

岩墙群的岩石学、地球化学和几何学特征 及其大地构造意义

李宏博^{1,2}, 张招崇¹, 吕林素^{1,2}, 汪云峰¹, 寇彩化¹, 廖宝丽¹, 李永生¹

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质博物馆, 北京 100034)

摘要: 对近几十年来岩墙群在构造环境、侵位模式、形成机制、岩相学、地球化学、同位素地质年代学、几何学和比较行星学等方面的研究成果进行了总结, 为岩墙群的深入研究提供重要信息。岩墙群主要与伸展构造环境有关, 是岩浆侵位事件(如地幔柱)造成上覆地壳形成裂隙系统, 岩浆随后灌入而形成的。岩墙群的侵位模式主要有垂向和侧向两种, 也可能是两种模式共同作用的结果。岩墙群的岩性多样, 但主要是超基性-基性岩, 说明其与深部岩浆作用密切相关。对岩墙群的地球化学研究可揭示岩浆事件的构造环境、岩浆演化过程以及源区特征。放射性岩墙群的几何学特征有重要的指示意义, 其收敛中心被认为是地幔柱的中心位置。岩墙群是古陆重建十分重要的“契合点”, 对古陆重建研究十分有帮助。类地行星(金星)巨型放射状系统很可能是岩墙群系统, 暗示了地球上也存在过这种完整的巨型放射状岩墙群系统。岩墙群对于古陆重建、地幔柱中心的指示、地幔源区示踪、火山机构以及区域岩浆演化的研究都有十分重要的意义, 并将对地球科学的发展产生重要影响。

关键词: 岩墙群; 形成机制; 构造意义; 几何学; 古陆重建; 类地行星

中图分类号: P588.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)01-0091-13

Petrological, geochemical and geometric characteristics of dyke swarms and their tectonic significance

LI Hong-bo^{1,2}, ZHANG Zhao-chong¹, LÜ Lin-su^{1,2}, WANG Yun-feng¹, KOU Cai-hua¹,
LIAO Bao-li¹ and LI Yong-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Geological Museum of China, Beijing 100034, China)

Abstract: Dyke swarms are important in geological investigation. In order to provide valuable information for future research, this paper summarized the multidisciplinary research conclusions about dyke swarms in such aspects as tectonic setting, emplacement mode, genetic mechanism, lithology, geochemistry, isotopic geochronology, geometry and comparative planetology. Dyke swarms were primarily formed in an extensional setting and resulted from magmatic emplacement along the fracture system in lithospheric crust which was caused by magmatic activities such as mantle plumes. The emplacement modes of dyke swarms are mainly vertical and lateral emplacements, and may also be the combination of these two emplacement modes. The lithologic characteristics are varied, with most of the dykes being ultrabasic-basic rocks, suggesting a significant relativity

收稿日期: 2011-03-01; 修订日期: 2011-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40925006); 教育部博士点基金资助项目(20090022110006); 973项目(2009CB421002); 111计划(B07011)

作者简介: 李宏博(1978-), 男, 博士, 助理研究员, 从事岩石学方面的研究, E-mail: li_h_b@sina.com.cn

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20111027.1721.001.html>

between dyke swarms and hypogene magmatism. The geochemical characteristics of dyke swarms show the tectonic environments, magmatic evolution and source types of magmatic events. Geometrical characteristics of radiating giant dyke swarms have important indicating significance and the center of radiating giant dyke swarms is considered to be the location of the head of mantle plumes. Dyke swarms are important 'piercing points' and very helpful to the palaeocontinent reconstruction. The giant radiating system on the terrestrial planets (Venus) may be the dyke swarms and can imply that such a radiating system once existed in the earth. Dyke swarms have important research values and valuable geological significance in such aspects as paleocontinent reconstruction, implication of mantle plume center, tracing of mantle sources, volcanic edifices and evolution of regional magmatism, thus playing a great role in geoscience.

Key words: dyke swarms; genetic mechanism; tectonic significance; geometry; palaeocontinent reconstruction; terrestrial planets

岩墙群是一种常见的地质单元类型,是岩浆迁移和侵位的通道,它的发生、演变和形成受约束于岩浆事件,同时也对岩浆作用单元(如火成岩省 LIP、火山机构和侵入岩体等)有着重要的影响。岩墙群的研究意义是多方面的,主要体现在:①为古陆重建(Columbia, Rodinia, Gondwana, Pangaea等)古陆块的比较研究以及古陆块的抬升及旋转研究提供重要依据(Hall, 1987);②利用岩墙群,尤其是巨型放射状岩墙群的几何学特征来确定地幔柱事件的中心位置(Ernst and Buchan, 2001b);③对岩墙群(尤其是前寒武纪的岩墙群)岩相学和地球化学的研究可揭示壳幔演化、岩石圈形成以及基性-超基性岩的成岩过程,同时对源区及岩浆作用的演化也有示踪意义(Greenough and Hodych, 1990);④火山系统中普遍发育岩墙群(小型),这些岩墙群是岩浆侵入和火山地热系统的通道,因此岩墙群对于火山发育和演化的研究也具有重要意义(Walker *et al.*, 1995);⑤通过不同期次岩墙群的地球化学和同位素地质年代学研究可了解区域岩浆热事件的发生序列(Heimann *et al.*, 1995; Vuollo *et al.*, 1995)。目前,越来越多的学者开始关注岩墙群的研究,并取得了丰硕的成果。本文对近几十年来国内外岩墙群的研究工作,尤其是国际岩墙会议(International Dyke Conference, 1985年第一届,加拿大;1990年第二届,澳大利亚;1995年第三届,以色列;2001年第四届,南非;2005年第五届,芬兰)的岩墙群研究成果进行了总结,试图展示一些背景材料,为岩墙群的深入研究提供重要信息。

1 岩墙群的构造环境、侵位模式与形成机制

1.1 岩墙群的构造环境

从大的构造环境来看,岩墙群主要与伸展构造环境有关(表1),在由地幔柱引起的离散大陆边缘环境多有发育,且多形成巨型岩墙群(Fahrig, 1987; Lecheminant and Heaman, 1989; Ernst and Baragar, 1992)。如加拿大的Abitibi岩墙群,被认为与Goodman地幔柱事件有关(Peterman and Sims, 1988),著名的Machenzie岩墙群与导致Poseidon洋盆打开的地幔柱事件有关(Fahrig and West, 1986; Lecheminant and Heaman, 1989; Hulbert *et al.*, 1993)。

在三叉裂谷环境中岩墙群也多有发育。Fahrig (1987)对加拿大地盾的岩墙群进行系统研究后,基于板块理论提出了大陆基性岩墙群的裂谷形成模式。该模式分3个阶段。第1阶段是伸展构造环境下的大陆张裂初始阶段,伴随着岩墙群的发育。古元古代末—中元古代华北克拉通发育的大规模基性岩墙群被认为是大陆裂解开始阶段的产物(侯贵廷等, 2005b)。第2阶段是裂谷的扩张阶段,这是岩墙群形成的主要时期,产生的岩墙群分为两种类型:一种是在发育夭折的裂谷环境中的岩墙,这种岩墙一般向大陆内部延伸,如加拿大的Grenville岩墙群(Seymour and Kumarapeli, 1995);另一种类型是平行于被动大陆边缘分布的岩墙群,如Eastern North America岩墙群(McHone *et al.*, 1987)。第3阶段是大洋闭合阶段,平行于被动大陆边缘分布的岩墙

表 1 岩墙群特征表
Table 1 Characteristics of dyke swarms

序号	岩墙群名称	所在国家或地区	岩性	规模及形态	成岩年龄/时代	成因
1	Abitibi	加拿大	橄榄辉长岩、辉绿岩	NE-ESE, 700 km×500 km, 放射状, 辐射角度 25°	1 141 ± 1 Ma	与古老绿岩带有关
2	Amambay	巴拉圭	粗面岩、苦橄岩、碳酸岩	NW, 规模较小	约 130 Ma	与陆壳减薄事件有关
3	Anton-Taram	乌克兰	辉绿岩、煌斑岩	NW, 200 km×(10~15) km	260~328 Ma	与泥盆纪火山带有关
4	Apatoe	哥伦比亚	石英拉斑玄武质岩类	NNW, 300 km×150 km, 呈近平行排布	230 Ma	中大西洋地幔柱事件 (CAMP) 有关
5	Arunta Block	澳大利亚	—	E, 300 km×50 km	1 200~1 000 Ma	—
6	Aysen	智利	辉绿岩	NS, EW, NE-SW, 760 km×350 km	46~4 Ma	俯冲带
7	Bastar	印度	亚碱性拉斑玄武岩、玻质安山岩-苏长岩	NW, WNW, 49 km×33 km, 呈近平行排列	约 1.9 Ga	大陆壳的拉张
8	Bazavluk	乌克兰	辉绿岩	NS, 250 km×150 km,	2.7~1.8 Ga	多期岩浆事件形成
9	Bir Safsaf	埃及	玄武-安山岩、英安岩	NS, NNW, NW, 48 km×42 km	560 ± 20 Ma	—
10	Bobrinets	乌克兰	辉绿岩、煌斑岩	NW, 150 km×60 km	1.44~1.38 Ga	—
11	British Tertiary	英国	玄武质安山岩 (Cleveland dyke)	SE-ESE, 400 km×400 km, 辐射角度 ~20°	约 60 Ma	与 British Tertiary LIP 有关
12	Cape Peninsula	南非	辉绿岩	NW, 91 km×72 km, 近平行排布	晚侏罗世	与 Karoo 地幔柱事件有关
13	Chara-Sinsk	俄罗斯	辉绿岩-石英辉长辉绿岩-石英二长斑岩-石英正长岩	NE, 700 km×600 km, 平行排布	晚泥盆世-晚石炭世	与裂谷有关
14	华北中部	中国	辉绿岩	N-NW, 1 000 km, 扇形分布	约 1.78 Ga	与地幔柱导致的大陆裂谷有关
15	Dharmapuri	印度	拉斑玄武岩	NW, 500 km×250 km, 呈近平行排布	1 800~1 600 Ma	—
16	East Greenland Tertiary	格陵兰	拉斑玄武岩	NE, 800 km×200 km, 中心发散状	60~30 Ma	大陆裂谷
17	Eastern North America	美国和加拿大	辉绿岩	NW-NE, 2 000 km×300 km, 分开的扇状, 辐射角度 90°	200 ± 1 Ma	与 CAMP 有关
18	峨眉山大火成岩省	中国	辉绿岩	呈中心发散状, 840 km×730 km, 辐射角度 ~200°	晚二叠世	与地幔柱导致的峨眉山 LIP 事件有关
19	Franklin	加拿大	—	NW, 1200 km×900 km, 分开扇形, 辐射角度 70°	721~712 Ma	Franklin 岩浆幕事件
20	Gairdner	澳大利亚	苏长岩-辉绿岩-辉长苏长岩	NW-WNW, 1 000 km×150 km, 平行排布	800 Ma	与板块内裂谷作用有关
21	Gardar	格陵兰	玄武岩-中性岩	NE-E, 300 km	1 300~1 150 Ma	—
22	Great Dyke	津巴布韦	纯橄榄岩、辉石岩、斜方辉橄岩、辉绿岩	NNE, 600 km×100 km, 近平行排列, 辐射角度 25°	2 461 ± 16 Ma	Mashaonaland 火成岩事件
23	Grenville	加拿大	辉绿岩	WNW, 700 km×200 km, 平行排布	590 Ma	与地幔柱成因的三叉裂谷有关
24	Jatulian	芬兰	玻质安山岩-苏长岩、辉长岩、拉斑玄武岩	NW-SE, 670 km×320 km	2.45~1.97 Ga	由 4 期次岩浆事件形成
25	Jotnian	芬兰	玄武岩、辉绿岩	WNW, 500 km×400 km, 近平行排列	1 250~1 457 ± 3 Ma	与 Jotnian 地幔柱有关
26	Kangamiut-MDI-BN	格陵兰	辉绿岩、玻质安山岩-苏长岩	N-NE, 400 km×150 km, 近平行排布	2 150~1 950 Ma	—
27	Karelian	斯堪的纳维亚-俄罗斯	辉绿岩、辉长辉绿岩	NW, 700 km×300 km, 近平行排布	2 100 Ma	—
28	Kenora-Kabetogama	美国	闪长岩-石英闪长岩	NNW, 310 km×250 km, 近平行排列	1 520~2 240 Ma	源区为软流圈的岩浆事件
29	Kola-Onega	斯堪的纳维亚	辉绿岩	N-NE, 600 km×500 km, 连续的扇形, 辐射角度 50°	1 000 Ma	—
30	Lake Ladoga	俄罗斯	煌斑岩、辉绿岩	NW, NE-SW, 70 km×50 km	1.54~1.8 Ga	与岩浆侵入事件有关

续表 1
Continued Table 1

序号	岩墙群名称	所在国家或地区	岩性	规模及形态	成岩年龄/时代	成因
31	Lebombo	南非	辉绿岩	NS 200 km×50 km 平行排布	约 182 Ma	与 Karoo LIP 事件有关
32	Lower Narmada Valley	印度	辉绿岩、碳酸岩(少量)	EW, ENW-WSW; NW 203 km×139 km 近平行排列	早古新世	与欧亚-印度碰撞事件引起的岩浆侵入事件有关
33	Machenzie	加拿大	玄武岩	N-NW 2 500 km×1 300 km 连续的扇形 辐射角度 100°	1 267±2 Ma	与地幔柱事件有关
34	Mashaba-Chibi	津巴布韦	辉绿岩	WNW, ENE 约 170 km×160 km	约 3 500~2 900 Ma	—
35	Mashonaland-Sebanga	津巴布韦	辉绿岩	NNW 350 km×500 km 近平行排布	1 830±230 Ma	—
36	Matachewan	加拿大	拉斑玄武岩	N-NW 800 km×450 km 连续的扇形 辐射角度 40°	2 454±3 Ma	与地幔柱和裂谷作用有关
37	Mutare	津巴布韦	—	NNW-NW 400 km×50 km 近平行排布	600~500 Ma	—
38	Patagonia	智利	辉绿岩、安山岩(少量)	N50°-N60° 780 km×350 km	46~4 Ma	与俯冲带有关
39	Permo-Carboniferous	Fennoscandian 地盾的西南边缘	拉斑质辉绿岩	—	—	与 Pangaea 分裂有关
40	Plumtree	津巴布韦	辉绿岩	SW 450 km×100 km 近平行排布	2 150 Ma	—
41	Ramon	以色列	玄武岩、粗面岩	NS, NW 28 km×11 km 近平行排布	约 130 Ma	与小型侵入岩体有关
42	Red Sea	沙特阿拉伯-埃及	玄武岩、辉绿岩	NW 1 600 km×400 km 近平行排布	20 Ma	与裂谷作用有关
43	Roerkulten	南极洲	玄武岩、安山岩	NEE, NE	约 900~1 000 Ma	与 Gondwana 分裂有关
44	Sapucaí	巴拉圭	碧玄岩、响岩	NW 规模较小	133~118 Ma	与陆壳减薄事件有关
45	Sone-Narmada-Tapti	印度	—	E-ESE 600 km×200 km 平行排布	80~37 Ma	—
46	Spanish Peaks	美国	流纹岩、煌斑岩	36 km×26 km 呈中心发散状 辐射角度 360°	27.5~20 Ma	小型侵入岩体
47	Thule	格陵兰	辉绿岩	WNW 300 km×200 km	约 730~640 Ma	—
48	Timan	俄罗斯	—	NW-NNW 1500 km×300 km 分开的扇形排布	680~350 Ma	—
49	Trap	格陵兰	辉绿岩	NW 350 km×50 km	225~116 Ma	大西洋和拉布拉多海打开事件
50	Widgiemooltha Suite	澳大利亚	苦橄岩 辉绿岩	EW 800 km×750 km 近平行排列	2.42 Ga	—
51	Yakutsk	俄罗斯	拉斑质-亚碱性钾质玄武岩	中心发散状 辐射角度 180°	350 Ma	与三叉裂谷有关

资料来源: Hammond, 1986; Halls and Fahrig, 1987; LeCheminant and Heaman, 1989; Mitchell *et al.*, 1989; Heaman, 1989; Parker *et al.*, 1990; Baer and Heimann, 1995; Ernst *et al.*, 1995a; Baragar *et al.*, 1996; Petrini *et al.*, 1998; Hanski *et al.*, 2006; Peng *et al.*, 2007; Hou *et al.*, 2008a; Denyszyn *et al.*, 2009; Klausen, 2009.

群消失了,只有夭折裂谷岩墙群得以保留。从目前的研究来看,裂谷的形成多与地幔柱作用有关(Peng *et al.*, 2006),因此裂谷环境的岩墙群也可归为地幔柱引起的伸展构造环境的产物。

其他的一些构造环境中也有岩墙群产出。洋中脊的拉张构造环境中席状岩墙群发育。在古老俯冲带的蛇绿岩套中也普遍发育席状岩墙群,如 Troo-

dos 和 Oman 蛇绿岩套(Condie, 2001)。火山机构周围多形成一些小型岩墙群,日本中部的 Miocene Otoge 杂岩体是一个火山机构产物,其中发育密集的岩席和岩墙群(Geshi, 2006)。还有一些与小型侵入岩体有关的岩墙群,如科罗拉多中南部的 Spanish Peaks 岩墙群和以色列的 Ramon 岩墙群。这两个岩墙群分别位于 Spanish Peak 岩株和一个隐伏侵入体周围,

是区域岩浆侵入事件的产物(Johnson, 1961, 1968; Baer and Reches, 1987; Baer and Reches, 1991)。

1.2 岩墙群的侵位模式

岩墙群的侵位受到源区深度、构造环境和热力学条件等因素的制约,不同的形成环境有不同的侵位模式。目前对于岩墙群的侵位模式存在两种观点。一是垂向侵位,即岩浆源区位于地壳深部,甚至深达软流圈或上地幔,岩浆自下而上垂直侵位后形成岩墙。二是侧向侵位,岩墙与源区在位置上近于水平,或垂向差距不大,岩浆经侧向侵位形成岩墙。垂向侵位曾被认为是岩墙群的主要形成模式,而侧向侵位也得到了越来越多的重视,岩墙局部构造、矿物定向排布、磁组构和地球化学的研究均证实了侧向侵位的存在。美国东北部 Shelburne 岩墙中的对冲构造(Ramping structure)就被认为是岩浆侧向侵位时留下的运动遗迹(Greenough and Hodych, 1990)。侯贵廷等(2005c)在中国鲁西地区前寒武纪基性岩墙群顶部发现圆柱状节理,这种罕见的构造现象是岩浆水平侵位时由黏滞性剪切作用造成的。在火山机构中侧向侵位占主导地位,这在夏威夷和冰岛正在活跃的火山中已经得到了证实(Bruce and Huppert, 1989, 1990)。

岩墙的侵位方式与岩浆房的位置有关。源区位于深部地幔或软流圈的岩墙群多以垂向侵位为主,比如元古宙的岩墙群多起源于深部地幔或软流圈层,呈垂向侵位。在加拿大的拉布拉多(Labrador)和苏格兰(Scotland)的元古宙地层中岩墙剖面上所观察到的“桥连”(bridge)和“尖刺”(bayonet)膨胀现象就说明了岩浆是垂向侵位而不是侧向侵位的。而岩浆房位于浅部地壳时多以侧向侵位为主。对 Cleveland 岩墙的物探研究表明,中心岩浆房的位置并不低于岩墙群所处层位,这说明岩墙是通过侧向侵位形成的(MacDonald *et al.*, 1988)。

在野外判定岩墙的侵位方式需要进行细致的观察。许多流动构造可帮助我们了解岩墙中岩浆的流动方向,如冲痕构造、矿物线理、碎裂斑晶不对称褶皱、定向排列的气孔(捕虏体、斑晶)等(侯贵廷等, 2003)。这些构造现象多发育于岩墙的边部,因为边部与围岩接触从而对围岩产生烘烤、挤压等作用,同时边部的岩浆流动和冷却速度相对于岩墙中部的差异也是产生这些流动构造发育的重要因素。如果野外观察不能判定岩墙的流动方向,可采用磁组构分析的方法来判定侵位方式。

岩墙的侵位是一个复杂的过程,在此过程中可能两种模式同时存在,即随着与地幔柱中心距离的增加,岩墙可从垂向侵位过渡到侧向侵位。Ernst 和 Baraga(1992)对 Machenzie 岩墙群进行的磁组构研究发现,在距离中心 500 km 范围之内是以垂向侵入为主,而在 600~2 100 km 以侧向侵入为主,认为侵位方式发生转变的地区应是地幔柱头部熔融的边界。Kent 等(2001)也认为岩墙侵位模式发生转变的地方应该是地幔柱诱发的部分熔融作用的边界。但是这种观点需要解释的一个关键问题是,巨型岩墙群的延伸长度可达几百甚至几千千米,而对于宽度只有几十米的岩墙来说,能否使岩浆运移这么远的距离?通过对夏威夷和冰岛处在活跃期的岩墙群的观察发现,岩浆侧向侵位的速度为 0.1~1 m/s。照此计算,只需 45 天,岩墙可移动 2 000 km。岩墙冷却模型研究也表明,由于基性岩浆的温度很高而粘度较低,岩浆可以快速地运移很远的距离(Delaney, 1987)。基于拉斑玄武岩质岩浆推算出的岩墙固结时间公式: $t_y = 0.680 \cdot w^2$,其中 w 为岩墙宽度的一半。由此推算,宽度为 10 m 的岩墙,固结时间将是 17 年,宽度为 100 m 的岩墙的固结时间达 1 700 年(Gudmundsson, 1995)。同时,后续岩浆不断的侵位将导致未固结岩墙的重熔,从而促使岩墙继续生长。地球化学方面的研究也证实了这一点,通过对 Theron Mountains 基性岩墙群(南极洲)在几千千米延伸方向上的研究表明,发现其地球化学特征十分相似,这说明岩浆存在几千千米的侧向运移(Leat *et al.*, 2006)。Schmitz 等(1995)对 Minnesota 北部古元古代的基性岩墙群也进行了类似的研究。

岩墙群源区的动力学特征对岩墙的侵位模式也有重要影响。Parfitt 和 Head(1993)认为源区是否能够不断得到补充是一个重要因素。如果源区不断得到补充,就会形成延伸很长、规模巨大的岩墙群,甚至岩墙可侵位至地表,而这种源区多位于地壳底部或地幔而且规模庞大。位于地壳中部或更浅部的规模较小的源区,如果没有补充,由于驱动压力的衰减,岩墙的宽度、长度都是有限的,喷出地表的几率也大大降低,因此,这种情况下多形成规模较小且侵位较浅的岩墙(Ernst *et al.*, 1995b)。岩墙侵位速度与深度以及岩浆同围岩之间的热侵蚀(thermal erosion)回熔(melt back)等热力学作用有关。比如,在深部的岩浆温度高、流量大,对围岩会产生很强的热侵蚀作用,岩墙通道不断拓宽,从而侵位速度

也较快。而在近地表 岩浆和围岩的温度较低 岩浆易固结而使围岩增厚 通道变窄 反而限制了推进速度 (Cadman *et al.*, 1990)。源区的驱动力也是一个重要因素。驱动压力强大不但能使岩墙不断增长 而且压迫裂隙系统不断扩大 从而促进了岩墙的生长。

1.3 岩墙群的形成机制

岩墙群的形成机制已有了一些模型 (Manzer, 1978; Halls, 1987; Baragar *et al.*, 1996)。虽然岩墙群的产出环境不同 但归纳来看 岩墙群是岩浆事

件上侵造成上覆地壳形成裂隙系统 随后岩浆沿着裂隙系统灌入而形成的 (图 1)。因此 构造环境、岩浆事件的规模、性质以及区域应力场是影响岩墙群形成的重要因素。同时 岩墙群的形成往往不是一次岩浆事件的结果 而是一个长期、多期次的过程。在一次岩浆事件中还包含了许多韵律。比如 在冰岛北部的 Krafla 火山系统的岩墙群中 岩墙往往由许多的柱状节理层组成 (Gudmundsson (1995) 认为这是岩浆房脉动式侵入造成的。

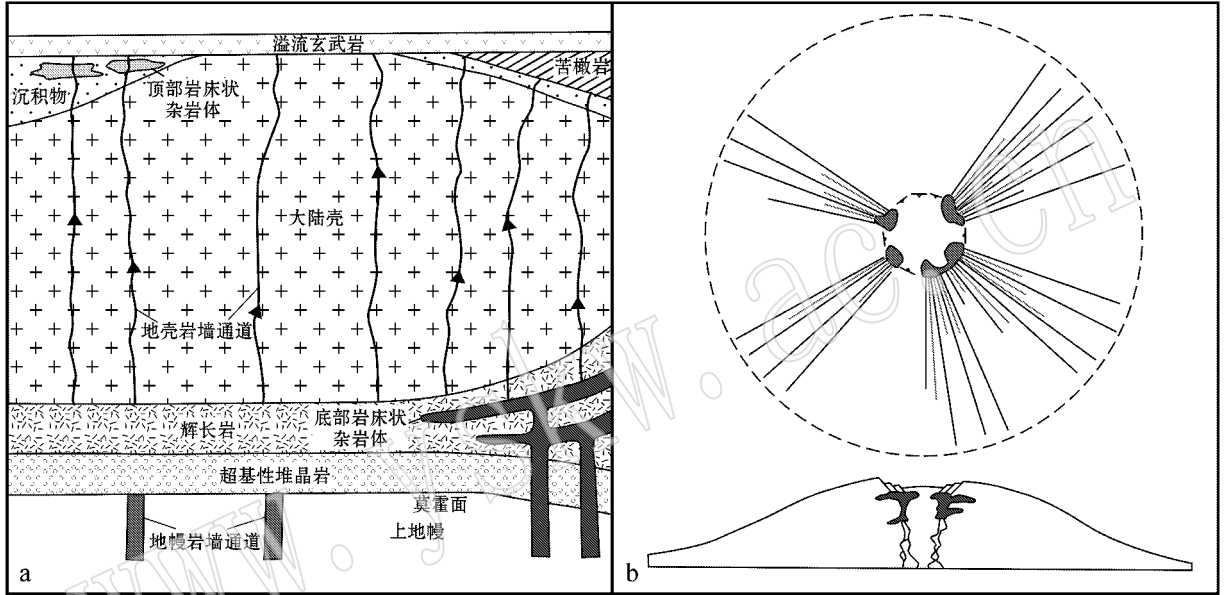


图 1 岩墙群成因模式图 (据 Cox, 1980; Baragar *et al.*, 1996)

Fig. 1 Genetic model of dyke swarms (modified after Cox, 1980; Baragar *et al.*, 1996)

a—大陆溢流玄武岩 (CFB) 中岩墙群的形成模式 岩墙群是岩浆运移的通道; b—Mackenzie 岩墙群成因模式 地幔柱引起地壳隆升 隆升中心地区的地壳式塌陷使得岩浆侵位并形成了多个岩浆房 各个岩浆房沿着裂隙系统侧向侵位而形成了放射状的岩墙群

a—model of dyke swarms of continental flood basalts (CFB), dyke swarms are feeders of magma; b—proposed model of Mackenzie magmatism related to plume-induced uplift, magma emplacement and magma chamber development loci are provided by graben collapse near the uplift core. Accordingly, magma chambers grow at a number of centers distributed concentrically around the center of the uplift. Each magma chamber feeds laterally its own radial swarm of dykes

2 岩墙群的岩相学、地球化学及同位素地质年代学研究

2.1 岩墙群的岩性特征及岩相学研究

岩墙群的岩性是多样的,从超基性到酸性都有出现 (表 1)。有的岩墙群表现为一套岩石系列组合,如发育于西伯利亚 Vilyuisk 古裂谷中的 Chara-Sinsk 岩墙群具辉绿岩-石英辉长辉绿岩-石英二长斑岩-石英正长岩的序列 (Tomshin and Koroleva, 1990)。这与源区的不均一以及不同程度的分离结晶和地壳

混染作用有关。虽然岩性多样,但超基性-基性岩墙群仍是主要的,这在一定程度上反映了岩墙群与地幔柱等深部岩浆作用的密切关系,目前的研究也多集中在此。

岩墙群岩相学研究的一个重要问题是从斑晶的成分及结晶形态的变化来反演其成岩机制。对埃及西南 Bir Safsaf 岩墙群的玄武安山质和钙碱性岩墙中的斜长石和角闪石斑晶的研究发现,斜长石斑晶普遍存在着圆形核部 (Rounded core)、筛状构造 (Sieve texture) 及片状区域 (Patchy zoning)。这些现象是一个经过玄武质和英安质两种岩浆混溶且分层

的岩浆房通过快速减压上涌而导致斜长石重熔,随后经过富钙的斜长石再生而形成的。角闪石斑晶中的重熔和环带及减压裂隙也证明了这种岩浆作用机制(Pudlo and Franz, 1995)。

通过岩墙岩石结构的变化可对岩墙的侵位方式有所认识。一般说来,岩墙边部的矿物颗粒由于冷却速度较快而结晶小,但也有一些结晶较大的矿物或斑晶(如斜长石斑晶等)呈定向排列,可指示岩浆流动方向。由于岩墙中部流速较快的岩浆对斑晶有牵引作用,使得斑晶长轴一端指向中部高流速带,另一端指向边部低流速带。斑晶长轴与岩墙边界的锐夹角与岩浆流向相反,以此可判定岩浆流动方向(Halls and Zhang, 1995)。

2.2 岩墙群地球化学研究

岩墙群的地球化学研究遵从一般的火成岩研究方法和规律,通过主量元素、微量元素及同位素特征对成岩构造环境、源区特征和形成机制等提供参考信息。岩墙群作为一种岩浆事件的产物,其地球化学特征反映了其形成的构造环境,同时对源区的地化特征有示踪作用。此外,由于岩墙群是连接源区和岩浆房以及地表的通道,它的位置处于深部,更靠近源区,因此它的地球化学特征对源区特征有更好的反映。一些岩墙群中科马提岩和苦橄岩等超基性岩类的发现为深部地幔作用的研究提供了重要信息,如南极洲古元古代岩墙中高镁质科马提岩的发现(Manzer, 1978)、苏格兰 Rum 杂岩体中富镁的苦橄岩质岩墙的发现等(Upton *et al.*, 2002)。

岩墙群微量元素的研究可提供构造演化史和岩浆作用性质方面的重要信息。武当地块中基性岩墙群的 Sr-Nd-Pb 及 O 同位素研究,证实该地块曾经历拉张及裂谷作用的构造演化,这很可能是一次地幔柱作用的结果(张成立等, 1999)。Wirt 和 Vervoort (1995)对加拿大 Super LIP 的 Kenora-Kabetogama 岩墙群进行的 Nd 同位素与其他元素(Si、Mg[#]、Yb、La/Sm 和 Th/Ta)相关性的研究指出,该岩墙群可能是地幔柱事件导致的,其源区为软流圈地幔。通过对同一地幔柱事件或大陆裂开事件有关岩墙群的地球化学特征进行比较研究,可为各构造单元的同源性提供佐证。在中大西洋裂开事件的研究中,Oliveira 等(1990)将巴西的 Amapa 岩墙群、东北美岩墙群、非洲摩洛哥和利比亚岩墙群进行对比,发现了它们在地球化学特征上的相似性和同源性,从而证明它们都是中大西洋地幔柱事件(CAMP)的产物。

在 LIP 的研究中,岩墙群与大陆溢流玄武岩(CFB)在地球化学特征上表现出明显的相关性。Peng 等(2007)对华北克拉通的放射状基性岩墙群(~1.78 Ga)的地球化学研究根据 Fe-Ti 含量将岩墙群划分出 3 种类型,并认为岩墙群与同期熊耳群火山岩(LIP 的残余)的存在密切关联,很可能是华北陆块伸展裂解的产物(赵太平等, 2007)。一些 LIP 从地球化学成分上可划分为高 Ti 和低 Ti 两种类型,如峨眉山 LIP、Karoo LIP 和东北美洲 LIP 等。通过对区内岩墙群的研究发现,其地球化学特征也表现出高 Ti 和低 Ti 两种类型,如在峨眉山 LIP 地区,溢流玄武岩明显呈现出西部低 TiO₂、东部高 TiO₂ 的特征(徐义刚等, 2001)。前人对峨眉山 LIP 岩墙的地球化学研究以及作者的未发表数据表明,岩墙群的地球化学性质和其共生的玄武岩具有相似性(Thompson, 1982; Guo *et al.*, 2004; 韩伟等, 2009),比如采集于 ELIP 东部宣威和禄劝地区的辉绿岩具有高钛玄武岩的性质,其 TiO₂ 的含量为 4.12%~4.45%,而采集于西部永平和大理地区的辉绿岩具有低钛玄武岩的性质,其 TiO₂ 的含量为 0.58%~1.77%,这恰恰与溢流玄武岩的 TiO₂ 特征一致。这说明这些岩墙是岩浆上升的通道,和峨眉山玄武岩有着密切的成因联系,是 ELIP 的重要组成部分。此外,CFB 有关的岩墙群多表现出一种富集地幔源区的特征,正如多数亚碱性系列的 CFB 所表现出的源区特征一样(Thompson, 1982; Patchett *et al.*, 1994; Wirth and Vervoort, 1995)。

岩墙剖面上(从中心到边部)的地球化学成分的变化也是目前研究的一个重点。这种变化对于宽度较大的岩墙尤为明显,主要表现为岩相(矿物成分、结晶粒度和结构)和相应的化学成分的递变变化趋势。如 Kenora-Kabetogama 辉绿岩墙从成分和岩相上都存在着从边部向中心的变化趋势,有的宽度大于 20 m 的岩墙存在明显的层状分带现象(Schmitz *et al.*, 1995)。Gibson 等(1987)对 Machenzie 岩墙群研究后发现,多数宽度超过 30 m 的岩墙都存在边部-中心式的成分变化,并认为这是分离结晶等岩浆演化作用的结果。这种变化在一定程度上证明了岩墙的成因模式与形成条件。如 Kenora-Kabetogama 辉绿岩墙从成分和岩相上的横向变化反映了岩墙是在一种开放的岩浆分离结晶系统中形成的,每次岩浆房得到补充都可引发一次侵位韵律。但是如果岩墙从边部到中心化学成分的变化太大,就不能简单

地用分离结晶过程来解释,则可能是蚀变作用的结果(Teutsch *et al.*, 1995)。

对于分布区域广大而形成时间跨度长的岩墙群,其成分变化则较为复杂。因为可能存在着不同时代、不同期次的岩墙群,并且彼此之间穿切和交叠。这些岩墙群可能是不同源区的产物,也可能是同一源区经过不同程度的分离结晶和同化混染作用的结果(Pinese *et al.*, 1995)。

2.3 岩墙群的同位素地质年代学研究

岩墙群的精确定年有助于了解古陆分裂的时间、地幔柱事件的演化过程以及岩墙群形成的时间序列。目前对岩墙群的年代学研究多用 U-Pb 锆石和斜锆石法,主要是因为该法受蚀变影响较小且适用范围较广。侯贵廷等(2005b, 2005d)采用锆石 U-Pb SHRIMP 法对中国鲁西地区基性岩墙进行了定年研究,根据锆石的晶形、结构等特征区分出原生锆石和俘获锆石,并认为对基性岩墙的锆石成因及年龄研究需谨慎对待,要结合野外侵入关系,不能以大多数数据的平均年龄为准。此外 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法也有很好的应用,周鼎武等(1999)对武当地块基性岩墙群采用了角闪石和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 中子活化定年测试,获得了一系列可靠并有重要意义的测年数据,为武当地块的构造演化提供了重要的参考信息。

2.4 地壳混染作用及蚀变

岩墙侵位之后的岩浆混染作用较少发生,这主要是因为岩墙边部的快速冷凝阻止了岩浆与围岩的进一步接触。岩墙的混染主要发生在侵位结晶之前的地壳深部(彭澎等, 2004)。但是由于出露剥蚀或流体交代作用,岩墙会遭受不同程度的蚀变。在进行地球化学研究时,尽量采集岩墙核部较为新鲜的样品,可避免蚀变的影响。在岩墙与围岩的结合部往往有流体作用发生,某些岩墙群的化学特征显示出热水流体的参与。以色列南部的 Elat 岩墙群及围岩就曾遭受低压条件下的热水溶液蚀变(Heimann *et al.*, 1995)。

3 岩墙群的几何学研究

岩墙群是岩浆侵入的产物,其主体往往未出露地表,那么如何了解岩墙群的几何学特征呢?目前主要是通过卫星遥感照片、地震层析、航磁数据(shadowgram maps)、重力探测、区域地质资料并结合野外观察的方法来认识岩墙群的几何特征。

3.1 岩墙群的规模和形态

目前已知的岩墙群数量约 1 100 个,规模大小不一。岩墙群的规模往往是由形成环境、成因模式、岩浆事件的强度、脉动的频率以及岩浆的性质等因素所决定的。目前发现的岩墙群中最大的是 Machenzie 岩墙群,其延伸长度达 2 500 km,分布面积 $2.7 \times 10^6 \text{ km}^2$ (表 1)。而小型的岩墙群如 Spanish Peaks,最大延伸为 36 km,分布面积仅约为 $1\,000 \text{ km}^2$ 。这里需说明的是,岩墙往往不是连续延伸的,多呈一种雁形斜列的方式断续展布。这种现象可能与区域应力场或围岩的流变学特性有关。目前已知单个连续岩墙(红海东缘)的最大长度约为 1 000 km(Parfitt and Head, 1993)。

岩墙的宽度变化较大。一般说来与地幔柱有关的岩墙宽度较大,平均 20~40 m,而在火山机构、小型侵入体和蛇绿岩套环境下形成的岩墙宽度较小,一般 < 10 m(Fahrig, 1987)。岩墙的宽度在延伸方向上往往有变化,其宽度的变化(由宽变窄)可指示岩墙侵位时岩浆的流动方向(侯贵廷等, 2003)。岩墙的宽度变化还与围岩的性质有关。如 Spanish peaks 岩墙群,当岩墙从粗碎屑质围岩延伸到页岩-砂岩质围岩时,岩墙宽度增加了,这说明围岩的强度和韧性对岩墙的宽度有影响(Smith, 1987)。目前对岩墙深度的了解是比较有限的,估算深度的方法主要有两种,一是计算岩墙侵位的环境温度,再根据地温梯度来得出深度值;二是根据不同深度的矿物固结速度的差异来判断深度。根据对岩墙围岩蚀变程度的对比,岩墙群的深度下限应是麻粒岩相带(Parfitt and Head, 1993)。

由于岩墙的形成受到区域应力场、构造环境等因素的影响,其形态具有多样性。除了呈平行或近于平行展布的岩墙之外,环形岩墙和锥状岩席群也是一种常见的岩浆运移通道型的岩体群,如位于西非尼日尔境内的著名的 Meugueur-Meugueur 岩体是一个大型环形岩席,研究发现它是由位于下部的环形岩墙和上部的锥状岩席组成的。目前认为环形岩席与岩墙的形成机制基本相同,但其源区应是地壳浅部的小型岩浆房,因此其规模也较小。对 139 个环形岩席的统计发现,95% 的直径为 4~29 km,平均 ~15 km(Bonin, 1982)。

3.2 岩墙群的几何特征对地幔柱中心的指示

Ernst 和 Bucher(2001b)系统研究了巨型岩墙群的几何特征,发现在空间展布上可指示地幔柱中心

的有 3 种模式(图 2):连续扇形(Mackenzie 岩墙群、Matachewan 岩墙群等)分开的扇形(Abitibi 岩墙群、British Tertiary 岩墙群、Timan Eastern Europe 岩墙群等)和中心发散状(Circum-Atlantic 岩墙群、ELIP 岩墙群)。但由于构造运动和剥蚀作用的破坏,多数岩墙群并不是理想的放射状或仅是放射状的一部分。即使如此,岩墙群的展布特征仍然对地幔柱的中心有重要的指示作用。①通过走向测定、古地磁的方法可以恢复岩墙群的放射状原型,各个方向岩墙群收敛的地区即是地幔柱的中心位置。复原的环北大西洋岩墙群收敛于佛罗里达南部,因此该地被认为可能是导致大西洋裂解的地幔柱的位置(Ernst and Buchan, 2001a)。②随着由中心向外围距离的增大,岩墙在厚度、走向和间距上也有变化。一般认为,靠近中心的位置,岩墙厚度大、呈放射状且间距较窄,而远离中心的地方则岩墙变窄、近平行排列且间距宽,这种变化可能是由于远离中心源区岩浆侵位动力减弱的结果。这一变化规律可用作识别中心区和边缘区岩墙的一个特征。③在理论上,岩墙群放射状排布向平行状排布转变的环形边界的中心应是岩墙群收敛的中心,即地幔柱的中心区域。此外,这个环形边界应与地幔柱引起的地壳隆升的边界吻合(Kent *et al.*, 2001)根据这个环形区域的范围可估算地幔柱中心区域的最大抬升量,Condie (2001)在对 Mackenzie 岩墙群的研究中就采用了这种方法。辉绿岩岩墙群被认为较为适合用于岩墙群几何形态对地幔柱中心指示意义的研究,这是因为辉绿岩岩墙发育较多(表 1),同时辉绿岩相对于其他超基性-基性岩侵位深部较大且较容易保存下来(Ernst and Buchan, 2001b)。

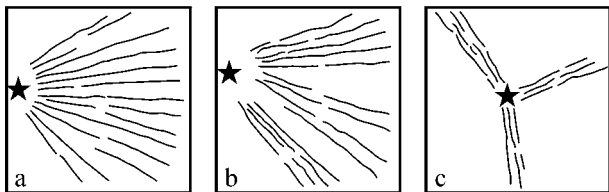


图 2 巨型放射状岩墙群的几何模型(据 Ernst and Buchan, 2001b)

Fig. 2 Characteristic geometries of giant radiating dyke swarms (modified after Ernst and Buchan, 2001b)

a—连续扇状; b—分开的扇状; c—中心发散状

a—continuous fanning pattern; b—fanning pattern subdivided into separate subswarms; c—subswarms of subparallel dykes that radiate from the same point

研究发现,岩墙群的一些其他特征如磁倾角、岩墙形态和矿物及化学成分对地幔柱中心也具有指示意义。对 Matachewan 岩墙群的古地磁研究发现,岩墙群末端比近中心处有更高的磁倾角变化(Halls, 1991)。在岩墙形态上具有雁形错断的岩墙往往呈较缓的角度向深部倾斜,所指方向为中心位置(Smith, 1987)。在矿物和地球化学成分上也有一定的变化规律,比如中大西洋火成岩省,距离中心较远的美洲东北部岩墙群主要为石英拉斑玄武岩,而在中心位置主要是橄榄拉斑玄武岩(Ernst and Buchan, 2001a)。

4 岩墙群对古陆重建的意义

岩墙群是古陆重建的重要“契合点”(Piercing point)。这是由于岩墙群延伸长度大、几何形态相对简单,大陆边缘地区的抬升、下沉、变形等构造破坏作用对岩墙群几何形态影响比较小,而海岬、裂谷边缘、被动大陆边缘等则很难保持岩墙群的原始形貌;岩墙群可延伸几千千米,分布在各个分离板块上的几率比较大,从而为重建留下宝贵的“线索”,相对于古地磁证据,岩墙群能够为古陆重建提供更为精确的年代学约束,对岩墙群的地球化学对比研究也可作为古陆的裂解建立动力学模型(Bleeker and Ernst, 2006)。如果岩墙群遭受了较大规模的构造运动破坏,就需要使用构造复原的方法来恢复其初始形态,从而更为有效地进行古陆重建及地幔柱中心的指示研究。在华北克拉通的前寒武岩墙群研究(Peng *et al.*, 2006)和本文作者对峨眉山 LIP 基性岩墙群的研究中,都采用了这种方法(李宏博等, 2010)。

在前寒武纪超级古陆(Columbia, Rodinia)的拼贴和裂解研究中,由于岩墙群在保存地质信息方面的“优势”,使其成为前寒武地质研究的热点(侯贵廷, 2005a)。以华北克拉通、南印度克拉通和加拿大地盾中的巨型放射状岩墙群(~1.85 Ga)为重建标志,并与同期发育的造山带和火山沉积岩系的对比研究表明,3个克拉通曾是一个联合地质体(India-North China-Laurentia)(Hou *et al.*, 2008a)。而在中元古代晚期(1.3~1.2 Ga)发育于加拿大地盾、澳大利亚、南极洲、波罗地等克拉通中的巨型放射状基性岩墙群具有很好的拼合性,说明这些克拉通也曾联合在一起。这为 Columbia 超级大陆的存在提供了重要佐证,而散布于各个克拉通中的放射状基性

岩墙群很可能是超级地幔柱引起的 Columbia 裂解事件的产物(Hou *et al.*, 2008b)。古生代以来的古陆重建研究中岩墙群也有很多应用,Ernst 和 Buchan (2001a)通过对散布在东北美、北非及南美的岩墙群的研究重建了北大西洋分裂前的古陆,并认为裂解是由中大西洋地幔柱(CAMP, 200 Ma)事件导致的。Zhu 等(2009)利用岩墙群对措美 LIP 的研究也是十分成功的。

5 类地行星的启示

地球在亿万年的演化中,剥蚀作用和地壳运动对早期形成的岩墙群有较大的破坏。金星等类地行星由于早已进入死亡期,早期形成的巨型放射状系统能够较为完整地保留下来。因此,在类地行星上的发现对研究地球上的岩墙群有重要的启示和类比意义。

美国的麦哲伦金星探测计划(Magellan mission)发现金星上存在着至少 163 个巨型放射状断裂——地堑系统,类似于地球上的巨型放射状岩墙群。这些巨型放射状系统在金星南北纬 40°、经度 200°~300°之间十分集中,这些地区多是高地和裂谷区,而在低地和极地地区几乎没有出现。放射状系统基本特点是:①环绕中心地区由断裂和地堑排列组成放射状系统;②直径 40~>2 000 km,平均为~325 km,这与地球上岩墙群的规模较为相似,52%的放射状构造辐射角超过了 270°,其中 80%超过了 180°;③放射状系统中心区的地形多变,53%为穹窿,15%平面,9%沉陷,还有 23%尚不清楚(Ernst *et al.*, 1995b)。

Parfitt 和 Head(1993)提出了金星放射状机构的演化模型。第 1 阶段,地幔柱顶托岩石圈引起抬升,形成放射状裂隙系统,通过地幔柱头部垂向的侵入形成早期延伸长度较大的岩墙,但是数量较少,且出露地表的也少。之后,由于地幔柱头部的减薄和扩展,引起地形的形变形成冠状形态。第 2 阶段,浅部的岩浆房形成,通过侧向的侵入形成延伸较短的岩墙。这个阶段不再像早期一样发生地形抬升,这也暗示了岩浆房的规模较为有限。此外,根据 Venera 着陆探测器的物相分析结果,金星放射状机构的岩石成分可能是玄武质的。因此,这些巨型放射状系统很可能是岩墙群系统,它的几何形态和地貌特征为地球的岩墙群系统研究提供了重要参考。

6 结语

通过对岩墙群在构造环境、侵位模式、形成机制、岩相学、地球化学、同位素地质年代学、几何学和比较行星学等方面研究成果的总结发现:岩墙群主要与拉张构造环境有关,是岩浆侵位事件(如地幔柱)造成上覆地壳形成裂隙系统,岩浆随后灌入而形成的。其侵位模式主要有垂向和侧向两种,但形成条件及规模形态均有区别。岩墙群的岩性多样,但主要是超基性-基性岩,说明其与深部岩浆作用密切相关。对岩墙群的地球化学研究可揭示岩浆事件的构造环境、岩浆演化过程以及源区特征。放射状岩墙群的收敛中心指示了地幔柱的中心位置。岩墙群是古陆重建十分重要的“契合点”。类地行星(金星)巨型放射状系统很可能是岩墙群系统,暗示了地球上很可能也存在过这种完整的巨型放射状岩墙群系统。岩墙群是联通地幔与地壳的通道,对于古陆重建、地幔柱中心的指示、地幔源区示踪、火山机构以及区域岩浆演化史的研究都有重要意义。同时,岩墙群的研究需要地质多学科的交叉和支撑,如火山学、岩石学、构造学、年代学、地球化学和地磁学等等。随着研究的深入,岩墙群对于地球系统的重要意义将不断地被揭示,并将对地球科学的发展产生重要影响。

致谢 审稿人为本文提出了宝贵的意见和建议,谨致衷心感谢!

References

- Baer G and Heimann A. 1995. Physics and Chemistry of Dykes[M]. Netherlands: Balkema, 95~114, 193~204, 267~280, 325~338.
- Baer G and Reches Z. 1987. Flow patterns of magma in dikes, Makhtesh Ramon, Israel[J]. *Geology*, 15(6): 569~572.
- Baer G and Reches Z. 1991. Mechanics of emplacement and tectonic implications of the Ramon dike systems, Israel[J]. *Journal of Geophysical Research*, 96(B7): 11 895~11 910.
- Baragar W R A, Ernst R E, Hulbert L, *et al.* 1996. Longitudinal petrochemical variation in the Mackenzie dyke swarm, northwestern Canadian Shield[J]. *Journal of Petrology*, 37(2): 317~359.
- Bleeker W and Ernst R. 2006. Short-lived mantle generated magmatic events and their dyke swarms: The key unlocking Earth's palaeogeographic record back to 2.6 Ga[A]. Hanski E, Mertanen S,

- Rämö T, *et al.* Dyke Swarms-Time Markers of Crustal Evolution [C]. UK : Taylor & Francis/Balkema , 3~26.
- Bonin B. 1982. Les granites des complexes annulaires : the granites of ring complexes[A]. Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Manuels et method[C]. France : Orléans , 183.
- Bruce P M and Huppert H E. 1989. Thermal control of basaltic fissure eruptions[J]. *Nature* , 342(6 250) : 665~667.
- Bruce P M and Huppert H E. 1990. Solidification and melting along dykes by the laminar flow of basaltic magma[A]. Ryan M P. Magma Transport and Storage[C]. USA : John Wiley & Sons , Chichester , 87~101.
- Cadman A, Tarney J and Park R G. 1990. Intrusion and crystallisation features in Proterozoic dyke swarm[A]. Parker A J, Rickwood P C and Tucker D H. Mafic Dykes and Emplacement Mechanisms [C]. Netherlands : Balkema , 13~24.
- Condie K C. 2001. Mantle Plumes and Their Record in Earth History [M]. British : Cambridge University Press , 23~45.
- Cox K G. 1980. A model for flood basalt volcanism[J]. *Journal of Petrology* , 21 : 629~650.
- Delaney P T. 1987. Heat transfer during emplacement and cooling of mafic dyke[A]. Halls H C and Fahrig W F. Mafic Dyke Swarms [C]. Canada : Geological Association of Canada , 31~46.
- Denyszyn S W, Halls H C, David D W, *et al.* 2009. Paleomagnetism and U-Pb geochronology of Franklin Dykes in High Arctic Canada and Greenland : a revised age and Paleomagnetic pole constraining block rotations in the Nares Strait region[J]. *Canadian Journal of Earth Science* , 46(9) : 689~705.
- Ernst R E and Barragar W R A. 1992. Evidence from magnetic fabric for the flow pattern of magma in the Mackenzie giant radiating dyke swarm[J]. *Nature* , 356(6369) : 511~513.
- Ernst R E and Buchan K L. 2001a. Large mafic magmatic events through time and links to mantle-plume heads[A]. Ernst R E and Buchan K L. Mantle Plumes : Their Identification through Time [C]. USA : Geological Society of America , Inc. , 483~575.
- Ernst R E and Buchan K L. 2001b. The use of mafic dike swarms in identifying and locating mantle plumes[A]. Ernst R E and Buchan K L. Mantle Plumes : Their Identification through Time[C]. USA : Geological Society of America , Inc. , 247~265.
- Ernst R E, Buchan K L, West T D, *et al.* 1995a. Giant dyke swarms : Characteristics, distribution and geotectonic applications[A]. Baer G and Heimann A. Physics and Chemistry of Dykes[C]. Netherlands : Balkema , 3~21.
- Ernst R E, Head J W, Parfitt E, *et al.* 1995b. Giant radiating dyke swarms on Earth and Venus[J]. *Earth Science Review* , 39(1~2) : 1~58.
- Fahrig W F and West T D. 1986. Diabase dyke swarms of the Canadian shield[A]. Canada : Geological Survey of Canada , Map 1627A[C].
- Fahrig W F. 1987. The tectonic settings of continental mafic dyke swarms : Failed arm and early passive margin[A]. Halls H C and Fahrig W F. Mafic Dyke Swarms[C]. Canada : Geological Association of Canada , 331~348.
- Geshi N. 2006. Development of dyke and sheet swarms controlled by magma supply rate-an example from the Miocene Otoge igneous complex , central Japan[A]. Hanski E, Mertanen S, Rämö T, *et al.* Dyke Swarms-Time Markers of Crustal Evolution[C]. UK : Taylor & Francis/Balkema , 161~170.
- Gibson I L, Sinha M N and Fahrig W F. 1987. The geochemistry of the Mackenzie dyke swarm , Canada[A]. Halls H C and Fahrig W F. Mafic Dyke Swarms[C]. Canada : Geological Association of Canada , 95~108.
- Greenough J D and Hodych J P. 1990. Evidence for lateral magma injection in the Mesozoic dyke of eastern North America[A]. Parker A J, Rickwood P C and Tucker D H. Mafic dykes and emplacement mechanisms[C]. Netherlands : Balkema , 35~46.
- Gudmundsson A. 1995. The geometry and growth of dykes[A]. Baer G and Heimann A. Physics and Chemistry of Dykes[C]. Netherlands : Balkema , 23~34.
- Guo F, Fan W M and Wang Y J. 2004. When did the Emeishan plume activity start? Geochronological evidence from ultramafic-mafic dikes in Southwestern China[J]. *International Geology Review* , 46(3) : 226~234.
- Halls H C. 1987. Dyke swarms and continental rifting : Some concluding remarks[A]. Halls H C and Fahrig W F. Mafic Dyke Swarms[C]. Canada : Geological Association of Canada , 483~492.
- Halls H C. 1991. The Matachewan dyke swarm , Canada : An early Proterozoic magnetic field reversal[J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 105(1~3) : 279~292.
- Halls H C and Fahrig W F. 1987. Mafic Dyke Swarms[M]. Canada : Geological Association of Canada , 109~122, 279~288, 349~360, 393~400, 401~418, 419~432, 445~456.
- Halls H C and Zhang B. 1995. Magnetic polarity domains in the early Proterozoic Matachewan dyke swarm , Canada : A novel method for mapping major faults[A]. Baer G and Heimann A. Physics and Chemistry of Dykes[C]. Netherlands : Balkema , 165~170.
- Hammond J G. 1986. Geochemistry and petrogenesis of Proterozoic diabase in the southern Death Valley region of California[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 93(3) : 312~321.
- Han Wei, Luo Jinhai, Fan Junlei, *et al.* 2009. Late Permian diabase in Luodian, Southeastern Guizhou and its tectonic significances[J]. *Geological Review* , 55(6) : 795~803(in Chinese with English abstract).
- Hanski E, Mertanen S, Rämö T, *et al.* 2006. Dyke Swarms-Time Markers of Crustal Evolution[M]. UK : Taylor & Francis/Balkema , 49~62, 85~98, 171~182, 201~212, 225~242.
- Heaman L M. 1989. U-Pb dating of mafic dyke swarms : what are the options? [A]. New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources. International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth 's Interior General Assembly[C]. Bulletin 131 : 125.
- Heimann A, Eyal Y, Eyal M, *et al.* 1995. Thermal events and low temperature alteration in the Precambrian schistose dykes and their host rocks in the Elat area , southern Israel : $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology[A]. Baer G and Heimann A. Physics and Chemistry of Dykes [C]. Netherlands : Balkema , 281~292.
- Hou Guiting, Li Jianghai, Halls H C, *et al.* 2003. The flow structures

- and mechanics of late Precambrian mafic dyke swarms in North China Craton [J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2):210~216 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Li Jianghai, Jin Aiwen, *et al.* 2005a. The Precambrian basic dyke swarms in the western Shandong Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(2):190~199 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Li Jianghai, Liu Yulin, *et al.* 2005b. Late paleoproterozoic extensional events in North China Craton: Aulacogen and dyke swarm [J]. *Progress in Natural Science*, 15(11):1366~1373 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Li Jianghai and Qian Xianglin. 2005c. The discovery and origin of the round columnar joints in the basic dyke swarms [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 41(2):235~239 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Liu Yulin, Li Jianghai, *et al.* 2005d. The SHRIMP U-Pb chronology of mafic dyke swarms: A case study of Laiwu diabase dykes in western Shandong [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(3):179~183 (in Chinese with English abstract).
- Hou G T, Santosh M, Qian X L, *et al.* 2008a. Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: Insights from radiating mafic dyke swarms [J]. *Gondwana Research*, 14(3):395~409.
- Hou G T, Santosh M, Qian X L, *et al.* 2008b. Tectonic constraint on 1.3~1.2 Ga final breakup of Columbia supercontinent from a giant radiating dyke swarm [J]. *Gondwana Research*, 14(3):561~566.
- Hulbert L, Williamson B and Theriault. 1993. Geology of middle Proterozoic MacKenzie diabase suites from Saskatchewan: An overview and their potential to host Noril'sk-type Ni-Cu-PGE mineralization [A]. Saskatchewan Geological Survey. Summary of Investigations [C]. Saskatchewan: Sask. Energy Mines Misc, 112~126.
- Johnson R B. 1961. Patterns and origins of radial dike swarms associated with West Spanish peak, south central Colorado [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 72(4):579~590.
- Johnson R B. 1968. Geology of the igneous rocks of the Spanish Peaks region, Colorado [A]. U S Geological Survey. U S Geological Survey Professional Paper [C]. USA: U S Geological Survey, G1~G47.
- Kent A J R, Baker J A and Eiler J. 2001. Exploring the dynamics of crustal contamination in continental flood basalts: Constraints from melt inclusion and mineral compositions [J]. *Eos Transactions, American Geophysical Union*, 81(48, Suppl.):1247.
- Klausen M B. 2009. The Lebombo monocline and associated feeder dyke swarm: Diagnostic of a successful and highly volcanic rifted margin? [J]. *Tectonophysics*, 468(1~4):42~62.
- Leat P T, Luttinen A V, Storey B C, *et al.* 2006. Sills of the Theron Mountains, Antarctica: Evidence for long distance transport of mafic magmas during Gondwana break-up [A]. Hanski E, Mertanen S, Rämö T, *et al.* Dyke Swarms-Time Markers of Crustal Evolution [C]. UK: Taylor & Francis/Balkema, 183~200.
- LeCheminant A N and Heaman L M. 1989. Mackenzie igneous events, Canada: Middle Proterozoic hotspot magmatism associated with ocean opening [J]. *Earth Planet*, 96(1~2):38~48.
- Li Hongbo, Zhang Zhaochong and Lü Linsu. 2010. Geometry of the mafic dyke swarms in the Emeishan large igneous province: Implications for mantle plume [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10):3143~3152 (in Chinese with English abstract).
- MacDonald R, Wilson L, Thorpe R S, *et al.* 1988. Emplacement of the Cleveland dyke: Evidence from geochemistry, mineralogy, and physical modeling [J]. *Journal of Petrology*, 29(3):559~583.
- Manzer G K. 1978. Petrology and Geochemistry of Precambrian Mafic Dikes, Minnesota, and their Bearing on the Secular Chemical Variation in Precambrian Basaltic Magma [D]. USA: Rice University.
- McHone J G, Ross M E and Greenhough J D. 1987. Mesozoic dyke swarms of eastern North America [A]. Halls H C and Fahrig W F. Mafic Dyke Swarms [C]. Canada: Geological Association of Canada, 47~54.
- Mitchell J G, Rands P N and Ineson P R. 1989. Perturbation of the K-Ar age system in the Cleveland dyke, UK: Evidence of an early Eocene age for barite mineralisation in the magnesian limestone of County Durham [J]. *Chemical Geology*, 79(1):49~64.
- Oliveira E P, Tamey J and João X J. 1990. Geochemistry of the Mesozoic Amapá and Jari dyke swarms, northern Brazil: Plume-related magmatism during the opening of the central Atlantic [A]. Parker A J, Rickwood P C, Tucker D H. Mafic dykes and emplacement mechanisms [C]. Netherlands: Balkema, 173~184.
- Parfitt E A and Head J W. 1993. Buffered and unbuffered dike emplacement on Earth and Venus: Implications for magma reservoir size, depth, and rate of magma replenishment [J]. *Earth, Moon and Planets*, 61(3):249~281.
- Parker A J, Rickwood P C and Tucker D H. 1990. Mafic Dykes and Emplacement Mechanisms [M]. Netherlands: Balkema, 107~118, 119~129, 131~144, 325~334, 334~348, 349~362, 383~390, 415~420.
- Patchett P J, Lehnert K, Rehkaemper M, *et al.* 1994. Mantle and crustal effects on the geochemistry of Proterozoic dikes and sills in Sweder [J]. *Journal of Petrology*, 35(4):1095~1125.
- Peng P, Zhai M G and Guo J H. 2006. 1.80~1.75 Ga mafic dyke swarms in the central North China craton: Implications for a plume-related break-up event [A]. Hanski E, Mertanen S, Rämö T, *et al.* Dyke Swarms-Time Markers of Crustal Evolution [C]. UK: Taylor & Francis/Balkema, 99~112.
- Peng P, Zhai M G, Guo J H, *et al.* 2007. Nature of mantle source contributions and crystal differentiation in the petrogenesis of the 1.78 Ga mafic dykes in the central North China craton [J]. *Gondwana Research*, 12(1~2):29~46.
- Peng Peng, Zhai Mingguo, Zhang Huafeng, *et al.* 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 [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3):439~456 (in Chinese with English abstract).
- Peterman Z E and Sims P K. 1988. The Goodman swell: A lithospheric flexure caused by crustal loading along the midcontinent rift system [J]. *Tectonics*, 7(5):1077~1090.
- Petrini R, Joron J L, Ottonello G, *et al.* 1998. Basaltic dykes from

- Zabargad Island, Red Sea: Petrology and geochemistry [J]. *Tectonophysics*, 150(1~2): 229~248.
- Pinese J P P, Teixeira W, Piccirillo E M, *et al.* 1995. The Precambrian lavras mafic dykes, southern Sao Francisco Craton, Brazil: Preliminary geochemical and geochronological results [A]. Baer G and Heimann A. *Physics and Chemistry of Dykes* [C]. Netherlands: Balkema, 205~219.
- Pudlo D and Franz G. 1995. Records of deep seated magma chamber processes from plagioclase and amphibole phenocrysts in Pan-African dyke rocks of Bir Safsaf, SW-Egypt [A]. Baer G and Heimann A. *Physics and Chemistry of Dykes* [C]. Netherlands: Balkema, 251~266.
- Schmitz M D, Wirth K R and Craddock J P. 1995. Major and trace element geochemistry of early Proterozoic mafic dykes of northern Minnesota and southwestern Ontario [A]. Baer G and Heimann A. *Physics and Chemistry of Dykes* [C]. Netherlands: Balkema, 219~236.
- Seymour S and Kumarapeli P S. 1995. Geochemistry of the Grenville dyke swarm: Role of plume-source mantle in magma genesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120(1): 29~41.
- Smith R P. 1987. Dyke emplacement at Spanish Peaks, Colorado [A]. Halls H C and Fahrig W F. *Mafic Dyke Swarms* [C]. Canada: Geological Association of Canada, 47~54.
- Tomshin M D and Koroleva O V. 1990. Composite dykes of the Vilyuisk paleorift system, Siberian platform, Yakutia, USSR [A]. Parker A J, Rickwood P C and Tucker D H. *Mafic Dykes Emplacement Mechanisms* [C]. Balkema: Rotterdam, 535~540.
- Teutsch N, Kolodny Y and Ayalon A. 1995. Low temperature alteration of a basaltic dyke in Makhtesh Ramon, Israel [A]. Baer G and Heimann A. *Physics and Chemistry of Dykes* [C]. Netherlands: Balkema, 315~324.
- Thompson R N. 1982. Magmatism of the British Tertiary volcanic province Scottish [J]. *Journal of Geology*, 18(1): 49~107.
- Upton B G J, Skovgaard A C, McClurg J, *et al.* 2002. Picritic magmas and the Rum ultramafic complex, Scotland [J]. *Geological Magazine*, 139(4): 437~452.
- Vuollo J I, Nykanen V M, Liipo J P, *et al.* 1995. Palaeoproterozoic mafic dyke swarms in the Eastern Fennoscandian Shield, Finland: A review [A]. Baer G and Heimann A. *Physics and Chemistry of Dykes* [C]. Netherlands: Balkema, 179~192.
- Walker G P L, Eyre P R, Spengler S R, *et al.* 1995. Congruent dyke-widths in large basaltic volcanoes [A]. Baer G and Heimann A. *Physics and Chemistry of Dykes* [C]. Netherlands: Balkema, 35~40.
- Wirth K R and Vervoort J D. 1995. Nd isotopic constraints on mantle and crustal contributions to early Proterozoic dykes of the southern superior province [A]. Baer G and Heimann A. *Physics and Chemistry of Dykes* [C]. Netherlands: Balkema, 237~250.
- Xu Yigang and Chung S L. 2001. The Emeishan large igneous province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions [J]. *Geochimica*, 30(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Zhou Dingwu, Jin Hailong, *et al.* 1999. Study on the Sr, Nd, Pb and O isotopes of basic dyke swarms in the Wudang block and basic volcanics of the Yaolinghe Group [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 430~437 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Xu Yonghang and Zhai Mingguo. 2007. Petrogenesis and tectonic setting of the paleoproterozoic Xiong'er Group in the southern part of the North China Craton: A review [J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 191~206 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Dingwu, Zhang Chengli, Zhou Xiaohu, *et al.* 1999. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of basic dykes from Wudang block and their geology significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 14~20 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Chung S L, Mo X X, *et al.* 2009. The 132 Ma Comei-Bunbury large igneous province: Remnants identified in present-day southeastern Tibet and southwestern Australia [J]. *Geology*, 37(7): 583~586.

附中文参考文献

- 韩伟, 罗金海, 樊俊雷, 等. 2009. 贵州罗甸晚二叠世辉绿岩及其区域构造意义 [J]. *地质论评*, 55(6): 795~803.
- 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 [J]. *地质学报*, 77(2): 210~216.
- 侯贵廷, 李江海, 金爱文, 等. 2005a. 鲁西前寒武纪基性岩墙群 [J]. *地质学报*, 79(2): 190~199.
- 侯贵廷, 李江海, 刘玉琳, 等. 2005b. 华北克拉通远古代末的伸展事件: 拗拉谷与岩墙群 [J]. *自然科学进展*, 15(11): 1366~1373.
- 侯贵廷, 李江海, 钱祥麟. 2005c. 岩墙群圆柱状节理发现和成因机制探讨 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 41(2): 235~239.
- 侯贵廷, 刘玉琳, 李江海, 等. 2005d. 关于基性岩墙群的 U-Pb SHRIMP 地质年代学的探讨——以鲁西莱芜辉绿岩岩墙为例 [J]. *岩石矿物学杂志*, 24(3): 179~185.
- 李宏博, 张招崇, 吕林素. 2010. 峨眉山大火成岩省基性岩墙群几何学研究及对地幔柱中心的指示意义 [J]. *岩石学报*, 26(10): 3143~3152.
- 彭澎, 翟明国, 张华峰, 等. 2004. 华北克拉通 1.8 Ga 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 [J]. *岩石学报*, 20(3): 439~456.
- 徐义刚, 钟孙霖. 2001. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件 [J]. *地球化学*, 30(1): 1~9.
- 张成立, 周鼎武, 金海龙, 等. 1999. 武当地块基性岩墙群及耀岭河群基性火山岩的 Sr, Nd, Pb, O 同位素研究 [J]. *岩石学报*, 15(3): 430~437.
- 赵太平, 徐勇航, 翟明国. 2007. 华北陆块南部元古宙熊耳群火山岩的成因与构造环境: 事实与争议 [J]. *高校地质学报*, 13(2): 191~206.
- 周鼎武, 张成立, 周小虎, 等. 1999. 武当地块基性岩墙群 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 15(1): 14~20.