

研究生教学用书

成都理工大学研究生教材建设项目资助

# 地球化学

## 原理与应用

倪师军 张成江 李泽琴 徐争启 汪云亮 编著

DIQIUHUAXUE YUANLI YU YINGYONG

地质出版社

研究生教学用书  
成都理工大学研究生教材建设项目资助

# 地球化学原理与应用

倪师军 张成江 李泽琴 徐争启 汪云亮 编著

地质出版社

·北京·

## 内 容 提 要

本书是在成都理工大学研究生课程《地球化学原理与应用》10年教学基础上,不断总结、改进编著而成,由四部分组成。第一部分为地球化学学科概况,主要介绍地球化学的基本概念、基本任务和研究内容、学科特点以及地球化学的创立与发展历程;第二部分为化学组成原理与应用;第三部分为化学作用原理与应用;第四部分为化学演化原理与应用。

本书为地球化学专业研究生教学用书,也可供从事地球化学研究的相关人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

地球化学原理与应用 / 倪师军等编著. —北京:地质出版社, 2008. 8

ISBN 978-7-116-05818-7

I. 地… II. 倪… III. 地球化学 IV. P59

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 122674 号

---

责任编辑:孙亚芸

责任校对:郑淑艳

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324569 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: [zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787 mm × 1092 mm  $\frac{1}{16}$

印 张:14.75

字 数:350千字

印 数:1—1500册

版 次:2008年8月北京第1版·第1次印刷

定 价:33.00元

书 号:ISBN 978-7-116-05818-7

---

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

# 前 言

地球化学学科的形成和发展已有一百多年历史。它与地质学、地球物理学和大地测量学一起，目前已成为地球科学的四大支柱学科。对于这样一门重要学科，百年发展历史已使它具有较为完善的理论和方法技术体系。与初创之时相比，其基本研究内容、研究领域都大大拓宽，今后的发展空间也非常广阔。编写《地球化学原理与应用》研究生教材之目的，是要概述好学科基本理论和基本研究内容，使读者很方便地了解地球化学的主要原理，并能自如地应用。

在安排本书的章节时有一个指导思想，即要充分体现地球化学基本原理和应用示例相结合的特点。本书按化学组成原理、化学作用原理、化学演化原理这样一条主线来安排章节，由四部分组成。第一部分为地球化学学科概况，由第1章地球化学概述构成，主要介绍地球化学的基本概念、基本任务和研究内容、学科特点以及地球化学的创立与发展历程。第二部分为化学组成原理与应用，由第2章丰度原理、第3章晶体化学原理构成。第三部分为化学作用原理与应用，由第4章“地球化学作用的方向预测原理”、第5章“地球化学作用的过程模拟原理”构成。第四部分为化学演化原理与应用，由第6章“化学元素的活化原理”、第7章“化学元素的迁移原理”、第8章“化学元素的富集原理”、第9章“地球化学示踪原理”构成。

本书由倪师军总体构思和完成编写计划初稿，之后多次组织编写组成员集体讨论和修改编写计划。在此基础上分工编写：前言（倪师军）；第1章（倪师军）；第2章（汪云亮、张成江）；第3章（李泽琴）；第4章（李泽琴）；第5章（李泽琴）；第6章（徐争启）；第7章（徐争启）；第8章（徐争启、张成江）；第9章（倪师军）。完成初稿后，编写组成员集体讨论，并对全书各章节进行了修改，修改时做了少量删减和增写，完成了第2稿。吴香尧教授、尹观教授审读了第2稿并提出了修改意见，编写组修改完成第3稿。

本书是在成都理工大学研究生课程《地球化学原理与应用》10年教学基础上，不断总结、改进的成果。成都理工大学研究生院（部）对本教材的编写给予了大力支持，10年教学过程中地球化学系的许多教师以及学习这门课程的研究生对此也有很多贡献，谨此致谢！

作者

2008年1月于成都理工大学

# 目 次

<b>第1章 地球化学概述</b> .....	(1)
1.1 地球化学的概念 .....	(1)
1.2 地球化学的三大目标和基本任务 .....	(2)
1.2.1 地球化学的三大目标 .....	(2)
1.2.2 地球化学的基本任务 .....	(3)
1.3 地球化学的分支学科 .....	(4)
1.4 地球化学发展简史 .....	(8)
1.4.1 地球化学的起源 .....	(9)
1.4.2 经典地球化学时期 .....	(9)
1.4.3 近现代地球化学时期 .....	(11)
1.5 地球化学原理概述 .....	(14)
1.5.1 哲学层面的理解 .....	(14)
1.5.2 学科层面的理解 .....	(16)
<b>第2章 丰度原理</b> .....	(17)
2.1 元素的丰度及丰度坐标系 .....	(17)
2.1.1 元素丰度的概念 .....	(17)
2.1.2 元素丰度的数值特征 .....	(19)
2.1.3 丰度坐标系 .....	(19)
2.1.4 与元素丰度有关的几个概念 .....	(20)
2.2 丰位 .....	(22)
2.2.1 丰位的概念 .....	(22)
2.2.2 丰位的加和性——广义丰位 .....	(25)
2.3 标准丰位 .....	(28)
2.3.1 标准丰位 .....	(28)
2.3.2 标准丰位的加和性 .....	(30)
2.3.3 标准分离位 .....	(31)
2.3.4 标准偶合位 .....	(32)
2.3.5 标准异常位 .....	(33)
2.3.6 稀土元素的标准丰位图 .....	(35)
2.4 迁移位 .....	(36)
2.4.1 元素迁移度和广义元素迁移度 .....	(36)
2.4.2 元素迁移位 .....	(37)
2.5 迁移位的加和性——广义迁移位 .....	(42)
2.5.1 广义元素迁移位 .....	(42)

2.5.2	分离迁移位 .....	(42)
2.5.3	偶合迁移位和平均迁移位 .....	(44)
2.5.4	异常迁移位 .....	(46)
<b>第3章</b>	<b>晶体化学原理 .....</b>	<b>(49)</b>
3.1	元素原子的性质与化学键类型 .....	(49)
3.1.1	元素原子的性质 .....	(49)
3.1.2	化学键类型 .....	(52)
3.2	晶体场理论与过渡金属元素 .....	(53)
3.2.1	过渡元素的电子层结构及晶体场理论 .....	(53)
3.2.2	晶体场理论在过渡元素结合中的应用 .....	(55)
3.3	分子轨道理论与元素分布和结合规律 .....	(57)
3.3.1	Schrodinger 定态方程与量子力学原理 .....	(57)
3.3.2	模型和计算方法 .....	(57)
3.3.3	深部地球化学作用及其演化研究 .....	(59)
3.3.4	硅酸盐熔体、水溶液、矿物表面 .....	(59)
<b>第4章</b>	<b>地球化学作用的方向预测原理 .....</b>	<b>(61)</b>
4.1	地球化学热力学的研究方法 .....	(61)
4.1.1	热力学与地球化学的特点 .....	(61)
4.1.2	平衡态与可逆过程 .....	(61)
4.2	平衡态热力学的基本原理 .....	(62)
4.2.1	热力学三个基本定律 .....	(62)
4.2.2	状态函数 .....	(63)
4.2.3	自由能及其他平衡态热力学判据函数 .....	(63)
4.2.4	地球化学热力学分析基础 .....	(64)
4.3	质量作用定律与平衡常数 .....	(64)
4.4	活度、逸度 .....	(65)
4.4.1	活度和逸度 .....	(65)
4.4.2	电解质溶液理论与活度系数的计算 .....	(65)
4.5	多相多组分系统化学反应途径数字模拟 .....	(67)
4.5.1	多相多组分系统与部分平衡 .....	(67)
4.5.2	化学反应途径数字模拟 .....	(67)
4.6	应用实例 .....	(68)
<b>第5章</b>	<b>地球化学作用的过程模拟原理 .....</b>	<b>(72)</b>
5.1	非平衡态热力学基本原理与不可逆过程演化方向分析 .....	(72)
5.1.1	热力学流与热力学力 .....	(72)
5.1.2	线性非平衡热力学原理 .....	(73)
5.1.3	非平衡态非线性热力学原理 .....	(74)
5.2	地球化学动力学过程 .....	(75)
5.2.1	化学反应动力学 .....	(76)
5.2.2	流体输运动力学 .....	(78)

5.2.3	化学反应与流体运输耦合动力学模型 .....	(79)
5.3	应用实例——成岩作用中流体-矿物反应的动力学模型 .....	(80)
<b>第6章</b>	<b>化学元素的活化原理</b> .....	<b>(85)</b>
6.1	化学元素的存在形式 .....	(85)
6.1.1	元素在流体相中的存在形式 .....	(85)
6.1.2	元素在固相中的存在形式 .....	(87)
6.1.3	元素在不同相中的分布 .....	(90)
6.2	元素的活化 .....	(94)
6.2.1	氧化还原条件 .....	(95)
6.2.2	酸碱性 .....	(95)
6.2.3	键型 .....	(96)
6.2.4	电离能 .....	(96)
6.2.5	溶解度 .....	(97)
6.2.6	共同离子效应 .....	(98)
6.2.7	离子电位 .....	(98)
6.2.8	温度 .....	(99)
6.3	不同地质作用中元素的活化 .....	(100)
6.3.1	表生环境中元素的活化 .....	(100)
6.3.2	沉积埋藏后元素的活化 .....	(102)
6.3.3	改造作用中元素的活化 .....	(103)
6.4	研究方法 with 实例 .....	(105)
6.4.1	化学元素的价态研究实例 .....	(105)
6.4.2	元素的“形态”分析实例 .....	(112)
<b>第7章</b>	<b>化学元素的迁移原理</b> .....	<b>(120)</b>
7.1	化学元素迁移形式 .....	(120)
7.1.1	物理迁移 .....	(121)
7.1.2	化学迁移 .....	(122)
7.1.3	生物迁移 .....	(122)
7.2	元素在液相中的迁移 .....	(123)
7.2.1	水的结构及水溶液的基本性质 .....	(123)
7.2.2	元素在水溶液中的迁移 .....	(124)
7.2.3	元素在胶体溶液中的迁移 .....	(135)
7.3	元素在气相中的迁移 .....	(137)
7.3.1	气体的组成及其在水中的溶解 .....	(137)
7.3.2	气相迁移的过程 .....	(138)
7.4	元素在固相中的迁移 .....	(143)
7.4.1	沉积作用过程中元素的迁移 .....	(143)
7.4.2	压实成岩作用过程中元素的迁移 .....	(145)
7.4.3	变质作用过程中元素的迁移 .....	(145)
7.4.4	改造作用中元素的迁移 .....	(147)

7.5	元素在熔浆中的迁移	(148)
7.5.1	元素在岩浆体中的存在形式	(149)
7.5.2	岩浆的性质	(149)
7.5.3	挥发分在岩浆元素迁移中的作用	(150)
7.5.4	主要造岩元素在岩浆中的演化	(151)
7.5.5	岩浆演化过程中微量元素的行为	(154)
<b>第8章</b>	<b>化学元素的富集原理</b>	<b>(161)</b>
8.1	元素富集的场所——地球化学界面	(161)
8.1.1	地球化学界面的由来及发展	(161)
8.1.2	成矿流体地球化学界面的组成及标志	(163)
8.1.3	成矿流体地球化学界面的应用实例研究	(166)
8.2	元素的富集与成矿	(171)
8.2.1	岩浆作用中元素的富集	(171)
8.2.2	气成-热液及热液作用中元素的富集与成矿	(175)
8.3	元素的富集与环境	(178)
8.3.1	元素的天然富集与环境	(179)
8.3.2	元素的人为富集及环境污染	(183)
<b>第9章</b>	<b>地球化学示踪原理</b>	<b>(185)</b>
9.1	地球化学示踪基本原理	(185)
9.1.1	微量元素的地球化学活动性	(185)
9.1.2	放射性同位素的自发衰变	(189)
9.1.3	稳定同位素的示踪原理	(191)
9.2	地球化学示踪基本方法	(191)
9.2.1	微量元素示踪	(191)
9.2.2	同位素示踪	(195)
9.3	地球化学示踪应用	(199)
9.3.1	微量元素示踪应用	(199)
9.3.2	同位素示踪应用示例	(208)
9.3.3	微量元素-同位素联合示踪	(214)
<b>参考文献</b>		<b>(216)</b>



# 第1章 地球化学概述

## 1.1 地球化学的概念

地球是一个极其复杂的物质体系，地球科学中的各个分支学科都是从各自的观点和不同的角度去认识和探索这个复杂物质体系的过去和现在。地球化学是地球科学传统学科，它是着重研究地球及其各个组成部分的化学组成、化学作用和化学演化的科学。地球化学是地质学和化学学科交叉的产物，同时还汲取物理学、数学、天文学、空间科学、海洋学等学科的丰富营养。现在，地球化学与地质学、地球物理学和大地测量学一起成为地球科学的四大支柱学科。

瑞士化学家 C. F. 许拜恩于 1838 年首创“地球化学”这个词，他说“在使描述地质学过渡为地质学之前，必须创立一门新学科，这就是地球化学”。“先有地球化学，然后才能谈真正的地质科学”。自从地球化学创立以来，不同时期的著名地球化学家都对地球化学做过定义，这些定义不同程度地反映了地球化学各个时期的发展水平。现分别介绍如下：

美国地质调查所主任化学师 F. W. 克拉克 (F. W. Clark, 1847 ~ 1931) 在 1924 年第五版《地球化学资料》(“The Data of Geochemistry”) 的序言中指出：“每一种岩石都可以看成一个化学体系，在这个体系中，各种作用都可以引起化学变化，研究这些变化就是地球化学的范畴。确定可能发生什么变化，怎样发生和什么时候发生，观察伴随这些变化所发生的现象，记录它们的最后结果，就是地球化学的功能”。

前苏联科学院院士 B. И. 维尔纳茨基 (B. И. Вернадский, 1863 ~ 1945) 在 1924 年出版的世界最早一部地球化学著作《地球化学概念》中明确指出：“地球化学是用科学的方法研究地壳中的化学元素，即研究地壳中的原子，并尽可能地研究整个地球上的原子。它研究原子的历史，研究原子在时间上、空间上的运动和分布，研究原子在地球上相互间的成因联系”。他的学生 A. E. 费尔斯曼院士 (A. E. Ферсман, 1883 ~ 1945) 同样强调地球化学研究原子历史的任务，他在 1933 年出版的《地球化学》(四卷集) 第一卷中指出：“地球化学研究地壳中化学元素——原子的历史及其在自然界的各种不同的热力学和物理化学条件下的行为”。

V. M. 戈尔德施密特 (V. M. Goldschmidt, 1888 ~ 1947) 在他所著《地球化学》中也阐明了地球化学的概念，他认为：“地球化学是根据原子和离子的性质，研究化学元素在矿物、矿石、岩石、土壤、水及大气圈中的分布和含量以及这些元素在自然界的迁移。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化学组成，另一方面是揭示每种元素分布的控制规律”。

我国在 20 世纪 70 年代以后出版的《地球化学》也给地球化学做过明确的定义，如南京大学刘英俊等编著的《地球化学》（1979 年）中对地球化学定义如下：“地球化学主要是研究地壳（尽可能整个地球）中的化学成分和化学元素及其同位素在地壳（地球）中的分布、分配、共生组合、集中分散及迁移规律的运动形式和全部运动历史的科学，也就是研究地壳（地球）中物质的化学运动和变化过程的科学”。

20 世纪 40 年代以后，修斯（H. E. Suess）和尤里（H. C. Urey）综合天体化学、天体物理学、同位素地球化学和陨石学研究成果，提出了核素宇宙丰度的概念，把地球化学的定义推广到天体化学研究领域。从 50 年代开始，由于空间探测技术和空间科学的发展，宇宙化学成为地球化学领域中一项重要研究内容。美国全国地球化学委员会地球化学发展方向小组（1973 年）在《地球化学的发展方向》一书中对地球化学的理解大大扩展了其研究范围，该书给地球化学定义如下：“地球化学是关于地球和太阳系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向”。

涂光炽等编著的《地球化学》（1984 年）对地球化学则作了如下定义：“地球化学就是地球的化学，它是研究地球（也包括部分天体）的化学组成、化学作用及化学演化的学科。它是地学和化学边缘杂交的产物。它更多的是地学的，但也可以是化学的分支学科”。这个定义，将地球化学精练地定位于研究地球和部分天体的化学组成、化学作用和化学演化的科学。

欧阳自远等在 2001 年出版的《地球的化学过程与物质演化》中定义：“地球化学就是研究各种地质体中的元素及其同位素的组成与时空变化的科学。它既探讨元素的共生组合、赋存形式和元素的物态、化合物种类、形式、键型、价态与其在晶体构造中的配位位置，也探索元素在时空上的宏观与微观的分散、集中、迁移的动态过程，以至太阳系的化学组成与演化，即太阳星云的化学成分、分馏和凝聚，太阳系各行星与小天体（卫星、小行星、彗星、陨石与宇宙尘等）的化学组成与演化。”

由上可见，地球化学的研究对象、研究范围逐步发生变化。经典地球化学的研究对象以地壳中的原子和元素行为为主，而现代地球化学的研究对象在空间上和时间上都发生了较大变化。在空间范围，现代地球化学的研究对象从地壳扩展到地球各部分（包括大气圈、海洋、地表、地壳、地幔等）、直至扩展到太阳系空间（主要包括行星、月球、宇宙尘和陨石等）；在时间尺度上，现代地球化学的研究对象从现代追索到地球形成之初的远古地质时代。

## 1.2 地球化学的三大目标和基本任务

### 1.2.1 地球化学的三大目标

地球化学学科发展的基本目标可以概括为如下 3 个方面：

#### (1) 推动地球科学的发展

天体、地球、生命、人类及元素的起源和演化是当代地球科学面临的基本理论问题。地球化学在解决这些地球科学基本问题时，有其重要的作用。例如，通过对陨石、月球、火星以及近地行星等的地球化学研究，可以了解天体的组成和演化、元素的起源和演化等

问题。通过对地球各层圈以及各种地质体中元素及其同位素的化学组成、化学作用及化学演化的地球化学研究，可以了解原始地球的形成和演化、地球生命的起源和演化、全球环境变化等科学问题。地球化学研究成果，直接推动着地球科学的发展。

### (2) 为资源（能源）勘查与评价利用提供理论依据和方法技术

地球化学研究能够帮助缓解人类面临的能源及资源紧缺局面。例如，通过勘查地球化学的理论和方法技术研究，可能直接或间接地找到深埋于地下的紧缺能源和紧缺矿产资源。通过矿床地球化学、石油地球化学、海洋地球化学和气体地球化学的理论和方法技术研究，可以提供能源及矿产资源勘查评价利用的理论依据，并可能探索新能源和新资源类型，也可能预测能源及矿产资源潜力。通过工艺地球化学研究可以提高能源及矿产资源的经济价值和利用率，可以生产出天然矿产资源的代用材料。

### (3) 为环境评价与环境改造提供理论依据和方法技术

地球化学的基本原理和方法技术应用于环境科学、生态学、第四纪地质和农业科学，形成了环境地球化学、生态地球化学、第四纪地球化学、地球化学工程学和农业地球化学等分支学科。这些分支学科，从不同的角度，对人类生存环境不同时空尺度出现的环境问题作出科学评价，并提出改善环境和合理利用环境的科学建议。

利用地球化学手段，还可以预测预报地震活动、火山爆发、滑坡、泥石流等地质灾害。这也是为评价和改善人类生存环境做出贡献。

## 1.2.2 地球化学的基本任务

地球化学研究内容经历了一个历史演变过程。地球化学创始阶段，其研究内容局限为研究“地壳中的原子（包括自然界出现的90多种化学元素和常见的340多种同位素的原子）”和“元素的行为”。现代地球化学则强调“地球的化学组成”、“化学作用”和“化学演化”。从目前地球化学研究对象来看，地球化学的基本任务主要如下：

### (1) 研究地球（也包括部分天体）的化学组成

这是地球化学最基本的研究内容，它涉及地球（也包括部分天体）中元素及其同位素的组成和时空变化。20世纪30~40年代，地球化学学科建立之时，大量的工作是关于地壳和地壳不同部位、不同地块、不同地质体中各种元素含量和分布的研究。后来，随着地球化学的发展，认识步步深入，逐渐开展了地球各个层圈、地外部分天体的化学组成研究。现在开展的区域地球化学研究、全球地球化学填图等科技计划是这一任务的现实体现。

### (2) 研究地球（也包括部分天体）的化学作用

地球化学的第二大任务是研究地球各个层圈中（也包括部分天体）发生的地球化学作用。这些地球化学作用丰富多彩、千变万化。地球上发生的陨石雨、地震、火山爆发、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害是激烈的、易于发现或觉察的，但地壳运动、岩石风化、矿床的形成、化学物质的迁移转化等是缓慢的、不易发现的。不管是激烈的还是缓慢的地质作用过程，都包含了丰富的地球化学作用。描述这些地质作用，发现这些地质作用过程中的化学作用规律，模拟并以简化的形式展示这些地球化学作用过程，将这些地质过程的化学作用原理应用并解决人类工程技术问题（例如地球化学工程等）等，是地球化学研究的重要任务。

可以列举几个方面内容：

1) 研究地球演化过程的各种地球化学作用中化学元素的活动性。主要是阐明化学元素在不同物理化学条件的介质中活化、迁移和集中分散的规律，这涉及个别元素化学性质及其行为的研究，包括化学元素的来源，其活化的驱动力以及迁移途径和搬运形式，沉淀富集的规律。着重研究地球演化历史和过程，研究地球各层圈化学元素及其同位素的分布、迁移和集中分散规律，并运用这些规律去解决地学有关理论和实际问题。显然，这些方面的研究成果是建立矿床地球化学模式和环境地球化学模式必不可少的资料。

2) 研究化学元素的结合规律。地球化学也研究化学元素在不同固相（主要是各种地质体，也涉及工业固体废物）中以各种形式相互结合在一起形成独立矿物的规律，也就是研究元素的共生组合和赋存形式。这里面包括元素的分配及其晶体化学控制问题，包括元素的物态、键型、价态、在晶体构造中的配位位置以及化合物种类和形式等等。

3) 研究不同地球化学过程的化学反应机理。地球化学还研究促使化学反应的物理化学条件和元素地球化学参数，并据以阐述地球化学作用过程所发生的化学反应机理。应用地球化学热力学方法研究地质作用的化学反应方向，运用地球化学方法研究地质作用的化学反应过程和机理。

(3) 研究地球（也包括部分天体）的化学演化

地球是有生命的，已经演化了46亿年，还要继续演化发展。地外天体成员也是有生命的，也存在过去的演化历史和将来的演化发展。地球化学的第三大任务是研究地球（也包括部分天体）的化学演化问题。对地球化学演化的研究，尤其要注重各层圈（尤其地壳）不同演化阶段的化学元素及其同位素的组成和演化特征，也要注重某区域、某地质体、某组成岩石和某矿物中的化学元素及其同位素的组成和演化特征。对太阳系的化学演化的研究，要注重太阳星云的化学成分、分馏和凝聚，太阳系各行星与小天体（卫星、小行星、彗星、宇宙尘等）的化学组成和演化特征。

## 1.3 地球化学的分支学科

地球化学的产生和发展与地质学、化学、海洋学、天文学等学科的发展有着密切的关系，同时，地球化学的发展也推动着这些学科的发展。地球化学以化学（无机化学、有机化学、物理化学、胶体化学、热力学、化学动力学、分析化学等）和地球科学（地质学、矿物学、岩石学、矿床学、地理学等）为基础，汲取了数学、物理学、计算机科学、海洋科学、大气科学、天文学、比较行星学、环境科学、生态学、生物学、医学、农学、土壤科学等学科的精髓。一方面，地球化学的发展促进了地球科学的向纵深发展，促进了社会繁荣和可持续发展；另一方面，地球化学学科本身也在为完成这几大基本任务的奋斗中得到迅速发展。

由于地球化学是一门理论性和应用性并重并且不断发展的学科，地球化学和其他学科不断相互渗透，于是便产生许多分支学科。这些地球化学的分支学科也具有生命力旺盛和正在发展的特征。下面对地球化学一些主要分支学科作一简述。

(1) 元素地球化学

元素地球化学是最早和最经典的地球化学分支学科。美国的克拉克、中国的黎彤等地

球化学家早期的研究工作都是从元素地球化学入手的。现今元素地球化学的研究内容主要有地球和部分天体中元素的性质、丰度、赋存状态、迁移形式、富集和分散规律、演化和循环历史等地球化学特征。

## (2) 量子地球化学

量子地球化学是20世纪70年代初晶体化学、量子化学（量子力学）、矿物学、固体物理学等学科交叉的结果。它“研究矿物中的化学键或‘电子结构’，矿物的晶体结构及其稳定性，矿物的物理和化学性质，化学元素的地球化学分布，相平衡和元素分配，晶体结构随温度、压力和成分的改变（比较晶体化学），矿物能量学以及矿物的谱学性质。量子地球化学的核心问题是用量子力学理论和各种谱学方法研究矿物中的化学键或‘电子结构’”。量子地球化学研究包括理论和实验两部分。理论研究就是应用量子力学理论，为所研究的地球化学物种对量子力学运动方程（薛定谔方程）求（近似）解。实验研究就是要用各种谱学方法来确定某物种的电子结构（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。

## (3) 地球化学热力学

地球化学热力学是应用热力学基本原理研究地学系统的状态变化所产生的一门地球化学分支学科，它主要研究能量及其转换，解决自然界过程的方向和限度问题，即平衡态问题。其主要研究内容有：自然热液体系的热力学；矿物相平衡；矿物热力学性质；矿物固溶体热力学；硅酸盐熔体的热力学；流体-岩石相互作用；非平衡非线性热力学；计算机模拟和模型化研究等（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。

## (4) 地球化学动力学

地球化学动力学是动力学基本原理应用到地球化学过程研究所产生的一门地球化学分支学科，它研究自然过程的速度和机制问题，包括化学反应速率的化学动力学和物理运动的动力学，主要指的是流体动力学、扩散和弥散等（中国科学院地球化学研究所，1998）。目前地球化学文献中将化学动力学和动力学划分为两个学科。化学动力学（Kinetics or Chemical Kinetics）研究化学反应的速率和反应历程（或反应机制，指反应物分子在变为产物分子的过程中所经历的具体途径与步骤）。而动力学（Dynamics）则是研究物体在力的作用下宏观运动的速率和机制。在地球科学实际研究和应用中，化学动力学和动力学二者兼而有之，不宜截然分割。所以，国内外学者用“地球化学过程的动力学”（简称地球化学动力学）来反映地球化学研究中的化学动力学和动力学问题（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。

## (5) 同位素地球化学

同位素地球化学主要采用地质年代测定和同位素示踪研究手段，研究地球和宇宙物质中核素的形成、丰度，以及根据这些核素在自然作用中的衰变和分馏来追踪各种地质地球化学过程。同位素地球化学包括放射性同位素地球化学和稳定同位素地球化学。放射性同位素地球化学主要根据放射性同位素的衰变进行地质体系计时，以及根据放射成因产物子体同位素组成进行示踪分析。稳定同位素地球化学主要利用轻稳定同位素在自然界中的分馏进行地质作用示踪（陈道公等，1994）。

## (6) 实验地球化学

实验地球化学是地球化学中一门比较年轻的分支学科，对其定义还没有统一的认识。人们一般认为，实验地球化学是在实验矿物学和实验岩石学基础上发展起来的，它主要涉

及流体相的地球化学过程中化学元素（包括同位素和有机质）的行为和反应机理的实验研究（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。

#### （7）天体化学

天体化学又称空间化学（Space Chemistry）或宇宙化学（Cosmochemistry），是地学、空间科学与天文学相互交叉渗透而产生的一门新兴科学。空间化学研究宇宙空间元素及其同位素的起源与分布、各类天体的化学组成与化学演化。浩瀚宇宙中的物质由基本粒子构成了100多种元素、2000多种同位素和各种化学物，天体化学研究这几个层次物质的时空分布、存在状态和演化规律（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。

#### （8）岩石地球化学

岩石地球化学是近代岩石学与地球化学的交叉学科。它以地球化学的基本原理、实验方法和研究成果，去探讨各类岩石学问题，从中引申出地质含义（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。岩石地球化学的研究内容主要涉及火成岩、沉积岩和变质岩中主元素、微量元素与同位素的地球化学组成、作用与演化。从研究地球或天体物质的岩石成因入手，进而研究地球的起源、演化与资源环境效应等问题。

#### （9）区域地球化学

区域地球化学的倡导者为 A. E. 费尔斯曼。根据费尔斯曼的意见，区域地球化学的任务是研究化学元素在一定区域中的时间和空间分配、分布、迁移和集中-分散规律。现代区域地球化学是以区域岩石圈——全球岩石圈的子系统为对象，开展有关该子系统化学组成、化学作用和化学演化综合研究的地球化学分支学科（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。

#### （10）构造地球化学

构造地球化学思想萌芽于19世纪（H. C. Sorby），在20世纪60年代由范菲（W. C. Fyfe）和陈国达等人奠定理论基础。构造地球化学是构造地质学和地球化学的交叉学科，它研究构造作用下地球（主要是地壳）中元素在流体和固相岩石中的赋存状态、分配和迁移、分散与富集等地球化学过程。陈国达在1976年和1984年多次指出：“构造地球化学是一门介于构造地质学和地球化学之间，研究各种地质构造作用与地壳中化学元素的分配和迁移、分散和富集等关系的学科。它的主要任务是研究地质构造作用与地球化学过程之间，也就是运动和物质之间在时间、空间和成因上的联系，把形成与形变、建造与改造统一起来加以研究”（吴学益，1998）。

#### （11）深部地球化学

深部地球化学又称地球深部物质科学。这一分支科学主要研究地球深部（特别是地幔和地核）的化学组成、化学作用和化学演化。这方面包括理论研究和实验研究。理论研究主要是运用地质学、地球化学、地球物理、岩石学、矿物学、构造地质学等基本原理，构筑深部地球模型。实验研究主要依托金刚石压腔和大腔体实验技术、静态超高压实验技术、超深钻探技术等的发展而发展。其研究内容为：① 地球深部物质的物理和化学性质的研究；② 地球内部物理和化学性质的研究；③ 地球演化及地球动力学研究（谢鸿森等，1997）。

#### （12）矿床地球化学

矿床地球化学以研究矿产资源为主要对象，是矿床学与地球化学相结合的一门交叉学科，它主要是用地球化学的理论和方法来研究矿床学。矿床地球化学一方面包含和继承了

经典矿床学、地球化学的理论和研究方法，同时也引进了地学领域以外的数理化等方面的一些理论知识和研究手段。矿床地球化学不仅要研究矿床本身的化学组成、化学作用和化学演化问题，而且还要研究矿床形成的成矿过程和矿床形成后的保存与演化（李朝阳，1999）。

### （13）勘查地球化学

勘查地球化学（Exploration Geochemistry）是从地球化学探矿学（或地球化学找矿学 Geochemical Prospecting, Geochemical Exploration）发展起来的一门新兴应用学科。西方国家对地球化学找矿的定义是：“地球化学找矿是基于系统地测定天然物质的一种或数种化学性质的任何矿产勘查方法”（H. E. Hawkes et al., 1962）。前苏联学者认为：“地球化学找矿是根据基岩及覆盖层中、地下水及地表水流中、植物中、土壤中和气体中的含矿物质不明显的微观分散晕以发现矿床的一种找矿方法”（B. Ч. 克拉斯尼科夫，1955）。在早期，地球化学产生了一门以矿产勘查为目的的应用学科，被称之为化探（地球化学找矿）。后来，地球化学找矿从理论上、方法上和技术上有了迅速进展，特别是应用领域发生了很大的变化，从纯粹的找矿地球化学领域扩展到环境地球化学、工程地球化学、农业地球化学等领域。所以，化探（地球化学找矿）这一名词逐步被勘查地球化学所取代。

### （14）低温地球化学

低温地球化学主要研究自然界中 200℃ 以下的地球化学作用和演化过程，也包括常温和零摄氏度以下的元素被萃取、活化、迁移与富集成矿的地球化学行为。过去，低温地球化学研究领域之所以较长期处于薄弱状态，原因主要是：① 过去的地球化学实验大都是在中高温条件下进行的；② 过去成岩成矿测温数据不够多和不够完善；③ 长期以来人们对元素活动性的理解存在片面性，未认识到低温条件下元素的较强烈的地球化学活动性；④ 一些低温交代作用，过去被误认为是高中温热液的产物。20 世纪 90 年代以来，在涂光炽倡导下，我国开展了低温地球化学的研究。目前已建立和完善了低温地球化学实验研究体系，总结了我国若干低温矿床和矿化层位的地球化学特点，研究了金、银、铂族金属、稀土元素和某些分散元素的低温地球化学行为和某些非金属的低温成矿作用，分析成矿、埋藏变质的低级变质作用中成矿元素的迁移和富集过程，进行了低温条件下某些成矿元素的活化、迁移、沉淀实验，建立了低温开放体系中水-岩相互作用模型（涂光炽，1998）。

### （15）有机地球化学

B. И. 维尔纳茨基在 20 世纪 20 年代初期先后发表了《生物圈》等著作，筹建了世界上第一个有关有机地球化学的“活质实验室”，标志着有机地球化学开始萌芽。之后，随着石油地质学和石油工业的发展，由于地质学、沉积学、生物学、有机化学、石油地质学等学科的发展和相互渗透，有机地球化学得到长足发展。其定义为：有机地球化学主要研究天然产出有机质的组成、结构和性质，它们在地质体中的分布、转化和参与地质营力的作用等（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。

值得指出的是，地球化学另一分支——生物地球化学，与有机地球化学有一定的关联。所以不单独列出。可以认为，生物地球化学也是在 20 世纪 20 年代初期萌芽的，它是研究生物圈中在生物有机体参与下发生的地球化学过程，揭示有机体与其环境在化学元素组成上的相关关系，查明地球化学省及其与地方病的关系，侧重生物和人类活动对碳、氮、磷、硫等元素地球化学循环的影响（国家自然科学基金委员会，1996）。

#### (16) 环境地球化学

环境地球化学研究人类活动与地球化学环境的相互关系，是地球化学与环境科学相互渗透而产生的新兴边缘学科。它从地球环境的整体性和相互依存性的观点出发，以地质学为基础，综合研究化学元素在地-水-气-生-人环境系统中的地球化学行为，揭示人为活动干扰下区域及全球环境系统的变化规律，为资源开发利用、环境质量控制及人类生存、健康服务（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。

#### (17) 流体地球化学

近十多年来，通过从火山、地震、海底热液、超深钻、非生物成因天然气、岩石矿物中流体包裹体等直接探测和观察地球内部流体，同时进行流体-岩石相互作用的野外和室内实验研究，获得许多重要发现和认识上的飞跃，完善了流体地球化学的研究体系（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。流体地球化学研究越来越引起人们的重视。例如，1993年和1997年两次召开“Geofluid”国际学术会议，“流体地球化学”1996年开始作为大学（成都理工学院）研究生课程，1997年，“流体地质与成矿效用”被列为国家攀登计划预选项目等等。流体地球化学主要研究自然界流体的形成、运移、定位（改造、演化、卸载和储存等）规律，重点探索流体地质作用过程中的地球化学规律、原理和效应。

#### (18) 气体地球化学

气体地球化学主要是研究自然界各种气体的地球化学特征、成因类型、运移、聚集规律及其所参与的地球化学动力学过程和表征的地质学意义（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。

#### (19) 农业地球化学

农业地球化学主要研究土壤中元素分布、分配规律、成壤的地球化学过程、土壤的利用和改良、农业污染及其防治，以及土壤地球化学环境与农产品（特别是粮食）产量、质量的关系。它在目前人口剧增、耕地锐减、土地承载力下降的严峻形势下有着重要的经济意义（国家自然科学基金委员会，1996）。

#### (20) 海洋地球化学

狭义的海洋地球化学是指海底地球化学。20世纪60年代以前一直处于资料积累阶段，60年代之后，随着大洋锰结核的大规模调查、海底热水硫化物的发现、深海钻探、国际海洋调查等一系列事件，推动了海洋地球化学的迅速发展（国家自然科学基金委员会，1996）。现代海洋地球化学的定义为：研究海洋环境下的各种地球化学作用过程和在这些过程中化学元素的行为规律和自然演化历史（欧阳自远，倪集众，项仁杰，1996）。

### 1.4 地球化学发展简史

在人类长期探索地球和进行大规模矿产资源勘查、开发的过程中，地质学与化学、物理化学等一系列基础理论学科及分析测试实验技术相结合，产生了地球化学。地球化学科学思想源远流长，根据地球化学发展的特点，可将地球化学发展简史大致分为3个时期：萌芽时期（史前至19世纪末）、独立成型时期（20世纪初到20世纪中叶）和稳定发展时期（1950年到现在）（国家自然科学基金委员会，1996；欧阳自远等，1996；欧阳自远等，2001）。



### 1.4.1 地球化学的起源

这一时期的特点主要是对地壳的化学组成逐步有所认识，并进行一些工作，积累了一定的资料，为地球化学兴起准备条件。这个时期历时最长，可以追溯到史前直至19世纪末。

17世纪中期以前（或1661年以前）处于朴素的地球化学思想萌芽阶段。这个时期出现一些金属矿产的野外找矿标志的定性描述，如公元前六百多年的《管子·地数篇》：“上有丹砂者，下有黄金，上有慈石者，下有铜金……”。公元七百多年，唐朝的颜真卿曾指出：“山上有葱，下有银；山上有韭，下有金；山上有薰，下有铜锡……”。还有，在北宋沈括的《梦溪笔谈》（1092年）和明代李时珍的《本草纲目》（1594年）中都有许多论述涉及地球化学思想，反映了勘查地球化学思想或矿床地球化学思想的萌芽。

1661年，英国化学家R. 波义耳发表了《怀疑派化学家》一文，提出了化学元素的科学定义而开始了化学分析，从而为实际获得有关地壳某些部分化学组成的定量数据提供了手段。这促进了地球化学思想萌芽的发展，推动了化学和地学的结合。在这个阶段中，许多化学家、矿物学家都曾对地壳某些部分的化学组成进行过分析，取得了部分矿物、岩石、水和陨石化学组成的定量资料。

1838年，瑞士化学家C. F. 许拜恩在《论温度影响下某些物体颜色变化的原因》一文中首次提出“地球化学”一词，并明确指出：“总之一句话……在揭开我们星球及组成它的无机物质的形成奥秘之前，必须创立一门新学科，这就是地球化学”。1842年他再次强调了建立地球化学这门学科的重要性。另外，这阶段不仅传统的重量分析和容量分析更加完善，而且又新发展了比色分析，并出现光谱分析技术（1859年G. R. 基尔霍夫和R. W. 本生设计制造了第一台以光谱分析为目的的分光镜）；不久，Д. И. 门捷列夫（1869年）发现了化学元素的周期律，这些都有力地促进了地球化学的发展。1882年，F. W. 克拉克作为美国地质委员会化学实验室负责人，选择了880个最典型的岩石分析计算了10种化学元素在地壳中的平均含量，即克拉克值。1889年，F. W. 克拉克发表了《化学元素的相对丰度》一文，提出19种化学元素在固体地壳和大洋中的平均百分含量，这是最早定量探讨地壳化学组成的尝试。

### 1.4.2 经典地球化学时期

1908年，F. W. 克拉克发表了《地球化学资料》，这是地球化学学科独立成型的标志。该书一版再版，第五版与华盛顿（H. S. Washington）合作，改名为《地壳组成》。这是世界第一部基础地球化学著作。这一时期地球化学不断地从化学、物理化学的发展中获得坚实的理论基础和分析测试手段，在日益深入研究地壳化学组成的同时，对地壳的某些化学作用和化学演化进行了研究，并逐步形成一门具独立的理论基础和研究方法的学科。这一时期在地球化学发展史上属于经典地球化学发展时期。

F. W. 克拉克和H. S. 华盛顿是代表人物，他们开创了研究地壳及其各部分化学组成的工作，发表了第一份地壳元素平均含量，即克拉克值表。这一期间，地球化学研究机构开始建立。如1907年成立的美国卡内基研究所地球物理实验室，该实验室的一些尖端领域也包括地球化学研究工作（“高温高压实验岩石学”、“氨基酸生物地球化学”和“同位