochemistry of Wanganzhen complex in the northern segment of Taihangshan tectonomagmatic belt. *Lithospheric Geoscience*: 29–38, Beijing: Seismic Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Wang Yan, Zhang Qi. 2001. A granitoid complex from Badaling area, North China: composition, geochemical characteristics and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 533–540 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y X, Zhao ZH. 1997. Geochemistry and origin of the Baerzhe REE-Nb-Be-Zr superlarge deposit. *Geochimica*, 26(1): 24–34 (in Chinese with English abstract)
- Wu F Y, Sun D Y. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(4): 313–318 (in Chinese)
- Wu F Y, Bor-ming Jahn and Lin Q. 1997. Isotopic characteristics of the post-orogenic granite in orogenic belt of Northern China and their implications for crustal growth. *Chinese Sciences Bulletin*, 42(20): 2188–2192 (in Chinese)
- Wu L R. 1985. The Mesozoic granitoids in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 1(1): 1–10 (in Chinese with English abstract)
- Xiao Q H, Deng J F, Ma D Q *et al.* 2002. The ways of investigation on granitoids. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Xu B L, Yan G H, Huang F S *et al.* 1996. Petrology, petrogenetic type and tectonic implication of Wulingshan alkaline granitic complex in northern Hebei Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 12(1): 145–155 (in Chinese with English abstract)
- Xu B L, Yan G H, Xu Z B *et al.* 1999. Geochemistry and genetic implication of three series of Yanshanian granite in Northern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 208–216 (in Chinese with English abstract)
- Xue S Z. 1984. Petrological characteristics and petrogenesis of the intermediate-basic intrusive complex in Handan-Xingtai area. Master dissertation of Peking University (in Chinese)
- Xu W L. 1993. The Mesozoic dioritic rocks and their deep-seated xenoliths in the central part of North China Plate. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Xu Y S. 1983. The Luotuochang Indosinian complex in Zhaomeng area, Inner Mongolia. *Chinese Sciences Bulletin*, 30(19): 1564–1566 (in Chinese)
- Xu Z G. 1985. Discussion on the Mesozoic volcanic rocks in east China: the characteristics of the tectonic stress field. *Acta Geologica Sinica*, ??(2): ???–??? (in Chinese with English abstract)
- Yan G H, Xu B L and Mu B L *et al.* 2000. Alkaline intrusives at the East foot of the Taihang – Da Hinggan Mountains: chronology, Sr, Nd and Pb isotopic characteristics and their implications. *Acta Geologica Sinica*. 74(4): 774–781 (in Chinese)
- Yan G H, Wang G Y, Feng Z Y *et al.* 1991. Petrology and geochemical evolution of Yanshanian intrusive in Taihang – Da Hinggan Mountains Tectonomagmatic Belt. In: Chinese Academic Society of Petrology, Mineralogy and Geochemistry (ed.) Collection of Abstracts in the 4th National Academic Symposium of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 225–226. Beijing: Seismic Publishing House (in Chinese)
- Yan G H, Xu B L, Mu B L *et al.* 2001. Nd, Sr, Pb isotopes of Mesozoic alkaline intrusives in North China and their implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 234–238 (in Chinese with English abstract)
- Yu J H, Fu H Q, Zhang F L *et al.* 1995. The plutonism of Beijing area. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Yang J H and Zhou X H. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd and Pb isotope systematics of pyrite: implications for the age and genesis of lode gold deposits. *Geology*, 29: 711–714
- Yu X H, Ren J Y, Zhang J X. 1996. Metallogenic condition and explorational direction of Cu-Au deposit in the middle section of Taihang Mountains. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics – the model. *Tectonophys.*, 75: 135–162
- Zhang D Q. 1993. Two granitoid series in different tectonic environments of Southern Da Hinggan Mountains, China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(1): 1–11 (in Chinese with English abstract)
- Zhang D Q and Sun G Y. 1988. Granites in eastern China. Wuhan: Press of China University of Geoscience (in Chinese)
- Zhang H F, Sun M and Zhou M F *et al.* 2004. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. *Geol. Mag.*, 141(1): 55–62
- Zhang L G *et al.* 1995. Block-geology of Eastern Asia lithosphere. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract)
- Zhang M, Yuan Z X. 1988. Geochemistry of oxygen isotope in rare element alkali granites in Inner Mongolia. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposit, Chinese Academy of Geological Science*, No. 1 (in Chinese)
- Zhang X A. 1988. Geological and geochemical characteristics of tin polymetallic deposit in Balinzuoqi and Haobugao area, Inner Mongolia. Master Dissertation of Peking University (in Chinese)
- Zhao H Z. 2002. Geochemical characteristics and source materials of the Da Haituo complex in Yanqing county, Beijing. *Geology of Beijing*. 14(2): 7–12 (in Chinese)
- Zhao Y M, Wang D W, Zhang D Q *et al.* 1994. Ore-controlling factors and ore-prospecting models for copper-polymetallic ore deposits in southeastern Inner Mongolia. Beijing: Seismic Publishing House (in

Chinese with English abstract)

- Zhao Y C. 1999. Mesozoic magma activity and metallogensis in Anyang-Linzhou area, Southern Taihang Mountains. Ph. D Dissertation of Peking University. (in Chinese with English abstract)
- Zhou X H, Zhang G H, Chen W J and Sun M. 2001. Sr-Nd-Pb isotope mapping of late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China Craton and implications to geodynamic processes. *Geochimica*, 30: 10-23. (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493-571

附中文参考文献

- 白志民, 许淑贞, 葛世伟. 1990. 八达岭花岗岩杂岩. 北京:地质出版社
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京:地质出版社
- 蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山等. 2003. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨. *岩石学报*, 19(1):81-92
- 蔡新平. 1981. 试论华北断块区中-新生代岩浆岩组合. 岩石化学特征及岩浆演化规律的大地构造意义. 北京大学硕士论文
- 陈斌, 翟明国, 邵济安. 2002. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学意义. *中国科学(D辑)*, 32(11):896-907
- 池际尚, 路凤香, 赵磊等. 1996. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京:科学出版社:215-275
- 迟效国, 许文良, 林景仟, 谭东娟. 1994. 华北地台中生代闪长质岩石成因的 Sr-Nd 同位素证据. 林景仟, 谭东娟编. 华北地台中生代钾质岩浆区. 北京:地震出版社
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学等. 1996. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京:地质出版社
- 邓晋福, 赵国春, 赵海玲等. 2000. 中国东部中生代火成岩构造组合与造山-深部过程. *地质论评*, 46:41-48
- 何国琦, 王廷印, 王式洸. 1982. 华北太行山晚中生代深成岩浆活动的大地构造背景. *地质研究论文集*, 21-29. 北京:北京大学出版社
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志. 北京:地质出版社
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. *地学前缘*, 7(2): 441-456
- 黄福生, 薛绥州. 1990. 邢邯地区中基性杂岩体的岩石学与地球化学特征及成因探讨. *岩石矿物学杂志*, 1(3): 203-212
- 李培忠, 于津生. 1993. 黑龙江碾子山晶洞碱性花岗岩岩体年龄及其意义. *地球化学*, 4:389-397
- 刘凤山, 石准立. 1998. 太行山-燕山地区中生代花岗岩生成动力学机制与陆内造山作用. *地球学报*, 19(1):12-18
- 罗照华, 邓晋福, 韩秀卿. 1999. 太行山造山带岩浆活动及其造山过程反演. 北京:地质出版社
- 穆克敏, 林景仟, 邹祖荣等. 1989. 华北地台区花岗质岩石的成因.

长春:吉林科学技术出版社

- 牛树银, 陈路, 许传诗等. 1994. 太行山地壳演化及成矿规律. 北京:地震出版社
- 钱青, 钟孙霖, 李通艺等. 2002. 八达岭基性岩和高 Sr-Ba 花岗岩地球化学特征及成因探讨:华北和大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比. *岩石学报*, 18(3): 275-292
- 任纪舜等. 1979. 从卫星照片初看中国断裂构造格局. *地质论评*, 25(2): 10-15
- 山西省地质矿产局. 1989. 山西省区域地质志. 北京:地质出版社
- 邵济安, 韩庆军, 张履桥等. 1999a. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩捕虏体的发现. *科学通报*, 44(5): 478-485
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊. 1999b. 大兴安岭中生代伸展造山过程的岩浆作用. *地学前缘*, 6(4): 339-345
- 王德滋, 任启江, 邱检生等. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用. *地质学报*, 70(1): 23-34
- 王季亮, 李丙泽, 周德星, 姚士臣, 李枝荫. 1994. 河北省中酸性岩体地质特征及其与成矿关系: 6-172. 北京:地质出版社
- 王式洸, 韩宝福, 李瑞, 马昌. 1994. 太行山北段王安镇岩体地球化学研究及其地球动力学意义. 北京大学地质系编, 岩石圈地质科学:29-38. 北京:地震出版社
- 王焰, 张旗. 2001. 八达岭花岗岩杂岩的组成、地球化学特征及其意义. *岩石学报*, 17(4):533-540
- 王一先, 赵振华. 1997. 巴尔哲超大型稀土铌钽矿床地球化学和成因. *地球化学*, 26(1):24-34
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. *长春科技大学学报*, 29(4):313-318
- 吴福元, 江博明, 林强. 1997. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义. *科学通报*, 42(20):2188-2192
- 吴利仁. 1985. 中国东部中生代花岗岩. *岩石学报*, 1(1):1-10
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京:地质出版社
- 许保良, 阎国翰等. 1996. 冀北雾灵山碱性花岗质杂岩的岩石学、成因类型及构造意义. *岩石学报*, 12(1):145-155
- 许保良, 阎国翰, 徐振邦, 何中甫, 赵晖. 1999. 冀北燕山期三个系列花岗质岩石的地球化学特征及其成因学意义. *岩石学报*, 15(2): 208-216
- 薛绥州. 1984. 邢邯地区中基性杂岩体的岩石学特征及其成因探讨. 北京大学硕士学位论文
- 许文良. 1993. 华北地台中部中生代闪长质岩石及深源包体. 北京:地质出版社
- 徐永生. 1983. 昭盟地区骆驼场印支期杂岩体. *科学通报*, 30(19): 1564-1566
- 徐志刚. 1985. 从构造应力场特征探讨中国东部中生代火山岩成因. *地质学报*, ??(2):???-???
- 阎国翰, 王关玉, 冯钟燕等. 1991. 太行山-大兴安岭构造岩浆带燕山期侵入岩岩石学与地球化学演化. 中国矿物岩石地球化学学会主编: 全国第四届矿物岩石地球化学学术讨论会论文摘要汇

- 编: 225-226. 北京:地震出版社
- 阎国翰,许保良,牟保磊等. 2001. 中国北方中生代富碱侵入岩钨、锶、铅同位素及其意义. 矿物岩石地球化学通报,20(4): 234-238
- 郁建华,付会芹,张凤兰,管梅生. 1995. 北京地区岩浆深成作用. 北京:地质出版社
- 喻学惠,任建业,张俊霞. 1996. 太行山中段铜-金成矿条件及找矿方向. 北京:地质出版社
- 张德全,孙桂英. 1988. 中国东部花岗岩. 中国地质大学出版社
- 张德全. 1993. 大兴安岭南段不同构造环境中的两类花岗岩. 岩石矿物学杂志,12(1):1-11
- 张理刚等. 1995. 东亚岩石圈块体地质-上地幔,基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学. 北京:科学出版社
- 张敏,袁忠信. 1988. 内蒙古“八零一”稀有元素碱性花岗岩氧同位素地球化学. 中国地质科学院矿床地质研究所刊. 第1号
- 张新安. 1988. 内蒙巴林左旗、浩布高锡多金属矿床的地质与地球化学特征. 北京大学硕士学位论文
- 赵海忠. 2002. 北京延庆大海沱岩体的地球化学特征及其岩浆来源探讨. 北京地质,14(2): 7-12
- 赵一鸣,王大畏,张德全等. 1994. 内蒙古东南部铜多金属成矿地质条件及找矿模式. 北京:地震出版社
- 赵永超. 1999. 太行山南段安林地区中生代岩浆活动和成矿作用. 北京大学理学博士学位论文
- 周新华,张国辉,杨进辉,陈文寄,孙敏. 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义. 地球化学,30: 10-23