



華夏英才基金學術文庫

周瑤琪 章大港 顏世永 編著
吳智平 冀國盛

地球動力系統及演化



科學出版社

地球动力系统及演化

周瑶琪 章大港 颜世永 吴智平 冀国盛 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

“地球动力系统及演化”是对各类地球现象进行全球性的概括,并应用地质、地球物理和地球化学等多学科的综合研究,以求达到对行星地球的整体认识,探讨和推断地球演化过程中的动力作用史,从而建立地球动力演化模型,是地球科学最核心、最前沿的问题。

本书是编者全面收集国内外地球动力系统及演化研究理论和实践方面的新成果,综合近30年以来计算机模拟方法,地震、地磁和重力等地球物理手段在内的观测方法得到的成果,特别是地震层析成像技术在地球内部的动力学研究中取得的最新认识和成果及编者十几年的研究成果,进行系统分析、归纳总结,择其要点和精华编写而成。

本书可以作为高等院校及科研院所地质学及地球物理学相关专业本科生和研究生的教材或参考书,也可供广大地球深部动力系统和和其他地学类研究工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

地球动力系统及演化 / 周瑶琪等编著. —北京: 科学出版社, 2013. 5

ISBN 978-7-03-034517-2

I. ①地… II. ①周… III. ①地球动力学 ②地球演化 IV. ①P541 ②P311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 111735 号

责任编辑: 王 运 韩 鹏 谢洪源 / 责任校对: 赵桂芬

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年5月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013年5月第一次印刷 印张: 28 1/4 插页: 2

字数: 660 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

从事地球科学研究近 30 年来，长期听到的都是人们对地球科学是否属于科学范畴的怀疑。的确，地球科学在过去近 200 年的发展历史都停留在定性描述性、经验性和哲学性的层面。只是近几十年由于其他科学和技术的发展，才使得地球科学越来越像一门科学，从地质学演变为地球科学，其定量性、可预测性和理论性才越来越明显。地球科学的研究对象就是行星地球本身，而地球作为一个自然天体过程的产物无疑具有所有自然物质都具备的复杂性。作为研究对象，到目前为止人们仍然只能对它表面极薄的一层进行观察和取样，对地球深部厚达 6300km 以上的区域只能用间接的方式了解，并且它还具有近 46 亿年的漫长发展历史，而人类本身的历史才 200Ma。这就要求从事地球科学研究的科学工作者要有对未知自然事物和过程的强烈好奇心，要有对超长时间和空间的丰富想象力，要对所有相关科学和技术领域的最新进展有所了解，要具备良好的数学、物理、化学、天文、生物和计算机的基础。这无疑加大了地球科学研究的难度，也是地球科学相对于其他自然科学发展缓慢的原因。中国改革开放搞市场经济建设已经 30 多年，经济发展是目前国家的主题。这样一来，一方面国家和社会对基础研究的重视程度大打折扣；另一方面，研究人员本身也不可避免地受到市场经济浪潮的冲击，难以潜心做真正的学问。这不能不说是科学研究的悲哀。在一个国家，人们生活和工作以国家利益为准绳应当无可非议，但作为人类的一员，以人类利益为最高利益更是应当可以理解的。对自然过程和未知世界的探索是基础研究的主题，也是满足人类好奇心、提高全人类知识水平的必由之路，是完全符合人类利益的。一个国家能否把人类利益和国家利益相协调，或者说在多大程度上将国家利益统一在全人类利益基础之上，是这个国家发展成熟程度的标志。希望我们的国家在不远的将来能够成为一个成熟的国家，使得从事基础研究的科学工作者能够幸运地、自由自在地、不受任何干扰地开展他们有兴趣的研究工作。

经过几年的准备，我和我的几位年轻同事终于下决心编写一本介绍地球动力系统及演化特征的书。一方面是介绍国际上这一领域最近的发现和进展，另一方面也将我们自己十几年来研究成果穿插其中，试图形成一个较完整的系统，为即将在这一领域从事研究工作并期望有所发展的研究生们提

供一本有价值的参考书。其中，周瑶琪负责第1章、第10章、第11章和第12章的编写以及全书的统稿定稿；章大港负责第2章、第3章、第4章、第5章和第6章的编写；吴智平负责第7章和第9章的编写；冀国盛负责第8章的编写。承蒙华夏出版基金会的资助和科学出版社的鼎力合作，才使其得以面世。感谢中国科学技术协会为我提供两次机会主持有关地球动力系统的青年科学家论坛；感谢《地学前缘》让我有幸主编两期以地球系统为主题的专集；感谢我博士后工作的导师王鸿祯院士给我的建议和思考地球系统演化的方式；感谢欧阳自远和马宗晋院士给我的帮助和鼓励；感谢宋晓东和张有学教授与我进行的合作和有益的讨论；感谢科学出版社谢洪源老师细心而艰苦的编辑校对；最后还要感谢我的几位研究生——陈勇、李月、刘超英、郭丹红、王鹏。他们在图表、文献和文字录入等方面提供了无私的帮助。

周瑶琪

2005年7月12日于山东东营

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 地幔主要不连续面的物理、化学性质与演化	1
1.2 地幔动力学系统与演化	7
1.3 结束语	26
第 2 章 地球内部的圈层结构与物理性质	28
2.1 地球内部的圈层结构	29
2.2 岩石圈的结构与物理性质	33
2.3 软流圈的结构与物理性质	40
2.4 下地幔的结构与物理性质	46
2.5 地核的结构与物理性质	67
第 3 章 地球各圈层的化学组成和矿物组成	71
3.1 岩石圈的地球化学和岩石学结构	73
3.2 软流圈的化学组成与气体成分	83
3.3 下地幔的主要化学成分和矿物组成	86
3.4 地核的化学成分	89
第 4 章 地幔动力学与板块运动	94
4.1 地幔对流理论	94
4.2 地幔对流与板块运动	98
4.3 地幔热点与热柱	103
4.4 地幔的地球化学演化	107
4.5 地幔对流的数值模拟	116
4.6 联合古陆聚散与地幔对流数值模拟	126
第 5 章 地核动力学与地磁场倒转	149
5.1 地核流体与运动学特征	149
5.2 地磁场的产生与极性反转	152
5.3 地核的热动力学演化及与下地幔的相互作用	170
第 6 章 大陆动力学	176
6.1 大陆岩石圈流变学特征	176
6.2 大陆动力学过程的地球化学示踪	182
6.3 造山动力学	188
6.4 造盆动力学	197

6.5	盆山耦合动力学与演化	211
6.6	地球动力学过程中的超临界流体问题	221
第7章	地球热动力系统与地质演化节律	227
7.1	地球内部热源与分布	227
7.2	热传递与热耗散	231
7.3	地质事件与地质节律	236
7.4	思考	242
第8章	潮汐作用与地月系统轨道参数的演变	245
8.1	潮汐作用	245
8.2	华北寒武系、奥陶系灰岩潮汐韵律与地月轨道参数的演化	249
8.3	软体动物贝壳生长纹层与潮汐	259
第9章	影响行星地球动力系统的其他天文因素	277
9.1	太阳系在银河系中的运动	277
9.2	小行星撞击事件	280
9.3	撞击事件对地球动力系统的影响	282
9.4	重力常数 G 值变化对地球动力系统的影响	291
9.5	地球轨道效应与米兰科维奇周期	294
9.6	太阳黑子活动与气候变化	299
9.7	固体潮汐作用对地球动力系统的影响	302
第10章	地球系统的静态模型	305
10.1	地球内部密度、重力和压力	305
10.2	介质中弹性波的传播速度、密度和弹性常数	311
10.3	状态方程	312
10.4	格林艾森参数——热学参数与弹性模量的关系	326
10.5	晶体的热学性质与弹性的关系——德拜温度 Θ 、模式格林艾森参数 γ_i 和 德拜-格林艾森参数 γ_D	328
10.6	地球内部德拜温度 (Θ) 和格林艾森参数 (γ) 的分配模式	331
10.7	地球内部温度分配模式的计算	332
10.8	地球内部的热导分布	336
10.9	地球内密度的变化	337
10.10	地球内的压力分布、重力引起的加速度变化以及弹性常数	345
第11章	地月系统的起源与早期演化	347
11.1	巨型碰撞理论	347
11.2	地球的增生与层圈分异	348
11.3	月球形成的时间	358
11.4	月球形成过程的超级计算机数值模拟	366
11.5	月球的化学组成	373
11.6	太阳系中的放射能	380

11.7 地球的内部结构与早期演化	382
11.8 尚未解决的问题与未来的展望	384
第 12 章 月球的起源与地月系统极早期演化数值模拟	386
12.1 IAMTM 模型	387
12.2 参数和边界条件讨论	391
12.3 计算结果和讨论	394
12.4 主要结论和将来的研究方向	397
主要参考文献	399
图版	

第 1 章 绪 论

“地球动力系统及演化”是地球科学最核心、最前沿的问题。与之密切相关的研究领域包括地球内部的圈层结构和物理化学性质、地幔对流与板块运动、地核动力学与地磁场倒转、大陆动力学以及地球的起源与演化等。了解地球内部动力系统及状态的主要手段有实验岩石学与实验地球化学,包括地震、地磁和重力等地球物理手段在内的观测方法,以及计算机模拟方法。经过近 30 年,特别是最近地震层析成像技术突飞猛进的发展,科学家对地球内部的动力学性质与状况有了比较清晰的了解。软流圈顶部边界层、地幔内部过渡层、核-幔边界以及内外核边界层的热状况和物理化学性质及其相互作用是当前地球动力学最激动人心的领域。新的发现往往集中在这几个重大边界上。每一个新发现、新认识都加深了人们对地球内部动力学状况的了解。这种格架性的了解已促使人们有信心去探索地球动力系统在时间轴上的演化特征及其在空间上的变化和分异特点。

1.1 地幔主要不连续面的物理、化学性质与演化

1.1.1 转换带

400~670km 深处的转换带是了解地幔演化的关键,对这一过渡带的观测有可能回答地球动力学上争论不休的一些重要问题,如地幔是否为分层对流的?为什么板块容易沉入转换带却不易穿过 670km 的不连续面?或者说是由于负的克拉珀龙斜率,还是由于随密度增加而增加的黏度而减慢或阻碍了板块更深地穿插?

要想了解控制板块的驱动机制,建立一个合适的地幔对流模型是至关重要的,但全地幔对流与地幔分层对流模型对表层板块运动的影响全然不同。如果采用分层地幔对流模型,即上地幔单独对流,则转换带成为对下地幔绝热的一个平板。作为行星地球的热演化及地质活动的时间尺度相对不分层的情况,即全地幔对流的情况要增加 10 倍或更多。当然,在分层对流情况下,则会面临难以取得下地幔样品的困难,因为分层对流使得转换带之下的岩石不能到达地表。

转换带的典型特征是这一区域压力足够大,使上地幔的普通岩石转换为新的致密的岩相。这种矿物的相变已在实验室中得到证实,实验的结果很好地解释了在 400~670km 深度观测到的地震特征的突变。20 世纪 90 年代以来,地震学家运用有关新技术来研究不连续边界层,确定其深度,精确其深度范围,研究速度及波阻抗对比等等。

支持将 400~670km 处不连续面解释为相边界的主要地震证据是它们全息成像偏移的相对方向。通过总结地震反射方面的工作,得知这些反射可与由实验确定的这些边界

的橄榄石相变的克拉珀龙斜率相一致。假如相边界的温度灵敏度可由实验很好地确定,则对这些边界照相可直接提供转换带结构的热参数。Shearer 和 Masters (1992) 做出了 660km 界线第一张全球层析成像图,该图显示出 30km 的形态变化。环绕太平洋边缘的长期俯冲区凹陷的 660km 不连续面,是由这些地区下沉的冷板块横向堆积形成的。

但 400~670km 处发生的相变会使整个转换带内发生的过程变得模糊起来。例如,它们会掩盖上地幔与下地幔之间总体成分上的变化,而这种成分变化有可能导致层状对流。目前人们只是部分了解相变对地幔对流的影响,理论上的计算则表明,与相变相伴随的物性上的微小变化,将强烈影响地幔对流的格局。

20 世纪 90 年代以来,最激动人心的进展之一是人们意识到有可能获得一些来自转换带深度的火山喷发的岩石样品。然而,大部分所谓地幔岩样品均来自浅层(200km 之内),那么能否获得更深的地幔样品呢?一般认为,来自转换带深度,且不用说更深的样品,可能比来自月球的样品更稀少。这些极为少见的样品可以提供关于行星地球演化的独特信息。

沉到转换带中去的板块的命运是许多地震学家、地球动力学家、矿物物理学家研究的主题。与此相似,地幔柱是否起源于转换带,也是人们关注的问题。最新的看法认为,虽然不是大部分,但是有小部分地幔柱确实起源于下地幔深度内,甚至可能来自于核-幔边界。果真如此的话,转换带又是怎样影响地幔柱上升的呢?是所有地幔柱都得以穿过该区域,还是转换带像一个漏斗一样,仅允许一定类型(如成分)的地幔柱穿过,进而有失偏颇地提供深部地幔的样品呢?

Li 和 Gwanmesia 等 (1996) 为了解转换带进行了新的多-压砧布里渊散射实验。此装置能产生大约 12GPa 的压力。多晶镁硅酸盐实验结果表明,在高压同质多象体的压缩波和剪切波速度之间存在一个简单的线性关系,多晶样品的特征是各向同性的均质体(注意,单晶 b 相是典型的非各向同性的)。由此得出结论,认为 410km 不连续面能够由 45%~65% 橄榄石(其 b 相完全没有什么速度意义)的地幔岩石模拟而成。同时指出,转换带所存在的镁铁榴石可以用来解释这一区域高的速度递减率。

Shearer 和 Masters (1992) 近年来采用 SS 叠前处理以突出 520km 不连续面的效应。最近的大洋区域数据叠前处理是手工操作的,仅局限于回跳点以减少波形畸变。这些叠前处理工作强烈地显示出 410km 和 660km 不连续面,而 520km 不连续面也有较弱的显示,从而为 660km 不连续面的速度递减率提供证据。叠前处理提供了 520km 不连续面的一个约 2.2%~3.6% 声阻抗反差,这与 Revenaugh 和 Jordan (1991) 的工作有很好的一致性。有意义的是,520km 不连续面使用了一系列与四个主要地幔界线的边界成像和体现结构相关的经验性模块。这四个边界包括自由表面、核-幔边界、400km 和 670km 深度边界层,它们能够用相变来进行模拟。其核心问题是地幔内部不均一性成像所产生的转换数据。这些转换函数取决于每一边界的化学和相变特征、密度和所估计的地震波速之间的比例换算、垂直黏度变化特征、跨越边界层的密度跳跃以及所有相转变边界的克拉珀龙斜率。使用模拟方法,即用正常模式结构系数和地球长波球体估算的沉积结构、边界层成像垂向上的密度和地震波速之间的比例换算关系,可获得 660km 深度、10km 厚度的层析成像。

高分辨率地震成像开始提供板块进入（或穿过）转换带的详细图像，而地幔柱的完整图像最终要揭示出这些重要的上涌物质源于何处。矿物物理学和岩石学资料集中给出了下地幔物质和成分的可靠的约束，层状或非层状对流（上、下地幔有不同或相同的总体成分）问题正逐步得到解决。

对流模型已变得很复杂，人们能够开始着手解决转换带这一地球动力学上的难题，如描述相变和物性（如刚性板块）垂向变化的效应，黏度随温度的变化，并且地幔如果是分层的，人们将能够开始研究物质穿过转换带这一问题，以及该体系对时间的依赖关系。

1.1.2 核-幔边界（CMB）

核-幔边界问题在过去的几年间引起了人们的极大兴趣。来自地震学、地磁学和大地下水准等方面的新的地球物理观测资料均显示出地幔的最底部是极为不均一的。事实上，靠近核-幔边界性质的侧向变化超过了除地表以外的地球其他任何地方所能找到的变化。这归因于核-幔边界作为地球化学、热力学和动力学等极为不同的体系间过渡带所起的作用。

CMB本身表现为一个截然的界线（能有效地反射高频地震波），地幔基底之上的D'区是非常复杂的。这一区域所观察到的地震波的不均一性可与在岩石圈内发现的不均一性相类比，后者具有复杂的动力学意义上明显的化学和热力学侧向边界层。地震证据表明，在D'层内局部是分层的，这进一步表明或是相变或是化学不均一性在该层的存在。化学不均一性可能是地幔早期分异、俯冲板块下沉或核-幔间不断进行的化学反应的结果。设想有低黏度的、热的化学边界层与可能的化学不均一性相结合，可以获得核-幔过渡带的复杂图像。这一区域应该是地核流动体系的上部边界，也是下地幔对流体系的底边界。

核-幔边界之所以令人感兴趣，是因为人们能够把该区的不均一性与深部地球动力学过程联系起来，就像岩石圈的不均一性可以与地质过程联系起来一样。一方面，由于对强烈的深部过程的响应，一个区域变得不均一（如部分熔融和分异，不完全的再混染、变形等），另一方面，不均一性本身，尤其是密度不均一（化学成分和热力学上的不均一）驱动着全球性的动力学过程。

在此意义上，CMB作为地球这颗行星上独特的化学活跃区域而令人有特殊的兴趣。事实上，一些实验结果表明液态的铁合金（地核物质）与结晶质的硅酸盐和氧化物（下地幔物质）在下地幔的温压条件下会发生强烈的反应。

Stevenson等（1983）评述了所有行星的比较研究，认为所有类地行星都会拥有一个液态的核，即使这些核并不都能对流，从核部传导出的热流也将驱动所有这些类地行星的幔部对流。由此提出每个行星幔的底部都应当是一个热动力学边界层，这些边界层的对比性研究对CMB成像、幔柱的产生、核-幔耦合的各种机制的讨论都将是极有意义的。

哈佛大学 Dziewonski 和 Haddon（1974）总结了由波形交叉校正所获得的 SS-S、

ScS-S、S-SKS 和 SKKS-SKS 绝对旅行时组成的新的全球性数据系统, 以及基于这些数据所获得的 CMB 成像, 发现了比以前成像结果大得多的异常 (近似于 2 倍) 和更高的分辨率。

为了与全球性反演结果进行对比, 华盛顿大学的 Wyss 等 (1996) 以青藏高原 S 分异波形为例, 讨论了局部数据系统怎样用于解决通过 D' 层的垂向结构问题。他还选用密苏里至马萨诸塞之间一个跨越 20 个地震台站的临时地震数据系统, 并作了一些假定, 使这些数据是可用的, 经过成因算法处理获得 PKP 相, 并且最后得出的这一结果是可行的。

另一个地幔底部局部异常的研究成果, 是由加州大学 Santa Cruz 分校的 Garnero 和 Helmberger (1995, 1996) 及其合作者提供的。他们使用穿越地核的 P 波, SPdKS、SKS、SPdKS 和 S 相来解决 CMB 上的薄层低速带 (LVZ) 成像问题。假定以 10% 的速度降低, 伴随 LVZ 之上 PREM 存在速度偏差, 可获得 LVZ 最大厚度约 40km。当然对 LVZ 至少存在三种解释, 即相变带、化学突变区域和部分熔融。对于第三种解释, 要符合观测的数据, 大约 25% 部分熔融是必需的。

加州大学 Berkeley 分校的 Romanowicz (1995), 分析了莫斯科地球物理研究所的同事们提供的 Tonga-Hiji 区域地震记录剪切波数据, 发现在马萨诸塞地震台站所接受到的 S_{diff} 波相对标准地球模型有大约 10s 的延迟。另外, S_{vdiff} 和 S_{hdiff} 波到达时间之间存在 3s 的时差, 这符合 S_{v} 和 S_{h} 之间存在 1% 速度差、低速层 (D'') 厚 200~300km 情况下的振幅比值和频率趋势。各向异性的一种可能解释是地幔底部对流边界层具有优选点阵取向性。

美国地质联合会 (AGU) 地球深部研究 (SEDI) 委员会第九届年度报告中有两份报告涉及 CMB 热流体影响地核的动力学和结构的检测问题。剑桥大学的 Lister 和 Buffett (1995) 检验了地核顶部层状物发展的条件。他们认为, 热的层状物是由穿越 CMB 的地核热流体控制的, 与沿着地核内部绝热线传导的热流比值 (Nu) 有关。当 $Nu < 1$ 时, 正如最近一些估计所认为的, 层状物的形成是作为来自 CMB 的负浮力的热流体和来自内核边界的正浮力的热流体之间相互作用的结果。使用简单的流体机制和热动力模式, 当 $Nu = 0.9$ 时, 将形成约 100km 厚的层状物, 然而核-幔边界热流体的变化将会导致出现大的流体速度, 这似乎与地磁场长期变化有关, 这种结果将不利于层状物的形成。对于 CMB 的热流体而言, 当 $Nu > 1$ 时, 其负浮力要大于沿绝热线传导热流体的正浮力。

Los Alamos 国家实验室的 Glatzmaier 和 John、霍普金斯大学的 Olson 和 Glatzmaier (1996) 使用三级磁对流模拟来研究 CMB 不均一的热流体是怎样影响地核磁场的形成和对流的。地幔中较冷的区域将吸收来自地核的热流, 由此形成对流。下降流则是典型的、狭窄的, 并且具有相对较大的速度, 而上升流则是宽广而相对较慢的。与此相反, 地幔中较热的区域能导致局部的热流进入地核, 由此而形成层状的区域。磁场发电机的特征强烈地受地核几何学特征的影响。

Max-Planck 研究所的 Boehler (2000) 运用金刚石压腔实验和冲击温度测量方法研究 CMB 区域的铁和硅酸盐熔融行为。其结果表明, 近 CMB 的地核温度约为 4000K。

铁合金的实验数据表明,处于高压环境下轻元素氧和硫的掺杂将使熔融温度降低。如果下地幔是近于绝热的话,轻元素将能使熔融温度降低 1500K 左右。他最近对两种主要的地幔成分 (Mg, Fe) SiO_3 -钙铁矿和 (Mg, Fe) O-镁方铁矿 (?) 的熔融实验表明,下地幔温度上限为 5000K 左右。

而加州理工学院的 Ahrens 和 Gallagher (1994) 则报道了对铁和橄榄石在高压条件下的冲击强度测量,表明 CMB 的熔融温度近似为 4200K。他们认为, CMB 的熔融温度不可能超过 4200K。他们通过对实验中所使用的窗口材料高压热散射进行校正,重新分析了铁的实验数据,由此得到内核边界的熔融温度约为 6000K。当增加一些轻的合金元素时,熔融温度便降低到大约 5500K,这样 CMB 的温度近似为 4500K。

Buffett (1992) 讨论了核-幔耦合过程中不均一性 D' 层的全序列 (consequence) 问题。由 CMB 形貌或 D' 层化学不均一性引起的电导率横向变化显然对地核顶部的磁场是有影响的。不均匀地幔下部液态核的运动能进一步改变其产生的磁场。对全部磁场流体在液态核中分布的解释,指出其所产生的磁场强度达到 $2 \times 10^{-4} \text{T}$, 对不均匀性和边界形貌来说,似乎是可能的。如此之大的扰动将对 CMB 的总体磁场产生严重的影响,并且对那些看似稳定的特征也有影响。这些磁场扰动将影响核-幔耦合。由于这种附加的磁场,地幔的磁场剪切压力将可能增加两倍以上,而作用在界线层的流体压力的影响却与 CMB 附近的磁力之间几乎没有太大的关系。CMB 的形貌和电磁扭矩均可作为解释磁场在时间尺度上的变化机制。

加州大学 Santa Cruz 分校的 Rodgers 和 USGS, 丹佛的 Engdahl (Rodgers and Engdahl, 1992) 讨论了核-幔过渡带的地震结构模式。他们使用了从 ISC 和 EDR 的 1964 年 1 月 1 日至 1994 年 6 月 1 日之间的地震记录,分析了 P、PcP、ScS 和 ScP 等旅行时系统,并用上升走时 (pP、PwP 和 sP) 和下降走时 (PPKPdf) 的残差,相对 akl35 模式 (Kennett, Engdahl and Buland, 1995) 进行了计算,并对震源深度进行了重新定位。运用更新震源位置后的地震记录重新确定了地震相,然后使用目前的地幔模型对 CMB 的结构进行计算。D' 层 P 波速度的不均一性与全球的大尺度结果符合得很好,但是一些小尺度结构图像用目前的数据系统还很难获得。

加州理工学院的 Helmberger、加州大学 Santa Cruz 分校的 Garnero (Garnero and Helmberger, 1995, 1996) 和哥伦比亚大学 Lamont 所的宋晓东 (1998) 将他们在深部地球速度结构方面的近期工作做了总结。其最下部地幔的速度结构是使用 SmKS 地震相获得的。发现 S-SKS 和 SKKS-SKS 旅行时与层析成像图与中太平洋区域的低速异常的测定符合得很好。这一地区的 SPdKS (SKS 随 P 波沿着 CMB 绕射) 地震相有非常明显的时间延迟。这种效应可通过引入 P 波以 10% 的速度降低、CMB 之上薄的低速层厚度 10~40km 来很好地模拟。

最近地震方面的工作已经描绘出了最下部地幔的几个幔速区域, CMB 上部的超低速层厚度小于或等于 40km, 该层的 P 波速度 (V_P) 也大约降低了 30%。加州大学 Santa Cruz 分校的 Revenaugh 和加州大学 Santa Barbara 分校的 Meyer (1997) 使用加州地区的地震数据记录计算了 CMB 之上、D' 层之下超低速层的厚度,至少发现三个区域的低速层厚度不超过 15km。他们认为这种低速层可能与地幔底部的部分熔融作用有关。

宋晓东(1998)利用 P_kP 波各分支之间的相对走时来研究 D'' 层 P 波异常, 其结果比全球到时资料层析结果要大几倍。的确, 如果厚度太小, 很难用来自 670km 不连续面上的残留板块的沉淀物来解释。

从目前来看, 使用各种方法对核-幔边界层进行更完全的详细观测, 迫切需要加强地震学方面的观测。将详细的地震学研究结果与地磁场的观测结果(即它的长期变化和倒转特征)联系起来可能是必要的。要达到这一目标, 显然需要对磁流体动力学及其倒转作用做进一步理论性工作, 以使地震学、矿物物理学、大地水准面测量和地磁学的研究成果能够统一起来, 需要地震学上的观测以描绘不均一性在强度和尺度上的变化。不均匀的 D'' 层的基本厚度的变化, 地幔底部的各向异性变化, 以及地核的外部是否存在不均一性, 都需要地震学方面的进一步证据。同时, 需要矿物物理学和岩石学方面进一步的实验工作。在超高压实验室中温度和达到化学平衡的方法需要更可靠的保证。这方面的进一步工作将给我们提供关于地幔底部的温度分布以及地质历史中核-幔系统如何进行化学演化的详细信息。

1.1.3 核-幔边界成图与流体动力学

核-幔边界是地球内部一个最基本的不连续界面, 该面上下地幔硅酸盐矿物与外核液态铁合金直接接触。因其距离地表有 2900km 之遥, 只能远距离地间接对它进行探测。最新的研究成果正在不断揭示地幔最底部的一些性质, 也由此提出一些关于这一区域的新的问题。地震波(P 波)速度在这一薄层中降低 10% 以上, 表明地幔底部正在发生部分熔融作用。下地幔可能是各向异性的, 或许可以作为一些小规模的成分变化的推论, 事实上地震研究结果已经显露出 CMB 几百米尺度的不均一性图像特征。

最近几年广泛的地震工作提供了这一现在称之为被 D'' 层环绕的约 200km 厚的最下部地幔区域更清晰的精细结构的有关情况。20 世纪 80 年代的地震研究显示了这一层值的剪切和压缩波速的不连续性增加特征, 最新结果则显示了 D'' 层在厚度和地震波速两方面都存在横向上的不均一性。例如, 西南太平洋的研究(Yamada and NaKanishi, 1996)发现 D'' 层在短距离内厚度变化近 100km, 而在其他一些地区, 则连 D'' 层的间断面的迹象都没有发现。现在已经提出了一些独立或综合性的机制来解释 D'' 区域的不均一性。当地核冷却释放热量时, 一个热的边界层就会在 CMB 上形成, 这一边界层随时间的演化而变得不稳定, 从而释放由热物质组成的上升幔柱。俯冲的板块(或许只是一些曾经为洋壳的成分), 可以抵达地幔的底部, 形成地核的一些残余物。它们因为太重而不易受来自冷却地核的传导热的影响而上升, 却有可能被地幔上升流带走。在这一区域, 相转变也是可能的, 或者, 这一边界层可能是化学活跃的区域, 与外核熔融液态铁发生反应, 从而改变其附近地幔矿物的成分。速度梯度和厚度的变化表明, 这些机制至少有一种可能是正确的。最近的探测主要是使用沿着地幔底部边界层绕射的地震波来了解这一区域的地震结构, 对于非常微弱的信号必须加以重视和处理。在 20km 左右的地幔底部薄层内, P 波速度(V_P)降低了大约 10%。这种解释是有一定多解性的, 在一定的限度内, 厚度和速度降低是可以替换的, 在一些地区较薄的层厚也可以用较大的速

度降低来解释。

是什么原因引起如此小的区域却有如此之大的速度降低呢? Williams 和 Garnero (1996) 认为最下部地幔是部分熔融的, 一种推论是剪切波速 (V_s) 的降低, 他们预测在这一薄层内 V_s 相对 V_p 有三分之一左右的降低。Revenaugh 和 Meyer (1996) 在对日本 Toga 和南美下部的 CMB 研究中, 也认为 V_s 的降低需要超高压的存在, 从而也支持部分熔融假说。他们也注意到了 D'' 层的厚度在不同地区是很不一样的, 并认为可能是地幔底部上升流和下降流相互作用的结果。无论 CMB 正在发生些什么, 那里的结构看起来严重地影响了下地幔对流的方式。

了解 CMB 特征的另一思路来自对地震波速各向异性的研究。在上地幔, 各向异性取决于矿物的定向, 并能指明地幔流动的方向; 在下地幔, 虽然这里的各向异性也能提供一些关于局部流动方式的信息, 但由于矿物组合是不同的, 或许还需要一些其他的机制。产生各向异性的一种可能的机制是矿物成分成层状分布的, 如果深部地幔包含了各种成分的物质, 对流的流体就会产生很小的层理, 而层理的产生会引起最大和最小剪切波速差异的定向性。一些各向异性的最明显证据已在阿拉斯加和中太平洋下面的 CMB 发现, 但是目前仍然只对部分地区的地震波数据进行了仔细分析。

在综合分析大量 CMB 岩石物理、热力学和流变学信息的基础上, 用计算机模拟这一边界层上发生的动力学过程无疑会有助于人们对核幔边界层的了解。Kellogg (1996) 提供了计算机模拟 CMB 二维图。模拟的是地幔和熔融外核的液态铁之间的化学和热相互作用的结果。较重的富铁层将在这一界面上生长。模型中下地幔以硅酸盐为主, 但覆盖在富铁层之上, 是长时间累积的图解。在这种时空-温度图解中, 水平轴显示的是物理位置, 垂直轴为时间。来自核内的热流形成由上升物质 (红色) 组成的热性, 冷的下降流 (蓝色) 模拟了通过地幔的沉降, 红色的径迹反映了热物质幔柱随时间的轨迹; 轨迹的分叉显示热性的边缘是连通的。水平轴尺度约为 10000km, 时间轴大约为 700Ma。

富铁层的生长是在地震观测的基础上假定的。这里的计算告诉人们, 这些层在 CMB 上是怎样生长的。这一薄层无疑对幔柱形成具有重大的意义, 对地磁场的演化也有明显的影响。这些新的探索开辟了新的研究领域, 也带来了很多问题, 例如地幔底部的薄层低速层是否全球性分布? 所观测的结果是否是部分熔融的结果? 如果是这样, 那么地幔底部熔融将能产生一些关于 D'' 层成分演化和上升地幔柱的热结构等方面有意义的推论。或许在不久的将来, 基于更高精度的 CMB 成像可获得 D'' 层各向异性的完整的地图, 可以指明地幔底部的流动方式和下地幔动力学过程中成分的变化。

1.2 地幔动力学系统与演化

地震学等地球物理方法揭示了有限的地球内部物理特征。要确定地球深部的组成和动力学过程尚需要更多的信息。为了解决这一问题, 可以考虑将地幔的一个全息照相作为地球内部当前结构的一个快照, 这也许可反映相当长的、而不仅仅只是当前的深部热对流方式, 由此所获得的深部热结构和对流的图像, 再加上地球表层板块运动的历史记录就构成了深部地球动力系统模拟的对象, 而地幔动力学模型的好坏则取决于人们对地

球深部物质组成、物性和边界特征等的了解程度。随着各种观测方法和技术的改进,人们对地球内部的了解也在不断更新,只有在这些不断更新的深部知识基础上,再运用合适的计算法和功能强大的巨型计算机,才有可能使深部动力学过程模拟真正具有理论和实际意义。

目前关于地球深部动力学过程的一些最基本看法仍然还是推测性或简单化处理的。例如,关于地幔物质组成非均一性程度到底有多大的问题,涉及地球内部化学分异(圈层分异)及过程、原始不均一性、地幔对流的方式和速度以及俯冲板块的沉降和地幔热活动等方面。

1.2.1 层圈分异与地幔非均质性

行星增生是一个剧烈和高温的过程。目前关于行星形成过程增生作用的大量研究表明,无数星子的碰撞促使了原始地球的广泛熔融。月球在约 40 亿年前的一次巨大规模撞击事件形成月海玄武岩的研究表明,类似增生过程的形成温度是极高的,足以使整个地球都熔融,并使一部分地幔硅酸盐物质蒸发。如果地球经历过早期的整体熔融,那么产生矿物分离的化学分异作用应当控制原始地球的形状和早期演化。

地球内部结构能为地幔的早期演化提供线索。富含痕量元素的地壳、水圈、大气圈以及富铁地核的存在证明了地球的层圈化学分异特征,但问题是地球能否在后期演化中持续这种分异作用并保持各层圈的地球化学均匀性呢?地幔在其早期高温状态下可能为不稳定的,并受到对流作用的强烈搅动。但分异过程中的晶体和熔融体趋向于分离,一个端元(晶体)形成了耐高温并具高密度的地核、下地幔和浮力小而富橄榄石的上地幔;另一端元(熔融体)则在俯冲作用和再循环运动中保持了地幔的均一性。若想搞清下地幔是原始未分异的物质还是层圈分层的耐高温残余物,必须综合分析来自地震学、岩石学、地球化学、宇宙化学和地幔对流模拟的各方面信息。

近 10 年来,岩石高温高压实验技术获得飞速的发展。人们能够从相平衡方程和地球化学分类学角度对地球的原始成分,包括深部地幔熔融造成的分异作用(图 1.1)进行实验研究。

澳大利亚国立大学的 Kesson 等(2002)进行了辉橄岩成分玻璃在 70~130 GPa 压力条件下加热到高温的实验,尽管温度没有测定,但我们估计实验温度至少高到可以驱动化学反应或歧化作用的程度。样品反复在 TEM 下观测,发现仅有富镁钙钛矿(Mp)、富钙钛铁矿(Cp)和镁方铁矿(Mw)三种相出现。铁在 Mp 和 Mw 之间的分馏($K_d=0.25$)与压力大小没有明显关系,没有证据表明发生了歧化作用,也没有发现新的矿物相。Na 和 Al 在 Mw 相中发现,Al 也在 Mp 相中发现。在充分估计热效应之后,所预计的集合体密度与地震资料符合得很好,由此认为上、下地幔均具有钙钛矿,但仍具化学不均一性。同时认为进入下地幔的板块大多数应是致密的,具有较低的温度,甚至在加热以后仍具有轻微的化学浮力,密度约减少 0.6%,有利于 CMB 地幔的形成。

日本东京大学的 Yamazaki 等(1996)首次研究了 $\text{MgSiO}_3 + \text{MgO}$ 的颗粒生长动力

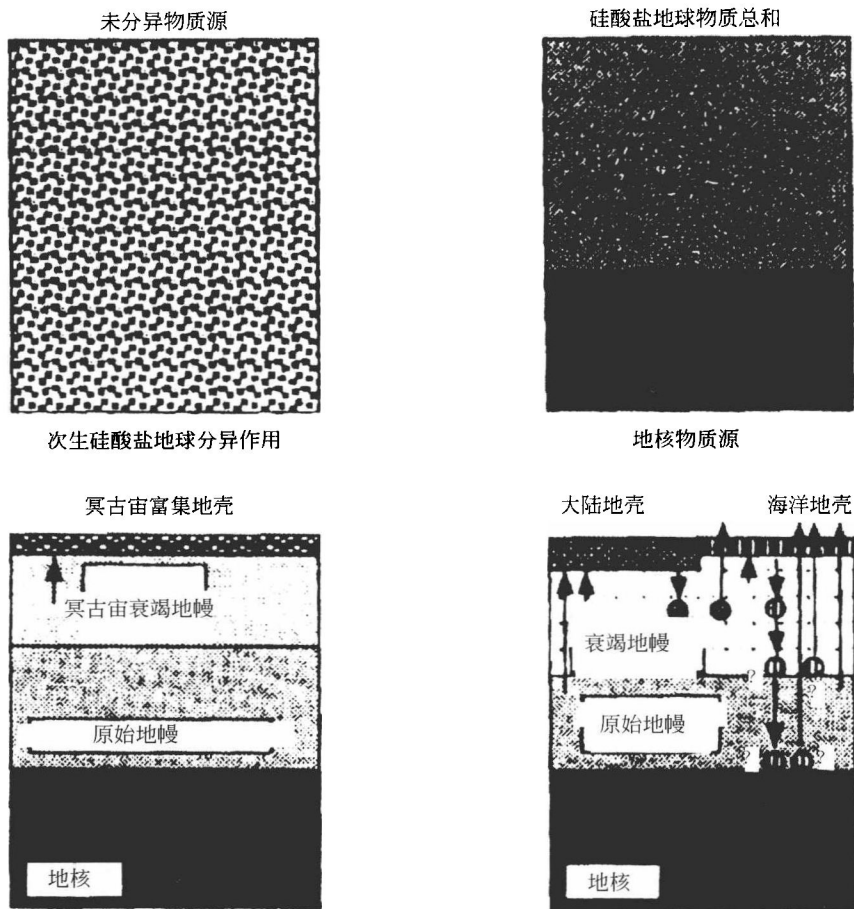


图 1.1 地幔内部发生化学分馏作用的主要过程示意图 (据 Jacobsen, 1993)
箭头表示物质流动的方向

学问题,这对于了解下地幔流变学特征非常重要。他们在复式压砧装置中将镁橄榄石转变成成为钙钛矿加方镁石,并形成非常小的颗粒集合体,然后推算出了颗粒大小作为温度 and 时间的函数。实验是在 25GPa 压力下,持续了 30h,最大温度达到 1573K。他们发现速率公式 $Dn - D_0n = Ct$ 的控制参数,公式中 D 为颗粒的直径, t 为时间, $C = C_0 \exp(-QA/RT)$ 。对 $MgSiO_3$ 而言, $Q = 321\text{kJ/mol}$, $n = 10.6$; 对 MgO 而言, $Q = 247\text{kJ/mol}$, $n = 10.8$ 。高的指数值表明生长速率非常小,所以在 100 万年时间内颗粒仅仅只是 10m 左右,并且在 1 亿年后颗粒的大小也会小于 100m。在讨论中, Cohen 和 Krakauer (1990)、Loper (1991) 询问为什么 n 值如此之大? 为什么在其他许多系统中 n 值通常在 3 左右? Jackson 和 Rigden (1998) 认为可能是由于系统由两相组成,在许多情况下,相对单相集合体而言,第二相的出现会阻碍颗粒的生长。Boehler (2000) 也指出生长速率测量太接近钙钛矿的稳定边界的问题, Cohen (1990) 则指出靠近相边界时,因子 $\exp(-DG/RT)$ 可能是非常重要的。在更高压力条件下实验的实现无疑将