

鲁西前寒武纪基性岩墙群

侯贵廷¹⁾, 李江海¹⁾, 金爱文²⁾, 钱祥麟¹⁾

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

2) 山东科技大学地学院, 泰安, 271019

内容提要: 鲁西地区发育大规模的中元古代基性岩墙群, 侵位于早前寒武纪结晶基底内, 未变形未变质, 以北西向和近南北向为主, 是鲁西前寒武纪最引人注目的一种伸展构造标志。鲁西基性岩墙群属于板内大陆裂谷拉斑玄武岩系列, 与板内大陆裂谷活动密切相关, 代表一种非造山岩浆活动。该岩墙群富集大离子亲石元素(LILE), 略亏损高场强元素(HFSE), 比较富集 Cr、Ni, 明显亏损 Th。稀土元素配分模式为轻稀土略富集的右倾曲线。鲁西基性岩墙群的微量元素和稀土元素特征反映源区为略富集的地幔。从时空分布特征、构造特征、岩石化学相关性、岩浆源区和古构造应力场分析, 鲁西基性岩墙群与燕辽—中条拗拉槽系有一定的成生联系。

关键词: 基性岩墙群; 地球化学特征; 板内大陆裂谷拉斑玄武岩; 伸展构造; 燕辽—中条拗拉槽系

全球各大克拉通内都广泛发育前寒武纪基性岩墙群。基性岩墙群作为同一基性岩浆事件中侵位的一系列基性岩墙组合。未变形未变质的基性岩墙群一般产状直立, 走向稳定, 具有区域地质对比意义, 成为古大陆伸展构造和克拉通构造演化的重要构造对比标志, 也是前寒武纪裂谷研究和古大陆再造的重要对比标志(Halls, 1987; Fahrig, 1987)。在Columbia 和 Rodinia 等前寒武纪超级古大陆的拼贴和裂解研究中, 基性岩墙群作为一种显著的可进行区域对比的构造岩浆事件, 日益受到重视, 成为国际前寒武纪地质研究的热点, 对前寒武纪结晶基底的隆升历史研究和超大陆拼合与裂解的研究具有重要的研究价值(Haffmann, 1997; 李江海等, 1997; 陆松年等, 2002; 赵国春等, 2002; 邵济安等, 2002a, 2005; Halls, 2003)。

华北克拉通广泛发育前寒武纪基性岩墙群, 主要分布在华北克拉通的中部山西省、内蒙古和河北省等地区, 大多数呈北北西走向分布, 少数为近东西向, 未变形未变质, 以辉绿岩为主, 与燕辽拗拉槽的裂谷活动有密切的成生联系(陈孝德等, 1983, 1992; Qian Xianglin et al., 1987; 侯贵廷等, 1994, 1998, 2001, 2002, 2003)。在华北克拉通东部的鲁西地区也广泛发育大规模的前寒武纪基性岩墙群。前人有过关于鲁西基性岩墙群年龄的报道(王世进, 1990,

1991; 庄育勋等, 1995, 1997), 其形成时代与华北克拉通中北部山西、河北和内蒙古的基性岩墙群形成时代基本一致, 主要形成于中元古代。鲁西基性岩墙群侵位于古元古代和太古宙的火成岩体内, 切割了所有早期的侵入岩体, 并在泰山北部和孟良崮地区被新元古代由砂岩、页岩和灰岩组成的土门群和早寒武纪五山组馒头组白云质灰岩所覆盖, 因此, 从侵位层序上, 鲁西基性岩墙群侵位于中元古代。鲁西基性岩墙群的 Sm-Nd 等时线年龄为 1328 Ma 和 1718 Ma(庄育勋等, 1997), K-Ar 年龄为 1149 Ma, 1209 Ma, 1503 Ma 和 1760 Ma(王世进, 1991; 庄育勋等, 1997)。可见, 鲁西基性岩墙群形成于中元古代, 主要形成于 1100~1800 Ma 之间。除了岩墙群的同位素定年工作以外, 前人没有对鲁西基性岩墙群进行系统深入的研究, 如岩墙群的空间分布、侵位特征和岩石化学特征都需要深入研究。鲁西地区是华北克拉通内燕辽—中条拗拉槽系以东唯一发育大规模中元古代基性岩墙群的地区。鲁西前寒武纪基性岩墙群的研究对于弄清鲁西前寒武纪地质演化、鲁西的隆升历史和与华板块内其他地块的对比以及古大陆的重建都具有重要的理论意义。

1 鲁西基性岩墙群的分布特征

鲁西早前寒武纪结晶基底的 95% 为侵入岩, 其

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40172066、40314141)资助的成果。

收稿日期: 2004-06-05; 改回日期: 2004-11-23; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 侯贵廷, 男, 1964年11月生, 博士, 副教授。主要从事前寒武纪地质学研究。Email: chenxl@pku.edu.cn。

余为绿岩和少量的构造变质杂岩(曹国权,1996)。鲁西早前寒武纪结晶基底岩石主要为新太古代早期的高级角闪岩相灰色片麻岩、新太古代晚期的绿岩建造、TTG 侵入岩、片麻状二长花岗岩和闪长岩-花岗闪长岩系列以及古元古代的二长花岗岩系列(王世进,1990;1991;吕发堂等,1998)。鲁西的早前寒武纪侵入岩可以划分为两个主要岩区:TTG 岩区和片麻状二长花岗岩区,前者主要分布在泰安—蒙阴一线北西向新太古代末发育的韧性剪切带以西,后者主要为片麻状二长花岗岩和闪长岩体,主要分布在该剪切带以东地区,中元古代基性岩墙群在鲁西东部的片麻状二长花岗岩区和西部的 TTG 岩区均有分布。

鲁西中元古代基性岩墙群绝大多数为辉绿岩,另外还有辉长辉绿岩、辉绿玢岩和辉长岩等。鲁西基性岩墙群走向稳定,倾角一般 80° 以上,近直立。鲁西

的北部泰山地区走向一般为北西向,少数为北东向,在鲁西的东部莱芜地区和南部的泗水、蒙阴地区走向一般北北西向或近南北向。鲁西所有的中元古代基性岩墙群均未变形未变质,主要为黑色块状辉绿岩岩墙,宽 $5\sim 80\text{ m}$,一般宽 20 m 左右,长 $1\sim 20\text{ km}$,一般长 10 km 左右。基性岩墙的岩石致密均一,浅表易风化,呈褐色,表明基性岩墙富含镁铁。鲁西基性岩墙群常在一个地区由数条或数十条相邻较近的产状相同的基性岩墙组成,呈群侵位于新太古代结晶基底。按分布地区,可分为北部、东部和南部三个岩墙群,北部岩墙群主要分布在泰山以北山区,即泰安—莱芜以北山区;东部主要分布在莱芜以东的山区;南部主要分布在蒙阴东南的孟良崮地区和泗水以南的四海山一带(图1)。

鲁西基性岩墙群总体上走向稳定,但大多数岩墙在局部都具有张性的不规则边界,是基性岩浆侵

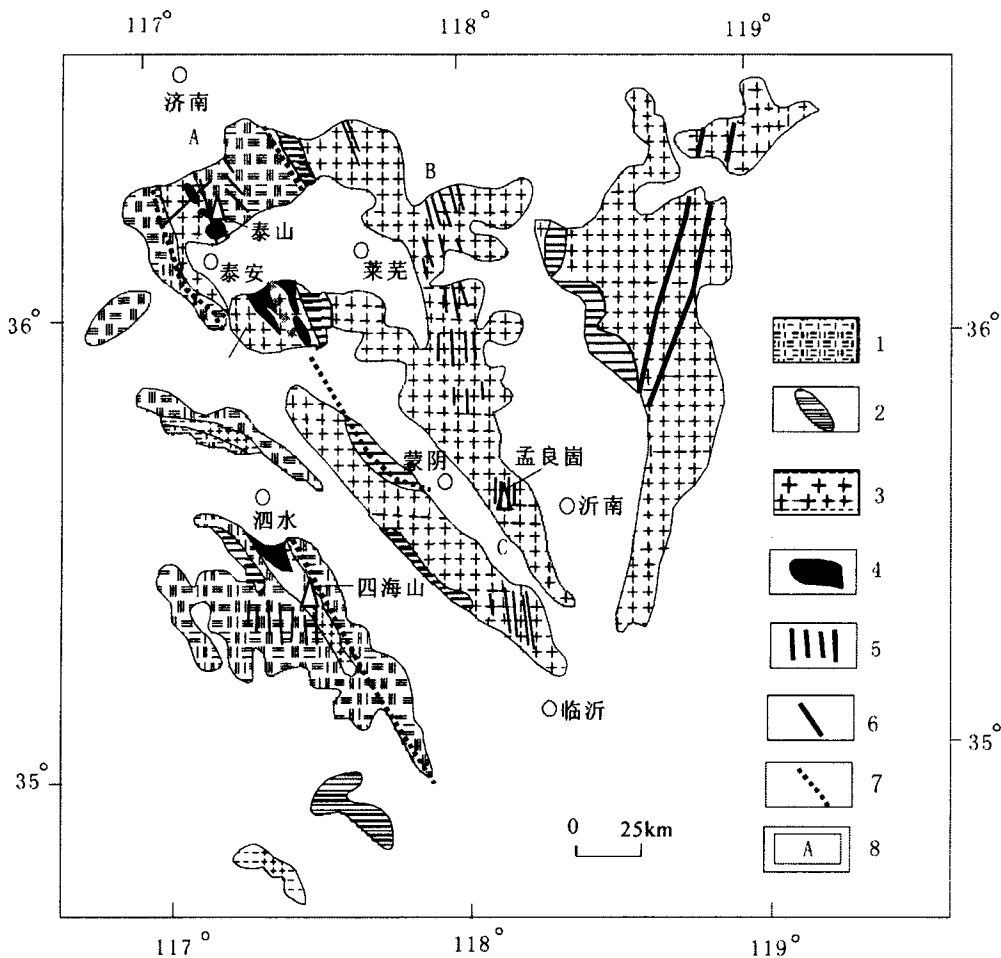


图1 鲁西前寒武纪基性岩墙群分布图

Fig. 1 Sketch showing the distribution of the Precambrian basic dyke swarms in the western Shandong

1—TTG 岩石;2—绿岩;3—片麻状二长花岗岩;4—闪长岩;5—岩墙群;6—古断裂带;7—韧性剪切带;8—采样区

1—TTG rocks; 2—greenstone; 3—gneissoid adamellite; 4—diorite; 5—dyke swarms; 6—fault zone; 7—ductile shear zone; 8—sample area

位到先存的上地壳张性脆性破裂内的产物。有的岩墙表现为雁列式分段的张剪性特征。有的表现为向南分叉,表明岩浆流向从北向南,岩墙边部的定向斑晶指向也是岩浆流向从北向南(图版 I-1~8)。总之,鲁西基性岩墙群是基性岩浆侵位到先存的张性破裂中的产物。

2 岩墙群的岩石及地球化学特征

基性岩墙群是一种深源岩浆浅侵位的构造岩浆活动,作为一种伸展构造,记录了岩墙群侵位时的构造性质和深部物质组成。基性岩墙群一般与裂谷活动密切相关,是代表地幔活动过程的重要构造-热事件(Halls, 1982, 1987; Condie, 1987)。因此,基性岩墙群为研究鲁西前寒武纪深部地质提供了一个很好的窗口。基性岩墙群的岩石化学特征为研究鲁西前寒武纪地质演化提供了深部地质信息。

鲁西基性岩墙群的岩石大多数为致密褐色辉绿岩,发育典型的辉绿结构,斜长石呈自形板条晶交错分布,构成三角形空隙,在空隙中充填它形粒状辉石和黑色细粒状钛铁氧化物等副矿物。斜长石主要为基性斜长石,以拉长石最常见,一般具有完好的双晶,晶带较宽,无环带构造,容易蚀变,遭受绿泥石化和钠黝帘石化。南部的岩墙群普遍发育斜长石斑晶,为辉绿玢岩。

岩墙与围岩接触时,对围岩有轻微的烘烤,岩墙本身都有冷凝边,一般宽5~10 cm,岩石结构从岩墙的边部向中部,依次为玻基斑状结构、隐晶斑状结构(或无斑隐晶结构)、似斑状结构和辉绿结构,在较宽的大岩墙中心甚至会出现辉长结构和斑状结构。基性岩墙的岩石主要由斜长石和辉石组成,斜长石约占矿物总量的50%~60%,辉石含量20%~30%,主要为普通辉石,副矿物主要为磁铁矿和钛铁矿等,约占5%~10%。普通角闪石小于5%,黑云母小于3%,石英小于3%。

通过鲁西基性岩墙群的岩石学和岩石化学的研究可以对鲁西基性岩墙群有一个比较深入的认识,进一步研究基性岩墙群的侵位机制及其形成的大地构造背景。本文根据在鲁西地区的北部、东部和南部三个岩墙群发育区的11个辉绿岩样品的岩石化学分析结果来分析鲁西基性岩墙群的岩石类型、岩石化学特征和大地构造背景。

根据鲁西地区的基性岩墙群的岩石化学分析(表1), $\text{SiO}_2 = 41.55\% \sim 52.23\%$, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4.04\% \sim 5.92\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.69\% \sim 15.44\%$, TFeO

$= 11.47\% \sim 16.45\%$, $\text{MgO} = 4.52\% \sim 7.95\%$,鲁西岩墙群的硅含量表明为基性岩石,比山西的中元古代基性岩墙群更偏基性(侯贵廷等, 2001),钾钠含量少数偏高,铝的含量不高,镁含量并不高,而明显富含铁。根据 $\text{TFeO}-(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})-\text{MgO}$ 图分析,鲁西基性岩墙群属于拉斑玄武岩系列岩石(图2)。

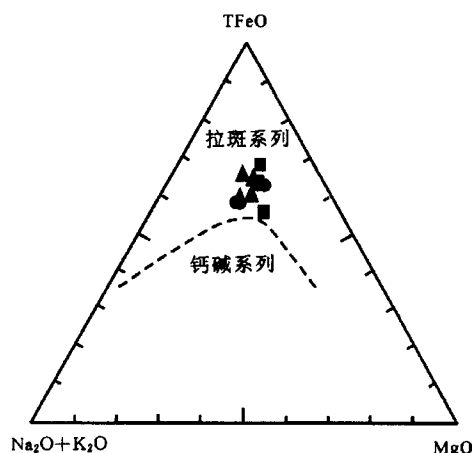


图2 鲁西岩墙群的 $\text{TFeO}-(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})-\text{MgO}$ 图
(据 Condie, 1987)

Fig. 2 $\text{TFeO}-(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})-\text{MgO}$ diagram of the dyke swarms in the western Shandong (after Condie, 1987)

- 泰山地区; ▲—莱芜以东地区;
- 蒙阴东南地区(以下图例相同)
- Taishan area; ▲—east area of Laiwu;
- southeast area of Mengyin

本区基性岩墙群富集大离子亲石元素(LILE), 如: Ba、Rb、K 等, $\text{Ba} = 244.2 \sim 1800 \mu\text{g/g}$, $\text{Rb} = 41.79 \sim 106.9 \mu\text{g/g}$, 略亏损高场强元素(HFSE), 如: Nb、Ta、Zr 等, $\text{Nb} = 6.13 \sim 24.77 \mu\text{g/g}$, $\text{Ta} = 0.66 \sim 3.33 \mu\text{g/g}$, $\text{Zr} = 140 \sim 170.8 \mu\text{g/g}$, 具有大陆裂谷玄武岩的微量元素分配特征(图3)。岩墙群的 Sr 并不富集, 说明地壳的混染作用很小。与山西基性岩墙群相比(侯贵廷等, 2001), 鲁西基性岩墙群比较富集 Cr、Ni, 相对亏损 Zr、Nb, 明显亏损 Th, 基性岩墙群的微量元素特征就是比较亏损高场强元素, 而相对更富集 Cr、Ni, 也说明基性岩浆源区相对比较深, 可能主要来自上地幔(Condie, 1987, 1997)。

根据鲁西基性岩墙群的稀土元素分析, 经 C1 球粒陨石标准化的稀土元素配分模式为轻稀土略富集的右倾曲线(图4)。鲁西地区基性岩墙群的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 在 3.76~8.46 之间, La/Yb 在 3.77~13.60 之间, 属于轻稀土略富集型。

表 1 鲁西基性岩墙群主量(%)、微量和稀土元素($\mu\text{g/g}$)分析数据Table 1 Major(%), trace elements, rare earth elements($\mu\text{g/g}$) data of the mafic dyke swarms in the western Shandong

采样区 采样号	泰山地区(A)			莱芜以东地区(B)				蒙阴东南地区(C)			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	47.75	46.23	48.49	41.55	46.90	48.95	46.45	52.23	51.90	46.29	46.63
Al ₂ O ₃	14.25	13.8	14.02	15.44	14.25	14.93	13.69	14.44	14.25	13.69	13.65
TFeO	14.24	16.45	12.25	16.28	13.37	12.75	15.38	11.47	11.51	14.65	14.33
CaO	9.84	9.32	8.91	5.86	7.92	6.76	7.61	6.95	6.99	8.64	9.37
MgO	5.81	5.73	7.95	5.31	5.89	5.00	5.76	4.52	4.55	6.17	6.43
K ₂ O	1.54	1.31	3.45	2.05	1.94	2.41	1.89	2.11	2.25	1.36	1.56
Na ₂ O	2.79	2.73	1.82	3.51	3.31	3.51	2.92	3.44	3.51	3.31	2.79
MnO	0.20	0.23	0.23	0.20	0.19	0.21	0.22	0.20	0.19	0.19	0.19
TiO ₂	1.59	1.82	0.90	2.97	2.59	2.61	2.80	2.31	2.28	2.87	2.69
P ₂ O ₅	0.33	0.40	0.25	0.76	0.45	0.46	0.61	0.41	0.41	0.36	0.37
LOI	1.66	1.98	1.68	6.03	3.17	2.38	2.64	1.92	2.14	2.47	2.00
Sr	223.9	274.0	348.3	568.4	513.2	546.8	338.3	511.2	503.6	507.4	480.1
Ba	244.2	394.2	1800	786.4	825.1	746.1	860.1	849.6	784.5	455.2	432.1
Co	51.00	53.13	46.46	56.71	52.26	52.38	45.42	38.81	40.49	52.03	53.71
Ni	98.18	96.07	104.5	84.04	125.9	85.85	69.13	73.20	82.49	72.32	86.27
Sc	25.33	38.46	42.61	26.72	33.62	32.24	21.13	15.94	19.28	17.80	21.13
V	295.7	323.4	255.9	277.66	283.7	260.6	285.9	222.6	215.9	339.8	337.1
Cu	104.0	61.13	51.64	37.21	87.71	48.98	38.51	46.73	46.36	53.46	53.83
Zn	112.1	130.0	192.3	151.7	158.4	140.4	138.9	125.4	130.1	129.8	115.2
Cr	86.70	94.12	241.4	58.15	197.2	121.0	66.12	113.3	106.7	64.60	80.75
Zr	169.3	166.3	129.1	181.2	170.8	194.6	167.1	161.1	153.6	155.1	140.0
Rb	52.39	47.09	140.3	55.87	55.89	106.9	114.0	41.79	68.34	70.65	69.16
Y	19.95	29.68	19.48	21.12	23.70	24.97	31.23	20.09	32.85	24.68	20.20
Nb	8.167	7.687	6.130	9.440	17.52	21.52	21.21	16.11	24.77	15.31	11.02
Ta	3.33	0.66	1.32	0.76	1.96	3.05	1.62	1.21	2.29	1.00	0.76
Pb	12.36	9.56	27.17	16.20	17.13	14.46	23.40	17.49	17.03	13.37	14.29
Th	2.64	2.71	2.38	1.23	2.92	3.58	3.75	2.65	4.21	2.52	2.11
U	0.54	0.61	0.62	0.42	0.66	0.86	0.93	0.62	0.97	0.61	0.52
La	13.96	17.08	8.98	15.18	26.68	30.98	31.95	25.43	39.08	21.38	16.42
Ce	31.22	37.89	20.93	36.77	63.81	73.22	73.74	59.66	95.08	49.96	39.75
Pr	3.95	5.09	2.86	5.07	8.77	9.97	9.69	8.04	13.03	6.92	5.45
Nd	17.22	23.12	12.63	24.37	39.43	44.57	40.89	35.63	57.51	31.98	25.11
Sm	3.85	5.28	2.96	5.32	7.73	8.43	7.67	6.83	11.08	6.80	5.35
Eu	1.18	1.70	1.14	1.95	3.56	3.78	2.92	3.35	5.37	2.52	1.97
Gd	3.80	5.35	3.23	4.94	6.75	7.32	7.11	5.89	9.37	6.15	4.99
Tb	0.66	0.95	0.58	0.79	0.99	1.09	1.11	0.85	1.37	0.98	0.77
Dy	3.86	5.62	3.45	4.33	5.07	5.39	6.07	4.41	7.02	5.21	4.12
Ho	0.76	1.13	0.73	0.82	0.93	0.98	1.19	0.79	1.28	0.95	0.77
Er	2.11	3.14	2.07	2.24	2.34	2.50	3.20	2.01	3.22	2.50	1.97
Tm	0.38	0.56	0.39	0.39	0.38	0.41	0.56	0.33	0.54	0.42	0.34
Yb	2.27	3.31	2.38	2.29	2.18	2.37	3.36	1.87	3.08	2.48	1.98
Lu	0.32	0.48	0.35	0.33	0.31	0.34	0.50	0.27	0.44	0.34	0.28
ΣREE	85.54	110.69	62.67	104.79	168.93	191.35	189.96	155.36	247.47	138.59	109.27
ΣLREE/ΣHREE	5.04	4.39	3.76	5.5	7.91	8.38	7.22	8.46	8.4	6.29	6.18
La/Yb	6.15	5.16	3.77	6.63	12.24	13.07	9.51	13.60	12.69	8.62	8.29

注:由北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室测定,常量元素利用 ICP-AES(等离子发射光谱)测定,微量和稀土元素利用 AXIOM ICP-MS(高分辨多接收器等离子质谱)测定。

鲁西基性岩墙群的 δEu 值在 0.96~1.62 之间。鲁西泰山北部地区的基性岩墙群的 δEu 一般在 1 左右 (0.96~1.1), 无 Eu 异常, 而在鲁西莱芜以东和

蒙阴南部地区的岩墙群 δEu 值在 1.1~1.62 之间, 尤其南部地区多数在 1.4~1.62 之间, 有比较明显的 Eu 正异常, 南部的岩墙群大多数都发育斜长

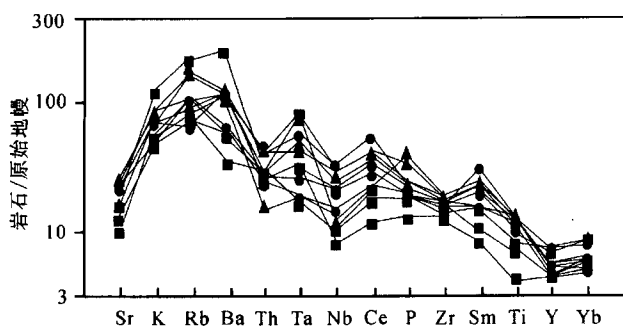


图3 鲁西岩墙群微量元素的原始地幔标准化图
Fig. 3 Primitive mantle-normalized trace element patterns for the dyke swarms in the western Shandong

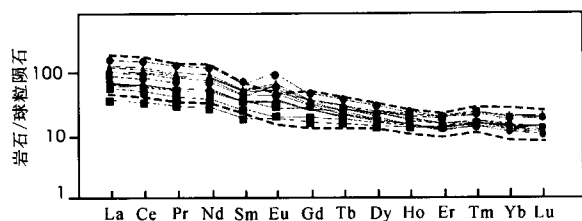


图4 鲁西岩墙群和熊耳群火山岩稀土元素的球粒陨石标准化配分模式图
Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of the dyke swarms in the western Shandong and volcanic rocks of the Xiong'er Group

●, ■—鲁西基性岩墙群; ———熊耳群火山岩
●, ■—The dyke swarms in the western Shandong;
———volcanic rocks of the Xiong'er Group

石斑晶,是引起Eu正异常的主要因素。基性岩墙群是基性岩浆快速侵位到先存裂隙内的产物(Pollard, 1987;侯贵廷等,1998,2002,2003),因此,与围岩的交代作用很弱,地壳混染不是影响岩墙群的岩石化学特征的主要机制,可以说基性岩墙群的地球化学特征基本上反映了岩浆源区的特征(李江海等,1997;马芳等,2000)。鲁西基性岩墙群的稀土配分曲线特征反映源区为略富集型地幔。鲁西基性岩墙群的稀土元素与山西基性岩墙群的稀土元素配分模式基本相似。这说明两个地区的基性岩墙群可能是同源的,都来自略富集型地幔。

3 岩墙群形成的地构造背景分析

基性岩墙群作为一种伸展构造的标志,是地壳伸展作用下深源基性岩浆快速侵位到先存破裂带形成的。深源岩浆浅侵位的基性岩墙群提供了深部物

质组成和岩浆侵位的动力学背景等方面的信息(Condie,1987;陈孝德等,1994;邵济安等,2001)。因此,可以通过岩墙群的岩石化学所携带的信息推测岩墙群侵位的大地构造背景和岩浆来源(Parker, 1990)。

根据鲁西基性岩墙群的岩石化学分析结果,利用岩浆岩构造环境图解分析,可以探讨本区基性岩墙群形成的地构造背景和岩浆来源。根据 Al_2O_3 - MgO - $TFeO$ 三角图解分析,本区基性岩墙群均落在大陆裂谷构造环境(图5)。Zr/Y-Zr图解分析表明本区基性岩墙群都落在板内玄武岩范围(图6)。综合分析,可见鲁西中元古代基性岩墙群属于板内大陆裂谷拉斑玄武岩系列,其成因与大陆裂谷构造环境密切相关。

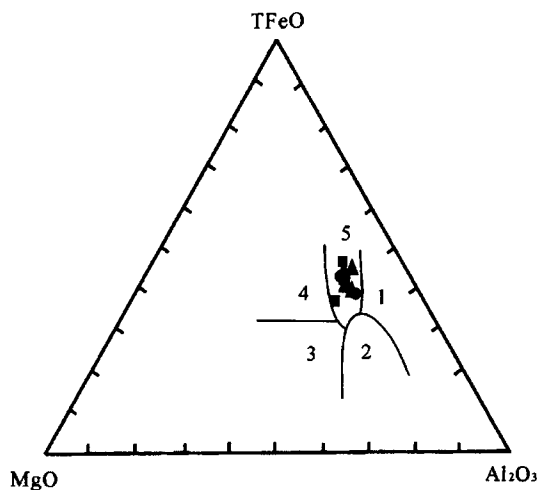


图5 鲁西岩墙群的 Al_2O_3 - MgO - $TFeO$ 图
(据Condie,1987)

Fig. 5 Al_2O_3 - MgO - $TFeO$ diagram of the dyke swarms in the western Shandong(after Condie,1987)
1—冰岛类型;2—造山带;3—大洋中脊;4—大洋岛;5—大陆裂谷
1—Iceland type; 2—orogen; 3—ridge of ocean;
4—oceanic island; 5—continental rift

根据Y/Nb-Zr/Nb和Th/Yb-Ta/Yb图解分析(图7),鲁西基性岩墙群一般投到距富集地幔端元比较近的区域,部分界于富集地幔和亏损地幔之间,可见本区岩墙群的岩浆来源不是典型的富集型地幔,而是PM型地幔向富集地幔过渡的类型,是略富集地幔,与山西中元古代基性岩墙群相同,表明两地的基性岩墙群可能是同源的。根据Th-Ta-La/Yb图解分析(Condie, 1997),鲁西基性岩墙群位于PM型地幔和富集地幔EM1及EM2型之间,进一步说明鲁西基性岩墙群的岩浆源区属于PM型地幔向富

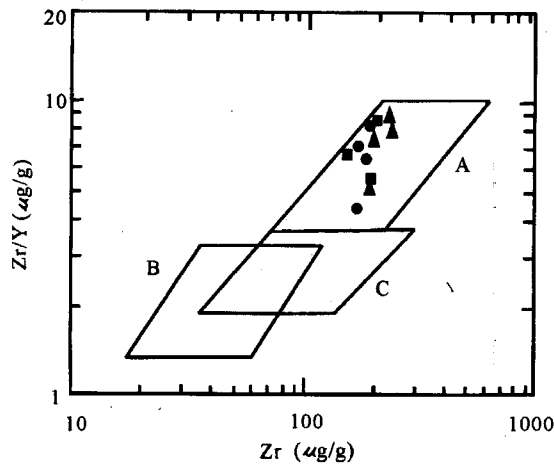


图6 鲁西岩墙群的Zr/Y-Zr图(据Condie, 1987)

Fig. 6 Zr/Y-Zr diagram of dyke swarms in the western Shandong (after Condie, 1987)

A—板内玄武岩; B—岛弧玄武岩; C—大洋中脊玄武岩
A—Intraplate basalt; B— island arc basalt;
C—mid-ocean ridge basalt

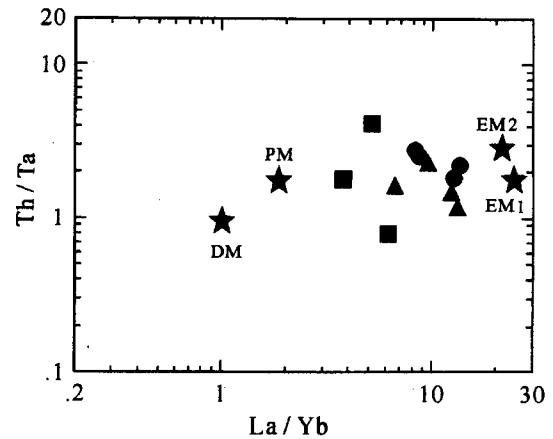
图8 鲁西基性岩墙群Th/Ta-La/Yb图
(据Condie, 1997)

Fig. 8 Th/Ta-La/Yb diagram of some representative basic dykes in the western Shandong (after Condie, 1997)

DM—亏损地幔; PM—普通地幔; EM1—富集地幔1型;
EM2—富集地幔2型

DM—Depleted mantle; PM—prevalent mantle; EM1—enriched mantle type 1; EM2—enriched mantle type 2

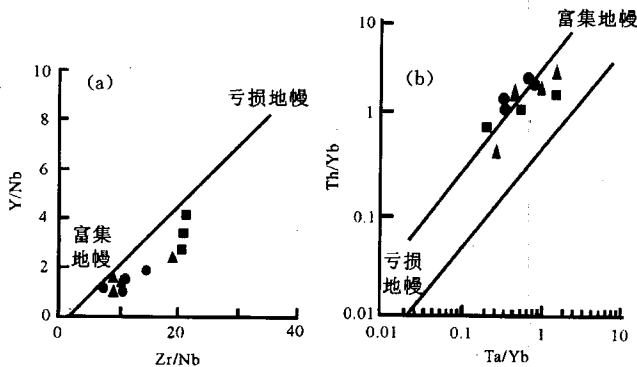


图7 Y/Nb-Zr/Nb和Th/Yb-Ta/Yb图

(据Wilson, 1989)

Fig. 7 Y/Nb-Zr/Nb and Th/Yb-Ta/Yb diagrams (after Wilson, 1989)

集地幔过渡的略富集地幔(图8)。鲁西中元古代基性岩墙群的地球化学特征反映了华北克拉通中元古代地幔的特征。中元古代正是华北克拉通的地幔从亏损地幔(DM)向富集地幔(EM)过渡的时期(刘勇胜等, 1998; 翟明国等, 2000; 赵太平, 2000)。

另外, 中生代基性岩墙群反映岩浆来源于典型的富集地幔, 这反映了华北克拉通的地幔从前寒武纪至中生代有向逐渐富集的演化趋势(翟明国等, 2000; 邵济安等, 2001a; 2001b; 2002; 侯贵廷等, 2001; 耿元生等, 2002)。

鲁西中元古代基性岩墙群富集亲石大离子元

素, 而亏损高场强元素, 轻稀土富集向右倾的配分模式曲线, 与板内大陆裂谷拉斑玄武岩的微量元素和稀土元素配分曲线是相似的(Condie, 1987; 邵济安等, 2001; 侯贵廷等, 2001), 表明本区基性岩墙群的形成与板内大陆裂谷有一定的成生联系。

4 岩墙群的成因机制讨论

基性岩墙群的成因机制分析对于前寒武纪伸展构造和构造演化的研究具有重要的理论意义。本节通过鲁西中元古代基性岩墙群的分布、构造特征、区域古构造应力场分析和岩石化学分析以及和山西地块的中元古代基性岩墙群的对比分析来综合探讨岩墙群的成因机制。

鲁西中元古代基性岩墙群与山西地块的同期发育的基性岩墙群一样, 作为华北克拉通内部醒目前寒武纪岩浆-构造标志, 在构造格局、构造应力场、地球化学特征和大地构造成因环境方面, 与同期活动的拗拉槽系有一定的成生联系(侯贵廷等, 1998, 2001, 2002)。

中元古代华北克拉通处于一个强烈伸展的大地构造环境, 在华北克拉通的陆缘和大陆内部发育一系列的拗拉槽裂陷活动, 如: 白云鄂博—渣尔泰拗拉槽、燕辽—中条拗拉槽系和徐淮拗拉槽(何海清等,

1998;李江海等,2001;邵济安等,2002a)。在这些拗拉槽之间的地块内发育大量以北北西向为主的同样也代表伸展作用的基性岩墙群,给我们展示了中元古代华北克拉通大规模的伸展构造格局(图9)。

山西地块基性岩墙群的流动构造指示岩墙向北西侵位(侯贵廷等,2003),而鲁西基性岩墙群的流动构造(包括岩墙的分叉、斑晶和捕虏体的定向等)指示岩浆流向为从北北西向南南东侵位(侯贵廷等,地质学报,待刊),均以 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的仰角侵位,反映华北克拉通基性岩墙群具有从燕辽—中条拗拉槽系深部向北北西和南南东侵位的特点。鲁西基性岩墙群的形态特征反映先存裂隙为张性,因此岩墙的走向指示主压应力方向,垂直于岩墙的走向为伸展方向。从鲁西和山西基性岩墙群的空间分布分析,中元古代华北克拉通的区域伸展方向为北东向,区域挤压应力方向为北西向。鲁西基性岩墙群的走向在北部为北北西向,在南部为近南北向,与鲁西隆起区的西北侧的燕辽—中条拗拉槽系和东南侧的徐淮拗拉槽扩张伸展作用有一定的空间上和区域应力场上的联系,两个拗拉槽的伸展作用导致在鲁西地区产生了来自燕辽—中条拗拉槽系北西向的挤压和徐淮拗拉槽近南北向的挤压,从而在鲁西形成了北西向和近南北向的张性裂隙,为鲁西基性岩墙群提供了侵位空间和力学条件。鲁西基性岩墙群形成的构造应力场与华北克拉通中元古代区域构造应力场的模拟结果是吻合的,表明鲁西基性岩墙群与中元古代的拗拉槽形成于统一的构造应力场(侯贵廷等,1998,2002)。

另外,华北克拉通的中元古代拗拉槽内均发育了一套火山—沉积岩系,如:燕辽—中条拗拉槽系的燕辽拗拉槽内的大红峪组和中条拗拉槽(亦称“晋陕裂陷槽”)内的熊耳群(赵太平等,2002;郁建华,1990;刘勇胜等,1998)。华北克拉通中元古代拗拉槽内的火山岩主要由玄武质到流纹质火山岩系组成,以中基性火山岩为主,一般富钾和铁,铝、镁和钙的含量不高,富含大离子亲石元素(LILE,如:K、Rb、Ba)和轻稀土元素(LREE),相对亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti),属于板内大陆拉斑玄武岩系列。以熊耳群火山岩为例,镁铁质火山岩的稀土元素配分与鲁西和山西基性岩墙群的稀土元素配分模式十分吻合,均属于轻稀土富集的右倾曲线,说明岩浆来源有一定的同源性,均来自富集地幔(赵太平,2002;侯贵廷等,2001)(图4)。这表明鲁西基性岩墙群不但在空间分布和应力场方面与燕辽—中条拗拉槽系有一

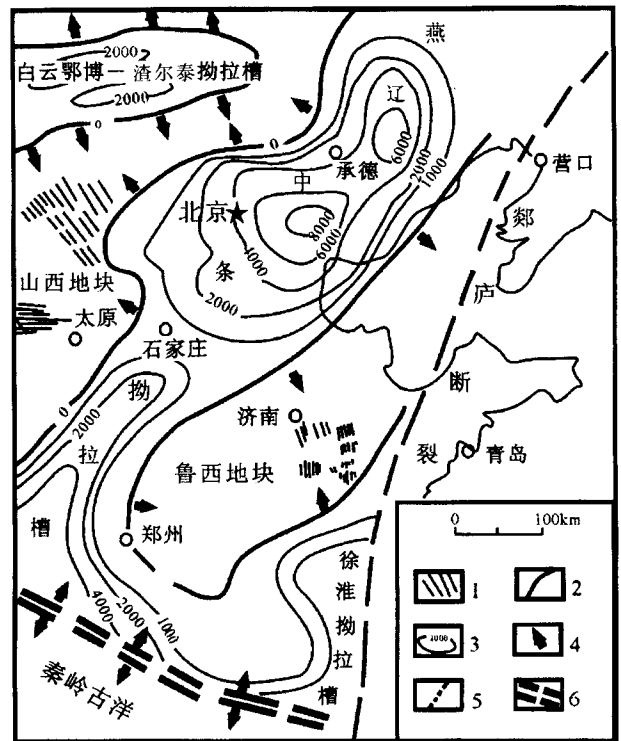


图9 华北克拉通中元古代岩墙群和拗拉槽分布图
(据何海清等,1998,增加岩墙群)

Fig. 9 The distribution of Mesoproterozoic dyke swarms and aulacogens in the North China Craton
(after He Haiqing, 1998, adding the dyke swarms)

- 1—基性岩墙群;2—拗拉槽沉积尖灭线;3—沉积厚度;
4—作用力方向;5—断裂带;6—古大洋
1—Mafic dyke swarms; 2—outline of aulacogen sediments;
3—thickness of sediments; 4—force direction;
5—fault zone; 6—paleo-ocean

定的联系,而且在岩石化学特征和岩浆来源方面也有一定的相关联系。华北克拉通在太古宙上地幔是亏损的,从中元古代开始,华北克拉通的火山岩表现出略富集地幔源区的特征(翟明国等,2000;赵太平,2002)。这说明在中元古代华北克拉通内发育的两种大型伸展构造——拗拉槽和基性岩墙群具有同源性,均来自略富集型地幔。

虽然鲁西基性岩墙群在空间分布上,不像山西岩墙群距燕辽—中条拗拉槽系很近,而是与燕辽—中条拗拉槽系有一定的距离。这是因为在华北克拉通东部中、新生代发育了华北盆地——一个拉分盆地,大约有50%的伸展量,即鲁西地区向南伸展了大约200km(陆克政等,1997;侯贵廷等,1998)。若去掉鲁西地块向南的伸展量,即向北恢复到中生代以前的位置,鲁西基性岩墙群距燕辽—中条拗拉槽系还

是比较近的。

5 结论

鲁西地区是华北克拉通内燕辽一中条拗拉槽系以东唯一发育大规模中元古代基性岩墙群的地区。鲁西中元古代基性岩墙群以辉绿岩为主,未变形未变质,岩墙群的走向为北西向和北北西向(近南北向)。本区岩墙群明显富铁、富钾钠,铝镁含量并不高,属于板内大陆裂谷拉斑玄武岩系列岩石。这些基性岩墙群富集大离子亲石元素(LILE),略亏损高场强元素(HFSE),比较富集Cr、Ni,明显亏损Th。鲁西基性岩墙群的稀土元素配分模式为轻稀土略富集的右倾曲线。岩石学和地球化学特征反映鲁西基性岩墙群形成于板内大陆裂谷伸展构造环境。

从鲁西基性岩墙群的时空分布、构造特征、侵位特征、地球化学、岩浆源区和伸展构造应力场分析,鲁西基性岩墙群同山西基性岩墙群一样,与燕辽一中条拗拉槽系有一定的成生联系,是中元古代华北克拉通大规模伸展作用形成的非造山岩浆活动的产物。中元古代华北克拉通处于一个古大陆广泛伸展的时期,横贯华北克拉通中部发育了燕辽一中条拗拉槽系,并在华北克拉通的北缘和东南缘分别发育了白云鄂博—渣尔泰拗拉槽和徐淮拗拉槽。同时期,这些拗拉槽之间的陆块已经具备了刚性特征,在拗拉槽扩张作用下,沿陆块受最大压应力的方向发育了大规模的张性破裂群,来自拗拉槽深部的基性岩浆侵位到先存张性破裂群内形成了基性岩墙群。由于缺少拗拉槽深部岩浆活动的同位素信息,基性岩墙群的侵位与拗拉槽的深部岩浆活动关系有待从同位素示踪方面进一步深入研究。

致谢:感谢加拿大多伦多大学地质学系教授Henry C. Halls与作者进行了有益的探讨,杨默涵和华金玉同学参加了野外工作。感谢两位评审人提出宝贵意见。

参 考 文 献

- 曹国权. 1996. 鲁西早前寒武纪地质. 北京:地质出版社,78~89.
- 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.
- 陈孝德,史兰斌,贾三发. 1992. 华北元古代基性岩墙群研究. 地震地质, 14(4):351~357.
- 陈孝德,史兰斌. 1994. 伸展构造中的基性岩墙群. 见:伸展构造研究(钱祥麟主编). 北京:地质出版社,71~74.
- 耿元生,万渝生,沈其韩. 2002. 华北克拉通早前寒武纪基性火山作用与地壳增生. 地质学报, 76(2):199~208.
- 何海清,王兆云,韩品龙. 1998. 华北地区构造演化对渤海湾油气形成和分布的控制. 地质学报, 72(4):313~322.
- 侯贵廷,穆治国. 1994. 华北克拉通晚前寒武纪镁铁质岩墙群 K-Ar 年龄及其地质意义. 华北地质矿产杂志, 9(3):267~270.
- 侯贵廷,张臣,钱祥麟,等. 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.
- 侯贵廷,钱祥麟,宋新民. 1998. 渤海湾盆地形成机制研究. 北京大学学报(自然科学版), 34(4):503~509.
- 侯贵廷,李江海,钱祥麟,等. 2000. 华北克拉通中部中元古代岩墙群的古地磁学研究及其地质意义. 中国科学(D辑), 30(6):602~608.
- 侯贵廷,李江海,钱祥麟. 2001. 晋北地区中元古代岩墙群的地球化学特征和大地构造背景. 岩石学报, 17(3):352~357.
- 侯贵廷,钱祥麟,李江海. 2002. 华北克拉通中元古代岩墙群形成的构造应力场数值模拟. 北京大学学报(自然科学版), 38(4):492~496.
- 侯贵廷,李江海, Halls H C, 等. 2003. 华北晚前寒武纪镁铁质岩墙群的流动构造及侵位机制. 地质学报, 77(2):210~216.
- 李江海,何文渊,钱祥麟. 1997. 元古代基性岩墙群的成因机制、构造背景及其古板块再造意义. 高校地质学报, 3(3):272~281.
- 李江海,侯贵廷,黄雄南,等. 2001. 华北克拉通对前寒武纪超大陆旋回的基本制约. 岩石学报, 17(2):177~186.
- 刘勇胜,高山,骆庭川. 1998. 华北克拉通基性火山岩高场强元素对 A_K-Pt 界限及新生代地幔源区特征的示踪. 地球科学, 23(5):468~474.
- 陆克政,漆家福,戴俊生,等. 1997. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式. 北京:地质出版社,87~209.
- 陆松年,杨春亮,李怀坤,等. 2002. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆. 地质前缘, 9(4):225~233.
- 吕发堂,高绍强. 1998. 泰山地区晚太古代“框架侵入岩”的地质特征及稀土地球化学演化. 中国区域地质, 17(1):9~15.
- 马芳,穆治国,李江海. 2000. 前寒武纪基性岩墙群的地球化学特征与岩石成因讨论. 地质地球化学, 28(4):58~63.
- 邵济安,李献华,张履桥,等. 2001. 南口—古崖居中生代双峰式岩墙群形成机制的地球化学制约. 地球化学, 30(6):517~524.
- 邵济安,张履桥,李大明. 2002a. 华北克拉通元古代的三次伸展事件. 岩石学报, 18(2):152~160.
- 邵济安,张履桥. 2002b. 华北北部中生代岩墙群. 岩石学报, 18(3):312~318.
- 王世进. 1990. 鲁西地区前寒武纪侵入岩. 山东地质, 6(1):59~80.
- 王世进. 1991. 鲁西地区前寒武纪侵入岩期次划分及基本特征. 中国区域地质, 4:298~307.
- 郁建华. 1990. 北京及附近元古宙裂谷槽中球斑花岗岩套的地球化学. 地质学报, 4:322~335.
- 翟明国,卞爱国,赵太平. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末—中元古代裂解. 中国科学(D辑), 30(增刊):129~137.
- 赵国春,孙敏. 2002. 华北克拉通基底构造单元特征及古元古代拼合. 中国科学(D辑), 32(7):538~549.
- 赵太平,金成伟,翟明国,等. 2002. 华北陆块南部熊耳群火山岩的地球化学特征与成因. 岩石学报, 18(1):59~69.
- 庄育勋,王新社,徐洪林,等. 1995. 泰山地区新太古代—古元古代地壳演化研究的新进展. 中国区域地质, 4:360~367.

庄育勋,王新社,徐洪林,等. 1997. 泰山地区早前寒武纪主要地质事件与陆壳演化. 岩石学报, 13(3):313~366.

References

- Cao Guoquan. 1996. Early Precambrian geology in the western Shandong. Beijing: Geological Press, 78~89 (in Chinese).
- 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 Xiaode, Shi Lanbin, Jia Sanfa. 1992. Study on the Proterozoic dyke swarm in North China. Seismology and Geology, 14(4): 351~357 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaode, Shi Lanbin. 1994. Basic dyke swarms in extensional structures. In: Qian Xianglin, ed. Study on extensional structures. Beijing: Geological Press, 71~74 (in Chinese with English abstract).
- Condie K C, Bobrow D J, Card K D. 1987. Geochemistry of Precambrian mafic dykes from the Southern Superior Province. In Halls H C, Fahrig W F eds. Mafic dyke swarms. Geological Association of Canada Special Paper, 34, 95~108.
- Condie K C. 1997. Sources of Proterozoic mafic dyke swarms: constraints from Th/Ta and La/Yb ratio. Precambrian Research, 81:3~14.
- Condie K C. 2000. Episodic continental growth model: after thoughts and extensions. Tectonophysics, 322:153~162.
- Fahrig W F. 1987. The tectonic settings of continental mafic dyke swarms: failed arm and early passive margin. In: Halls H C, Fahrig W F, eds. Mafic dyke swarms. Geological Association of Canada Special Paper, 34:331~348.
- Geng Yuansheng, Wan Yusheng, Shen Qihan. 2002. Early Precambrian basic volcanism and crustal growth in the North China Craton. Acta Geologica Sinica, 76(2): 199~208 (in Chinese with English abstract).
- Haffmann A W. 1997. Early evolution of continents. Science, 275: 498~499.
- Halls H C. 1982. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic processes. Geoscience Canada, 9(3): 145~154.
- Halls H C. 1987. Dyke swarms and continental rifting: some concluding remarks. In: Halls H C, Fahrig W F eds. Mafic Dyke Swarms. Geological Association of Canada Special Paper, 34:5~24.
- Halls H C, Zhang B. 2003. Crustal uplift in the southern Superior Province, Canada, revealed by paleomagnetism. Tectonophysics, 362(1~4):123~136.
- He Haiqing, Wang Zhaoyun, Han Pinlong. 1998. The evolution of North China Craton and its control to the origin and distribution of petroleum in Bohai Sea. Acta Geologica Sinica, 72(4): 313~322 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Mu Zhiguo. 1994. K-Ar ages and their geological significance of late-Precambrian mafic dyke swarms in North China Craton. Journal of Geology and Mineral Resources of North China. 9(3):309~314 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Li Jianghai, H C Halls, et al. 2003. The flow structures and mechanics of Late Precambrian mafic dyke swarms in North China Craton. Acta Geologica Sinica, 77(2): 210~216 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Li Jianghai, Qian Xianglin, et al. 2001. The paleomagnetism and geological significance of Mesoproterozoic dyke swarms in the central North China Craton. Science in China (Series D), 44(2):165~192.
- Hou Guiting, Li Jianghai, Qian Xianglin. 2001. Geochemical characteristics and tectonic setting of Mesoproterozoic dyke swarms in northern Shanxi. Acta Petrologica Sinica. 17(3): 352~357 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Qian Xianlin, Li Jianghai. 2002. The simulation of Mesoproterozoic tectonic stress field forming mafic dyke swarms in the Central North China Craton. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 38(4): 492~496 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Zhang Chen, Qian Xianglin. 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, Huang Xiongnan. 2001. The constraint for the supercontinental cycles: evidence from Precambrian geology of North China Block. Acta Petrologica Sinica, 17(2):177~186 (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 University, 3(3): 272~281 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Luo Tingchuan. 1998. HFSE in the mafic volcanic rocks in North China Craton: implications for the Ar-Pt boundary and Cenozoic basalts mantle source. Earth Science, 23(5): 468~474 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fatang, Gao Shaoqiang. 1998. Geological features and REE geochemical evolution of Late Archean "Framework intrusive rocks" in the Mount Taishan area. Regional Geology in China, 17(1):9~15 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Yang Chunliang, Li Huaikun. 2002. North China continent and Columbia supercontinent. Earth Science Frontiers, 9(4):225~233 (in Chinese with English abstract).
- Ma Fang, Mu Zhiguo, Li Jianghai. 2000. The geochemistry and petrological origin discussion of Precambrian basic dyke swarms. Geology-geochemistry, 28(4):58~63 (in Chinese with English abstract).
- Parker A J, Rickwood P C, Tucker D H. 1990. Mafic dykes and emplacement mechanisms. International Geological Correlation Program Project, 257.
- Pollard D D. 1987. Elementary fracture mechanism applied to the structural interpretation of dykes. In: Halls H C, Fahrig W F, eds. Mafic dyke swarms. Geological Association of Canada Special Paper, 34, 5~24.

- Qian Xianglin, Chen Yaping. 1987. Late Precambrian mafic dyke swarms of the North China Craton, In: Halls H C, Fahrig W F, eds. Mafic dyke swarms. Geological Association of Canada. Special Paper, 34, 385~392.
- Shao Ji'an, Li Xianhua, Zhang Luqiao, et al. 2001. Geochemical condition for genetic mechanism of the Mesozoic bimodal dike swarms in Nankou—guyaju. *Geochimica*, 30(6): 517~524 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhang Luqiao. 2002. Mesozoic dyke swarms in the north of North China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 312~318 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhang Luqiao, Li Daming. 2002. Three Proterozoic extensional events in North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 152~160 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shijin. 1990. The Precambrian intrusive rocks in the western Shandong, China. *Geology in Shandong*, 6(1): 59~80 (in Chinese).
- Wang Shijin. 1991. Stage and phase division and basic features of Precambrian intrusive rocks in the western Shandong area. *Regional Geology in China*, (4): 298~307 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shijin. 1993. Early Precambrian geological tectonic in the western Shandong. *Regional Geology in China*, 3: 216~222 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinshe, Zhuang Yuxun, Xu Honglin, et al. 1999. The implication of terminal Archean ductile shearing in continental crustal evolution of the Taishan Mountain. *Regional Geology in China*, 18(2): 168~174 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jianhua. 1990. Geochemistry of rapakivi granite in the proterozoic aulacogen in the Beijing and neighbor area. *Acta Geologica Sinica*, 4: 322~335 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Bian Aiguo, Zhao Taiping. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archean and its breakup during Late Proterozoic and Mesoproterozoic. *Science in China(Series D)*, 43(Supp): 219~232.
- Zhao Guochun, Sun Min. 2002. The characteristic of basement tectonic units in North China Craton and Paleoproterozoic assembly. *Science in China(D)*, 32(7): 538~549 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Jin Chengwei, Zhai Mingguo, et al. 2002. Geochemistry and petrogenesis of the Xiong'er Group in the southern regions of the North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 18(1): 59~69 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Yuxun, Wang Xinshe, Xu Honglin, et al. 1997. Main geological events and crustal evolution in Early Precambrian of Taishan region. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3): 313~366 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Yuxun, Xu Honglin, Wang Xinshe, et al. 1995. New advances in the study of Neoproterozoic—Paleoproterozoic crustal evolution in the Taishan area. *Regional Geology in China*, (4): 360~367 (in Chinese with English abstract).

图版说明

鲁西地区中元古代基性岩墙群的流动构造(图1)。

1. 张性角砾岩(采样地点:蒙阴)。
2. 圆柱状节理(采样地点:泰山)。
3. 圆柱状节理横截面(采样地点:泰山)。
4. 流动冲痕(采样地点:四海山)。
5. 流动滑痕(采样地点:莱芜东)。
6. 定向宏观捕虏体(采样地点:泰山)。
7. 定向微观捕虏体(采样地点:莱芜东)。
8. 定向斑晶(采样地点:莱芜东)。

The Precambrian Basic Dyke Swarms in the Western Shandong Province

HOU Guiting¹⁾, LI Jianghai¹⁾, JIN Aiwen²⁾, QIAN Xianglin¹⁾

1) *The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Earth and Space Sciences School, Peking University, Beijing, 100871, China;* 2) *Earth Science School, Science and Technique University of Shandong, Tai'an, 271019*

Abstract

A lot of Meso-Proterozoic undeformed and unmetamorphic NW-trending or N-trending mafic dyke swarms develop in the western Shandong, which are conspicuous extensional structures emplacing into Early Precambrian crystal basement. The mafic dyke swarms in the western Shandong are an unorogenic igneous activity as the tholeiite series basalt in the intraplate continental rift environment relative to the continental rifting. The dyke swarms are enriched in LILE, relatively depleted in HFSE, enriched in Cr and Ni and intensively depleted in tholeiite. The mode of REE with enriched LREE is right-dip curve. The trace elements and rare earth elements show that the magma source of the mafic dyke swarms in the western Shandong are from enriched mantle. The mafic dyke swarms in the western Shandong is with the original relation to the Yanliao—Zhongtiao aulacogens based on the distribution, structural character, geochemistry, magma sources and paleotectonic stress field.

Key words: mafic dyke swarms; geochemistry; tholeiite basalt; intraplate continental rift; extensional structures; Yanliao—Zhongtiao aulacogens

