

承德三岔口基性岩墙地球化学特征及地质意义

杨毓红^{1,2}, 刘 燊³, 胡瑞忠¹, 冯彩霞³, 冯光英^{1,2}, 杨朝贵^{1,2}, 齐有强¹

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

3. 西北大学大陆动力学国家重点实验室/地质学系, 西安 710069

摘要:对承德三岔口基性岩墙进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩石地球化学研究。定年结果表明岩墙属晚印支期(222.1±1.6) Ma 岩浆活动的产物;地球化学特征显示岩墙具有拉斑玄武岩特征,轻稀土(LREE)和大离子亲石元素(LILE)相对富集岩墙,亏损 Nb、Ta 和 Ti 等。同位素组成特征显示,岩墙具有正的初始 Sr 比值和负的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值。以上特征都暗示三岔口基性岩墙可能来源于富集的岩石圈地幔。根据年代学、地球化学和前期研究成果认为,与三岔口基性岩墙同期位于华北北缘的东西向侵入岩带,可能是华北克拉通减薄的最初表现。

关键词:锆石 U-Pb 年龄;地球化学;Sr-Nd 同位素;基性岩墙;岩石成因;承德

中图分类号:P595 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5888(2012)06-1796-10

Geochemistry and Petrogenesis of the Sanchakou Mafic Dyke in Chengde, Hebei Province, China

Yang Yu-hong^{1,2}, Liu Shen³, Hu Rui-zhong¹, Feng Cai-xia³,
Feng Guang-ying^{1,2}, Yang Chao-gui^{1,2}, Qi You-qiang¹

1. Institute of Geochemistry/State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. State Key Laboratory of Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069

Abstract: Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geochemical analysis have been carried on the mafic dyke from Sanchakou area, Hebei Province. The isotopic dating results indicate mafic dykes, with the age of (222.1 ± 1.6) Ma, were resulted from the Late Indosinian magmatism. Geochemical characteristics indicate they belong to tholeiite basalt, rich in LREE and LILE, as well as obviously depleted in Nb, Ta and Ti. Moreover, Sr-Nd isotopic composition means that the mafic dyke has high initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and negative $\epsilon_{Nd}(t)$ (from -9.3 to -6.1). As it mentioned above, it's implied that the studied mafic dyke was derived from enriched lithospheric mantle. The Chronology, geochemistry and previous studies suggest that the Early Mesozoic intrusion zone coexistent with mafic dykes in Sanchakou area, in northern North China block, might be formed in the early period of lithospheric thinning.

Key words: zircon U-Pb age; geochemistry; Sr-Nd isotopic compositions; mafic dyke; petrogenesis;

收稿日期:2012-06-07

基金项目:国家自然科学基金项目(40773020);西北大学大陆动力学国家重点实验室开放课题基金(08LCD08)

作者简介:杨毓红(1985—),女,博士研究生,主要从事地球化学方面研究,E-mail:yangyuhong19851111@163.com

通信作者:刘燊(1974—),男,研究员,博士,主要从事岩石学和地球化学研究,E-mail:liushen@vip.gyig.ac.cn.

Chengde

0 引言

华北克拉通北缘的燕山—阴山地区是否存在介于海西—燕山运动之间的印支运动,是一个长期争议较大的问题。1953年黄汲清先生曾指出,由于该区燕山运动占压倒优势,而印支运动被掩盖了,要搞清印支运动的性质和范围需要几十年的努力^[1]。已有研究发现,燕山—阴山地区发育一条呈东西向分布的晚古生代—早中生代的侵入岩带。这条侵入岩带的形成时间被认为代表了华北克拉通破坏的起始时间,是华北克拉通破坏的产物^[1-7]。但大部分研究成果均来自碱性岩,对基性岩墙的研究还较少涉及^[8-9]。基性岩墙作为岩石圈拉张背景下的产物,是基性岩浆从地幔上升至地表所形成,为壳幔演化的研究提供了重要信息,对限定研究区的构造格局和时空演化特征起着重要的作用,具有特殊的大陆动力学意义^[9-11]。笔者以冀北承德地区三岔口基性岩墙为研究对象,结合前人研究成果,对三岔口基性岩墙地球化学特征及成因进行讨论,以期对该岩墙的成因及地质意义做全面的认知。

1 地质背景和岩相学特征

古老的华北克拉通与西伯利亚南缘蒙古增生褶皱带在二叠纪末—三叠纪初期沿索伦—林西—长春—延吉一线碰撞拼合,形成了华北板块^[12-13]。在约 250 Ma 形成的碱性岩及相伴的碱性超镁铁岩与华北地块和西伯利亚南缘蒙古增生褶皱带最终碰撞拼合后的后碰撞/后造山伸展作用有关^[1-2,12-13]。研究区位于燕山构造带内蒙古隆起以南的燕山台褶带北缘,承德市宽城满族自治县塌山乡三岔口村(图 1)。区内构造环境复杂,一组 EW—NE—EW 向断裂带贯穿整个区域,控制了所研究基性岩墙的侵入状态^[14]。区内侵入岩分布非常广泛(主要为燕山期花岗岩和闪长岩等)。笔者所研究的三岔口基性岩墙主要侵入震旦系上统下马岭组中,被侏罗系中统四海组覆盖(图 1)。岩墙走向近东西,共有 5 条岩墙出露,东西长约 6 km,宽 10~100 m。采样区位于图中红色方框区,岩石比较新鲜,主要为辉绿岩,具典型的辉绿结构和块状构造。主要矿物组成为单斜辉石(40%~35%)和斜长石(58%~63%),含少量黑云母和 Fe—Ti 氧化物(磁铁矿或钛铁矿)(1%~

2%)。

2 分析方法

样品的破碎和锆石挑选在河北廊坊市诚信地质服务公司完成。锆石阴极发光图像处理在西北大学“大陆动力学国家重点实验室”完成。锆石 U—Pb 同位素定年在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验利用 LA-ICP-MS 分析完成。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U—Th—Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法见 Liu 等^[15]。锆石标准 91500 的 U—Th—Pb 同位素比值推荐值据文献^[16]。锆石样品的 U—Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3^[17]完成。岩石主量元素、微量元素组成及 Sr—Nd 同位素组成分析在中科院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成, Sr—Nd 同位素组成采用热电离质谱(TIMS)分析,所用仪器是 Thermo Fisher 公司生产的 Triton 型热电离质谱仪,分析方法参见文献^[18]。主元素测试采用 AxiosPW4400 型 X 荧光光谱仪,分析精度优于 3%;微量元素分析采用 ELAN6000 ICP-MS 完成,分析精度优于 5%。

3 分析结果

3.1 锆石 U—Pb 年龄

所采样品约 50 kg,并从中挑选出约 200 粒单颗粒锆石。挑选出的锆石为自形—半自形无色透明状,锆石直径为 70~120 μm ,具有清晰的震荡环带(图 2)。所测试锆石的 Th/U 值均 >0.1 (表 1),具有岩浆锆石的特征。分析点均位于 U—Pb 谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (222.1 ± 1.6) Ma(图 2),代表了该岩墙的结晶年龄,为印支晚期岩浆活动的产物,与平泉光头山碱性花岗岩的形成年龄 $((220 \pm 1.0)$ Ma)^[2]一致。

3.2 岩石地球化学特征

本次共测定了 10 个代表性样品的主微量元素组成(表 2、3)。所有样品具有相对较低的 SiO_2 质量分数(47.43%~48.62%),在 TAS 图解中(图 3)几乎所有样品都落在拉斑玄武岩区域,样品全碱质量分数很低($w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) = 3.20\% \sim 4.19\%$,平

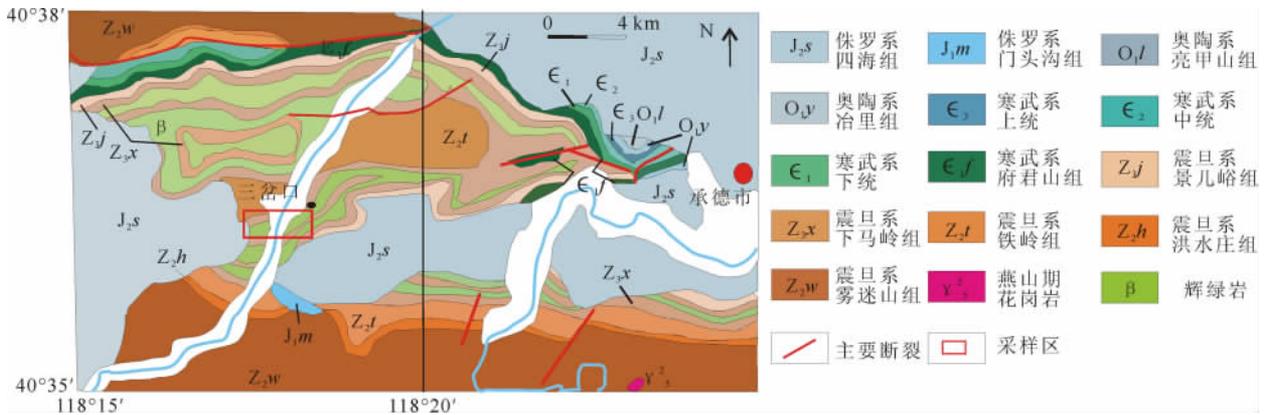


图 1 三岔口基性岩墙地质图

Fig. 1 Geological map of Sanchakou mafic dykes

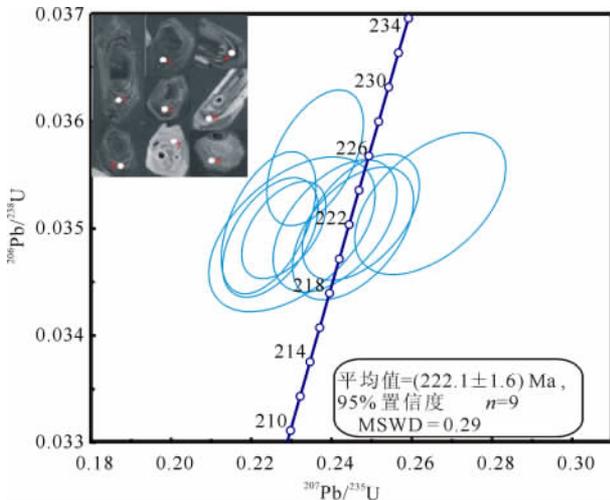


图 2 三岔口基性岩墙中代表性锆石的 CL 图像及锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄

Fig. 2 Representative zircon cathodoluminescence (CL) images and LA-ICP-MS U-Pb concordia age from the Sanchakou mafic dykes

均为 3.22%), 且 $w(K_2O) < w(Na_2O)$ 。 $Mg^\# = 48.32 \sim 50.73$, $w(Al_2O_3) = 14.60\% \sim 15.09\%$, 平均为 14.86%。 $La_N/Yb_N = 1.52 \sim 4.02$, 平均为 3.10, $\delta Eu = 0.86 \sim 1.08$, 平均为 0.96。在三岔口基性岩墙稀土元素配分曲线上(图 4a), 所有样品都具有弱的右倾趋势。在微量元素蛛网图上(图 4b), 样品相对富集大离子亲石元素(Rb、K 和 U), 亏损高场强元素(Nb、Ta 和 Ti), 且具有明显的 Pb 富集和 Sr 亏损特征。

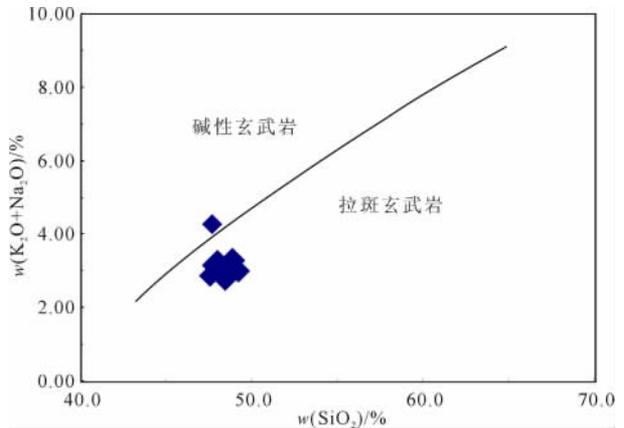


图 3 三岔口基性岩墙的 $w(SiO_2) - w(Na_2O + K_2O)$ 图解

Fig. 3 $w(SiO_2)$ vs. $w(Na_2O + K_2O)$ diagram of Sanchakou mafic dykes

3.3 Sr-Nd 同位素组成

三岔口基性岩墙的 Sr-Nd 同位素组成见表 4。 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7060 \sim 0.7064$, $\epsilon_{Sr}(t) = 21.5 \sim 27.1$ 。 $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512197 \sim 0.512286$, $\epsilon_{Nd}(t) = -9.3 \sim -6.1$, 与燕辽—阴山三叠纪碱性岩的同位素组成^[2]有着相似的特征(图 5), 暗示三岔口基性岩墙与这条碱性岩带的源区相同, 都属于富集的岩石圈地幔。

4 讨论

4.1 分离结晶作用

三岔口基性岩墙的 $Mg^\# = 48.32 \sim 50.73$, 低于原始岩浆的参考数值(65)^[19-20], 表明基性岩墙是原

表 1 三岔口基性岩脉锆石 U-Pb 年龄
Table 1 Zircon U-Pb age of the Sanchakou mafic dykes

点号	同位素比值										年龄/Ma					
	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	1σ	1σ	1σ		
SCK-01	948	746	37.8	0.787 0	0.053 8	0.002 3	0.264 4	0.012 4	0.035 2	0.000 4	362	83	238	10	223	3
SCK-02	733	682	33.0	0.929 7	0.048 4	0.003 0	0.230 0	0.013 7	0.034 9	0.000 5	117	107	210	11	221	3
SCK-03	442	639	28.08	1.443 8	0.046 6	0.001 6	0.224 6	0.007 9	0.034 9	0.000 4	30	55	206	7	221	2
SCK-04	901	885	42.3	0.982 4	0.047 0	0.001 5	0.228 0	0.006 9	0.035 0	0.000 3	51	51	209	6	222	2
SCK-05	514	632	28.5	1.227 9	0.046 4	0.001 6	0.224 3	0.007 8	0.035 0	0.000 4	17	50	205	6	222	3
SCK-06	800	1 107	49.7	1.383 4	0.048 1	0.001 8	0.235 8	0.008 0	0.035 7	0.000 4	102	57	215	7	226	3
SCK-07	616	663	31.2	1.075 7	0.050 9	0.002 1	0.245 2	0.010 0	0.034 9	0.000 4	234	72	223	8	221	3
SCK-08	146	564	22.32	3.863 0	0.051 0	0.002 0	0.247 2	0.009 6	0.035 1	0.000 4	238	69	224	8	222	2
SCK-09	1 015	748	38.8	0.736 7	0.049 8	0.002 1	0.240 7	0.010 2	0.035 0	0.000 4	183	76	219	8	222	3

表 2 三岔口基性岩脉主量元素分析结果
Table 2 Major elements of Sanchakou mafic dykes

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	烧失量	总计	Mg#	w _B /%
SCK-1	47.98	15.02	13.59	5.75	9.35	1.95	1.16	0.17	0.17	1.65	1.75	98.53	49.65	
SCK-2	48.31	14.85	13.52	5.83	9.49	1.97	1.13	0.17	0.18	1.61	1.63	98.70	50.12	
SCK-3	47.65	15.04	14.27	5.73	9.38	2.12	1.12	0.18	0.17	1.66	1.74	99.06	48.32	
SCK-4	47.55	15.09	14.38	5.91	9.35	2.08	1.13	0.18	0.17	1.65	1.67	99.14	48.92	
SCK-5	47.65	14.80	13.90	5.89	9.32	1.99	1.12	0.18	0.16	1.65	1.64	98.30	49.69	
SCK-6	47.85	14.60	13.98	5.99	9.42	1.91	1.11	0.18	0.16	1.67	1.74	98.62	49.96	
SCK-7	48.43	14.99	13.99	5.95	9.44	2.01	1.13	0.18	0.17	1.66	1.44	99.38	49.78	
SCK-8	48.62	14.63	13.59	5.84	9.29	1.87	1.12	0.17	0.17	1.63	1.70	98.62	50.04	
SCK-9	47.89	14.66	13.49	5.96	9.44	2.99	1.20	0.18	0.15	1.72	2.35	100.03	50.73	
SCK-10	47.43	14.98	13.87	6.00	9.59	2.30	0.78	0.19	0.15	1.75	2.40	99.44	50.20	

表 3 三岔口基性岩脉微量元素分析结果

Table 3 Trace elements of Sanchakou mafic dykes

	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	La	Ce	Pr	Nd
SCK-1	41.20	575.20	51.92	67.68	51.86	151.67	153.71	19.72	26.40	240.99	31.75	126.77	10.12	188.04	14.19	31.17	4.21	19.24
SCK-2	37.92	580.16	5.98	60.21	47.21	231.50	141.22	17.08	20.48	146.69	54.57	134.51	9.31	139.13	15.07	33.41	4.62	21.42
SCK-3	43.03	581.15	5.31	80.84	62.88	322.73	183.71	21.14	22.33	181.27	30.39	141.29	11.09	163.04	15.85	33.52	4.35	19.67
SCK-4	35.41	364.96	119.75	51.13	45.50	97.28	117.72	18.50	45.64	189.65	27.34	116.13	9.42	193.48	13.97	30.95	4.00	18.25
SCK-5	35.22	547.43	4.62	53.63	43.41	221.24	127.47	14.84	18.13	152.98	59.88	115.16	8.25	122.83	14.85	31.62	4.26	19.45
SCK-6	37.92	389.75	141.78	66.39	71.14	113.70	139.97	20.02	24.67	208.51	27.34	118.06	9.06	166.30	13.63	29.15	3.89	17.27
SCK-7	35.41	480.00	4.32	64.89	49.49	247.47	149.97	17.58	21.22	180.22	44.06	120.97	9.36	144.56	15.63	34.98	4.74	21.64
SCK-8	42.94	605.95	2.75	77.45	51.20	319.31	191.21	23.28	30.47	192.79	36.94	169.35	13.13	214.13	20.17	44.18	5.90	26.34
SCK-9	34.10	359.00	223.00	78.60	98.90	86.70	130.00	19.40	36.80	245.00	24.90	119.00	8.92	161.00	13.00	28.70	3.87	17.60
SCK-10	31.80	347.00	193.00	89.50	116.00	89.70	135.00	19.70	26.70	240.00	25.10	120.00	9.15	171.00	13.30	29.40	3.92	17.70
	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	ΣREE	LREE/HREE	L _{AN} /Y _{BN}
SCK-1	5.02	1.58	5.60	0.93	6.12	1.20	3.20	0.50	3.12	0.47	3.77	0.74	3.84	2.40	0.49	128.29	1.43	3.27
SCK-2	5.54	1.71	6.56	1.18	8.27	1.87	5.81	0.91	6.46	0.99	3.70	0.69	3.57	2.47	0.56	168.39	0.94	1.67
SCK-3	4.87	1.80	5.24	0.92	6.03	1.18	3.39	0.49	3.16	0.45	4.04	0.84	5.25	2.72	0.59	131.30	1.56	3.60
SCK-4	4.54	1.56	4.93	0.81	5.40	1.03	2.76	0.39	2.79	0.41	3.28	0.73	3.64	2.34	0.50	119.12	1.60	3.59
SCK-5	5.37	1.68	6.26	1.19	8.91	2.04	6.21	1.00	7.03	1.18	3.21	0.57	3.12	2.04	0.54	170.94	0.82	1.52
SCK-6	4.53	1.49	4.79	0.79	5.38	1.07	2.96	0.43	2.86	0.40	3.33	0.68	5.17	2.33	0.46	115.98	1.52	3.42
SCK-7	5.96	1.75	6.52	1.15	7.87	1.69	4.69	0.69	4.48	0.69	3.56	0.73	3.40	2.44	0.60	156.54	1.18	2.50
SCK-8	6.78	2.10	7.14	1.19	7.41	1.53	3.84	0.56	3.60	0.49	4.83	0.97	6.89	3.49	0.72	168.17	1.68	4.02
SCK-9	4.32	1.52	4.68	0.84	4.73	1.05	2.84	0.39	2.51	0.35	3.29	0.63	3.90	2.30	0.48	111.30	1.63	3.72
SCK-10	4.43	1.60	4.79	0.83	4.85	1.06	2.86	0.39	2.57	0.39	3.31	0.65	3.95	2.30	0.50	113.18	1.64	3.71

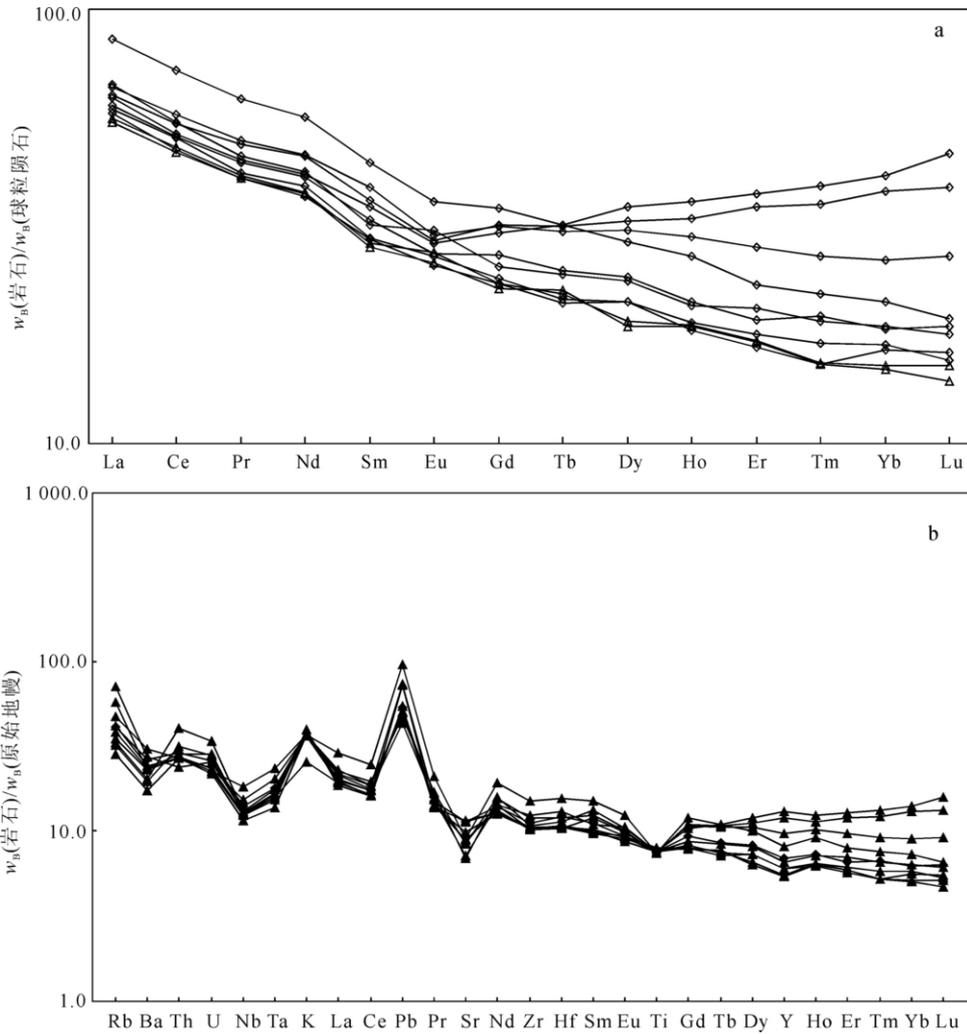


图 4 稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化图解(b)

Fig. 4 Chondrite-normalized rare earth patterns diagram(a) and primitive-mantle-normalized spider diagrams for Sanchakou mafic dykes (b)

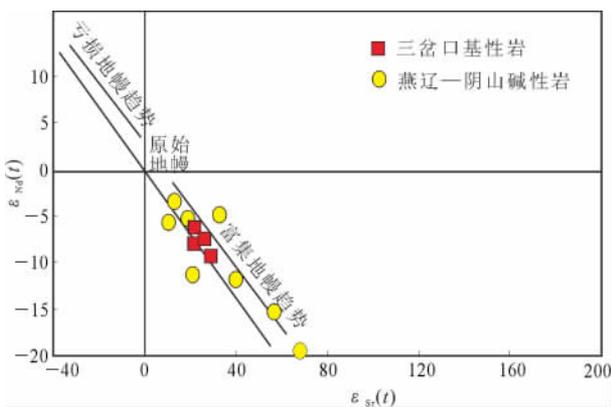


图 5 三岔口基性岩墙 $\epsilon_{Sr}(t)$ - $\epsilon_{Nd}(t)$ 同位素组成

Fig. 5 $\epsilon_{Sr}(t)$ vs. $\epsilon_{Nd}(t)$ plot of Sanchakou mafic dykes

始岩浆经历了一定程度分异作用的产物。在 Harker 图解中(略), MgO 与 Al_2O_3 没有明显的相关关系, 而且在稀土配分图解中 Eu 的负异常不明显($\delta Eu=0.86\sim 1.08$, 平均为 0.96), 暗示成岩过程中斜长石的分离结晶作用不明显。

4.2 地壳混染

三岔口基性岩墙富含大离子亲石元素(LILE、K 和 Rb 等)和轻稀土元素(LREE), 相对亏损高场强元素(Nb 和 Ta 等), 这些特征说明岩脉可能受到陆壳的混染作用, 不排除有其他可能, 如地壳物质的再循环作用或流体交代作用^[21]。但其相对均一的元素地球化学性质和变化微小的 La/Sm 值($2.62\sim 3.26$)表明地壳混染作用在岩浆演化过程中的影响

表 4 三岔口基性岩墙 Sr、Nb 同位素及比值

Table 4 Sr, Nd isotopic composition of Sanchakou mafic dykes

样品	年龄/Ma	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$
SCK-2	222.1	26.4	241	0.317 0	0.707 4	4	0.706 3	26.6
SCK-4	222.1	22.3	181	0.356 0	0.707 5	5	0.706 4	27.1
SCK-7	222.1	24.7	209	0.342 8	0.707 2	4	0.706 1	22.8
SCK-8	222.1	21.2	180	0.340 4	0.707 1	4	0.706 0	21.5
样品	年龄/Ma	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
SCK-2	222.1	1.60	5.0	0.193 4	0.512 242	2	0.512 0	-7.6
SCK-4	222.1	1.80	4.9	0.222 1	0.512 197	1	0.511 9	-9.3
SCK-7	222.1	1.50	4.5	0.201 5	0.512 230	1	0.511 9	-8.1
SCK-8	222.1	1.70	6.0	0.171 3	0.512 286	1	0.512 0	-6.1

注:计算 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 初始 Sr 比值和 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 初始 Nd 比值时,引用 CHUR 值($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}=0.084\ 7$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.704\ 5$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.196\ 7$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\ 638$); $\lambda_{\text{Rb}}=1.42\times 10^{-11}/\text{a}$ (Steiger and Jager, 1977); $\lambda_{\text{Sm}}=6.54\times 10^{-12}/\text{a}$ (Lugmair and Hartl, 1978)。

微弱^[22],另外,用 Nb/Ta-La/Yb 相互关系做进一步检验,如果岩浆在上升侵位过程存在明显的地壳混染,基性脉岩在该图上的标绘点应当呈现出负相关关系^[23]。该区岩墙在相关图中(略)并不呈现出负相关关系,因此,其元素地球化学特征主要反映了其源区的地球化学性质。

4.3 源区特征

上述讨论说明三岔口基性岩墙的地球化学特征反映了源区特征。那么岩墙 $w(\text{SiO}_2)=47.43\% \sim 48.62\%$,表明岩墙的母岩浆只能是地幔源区。另外,样品较高的 Sr 同位素初始比值(0.706 0~0.706 4),以及负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-9.3~-6.1,平均为-8.0),表明该岩墙来源于富集的岩石圈地幔^[24]。但三岔口基性岩墙的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值却有地壳、壳幔混染以及富集地幔 3 种可能的成因。华北克拉通下地壳由太古宙和早元古代角闪岩相-麻粒岩相变质岩系组成,它们在 130 Ma 时 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -40~-30,如果用研究区基性岩墙年龄(222.1 Ma)进行校正,下地壳的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 略升高但不会有较大变化,与三岔口基性岩墙的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值相差太远,表明这样的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值不可能来自下地壳,只能是壳幔混合或富集地幔。在华北北部近 EW 向展布的三叠纪碱性岩带,Nd 同位素都具有富集地幔的特征^[5],而三岔口基性岩墙同样形成于这条碱性岩带区域,形成年龄也一致,所以推测三岔口基性岩墙可能与华北岩石圈地幔有内在联系。

4.4 岩石成因及地质意义

岩石富集 LREE,亏损高场强元素 Nb 和 Ta,以及高 Sr 低 Nd 的同位素组成可能有以下 2 种原因:

1)俯冲背景交代地幔楔部分熔融的产物;2)大陆岩石圈伸展背景下富集岩石圈地幔减压部分熔融而成^[25]。三岔口基性岩墙富集不相容元素(Ba、Rb、Th 和 K),而亏损 HFSE(Ti、Nb、Ta、Zr 和 Hf)和 Sr,这些特点在一定程度上和美国西部产于与俯冲消减作用有关的岩浆相似^[26];因此,三岔口基性岩墙可能与大洋俯冲作用有一定联系。但古亚洲洋早在三叠纪初期就已经完成了闭合,三岔口基性岩墙形成时(222.1 Ma),本区已经为一个完整的克拉通,大洋俯冲的影响已不可能存在;因此,三岔口基性岩墙应该是大陆岩石圈伸展背景下富集岩石圈地幔减压部分熔融形成的。在这个时期的侵入岩除了三岔口岩墙外,还有同时期的碱性岩^[27]及花岗岩^[28],被认为形成于后碰撞环境中。关于三岔口岩墙的成因,作者认为是在海西末期西伯利亚板块与华北板块发生碰撞闭合,随后应力松弛并逐渐向板块内部传递,印支期时应力传递到板块内部,导致板内拉张作用加剧,软流圈地幔上涌使岩石圈部分熔融最终形成三岔口基性岩墙。

从中生代开始,华北地区的大规模岩浆活动正是华北克拉通减薄的表现^[29-32],在此之前的元古宙和古生代,华北的构造及岩浆活动都非常微弱,岩石圈处于稳定的状态。如果说岩石圈破坏的高峰期是中生代,那么中生代岩浆活动鼎盛时期和古生代的稳定时期之间的这段时间内的岩浆活动都有可能是华北克拉通破坏的开始。在区域上,早中生代岩浆活动在华北北缘形成了以富集地幔来源为主的燕山-阴山三叠纪侵入岩带,其年龄都在 196~230 Ma^[28,33-35],其时代与三岔口基性岩墙基本一致。尽

管中国东部晚中生代岩石圈减薄可能与华北和华南板块碰撞或太平洋板块的俯冲有关^[36],但是这些都难以解释空间上近EW向展布于中亚造山带和华北北缘,时间上且大致一致的早中生代岩浆活动;再结合中亚造山带内构造体制在早中生代开始发生转变,从挤压转变为伸展^[37],以及在华北北缘的中一基性岩墙^[9]的出现,可以推测这些岩浆活动事件和构造事件可能为深部壳幔相互作用的表现,同时掀起了岩石圈减薄的开端。

5 结论

1) 锆石 U-Pb 年龄表明,三岔口基性岩墙形成于(222.1±1.6) Ma,属印支晚期岩浆活动的产物。2) 主、微量元素和 Sr-Nd 同位素特征表明,三岔口岩墙的源区为富集岩石圈地幔。3) 三岔口基性岩墙为古亚洲洋闭合后西伯利亚板块和华北板块碰撞后伸展背景的产物。

野外地质资料的查询中得到了河北地矿局的大力支持,中国地质大学(武汉)胡兆初和刘勇胜教授在锆石 U-Pb 定年中给予了帮助,中科院地球化学研究所胡晓燕、漆亮和李晓彪老师在主微量及同位素测试中给予了大力帮助,在此一并感谢。

参考文献 (References):

- [1] 阎国翰,牟保磊,许保良,等. 燕辽—阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义[J]. 中国科学: D 辑, 2000, 30(4): 383-387.
Yan Guo-han, Mu Bao-lei, Xu Bao-liang, et al. Triassic Alkaline Intrusives in the Yanliao-Yinshan Area: Their Chronology Sr, Nd, Pb Isotopic Characteristics and Their Implication[J]. Science in China; Series D, 2000, 30(4): 383-387.
- [2] 韩宝福, 加加美宽雄, 李惠明. 河北平泉光头山碱性花岗岩的 Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(6): 1375-1388.
Han Bao-fu, Kagami H, Li Hui-ming. Age and Nd-Sr Isotopic Geochemistry of the Guangtoushan Alkaline Granite, Hebei Province, China: Implications for Early Mesozoic Crust-Mantle Interaction in North China Block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(6): 1375-1388.
- [3] 杨富全, 吴海, 刘晓文, 等. 冀北承德甲山正长岩: 燕山陆内造山带岩石圈减薄的早期记录[J]. 地质论评, 2003, 49(5): 474-485.
Yang Fu-quan, Wu Hai, Liu Xiao-wen, et al. The Jiashan Syenite in Northern Hebei: An Early Record of Lithospheric Thinning in the Yanshan Intracontinental Orogenic Belt[J]. Geological Review, 2003, 49(5): 474-485.
- [4] 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 824-842.
Zhang Shuan-hong, Zhao Yue, Liu Jian-min, et al. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Setting of the Late Paleozoic—Early Mesozoic Magmatism in the Northern Margin of the North China Block: A Preliminary Review [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(6): 824-842.
- [5] 赵越, 陈斌, 张拴宏, 等. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 900-914.
Zhao Yue, Chen Bin, Zhang Shuan-hong, et al. Pre-Yanshanian Geological Events in the Northern Margin of the North China Craton and Its Adjacent Areas[J]. Geology in China, 2010, 37(4): 900-914.
- [6] 张拴宏, 赵越, 刘健, 等. 华北地块北缘晚古生代—中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 625-638.
Zhang Shuan-hong, Zhao Yue, Liu Jian, et al. Emplacement Depths of the Late Paleozoic-Mesozoic Granitoid Intrusions from the Northern North China Block and Their Tectonic Implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(3): 625-638.
- [7] Yang Jin-hui, Wu Fu-yuan. Triassic Magmatism and Its Relation to Decratonization in the Eastern North China Craton[J]. Sci China; Ser D: Earth Sci, 2009, 52(9): 1319-1330.
- [8] 邵济安, 翟明国, 张履桥, 等. 晋冀蒙交界地区五期岩墙群的界定及其构造意义[J]. 地质学报, 2005, 79(1): 56-67.
Shao Ji-an, Zhai Ming-guo, Zhang Lü-qiao, et al. Identification of 5 Time-Groups of Dike Swarms in Shanxi-Hebei-Inner Mongolia Border Area and Its Tectonic Implications [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(1): 56-67.
- [9] 邵济安, 张履桥. 华北北部中生代岩墙群[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 312-318.
Shao Ji-an, Zhang Lü-qiao. Mesozoic Dyke Swarms in the North of North China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(3): 312-318.
- [10] 刘燊, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 鲁西晚中生代基性脉岩的成因和源区性质: 岩石学和地球化学[J]. 地质论评, 2004, 50(6): 577-586.

- Liu Shen, Hu Rui-zhong, Zhao Jun-hong, et al. Genesis and Source Characteristics of the Mafic-Ultramafic Dikes in West Shandong Province: Evidence from Petrology and Geochemistry [J]. *Geological Review*, 2004, 50(6): 577-586.
- [11] 张贵山, 温汉捷, 裘愉卓. 闽西晚中生代基性岩脉的地球化学研究[J]. *地球化学*, 2004, 33(3): 243-253.
- Zhang Gui-shan, Wen Han-jie, Qiu Yu-zhuo. Geochemistry of the Late Mesozoic Mafic Dikes in Western Fujian Province [J]. *Geochimica*, 2004, 33(3): 243-253.
- [12] 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(4): 584-605.
- Li Jin-yi, Zhang Jin, Yang Tian-nan, et al. Crustal Tectonic Division and Evolution of the Southern Part of the North Asian Orogenic Region and Its Adjacent Areas [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2009, 39(4): 584-605.
- [13] 郑亚东, Davis G A, 王综, 等. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J]. *地质学报*, 2000, 74(6): 289-302.
- Zheng Ya-dong, Davis G A, Wang Zong, et al. Major Mesozoic Tectonic Events in the Yanshan Belt and the Plate Tectonic Setting [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(6): 289-302.
- [14] 河北省区域地质测量大队. 青龙幅地质图及说明书[M]. 北京: 地图出版社, 1970.
- The Team of Regional Geological Survey of Hebei Province. *Geological Map and Caption of Qinglong* [M]. Beijing: Sinomaps Press, 1970.
- [15] Liu Yong-sheng, Hu Zhao-chu, Gao Shan, et al. 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 of Mantle Xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [16] Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 1995, 19(1): 1-3.
- [17] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot /Ex, Version 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel, Berkeley, California [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- [18] 李晓彪. 热电离质谱(TIMS)的 Sr-Nd-Pb 同位素标样测定[J]. *矿物学报*, 2009(增刊 1): 609-610.
- Li Xiao-biao. Sr-Nd-Pb Isotope Determination of Standard Samples of Thermal Ionization Mass Spectrometry (TIMS) [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009(Sup. 1): 609-610.
- [19] 冯光英, 刘燊, 冯彩霞, 等. 吉林红旗岭超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1594-1606.
- Feng Guang-ying, Liu Shen, Feng Cai-xia, et al. Zircon U-Pb age, Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry and the Petrogenesis of the Ultramafic Pluton in Hongqiling, Jilin Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1594-1606.
- [20] 冯光英, 刘燊, 钟宏, 等. 吉林晚古生代榆木川基性岩的地球化学特征及其岩石成因[J]. *地球化学*, 2010, 39(5): 427-438.
- Feng Guang-ying, Liu Shen, Zhong Hong, et al. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Late Paleozoic Mafic Rocks from Yumuchuan, Jilin Province [J]. *Geochimica*, 2010, 39(5): 427-438.
- [21] Liu Shen, Hu Rui-zhong, Gao Shan, et al. Zircon U-Pb Geochronology and Major, Trace Elemental and Sr-Nd-Pb Isotopic Geochemistry of Mafic Dykes in Western Shandong Province, East China: Constraints on Their Petrogenesis and Geodynamic Significance [J]. *Chemical Geology*, 2008, 225(3/4): 329-345.
- [22] 郭峰, 范蔚茗, 王岳军. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用[J]. *岩石学报*, 2001, 17(1): 161-168.
- Guo Feng, Fan Wei-ming, Wang Yue-jun. Petrogenesis of the Late Mesozoic Bimodal Volcanic Rocks in the Southern Daxing Mountains, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(1): 161-168.
- [23] Munker C. Nb-Ta Fractionation in a Cambrian arc/Basalt system, New Zealand: Source Constraints and Application of Refined ICP-MS Techniques [J]. *Chem Geol*, 1998, 144(1/2): 23-45.
- [24] Liu Shen, Hu Rui-zhong, Gao Shan, et al. Zircon U-Pb Age and Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry of Permian Granodiorite and Associated Gabbro in the Songliao Block, NE China and Implications for Growth of Juvenile Crust [J]. *Lithos*, 2010, 114(3/4): 423-436.
- [25] 李晓勇, 范蔚茗, 郭锋, 等. 北京西山东狼沟组钾质火山岩成因及其动力学机制[J]. *地球化学*, 2004, 33(4): 353-360.
- Li Xiao-yong, Fan Wei-ming, Guo Feng, et al. Genesis of Donglangou Formation Potassic Volcanics in Xishan, Beijing: Implication for Geodynamic Mechanism [J]. *Geochimica*, 2004, 33(4): 353-360.

- [26] 王飞, 王博, 舒良树. 塔里木西北缘阿克苏地区大陆拉斑玄武岩对新元古代裂解事件的制约[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 548-558.
Wang Fei, Wang Bo, Shu Liang-shu. Continental Tholeiitic Basalt of the Akesu Area (NW China) and Its Implication for the Neoproterozoic Rifting in the Northern Tarim[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2): 548-558.
- [27] 张招崇. 冀北印支期碱性岩浆活动及其地球动力学意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16(4): 214-217.
Zhang Zhao-chong. Indosinian Alkaline Magmatism in North Hebei Province and Its Geodynamic Significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1997, 16(4): 214-217.
- [28] 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义[J]. 地球化学, 2003, 32(2): 173-180.
Luo Zhen-kuan, Miao Lai-cheng, Guan Kang, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of the Dushan Granitic Batholith and Related Granite-Porphry Dyke, Eastern Hebei Province, China, and Their Geological Significance[J]. Geochimica, 2003, 32(2): 173-180.
- [29] 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 等. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉还是热侵蚀和化学交代[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 105-119.
Deng Jin-fu, Su Shang-guo, Liu Cui, et al. Discussion on the Lithospheric Thinning of the North China Craton: Delamination or Thermal Erosion and Chemical Metasomatism? [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 105-119.
- [30] 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 51-60.
Wu Fu-yuan, Ge Wen-chun, Sun De-you, et al. Discussions on the Lithospheric Thinning in Eastern China[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 51-60.
- [31] 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1145-1174.
Wu Fu-yuan, Xu Yi-gang, Gao Shan, et al. Lithospheric Thinning and Destruction of the North China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6): 1145-1174.
- [32] 杨进辉, 吴福元. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏[J]. 中国科学: D 辑, 2009, 39(7): 910-921.
Yang Jin-hui, Wu fu-yuan. Triassic Magmatism and Its Relation to Decratonization in the Eastern North China Craton [J]. Science in China: Series D, 2009, 39(7): 910-921.
- [33] 王季亮, 李丙泽, 周德星, 等. 河北省中酸性岩体地质特征及其成矿关系 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-213.
Wang Ji-liang, Li Bing-ze, Zhou De-xing, et al. Geological Characteristics of Intermediate and Acid Inerusions of Hebei Province and Their Relations to Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-213.
- [34] 罗镇宽, 关康, 裘有守, 等. 冀东金厂峪金矿钠长斑岩及青山口花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义[J]. 地质找矿论丛, 2001, 16(4): 226-231.
Luo Zhen-kuan, Guan Kang, Qiu You-shou, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Albite Dyks in Jinchangyu Gold Mine, Jidong Area, Hebei, China [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2001, 16(4): 226-231.
- [35] 邵济安, 张任祐, 韩庆军, 等. 内蒙古喀喇沁堆晶岩捕虏体和寄主闪长岩的同位素年龄 [J]. 地球化学, 2000, 29(4): 331-336.
Shao Ji-an, Zhang Ren-hu, Han Qing-jun, et al. Geochronology of Cumulate Xenoliths and Their Host Diorites from Harqin, Eastern Neimongu [J]. Geochimica, 2000, 29(4): 331-336.
- [36] Gao Shan, Luo Ting-chuan, Zhang Bin-bin, et al. Chemical Composition of the Continental Crust as Revealed by Studies in East China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 62: 1959-1975.
- [37] 王涛, 郑亚东, 刘树文, 等. 中蒙边界亚干变质核杂岩糜棱状钾质花岗岩: 晚古生代—早中生代收缩与伸展构造体制转折标志 [J]. 岩石学报, 2002, 18(2): 177-186.
Wang Tao, Zheng Ya-dong, Liu Shu-wen, et al. Mylonitic Palassic Granitoids from the Yagan Metamorphic Corcomplex on Sino Monolian Border: A Mark of Transition from Contractile to Extensional Tectonic Regime [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(2): 177-186.