

地球化学原理

[美] B·馬遜 著

陈浩疏等译

中国工业出版社

地球化学原理

[美] 卡·瓦·弗鲁格

曹树基等译

中国地质出版社

56.6
445

地球化学原理

(美) B·马逊著

陈浩疏等译

200/60

中国地质出版社

本书系根据美国1958年出版的B·馬逊著的“地球化学原理”一书第二版譯出。全书共分11章，是作者依据他在大学讲課的讲义写成的，对地球化学一般問題的各个方面均作了叙述，是資本主义国家所出版的地球化学教科书中比較优秀的一本著作。书中有不少新的資料可供我国地质院校教师及学生参考。

本书第一章由赫祥安譯，第六章由王东坡譯，第十章由尹宗烈譯，其余各章由陈浩疏譯。全书由郭承基审校。

BRIAN MASON
Principles of Geochemistry
NEW YORK, JOHN WILEY & SONS, INC.,
LONDON, CHAPMAN & HALL, LIMITED,
1958

* * *

地球化学原理

陈浩疏等譯

*

地质部地质书刊編輯部編輯（北京西四羊市大街地质部院內）

中国工业出版社出版（北京东胡林路10号）

（北京市書刊出版事业許可証出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $9 \frac{1}{8}$ ·字数239,000

1963年6月北京第一版·1964年6月北京第二次印刷

印数2,161—4,020·定价(科七)1.50元

*

統一书号：15165·2195(地质-225)

原 序

本书系根据在新西兰大学坎特伯里学院以及后来在印第安纳大学和哥伦比亚大学所讲授的讲义扩充编写而成的。这些讲义不仅指导过学地质的学生，而且也指导过学其他学科的，特别是学化学的学生。本书目的在于概括与地球化学有关的重要事实和概念，和综合这些论据使之成为对地球的物理和化学的发展的一个合理解释。要达到这一目的有很多困难——从许多方面收集资料并对这些资料加以评价；对显然互不相关的现象进行解释并比较；用逻辑的方法对材料加以介绍均有困难。本书内容大部份系采用在印第安纳大学所讲授的同一题目的半学年课程。

本书从描述地球化学的范围及其发展这一章开始，次一章则论述做为一个行星的地球及其对太阳系和整个宇宙的关系，然后跟着以一章讨论地球的內部构造及其组成。根据这两章所介绍的资料解释诸元素及诸同位素在地球和整个宇宙内的相对富度，根据这种证据企图对地球可能的前地质史作一逻辑的说明。前几章的目的系对本书的其余部份，即论述在地表及地表附近的物质与作用的部分提供一种背景。由于地球化学在很大程度上是对于地球上和地球内所进行的各种作用的物理化学原理的应用，所以下一章对这些原理，特别是关于固体状态的化学作某些说明。然后是论述火成岩的地球化学，接着一章是沉积作用与沉积岩。以后各章则依次论述水圈、大气圈和生物圈的地球化学。水圈的地球化学本质上是海水的地球化学，并提出像海洋的起源方式与发育那样的基本问题。大气圈的地球化学论述原始大气圈的性质及其通过与水圈、生物圈及岩石圈的相互作用所遭受的变化。生物圈的地球化学包括有机物质的数量的讨论、生物圈的组成及有机体对个别元素的富集和沉积的作用。然后接着一章是变质作用与变质岩，最后一章是有关地球化学旋迴的一个简短摘要和综合。

07220

全书中所提到的温度，除特别指明者外，均以摄氏度数表示；吨数则以公吨（1000公斤）表示。

全书重点与其说是描述，毋宁说是解释——对尚需研究的和已知事物的解释。著者假定，读者是精通地质学的基本概念及物理学和化学原理的，并对这些学科的著名的著作是熟悉的。虽然本书主要是从地质学者的观点来编写的，但著者希望本书对为地球的基本问题所吸引的化学家和物理学家也将是有趣的和鼓舞的。这些地球的基本问题只有由许多方面的工作者共同努力才能解决。在我们的知识和理解方面目前存在着很大的缺陷，即使是简单的检查便可看出缺乏完全可行的研究工作，这些研究工作有助于减少这些缺陷——而且也可以暴露目前尚未发现的其他缺点。目前迫切需要大量精确的、有关地球物质的化学和物理资料，对于这些资料，地质学家则依靠化学家和物理学家。

本书当然是根据多方面的材料来编写的，这些材料不仅包括已出版的书籍与论文，而且也包括许多人的通讯与谈话。著者和他的同事们在讨论本书所介绍的许多概念时得到过很大的帮助。著者特别感谢阅读过本书第一版原稿的J·维尔胡根教授以及阅读过第二版原稿的G·J·华沙堡教授和S·爱泼斯坦教授；他们的评论和建议帮助最大。

由于地球化学的参考文献非常分散，所以每一章都附有一份经过选择的书目。这些参考文献的选择看起来似乎是任意的；其实，选择时包括了很多教科书、最近的重要论文（特别是通常不为地质学家们所参考的杂志中的论文）以及许多评论文章。杂志及期刊的缩写是根据化学文摘写的。目的是希望读者能从这些书目中找出自己最有用的参考文献，而当他有兴趣时，可以继续对参考文献作进一步的研究。

自本书第一版出版以来的六年中，由于地球化学方面的大力研究，结果增加了大量的资料，同时在概念上和理论上也得到巨大的发展。特别显著的是，岩石年龄测定技术的提高，对地球内部的性质和组成引起了强烈的兴趣（以及在实验室中对以前不能

达到的温度和压力下相变的研究），对地质材料中次要元素和痕跡元素的大量工作，以及同位素地球化学的发展等。这个时期也成立了一些专门学会，其中地球化学学会是在1955年成立的，该学会在成立的第一年就拥有会员近1500名。地球化学的重要性及应用已获得广泛的承认。

在这种情况下，“地球化学原理”的修订本就变得很有必要。第一版中的许多数据已被更可靠的数字所代替，而对这门学科的理论基础则作了附带的扩充。虽然修订本保持原书的编排，但细节上的改变却不少。在第二版中，为了把更多的资料合并成简明的形式，所以图表的数目，特别是图的数目已大量增加。附于每一章之后的书目已全部改订，以便把新的资料来源包括在内，而把其他的大部分已被编入较新的著作中的那些参考文献加以删除。

B. 馬遜

1958年1月于紐約

目 录

原 序

第一章	緒論	1
第二章	地球对宇宙的关系	7
第三章	地球的构造及其組成	27
第四章	热力学和晶体化学	63
第五章	岩浆作用与火成岩	90
第六章	沉积作用与沉积岩	144
第七章	水圈	183
第八章	大气圈	198
第九章	生物圈	214
第十章	变质作用与变质岩	237
第十一章	地球化学旋迴	272
附录 I	原子量和离子半径	283
附录 II	地质年代表	285

第一章 緒 論

地球化学的含义 简单說来，可以把地球化学解释为研究整个地球及其各个組成部分的化学的一門科学。同时这門科学不仅比地质学更为严谨，而且范围也更为广泛。地球化学是研究地球內化学元素在空間上和時間上的分布和迁移。关于整个宇宙中化学元素的发生和分布的科学則叫做宇宙化学。

克拉克在其所著的“地球化学資料”一书中，以較严谨的方式来闡明这个問題：“就目前的目的來說，每一种岩石都可以认为是通过各种作用能够发生各种化学变化的化学系統。每一次的变化都意味着平衡的破坏，最后形成一个新的系統，它在新的条件下又变得稳定。研究这些变化就是地球化学的范围。地球化学家的职责就是要决定那些变化是可能的；它們是怎样发生和在甚么时候发生的；观察随着变化而来的現象；以及注意这些变化的最終結果……。从地质学的观点来看，地壳是主要的研究对象；而在地壳中所发生的反应則可以分为三类：（1）地球本身主要成分之間的反应；（2）由地壳的水圈所引起的反应；（3）由大气圈的营力所产生的反应”。

戈尔德史密斯（1954）以下面的話来描述地球化学：

“地球化学的主要目的，一方面是从量上确定地球及其各部分的組成，而另一方面是发现支配各种元素分布的規律。为了解决这些問題，地球化学家需要对地球上的物质如岩石、水和大气等的分析資料作广泛的蒐集；同时也应用隕石的分析資料，其他天体的組成的天文物理資料，以及有关地球內部性质的地球物理資料。許多有价值的知識也由合成矿物的实验以及它們形成的方式和它們稳定条件的研究而获得”。

因此地球化学的主要任务可以概括如下：

1. 确定各种元素及諸原子种类(同位素)在地球中的相对富

度和絕對富度。

2. 研究各个元素在地球的不同部分（大气圈、水圈、地壳等）以及在矿物、岩石中的分布和迁移，其目的在于发现支配这种分布及迁移的規律。

地球化学的历史 地球化学主要是在本世紀发展起来的；可是，把从事地球的化学作为一門独立学科却是一个旧的概念，而“地球化学”这个名詞是瑞士化学家圣拜恩（Schönbein）（臭氧的发现者）在1838年提出的。第一次計算元素在地球中的富度是在一百多年以前由杜伯賴納（Döbereiner）所作的。这种計算当然是比智慧的猜測好不了多少。到1850年即已获得一大批基本資料，主要是有关矿物和岩石的組成方面的資料，其中許多資料是瑞典的伯奇里亚斯（Berzelius）及其学派的工作成果。德国地质学家及化学家比紹夫（Bischof）在其1847—1854年首次出版的“物理及化学地质学教科书”中企图对这些資料加以整理和解释。这本书多年以来一直是一部优秀的作品，至19世紀末遂为罗斯（Roth）所著的并于1879—1893年出版的“普通及化学地质学”一书所代替。

在整个19世紀中，地球化学資料主要是普通地质和矿物研究的副产品，并包括构成地球各个易于获得的部分中的各种单位——矿物、岩石、天然水及气体——的較多和較好的分析。許多年来，这种工作大部分是在欧洲的實驗室中进行的，但由于1884年美国地质調查所的成立并任命克拉克为总化学师，于是一个專門对地球作化学研究的中心便在美洲大陆建立起来了。美国地质調查所的地球化学工作由那时起，一直在繼續进行着，到目前为止，这种工作在所內成为一个独立部門；它可能是目前美国地球化学領域中最大的研究机构。

过去近百年来，地球化学的研究大部分与易为肉眼观察的地球上各个部分的分析和化学分析相类似。它对事物的本质还是无能为力的；从一大堆实际知識中創立的原理，即理論地球化学还有待于基础科学，特別是物理学和化学的发展。举一个简单的例

子就可以說明这种情况：在发现X-射綫的衍射对决定固体中原子的排列提供了一种方法以前，充分地說明硅酸盐矿物的地球化学的一切嘗試都失敗了。

1905年华盛頓卡尼基研究院建立地球物理實驗室，該室所遵循的方針是在控制的条件下仔細地进行实验，并把物理化学原理应用到有关的地质作用中。以前的大多数地质学家和化学家对于把物理的和化学的技术及原理应用到像地球上及地球內那样复杂的作用中去的可能性一直是怀疑的。

与地球物理實驗室在华盛顿开始工作的同时，另一个新的地球化学学派在挪威成长起来了。由弗格特和勃罗傑(J.H.L.Vogt and W.C.Brögger)所創始的这一学派由于戈尔德史密特及其同事們的工作而知名于全世界。戈尔德史密特1911年毕业于奥斯陆大学，他的博士論文“克瑞斯强地区的接触变质作用”对地球化学是一个基本的供献。它应用了最近为茹齐布(Roozeboom)的工作所法典化了的相律去解释由灰岩、泥灰岩、頁岩經過接触变质作用所产生的矿物变化，并証明这些变化可以用化学平衡原理来解释。其后十年中，他专心从事岩石变质作用的类似研究。这些研究激起了斯堪的納維亞其他国家的类似的研究工作，最后終於导出埃斯科拉(Eskola)的“矿物相”原理的发表，这篇論文是由戈尔德史密特的實驗室出版的。

从許多方面看来，1912年可以认为是地球化学发展的临界时期，劳埃 (Laue)在那一年証明了晶体中原子的規律排列对X-射綫起衍射光栅的作用，这个发现使确定固体物质的原子构造成为可能。由于地球化学家主要是探討固体的化学，所以这一发现的意义是无可估計的。然而，这一新的发现在經過了許多年以后才应用到地球化学中。1924年出版的克拉克的“地球化学資料”对这一发现并未提及。戈尔德史密特的貢獻在于，他不仅認識到晶体构造的鑑定对地球化学的意义，而且也制訂了研究計劃，从而以最短的时间取得最大的成果。在1922年至1926年間，他和他的同事們在奥斯陆大学解决了許多化合物的构造，因而为

寻找支配着元素在结晶物质中分布的一般规律建立了广泛的基础。这些结果以题为“元素的地球化学分配规律”的一系列文章发表，虽然标题如此，但其中大部分是讨论无机化合物的构造的。在这些刊物中，戈尔德史密斯的名字和巴兹 (Barth)、查卡里森 (W.H.Zachariasen)、湯馬森 (L.Thornassen)、隆德 (G.Lunde)、奥福特达尔 (I.Oftedahl)，以及其他等人联在一起，他们的事业在当时早已闻名了。

1929年，戈尔德史密斯离开奥斯陆前往古丁根，在那里他开始应用了前几年所发现的原理和最近才发展起来的高精密度的快速测定若干元素的微小含量的定量光谱法来进行个别元素的地球化学研究。这些成果在1937年伦敦化学学会第七次的雨果·穆勒 (Hugo Müller) 讲座“化学元素在矿物与岩石中的分布规律”中充分地加以概括了。由于德国的情况^①，戈尔德史密斯于1935年返回奥斯陆。遗憾的是在1940年法西斯德国侵入挪威以后，他便不能作甚么工作。1942年他被迫逃出挪威到波兰以避免放逐，然后逃往瑞典，再从瑞典到英国。由于在挪威集中营被禁锢的结果，他的健康受到了严重的损害，以后从未得到康复，故于1947年在短寿的59岁逝世了。

由于戈尔德史密斯的工作和鼓励，在过去的三十年中地球化学从散漫的实际资料的收集发展成为一门理论的科学，它的基础是地球化学旋迴的概念，每一种元素都根据已确定的原理在这种旋迴中起作用。地球化学的推想已扩大到地球的易于接近的部分以外而及于地球内部的性质和构造方面，以及整个地质年代中地球的发展，最后并扩大到地质史前的情况和整个太阳系的历史。

特别是在1917年以来，一个重要的地球化学学派在苏联发展起来了。这个学派最伟大的人物是维尔纳茨基和他的年青同事费尔斯曼。这个学派的作品是大量的，包括费尔斯曼在1933年至1939年出版的四本巨大的地球化学著作。遗憾的是，所有这些文

① 法西斯希特勒当政之后。——译者注

献实际上都是俄文的，因而未能广泛利用，近来更增加了限制。苏联的地球化学，特别是在指导矿物原料的寻找和勘探方面显然获得了巨大的成就。

地球化学文献 地球化学的事实、理论和幻想广泛地散布在所有的科学文献中。这些资料的第一种来源自然是各种地质刊物，但它们为数甚多，而且在任何一种刊物中都可以找到地球化学的文章。化学的刊物当然也有许多具有地球化学意义的文章，而且有时出现经典的材料，例如1925年法拉第学会 (Faraday Society) 出版的题为“火成岩形成的物理化学”的研究录就是。幸运的是，化学文献通过文摘是可以比较容易获得的。天文学，生物学和物理学的文献也给地球化学家带来了重要的资料。直到最近还没有地球化学的专门期刊（德文“地球的化学”期刊主要是研究岩石学和矿物学的）；“地球化学与宇宙化学学报”的出版已经改变了这一情况，这是在一个国际编辑部领导下，在英国出版的一种期刊。虽然这个刊物能吸收许多专门性的地球化学文章，但是具有地球化学意义的资料会继续在矿物学、岩石学、经济地质学、无机化学和物理化学以及其他科学的刊物中作为附带的材料出现。

下面三部专著是地球化学领域内的优秀参考书。第一部是1924年版本的克拉克的“地球化学资料”。它仍然是最易应用的地质材料的分析资料的蒐集，仅就这一点来说就是一部重要的著作。此外，它还辑列了大量的文献，其中有許多仍然是有意义的。第二部是蓝卡玛和萨哈玛 (Rankama and Sahama) 在1950年出版的“地球化学”。这本权威的和流行的著作不仅讨论了地球化学的一般情况；而且对每一种元素的地球化学也加以详尽的叙述。第三部是V·M·戈尔德史密斯所著的“地球化学”。戈尔德史密斯在1947年逝世时已为这部著作准备了大量的手稿，而且由于A·穆尔 (A. Muir) 博士的慎密的编辑工作以及其他的人对散失

部分的寄贈，使本書終於在1954年出版。雖然這部著作在範圍方面與藍卡瑪和薩哈瑪的“地球化學”相類似，但是它表現出戈爾德史密特把大量互不相干的敘述加以聯系的高度概括的天才。

参 考 文 献

- CLARKE, F. W. (1924). The data of geochemistry (fifth edition). *U. S. Geol. Survey Bull.* 770. 841 pp.
- GOLDSCHMIDT, V. M. (1954). *Geochemistry*. 730 pp. Clarendon Press, Oxford, England.
- GREEN, J. (1953). Geochemical table of the elements for 1953. *Bull. Geol. Soc. Amer.* 64, 1001-1012. This is a very useful compilation of, up-to-date geochemical data, compactly presented on a large periodic table.
- RANKAMA, K., and TH. G. SAHAMA (1950). *Geochemistry*. 912 pp. University of Chicago Press, Chicago.

第二章 地球对宇宙的关系

宇宙的性质 地球是太阳系以内的一个单位，太阳系由太阳、行星及其卫星、小行星、彗星和隕石所組成。太阳本身只是銀河系以内的一个星体，銀河系大概包括 10^{11} 个以上的星体，并且具有一个直径約为70,000光年（1光年 $\approx 10^{13}$ 公里）的透鏡般的形状。在銀河系以外尚有很多大小差不多的其他的星体系統。这些系統（河外星云）十分均匀地散布在太空中，离我們最近的是距离約为1,000,000光年的仙女(Andromeda)星云。这些河外星云的光譜显示譜綫向光譜的紅方移动，这种紅色位移大致与星云的距离成正比。紅色位移被认为是由于速度与距离大致成比例的星云的后退所产生的一种都卜勒效应(Doppler effect)，从而引起一幅宇宙膨胀的景象。宇宙膨胀說的大部分仍然是高度推測的；因此以这个学說作根据的結論也帶有推測的性质。

宇宙的年齡 膨胀的、动的宇宙学說意味着宇宙过去和現在都处于一种发展的状态。假如我們在時間上反过来往回推定，我們就得到宇宙被“縮小到一点”，或宇宙中所有的物质都被集中在一个很小范围时的状态。人們习惯于把这种状态作为宇宙的原始状态，并从这个时期来計算宇宙的天文年齡。利用有关膨胀率的某些假設，計算宇宙的天文年齡大約为 5×10^9 年。

宇宙年齡的一种不同的和独立的見解是由元素年齡的概念所提供的。基本的假設是所有元素差不多是同时（这是年代表上的零点）形成的，而且原始构造在以后被放射作用和热核子反应所改变。于是元素的年齡就从自然放射系列完全由母体元素（非放射性成因的“子系”元素可能存在）所組成的那个时期来計算。表1給出了作这种計算的重要的自然放射性系列。

有关元素富度的資料証明，原子序数大于40的元素其富度大致相等，这說明，無論形成的过程如何，复杂程度大致相同的核

子所形成的数量大致相同。因为半衰期为 4.5×10^9 年的 U^{238} 的富度与稳定元素铋和汞的富度大約相同，所以元素就不能在超过

地质时代計算的某些重要的自然放射性系列 表 1

母体元素	总半衰期	最終产物
U^{238}	4.5×10^9 年	$Pb^{206} + 8He^4$
U^{235}	7.1×10^8 年	$Pb^{207} + 7He^4$
Th^{232}	1.5×10^{10} 年	$Pb^{208} + 6He^4$
Rb^{87}	5.0×10^{10} 年	Sr^{87}
K^{40}	1.3×10^9 年	A^{40}, Ca^{40}

几十亿年以前形成,否則 U^{238} 将由于蜕变而大部份消失掉了。在另一方面,平均半衰期为 1.3×10^9 年的自然放射性的鉀的同位素(K^{40})的低富度証明, 这种核子的形成至少发生在几十亿年以前,使它有充分的时间大大地破坏。同样的理由可以說明 Np^{237} 和 Pu^{239} 的极端缺乏, 这些元素的半衰期分別为 2.25×10^6 年和 2.4×10^4 年。另一种独立的解释是由 U^{235} 和 U^{238} 的相对富度所提供的。如果这两种同位素当初形成时数量大致相等的話, 那末 U^{235} 对 U^{238} 的現在比率 (1 : 140) 乃系由于 U^{235} 的寿命較短所致, 較短的寿命使得它比 U^{238} 消失得更快。 U^{235} 的半衰期是 7.1

$\times 10^8$ 年; 因此, 要它的数量减少到 U^{238} 的数量的 $\frac{1}{140}$ 就需要

大約 5×10^9 年。 虽然这种証据受到元素的原始富度不确实所限制, 但却指出了可以把元素的年齡确定出一个同一的数值。这个年齡在大小的等級上与宇宙的天文年齡一致, 并意味着膨胀的开始和元素的形成是互相連系的。

其他的理論也支持我們所認識的宇宙是从几十亿年以前就开始的那种見解。因此在鉛的同位素($Pb^{204}, Pb^{206}, Pb^{207}, Pb^{208}$) 中, Pb^{204} 是不属于放射性成因的, 而它現在的数量應該与它当初形成时的数量相同; 其他的鉛的同位素有一部分大概是 原来的, 而有一部分是由 U^{238} , U^{235} 和 Th^{232} 的蜕变而来的。在含鈾而又含鉛的物质中, 鉛的同位素組成在地质年代中遭到了連續的变化; 放射性成因的鉛的同位素較之非放射性成因的 Pb^{204} 来

說，其相对数量已經增加。关于这一事实隕石給我們提供一種特別令人滿意的說明。不含鈾而有少量鉛存在的鉄隕石具有任何天然物质的 Pb^{204} 的最高的相对数量。含有数量上可以測定的鈾的石隕石，則鉛的存在証明是放射性成因的鉛比从鉄隕石中提取的鉛以极大的 Pb^{206}/Pb^{204} 和 Pb^{207}/Pb^{204} 的比率不断增加的結果。对資料的数学分析，計算出隕石的年齡为 4.5×10^9 年，这个数字已經被鉀-氬法測定石隕石的年齡而单独地証实。这是隕石母体自固結以來的時間，而且这个時間大概能够与太阳系的年齡相等。

关于宇宙年齡这个普通問題的另一種近似的見解是由地球上物质的年齡所提供的。对鉛的同位素組成随時間而变化的問題曾經对已知地质年齡的鉛矿石加以研究；正如所預料的那样，这种研究証明， Pb^{204} 与年代較新的矿石中的鉛的其他同位素比較，其分布量也是逐漸減少的。对数据的統計研究，为原始的鉛由于鈾和釷所产生的鉛的同位素的增加而开始变化的時間提供了許多独立的解釋。这些解釋表明数值十分集中于 3.5×10^9 年。因为这种数据是从地壳的标本上測定的，所以这个年齡就是地壳从层壳中分离的年齡。这显然是較地球在太阳系中作为一个独立体出現的為晚，地球的年齡大概最好是由隕石的年齡来决定，即 4.5×10^9 年。地球年齡与地壳年齡之間的这十亿年的間隔的意义在下一章中討論。

关于地壳最后固結的年齡为 3.5×10^9 年是通过一种或另一种放射性蛻變的方法以計算地壳中个别岩石年齡所得的可靠資料來証实的。到目前为止，最古老的岩石是南罗得西亚砾岩中的花崗岩砾石；这种砾石通过鉀-氬法的測定，其年齡为 3.3×10^9 年。对加拿大地盾砾岩中的花崗岩砾石作同样的測定，所得的年齡則为 3.1×10^9 年。根据对几个地区——加拿大地盾，南罗得西亚，西澳大利亚——的伟晶岩中矿物的測定，其年齡大約为 2.7×10^9 年，用鈾-鉛法，鋇-鋇法和鉀-氬法都获得一致的結果。原始地壳形成的時間和作为一个独立物体的地球的年齡必然要比这些