

439548

最新世界名著

地球物質

恩斯特原著

陳汝勤譯



國家科學委員會補助
國立編譯館出版
復興書局印行



最 新 世 界 名 著

地 球 物 質

恩 斯 特 (W. G. Ernst) 原 著
陳 汝 勤 譯

譯權所有人	國 立 編 譯 館
補 助 機 關	國 家 科 學 委 員 會
印 行 者	復 興 書 局



版 權 所 有

中華民國七十年四月再版

地 球 物 質

全一册 基價 一元九角

原 著 者 恩 斯 特

譯 者 陳 汝 勤

譯權所有人 國 立 編 譯 館

補助機關 國家科學委員會

印 行 者 復 興 書 局

地址：臺北市漢寧街四十四號

電話：3716911 3315011

本書局登記證字號：行政院對
關局局版登業字第一八八號

發 行 人 沈 亦 珍

地址：臺北市懷安街四十四號

(1431臺盛祥賢)

目 次

緒 言

第一章 礦物學與晶體化學

晶體、礦物與岩石·····	4
地球的組成與大體構造·····	7
原子構造·····	11
鍵合·····	15
結晶構造·····	22
形態結晶學·····	28
礦物的物理性質·····	33

第二章 岩石化學

基本熱力學·····	38
相的平衡·····	41

第三章 非矽酸鹽礦物

金鋼石與石墨·····	49
鐵·····	54
石鹽·····	57
方解石與霏石·····	60
黃鐵礦·····	64
磁鐵礦·····	66

第四章 矽酸鹽礦物

矽酸鹽類的構造分類.....	70
橄欖石.....	76
柘榴子石.....	79
輝石類.....	82
角閃石類.....	88
雲母類.....	93
長石類.....	98
二氧化矽礦物.....	100

第五章 火 成 岩

火成岩的產狀.....	112
火成岩的化學及礦物成分.....	120
岩漿分化.....	123
岩漿的起源.....	126

第六章 沉 積 岩

侵蝕輪迴.....	131
沉積岩的組織分類.....	133
沉積岩的化學及礦物成分.....	135
沉積物與地殼平均成份的整體化學關係.....	137
常見沉積岩的記述.....	138

第七章 變 質 岩

變質構造.....	151
-----------	-----

壓碎岩.....	153
接觸變質岩.....	155
區域變質岩.....	157
變質岩的化學成分.....	163
變質作用的物理條件.....	165
變質作用與岩石輪迴.....	167

緒 言

地質學是綜合了數學、物理、化學及生物學，以研究地球的現狀與行星演化所經歷的過程及階段。地質學雖然依賴物理及生命科學並將其原理應用在地球上，但它與這些學科仍有一些基本的不同。實際上地球上發生的各種過程和事蹟都是由目前可資利用的證據推知的，可是此等過程與事蹟大部份無法在實驗室裏複製或仿效。另一方面直接的觀察却受到嚴重的限制，因為各種過程和事蹟大多發生在地球的深處或史前時代。基於這些原因，研究地球就帶有挑戰性與受挫性，前者是因為研究這門學科必須充分的具備各種基礎科學的素養，後者是因為地質問題絕難找到一定的答案。儘管在許多方面不能作實際的測量，但是研究地球仍然是有價值的，因為除此以外沒有其他的科學可使我們了解吾人現在及過去所處的整個物理環境。

地球發生的過程和事蹟能够保存的都記錄在岩石裏，地質學家的目標就是在於闡述這些記錄。岩石學——涉及岩石的類別及來源的科學，就是為要了解這些記錄最基本的科目，因為岩石學是討論組成固態地球的基本物質。仔細觀察這些岩石，可以看出它是由許多礦物顆粒所組成，所以研究岩石學的人必須要先熟悉礦物學——涉及礦物的物理和化學性質以及其來源的科學。再往深處看，礦物是由原子有系統的排列所組成的，所以礦物學最終還得依賴晶體化學和固態物理等基本的科學。也許諸位到現在已經開始了解地球科學的基礎是十分的廣泛。

本書是對岩石及礦物等造成固體地球物質的介紹。我們將討論物質如何以及為何會形成特殊的岩石或礦物，同時將討論在什麼條件下發生物理和化學的變化而導致不同岩石或礦物的形成。本書有一部分

2 地球物質

將注重於描述礦物和岩石，因為對於這些物質沒有基本的認識便不能作進一步的討論。無論如何，我們主要的旨趣在了解岩石與礦物的起源。

欲探索地球的起源，必須先對岩石與礦物形成的過程有所了解，這些過程有時候可以目睹，例如圖1所顯示的閃電伴隨着海底火山作用。但大部分地球物質的產生及相互作用不是深藏不露就是以一種不可捉摸的方式表現出來。



圖1 1963年十二月一日夜間，閃電和風暴伴隨着火山噴發作用，在冰島外形成了新的舍特希島。

本書在討論某些專題方面與其他書籍有所不同，那就是在岩石和礦物方面的介紹比一般性的地質教科書冗長得多且注重數量的探討，但比起目前大學二年級岩石及礦物課程的教科書却要簡捷許多。

本書提供了研究地球物質數量方面的探討。礦物研究的發展是基

於原子和結晶構造等根本問題，而不是基於晶體的外形和礦物的類別。我們採取這種討論的方式是因為實際上所有礦物的特性都取決於內部組成原子、離子或分子的排列，也只有透過對這些排列和結晶構造的研究，才能了解礦物的起源和不同。

因為礦物的生成是由化學平衡所決定，所以一些熱力學和物理化學的基本原理都會在這本書裏提到。同時岩石又是礦物的聚合體，討論岩石學的重點將集中在礦物羣以及它們的安定關係，即某些特殊礦物羣存在的溫度與壓力狀況。

第一章 礦物學與晶體化學

晶體、礦物與岩石

進行討論之前，我們最好對若干基本術語下一定義（也許你已直覺地知道了）。

礦物 礦物是一種固體，它有一特定的化學組成（或具一有限的組成範圍），並且具有一有系統的立體空間原子排列。它的化學與物理性質是均勻的，或許顯示有限的系統變化。礦物係「天然產出」與「無機產出」，礦物學家習慣上用此定義來斥拒某些由人爲或其他有機體形成之物質（不認爲此等物質爲礦物）。因此，碳酸鈣(CaCO_3)自海水中沉澱出來爲合格之礦物（即方解石）。相反的，蛤類的鈣質殼必須稱爲生物源方解石。在實驗室中自飽和溶液沉澱出之 CaCO_3 必須稱爲合成方解石。這些定義是相當明顯的，不需我們作進一步討論。下面所述之有關礦物之定義極爲重要：

礦物是一個均勻相，即實際上或原理上不能由機械的方法分成兩個或更多具不同物理或化學性質（例如比重、硬度、顏色、磁感率、電或熱的傳導度）的物質。舉例來說，沒有任何機械的方法可證明方解石之物理與化學性質是不均勻的。當然，我們能够在一大氣壓下加熱方解石，使溫度超過攝氏 800 度，跟隨發生的化學反應是 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ 。但這並不能證明方解石是不均勻，此過程只是產生一個均勻的固相，即石灰（在這情況下應稱爲一種合成礦物）與另一個均勻氣相，即二氧化碳。

礦物是固相，不同於液相或氣相。它是由具有固定成份之化合物（例如石英， SiO_2 ），或由具有固定組成區間之化合物構成（例如橄

礦石，其組成區間自純矽酸鎂 Mg_2SiO_4 至純矽酸鐵 Fe_2SiO_4 ）。

礦物 是由原子所構成，此等原子在立體空間裏有系統的排列與重複。礦物內的原子排列即為結晶構造，在大多數礦物內原子的排列與其週期性隨方向不同而異。一般言之，物質具有有規則和順序的原子結構者，皆稱為結晶體。當然，依照上述的定義，所有的礦物都是結晶體。

準礦物 準礦物是自然界產出的固體或液體，其組成原子缺乏有系統的排列。亦即準礦物為非結晶體或非晶質。火山玻璃、琥珀、煤與石油俱為準礦物。廣義言之，它們屬於礦物界。故使用「礦物資源」一詞時即包括了準礦物。

晶體 晶體是具有結晶面的礦物粒，所謂結晶面即原子排列具有一定的幾何關係。你也許知道：石英的晶體 SiO_2 （見圖1—1），或「犬牙石」（一種方解石，見圖1—2）是由美麗的平面所包圍而成。這些結晶面反映出結晶生長之過程，它們與原子結構間有一定的角度



圖1—1 石英（水晶）



圖 1—2 犬牙石（方解石）

關係（見以後進一步的討論）。我們可以在晶體上磨出任何方向的小平面或曲面，但這些並非結晶面，也不是可發育的生長面。

礦物粒由結晶面包圍者稱為自形 (euhedral)，具不規則之端面者稱為他形 (anhedral)。

岩石 岩石是天然產出的物質，它是由一種或多種礦物（或準礦物）組成。岩石之單元通常是大得足以組成固體地球之重要部分，該形容詞「重要」的意思是指此單元可用地質圖來表示（或此岩層露於表面時可繪於地質圖上者）。這裏我們涉及到尺度問題，因為事實上有尺度等級存在。例如一個山系可全由花崗岩組成，但花崗岩也可呈極細的岩層和岩脈包含於其他岩石之內。岩石中成分相同或不相同的組成顆粒，只要它們現在共存著就表示經過相同的生成過程，即岩石本身的來源。

廣泛說來，地質學家認為有三種主要的造岩過程(1)熔融矽酸鹽物質或岩漿 (magma) 固化成 ①玻璃 ②一種礦物 ③多種礦物之結合或 ④玻璃與礦物之組合。此等岩石被稱為火成岩 (igneous rocks) (見

第五章)。Ignis 是拉丁字「火」，於是火成岩是「由火生成」。熔岩流與火山灰落塵為火成岩明顯之例子。(2)沉積岩 (sedimentary rocks) 是由機械或生物過程所聚集之以前存在的岩石與礦物碎片以及自液體介質中經化學或生化作用而沉澱的物質所構成（這羣岩石將在第六章討論）。「Sedimentum」在拉丁文的意思是「沉降」，沉積岩中其組成成分常在陸上或水中「沉降出來」。沉積岩包括砂岩、殼灰岩（貝殼層）與河川礫岩等。(3)變質岩 (metamorphic rocks) 包括其原始礦物或結構，因再結晶作用或變形而有顯著變質的所有岩石。變質作用可能發生在地球內部相當深處，但在某些情況下亦可發生於近地表處，此乃由於高溫火成岩體位置所引起者。希臘字 meta 譯為「連續」「之後」或「改變」。因此，變質岩代表礦物或結構的「後來組態」不同於原來岩石。塊滑石（皂石）、大理石與板岩均為變質岩之例（見第七章）。

地球的組成與大體構造

在討論控制岩石及礦物組織與成因的原理之前，我們先來觀察地球的整體組成與礦物成分。在本書定量討論與圖表中，我們全用公尺制度，為不熟悉該制度之讀者提供一些換算因式列於表 1—1。此外，元素的週期表印在本書最末頁，可供參考。

地球平均半徑約為 6,370 公里，並且由三個成分相異之同心層所組成，如圖 1—3 所示。

表 1—1 單位的換算因式

	公 制	英 制
1 巴	≈ 0.9869 大氣壓力	1 大氣壓力 = 14.696 磅/平方吋
1 仟巴	$\approx 1'000$ 巴	≈ 1.0133 巴
攝氏溫度	$= 5/9$ (華氏溫度 - 32)	華氏溫度 = $9/5$ (攝氏溫度) + 32
絕對溫度	$=$ 攝氏溫度 + 273.16	

8 地球物質

1 公分 = 0.3937 吋

1 吋 = 2.540 公分 = 25.40 毫米

1 Å = 10^{-8} 公分

1 呎 = 0.3048 公尺



圖 1-3 地球構造的截面

(1)最外層或稱為地殼，是一相當薄之皮殼，大陸地殼厚度約為20至60公里，但平均約為35公里，而海洋地殼僅5至10公里厚。大陸地殼之構成物質主要是鎂、鐵、鋁、鈣、鹼金屬的矽酸鹽以及二氧化矽 (SiO_2)，詳情明示於表 1-2 所列元素之含量。海洋地殼之成分乃是

表 1-2 在大陸地殼中的主要元素含量

元素	重量百分率	原子百分率	離子體積百分率
氧	47.2	61.7	93.8
矽	28.2	21.0	0.9
鋁	8.2	6.4	0.5
全鐵	5.1	1.9	0.4
鈣	3.7	1.9	1.0
鈉	2.9	2.6	1.3
鉀	2.6	1.4	1.8
鎂	2.1	1.8	0.3
氫	微量	1.3	0.0

值得商榷的課題，一些學者認為海洋地殼主要為蛇紋石* 化之純橄欖岩與橄欖岩（見第五章），而此類岩石僅為地函（地球的次深層殼）物質之水合者；另一些學者支持海洋地殼是由玄武岩構成，亦即海洋地殼比大陸地殼含有較多量的鈣、鎂與鐵，但含有較少量的鉀、鈉與矽。我們將這些爭論置於一旁先來討論關於地球上大陸與海洋地殼之要點如下：(a) 地殼是由矽酸鹽類的混合物組成。(b) 主要元素之數目很少。(c) 氧為含量最豐的元素，實際上幾乎佔了大陸地殼體積的94%。因此，只要研究少數（約十二個）矽酸鹽、氧化物與碳酸鹽礦物即可了解主要成岩礦物之概況。

(2) 在地殼之下是一厚層，稱為地函，往下延伸至大約2,900公里的深度。雖然我們對它還不完全清楚，但基於天文、隕石與地球物理的證據，地函的組成物質被認為近似於石質隕石，地函主要是由鎂及鐵之矽酸鹽、非結合狀態的鈣與微量硫化鐵所組成。

(3) 地球的中央核心（地核）自地函之底延伸到地表之下約為6,307公里的地球中心。地核由液體之外殼與固體的內地核所組成。內地核由深度約5,000公里處開始，此乃由地震觀測推出者。地核具有類似鐵質隕石之成分，主要由鐵組成，並含有大約10%的鎳。

地球各主要構造單位之組成列於表1—3，其中微量元素略而不計，同時分析值係以無水為基礎計算成100%。從表1—2與表1—3顯示出揮發性成分，尤其是氫（包括表1—3所未列出的水與二氧化碳）在地球最外層含量豐富，而地核却無。

現在我們討論地球的組成礦物，鐵是主要的地核礦物，鎂及鐵之矽酸鹽組成了整個地函。在本書中我們將集中全力於討論組成地殼之矽酸鹽（見表1—4）。我們所以要偏重地殼礦物，有兩個原因：第一、我們能了解許多地殼的礦物是因為它們易於獲得並且便於研究，

* 蛇紋石為綠色片狀矽酸鹽，化學式為 $Mg_3Si_2O_{10}(OH)_2$ 。

10 地球物質

表 1—3 地球構造單位的成分 (重量百分率) *

組成物	大陸地殼	海洋地殼	地 函 (平均石 質隕石)	地 心 (平均鐵 質隕石)
SiO ₂	60.1	49.9	38.3	
TiO ₂	1.1	1.5	0.1	
Al ₂ O ₃	15.6	17.3	2.5	
Fe ₂ O ₃	3.1	2.0		
FeO	3.9	6.9	12.5	
FeS			5.8	
Fe			11.9	90.8
Ni			1.4	8.6
Co			0.1	0.6
MgO	3.6	7.3	24.0	
CaO	5.2	11.9	2.0	
Na ₂ O	3.9	2.8	1.0	
K ₂ O	3.2	0.2	0.2	
P ₂ O ₅	0.3	0.2	0.2	

* 大陸地殼與海洋地殼的分析已經換算成無 H₂O 和 CO₂ 的基礎，以與地函及地心的分析值相比較。

地函 (與地核) 物質至今難於得到。現在雖然有許多關於地球深部礦物組成之學說，但有關地球深部之巨大壓力與溫度所造成之影響皆屬推測性質。第二、地殼為人類與其他有機體棲息之處，其質量與範圍

表 1—4 大陸地殼礦物成分的估計值

礦 物 羣	體積百分率
長 石 類	58
輝石類、角閃石類	13
石英	11
雲母類、綠泥石類，粘土礦物	10
碳酸鹽類、氧化物 } 硫化物、鹵化物類 }	3
橄欖石類	3

綠簾石類、鋁矽酸鹽 }
 柘榴仔石類、沸石類 }

2

在整個地球來說是不重要，然而其狀況對於所有生命來說是有深刻的意義——這一點或許是以自我為中心，但仍然是一值得支持的論點。

原 子 構 造

在討論結晶構造與礦物的化學及物理性質之前，我們將簡短的討論原子構造與原子鍵型之基本概念。這種非常基本的開始是需要的，因為如果我們不了解礦物的構造，我們便無法了解複雜的礦物類型。我們必須認清控制原子排列之原理，才能明瞭結晶構造。

此處所描述的原子模型稱為所謂波爾原子，為紀念丹麥物理學家波爾 (Niels Bohr) 而命名的。原子是保留元素原有特性而可分割的最小單位，它由一個核與周圍的電子軌層所組成。在圖 1—4 裏電子軌層以一系列之同心層示出。原子核直徑約為 10^{-13} 公分；而電子層直徑約 10^{-8} 公分（或為原子核直徑的100,000倍）。從某方面看來原子構造與太陽系相似，如以太陽比擬原子核，則行星即為電子。

原子核含有兩種主要的原子質點(1)質子，每個質子具有單一正電荷，(2)不荷電的中子。這二類質點約具相同的質量。質子數(Z)可決定一個原子的原子序，每個元素可依不同的(Z)值來區分。質子與中子之總和決定了元素的特有質量（或質量數）。同一元素中各個原子間具有不同的中子數者，稱為該特定元素之同位素。例如氧($Z=8$)有三種同位素，最常見的氧核含有八個質子與八個中子，記為 O^{16} ，另一種較稀少且較重之同位素為 O^{18} ，其核內帶有八個質子與十個中子。

荷負電之電子雲環繞著原子核，每一電子具有等於質子之電荷，