

简明地球化学手册

中国科学院贵阳地球化学研究所 编译
《简明地球化学手册》编译组

科学出版社

简明地球化学手册

中国科学院贵阳地球化学研究所
《简明地球化学手册》編譯組 編譯

科 学 出 版 社

1 9 7 7

内 容 简 介

本书主要根据苏联沃伊特克维奇等和美国出版的《简明地球化学手册》编译而成。书中以大量图表(图 40 幅、表 178 个)形式收集和整理了有关地球化学的主要资料,也简述了地球化学的一些基本概念。全书共分九章,内容包括:地球的一般资料;原子、离子半径及元素地球化学分类;元素丰度;各类岩石的平均化学成分;稳定同位素;同位素地质年龄测定;元素、矿物、岩石的性质(离子电位、负电性、热力学性质、氧化-还原电位、同质多象);类质同象、矿物共生组合;矿物形成温度的测定。附录部分列举了常用物理常数和常用计量单位及其换算表等。

本手册可供地质普查、勘探工作人员和地质、地球化学的科研及教学人员参考。

简明地球化学手册

中国科学院贵阳地球化学研究所 编译
《简明地球化学手册》编译组

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1977 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1977 年 7 月第一次印刷 印张: 13 3/8 插页: 1

印数: 0001—10,400 字数: 304,000

统一书号: 13031·570

本社书号: 834·13—14

定 价: 1.40 元

编译者的话

地球化学是应用近代的科学方法和原理,研究地球的物质组成(元素、同位素)及其运动过程和规律的一门科学.它是探寻矿产资源,了解成岩成矿规律,乃至研究地球起源及其演化发展历史方面的一门重要学科.

地球化学发展成为一门独立的地质科学只有半个多世纪.在我国,随着生产实践和科学实验的发展,地球化学的理论和方法已迅速而广泛地运用到地质工作中,积累了大量数据资料,并取得了积极的成果.现在,地球化学的研究领域日益扩大,相应地也出现了一些新的分支学科.近些年来,国外先后出版了地球化学手册〔苏联《简明地球化学手册》(Краткий справочник по геохимии)^[1],美国《地球化学手册》(Handbook of geochemistry)^[2]〕,对地球化学基本资料进行收集和整理.前者主要以综合数据资料为主,内容较简明扼要,也述及了地球化学的一些基本概念,但有些资料旧而不全.后者比较详细地介绍了地球化学的基本概念,还分述了化学元素周期表中各元素的结晶化学性质、同位素及其在矿物和各类岩石、水圈、大气层中的分布等,内容较为系统和全面,不过基本数据资料尚感欠缺.我们鉴于有关地球化学的基本概念在一般教科书中已有专门阐述,遵照毛主席关于“洋为中用”的教导,考虑到我国广大地质工作者在生产实践和科研工作中的迫切需要,侧重于综合数据资料,编译了这本《简明地球化学手册》.本书主要参考了苏联出版的《简明地球化学手册》^[1],还参考了美国出版的《地球化学手册》^[2](一卷和

二卷第一部分),以大量图表形式叙述了地球的物质组成及其性质,简介了某些地球化学的基本概念,还搜集了近年来我国有关书刊发表的一些资料,增添和删节了原书的部分内容,并对书中一些错误的地方作了纠正。

参加本书编译工作的有赵振华、王中刚、李华梅、南君亚、白正华、吴宗絮、徐建国、苏贤泽、张哲儒、王贤觉、侯洪泉等同志。郭承基、欧阳自远、杨凤筠、卫克勤、蔡仁安、邹天人、杨朝梁、洪文兴、王贤觉、于学元等同志分别对各章译稿进行了审校。

由于我们水平有限,编译时间短促,本书对国内近些年来生产、科研和教学单位所取得的有关地球化学的新成果未及收集整理,其他方面的缺点、错误也会不少,敬希读者批评指正。

目 录

编译者的话	(i)
第一章 地球的一般资料	(1)
一、地球的大小	(1)
二、地球的质量、平均密度、结构模型	(2)
三、地壳	(8)
四、月球	(14)
五、太阳	(18)
六、太阳系行星特性的比较	(19)
七、地球的能量平衡和内热	(19)
第二章 地球化学中的原子和离子	(27)
一、基本粒子	(27)
二、原子的电子层构造	(27)
三、化学元素的原子量	(31)
四、元素的原子半径	(31)
五、元素的离子半径	(33)
六、元素的地球化学分类	(44)
第三章 化学元素的丰度	(50)
一、引言	(50)
二、元素和核类(原子核类)的宇宙丰度	(51)
三、化学元素的原子丰度(以 $\text{Si} = 10^6$ 为标准)	(57)
四、地壳中化学元素的平均含量	(60)
五、主要岩石类型中化学元素的平均含量	(68)
六、元素在地壳岩石中的丰度	(75)
七、元素在水圈中的丰度	(81)
八、元素在生命物质中的丰度	(86)

九、地球大气圈的成分	(89)
十、整个地球的平均化学成分	(91)
第四章 岩石和其它自然形成物的化学成分	(92)
一、陨石的化学成分	(92)
二、火成岩的成分	(103)
三、沉积岩的化学成分	(120)
四、变质岩的化学成分	(140)
五、地壳中最主要的岩石类型和最主要矿物的分 布量	(140)
六、天然水的化学成分	(141)
七、某些生命有机质、可燃性物质和火山气体的 成分	(147)
第五章 地球化学中的同位素	(150)
一、同位素分布的基本规律	(150)
二、自然条件下同位素的分离过程	(164)
三、氢的同位素	(166)
四、碳的同位素	(168)
五、氮的同位素	(176)
六、氧的同位素	(177)
七、硫的同位素	(189)
第六章 核子地质年代学	(202)
一、引言	(202)
二、铅法	(206)
三、根据普通铅同位素组成计算年龄	(220)
四、氡法	(226)
五、铯法	(233)
六、石陨石的年龄	(235)
七、地球的年龄	(236)
八、地质年代表	(239)
第七章 元素、矿物和岩石的某些物理性质	(242)

一、元素的配位数	(242)
二、矿物的结构·异质同象和同质多象矿物	(249)
三、原子和离子的电离势	(263)
四、元素的负电性	(267)
五、标准氧化-还原电位	(274)
六、矿物及有关物质的热力学性质	(327)
七、不同温度的岩石的热导率	(328)
八、岩石的密度	(328)
第八章 元素聚积的地球化学特性	(336)
一、矿物和元素的共生组合	(336)
二、类质同象	(338)
三、鲍温反应系列	(351)
四、有用矿物	(352)
五、天然气体	(369)
第九章 矿物形成温度的测定准则和方法	(370)
一、矿物的熔化温度	(370)
二、天然化合物分解的温度	(379)
三、相变温度	(379)
四、矿物中气液包裹体的研究	(381)
五、阿尔诺耳德法	(384)
六、巴尔特法	(384)
七、氧同位素温度计法测定温度	(387)
八、玄武岩熔岩的温度	(389)
附录	
I. 物理常数表	(390)
II. 常用计量单位及其换算	(391)
III. 氧化物重量百分比与分子数换算表	(394)
IV. 化学元素发现的时间和发现者	(402)
V. 化学元素周期表	(406)
各章插表索引	(407)

各章插图索引	(414)
参考文献	(417)

第一章 地球的一般资料

一、地球的大小

第一种近似的看法把地球的形状当作圆球；第二种近似看法认为地球是轴向上微受压缩的旋转椭球体；第三种近似的看法(根据精确的大地测量研究结果)则认为真实的地球形状应为两个几乎相等的赤道轴和一个较小极轴的三轴椭球体。而目前的看法是，地球的真实形状是一个近于椭球的不规则体——大地球体。

为了说明地球的特征，选定了下列参数： a ——大半轴(赤道半径)， b ——小半轴(极半径)，地球扁平率 $\alpha = \frac{a-b}{a}$ 。在地球物理学和大地测量学中最常用的有三种地球椭球体模型：(1)别谢利的椭球体模型，是在1841年提出的，目前仅在个别情况下采用；(2)国际椭球体模型，是赫伊弗尔德在美国大地测量基础上计算的，曾被1924年国际大地测量代表大会推荐；(3)苏联椭球体模型，由中央大地测量、航空测量和制图科学研究所(Ф. Н. 克拉索夫斯基, А. А. 伊佐托夫和 М. С.

表 1.1 地球椭球体参数

椭 球 体 模 型	a (大半轴), 米	b (小半轴), 米	α (扁平率)
别谢利椭球体	6,377,397	6,356,079	1:299.15
赫伊弗尔德椭球体	6,378,388	6,356,909	1:297
克拉索夫斯基椭球体(1940年)	6,378,245	6,356,863	1:298.3

莫洛坚斯基)根据苏联、西欧和美国大地测量结果计算的。上述椭球体资料列于表 1.1 中。

克拉索夫斯基椭球体模型的补充资料:

平均半径 6,371.22 公里;

赤道圆周长度 40,075.696 公里;

地球面积 510,000,000 平方公里;

陆地面积 149,000,000 平方公里 (占整个地球面积的 29%);

水的面积 361,000,000 平方公里 (占整个地球面积的 71%);

地球体积 1.083320×10^{12} 立方公里;

物体脱离的临界速度 11.2 公里/秒;

赤道上点的线速度 465 米/秒;

地球沿轨道运动的平均速度 29.76 公里/秒 (100,000 公里/小时)。

二、地球的质量、平均密度、结构模型

地球的质量是根据全球万有引力定律计算的。目前关于地球质量和平均密度的数值列述如下:

地球质量 $M=5.974 \times 10^{27}$ 克;

地球平均密度 $d=5.517 \pm 0.004$ 克/立方厘米;

上部岩石圈的平均密度 $d=2.65$ 克/立方厘米。

地球的平均密度与较轻的固体岩石上部带的差别,表明了地球内部存在有致密的地核。地球表面重力加速度的分布取决于地球的形态与自转。A. 克列罗提出了确定地球表面正常重力场的第一个公式。对于苏联的椭球体模型, A. A. 伊佐托夫利用大陆和海洋观测站资料计算的地球表面重力加速度分布可用如下公式表示:

$g\varphi = 978.045 (1 + 0.0053026 \sin^2\varphi - 0.0000059 \sin^2\varphi)$,
式中 φ 为该点的纬度。

标准的平均重力加速度为:

$g = 980.665$ 厘米/秒², 或 980.665 毫伽;

赤道重力加速度为 978.045 毫伽;

在纬度 45° 处的重力加速度为 980.616 毫伽;

极地重力加速度为 983.235 毫伽。

重力加速度值随深度而增大, 达到一定的深度至少有一个最大值, 再向地心则重力加速度值减小, 在最中心为零值。根据 Γ. 德热弗里斯 (1960 年) 的地球结构模型, 重力加速度值随深度的变化如表 1.2 所示。

关于地球内部结构的基本资料是在研究地震产生的地震波传播特征的基础上获得的。1914 年, 根据地震学的资料成功地确定了地球结构的总轮廓, 并近似的计算了地震波——纵波 (P) 和横波 (S) 的传播速度。

按目前建立的概念, 地球由三个基本壳层组成: 地壳、地幔 (或过渡壳层) 和中心核。它们之间的界面由地震波传播速度的突变来确定。

特别显著的突变属一级分界面, 较小的突变属二级分界面。

关于地球深部物理状态和组成问题是有争议的, 并且到目前还存在着问题。

地球中央部分的高密度 (5.52 克/立方厘米) 和它上部的低密度 (2.65 克/立方厘米) 之间的显著差别, 使我们得出地球中心存在稠密物质即地核的结论。可是, 地核界面只是在二十世纪由于地震学的功绩才开始确立。

早在十九世纪就提出了地球结构和组成的第一个模型 (图 1.1)。已发现的地核的高密度不能用过去的只有上部物

表 1.2 地球内部结构和特性

(德热弗里斯, 1960 年)

壳 层	深 度 (公里)	$\frac{r^*}{R}$	密 度 (克/立方厘米)	重力加速度 (厘米/秒 ²)	地 震 波 速 度 (公里/秒)	
					P (纵波)	S (横波)
地壳	0	1.000	2.60	981	5.57	3.36
	10	0.9984	2.70	982	6.50	3.74
莫霍洛维奇界面						
地幔	33	0.995	3.32	985	7.76	4.35
	100	0.984	3.38	989	7.94	4.44
	200	0.969	3.47	992	8.24	4.60
	300	0.953	3.55	995	8.59	4.76
	400	0.936	3.63	997	9.09	4.95
	600	0.906	4.13	1001	10.15	5.66
	800	0.874	4.49	999	10.97	6.12
	1000	0.843	4.68	995	11.42	6.36
	1500	0.765	4.97	987	12.12	6.68
	2000	0.686	5.24	986	12.79	6.92
	2500	0.608	5.49	1004	13.66	7.17
主 要 分 界 面						
地核	2900	0.545	9.43	1037	8.10	—
	3000	0.529	9.57	1019	8.22	—
	3500	0.450	10.23	914	8.90	—
	4000	0.373	10.76	803	9.50	—
	4500	0.294	11.19	696	9.97	—
内 核 界 面						
地核	5000	0.216				
	5500	0.137	17.00	411	9.7	—
	6000	0.058	17.10	177	11.23	—
	6371	0.000	17.20	0	11.31	—

* r ——离地面的距离; R ——地球半径.

质单一压力作用来解释。由于陨石被视为类地行星碎片，所以，可根据陨石成分的资料推断地球深部的物质组分。可是，正如过去已提出的假设一样，目前许多研究者又提出了地球平均化学成分与陨石成分相当的假说。由此便产生了所谓的地球结构和成分的陨石模型。

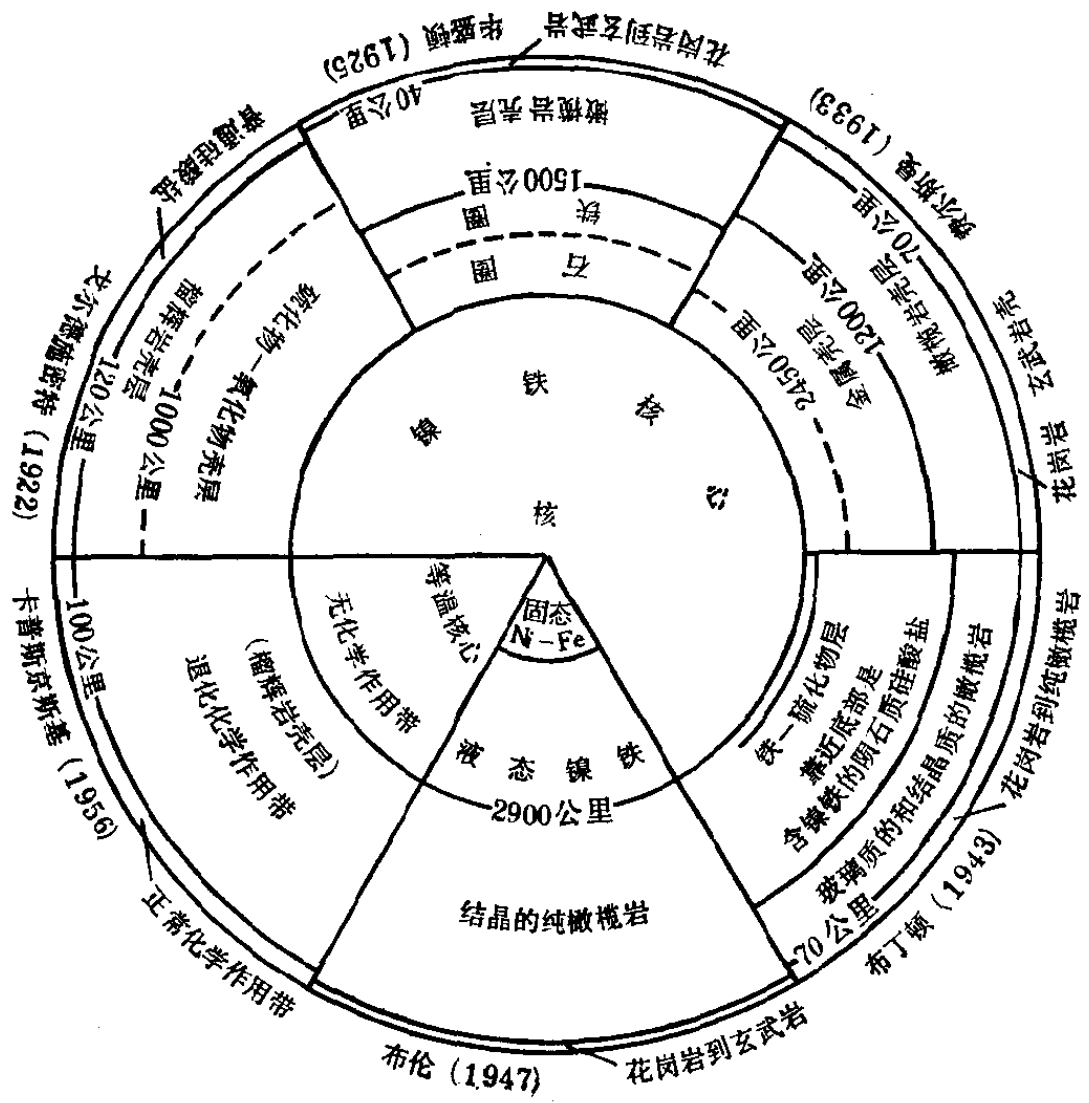


图 1.1 不同作者提出的地球结构

近十年来建立了地球结构和组成的两种概念。根据第一种由多数地球化学家(V. M. 戈尔德施密特, A. E. 费尔斯曼等)所发展的概念, 地球的层状构造和壳层的不同化学组成有关。根据第二种概念[B. H. 洛多奇尼科夫, W. H. 拉姆齐(Ramsey)], 整个地球的化学组成是相当均匀的。不同密度

壳层的存在，可以用硅酸盐物质受强烈压缩并转变为比较致密的相来解释。因此，地核是由受强烈压缩的“金属”状硅酸盐组成。

A. Ф. 卡普斯京斯基(1956年)在运用热力学、化学和量子力学等各种方法考查地球结构问题时，提出了独特的地球模型。当然，对三种不同科学分析方法都能同样符合的地球模型是最合适的。卡普斯京斯基认为，地球由三个同心圆壳层组成——外圈、中间圈和中心圈。第一和第二圈之间有间断，位于深50—120公里处。外圈近似的相当于岩石圈的概念，中间圈相当于榴辉岩壳层，其达到的深度为2,900公里。中心圈是金属核。地球由外层向中心，其物质组成具有连续变化的特征。在外圈范围内进行的化学作用严格地服从Д. И. 门捷列夫周期律。因此，外壳层是具有结晶构造的固体的正常化学作用带。中间圈——榴辉岩壳层，由强烈压缩的硅酸盐系组成。此壳层可能是氧化物和硫化物的聚积源。在中间圈，由于压力的作用，改变了化学原子的性质——发生了电子向未充满的内层迁移的现象。这就产生了原子的电子异构，它们的化学性质退化了。此作用进行的机理尚不清楚。中间圈（或按现在的术语称为地幔）乃是退化的化学作用带，其原子构造近于晶体状态。中心圈（地核）已失去化学特性。在那里，由于高压引起了与化学反应有关的原子的电子壳层完全破坏，因此，不存在电子交换的化学作用。中心圈是由原子核组成的无化学作用的地区，所有原子核均为压紧的电子液态的等离子体，并具有金属态性质。所有自然体在超高压下均变成单一的金属结构，这并不取决于其化学成分。从而可以这样设想，中心圈由似结晶液体组成，而这些液体相当于钢的硬度，同时又保留了液体的某些性质。

新的地球物理资料证明，地球主要壳层——地幔和地核

具有不同的化学组成。实验室的试验目前已超过了地球深部温度和压力的整个范围。借助于冲击波的动力研究,可以达到相当于地心的压力。已对相当于 600—800 公里深度条件下的物质进行了系统的研究。据实验研究,在五百万大气压的超高压情况下不出现硅酸盐的金属化,因此,对金属核的假设提出了很大的怀疑。同时,根据地核的低粘度、地震波速度和震波吸收资料、地球固有振动资料以及地球体的涨潮和地轴振动的研究,证明地核主要呈液态,这是地球物理学的重大成就。

表 1.3 地球结构(古登堡-布伦模型)

壳 层	深 度 (公里)	密 度 (克/立方 厘米)	体积百分比 (%)	质 量 (10^{25} 克)	占整个质量 的 百分比 (%)
地 壳 (A)	0—33	2.7—3.0	1.55	5	0.8
地 幔 {	(B) 33—400	3.32—3.65	16.67	62	10.4
	(C) 400—1000	3.65—4.68	21.31	98	16.4
	(D) 1000—2900	4.68—5.69	44.28	245	41.0
地 核 {	(E) 2900—5000	9.40—11.5	15.16	188	31.5
	(F) 5000—5100	11.5—12.0	0.28		
	(G) 5100—6371	12.0—12.3			

表 1.4 地球壳层的特征

壳 层	厚 度 (公里)	体 积 (10^{27} 立方 厘米)	平均密度 (克/立方 厘米)	质 量 (10^{27} 克)	质 量 (%)
气圈	—	—	—	0.000005	0.00009
水圈(平均)	3.8	0.00137	1.03	0.00141	0.024
地壳	30	0.015	2.8	0.043	0.7
地幔	2870	0.892	4.5	4.054	67.8
地核	3471	0.175	10.7	1.876	31.5
整个地球	6371	1.083	5.52	5.974	100.00

地核物理性质的新资料表明,地核可能由铁和较轻元素的合金组成。在已知合金中,由 Fe(80%)和 Si(20%)组成的合金最接近于地核性质。

目前认为,古登堡-布伦的模型(表 1.3)是地球结构和组成的最可能的模型。表 1.4 还列出了 B. 马逊(1958 年)的资料,该表示出了地球的上壳层——气圈和水圈的特征。

三、地壳^[3-7]

地壳,也称岩石圈。它和水圈、气圈、生物圈组成地球的外部地圈。其空间范围是从地表到莫霍洛维奇分界面。地壳是不均匀的,其厚度处处都有变化,特别是大陆和深海盆地之间存在着显著的差异。大陆地壳平均厚度 40 公里左右,在喜马拉雅造山褶皱带地区,地壳最大厚度达 60—70 公里,而太平洋地区地壳厚度仅 5—6 公里。图 1.2 鲜明地反映了地壳厚度的变化。表 1.5、1.6、1.7 分别列出了用瑞雷波、乐夫面波及 SP' 波确定的我国地壳厚度的资料。根据世界地壳厚度的分布率统计,可以看出两个明显的和一个不太明显的峰值区。厚度为 5—10 公里为第一峰值区,占地壳总面积约 30%;第二峰值区为 30—35 公里,占地壳总面积约 15%;第三峰值区是大于 60 公里,仅占地壳总面积 2%左右。

地壳的物质组成也是极不均匀的。它主要由下部玄武岩层(硅镁层)与上部的花岗岩层(硅铝层)及上覆沉积岩盖层所组成。地壳差不多是处于完全均衡调整状态,地表的不规则由地壳内不同密度物质的分布来补偿。地壳和地幔之间的界面不仅是一个地震分界面,而且也是一个质量大致相等的上覆岩石的(在海盆地中则还有水)等体积补偿面。A. 波特瓦尔德(1955 年)和 A.B. 罗诺夫(1967 年)根据地壳均衡补偿的特