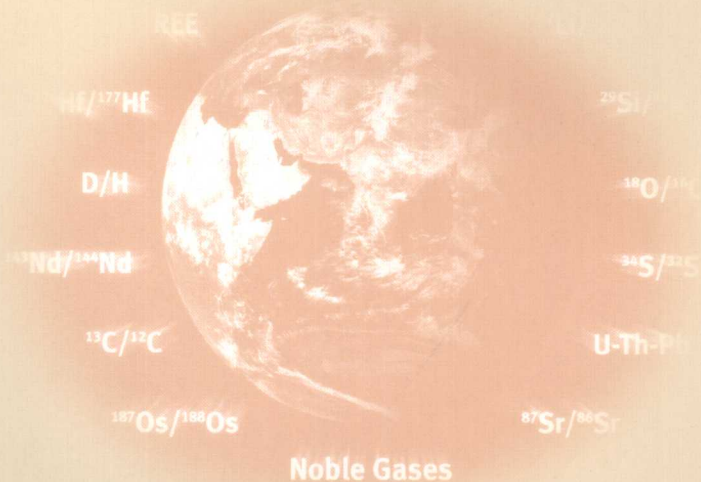


“十一五”国家重点图书 中国科学技术大学精品教材

地球化学

第2版

► 陈道公 支霞臣 杨海涛 编著



中国科学技术大学出版社

中国科学技术大学精品教材

地球化学

DIQIU HUAXUE

第2版

陈道公 支霞臣 杨海清 编著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书主要包括化学元素丰度和分布、地球化学热力学、地球化学动力学、微量元素地球化学、放射成因同位素地球化学及示踪、稳定同位素地球化学、环境地球化学和地壳上地幔化学演化等章节。本书力求系统、定量、简明的介绍地球化学的基本概念、基本原理和基本应用,不过多描述各种地质作用地球化学现象,力求围绕学科中最基本、最有发展前景的分支学科展开。本书在 1994 年第 1 版基础上,根据十余年来学科发展状况和 21 世纪学科动态对内容作了较大的更新和增删。

本书可作为高等学校地球化学、地球物理、地质学等地球科学专业和临近的地理、环境、土壤等学科的本科生、研究生的教材和教学参考书,亦可供有关科学研究和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地球化学/陈道公,支霞臣,杨海涛编著.—2 版.—合肥:中国科学技术大学出版社,2009.4

(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书

安徽省高等学校“十一五”省级规划教材

ISBN 978-7-312-02174-9

I. 地… II. ①陈… ②支… ③杨… 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(2009)第 167033 号

中国科学技术大学出版社出版发行

地址 安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

安徽辉隆农资集团瑞隆印务有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:710×960 1/16 印张:29 插页:2 字数:540 千

1994 年 1 月第 1 版 2009 年 4 月第 2 版 2009 年 4 月第 2 次印刷

印数:3001—6000 册

定价:46.00 元



编审委员会

主 任 侯建国

副主任 窦贤康 刘 斌 李晓光

委 员 (按姓氏笔画排序)

方兆本 史济怀 叶向东 伍小平

刘 斌 刘 兢 孙立广 汤书昆

吴 刚 李晓光 李曙光 苏 淳

何世平 陈初升 陈国良 周先意

侯建国 俞书勤 施蕴渝 胡友秋

徐善驾 郭光灿 郭庆祥 钱逸泰

龚 立 程福臻 窦贤康 褚家如

滕脉坤 霍剑青 戴蓓蓓

总 序

2008年是中国科学技术大学建校五十周年。为了反映五十年来办学理念 and 特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

1958年学校成立之时,教员大部分都来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。五十年来,外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。这次入选校庆精品教材的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步

修订版前言

本书自 1994 年 1 月出版以来已历经 13 余年. 作为高等院校地球化学和有关地球科学类专业的教材和教学参考书, 本书在修订过程中仍坚持第 1 版的少而精原则, 着重论述地球化学的基本原理和基本方法, 根据近十余年来学科发展状况对原教材内容作了必要的更新和增删, 但仍保留了原来的章节. 考虑到当代地球化学的发展, 新增加“环境地球化学”一章.

2004 年 Elsevier Ltd. 出版的十卷本“地球化学文集”(Treatise of Geochemistry)是对 20 世纪 90 年代以来地球化学各领域成果的一个总结, 本书修订过程中参考和引用了其中的部分内容. 建议专业水平较高、有兴趣的读者可根据需要选择性的阅读该文集.

本书是中国科学技术大学校庆 50 周年出版的教材, 再版过程中得到了教务处、研究生院和出版社的大力支持和帮助, 深表感谢.

修订版写作分工和第 1 版相同, 新增环境地球化学一章由陈道公编写. 由于编者水平所限, 文中取材不当、叙述不清甚至错误之处, 在所难免, 敬请批评指正.

编者

2007 年 10 月

第 1 版前言

根据多年教学和科研实践,结合科大地球化学专业特点,我们编写了这本地球化学教科书。

当代地球化学涉及领域广泛,内容十分丰富,已成为地球科学的三大支柱之一。根据少而精的原则,在选材上本书着重介绍和论述地球化学的基本原理和基本方法,不过多地描述自然现象;强调热力学、动力学作为地球化学的基础理论和某些微观机理对地球化学作用过程的重要性。本书对当代地球化学发展中的一些重要领域,如微量元素地球化学、同位素地球化学等给予较多篇幅的论述,略去了各种地质作用地球化学及有关内容。在编写过程中注意收集 70 年代以来国内外的最新科研成果,力图使本书的内容具有时代气息,希望本书的出版是对现有各类教材的补充和深化。

本书第 3 章由支霞臣编写,第 4 章由杨海涛编写,其余各章节由陈道公编写,全书由陈道公定稿。在编写过程中得到了中国科学技术大学地球空间科学系的热情支持和帮助,在此谨表谢意。

编者

1992 年 8 月

目次

总序	i
修订版前言	iii
第1版前言	v
第1章 绪论	1
1.1 地球化学的基本概念	1
1.2 地球化学的发展	4
1.2.1 经典地球化学的三个代表人物	4
1.2.2 现代地球化学及其发展	6
1.3 地球化学的研究方法	11
1.3.1 地球化学的一般工作方法	11
1.3.2 地球化学模式研究法	13
第2章 化学元素的丰度与分布	18
2.1 元素丰度的概念和表示方法	18
2.1.1 丰度和丰度体系	18
2.1.2 丰度表示法	19
2.2 太阳系的化学组成	21
2.2.1 太阳的化学成分	22
2.2.2 陨石的类型和化学组成	27
2.2.3 月球化学	34
2.2.4 行星和行星间物质的化学成分	36
2.2.5 宇宙演化的时间序列	37
2.3 地球的化学组成	38
2.3.1 地球的结构模型	38
2.3.2 地球的化学组成	44
2.3.3 地球上元素的分类	47
2.4 地壳的化学组成	48

4.2.4 速率常数的经验规律	128
4.3 不可逆过程热力学理论	129
4.3.1 简单过程的动力学方程	129
4.3.2 复杂过程和耗散函数	131
4.3.3 非线性过程和耗散结构	139
4.3.4 分支理论和时空有序结构的形成	147
4.3.5 小结	161
第5章 微量元素地球化学	163
5.1 微量元素概念及分类	163
5.1.1 微量元素概念	163
5.1.2 微量元素分类	164
5.1.3 微量元素存在状态	167
5.2 共存相中微量元素分配	168
5.2.1 稀溶液的性质	168
5.2.2 微量元素分配	169
5.3 岩浆过程微量元素分配定量模型	179
5.3.1 部分熔融作用定量模型	180
5.3.2 分离结晶作用定量模型	188
5.3.3 混合作用定量模型	190
5.4 岩浆过程性质判别	196
5.4.1 部分熔融的环境和时间尺度	197
5.4.2 分离结晶作用的瑞利效应	197
5.4.3 混合作用	198
5.4.4 过程判别	198
5.5 稀土元素地球化学简介	203
5.5.1 稀土元素概述	203
5.5.2 稀土元素丰度表示法	206
5.5.3 自然界稀土元素的分布	212
5.6 微量元素地球化学意义	215
5.6.1 微量元素地球化学数据处理方法	215
5.6.2 成岩成矿作用过程判据	216
5.6.3 微量元素地质温压计	217
第6章 放射性同位素地球化学及示踪	219

6.8.2 部分熔融与同位素	292
6.9 同位素混合体系	295
6.9.1 二元混合体系	295
6.9.2 多元混合体系	297
6.9.3 AFC 模式中的同位素	298
第 7 章 稳定同位素地球化学	301
7.1 同位素组成和分馏的表示	302
7.1.1 同位素分馏	302
7.1.2 同位素组成	303
7.1.3 同位素标准	303
7.1.1 同位素分馏值	305
7.2 同位素分馏机理	305
7.2.1 同位素热力学平衡分馏	306
7.2.2 同位素动力分馏	307
7.2.3 非质量相关同位素分馏	308
7.2.4 瑞利分馏	308
7.3 平衡分馏与地质测温	310
7.3.1 基本原理	310
7.3.2 分馏方程的建立	310
7.3.3 平衡判别	314
7.4 氢、氧同位素地球化学	318
7.4.1 水的氢、氧同位素组成	318
7.4.2 岩石中的氢、氧同位素	321
7.5 硫同位素地球化学	330
7.5.1 硫同位素分馏	331
7.5.2 不同储库的硫同位素组成	333
7.5.3 热液体系中的硫同位素	335
7.5.4 硫同位素温度计	337
7.6 碳同位素地球化学	338
7.6.1 同位素分馏	339
7.6.2 各类岩石中碳同位素	341
7.6.3 有机物的碳同位素	344
7.6.4 大气、水和生物圈中的碳同位素	347

9.1.3	环境地球化学与污染	404
9.1.4	环境地球化学与全球环境变化	405
9.2	全球变化与生物圈地球化学循环	409
9.2.1	生物圈化学元素组成	410
9.2.2	生物地球化学循环的一般特征	410
9.2.3	碳的生物地球化学循环	413
9.2.4	氮、硫和磷的生物地球化学循环	422
9.3	有毒有害物质循环	427
9.3.1	有毒有害物质循环的一般特征	428
9.3.2	重金属循环	429
9.3.3	化学农药的循环	430
9.3.4	酸雨的形成与危害	432
9.4	环境有机地球化学	436
9.4.1	污染物的环境有机地球化学	437
9.4.2	生物标志化合物与古环境	439
9.5	环境地球化学与健康	443
9.5.1	地壳物质组成的资源作用与健康效益	443
9.5.2	人类活动对地壳和岩石圈环境的影响	445

第 1 章 绪 论

1.1 地球化学的基本概念

什么是地球化学？顾名思义，地球化学就是地球的化学，它是研究地球（广义的也包括部分天体）的化学组成、化学作用及化学演化的学科。它是地学和化学的边缘学科。地球化学着重研究化学元素和其同位素在地球演化历史过程中的分布、迁移的运动规律，并运用这些规律来解决有关的理论和实际问题。

地球化学的定义、概念和研究范围是逐渐发展的，不是一成不变的。地球化学这一名词是由瑞士化学家许拜恩(Schonbein C F)在 1838 年首先提出。早在 20 世纪 20 年代，俄罗斯地球化学家维尔纳茨基(Vernadsky V I, 1922)给地球化学下的定义是：“地球化学科学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、它们在时间和空间上的分配和运动，以及它们在地球上的成因关系”。俄罗斯另一位地球化学家费尔斯曼(Fersman A E, 1922)提出了类似的定义：“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。”挪威的地球化学家戈尔德斯密特(Goldschmidt V M, 1933)给出的地球化学定义是：“地球化学是根据原子和离子的性质，研究化学元素在矿物、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中的迁移。”这些定义大概就是那个时代对地球化学最完整的理解了。由这些定义可知，20 世纪三四十年代以前，地球化学主要是研究地球中地壳和地壳的不同部位、不同地质单元各种化学元素的含量和分布，属于积累资料的初期阶段。

第二次世界大战以后，随着科学技术的发展，地球科学包括地球化学的研究内容和研究领域也得到了迅速的扩展。登月计划、深海钻探计划、上地幔计划以及 60 年代国际地球物理年计划等的实施，促进了高温高压实验技术、微区微量分析技术、同位素质谱分析技术的发展，从而大大的拓宽了地球化学的研究广度和深度。1973 年，美国全国地球化学委员会地球化学发展方向小组委员会在以美国国

在各种自然体系中,物质的分布是不均匀的,因而组成物质的各种元素,其分布也是很不均匀的.地球化学的首要任务就是查明各种自然体系(大至地壳、地球、太阳系,小至岩石、矿物)中化学元素的分布状态,要从不均匀分布中了解其变化范围和其平均值,后者就是所谓的元素丰度.地球化学研究各个自然体系中元素的分布和丰度的目的,是要搞清元素分布不均匀的原因,以及支配化学元素分布的规律,了解化学元素和同位素的分布和丰度规律,这种规律可以为阐明矿物岩石成因、地壳地幔演化及太阳系元素起源等理论问题提供科学依据.

发生在地球上的各种物理作用、化学作用、生物作用和地质作用都是物质的运动过程。在这些作用中,元素和由它组成的化合物依据各自的物理性质和化学性质,以及它们所处的物理化学环境(温度、压力、浓度等),遵循一定的规律,以不同的速度相对地运动着,并产生物质的化学变化。这种变化和运动所表现出来的天然化学现象,可以称为球化学作用或地球化学过程。地球化学的第二个任务就是要研究地球表面及深部和某些天体的各种千变万化的化学作用。地质作用就是一种重要的地球化学作用,它包括了各类岩浆作用、风化沉积作用和变质作用等,岩浆作用中又有熔融作用、结晶作用、同化混染作用等等。这些作用各有其特殊的物理化学环境和物理化学过程。

元素在不同的地球化学作用中,由于所处物理化学条件不同,往往表现出不同的化学特性。元素的这种特性,叫做元素的地球化学性质或行为。因此,同一元素在不同的地球化学作用中可以表现出不同的地球化学行为。例如,铅元素在岩浆作用过程中是以二价离子(Pb^{2+})形式出现,它不形成独立矿物,常以类质同象方式替换两个钾离子(K^+)而进入钾长石;在热液作用中,当有二价硫离子(S^{2-})存在时,铅就与之结合形成方铅矿(PbS);在地表风化作用过程中,元素硫还可以被氧化,方铅矿变得不稳定,这时分离出来的 Pb^{2+} 可与硫酸根结合形成铅矾(PbSO_4),也可以与碳酸根结合而形成白铅矿(PbCO_3)。同样,化学性质非常相似的元素,由