

元素地球化学表

J·格林 著

李亿斗 译 苗树屏 校

中国工业出版社

无机化学讲义

第一分册
无机化学讲义

——

元素地球化学表

J·格林 著

李亿斗译 苗树屏校

中国工业出版社

本书系由美国地质学会报第70卷9期 (Bulletin of the Geological Society of America Vol 70, №9) 中的“元素地球化学表” (Geochemical table of the elements for 1959)。作者J.格林 (J. Green)。

本书是作者广泛搜集了近30个国家有关地球化学领域内最新的数据资料而编成的。书中所附的“元素地球化学表”是按一般周期表的格式，并在作者1953年所编的“元素地球化学表”的基础上，增补了最新的资料编出的。由此表中可以清楚地反映出各种物理、化学性质的周期性。

本书主要阐述了编制“元素地球化学表”的资料来源及资料取舍的原则，同时介绍了许许多多有关专门性的著作，并对这些著作进行了评论。书中还简单地解释了地球化学参数的概念。

本书不但可供广大地质工作者参考，同时亦可作为化学工作者参考之用。

元素地球化学表

J·格林 著

李亿斗 译 苗树屏 校

*

地质部地质书刊编辑部编辑 (北京西四羊市大街地质部院内)

中国工业出版社出版 (北京佟麟阁路丙10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本787×1092¹/₁₆·印张5·插页2·字数74,000

1962年7月北京第一版·1962年7月北京第一次印刷

印数0001—4,046·定价(11-8) 1.50元

*

统一书号: 15165·1533 (地质-158)

目 录

一、緒論	4
二、鳴謝	4
三、原子常数及元素常数	4
1. 原子量与物理量标及化学量标	4
2. 說明地球化学参数所用的周期表	5
3. 与鍵型及配位数有关的原子半径	6
4. 在地球化学历程中的晶格能系数	9
5. 同位素丰度及热中子俘获截面	11
6. 热力学数据	12
四、在地球化学领域中元素的分布与丰度	12
1. 地球化学文献及近代評述論文	12
2. 元素分布与丰度	12
3. 以分布規律性为基础而作出的元素分类	15
五、在不同物质范畴中元素的丰度描述及有关专门性参考文献的評述	15
1. 丰度数据的选择	15
2. 宇宙的元素丰度	15
3. 陨石的元素丰度	16
4. 火成岩的元素丰度	17
5. 变质岩的元素丰度	18
6. 深海沉积物的元素丰度	18
7. 頁岩、砂岩及碳酸盐的元素丰度	18
8. 海洋水圈的元素丰度	19
9. 风化及淋滤岩石的元素丰度	24
10. 非海成水圈的元素丰度	24
11. 其他地球化学圈的元素丰度	24
12. 矿物的元素丰度	25
六、各种不同元素的元素丰度描述 (附詳細的文献及同位素文献目录)	25
七、元素的价格及其波动范围	50
八、具有地球化学意义的系列	50
1. 对敞开体系中系列变化的解释	50
2. 标准电极势、电化当量、水溶液中离子的熵、及氧化-还原势諸系列	50
3. 阴电性系列	51
4. 阳离子場强度系列	51
5. 离子置换指数系列	51
6. 控制氢氧化物沉淀的pH值系列	51
7. 硫化物的溶解度系列	51
8. 与熔浆中的硫的亲合性系列	52
9. 分带性系列	52
10. 反应系列	52
11. 在粘土矿物中的交换性系列	52
12. 离子势与配位系列	52
九、在地球化学领域中所采用的技术和方法及其发展远景	53
参考文献	55

06094

一、緒 論

1959年新編的元素地球化学表，綜合了自1953年以来所发表的地球化学参数資料。地球化学发展的迅速，致使1953年所編制的地球化学表（J. 格林，1953）失去其实用意义。重新测定的原子量及原子半径的精密数据，原子在岩石及矿物中的新丰度数据，以及补充的原子核与电化学值都已包括在1959年的表中。所有的資料都选自地球科学領域內公認的专家的著作；选择正确的，并且，在很少的情况下，摒弃不精确的数值的責任就落到了作者的肩上。这里所包括的丰度数据局限于岩石圈、海洋水圈以及除无球粒隕石和玻璃隕石以外的宇宙圈內。在生物圈和大气圈里的元素丰度并不包括在內。

在表2中元素的一般地球化学行为用顏色或不同字体标明。以地球化学行为作基础而进行的分类，包括与硅共生的亲石元素；与硫共生的亲硫元素；与鉄共生的亲鉄元素；与碳共生的亲生物元素；与氧和氮共生的亲气元素。分散元素（維尔納茨基，1924，p. 61—64）（大部分是由于历史的原因而算做分散元素），是用斜体原子序数表示。

由于篇幅所限，不允許对分析技术作全面而詳尽的叙述或评价。本文仅指出了編制地球化学表所用的資料来源。这只是一小部分近代地球化学文献的一个索引。由于本文是为广大的讀者而写的，因此在其中也提及了許多輔助的參考讀物。

二、鳴 謝

汇集有关的参数以編成一张完善的地球化学表，这项工作如果企图由一个人单独地完成显然是不自量力的。編者得到了一些专家的大力支持，他們盛情地允許編者利用他們未发表的資料。J. A. S. 艾德姆斯博士提供了沉积岩中鉀、鈾和釷的丰度数据，他也評閱了本文的手稿并提出了批評性的意見。M. 弗勒舍博士在选择矿物組合上給予作者有力的帮助，并允許作者应用他所匯編的G1及W1丰度数据。E. D. 高尔德堡博士提供了海洋水圈元素丰度的估值。W. T. 霍瑟博

士为本文搜集及計算了鉍的大部份丰度数据。布魯塞尔的J. 耶德华博士及克里沃伊·罗格（Krivoy Rog）的A. S. 波瓦伦尼赫为作者选集了已发表的、而在本文写作过程中在美国的圖書館內不能得到的論文。他們減輕了作者的負担并提高了地球化学表的編制质量。最后，加里福尼亚研究机关帮助作者完成了图表的清繪工作并給予許多其他的帮助和便利，这些都是使地球化学表得以問所必需的。

三、原子常数及元素常数

1. 原子量与物理量标及化学量标

在表2中列出了为国际原子量委员会（韦契斯，1956，p. 3235—3237）所接受的

下列元素的新数值：Ni、Pd、In、Xe、Sm、Gd、Dy、Er、Hf、W、Re 和 Pt。出席理論化学与应用化学国际协会原子量委员会第19次會議的成員（巴黎，1957年7月16—25

日)，同意不改变这个委员会在1955年所推荐的原子量的值。但是，为了工作的高度准确性，韦契斯 (Wichers, 1958) 建议应用下列以物理方法测定的原子量：As, 74.92; Y, 88.91; Pr, 140.91; Bi, 208.99。22个单同位素元素 (monoisotopic elements) 原子量的详细资料 [达克沃斯 (Duckworth), 1954] 可以与用物理方法测定和算出的原子量相比较而没有什么差别 [韦普斯特拉 (Wapstra), 1957]。

在表2中将放射性元素的同位素列入方括号内而不管这些元素是天然产出的或仅仅是由人工合成的，这些元素是：Tc、Pm、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es^①、Fm、Md^① 和No。所列出的同位素 (1957年原子量委员会所选定的) 或者是属于已知半衰期最长的同位素，或者是比较熟悉的同位素。在后一种场合下用星号标明。但是铯和钫原子量仍然采用1957年的值。在自然界中可能没有 Tc、Pm、Fr 以及在周期表中排列在 Pu 后面的那些元素。对于硫所公认的 ± 0.003 的变异在表中并没有示出。博格斯 (Boggs, 1955) 曾探讨过自然界中某些其他元素的原子量的变异。

表2中所列出的原子量是在化学量标上的原子量，这种原子量是以氧的平均原子量为16作基础而确定的。物理量标则以¹⁶O的原子量为16作基础。韦契斯 (1956 P. 3237—3240) 及斯科特与韦尔 (Scott and Weir, 1957) 指出了采用元素氟 (原子量为19) 作为化学量标及物理量标的共同基础的优点。这样就会导致基于化学量标上的现存值向上提高 $1/25,000$ ($+0.0041\%$ ——这种变化是可以忽略不计的)，并且使基于物理量标的现存值向下降低 $1/5000$ 。其他变换量标的建议及关于化学量标的数字相对移动，计有：碳 $12 = 12(-0.0043\%)$ ；氮 $15 = 15(-0.0050\%)$ ；氧 $17 = 17(+0.0008\%)$ ；氧 $18 = 18$

($+0.0004\%$)。这些建议曾为理论化学及应用化学国际协会 (1957) 所详细研究过。纳尔博士所提议的以碳12为基础的量标，似乎对物理学家和化学家都是最适合的量标 [迈陶奇 (J. Mattauca), 1958]。和物理常数及化学常数打交道的地球化学家，无疑会找到对这两个体系都很便利的共同基础。

阿伏伽德罗数——取其值为 6.02403×10^{23} [斯特劳曼尼斯 (Straumanis), 1953; 1954]——被用来计算每种元素的单个原子重量。

2. 说明地球化学参数所用的周期表

许多作者都应用门捷列夫周期表或修正的门捷列夫周期表以说明地球化学特征。因此应用这样一个被普遍接受的、具有传统意义的格式，以列入半径数据、矿物学数据、丰度数据及其他数据将是十分便利的。在这个表中，诸如镧族及锕族等副族的旁支被放到显著的位置上。为了保持完整起见，最新的合成元素 [吉奥尔骚和西博尔格 (Ghiorso and Seaborg), 1956] 也被列入表中，并且留下一个空位以充满5f电子壳层。勒普西阿斯与阿松玛 (R. Lepsius and S. K. Asunmaa, 1954) 和阿松玛与勒普西阿斯，1955曾发表过有关周期表与原子半径及电子壳层的关系方面的著作。J. I. 博利瓦尔 (Bolivar) 及其他学者 (1957) 所发表的论周期表的数学基础的文章隐约地谈到了周期系的某些专门细节，如周期的长短等等 [F. 图多斯 (Tudos), 1954; S. V. 马尔克维奇 (Markevich), 1952; A. S. 乌克朗斯基 (Uklonskiĭ), 1954]。学者如对周期表的历史演变 [S. I. 托姆克耶夫 (Tomkeieff), 1958] 和创立周期表的经过 [S. 麦雅和 A. K. 劳逊克维斯特 (Meyer and Rosengvist), 1949a; 1949b] 感兴趣，则参考捷尔札文 (Derzhavin, 1955) 的周期

① 许多书中此二元素符号常写为 E, Mv。

表变化图解将是很有价值的。

所謂新的周期表，事实上并没有什么新异之处〔約內斯庫 (Ionescu)，1956；山德逊 (Sanderson)，1956；阿尔班斯基 (Al' banskii)，1950；托姆克耶夫，1954；貝德里格 (Bedreag)，1952；卡罗比 (Carobbi)，1947；格里布 (Grebe)，1958；科尔尼洛夫 (Kornilov)，1957〕，只不过它們为了适应不同的用途而采取不同的型式和添入不同的内容而已，因此它們的作用要看应用的目的而定。为了补充索科洛夫(1954)所发表的論述周期表与地球化学的关系的专门論文，讀者可以參看突出地将周期表作为近代化学的基础而描述的一般性文章〔例如，舒卡列夫 (Shchukarev)，1954，和謝曼欽科 (Semenchenko)，1952〕。

在周期表上可以显示出下列物理化学性质的周期性，

- (1) 点陣型式和歛集密度 (托姆克耶夫，1956b)
- (2) 生成热〔希紹金 (Shishokin)，1954〕
- (3) 电子壳层收縮〔拉克托斯 (Lakatos)，1956〕
- (4) 热力学諸性质(拉克托斯，1955)
- (5) 压缩性〔埃格耶特 (Egyed)，1954〕
- (6) 密度〔V.I.列別捷夫，1948〕
- (7) 熔解熵，汽化热〔杰尔茨里肯 (Gertsriken)，1956〕
- (8) 过渡金属的原子热〔拉克托斯 (Lakatos)，1957〕
- (9) 电离势〔卡特勒德 (Cartledge)，1928〕
- (10) 液态結構〔高利克 (Golik)，1957〕
- (11) 玻璃的光学性质〔居納 (Kuhne)，1956〕
- (12) 熔点〔沃罗涅特 (Voronet)，

1957〕

(13) 同位素的丰度〔哈金斯 (Harkins)，1917，1931；費尔斯曼，1932〕

(14) 造矿元素集合〔布·吳·布朗 (Brown)，1956〕

(15) 原子体积〔查斯拉夫斯基 (Zaslavskii)，1931〕

(16) 离子半径〔伯肯海姆 (Berkenheim)，1929〕

上面所列出的文献是近代文献以及一些古典著作中的杰出代表。所述的这些物理化学性质的周期性說明了以周期表的格式作为編制地球化学表的基础是最恰当不过的。

3. 与鍵型及配位数有关的原子半径

除了杂类半径不算以外，在表2中某一种配位数的离子，它的电荷、半径、配位数、离子体积、半径比率、晶格能系数和电离势都列在与这种配位数相对应的同一水平綫上。例如，配位数为8的锂离子；它的电荷为零；半径为1.52；离子体积为14.7；半径比率为0.49；晶格能系数为155；电离势为5.390等等 (參看表2)。

原子半径包括离子半径、金属离子半径、共价半径或四面体半径以及水化离子半径。在应用这些半径时曾經存在着不同程度的曲解。由于鍵能随环境条件的不同而变，結果形成了一个半径的連續区，这个連續区仅在某些部分理想地增强而变成离子型、同极型、金属型及范德瓦尔型的区域〔波瓦伦尼赫 (Povarennykh)，1956a，1956b；爱汶斯，1939，P.41；托姆克耶夫 (Tomkei-eff)，1955；菲夫 (Fyfe)，1951〕。但是“半径”这个参数却有时被錯誤地列入原子及元素“常数”中，而实际上它的值是变动的。此外，半径也随着配位数而变〔保林 (Pauling)，1948a，P.367〕。桑瑪雅朱卢与派利特 (Somayajula 与 Palit，1957) 及巴查諾夫与帕克霍莫夫 (Batsanov 与 Pakhomov，

1957) 曾探討过原子鍵、离子鍵及鍵型与配位数的关系。在配位数愈小, 或离子鍵愈强, 或不仅配位数小而且离子鍵强的情况下, 通常半径均較小。

如果某些特殊的元素的离子半径測定值有遺漏, 則有14組离子半径值可供参考及选用, 至于选用哪些半径值較為恰当, 不同的专家所持的意見各不相同:

布拉格 (1920);

从元素的晶体及离子化合物的晶体的 x -射綫資料計算求出。

华薩斯特哲納 (Wasastjerna, 1923);

导自离子折射的数值 (參看巴查諾夫及魯奇金, 1956)。

戈尔德施密特 (Goldschmidt) 及其他学者 (1926);

导自离子間距測量的經驗数据。

保林 (Pauling) (1927);

应用原子结构的电子理論而从經驗数据算出。

查恰里阿逊 (Zachariasen, 1931);

根据靜电力的研究算出。

韦柯夫 (Wyckoff, 1931);

以在硷的卤化物中的离子間距为基础算出。

卡普斯欽斯基 (Kapustinskiĭ) 和維謝洛夫斯基 (Veselovskii) (1934);

根据热化学的資料。

詹逊 (Jensen), 麦雅-戈斯勒 (Meyer-Gossler) 和劳德 (Rohde, 1938);

应用波力学算出。

科尔德斯 (Kordes, 1940);

从原子物理学性质算出。

什托卡尔 (Stockar, 1950);

从經驗公式算出。

阿伦斯 (Ahrens, 1952, 1953);

根据电离电势数据。

雅齐米爾斯基 (Yatsimirskii, 1953);

根据电离电势数据。 (1954);

別洛夫 (Belov) 和博基 (Bokii);

导自半-理論研究

(Semi-theoretical consideration) ——保林的数据与戈尔德施密特的数据之間

波瓦伦尼赫 (Povarennykh, 1956a)

从阴电性参数获得。

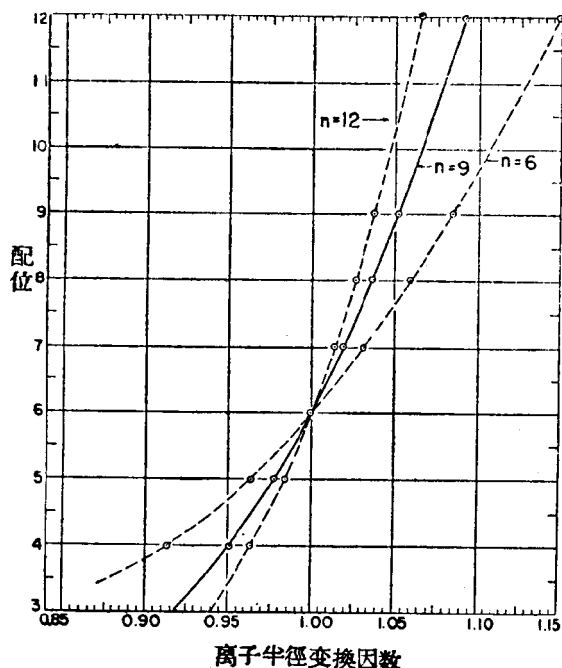
关于在某些指定的离子組合中的离子半径的較高深的論文, 可以參看菲夫 (Fyfe, 1954), 芬德尔与弗劳恩霍弗 (Vendeland Fraunhofer, 1955) 及阿納尔德 (Arnold, 1956) 的著作。

因为任何一种离子的半径都依赖于它所处的环境为轉移, 換一句話說就是依赖于它处在配位和鍵型連續区的哪一个区間而定, 所以曾试图根据这两个变数中的一个, 即根据配位数以校正离子半径的值。在表2中所列出的离子半径是利用这种方法而算出的、处在不同配位中的离子的阿伦斯 (1952) 半径。这些半径都是以氧原子半径 $1.40 \text{ \AA}$ 为基础計算而得, 而 $1.40 \text{ \AA}$ 則是沒有遭受过显著极化的氧原子的半径 (賴姆堡, 1954; 巴查諾夫, 1956)。应用保林的 (1948a, P. 368) 离子半径变换因数和玻恩指数 9^① (图1), 就可以将处在6重配位中的离子的半径換算成与其他配位数相应的半径。离子处在4重配位中的半径与处在6重配位中的半径相差很小; 而其处在10重或12重配位中的半径与处在6重配位中的半径則相差很大。例如, Cs在6重配位中具有离子半径1.67。然而, 处在6重配位中的Cs在自然界中並沒有出現。在它通常所出現的配位中 (配位数为12——譯者注), 它的半径乘以相应的半径变换因数后是 $1.85 \text{ \AA}$ 。

Ac^{+4} 、 Th^{+3} 和 U^{+3} 的离子半径在阿伦斯的文献 (阿伦斯, 1952, P. 168—169) 中並沒有登載。

①玻恩指数是物质压缩性的一个函数。对于結晶物质, 玻恩指数約等于9。

编者根据阿伦斯的对应于配位数为6的 Am^{+4} 、 Pu^{+4} 、 Np^{+4} 、 U^{+4} 、 Pa^{+4} 和 Th^{+4} 的半径以外推法导出 Ac^{+4} 的半径，再根据导



对于玻恩指数为6、9、和12的离子半径变换因数与配位数曲线图解(根据保林, 1948)得的半径换算出对应于8重配位的 Ac^{+4} 底半径。考虑到W.V.奥尔特(Ault)和M.K.克朗(Carron)对阿伦斯(1952, P.169)所提出的 Pm^{+3} 底半径值的批评意见(私人通信), 编者曾将这个值加以修改。 Th^{+3} 和 U^{+3} 的半径是利用外推法从阿伦斯的 Am^{+3} 、 Pu^{+3} 、 Np^{+3} 、 Pa^{+3} 和 Ac^{+3} 底6重配位半径值导得的。这两个外推半径值导得后和上述处理 Ac^{+4} 的情况一样被用以作为换算 Ac^{+4} 底8重配位半径值的依据。

戈尔德施密特(1954, P.89)基于氧的半径为1.33 Å而导得的 Eu^{+2} 与 Yb^{+2} 底半径, 曾被归一化(Normalization, 或译标准化或规范化)为阿伦斯的半径。对所述元素进行归一化所采用的因数是这种元素在阿伦斯半径组中和戈尔德施密特半径组中的半径比率, 这些归一化的半径最后被用以换算出不同配位数的离子半径值。

为了核对阿伦斯根据电离势而导得的离子半径底正确性, 编者采用了所有阿伦斯的6重配位离子半径及归一化的6重配位离子半径以计算离子的密度(以原子质量/立方埃为单位)。并根据算出的值及其他资料, 以密度为纵坐标, 以原子序数为横坐标, 绘出一张包括几种不同价数的离子密度曲线、元素密度曲线以及实测的固体与液体密度曲线(在这一节中所提到的密度均以原子质量/立方埃为单位)在内的曲线图。在图上显示出离子密度有预期的周期性变化。离子密度曲线随着元素的离子性的减弱而偏离于元素密度曲线。对于电荷相似的离子, 其密度曲线均较为圆滑, 而在 Cr^{+3} 离子处则例外。在周期表中毗邻于铬底元素的+3价离子底密度为: Sc^{+3} , 20.2; Ti^{+3} , 26.0; V^{+3} , 30.0; Cr^{+3} , 49.7; Mn^{+3} , 45.6; Fe^{+3} , 50.9; Co^{+3} , 56.3。为了使+3价离子的密度曲线变得圆滑, 必须校正 Cr^{+3} 离子的密度值。因为在铬—镨区以内的原子质量可以放心地采用而不致于产生错误[达克沃斯(Duckworth), 克尔(Kerr)和泰勒, 1955], 所以 Cr^{+3} 离子密度的误差并不是由于原子质量的误差而是由于半径的误差而引起的。根据校正后的密度值而计算出的 Cr^{+3} 离子半径为0.69 Å。由于阿伦斯的离子半径是根据电离势算出的, 所以 Cr^{+3} 的电离势也需要重新审查。在表2中仍然保持 Cr^{+3} 的归有半径(0.63 Å)以待审查后得出正确的结果再行变动。

表2中所列的原子半径系取自戈尔德施密特(1928; 1954, P.119)的著作。补充的稀土元素原子半径则取自哈尔曼(Herrmann), 达埃恩(Daane), 和斯佩丁(Spedding)(1955, P.46—47)的著作。下面所列出的元素底12重配位离子半径, 是底面原子及层间原子的间距的X-射线数据底平均值: La, Ce, Pr, Sm, Gd, Tb, Ho, Er, Tm, Lu 和 Eu (最后的一个元素的离子半径

是指处在 8 重配位中的离子半径)。所有其余的稀土金属半径、连同 12 重配位中的 Nd、Dy 和 Yb 的抄录数据乃取自克勒姆 (Klemm) 和博默 (Bommer) 的著作 (1937)。

某些成键与半径关系的特殊例子值得一提。特别是在半导体表面上键型不同的原因曾为沃尔肯斯坦 (Wolkenstein, 1957) 及穆瑟 (Mooser) 和皮尔逊 (Pearson)

(1956) 所探讨过。关于这一方面与矿物学和岩石学研究的密切关系的论述见于赖姆堡 (Ramberg, 1952b), 波瓦伦尼赫 (1957), 维斯捷利乌斯 (Vistelius, 1956) 以及克朗, 姆罗斯 (Mrose) 和村田 (Murata) (1958) 等人所发表的论文中。

列在表 2 中的杂类半径与其他离子参数并没有任何联系。这些半径值是垂直地列入同一个纵列内而与其他纵列并排。杂类半径这一纵列包括四面体半径, 水化半径, 和在氟化物、氧化物与硫化物中的归一化半径。

共价化合物中的原子半径——即四面体半径——是这样的一种半径, 它既符合于非离子型无机及有机化合物底分子排列中的原子间距, 又符合于配位数直到 4 为止的晶体中的共价键。这一种类型的半径, 用下标 T 标明, 是取自为戈尔德施密特 (1954, P. 109) 所汇编的保林和哈金丝底资料。

水化半径, 取自奥夫钦尼科夫 (Ovchinnikov, 1956, P. 143) 的著作, 是水化离子的半径。这种半径在表 2 中用下标 H 标明。它们的近似值可以根据下式求得:

$$r = \frac{n_e C_0 F}{6\pi n u} \text{ 布罗德斯基 (Brodskii, 1948, P. 613)}$$

其中

r = 水化离子的半径

n_e = 离子价

C_0 = 元素的电荷

F = 法拉第常数

n = 溶剂的粘滞性

u = 离子的绝对淌度 (流动性)

格里姆 (Grim, 1953, P. 148) 曾列出了取自其他文献中的水化离子半径底补充数据。韦尔比 (Welby, 1958) 曾探讨过水化半径及离子势在墨西哥海湾的沉积物中所起的作用。

氟化物、氧化物及硫化物底离子半径是出自波瓦伦尼赫 (1956a, P. 1168) 的半径数据, 并且为了归一化成阿伦斯半径, 曾经将这些数据稍加改动。但是, 归一化的处理是以这样的假定为基础的, 即: 波瓦伦尼赫所算出的有效半径, 在一个相对的意义上当于导自电离势的离子半径。波瓦伦尼赫采用 Na 和 K 的金属半径作为起点而获得了他的这一组半径值。知道了它们在氟化物中的共价键度, 就可以求出有效离子半径。兹在下表中举出钙作为归一化的例子:

	离子半径	共价金属半径	差	在氟化物中的半径	在氧化物中的半径	在硫化物中的半径
波瓦伦-尼赫	0.92	1.97	1.05	0.99	1.12	1.43
阿伦斯 (仅为离子半径)	0.99	1.97	0.98	0.99	1.12	1.43
变换为阿伦斯半径	0.99	1.97	0.98	1.06	1.18	1.47

$$\begin{aligned} & \text{氟化物} & \text{氧化物} \\ & 0.07/1.05 \times 0.98 = 0.07 & 0.20/1.05 \times 0.98 = 0.19 \\ & 0.07 + 0.99 = 1.06 & 0.19 + 0.99 = 1.18 \\ & \text{硫化物} \\ & 0.51/1.05 \times 0.98 = 0.48 \\ & 0.48 + 0.99 = 1.47 \end{aligned}$$

杂类半径在没有进行严格的归一化以前, 应该仅作为氟化物、氧化物及硫化物中离子半径的一个近似值来应用。

4. 在地球化学历程中的晶格能系数

晶格能是一克分子的晶体扩散成相隔无限远的离子所需要吸收的能量。将晶格能视为一种深入了解地球化学历程的工具而加以研究, 是费尔斯曼 (1935a; 1935b) 的工作, 由于他的工作, 推动了这门科学向前发展。最近洛伊特万 (Leutwein) 和道厄菲尔 (Doerffel) (1956) 又重新考察了这一方

面的工作。他們应用近代的半径数据和热力学数据将許多早先的数据重新进行了計算。他們的数据也一併收入在表2中。对于諸如NaCl或Mgo等的简单二元化合物，其晶格能(U)可以从下列公式求出：

$$U = \frac{NAz_cz_a}{r} \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

其中 U = 晶格能

N = 阿伏伽德罗数

A = 为某一个晶格构造型式所特有的常数〔馬德隆(Madelung)常数〕

z_c, z_a = 阳离子及阴离子的电荷

r = 阴离子与阳离子之間的最短距离

n = 依赖于原子核間的斥力的因数(通常約等于10)

雅齐米尔斯基(1956)曾經計算过更复杂的化合物底晶格能。

晶格能系数是每一种元素的一个經驗常数，它代表这种元素在化合物的晶格能中所占有的比例。将某一化合物中各元素的晶格能系数相加并乘以一个常数，就可以求出这一化合物的晶格能。作为一个起点，費尔斯曼应用近等的阳离子与阴离子半径于氟化鉀和氧化鋁等化合物中。他将这两种化合物的已知晶格能均匀地分配到阳离子及阴离子上，从而获得了四个EK值(能系数)，并根据这四个EK值而求出其他的新的EK值。价能系数(VEK)，只要简单地将EK除以离子的电荷就可求出(費尔斯曼，1936)。描繪VEK与电荷的关系曲綫图，可以得到与离子—电势关系曲綫图相似的图形；横坐标从0算起直到500左右。在洛伊特万与道厄菲尔(1956, p.78)的著作中，可以找到这种图解及与其有关的描述。

晶格能对多晶形物质及含两性元素的化合物方面的应用，以及在设计上的限制曾为馬逊(1958, p.79)所探討过。鋁在硅酸盐中的双重作用是众所周知的。对在SiO₂四面体中含有鋁的硅酸盐所算出的晶格能是异

常的。在反应系列中(表2)，取自洛伊特万与道厄菲尔(1956, p.93)的著作的相对晶格能被列入圓括弧內。他們曾經指出：在鋁起双重作用的矿物中所算出的晶格能系数是不准确的(試比較反应系列中的长石、輝石与石英的晶格能，就可以得出这一結論)。然而他們却強調應該研究单个离子的晶格能系数。例如Si⁴⁺的晶格能系数(2500)較Al³⁺(1280)为大。这就意味着SiO₄⁴⁻四面体較AlO₄⁵⁻四面体更易于形成。但是如果这两种絡合物都存在于岩浆中則AlO₄⁵⁻四面体将会首先晶出，因为AlO₄⁵⁻的晶格能較SiO₄⁴⁻为大(洛伊特万与道厄菲尔，1956, p.75, 93—94)。上述的最后一篇論文中所給出的資料及所討論的晶格能在矿物共生問題上的应用，曾为斯查德茲基—卡尔多斯(Szadeczky-Kardoss, 1956)所审查过并提出了批評性的意見。

关于晶格能的补充参数包括：

离子势	卡特勒德Cartledge (1928)
阳离子場强度列	
表2中的“具地球(化学意义的	
系列”这一栏中)。	狄泽尔(Dietze 11942)
电离势	阿伦斯 (1953)
能指数	格伦納(Gruner, 1950)
鍵能	哈金絲(Huggins)和孙(1946)
离子密度；阳离子与阴离子势	斯查德茲基—卡尔多斯 Sun Szadeczky—Kardoss(1953—1954, 1954, 1955a)
成鍵能	克勒 (Keller, 1954)
繼承指数(Index of diadochy) (即在表2中列在“具地球化学意义的系列”这一栏下的离子置换指数)	堀(Hori, 1954)

大的重視。

在講解岩石學中，晶格能系數應予以更

5. 同位素丰度及热中子俘获截面

自从1953年以来，出版了一些关于放射生成与非放射生成同位素的分布及丰度的卓越专著与評論[万勒斯(Wanless), 1957; 弗尔(Faul), 1954; 兰卡瑪, 1953; 1954a; 洛佩·德·阿科納(Lopez de Azcona), 1953; 1955; 英格逊(Ingerson), 1953—請同时参看下列論文: 兰卡瑪, 1954i; 阿伦斯, 1957a; 約利耶(Joliet), 1957; 維諾格拉多夫, 1954a; 1958; 詹逊1953b; 阿普里尔(Aprile), 1955; 維多里亚, 1955; 小穴(Koana), 1956; 西尔弗曼(Silverman)和考恩(Cohen), 1956; 克賴格(Craig)和包阿陶(Boato), 1955]。盖斯(Geiss, 1957)曾探討过同位素在研究隕石上的專門应用, 同时詹逊(1953a)也討論过在液态包裹体研究的同位素方法。博戈莫洛夫(Bogomolov, 1955)簡要地从同位素的立場上討論了地下水的运动。埃里拉(Herrera, 1954)曾运用同位素技术以解决岩石成因上的問題。逊弗特尔和布賴肯(Bracken, 1955)曾討論过扩散作用对于岩石及其相关的液体中同位素丰度比率的理論效应。

在表2中所列出的同位素相对丰度百分数是存在于天然产出元素中的稳定核类(Stable nuclide)①的百分率, 这一个量以原子数的百分率表示而不以重量百分率表示。在表2中的同位素丰度及中子-俘获截面是摘自兰杰的著作(Lange, 1956, p.114—149)。这些資料原先是由G. 弗里德兰德(Fridlunder)与M. 派尔曼(Perlman)所汇集的, 并且克諾尔斯原子能实验室的J.R. 斯特恩(Stehn)和E.F. 克兰西(Clancy)在修訂1956年通用电气公司的核类图表示时又对这些資料进行了修訂。霍兰德(Hollander), 派尔曼和西博尔格(1953)以及休茲(Hughes)

和哈尔維(Harvey) (1955)曾分別將早期汇编的許多同位素丰度与中子俘获截面数据約整成二位或三位数的数字。在表2中, 关于同位素丰度应作下列的补充注释:

Ge与Si (但不包括Hf)的丰度百分数是根据里瓊尔茲(Reynolds, 1953a)的資料加以約整后所得到的数据; 氧的丰度百分数是摘自斯特恩和克兰西的著作。这些数据, 根据斯特恩和克兰西所述, 是由納尔(Nier, 1955)以及斯科尔曼(Scolman), 克韦逊伯里和納尔(1956)給出的。⁷Be的数据是編者自J.R. 阿納尔德的資料中摘来的(1954, 洛佩·德·阿科納所援引的私人通信資料; 1955), 而⁴He的数据則摘自洛佩·德·阿科納的資料(1955)。Ru的丰度数据取自塞茲(Sites)的資料(1956, p.152)并且可能應該約整成三位数使之能与表內的其他丰度数据在位数上符合一致。Pd的丰度百分数資料是由斯特恩和克兰西根据塞茲、康索拉齐奥(Consolazio)和博尔多克(Baldock) (1953)的数据約整至小数后一位数字而得来的; Ta的丰度是由斯特恩和克兰西从韦特、科林斯(Collins)和劳尔克(Rourke) (1955, p.566—567)的資料中原封不动地逐字录来; Ir的丰度是由編者从塞茲的資料中摘来的(在拟編中, 塞茲的数据被列入联合碳化物原子核公司的索引目录中, 1957, p.29)。在这本索引目录以及还有在毛勒(Mohler, 1955)和狄貝勒

①譯者注: “nuclide”(核类)和“nucleus”(原子核)这两个术语, 往往被錯誤地譯为“核子”(nucleon), 同时某些国外的作者也往往錯誤地将“nuclide”理解为“isotope”(同位素) (参看Rankama: Isotopic Geology, 1954, p7的脚注)。其实“nuclide”这个概念, 是指以中子数和质子数为特征的一种原子核类, 換一句話說, 就是以中子数和质子数作为分类基础而划分出的一些原子核的种属(不同的核类具有不同的中子数或/和质子数), “核类”这个词是譯者根据这个定义而杜撰的; “isotope”这个概念是指周期表中占有相同位置的那些原子; “nucleus”这个概念則泛指一般的原子核, 即在原子中带正电荷并集中原子的絕大部份质量的核心; 而“nucleon”(核子)却是质子和中子的統称。

(Dibeler, 1956)的著作中載有可供应用的特殊的同位素类以及特殊同位素标准的資料。

科曼 (Kohman, 1953) 曾討論过关于探寻 ^{48}Ca 、 ^{50}V 、 ^{96}Zn 、 ^{100}Mo 、 ^{112}Cd 、 ^{113}In 、 ^{123}Sb — ^{123}Te 、 ^{230}Te 、 ^{138}La 及 ^{150}Nd 等同位素的新的天然放射性以及探寻在 ^{180}W 或 ^{178}W 、 ^{144}Nd 、 ^{209}Bi 及 ^{204}Pb 的 α -放射性的問題。

1953年以来的非放射生成同位素的文献目录 (不包括方法学及有关仪器方面的文献) 将登載在“各种不同元素的元素丰度描述”一节中。

以 $h/2\pi$ 的倍数表示的核力学矩或“核自旋”是摘自克林肯堡 (1952) 的資料, 其中 h 是普朗克常数。这一个量用添附在同位素符号上的黑体字上标表示。Gd 的核矩则导自勒奥 (Low, 1956) 的資料。

6. 热力学数据

标准生成热 (气体), 标准生成自由能

(气体), 生成的平衡常数的对数 (气体) 及在 25°C 下的熵 (气体与固体, Hg 除外) 是取自兰杰 (1956, p. 1579—1630) 的資料。表中所列碳的熵值是指石墨中碳的熵值。磷和錫在 25°C 下的熵 (固体), 则分别指白磷和四方体相的錫。罗西尼 (Rossini) 和其他学者 (1952), 埃特尔 (Eitel, 1952)、拉蒂默 (Latimer, 1954) 及斯塔耳 (Stull) 和辛克 (Sinke, 1956) 曾詳尽地討論过这些数据。G. J. F. 麦克唐納 (1954, 哲学博士論文, 哈佛大学, 未刊稿) 曾詳尽地論述过具有地质意义的热化学数据, 包括矿物的生成热、熵和热容。对于作为矿物成份的一个函数的热化学性质的变化也进行过研究。曾对这些資料连同 236 份文献一起进行了編录工作。騷尔 (Saul, 1955), 加雷尔斯 (Garrels, 1957), 及賴姆堡, 本宁頓 (Bennington) 和韦克斯 (Weeks, 1957) 曾运用这些热力学参数以研究地质历程。

四、在地球化学领域中元素的分布与丰度

1. 地球化学文献及近代評述论文

編者曾引用經典的地球化学文献及近代发表的評論中的許多材料。根据这些大量的資料, 使作者有可能对丰度資料进行确定的及充分的評价。除了英語地区所熟識的, 如兰卡瑪与薩哈瑪 (1950), 戈尔德施密特 (1954) 及馬逊 (1958) 等人的著作以外, 还有薩烏科夫 (1953) 与三宅 (Miyake, 1954) 的著作以及山崎 (Yamasaki, 1956) 所发表的評論。在地球科学丛刊的物理及化学专栏中所发表的評論 (阿伦斯和其他学者, 1956; 1957) 也被引用以作为汇編 Ga, In 和 Tl [肖 (Shaw), 1957] 及 Cl, I, F 和 Br (科伦斯, 1956) 的数据的基础。托姆克耶夫 (1956a, p. 243—246) 曾深入地研究了

苏联的地球化学文献。謝勒 (Schairer, 1957) 所发表的一篇关于地球化学相图的評論, 以及卡尼基研究院地球物理實驗室主任的一篇年度报告也是值得一提的。美国地质調查所修訂的地球化学資料中 [編者是 M. 弗莱舍 (Fleischer), 在拟編中] 收集有許多詳細的并經严格选出的分析数据。霍克斯 (Hawkes, 1957) 与克拉斯尼科夫 (Krasnikov, 1957) 曾发表了两篇关于地球化学探矿的近代著作。

2. 元素分布与丰度

关于在地球內或在地球上一般元素的丰度的文章并不稀少。比較一下早在二十年代 (F. W. 克拉克和华盛顿, 1924, p. 34; 維尔納茨基, 1924, p. 27) 所发表的丰度数字

与近代汇集的数字[貝拉姆吉尔(Bayramgil) 1952; 尤雷(Urey) 1952, 1953a; 尤尔拜恩(Urbain) 1954; 阿西莫夫(Asimov) 1954, 1956; 布隆德(Blondel) 1954; 弗莱舍, 1954, 1955; 島津(Shimazu) 1955; 維諾格拉多夫, 1956; 阿伦斯, 1957; 利文(Levin) 1957; 图里基安(Turekian) 在排印中; 麦克唐納和克諾波夫(Knopoff) 1958]是十分有趣的。論述元素在岩石中的分布及其規律的一般性文章, 包括戈尔德施密特(1930, 1934, 1937b); 格林和波尔德瓦尔特(Polderwaard, 1958); 繆曼(Neumann), 米德(Mead) 和維塔利安諾(Vitaliano, 1954); 尤格斯特(1955); 科克齐(Koczy, 1951); 蘆尔耶(Lur'e, 1957); 和斯塔尼欽科(Stadnichenko, 1957)等学者的著作。斯塔尼欽科的一篇文章还附有对克拉克值这一概念的評論。一份选編的关于元素丰度的“对数正态分布”(lognormal)問題爭論的文献目录, 包括: 阿伦斯^①(1954a, 1954b, 1957b), 契茲(Chayes, 1954), 奥布雷(Aubrey, 1954, 1955), 米勒和高尔德堡(Goldberg, 1955), 梅本(Umencto, 1955), 杜罗維奇(Durović, 1957), 以及安尼雅(Hanya)和泽田(Sawada, 1956)的著作。M. H. 舍拉(Shera) (1955, 碩士論文, 西方儲备大学, 未刊稿)曾对現有的地球化学文献进行过評論。

除了一般的著作与評論以外, 还有許多文章也談到某些特殊元素在某一个环境中或在某一种岩石类型中的分布与丰度。在表2中所选出的不同的物质范畴, 不包括非海成水圈、大气圈、生物圈、土壤、无球粒隕石及玻璃隕石在內。在其余的范畴中不仅存在着范畴的划分是否适合的問題而且也存在着各个范畴的定义問題。例如, 实际上已經知道, 对于許多元素來說, 海成頁岩与非海成頁岩在化学上存在显著的差别, 而黑色頁岩与非黑色頁岩也有很大的不同的情况下, 在編

录地球化学丰度数据时将頁岩归諸同一个范畴是否还有意义? 在这个問題上編者就掩盖了在不同水解产物的环境中的实际及显著差别的危险。正如狄根斯(1957), 狄根斯, 威廉士和克斯(Keith) (1957)以及其他学者所指出的那样, 这种差别确实是存在的。同时, 对于片岩來說, S. R. 泰勒(1955)也強調过导来于玄武岩的片岩与导来于沉积物质的片岩在化学上的差别。必須仔細地对不同的物质范畴加以严密的定义, 才能使数据的对比工作显得更正确和更有意义。

在这种性质的总編工作中, 平均值的确定也是一个問題。是否应该基于岩层厚度、面积、体积、時間以計算平均值或是根据这些因素的综合以計算平均值? 兰納尔斯(Runnels)和什萊契尔(Schleicher, 1956)曾将基于地层学单元的厚度以算出的平均值与“习用的”平均值进行了比較。他們还給出了某些組份的两种平均值。第一种平均值只是全部样品中那些含量已超出了可检出极限的样品的平均值。第二种平均值是包括全部样品在內的平均值, 并假定含量低于可检出极限的样品的值为零。

至于元素丰度的時間效应(譯者注: 即時間对元素丰度的影响), 一个地区的数据

^①阿倫斯在1954年应用数理統計学的方法处理某些元素的丰度值时, 曾經发现如果将丰度值換算成对数, 則其頻率分布曲綫相类似于或接近于正态分布曲綫(即高斯曲綫), 他将这种现象称为元素(丰度)的对数正态分布(lognormal distribution of elements)或元素(丰度)的对数正态型分布(The lognormal-type distribution of elements), 而元素丰度的这种統計学性质則称为“对数正态分布性”(lognormality), 从而他又得出結論, 認為这些元素的丰度是服从对数正态分布律的。关于这个問題曾經引起了一些学者的爭論(參看Ahrens, L.H., 1954: “The lognormal distribution of the elements”, *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.5, P. 49—73 以及正文中所列出的其它参考文献)。“lognormal”与log normality”都是属于数理統計学的术语, 关于这两个术语目前尚沒有适当的中譯名可以引用, “对数正态分布”和“对数正态分布性”这两个詞是譯者根据原文字义并参照数理統計学名詞而杜撰的。譯者

与另一地区的数据对比是变幻莫测的，这主要取决于在这些地区中的取样与分析方法的标准化。在表1的脚注中所引用的苏联研究者以及还有岡田 (Okoda, 1956) 都力图解释某一个地区内不同年代的元素丰度。

所有这些问题，综合起来都是在于样品的选择以及分析数据的取舍上。到底什么是代表性？有时，由于包括了风化样品、淋滤样品、热液蚀变、自变质及次生富集样品而助长了对数正态分布性 (log normality)。在任何一个物质范畴中如果保留这种样品，则其平均值就会有所歪曲。

在计算近代沉积物的元素平均值时也存在问题。在好几位研究者〔派特逊 (Pettersson), 1953; 派特逊和罗特希 (Rotschi), 1952; 雅尔科夫斯基 (Yalkovsky), 1958〕的记录中，都描述了从海水沉积物的剖面下存在着一系列不规则的元素成份的变化。另一方面，某些如U及Th这一类的元素，沿着深海岩心向下其成分却几乎保持恒定〔斯塔里克 (Starik) 和其他学者, 1958〕。

许多人曾研究过粒度对元素丰度的统计上的效应，但是却沒有总结出一个适用的通则。在一次深入的研究中，曾将花岗岩、安山岩、花岗岩长岩及玄武岩的风化产物按照粒度的大小分成砂、泥、粘土等部分，并将这些部分分别进行光谱化学分析以检验下列的元素：Si, Al, Fe³⁺, Mg, Ca, Na, K, Ti, Ba, Co, Cr, Cu, Ga, Mn, Ni, Pb, Sc, Sr, V, Zn 和 Zr。然而在各粒级部分的分析数据中，大部分的元素都沒有观察出在分布型式上的协合一致〔N.M. 紹尔特 (Short), 1958, 馬薩諸塞工学院，哲学博士論文，未刊稿〕。另一方面，某些元素特别易于集中在海洋沉积物的某些粒级部份中的这个事实是众所周知的，硼在海洋粘土中的分布就是一个例子 (兰德格伦, 1958)。

在表2的用法说明中所列出的各个范畴中的元素丰度是某些分析数据的算术平均

值。这个值所附的上标表示单个分析数据的个数。如果全部或其中任何一个单个分析数据是来自组合样品的，则在上标下面加一短横以表示之。平均值所附的下标则表示标准差 (S)：

$$S = \sqrt{\frac{\sum(m-M)^2}{n-1}}$$

其中 m = 单个的分析数据

M = 算术平均值

n = 单个分析数据的个数

用括号插入的上标和下标的意义，将在“頁岩、砂岩及碳酸盐”这一小节中加以说明。

在很稀少的场合下，编者摒弃了某些单个的分析数据，摒弃的理由将在“各种不同的元素的元素丰度描述”这一小节中按字母顺序排列的元素项内说明。这些被摒弃的数据大部分都异常地高，因此它们并不具代表性而且会导致标准差大大地高出平均值。这样就产生了一个问题，即：标准差是否是说明某一种元素在某一个划分出的物质范畴中的分布均匀性的一种最好的方法。与各个分析数据有关的标准差对于个别的极端值是很灵敏的。但是平均差（也是从所列的值算出的）对极端值则不甚灵敏。然而平均差——单个的分析值与算术平均值的差的算术平均值——却比标准差更易于计算。鉴于解决地球化学取样问题的便利与实用性，平均差也值得考虑以作为地球化学圈中元素分布的变异性的一个粗略估值。但是由于标准差更为大家所熟悉，并且它能够更易于应用到统计计算中去〔肖 (Shaw) 和班基厄 (Bankier), 1954〕，所以在表2中采用了标准差而沒有采用平均差。在划分出的物质范畴中，有一个范畴（即煤这一个范畴），由于所援引的论文中并没有发表单个分析的数据，所以只得采用均方比。均方比（被放在括号内）是丰度百分率的最大值除以最小值得到的。

最后，如果算术平均值所指的是全球性

平均值或总平均值，則用粗体字表示之。这些值都是引自一些著名的权威的資料。放到括号内的值表示原先的編者認為这个值是有問題的。在表2中任何一栏内如果标有百分率符号，則这个百分率符号适用于这一栏内的所有数值。

3. 以分布規律性为基础而作出的元素分类

为了解释为什么元素按照它們現存的分布情况而分布，許多人试图从地球化学的立場去进行元素的分类。与元素的分类密切联系的是元素的淌度（移动性），而元素的淌度則是溫度、溶解度、氧化-还原电势、阴电性、晶格能、pH值、离子半径以及其他列在表2中的参数的一个函数。最早的分类之一，是維尔納茨基（1924）的分类。戈尔德施密特（1954）曾經批判了他的关于“分散元素”的概念。繼維尔納茨基的嘗試之后，別洛夫（1952）、卡普斯欽斯基（1956）、

庫蒂納（Kutina, 1957）、杰德瓦布（Jedwab, 1953）、博基（Bokii, 1956）、烏克蘭斯基（1949, 1953）和托姆克耶夫（1954）相繼发表了关于元素的地球化学分类問題的著作。大部分的这些地球化学分类，都以周期表为框架。

許多論文都牽涉到元素的淌度以及与其有关的共生問題。这个領域的开拓者柯尔仁斯基（Korzhinskii, 1936, 1941, 1950, 1957）曾引入了元素的地球化学淌度（移动性）的概念。这个問題的某些方面曾为乘富（Noritomi, 1953）、斯查德茲基-卡尔多斯（1953—1954）、德沃尔（Devore, 1954）、尤格斯特（1955）、奥夫奇尼科夫·彼列尔曼（1956）、洛伊特万和道厄菲尔（1956, p. 92—94）、D·H·安德逊和霍克斯（1958）、A. П. 列別捷夫（1957）、盧卡歇夫（Lukashchev, 1957）及契尔諾魯克（Chernoruk）和罗瑪歇娃（Romasheva）（1955）討論过。

五、在不同物質范畴中元素的丰度描述及有关專門性参考文献的評述

1. 丰度数据的选择

在选择表2的丰度数字的过程中，曾力图使数据符合于三种来源。第一种来源是单一的研究者利用相同的分析技术，在同一个实验室中得到的属于同一物质范畴中的許多元素的分析数据；第二个来源是某一个权威的专家对属于同一物质范畴中的許多元素的丰度数据所进行的选择、取舍和評价，而这些数据則取自文献的資料。下面在按照不同物质范畴而排列的各小节中，将詳細登載属于这两种来源的文献。第三个来源是某一个研究者在同一实验室中利用相同的技术，而得到的某一种元素在許多不同物质范畴中的数据。关于这些数据的文献，将刊登在下部分的“各种不同元素的元素丰度描述”

这一节中。

2. 宇宙的元素丰度

宇宙中元素的丰度数据，在表2中以两种方式表示：（1）以重量的百万分之一（Ppm）为单位，包括挥发性元素，用粗体字表示；（2）每百万个硅原子中的原子数，用括号表示。除了As, Ra, Ac, Th及U以外，所有用每百万个硅原子中的原子数表示的宇宙丰度都是取自苏伊士（Suess）和尤雷（1956, p. 56）的資料。对于As，鑑于阿伦斯（阿伦斯，1956, p. 275）的意見，它在球粒隕石中的最大值—4ppm——是取自大西（Onishi）和山德尔（Sandell, 1955, p. 31）的資料。因此苏伊士和尤雷的值4.0个As原子/每百万个Si原子就修正为8.1个As