

放射性元素矿物化学

郭 承 基

科学出版社

放射性元素矿物化学

郭 承 基

科 学 出 版 社

1959

內 容 簡 介

本書的主要內容包括：(1)鈾的地球化學；(2)鈾礦的礦床類型；(3)含鈾礦物的物理及化學性質；(4)鈾礦的分析方法和(5)鈾礦的化學組成等五部分。其中以含鈾礦物為重點，收集了1958年以前世界各地所發現的重要礦物。除了對這些礦物的產狀、物理性質及化學性質進行了必要的敘述以外，並結合礦物成因，論述了礦物中元素的組合相關關係。此外對於某些礦物的鑑定特徵、研究的方法、綜合利用以及存在的問題等也進行了概括性的論述。

放射性元素礦物化學

著 者 郭 承 基
出版者 科 學 出 版 社

北京朝陽門大街117號

北京市書刊出版業營業許可證出字第061號

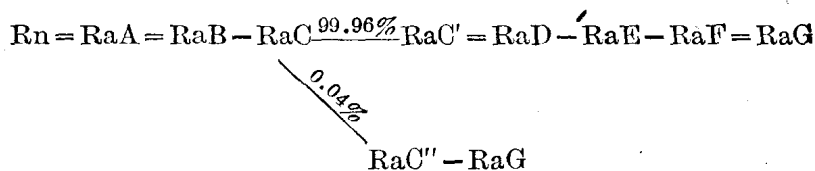
印刷者 中 國 科 學 院 印 刷 廠
總經售 新 華 書 店

1959年9月第一版 書號：1684 字數：427,000
1959年9月第一次印刷 開本：787 1092 1/16
(京)0001-8,500 印張：17 3/9 插頁：2

定價：2.20 元

2/6/83 / 12

存在于自然界的数十种放射性元素中,除了少数的元素($K^{40} \xrightarrow{\beta} Ca^{40}$; $Rb^{87} \xrightarrow{\beta} Sr^{87}$; $Sm^{148} \xrightarrow{\alpha} Nd^{144}$)以外,可以把它們分为三系:(1) U-系;(2) AcU-系和(3) Th-系,这些元素都是由鈾、錒和釷三种元素蜕变而生成的。U-系和 AcU-系的蜕变系統如下:

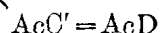
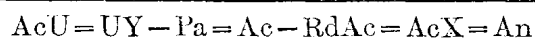
$$UI = UX_1 \frac{99.65\%}{0.35\%} UX_2 - UII = I_0 = R_a = R_n$$


一：示 β 蜕变

元 素	原 子 量	原子序数	同 位 素	半 寿 期	蜕 变
UI	238	92	U	4.5×10^9 年	α
UX ₁	234	90	Th	23.8 日	β
UX ₂	234	91	Pa	1.15 分	β
UZ	234	91	Pa	6.7 小时	β
UII	234	92	U	2.7×10^5 年	α
Io	230	90	Th	9×10^4 年	α
Ra	226	88	Ra	1590 年	α
Rn	222	86	Rn	3.85 日	α
RaA	218	84	Po	3.05 分	α
RaB	214	82	Pb	26.8 分	β
RaC	214	83	Bi	19.5 分	β
RaC'	214	84	Po	10^{-6} 秒	α
RaC''	210	81	Tl	1.32 分	β
RaD	210	82	Pb	22 年	β
RaE	210	83	Bi	4.85 日	β
RaF	210	84	Po	136.5 日	α
RaG	206	82	Pb		

(2) AcU-系

元 素	原 子 量	原 子 序 数	同 位 素	半 寿 期	蜕 变
AcU	235	92	U	5.7×10^8 年	α
UY	231	90	Th	25.5 小时	β
Pa	231	91	Pa	3×10^4 年	α
Ac	227	89	Ac	13.5 年	β
RdAc	227	90	Th	18.9 日	β
AcX	223	88	Ra	11.2 日	α
An	219	86	Rn	3.92 秒	α
AcA	215	84	Po	2×10^{-3} 秒	α
AcB	211	82	Pb	36.1 分	β
AcC	211	83	Bi	2.16 分	α
AcC'	211	84	Po	5×10^{-3} 秒	α
AcC''	207	81	Tl	4.76 分	β
AcD	207	82	Pb		



=: 示 α 蜕变

-: 示 β 蜕变

α 蜕变时,由铀的原子核中放射出 α 粒子(相当于氦的原子核),其原子量减少 4,原子序数减少 2。 β 蜕变时,则由于一个中子转化为质子,从铀的原子核放出一个电子 e^- ,其原子量虽然没有变化,而原子序数增加 1。这对于决定放射性元素的原子量和它们在週期表中的位置,有重要的意义。属于 U-系和 AcU-系的各种元素在週期表中的位置如后表所示:表中 $\searrow$ 示 α 蜕变, $\rightarrow$ 示 β 蜕变,属于同一行的元素,互为同位元素。直到现在为止,还不可能用化学的方法把它们完全分离。

各种元素的原子核中,包含有与各该元素的原子序数相等的质子以及等于原子量与原子序数之差的中子。所以原子量愈大,则原子核中包含的这些质子和中子的数目也就愈多。在铀的原子核中,有 92 个质子和 146 个中子(U^{238}),不难想象在原子核中包含有多数质子和中子的元素,其稳定度比低原子量的元素要差。所以 Po 以上的元素(包括 U 在内)的原子核,都有蜕变为低原子量的原子核的性质。在许多方面,例如原子能的利用问题、铀元素在地壳内的存在量、岩石和矿物的绝对年龄的测定以及这些元素的研究等都与这种自然蜕变的性质有很大的关系。

在門捷列夫週期表内,铀与钼、钼及钨等三种元素属于第六族。这些元素的电子层的構造如下表所示:

原子序数	元素	K	L	M	N	O	P	Q
24	Cr	2	8	13	1			
42	Mo	2	8	18	13	1		
74	W	2	8	18	32	12	2	
92	U	2	8	18	32	21	9	2

(1) U-系

原子量	IIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	O	Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	原子量
206		RaG Pb											
210		RaC'→RaD→RaE→RaF											
214		RaB→RaC→RaC'											
218													
222													222
													226
													230
													234
													238
同位元素	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86	Fr 87	Ra 88	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	

(2) AcU-系

原子量	IIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	O	Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	原子量
207		AcC'→AcD Pb											
211		AcB→AcC→AcC'											
215													
219													
													223
													227
													231
													235
同位元素	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	

根据这些元素的电子的配列情况, 不难推断它们的原子价的可变性。例如铀在还原的环境下, 成四价离子(U^{4+})的状态; 而在氧化的环境下, 则成六价的离子(U^{6+}); 在人造的化合物中, 除了四价与六价以外还有二价、三价及五价等三种。属于本族的元素虽然有許多类似的性质, 但是也有許多不同的地方。这种差异主要表现在它们对于氧和硫的亲合力上。例如钼在自然界一般多成硫化物(輝鉬矿 MoS_2)而产出, 钼的氧化物則很少。錳主要成氧化物(錳酸鹽——黑錳矿、白錳矿等), 錳的硫化物(WS_2)只有在特殊的条件下, 才能生成。至于原子量最大的鈾, 在自然界中就仅有氧化物或复氧化物而无硫化物。后者只有人工制成的化合物。

鈾的原子序数为 92, 原子量为 238.07。它的原子半径为 $1.60\text{\AA}$ ($R_a=1.60\text{\AA}$), 四价鈾的离子半径为 $0.89\text{\AA}$ ($U^{4+}R_i=0.89\text{\AA}$), 六价鈾的离子半径为 $0.7\sim 0.8\text{\AA}$ ($U^{6+}R_i=0.7\sim 0.8\text{\AA}$)。

鈾为一种银灰色的金属, 其结晶属于斜方晶系, 单位晶格的边长为: $a=2.852\text{\AA}$, $b=5.865\text{\AA}$, $c=4.945\text{\AA}$ 。其空间群为 $V_h^{17} Cmc$, 在 $4c$ 的位置上有四个鈾的原子。比重为 18.7, 熔点为 $1130\pm 2^\circ\text{C}$, 富于延展性。

自从 1789 年, 由瀝青鈾矿中发现鈾元素以后, 在很长的时间内, 鈾在工业上的用途, 仅仅是少量地当作一种催化剂应用于化学工业方面以及陶瓷制造方面的着色剂。所以由 1850 年到 1900 年, 全世界氧化鈾的年产量约在 3 吨以下, 主要为开采银矿和铅矿时的副产品。自从 1898 年由瀝青鈾矿中发现了镭以后, 为了供应医疗等方面的需要, 到 1920 年, 每年氧化鈾的产量增至约 100 吨。但鈾矿在提取了镭以后, 剩下的鈾在数十年内没有发现它的新的用途。由 1900 到 1940 的 40 年间, 资本主义国家所开采的鈾矿大约为 7500 吨, 其中比属刚果占第一位, 约为 4500 吨, 加拿大 1500 吨, 美国 1200 吨, 英国 300 吨。

在 1939 年汉恩 (Hahn) 等发现由中子的冲击可以引起鈾原子的核分裂以后, 关于原子能的利用问题, 遂成为各国科学家研究的主要对象之一。在 1954 年, 苏联建成了世界上第一座原子能发电站, 为今后原子能的和平利用开辟了广阔的远景。

由 1940 年以后, 没有关于世界鈾矿产量的正确数字, 据估计氧化鈾的产量, 每年可达数千吨。无疑地, 随着今后和平利用原子能范围的扩大, 鈾矿的产量将逐渐增加。

本书的主要目的是为了介绍关于鈾矿矿物学的和地球化学的基本概念以及鈾矿的化学组成的研究方法。在内容方面, 有很多的地方受到 A. T. 别傑赫琴院士和謝尔比納教授的报告的启发很大, 应该向他们表示深切的感谢。

郭 承 基

1956 年 1 月 20 日

增訂版序

目前稀有元素矿物、矿床及地球化学的研究工作已經进入了一个新的阶段,在放射性元素矿物的研究方面也获得了空前的发展。二年前出版的“鈾矿化学”小册子早已不能滿足需要,因此趁再版的机会,在放射性元素矿物方面补充了一些必要的資料和新的内容。但是恐怕仍旧赶不上实际的需要,希望在今后不断的予以修訂和补充。

郭承基

1958年5月3日

目 录

序 言	(i)
增訂版序	(v)
一、緒 論	(1)
(一)地球的構造及其化学成分	(1)
(二)成矿作用概述	(12)
二、鈾的地球化学	(30)
三、鈾矿的矿床类型	(36)
四、含鈾矿物	(41)
(一)氧化矿物	(69)
(二)碳酸鹽矿物	(89)
(三)磷酸鹽矿物	(98)
(四)矽酸鹽矿物	(123)
(五)鈦酸鹽矿物	(159)
(六)釩酸鹽矿物	(169)
(七)鈮鉭酸鹽及鈦鈮鉭酸鹽矿物	(176)
(八)硫酸鹽矿物	(240)
(九)砷酸鹽矿物	(246)
(十)鉬酸鹽矿物	(254)
五、稀有元素矿物的鑑定	(257)
六、鈾矿的找矿標誌	(263)
七、鈾矿的化学分析	(265)
(一)鈾化合物的性質	(265)
(二)鈾的定性分析	(266)
(三)鈾的定量分析	(270)
1. 鈾与其他元素的分离	(270)
(1) 鈾与硫化氫族元素的分离	
(2) 鈾与硷金屬、硷土金屬、Ea、Co、Mn、Ti 及 Zn 的分离	
(3) 鈾与 Be、Fe、Mn、Ni、Co、Zn、Ti 及硷土金屬的分离	
(4) 鈾与 Fe、Ni、Co 及 Zn 的分离	
(5) 鈾与 Be、Al、Cr、Nb 及磷的分离	
(6) 鈾与 Fe、Ti、Zr 及 V 的分离	
(7) 四价鈾与六价鈾的分离	
(8) 鈾与 Nb、Ta 及 Ti 的分离	
(9) 鈾与釩的分离	
(10) 鈾与鉬的分离	

(11) 鈾与 Al 及 Be 的分离	
(12) 鈾与鉛的分离	
(13) 鈾与砷及磷的分离	
(14) 利用有机溶媒的分离法	
2. 鈾的重量分析法	(275)
(1) 氨水沉淀法	
(2) 磷酸鹽法	
(3) 8-羟基喹啉法	
(4) 銅鉄試剂法	
(5) 丹宁法	
(6) 吡啶法	
(7) 六次甲基四胺法	
(8) 氢氟酸法	
(9) 多硫化銨法	
3. 鈾的容量分析法	(278)
(1) 高錳酸鉀滴定法	
(2) 重鉻酸鉀滴定法	
(3) 硫代硫酸鈉滴定法	
(4) 磷酸鹽滴定法	
(5) 硫酸高錳滴定法	
(6) 溴酸鉀滴定法	
(7) 高錳酸鉀-硫酸高鉄銨滴定法	
(8) 鈾与鈾共存时的容量分析法	
(9) 磷酸溶矿法	
4. 鈾的比色分析法	(286)
(1) 黄血鹽法	
(2) 过氧化氢或过氧化鈉法	
(3) 硫氰化物法	
(4) 丹宁、水楊酸鈉或沒食子酸法	
5. 低品位矿石中的鈾的分析法	(287)
(1) 比色法	
(2) 容量法	
(3) 硫氰化物法	
(4) 螢光法	
(5) 放射能測定法	
6. 鈾矿的全分析法	(288)
(1) 鈾的鈦鉍鉍酸鹽矿物的分析	
(2) 鈾的磷酸鹽类及砷酸鹽类矿物的分析	
(3) 鈾的氧化矿物的分析	
(4) 鈾的鈳酸鹽类矿物的分析	
(5) 鈾的矽酸鹽类矿物的分析	
八、鈳矿的化学組成	(298)
主要参考文献	(303)

一. 緒 論

(一) 地球的構造及其化学成分

1. 地球的構造

关于地球的起源有种种学說,迄今尚无定論。据推論地球在形成的初期,可能成高温气体的状态,以后由于温度的下降,其中一部分形成熔液,这种熔液在高温时各部分可能成均質的状态,而随着温度的繼續下降,分为成分不同的几种液体。并由于重力的影响,使比重最大者集中于地球的中心,而比重最小者則集中于地球的最外层,这种現象在熔矿爐中常常可以看到。例如硫化矿矿石与种种的熔剂一起在熔矿爐中加热熔融时,在爐底为由还原而形成的金屬熔液层,其上为硫化物的熔液层,最上部为矽酸鹽熔液层。

戈尔德施密特即根据这种現象,推論地球在演化过程中大致分为金屬、含氧化物的硫化物及矽酸鹽三种液相,这三种液相由于重力的影响,比重大的金屬熔液集中于地球的中心,比重小的矽酸鹽熔液集中于最外层,在二者之間为含氧化物的硫化物熔液。这种矽酸鹽熔液即一般所謂的“岩漿”,在岩漿中 SiO_2 的含量較低,Fe 及 Mg 含量較高的基性岩漿佔据矽酸鹽熔液的下部,大致相当于榴輝岩。榴輝岩的化学成分与輝長岩类似,而其比重較輝長岩大,是在高压下安定的一种变質岩。

因此根据戈尔德施密特的学說,由地球表面到中心可以分为矽酸鹽层、含氧化物的硫化物层及金屬层,而且各层的化学成分为不連續的变化。各层的比重及由地表的深度如图 1 所示。

当然上述各种液相的分离在自然界不可能是很完全的,例如在矽酸鹽层中也含有金

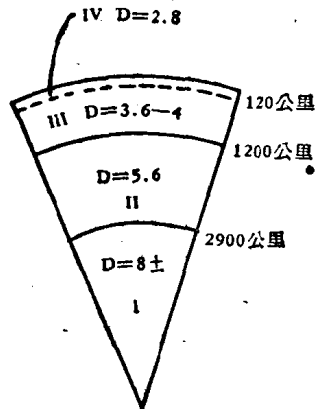


图 1

I. 金屬核(亲鉄圈)	30%
II. 硫化物、氧化物层(亲銅圈)	30%
III. 榴輝岩层(岩石圈)	40%
IV. 矽酸鹽层	

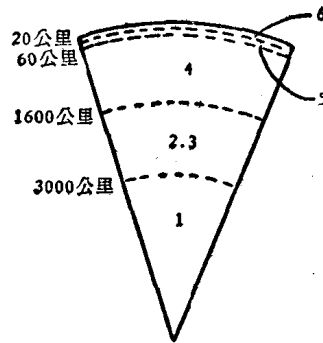


图 2

1. 中心核	3000 公里以下
2. 斑石层	3000—1600 公里
3. 斑鉄层	
4. 橄欖岩层	1600—60 公里
5. 玄武岩层	60—20 公里
6. 花崗岩层	20—0 公里

屬成分和硫化物成分。

G. 唐門 (Tammann) 曾將矽酸鹽、硫黃、砷及金屬鐵的混合物，在坩堝中加熱熔融，結果發現在熔融後分成了三層：最下層為鐵的熔液，其上為硫化鐵熔液、最上層為矽酸鹽熔液。試驗的結果與戈爾德施密特的假說是符合的，由此不難指出，在地球的中心部分富集有 Ni、Au、Pt 等重金屬。事實上，相當於地球中心成分的隕鐵中就含有比地殼高很多倍的 Ni 和 Pt 等重金屬。

根據萬有引力常數的測定，推算地球的平均比重約為 5.52，而在地球上所能看到的岩石的比重則要小得多。例如砂岩的比重約為 2.6，石灰岩為 2.7，花崗岩為 2.64，玄武岩為 3.05，因此地殼的平均比重大約為 2.7 左右。雖然由於壓力的關係可能在某種程度上影響比重的大小，但主要還是由於在地球中心富集有高比重物質的結果。地球的這種在成分上不連續的構造，另外由地震波傳播速度的測定也獲得了比較可靠的證明。

B. 戈登堡 (Gutenberg) 根據地震波速度的測定，指出地表下 60 公里，1200 公里及 2900 公里為不連續帶的界限。

H. 華盛頓曾將地球分為以下各層 (圖 2)。

上述花崗岩層相當於 F. E. 謝斯 (sues) 所謂的矽鋁層 (sial)，玄武岩層和橄欖岩層相當於矽鎂層 (Sima)，中心核相當於鐵鎳層 (nife)。H. 華盛頓與戈爾德施密特假說的主要區別，在於對中間層的看法。戈爾德施密特認為中間層為含氧化物的硫化物，與下層成不連續的關係，而 H. 華盛頓則認為中間層是橄欖岩層和中心核的過渡層。

2. 地球內部元素的配分

如上面所述，地球在演化過程中由於溫度的下降，分為幾種成分不同的液相，在每種液相中富集有種類不同的和含量不等的某些元素。這些元素並隨著地球的演化不斷在發生遷移和變化。由地球生成到現在為止，其中元素所發生的變化稱為地球的物質代謝，可以直接進行研究的地殼中元素所發生的變化則稱為元素的地球化學遷移。某一種元素與另外元素相伴產出的現象稱為元素的共生，在某些情況下，一種元素常與離子半徑類似的少量的另外一種元素共生，例如 Zr 常與少量的 Hf 共生，這種共生現象特稱為元素的擬裝 (Camouflage)，由化學的親合力而考慮元素的共生關係時，可以將所有的元素分為以下五類：

(1) 親氣元素：如惰性氣體及 N 等，這些元素的化學親合力很弱，一般不與其他元素結合，在自然界成單體的状态而存在，現在主要做為大氣的成分而存在。

(2) 親石元素：與氧容易化合的元素，如 Si、Al、K、Na 等，這些元素與硫的親合力不大，主要在岩石中有顯著的共生關係。

(3) 親銅元素：與硫容易化合的元素，如 Cu、Pb、Zn 等，主要在硫化礦物中有顯著的共生關係。

(4) 親鐵元素：如 Fe、Ni、Co 等，這些元素與氧或硫的親合力都不算太大，因此在地球內部成自然金屬的状态共生在一起。

(5) 親生元素：做為動植物的成分具有共生關係的元素。

以上的分類並不是絕對的，例如有些元素同時具有親銅性和親鐵性 (表 1)。

當地球由氣體状态變為熔液時，親氣元素主要殘留於地球的外圍。而其他元素則進

表 1

亲气元素	H, C, N, (O), Cl, Br, I, He, Ne, Ar, Kr, Xe
亲石元素	O, (P), (H), Ti, Zr, Hf, Th, (Sn), F, Cl, Br, I, B, Al, (Ga), Sc, Y, TR, Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, (Fe), V, Cr, Mn, Nb, Ta, W, U
亲铜元素	((O)), S, Se, Te, Fe, Cr, (Ni), (Co), Cu, Zn, Cd, Pb, Sn, Ge, Mo, As, Sb, Bi, Ag, (Au), Hg, Pd, Ru, (Pt), Ga, In, Tl
亲铁元素	Fe, Ni, Co, P, (As), C, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au, Ge, Sn, Mo, (W), (Nb), (Ta), (Se), (Te)
亲生元素	C, H, O, N, P, S, Cl, I, (B), (Ca), (Mg), (K), (Na), (V), (Mn), (Fe), (Cu)

入熔液中。由温度的降低,熔液分为三部分,亲铁元素主要富集于金属相中,亲铜元素富集于硫化物-氧化物相中,而亲石元素则主要富集于矽酸盐相中。

3. 元素的地球化学分类

戈尔德施密特曾将元素分为以下四种:

- (1) 亲气元素(惰性气体及氮)——为最外层具有八个电子的原子。
- (2) 亲石元素(Na, Mg, Al, S, K...)——为最外层具有八个电子的离子。
- (3) 亲铜元素(Cu, Ag, Hg, Pb, Zn...)——为最外层具有十八个电子的离子。
- (4) 亲铁元素(Fe, Co, Ni, 铂族元素)——为电子层未填满的离子。

维尔纳茨基根据元素的化学性质以及是否具有放射性等,将元素分为以下六类:

- (1) 惰性气体;
- (2) 贵金属;
- (3) 循环元素(H, Na, O, Al, Si, Fe...);
- (4) 分散元素(Ge, Ga...);
- (5) 强放射性元素;
- (6) 稀土元素。

费尔斯曼根据元素的周期系,将元素分为以下四类:

- (1) 酸性岩浆元素(Li, K, Rb, Cs, Be, Ra, Y, TR, Ac, Zr, Hf, Th, Nb, Ta, Pa, Mo, W, U, (Re), (Au), Al, B, (Si), (Ge), (Sn), (Pb), (P), (Bi), O, Po, H, F, He, Rn);
- (2) 中性岩浆元素(Na, Ca, Sr, Ba, Sc, (Al), C, (Si), (P), (S), Cl, Br, I);
- (3) 超基性岩浆元素(Mg, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt);
- (4) 硫化矿床元素[(Sc), (Re), Cu, Ag, (Au), Zn, Cd, Hg, Ga, In, Tl, (Ge), (Sn), (Pb), As, Sb, (Bi), (S), Se, Te]。

查瓦里茨基把元素分为以下十类:

- (1) 惰性气体(He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn);
- (2) 岩石元素(Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Al, Si);
- (3) 岩浆气体元素(B, C, N, P, O, S, F, Cl);
- (4) 铁族元素(Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni);
- (5) 稀有元素(Sc, Y, TR, Zr, Hf, Nb, Ta);

- (6) 放射性元素(Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U);
- (7) 金屬元素(Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg, Ga, In, Tl, Ge, Sn, Pb);
- (8) 非金屬及半金屬元素(As, Sb, Bi, Se, Te, Po);
- (9) 鉑族元素(Ru, Os, Rh, Ir, Pd, Pt);
- (10) 重鹵族元素(Br, I)。

其他的分类法:

甲、华盛顿分为成矿元素及造岩元素两大类。这种分类过于一般化, 缺乏实际的意义。

乙、别尔格分为輕金屬及貴金屬等, 这种分类事实上已不属于地球化学分类的范畴。

4. 元素的地球化学迁移

目前能够直接研究的对象为地壳。由岩漿形成各种岩石的作用称为岩漿分異作用。为便于說明起见, 这种分異作用可以分为三期:

(1) 初期: 在矽酸鹽溶液中有 Fe, Mg 的矽酸鹽及亲銅元素的硫化物品出。

(2) 中期: Al, Ca, Na 等亲石元素成矽酸鹽或鋁矽酸鹽晶出。

(3) 晚期: 即在偉晶岩期, 除了 Al, K 等矽酸鹽晶出外, 有 Li, Be, Zr, Nb, Ta, U, Th 及 TR 成各种矿物而晶出。

經過以上的分異过程后亲石元素中的大部分將行晶出。殘存的少量亲銅元素, 由于岩漿中揮发性成分(如 H_2O , H_2S ...) 的作用, 將在气相或液相中晶出。目前开采的矿床的大部分, 即由于殘留在岩漿中的亲銅元素或亲鉄元素(这些元素本来应富集于硫化物-氧化物层或金屬核), 經上述的迁移过程而形成的。

5. 地球的化学成分

(1) 金屬核——不能直接知其質与量, 約相当于隕鉄。自然鉄也大致相当于金屬核。戈尔德施密特認為其組成为 Fe 90%, Ni 8% 的合金, 华盛顿認為不仅为鉄鎳合金其中还有硫化物及碳化物。隕鉄及自然鉄的分析結果如表 2 所示。

表 2

元素隕鉄*重量(%)		自然鉄**的重量(%)		
		(I)	(II)	(III)
Fe	90.65	93.16	88.13	92.46
Ni	8.49	2.01	2.13	1.92
Co	0.59	0.80	1.07	0.93
P	0.17	0.32	0.25	0.07
Cu	0.02	0.12	0.48	0.16
Cr	0.01	—	—	—
S	0.04	0.41	0.36	0.59
C	0.03	2.34	2.33	3.11
其他	—	0.02	4.28	1.33

* 为 360 种隕石分析的平均值。

** 格陵蘭产。

(2) 硫化物-氧化物层——关于本层的成分,有不同的看法。戈尔德施密特认为是含有若干氧化物的硫化物层,并由重力的影响,佔据地球的中間层,其成分約相当于陨硫鉄 (FeS, 常存在于陨石中) I. and W. 納达克(Noddack)分析的结果如表 3 所示。

表 3

元 素	重 量 (%)	元 素	重 量 (%)
Fe	61.1	V	0.0015
S	34.3	Cd	0.0030
Ni	2.88	Ag	0.0021
Cu	0.42	Te	0.0017
P	0.305	Pd	4.5×10^{-4}
Co	0.208	Ru	4.2×10^{-4}
Sn	0.161	Pt	3.0×10^{-4}
Zn	0.153	Bi	2.0×10^{-4}
Cr	0.120	Rh	1.0×10^{-4}
Ge	0.115	In	8.0×10^{-5}
As	0.102	Ir	5.0×10^{-5}
Se	0.084	Au	4.5×10^{-5}
Pb	0.071	Tl	3.0×10^{-5}
Mn	0.046	Re	1.0×10^{-7}

华盛顿认为本层是由橄欖岩层到中心核的过渡层,其成分应相当于橄欖陨鉄 (pall-site)。橄欖陨鉄的化学成分如表 4 所示。

表 4

元 素	重 量 (%)	元 素	重 量 (%)
Fe	49.50	Si	9.75
O	21.30	Ni	5.00
Mg	14.20	Co	0.25

(3) 岩石层——其下部由比重較大的基性岩構成,戈尔德施密特认为相当于在高压下安定的榴輝岩,其下限为 1,200 公里。榴輝岩的化学成分如表 5 所示。

表 5

元 素	重 量 (%)	元 素	重 量 (%)
O	43.8	Na	1.85
Si	22.3	K	0.46
Al	7.61	H	0.06
Fe	8.90	Ti	1.03
Ca	8.50	P	0.16
Mg	5.13	Mn	0.18

本层的表层部与酸性岩的成分类似。戈尔德施密特认为本层的范围为地下 120 公里,而华盛顿等认为其下限为 20 公里,并有厚 40 公里的玄武岩中間层。玄武岩的化学成

表 6

元 素	重 量 (%)	元 素	重 量 (%)
O	44.3	Na	1.91
Si	22.9	K	0.68
Al	6.89	H	0.17
Fe	10.4	Ti	1.49
Ca	6.89	P	0.18
Mg	3.76	Mn	0.15

分如表 6 所示。

(4) 地壳——为直接研究的对象，而其范围只不过为岩石层的一小部分。目前油井的深度虽然可达4—5公里，但与地球的半径(约6,378公里)比较，相差还是很大。由于造山运动、侵蚀作用以及根据露头的推定，直接研究的范围可以扩大到16—20公里左右，一般把这一部分可以直接研究的范围称为地壳。地壳主要包括大气圈、水圈及岩石圈三部分，另外也包括次要的生物圈。

岩石圈——1924年克拉克及华盛顿根据各种火成岩、页岩、砂岩及石灰岩5,835种的分析值，计算其平均结果如表7所示。

表 7

成 分	火 成 岩 (%)	页 岩 (%)	砂 岩 (%)	石 灰 岩 (%)
SiO ₂	59.12	58.11	78.31	5.19
Al ₂ O ₃	15.34	15.40	4.76	0.81
Fe ₂ O ₃	3.03	4.02	1.08	0.51
FeO	3.80	2.45	0.39	—
MnO	0.12	—	—	—
MgO	3.49	2.44	1.16	7.89
CaO	5.08	3.10	5.50	42.57
Na ₂ O	3.84	1.30	0.45	0.05
K ₂ O	3.13	3.24	1.82	0.33
H ₂ O	1.15	4.89	1.63	0.77
CO ₂	0.10	2.63	5.04	41.54
TiO ₂	1.05	0.65	0.25	0.06
P ₂ O ₅	0.30	0.17	0.03	0.01
Cl	0.05	—	—	0.02
SO ₂	—	0.65	0.07	0.05
S	0.05	—	—	0.09
其他	—	0.85	0.05	0.05

(i) 对于稀有及分散元素未曾测定，根据近代分析，其他微量元素应增加。

(ii) 火成岩为5,159个的平均值，未考虑各种岩石所佔的体积。T. H. L. 佛格特(Vogt)考虑火成岩的频出度，计算的结果与上述平均值大致相同。

水圈——根据统计的结果，水圈的总重量为 1.4×10^{18} 吨，即佔地壳总重量的7%弱。海洋的深度，最深在10,000米以上，平均约为3,700米。海水的总体积约为1,370,000,000

表 8

元 素	重 量 (%)	元 素	重 量 (%)
O	85.89	Si	0.0001
H	10.80	F	0.0001
Cl	1.93	Rb	2×10^{-5}
Na	1.07	Li	7×10^{-6}
Mg	0.13	Zn	7×10^{-6}
S	0.088	P	6×10^{-6}
Ca	0.042	I	5×10^{-6}
K	0.037	As	2×10^{-6}
Br	0.0066	Cu	1×10^{-6}
C	0.002	Cs	2×10^{-7}
Sr	0.001	Ag	3×10^{-8}
B	0.0004	Au	1×10^{-9}

立方公里。海洋水的化学成分如表 8 所示。

另外在海洋水中尚有 $N(n \times 10^{-5})$ 、 $Ba(n \times 10^{-6})$ 、 $Al(n \times 10^{-5})$ 、 $Mn(n \times 10^{-6})$ 、 $Ra(2 \times 10^{-12})$ 等元素。其他經定性分析証明的有 Ar、He、Ne、Kr、Xe、Rn、Ni、Co、Sn、Mo 等元素。

气圈——根据統計，大气圈的重量为 5×10^{15} 吨，即佔地壳总重量的 0.03—0.05%。目前把大气圈的上限定为 1,000 公里高，以上为成真空地帶的星际空間，其下限推定为地下 60—100 公里。对流层的高度在赤道为 16—18 公里，在温帶为 10—12 公里，在兩极为 7—8 公里。对于地質作用來說，对流层具有重要的意义，并佔整个大气圈重量的大部分，其化学成分(水蒸气除外)如表 9 所示。

表 9

元 素	重 量 (%)	元 素	重 量 (%)
N	75.51	Ne	0.0012
O	23.01	Kr	0.0003
Ar	1.28	He	0.00007
CO ₂	0.04	Xe	0.00004

6. 克拉克值

地壳内岩石圈、水圈及气圈的重量百分比如下：

地壳	{	气圈.....	0.03	
		水圈.....	6.91	
	{	岩石圈 {	火成岩.....	88.41 火成岩: 95%
		{	頁岩.....	3.72 水成岩: 5%
			砂岩.....	0.70
			石灰岩...	0.23

各圈的化学成分，已如上面所述，故由此重量百分比可以計算元素在地壳中的存在