

谢鸿森 侯渭 张福勤 译 徐仲伦 校

西北大学出版社

地球物质研究



地球物质研究

谢鸿森

侯渭译

张福勤

徐仲伦校

西北大学出版社

新登(陕)字第011号

地球物质研究

谢鸿森等 译

◆

西北大学出版社出版发行

(西安市太白路)

新华书店经销

西安市委党校印刷厂印刷

◆

787×1092毫米 1/32开本 印张: 4 字数: 89千

1991年10月第1版 1991年10月第1次印刷

印数: 1—1,000

ISBN7—5604—0281—x/p·17 定价: 2.50元

目 序

这个小册子的书名叫作“地球物质研究”。地球物质是并不常用的名词，但对地球物质的研究很可能反映在今后若干年地学诸分支领域受到关注和发展较快的综合学科中。

首先，此书的来历颇不寻常。它是由美国科学院、美国工程学院和美国医学科学院三个单位著名成员组成的国家研究委员会（National Research Council）的领导授权，委托一些地学权威写成的。在写成后曾得到正式的同行评议和委员会领导的赞许。在美国，这三所科学院和国家研究委员会都具有就科技发展问题向美国政府提出咨询的义务。

这一书的出现形式也非同一般。它是由四十多位权威学者，如Prewitt, Ernst, Depaolo等经分组多次讨论完成。篇幅不长，却凝聚了造诣很深的一批专家的心血和精辟见解。

小册子指明地球物质研究领域当前的三大主要课题：

一、地幔对流；二、流体运动；三、大陆演化，并分别阐述了它们的概略内容。从科学发展出发，作者对涉及地球物质研究的地球化学、岩石学、矿物物理和岩石物理四门学科的领域、重点、方法、趋势、理论作了相当锐敏的剖析。这一部分虽以书的附录形式出之，但却是应当引起人们注意的。

本书十分关注地球物质的研究手段和对象，以较大篇幅讨论了四种新的测试仪器方向和三种取样方式。

总之，书的内容新颖、中肯、带启发性，使人深思。对地球物质研究感兴趣者不妨读读、想想，再议一议。

涂光炽

1989.9.7.

前 言

地球物质研究这一课题最早是在1984年5月在美国辛辛那提召开的美国地球物理协会 (AGU) 会议上提出的。会上一些与会者对这一问题表示了关注。他们认为在致力于地球物质研究的地质学家之间缺乏合作性研究。同年11月在莱诺召开的美地质学会会议和12月在旧金山召开的美国地球物理协会会议上提出了召开有关专题讨论会的建议, 且对地球物质科学研究的现状以及在国家研究委员会帮助下组织一个专题讨论会的可能性进行了公开的讨论。会议邀请出席会议的科学家们向地球科学部提供有关地球物质研究中的重大问题和研究目标的书面材料。共收到32份材料, 这些材料对于制定和实施专题讨论会的计划都是很有价值的。

为了进一步落实专题讨论会的目的和要求, 地球科学部指派了一个专门小组来完成这项工作。该小组列席了1985年春天在巴尔的摩召开的美国地球物理协会会议, 进而促成了地球科学部设立了这一项目。国家研究委员会执行委员会批准了该项计划指定了筹备委员会。筹备委员会制定了专题讨论会的计划和目的以及会议报告。这个专题讨论会的最初目的, 是要把从不同侧面进行地球物质研究的地球科学家们组织在一起, 共同商讨应怎样组织全美的力量来完成以下方面的工作。

1. 充分利用物理学家、化学家和材料科学家在地球物质研究方面已获得的成果。

2. 更好地发挥现有设备的作用。

3. 抓住主要目标并发挥研究工作的首创性。
4. 鼓励开展协作性研究。
5. 商讨如何创建和利用物质特性数据库。
6. 对从事地球物质研究的人员的素质和人数进行评估。

7. 提出一个完成专题讨论会各项建议的计划。

以上各项中，专业人员被认为是一个重要因素，但已超出了专题讨论会的主要范围；另外，目前还没有有关人材资源这方面的材料。

专题讨论会于1986年4月24—26日在弗吉尼亚艾尔利召开。除了全体会议外，还召开了几次与学科有关的讨论会。会上成立了4个小组，它们分别为：地球化学、岩石学、矿物物理和岩石物理小组。除了在全体会议进行交流之外，还鼓励这些小组在研究工作方面相互协作。这些小组分别编写了本报告的附录。本报告的主要部分是会议筹备委员会在各小组会议讨论结果的基础上编写的。

目 录

前言

总述	(1)
----	-----

一、引言	(4)
------	-----

二、地球物质的物理和化学研究	(6)
----------------	-----

1. 地球内部的地球物理	(9)
--------------	-----

2. 地球内部的地球化学	(10)
--------------	------

3. 结构特征	(11)
---------	------

(1) 矿物学特征

(2) 集合体特征

4. 相变	(13)
-------	------

(1) 固—固相变

(2) 固—液相变

5. 磁性	(16)
-------	------

6. 表面、界面和集合体	(18)
--------------	------

7. 流体—固体体系	(20)
------------	------

三、地球及其物质的性质	(20)
-------------	------

1. 地幔对流	(20)
---------	------

2. 地幔的不均匀性	(22)
------------	------

3. 物质的动移	(23)
----------	------

(1) 岩浆作用

(2) 流体流

4. 大陆克拉通的成因和演化	(26)
----------------	------

四、地球物质科学的研究方法	(27)
---------------	------

1. 小组研究	(27)
---------	------

2. 大组(合作性)研究	(29)
--------------	------

五、今后的研究方向..... (31)

1. 建议..... (32)

2. 仪器设备..... (33)

(1) 同步辐射加速器

(2) 高压、高温大腔体技术

(3) 显微分析仪器设备

(4) 加速器质谱

3. 样品..... (38)

(1) 全球性样品

(2) 详细的取样

(3) 高质量样品

六、结论..... (41)

附录A 地球化学..... (43)

附录B 岩石学..... (54)

附录C 矿物物理..... (81)

附录D 岩石物理..... (99)

总 述

在物理学和化学发展水平上,开展全国性地球物质研究是非常现实和及时的。为了进一步了解地球及其动力学问题(其中包括控制地壳和地表物质迁移和分布的主要作用过程),促进了地球物质研究的发展。组成地球的物质的物理、化学性质控制了上述过程,因此地球物质的研究对于我们进一步了解地球的演化过程是至关重要的。由于仪器设备和计算技术的飞速发展,使新的实验方法、高的分析灵敏度和精确度的分析技术,以及新的理论能应用于地球物质的研究。因此在未来10年中,可望取得大的进展。

虽然本书主要强调了地球物质特性的研究在了解地球内部作用过程中的意义,但总体来说把那些对于了解地表作用过程,如碳氢化合物的迁移和聚集、矿产利用、废物处理、地下水运移及与工业和技术有重要意义的物质特性研究也包括在内。

地球物质的研究对于解释其它几门重要学科的研究成果将起关键的作用。地球物质研究不仅是地质、地球物理和野外测量的依据,而且也具有实际应用的价值,如地球资源的估价、自然灾害的预报等。

加速地球物质研究所获得的重大进展,可从以下三个重要的研究课题得到例证:

(1) 在整个地质历史过程中地幔对流是板块运动、火

山和地表活动以及地壳地幔物质再分配的驱动力。喷发岩浆的同位素组成的系统特征有利于研究地幔对流与时间的关系。如果采样合理,分析可靠,就能够使用同位素、化学和物理性质的有关资料去阐明地幔对流体系的特点,增进我们对地球热化学演化过程的了解。

(2) 通过熔融、侵入、交代、变质以及成矿作用,使流体发生迁移,进而使地壳和地幔物质进行重新分配。流体也会影响岩石的各种性质,包括地震波速、岩石电阻率、岩石强度和渗透性等。

(3) 论证大陆的演变特征是一个全球性的课题。现在已对许多地区开展了年龄、成因、结构等方面研究,但它们无法代表全球性的地壳特征。广大地区还没有进行过现代化技术手段的研究。在没有能够代表全球性大陆物质的精确资料的情况下,是不可能真正了解大陆的成因的。这就需要开展一个协作性基岩样品取样计划,包括年轻的火成岩、沉积岩和变质岩的取样。这样的计划可能需要在国际范围内合作进行。

建 议

果为了发挥我们的积极性并加速地球物质的物理和化学的基础性研究,委员会提出了两个主要建议:

(1) 增加经费以改善现有的实验和分析设备并提高它们的使用率,研制和应用新的实验和分析技术,加强实验和分析结果的解释。

以下4种专门的实验分析技术应加以研制并扩大其使用范围:①同步辐射加速器技术,②高温高压大腔体实验技

术, ③就地显微分析设备与技术, ④加速器质谱。

几项新技术的出现和发展, 使地球物质的分析和特性研究得以在与地球内部相近似的极端高温高压条件下进行。可控高温高压及不同化学条件的实验使地球模型中所需的几项基本参数的测定得以实现。分析技术的发展使科学家们在各种条件下测定合成物质和天然物质的物理化学性质。随着现代理论的发展, 这些新技术为我们进一步了解整体地球并确定其内部的基本特征提供了许多良好的条件。

(2) 建议制定一个地球物质研究所需样品的收集、合成、分配和分析的统一计划。其中包括了: ①协同努力以获得适当的固体、液体和气体样品; ②研制和使用实验室设备以便合成出重要的矿物、岩石和它们的相似物; ③加强样品管理及资料的交流。

要想更好地了解地球演化的最主要障碍是缺乏适当的矿物和岩石样品。这里要强调的是, 为了揭示地球内部演化的特征和历史, 应确定岩石及岩石源区的变化特征。某些特殊问题或某些作用过程的研究需要在局部范围内广泛取样。如流体流动性质以及流体与母岩作用的研究。

此外, 还需要高质量的, 其特征研究很详细的样品。这就必须进行某些矿物单晶和多晶集合体的人工合成。这些样品对于实验室测定物质的物理和化学性质十分重要。如 MgSiO_3 的铝钛矿结构相, 在地表条件下不稳定, 但它可能是地球内部的一种重要组分。

一、引言

将物理学和化学的理论和实验方法应用于地球物质的研究已经成为当前地球科学最迫切和重要的任务。这样强调的目的在于阐明地球内部的性质及其动力学问题以及更深入地了解控制地壳和地表物质分散、运移的重要作用过程。由于仪器设备和计算技术的飞速发展，使新的实验方法、高灵敏度和高精度的分析技术及理论上的新进展都能应用于地球物质的研究上。因此，我们期待在下一个10年里，地球物质的研究能获得相当大的进展。

地球物质研究除增进我们对地球作用过程的了解以外，对于一系列社会问题和技术进步也有重要意义。了解地震和火山喷发机制，矿产、矿物燃料、地热资源的勘探与开发，有害废物的安全处理，以及新的高科技材料研制和生产都与目前正在兴起的地幔物质科学的发展直接相关。例如，详细了解水和其它流体是如何渗入岩石的将增进我们了解矿石是怎样形成的，石油是怎样聚集的。这些知识对于自然资源的发现和提高开采效力也是很重要的。

地球物质研究有特别广泛的研究对象。基于这种广泛性，本讨论会把注意力集中到地球物质研究与某些学科之间的交叉性研究上，这些学科包括岩石学、地球化学、矿物物理、岩石力学等困难的学科。还有几个重要的研究领域在讨论会上没有加以强调，但它们与地球物质研究有着密切的关

系，如风化作用和表生过程、烃的迁移和聚集、矿产利用、废物处理和地下水活动、以及利用沸石作化学催化剂等。研讨会讨论的重点是地球物质研究对于解决许多重大地球科学问题的重要性，例如对地幔对流、流体运动以及大陆演化等研究的贡献。

最近召开的会议和出版物表明，地球物质研究已成为地球科学研究中一个令人振奋的领域。从事不同学科研究的科学家们以前从未合作过，但现在越来越多地结合在一起，进行有关地球物质基本特性和行为的协作性系统研究。这并不是一个孤立的现象，因为象日本、苏联等技术发达的国家在该研究领域也一直是十分活跃的。因此，地球科学的理论和应用分支学科的快速发展，迫切需要有关地球物质研究方面的资料以促进这些学科的研究。

材料和材料性质的研究是物理学、化学、生物学和各种工程研究领域的重要组成部分。许多大学建立了材料科学系，并已得到迅速的发展。但是，对地质物质的研究却未给予足够的重视。一般只作为某些地质学的课程，如矿物学、岩石学、有时还有结晶学的部分内容作一般性描述。许多学习地球科学的学生对矿物和岩石的物理、化学性质，如磁性、热导性、电导性、光谱特征、扩散率和流变学都缺乏一定深度的了解。由于对地球物质方面的知识贫乏，因而造成了一种非良性循环。结果对岩石或矿物与大范围的地质现象之间的重要关系往往无法认识。然而，对材料科学的许多重大贡献却是由地球科学家做出的。其中特别引人注目的是，关于矿物结构的研究，例如对石榴石、尖晶石、钙钛矿、石英和沸石结构的研究有着重要的工业和材料应用价

值。此外，材料科学的发展促进了电子探针技术的发展，金刚石压腔的发明和发展，各种材料的合成技术，包括氧逸度的控制，液相和玻璃结构测定等方面的进展，以及矿物谱学的发展。随着地球物质及其特征研究的进一步深入科学家们在材料研究方面将会取得更大的进展。

当前，地球科学生气勃勃，给人们提出了大量的基本问题，但同时也提供了广泛的机会。板块构造问世、行星探测的成功、新的仪器设备分析鉴定能力的改善和一些新的重大研究计划，如大洋和大陆钻探、地表剖面勘测、全球地震网络、大陆地球物理测量使地壳、地幔、地核的研究成为可能，这在以前是不可想象的。而地球物质研究在解释这些重大科学研究成果方面起了关键的作用。特别应指出的是，地球物质研究为探讨固体地球的特征（根据晶体结构、成分、热状态和动力学过程）提供了独特的数据。该领域不仅为地质学和地球物理学的理论奠定了基础，而且在某些实际应用中（包括地球资源的评价，自然灾害的预报）也是必不可少的。因此科研机构、工业部门和国家实验室对于地球物质的研究都应给予更大的重视。

二、地球物质的物理和化学研究

对地球物质及某合成材料的研究对人类社会进步是十分重要的。例如，从最古老的制陶术所使用的原料发展到今天将沸石作为催化剂就是一个佐证。人类生存依赖的所有原料都来源于地壳和地球内部。此外，了解构成地球物质的物

理和化学性质也是了解各种地质过程的先决条件。

地球是一个活动的行星。在地质时标上表现为大陆的运动、山脉的形成和破坏、矿体的形成等。在人类演化时标上，我们看到的是上述过程所产生的影响，如地震、海啸、大陆滑坡和热泉等的产生。

理论和实验技术的进展使我们能够在实验室中测定地球物质在各种变化的物理化学条件下的行为。例如，岩石中产生粘滞流体所需的应力，或发生某种特殊反应所需要的温度和化学条件，都可以由各种矿物、岩石及其合成产物进行系统的测定。当确认在自然界有类似的效应出现时，就可能了解下述地质作用过程，如所受的应力、所需能量的大小和来源，以及作用过程的时间等等。

矿物是所知最复杂的无机物之一，矿物构成了地球，也构成了生命物质的硬组织。虽然人们在研究地球物质方面表现了极大的兴趣，但要了解他们的性质也同样是很困难的。尽管如此，我们已能够从原子的角度，根据键能和几何构形特点去解释在实验室测量得到的各种物理和化学性质。根据原子理论所得到的认识就有可能进行人工合成类似物质和全新的物质，而这些人工合成材料有着广泛的应用价值，例如人工合成金刚石和用作固体激光材料的石榴石。在这种意义上，地球物质的研究与材料科学、凝聚态物质物理和化学有密切关系。研制新材料（包括新的陶瓷和合金，它们具有预料不到的技术应用价值）的发展前景是十分广阔的。最近发现的高温超导材料就是一个绝好的实证，这些超导材料的结构与钙钛矿型矿物有关，而钙钛矿型矿物在地球中又极为丰富。

然而与材料科学、凝聚态物质物理学和化学不同，地球物质研究在空间和时间上涉及的范围大大超出了人们所经历的范畴（见图1）。在研究地质作用过程中，时间尺度比实验室所达到的最大值大4—10个数量级，而空间尺度比实验室大7个数量级。这个尺度范围与天文物理相似。把实验室所获得的关于地球物质的实验和理论认识进行极大的外推有助于了解各种地质作用过程。

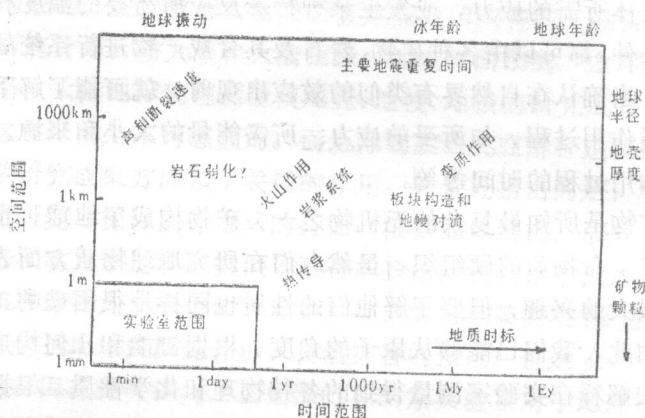


图1 地球物质研究的时、空范围

地质学研究表明，在极端漫长的时间和特别大的范围内地球物质的习性与它们在实验室的特征大不相同。例如，小块岩石样品的强度能够精确地测定出来，但在大陆的尺度范围内，这些岩石却显得十分脆弱。同样，我们每天所见到的岩石都是固体物质，但在地质时标上，固体地幔表现出流体的性质并有对流发生。这种对流作用是使行星深部热能丢失的最有效过程。虽然热能通过固体岩石传导出去，但是岩石

内部的构造流却提供了更为有效的全球热迁移方式。地幔对流与全球性主要火山和地震活动带的出现，以及大陆的形成和运动有着密切的关系，它决定了行星体包括地球、月球、火星等的长期演化过程。

1. 地球内部的地球物理

研究地球物质的一个重要目的是确定地球深处的性质。有关地球深部信息的唯一来源是地震学。但是依据温度、压力和成分资料来解释地表观测结果则需要透彻了解整个地球各处多种条件下矿物和岩石的性质。目前根据地震资料对地壳、地幔，地核结构所作的最新观测则需要对地球物质的物理化学性质的认识达到一个新的水平。

在估算整个地球内部的密度、温度和成分的平均值方面已取得了相当大的进展。当人们认识到地球是一个具有动力学行为的行星时，其研究兴趣就会转移，由研究物质的性质变化转变为研究不同深度物质成分和温度的变化，而不是只考虑它们的平均值。高分辨率地震资料能够定量地揭示地球内部各处物质物理性质的横向变化，从而对实验室测试手段的精度和准确度提出了更高的要求。与地球半径方向的变化相比，横向变化是较微弱的，但就是这种横向上的差别导致了地幔对流并产生了板块构造旋回。具体而言，在某一深度地球物质密度的不均匀性造成了物质运动，最后导致板块构造的发生。相对于不太致密的岩石而言，致密的岩石会向下沉降，而密度的变化是否是由温度、成分或其它性质的差异造成的呢。为了从根本上了解造成地球内部流体运动、岩石圈的变形破裂、热量散失的原因，我们必须了解地壳和地幔不