

# 中国与俄罗斯 二叠纪大火成岩省对比研究

ZHONGGUO YU ELUOSI ERDIEJI DAHUOCHENGYANSHENG DUIBI YANJIU

◎ 刘建民 李金宝 杨振宇 赵 越 张照伟 等著



地质出版社

# 中国与俄罗斯二叠纪大火成岩省 对比研究

刘建民 李金宝 杨振宇 赵 越 张照伟 李文渊  
杜星星 陈柏林 尤敏鑫 韩梅梅 董法先 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

## 内 容 简 介

本书是中国地质调查局和科技部组织实施的中国-俄罗斯地质科技合作项目(2011~2016年)的系列成果之一。研究者以国际合作对比研究项目为平台,通过地质学、岩石学、地球化学、同位素年代学和古地磁学等不同学科和手段的综合对比,开展了(石炭纪—)二叠纪俄罗斯西伯利亚大火成岩省与中国峨眉山和塔里木大火成岩省的形成环境及其成矿背景对比研究。项目实施期间,双方科学家开展了一系列实质性的野外地质联合考察和学术交流,尤其是通过对俄罗斯西伯利亚大火成岩省和世界级诺里尔斯克铜镍矿、中国的峨眉山大火成岩省及攀枝花钒钛磁铁矿的考察和研究,对岩浆型铜镍矿的成矿过程及成矿机制有了更加深刻的理解和认识。通过引入天体因素,考虑全球构造及地质事件的周期性和旋回性与天文因素背景的关系,探讨了晚古生代大规模的岩浆活动和火山喷发的全球性构造背景和成矿响应。结合成矿元素地球化学性质及内生矿床的形成过程,强调了岩浆深部的液态融离和重力分异作用在岩浆型铜镍硫化物矿床及钒钛磁铁矿床形成过程中的联系与差别,作者提出西伯利亚和峨眉山两个大火成岩省成矿系列具有相似的成矿机制及成矿过程,这一认识对重新认识相关构造环境下的成矿特点及潜力评价具有重要意义。

本书可供从事基础地质科学研究人员、地质矿产勘查工程技术人员参考,也可供高等院校地质专业师生阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

中国与俄罗斯二叠纪大火成岩省对比研究 / 刘建民等著. —北京:地质出版社, 2017.6

ISBN 978-7-116-10367-2

I. ①中… II. ①刘… III. ①二叠纪—火成岩—成岩作用—对比研究—中国、俄罗斯 IV. ①P588.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第124711号

---

责任编辑:蔡卫东 赵俊磊

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号, 100083

电 话:(010) 66554528(邮购部); (010) 66554628(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京地大彩印有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:16.5

字 数:400千字

印 数:1—500册

版 次:2017年6月北京第1版

印 次:2017年6月北京第1次印刷

定 价:60.00元

书 号:ISBN 978-7-116-10367-2

---

(如对本书有意见或建议,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

# 前言

## 一、大火成岩省的研究意义

大陆岩石圈岩浆作用、火山活动和地幔深部地质过程是当前国际地学界前沿领域的热点问题。大火成岩省 (Large Igneous Provinces, LIPs) 是指地质历史演化过程中由短时间内 (通常认为  $< 1\sim 2\text{Ma}$ ) 形成的、连续的、体积庞大的火成岩构成的巨型岩浆岩建造, 覆盖面积在  $10^5\text{km}^2$  以上。按照岩石成分, 可以分为镁铁质大火成岩省和长英质大火成岩省 (王德滋, 2005)。其中, 镁铁质大火成岩省可表现为大陆溢流玄武岩、火山被动陆缘、大洋高原玄武岩、大岩墙群和大层状侵入体等, 这也是早期对于“大火成岩省”这一术语的基本描述 (Coffin, 1994)。一般认为, 镁铁质大火成岩省是地幔柱岩浆活动的直接产物; 而长英质大火成岩省则主要由酸性、中酸性熔结凝灰岩及与之有成因联系的花岗岩构成, 一般认为与岩石圈伸展构造和玄武岩底侵作用有不可分割的联系。

大火成岩省所代表的巨型火山岩和侵入岩建造是地质历史时期最强烈的、大规模的岩浆活动及构造运动的反映, 记录了地质历史演化中巨量物质和能量由地球内部向外迁移的过程, 是地质学家了解地球深部壳幔物质形成和变化的窗口, 也是研究地球动力学过程 (地幔动力学、大陆增生、大陆裂解) 的重要手段, 并常常与岩浆矿床 [Cu、Ni 硫化物矿床、铂族元素矿床 (PGE)、铬铁矿床和钽钛磁铁矿床] 的形成相联系。而伴随着大火成岩省形成的大规模火山喷发作用, 也一直作为有可能对于全球气候变化和地质历史上的生物大灭绝有决定性影响的突发性地质事件或者“触发器”而加以研究 (Erwin, 1994; Wignall, 2001), 如被学术界广泛提起的西伯利亚暗色岩和峨眉山玄武岩的喷发可能与二叠纪末期两次生物大灭绝有密切关系。因此, 大火成岩省形成机制和相关的成矿机理研究一直是近几年固体地球科学领域优选课题之一。

截至目前, 已经在世界范围内确定了若干时代不同、面积不等以及岩石和物质组成不同的大火成岩省, 尤其以晚古生代以来的大火成岩省相对广泛 (图 1-1), 显示出地球运动的周期性变化过程。时间最早的为南非的布什维尔德 (Bushveld) 层状侵入体 (2060 Ma)、加拿大北部的 Mackenzie 大岩墙群 (1267 Ma) 等; 二叠纪—三叠纪期间主要有西伯利亚暗色岩 (二叠纪末, 249~251 Ma)、中国西南“峨眉山玄武岩” (二叠纪, 259~261.5 Ma) 和中国西北天山—塔里木大火成岩省 (二叠纪早期, 290~270? Ma) 等; 白垩纪末期印度德干高原暗色岩 (白垩纪—古、新近纪, 65 Ma)、巴西南部的 Parana 溢流玄武岩、非洲纳米比亚的 Etendeka 溢流玄武岩 (150 Ma)、Gondwana 大陆侏罗纪时期裂解形成的非洲及南极留下的玄武岩 “Karoo- Ferrar 大火成岩省 (前者为 195 Ma 和 180~177 Ma; 后者为 190 Ma 和 180~170 Ma)”、北大西洋被动陆缘火成岩省 (61~58 Ma, 现代冰岛)、Caribbean (92~74 Ma)、Ontong Java (122 Ma) 和 Kerguelen (114~110 Ma) 大洋高原玄武岩、中大西洋火成岩省 (200 Ma) 大岩墙群、南美洲南端的 Patagonia 及与之毗邻的 West Antarctica 和澳大利亚昆士

兰州东部及其海域存在一巨大的“长英质火成岩省(侏罗纪)”,即 Whitsunday 火成岩省(132~95 Ma)、中国东南部环太平洋周边巨大的中晚中生代火成岩省等;新生代时期的有北美哥伦比亚河玄武岩(16.5~15.5 Ma)、非洲东北部的“埃塞俄比亚”和“东非高原”(古、新近纪玄武岩 30~15 Ma)、墨西哥的 Sierra Madre Occidental 地区广泛分布有流纹质熔结凝灰岩(中古、新近纪)、美国黄石公园火成岩省(2.2 Ma)等。

## 二、项目研究背景及意义

晚古生代大火成岩省是地球大陆表面目前被确认的最为重要的大火成岩省形成时期之一,以中国峨眉山大火成岩省和俄罗斯西伯利亚大火成岩省为代表。近年来,中国天山-塔里木石炭-二叠纪大规模的岩浆岩也被作为大火成岩省加以研究。

俄罗斯西伯利亚大火成岩省是大陆表面最大的岩浆建造之一。西伯利亚溢流玄武岩地表出露面积约 400 万  $\text{km}^2$ ,平均厚约 1 km;原始喷发的面积可能达 700 万  $\text{km}^2$ 。在西伯利亚大火成岩省内部发育有世界上远景储量最大的岩浆型铜-镍-铂族元素硫化物矿床(诺里尔斯克-塔尔纳赫 Cu-Ni-PGE 元素硫化物矿床)。西伯利亚暗色岩的喷发被认为与二叠纪末期生物大灭绝有密切关系(Condie, 2001)。

峨眉山大火成岩省其分布面积达 30 万~50 万  $\text{km}^2$ (骆耀南, 1988),是近年来国际地学界研究的热点地区之一,并取得了很多重要的进展(张招崇, 2009)。有研究认为,峨眉山大火成岩省的火山喷发与二叠纪时期的生物大灭绝密切相关(Zheng et al., 2010)。同时,其内部发育一系列被认为与大火成岩省相关的世界级超大型 V-Ti-Fe 氧化物矿床和部分中、小型 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床。

中国天山(中亚)-塔里木造山带内部广泛发育石炭-早二叠世岩浆岩,其内火山岩系连合同时代的层状基性-超基性侵入体和花岗岩分布范围约 170 万  $\text{km}^2$ ,近年来也被认为属于古生代大火成岩省(夏林圻等, 2007)。该大火成岩省囊括了境内外天山造山带以及天山以北的准噶尔地区和天山以南塔里木板块的中北部(包括塔里木盆地西北缘的柯坪地区、塔里木盆地西部和塔里木盆地东北缘的北山地区)。中亚天山-塔里木造山带是重要的有色多金属成矿带,众多研究表明这些金属矿化的发生与石炭-早二叠世的岩浆活动有直接的成因联系。

我们注意到,尽管上述三个大火成岩省集中形成于晚古生代(石炭纪—二叠纪),但各自分布于不同的大地构造单元大陆壳内部。其中,峨眉山大火成岩省与西伯利亚大火成岩省在纬度上跨度达  $40^\circ \sim 50^\circ$  之多。那么,它们之间是否具有内在的成因联系,还仅仅是各自独立的时间?到底是什么原因在如此短的时间内、在如此大范围的区域内启动了如此大规模的岩浆活动和火山喷发?也就是说,这种大规模火山喷发的全球地幔动力学和地球动力学背景是什么?而且,虽然各个大火成岩省均有不同级别的成矿作用伴生,但是,各成矿带内的矿床种类和成矿特点有差别。已经有学者注意到了峨眉山大火成岩省和西伯利亚大火成岩省在成矿特征上的明显不同。前者产出世界级的钒钛磁铁矿床及一系列不同规模的 Cu-Ni-PGE 矿床,而后者则以产出世界级的铜-镍-铂族元素矿床为特色(张招崇, 2009)。

地史学和大地构造学研究均表明,晚古生代时期是全球泛大陆(Pangea)形成和逐渐裂解的一个重要阶段,是地壳运动或板块运动较为活跃时期之一,也是造山作用极其相关的火

山活动广泛分布的时期。伴随着晚古生代末期造山作用和造山带的形成，世界范围内的许多地槽封闭并陆续地形成褶皱山系，并在不同构造带或者构造带中引发广泛而强烈的裂谷作用、岩浆作用、火山活动，包括花岗岩侵入及中、酸性熔岩与凝灰岩的喷出和与之相关的是不同程度的成矿作用。其中，西伯利亚大火成岩省、天山-塔里木大火成岩省和峨眉山大火成岩省无疑是晚古生代时期全球性的大规模构造-岩浆活动在不同构造单元（或褶皱带）内的反映，而其中的岩浆型矿床则是与之相伴随的地质演化的伴生产物。

值得注意的是，古地磁研究表明，晚古生代时期也是地球内部经历了长时间的静磁时期（晚石炭世至中二叠世长达 30 余百万年的 Kiaman 稳定的反向极性期）后，地球内部核幔边界热活动开始（二叠纪中期）加剧，地球磁场开始呈现正反磁极性交替（Illawara 极性期）的时期（图 0-1）。地球物理学家根据磁性地层学的研究曾经提出地磁极反转是引发全球性突发事件的重要因素。

值得注意的是，近几年来，学者们对不同的大火成岩省开展了一系列野外地质、岩石学、地球化学和同位素年代学等方面的研究，但多数集中于大火成岩省本身的地球化学特征以及由此推定的地幔柱成因等方面的研究，而对于各个大火成岩省的大地构造环境以及引发地幔柱所代表的岩浆作用或火山活动形成的机制关注得很少。应该说，恰恰是本项目所提出的大地构造环境及对于引发独特岩浆活动形成的大地构造背景才是我们应该予以更加关注的基础地质问题，而对比研究不同构造环境中的大火成岩省有关的岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿床和 V-Ti-Fe 矿床，对于指导我国类似构造环境中的 Cu-Ni-PGE 矿床的勘查具有重要的指导意义。

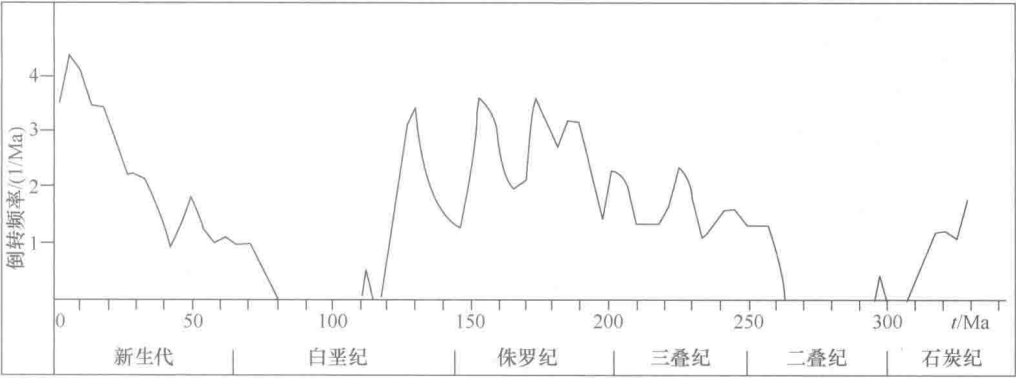


图 0-1 330Ma 以来地磁场倒转频率分布图

2010 年 8 月，时任国土资源部副部长、中国地质调查局局长汪民先生和中国地质科学院副院长董树文教授等一行中方代表团，成功完成对俄罗斯北极地区的野外考察，并签署中国地质调查局与俄罗斯联邦地质矿产资源的谅解备忘录（2010 年 8 月）。为进一步拓展研究领域，深化研究内容，中俄双方于 2010 年 12 月中旬在北京召开的国际合作项目对接工作会议上，对未来 3~5 年合作研究计划进行协商，决定在中国、俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦、韩国五国长期友好合作基础上，设立“西太平洋大陆边缘深部过程与成矿”“青藏高原与贝加尔湖形成地质环境研究”和“俄罗斯与中国二叠纪大火山岩省对比研究”等 3 项中-俄地质科技合作项目，纳入中国地质调查局地质调查项目计划。三个工作项目所属计划项目为“中东亚三维地质结构与资源环境响应”（由中国地质科学院本部实施）。2011 年，立项得到中国



地质调查局批准执行,工作周期为5年(2011~2015年)。

其中,项目“俄罗斯与中国二叠纪大火山岩省对比研究”的总体目标任务是:以国际合作对比研究项目为平台,通过地质学、岩石学、地球化学(常量及微量元素)、同位素年代学和古地磁学等不同学科和手段的综合对比,开展(石炭纪—)二叠纪中国峨眉山、塔里木大火成岩省与俄罗斯西伯利亚大火成岩省的形成环境及其成矿背景对比研究,探讨(石炭纪—)二叠纪大规模岩浆作用(大火成岩省)的形成过程及成矿机制,揭示地球深部过程、重大地质事件的发生与巨量Cu、Ni硫化物和V、Ti磁铁矿矿产的形成过程之间的耦合关系。为重塑中东亚地质结构构造演化和资源响应提供基础数据,并期望为在中国类似构造环境下寻找诸如诺里尔斯克型的大型铜镍矿床提供技术支持。

项目由中国地质科学院地质力学研究所承担,参加单位有中国地质调查局西安地质调查中心、长安大学。

5年来,中俄双方领导高度重视,为双方互派野外地质考察代表团开展野外地质调查创造条件。

2011年11月和2012年8月,双方科学家先后完成了对四川峨眉山大火成岩省和俄罗斯诺里尔斯克地区铜镍矿及西伯利亚大火成岩省的联合地质考察,并取得丰富成果。

2013年9月,项目组圆满完成了对全俄地质研究所的学术访问。主要目的是对2012年8月中俄联合野外地质考察期间所获取的地质样品进行综合处理和测试分析。

2014年底和2015年8月,双方科学家先后完成了对“中国金川镍矿-胶东金矿”和“俄罗斯雅库特南部阿尔丹中部地区金及金-铀矿地质与成矿作用”的野外地质考察。通过双方科学家的互访和野外联合考察,加深了对中东亚成矿地质背景的认识,尤其是对世界级诺里尔斯克铜镍矿的考察和研究,对于岩浆型铜镍矿的成矿过程及成矿机制有了更加深刻的理解和认识。

同时,在此基础上,我们申报并获批科技部国际合作与交流对俄专项项目“我国急缺金属矿产中俄成矿条件与探测技术合作研究(2014~2016)”(项目编号:2014DFR21270)。该项目于2017年8月顺利通过科技部国际合作与交流中心组织的专家评审验收。

### 三、取得的主要成果

(1)项目在充分收集、整理国内外研究成果的基础上,与俄罗斯科学家开展了充分交流与合作,双方共同完成了对二叠纪峨眉山大火成岩省和西伯利亚大火成岩省的地质考察,获取了大量的第一手数据资料,并与塔里木大火成岩省进行对比。其中,对诺里尔斯克的考察并通过井下和代表性钻孔的考察,系统了解了矿床的地质特征及成矿特点。详细观察代表性钻孔8个,平均深度600余米;地表采场1处,井下700 m水平坑道3处,地表剖面约2 km。前后采集样品近百块(60余千克)。在全俄地质研究所开展了样品的测试分析工作,确定了诺里尔斯克铜镍矿床的基本矿石矿物组合:磁黄铁矿+镍黄铁矿(部分为硫化镍)+黄铜矿+黄铁矿,矿床中Co、Pt、Pd等铂族元素不同程度的富集,并偶见自然金等。

(2)从地质学、岩石学和岩石地球化学、同位素地球化学和年代学等方面总结了三大火成岩省主要地质要素的异同;三大火成岩省均有相同的岩石系列结构(基性-超基性),上部为拉斑玄武岩,底部为镁铁质-超镁铁质熔岩,均来自地幔甚至软流圈深部;各大火成岩省

的溢流玄武岩全部发育在各自地块的西北部，在剖面上往往向西北部厚度增大，如西伯利亚暗色火山岩序列的最厚部分在西北部诺里尔斯克（最大厚度达到 3500 m），向东南部明显变薄；峨眉山火山岩最厚部分在西部宾川地区（最大厚度达 5000 余米），向东部逐渐变薄至尖灭。差异主要体现在不同火成岩省的时代、规模等方面，即三大火成岩省发育在不同的构造环境中，西伯利亚大火成岩省规模远大于其他两个，塔里木大火成岩省集中形成在 290 Ma 左右，而峨眉山火山岩集中在 260 Ma 左右，西伯利亚火山岩集中在 250 Ma 左右。

（3）通过野外实地考察和镜下研究，结合成矿元素地球化学性质及内生矿床的形成过程，项目提出西伯利亚和峨眉山两个大火成岩省成矿系列具有相似的成矿机制及成矿过程，即岩浆深部的液态融离+重力分异作用+热液交代作用。这对重新认识相关构造环境下的成矿特点及潜力评价具有重要意义。我们认为西伯利亚和峨眉山两个大火成岩省表现出来的不同成矿系列在成矿本质及机制上是一致或者相似的：即岩浆深部的液态融离+重力分异作用+热液交代成矿作用；这一认识改变了仅通过地球化学数据认为地壳物质混染程度是造成不同岩石系列地球化学数据不同的认识，后者认为铜镍硫化物有关的超基性岩受地壳物质混染程度高，而与钽铌磁铁矿有关的基性岩地壳混染程度低。

（4）项目提出晚二叠纪三大火成岩省的形成及资源环境响应，与地球自转和岩石圈动态加厚过程有关的认识，对理解大火山岩省玄武岩分布规律、喷发时间及成分变化有一定合理性。

本项目引入新的观点和理论来探讨晚古生代大规模的岩浆活动和火山喷发的全球性构造背景和成矿响应。通过引入天体因素，考虑全球构造及地质事件的周期性和旋回性与天文因素背景的关系。我们注意到：地质历史时期对应的是华力西构造旋回，恰恰是处于石炭纪（315 Ma）银河系中心位于北极方向的位置，这种持续数百万年，方向恒定不变化的起潮力，使地球发生膨胀，出现南北向破裂，形成南北向分布的裂谷，在这些裂谷中出现溢流玄武岩，这就是晚古生代末期的全球大火成岩省的形成本质原因。本项目以古地磁数据、同位素年代学数据为参考，根据李金宝先生（2008）提出的地壳运动的四种动力来源：即内外差自转的摩擦力、较差自转的扭动力、地壳垂直运动的液压定律原理以及大陆向北漂移的动力来解释峨眉山、塔里木、俄罗斯西伯利亚三大玄武岩省地质事件的内在联系及其分布的时空规律；阐述了三大火成岩省的玄武岩时间上的先后联系，即岩石圈地表破裂时先从赤道附近开始，逐渐向南向北伸展，这也就是塔里木玄武岩最早、峨眉山玄武岩次之、西伯利亚玄武岩最后的基本原因；同时，阐述了三大火成岩省的玄武岩均分布在稳定地台的西边或西北边界的内在原因。根据这一理论，在华力西裂谷发育过程中，出现与东太平洋中脊一样的动力学机制，在裂谷西侧，岩石圈向西漂移与向西的扩张方向相同，因此裂谷向西扩张速度快；由于漂移与扩张的速度方向相同，相互之间没有发生对冲碰撞，因此不可能隆升为陆地；在裂谷的东侧，岩石圈向西漂移与向东扩张方向相反，相互之间产生对冲碰撞作用，使洋底发生隆升为陆地，形成陆相玄武岩喷发。这样演化的结果，使峨眉山玄武岩省东岩区是陆相玄武岩，中岩区是海陆交互相玄武岩，西岩区是海相玄武岩。东岩区陆相喷发结束早，因此玄武岩层薄；其次是中岩区海陆交互相玄武岩喷发结束，因此玄武岩层比东部厚；西岩区海相喷发结束时间最晚，因此西岩区玄武岩层最厚。同时造成西部苦橄质岩石含量高，说明来源于较深部位。



这一解释颠覆了前人认为的西部海相喷发早、东部陆相喷发晚的认识；同样，西伯利亚大火成岩省大面积分布于俄罗斯西伯利亚地台西北缘；塔里木盆地玄武岩分布在西北部，都是上述相同的地球动力学机制所形成。

(5) 项目获得杨柳坪铜镍矿床成矿时代为加里东期 (377 Ma)，否定了前人提出的该矿床是二叠纪大火成岩省的岩浆同期矿床的认识。

(6) 系统总结了二叠纪末期大火成岩省的环境响应 (生物大灭绝) 的研究现状。

综合前人研究成果及结论，地史上的生物大灭绝事件与大火成岩省伴随的大规模火山喷发间确实存在着惊人的因果关系，但是，到目前为止，除了二者之间时间上的相近外，准确评估溢流玄武岩事件与生物大灭绝事件间的因果关系是难以捉摸的。科学家所认为生物大灭绝事件的主因仍然是由火山活动产生大量挥发性气体和火山灰引发全球性环境气候急剧恶化的结果。因此，火山活动恐怕只是导火索之一，其本质还是地球内部壳、幔相互作用所形成的大规模的岩浆活动对地球表面 (包括海水) 气候的剧烈影响所致。生物大灭绝事件和大火成岩省本身都是非常复杂的演化过程，仍然需要科学家抱着开放的科学态度进行长久的研究。正如 Andy Saunders & Marc Reichow (2009) 评论所说，乞求用一种机制来解释所有的生物大灭绝事件显然是过分简单化的。比如白垩纪末期的生物大灭绝事件科学家倾向于陨石撞击所致，但是，对于其他的生物大灭绝事件而言，陨石撞击方面的证据并不明显，因此，提出其他的机制是必要的。

二叠纪末期—三叠纪初期的晚古生代大火成岩省的形成实际上是受到这一时期天文因素的影响而发生的联合古陆的裂解及聚合背景下伴生的构造岩浆旋回。同时，不同板块边缘和内部形成的岩浆活动的时序又受到地球自转差及大陆向北漂移过程的共同作用，从而形成塔里木大火成岩省的优先破裂，接着地壳由赤道向南北两侧先后发展，并由此诱发峨眉山和西伯利亚大火成岩省的形成。而不同板块内部大规模火山岩的先后喷发，对全球性的生态循环系统 (包括气候和陆地及海洋环境) 造成了毁灭性的破坏，从而诱发了二叠纪中晚期及其末期的生物大灭绝事件。实际上，地球内部有足够的热量产生大火成岩省岩浆形成所需要的热量，只不过需要在银河系-太阳系-地球系统处于最强作用周期时才能诱发岩石圈的破裂及大火成岩省及其各种地质现象的发生。

本书是对上述项目研究成果的系统总结，是项目组全体成员集体劳动的成果。各章具体分工如下：刘建民、张照伟执笔前言，刘建民、赵越、杜星星、陈柏林、杨振宇、刘晓春执笔第一章、第二章、第三章和第五章部分章节；张照伟、李文渊等执笔第四章；李金宝执笔第五章部分章节；图件由尤敏鑫、韩梅梅、郭初笄、乔子江等清绘。参加野外地质调查工作的中方人员有刘建民、杨振宇、赵越、李金宝、董法先、陈柏林、杜星星、韩淑琴、刘晓春、徐刚、张照伟、尤敏鑫、韩梅梅、陈才杰 (四川冶金 601 地质大队) 等；俄方人员有 Evgeny Arkadievich Kiselev, Sergeev Sergey Andreevich, Masaytis Viktor Liudvigovich, Prasolov Eduard Mikhailovich, Khalenev Vladimir Olegovich, Paderin Petr Grigorievich, Chepkasova Tatiana Veniaminovna, Ekhanin Alexandr Georgievich, Radko Viktor Alexandrovich。

本书是中国地质调查局和科技部组织实施的中国-俄罗斯地质科技合作项目 (2011~2016 年) 的系列成果之一。其中，中国地质调查局设置的项目编号分别为科〔2011〕01-55-03、科〔2012〕02-51-003、科〔2013〕01-50-002 和科〔2014〕04-017-002。科技部国际合作与交

流项目编号为 2014DFR21270。项目的顺利实施，得益于中俄双方领导高度重视，尤其是全俄地质研究所彼得罗夫所长和中国地质科学院董树文副院长一直亲切关心并给予全方位指导，为双方互派野外地质考察代表团开展野外地质调查创造条件。为接待中方考察诺里尔斯克镍矿，全俄地质研究所与诺里尔斯克镍矿集团动员多方力量，由下属的诺里尔斯克地质公司和诺里尔斯克矿山管理局原料基地勘探评价部具体组织安排野外和矿山考察。对野外路线地质、岩心观察、井下考察等进行了专业、精心细致的准备，并全程陪同中方考察团，对典型地质现象，尤其是成矿作用特点进行细致的介绍；同样，中国四川攀枝花钢铁集团相关领导和专家也对中俄专家组的攀枝花铁矿野外考察给予了大力支持。

中方所有的外事联系均是在中国地质科学院国际合作处领导及同事们的鼎力协助下完成的。同时，地质力学所的领导也高度重视，对外事出访中的安全及专业考察给予指导。

项目实施过程中，始终得到科技部、中国地质调查局、中国地质科学院、地质力学研究所、攀枝花钢铁集团、四川冶金 601 地质大队等单位大力支持。在此，谨向所有给予本项目关心支持的领导和同事们表示衷心感谢。

本书作者感谢地质出版社责任编辑蔡卫东编审为本书顺利出版所给予的大力支持和付出的辛勤工作。

作者

2017 年 8 月

# 目 录

## 前 言

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第一章 当代大火成岩省研究进展 .....             | 1  |
| 第一节 大火成岩省的组成和类型 .....             | 1  |
| 一、镁铁质大火成岩省 .....                  | 1  |
| 二、长英质大火成岩省 .....                  | 5  |
| 第二节 大火成岩省形成的源区和构造背景 .....         | 7  |
| 第三节 大火成岩省形成的地幔动力学 .....           | 8  |
| 第四节 大火成岩省与成矿 .....                | 11 |
| 一、与镁铁质大火成岩省有关的成矿作用 .....          | 11 |
| 二、与长英质大火成岩省有关的成矿作用 .....          | 13 |
| 第二章 峨眉山大火成岩省及其成矿背景 .....          | 15 |
| 第一节 大地构造及区域构造演化史 .....            | 15 |
| 一、深部地球物理特征与地壳和岩石圈结构 .....         | 15 |
| 二、区域构造演化阶段 .....                  | 19 |
| 三、主要断裂构造特征 .....                  | 21 |
| 四、岩浆活动 .....                      | 21 |
| 第二节 峨眉山玄武岩 .....                  | 22 |
| 一、时空分布及地质概况 .....                 | 22 |
| 二、峨眉山玄武岩喷发时限 .....                | 24 |
| 三、古地磁长期变化对峨眉山大火山岩省喷发持续时间的限制 ..... | 25 |
| 四、岩相学特征 .....                     | 35 |
| 五、岩石化学及地球化学研究 .....               | 36 |
| 六、成因讨论 .....                      | 40 |
| 第三节 基性-超基性岩体地质及含矿特征 .....         | 42 |
| 一、侵入岩的年代学特征 .....                 | 42 |
| 二、主要基性超基性岩体的地质及矿化特征 .....         | 45 |
| 三、基性超基性岩体的岩石化学及地球化学特征 .....       | 61 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 四、两种系列基性超基性岩体的成矿作用的区别与联系 .....  | 70  |
| 第四节 杨柳坪镍矿成矿时代与西南地区铜镍矿找矿方向 ..... | 71  |
| 第三章 西伯利亚大火成岩省及成矿作用 .....        | 75  |
| 第一节 大地构造背景及区域构造演化历史 .....       | 76  |
| 一、西伯利亚地台深部结构特征 .....            | 76  |
| 二、西伯利亚地台的构造演化阶段 .....           | 77  |
| 三、构造特点 .....                    | 81  |
| 四、岩浆活动 .....                    | 82  |
| 第二节 西伯利亚暗色熔岩 .....              | 82  |
| 一、概述 .....                      | 82  |
| 二、西伯利亚诺里尔斯克地区火山岩的岩石地层学特征 .....  | 85  |
| 三、西伯利亚暗色岩的同位素定年 .....           | 90  |
| 四、西伯利亚板块古地磁资料 .....             | 91  |
| 五、西伯利亚暗色岩熔岩的地球化学 .....          | 93  |
| 六、西伯利亚暗色岩熔岩的岩石学成因解释 .....       | 104 |
| 七、结论 .....                      | 110 |
| 第三节 诺里尔斯克矿集区侵入岩 .....           | 111 |
| 一、侵入体类型及其地质特征 .....             | 111 |
| 二、诺里尔斯克型含矿侵入体地质特征 .....         | 117 |
| 三、诺里尔斯克型含矿侵入体的岩石学特征 .....       | 120 |
| 四、诺里尔斯克型含矿侵入体的岩石化学及地球化学特征 ..... | 128 |
| 第四节 诺里尔斯克矿集区矿床地质地球化学特征 .....    | 135 |
| 一、概述 .....                      | 135 |
| 二、主要矿床地质特征 .....                | 139 |
| 三、矿石矿物成分及结构构造 .....             | 151 |
| 四、矿床地球化学特征 .....                | 153 |
| 五、诺里尔斯克矿区模式总结 .....             | 164 |
| 第四章 塔里木大火成岩省及其成矿作用 .....        | 167 |
| 第一节 区域地质背景及构造演化特征 .....         | 167 |
| 第二节 塔里木大火成岩省的组成和类型 .....        | 168 |
| 一、主要岩石类型及其分布范围 .....            | 168 |
| 二、火成岩岩相学特征 .....                | 169 |
| 三、矿物晶体化学特征 .....                | 172 |

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| 四、塔里木大火成岩省形成时限研究及分布范围重新厘定                  | 174 |
| 第三节 塔里木大火成岩省的时空发育特征                        | 175 |
| 一、空间分布特征                                   | 175 |
| 二、时间序列                                     | 175 |
| 第四节 塔里木大火成岩省的岩石地球化学特征                      | 178 |
| 一、超基性岩类地球化学特征                              | 178 |
| 二、基性岩类                                     | 181 |
| 第五节 塔里木大火成岩省的岩浆作用过程                        | 184 |
| 一、蚀变作用                                     | 184 |
| 二、同化混染                                     | 186 |
| 三、原生岩浆                                     | 187 |
| 四、岩浆源区性质                                   | 187 |
| 第六节 塔里木大火成岩省的地幔动力学机制                       | 188 |
| 第七节 成岩成矿作用关系研究                             | 189 |
| 一、与塔里木大火成岩省有关的钒钛磁铁矿床                       | 189 |
| 二、与塔里木大火成岩省有关的铜镍矿床                         | 190 |
| 第五章 峨眉山、塔里木与西伯利亚二叠纪大火成岩省的构造动力学、成矿及<br>环境响应 | 197 |
| 第一节 三大火成岩省的共性和差异性                          | 197 |
| 第二节 二叠纪大火成岩省的构造环境及动力学                      | 203 |
| 一、晚古生代全球玄武岩溢流的天文因素                         | 205 |
| 二、三大玄武岩省时空关系恢复及其演化模式                       | 209 |
| 三、三大玄武岩省共性地质特征及其形成机理                       | 218 |
| 第三节 二叠纪大火成岩省的成矿响应及形成机制                     | 224 |
| 一、控制大火成岩省矿产类型分布规律的因素                       | 224 |
| 二、岩浆型钒钛磁铁矿和铜镍硫化物矿床的成矿机制                    | 230 |
| 第四节 二叠纪大火成岩省的环境响应（生物大灭绝）                   | 231 |
| 一、大火成岩省与生物大灭绝关系的研究现状                       | 231 |
| 二、生物灭绝与地球内部化学韵律圈层的相关性                      | 235 |
| 参考文献                                       | 238 |

# 第一章 当代大火成岩省研究进展

## 第一节 大火成岩省的组成和类型

根据组成大火成岩省的岩浆类型和岩石成分不同,一般将大火成岩省可分为两类,一是以基性火成岩为主的镁铁质大火成岩省,二是以酸性火成岩为主的长英质大火成岩省(王德滋,2005)。

### 一、镁铁质大火成岩省

镁铁质大火成岩省是指规模巨大、主要由镁铁质喷出岩和侵入岩组成的岩浆岩区(Campbell and Griffiths, 1990)。它们具有以下重要特征:①由面积广瀚的基性熔岩流组成(在一些地区具有双峰式分布特征),覆盖面积通常超过100万 $\text{km}^2$ ,最大厚度可达5 km。一些地区的剖面长达数十至上百千米。基性侵入岩通常为层状辉长岩类和岩墙群;②玄武岩浆喷发之前,地壳通常发生隆升。垂直幅度1 km的隆升区基本与玄武岩覆盖范围相当;③大陆区的镁铁质大火成岩省即大陆溢流玄武岩(Continental Flood Basalts, CFB)的同位素组成变化范围很大,由洋岛玄武岩到接近古老地壳。镁铁质大火成岩省的形成构造环境包括大陆内部(如德干高原、西伯利亚和峨眉山溢流玄武岩等)、被动火山边缘(如大西洋挪威海附近的Vøring Plateau玄武岩省)、洋脊高地(如太平洋西南部、所罗门群岛北部的Ontong Java Plateau玄武岩省)、大洋盆地(如加勒比海溢流玄武岩)以及火山岛链(如夏威夷-皇帝海链)等。

表1-1列出了全球主要的镁铁质大火成岩省形成时代和空间分布。图1-1显示了全球大火成岩省分布情况。

表 1-1 全球主要的镁铁质大火成岩省的时代和空间分布

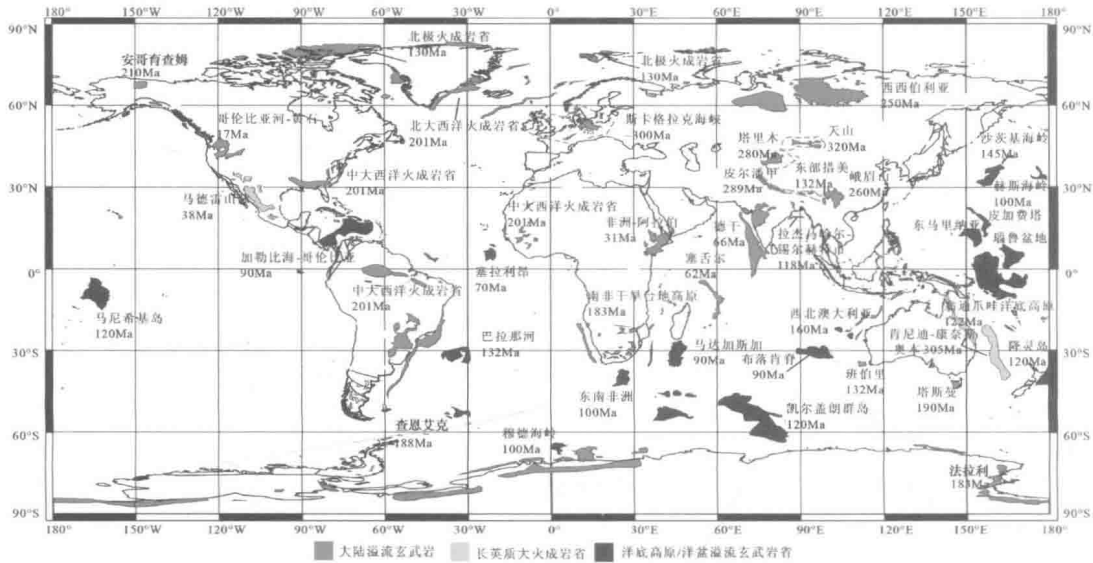
| 大火成岩省     | 形成时间/Ma           | 地层边界时代/Ma                                 | 喷发期间/Ma  | 体积/ $10^6 \text{ km}^3$ | 分布地域   |
|-----------|-------------------|-------------------------------------------|----------|-------------------------|--------|
| 哥伦比亚河     | 16±1              | 早/中中新世, 16.4                              | ~1 (90%) | 0.25                    | 美国西部   |
| 埃塞俄比亚     | 31±1, 37±1        | 早/晚更新世, 30                                | ~1       | ~1.0                    | 埃塞俄比亚  |
| 北大西洋      | 57±60.5           | 古新世/始新世, 54.8 (57.9)                      | ~1       | >1.0                    | 北大西洋   |
| 环地中海      | 60~70             | 新生代, 60~70                                | ?        | ?                       | 环地中海   |
| 德干        | 66±1              | 白垩纪/古近纪, 65.0±0.1                         | ~1       | >2.0                    | 印度     |
| 马达加斯加     | 88±1, 94±1        | 森若曼期/土仑期 ( $K_1/K_2$ ), 93.5±0.2 (89±0.5) | ~6?      | ?                       | 马达加斯加南 |
| Kerguelen | 110, 85~95, 38~82 |                                           | >10      | ~3                      | 西南印度洋  |



续表

| 大火成岩省           | 形成时间/Ma                    | 地层边界时代/Ma                               | 喷发期间 /Ma | 体积/ $10^6 \text{ km}^3$ | 分布地域 |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------------------|----------|-------------------------|------|
| Rajmahal        | 116~118                    | 阿普特期/阿尔布期 ( $K_1$ ), 112.2 $\pm$ 1.1    | ~2       | ~2.5                    | 印度东部 |
| Ontong Java     | 120~124, 90                | 早/中白垩世                                  | 4        | ~5                      | 西太平洋 |
| Parana-Etendeka | 132 $\pm$ 1                | 侏罗纪/白垩纪, 142 $\pm$ 2.6 (132 $\pm$ 1.9)  | ~1 或 ~5? | >1.0                    | 巴西   |
| 南极洲             | 176 $\pm$ 1, 183 $\pm$ 1   | 阿连期/马柔期, ( $J_1/J_2$ ), (176.5 $\pm$ 4) | ~1?      | >0.5                    | 南极   |
| 开罗              | 183.1 $\pm$ 1, 190 $\pm$ 3 | 早/中侏罗世, 180.1 $\pm$ 4                   | 0.5~1    | >2.0                    | 南非   |
| Newark          | 201 $\pm$ 1                | 三叠纪/侏罗纪, 205.7 $\pm$ 4                  | ~0.6     | >1.0?                   | 北美洲东 |
| 西伯利亚            | 253.4~250.2~236            | 二叠纪/三叠纪, 248.2 $\pm$ 4.8                | ~2       | >2.0                    | 西伯利亚 |
| 峨眉山             | 260                        | 中/晚二叠世, 260.4 $\pm$ 0.4                 | <3       | ~0.5                    | 中国西南 |
| Antrim          | 513 $\pm$ 12, 508 $\pm$ 2  | 寒武纪/奥陶纪                                 |          |                         | 澳大利亚 |
| Bangemall       | 1 070                      | 中元古代/新元古代, 1050                         | ?        | ~0.25                   | 澳大利亚 |
| Keweenaw        | 1 109~1 087                | 中元古代/新元古代, 1050                         | 2~22     | ~0.42                   | 美国北部 |

(据 Condie, 2001, 有补充)



数据来源: Bryan and Ferrari, 2013. Large igneous provinces and silicic large igneous provinces: Progress in our understanding over the last 25 years. Geological Society of America Bulletin, doi:10.1130/B308210.1  
投影方式: 等距圆柱投影; 中央经线: 0°

图 1-1 全球大火成岩省分布图  
(据李江海等, 2014)

1. 大陆溢流玄武岩

全球大陆溢流玄武岩分布状况如图 1-1 所示, 它们的基本特征如分布面积、形成时代和岩石组合等已被众多学者研究确认。

(1) 北美哥伦比亚河玄武岩省的体积 17.5 万  $\text{km}^3$ , 其中 85%以上是在 16.5~15.5 Ma 期间喷发, 构成了哥伦比亚河高原。该火成岩省主要由拉斑玄武岩组成, 含少量碱性玄武岩和玄武安山岩 (Chesley et al., 1998), 很多人认为与黄石热点有关。多数研究

者认为巨量的玄武岩浆来自不同的储源 (Hooper, 1997; Condie, 2001)。

(2) 西伯利亚暗色岩的玄武岩浆是在二叠纪—三叠纪间的 1 Ma 期间喷溢的。该玄武岩省面积为 400 万  $\text{km}^2$ , 平均厚度为 1 km。一个重要特征是含有大量基性火山碎屑岩, 在某些盆地中玄武质凝灰岩与角砾岩的最大厚度达 700 m, 有的地方火山碎屑岩的量超过熔岩。从化学成分看, 主要为拉斑玄武岩、碱性玄武岩、苦橄岩和玄武安山岩, 且伴有少量 A 型花岗岩 (Lightfoot et al., 1993)。西伯利亚暗色岩的形成与二叠纪末期的生物绝灭有关 (Condie, 2001)。

(3) 印度中西部德干高原溢流玄武岩喷发于 65 Ma 前 (白垩纪—古、新近纪) 的 1 Ma 期间, 当时位于 Réunion 热点之上。其体积为 820 万  $\text{km}^3$  (Chandrasekharam, 2003), 主要由拉斑玄武岩组成, 碱性玄武岩较少。其次有少量超镁铁质岩和碱性长英质岩。据认为白垩纪末生物大灭绝就与该期溢流玄武岩的喷发有关 (Condie, 2001)。

(4) 中国西南峨眉山玄武岩省是在 259~261.5 Ma 期间喷发的, 其体积为 30 万  $\text{km}^3$ , 岩石类型主要为拉斑玄武岩, 含少量苦橄岩、玄武安山岩、流纹岩和粗面岩 (Xu et al., 2001)。多篇文献研究成果认为, 中国峨眉山玄武岩的喷发是造成晚二叠世早期的大规模生物绝灭的重要因素 (Wignall et al., 2001)。

(5) 巴西南部的 Paraná 溢流玄武岩和非洲纳米比亚的 Etendeka 溢流玄武岩均认为是与南大西洋 Tristan 热点有关的巨大溢流玄武岩省的残留, 其面积分别为 120 万  $\text{km}^2$  和 8 万  $\text{km}^2$  (Peate, 1997)。其中拉斑玄武岩占 90%, 出现一些流纹岩、中性岩、碱性杂岩 (Garland et al., 1995) 和大岩墙群。Paraná-Etendeka 大火成岩省熔岩的喷发被认为与南大西洋在 150 Ma 前后裂开有关 (Hawkesworth et al., 1992; Condie, 2001)。

(6) 冈瓦纳大陆 (Gondwana) 侏罗纪时的裂解在非洲和南极留下的溢流玄武岩构成了 Karoo-Ferrar 大火成岩省 (Hergt et al., 1991)。南非 Karoo 省溢流玄武岩的范围达 300 万  $\text{km}^2$ , 熔岩以拉斑玄武岩为主, 有一定量的苦橄岩、流纹岩、霞石岩, 并伴有辉绿岩、辉长岩、花岗岩、正长岩和碱性岩岩墙。玄武岩浆分别在 195 Ma 和 180~177 Ma 喷发。南极洲的 Ferrar 省主要由基性岩流、岩墙和岩床构成, 体积超过 100 万  $\text{km}^3$ 。分别在 193 Ma 和 180~170 Ma 期间喷发 (Condie, 2001)。

(7) 非洲东北部 Ethiopian (埃塞俄比亚) 和 East African 高原是非洲最大的古、新近纪大火成岩省。玄武岩的体积达 100 万  $\text{km}^3$ 。熔岩主要是拉斑玄武岩及部分碱性玄武岩, 高原上覆盖的主要是 30~15 Ma 的呈盾形火山出现的碱性玄武岩。它们的喷发被认为与埃塞俄比亚的 Afar 地幔柱及肯尼亚地幔柱有关 (Rogers et al., 2000; Condie, 2001)。

## 2. 被动陆缘火山岩

LIPs 广泛分布在陆壳和洋壳, 位于现在或古老的板块边缘或大陆边缘。由于在大陆裂谷期间软流圈上隆, 位于大陆裂谷边缘的火山被动边缘发生广泛的岩浆作用, 伴随着岩浆的侵入和喷发。“北大西洋火成岩”是典型的被动陆缘大火成岩省。西边从加拿大开始, 向东南过格陵兰、冰岛直到裂谷化的欧洲西北大陆边缘。水下、路上的火山-侵入岩的体积达 660 万  $\text{km}^3$  (Eldholm et al., 1994), 其形成被认为与现今仍在活动的冰岛热点有关 (Fitton et al., 2000)。在 61~58 Ma 期间喷发形成巨大体积的玄武岩、苦橄岩, 并使当时的格陵兰从欧洲西北缘分离出去。其后有 Skaergaard 等巨大层状侵入

体定位。冰岛是北大西洋火成岩省中最大的火山岩露头,其中 90%是拉斑玄武岩,并有少量中性岩和酸性岩。火山岩浆来自冰岛地幔柱(Condie, 2001)。

### 3. 大洋高原玄武岩

现已研究确定的大洋高原玄武岩有 Caribbean, Ontong Java 和 Kerguelen 等。

(1) Caribbean 大洋高原熔岩(92~74 Ma)面积约 300 万  $\text{km}^2$ ,但熔岩的微量元素、不相容元素及 Nd-Pb 同位素的初始成分相当均一。熔岩的同位素及微量元素的富集特性表明,地幔柱头在短的时间内把留在下地幔的再循环大洋岩石圈带回到浅部亏损的洋中脊玄武岩(Mid Ocean Ridge Basalt, MORB)地幔源(Hauff et al., 2000)。

(2) 西太平洋所罗门岛(Solomon Island)东北的 Ontong Java 大洋高原是世界上最大的大洋高原之一,面积 186 万  $\text{km}^2$ (Neal et al., 1997),主要岩石为具枕状构造的拉斑玄武岩及其岩墙、岩床。大部分玄武岩是在 122 Ma 喷发的。Ontong Java 地幔柱头位于扩张的洋脊附近,因而 Ontong Java 熔岩的地球化学及同位素特征可用地幔柱-洋脊的相互作用来解释(Gladchenko et al., 1997; Condie, 2001)。

(3) 南印度洋 Kerguelen 大洋高原省也被认为是 Kerguelen 地幔柱活动的产物。玄武岩浆主要在 114~110 Ma 期间喷发,喷发速率为  $3.5 \text{ km}^3/\text{a}$ 。拉斑玄武岩占 85%以上,玄武岩中发现“石榴子石-黑云母片麻岩”的陆壳碎屑,火山作用以富挥发分的硅质岩浆的爆发结束。地球化学、地球物理资料证明,该大火成岩省中含有大陆岩石圈组分,可能代表 Gondwana 古陆裂解、印度洋形成之初有“大陆碎片”或“循环的地壳”进入 Kerguelen 地幔柱(Frey et al., 2000)。

### 4. 大岩墙群

“大岩墙群”由成因上有联系的岩墙构成,许多放射状岩墙群是大火成岩省中溢流玄武岩剥蚀的残留。分布面积可达数十万平方千米,单个岩墙延伸 1000 km,根据地球物理资料推测,许多岩墙甚至可延伸 2000 km 以上。大多数大岩墙群的成因被认为与地幔柱有关。中大西洋岩浆省(The Central Atlantic Magma Province, CAMP)是一典型实例,在这个火成岩省中,地幔柱头(Fernando 地幔柱)接近 Pangea 泛大陆 200 Ma 裂开前南美、北美与非洲的三联点(Ernst et al., 1997),岩墙侵入处可以距地幔柱头 2800 km,岩墙分布面积超过 700 万  $\text{km}^2$ ,伴生的溢流玄武岩较少(图 1-2)。三大洲的岩墙群的方向各异,其会聚点即为超级地幔柱的位置。另一个有名的大岩墙群是加拿大北部 1267 Ma 时定位的 Mackenzie 岩墙群,覆盖面积 270 万  $\text{km}^2$ ,岩墙距地幔柱头达 2600 km。在岩墙群交会处,出现同源的溢流玄武岩和大的层状侵入杂岩(LeCheminant et al., 1991; Condie, 2001)。

### 5. 大层状侵入体

大层状侵入体也被认为是地幔柱岩浆作用的重要产物,有的大层状侵入体与溢流玄武岩和大岩墙群伴生。南非的 Bushveld 层状杂岩是世界上最大的层状侵入体之一。在 2060 Ma 时侵入到稳定的克拉通内,是与溢流玄武岩相当的侵入岩。Bushveld 层状杂岩可分为下部带、临界带、主要带和上部带等 4 个带。下部带由辉石岩、方辉橄榄岩和纯橄榄岩组成。临界带的下部为层状辉石岩夹铬铁矿条带,上部为铬铁矿、辉石岩、苏长岩和斜长岩构成的韵律层。主要带由辉长苏长岩、斜长岩和苏长岩构成。上