

晋冀蒙交界地区五期岩墙群的界定及其构造意义

邵济安¹⁾, 翟明国²⁾, 张履桥³⁾, 李大明⁴⁾

1) 北京大学地球与空间科学学院, 100871; 2) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029

3) 内蒙古矿产实验研究所, 呼和浩特, 010020; 4) 中国地震局地质研究所, 北京, 100029

内容提要:以幔源岩浆侵位为标志的岩墙群是伸展作用的产物。根据同位素年龄测定, 华北克拉通北缘晋冀蒙交界地区基性岩墙群可分为: 1800~1700 Ma, 800~700 Ma, 230 Ma, 140~120 Ma, 50~40 Ma 五个年龄组。本文通过这五组岩墙群的地质、岩石及同位素地球化学特征的研究, 探讨本地区地幔物质组分随时间的演变规律; 并将本地区出现的五期伸展作用与华北克拉通乃至全球同期的重要构造事件进行对照。

关键词:岩墙群; 华北克拉通; 伸展事件

基性岩墙群代表着基性岩浆从地幔上升到地表的通道, 它不因后期的剥蚀而消失, 相反, 抬升剥蚀可使深部蚀变轻微的岩墙得以暴露, 这是其他研究对象无法比拟的。基性岩墙群主要产于大洋中脊、裂陷盆地和大陆克拉通。相比之下, 大陆克拉通由于相对稳定的背景, 使得岩墙群产状稳定、分布广, 变质变形弱, 保存完整。因此, 笔者力图通过系统解剖华北克拉通一个地区岩墙群的演化历史, 了解华北地质历史期间的伸展作用及其壳幔相互作用, 并尝试讨论华北克拉通对全球几个主要伸展事件的响应。

1 研究区的选择和大地构造背景

研究区主要位于以大同地区为中心的晋、冀、蒙接壤地区(图1)。该区岩墙群发育, 区内主要出露太古宙和古元古代地层, 其中以太古宙变质的奥长花岗岩、英云闪长岩、花岗闪长岩系列岩石(简称TTG)为主。近年来有人将古元古代克拉通形成之前的华北分成东、西两个块体, 其间有一个很宽的中间带称为中央带(Central Zone), 虽然关于地块的划分、命名乃至中间带地质意义的认识有所差异(伍家善等, 1998; Zhai et al., 2000, 2003a; Guo et al., 2002), 但是 Zhao 等(2000)确定的中间带的大体位置是公认的。1900~1800 Ma 之后, 它们作为统一的华北克拉通, 接受了中、新元古代的盖层。尽管如此, 中央带和它相邻地带仍然是一个比较薄弱的地带, 对地质历史期间华北克拉通所遭受到的伸展事

件会有一定反映。南非林波波活动带就是一个与此类似的构造带(Halls et al., 1987)。

本研究区正位于前述“中间带”由北东向近南北走向转折的部位上, 这里褶皱作用较弱, 断裂活动相对明显。由于变质基底长期隆起而剥蚀出露, 中、新元古代沉积盖层以其平缓的产状、低级的变质作用为特征, 此外该区还局部保存了古生界、中生界地层, 广泛地覆盖了古近纪玄武岩。由于长期来构造—岩浆作用活跃, 除了大量的基性岩和碱性岩出露外, 还保留了1800 Ma 以来不同阶段的岩墙群。

2 岩墙群的同位素年龄测定

2.1 样品的采集

前人在区域地质调查总结时编写了《山西省基性侵入岩》, 对山西省发育的基性岩墙群进行了详细研究, 测定了大量 K-Ar 年龄。笔者在此基础上, 对晋冀蒙交界地区的基性岩墙群开展了大范围的地质调查, 在明了地质产状和背景情况下, 采集了不同时段有代表性的岩墙样品, 岩性以辉绿岩、煌斑岩为主(表1)。

2.2 测试方法

样品⁴⁰Ar-³⁹Ar 和 K-Ar 年龄测定在中国地震局新构造年代学开放实验室完成。采用 K-Ar 同位素稀释法。测试仪器为 MM1200 静态气体质谱仪, 灵敏度 4A⁻⁴/tor。⁴⁰Ar-³⁹Ar 法在中国科学院高能物理研究所的原子反应堆进行快中子照射, 累积通量

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40072073)和中国科学院知识创新工程重大课题(编号 KZCX1-07)资助的成果。

收稿日期: 2004-03-11; 改回日期: 2004-06-26; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 邵济安, 女, 1940年生。教授, 构造地质专业。通讯地址: 100871, 北京大学地球与空间科学学院。

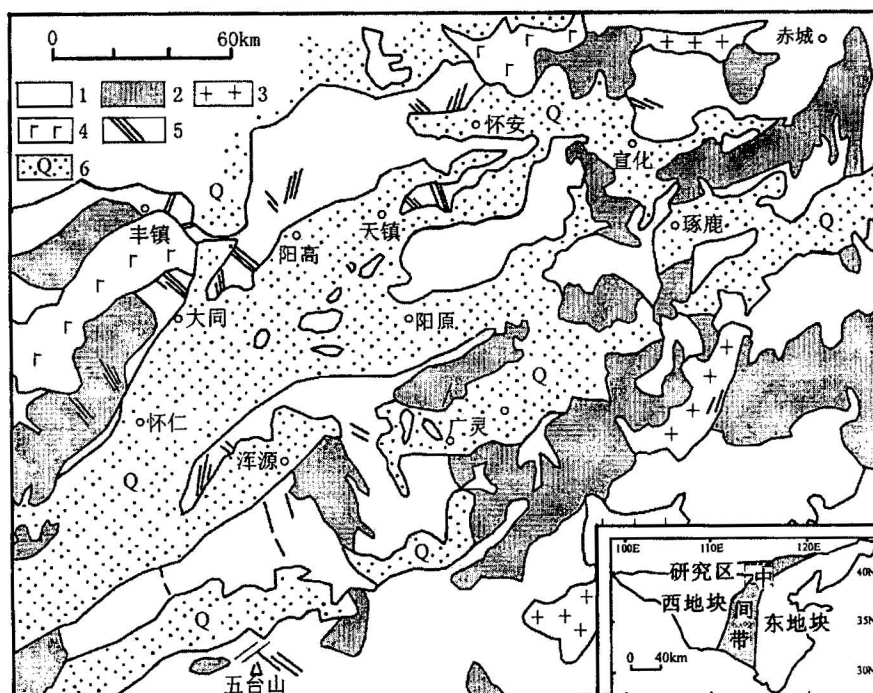


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of research area

1—太古宇—元古宇; 2—古生界—中生界; 3—花岗岩; 4—新生代玄武岩; 5—岩墙群; 6—新生界; 右下角为中间带在华北克拉通中的位置
 1—Archaeozoic—Proterozoic; 2—Palaeozoic—Mesozoic; 3—granites; 4—Cenozoic basalts; 5—dike swarms; 6—Cenozoic;
 the right-lower is location of the central zone in North China Craton

表 1 研究区岩墙群年龄测定结果

Table 1 The age determination of the dike swarms in research area

时代	编号	地点	岩性	产状	测试方法	年龄 (Ma)
1800~1700	JL	河北怀安积儿峪刘全庄	辉绿辉长岩	340°/NW/80°	Rb-Sr ^②	1885±43
	NK3	山西广灵望孤牛口峪	煌斑岩	290°/SE/70°	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar ^①	1804±16
		山西恒山(引自李江海)	辉绿岩	340°/NW/85°	U-Pb	1769±3
	GS1	大同古店乡孤山	辉绿岩	330°/NE/75°	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar ^①	1725±16
	HY8	河北怀安西洋河新沟村	辉绿岩	330°/NE/80°	K-Ar ^①	1620±31
800~700	HY4	河北万全县羊窑沟	正长岩	15°/NW/70°	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar ^①	857.2±9.7
	HY2	河北万全县羊窑沟	辉长岩	35°/NW/60°	Rb-Sr ^②	850±76
	XH5	内蒙古丰镇西煌耀	煌斑岩	15°/NW/70°	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar ^①	838.9±9.6
	DS2-1	山西浑源恒山大石沟	辉绿岩	320°/NW/85°	K-Ar ^③	730.5±6.6
					⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar ^①	710.6±8.4
	G1	河北宣化县葛峪堡	辉绿岩	315°/NE/70°	K-Ar ^①	600.9±11.4
230	YZ-5	山西怀仁县窑子头	煌斑岩	355°/NE/70° 320°/SW/80°	Rb-Sr ^②	229±11
140~120	D23	河北涿鹿县岔河	辉绿岩	10°/NW/80°	K-Ar ^①	153.6±2.9
	J2-2	内蒙古丰镇县对九沟	云斜煌斑岩	15°/SE/45°	K-Ar ^①	146.6±2.9
	JD	内蒙古丰镇县对九沟	辉长岩	335°/SW/75°	Rb-Sr ^②	144±57
	Z2	山西天镇县朱家沟	闪长岩	330°/SW/70°	K-Ar ^①	140.4±1.3
	LD	山西广灵县罗町煤矿	辉绿岩	65°/NW/55°	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar ^①	134.5±2.0
	Ly8-2	山西大同聚乐堡连石窑	辉绿岩	355°/NE/65°	K-Ar ^③	116.3±1.0
50~40	Dt-1	山西五台山东台	辉绿岩	310°/SW/70°	K-Ar ^③	51.9±0.3
	ZY3	山西左云县水窑乡	橄榄玄武岩	315°/SW/80°	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar ^①	47.5±0.8

注: ① 由国家地震局地质研究所同位素室李大明测试; ② 由中国科学院地质与地球物理研究所同位素室张任祐测试; ③ 由北京大学地球与空间科学学院同位素室刘玉琳测试。

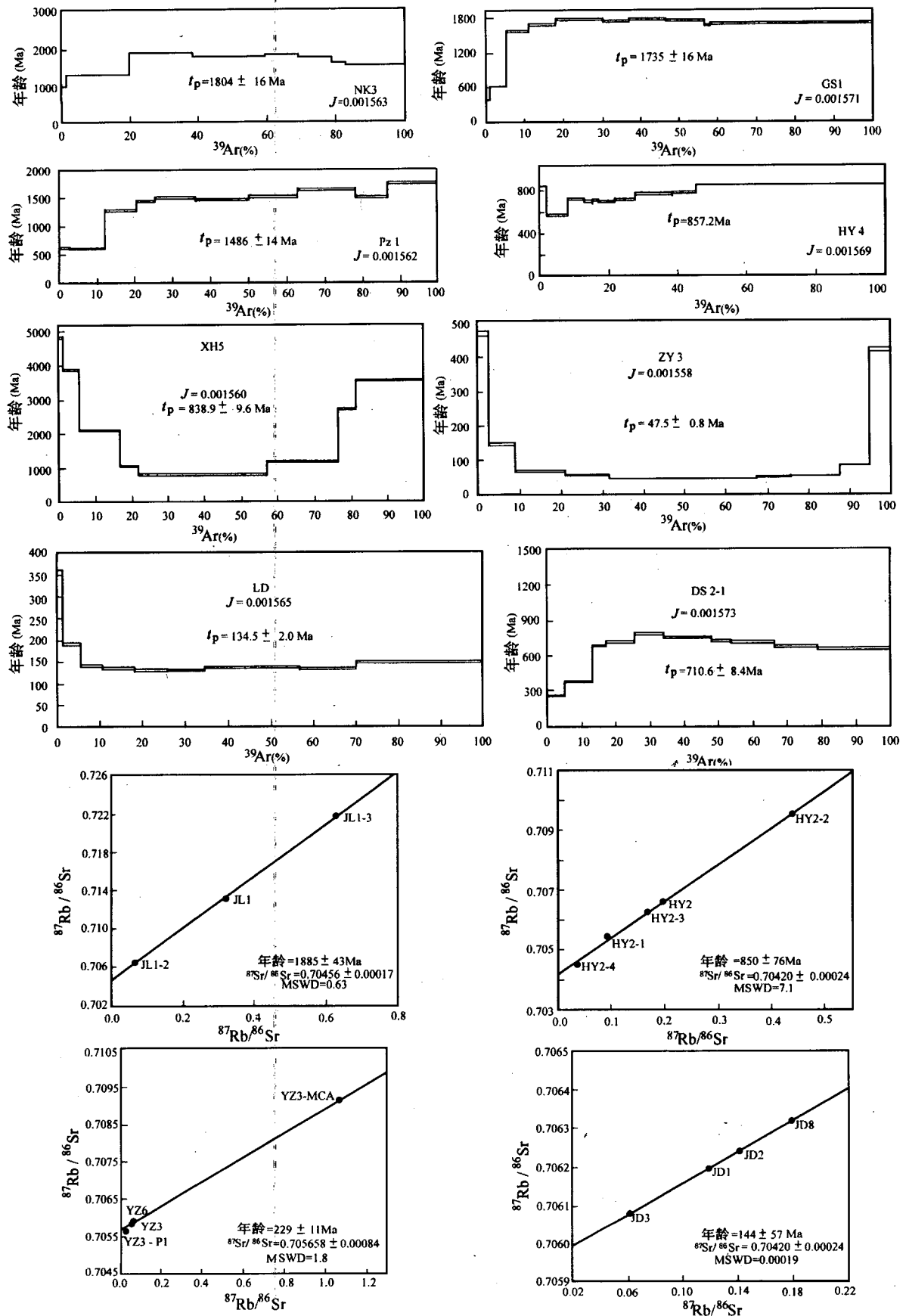


图 2 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和 Rb-Sr 同位素年龄图谱
Fig. 2 ^{40}Ar - ^{39}Ar and Rb-Sr age isotopic spectrum

$1.5 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。国际标样使用的是 SD3 和 ZBH-25。误差为 1σ 。7 个样品的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄谱示于图 2, 其中 GS1、LD、DS2-1、NK3、ZY3 和 XH5 是全岩样品, HY4 是钾长石单矿物。其结果中除了 XH5 是平均年龄, HY4 是阶段年龄外, 其余均为坪年龄。

Rb-Sr 等时线法的测试是在中国科学院地质与地球物理研究所 Rb-Sr 同位素超净实验室完成的, 同位素测量在 VG354 固体质谱计上进行。采用 ISOPLOT/EX 版本程序进行相关系数 MSWD 值的计算和检验 (Ludwig, 1992), 使用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的相对误差为 0.01, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 相对误差为 0.01。

2.3 关于年龄数据的解释

总共获取了 7 个全岩或单矿物 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法坪年龄, 4 个 Rb-Sr 等时线年龄, 和 8 个 K-Ar 稀释法年龄, 引用了 1 个 U-Pb 年龄 (李江海等, 2001) (图 2)。对这些年龄解释如下。

大同古店乡孤山样品 GS1 和山西广灵县罗町煤矿样品 LD 的年龄谱具有相当平坦的坪区, 坪区的 ^{39}Ar 占总析出量的 90% 以上。它们的坪年龄分别为 $1725 \pm 16 \text{ Ma}$ 和 $134.5 \pm 2.0 \text{ Ma}$, 而且与等时线年龄基本一致。

山西浑源恒山大石沟样品 DS2-1 和山西广灵望孤牛口峪样品 NK3 的年龄谱虽然没有典型的理想坪区, 但是年龄谱的中—高温区相对平坦, 阶段年龄比较接近, 这在全岩样品中是比较常见的。两个样品年龄谱中相对平坦部分阶段年龄的加权平均年龄分别为 $710.6 \pm 8.4 \text{ Ma}$ 和 $1804 \pm 16 \text{ Ma}$, 它们也与等时线年龄一致。

山西左云县水窑乡样品 ZY3 和内蒙古丰镇西煌耀样品 XH5 的年龄谱呈现马鞍形, 揭示可能存在过剩氩。对于此类年龄谱, 其高温和低温的高年龄值没有地质意义, 但是中间部分如果存在多阶段相对稳定的低年龄, 则可以代表样品的形成时间。ZY3 中间部分坪区 ^{39}Ar 占总析出量的 80% 以上, 坪年龄为 $47.5 \pm 0.8 \text{ Ma}$, 且与等时线年龄一致, XH5 中温区存在两个一致的阶段年龄 ($829.2 \pm 9.4 \text{ Ma}$, $845.2 \pm 9.7 \text{ Ma}$), 加权平均年龄为 $839.9 \pm 9.6 \text{ Ma}$ 。

河北万全县羊窑沟样品 HY4 为钾长石, 其年龄谱中除第一阶段外, 其他阶段年龄随温度的升高而缓慢增大, 最高温度阶段的 ^{39}Ar 占总析出量 54.7%, 阶段年龄为 $857.2 \pm 9.7 \text{ Ma}$, 应代表样品的形成时代。前面不同程度偏低的阶段年龄表明样品在形成后有部分 Ar 丢失。

关于 4 个 Rb-Sr 等时线法的测试结果 (图 2) 说明

如下: 怀安积儿峪的辉绿辉长岩 (JL) 选取全岩和单矿物角闪石、斜长石 3 个测试样品。其 Rb-Sr 等时线年龄为 $1885 \pm 43 \text{ Ma}$, MSWD 值为 0.63。河北万全县羊窑沟辉石岩 (YH2) 选取的是一个全岩样品 (HY2), 4 个单矿物 (HY2-1 辉石、HY2-2 变云母、HY2-3 斜长石、HY-4 磷灰石), 5 个点的 Rb-Sr 等时线年龄为 $850 \pm 76 \text{ Ma}$, MSWD 值为 7.1。总的来看, 前两个元古宙岩墙群的年龄是可信的。大同怀仁与碳酸岩共生的煌斑岩岩墙 (邵济安等, 2003) 侵入石炭系—二叠系, 又被下侏罗统所覆盖, 因此 $229 \pm 11 \text{ Ma}$ Rb-Sr 等时线年龄是可靠的。内蒙古丰镇县对九沟辉长岩 (JD) 的 3 个全岩样品的 Rb-Sr 等时线年龄为 $144 \pm 57 \text{ Ma}$, MSWD 值为 0.00019。因为 3 个样品的点比较集中, 误差比较大, 但考虑到同一地点的另一云斜煌斑岩样品 (J2-2) 的 K-Ar 年龄为 $146.6 \pm 2.9 \text{ Ma}$, 因此认为该结果还是有参考意义的。

以上年龄采用的是 ^{40}Ar - ^{39}Ar 、Rb-Sr 和 K-Ar 法测定, 这些方法都不同程度存在易于受热扰动干扰的问题。除晚中生代和新生代这些较年轻的样品外, 1800~1700 Ma 这组年龄引用了他人的锆石 U-Pb 法年龄作为佐证。对 800~700 Ma 这组年龄的同一样品 (DS2-1) 采用 ^{39}Ar - ^{40}Ar 和 K-Ar 两种不同测年方法; 对同地点、同期而不同岩性的样品 (HY4 和 HY2) 采用了 Rb-Sr 和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法测定, 它们都取得相近的结果, 增强了年龄结果的可信度。如前所述, 230 Ma 这组岩墙与地层的接触关系为年龄的合理性提供了重要依据。结合年龄测定的原始数据 (表 2) 以及与国内外岩墙群时代的对比, 可以认为本文提供的这些年龄是有意义的。

3 岩墙群产状、规模和形成的构造环境

本研究区较为发育的岩墙群, 在时间演化上具有多期性。主要分布在: 古—中元古代之交的 1800~1700 Ma、新元古代末期的 800~700 Ma、早中生代 230 Ma、晚中生代 140~120 Ma 和古近纪 40~50 Ma 等 5 个时期, 不同时期岩墙群的规模和成分有一定差异。总体上从老到新, 岩墙群的规模有逐渐缩小的趋势。中元古代 1800~1700 Ma 的岩墙规模最大, 岩墙产状 $340^\circ/\text{NW} \angle 70^\circ \sim 80^\circ$, 走向稳定, 宽度大 (数十米至上百米), 延伸长 (数百米至上千米)。令人关注的是这一期岩墙的岩石十分新鲜, 以辉绿岩为主, 几乎未变质变形, 岩石组成较单一, 在野外

表 2 晋冀蒙交界地区岩墙群⁴⁰Ar-³⁹Ar 法年龄数据Table 2 ⁴⁰Ar-³⁹Ar age data of the dyke swarms in Shanxi—Hebei—Mongolia border area

温度(℃)	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar (×10 ⁻³)	³⁹ Ar (×10 ⁻¹² mol)	剩余 ³⁹ Ar(%)	⁴⁰ Ar* (%)	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	年龄±1σ (Ma)
NK3 $J=0.001563$ $W=62.90$ mg $t_p=1804\pm16$ Ma								
500	432.2	160.9	163.1	0.005	1.58	91.9	449.7	960.4±10.3
600	613.2	81.90	32.08	0.056	19.9	99.6	649.0	1263±12.2
700	1123	42.90	12.11	0.056	38.3	~100	1159	1865±15.9
750	1076	23.00	22.93	0.027	47.2	99.5	1090	1794±15.9
800	1080	0.6794	9.332	0.038	59.6	99.7	1078	1781±16.0
850	1101	2.036	22.94	0.013	63.8	99.4	1096	1801±16.2
900	1102	1.774	32.59	0.015	68.6	99.1	1094	1798±16.2
1000	1038	2.550	22.96	0.030	78.6	99.4	1033	1734±15.8
1100	907.5	2.043	17.33	0.013	82.7	99.5	903.9	1589±15.0
1310	833.2	5.896	9.936	0.053	100	99.7	834.3	1506±14.4
Gsl $J=0.001571$ $W=50.10$ mg $t_p=1725\pm16$ Ma								
500	151.6	298.6	215.0	0.003	1.00	74.3	143.9	367.6±5.6
600	281.4	0.0000	64.33	0.013	5.19	93.2	262.4	622.6±8.0
700	872.8	28.52	24.84	0.019	11.3	99.4	886.1	1573±14.6
750	988.7	1.130	9.059	0.022	18.2	99.7	986.9	1689±15.5
800	1058	11.94	9.339	0.037	30.1	99.8	1066	1775±15.9
850	1029	1.103	5.231	0.022	37.2	99.9	1028	1734±15.8
900	1039	38.11	4.293	0.029	46.5	~100	1070	1779±15.5
1000	1046	5.401	9.727	0.032	56.8	99.8	1047	1755±15.8
1100	975.7	10.65	40.07	0.005	58.2	98.9	972.3	1673±15.5
1310	978.8	21.68	6.517	0.129	100	~100	994.3	1697±15.3
HY4 $J=0.001569$ $W=30.85$ mg $t_p=857.2\pm9.7$ Ma								
500	389.5	96.56	177.1	0.005	1.81	88.6	371.1	827.7±10.0
600	226.8	83.25	29.84	0.017	8.01	99.1	239.2	575.0±6.6
700	321.7	1.953	27.59	0.013	12.7	97.5	314.1	722.9±8.6
750	313.1	3.791	40.16	0.007	15.2	96.3	302.4	700.4±8.5
800	314.4	26.49	45.05	0.005	16.9	96.5	309.2	713.6±8.5
900	302.3	36.77	30.76	0.013	21.7	98.0	304.3	704.2±8.2
1000	318.5	5.961	24.65	0.017	27.8	97.9	313.1	720.9±8.6
1050	344.3	0.8541	15.22	0.029	38.6	98.7	340.1	771.4±9.0
1100	353.7	1.384	19.99	0.018	45.3	98.4	348.3	786.5±9.2
1310	390.9	0.1684	11.28	0.148	100	99.1	387.6	857.2±9.7
XH5 $J=0.001560$ $W=50.50$ mg $t_p=838.9\pm9.6$ Ma								
500	7520	233.6	1121	0.001	1.01	95.8	8681	4830±20.9
600	4439	133.0	227.6	0.003	5.47	98.7	4851	3875±20.7
700	1374	80.65	116.6	0.008	16.7	98.0	1430	2115±17.0
750	519.5	40.62	77.11	0.003	21.6	96.3	515.2	1064±11.5
850	375.0	31.51	40.80	0.009	35.4	97.5	374.0	829.2±9.4
950	389.0	1.838	22.35	0.015	56.8	98.3	383.1	845.2±9.7
1050	603.9	2.037	25.39	0.013	76.2	98.8	597.4	1188±12.4
1150	2159	48.40	78.97	0.003	81.1	99.1	2218	2697±19.3
1310	3893	2.087	62.26	0.013	100	99.5	3881	3525±22.0
DS2-1 $J=0.001572$ $W=48.85$ mg $t_p=710.6\pm8.4$ Ma								
500	77.76	361.3	113.6	0.008	4.85	95.0	100.2	263.8±3.3
600	132.1	191.5	63.41	0.013	13.0	97.7	150.0	381.9±4.4
700	309.6	3.620	53.21	0.007	17.1	95.0	294.9	687.2±8.5
750	298.9	83.03	43.09	0.014	25.4	98.0	311.8	719.6±8.1
800	357.5	1.719	27.86	0.014	23.9	97.7	349.8	790.5±9.3
850	334.6	1.061	11.86	0.023	47.8	99.0	331.4	756.5±8.8
900	320.0	2.559	23.07	0.009	53.6	97.9	313.9	723.7±8.6
1000	313.4	1.165	10.12	0.021	66.2	99.1	310.8	717.7±8.4
1100	296.5	3.515	18.00	0.020	78.7	98.3	292.2	681.9±8.1
1310	285.6	0.6919	18.03	0.035	100	98.2	280.4	658.9±8.0

续表2

温度(℃)	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ($\times 10^{-3}$)	^{39}Ar ($\times 10^{-12}$ mol)	剩余 ^{39}Ar (%)	$^{40}\text{Ar}^*$ (%)	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K$	年龄 $\pm 1\sigma$ (Ma)
LD $J=0.001565$ $W=36.25$ mg $t_p=134.5\pm 2.0$ Ma								
500	103.9	461.0	155.7	0.003	1.21	92.2	143.9	366.5 $\pm$ 4.1
600	58.91	221.8	57.92	0.009	5.50	~100	71.55	191.5 $\pm$ 2.4
700	60.57	27.22	40.71	0.011	10.6	83.8	51.80	140.6 $\pm$ 2.3
750	54.63	31.95	28.17	0.016	17.9	89.6	50.09	136.2 $\pm$ 2.1
800	52.62	1.439	16.31	0.018	25.9	91.0	47.96	130.6 $\pm$ 2.0
850	50.96	1.335	10.92	0.019	34.6	93.9	47.88	130.4 $\pm$ 1.9
900	53.55	1.302	11.48	0.019	43.5	93.8	50.31	136.7 $\pm$ 2.0
1000	53.22	0.8746	11.29	0.029	56.8	93.9	49.98	135.9 $\pm$ 2.0
1100	51.72	0.8945	9.290	0.028	69.8	94.8	49.08	133.5 $\pm$ 1.9
1310	56.10	1.917	6.701	0.066	100	96.7	54.34	147.3 $\pm$ 2.1
ZY3 $J=0.001558$ $W=57.10$ mg $t_p=47.5\pm 0.8$ Ma								
500	186.8	450.0	323.6	0.003	2.83	68.6	190.5	468.8 $\pm$ 6.8
600	110.2	3.777	190.7	0.007	9.45	49.1	54.26	146.4 $\pm$ 4.5
700	35.93	27.39	44.98	0.014	22.2	69.2	25.39	70.01.5
750	25.23	38.73	26.17	0.012	33.2	81.9	21.27	58.8 $\pm$ 1.0
800	19.41	20.37	14.17	0.019	50.4	87.0	17.14	47.50.8
850	20.19	24.60	18.24	0.011	60.5	83.3	17.12	47.5 $\pm$ 0.8
900	21.75	26.23	23.93	0.012	71.0	77.4	17.16	47.6 $\pm$ 0.9
1000	24.03	2.870	19.61	0.010	79.7	76.8	18.50	51.3 $\pm$ 1.0
1100	23.40	4.030	12.00	0.014	92.1	86.2	20.24	56.0 $\pm$ 0.9
1200	34.82	3.178	18.93	0.009	100	84.6	29.55	81.2 $\pm$ 1.3

注:数据由本文作者李大明测试。

往往可以根据规模和岩性区别后期岩墙。新元古代 800~700 Ma 的岩墙规模不及中元古代,但分布广,形成时代可延续到 600 Ma,岩石组成开始变得复杂,除辉绿岩之外,还出现了类似葛峪堡与辉绿岩岩墙共生的正长岩岩墙。获得同位素年龄的早中生代岩墙不多,本文只列举了大同怀安分布面积达 150 km² 的碳酸岩-煌斑岩共生的岩墙群(邵济安等, 2003)。尽管如此,从整个华北克拉通来看,反映早中生代构造伸展事件的碱性岩分布还是十分普遍的(李之彤等, 1986; 牟保磊等, 1992, 2001; 周玲棣等, 1996; 阎国翰等, 1998, 2000), 因此可以将这期岩墙群看作这次地质事件的代表。晚中生代岩墙群比较普遍,除常见的辉绿岩、煌斑岩外,华北还出现由辉绿岩和正长岩以及基性钾玄岩和酸性的花岗质岩石组成的双峰式岩墙群(邵济安等, 2001)。整个中生代岩墙的岩石类型复杂,显示地幔的不均一性增强。新生代以玄武质岩石为主,以岩石新鲜,色黑区别于前新生代岩墙群,新生代岩墙产出分散、孤立,规模有限,总的趋势说明随时间增加,大陆岩石圈的稳定性不断增加,地壳渗透性逐渐减小,而岩浆来源则不断加深。综观各期岩墙群,以 NW 走向(290°~330°)为主,另外两组近 SN(355°~15°)和 NE(60°~70°)走向(表1)。

4 岩石化学组成及元素地球化学特征

本文讨论的岩墙群主要为基性岩类,部分为超基性岩和少量中性岩, SiO₂ 含量多在 45%~54% 之间(表3)。常见岩石为辉绿岩,其次为煌斑岩,少量辉石岩、橄榄玄武岩、正长岩、闪长岩、碳酸岩。岩石中常见矿物为斜长石、辉石、角闪石、橄榄石,其次为黑云母(部分为金云母)、磷灰石、磁铁矿。常见辉绿结构、粒玄结构、无斑隐晶结构。

借助于大陆玄武岩硅碱含量变异图的岩石分类,本区基性岩墙群岩石为碱性玄武岩,岩石类型主要相当于玄武岩、部分相当碧玄岩和响岩(图3a)。在 Na₂O+K₂O 与 Na₂O/K₂O 关系图中,本区大多数岩墙群与亚洲大陆东部碱性玄武岩的投影区域一致(图3b)。

与 Pearce(1982)统计的板内拉斑玄武岩和碱性玄武岩的元素丰度比较,本区基性岩墙群除了 TiO₂、Nb、Cr 可与拉斑玄武岩相比之外,其他均可与板内碱性玄武岩相比(表4)。反映地幔内热供给有限,地幔局部熔融程度要小。值得注意的是本区的 K₂O 比较高(表4),接近 Pearce 统计的钾玄岩 K₂O 含量 2.51%。看来,富 K 是华北岩石圈地幔的继承性特征。同时,岩墙群富含大离子不相容元素 K、

Rb、Ba 等,表明岩浆来源于岩石圈地幔。

从表2中可见,随着时间推移,从中元古代经新元古代到中生代, SiO_2 、 Al_2O_3 和 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 逐渐递增,而 TiO_2 、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 和 MgO 逐渐递减,呈现有规律的变化。中元古代岩墙群岩石中Fe、Mg、Ti、P等元素最高。值得注意的是,新生代 SiO_2 、 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 则明显降低, MgO 和 TiO_2 明显增高,又趋近中元古代岩墙的特点。在AMF图中可以清楚地看到从元古宙经早中生代到晚中生代,从偏近FM一侧逐渐向右下方A端元移动,新生代又向F端元回返(图3c)。基性岩墙群岩浆来源于岩石圈地幔,这一变迁反映地幔源区的某些变化。

5 同位素地球化学特征与构造背景的

表3 晋冀蒙交界地区岩墙群的全岩化学分析结果(%)

Table 3 Whole-rock chemical analysis data (%) of the dyke swarms in Shanxi—Hebei—Mongolia border area

时代	编号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	Σ
中元古代	JL	43.32	1.84	16.72	5.41	6.04	0.26	7.33	5.59	3.74	3.06	1.27	4.92	99.5
	NK3	47.84	2.88	12.47	9.18	6.41	0.12	7.86	3.99	2.18	2.07	1.8	2.77	99.57
	NK5	49.74	1.26	12.31	9.64	5.97	0.13	9.3	6.09	0.98	1.87	0.34	2.28	99.91
	GS1	44.87	3.78	12.98	11.36	3.96	0.11	8.07	3.85	2.85	2.55	2.44	2.73	99.55
	HY8	51.11	2.74	12.86	9.49	6.04	0.26	7.17	2.4	2.45	2.52	1.61	1.22	99.87
	PZ1	48.48	2.4	12.26	12.16	3.49	0.14	8.5	5.52	0.77	2.52	0.26	3.47	99.97
平均		47.56	2.48	13.26	9.54	5.32	0.17	8.04	4.57	2.16	2.43	1.29		
新元古代	HY4	68.29	0.12	13.64	1.82	0.62	0.04	1.32	2.47	3.56	4.9	0.12	3.73	100.6
	HY2	40.75	0.21	12.33	8.11	10.05	0.21	10.13	6.78	2.41	0.77	0.2	7.08	99.03
	XH5	46.21	2.72	14.46	7.63	8.16	0.14	9.42	6.35	0.61	1.69	0.26	2.07	99.72
	DS2-1	45.01	3.99	13.21	4.89	12.7	0.28	5.29	6.64	3.08	1.99	0.45	2.52	100.1
	DS1-1	43.65	2.29	15.19	5.14	6.82	0.19	7	8.58	2.98	2.29	0.47	5.45	100.1
	G1	47.22	3.14	12.39	8.4	6.10	0.25	6.16	3.69	2.49	1.3	1.5	6.86	99.5
平均		48.52	2.08	13.54	6.00	7.41	0.19	6.6	5.75	2.52	2.16	0.5		
早中生代	YZ-5	45.09	1.26	14.34	3.12	9.27	0.29	8.6	8.83	2.98	0.61	0.18	4.93	99.5
	YZ-3	46.42	1.29	14.39	3.03	9.54	0.10	8.98	8.3	2.17	0.6	0.18	4.92	99.92
晚中生代	D23	58.09	0.93	16.34	4.19	2.85	0.25	5.77	3.4	2.83	3.08	0.37	1.47	99.57
	J2-2	53.53	0.77	17.05	5.35	2.97	0.12	7.81	5.37	1.44	3.6	0.41	1.51	99.93
	JD8	49.98	1.86	16.58	5.23	3.97	0.13	8.26	5.78	3.27	2.35	0.8	1.55	99.76
	Z2	60.86	0.79	16.9	3.57	2.48	0.24	4.48	2.3	3.78	3.26	0.42	0.8	99.88
	LD2	53.67	2.14	15.17	6.17	3.16	0.09	6.31	3.54	2.65	3.55	1.06	2.1	99.61
	Ly8-2	52.94	1.41	17.37	4.15	4.72	0.21	3.69	5.61	3.37	4.64	0.48	1.41	100
平均		53.55	1.31	16.25	4.53	4.22	0.18	5.19	4.94	2.85	3.01	0.53		
新生代	Dt-1	41.42	3.24	13.47	6.03	8.85	0.18	8.64	8.08	2.31	2.39	0.51	4.91	100
	ZY3	44.02	1.54	14.15	7.88	2.86	0.1	8.76	7.49	0.91	2.81	0.35	8.93	99.8
平均		42.72	2.39	13.81	6.96	2.86	0.14	8.70	7.78	1.61	2.60	0.43		

注:由中国科学院地质与地球物理研究所曹杰测定。

表4 研究区岩墙群与板内的拉斑玄武岩和碱性玄武岩的对比(据Pearce,1982)

Table 4 Comparison of the dike swarms in research area with intraplate tholeiite and alkalic basalt (after Pearce,1982)

成分	K_2O	Rb	Ba	TiO_2	Zr	Hf	Sm	P_2O_5	Ce	Ta	Nb	Th	Sr	Yb	Cr
拉斑	0.5	7.5	100	2.23	149	3.44	5.35	0.25	31.3	0.73	13	0.77	200	2.12	352
碱性	1.5	40	600	2.9	213	6.36	8.87	0.64	96.8	5.9	84	4.5	842	0.89	536
本区	2.2	37	951	2.1	207	4.91	8.23	0.74	81	1.04	16.63	3.9	630.2	2.6	300

注:表中氧化物为百分含量,其他元素含量单位为 $\times 10^{-6}$;本文微量元素均为中国科学院广州地球化学研究所涂湘林测定。

探讨

本文测定了不同时代的12个样品的Rb-Sr,Sm-Nd同位素值(表5),根据它们的同位素年龄计算了Sr、Nd初始值,又根据Sm-Nd同位素确定了 T_{DM} 年龄。

从Sr-Nd同位素组成看(图4),本区不同时代基性岩墙群的投点基本上落在2、4象限,与东非裂谷等地富钾岩石的Sr-Nd同位素组成有类似之处,从MORB-OIB一直延伸到富集象限,呈对角分布,富钾岩浆具有宽广的Sr-Nd同位素组成(徐义刚,1999)。本文尝试结合同位素地球化学特征讨论它们与地质演化过程的耦合关系。

表 5 晋冀蒙交界地区岩墙群 Rb-Sr, Sm-Nd 同位素分析结果

Table 5 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic analytical results of the dyke swarms in Shanxi—Hebei—Mongolia border area

样品号	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(2\sigma)$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(2\sigma)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$t(\text{Ma})$	$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$
ZY	0.0794	0.705113±15	0.1366	0.512661±8	0.8	8.7	0.7051	47.5	0.8
LD	0.1579	0.706952±20	0.1060	0.512074±11	-9.4	32.6	0.7067	134.5	1.4
Nc7-2	1.472	0.708371±11	0.07726	0.511807±7	-14.3	18.7	0.7057		1.6
Nc10-1	0.287	0.705983±10	0.08865	0.511835±10	-13.9	15.57	0.7055	128.7	1.6
Nc6-7	0.064	0.705627±11	0.09898	0.512118±7	-8.6	16.30	0.7055		1.4
504-1	0.522	0.707669±19	0.1259	0.512037±7	-9.62	46.1	0.7075		1.9
Wj-1	0.3279	0.707933±20	0.0940	0.512207±20	-8.4	37.1	0.7069	229	1.2
Wj-3	0.06106	0.707077±20	0.1215	0.512287±20	-6.8	37.3	0.7069		1.4
XH	0.295	0.706625±15	0.1593	0.512608±10	3.4	-7.0	0.7031	839	1.2
PZ	0.233	0.708502±16	0.1538	0.512316±11	1.9	9.2	0.7035	1480	1.8
GS	0.335	0.713458±18	0.1109	0.511388±10	-5.4	36.0	0.7051	1725	2.4
NK3	0.301	0.714644±10	0.1271	0.511478±10	-6.5	61.5	0.7068	1804	2.6

注:504-1—碳酸岩; Wj-1—煌斑岩; Wj-3—碳酸岩; Nc7-2、Nc10-1、Nc6-7均为京北双峰式岩墙群中的基性岩墙群。表中 $T_{\text{DM}}(\text{Ga})$ 年龄以 Sm-Nd 同位素确定。同位素由中国科学院地质与地球物理研究所测定。

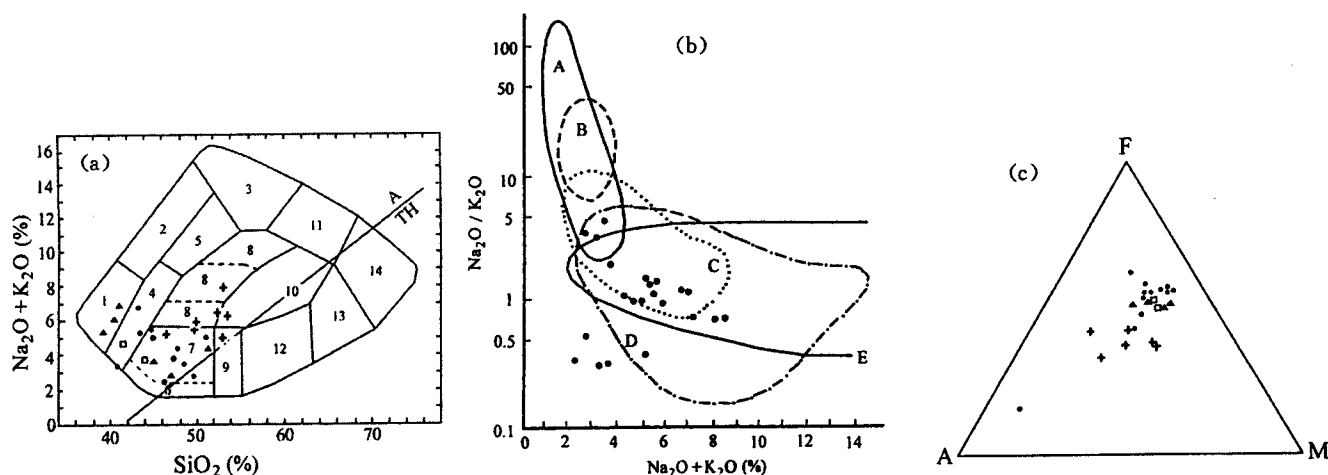


图 3 晋冀蒙交界地区岩墙群的岩石化学图解

Fig. 3 Petrochemistry diagram of the dike swarms in Shanxi—Hebei—Mongolia border area

(a) $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 图(据 Wilson, 1989): 1—霞石岩; 2—响岩质霞石岩; 3—响岩; 4—碧玄岩和响岩; 5—响岩质碱玄岩; 6—苦橄玄武岩; 7—玄武岩; 8—粗玄岩; 9—玄武安山岩; 10—粗面安山岩; 11—粗面岩; 12—安山岩; 13—英安岩; 14—流纹岩; (b) $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 关系图(据 Miyashiro, 1975): A—冰岛拉斑玄武岩; B—大洋拉斑玄武岩; C—岛弧拉斑玄武岩; D—亚洲大陆东部碱性玄武岩; E—大西洋洋岛碱性玄武岩; (c) AMF 图(据 Irvine et al., 1971): ●—元古宙; ▲—早古生代; +—晚古生代; □—新生代

(a) $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ diagram (after Wilson, 1989): 1—nephelinolite; 2—phononephelinite; 3—phonolite; 4—basanite and phonolite; 5—phonotephrite; 6—hillhouse basalt; 7—basalt; 8—trachybasalt; 9—basaltic andesite; 10—trachyandesite; 11—trachyte; 12—andesite; 13—dacite; 14—rhyolite; (b) $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ diagram (after Miyashiro, 1975): A—Iceland tholeiite; B—oceanic tholeiite; C— island arc tholeiite; D—alkalic basalt in east margin of Asian continental; E—Atlantic oceanic alkalic basalt; (c) AMF diagram (after Irvine et al., 1971); ●—Proterozoic; ▲—early Mesozoic; +—late Mesozoic; □—Cenozoic

华北克拉通经历了长期(2500~1800 Ma)相对平静的阶段(赵宗溥, 1993), 中元古代初1800~1700 Ma 蓟县—熊耳裂陷槽形成与古地幔柱作用下的超大陆裂解作用有关, 正是由于软流圈(层)上涌, 这时期的岩墙群明显富铁、镁, 又由于活跃的壳幔相互作用, Sr-Nd 同位素体系表现出富集地幔的特点, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-5~-7, 与内蒙古集宁1800 Ma 岩墙群完全一

致(Zhai et al., 2000)。华北1840~1750 Ma 之间普遍发育的奥长环斑花岗岩和斜长岩以及长城—蓟县系钾质系列火山岩就是非造山岩浆的主体。赞皇变质穹隆1800 Ma 的年龄也标志了华北克拉通基底所经受的强烈的构造热伸展事件(王岳军等, 2003)。1900~1700 Ma 的基性岩墙群已经有规模地出现在冀东和晋冀蒙交界地区(陈孝德等, 1983; Qian

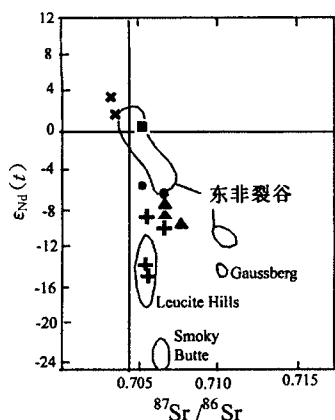


图 4 晋冀蒙交界地区岩墙群 Sr-Nd 同位素图

Fig. 4 Sr-Nd isotopic diagram for the dike swarms of research area in Shanxi-Hebei-Mongolia border area

●—中元古代; ×—新元古代; ▲—早中生代; +—晚中生代;
■—新生代; 世界富钾岩石的 Sr-Nd 同位素分布引自徐义刚 (1999)

●—Middle Proterozoic; ×—Neoproterozoic; ▲—early Mesozoic;
+—late Mesozoic; ■—Cenozoic. Sr-Nd isotopic distribution of rich potassium rocks in world (after Xu Yigang, 1999)

Xianglin et al., 1987; Zhai M G., 1999; 侯贵廷等, 2001; 李江海等, 1997, 2001; 张臣等, 2001)。中—新元古代(1500~800 Ma)裂谷继续发育, 长期与富集地幔有关的非造山岩浆活动之后, 致使本区新元古代700~800 Ma 阶段玄武质岩墙群的 Sr-Nd 同位素表现出亏损的特征。与此相应, 克拉通北缘新元古代也出现了一套陆缘裂陷槽具亏损特征的岩浆组合, 其基性火山岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 +6.27, 层状闪长岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 +8(张臣等, 2001)。

早中生代晚三叠世, 华北构造格局发生了明显变化, 东部形成许多断陷盆地, 地表差异升降引起的剥蚀作用也非常强, 例如华北盆地采用古地温法求得中晚三叠世的剥蚀厚度平均为 3122 m^①, 是显生宙以来最大幅度的剥蚀量。这一时期华北北部的底侵作用明显, 形成早。

中生代的堆晶岩、麻粒岩(邵济安等, 1999, 2000)。壳幔相互作用致使 Sr-Nd 同位素呈富集状态。这一时期伴有大量源自富集地幔的碱性或偏碱性的岩浆活动(阎国翰等, 2000; 牟保磊等, 2001)。

华北晚中生代壳幔作用再次活跃, 下地壳的底侵—重熔作用明显, 发生的麻粒岩相变质作用(樊祺诚等, 1996), 并形成一系列碱性花岗岩(阎国翰等, 1998)和钾玄质火山岩(廖群安等, 1993), 大地热流值明显增高, 高达 90 Mw/m²^①。因此这一时期岩墙

群的 Sr-Nd 同位素相对早中生代更为富集, 属于典型的 EMI 型。新生代岩墙的岩浆来源接近原始地幔, 在 Sr-Nd 同位素体系中的投影点落在华北新生代玄武岩从原始地幔延伸到亏损地幔区间内(陈义贤等, 1997)。新生代岩浆源区研究表明, 新生代在软流物质上涌背景下, 岩石圈地幔被不断更新, 部分地区甚至被新生代的软流圈热物质替代(路凤香等, 2000)。

综上所述, 本研究区岩浆演变与壳幔作用之间的耦合性, 都暗示在地质历史中, 不论华北克拉通板块在全球相对位置中如何位移, 华北岩石圈地幔和上覆地壳可能保持了相对稳定的空间关系。

6 华北克拉通伸展事件对全球构造事件的响应

以幔源岩浆侵位为标志的岩墙群是伸展作用的产物, 往往有着更大范围的构造背景。因此, 本文将从全球构造演化的角度来看华北克拉通不同时期岩墙群形成的背景。综合 Halls 等(1987)、Windley(1977)等人资料可见, 全球 1800 Ma 以来的岩墙群分布主要集中在 1800~1600 Ma、1200~1100 Ma、800~600 Ma、230~120 Ma 和 50~30 Ma 区间内。

古—中元古代之交(1900~1700 Ma)与克拉通裂解有关的岩浆活动, 如南极、印度南部、南非林波波带等地发育的基性岩墙群, 以及阿尔丹、乌克兰、亚马逊等地的 1800~1700 Ma 非造山岩浆活动。

新元古代末(800~700 Ma)是 Rodinia 超大陆裂解时期, 沿着澳洲大陆东缘发生裂解的裂谷作用和火山活动从 830 Ma 开始, 一直持续到 Rodinia 超大陆裂解(Powell et al., 1993)。在波罗的地盾存在 650~750 Ma 与 Iapetus 洋打开有关的拉斑玄武岩系列的岩墙群; 在南非存在 880 Ma 的岩墙群。在中国华北克拉通北缘也明确记录了 Rodinia 超大陆在华北的表现(Zhai Mingguo et al., 2003b)。白云鄂博矿区也存在这一时期的碱性基性岩—碳酸岩岩墙(郝梓国等, 2002)。

在古生代和中生代交替之际, 全球进入活跃的伸展构造时期, 南大西洋的开始裂解, 并且逐渐向北的不断扩张; 西伯利亚裂谷系、南非林波波、赞比亚等地堑以及印度地堑都活跃起来, 200~300 万立方千米的暗色岩浆作用出现在西伯利亚, 晚三叠世

① 付明希, 2003. 华北东部中生代盆地热体制转换与岩石圈热结构研究. 中国科学院地质与地球物理研究所博士论文, 北京。

碱性组合岩墙群出现在阿帕拉契、法兰士约瑟夫群岛,早侏罗世出现2000 km 长的粗玄岩岩墙群沿阿帕拉契山脉东侧延伸(McHone et al., 1987)。晚三叠世华北克拉通北缘正处于从古亚洲构造域向古太平洋构造域叠加和转换的重要时刻(邵济安等, 1997), 岩墙群的形成和深源岩浆活动也是对这一时期全球性活动的响应。

中生代140~120 Ma 全球进入一个伸展扩张的高峰时期,太平洋板块的扩张、地幔柱的活动、洋底高原、海山链、大型岩浆省和大陆溢流玄武岩的形成、全球气温变化、生物的剧生剧灭、石油的生成等许多重要地质事件都发生在这一时期。这一时期在大陆克拉通上形成的岩墙群同样是幔源岩浆上升的表现。格陵兰、美国、南美洲伴随大西洋裂解的拉斑或碱性玄武质岩墙群从237 Ma 一直延续到100 Ma, 早白垩世还出现伴随碱性杂岩的煌斑岩岩墙(McHone et al., 1987)。同样140~120Ma 也是华北岩石圈伸展的峰期。

以上4个时期的岩墙群直接反映了华北克拉通自1800 Ma 以来的几次伸展事件,它们可以看作是对全球规模的同期伸展事件的响应。

至于古近纪这期岩墙群如何看待?米兰诺夫斯基在总结了冰岛裂谷、哥伦比亚高原等地古近纪岩浆作用后,他通过大陆上的古近纪地堑在靠近大洋盆地一侧加宽、加深,并在大陆的内地消失的事实,指出“基性岩浆产物既有呈喷发形态的,也有呈密集的侵入体“浸透”了岩石圈,因此,地壳所受的改造应该更深(Милановский Е Е, 1976)。从近年来我国的研究来看,新生代许多地区岩石圈地幔被软流圈改造的事实是存在的(郑建平, 1999)。这种改造有可能是从晚中生代开始的,这种大规模置换和改造不能简单被看成一次伸展事件。

本文虽然划分了5个阶段的岩墙群,但是他们发育的程度不同、形成的背景也不全然相同,之所以把它们放到一起讨论,是为了通过不同阶段岩墙群的研究,探讨地幔物质组分的变化,同时,探讨它们与构造环境之间的耦合关系。

致谢:感谢戴樟漠研究员在同位素年代学方面的审阅和指点。

参 考 文 献

陈孝德,史兰斌. 1983. 五台—太行辉绿岩岩墙群的初步研究. 科学通报, (16):1002~1005.
陈义贤,陈文奇. 1997. 辽西及邻区中生代火山岩. 北京:地震出版

社, 238.
樊祺诚,刘若新. 1996. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体. 科学通报, 41:235~238.
郝祥国,王希斌,李震,肖国望,张台荣. 2002. 白云鄂博矿区碱性基性岩—碳酸岩岩墙岩石学研究. 岩石矿物学杂志, 21(4):429~444.
侯贵廷,张臣,钱祥麟,张保兴. 1998. 华北克拉通中元古代基性岩墙群形成机制及构造应力场. 地质论评, 44(3):309~314.
李江海,侯贵廷,钱祥麟, Halls H C, Davis D N. 2001. 恒山中元古代早期基性岩墙群的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其克拉通构造演化意义. 地质论评, 47(3):234~238.
李江海,何文渊,钱祥麟. 1997. 基性岩墙群的成因机制及其古板块再造意义. 高校地质学报, 3(3):2~8.
李之彤,余昌涛,程德琳,庞庆邦,唐淑兰. 1986. 辽宁省凌源县河坎子碱性杂岩体地质特征. 沈阳地质矿产研究所所刊, 14: 43~62.
廖群安,邱家骥. 1993. 北京地区中生代钾玄岩系列—高钾钙碱性系列的识别与成因分析. 岩石学报, 9(增刊):14~23.
路凤香,郑建平,李武平,等. 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式:“蘑菇云”模型. 地学前缘, 7(1):97~108.
牟保磊,阎国翰. 1992. 燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及其意义. 地质学报, 66(2):108~122.
牟保磊,邵济安,储著银,阎国翰,乔广生. 2001. 河北矾山钾质碱性超镁铁岩—正长岩杂岩体 Sm-Nd 年龄和 Sr、Nd、Pb 同位素特征. 岩石学报, 17(3):358~365.
邵济安,牟保磊,何国琦,张履桥. 1997. 华北北部在古亚洲域与太平洋域构造叠加过程中的地质作用. 中国科学, 27(5):390~400.
邵济安,韩庆军,张履桥,牟保磊. 1999. 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,韩庆军. 2000. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现. 中国科学, 30(增刊):148~153.
邵济安,张履桥,魏春景,韩庆军. 2001. 北京南口中生代双峰式岩墙群的组成及其特征. 地质学报, 75(2):205~212.
邵济安,张永北,张履桥,牟保磊,王佩瑛,郭峰. 2003. 大同地区早中生代煌斑岩—碳酸岩岩墙群. 岩石学报, 19(1):93~104.
王岳军,范蔚茗,郭锋,李超文. 2003. 赞皇变质穹隆黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究及其对构造热事件的约束. 岩石学报, 19(1):131~140.
伍家善,耿元生,沈其韩,万渝生,刘敦一,宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京:地质出版社, 11~15.
徐义刚. 1999. 拉张环境中的大陆玄武岩浆作用:性质及动力学过程. 见:郑永飞主编. 化学地球动力学. 北京:科学出版社, 119~167.
阎国翰,许保良,牟保磊,谭林坤,何中甫. 1998. 中国北方中、新生代板内拉张性岩浆作用及其地球动力学意义. 见:北京大学地质系主编. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京:地震出版社, 650~659.
阎国翰,牟保磊,许保良,等. 2000. 燕辽—阴山年代学和 Sr、Nd、Pb 同位素特征及意义. 中国科学, 30(4):383~387.
张臣,吴泰然. 2001. 内蒙古苏左旗南部华北板块北缘中、新元古代—古生代裂解—汇聚事件的地质记录. 岩石学报, 17(2):199~

205.

赵宗溥. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化. 北京: 科学出版社, 357~364.

郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社, 105~112.

周玲棣, 赵振华, 周国富. 1996. 我国一些碱性岩的同位素地球化学研究. 地球化学, 25(2): 164~171.

References

Chen Xiaode, Shi Lanbin. 1983. Initial study of diabase dyke swarms in Wutai-Taihang area. Chinese Science Bulletin, (16): 1002~1005 (in Chinese with English abstract).

Chen Yixian, Chen Wenji. 1997. The Mesozoic volcanic rocks in the West Liaoning and its adjacent areas: geochronology, geochemistry and tectonic setting. Beijing: Seismological Publishing House, 238 (in Chinese).

Fan Qicheng, Liu Ruoxin. 1996. High-temperature granulite xenoliths in Hanroba basalts. Chinese Scientific Bulletin, 41: 235~238 (in Chinese).

Guo J H, O'bring P J, Zhai M. 2002. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: metamorphic evolution, P-T paths and geotectonic significance. J. Metamorphic Geol., 20: 741~756.

Halls H C, Fahrin W F. 1987. Mafic dyke swarms. Geological Association of Canada Special Paper, 34.

Hao Ziguang, Wang Xibin, Li Zhen, Xiao Guowang, Zhang Tairong. 2002. Petrological study of alkaline basic dyke and carbonatite dyke in Bayan Obo, Inner Mongolia. Acta Petrologica et Mineralogica, 21 (4): 429~444 (in Chinese with English abstract).

Hou Guiting, Zhang Chen, Qian Xianlin, Zhang Baoxing. 1998. The formation mechanism and tectonic stress field of the Mesoproterozoic mafic dyke swarms in the North China craton. Geological Review, 44(3): 309~314 (in Chinese with English abstract).

Li Jianghai, Hou Guiting, Qian Xianglin, Halls H C, Davis D N. 2001. Single-zircon U-Pb age of the initial Mesoproterozoic basic dike swarms in Hengshan Mountain and its implication for the tectonic evolution of the North China Craton. Geological Review, 47(3): 234~238 (in Chinese with English abstract).

Li Jianghai, He Wenyuan, Qian Xianglin. 1997. Genetic mechanism and tectonic setting of Proterozoic mafic dyke swarms: its implication for paleoplate reconstruction. Geological Journal of China Universities, 3(3): 2~8.

Li Zhitong, Yu Changtao, Cheng Delin, Pang Qingbang, Tang Shulan. 1986. Geological characteristics of the Hekanzi alkaline complex in Lingyuan county of Liaoning province. Bulletin of the Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, 14: 43~62 (in Chinese with English abstract).

Liao Qun'an, Qiu Jiaxiang. 1993. The discriminate and genetic analysis of Mesozoic shoshonite association——high potassium calc-alkaline series in Beijing area. Acta Petrologica Sinica, 9

(supp.): 14~23 (in Chinese with English abstract).

Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Li Wuping, et al. 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in the eastern China: the "Mushroom Cloud" model. Earth Science Frontiers, 7(1): 97~108 (in Chinese with English abstract).

Ludwig R K. 1992. ISOPLOT——A plotting and regression program for radiogenic-isotope data, Version 2. 57. U. S. Geological Survey Open File Report, 40: 91~445.

McHone J G, Ross M E, Greenough J D. 1987. Mesozoic dyke swarms of Eastern North America, In: Halls H C and Fahrin W F, eds. Mafic dyke swarms. Geological Association of Canada Special Paper, 34: 279~288.

Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics and origin of ophiolites. J. Geol., 83: 249~281.

Mou Baolei, Yan Guohan. 1992. Geological features of Triassic alkaline and subalkaline igneous complexes in the Yan-Liao area. Acta Geologica Sinica, 66 (2): 108~122 (in Chinese with English abstract).

Mou Baolei, Shao Ji'an, Chu Zhuyin, et al. 2001. Sm-Nd age and Sr, Nd isotopic characteristics of the Fanshan potassic alkaline ultramafic-syenite complex in Hebei province. Acta Petrologica Sinica, 17(3): 358~365 (in Chinese with English abstract).

Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Andesites, ed. Thorps R S, Chichester, Wiley, 525~548.

Powell C M, Li Z X, McElhinny M W. 1993. Paleomagnetic constraints on timing of the Neoproterozoic breakup of Rodinia and the Cambrian formation of Gondwana. Geology, 21(10): 889~892.

Qian Xianglin, Chen Yaping. 1987. The Precambrian mafic swarms of the north China Craton. In: Halls H C, Fahrin W F, eds. Mafic dyke swarms. Geological Association of Canada Special Paper, 34: 385~391.

Shao Ji'an, Mou Baolei, He Guoqi, Zhang Lujiao. 1997. Geological effects in tectonic superposition of paleo-Pacific domain and Paleo-Asian domain in northern part of North China. Science in China, 40(6): 634~640.

Shao J A, Han Q J, Zhang L Q, Mou B L. 1999. Cumulate complex xenoliths in the Early Mesozoic in eastern Inner Mongolia. Chinese Science Bulletin, 44(14): 1272~1279.

Shao Ji'an, Han Q J. 2000. Early Mesozoic mantle-crust transition zone in eastern Inner Mongolia: Evidence from measurements of compressional velocities of xenoliths at high pressure and high temperature. Science in China (Series D), 43 (Supp.): 253~261.

Shao Ji'an, Zhang Lujiao, Wei Chunjing, Han Qingjun. 2001. Composition and features of the Mesozoic bimodal dike swarms in Nankou area, Beijing. Acta Geologica Sinica, 75(2): 205~212 (in Chinese with English abstract).

Shao Ji'an, Zhang Yongbei, Zhang Lujiao, Mu Baolei, Wang Peiying, Guo Feng. 2003. Early Mesozoic dike swarms of carbonatites and lamprophyres in Datong area. Acta Petrologica Sinica, 19(1): 93~104 (in Chinese with English abstract).

- Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng, Peng Touping, Li Chaowen. 2003. Biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the deformational rocks from Zanhuan metamorphic domain in south Taihang mountains and their tectonothermal overprinting. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1):131~140 (in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1989. Igneous petrogenesis: a global tectonic approach. London: Chapman and Hall.
- Windley B F. 1977. The Evolving Continents. London, New York, Syney, Toronto: John Wiley and Sons, 1~385.
- Wu Jiashan, Geng Yuansheng, Shen Qihan, Wan Yusheng, Liu Dunyi, Song Biao. 1998. Archaean geology characteristics and tectonic evolution of China—Korea Paleo-continent. Beijing: Geological Publishing House, 11~15 (in Chinese).
- Xu Yigang. 1999. Magmatism of continental basalts during extension: nature and dynamical process. In: Zheng Yongfei, ed. Chemical Geodynamics. Beijing: Science Press, 119~167 (in Chinese).
- Yan Guohan, Xu Baoliang, Mou Baolei, Tan Linkun, He Zhongfu. 1998. Extensive magmatism of Northern China's Intraplate during Mesozoic and Cenozoic Era and its implication of geodynamics. In: Geological Department of Peking University, ed. Collected Works of International Symposium on Geological Science. Beijing: Seismological Publishing House, 650~659 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G. 1999. The 1.8Ga thermal event in the North China craton: a record of early upwelling mantle plumes. In: Lee B-J, Lee S-K, Kim J. eds. Crustal Evolution in Northeast Asian. Taejon: KIGMM, 2~3.
- Zhai M G, Bian A G, Zhao T P. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China craton at the end of the NeoArchaean, and its break-up during the late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic. *Science in China (Series D)*, 43(Supp.): 219~232.
- Zhai M G. 2003a. Precambrian geological events in the North China Craton. *J. Geol. Soc. London*, Special Paper Issue.
- Zhai Mingguo, Liu Wenjun. 2003b. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China Craton: a review. *Precambrian Research*, 2289:1~17.
- Zhang Chen and Wu Tairan. 2001. Crack and assembly events of Meso-Neoproterozoic continental blocks in the southern area of Suzuoqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2):199~205 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, Sun M, Lu L. 2000. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the North China craton: implications for Palaeoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Res.*, 103:55~88.
- Zhao Zongpu. 1993. The Precambrian geological evolution of Sino—Korea Platform. Beijing: Science Press, 357~364 (in Chinese).
- Zheng Jianping. 1999. Mesozoic—Cenozoic mantle replacement and lithospheric thinning beneath the Eastern China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 105~112 (in Chinese).
- Zhou Lingdi, Zhao Zhenghua, Zhou Guofu. 1996. Isotope geochemistry research on some alkalic rocks in China. *Geochimica*, 25(2): 164~171 (in Chinese with English abstract).
- Милановский Е. Е. 1976. Рифтовые зоны континентов. Москва: Недра.

Identification of 5 Time—Groups of Dike Swarms in Shanxi—Hebei—Inner Mongolia Border Area and Its Tectonic Implications

SHAO Ji'an¹⁾, ZHAI Mingguo²⁾, Zhang Luqiao³⁾, Li Daming⁴⁾

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

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

3) Institute of Mineral Deposit and Experiment, Inner Mongolia AUT. Huhhot, 010020

4) Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing, 100029

Abstract

Dike swarms marked with intrusion of mantle source magma result from extension. The basic dike swarms around Shanxi—Hebei—Inner Mongolia borders in the north peripheral area of North China Craton can be divided into five age-groups according to isotopic age determination: 1800~1700 Ma, 800~700 Ma, 230 Ma, 140~120 Ma, and 50~40 Ma. Geological, petrological and isotope-geochemical features of the five groups are investigated in order to explore variation of the mantle material composition in the concerned area with time. And the various extensional activities reflected by the five groups of dike swarms are compared with some important tectonic events within North China Craton as well as around the world during the same period.

Key words: dike swarms; North China Craton; extensional events