



地球化学

韩吟文 马振东 主编

常用ICP谱线
元素符号
原子量

地质出版社

高等教育面向 21 世纪课程教材项目
国家理科基地创建名牌课程项目

研究成果

高等教育面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

地球化学

韩吟文 马振东 张宏飞 张本仁

李方林 高山 鲍征宇

编

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本教材以地球系统的化学组成为背景,对地球化学的基础理论(晶体和物质结构化学、水溶液化学、热力学和动力学理论及同位素地球化学等)进行了集中的论述,并以地球子系统的特征结合对其中作用的分析,深化、扩展了对前述基本理论及其应用。最后在地球系统的整体上,讨论了地球层圈的相互作用和演化中各类地球化学作用的相互制约和综合效应。编写者本着以学生为本,对基本原理、定律、概念表述力求准确完整;精选实例进行辩证分析,问题讨论的依据和思路清楚,使本教材有一定的特色和启示性。本教材主要面对初学地球化学的本科生和研究生,也可供地球科学和相关学科的研究人员自学或参考。

图书在版编目(CIP)数据

地球化学/韩吟文,马振东主编. -北京:地质出版社,2003.7(2004.5重印)
面向21世纪课程教材
ISBN 7-116-03507-9

I. 地… II. ①韩…②马… III. 地球化学-高等学校-教材 IV. P59

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第053130号

DIQIU HUAXUE

责任编辑:王永奉 王 璞

责任校对:黄苏晔

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) 82324508(邮购部);(010) 82324572(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京朝阳区小红门印刷厂

开 本:787mm×960mm^{1/16}

印 张:23.75

字 数:465千字

印 数:3001—8000册

版 次:2003年7月北京第一版·2004年5月北京第二次印刷

定 价:24.00元

ISBN 7-116-03507-9/P·2243

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

前言

20 世纪 20~30 年代,地球科学大家族中诞生了一个新的成员,被称为“地球化学”。历经近 1 个世纪的艰辛探索,在化学、物理化学和地球动力学等学科发展的推动下,在现代科学技术的支持下,地球化学与相邻学科互相促进,学科的研究领域有了很大的拓展。20 世纪 70~80 年代,地球化学学科逐渐走向成熟,学科的性质发生了质的飞跃,由单纯研究地球和地壳等自然系统中元素的分布量及元素在各地质体中的分配、集中分散、共生组合和迁移规律,进入到对这些规律的化学机制研究;从重点关注资源的勘察开发,到全面对各自然系统中物质化学运动的热力学和动力学机制的研究;地球化学的研究方法正在逐渐实现从表象到本质、从微观到宏观、从定性到定量的转变;地球化学的理论不断完善。地球化学的理论、方法、技术已逐渐渗透到地球科学及其他相关学科的研究领域,并成为地球科学中重大基础问题——诸如地球的形成、生命的起源等研究中一个不可或缺的方面军。

在地球化学发展的不同阶段,国内外地球化学家编写了多种地球化学专著和教材,从 1960 年起,仅中国地质大学曹添、於崇文、张本仁、赵伦山等前辈就先后出版过四版《地球化学》教材。近 30 年来地球化学学科也取得了迅猛的发展,为适应 21 世纪地球化学教学的需要,中国地质大学(武汉)地球化学研究所决定由所有从事地球化学教学的教师合力编写新版《地球化学》。在完成分章编写后,张本仁院士统阅了初稿,对教材的编写思想、选材、编排等提出了系统、全面、具体、中肯的意见,赵伦山教授也给本教材的编写提出了许多宝贵的建议。

本书的各章分工如下:第一章由李方林、高山执笔,第二章和第三章由韩吟文编写,第四章由韩吟文、鲍征宇合作完成,第五章和第六章分别由马振东和张宏飞编写完成,第七章和第八章由韩吟文执笔,第九章由张本仁完成。全部书稿完成后由韩吟文、马振东统一校核和整理,并由韩吟文编写了绪论。

编写过程受到张本仁院士和赵伦山教授的悉心指导和鼓励,张本仁院士还倾心参与编写,在此向两位老师表示诚挚的谢意。本书图件全部由何建华清绘,贾先巧、侯广顺、侯青叶参加了部分文字的录入和修订工作,在此谨表谢意。

历经一年多的重编,本教材终于完稿,在书稿付印之时,我们仍心怀忐忑,这不仅因为时间所限、资料收集不全,难免挂一漏万,更因为我们的学术

水平有限，在地球化学学科迅猛发展的今天，对目不暇接的大量新成果缺乏足够的分析和驾驭能力。此书中的不足和欠妥之处，诚望读者批评指正。

尽管此书远非完美，仍愿将它献给希望了解地球化学和关注地球化学教学的人们。

编写者

2002 年 3 月

目 录

前 言

绪 论	(1)
0.1 地球科学与地球化学	(1)
0.2 地球化学的基本问题及定义	(2)
0.2.1 地球化学的研究思路	(2)
0.2.2 地球化学的基本问题	(3)
0.2.3 地球化学的定义	(5)
0.2.4 地球化学的学科特点	(6)
0.3 地球化学发展简史	(7)
0.3.1 地球化学学科的建立	(8)
0.3.2 现代地球化学及其发展趋向	(9)
0.3.3 我国地球化学发展概况	(10)
0.4 地球化学的方法论和方法学	(10)
0.4.1 地球化学的方法论	(10)
0.4.2 地球化学的基本工作方法	(11)
第1章 太阳系和地球系统的元素丰度	(14)
1.1 太阳系的组成和元素丰度	(14)
1.1.1 太阳系组成的研究方法	(15)
1.1.2 陨石的化学成分	(15)
1.1.3 行星和月球的化学成分	(20)
1.1.4 太阳的化学成分	(25)
1.1.5 星际物质和宇宙射线的化学成分	(25)
1.1.6 太阳系的元素丰度及元素的起源	(27)
1.2 地球的结构和化学成分	(30)
1.2.1 地球的结构和各圈层的成分	(30)
1.2.2 地球元素丰度	(35)
1.3 地壳的化学组成	(39)
1.3.1 大陆地壳化学组成的研究方法	(40)
1.3.2 大陆地壳的结构与组成	(44)
1.3.3 地壳化学成分和元素克拉克值的地球化学意义	(48)
1.4 小结	(51)
第2章 元素的结合规律与赋存形式	(54)

2.1 自然体系及自然作用产物	(55)
2.1.1 地球化学体系的特征	(55)
2.1.2 自然过程产物的特征	(55)
2.1.3 自然界元素结合的基本规律	(56)
2.2 元素的地球化学亲和性及其分类	(56)
2.2.1 元素的地球化学亲和性	(56)
2.2.2 亲氧性元素和亲硫性元素	(57)
2.2.3 亲铁性元素	(58)
2.3 类质同象	(60)
2.3.1 类质同象和固溶体	(60)
2.3.2 控制类质同象置换的晶体化学因素	(60)
2.3.3 类质同象置换法则	(62)
2.3.4 类质同象规律的意义	(63)
2.4 晶体场稳定能及其对过渡金属行为的控制	(67)
2.4.1 晶体场理论概要	(67)
2.4.2 晶体场理论对过渡金属元素行为的控制	(71)
2.5 元素结合规律的微观控制因素	(73)
2.5.1 决定元素结合的基本参数	(74)
2.5.2 硫化物类矿物中的化学键及元素的行为	(81)
2.6 元素的地球化学分类和元素的赋存形式	(82)
2.6.1 元素的地球化学分类	(82)
2.6.2 元素的赋存形式	(86)
2.7 小结	(91)
第3章 水-岩化学作用和水介质中元素的迁移	(93)
3.1 地球系统的化学作用和化学迁移	(94)
3.1.1 地球系统的化学作用类型	(94)
3.1.2 元素的地球化学迁移	(94)
3.2 水-岩化学作用	(96)
3.2.1 水-岩化学作用的物理化学条件	(96)
3.2.2 水-岩化学作用的基本类型	(97)
3.2.3 地球中天然水的类型	(100)
3.2.4 水溶液中元素的搬运形式	(101)
3.3 水-岩化学作用的影响因素	(102)
3.3.1 体系组成对水-岩化学作用的影响	(102)
3.3.2 体系物理化学环境对水-岩化学作用的影响	(109)
3.4 水-岩化学作用的实例	(119)
3.4.1 风化过程中的水-岩化学作用	(119)
3.4.2 沉积地球化学作用	(128)

3.4.3 高温水-岩化学作用	(133)
3.5 小结	(138)
第4章 地球化学热力学与地球化学动力学	(140)
4.1 热力学基础	(141)
4.1.1 热力学第一定律和第二定律	(141)
4.1.2 热力学参数及其基本性质	(141)
4.1.3 平衡态及相律	(143)
4.1.4 化学平衡	(145)
4.2 热力学在元素结合规律中的应用	(147)
4.2.1 元素地球化学亲和性的热力学控制	(147)
4.2.2 矿物固溶体热力学	(148)
4.2.3 矿物溶解度及元素在流体中的存在形式	(151)
4.3 自然过程的方向和相图的编制	(155)
4.3.1 确定自然过程的方向和限度	(155)
4.3.2 矿物相平衡计算和相图的编制	(157)
4.3.3 相平衡研究的意义	(166)
4.4 地球化学动力学	(169)
4.4.1 基本概念	(169)
4.4.2 地球化学动力学研究步骤和方法	(169)
4.4.3 均相化学反应的速率定律	(171)
4.4.4 水-岩作用化学动力学	(175)
4.4.5 孔隙介质中流体渗流-组分扩散-化学反应耦合过程的动力学	(176)
4.5 小结	(179)
第5章 微量元素地球化学	(181)
5.1 微量元素地球化学基本理论	(181)
5.1.1 微量元素的概念	(181)
5.1.2 能斯特定律及分配系数	(182)
5.1.3 分配系数的测定及其影响因素	(184)
5.2 岩浆作用过程中微量元素分配演化的定量模型	(186)
5.2.1 岩浆形成过程中部分熔融模型	(186)
5.2.2 岩浆结晶过程中结晶作用模型	(188)
5.3 稀土元素地球化学	(189)
5.3.1 稀土元素的主要性质	(190)
5.3.2 稀土元素在自然界中的分布	(195)
5.3.3 稀土元素在自然界的分馏	(196)
5.3.4 REE组成数据的表示	(197)
5.4 微量元素地球化学示踪作用	(202)
5.4.1 岩浆成岩过程的鉴别	(203)

5.4.2	成岩成矿构造环境的判别	(204)
5.4.3	成岩成矿物理化学条件示踪	(207)
5.4.4	地球历史中灾变事件的微量元素地球化学证据	(210)
5.5	小结	(211)
第6章	同位素地球化学	(213)
6.1	自然界同位素成分变化的机理	(213)
6.1.1	同位素的基本性质	(213)
6.1.2	自然界同位素成分变化	(214)
6.2	同位素地质年代学	(218)
6.2.1	衰变定律及同位素地质年代学的基本原理	(218)
6.2.2	Rb-Sr 法年龄测定及 Sr 同位素地球化学	(221)
6.2.3	Sm-Nd 法年龄测定及 Nd 同位素地球化学	(225)
6.2.4	U-Th-Pb 法年龄测定及 Pb 同位素地球化学	(231)
6.2.5	K-Ar 法及 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法年龄测定	(239)
6.2.6	^{14}C 法年龄测定	(241)
6.2.7	其他同位素年龄测定方法	(242)
6.2.8	同位素封闭温度及冷却年龄	(242)
6.2.9	同位素年代学的地质意义	(243)
6.3	稳定同位素地球化学	(246)
6.3.1	氢、氧同位素地球化学	(246)
6.3.2	硫同位素地球化学	(254)
6.3.3	碳同位素地球化学	(259)
6.4	小结	(266)
第7章	岩浆化学作用	(268)
7.1	岩浆的成分与性质	(268)
7.1.1	岩浆起源与化学组成	(268)
7.1.2	岩浆熔体结构	(269)
7.1.3	岩浆的性质	(271)
7.1.4	岩浆中的水和其他挥发分	(272)
7.2	岩浆演化过程元素的行为	(275)
7.2.1	岩浆的形成机制	(275)
7.3	岩浆源区和构造环境的判别	(279)
7.3.1	火成岩中元素及同位素组成与源区和构造环境的关系	(279)
7.3.2	微量元素和同位素示踪标志的选择原则	(281)
7.3.3	微量元素和同位素示踪应用	(284)
7.4	岩浆的演化机制与岩浆成矿	(292)
7.4.1	类质同象规律对岩浆结晶分异过程微量元素富集的影响	(292)
7.4.2	岩浆作用过程微量元素的富集成矿	(296)

7.5 小结	(301)
第8章 有机地球化学	(303)
8.1 自然界中的有机质和元素的生物循环	(303)
8.1.1 自然界中的有机质	(303)
8.1.2 有机反应、能量的转换与储存	(309)
8.1.3 元素的生物地球化学循环	(311)
8.1.4 有机质的同位素研究	(314)
8.1.5 生物标志化合物	(315)
8.2 可燃类矿床的有机地球化学	(317)
8.2.1 煤的有机地球化学	(317)
8.2.2 石油的有机地球化学	(319)
8.3 金属成矿过程中生物和有机质的作用	(323)
8.3.1 有机质对金属的富集作用	(323)
8.3.2 层控矿床有机地球化学	(330)
8.4 小结	(336)
第9章 地球的化学演化	(338)
9.1 地球的形成和早期分异	(338)
9.2 地壳的形成与演化	(340)
9.2.1 原始地壳的成因	(340)
9.2.2 原始地壳的成分	(341)
9.2.3 洋壳的形成	(342)
9.2.4 陆壳的形成与早期发展	(343)
9.2.5 地壳的化学演化	(345)
9.3 大气圈和水圈的演化	(348)
9.3.1 大气圈和大洋的成因	(348)
9.3.2 早期大气圈的成分	(349)
9.3.3 早期的大洋	(350)
9.3.4 大气圈-海洋系统的演化	(351)
9.3.5 大气圈 CO ₂ 的历史	(352)
9.3.6 大气圈自由氧 (O ₂) 的历史	(353)
9.4 生物圈的演化与生物地球化学循环	(356)
9.4.1 生命的起源	(356)
9.4.2 生物地球化学作用的演化	(358)
9.5 全球性变化	(362)
9.5.1 海相碳酸盐岩锶同位素组成的演化	(362)
9.5.2 海相沉积硫化物和硫酸盐的硫同位素组成变化	(363)
9.5.3 古气候的变化	(365)
9.5.4 矿床类型随地质时代的演化	(366)
9.6 小结	(370)

绪 论

与生俱来的好奇心，是人类观察和认识世界的动力，但要发展一门学科则需要人类持续不断地系统探索。关注地球及宇宙的人们已发现：地球及整个宇宙都是由永恒运动的物质构成的。地球内部的不稳定核素自发地进行衰变，其所释放的能量是地球物质运动的主要能源，它们足以引发岩石熔融、岩浆活动、火山喷溢，以至全球规模的构造运动等各种作用过程。物质组成和能量分布的不均一性，导致了地球不同尺度物质系统间的物质交换和相互作用。地球表层物质运动的能量则主要来自太阳，近现代生物，尤其人类的活动也对地球表层的物质组成、运动方式产生了明显的影响。几十亿年来经久不息的地球物质运动，既不断改变着地球的内部结构和外貌，也推动着元素间的结合、分异和迁移活动。地球科学面对的就是这样一个已经历了几十亿年发展变动，至今仍在持续演化的地球。

0.1 地球科学与地球化学

地球及其子系统内部、系统与环境间总是处于相对不平衡状态，因此，地球不仅有复杂的组成，而且是一个在不断运动着的物质体系。

地球系统的物质运动可以表现为力学的、物理学的、化学的和生物学的运动形式，而且各种运动形式相互作用，构成综合、复杂的高级运动。对地球及各子系统中各类基础运动形式的综合研究，是地球科学的目标和任务。

地球物质的各种运动形式互相依存和互相制约，并可以互相转化。以大洋板块向大陆板块之下的俯冲为例：当洋壳板块在板块会聚带向大陆之下俯冲时，主要表现为构造（力学）运动；随洋壳板块下插，板块的温度压力不断升高（物理环境的变化），导致洋壳板块脱水和变质，甚至产生岩浆（化学反应）。在这一过程中，洋壳板块的远洋沉积物中所含的生物遗体或其他有机分子可以发生降解作用（生物化学反应）。

地球形成初期，地球物质经分异形成了圈层结构。而后，圈层间不断发生的物质和能量交换及动量的传递、对流等，使地球整体构成一个完整的动力学系统。因此，不同圈层间物质的相互作用是推动地球发展演化的动力。

在地球的圈层结构形成后的漫长时期，均有岩浆、沉积、变质作用和造山运动发生，表明在地球历史中相同的地质事件可以重复出现。然而，随时间推

移类似事件的特性会发生变化。例如，源自地幔的岩浆作用仅在前寒武纪才能产生科马提岩浆，以后则只能产生玄武岩浆；又如，随着大气成分的演变，在早前寒武纪形成的沉积铁矿以硅铁建造为主，震旦纪时主要生成鲕状赤铁矿，显生宙又转为以湖相沉积为主；地球上的生物从无到有，由低级向高级演化，其间还曾发生过大规模的生物大爆炸和生物灭绝事件。以上事实说明，地球的发展演化具有旋回性和非均变性（突变性）发展的特点。

地球演化的旋回性使得有可能通过研究近现代的地质作用来了解历史上的地质作用；地球演化的非均变性又使地球科学家认识到：不能简单、机械地“将今论古”，必须用发展、变化的观点来认识地球的形成演化历史。

地球是一个极其复杂的物质体系，地质体或地球各圈层构成了地球的子系统。地球科学的众多分支学科从不同侧面研究地球过去和现在。地球运动的载体是地球系统中的物质，原子和离子是这些物质客体中具有独立化学个性的最小组成单位，地球化学从这些最小的物质组成单位入手，着重研究地球及其子系统中物质的化学运动。地球化学的研究目标与其他地球科学一致，它与其他地球科学之间的区别只是在解决问题的途径上有所不同。地球化学与化学研究的物质单位相同但基本目标不同，化学的主要任务是阐明化学元素间的结合力和结合方式、尝试合成新的化合物等，而地球化学是通过应用化学理论来阐明元素在自然界的行爲，并借此探索地球的奥秘。从这个意义上讲，地球化学虽然有化学科学的属性，但不应属于化学类学科，而是地球科学中的一个二级学科。它和其他地球科学二级学科一起，对地学起着支撑的作用，它一方面从地球的一种基本运动（化学运动）形式来研究地球，另一方面已进展到以地球或其子系统作为学科的研究对象，地球化学具有很广阔的研究领域。

0.2 地球化学的基本问题及定义

0.2.1 地球化学的研究思路

地球化学是 20 世纪初期由地质学与化学类学科结合产生的一门边缘学科。现在它已经形成了自己独立的研究思路和研究方法，地球化学的基本研究思路可概括为：

(1) 自然过程在形成宏观地质体的同时也留下了微观踪迹，其中包括了许多地球化学信息。如造成了系统各部分常量、微量元素和同位素组成的变化，元素相互结合和赋存状态的改变；等等。这些微观踪迹中包含着重要的地球演化信息，地球化学就是通过鑑识这些微观踪迹来追索地球历史的。

(2) 自然界物质的运动和存在状态是环境和体系介质条件的函数。地球化学将任何自然过程都看成是热力学过程，应用现代科学理论来解释自然体系化

学变化的原因和条件,使有可能在更深层次上探讨和认识自然作用的机制。

(3) 地球化学问题必须置于地球或其子系统(区域岩石圈、壳、幔)中进行分析,以系统的组成和状态来约束作用过程的特征和元素的行为。

由于地质作用规模宏大、时间持久、作用因素复杂且多次作用叠加,地球化学研究必须观察和分析多种变量,确立多层次的指标,才有可能追踪地球的历史。

0.2.2 地球化学的基本问题

围绕原子在自然环境中的变化及其意义,地球化学研究涉及以下四个基本问题。

0.2.2.1 地球系统中元素及同位素的组成(丰度 abundance 和分配 distribution)问题

作为一门独立的学科,地球化学的研究对象是地球中的原子。地球化学研究的第一个基本任务是研究元素在地球及各子系统(地壳、地幔、地核)中的化学成分和元素平均含量(丰度)。目前,对现今地壳的平均化学成分已取得较多的数据,对地球深部圈层及地球在各主要历史时期的元素含量的了解还处在探索阶段。丰度问题的解决是研究地球物质化学演化历史的基础。有关丰度的研究思路、研究方法及成果将在第一章进行介绍。

在看似纷繁的元素含量数据中,包含着极重要的地质作用信息。如岩石学根据岩石中主要组分 SiO_2 的含量来划分火成岩的岩石大类,地球化学对火成岩中微量元素组成的研究查明:酸性岩中含 Be 为 $1.6 \times 10^{-6} \sim 5.5 \times 10^{-6}$; Cr 为 $4.1 \times 10^{-6} \sim 38 \times 10^{-6}$,而基性岩中 Be 的含量为 $0.4 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-6}$,Cr 的含量为 $30 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 。也就是说,通常情况下根据火成岩中微量元素的含量也能识别岩石大类,而且其鉴别效果与主量元素 SiO_2 指标是等效的。不同的地质构造单元、不同的岩石、矿床和矿物中,元素的含量不同,这是由于不同地球化学体系的化学组成差异造成的。相同类型的地质构造单元、岩石、矿床和矿物中,元素的含量也不完全相同,这是体系所处的热力学条件差异造成的。探讨元素在地球化学体系中不同相(矿物)之间元素含量的变化及其与热力学条件的依存关系,是元素分配的研究范畴。从动态的角度进行研究还可以得到有关元素分配自然演变的认识。

0.2.2.2 元素的共生组合和赋存形式问题

具有相同或相似迁移历史和分配规律的各种元素在地质体中有规律的组合,称为元素的共生组合。其实质是,在自然环境中由化学作用形成各类化合物时,元素的分配和组合是有规律的,不同组成和不同成因的地质体,各有特定的元素组合。例如,Cu、Pb、Zn 等常在热液矿床中富集,Cr、Ni、Co 和铂族元素等则倾向在基性、超基性岩中成矿。不同元素的存在形式也各不相同,

如在岩石圈中, Ti、Cr、Mn 等呈氧化物, Cu、Pb、Zn、Ni、Co 等多呈硫化物, 铂族元素除少量形成硫化物外, 主要以自然元素和金属互化物形式存在。不同的元素共生组合, 也是元素在不同热动力条件下遵循一定分配规律的反映。元素在系统中不同部分的分配往往是不均匀的, 元素在系统中分配的不均匀性, 导致了元素在子系统中的分散和集中。本书第二章将分析地壳元素结合的微观规律, 第四章将讨论热力学条件对元素结合规律的控制。

当已形成的地质体解体后, 原子将转入活动状态, 经重新组合进入新的结合状态, 并形成新的地质体。原子在地质体中的存在状态是地质体形成时物理化学条件的反映, 因而元素的存在形式能指示地质体的成因。如在自然环境中, 金常呈自然金属状态, 但在富含 Cl^- 、 HS^- 等配合剂的热液中, Au 可被氧化成 Au^+ 和 Au^{3+} , 以络合物的形式迁移。

0.2.2.3 元素的迁移和循环

元素的重新组合常伴随元素的空间位移及元素在系统不同部分状态的转化, 这样的过程称作元素的地球化学迁移, 它是包含了体系物理化学条件和迁移介质特性等制约关系变化的动态过程。元素的分布、分配、共生组合和分散、集中等特征, 实质上是自然界原子结合、转化及迁移运动的结果和表现。元素迁移的自然过程是难以直接观察的, 但是只要系统地对比各种地质和地球化学的实际资料, 研究产生实际结果的原因和条件, 就能够得出元素的迁移规律。例如, 通过对一条矿脉的考查, 根据矿体和相关岩石中在成矿前后元素含量的变化及围岩的蚀变特征, 就能追踪元素迁移的过程; 通过矿脉中矿物形成的化学反应可以推断成矿流体的组成和性质; 综合对反应和过程的认识, 可以判断元素发生活化、转移和富集的化学机制。在不同条件下元素迁移过程的相互转换, 有些元素的迁移链可以首尾相接, 构成迁移循环。

元素的迁移是地球化学研究的核心问题之一, 除了封闭系统的化学作用外, 自然界化学作用过程常伴随有元素的迁移活动。本书大部分章节讨论的地球化学过程, 都涉及元素的迁移问题。

0.2.2.4 地球的历史与演化

地球的历史是一个由大量地质事件构成的漫长的时间序列, 它具有灾变和渐变相间、分阶段循环叠加、总体呈单向发展的特征, 地球科学在认识这一复杂过程时, 主要依据能保留事件踪迹的证据。元素和同位素的迁移活动寓于地质作用之中, 地质事件对微量元素及核素的影响有可能跨越后期作用而被保留下来, 因此同位素和微量元素组成上的变异常能提供最接近事实的证据。同位素地球化学和微量元素地球化学已为“考证”前寒武纪历史和前地质时期的地球历史提供了一套完整的理论和工作方法。通过微量元素或同位素的变异来揭示地质作用过程的特征, 称为微量元素或同位素“示踪”, 这一领域的研究思路和基本研究方法将在本书第五章和第六章进行介绍。第九章则在较大的时

间尺度上讨论地球的化学演化问题。

综上所述，地球化学通过观察原子之“微”，以求认识地球和地质作用之“著”，地球化学总的科学思路可概括为：以化学、物理化学等基本原理为基础，以研究原子（包括元素和同位素）的行为为手段，来认识地球的组成、历史和地球化学作用过程。

0.2.3 地球化学的定义

考察地球、地壳、地质体以至其他自然产物的形成和化学作用的演化历史，构成了地球化学独立的研究任务。以下通过介绍地球化学发展的不同阶段对学科的定义，来说明地球化学学科性质和任务的演变。

从“地球化学（Geochemistry）”这一术语不难看出，这一学科是“地质学（Geology）”与“化学（Chemistry）”类学科相结合产生的一门边缘学科。1838年瑞士化学家舍恩拜因（Schönbein）第一次提出了“地球化学”这个名词。1842年他预言“一定要有了地球化学，才能有真正的地质科学”。20世纪前半叶，在结晶学、矿物学、物理学和化学等有关学科研究不断深入的基础上，地球化学学科应运而生。

在地球化学学科的建立阶段，不少学者提出过对“地球化学”的定义。B.И. 韦尔纳茨基（1922）认为：“地球化学科学地研究地壳中的化学元素，即地壳的原子，在可能范围内也研究整个地球的原子。地球化学研究原子的历史、它们在空间上和时间上的分配和运动，以及它们在地球上的成因关系”。A.E. 费尔斯曼（1922）提出了类似的观点：“地球化学研究地壳中化学元素——原子的历史及其在自然界各种不同的热力学与物理化学条件下的行为”。V.M. 戈尔德施密特（1933）认为地球化学的研究应扩大到整个地球，他提出：“地球化学的主要目的，一方面是定量地确定地球及其各部分的成分，另一方面要发现控制各种元素分配的规律”。经典地球化学家给出的定义代表了地球化学发展的一个历史阶段，在这个阶段，地球化学主要研究地球中元素的分布、分配、共生组合，以及元素集中、分散与迁移的化学机制，即研究“地壳中的原子及元素行为”的阶段。

近半个世纪以来，地球化学的研究领域和研究思路都有了开拓性的进展。一方面，随着宇宙探测技术的迅速发展，对地球以外星体化学的研究工作日益增多，地球化学家已将宇宙化学的研究内容包括到地球化学的研究领域中来；另一方面，由早期注重元素行为的研究向较大自然系统（如地球、地圈）等形成过程的化学作用及化学成分演化等基础问题的研究转变，因而对地球化学学科有必要给出新的定义。美国全国地球化学委员会地球化学发展方向小组委员会（1973）给地球化学做出如下定义：“地球化学是关于地球（Earth, the globe）和太阳系（solar system）的化学成分及化学演化的一门科学，它包括了与它有

关的一切科学的化学方面”。该委员会还指出：“地球化学包括组成太阳系的宇宙尘埃化学；地球、月球和行星化学；地壳、地幔和地核化学；岩石循环化学；海洋与大气的化学演化；岩石中有机质的化学”。1982年梅森（Mason）也提出“地球化学是研究地球整体及其各组成部分的科学的科学”，“地球化学阐述在地球范围内元素在空间和时间上的分布和迁移问题”。1985年涂光炽提出的地球化学定义为：“地球化学是研究地球（包括部分天体）的化学组成（chemical composition, chemical constitution）、化学作用（chemical action, chemical process）和化学演化（chemical evolution）的科学”。

地球化学历经 80 余年的历史，虽然对它的研究范围、任务的认识已经有了一定的演变和发展：早期研究元素的历史主要解决成岩和成矿作用问题，现今主要通过研究地球的化学组成、化学作用和化学演化，解决地球、地圈、太阳系、行星的形成演化历史。现代学者对地球化学认识的进展，一方面表现为学科研究范围的扩大，另一方面对地球化学研究的着眼点也从“地壳中的原子”和“元素的行为”发展为地球的“化学组成”、“化学演化”，以至“地球和行星演化中的所有化学方面”。因此，地球化学的中心课题是通过观察和揭示这些客体的化学特性、所处的热动力学环境，以及在客体中或与客体有关的系统中发生的作用过程。也就是说，研究元素的行为已不是地球化学研究的主要目标，它已成为研究自然作用过程和地球演化的手段和途径。

根据以上理解，“地球化学是研究地球及其子系统（含部分宇宙体）的化学组成、化学机制和化学演化的科学”可能是对地球化学定义的简洁表述，它强调了地球及其子系统是地球化学研究的主要对象，而地球化学的基本研究内容是在地球及其子系统中发生的各种自然作用的动态机制和物质系统的化学演化历史。

0.2.4 地球化学的学科特点

根据定义和基本问题，不难看出地球化学具有如下学科特点：

（1）地球化学研究的主要物质系统是地球、地壳及地质作用体系，因此它是地球科学的一部分。地球化学针对自然作用过程提出问题，应用地球化学的理论和方法进行研究，最后得出对自然作用化学机制的认识。

（2）地球化学着重研究地球系统物质运动（含地质运动）中物质的化学运动规律。在地球科学中，地球化学与同是研究地球物质组成的结晶学、矿物学、岩石学和矿床学等学科的关系特别密切。矿物学、岩石学和矿床学往往借助并引进地球化学的理论，来研究各自学科的问题。地球化学研究系统或过程中微量元素和同位素的分配行为和演变，地球化学的基本原理具有普遍性的指导和应用意义。通过地球化学研究，可以更好地回答：岩浆形成的深度和温度、各类变质岩的形成温度和压力、沉积物是否进入地幔、金属矿床和石油的

形成环境和条件等各类问题。

(3) 地球化学研究原子的自然历史, 必然联系到元素自身的性质及其所处的热力学条件。因此, 地球化学以化学类科学(无机化学、有机化学、物理化学、热力学、解析化学以及化学动力学等)为理论基础。相关的基础自然科学还有物理学、数学等。这些学科使地球化学在考查元素的行为规律时具备了强有力的基础理论的支持, 在推动学科定量化和预测化的进程中起着重要作用。

(4) 地球化学与有关学科密切结合和相互渗透, 使得地球化学的研究范畴不断扩大, 并繁衍出众多分支学科。地球化学派生的分支学科有: 海洋地球化学、生物地球化学、环境地球化学、区域地球化学、个别元素地球化学、成岩成矿作用地球化学、同位素地球化学和地球化学热力学等。

(5) 地球化学在密切关注人类生活和生产活动中发展, 它运用学科自身的知识、理论、研究思路和工作方法研究矿产资源、资源利用以及农田、畜牧、环境保护等多方面的问题。因此, 地球化学也是应用性很强的学科。当前, 环境地球化学已成为环境科学中的核心组成部分, 诸如: 酸雨的形成、臭氧空洞的成因、全球变暖和温室效应、水和土壤环境的污染等, 都是环境地球化学关注的问题, 对环境问题的认识和分析也要求应用地球化学的理论和知识。另外, 如金属矿产和石油等大部分不可更新的资源的找寻和勘探, 也需要地球化学方法和手段的支持。

(6) 地球化学只有约 100 年的历史, 是年轻的发展中的科学。随各类研究资料的不断积累, 地球化学的理论和方法也一再更新。地球化学是 20 世纪的新兴学科, 也是 20 世纪最活跃的地球科学分支学科。在刚过去的 50 年中, 人类对地球认识的进展比在此之前的整个人类历史的积累都丰富。这不仅意味着人类视野的扩大和资料积累量的迅速增长, 更体现出人类在认知地球的深度上质的变化。

0.3 地球化学发展简史

地球化学产生于 20 世纪, 但地球化学的萌芽思想却源远流长。早在 2500 年前我国的《山海经》中便已描述了 70 多种金属和非金属矿物及其产地; 西周时期的“五行”说将自然物质划分为水、火、木、金、土, 是人类最早对地球物质状态的分类。人们在矿业生产中也逐渐产生了对元素的共生、分带和地球化学找矿标志的直观认识。如: 在距今 1500 年前的《地镜图》中已有: “草茎赤秀, 下有铅; 草茎黄秀, 下有铜……”的记述; 古代希腊人在《论石头》一书中描述了 16 种矿物和岩石的属性; 亚里士多德将地球物质运动看成是四元素(火、气、土、水)与四性(热、冷、干、湿)的结合和变换转化等。这