

[英] Hugh R. Rollison 著
杨学明 杨晓勇 陈双喜 译

中国科学技术大学出版社

岩石地球化学

岩石地球化学

[英] Hugh R. Rollison 著

杨学明 杨晓勇 陈双喜 译

中国科学技术大学出版社

2000·合肥

© Longman Group UK Ltd 1993

《Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation》(利用地球化学数据: 评价、表达、解释)(第1版)由 Pearson Education Limited 安排出版。

图书在版编目(CIP)数据

岩石地球化学/杨学明, 杨晓勇, 陈双喜译. —合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000.3
ISBN 7-312-01190-X

I. 岩石… II. ①杨…②杨…③陈…
III. 岩石学: 地球化学元素 高等学校 教材 IV. P584

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 17261 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号, 邮编: 230026)

安徽肥西新华印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本: 787×1092/16 印张: 18 字数: 449 千

2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷

印数: 001—600 册

ISBN 7-312-01190-X/P•50 定价: 20.00 元

原作者序

Pascal 曾经写到“我们发现写一本书的最后一件事就是要知道把什么放在开头”。这对我来说尤其如此，要展示地球化学各个主要领域的方法学，的确困难重重，因为这是需要众多的专家才能完成的任务。这与 Goldschmidt 于 1954 年在其经典的地球化学教科书的序言中所承认的困难是十分相似的。当然，今天问题还要复杂得多，因为地球化学涉及大量相对新的又比较狭窄的研究领域。现在有 X 射线荧光技术和等离子发射技术的专家，有锆石铅同位素和氩同位素体系方面的学者。由于这些技术十分复杂，专业人员从事这些工作是非常必要的。然而，有许多读者可能只需概略地了解主要技术范围的概貌，而另一些读者希望了解地球化学技术的实际应用和合理解释分析结果。本书正是希望给出这样一个全貌。本书介绍的并非是具有原始创新的概念，但是本书将地球化学文献中广泛的概念和方法系统地进行介绍，从这个意义上讲，本书具有原始创新性。

本书着重讨论“全岩”地球化学，而同样重要的矿物地球化学的广泛领域只能一略而过了。此外，本书不可能涉及某些当前用于地球化学研究的更新和深奥的技术，只能介绍常用的研究方法和技术。这是广大读者最需要的。

本书曾设想是专门为地球化学专业的高年级学生和研究生而写的教学参考书。然而，随着写作工作的不断进行和深入，本书似乎还有更多的用途。比如，本书可作为高年级和研究生的岩石地球化学教科书，而对于那些从事某个专项研究的地球化学家，想更广泛地考虑他的研究问题，也是有用的。本书对于岩石矿物地球化学工作者，无论是在学术界的，工业界的，还是地质区测的，他们若需要评价和解释岩石地球化学数据，同样都是有用的。从这个意义上看，本书又可以作为岩石地球化学方法的工具书来使用。

因此，本书有两个目的。首先，本书可作为从事矿物、岩石和地球化学工作的科研人员、教师和学生的参考书；他们的目的是需要利用地球化学数据，希望了解目前常用的地球化学方法和技术，并从这些数据中获得有地质意义的信息。其次，本书试图概括常用的地球化学方法和技术。所以，可以从两个层次上来阅读本书。希望评价和解释岩石地球化学数据的地球化学家可以参考此书；希望理解目前岩石地球化学术语和了解地球化学文献的地质学家和地球化学家也可以阅读本书。

读者可能会觉察到本书的内容存在明显侧重之处，这是由于作者的地质兴趣所不可避免的结果。第一个侧重之处是选择的实例多为太古代的，这是我的主要研究领域，书中的一些内容也可说明这一点。第二个是侧重于我感兴趣的火成岩石学和变质岩石学，这也是将许多描述的研究方法首先应用的领域。

我非常感谢许多同事在本书写作过程中所给予的帮助，特别是 Jan Kramers, Gordon Lampitt, Alex Woronow, David Lowry, Ken Eriksson, Kevin Walsh 和已过世的同事 Thorley Sweetman 对本书初稿的仔细阅读。最后，感谢我的妻子 Patrica 对我的长期支持和宽容，以及 Amy, Oliver 和 Edward 的耐心鼓励：“爸爸，您还有多少章要写？”

Hugh R. Rollinson

1992 年 5 月于津巴布韦大学

译者的话

我们在刚刚做硕士研究生的时候，曾被浩瀚的中外文献资料吓得不知如何是好。学术导师把研究题目定下来之后，我们要作的第一件事就是开始查阅研究地区或者研究领域的前人研究资料，试图从中找出可以在预定的时间内完成学位论文的研究内容，并且能够有所突破，有所创新。随着把已有的关于研究地区的研究资料看完之后和理论课程的细心钻研，我们开始涉猎相关的英文文献，目的在于了解国外的研究状况，虽然开头语言上存在着许多困难，也不知哪些重要，哪些应该重点去读，这种过程可谓十分痛苦。然而，随着阅读量的加大和导师的有效指点，逐渐感觉到文献资料给我们带来了许多课堂上很难学到的东西。我们读到 G.N. Hanson 和 C.J. Allegre 等关于利用稀土元素（包括微量元素）定量模拟岩浆岩的成岩过程的时候，被深深地吸引住了，觉得很有道理，深受其影响。我们从中学会了微量元素定量模拟岩浆过程的基本原理，也试着应用到自己的研究课题之中（杨学明和林文通，1988，铜官山火成杂岩体成岩机理研究。地质评论，第 1 卷，第 34 期，25~35）。经过硕士阶段学习的锻炼，攻读博士学位的时候已不像以前那么迷惑了。站在新的起点，习惯于更加广泛吸取文献中有价值的东西，在学术导师的指导下学会了从中找出问题，设计出解决问题的办法。这些办法在现有的技术条件下究竟能否实现伴随着我们读完博士学位。经过这些磨练，我们深刻体会到作为一个岩矿工作者虽然很少有机会接触大型分析仪器，亲自测试样品的地球化学数据，但是需要知道如何评价这些数据，从中能够获得哪些关于地球化学过程的有用的信息，这对于我们来说是最为重要的。然而，手头缺少一部简明的介绍如何运用岩石地球化学数据的参考书，工作起来深有不便之处，只好从众多的文献中索取所要的东西。所以，译者之一（杨学明）早就希望能够有一本这样的参考书，等了许多年。他在英国 Leicester 大学作博士后研究期间，合作导师 Dr. M.J. Le Bas 先生向他介绍了一本这方面的著作(Hugh R. Rollison, 1993, Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific & Technical Limited.)，看了觉得非常不错。他回来之后，和同事们商量，决定将这本书译出来介绍给我国的读者。做这项工作的另一个原因是，作为高校的教师及时地把学科的新进展有选择性地搬上讲台，开出新的课程以满足学生日益增长的求知欲望和要求，是我们的本职工作和应尽的责任。特别对高年级学生和研究生来说，更是希望能把新方法迅速有效地应用到要做的毕业论文之中。我们已尝试为地球化学专业的研究生开设了《岩石地球化学》的选修课程，得到了学生的普遍欢迎，这更坚定了我们的决心。

在翻译的过程中，原著作者 Hugh R. Rollison 教授十分关心我们工作的进程，多次来 E-mail 或者来信询问情况，并给予热情的支持和帮助。Lynnen Owen 博士在版权转让方面给予许多帮助，使得这本书的中文版能在国内出版。

本书的翻译过程中还得到了许多朋友的支持和赞助，学友程鹏先生的鼎力相助使得我们能够有效地完成本书的翻译工作。与地球化学教研室的同事们的有益讨论，帮助我们澄清了许多问题。在教学过程中，学生们敏锐的提问和对新知识的期盼时时激励着我们。与外国同僚的合作研究(英国 Leicester 大学的 M.J. Le Bas 博士和伦敦自然历史博物馆的 P. Henderson

研究员), 开阔了我们的眼界, 尤其值得我们学习的是他们那种敬业精神。张培善教授、林文通教授、岳书仓教授、王奎仁教授、从柏林教授、常印佛院士、戴金星院士和叶大年院士等对我们的教诲, 不断地鞭策我们努力进取。周新民教授、徐嘉炜教授、郑永飞教授、李曙光教授、陈江峰教授、刘德良教授、支霞臣教授、陈道公教授、彭子成教授、孙立广教授、王汝成教授、范宏瑞教授、朱光教授、Dr. Dazhi Jiang 教授、Dr. Shoufa Lin 教授和江来利教授等一贯对我们的鼓励和支持使我们信心倍增。我们在此致以深切的谢意。

本书共有 7 章。第一章简要地介绍岩石地球化学数据的影响因素、分析方法和误差的来源。第二章介绍地球化学数据作为特殊的一类数据的处理方法和存在的一些问题, 呼吁数学地质学家的研究成果在应该引起地球化学界足够重视的同时, 也应该注意加强相互间的交流。第三章介绍主要元素数据的应用方法, 包括岩石分类、构筑协变图解; 同时帮助读者了解岩石形成过程、在实验确定的相图上进行投影以估计岩石的形成条件等。第四章介绍微量元素数据的运用方法, 着重讨论各种岩浆作用过程中微量元素的地球化学行为, 进而示踪地球化学过程、岩浆源区。从中我们将会看到微量元素在地球化学中的重要性。第五章根据岩石主要元素和微量元素数据, 我们可以对岩石形成的构造环境进行有效地判别。同位素可分为放射性成因同位素和稳定同位素。放射性成因同位素(第六章)包括那些因天然放射性而自发衰变的同位素以及衰变体系最终的子体。例如, 母体-子体对: Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb, Th-Pb 和 K-Ar 等等。根据母体-子体同位素的衰变规律, 可以对岩石进行精确的定年。放射性成因同位素以同位素比值表示, 如 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, 或者相对于一个参考标准, 换算为 ϵ 值来表示。同位素初始比值可以用来识别岩石的物源区特征; 不同体系同位素比值的相互配合或者与微量元素或稳定同位素数据的相互配合, 可以很好地对岩石的形成过程进行制约。对大洋玄武岩地幔源区的几种端元的认识, 可能是近年来地球化学领域最令人振奋的进展。岩石地球化学研究中的稳定同位素(第七章)集中在自然存在的轻元素的同位素, 如 H, O, C, S 等。它们的同位素因其质量的差异而发生同位素之间的分馏。例如, ^{18}O 比 ^{16}O 重 12.5%, 它们在水的蒸发过程中必然发生分馏, 轻的 ^{16}O 富集在蒸汽之中, 较重的 ^{18}O 则在液体相中富集。稳定同位素在研究地质流体和挥发份中的意义很大。

本书的主体就是讨论上述概括的四类地球化学数据, 以及如何利用它们来识别地球化学过程。此外, 第五章介绍了用微量和主要元素地球化学来确定某些火成岩和沉积岩的大地构造环境。第二章讨论了在分析地球化学数据组时遇到的一些特殊的统计学问题, 对数据的容许的和不容许的表示方法作了分析和讨论。

本书中难免出现一些用词不当或理解不透的地方, 完全是由于翻译者水平有限, 欢迎读者批评指正, 以便再版时修正。

2000 年 1 月于
中国科学技术大学

目 录

第一章 岩石地球化学数据的控制因素和分析方法.....	1
第一节 引 言.....	1
第二节 地质过程及其地球化学指纹.....	2
一、制约火成岩石化学成分的地质过程.....	5
二、制约沉积岩石化学成分的地质过程.....	5
三、制约变质岩石化学成分的地质过程.....	7
第三节 制约岩石地球化学数据的地质因素.....	7
第四节 岩石地球化学中的分析方法.....	8
一、X 射线荧光光谱(XRF).....	11
二、中子活化分析(INAA 和 RNAA).....	11
三、等离子光谱(ICP).....	12
四、原子吸收光谱(AAS).....	12
五、质谱方法.....	12
六、电子探针分析(EMPA).....	13
七、离子探针分析(IMPA).....	14
第五节 选择适当的分析技术.....	14
第六节 岩石地球化学数据中的误差来源.....	15
一、污染.....	15
二、校准.....	15
三、峰的叠加.....	15
四、岩石地球化学数据的误差检验.....	16
第二章 岩石地球化学数据的处理方法.....	17
第一节 引 言.....	17
第二节 平 均 值.....	17
第三节 相 关 分 析.....	19
一、相关系数.....	19
二、相关系数(R)的意义.....	20
三、计算乘积-动差相关系数时的假设.....	21
四、SPEARMAN 秩相关分析.....	22
五、相关矩阵.....	24
六、相关系数型式.....	25

第四节 回归分析.....	25
一、一般的最小二乘法	26
二、减小主轴回归分析	28
三、加权最小二乘法回归分析	28
四、稳定回归分析	28
五、传统的相关分析和回归分析中的一些问题	29
第五节 比值相关分析.....	29
一、PEARCE 元素比值图解——不恰当运用的比值相关分析的一个实例	30
二、比值相关分析在微量元素图解中的运用	31
三、同位素地质学中的比值相关分析	31
第六节 常数和问题.....	31
一、封闭的结果	32
二、常数和效应的 AITCHISON 解决方法.....	33
第七节 三角图解中趋势线的解释	35
第八节 主要组分分析.....	35
第九节 判别分析.....	37
一、火成岩石学中的一个例子	37
二、判别分析的其它运用	38
第十节 岩石地球化学数据分析向何处去?	39
第三章 岩石主要元素数据的运用方法.....	40
第一节 引言.....	40
第二节 岩石的分类.....	40
一、利用氧化物-氧化物图解进行火成岩石的分类	40
二、利用标准矿物进行火成岩石的分类	44
三、利用阳离子进行火成岩石的分类	50
四、沉积岩的化学分类	51
五、讨论	54
第三节 协变图解.....	54
一、从主元素协变图解识别地球化学过程	55
二、协变图解的选用	60
三、协变图解中趋势线的解释	64
四、模拟火成岩主要元素过程	68
五、讨论	69
第四节 岩石化学成分在实验确定的相图上的投影	69
一、钠长石-钾长石-石英标准矿物图解——花岗岩体系	70
二、霞石-钾霞石(KALSILITE)-二氧化硅图解——霞石正长岩体系	73
三、玄武岩的实验体系	73

四、钙-碱性岩石的实验体系	80
五、讨论	81
第四章 岩石微量元素数据的运用方法	83
第一节 引 言	83
一、基于地球化学行为的微量元素分类	83
二、岩浆体系中微量元素的行为	83
第二节 微量元素分配的控制因素	86
一、分配系数	86
二、控制微量元素分配的地质因素	96
第三节 稀土元素(REE)	106
一、REE 的化学特征	107
二、REE 数据的处理	107
三、REE 型式的解释	110
第四节 多元素标准化图解或不相容元素图解(蜘蛛图解)	112
一、火成岩的多元素标准化图解	112
二、沉积岩的多元素标准化图解及其解释	117
第五节 铂金属组元素(PGE)图解	119
一、PGE 数据的处理	119
二、PGE 图解的解释	121
第六节 过渡金属元素图解	121
第七节 双变量微量元素图解	123
一、火成岩的双变量微量元素图解	123
二、沉积岩的双变量微量元素图解	124
第八节 富集-亏损图解	125
第九节 利用微量元素模拟火成岩的形成过程	125
一、矢量图解	127
二、用多变量微量元素图解模拟	127
三、岩石成因模拟——实例	127
四、微量元素的反演技术	131
五、地球化学模拟的最后评论	133
第五章 运用岩石地球化学数据判别大地构造环境	134
第一节 引 言	134
一、判别分析	134
二、不活动元素	134
三、大地构造环境	135
四、判别图解的运用	136

第二节 玄武质至安山质成分岩石的判别图解	136
一、微量元素判别图解	136
二、玄武岩的主要元素判别图解	149
三、玄武岩的次要元素判别图解	152
四、玄武岩的单斜辉石成分判别图解	154
第三节 花岗质成分岩石的判别图解	155
一、基于变量 RB-Y-Nb 和 RB-Yb-Ta 的花岗岩判别图解(PEARCE 等, 1984)	156
二、基于变量 HF-Rb-Ta 的花岗岩判别图解	157
三、衡量火山弧花岗岩弧成熟度的一个标志	157
四、花岗岩的主要元素判别图(MANIAR 等, 1989)	157
五、花岗岩构造环境的 R1-R2 因素判别图解 (BECHER 等, 1985)	159
六、讨论	160
第四节 碎屑沉积岩的判别图解	160
一、碎屑沉积物的主要元素判别图解	160
二、碎屑沉积物的微量元素判别图解	163
三、讨论	164
第五节 大地构造对岩浆岩和沉积岩地球化学的制约	164
一、识别古火山岩大地构造环境的专家系统 (PEARCE, 1987)	165
二、大地构造环境判别图解仍然有功效吗?	165
第六章 岩石放射性成因同位素数据的运用方法	167
第一节 引 言	167
第二节 地质年代学中的放射性成因同位素	167
一、等时线的计算	169
二、模式年龄	171
三、地质年龄数据的解释	174
第三节 成因岩石学中的放射性成因同位素	179
一、不同的同位素体系在识别源区和地质过程中的作用	180
二、源区的识别	181
三、地幔源区随时间的演化——地幔演化图解	190
四、EPSILON 标记法	193
五、同位素相关图解	199
六、地幔-地壳地球动力学	203
第七章 岩石稳定同位素数据的运用方法	206
第一节 引 言	206
一、标记	206
二、同位素分馏	206
三、物理化学对同位素分馏的控制	208
第二节 氧同位素的运用方法	209

一、自然界 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化.....209

二、氧同位素温度计.....209

三、氧同位素-放射性成因同位素相关图解.....215

第三节 利用氧和氢同位素研究热水溶液：水岩相互作用.....219

一、氢同位素.....220

二、由矿物同位素组成计算水的同位素组成.....220

三、天然水的同位素组成.....221

四、水/岩比值的定量化.....223

五、水-岩相互作用的实例.....225

第四节 碳同位素的应用.....228

一、碳同位素在自然界的分布.....228

二、碳酸盐的碳和氧同位素研究： $\delta^{18}\text{O}$ 对 $\delta^{13}\text{C}$ 的投影.....229

三、海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成.....232

四、生物地球化学演化.....232

五、 CO_2 的碳同位素.....232

六、碳同位素温度计.....234

第五节 硫同位素的应用.....235

一、硫同位素在自然界的分布.....235

二、硫同位素分馏的控制因素.....235

三、硫同位素在火成成因岩石学中的运用.....239

四、硫同位素在热液矿床成因研究中的运用.....240

参考文献.....243

第一章 岩石地球化学数据的控制因素和分析方法

第一节 引言

本书主要讨论岩石地球化学数据及其如何获取有关地质过程和成因信息的方法。按照习惯，地球化学数据可分四类：主要元素、微量元素、放射性成因同位素和稳定同位素地球化学数据。表 1.1 列出文献中地球化学数据的一个常见的实例。我们将以这四类地球化学数据为主线，分别来进行介绍。每一章将说明如何用特定的地球化学数据来追索一套岩石的成因，讨论数据的表达方式和评价其优缺点。

表 1.1 津巴布韦 Belingwe 绿岩带科马提岩的全岩地球化学数据(据 Nisbet 等, 1987)*

主要元素氧化物(wt%)	ZV14	ZV85	ZV10	微量元素(ppm)	ZV14	ZV85	ZV10
SiO ₂	48.91	45.26	45.26	Ni	470	1110	1460
TiO ₂	0.45	0.33	0.29	Cr	2080	2770	2330
Al ₂ O ₃	9.24	6.74	6.07	V	187	140	118
Fe ₂ O ₃	2.62	2.13	1.68	Y	10	6	6
FeO	8.90	8.66	8.70	Zr	21	16	14
MnO	0.18	0.17	0.17	Rb	3.38	1.24	1.38
MgO	15.32	22.98	26.31	Sr	53.3	32.6	31.2
CaO	9.01	6.94	6.41	Ba	32	12	10
Na ₂ O	1.15	0.88	0.78	Nd	2.62	1.84	2.31
K ₂ O	0.08	0.05	0.04	Sm	0.96	0.68	0.85
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.02	放射性成因同位素比值	ZV14	ZV85	ZV10
S	0.04	0.05	0.05	ε _{Nd}	+2.4	+2.4	+2.5
H ₂ O+	3.27	3.41	2.20	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.7056	0.70511	0.70501
H ₂ O-	0.72	0.57	0.28	稳定同位素比值(‰)	ZV14	ZV85	ZV10
CO ₂	0.46	0.84	1.04	δ ¹⁸ O	+7.3	+7.0	+6.8
总计	100.38	99.03	99.20				

*注: 主要元素和微量元素 Ni, Cr, V, Y 由 XRF 测定; FeO 由湿化学法测定; H₂O 和 CO₂ 由重量法测定; Rb, Sr, Sm, Nd 由 IDMS 测定。

主要元素(第三章)是指在任何岩石中占绝对多量的元素，如 Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K 和 P。它们的含量用氧化物重量百分数表示(wt%)。主要元素的测定通常只测其阳离子，并假设有适量的氧与之相匹配。因此，主要元素氧化物的总量大约是 100%。岩石样品的主要元素氧化物分析数值的总和，可以作为其分析方法的可靠性的粗略指标，一般要求误差不能大于±1%。铁可测定为 FeO 和 Fe₂O₃，但有时以总铁表示，即以 FeO_(total)或 Fe₂O_{3(total)}

形式表示。

微量元素(第四章)是指含量低于 0.1%的那些元素,它们的含量用 ppm(百万分之一)表示,或者更为稀少以 ppb(十亿分之一)表示。然而,大家可能注意到并不是总按照这样约定的,有时含量高于 0.1%(1000ppm)元素也被列为微量元素(表 1.1)。从后面的表 1.5 和图 4.1,我们将会看到微量元素在地球化学中的重要性。

有些元素在一类岩石中呈现为主要元素,而在另一类岩石中则表现为微量元素。例如, K 是流纹岩的主要组分,含量高于 4.0 wt%;它是正长石和黑云母的基本结构元素。但是, K 在某些玄武岩中的含量极低,不存在含 K 的单矿物相。在这种情况下, K 的地球化学行为表现为微量元素。

挥发份,如 H_2O , CO_2 和 S 一般包括在主要元素分析数据之中(表 1.1)。结合于硅酸盐矿物晶格中的水,若温度高于 $110^\circ C$ 才会释放出来,这种水叫做结晶水,以 H_2O^+ 表示。附着于岩石矿物裂隙或缺陷中的水,在温度低于 $110^\circ C$ 就会释放出来,这种水称为吸附水,以 H_2O^- 表示。吸附水不是岩石的主要组分。有时用温度为 $1000^\circ C$ 的烧失量来确定岩石的挥发份含量,以 LOI 表示(Lechler 等, 1987)。

同位素可分为放射性成因同位素和稳定同位素。放射性成因同位素(第六章)包括那些因天然放射性而自发衰变的同位素以及衰变体系最终的子体。例如,母体-子体对: Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb, Th-Pb 和 K-Ar 等。放射性成因同位素以同位素比值表示,如 $^{87}Sr/^{86}Sr$,或者相对于一个参考标准,换算为 ϵ 值来表示(表 1.1)。

地球化学研究中的稳定同位素(第七章)集中在那些自然存在的轻元素的同位素,如 H, O, C, S 等。它们的同位素因其质量的差异而发生同位素之间的分馏。例如, ^{18}O 比 ^{16}O 重 12.5%,它们在水的蒸发过程中必然发生分馏,轻的 ^{16}O 富集在蒸气之中,较重的 ^{18}O 则在液体相中富集。稳定同位素在研究地质流体和挥发份中的意义很大,能够用来示踪流体的来源。稳定同位素以其比值相对于标准值表示为 δ 值的形式(表 1.1)。

本书的主体就是讨论上述概括的四类地球化学数据,介绍如何利用它们来识别地球化学过程。此外,第五章介绍了用微量和主要元素地球化学来确定某些火成岩和沉积岩形成时的大地构造环境。第二章讨论了在分析地球化学数据组时遇到的一些特殊的统计学问题,对数据的容许的和不容许的表示方法作了分析和讨论。

在本章里我们讨论 3 项内容: (1)自然界可能的地质过程及其地球化学指纹; (2)野外地质工作和地球化学数据解释的相互关系; (3)当前用于现代地球化学中的分析技术和方法。

第二节 地质过程及其地球化学指纹

本书的一个主要目的就是介绍如何利用岩石地球化学数据来识别岩石形成的地质过程。这一节以图(图 1.1 至图 1.3)和表(表 1.2 至表 1.4)的形式扼要地总结火成作用、沉积作用和变质作用过程的主要地球化学指纹或者特征。这里先作简要的说明,在后继的章节里再做全面的介绍和讨论。表 1.2 至表 1.4 列举了地质过程及其地球化学指纹,标明了后继的章节里哪里可以找到用主要元素或微量元素、放射性成因同位素或稳定同位素判别特定的地质过程的内

表 1.2 后续章节将讨论的火成作用过程的地球化学指纹

	主要元素指纹	微量元素指纹	放射性同位素指纹	稳定同位素指纹
近地表过程				
去气作用				第七章四节
				第七章五节
与地下水的相互作用				第七章三节
岩浆房过程				
分离结晶作用	第三章三节	第四章二节		第七章二节
		第四章三节		第七章五节
		第四章七节		
		第四章九节		
混染作用		第四章二节	第六章三节	第七章二节
				第七章五节
同化混染作用和分离结晶作用	第三章三节	第四章二节	第六章三节	
		第四章九节		
岩浆混合作用		第四章九节	第六章三节	
开放体系过程(RTF 岩浆房)		第四章二节		
		第四章九节		
液体不混溶作用		第四章五节		
源区过程				
部分熔融作用	第三章三节	第四章二节		
	第三章四节	第四章三节		
		第四章九节		
区域溶化		第四章二节		
源区混合作用		第四章九节	第六章三节	第七章二节
源区特征		第四章七节	第六章三节	第七章二节
大地构造环境	第五章二节	第五章二节		
		第五章三节		
		第五章五节		

表 1.3 后续章节将讨论的沉积作用过程的地球化学指纹

	主要元素指纹	微量元素指纹	放射性同位素指纹	稳定同位素指纹
物源区研究				
碎屑沉积物的大地构造环境	第五章四节	第四章七节		
		第五章四节		
物源区化学	第五章四节	第四章三节	第六章二节	
		第四章四节	第六章三节	
物源区混合作用	第三章三节			
风化作用	第三章三节	第四章三节		

续表 1.3 后续章节将讨论的沉积作用过程的地球化学指纹

	主要元素指纹	微量元素指纹	放射性同位素指纹	稳定同位素指纹
搬运和侵蚀作用				
沉积物成熟度	第三章二节	第四章二节		
		第四章三节		
河水化学		第四章三节		
海水化学			第六章三节	第七章二节
				第七章三节
				第七章四节
大气水化学				第七章三节
				第七章四节
沉积过程				
元素在海水中的滞留时间		第四章三节	第六章二节	
		第四章二节		
化学沉积物的沉淀		第四章三节		第七章五节
黑色页岩的沉积				第七章四节
硫酸盐的还原作用				第七章五节
成岩作用		第四章三节		
		第四章二节		
成岩温度				第七章二节
				第七章三节
孔隙水成分				第七章三节
石灰岩的成岩作用				第七章四节

表 1.4 后续章节将讨论的变质作用过程的地球化学指纹

	主要元素指纹	微量元素指纹	放射性同位素指纹	稳定同位素指纹
原岩				
火成的	第三章二节			
沉积的	第三章二节			
构造混合的	第三章三节			
元素的活动性	第三章三节	第四章二节	第六章三节	
		第四章四节		
		第四章八节		
		第四章九节		
		第五章一节		
固态扩散作用				
封闭温度			第六章二节	
温度计				第七章二节
				第七章四节
流体运移				
H ₂ O				第七章三节
CO ₂				第七章四节

容。这样安排可能有助于读者阅读和使用本书。

一、制约火成岩石化学成分的地质过程

从本质上来看，火成岩石的化学成分受其源区的化学成分和矿物成分所制约。熔体的主要元素和微量元素组成由部分熔融过程类型和部分熔融程度而决定，尽管熔体在从源区迁出上侵定位的过程中或许受到很大程度的调整(图 1.1)。火成岩石的放射性成因同位素组成能够准确地限定其源区的性质，因为其初始比值在部分熔融和岩浆房过程中保持恒定。源区的本身成分是曾经发生在源区的各种地质过程共同作用的结果。这对于地幔的研究尤其重要。在过去十年中，通过对幔源大洋玄武岩的同位素研究，我们对地幔动力学的理解已经获得突破性的进展(第六章第三节)。

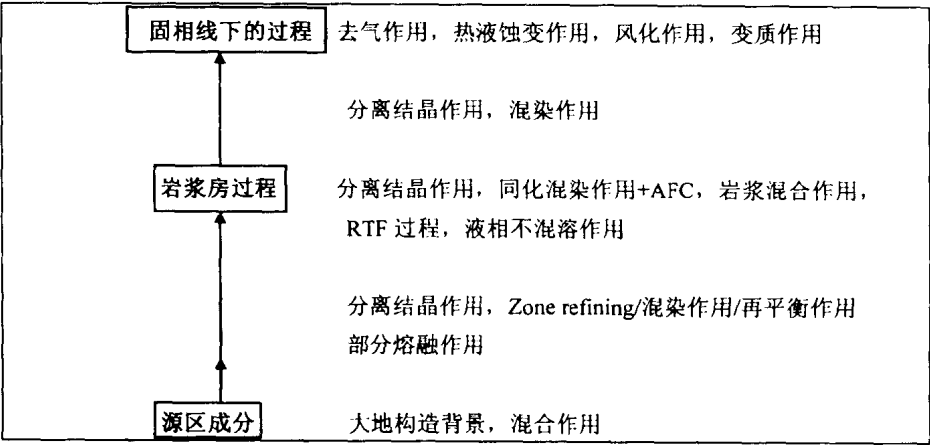


图 1.1 制约火成岩的化学成分的主要过程流程图

大多数岩浆在侵位至地表或近地表之前都经过了岩浆房的渗透作用。岩浆房过程通常要改变由源区经部分熔融作用形成的原始岩浆的化学成分；岩浆房过程包括分离结晶作用、岩浆混合作用、混染作用或者几种这些过程的动力学混合。理解这些不同的过程的化学效应需要完整的地球化学手段，即主要元素和微量元素研究以及放射性成因同位素和稳定同位素成分的分析测定。Hall(1987)和 Wilson(1989)都曾详细地讨论了岩浆房过程。

随着岩浆的侵位或者喷出，火成岩石的化学成分可能受到去气作用或者与流体相互作用而发生显著的变化。火成岩的去气作用主要影响稳定同位素成分，而与流体相互作用可能影响所有的岩石化学成分。理想的情况是，化学分析样品应选择新鲜的火成岩，但是在实际工作中有时难以找到新鲜的样品。例如，大多数采自海底的样品都发生了程度不同的风化作用或者甚至遭受了海水的蚀变作用。许多侵入岩体在其侵位的过程中，首先引起围岩中发生地下热水循环，进而导致火成岩自身发生化学蚀变作用。如以下将讨论的，变质火成岩石与流体相相互作用，其化学成分同样也发生了明显的调整。

二、制约沉积岩石化学成分的地质过程

沉积岩石物源区的化学成分可能是控制沉积岩化学成分的主要因素，尽管随后的过程对它们的化学成分有很大程度的调整(图 1.2)。物源区的化学成分是大地构造环境的函数。风化

条件可能将其指纹留在沉积物中，沉积岩的主要元素研究表明沉积物的化学成分能够反映其风化条件(第三章第三节)。在搬运的过程中，化学成分发生很大的变化：某些微量元素富集于粘土矿物和重矿物中，而另外一些元素分散在富石英的粗粒部分之中。这些过程从很大程度上取决于侵蚀和沉积作用的时间跨度。

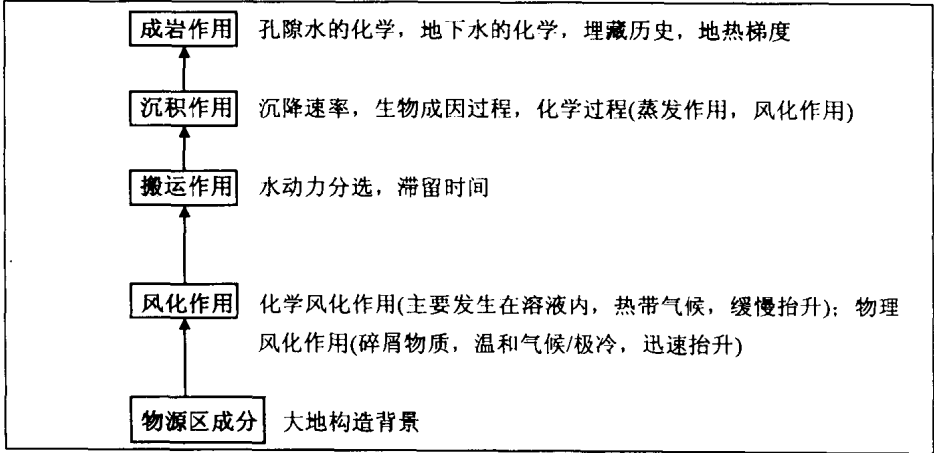


图 1.2 制约沉积岩的化学成分的主要过程流程图

在沉积过程中，化学变化取决于沉积环境；沉积环境受沉降速率控制。化学和生物化学控制元素在海水中的溶解度，海水中的风化和氧化还原条件同样对特殊沉积物来说是重要的制约因素。利用稳定同位素可以很好地研究沉积后的过程。氧和氢稳定同位素是海水类型的重要示踪剂，它们在研究成岩流体中起关键作用。碳和氧同位素可用于石灰岩的成岩作用研究。与温度有关的氧同位素分馏作用能够用来研究成岩过程中的地热梯度，并可以对岩石的埋藏历史进行制约。

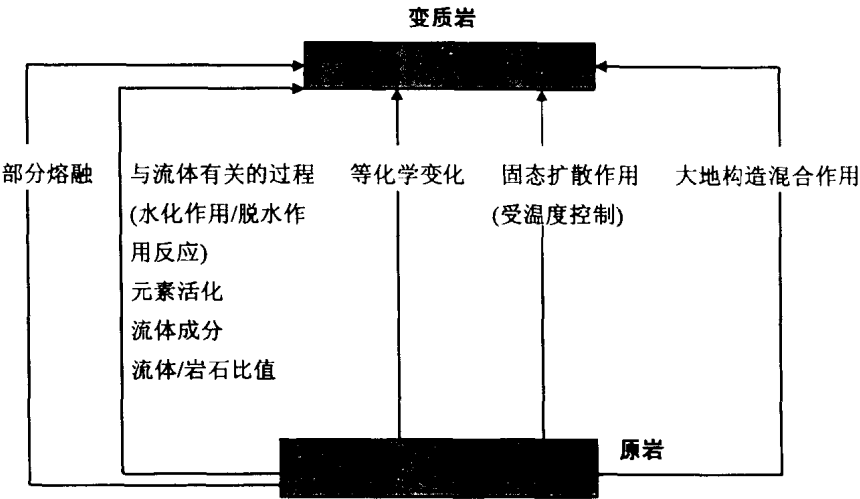


图 1.3 制约变质岩的化学成分的主要过程流程图