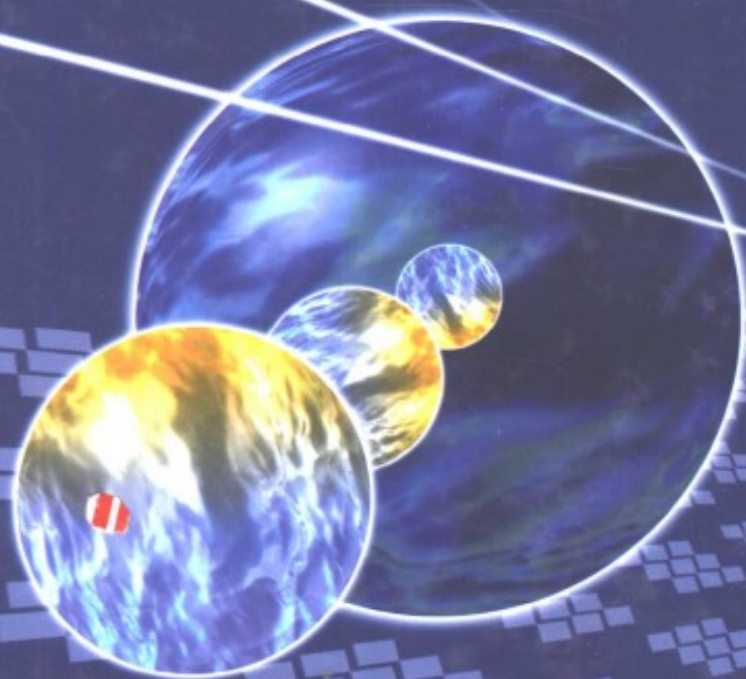


◆ 郑永飞 主编

化学地球动力学

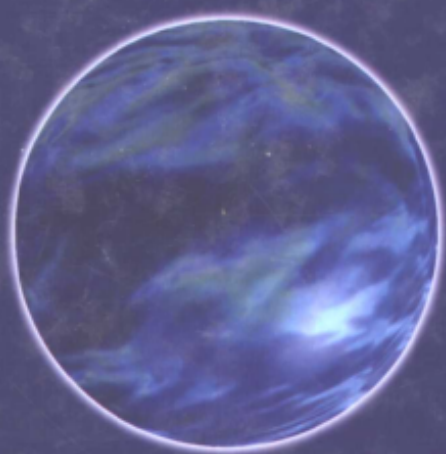


科学出版社

(P-1126.1101)

责任编辑: 谢洪源 章雨旭

封面设计: 王 浩



ISBN 7-03-007431-9



9 787030 074317 >

ISBN 7-03-007431-9/P · 1126

定价: 60.00 元



中国科学院科学出版基金资助出版

化学地球动力学

郑永飞 主编

国家自然科学基金委员会资助出版

科学出版社

1999

内 容 简 介

本书为一本系统反映化学地球动力学这一固体地球科学方面新兴边缘学科研究原理、方法、成果和进展的专著,它着重从地球动力学角度介绍和论述近代地球化学发展的一些重要领域,并努力反映我国在这些领域的若干成果。全书共 14 章,主要内容包括:①地幔地球化学与岩石圈演化,②地球的块体化学不均一性,③大陆地壳的结构、组成和演化,④花岗岩同位素体系与陆壳演化,⑤板块俯冲化学地球动力学以及热年代学。

本书是固体地球科学研究和教学的重要参考资料,是高等院校、科研院所研究人员、教师、研究生等的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化学地球动力学/郑永飞主编. -北京:科学出版社,1999.5

ISBN 7-03-007431-9

I. 化… II. 郑… III. 地球动力学:化学动力学 N. P59

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 07263 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1999 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1999 年 5 月第一次印刷 印张: 25

印数: 1—1 600 字数: 581 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序 言

元素和同位素的精确定量分析结果能够用来认识全球尺度的大地构造演化,同位素示踪和定年技术为研究板块运动与地球动力学演化规律提供了强有力的武器,这是人类通过分析物质微观性质来认识宏观世界的成功范例。应用地球化学方法示踪地幔和地壳的形成过程和演化历史,探索固体地球的化学结构与层圈之间的相互作用,是国际上化学地球动力学(Chemical Geodynamics)研究的前沿。为了总结和交流国内、外在该领域的研究成果,促进我国化学地球动力学研究的发展,我们于1995年12月在中国科学技术大学成功地召开了首次“化学地球动力学高级研讨会”。与会者一致认为,化学地球动力学作为地球化学与地球动力学相结合的一个边缘学科,虽然正式问世迄今仅约20年,但已成为地球化学前沿最活跃、最具生命力的研究领域。化学地球动力学研究的一系列成果使地球科学家认识到,地球化学不仅仅是一种“手段”,而且是地球科学的一个独立且很有前景的二级学科。化学地球动力学研究不仅仅着眼于地质现象,更重要的是“透过现象看本质”。

我国地球化学界在化学地球动力学这一领域已经开展了大量工作,有丰富的成果积累。这门学科已成为固体地球科学研究和教学中不可缺少的一部分。虽然国内、外在这一学科的不同领域曾出版过若干专著和教科书,但至今尚未出版过全面总结已有化学地球动力学研究成果及其有关原理、研究方法和进展的专著。有鉴于此,我们在1995年“化学地球动力学高级研讨会”专题报告的基础上,特邀国内长期在化学地球动力学各领域从事科学研究的专家,编著了这本《化学地球动力学》。在内容选择和编著过程中突出的是“新”,在“新”的基础上求全。全书各章节的设置均考虑了国内、外在这一学科不同领域的研究进展,虽然各章自成体系,但又保持了全书的系统性。

各章的撰写人如下:第一章,郑永飞;第二章,周新华;第三章,朱炳泉;第四章,支霞臣;第五章,郑永飞;第六章,徐义刚;第七章,高山、刘勇胜;第八章,赵凤清;第九章,吴福元;第十章,陈江峰、江博明;第十一章,李献华;第十二章,沈渭洲、徐士进;第十三章,李曙光;第十四章,陈文奇、李齐。为了确保本书的高水平和权威性,我们对每章均约请国内两位同行专家予以评审,对作者修改和完善有关内容起到了重要的作用。

由于本书各章节涉及的内容特点不同,国内外在化学地球动力学各亚领域的研究程度和资料积累的多少也不同,再加上撰稿专家认识上的差别,因此存在内容深浅程度不一、侧重不同、写作方式不同和联系欠紧凑等缺点。书中的少数提法和观点也有待于进一步推敲。从化学地球动力学体系来说,还有一些内容本书未能涉猎,例如汇聚板块边缘的岩浆作用、扩散理论与变质岩 P - T - t 轨迹确定、稀有气体同位素地球化学等,希望在本书再版时予以补上。

本书的出版得到中国科学院科学出版基金和国家自然科学基金委员会联合资助,中国科学技术大学化学地球动力学研究实验室的同仁们和中国地质科学院章雨旭研究员等对本书的编辑出版给予了大力协助,在此表示感谢。

郑永飞

1998. 7. 1.

• i •

作者所在单位和通讯地址

郑永飞	中国科学技术大学地球和空间科学系	合肥金寨路	230026
周新华	中国科学院地质研究所	北京德胜门外	100029
朱炳泉	中国科学院广州地球化学研究所	广州五山	510640
支霞臣	中国科学技术大学地球和空间科学系	合肥金寨路	230026
徐义刚	中国科学院广州地球化学研究所	广州五山	510640
高山	中国地质大学地球科学学院	武汉武昌喻家山	430074
赵风清	中国地质科学院天津地质矿产研究所	天津河东区	300170
吴福元	长春科技大学地球科学学院	长春西民主大街	130061
陈江峰	中国科学技术大学地球和空间科学系	合肥金寨路	230026
李献华	中国科学院广州地球化学研究所	广州五山	510640
沈渭洲	南京大学地球科学系	南京汉口路	210093
李曙光	中国科学技术大学地球和空间科学系	合肥金寨路	230026
陈文寄	中国地震局地质研究所	北京德胜门外	100029

目 录

序 言	郑永飞(i)
主要作者所在单位和通讯地址	(ii)
第一章 化学地球动力学:从同位素到板块构造	郑永飞(1)
一、主要研究内容和特点	(1)
二、主要研究进展	(3)
三、地球动力学循环	(8)
四、铍同位素示踪板块俯冲	(10)
五、结语	(12)
第二章 壳—幔深部过程化学地球动力学与大陆岩石圈研究	周新华(15)
一、固体地球科学发展历史的回顾	(15)
二、深部壳—幔过程的研究对象	(17)
三、深部壳—幔过程的地球化学制约	(19)
四、地幔柱与岩石圈演化	(22)
五、壳—幔过程动力学研究的新方向:由壳论幔	(25)
六、结语	(27)
第三章 地球的块体化学不均一性与地球动力学	朱炳泉(30)
一、不同块体化学不均一性的地球化学证据	(30)
二、地球化学边界及其与构造边界及地球物理场的关系	(37)
三、地球化学边界对超大型资源分布的制约	(42)
四、地球化学边界形成的地球动力学模式	(42)
第四章 Re-Os 同位素体系及其在地幔化学地球动力学中的应用	支霞臣(46)
一、Re-Os 同位素体系的基本特点	(46)
二、地幔钨同位素组成的演化	(48)
三、Re-Os 同位素体系和大陆岩石圈地幔定年	(52)
四、Re-Os 同位素体系在其他方面的应用	(57)
第五章 地幔稳定同位素地球化学	郑永飞(62)
一、氧同位素	(63)
二、氢同位素	(85)
三、硫同位素	(91)
四、碳同位素	(97)
第六章 拉张环境中的大陆玄武岩浆作用:性质及动力学过程	徐义刚(119)
一、基本认识	(120)

二、大陆玄武岩的岩石学和地球化学特征	(132)
三、大陆玄武岩浆的成因模式和一些关键问题	(137)
四、大陆拉张区岩浆作用的动力学意义	(145)
五、中国华北地区岩浆作用的时空演化和动力学	(152)
六、主要结论、存在问题和今后研究方向	(159)
第七章 大陆地壳深部结构与组成	高山 刘勇胜(168)
一、研究方法	(169)
二、大陆地壳的结构	(178)
三、深部地壳的组成	(180)
四、深部地壳的化学成分	(185)
五、拆沉作用与大陆地壳成分的演化	(195)
第八章 大陆深部地壳结构的研究与化学地球动力学的应用	赵凤清(202)
一、大陆深部地壳结构和性质研究进展	(203)
二、大陆深部地壳结构和性质的研究方法	(210)
三、化学地球动力学在研究深部地壳结构和性质方面的应用	(216)
四、结语	(219)
第九章 大陆地壳的形成时间及增生机制	吴福元(224)
一、大陆地壳的基本特征及其化学成分	(224)
二、陆壳形成时间及增生机制研究的地球化学方法	(228)
三、大陆地壳的形成时间	(233)
四、大陆地壳的增生机制	(238)
五、中国大陆地壳的形成时间	(247)
六、结语	(249)
第十章 铍、锶、铅同位素示踪和中国东南大陆地壳演化	陈江峰 江博明(262)
一、地壳演化的同位素体系示踪	(262)
二、中国东南的铍同位素地壳省和陆壳增生	(270)
三、中国东南地壳演化的铍和铅同位素联合示踪	(278)
四、结语	(283)
第十一章 元古宙地壳增长和演化的地球化学制约——以华南为例	李献华(288)
一、元古宙超级大陆	(288)
二、元古宙蛇绿岩	(290)
三、元古宙地壳演化	(290)
四、华南元古宙基底时代	(291)
五、新元古代晋宁期碰撞造山运动	(295)
六、华南新元古代构造演化及其在 Rodinia 超级大陆重建中的意义	(309)
第十二章 扬子板块周边晋宁期花岗岩类的同位素地球化学特征	
..... 沈渭洲 徐士进	(317)
一、花岗岩类的 Nd-Sr 同位素示踪	(317)
二、前寒武纪花岗岩类研究概况	(319)

三、格林维尔期造山带花岗岩类	(320)
四、扬子板块周边晋宁期造山带	(322)
五、晋宁期造山带花岗岩类的同位素特征	(323)
六、结语	(330)
第十三章 大陆俯冲化学地球动力学	李曙光(334)
一、陆壳俯冲事件年代学	(335)
二、超高压岩石冷却史及折返机制的研究	(338)
三、深陆壳俯冲发生的构造环境	(342)
四、俯冲陆壳与上地幔的相互作用	(348)
五、俯冲陆壳物质的再循环	(352)
六、结语	(353)
第十四章 碱性长石中氩的多重扩散域(MDD)模式与构造非平稳运动	陈文寄 李 齐(358)
一、碱性长石中氩的多重扩散域(MDD)模式	(358)
二、几个实例研究	(370)
三、MDD 模式对构造非平稳运动的定量制约	(386)
四、问题和展望	(388)

第一章 化学地球动力学:从同位素到板块构造

郑永飞

应用地球化学方法研究地球的结构和演化,特别是利用岩石和矿物中同位素(包括稳定和放射成因同位素)和微量元素(包括稀土元素)组成变化特征,示踪地壳和地幔的形成和演化规律,已经有了几十年的历史(Gast, 1960; Zindler and Hart, 1986; Allegre, 1987; Hofmann, 1997)。地幔化学端元的识别及其不均一性的发现是这一领域的重要研究成果之一(Gast et al., 1964; Tatsumoto, 1966; Hart, 1988)。70年代末,玄武岩中钕同位素组成的准确测定,使地幔地球化学研究发生了革命性的飞跃(DePaolo and Wasserburg, 1976; O'Nions et al., 1977)。应用板块构造理论研究地壳物质再循环和地幔的化学结构,确定地幔对流形式与玄武岩源区之间的关系,提高了人们对地幔化学组成及地球内部演化规律的认识。对大陆地壳成分和演化的地球化学研究表明,玄武质岩浆底侵和花岗岩熔体形成均对应于不同程度的壳—幔相互作用(Taylor and McLennan, 1995; Hofmann, 1988; Condie, 1989)。这些成果的积累促使化学地球动力学脱颖而出(Allegre, 1982; Zindler and Hart, 1986),成为当今世界固体地球科学研究的最前沿学科。

化学地球动力学是地球化学的一个年轻分支,虽然正式问世迄今仅约20年,但已成为地球化学前沿最活跃、最具生命力的学科领域。它在研究地球内部化学组成和演化时,把地球视为一个完整的动力学系统而不是将其组成部分作为彼此孤立的地质体(Hart and Zindler, 1986; Carlson, 1994; Poirier, 1994; Allegre et al., 1995; McDonough and Sun, 1995)。它通过研究地球各层圈内部的化学结构和过程以及不同层圈之间的化学相互作用,从本质上研究和认识发生在地球内部和外部的各种地质作用(图1.1)。它综合应用同位素地球化学、微量元素地球化学以及地球物理手段研究地壳、地幔和地核的化学组成及其相互作用过程,从物理和化学过程的本质上探讨地球及其各组成部分的起源和演化、相互作用以及它们对资源、环境和自然灾害的制约。

一、主要研究内容和特点

现代地球科学发展中学科交叉的趋势要求并刺激了地球化学的触角伸展到地球科学的各个领域。解决固体地球科学中存在的重大基础问题是促进化学地球动力学研究的主要原动力。地球科学的迅猛发展为化学地球动力学提供了立足于地球化学前沿的机会。

根据板块构造理论,地球的冷外壳(即岩石圈)分裂成若干彼此相对运动的板块,新的岩石圈板块在洋中脊产生,并随着时间和冷却程度增加而增厚。在板块汇聚处,即岛弧和造山带,老的大洋或大陆岩石圈又返回到地幔中去。同位素年龄测定为板块的这种运动模式提供了最重要的证据:在板块分离处的大洋中脊,通过深海钻探取样得到年龄为零(即

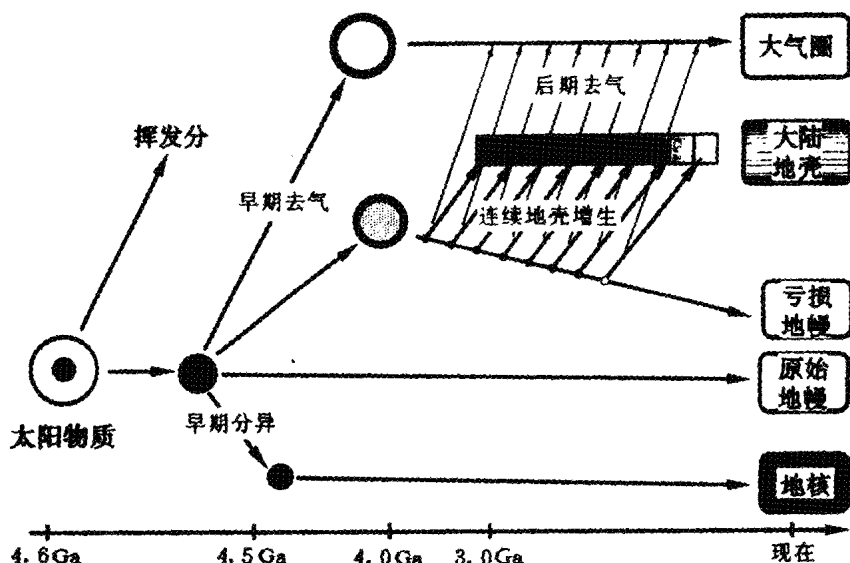


图 1.1 地球不同层圈演化示意图
(据 Allegre, 1987)

地球在形成之前发生去气作用, 导致地球亏损挥发分; 地球的早期分异作用形成大气圈和地核; 自 4.1Ga 以来大陆地壳不断形成

正在形成)的玄武岩;随着远离洋中脊,两边的岩石年龄逐渐变老,从而证明海底正在扩张。在板块汇聚处,即岛弧和大陆岩浆弧环境下形成的酸性火山岩、玄武岩和辉长岩中发现了来自地表沉积物的宇宙成因核素¹⁰Be 和碳质,证明地表沉积物在板块汇聚处向下俯冲并与炽热的地幔物质发生相互作用,或通过火山喷出地表,或作为深成岩侵入造山带。

通常,现代玄武岩和太古宙科马提岩的同位素和微量元素成分可示踪地幔的结构、成因和演化。现代海底玄武岩是由上地幔部分熔融形成,由于大陆地壳的提取导致了这些玄武岩显著亏损不相容元素。洋岛(例如夏威夷)玄武岩来自深部地幔,而其中含有海洋地壳组分,表明后者已通过板块俯冲和再循环进入地幔。科马提岩记录了太古宙地幔成分和熔融条件。

就现有的资料来看,化学地球动力学的研究主要集中在下列几个方面:

- (1) 研究地球原始地幔(地球的硅酸盐圈层)的化学和同位素特征,了解地核生长、地幔分异的时间和过程;
- (2) 描述形成洋岛玄武岩(OIB)源区特征的各种地球化学过程;
- (3) 确定洋中脊玄武岩(MORB)与洋岛玄武岩(OIB)不同的化学和同位素特征是否反映了与大陆地壳生长的补偿关系;
- (4) 研究地幔元素丰度及比值变化规律,以便理解与地壳形成相关的地幔分异过程;
- (5) 研究地壳物质是如何通过再循环过程返回地幔的,确定地壳再循环进入地幔的程度和机制及其对地幔化学和同位素演化的影响;
- (6) 确定俯冲岩石圈的命运是简单的再循环进入上地幔,还是有部分迁入下地幔;
- (7) 研究地幔是如何通过部分熔融作用形成地壳的,表征在不同构造背景下形成岩

浆的熔融和提取过程及元素的行为；

(8) 澄清在不同地幔储库之间的几何和动力学关系,评价与这些储库形成和演化的动力学过程；

(9) 探讨在大陆岩石圈及下伏对流地幔内化学和同位素不均一性的居留时间；

(10) 确定大陆地壳的年龄、增长速率和机理及其地壳成分和物理状态的影响,如大陆根的形成和破坏作用。

目前,化学地球动力学发展的主要特点是：

(1) 研究对象从地球单一层圈发展到不同层圈及其界面之间的相互作用,例如地幔地球化学和壳—幔相互作用研究；

(2) 研究手段从大区域范围的综合测定发展到单矿物颗粒内部的微区分析,例如离子探针、激光探针和等离子质谱分析方法的建立和应用；

(3) 研究范畴从三维空间向四维空间拓展,更加重视时间维的作用,并注重与其他学科的结合,例如对高级变质岩的 PTt 轨迹研究和地幔四维填图；

(4) 研究方法从静态的半定量描述转向动态的定量模拟,如各种地球化学模式研究；

(5) 不断开拓新的地球化学示踪方法,例如 Re-Os 和 W-Hf 同位素体系。

化学地球动力学的蓬勃发展使地球化学进入了学科交叉渗透的新时代,形成了一系列认识地球内部和外部各系统化学组成和演化过程的新增长点。

化学地球动力学在固体地球科学中的重要性主要体现在以下几个方面：

(1) 地球化学示踪体系是精确定量地球动力学研究的支柱,元素和同位素体系对自然演化规律和物质再循环的示踪是地球科学研究的重要组成部分；

(2) 地球科学是一门时间起着关键作用的历史性科学,同位素定年技术是使地球科学研究从三维空间向四维领域拓展的重要支撑体系；

(3) 化学地球动力学是一个高新技术含量较高的领域,地球科学的前沿研究已经同这些高新技术融为一体；

(4) 在时间—空间尺度上不断向微观深入,并且能够由此推演宏观过程,例如由矿物内部元素扩散分带动力学推导板块俯冲和折返速率等；

(5) 对地球内部不同层圈物理和化学结构的认识,是化学地球动力学研究的优势和特色,这必将促进对地球起源理论的革命。

同位素地球化学和化学地球动力学是世界上地球化学研究最活跃的领域,有举足轻重的影响。地幔地球化学和大陆岩石圈化学结构等一系列研究成果的不断涌现已向人们表明,地球化学不仅是一种“手段”,而且是地球科学的一个独立且具有诱人前景的学科分支；化学地球动力学研究不仅着眼于同位素地球化学的基础理论和地质应用,而且在对地质现象深入认识的基础上能够“透过现象看本质”。它以同位素和元素示踪方法为主要手段,结合基础地质工作认识地球各层圈内部及其相互作用的物理化学规律,因此有着极为广阔的前景。

二、主要研究进展

1 地幔的化学结构

根据对洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB)Sr-Nd-Pb 同位素相关性特征的研

究,已经鉴定出 4 个代表性的地幔化学组分端元(图 1.2)。

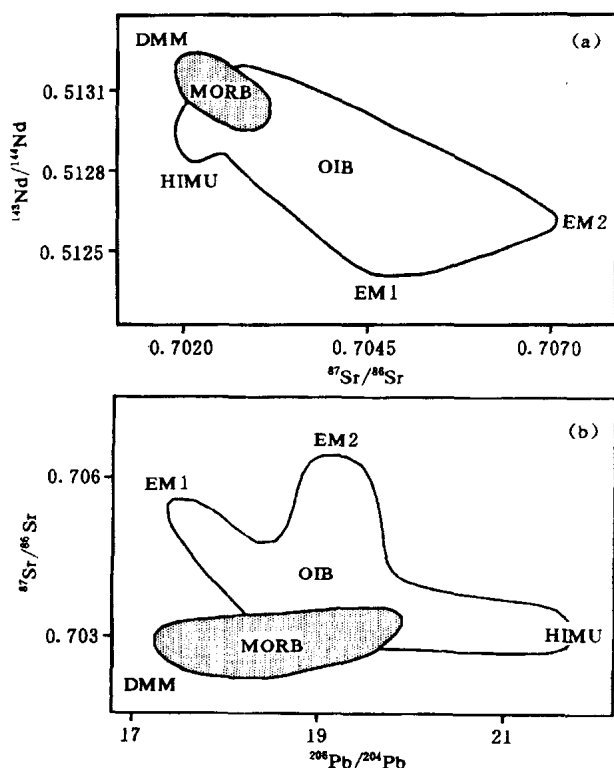


图 1.2 海洋玄武岩 Nd-Sr-Pb 同位素组成变化范围
DMM—亏损的洋中脊玄武岩地幔, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5134 \sim 0.5135$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7020 \sim 0.7024$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.0 \sim 17.8$ (a) 或 $15.5 \sim 16.3$ (b); HIMU—高 U/Pb 值地幔: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5128$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7026 \sim 0.7030$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 21 \sim 22$; EM1—I 型富集地幔: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5123 \sim 0.5124$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7054 \sim 0.7060$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.5 \sim 17.5$; EM2—II 型富集地幔: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5127 \sim 0.5129$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.707$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.5 \sim 19.5$

Hart(1988)认为,所有观察到的玄武岩,其 Sr、Nd、Pb 同位素组成都可能是这 4 种组分中的某 2 种或 3 种之间的混合产物。第 5 种可能的组分为常规地幔 (PREMA), 其 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值约为 0.5130, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值约为 0.7035, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值约为 18.3。这个组分可以存在,但其同位素组成恰好位于其他 4 种端元组分混合物的中心。因此,这个第 5 组分既可以是前 4 种组分的均一混合结果,也可以是一个原始地幔组分分异出其他 4 种组分。由于地幔柱可能提取了核—幔边界或地幔深部 660km 不连续界面位置的物质,对其起源深度的研究是近年来地幔地球化学研究的热点 (Hofmann, 1997)。

HIMU、EM1 和 EM2 组分是产生洋岛玄武岩的 3 个主要组分,它们代表了产生板内火山岩中极端同位素成分的端元。HIMU 组分的特征是非常高的放射成因铅同位素成分; EM1 则为相对非放射成因的 Sr、Nd 和 Pb 同位素成分; EM2 的钕同位素成分类似于 EM1,但具有较高的放射成因铈和铅同位素成分。这些组分可能不是相互独立的,而是物理上相关的。

联的。

就这些端元组分的成因来说,尚存在较大分歧。HIMU 组分可以由地幔交代作用产生,也可以是再循环的洋壳在俯冲期间或之前由于热液过程丢失了部分铅。EM1 是一个稍微变化的全球组分,可能起源于陆下岩石圈地幔。一种观点认为,无论 HIMU 还是 EM1 都不可能是再循环的洋壳或沉积物。另一种观点认为,EM1 和 EM2 可以代表相同的再循环洋壳与其一起俯冲的沉积物的混合物。EM2 可以同一个再循环(俯冲)的沉积物母岩相吻合,因此 EM2 易同其他组分混合形成显著的曲线形混合线。DMM 居留在最上部地幔,亏损大离子亲石元素(LILE)或者不相容元素,因此通常作为大陆地壳从地幔分异后均一化的残留物。

2 地幔的化学不均一性

根据幔源超基性岩和玄武岩的同位素研究,人们在 30 年前就认识到地幔在同位素组成上的不均一性。例如,洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩在 Sr、Pb、Nd 同位素组成上有显著差异,前者的源区较后者 Rb、U 和 Sm 等元素亏损较大。这种地幔同位素不均一性尺度可以从几厘米到几千千米大的规模;各种同位素比值间存在本质上相关性;不均一发育的年龄可达几十亿年的数量级。同位素可区分洋中脊或洋岛玄武岩的地幔。这些发现在研究地幔演化和动力学方面提供了基本的格架。

研究表明,Nd、Sr 和 Pb 同位素组成的全球分布不是无规则可循的。除极少数外,大多数富集地幔组分(EM)限制在赤道与南纬 50°S 之间的地带内,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值大于 0.705, Hart(1984)定义这个带为 Dupal 异常,铅同位素指标为 $\Delta(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) > +60$ 。一个强烈 Dupal 地幔区存在于中大西洋中脊与中印度洋之间,另一个存在于西太平洋与中太平洋之间,但它在南半球的太平洋中脊却是缺乏的。

大洋玄武岩的铅同位素组成一般落在地球等时线(geochron)的右边,要求 U/Pb 值在过去有显著增加。在洋中脊玄武岩中,铅同位素比值形成了一个线性趋势。这已经被解释为地幔等时线(约 1.7Ga)或在 HIMU 组分与 DMM 组分之间的混合线。这些解释意味着,这种特别的铅同位素组成是早期分异作用的结果。另一种解释认为,HIMU 源区是早期分异事件的残留物,而洋中脊玄武岩的铅同位素组成主要反映了最近产生的高 U/Pb 值源区与低 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值地幔的混合。换句话说,所谓的“地幔等时线”可以是在上地幔内连续分异和对流混合的产物,因此没有真实年龄意义,因为洋中脊玄武岩的分异年龄可能小于 1Ga。

地幔化学不均一性的起因主要有 3 种可能的途径:① 地幔部分熔融及岩浆析出;② 地幔交代作用;③ 地壳及岩石圈物质重新进入地幔对流。其中,前两种过程对地幔岩 Rb/Sr 值和 Sm/Nd 值的影响是一致的,使它们始终保持负相关关系,并在 Nd-Sr 同位素图上形成地幔排列(mantle array),而对地幔岩 U/Pb 值和 Th/Pb 值的影响不一致。在部分熔融过程中,U/Pb 值和 Rb/Sr 值呈正相关变化;在地幔交代过程中,U/Pb 值与 Rb/Sr 值呈负相关变化,从而使不同大洋玄武岩的锶、铅同位素组成表现出不同的相关性,而对整个大洋玄武岩则不显示出相关性。

目前,人们已着手模拟地幔化学不均一性、壳—幔演化和对流作用。对古太古代地幔亏损的模式也已经开始研究,全地幔相对于层状地幔的对流作用正在受到注意。根据特征性微量元素对比,Hofmann(1988)认为,今天洋中脊玄武岩源区的化学不均一性不是在大陆地壳提取期间产生的,而是由于在此之后残余地幔分异成为亏损的洋中脊玄武岩和富集的洋岛玄武岩。

3 地球的盒子模式

如果假定地球内部不同结构单元是相对均一的储库,这些储库就称为“盒子”。地壳与地幔之间的物质交换就可以用这种盒子模式进行模拟。70 年代以来,人们根据大陆地壳与上地幔之间不同的 Nd-Sr 同位素组成特征提出了“两盒子模式”(O'Nions et al., 1979; Jacobsen and Wasserburg, 1979),假定下地幔未受大陆分异的影响。目前,人们根据 Sr-

Nd 同位素对、 ^{206}Pb - ^{207}Pb - ^{208}Pb 同位素对和 Hf-Os 同位素对建立了“三盒子模式”(Allegre and Lewin, 1989)。它假定地幔-地壳体系是一个 3 储库体系: ① 地壳; ② 亏损地幔(相当于上地幔或洋中脊玄武岩储库); ③ 原始地幔(相当于下地幔)。原始地幔也是大陆地壳与亏损地幔之和。利用一个非线性模型反演上述 7 个同位素体系, Allegre and Lewin (1989)模拟了地球的化学结构和历史。结果, 他们得到了一个更好的全球成分估计值, 改进了对大陆地壳和纯洋中脊玄武岩化学成分的认识。这种内生地球化学循环的模拟是我们认识地球内部化学结构和动力学演化的重要手段之一。另一方面, 外生地球化学循环(即大气、海洋和地壳之间)的模式对认识生物地球化学过程及成矿元素的富集能起一定的指导作用。

此外, 对大洋玄武岩惰性气体同位素组成的研究揭示了地球具有显著的去气作用。然而, 地球去气的年代及其与大气圈演化的关系还有待于进一步解决。

4 大陆增生

同位素地质年代学研究表明, 地球的形成年龄为 4.55Ga。在西澳大利亚太古宙沉积岩中, 应用离子探针技术测定出碎屑锆石的 U-Pb 年龄为 4.2Ga(Froude et al., 1983)。这说明, 早在 4.2Ga 前, 地球上就已有了固结的岩石。事实上, 地球是太阳系中唯一已知的一个经历演化的、具有长英质大陆地壳的行星, 而其他星球, 例如月球的月亮基本上是未经分异的玄武岩。现有的研究已经证实, 原始地壳是由地幔通过部分熔融产生的岩浆上侵和喷发而成。

大陆地壳、地幔和地核是地球化学分异的基本表象。核-幔分异可能发生在地球历史的早期, 而大陆的产生一直持续到现在(Arndt and Goldstein, 1989; McCulloch and Bennett, 1994)。因此, 大陆地壳的形成是仅有的地球长期化学和热演化的指示。然而, 大陆地壳形成历史的某些重要方面还不是很清楚, 有些人认为大陆形成是连续的; 另一些人认为是幕式的。大陆的质量是否随着时间增加或降低或保持恒定也是未解决的问题。大陆的产生和保存的重要性在于它们同地球的热丢失和内部温度之间的关系。

如果大陆地壳的质量能够被确定为地球历史上时间的函数, 大陆的增长或破坏的问题就能得到解决, 大陆地壳可能已经存在达 4.2Ga。如果大陆地壳自产生以后得到保存, 这就有可能确定其质量与年龄的关系。不过, 日益增多的证据表明, 大陆地壳可能被破坏然后回到地幔, 即大陆地壳不是永恒的。因此, 这就不可能通过简单测定现代地壳的年龄分布来确定大陆地壳的增长历史。现代地壳年龄分布是地壳产生和消亡的净结果, 因此它限制了作为年龄函数的大陆最小质量。

利用 Sm-Nd、Lu-Hf 和 Rb-Sr 同位素质量平衡反演, Jacobsen(1988)模拟了一个 3 层壳-幔演化模式。结果表明, 约 30% 的地幔在 670km 的不连续面以上为亏损, 约 40% 的现今大陆地壳是形成于 3.8Ga。他所估计的大陆再循环和叠加速率约在 3.0Ga 达到最大。因此, 大陆叠加速率在 4.5~4.0Ga 和在显生宙是非常高的。

以往人们认为大陆地壳生长主要发生在板块边缘的岛弧区。而近来不少研究发现, 板内地区的地壳生长作用也可能是很重要的, 特别是在地壳历史的早期。这种作用如同洋底高原增生造成的地壳生长(Abbott and Mooney, 1995)。目前国内外已取得了大量关于大陆增长的钨同位素模式年龄资料, 但对于地幔增长线形式的认识仍然存在分歧。今后的研

究应将残留锆石 U-Pb 年龄与钨同位素模式年龄结合起来讨论,统一模式年龄计算的公式和参数,在充分研究区域岩石构造年代格架的基础上确定大陆增生的形式和速率。

5 壳—幔相互作用

从板块构造理论角度来说,地壳加入到地幔是不言而喻的。洋壳在其生长期间不仅获得了主要来自大陆地壳的沉积物夹层,而且与海水及其衍生的热液流体发生反应而改变了化学成分。不仅沉积物与洋壳的玄武岩部分能够一起俯冲进入地幔,而且大陆地壳也能够通过板块俯冲进入地幔。这个过程对于大陆地壳和地幔的化学演化具有显著的效应(Armstrong, 1981)。由于地壳与地幔物质的交换,地壳物质不断加入到地幔中,因此在板块运动出现后,地幔的性质发生了改变。

洋壳和岩石圈的产生和俯冲一起构成了一个大规模的地球化学循环过程,因此这也是出现在地球上的最大分异过程。洋岛玄武岩(OIB)的化学不均一性很可能反映了这个再循环过程。对 EM2 型洋岛玄武岩的 Nb/U 和 Ce/Pb 值与⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值之间的相关性研究,揭示其中含有再循环的以俯冲深海沉积物形式的大陆地壳。复合的 MORB-OIB 储库产生了比平均大陆地壳年轻同位素模式年龄,指示了由地幔对流和海底扩张引发的连续再混合和再分异。对洋中脊玄武岩地幔和上部大陆地壳的 Th-U-Pb 同位素演化研究指示,铀的迁移方向和时间对亏损地幔和上部地壳是相互补偿的,即铀经过热液蚀变洋壳的俯冲流回到上地幔中。

通过确定在现代海相沉积物(包括锰结核、生物成因软泥、深海和半深海粘土)中的 Sr、Nd、Pb 同位素和 K、Rb、Cs、Ba、Sr、U、Th、Pb 及稀土元素丰度,Ben Othman 等(1989)发现,这些沉积物的 Sr、Nd 同位素比值和 Sr/Nd 元素丰度比值可以是俯冲的沉积物与亏损地幔(或俯冲的洋壳)的混合结果,并且部分与大洋玄武岩的 Sr-Nd 地幔阵列相重叠。这意味着,岛弧火山岩的同位素成分是否落在这个地幔阵列内不能唯一地指示其源区是否含有俯冲的沉积物组分。不过,岛弧火山岩源区俯冲沉积物的存在导致其 Cs/Rb 和 Pb/Ce 值常高于大洋玄武岩。

对与俯冲的大洋岩石圈伴随的变质岩套的地球化学研究表明,许多富集在岛弧岩浆中的元素(例如 Cs、Rb、B、As、Sb、Pb、W、U)在火成和沉积物质中递进亏损(当它们遵循一个递进的俯冲地热梯度时)。此外,铅同位素比值可用来指示岛弧熔岩中沉积物的存在。因为不仅沉积物 Pb 丰度显著高于地幔,而且其²³⁸U/²⁰⁴Pb 值较低,导致了相对较低的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值。结果,含有沉积物的岛弧火山岩要比大洋玄武岩具有较陡的²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 相关线斜率。

汇聚板块边缘火山作用和现代海洋沉积物的地球化学研究,已经能够确定这种沉积物俯冲和再循环在地幔演化和岛弧岩浆成因中所起的作用。另一方面,大陆壳—幔边界可能是开放的,地幔部分熔融物质可以通过底侵作用成为陆壳的组成部分,俯冲地壳的拆沉也可再循环进入地幔(McKenzie and O'Nions, 1983; Kempton and Harmon, 1992; Kay and Kay, 1993)。对大陆地壳化学成分的研究发现,从地幔进入地壳的原始地壳增生物质主要是玄武质的,而现今大陆地壳的总体成分是安山质的。这种成分上的显著差异表明,壳—幔之间的物质交换是双向的,即不仅有地幔物质通过岩浆作用加入地壳,而且地壳物质也以某种机制(如大陆板块俯冲和下地壳拆沉作用)返回地幔,结果引起大陆地壳增生

和地幔化学不均一性(Allegre and Lewin, 1995)。通过研究壳—幔双向物质交换机制和质量迁移量有助于回答下列基本问题(Rudnick, 1995):① 地幔是如何通过部分熔融作用形成地壳的?② 地壳物质是如何通过再循环过程返回地幔的?③ 地壳形成和演化机制在地质历史上是否发生过明显变化?

三、地球动力学循环

地球的内部活动与地壳表面的地质现象是一个有机的统一体。地幔对流活动制约着板块运动,而板块运动导致了地壳与地幔物质的相互交换,也为地壳的增生和重熔创造了条件。实际上,在地球表面的地球化学过程中也存在物质循环。溶解在海洋中的盐并不总是停留在那里,而是通过化学结晶成为沉积岩。二氧化碳通过生物圈、大气圈、水圈、土壤和岩石储库不断地循环。在地球的壳—幔之间存在一个更大也是更基本的地球化学循环,这种循环同样出现在其他行星体内部。根据这个理论,洋壳和沉积物通过板块俯冲进入深部地幔,在数千万年后又作为地幔柱上升到地表。

同位素研究已经成为验证深部地幔再循环假设的核心,但以前的研究主要集中在放射成因同位素(例如 Sr 和 Nd)组成的变化上。近年来人们已将稳定同位素分析与放射成因同位素研究相结合,通过对岩浆岩的研究证实了壳—幔物质再循环理论,而其中氧同位素组成的变化具有突出意义(Woodhead et al., 1993; Harmon and Hoefs, 1995)。

1 热点和地幔柱

当岩石圈板块在“热点”之上漂移时,从深部地幔上升的热岩石—流体柱体形成地幔柱,在夏威夷和社会岛产出的线性大洋火山链正是这些地幔柱出露地表的证据。这种火山作用是当地幔柱到达近地表时由于减压熔融而引发的,然而这些地幔柱到底起源有多深的问题尚未解决。实验和数值模拟已经证明,地幔柱只能在不同对流区域的边界(例如地球内部 2900km 深部的核—幔边界)产生。另外,对全柱热流量的计算表明,与预期的地核热流量相匹配。因此人们推测,地幔柱是在核—幔边界产生的。然而,如果地幔本身能够划分为两个对流层,地幔柱可以从其内部边界,也许 660km 深处地震不连续面产生。

洋中脊喷发的岩浆起源于上地幔。将其化学组成与在洋岛喷发的岩浆相比可见,地幔柱在化学上不同于上地幔。这种差别的原因已经成为近 20 多年来地幔地球化学研究的中心问题之一。早些时候,人们认为地幔柱来自化学上未改变的或原始的地幔储库。然而,地幔柱一般富集那些在地壳中富集的元素,并且放射成因同位素研究表明,这种富集必须出现在几亿年前。根据这些观察,Hofmann and White(1982)提出,地幔柱里有一部分是由深部消减的洋壳和沉积物组成。

2 俯冲

地壳物质返回地幔在板块理论中是不言而喻的。Armstrong(1968)早就认识到这对于地壳和地幔演化的潜在意义,特别是如果大陆来源的沉积物在板块汇聚时俯冲进入地幔,其意义更加重要。后来,对板块俯冲带之上产出的、沿岛弧喷发的岩浆的化学和同位素研究认为,沉积物能够俯冲到至少 100km 深度。有人观察到,在进入俯冲带的沉积物通量与有关火山喷发岩浆的成分之间存在全球相关性,但是只有一部分沉积物消耗在岛弧岩