

# 华北克拉通 1.8Ga 镁铁质岩墙群的地球化学特征及其地质意义:以晋冀蒙交界地区为例\*

彭澎<sup>1</sup> 翟明国<sup>1</sup> 张华锋<sup>1</sup> 赵太平<sup>2</sup> 倪志耀<sup>3</sup>

PENG Peng, ZHAI MingGuo, ZHANG HuaFeng, ZHAO TaiPing and NI ZhiYao

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640

3. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059

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

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2003-04-10 收稿, 2004-01-14 改回.

Peng P, Zhai MG, Zhang HF, Zhao TP and Ni ZY. 2004. Geochemistry and geological significance of the 1.8 Ga mafic dyke swarms in the North China Craton: an example from the juncture of Shanxi, Hebei and Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3):439-456

**Abstract** The 1.8 Ga dyke swarms in the North China Craton are among the largest ones in China. In the juncture of Shanxi, Hebei, and Inner-Mongolia, they presented as NNW and EW-oriented vertical to subvertical dykes with chilled margins from a uniform tectonic setting. The dykes are up to tens of kilometers in length, and 0.5 to 100 m in width. Three dyke swarms, S-I, S-II, and S-EW, are identified. They consist of clinopyroxene and plagioclase as rock forming minerals, and accessory amphibole, Fe-Ti oxides, biotite, apatite, alkaline-feldspar, and quartz as minor minerals. S-II is characterized by olivine phenocrysts and orthopyroxene + amphibole rim structures around olivine and clinopyroxene. S-I is tholeiite relatively high in MgO, with relatively low FeO (total) - TiO<sub>2</sub> - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; while S-II varies in composition from alkaline to sub-alkaline high-Fe basalt, with high FeO (total) - TiO<sub>2</sub> - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. S-EW includes high-Fe tholeiite basalt and andesite. All dykes have high total rare earth elements, and the light rare earth elements in dykes are enriched. They are relatively enriched in Ba, K, and P, and depleted in Nb and Ta in primitive mantle normalized diagrams. S-II and S-EW are depleted in Sr. S-I exhibits various degrees of partial melting, with slight fractionation and crustal assimilation. And S-II shows an iron-enriched and silica-poor trend (the Fenner trend) and crustal assimilation. While S-EW performs a silica-rich and iron-poor trend (the Bowen trend) with strong crustal assimilation. We suggest that there are multiple sources, and the dyke swarms initiated the continental break-up, possibly associated with a plume.

**Key words** Mafic dyke swarms; North China Craton; 1.8 Ga; Petrology; Geochemistry

**摘要** 华北克拉通 1.8 Ga 镁铁质岩墙群是我国规模最大的岩墙群之一。在晋冀蒙交界地区, 岩墙群表现为 NNW 和 EW 向近直立具有冷凝边结构的岩墙, 它们产出于统一构造体制之下。单条岩墙的长度达几十公里, 宽度 0.5 ~ 100m, 通常 20m 左右。可以根据岩墙产状和岩石地球化学特征将这些岩墙群分成三组, 简记为 S-I, S-II 和 S-EW, 分别对应两组 NNW 向和一组 EW 向的岩墙群。岩墙的主要造岩矿物为单斜辉石和斜长石, 其它矿物包括角闪石、Fe-Ti 氧化物、黑云母、磷灰石、碱性长石和石英。S-II 能见到橄榄石斑晶及围绕橄榄石和单斜辉石颗粒生长的斜方辉石和角闪石反应边结构, 以及斜长石正环带结构。S-I 相对低 FeO(全) - TiO<sub>2</sub> - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 成分为相对高 MgO 拉斑玄武岩, 而 S-II 高 FeO(全) - TiO<sub>2</sub> - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 由碱性到亚碱性高 Fe 玄武岩组成。S-EW 包括高 Fe 拉斑玄武岩和安山岩。所有岩墙稀土总量(∑REE)和轻稀土含量(LREE)较高。它们相对富集 Ba、K 和 P, 并且亏损 Nb 和 Ta。S-II 和 EW 相对亏损 Sr。分析表明, S-I 表现为不同程度部分熔融的特征, 内部又有一定的分离结晶作用和地壳混染过程。S-II 表现为富铁贫硅(Fenner 趋势)的分离结晶作用和明显的地壳混染。

\* 本研究由国家自然科学基金项目(编号: 40234050)和中国科学院重大创新项目(编号: KZCX1-07)资助

第一作者简介: 彭澎, 男, 1978 年 7 月生, 博士研究生, 岩石学专业, E-mail: pengpengwj@mail.igcas.ac.cn

而 S-EW 表现为富硅贫铁 (Bowen 趋势) 的演化过程, 也有明显的地壳混染。我们认为岩墙群涉及两个或多个源区, 可能是地幔柱背景下大陆伸展裂解的产物。

**关键词** 镁铁质岩墙群; 华北克拉通; 1.8 Ga; 岩石学; 地球化学

**中图法分类号** P588.125

## 1 引言

华北克拉通 1.8 Ga 镁铁质岩墙群是我国规模最大的岩墙群之一, 它对于理解华北克拉通的地质演化有着重要的地质意义 (图 1) (陈孝德和史兰斌, 1983; Qian & Chen, 1987; 张臣等, 1994; 侯贵廷等, 1994, 1998, 2000; 庄育勋等, 1997; 李铁胜, 1999; 周鼎武等, 2000; Halls *et al.*, 2000; 李江海等, 2001; Zhao *et al.*, 2001; Lu *et al.*, 2002; 彭澎和翟明国, 2002; Kusky & Li, 2003)。冀东和鲁西地区的岩墙多以 NE 向和 NW 向两组岩墙为主; 而晋冀蒙交界的吕梁山、太行山、桑干河和丰镇地区的岩墙主要呈 NNW 和 EW 两种产状, 也有少量近北向较晚的岩墙。晋冀蒙交界地区岩墙群的研究程度相对较高, 陈孝德和史兰斌 (1983)、Qian & Chen (1987)、侯贵廷等 (2000) 提供了该区岩墙部分岩石地球化学数据。Qian & Chen (1987) 和 Halls *et al.* (2000) 做了很多古地磁工作, 从这些结果来看, NNW 向岩墙的活动时间具有很好的一致性。Qian & Chen (1987)、张臣等 (1994) 和侯贵廷等 (1994) 进行了较为详细的 K-Ar 年代学工作, 并且进行了分期, 认为 EW 晚于 NNW 向岩墙, 但年龄跨度较大 (1922 ~ 1091 Ma)。李江海等 (2001) 取得了较好的单颗粒锆石 U-Pb 年龄。侯贵廷等 (1998) 进行了应力场分析, 认为 NNW 和 EW 向岩墙和燕辽-中条拗拉槽形成于统一的构造体制下。对于岩墙群的成因, 一些作者认为岩墙群形成于大陆裂谷拉张伸展的构造环境或者超大陆的裂解 (Qian & Chen, 1987; 侯贵廷等, 2001; 李江海等, 2001), 而另外一些学者强调岩墙群和碰撞后伸展活动有关 (Zhao *et al.*, 2001)。近年来, 一些学者提出, 华北克拉通和一个 1.8 Ga 前后出现的 Columbia 超大陆有关, 可能由印度、南极、北美、波罗的、亚马逊和 华北克拉通等组成 (Rogers & Santosh, 2002; Wilde *et al.*, 2002; Lu *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2002)。虽然 Halls *et al.* (2000) 认为华北克拉通、劳亚、西伯利亚和波罗的等古老陆块自 18 亿年以来相对位置基本上没有变化, 但是这一结论还缺乏古经度和更多的古地磁数据的支持。这一时期广泛分布的岩墙群事件对于认识和理解 Columbia 大陆非常重要。另外, 如果 Columbia 超大陆存在, 岩墙群的构造环境就成为了一个重要的问题: 它是代表了与超大陆形成有关的碰撞后产物还是代表了超大陆裂解的产物。

本文以晋冀蒙交界地区为工作区 (图 1), 该区岩墙分布密度较大, 而且有一定工作基础。前人注意到了 NNW 向和 E-W 向岩墙的地球化学差异 (如: Qian & chen, 1987; 侯贵廷

等, 2000), 没有注意到 NNW 向岩墙内部也存在明显的分组, 而这些分组信息对于更好的认识岩墙群和 18 亿年地质事件以及可能存在的 Columbia 超大陆的关系很有帮助。为此, 我们做了进一步的地球化学工作。新的数据显示, NNW 向岩墙可以分成相对高 FeO (全) - TiO<sub>2</sub> - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和低 FeO (全) - TiO<sub>2</sub> - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量的两组, 这一特征与一些大型岩浆岩省如 Deccan、Karoo、Parana 和 Indo-China 等相似, 被认为来自不同的地幔源区 (如: Mahoney, 1988; Gallagher & Hawkesworth, 1992; Hoang *et al.*, 1996)。同时, 高铁玄武岩和相关的铁质苦橄岩见于 Parana-Etendeka 大陆溢流玄武岩 (CFB) 组合底部, 被认为来自地幔柱 (Gibson *et al.*, 2000)。另外, 两组 NNW 向岩墙之一以及 E-W 向岩墙分别具有 Fenner 和 Bowen 分异趋势 (Brooks, 1991), 这一特征又和徐义刚等 (2003) 报道的峨眉山大火成岩省相似。

## 2 地质背景

华北克拉通可能是由不同的微陆块拼合而成的 (白瑾等, 1993; 伍家善等 1998; Zhai *et al.*, 2000), 而对于中部地区, 最简单的划分是分为东部陆块、西部陆块和分开两者的中央造山带 (图 1 插图, Zhao *et al.*, 2001; Kusky *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2002; Kusky & Li, 2003; Zhai *et al.*, 2003)。除了对微陆块的划分有不同意见, 对于克拉通中部两个陆块何时沿中央造山带拼贴也有争议。一些学者认为两大陆块直到 1.8 Ga 才拼合, 主要约束条件是高压麻粒岩的变质时代 (Wu & Zhang, 1998; Zhao *et al.*, 2001; Kröner *et al.*, 2002), 因此岩墙群代表了与高压麻粒岩出露后或者超大陆形成相关的岩浆活动, 是碰撞后的产物 (Zhao *et al.*, 2001; Wilde *et al.*, 2002)。另外的一些学者认为主要的碰撞事件发生于 2.5 Ga (Kusky, 2001; Li *et al.*, 2002; Zhai *et al.*, 2003; Zhai & Liu, 2003), 而岩墙群代表着非造山的伸展事件。Kusky & Li (2003) 提出 2.3 Ga 华北克拉通沿着北部所谓的内蒙古-冀北造山带拼合, 2.20 ~ 1.85 Ga 时表现为安第斯型的聚合边界, 1.85 Ga 开始转变为伸展体制。如果和 Columbia 超大陆联系起来, 它可能代表了超大陆的裂解产物 (Zhao *et al.*, 2002; Zhai *et al.*, 2003)。Zhai *et al.* (2003) 提出古元古代 2350 ~ 1970 Ma 华北克拉通内部和大陆边缘都有着广泛的地质记录, 包括辽吉岩套、丰镇孔兹岩系和溥沱群建造等, 可能和 Columbia 超大陆形成有关。而 1900 ~ 1650 Ma 的吕梁运动, 包括基性岩墙群可能和 Columbia 超大陆的裂解有关。

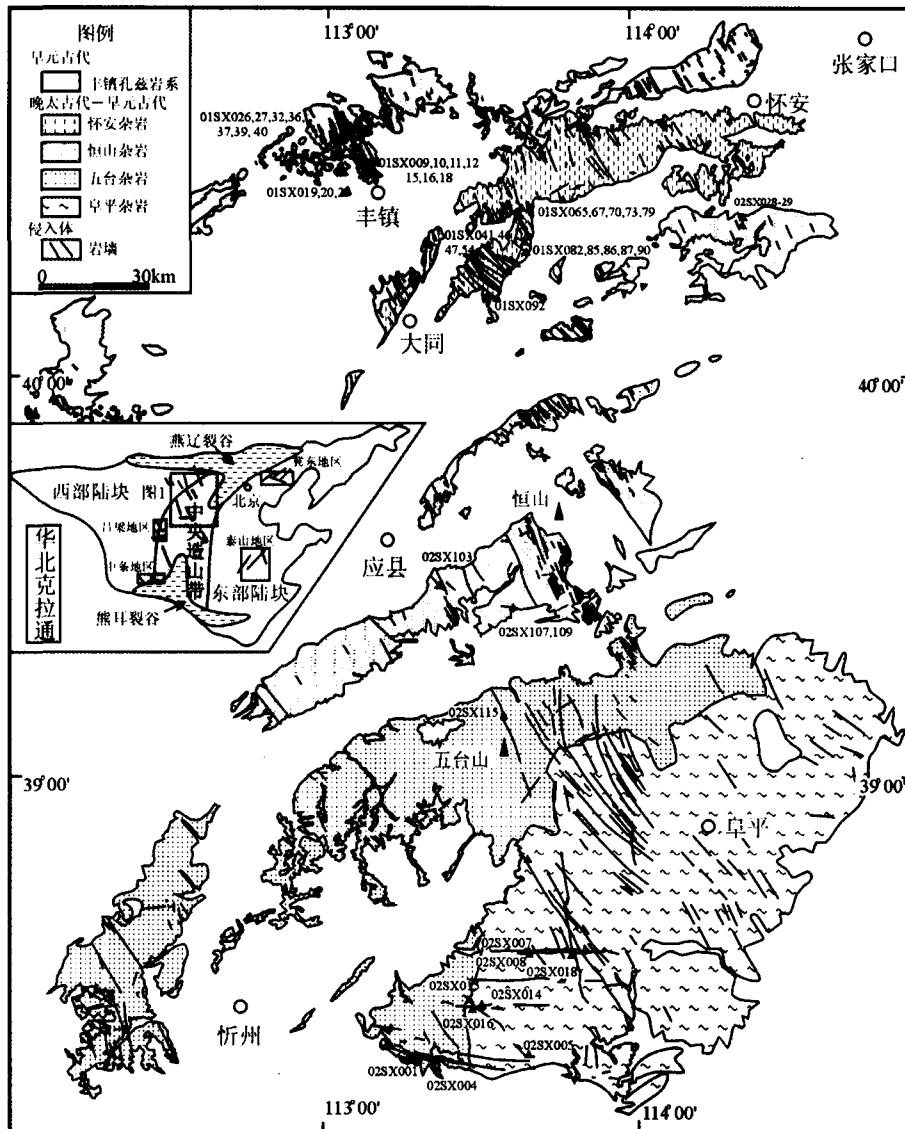


图1 晋冀蒙交界地区 1.8 Ga 镁铁质岩墙群地质图

Fig.1 Geological map of 1.8 Ga mafic dyke swarms in the juncture of Shanxi, Hebei and Inner-Mongolia

晋冀蒙交界地区岩墙群分布于新太古代到古元古代怀安杂岩、恒山杂岩、五台杂岩、阜平杂岩和丰镇孔兹岩系中(图1),没有切穿中元古代或者更晚的岩层。怀安杂岩主要分布于怀安-大同一带,主体为一些中酸性麻粒岩和少量薄层状和透镜状表壳岩,包括 2.8 Ga 灰色片麻岩和 2.5 Ga 花岗质片麻岩(Zhai *et al.*, 1996)。恒山杂岩主要由高角闪岩相-麻粒岩相 TTG 岩套和一些角闪岩相-高中压麻粒岩相基性布丁体和透镜体组成(李江海 & 钱祥麟, 1994), 锆石年龄集中于 2526 ~ 2455 Ma(Kröner *et al.*, 2002)。五台杂岩包括五台群和滹沱群。五台群是一些以基性岩为主的火山-沉积岩系列,经历了绿片岩相-角闪岩相的变质和多期变形。滹沱群是一套厚的中-低绿片岩相变质的杂岩(程裕淇等, 1982)。五台群中部流纹安山岩给出的 SHRIMP 锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  平均年龄为  $2524 \pm 8$  Ma(Wilde *et al.*, 1997)。恒

山杂岩和五台杂岩都存在一期约 2.1 Ga 的脉岩/花岗岩形成事件(Kröner *et al.*, 2002)。阜平杂岩位于太行山南部,由一套高角闪岩相-麻粒岩相的岩石组成。郝杰等(1999)将其解体为年龄分别为 2800 ~ 2700 Ma、2580 ~ 2540 Ma 和 2400 ~ 2300 Ma 的三个部分。丰镇孔兹岩系组成主要为含石榴子石和矽线石的长石片麻岩。Guo *et al.*(2001)的年代学揭示其形成于 2.0 Ga 之前,变质年龄为 1.87 Ga。因此,岩墙的侵位应晚于 1.87 Ga。中元古代燕辽裂谷分布于基性岩墙工作区的北缘和东缘,主要由一些沉积岩、沉积-火山岩系列组成。1760 Ma 的熊耳群分布于工作区的南缘,是大陆裂解的产物(Zhao *et al.*, 2002)。周鼎武等(2002)认为岩墙群和熊耳群火山作用相关。除了李江海等(2001)的  $1769 \pm 2.5$  Ma 单颗粒锆石年龄,最新的 SHRIMP 锆石 U/Pb 平均年龄是  $1778 \pm 3$  Ma( $n=12$ , MSWD=1.7)(彭澎,未发表数据)。

### 3 岩墙的野外产状和岩石学特征

晋冀蒙交界地区分布着数以百计的 NNW 向和 E-W 向岩墙, 也有少数几条近北向分布的岩墙, 后者切割了前者 (图 1), 前人 (如: Qian & Chen, 1987; 张臣等, 1994) 描述了 E-W 向岩墙切穿 NNW 向岩墙的关系, 而原地矿部七十年代的 1:20 万地质图记录了 E-W 向岩墙和 NNW 向岩墙互相切穿的现象。我们观察到有些露头显示两种岩墙同时侵入的特征。从分布上看, E-W 向的岩墙 (Swarm EW, 简记为 S-EW) 主要分布在南部五台杂岩和阜平杂岩里。而 NNW 向的岩墙从地球化学上可以分为两个组 (Swarm NNW-I/II, 简记为 S-I 和 S-II, 分组依据见下), S-I 空间上尺度一般比较大, 而且也比较新鲜。S-II 尺度变化比较大, 后期的风化也比较强, 然而两者在空间分布上没有明显的差异。岩墙的露头上有时表现为球形风化。长度达到几十公里, 而宽度在 0.5 m 和 100 m 之间, 通常为 20 m 左右。岩墙的长宽大致呈正比关系。岩墙的分叉结构显示岩浆的流动方向兼有向上和沿走向从南向北的特征。

大部分岩墙都具有冷凝边结构。冷凝边表现为一些斑状结构或者玻基斑状结构。斑晶为斜长石和单斜辉石, 也出现伊丁石化橄榄石。长条状斜长石常具有平行接触面优选方向。有些岩墙相对较小, 冷凝边相对较宽, 有时边部还呈现韧性剪切结构形成的岩片, 其中有大量的云母。岩墙中部典型结构为辉绿结构, 一些大型岩墙的中部可以看到辉长结构, 而一些小的岩墙以及几乎所有的岩墙的边缘都表现为斑状结构。岩墙的造岩矿物组合为单斜辉石和斜长石, 另外, 还有一些角闪石、Fe-Ti 氧化物副矿物 (钛铁矿熔体、磁铁矿)、磷灰石、黑云母、碱性长石和石英等。S-II 中还可以见到橄榄石斑晶, S-II 和 S-EW 中常可见到斜长石正环带结构 (表 1, 图 2a)。

在 S-II 的样品中, 出现了一些特征的反应边结构。有两种类型, 一种类型为橄榄石颗粒边部的反应边结构, 表现为三个阶段的反应, 从中心到边缘依次为斜方辉石 (ferrosillite)、角闪石和黑云母 (图 2b, 表 1); 另一种类型为单斜辉石颗粒边部的反应边, 有斜方辉石和角闪石反应边 (图 2c, 表 1)。S-I 或者 S-EW 中没有找到类似结构。另外, 岩墙的晚期以出现角闪石和斜长石组合为特征的后期变质组合也很普遍 (图 2b, 表 1)。

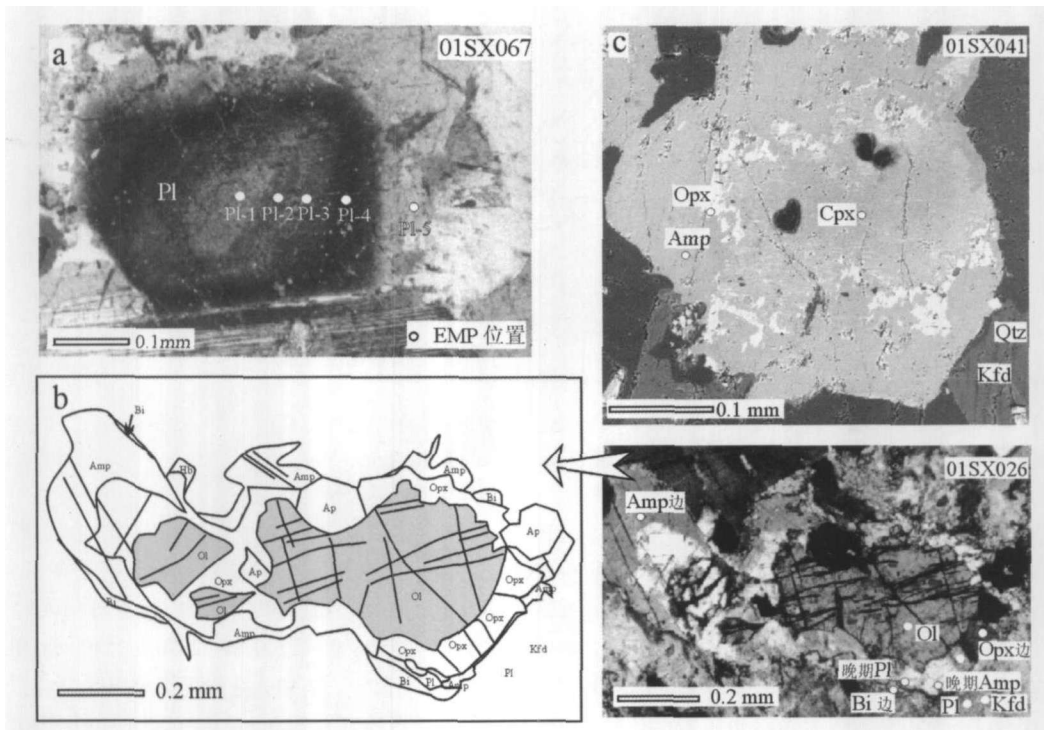


图 2 典型显微结构图

a. 长石环带结构; b. 橄榄石的斜方辉石、角闪石和黑云母边; c. 单斜辉石的斜方辉石和角闪石边 (BSE 图)。白色圆斑为 EMP 点位, 数据见表 1。Ol-橄榄石; Opx-斜方辉石; Cpx-单斜辉石; Amp-角闪石; Bi-黑云母; Pl-长石; Kfd-钾长石; Qz-石英; Ap-磷灰石。

Fig. 2 Selected pictures showing typical micro-structures;

a. a plagioclase zoning; b. orthopyroxene, amphibole, and biotite rims of an olivine; c. orthopyroxene and amphibole rims of a clinopyroxene (Backscattered electron image), white circles show EMP locations, see data in Table 1. Ol-olivine, Opx-orthopyroxene, Cpx-clinopyroxene, Amp-amphibole, Bi-biotite, Pl-plagioclase, Kfd-K-feldspar, Qz-quartz, Ap-apatite.

表 1 部分矿物的电子探针(EMP)分析数据表  
Table 1 Electronic Microprobe (EMP) data for selected minerals

样品号	01SX067										01SX041										01SX026																														
	PI-1	PI-2	PI-3	PI-4	PI-5	Cpx	Opx 边	Amp 边	Ol	Pl	Kfd	Opx 边	Opx 边	Amp 边	Bi 边	后期 Amp	后期 Pl	PI-1	PI-2	PI-3	PI-4	PI-5	Cpx	Opx 边	Opx 边	Amp 边	Ol	Pl	Kfd	Opx 边	Opx 边	Amp 边	Bi 边	后期 Amp	后期 Pl																
SiO <sub>2</sub>	56.12	57.14	59.13	64.01	63.91	49.34	48.62	42.55	27.55	60.30	62.39	46.24	45.95	39.69	33.59	45.18	63.10	56.12	57.14	59.13	64.01	63.91	49.34	48.62	42.55	27.55	60.30	62.39	46.24	45.95	39.69	33.59	45.18	63.10	56.12	57.14	59.13	64.01	63.91	49.34	48.62	42.55	27.55	60.30	62.39	46.24	45.95	39.69	33.59	45.18	63.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.14	27.33	24.77	22.48	22.82	1.43	0.13	8.51	0.03	23.60	19.12	0.13	0.06	7.72	12.88	6.33	23.29	28.14	27.33	24.77	22.48	22.82	1.43	0.13	8.51	0.03	23.60	19.12	0.13	0.06	7.72	12.88	6.33	23.29	28.14	27.33	24.77	22.48	22.82	1.43	0.13	8.51	0.03	23.60	19.12	0.13	0.06	7.72	12.88	6.33	23.29
MnO	0.14	0.05	0	0.11	0.13	0.62	1.16	0.26	1.19	0	0	1.05	1.04	0.22	0.12	0.26	0	0.14	0.05	0	0.11	0.13	0.62	1.16	0.26	1.19	0	0	1.05	1.04	0.22	0.12	0.26	0	0.14	0.05	0	0.11	0.13	0.62	1.16	0.26	1.19	0	0	1.05	1.04	0.22	0.12	0.26	0
FeO* <sup>3</sup>	0.35	0.77	0.72	0.14	0	24.52	40.85	26.11	67.19	0.46	0.45	43.94	44.01	27.88	30.33	26.72	0.51	0.35	0.77	0.72	0.14	0	24.52	40.85	26.11	67.19	0.46	0.45	43.94	44.01	27.88	30.33	26.72	0.51	0.35	0.77	0.72	0.14	0	24.52	40.85	26.11	67.19	0.46	0.45	43.94	44.01	27.88	30.33	26.72	0.51
MgO	0	0	0	0	0	12.42	9.20	6.47	2.82	0.01	0	6.65	7.01	4.42	5.19	6.55	0.02	0	0	0	0	0	12.42	9.20	6.47	2.82	0.01	0	6.65	7.01	4.42	5.19	6.55	0.02	0	0	0	0	0	12.42	9.20	6.47	2.82	0.01	0	6.65	7.01	4.42	5.19	6.55	0.02
CaO	10.07	9.24	6.9	4.33	4.55	11.56	0.56	10.62	0.06	5.77	0	0.61	0.80	10.19	0.01	10.75	3.79	10.07	9.24	6.9	4.33	4.55	11.56	0.56	10.62	0.06	5.77	0	0.61	0.80	10.19	0.01	10.75	3.79	10.07	9.24	6.9	4.33	4.55	11.56	0.56	10.62	0.06	5.77	0	0.61	0.80	10.19	0.01	10.75	3.79
Na <sub>2</sub> O	5.20	5.60	6.06	7.57	8.13	0.18	0	1.60	0	7.78	1.56	0.07	0.04	1.94	0.29	1.44	9.18	5.20	5.60	6.06	7.57	8.13	0.18	0	1.60	0	7.78	1.56	0.07	0.04	1.94	0.29	1.44	9.18	5.20	5.60	6.06	7.57	8.13	0.18	0	1.60	0	7.78	1.56	0.07	0.04	1.94	0.29	1.44	9.18
K <sub>2</sub> O	0.08	0.16	0.3	0.21	0.08	0	0.03	1.14	0.01	0.15	12.77	0	0.01	1.19	8.50	0.67	0.33	0.08	0.16	0.3	0.21	0.08	0	0.03	1.14	0.01	0.15	12.77	0	0.01	1.19	8.50	0.67	0.33	0.08	0.16	0.3	0.21	0.08	0	0.03	1.14	0.01	0.15	12.77	0	0.01	1.19	8.50	0.67	0.33
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.01	0.18	0.02	0.02	0.49	0.17	0.70	0.01	0.03	0	0	0.01	1.85	4.43	0.78	0.03	0.07	0.01	0.18	0.02	0.02	0.49	0.17	0.70	0.01	0.03	0	0	0.01	1.85	4.43	0.78	0.03	0.07	0.01	0.18	0.02	0.02	0.49	0.17	0.70	0.01	0.03	0	0	0.01	1.85	4.43	0.78	0.03
总和	100.17	100.31	98.05	98.86	99.63	100.56	100.7	98.96	99.99	99.1	96.29	98.69	98.92	95.10	95.35	98.68	100.26	100.17	100.31	98.05	98.86	99.63	100.56	100.7	98.96	99.99	99.1	96.29	98.69	98.92	95.10	95.35	98.68	100.26	100.17	100.31	98.05	98.86	99.63	100.56	100.7	98.96	99.99	99.1	96.29	98.69	98.92	95.10	95.35	98.68	100.26
氧离子总数	8	8	8	8	8	6	6	23	4	8	8	6	6	23	12	23	8	8	8	8	8	8	6	6	23	4	8	8	6	6	23	12	23	8	8	8	8	8	8	6	6	23	4	8	8	6	6	23	12	23	8
Si	2.517	2.558	2.682	2.843	2.823	1.909	1.978	6.524	0.945	2.705	2.960	1.967	1.955	6.540	2.724	7.000	2.788	2.517	2.558	2.682	2.843	2.823	1.909	1.978	6.524	0.945	2.705	2.960	1.967	1.955	6.540	2.724	7.000	2.788	2.517	2.558	2.682	2.843	2.823	1.909	1.978	6.524	0.945	2.705	2.960	1.967	1.955	6.540	2.724	7.000	2.788
Al	1.486	1.441	1.323	1.176	1.187	0.065	0.006	1.537	0.001	1.299	1.068	0.006	0.003	1.499	1.230	1.156	1.212	1.486	1.441	1.323	1.176	1.187	0.065	0.006	1.537	0.001	1.299	1.068	0.006	0.003	1.499	1.230	1.156	1.212	1.486	1.441	1.323	1.176	1.187	0.065	0.006	1.537	0.001	1.299	1.068	0.006	0.003	1.499	1.230	1.156	1.212
Mn	0.005	0.002	0.000	0.004	0.005	0.020	0.040	0.033	0.035	0.018	0.000	0.038	0.038	0.031	0.008	0.035	0.000	0.005	0.002	0.000	0.004	0.005	0.020	0.040	0.033	0.035	0.018	0.000	0.038	0.038	0.031	0.008	0.035	0.000	0.005	0.002	0.000	0.004	0.005	0.020	0.040	0.033	0.035	0.018	0.000	0.038	0.038	0.031	0.008	0.035	0.000
Fe	0.013	0.029	0.027	0.005	0.000	0.772	1.370	3.347	1.926	0.005	0.018	1.563	1.566	3.842	2.057	3.462	0.019	0.013	0.029	0.027	0.005	0.000	0.772	1.370	3.347	1.926	0.005	0.018	1.563	1.566	3.842	2.057	3.462	0.019	0.013	0.029	0.027	0.005	0.000	0.772	1.370	3.347	1.926	0.005	0.018	1.563	1.566	3.842	2.057	3.462	0.019
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.716	0.558	1.478	0.144	0.018	0.000	0.422	0.445	1.086	0.627	1.513	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.716	0.558	1.478	0.144	0.018	0.000	0.422	0.445	1.086	0.627	1.513	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.716	0.558	1.478	0.144	0.018	0.000	0.422	0.445	1.086	0.627	1.513	0.001
Ca	0.484	0.443	0.335	0.206	0.215	0.479	0.024	1.744	0.002	0.027	0.000	0.028	0.036	1.798	0.001	1.785	0.179	0.484	0.443	0.335	0.206	0.215	0.479	0.024	1.744	0.002	0.027	0.000	0.028	0.036	1.798	0.001	1.785	0.179	0.484	0.443	0.335	0.206	0.215	0.479	0.024	1.744	0.002	0.027	0.000	0.028	0.036	1.798	0.001	1.785	0.179
Na	0.452	0.486	0.533	0.652	0.696	0.014	0	0.475	0	0.676	0.143	0.006	0.003	0.620	0.045	0.433	0.787	0.452	0.486	0.533	0.652	0.696	0.014	0	0.475	0	0.676	0.143	0.006	0.003	0.620	0.045	0.433	0.787	0.452	0.486	0.533	0.652	0.696	0.014	0	0.475	0	0.676	0.143	0.006	0.003	0.620	0.045	0.433	0.787
K	0.005	0.009	0.017	0.012	0.005	0	0.001	0.224	0	0.009	0.773	0	0.001	0.250	0.879	0.132	0.019	0.005	0.009	0.017	0.012	0.005	0	0.001	0.224	0	0.009	0.773	0	0.001	0.250	0.879	0.132	0.019	0.005	0.009	0.017	0.012	0.005	0	0.001	0.224	0	0.009	0.773	0	0.001	0.250	0.879	0.132	0.019
Ti	0.002	0.000	0.006	0.001	0.001	0.014	0.005	0.081	0	0.001	0.000	0	0	0.230	0.091	0.001	0.001	0.002	0.000	0.006	0.001	0.001	0.014	0.005	0.081	0	0.001	0.000	0	0	0.230	0.091	0.001	0.001	0.002	0.000	0.006	0.001	0.001	0.014	0.005	0.081	0	0.001	0.000	0	0	0.230	0.091	0.001	0.001
阳离子总数	4.964	4.967	4.924	4.899	4.932	3.989	3.982	15.443	3.054	4.985	4.962	4.032	4.047	15.896	7.841	15.607	5.006	4.964	4.967	4.924	4.899	4.932	3.989	3.982	15.443	3.054	4.985	4.962	4.032	4.047	15.896	7.841	15.607	5.006	4.964	4.967	4.924	4.899	4.932	3.989	3.982	15.443	3.054	4.985	4.962	4.032	4.047	15.896	7.841	15.607	5.006

注: 1. 分析由中国科学院地质与地球物理研究所 EMP 实验室徐平博士帮助完成; 2. 探针位置见图 2; 3. 全铁简记为 FeO\*。

### 4 岩墙的地球化学特征、分组及演化

#### 4.1 样品准备和分析

45 件样品被用于地球化学分析(图 1), S-I、S-II 和 S-EW 样品分别为 9、30 和 6 件。其中, 有两对样品(01SX046 和 ~047, 02SX107 和 ~109)分别取自样品的中心和边缘, 另有五件样品(01SX009、~010、~011、~012、~015)为一条岩墙沿走向间隔约 200m 取样。除了前面提到的取自边缘两件样品外, 其他样品都取自中心新鲜部位。主量元素测试使用 X-射线荧光光谱法(XRF), 微量元素测试使用 ICP-MS

方法, 以上测试完成于中国科学院矿产资源重点实验室。数据见表 2。

#### 4.2 岩墙的地球化学分组及其特征

岩墙的岩性主要为基性, 少数样品为中酸性。岩墙呈现碱性到亚碱性, 基性样品呈现高 Fe 玄武岩类的特征(图 3ab)。Mg 数(简记为  $Mg^*$ ,  $Mg^* = MgO / (MgO + FeO)$  (摩尔比), 其中  $FeO = 0.9 \times FeO^*$  (全 FeO, 下同))从 24.7 到 56.1。所有岩墙具有不同程度轻稀土(LREE)富集的特征(图 4abcd)。在微量元素蜘蛛图上, 岩墙又具有 Nb 和 Ta 相对亏损, Ba、K、La、Ce 和 P 相对富集的特征(图 5abcd)。

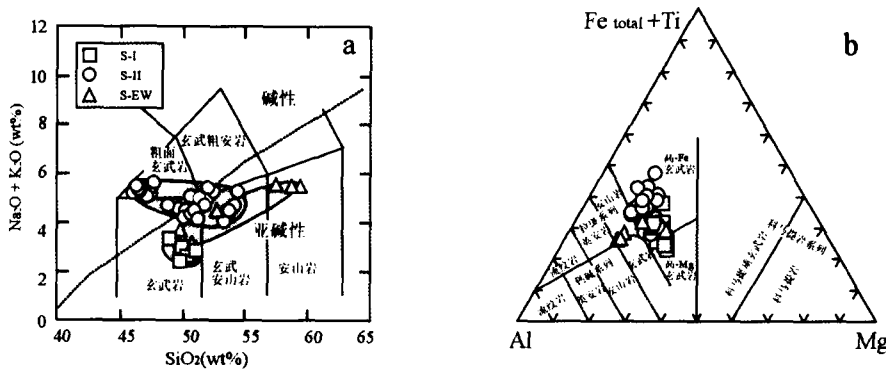


图 3 a. 岩墙的 TAS 图解(碱性/亚碱性界线引自 Irvine & Baragar, 1971); b. Al - 全 Fe + Ti - Mg 三角图(据 Rollison, 1995), 正方形、圆圈和三角形分别代表 S-I、S-II 和 S-EW 的样品。

Fig. 3 a. TAS (Total-Alkaline-Silica) plot including the alkaline-subalkaline basalt dividing line of Irvine and Baragar (1971); b. Al, Fe(total) and Ti, and Mg cation percentages plot (after Rollison, 1995). Squares, circles, and triangles represent S-I, -II, and EW, respectively.

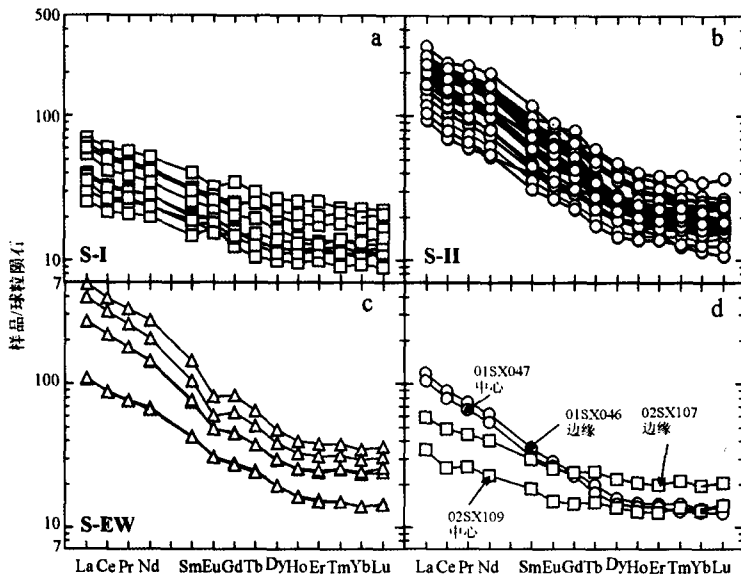


图 4 岩墙的球粒陨石标准化 REE 配分模式图(球粒陨石标准值据 Sun & McDonough, 1989), 样品图例同图 3。  
Fig. 4 Chondrite-normalized REE pattern for the dykes (chondrite values of Sun & McDonough, 1989). Sample symbols as in Fig. 3.

表 2 晋冀蒙交界地区镁铁质岩墙群部分样品全岩主量(wt%)、微量元素含量(ppm)分析数据表

Table 2 Selected whole rock analyses of major (wt%) and trace elements (ppm) of the mafic dyke swarms in the juncture of Shanxi, Hebei and Inner - Mongolia

样品号 岩性	S-I (共9件样品)									S-II (共30件样品)								
	01SX025	01SX036	01SX037	01SX040	01SX070	02SX018	02SX107	02SX109	02SX115	01SX009	01SX010	01SX011	01SX012	01SX015	01SX016			
SiO <sub>2</sub>	50.16	49.93	49.90	50.36	49.75	48.99	50.48	50.74	50.98	51.83	47.40	47.04	47.04	47.39	46.88			
TiO <sub>2</sub>	0.95	1.11	1.02	1.01	2.51	2.09	1.57	0.94	1.98	2.33	3.42	3.48	3.57	3.57	3.63			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.99	14.50	15.21	14.69	12.18	15.40	13.19	14.40	13.65	13.73	12.88	13.04	13.44	13.44	12.78			
FeO*	12.90	13.85	12.99	13.48	16.85	13.47	15.02	12.15	13.96	13.54	16.24	16.64	15.47	15.47	17.09			
MnO	0.19	0.20	0.19	0.19	0.20	0.18	0.22	0.19	0.20	0.17	0.20	0.20	0.18	0.21	0.21			
MgO	7.29	6.85	6.48	7.34	5.01	4.57	5.78	7.00	5.13	3.06	4.63	4.43	4.25	4.64	4.64			
CaO	10.61	10.10	10.24	10.28	8.99	9.41	9.71	10.70	9.42	7.06	7.52	7.30	7.57	7.19	7.19			
Na <sub>2</sub> O	2.27	2.30	2.39	2.13	2.01	2.27	1.98	2.50	1.99	2.63	2.47	2.54	2.58	2.52	2.52			
K <sub>2</sub> O	0.54	0.67	0.65	0.66	0.44	1.14	0.25	0.47	0.89	2.35	2.72	2.68	2.85	2.82	2.82			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.16	0.15	0.13	0.24	0.16	0.25	0.14	0.16	0.89	1.93	1.86	1.89	1.88	1.88			
LOI <sup>3</sup>	0.01	-0.09	0.16	-0.09	2.08	1.82	0.65	0.15	0.99	1.88	0.14	0.20	0.17	0.17	-0.23			
Total	100.01	99.57	99.37	100.08	100.95	99.50	99.53	99.39	99.37	97.60	99.55	99.53	99.53	99.36	99.41			
Sr	289	276	277	279	155	193	193	212	254	399	366	380	380	376	329			
Rb	6.12	9.49	9.02	6.97	9.07	43.0	12.6	9.54	41.3	38.9	41.9	42.8	44.0	37.7	38.5			
Ba	185	268	240	235	102	161	293	191	168	978	1220	1250	1280	1200	1210			
Th	0.43	0.82	0.81	0.56	2.05	2.51	1.34	0.69	2.71	3.54	2.40	2.66	2.86	2.65	2.60			
U	0.11	0.63	0.20	0.16	0.50	0.48	0.36	0.16	0.55	0.61	0.62	0.65	0.65	0.65	0.58			
Zr	36.6	49.3	47.6	41.6	174	95	97.5	55.1	128	197	228	262	272	214	243			
Hf	1.24	1.62	1.56	1.40	4.92	3.02	3.23	1.79	3.99	5.18	5.40	6.34	6.63	5.27	5.95			
Nb	1.18	1.81	1.83	1.39	11.0	7.19	4.47	2.49	9.13	8.71	8.45	11.7	12.0	9.71	9.99			
Ta	0.10	0.15	0.29	0.17	0.75	0.71	0.51	0.41	0.85	0.57	0.47	0.71	0.72	0.64	0.59			
Sc	35.4	36.2	38.1	30.1	40.5	29.3	43.5	35.7	38.0	25.2	21.8	22.2	21.8	22.8	23.2			
V	257	253	260	247	428	321	346	260	375	246	186	193	199	192	182			
Cr	271	229	212	219	91.3	80.0	84.4	109	150	12.0	23.7	23.1	23.1	9.69	9.36			
Co	51.2	48.6	50.8	52.3	46.4	34.6	52.1	47.6	45.2	37.5	40.7	42.5	47.1	43.5	41.3			
Cu	63.8	74.0	65.0	53.9	106	37.5	75.4	43.5	106	24.2	24.1	21.9	23.2	21.9	28.8			
Pb	1.74	6.14	3.03	2.9	4.37	8.06	4.96	2.23	5.39	10.9	9.67	10.7	10.9	8.97	10.3			
Zn	115	117	107	157	168	109	133	93.3	148	182	222	246	247	228	228			
Be	0.09	0.35	0.26	0.20	0.78	0.59	0.60	0.22	0.78	1.00	0.96	1.00	1.00	0.79	0.99			
Ga	15.6	16.0	16.6	15.6	19.6	18.0	19.0	16.7	20.8	21.0	22.3	20.7	22.4	20.7	19.8			
Ca	0.25	0.29	0.23	0.62	0.14	1.35	0.45	0.38	3.22	0.71	0.62	0.52	0.45	0.49	0.33			
Bi	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01			
Li	4.92	7.06	5.24	5.00	13.2	15.4	11.2	6.43	15.7	6.07	10.55	9.27	6.77	9.63	8.79			
La	6.14	9.48	9.06	7.25	16.8	12.9	13.9	7.78	15.2	46.7	52.4	58.7	60.0	51.1	54.3			
Ce	13.4	20.1	20.7	15.7	37.2	25.3	29.7	16.6	32.4	92.4	109	114	118	106	108			
Pr	2.02	2.93	2.86	2.39	5.40	3.74	4.24	2.35	4.57	12.3	15.2	16.6	17.1	15.0	15.6			
Nd	9.46	13.2	13.2	11.2	24.4	16.3	19.1	10.5	20.1	50.6	64.3	70.1	71.7	65.5	67.2			
Sm	2.28	3.19	3.05	2.74	6.25	3.84	4.56	2.78	4.90	9.25	11.4	12.0	13.0	12.0	12.2			
Eu	0.97	1.13	1.25	1.04	1.89	1.36	1.50	0.96	1.63	2.81	3.56	3.94	4.04	3.68	3.63			
Gd	2.59	3.33	3.23	2.96	7.15	4.26	5.01	2.93	5.24	8.16	10.2	11.1	11.5	10.2	10.4			
Tb	0.40	0.51	0.57	0.48	1.12	0.75	0.92	0.54	0.93	1.08	1.23	1.38	1.41	1.27	1.26			
Dy	2.52	3.08	3.74	2.87	6.87	4.12	5.56	3.28	5.23	5.90	6.31	7.16	7.33	6.63	6.76			
Ho	0.55	0.67	0.77	0.64	1.45	0.83	1.15	0.68	1.03	1.17	1.26	1.38	1.43	1.29	1.30			
Er	1.64	2.01	2.25	1.90	4.24	2.36	3.27	1.93	2.89	3.33	3.15	3.56	3.98	3.86	3.60			
Tm	0.23	0.29	0.38	0.29	0.59	0.37	0.54	0.32	0.46	0.48	0.45	0.50	0.52	0.50	0.48			
Yb	1.59	1.90	2.42	1.77	3.89	2.36	3.33	2.02	2.80	2.90	2.87	3.26	3.35	2.90	3.05			
Lu	0.23	0.29	0.34	0.29	0.57	0.36	0.52	0.30	0.42	0.42	0.42	0.48	0.49	0.45	0.46			
Y	13.6	17.1	18.1	15.5	36.4	21.6	28.4	17.5	25.8	30.0	33.7	34.1	35.0	32.6	32.8			
ΣREE (La/Yb) <sub>N</sub>	58	79	82	67	154	101	122	70	124	267	316	341	350	312	321			
(Gd/Yb)	2.6	3.4	2.5	2.8	2.9	3.7	2.8	2.6	3.7	10.9	12.3	12.2	12.1	11.9	12.0			
(Gd/Yb)	1.3	1.5	1.1	1.4	1.5	1.5	1.2	1.2	1.5	2.3	2.9	2.8	2.9	2.9	2.8			

注: 1. 取样位置见图 1; 2. B = 玄武岩, TB = 粗面玄武岩, BA = 玄武粗安岩, A = 安山岩; 3. LOI = 烧失量 (loss on ignition)。

续表 2  
Continued Table 2

组 样品号 岩性	S - II (共 30 件样品)															
	01SX018	01SX019	01SX020	01SX026	01SX027	01SX032	01SX039	01SX041	01SX046	01SX047	01SX054	01SX065	01SX067	01SX073	01SX079	
	TB	B	TB	TB	B	BA	TB	BA	BA	BA	B	BA	BA	B	BA	
SiO <sub>2</sub>	47.72	49.68	47.17	50.60	48.79	54.03	46.63	54.46	53.62	53.27	50.17	53.54	54.08	50.13	53.71	
TiO <sub>2</sub>	3.52	2.52	3.25	3.07	2.37	1.44	3.58	1.92	1.15	1.04	2.42	1.48	1.40	3.31	1.57	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.17	14.48	13.42	10.17	13.67	13.12	13.07	12.52	13.91	13.88	12.29	13.21	13.10	11.74	13.46	
FeO*	14.10	12.57	15.54	19.06	15.09	15.17	16.70	14.89	12.66	12.87	15.36	14.13	14.08	17.51	13.69	
MnO	0.14	0.16	0.20	0.26	0.20	0.20	0.18	0.19	0.18	0.18	0.20	0.19	0.19	0.22	0.19	
MgO	3.20	5.96	4.62	3.06	5.22	3.93	4.52	3.09	4.60	5.21	3.82	4.26	4.12	3.21	4.08	
CaO	7.72	8.49	7.96	6.81	8.12	7.64	7.40	6.51	8.43	8.74	7.03	7.63	7.53	6.31	7.20	
N <sub>2</sub> O	2.70	3.22	2.48	2.49	2.65	2.85	2.54	2.83	2.78	2.72	2.31	2.71	2.79	2.62	2.76	
K <sub>2</sub> O	2.95	1.35	2.59	2.62	2.06	1.81	2.79	2.51	1.54	1.38	2.21	1.84	1.93	1.61	1.80	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.95	0.45	1.86	1.56	0.90	0.30	1.90	0.54	0.29	0.24	0.89	0.39	0.39	1.36	0.41	
LOI <sup>3</sup>	1.16	0.42	0.29	-0.39	0.52	-0.15	1.90	-0.15	0.19	0.24	2.86	0.00	-0.06	1.37	0.98	
Total	98.17	99.31	99.39	99.31	99.60	100.35	99.36	99.40	99.34	99.77	99.56	99.39	99.61	99.40	99.85	
Sr	381	424	371	274	439	307	366	320	336	350	388	332	331	373	363	
Rb	46.6	14.0	39.7	54.8	33.8	37.0	43.3	54.6	32.9	27.7	38.4	39.0	41.1	36.3	39.9	
Ba	1370	235	1210	1130	913	603	1250	808	656	471	949	706	673	990	1010	
Th	3.39	1.99	2.61	6.29	2.15	4.52	2.63	5.77	3.55	2.79	3.14	4.50	4.21	5.47	3.62	
U	0.72	0.53	0.70	1.31	0.50	0.94	0.63	1.15	0.61	0.58	0.58	0.86	0.86	0.89	0.50	
Zr	268	179	222	335	180	154	266	221	123	112	202	158	164	270	159	
Hf	6.85	4.94	5.51	9.35	4.94	4.34	6.44	6.03	3.43	3.10	5.14	4.51	4.40	7.30	4.25	
Nb	13.6	28.0	9.45	21.4	9.72	5.95	10.8	9.06	5.39	4.25	8.62	6.86	6.60	16.6	6.60	
Ta	0.99	1.97	0.64	1.44	0.59	0.44	0.62	0.56	0.50	0.27	0.55	0.59	0.47	1.09	0.47	
Sc	21.0	22.3	23.8	29.9	24.2	29.7	19.4	28.0	37.3	33.0	26.1	35.3	26.4	31.0	28.9	
V	190	211	166	36.4	211	313	196	300	250	237	271	305	210	169	270	
Cr	8.22	175	45.5	0.22	63.4	9.04	1.76	4.57	10.7	10.0	17.4	13.6	5.89	1.01	13.8	
Co	36.9	43.1	38.8	33.4	41.4	48.4	44.0	40.0	45.1	47.2	40.1	44.3	41.3	35.8	40.7	
Cu	28.5	50.4	25.2	38.0	23.1	27.3	36.3	26.5	43.6	36.8	20.3	34.3	24.2	70.7	84.7	
Pb	13.8	3.09	10.1	12.1	9.19	9.70	11.4	13.6	11.2	7.06	11.5	10.9	10.6	12.1	11.1	
Zn	261	174	222	254	258	146	246	175	120	115	198	147	144	235	181	
Be	1.30	1.39	0.89	1.73	1.01	0.82	1.02	1.16	0.85	0.53	0.87	0.97	0.88	1.30	0.80	
Ga	24.3	21.7	20.5	24.1	20.6	20.0	22.3	21.5	20.1	18.6	20.7	19.7	19.8	23.5	19.7	
Cs	0.50	0.14	1.33	0.75	0.72	1.05	0.58	0.91	0.58	0.48	1.64	0.76	0.62	1.06	0.77	
Bi	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.04	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.07	0.07	
Li	4.85	9.46	8.53	12.1	10.3	4.56	10.9	5.28	6.90	4.87	8.71	5.74	10.1	11.1	5.72	
La	59.2	23.2	52.3	72.4	43.5	32.3	57.9	50.0	28.5	24.9	45.4	37.3	37.1	61.0	36.2	
Ce	131	46.0	109	144	90.0	64.2	120	98.1	54.9	48.8	90.0	70.9	72.3	127	71.1	
Pr	17.8	5.90	15.2	21.3	12.2	8.35	16.6	12.6	7.10	6.30	12.0	9.10	9.38	17.6	9.36	
Nd	79.0	26.6	66.2	92.9	51.4	34.0	70.2	49.7	30.0	25.6	49.0	38.7	37.8	74.0	37.7	
Sm	13.8	6.45	11.9	18.3	9.71	6.50	12.7	8.99	5.61	4.84	9.01	7.28	6.89	14.5	6.97	
Eu	4.38	2.28	3.56	4.94	2.98	1.84	3.96	2.99	1.94	1.57	2.76	2.29	2.49	4.13	2.04	
Gd	12.2	6.93	10.3	16.5	8.88	6.00	11.2	8.14	5.44	4.67	8.11	6.70	6.39	13.2	6.42	
Tb	1.66	1.11	1.30	2.13	1.16	0.86	1.38	1.11	0.85	0.66	1.07	1.04	0.87	1.69	0.85	
Dy	9.72	6.52	6.78	11.2	6.36	4.96	7.15	6.11	5.22	3.74	5.76	6.32	4.90	9.21	4.83	
Ho	1.70	1.19	1.33	2.15	1.27	1.05	1.38	1.26	1.04	0.79	1.30	1.25	1.01	1.77	0.97	
Er	4.77	3.00	3.63	5.87	3.58	3.01	3.86	3.67	3.04	2.31	3.30	3.60	2.91	4.84	2.80	
Tm	0.69	0.45	0.50	0.79	0.48	0.45	0.51	0.51	0.46	0.33	0.47	0.55	0.43	0.62	0.41	
Yb	4.46	2.68	3.07	4.78	3.20	2.83	3.27	3.33	2.92	2.17	2.86	3.57	2.67	3.94	2.56	
Lu	0.59	0.34	0.47	0.68	0.46	0.43	0.49	0.49	0.41	0.32	0.44	0.49	0.41	0.57	0.39	
Y	41.3	26.4	32.0	53.0	31.5	24.9	34.9	31.8	24.2	19.6	29.9	28.7	25.4	44.7	25.7	
ΣREE	382	159	318	451	267	192	346	278	172	147	261	218	210	379	208	
(La/Yb) <sub>N</sub>	9.0	5.8	11.5	10.2	9.2	7.7	12.0	10.2	6.6	7.9	10.7	7.1	9.4	10.5	9.6	
(Gd/Yb)	2.3	2.1	2.8	2.9	2.3	1.8	2.8	2.0	1.5	1.8	2.3	1.6	2.0	2.8	2.1	



续表 2  
Continued Table 2

组 样品号 岩性	S-II (共 30 件样品)										S-EW (共 6 件样品)					
	01SX082 BTA	01SX085 B	01SX086 TB	01SX087 TB	01SX090 BTA	02SX028 B	02SX029 B	02SX103 B	01SX092 B	02SX001 BA	02SX004 A	02SX005 B	02SX007 A	02SX008 A	02SX014 B	
SiO <sub>2</sub>	52.41	51.36	46.42	46.33	52.02	50.66	50.97	51.20	51.76	52.77	57.48	50.82	59.39	58.69	49.80	
TiO <sub>2</sub>	2.31	2.49	3.78	3.60	2.54	2.80	2.83	3.09	2.37	2.58	1.86	2.05	1.39	1.43	2.25	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.00	12.95	12.39	12.86	11.95	13.50	12.98	12.57	12.21	13.59	13.85	12.89	14.11	14.08	13.30	
FeO*	14.90	15.52	17.50	17.03	17.10	13.00	14.31	15.26	17.01	12.48	10.16	12.64	9.48	9.68	13.20	
MnO	0.19	0.20	0.21	0.21	0.26	0.16	0.18	0.25	0.23	0.13	0.17	0.19	0.14	0.14	0.20	
MgO	3.56	3.88	4.57	4.66	2.52	2.96	3.59	3.35	3.44	4.05	3.05	6.19	2.74	2.96	5.97	
CaO	6.58	7.33	7.43	7.22	6.63	7.53	7.66	6.73	7.22	5.25	5.21	8.83	5.53	5.67	8.42	
Na <sub>2</sub> O	2.65	2.73	2.49	2.66	2.82	2.24	2.30	2.49	2.70	1.47	2.34	2.02	2.47	2.55	2.39	
K <sub>2</sub> O	2.70	2.29	2.89	2.83	2.65	2.17	2.21	1.65	2.06	3.08	3.27	1.11	3.04	2.95	1.34	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.86	0.90	1.98	1.83	1.18	1.09	1.02	0.67	0.67	1.28	0.72	0.26	0.46	0.49	0.25	
LOI <sup>3</sup>	0.17	-0.24	-0.25	0.11	0.24	3.23	1.10	2.04	-0.18	2.43	1.22	2.42	0.63	0.56	2.41	
Total	99.32	99.40	99.42	99.35	99.43	99.33	99.15	99.32	99.50	99.12	99.32	99.42	99.38	99.19	99.54	
Sr	401	362	332	351	315	405	380	212	300	466	425	320	447	472	306	
Rb	48.2	36.9	44.0	42.1	48.0	32.5	35.9	61.0	37.5	157	117	37.9	84.3	71.0	67.9	
Ba	1040	1010	1240	1260	1460	1500	1530	519	794	2550	1690	2510	1580	1620	282	
Th	3.66	3.01	2.67	2.62	4.84	3.49	3.52	8.91	3.39	4.23	6.36	3.22	5.15	5.21	3.29	
U	0.59	0.52	0.59	0.57	0.92	0.55	0.56	2.23	0.73	0.91	1.15	0.83	0.89	0.89	0.83	
Zr	214	190	274	256	273	193	195	461	183	367	379	154	284	279	160	
Hf	5.57	4.85	6.55	6.08	7.34	5.34	5.94	13.18	5.13	10.1	10.9	4.69	8.58	8.27	5.03	
Nb	8.91	8.16	10.8	11.6	17.0	10.3	10.1	35.8	7.31	22.9	19.6	20.5	13.2	13.2	20.6	
Ta	0.52	0.56	0.62	0.75	1.08	0.79	0.95	2.65	0.46	1.37	1.29	1.50	0.95	0.92	1.50	
Sc	27.6	25.7	23.1	21.3	31.7	28.4	30.0	30.1	36.6	25.8	21.7	37.3	19.9	20.1	36.9	
V	263	267	175	201	57.9	289	273	246	300	167	149	335	139	152	401	
Cr	15.2	14.6	2.82	11.2	4.81	22.1	27.5	40.3	9.98	111	91.2	227	78.9	80.2	171	
Co	39.0	36.3	42.7	45.4	25.8	49.3	43.6	34.0	40.6	31.9	25.3	45.3	24.6	25.5	46.9	
Cu	20.0	23.8	28.1	26.2	27.4	19.3	88.6	26.2	49.9	72.0	24.7	91.2	21.0	21.5	104	
Pb	11.5	10.5	11.0	10.7	11.9	14.1	15.7	27.0	8.47	23.0	25.2	5.78	19.9	17.6	7.81	
Zn	188	183	264	251	230	181	191	242	203	186	140	120	124	124	151	
Be	0.95	0.89	0.92	1.00	1.28	1.44	1.15	2.90	1.02	2.41	2.17	1.37	1.75	1.93	1.38	
Ga	21.6	20.4	22.0	22.0	24.0	21.2	21.6	28.0	22.0	23.9	23.0	17.0	21.9	20.9	18.1	
Cs	0.39	0.33	0.40	0.43	0.52	1.35	1.02	4.29	0.52	1.60	1.31	0.85	0.64	0.86	1.67	
Bi	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	-	0.01	0.12	0.03	0.10	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	
Li	5.09	4.16	10.6	8.31	6.74	16.3	8.76	24.5	10.4	41.1	27.9	32.9	10.6	11.7	37.7	
La	48.7	43.0	59.1	57.5	62.3	46.8	47.4	54.4	39.4	114	92.0	25.2	62.9	63.2	25.8	
Ce	96.8	85.1	123	114	131	90.1	94.2	112	80.3	237	191	53.6	132	132	53.0	
Pr	12.8	11.5	16.8	16.1	18.1	12.8	12.8	14.8	10.9	31.1	24.1	7.28	16.7	16.9	7.13	
Nd	51.3	47.4	71.1	68.9	76.6	52.6	54.1	62.9	45.9	127	94.0	31.5	65.6	66.3	30.5	
Sm	9.33	8.72	12.8	12.3	15.2	11.4	11.0	13.4	9.12	21.8	15.9	6.55	11.3	11.7	6.40	
Eu	2.89	2.72	4.10	3.76	5.21	3.29	3.19	3.59	2.83	4.68	3.44	1.78	2.78	2.78	1.76	
Gd	8.64	7.73	11.6	10.7	14.1	8.91	8.71	13.5	9.14	16.9	12.8	5.70	9.35	9.21	5.55	
Tb	1.10	1.03	1.39	1.32	1.82	1.32	1.31	2.24	1.24	2.39	1.89	0.92	1.40	1.39	0.89	
Dy	5.98	5.63	7.10	6.84	9.72	7.10	6.97	12.0	7.09	12.04	9.66	4.85	7.38	7.51	4.86	
Ho	1.20	1.12	1.36	1.32	1.89	1.38	1.37	2.32	1.51	2.24	1.83	0.93	1.41	1.42	0.91	
Er	3.47	3.16	3.76	3.73	5.25	3.85	3.77	6.44	4.39	6.20	5.08	2.52	3.97	4.06	2.46	
Tm	0.47	0.44	0.49	0.52	0.69	0.60	0.59	0.99	0.62	0.96	0.80	0.38	0.63	0.65	0.38	
Yb	3.10	2.75	3.12	3.08	4.36	3.81	3.70	5.94	4.10	5.88	4.98	2.35	3.90	4.06	2.34	
Lu	0.45	0.43	0.45	0.47	0.64	0.59	0.59	0.94	0.61	0.92	0.78	0.37	0.61	0.65	0.36	
Y	31.7	29.0	34.7	34.6	48.0	33.6	32.5	60.5	40.1	57.1	48.0	21.2	36.9	37.0	21.5	
Σ REE	278	250	351	335	395	278	282	366	257	640	506	165	356	358	164	
(La/Yb) <sup>N</sup>	10.6	10.6	12.8	12.6	9.6	8.3	8.7	6.2	6.5	13.1	12.5	7.3	10.9	10.5	7.4	
(Gd/Yb)	2.3	2.3	3.1	2.9	2.7	1.9	1.9	1.9	1.8	2.4	2.1	2.0	2.0	1.9	2.0	

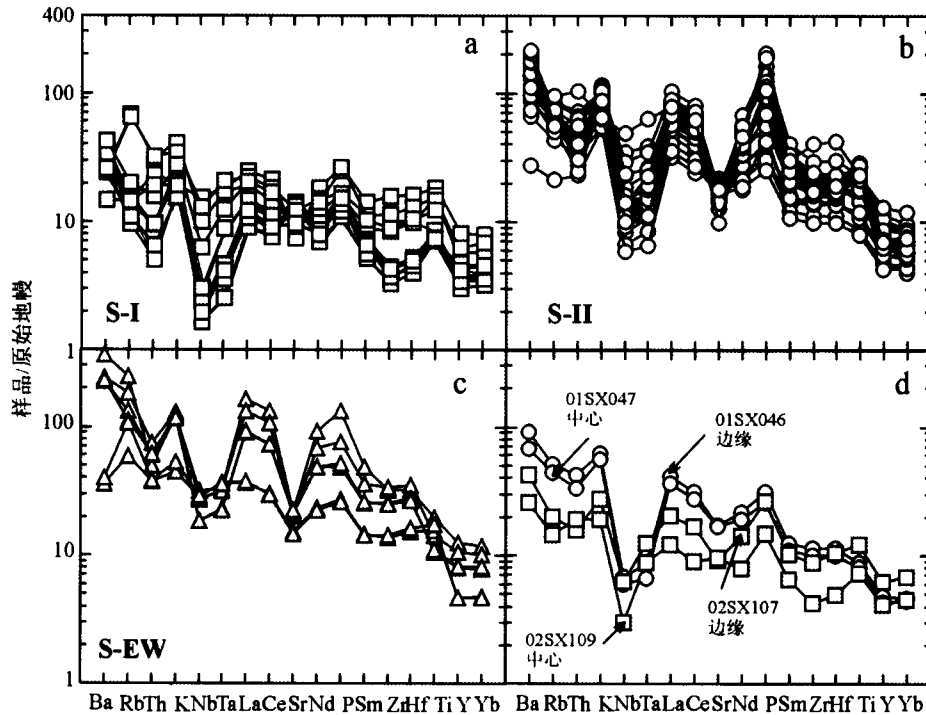


图5 岩墙原始地幔标准化蜘蛛图(原始地幔标准值据 Sun&McDonough, 1989), 样品图例同图3。

Fig. 5 Primitive mantle-normalized multi-element spidergrams for the dykes (Primitive mantle values of Sun & McDonough, 1989). Sample symbols as in Fig. 3.

S-II的样品因其相对高的 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{FeO}^*$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 和稀土总量( $\sum\text{REE}$ ), 相对低的 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 和 $\text{Mg}^*$ , 以及明显不同的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 比值而区别于S-I组的样品。Sm和Nd含量也显著要高。虽然部分S-I岩墙的 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{FeO}^*$ 含量也较高, 但是在相同的 $\text{SiO}_2$ 含量下S-II的 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{FeO}^*$ 含量高于S-I, 这部分 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{FeO}^*$ 含量相对较高的S-I样品可能是内部分异和(或)两组混合造成的。S-I和S-II分别表现为低 $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$ 和高 $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$ 玄武岩, 相对S-I而言, S-EW也具有较高的 $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$ 含量(表3)。S-I为 $\text{MgO}$ 含量相对较高的拉斑玄武岩; S-II的一些样品表现为碱性特征, 另一些样品表现为亚碱性, 属于高Fe玄武岩系列; 而S-EW为高Fe拉斑玄武岩和安山岩(图3ab)。S-I的稀土总量( $\sum\text{REE}$ )为58 ~ 154 ppm, 多数小于100 ppm(表3), REE模式相对平坦(图4a)。S-I又可以分为两个亚组, 一亚组样品指示轻微的负Eu和Sr异常,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.1 \sim 1.3$ , 而另外一亚组样品表现为正Eu和Sr异常, 并且更加亏损Nb、Ta、Zr、Hf等元素(图5a),  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.3 \sim 1.5$ 。这表明两亚组之间存在一定程度的分异。S-II的稀土总量( $\sum\text{REE}$ )为147 ~ 451 ppm, 大多数大于210 ppm(表3)。REE模式显示轻稀土较为富集(图4b)。并且, 大多数样品明显亏损Nb、Ta和Sr, 而富集Ba、K和P(图5b)。S-EW的稀土总量( $\sum\text{REE}$ )为164 ~ 640 ppm, REE模式显示轻稀土最为富集(图4),

$(\text{La}/\text{Yb})_N = 7.3 \sim 13.1$ , 而 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.9 \sim 2.4$ (表3)。样品富集Ba、Rb、K、La、Ce和P而相对亏损Nb、Ta和Sr(图5c)。

#### 4.3 岩墙的演化趋势

从元素相关性图解来看(图6, 7a bcd), 三组岩墙群具有不同的岩浆演化趋势。在 $\text{LOI}$  vs  $\text{MgO}$ 和 $\text{LOI}$  vs  $\text{SiO}_2$ 图上(图6), S-II和S-EW样品并没有显示明显的后期改造的特征。S-I的样品在 $\text{LOI}$  vs  $\text{MgO}$ 图上显示一定的线性关系, 但是 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeO}^*$ 值却显示很大的变化, 因此S-I样品记录了岩浆演化的特征。图6中, S-I样品的一些元素随着 $\text{MgO}$ 的变化产生线性变化, 表现为随着 $\text{MgO}$ 含量的降低,  $\text{FeO}^*$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、La、Nb、Sm、Zr和Hf等升高, 而 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、Sr、Ni和Cr等降低。相容元素, 尤其是Ni和Cr等随着 $\text{MgO}$ 和 $\text{SiO}_2$ 的变化有很明显的变化。大部分元素随着 $\text{SiO}_2$ 的变化趋势不明显(图6)。图7中, S-I样品的相容元素和不相容元素图解显示不同程度部分熔融的特征。因此, S-I的岩浆演化总体上表现为不同程度的部分熔融, 结晶分异的影响相对较小。

S-II显示富铁贫硅的结晶分异趋势(Fenner趋势), 表现为随着 $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 等元素含量的降低,  $\text{FeO}^*$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、Ba、La、Nb、Sm、Zr和Hf升高(图6)。 $\text{Na}_2\text{O}$ 、Sr和相容元素(如Sc、Cu、Ni和Cr)变化较小(图6)。图7也显示了明

表 3 三组岩墙的基本特征比较

Table 3 Basic characteristics comparison of the three dyke swarms

	S-I	S-II	S-EW
产状	NNW 向, 近直立 岩墙规模较大, 岩石新鲜	NNW 向, 近直立 岩墙规模变化大, 岩石不同程度风化	E-W 向, 近直立 岩墙规模较大, 岩石较为新鲜
分布	桑干-恒山-太行地区	桑干-恒山-太行地区	太行地区南部、吕梁地区
岩石组合	玄武岩	粗面玄武岩、玄武岩、玄武粗安岩、 玄武安山岩	玄武岩、玄武安山岩、安山岩
矿物组合	单斜辉石、斜长石 铁钛氧化物、黑云母、碱性长石、 石英	单斜辉石、斜长石、铁钛氧化物、 角闪石、黑云母、碱性长石、石英, 有时见橄榄石斑晶	单斜辉石、角闪石、斜长石、石英 铁钛氧化物、黑云母、碱性长石
岩石化学	MgO 含量相对高的拉斑玄武岩 低 FeO* - TiO <sub>2</sub> - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	碱性-亚碱性玄武岩 高 FeO* - TiO <sub>2</sub> - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	拉斑玄武岩-安山岩
岩浆演化	不同程度部分熔融, 组内显示分离 结晶趋势, 有一定地壳混染	富铁贫硅分离结晶趋势, 有明显的 地壳混染特征	富硅贫铁分离结晶趋势, 有明显的 地壳混染特征
地球化学特征			
SiO <sub>2</sub> (wt%)	48.99 ~ 50.98 (50.14) *	45.95 ~ 54.46 (50.24)	49.80 ~ 59.39 (54.83)
TiO <sub>2</sub> (wt%)	0.94 ~ 2.51 (1.46)	1.04 ~ 3.78 (2.66)	1.39 ~ 2.58 (1.93)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt%)	12.18 ~ 15.40 (14.25)	10.17 ~ 14.17 (13.00)	12.89 ~ 14.11 (13.64)
FeO* (wt%)	12.90 ~ 16.85 (13.85)	12.57 ~ 19.1 (15.34)	6.96 ~ 13.20 (11.27)
MgO (wt%)	4.57 ~ 7.98 (6.33)	2.52 ~ 5.96 (4.04)	2.74 ~ 6.19 (4.16)
CaO (wt%)	8.99 ~ 10.61 (9.94)	6.31 ~ 8.74 (7.41)	5.21 ~ 8.83 (6.49)
Na <sub>2</sub> O (wt%)	1.98 ~ 2.39 (2.21)	2.24 ~ 3.22 (2.63)	1.47 ~ 2.55 (2.21)
K <sub>2</sub> O (wt%)	0.44 ~ 1.14 (0.67)	1.35 ~ 2.95 (2.29)	1.11 ~ 3.27 (2.47)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (wt%)	0.10 ~ 0.24 (0.17)	0.24 ~ 1.98 (1.13)	0.25 ~ 1.28 (0.58)
Mg#	43.0 ~ 56.1 (49.5)	24.7 ~ 51.3 (36.8)	39.1 ~ 52.1 (44.0)
Sm (ppm)	2.28 ~ 6.25 (3.74)	4.84 ~ 18.3 (8.81)	6.40 ~ 21.8 (12.3)
Nd (ppm)	9.46 ~ 24.4 (15.5)	26.6 ~ 92.9 (46.8)	30.5 ~ 127 (69.2)
Σ REE (ppm)	58 ~ 154 (93)	147 ~ 451 (290)	164 ~ 640 (365)
(La/Yb) <sub>N</sub>	2.5 ~ 3.7 (3.0)	5.8 ~ 12.8 (9.8)	7.3 ~ 13.1 (10.3)
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.1 ~ 1.5 (1.4)	1.5 ~ 3.1 (2.3)	1.9 ~ 2.4 (2.1)

\* 圆括号中的数据为该组岩墙数据的平均值。

显的分离结晶作用趋势。同一条岩墙沿着走向上元素演化也有相似的特征(图 8)。一般认为, 岩浆低氧逸度结晶分异会产生富铁贫硅系列的岩石, 这一趋势在 Reykjanes、Galapagos 和 Skaergaard 等地有过报道(Brooks *et al.*, 1991 及其文献)。用 K<sub>2</sub>O 和 La 对 Zr 的相关关系来模拟结晶分异过程(图 9ab)显示长石是岩浆分异的可能矿物相。长石的强烈分异可能也是导致该组岩墙 Sr 异常的原因。斜长石环带结构(图 2)的化学特征可以很好的用结晶分异过程来解释。橄榄石反应边结构可以用分离结晶作用过程来解释: 早期晶出的橄榄石结晶到一定程度时 SiO<sub>2</sub> 达到饱和, 进而可能会与熔体反应形成斜方辉石, 同样, 斜方辉石会与熔体反应形

成角闪石, 最后甚至出现黑云母。

S-EW 表现为一个贫铁富硅的演化过程(Bowen 趋势, 图 6), 与 S-I 和 S-II 两组相比, 本组各种元素的分异大都记录了一个变化过程: FeO\*、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Ba、Sr、La、Nb、Sm、Zr 和 Hf 等的含量首先随着 MgO 含量降低而升高或者保持不变, 然后在约 SiO<sub>2</sub> = 53 wt% 和 MgO = 4 wt% 的位置降低(图 6), 而 CaO、Sc、Cu、Ni 和 Cr 等的含量首先是降低, 然后轻微的降低或者基本不变(图 6)。这个转折很有可能是结晶分异的矿物相发生改变造成的。从图 9ab 少量样品的数据模拟来看, 似乎可以用长石分异变化到角闪石分异来解释。

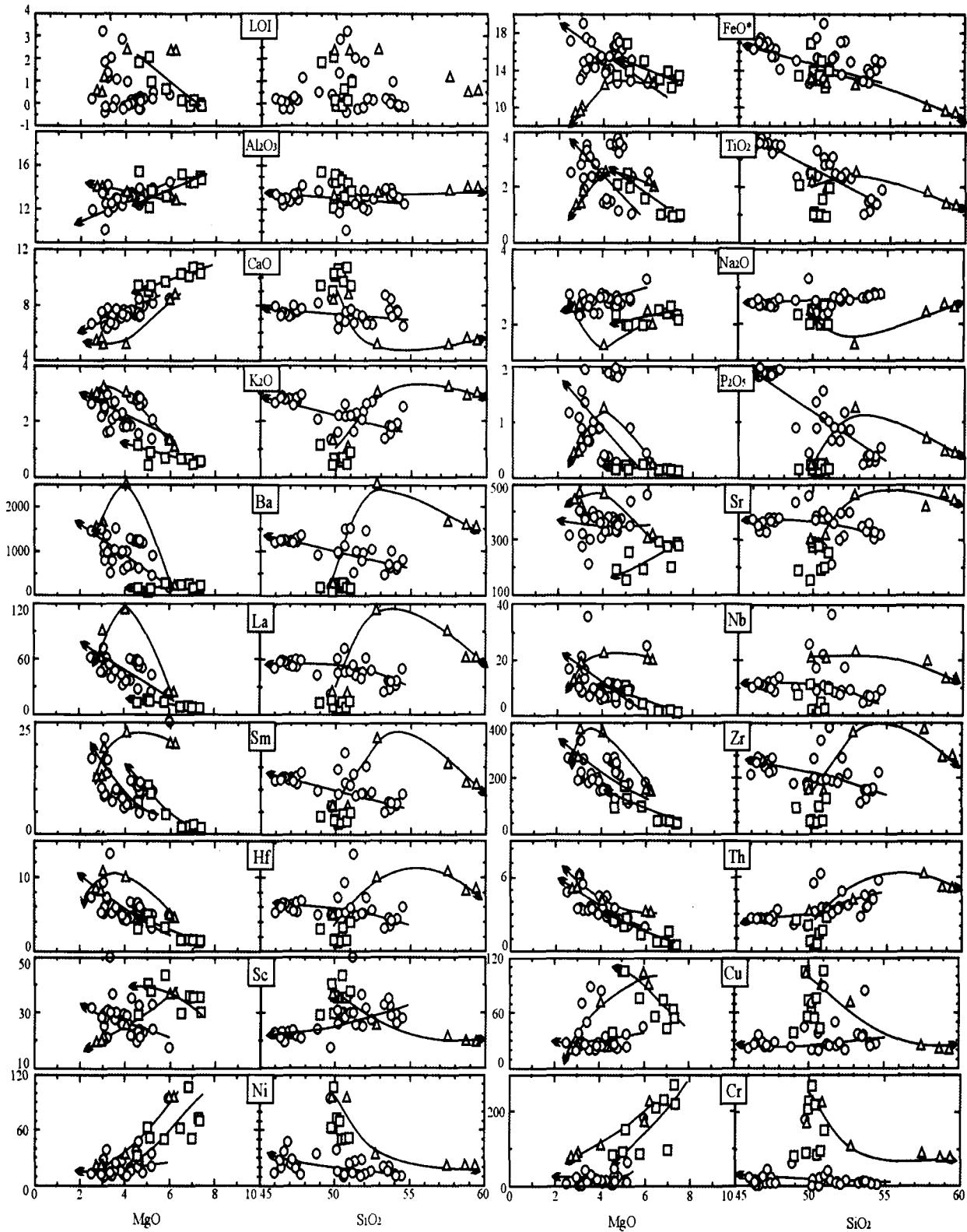


图6 岩墙的 LOI(wt%)、部分主量元素(wt%)和微量元素(ppm)和 MgO(wt%)、SiO<sub>2</sub>(wt%) 相关关系图, 样品图例同图3, 箭头所示为可能的演化趋势线。

Fig. 6 LOI, major elements and selected trace element vs. MgO and SiO<sub>2</sub> for the dykes in the NCC. Sample symbols as in Fig. 3. Possible magma differentiation trends are shown with arrows.

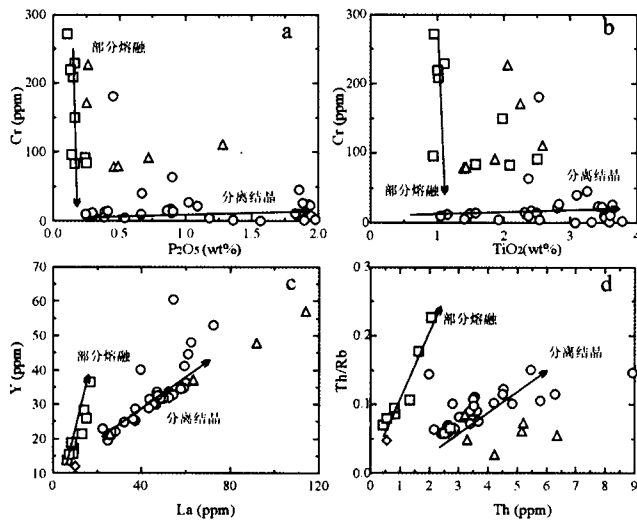


图7 a. Cr vs. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>图; b. Cr vs. TiO<sub>2</sub>图; c. Y vs. La 图; d. Th/Rb vs. Th 图。样品图例同图3。

Fig. 7 a. Cr vs. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> plot; b. Cr vs. TiO<sub>2</sub> plot; c. Y vs. La plot; d. Th/Rb vs. Th plot. Sample symbols as in Fig. 3.

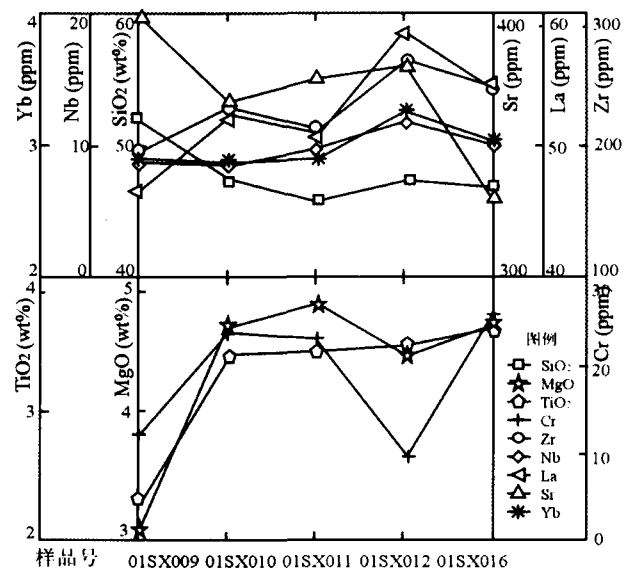


图8 岩墙内部沿着走向方向上的地球化学变化

Fig. 8 Chemical variations within an individual dyke along its extending direction.

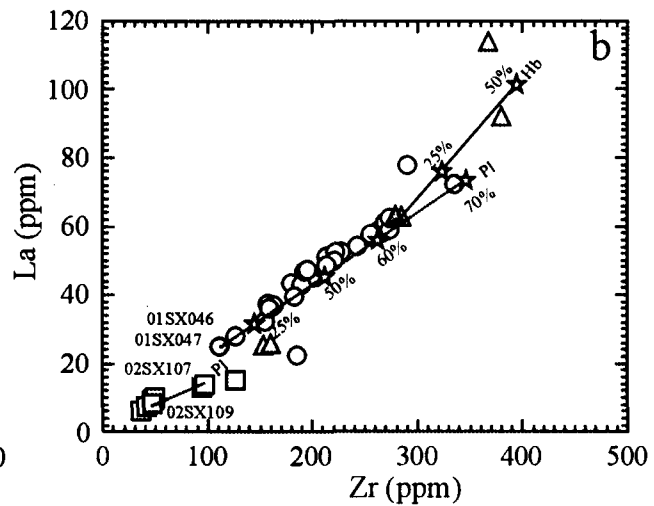
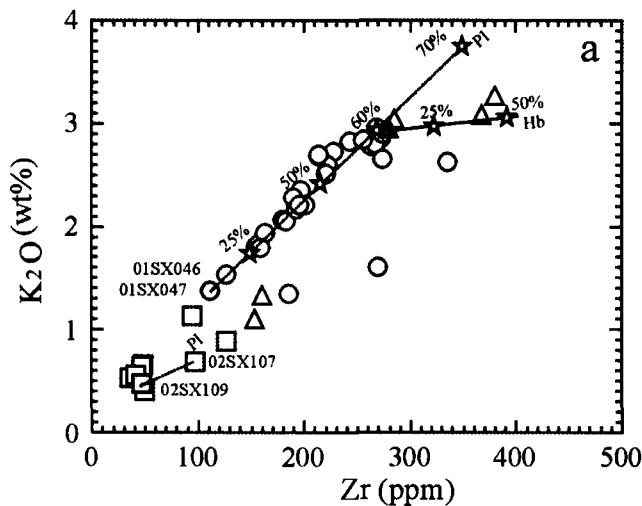


图9 K<sub>2</sub>O (wt%) - Zr(ppm) (a)和 La(ppm) - Zr(ppm)分异图解

虚线和实线分别为模拟的长石和角闪石分异线，模拟计算从图中有阴影的样品开始，而五角形边上的数据对应模拟计算的分异量。分异系数根据 Rollison(1995) (对应长石和角闪石中的 K<sub>2</sub>O、Zr 和 La 的分异系数分别为 0.170、0.048 和 0.1477, 0.96、0.50 和 0.25)，样品图例同图3。

Fig. 9 Biaxial plots showing fractionation trends for (a) K<sub>2</sub>O wt% vs. Zr ppm; and (b) La ppm vs. Zr ppm.

Dashed line corresponds to modeling fractionation of plagioclase, solid line for hornblende. Calculation began with the samples with the dark symbols. Numbers adjacent to pentagons give amount of fractionation. Distribution coefficients used in modeling are from Rollison (1995) (0.170, 0.048, and 0.1477 for plagioclase (Pl), and 0.96, 0.50, and 0.25 for hornblende (Hb), respectively to K<sub>2</sub>O, Zr, and La). The samples marked 'm' and 'i' in each swarm are from the margin and interior of the same dyke. Sample symbols as in Fig. 3.

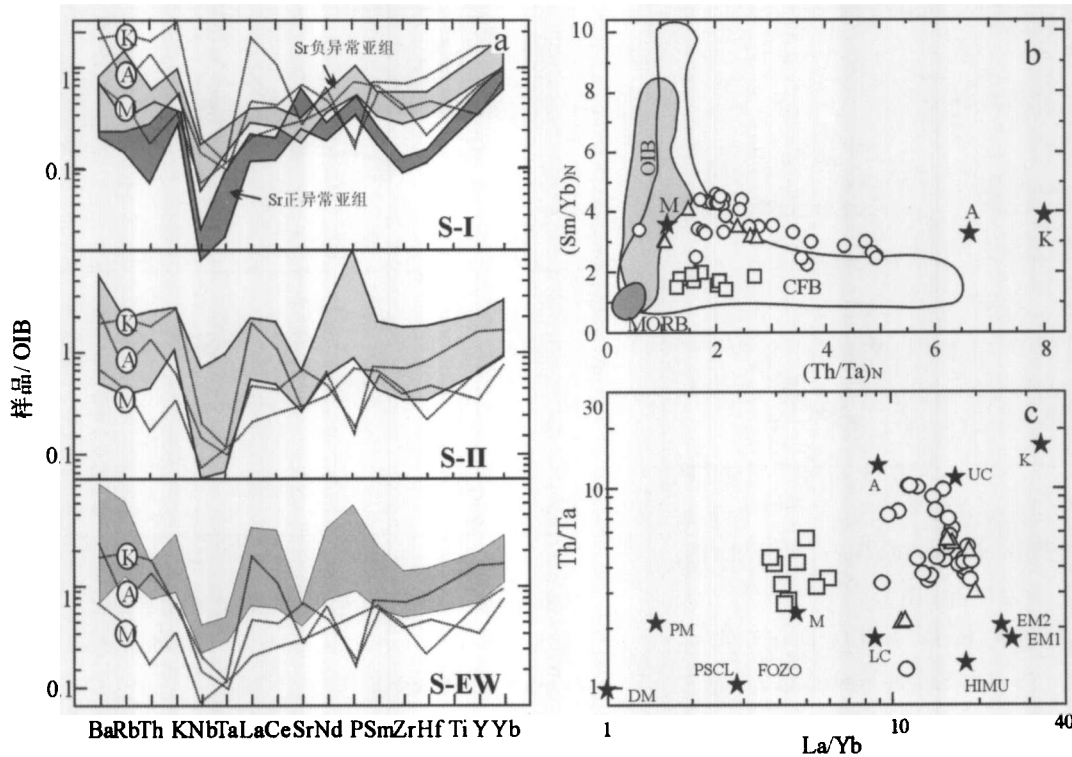


图 10 (a) OIB 标准化蜘蛛图(OIB 标准值据 Sun and McDonough, 1989); (b)  $(\text{Sm}/\text{Yb})_N$  vs.  $(\text{Th}/\text{Ta})_N$  图解(根据 Wooden *et al.*, 1993); (c)  $\log(\text{Th}/\text{Ta})$  vs.  $\log(\text{La}/\text{Yb})$  图解(据 Condie, 1997)

图中, M、A 和 K 分别为基性、酸性麻粒岩和孔兹岩系的元素含量平均值(据 Zhai *et al.*, 2002); PM, 原始地幔; PSCL, 太古宙后陆下岩石圈; LC, 下地壳; UC, 上地壳; HIMU, 高 U/Pb 地幔源; EM 1 和 EM2, 富集地幔; FOZO, 下地幔地幔柱成分(FOZO 之下和周围), 样品图例同图 3。

Fig. 10 (a) OIB-normalized spidergram (OIB values of Sun and McDonough, 1989); (b)  $(\text{Sm}/\text{Yb})_N$  vs.  $(\text{Th}/\text{Ta})_N$  plot (after Wooden *et al.*, 1993); (c)  $\log(\text{Th}/\text{Ta})$  vs.  $\log(\text{La}/\text{Yb})$  plot (after Condie, 1997); M, A, and K are average mafic granulite, acid granulite, and khondalite compositions of the study area respectively, after Zhai *et al.*, 2002; PM, primitive mantle; PSCL, post-Archaean subcontinental lithosphere; LC, lower continental crust; UC, upper continental crust; HIMU, high U/Pb mantle source; EM 1 and EM2, enriched mantle sources; FOZO, lower mantle plume component (area on the graph beneath and around the word FOZO). Sample symbols as in Fig. 3.

#### 4.4 岩浆演化过程中的地壳混染

Zhai *et al.* (2001) 报道了岩墙群分布区的基性和酸性麻粒岩以及孔兹岩的数据, 并认为三者代表了从下地壳到中下地壳的地球化学特征, 本文选取这些数据作为岩墙围岩的地球化学的代表。图 9 中, 'M'、'A' 和 'K' 分别指 Zhai *et al.* (2001) 报道的基性和酸性麻粒岩以及孔兹岩系的地球化学数据的平均值。从洋中脊玄武岩(OIB)标准化微量元素蜘蛛图(图 10a),  $(\text{Sm}/\text{Yb})_N$  vs.  $(\text{Th}/\text{Ta})_N$  图(图 10b) 和  $\text{Th}/\text{Ta}$  vs.  $\text{La}/\text{Yb}$  图(图 10c) 可以看出, S-II 和 S-EW 具有明显的地壳混染特征。地壳混染(尤其是酸性麻粒岩和孔兹岩系)对于 Ba、Th、La 和 Ce 的富集和 Nb、Ta 和 Sr 的亏损可能有较大的影响(图 10a)。从图 10a 来看 S-I 也可能经历了

一定程度地壳混染的特征。

从岩墙的边缘到中心, 一个 S-I 样品显示分异的特征(表 2, 样品号 02SX107(边部)和 02SX109(中心))和平行的 REE 模式(图 4d)。在微量元素蜘蛛图上(图 5d) 边部的地球化学特征和 S-I 的 Eu、Sr 负异常的亚组相近, 而中心部分和正异常的亚组相近。对于 S-II 的一对样品(表 2, 样品号 01SX046(边部)和 01SX047(中心)), 从边部到中部 MgO 含量轻微升高, 而  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO}^*$  和 REE 含量轻微降低。而 REE 模式(图 4d) 和微量元素特征(图 5d) 相近。趋势演化模拟(图 9ab) 显示长石分异的特征。因此 S-I 中 Eu 和 Sr 异常同样可以用长石分异来解释。岩墙都有明显的冷凝边结构, 并且和围岩接触截然, 结合岩墙边部到中部的分异特征来看, 岩墙的地壳混染主要发生在侵入结晶之前。

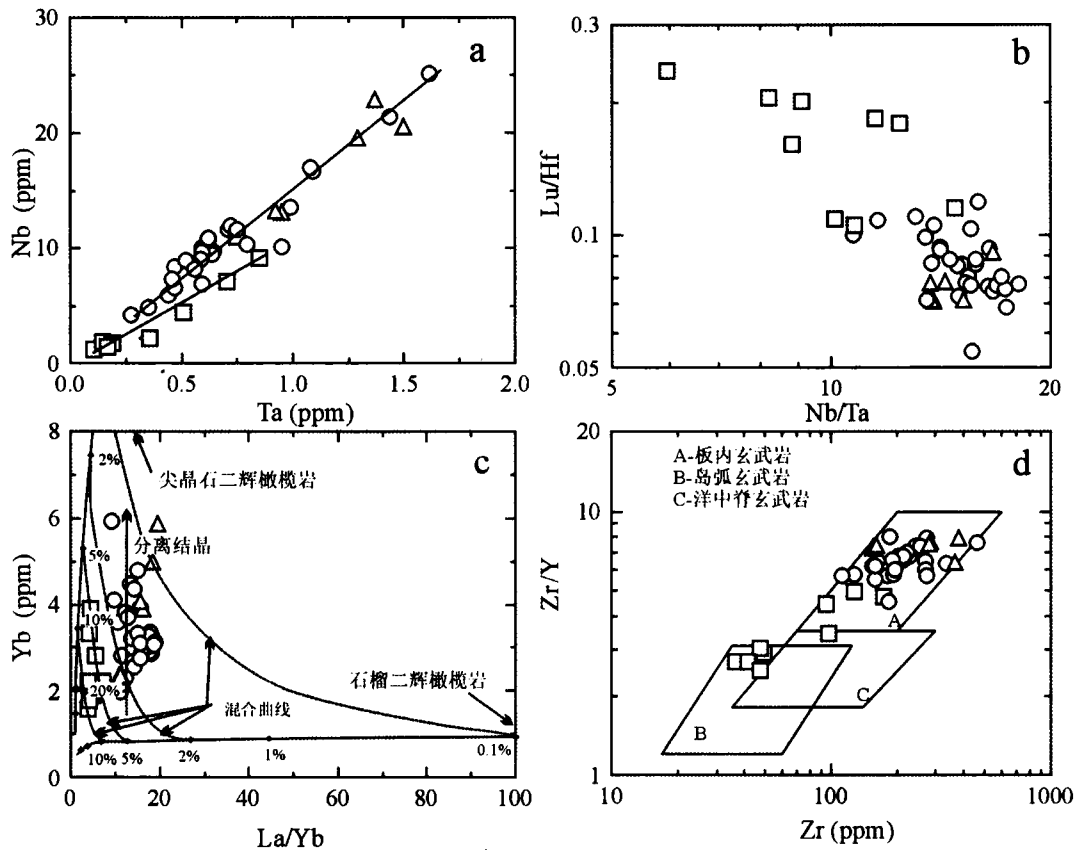


图 11 (a) Nb vs. Ta 图解; (b) Lu/Hf vs. Nb/Ta 图解; (c) Yb vs. La/Yb 图解:部分熔融模拟根据假设的尖晶石二辉橄橄榄岩和石榴石二辉橄橄榄岩地幔源区进行:分配系数引自 Mckenzie & O' Nions (1991), 假设尖晶石二辉橄橄榄岩的矿物组成为 Ol 0.636、Opx 0.263、Cpx 0.012、Sp 0.033, 而石榴石二辉橄橄榄岩为 Ol 0.598、Opx 0.211、Cpx 0.076、Gt 0.116。假设源区的组成为 La 0.687 ppm 和 Yb 0.493 ppm(引自 Sun & McDonough, 1989); (d) 岩墙群的 Zr/Y - Zr 图解(据 Pearce and Cann, 1973)。样品图例同图 3。

Fig. 11 (a) Nb vs. Ta plot; (b) Lu/Hf vs. Nb/Ta plot. (c) Yb vs. La/Yb diagram. Modal partial melting trends are indicated for hypothetical modal spinel and garnet lherzolite mantle sources, calculated using partition coefficients from Mckenzie & O' Nions (1991), with assumed modal source mineralogy of Ol 0.636, Opx 0.263, Cpx 0.012, and Sp 0.033 for spinel lherzolite, and Ol 0.598, Opx 0.211, Cpx 0.076, and Gt 0.116 for garnet lherzolite. The assumed source composition, which is La 0.687 and Yb 0.493, is from Sun & McDonough (1989). (d) log (Zr/Y) - log (Zr) diagram (after Pearce and Cann, 1973). Sample symbols as in Fig. 3.

### 5 岩墙群地质意义讨论

S-I 和 S-II 在空间展布上没有明显的差别, 而且古地磁数据显示所有 NNW 向岩墙有很好的-一致性(Halls *et al.*, 2000)。野外见 NNW 和 E - W 向岩墙同时侵入的关系。而且也没见到这三组岩墙截切长城系或者更年轻的地层, 因此我们认为三组岩墙的活动虽然可能有一定先后, 延续时间长短可能不同, 但是大致开始于 1.8 Ga(或者 1.78 Ga,

据彭澎, 未发表数据)。而这三组岩墙存在较为明显的差异, 组与组之间既相关又缺乏连续性, 它们可能受不同的岩浆过程制约。

Ti 的异常通常被认为是分异的结果, 而 Nb 和 Ta 更多的代表源区的属性, 与一定条件下地幔源区稳定相有关(Briqueu *et al.*, 1984)。Nb 和 Ta 的半径相近、电荷数相同, 因此一般认为 Nb/Ta 的值在岩浆作用过程中(包括结晶分异和部分熔融)保持不变(Kamber & Collerson, 2000), 除了极低程度部分熔融和极亏损的 MORB 岩套(Niu & Batiza,

1997)。S-II 中  $\text{TiO}_2$  的含量有很大的跨度, 表明该组岩墙的分异强烈。S-I 的  $\text{TiO}_2$  含量也有较大的变化, 也应该是组内分异和(或)S-I 和 S-II 两组之间混合的结果。但是应该注意的是在相同的  $\text{SiO}_2$  下 S-II 的  $\text{TiO}_2$  含量高于 S-I 的含量, 这一特征应该反映了它们源区的差异。而三组岩墙 Nb 和 Ta 的变化很大(表 2, 3, 图 11a), 这也可能代表了源区存在一定的差异。三组岩墙在  $\log \text{Lu}/\text{Hf} - \log \text{Nb}/\text{Ta}$  图上(图 11b)显示线性关系, 表明三组岩墙可能存在相互混合。三组岩墙 Nb/Ta 平均值分别为 10.0、15.0 和 14.6, 低于地幔值的平均值( $\sim 17.5$ ), 尤其 S-I 组显著低(图 11ab), 而其地壳混染特征又不如另外两组明显, 因此 Nb/Ta 值除了地壳熔体的影响, 也可能和源区过程不同有关。Ionov & Hofmann (1995) 认为极低 Nb/Ta 值和相对 Nb-Ta 亏损的特征可能是地幔源区残留角闪石中富集这些元素造成的。

S-I 和 S-II 分别为低  $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$  和高  $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$  玄武岩, 两种类型玄武岩同时出现的情况在其它地区也有报道, 如在 Pantelleria 岛, 源区位于较低深度的低  $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$  的玄武岩紧接着高  $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$  玄武岩喷发(Civetta *et al.*, 1998)。其他大型火山岩省如 Deccan、Karoo、Parana 和 Indo-China 等也有相似的演化过程, 并且高  $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$  玄武岩被认为显示了软流圈地幔的特征, 而低  $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$  的玄武岩体现了岩石圈地幔的特征(Mahoney, 1988; Gallagher & Hawkesworth, 1992; Hoang *et al.*, 1996)。在 Yb vs. La/Yb 图上(图 11c), S-I 大致位于假设的尖晶石二辉橄榄岩源区分异线附近; S-II 和 S-EW 投点显示假设的尖晶石二辉橄榄岩和石榴石二辉橄榄岩源区对二组岩墙都有贡献, 这也支持前人的推测。S-I 和 1760 Ma 的熊耳群表现了相似的地球化学特征(见 Zhao *et al.*, 2002 数据), 中条山地区一些 NNW-NNE 和 EW 向岩墙被中元古代西阳河群覆盖, 被认为和熊耳群相关(周鼎武等, 2000)。因此, S-I 可能和熊耳群具有相似的地幔源区, 可能是陆下岩石圈地幔(Zhao *et al.*, 2002)。图 11d 显示所有 S-II 和 S-EW 岩墙投在板内玄武岩区域, S-I 岩墙部分样品还投到了岛弧玄武岩区域。然而所有的样品的  $\text{TiO}_2$  含量为 1.0 ~ 4.0% ( $\text{MgO}$  为 2.0 ~ 8.0%), 这是地幔柱相关玄武岩的特征, 而不同于受岛弧影响的源区的特征(Puffer, 2001)。另外, 高铁玄武岩和相关的铁质苦橄岩见于 Parana-Etendeka 大陆溢流玄武岩(CFB)组合底部, 被认为来自地幔柱(Gibson *et al.*, 2000)。因此我们认为 S-II 和 S-EW 可能涉及到其它地幔源区(如, 软流圈或深部地幔)。至于 S-II 和 S-EW 的演化趋势的不同(分别属于 Fenner 和 Bowen 分异趋势), 应该是氧逸度不同造成的(Brooks *et al.*, 1991)。对于两种趋势在同一大火成岩省出现的现象, Xu *et al.* (2003) 在峨眉山玄武岩中有过报道, 认为是地壳混染过程改变氧

逸度而造成的。但是, 本区 S-II 和 S-EW 两组岩墙都有较强的地壳混染特征, 因此我们推测可能和其母岩浆的氧逸度不同有关。

华北克拉通 1.8 Ga 镁铁质岩墙群还包括泰山地区(1760Ma, K-Ar 全岩等时线年龄, 庄育勋等, 1997)、冀东地区(1729 ~ 1759Ma, Sm-Nd 全岩等时线年龄, 李铁胜, 1999)、中条山地区(地层制约, 周鼎武等, 2000)等的岩墙(图 1 插图)。华北克拉通 1.8 Ga 镁铁质岩墙群产状上呈现以熊耳裂谷为中心, 向北放射状或者同心圆状分布的特征。用地幔柱相关的基性岩墙似乎能解释岩墙群的分布特征以及不同源区的特征。本区最宽的岩墙达 100 m, 这和 Abbott & Isley (2002) 提出的超级地幔柱最宽的岩墙应该大于 70m 是吻合的。Zhao *et al.* (2002) 提出熊耳群以及周边的超基性岩构成了熊耳大型火成岩省, 也可用地幔柱来解释。Rogers & Santosh (2002) 认为古元古代 Columbia 超大陆包括华北克拉通, 我们推测华北克拉通和 Baltica 的岩墙群以及熊耳大型火成岩省可能与一个超级地幔柱活动有关, 岩墙群的分支特征(显示岩流从南向北和由下向上)和以熊耳地区为中心的地幔柱活动在空间上是吻合的。

## 6 初步结论

(1) 晋冀蒙交界地区 1.8 Ga 镁铁质岩墙群产于统一构造体制下, 主体开始于 1.78 Ga 前后。岩墙主要造岩矿物为单斜辉石和斜长石。岩墙呈碱性到亚碱性, 部分显示高-Fe 玄武岩特征。岩墙中度到高度 LREE 富集。在微量元素蜘蛛图上, 岩墙相对富集 Ba、K、La 和 P, 相对亏损 Nb 和 Ta。

(2) 岩墙群可以根据产状和岩石化学特征分成三组。其中, S-I 和 S-II 为 NNW 向岩墙群, S-I 为相对高 Mg 的拉斑玄武岩, 低  $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$ , S-II 为高 Fe 玄武岩, 相对高  $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$ 。S-EW 为 E-W 向岩墙群, 为富 Fe 拉斑玄武岩和安山岩, 相对高  $\text{FeO}^* - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$ 。S-I 显示不同程度的部分熔融特征, 并且组内和岩墙内部也显示一定的分异特征; S-II 表现为富铁贫硅的演化趋势(Fenner 趋势); S-EW 表现为富硅贫铁趋势(Bowen 趋势), S-II 和 S-EW 都经历了明显的地壳混染。三组岩墙可能存在部分混合, 并且可能涉及两个或者多个地幔源区, 可能是和地幔柱事件相关的大陆裂解的产物。

致谢: 成文和修改过程中与李继亮研究员、金成伟研究员、郭敬辉研究员、李江海教授、陈福坤博士、李铁胜博士和 T. Kusky 博士等进行了有益的讨论, 张艳斌博士参加了部分野外工作, 徐平博士、李禾老师和靳新娣老师等帮助进行了部分测试工作, 谨致谢忱。



## References

- Abbott DH and Isley AE. 2002. The intensity, occurrence, and duration of superplume events and eras over geological time. *Journal of Geodynamics*, 34:265-307
- Bai J, Huang XG, Dai FY, Wu CH. 1993. The Precambrian evolution of China. Beijing: Geological Publishing House, 65-79 (in Chinese with English abstract)
- Brooks KC, Larsen LM and Nielsen TFD. 1991. Importance of iron-rich tholeiitic magmas at divergent plate margins: A reappraisal. *Geology*, 19:269-272
- Chen B and Zhai MG. 2002. Geochemistry of late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, north China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle. *Geol. Mag.*, 139(6):1-7
- Chen XD and Shi LB. 1983. Primary study on diabase dyke swarms in Wutai-Taihang area. *Chinese Science Bulletin*, 16:1002-1005 (in Chinese)
- Cheng YQ and Zhang SG. 1982. Notes on the metamorphic series and metamorphic belts of various metamorphic epochs of China and related problems. *Regional Geology of China*, 2:1-14 (in Chinese with English abstract)
- Civetta L, D'Antonio M, Orsi G and Tilton GR. 1998. The geochemistry of volcanic rocks from Pantelleria island, Sicily Channel: petrogenesis and characteristics of the mantle source region. *Journal of Petrology*, 39:1453-1493
- Condie KC. 1997. Sources of Proterozoic mafic dyke swarms: constraints from Th/Ta and La/Yb ratios. *Precambrian Research*, 81:3-14
- Gallagher K, Hawkesworth C. 1992. Dehydration melting and the generation of continental flood basalts. *Nature*, 358:57-59
- Gibson SA, Thompson RN and Dickin AP. 2000. Ferroperites: geochemical evidence for Fe-rich streaks in upwelling mantle plumes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 174:355-374
- Guo JH, Zhai MG and Xu RH. 2001. Timing of the granulite facies metamorphism in the Sanggan area, North China craton: zircon U-Pb geochronology. *Science in China (Series D)*, 44(11), 1010-1018
- Halls HC, Li JH, Davis D, Hou GT, Zhang BX and Qian XL. 2000. A precisely dated Proterozoic paleomagnetic pole from the North China Craton, and its relevance to paleocontinental construction. *Geophy. J. Int.*, 143:185-203
- Hoang N, Flower MFJ and Carlson RW. 1996. Major, trace element, and isotopic compositions of Vietnamese basalts: interaction of hydrous EMI-rich asthenosphere with thinned Eurasian lithosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60:4329-4351
- Hou GT and Mu ZG. 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): 267-270 (in Chinese with English Abstract)
- Hou GT, Li JH and Qian XL. 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 GT, Zhang C and Qian XL. 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)
- Hou J, Wang KY, Liu XH and Deng XG. 1999. Stratigraphic classification and their tectonic setting of the Fuping high-grade metamorphic complex. In: Chen HH, Hou QL and Xiao WJ eds., *Collision Orogenic Belts of China*. Beijing: China Ocean Press, 114-121 (in Chinese with English Abstract)
- Ionov DA and Hofmann AW. 1995. Nb-Ta-rich mantle amphiboles and micas; implications for subduction-related metasomatic trace element fractionations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 131: 341-356
- Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523-548
- Kamber BS and Collerson KD. 2000. Role of hidden deeply subducted slabs in mantle depletion. *Chemical Geology*, 166: 241-254
- Kröner A, Zhao GC, Wilde SA, Zhai MG, Passchier CW, Sun M, Guo JH, O'Brien, Walte N. 2002. A late Archaean to early Proterozoic lower to upper crustal section in the Hengshan-Wutaishan area of northern China, Guidebook for Penrose Conference Field Trip. Penrose Conference, Beijing, 2002 Sept., 32-39
- Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22: 383-397
- Kusky TM, Li JH, Tucker RT. 2001. The Archaean Dongwazi ophiolite complex, North China craton: 2.505 billion year old oceanic crust and mantle. *Science*, 292: 1142-1145
- Li JH and Qian XL. 1994. The early Precambrian crustal evolution of Hengshan metamorphic terrain, north China craton. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 124 (in Chinese with extended English abstract)
- Li JH, Hou GT, Qian XL, Halls HC and Don D. 2001. Single-zircon U-Pb age of the initial Mesoproterozoic basic dyke 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 JH, Kusky TM and Huang XN. 2002. Neoproterozoic podiform chromitites and mantle tectonites in ophiolitic mélange, North China Craton: a record of early Oceanic mantle oceanic mantle processes. *GSA Today*, 12: 4-11
- Li TS. 1999. Taipingzhai-Zunhua Neo-Archaean island arc terrain and continental growth in Eastern Hebei, North China. [Doctoral paper]. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing, 73-88 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Yang CL, Li HK et al. 2002. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China craton. *Gondwana Research*, 5: 123-131
- Mahoney JJ. 1988. Deccan traps. In: JD MacDougall ed., *Continental flood basalt*. Kluwer Acad. Publ., 151-194
- Mckenzie D and O'Nion RK. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *J. Petrology*, 32: 1021-1091
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274: 321-355
- Niu Y and Baltiza R. 1997. Trace element evidence from seamounts for recycled oceanic crust in the eastern Pacific mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 471-483
- Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19(2): 290-300
- Pearce TH, Gorman BE and Birkett TC. 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basaltic and intermediate volcanic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36: 121-132
- Peng P and Zhai MG. 2002. Two major Precambrian geological events of North China Block (NCB): characteristics and property. *Advance in Geology*, 17(6): 818-825 (in Chinese with English abstract)
- Puffer JH. 2001. Contrasting high field strength element contents of continental flood basalts from plume versus reactivated-arc sources. *Geology*, 29(8): 675-678
- Qian XL and Chen YP. 1987. Late Precambrian mafic dyke swarms of the North China craton. In: Halls HC and Fahrig WF (eds.). *Mafic Dykes Swarms*. Geology Association of Canada Special Paper, 34:

- 385 - 391
- Rogers JJW and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent; Gondwana Research, 5: 123 - 132
- Rollinson H. 1995. Using geochemical data, evaluation, presentation, and interpretation, Longman Scientific & Technical, 63: 108
- Shao JA, Zhang LQ and Li DM. 2002. Proterozoic three extensional events in North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 18(2): 152 - 160 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts implications for mantle composition and process. In: Saunders AD and Nony MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 42: 313 - 354
- Wilde SA, Cawood PA and Wang KY. 1997. SHRIMP U-Pb data of granites and gneisses in the Taihangshan-Wutaishan area: implications for the timing of crustal growth in the North China craton. Chinese Science Bulletin, 43(sup.): 144
- Wilde SA, Zhao GC and Sun M. 2002. Development of the North China Craton during the Late Archaean and its final amalgamation at 1.8 Ga: some speculation on its position within a global Paleoproterozoic Supercontinent. Gondwana Research, 5: 85 - 94
- Wooden JL, Czamanske GK, Fedorenko A, Arndt NT, Chauvel C, Bouse RM, King BSW, Knight RJ and Siems DF. 1993. Isotopic and trace-element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57: 3677 - 3704
- Wu CH and Zhang CT. 1998. The Paleoproterozoic SW-NE collision model for the central north China Craton. Progress of Precambrian Research, 21: 28 - 50
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wang YS, Liu DY and Song B. 1998. Archaean geology characteristics and tectonic evolution of Sino-Korea Paleo-continent. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 104 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Mei HJ, Xu JF, Huang XL, Wang YJ and Chung SL. 2003. Origin of two differentiation trends in the Emeishan flood basalts. Chinese Sci. Bull., 48: 390 - 394
- Zhai MG. 1996. Granulite and Lower Continental Crust in North China Archaean Craton. Seismological Press, Beijing: 1 - 20.
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000. Amalgamation of the supercontinent of the North China craton and its break up during late-middle Proterozoic. Science in China(D), 43: 219 - 232
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2001. An exposed cross-section of early Precambrian continental lower crust in north China craton. Phys. Chem. Earth, 26(9-10): 781 - 792
- Zhai MG and Liu WJ. 2003. Paleoproterozoic tectonic history of the North China craton: a review. Precambrian Research, 122: 183 - 199
- Zhai MG, Guo JH, Li YG, Liu WJ, Peng P and Shi X. 2003. Two linear granite belts in the central-western North China Craton and their implication for late Neoproterozoic-Paleoproterozoic continental evolution. Precambrian Research, 127: 267 - 283
- Zhang C, Hou GT and Qian XL. 1994. Magnetic fabric evidence of the style of emplacement of late Precambrian mafic dyke swarms in the Lvliang-northern Shanxi region, north China. Geological Review, 40(2): 245 - 251 (in Chinese with English Abstract)
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2001. Archaean blocks and their boundaries in the North China craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. Precambrian Research, 107: 45 - 73
- Zhao TP, Zhou MF and Xia B. 2002. Paleoproterozoic rift-related volcanism of the Xiong'er group, North China Craton: implications for the breakup of Columbia. International Geology Review, 44: 336 - 351
- Zhou DW, Zhang CL, Liu L, Wang JL, Wang Y, Liu JP. 2000. Synthetic study on Proterozoic basic dyke swarms in the Qinling orogenic belt and its adjacent block as well as a discussion about some questions related to them. Acta Petrologica Sinica, 16: 22 - 28 (in Chinese with English abstract)
- Zhuang YX, Wang XS, Xu HL, Ren ZK, Zhang FZ and Zhang XM. 1997. Main geological events and crustal evolution in early Precambrian of Taishan region. Acta Petrologica Sinica, 13: 313 - 330 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 白瑾, 黄学光, 戴凤岩, 吴昌华. 1993. 中国前寒武纪地壳演化. 北京: 地质出版社, 65 - 79
- 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
- 程裕洪, 张寿广. 1982. 略论我国不同变质时期的变质岩系、变质带和若干有关问题. 中国区域地质, 2: 1 - 14
- 郝杰, 王凯怡, 刘小汉, 邓希光. 1999. 阜平高级变质岩系地层划分及其形成的大地构造背景. 见: 陈海泓, 侯泉林, 肖文交主编. 中国碰撞造山带研究. 北京: 海洋出版社, 114 - 121
- 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, 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, 张宝兴. 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, 钱祥麟. 1994. 恒山早前寒武纪地壳演化. 太原: 山西科学技术出版社, 124
- 李江海, 侯贵廷, 钱祥麟, Halls H C, Davis D. 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
- 李铁胜. 1999. 冀东太平寨-遵化新太古代古岛弧地体及其大陆生长[博士论文]. 北京: 中国科学院地质研究所, 73 - 88
- 彭澎, 翟明国. 2002. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质. 地球科学进展, 17(6): 818 - 825
- 邵济安, 张履桥, 李大明. 2002. 华北克拉通三次伸展事件. 岩石学报, 18(2): 152 - 160
- 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, 1 - 104
- 张臣, 侯贵廷, 钱祥麟. 1994. 吕梁-晋北地区晚前寒武纪镁铁质岩墙群侵位方式的磁组构证据. 地质论评, 40(3): 245 - 251
- 周鼎武, 张成立, 刘良, 王居里, 王焰, 刘金平. 2000. 秦岭造山带及相邻地块元古代基性岩墙群研究综述及相关问题讨论. 岩石学报, 16(1): 22 - 28
- 庄育勋, 王新社, 徐洪林, 仁志康, 张福中, 张锡明. 1997. 泰山地区早前寒武纪主要地质事件与地壳演化. 岩石学报, 3: 313 - 330