

# 野外地质工作

参考资料



冶金工业出版社

# 野外地质工作参考资料

《野外地質工作參考資料》編写組

冶金工业出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了地球化学基础知识、地层与岩浆岩、矿物及其工业利用、岩石命名与分类、金属矿床的普查找矿、勘探与预测、地球物理与地球化学找矿以及数理统计等。

本《资料》供从事金属矿床普查找矿和勘探工作的野外地质工作者参考。

## 野外地质工作参考资料

《野外地质工作参考资料》编写组

\*

冶金工业出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
冶金工业出版社印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张32 字数768千字  
1978年11月第一版 1979年12月第二次印刷  
印数 16,501~26,500册  
统一书号：15062·3366 定价 2.60 元

# 前 言

在党的第十一次代表大会路线的指引下，全国人民都为在本世纪内把我国建设成为全面实现农业、工业、国防和科学技术现代化的社会主义强国，使我国国民经济走在世界前列的宏伟目标而努力奋斗。冶金地质战线广大职工，为加快冶金工业的发展，也在不断加快步伐，实现新的跃进。

地质工作是发展国民经济的基础工作，为了适应冶金地质工作迅速发展的需要，加速冶金工业的发展，由《地质与勘探》编辑部负责组织冶金地质系统的有关生产、科研单位以及武汉地质学院的同志共同编写了这本《野外地质工作参考资料》。在编写中，为适应我国冶金地质工作的特点，取材主要依据国内的生产实践经验，部分章节也吸收了国外的资料。

本《资料》所涉及的政策、规范、标准和指标等，如有与国家或上级现行规定有矛盾之处，在使用中应以国家和上级现行规定为准。

本《资料》可供从事金属矿床普查找矿和勘探的野外地质人员参考，因此，力求突出金属矿产，特别是当前冶金工业急需矿产的找矿、评价、勘探以及与其有关的一些问题，有重点地提供一些比较有效的工作方法和常用数据与资料。总之，作为参考资料，希望能达到结合生产，普及实用的目的。

由于我们深入实际调查研究不够，水平有限，加之编写经验不足，因此，书中可能有缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

在编写过程中，曾得到许多单位的大力支援和提供资料，在此谨致谢意。

《野外地质工作参考资料》编写组

一九七七年十月

# 目 录

## 第一章 地球化学知识

第一节 地球化学及其内容、任务和方法 .....	1	第三节 同位素地球化学 .....	20
1. 地球化学及其内容、任务和它在相邻学科中的地位 .....	1	1. 同位素成分对解决地球化学问题的作用 .....	20
2. 地球化学的研究方法 .....	1	2. 化学元素的同位素成分及其变化的原因 .....	21
第二节 地球以及包括水圈与大气圈在内的地壳的组成和化学成分 .....	2	3. 个别元素的同位素地球化学 .....	24
1. 地球带状构造理论依据的地质与地球物理资料 .....	2	第四节 原子、离子的结构 .....	29
2. 地壳、水圈、大气圈和生物圈的平均化学成分; 克拉克值的计算方法; 关于元素分配的认识的改变和对克拉克值的分析 .....	6	1. 元素按原子结构类型的分类; 元素的化学性质与原子电子层结构的关系 .....	29
3. 化学元素及其同位素的分布规律 .....	16	2. 化学元素的地球化学分类 .....	33
4. 克拉克值的实际意义 .....	17	第五节 原子、离子的大小与类质同象 .....	36
5. 元素的地球化学平衡与定量地球化学原理 .....	18	1. 原子、离子的大小对地球化学的意义 .....	36
		2. 类质同象 .....	39

## 第二章 中国地层和侵入岩

第一节 中国地层概述 .....	44	9. 三叠系 .....	47
1. 前震旦系 .....	44	10. 侏罗系和白垩系 .....	47
2. 震旦系 .....	44	11. 第三系 .....	62
3. 寒武系 .....	45	12. 第四系 .....	62
4. 奥陶系 .....	45	第二节 中国侵入岩 .....	62
5. 志留系 .....	45	1. 前震旦纪侵入岩 .....	63
6. 泥盆系 .....	46	2. 震旦纪侵入岩 .....	63
7. 石炭系 .....	46	3. 古生代侵入岩 .....	63
8. 二叠系 .....	47	4. 中生代侵入岩 .....	64

## 第三章 金属元素矿物及岩石分类与命名

第一节 金属元素矿物 .....	69	4. 贵金属(金、银、铂、钯、钌、铑、铱) .....	84
1. 黑色金属(铁、锰、铬) .....	69	5. 半金属(硅、砷、碲、硒) .....	89
2. 重有色金属(汞、铅、铋、镍、钴、铜、镉、锡、锑、锌) .....	72	6. 稀有轻金属(锂、铍、铯、铷、铀、钍) .....	92
3. 轻有色金属(铝、镁、钾、钠、钙) .....	81	7. 稀有高熔点金属(钨、钼、钽、铌) .....	

钼、钨、铋、钒) .....	96	3. 正常沉积碎屑岩类 .....	126
8. 稀有分散金属(镓、锗、铟、铊、		4. 泥质岩类 .....	131
铊) .....	101	5. 化学岩和生物化学岩类 .....	131
9. 稀土金属(钇族、铈族) .....	104	6. 附生岩类 .....	138
<b>第二节 火成岩</b> .....	106	<b>第四节 变质岩</b> .....	138
1. 火成岩分类表 .....	106	1. 概述 .....	138
2. 超基性、基性侵入岩类 .....	109	2. 变质岩的化学成分、矿物成分、结构	
3. 中-酸性侵入岩类 .....	110	构造、变质作用类型、变质相和变质	
4. 碱性侵入岩类 .....	112	相系 .....	138
5. 脉岩类 .....	113	3. 变质岩分类和命名的一些原则规定 .....	142
6. 次火山岩类 .....	114	4. 变质岩的主要构造、结构分类和化	
7. 火山岩类 .....	116	学分类 .....	143
<b>第三节 沉积岩</b> .....	119	5. 变质岩的变质作用分类 .....	144
1. 概述 .....	119	6. 变质相的分类 .....	153
2. 火山碎屑岩类 .....	120	7. 变质相系的分类 .....	155

#### 第四章 金属矿床共生组分研究

<b>第一节 概述</b> .....	162	2. 铂族元素矿物的富集及有关元素	
1. 金属矿产的综合利用 .....	162	分析 .....	189
2. 共生组分的研究程度 .....	163	3. 铂族元素矿物的鉴定 .....	190
3. 主要矿种共生金属组分分布概况 .....	163	4. 铂族元素的配分 .....	191
4. 矿石物质成分研究的主要内容及		<b>第四节 硫化矿中伴生金的研究</b>	
工作方法 .....	166	方法 .....	193
5. 关于组织协作 .....	176	1. 研究内容及方法 .....	193
<b>第二节 伴生钴矿石的物质成分</b>		2. 金的工艺特性研究 .....	199
研究及其综合评价 .....	177	<b>第五节 稀有元素矿石物质成分</b>	
1. 野外地质观察及取样 .....	177	研究方法 .....	201
2. 钴的分布富集规律研究 .....	177	1. 矿床地质研究 .....	201
3. 钴赋存状态的研究方法 .....	181	2. 样品的采取及重砂加工分离流程 .....	202
4. 钴矿石工艺特性的研究 .....	187	3. 矿石化学成分研究 .....	207
5. 钴的储量计算 .....	187	4. 矿物鉴定 .....	208
<b>第三节 铂族元素矿床物质成分</b>		5. 重砂定量 .....	208
研究方法 .....	188	6. 元素赋存状态的研究 .....	208
1. 样品采集 .....	188		

#### 第五章 某些金属矿的地质与找矿

<b>第一节 铁</b> .....	210	<b>第二节 铜</b> .....	226
1. 铁的性质和用途 .....	210	1. 铜的性质和用途 .....	226
2. 铁矿物种类及其主要矿物特征 .....	212	2. 国外铜矿资源概况 .....	226
3. 工业要求及矿石类型的划分 .....	212	3. 铜的主要矿物 .....	227
4. 铁矿床的主要类型、特征及		4. 铜矿床的一般工业要求 .....	227
找矿标志 .....	215	5. 铜矿石的工业类型 .....	228

6. 铜矿床的工业类型及找矿标志	231	1. 概述	246
<b>第三节 铬</b>	235	2. 铂族元素矿床地质及类型	247
1. 铬的性质和用途	235	3. 铂族元素成矿作用的讨论	250
2. 铬的地球化学及其工业矿物	236	4. 铂矿床找矿有利的地质前提和找矿方法	251
3. 铬矿床的成因类型	238	<b>第七节 金</b>	251
4. 铬矿石类型及其质量的工业要求	239	1. 金的性质	251
5. 国外铬矿资源概况	239	2. 金矿床的成因类型	252
6. 铬铁矿矿床的某些形成条件与分布规律	240	3. 砂金矿找矿的有利地质前提	252
7. 铬铁矿矿床的工作方法简述	242	<b>第八节 铌和钽</b>	253
<b>第四节 镍</b>	243	1. 性质和用途	253
1. 镍的性质和用途	243	2. 地球化学及矿物学特点	254
2. 镍矿石的工业类型和一般工业要求	243	3. 矿床类型	255
3. 镍矿床的工业类型	243	4. 工业要求	255
4. 主要类型镍矿成矿有利的地质前提和找矿方法	244	5. 国外资源及生产简况	257
<b>第五节 钴</b>	246	<b>第九节 铍</b>	259
1. 钴的性质和用途	246	1. 铍的性质与用途	259
2. 钴的工业矿床	246	2. 矿物学特点	260
<b>第六节 铂族元素</b>	246	3. 矿床类型	261
		4. 铍矿石的工业要求及类型	262

## 第六章 金属矿床的若干基本概念和研究方法

<b>第一节 矿床的若干基本概念</b>	264	1. 成矿温度的测定	275
1. 矿产的分布面积	264	2. 矿物标型特征在矿床研究中的应用	281
2. 矿体的形态	265	3. 矿床的生成深度	290
3. 矿石的结构和构造	269	4. 岩石的孔隙度及其在成矿中的作用	292
<b>第二节 矿床的若干研究方法</b>	274	5. 矿田的构造形态	296

## 第七章 大比例尺金属矿产预测工作方法

<b>第一节 矿产预测的目的和意义</b>	328	4. 编制基础图件	331
<b>第二节 矿产预测的原则</b>	328	5. 进行综合研究, 编制成矿规律图	334
1. 坚持实践第一的观点	328	6. 编制成矿预测图, 指出进一步工作的方向	335
2. 坚持唯物辩证法, 正确分析矛盾	329	<b>第四节 矿产预测工作中对一些控矿因素的研究要点</b>	336
3. 坚持群众路线	329	1. 岩浆控制因素	336
4. 坚持一般和个别结合、点面结合的原则	329	2. 构造控制因素	337
5. 坚持贯彻国家对地质工作的有关政策	329	3. 岩性控制因素	338
<b>第三节 大比例尺矿产预测的工作步骤和方法</b>	329	4. 矿床的带状分布	340
1. 明确任务的特点, 统一思想认识	330	5. 围岩蚀变与接触变质	340
2. 确定编图种类和要求	330	6. 矿床的分布深度	341
3. 系统收集资料	331		

## 第八章 数理统计在地质勘探工作中的应用

第一节 概述	343	8. 统计推断与信度	349
第二节 基本概念	344	第三节 方法与应用	349
1. 总体与个体	344	1. 矿体地质特征的定量表示	349
2. 样本与样品	344	2. 地质趋势的查明	351
3. 变量与随机变量	344	3. 矿床成因问题分析	355
4. 频率与概率	345	4. 两组观测结果的对比	358
5. 统计分布与概率分布	345	5. 勘探误差及合理观测量个数的确定	360
6. 正态分布与中心极限定理	347	6. 系统影响因素的查明	363
7. 参数与统计量	348	7. 区域矿产预测	366

## 第九章 金属矿产资源的勘探

第一节 关于勘探工作的几个 基本概念	370	内容和使用方法	371
1. 勘探工作的任务	370	第三节 储量计算	373
2. 关于勘探成果的准确性和勘探方法的 合理性	370	1. 矿块体积	373
3. 地质勘探、矿山设计和基本建设 的“三结合”	371	2. 矿石体重和湿度	376
第二节 矿石工业品位指标的		3. 主金属平均品位	376
		4. 矿块储量	378
		5. 共生组分的金属储量	378
		6. 矿体和矿区储量	383

## 第十章 地球物理勘探

第一节 绪论	384	2. 重力勘探	406
1. 研究范围与分类	384	3. 野外工作与观测值的各项改正	406
2. 岩石和矿石的物理性质	384	4. 重力异常的推断解释	408
3. 物探方法分类、应用条件和范围	389	5. 重力勘探的应用	410
4. 物探的一般工作方法	390	第四节 电法勘探	410
第二节 磁法勘探	392	1. 自然电场法	410
1. 地磁场和异常磁场	392	2. 充电法	412
2. 仪器	395	3. 电阻率剖面法	414
3. 野外工作	395	4. 垂向电测深法	419
4. 磁异常的推断解释	396	5. 激发极化法	423
5. 复杂磁异常的推断解释	402	6. 电磁感应法	426
6. 航空与井中磁测	404	第五节 地震勘探与放射性勘探	433
7. 磁法勘探的应用	405	1. 地震勘探	433
第三节 重力勘探	405	2. 放射性勘探	435
1. 地球的重力场	405		

## 第十一章 地球化学找矿

第一节 概述	437	第二节 岩石地球化学法(原生	
--------	-----	----------------	--



晕法) .....	439	2. 点群分析.....	459
1. 定义.....	439	3. 判别分析.....	463
2. 影响岩石地球化学异常的因素.....	439	4. 趋势分析.....	466
3. 工作方法.....	453	5. 回归分析.....	470
<b>第三节 土壤地球化学测量(次生</b>		6. 因子分析.....	480
晕法) .....	453	7. 几点看法.....	482
1. 简述.....	453	<b>第七节 地球化学找矿分析</b>	
2. 采样及编录.....	454	方法概述 .....	482
3. 样品处理.....	454	1. 化学分析.....	483
4. 确定指示元素及分析方法.....	454	2. 仪器分析.....	487
<b>第四节 水系底沉积物测量(分散</b>		<b>附录1 有关地球的一些常数 .....</b>	<b>490</b>
流法) .....	455	<b>附录2 地质时代、地层单位及地</b>	
1. 简述.....	455	质年表.....	490
2. 样品采集和加工.....	455	<b>附录3 中国岩浆岩及其主要岩种</b>	
3. 样品的分析.....	455	的平均化学成分表 .....	493
<b>第五节 资料整理及异常评价 .....</b>	<b>456</b>	<b>附录4 常见矿物名称缩写 .....</b>	<b>497</b>
1. 质量检查.....	456	<b>附录5 地震震级与地震烈度.....</b>	<b>498</b>
2. 化探工作的一般图件.....	456	<b>附录6 筛网的规格 .....</b>	<b>498</b>
3. 异常评价.....	457	<b>附录7 含量与浓度的换算 .....</b>	<b>499</b>
<b>第六节 化探工作中常用的几种</b>		<b>附录8 压力与温度换算表 .....</b>	<b>499</b>
数理统计方法 .....	458	<b>附录9 中外度量衡表 .....</b>	<b>500</b>
1. 几个常用特征数.....	458		

# 第一章 地球化学知识

## 第一节 地球化学及其内容、任务和方法

### 1. 地球化学及其内容、任务和它在相邻学科中的地位

地球化学是一门研究地壳的化学过程的科学，其中包括化学元素的迁移、集中与分散；地球本身与地壳的化学成分；化学元素在地壳中的分布、分配与相互结合。

地球化学还要研究化学元素在整个地质过程中的历史，它们迁移的方式以及在岩石和矿物中的赋存状态。此外，研究的内容还包括离子在结晶格架中的性状和各种地球化学作用的动力学。

在各种各样地质过程纷繁错综的情况下，地球化学一方面研究化学元素积聚的条件，同时也可了解形成矿床的物理化学环境的特点，从而提供找矿的途径。地球化学找矿已在地质普查工作当中广泛应用，既能减化工作，又可节约开支，而与地球物理方法相配合，还可用于寻找不出露地表的隐伏矿床。

为要判定找矿有利的新区域、新地段，必须掌握这一区域范围的成矿特点。这种特点表现为化学元素与给定的岩石中它们的平均含量之间的量比变化；另外，也表现在该区域的岩石和矿床借以形成的某种占优势的典型地球化学作用。

在掌握一种新的矿物原料或新矿床类型矿石的加工工艺方面，地球化学可以发挥不小的作用，能够指出需要提取的元素究竟是以哪种状态存在，是独立矿物，还是某种矿物中的类质同像杂质，还是吸附状态，等等。

通过各种化学和物理的研究方法，同时借助于物理化学、结晶格架动力学的资料和热力计算，地球化学还可以解决矿床成因上的一些复杂问题，特别是那种由于极不相同的地球化学作用相互叠加而形成的矿床，更为适合。

总之，地球化学是一门综合性的科学，处于地质科学（矿物学、岩石学、矿床学、水文地质学、海洋学）与化学（无机化学、物理化学、化学热力学、结晶化学、胶体化学）之间的地位。

另一方面，在研究地球起源与组成成分的问题上，地球化学又关联到天文学（宇宙学、陨石学）、物理学（放射学、核地质学、地球物理学）和生物学（生物化学、土壤学以及与生物地球化学有关的分支）。

### 2. 地球化学的研究方法

与拥有专门研究手段的一些基础科学不同，地球化学作为一门综合性的学科，广泛采用地质的、矿物的和化学的研究方法。

物理的研究方法包括光谱分析、伦琴射线光谱分析、伦琴射线结构分析、放射性测量、同位素分析、分光光度测定、发光分析、磁化率的磁化学测定，另外还有穆斯鲍尔效应、电子顺磁共振等等。

在地球化学找矿的专门方法当中，需要提到的是金属量测量。这种方法可以确定矿床周围无论是疏松岩石，还是结晶岩石，甚至是水域中的元素分散量。

地球化学集中观察研究的有以下几个方面：矿物分带与化学分带；由一般的物理化学多组物系产生的矿物共生组合；矿物的析出顺序；一种矿物对另一种矿物的交代置换。

在人工合成矿物和研究其进一步的蚀变、置换或破坏过程时，目前已采用实验室再现自然过程的方法。利用这种方法可以在所观察的共生组合当中证实该过程中化学元素可能的搬运方式和成矿沉积溶液的成分，同时能够查明矿物的形成条件。

在化学研究方面，除了包括极谱分析、光度比色法在内的一般分析方法以外，pH 值（介质的酸碱度）和 E<sub>h</sub> 值（氧化还原电位）的测定对不少地球化学问题的解决有很大作用。另外，研究络合物的方法和胶体化学的方法也越来越重要。

在热分析方面，除去可以得出脱水曲线、碳酸盐类的离解温度和转变点的热记录法之外，近来已逐渐更多地应用气液包裹体的均一温度和爆裂温度研究等方法。

以上提到的许多研究方法，若是几种同时并用，相互校正，就能解决更多的问题。

## 第二节 地球以及包括水圈与大气圈在内的地壳的组成和化学成分

### 1. 地球带状构造理论依据的地质与地球物理资料

关于地球的构造与成分的设想当中，有许多争论与假设。有关水圈、大气圈，尤其是对流层（它的下部）的资料以及研究力量所能达到的地壳上部成分的资料比较可信。至于更深部位的成分，只有根据地震测量、重力测量和地热、放射性与磁测数据得出的一些假设。

在介绍现有的认识之先，应该了解下列已有的可信数据：

地球的大小

平均半径(公里)	6371.22	体积(立方公里)	$1083320 \times 10^{18}$
极半径(公里)	6356.86	质量(吨)	$5974 \times 10^{21}$
赤道半径(公里)	6378.24	平均密度(克/立方厘米)	5.517
地球表面(平方公里)	$510 \times 10^6$	地表岩石平均密度(克/立方厘米)	2.73

对比后两项数字就可以说明深部存在的物质密度更大，而地震资料也指出密度的变化是跳跃式，这就是说，地球的构造略呈层壳状。水圈的体积虽然只是  $1.37 \times 10^9$  立方公里，即占地球体积的 1/800 或质量的 1/4200，但它的作用巨大。水圈的面积是  $361 \times 10^6$  平方公里，地球表面的 70.78% 被它覆盖；海洋平均深度 3792 米，最深处达到 10863 米（太平洋马里亚纳群岛以南）。

水圈的质量为  $1.41 \times 10^{18}$  吨（比重 1.028 克/立方厘米），其中 98.3% 属于海洋，而后者携带的已溶化合物达到  $5 \times 10^{16}$  吨。现代陆地面积是  $149 \times 10^6$  平方公里，或者说是平均高度 825 米到最大高度 8848.13 米（喜马拉雅山的珠穆朗玛峰）的地球表面的 29.22% 属于陆地范围。

象整个地球一样，大气圈（质量约等于  $5.15 \times 10^{15}$  吨）的构造也是分层的。对流层高度是 10~12 公里，赤道上可达 16~18 公里，它的成分是水蒸气和碳酸气。对流层质量约占大气圈质量的 80%。

对流层的最上限是对流层顶，也就是与同温层的分界。同温层高达 80 公里，不含水蒸气，15~60 公里处有数量不多的臭氧 (O<sub>3</sub>)，强力吸收太阳的紫外线辐射。30~40 公里

高度以上，空气温度由 $-(50\sim 60)^{\circ}\text{C}$ 骤升，在60公里处可以达到 $+75^{\circ}\text{C}$ ，但再上到80公里处，温度又降为 $-75^{\circ}\text{C}$ 。

同温层之上就是电离层，有数量较多的离子和自由电子。这一层的高度可以达到1000~1300公里，再向上就是逐渐稀薄的大气外层。

地球本身坚实的上部就是地壳，其厚度不一：海洋下部的地壳只有5~6公里厚，大陆下的厚度是35公里左右，山脉之下则是60~70公里。

对地壳及其各个组成部分来说，有几个数值很有意义，这就是弹性波的传播速度（平均5~6公里/秒）和地壳各部分的密度（平均2.7~2.9克/立方厘米）。

地壳的各部分	纵波速度 (公里/秒)	密度 (克/立方厘米)
上层(沉积层)	3~5	1.8~2.5
中层(花岗岩层)	5.5~6	2.5~2.7
下层(玄武岩层)	6.4~7	2.7~2.9
深层	7.8~8.2	3.1~3.5

海洋之下不存在花岗岩层，只有玄武岩层。

地台区地壳的厚度是25~35公里，山区是40~80公里；褶皱愈古老，地壳厚度愈小，例如：前寒武纪与加里东褶皱的厚度为30~35公里，海西褶皱为38~42公里，阿尔卑斯褶皱则是50~80公里。

关于地台区地壳的资料要比褶皱区的资料分得更细。阿尔卑斯褶皱区花岗岩层的厚度比海西褶皱区的大。当拗曲转变为褶皱区时，花岗岩层随之增厚（既借助于来自玄武岩层和深层的物质，同时也有沉积岩的变质作用）；褶皱区转变为地台时，地壳厚度随之减小，但玄武岩层加厚。地壳的质量约等于 $2\times 10^{19}$ 吨，即大到相当于地球质量的1/300，其中岩石圈占93.06%，水圈占6.91%，大气圈占0.03%。

地壳是由“莫霍面”与“地幔”分开，后者又分为上地幔（深达1200公里）与下地幔（深达2900公里）。再向下就是地核，它又分为液态的外核（深达5120公里）和估计是固态的内核。

各种构造现象、地震和火山作用，追溯其起因都是来自上地幔。从地震波在上地幔的传播速度来判断，在200~400公里深部有一个软化层。主张矿石形成于地壳深层的人认为，含矿物质来自地幔的上部。

有人提供资料说，地核外层是液态的。这个假设有一个根据，即地震波的速度逐渐变小，在过渡到地幔时由6公里/秒增大到8公里/秒，之后又变小，直至横波消失。此外，地磁场主要部分的形成条件是带电粒子在地核外层的运动，所以后者应该是液态的。

下列数字表明地球本身物质密度（克/立方厘米）随深度增加的情况：

33公里	3.32克/立方厘米	2900公里	5.68克/立方厘米
100公里	3.38克/立方厘米	3600公里	10.35克/立方厘米
400公里	3.63克/立方厘米	4000公里	10.76克/立方厘米
500公里	3.89克/立方厘米	4800公里	11.47克/立方厘米
600公里	4.13克/立方厘米	4980公里	11.54克/立方厘米
700公里	4.33克/立方厘米	5120公里以下	14.2~16.8克/立方厘米
1200公里	4.80克/立方厘米	6370公里(地心)	17.2克/立方厘米

根据地震波的传播速度，地球物理工作者把地壳划分为几个带(表 1-1)。

地壳密度的垂直变化

表 1-1

带	深度, 公里	密度, 克/立方厘米	压力, 百万巴
A	0~33	3.32	0.01
B	33~410	3.64	0.14
C	410~1000	4.68	0.39
D'	1000~2700		
D''	2700~2900	5.69~9.4	1.37
E	2900~4980	11.5	3.17
F	4980~5120		
G	5120~6370	17.2	3.64

在地球化学过程中，压力的作用是很大的，并随深度不同而变化，如：

深度(公里)	800	1600
压力(大气压)	296100	592200
深度(公里)	2400	3200
压力(大气压)	1085700	1677900
深度(公里)	4000	6370
压力(大气压)	2260100	3059700

密度的变化以及两种界面（即莫霍面与 2900 公里深处更加清晰的界面）的存在，使我们有理由设想地壳不同部分的成分也是有差别的。也就是说，组成地壳的是来自地幔的橄榄岩或榴辉岩物质，同时也有来自金属核的物质。金属核的说法所以能够成立，是因为存在一种铁陨石，它与陨石一样，平均成分接近玄武岩。

根据前人提出的模型，地球的深部组成大致是：

硅酸盐壳	深 60~120 公里	密度 2.73 克/立方厘米
榴辉岩壳	深 1200 公里	密度 3.6~4 克/立方厘米
硫化物、氧化物壳	深 2900 公里	密度 5~6 克/立方厘米
铁镍核心	深 6370 公里	密度 8~10 克/立方厘米

硫化物成分的陨石极少见，这与存在硫化物壳的说法有矛盾。因此有人 (H. S. Washington) 对地球的内部组成作另一种描述：

花岗岩壳	深 20 公里	密度 2.8 克/立方厘米
玄武岩壳	深 60 公里	密度 3.2 克/立方厘米
橄榄岩壳	深 1600 公里	密度 4.0 克/立方厘米
铁斑壳	深 2300 公里	密度 5.8 克/立方厘米
石斑壳	深 3000 公里	密度 8.0 克/立方厘米
中心核	深 6371 公里	密度 10.0 克/立方厘米

另有人 (A. Ф. Капустинский) 提出地球内部分三层的说法：60~120 公里以上是外层，一般的化学规律和物理化学规律在这里起主要作用；由 60~120 公里到 2900 公里(即地幔)是中间层，特点在于元素的化学性质是“退化”的，因为这一层压力极大，原子里面的外层电子转为原子的电子层；由 2900 公里到 6370 公里是中心层，特点是化学变化趋于零。在高压作用下( $10^6$ 大气压以上)，外层电子脱离，原子变小，密度相应增大。这种原

子也许可以叫作“残废”原子，它们之间的化学作用是趋于停止的。自由电子成为共有的游离电子并产生金属特性。这种“金属化”的趋势逐渐成为典型的非金属元素所固有的。

Капустинский 提出热力学的一个原则，即“任何压力也不能使物体的体积变为零”，同时指出在高压之下被压缩的物体体积趋向于零，而熵也趋向于零。由于熵是和态的概率的对数成比例的，而它的极限值等于零，所以概率就等于 1（因为  $\log 1 = 0$ ）。这就是说，一切物质在高压下都形成“化学上处于中性状态的原子核的同样液体，而这种原子核位于共有电子的‘等离子’包围之中。这种‘万能金属’也具有一致的类金属结构，它的一致性符合等于 1 的热力概率”。

按照他的意见，随着运动深入地球的中心，热容量减小，但导热性增大（这也是金属态的一个特征），所以已经达到的相当高的温度，在某种程度上保持恒定，换言之，即在地球内部应该有一个等温带。

另外也要看到，如果元素的外电子层破坏而使其化学性质消失，但是由核电荷所决定的原子的化学独立性却仍然保存。因此，在一百万到三百万个大气压的压力下，铁与镍已经丧失了形成化合物的能力，但这并不否定在地核内部可能存在大量的铁和镍。

地球的热循环是相当稳定的，尽管有一定的根据可以设想地球的热辐射在远古代比现代略强。

地球上的热平衡是取自太阳的热量，即 1 平方厘米/昼夜平均约 290 卡。太阳对地球的辐射总量是  $4.3 \times 10^{15}$  卡/秒或者是  $12 \times 10^{23}$  卡/年，这个热量决定着地球表面的平均温度。年度的温度变化从地表向下几十米就不起作用了。

根据测定，地热丧失量是每秒  $1.2 \times 10^{-6}$  卡/平方厘米，整个地球就是  $2 \times 10^{20}$  卡/年，相当于从太阳得到热量的 1/6000。至于火山喷发和温泉等方面丧失的热量，有人估计只占地球辐射热的 1/1000 或 1/350。

也有人认为，自地球存在以来地热的丧失过程是波浪式起伏变化的，而在地槽区构造运动强烈时，释出热量最大。 $2 \times 10^{20}$  卡/年的热量有 80% 是放射热释出的，20% 是地球从融熔状态继承下来的宇宙热。地球所含的  $U^{238}$ 、 $U^{235}$ 、Th、K 在现代释出的热量只相当于三千万年前的 40.96%。

有一种关于岩浆成因的论点，认为岩浆的生成是受到放射热的影响而融熔的结果，而这种放射热量在遥远的地质年代要比现在大一倍半。

地球释放的热量是由等温带开始向下的每一个地热梯度（每 100 米温度的升高）平均  $3^\circ\text{C}$  来计算的，或者是根据地热级差计算。所谓地热级差，就是从等温带向下温度每升高  $1^\circ\text{C}$  的垂直距离。地热级差的间距大小很不一样，由 5 米到 143 米，平均 33 米。山脉下部和海洋附近，地热级差大；火山地区和煤田、油田附近，级差小。此外，随深度而增加的温度，在导热性强的岩石中（如石英岩）增长不多；反之，在导热性差的岩石中（如泥质片岩）增加较多。

如果认定每加深 1 公里温度就升高  $33^\circ\text{C}$ ，那么地球中心部分的温度会是无法想象的高。但普遍认为随深度的增加，放射性元素的含量急剧减少，在极深的部位，温度也并不太高。从某些资料来看，地下 100 公里深处的温度约为  $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ ；另外，在 400 公里深的地方见有相的过渡。温度随深度而增加的情况是：

深度(公里)	100	200	300	500
温度(°C)	900	1100	1200	1370
深度(公里)	700	1000	1600	
温度(°C)	1570	1970	2900	

多数人认为 2900 公里深处的温度是 1500~2000°C 到 5000°C，地球中心的温度是 3900°C 或略低。以上就是关于地球内部温度的一些认识。

这些材料可以帮助我们判断物质的聚集状态和地球的热量储存。地球深部温度增长缓慢足以说明这些部位不存在放射性过程，也就是不存在放射性元素。

此外，地震测量确认地球外核是“液态”的，这就可以解释地磁是具有  $8 \times 10^{25}$  电磁单位的偶极矩。

地球是一个永久的热辐射体，要测定它的热储量，就必须了解地球的年龄。太阳系（包括地球在内）的年龄确定是 55 亿年，地球上最古老的岩石年龄是 35 亿年。1956 年有人 (Patterson) 计算地球从具备目前的质量开始至今的年龄是  $45.5 \pm 0.07$  亿年。

## 2. 地壳、水圈、大气圈和生物圈的平均化学成分；克拉克值的计算方法；关于元素分配的认识的改变和对克拉克值的分析

1889 年，美国化学家克拉克 (F. W. Clark) 开始测定地壳的平均化学成分。他根据 880 个致密块状晶质岩石的全分析资料，计算了十种化学元素 (O、Si、Al、Fe、Ca、Mg、K、Na、Ti、P) 在地壳中的平均含量。Clark 是从这样一个设想出发的，即认为任何岩石的分析数量大体上相当于它们在自然界的分布，而 880 个分析数据已足够保证某一种或某几种岩石成分中的特殊现象都能对取得正确的平均值产生影响。1897 年，他利用 680 个新的分析资料进一步核实了已有的数据，到 1908 年就发表了《地球化学资料》(《Data of Geochemistry》) 这本著作。1924 年，Clark 与 H. S. Washington 一起提出了化学元素分布表。这个表所根据的已经是按地理原则分类的 5159 个分析样品。元素分布的计算是以扣除水与微量组分后换算为 100%，然后再换算成氧化物。得出的数字是：

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO
60.18	15.61	3.14	3.88	3.56	5.17
Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
3.91	3.19	1.06	0.30		

之后，G.L. Fogt 进一步补充了这方面的研究，增加了锰、镍、钴、铜、铅等元素的含量数值。他取不同岩石中锰与铁的比值并根据克拉克得出的铁的数据，用间接的方法求出了锰、镍、钴的数字。但对铜、铅和其它元素，问题就更为复杂，为此曾利用了矿石中金属的量比关系和世界金属开采量等数字。显然，这些数据并不能反映地壳中元素的真实含量。Fogt 共提出了 22 种元素在地壳中的含量，对另外 34 种元素只给出了大致的数量级。

1909 年，B. И. Вернадский 开始进行 Rb、Cs、Tl、In、Bi 和其它一些元素分布的光谱化学研究，到 1914~1915 年发表了《地壳的光谱资料》一文，1923 年提出了化学元素含量表。

以后，在 1930~1935 年间，V. M. Goldschmidt 等人改进了定量分析方法，测定了 Be、B、Sc、Ga、Ge、As、Se、Rb、Cs、钼族和其它某些元素在岩石与矿物中的含量。他们取挪威粘土的成分与地壳的平均成分对比，发现有许多相似之处。另外，他们还发展了地球化学元素平衡的想法，提出了定量地球化学这一新的研究方向。

1930~1934年间, J.Noddak 等人在研究铼与铂族金属地球化学的过程中, 作了大量的定量光谱化学测定, 从而改变了关于化学元素分布的若干认识, 探索了一些新规律。

还在1923年, 就有人把地壳中(也包括水圈)化学元素的含量称作“克拉克值”, 这个名称很快就被学术界确认。

随着岩石全分析的新资料与日俱增, 有一点看得很明显, 就是对一般分布较广的岩石分析愈来愈少, 而成分不寻常的、分布较少的外来岩石的分析渐多, 因此克拉克的方法就变得不精确了。

1928年, T.Hevesy 建议用地球不同地区按分布比例采取的岩石制成标准的混合样, 然后从中分析元素含量。他用这个方法得出了 Ti、Zr、Hf、Th、Pb、V、Nb、Ta、Pa 的克拉克值。

之后, С. П. СОЛОВЬЕВ 提出另一种测定克拉克值的方法, 就是采用个别岩石的分布面积和该面积内这种岩石的平均成分。1952年, 他在一本著作中为了对比提出了一个“苏联欧洲部分岩浆岩平均成分表”(见表1-2)。这个表可以说明一个问题, 就是不同方法测出的数字能有很大差别, 而把岩石分布面积考虑在内是比较重要的。

在已有的克拉克值的基础上, 同时设想地壳的组成是一份基性岩和两份酸性岩, А. П. Виноградов 在1956年提出一个克拉克值表, 到1962年略有修改。

苏联欧洲部分岩浆岩平均成分

表 1-2

组 分	据 Clark 和 Washington 测定	据 Соловьев 测定
SiO <sub>2</sub>	54.22	63.65
TiO <sub>2</sub>	0.66	0.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.30	14.47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.28	2.18
FeO	5.54	3.19
MnO	0.14	0.07
MgO	5.02	3.70
CaO	7.60	4.28
Na <sub>2</sub> O	2.99	3.51
K <sub>2</sub> O	1.92	2.84
H <sub>2</sub> O	1.17	1.47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.10
其它	0.09	—
	100.00	100.00

表1-3所列的是近十年来不同的作者提出的克拉克值, 尽管其中有些数据相差很大, 但也有不少相近之处, 能看出地壳当中化学元素分布的一般规律。它的缺点有以下几方面: 1) 阳离子元素以及与之有关的氧、卤素的平衡尚不令人满意; 2) 自然界现实所见的元素之间的数量比例并不总是和表中的数据一致; 3) 列出的克拉克值没有把地球化学研究程度较差地区的岩石成分特点考虑在内; 4) 现有的数据都是针对陆地岩石成分的, 没有包括海洋底部岩石, 但后者占地球表面的71%, 何况其中的一部分过去也曾经是陆地。

为了弥补这些不足, 1967年曾有人试图根据莫霍面这个地壳的天然界限来计算化学成分。也就是说, 这不仅包括了地壳的海洋部分, 而且也包括下面的玄武岩。他们把所测的范围按地壳的类型分成若干块段, 测量它们的面积、体积和质量, 并相应按照各块段加起来的平均成分进行计算。由于地壳深部化学成分研究得太少, 所以算出的结果带有一定的假设性, 而且也不十分准确。

近十年来, Соловьев 继续了这方面的研究。为了计算苏联火成岩的平均成分, 他测量了这类岩石的分布面积, 对每一个具体的岩体根据其现有的化学分析资料求出平均成分, 并按岩石的分布比例算出个别地区侵入岩与喷发岩的平均成分以及乌拉尔、高加索等地



化学元素的克拉克值(克/吨)

表 1-3

序 号	元 素	Виноградов, 1962年	Ведеполь, 1967年	Мейсон, 1966年	Шоу, 1964年	Ферсман, 1932年
1	H		700	1400		10000
2	He		0.003			0.01
3	Li	32	30	20	29	50
4	Be	3.8	2	2.8	2	30
5	B	12	9	10	13	100
6	C	200	320	200	1000	3500
7	N	19	20	20		400
8	O	470000	472500	466000		491300
9	F	660	720	625	700	800
10	Ne					0.005
11	Na	25000	24500	28300	22000	24000
12	Mg	18700	13900	20900	31000	23500
13	Al	80500	78300	81300	81000	74500
14	Si	295000	305400	277200	258000	260000
15	P	930	810	1050	1000	1200
16	S	370	310	260	300	1000
17	Cl	170	320	130	200	2000
18	Ar		0.04			4
19	K	25000	28200	25900	16000	23500
20	Ca	33000	28700	36300	60000	32500
21	Sc	10	14	22	15	6
22	Ti	4500	4700	4400	10000	6100
23	V	90	95	135	100	200
24	Cr	83	70	100	90	300
25	Mn	1000	690	950	1000	1000
26	Fe	46500	35400	50000	55000	42000
27	Co	18	12	25	27	20
28	Ni	58	44	75	80	200
29	Cu	47	30	55	70	100
30	Zn	83	60	70	40	200
31	Ga	19	17	15	19	10
32	Ge	1.4	1.3	1.5	1.7	1
33	As	1.7	1.7	1.8		5
34	Se	0.05	0.09	0.05		0.8
35	Br	2.1	2.9	2.5		10
36	Kr					$2 \times 10^{-4}$
37	Rb	150	120	90	120	80
38	Sr	340	290	375	450	350
39	Y	29	34	33	40	50
40	Zr	170	160	165	156	250
41	Nb	20	20	20	24	0.32
42	Mo	1.1	1	1.5	1	10
43	Tc					
44	Ru		0.001	0.01		0.05
45	Rh		0.001	0.005		0.01
46	Pd	0.013	0.01	0.01		0.05
47	Ag	0.07	0.06	0.07	0.08	0.1