

# 地球的化学成分

A. H. 别列斯金



地质出版社

# 地 球 的 化 学 成 分

A.И. 别列雷曼

王 集 源      译

李 德 方      校

地 质 书 局 出 版

这本小册子论述的克拉克值是地球化学的主要问题之一。地球化学是研究地球原子史的科学。作者说明了地壳、地球整体和宇宙的平均化学成分是怎样确定的。为什么地球上有些元素多，而另外一些元素则极少等问题作了解答，分析了生物体、世界大洋、大气圈以及陨石的成分。

这些问题不仅具有科学意义，而且对于解决国民经济的许多任务也很重要。

## 地球的化学成分

A. И. 别列雷曼

王集源 译

李德方 校

\*

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

\*

开本：787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub>印张：2 字数：41,000

1981年8月北京第一版·1981年8月北京第一次印刷

印数1—3,330册·定价~~8.60元~~  
0.40

统一书号：15038·新634

# 目 录

地壳的化学成分是怎样确定的·····	1
元素的分散性与原子结构·····	9
矿石和矿物的形成·····	23
天然系统·····	31
人类与克拉克值·····	47
参考文献（从略）·····	54

# 地壳的化学成分是怎样确定的

经过漫长的半个世纪的工作，地球化学取得了新的数据——宇宙新常数。

A. E. 费尔斯曼

地球是由哪些元素组成的呢？确切地说，就是我们的研究所能达到的地球的外壳——地壳，是由哪些化学元素组成的呢？正常的想法提醒我们，地壳是由门捷列夫周期表中已知的那些元素组成的。这种回答，在几十年前，可能算是正确的，但现在就需要补充了。因为这几十年，获得了16个人工合成的化学元素。它们都是过去存在于自然界中而不为人们知道的。这些元素是锝Tc（43号）、砹At（85号）、钫Fr（87号）以及自93号开始的13个超铀元素（镎、钚、镅、锔等）。后来在地球矿物中也找到了极微量的锝、砹、钫、镎和钚的痕迹。因此，地壳定性的元素成分业已知晓。但是在地壳中所含的每一个单个元素的数量又是怎样的呢？美国化学家和矿物学家弗·克拉克（1847—1931年）为自己提出了这一任务。他于1889年发表了地壳平均成分的计算<sup>①</sup>。

---

① 克拉克有一些见解超过他的前驱者。1815年英国矿物学家B. 菲利普斯对10种元素作了类似的计算。法国科学家波蒙和多布莱使菲利普斯的工作得以继续。但是，这些计算都是近似的，对当时的科学思维没有显著的影响。

弗·克拉克曾任华盛顿地质委员会化学实验室的领导人，许多岩石矿物分析都是经他手进行的。克拉克根据 880 个完全可靠的岩石分析样品，计算出 10 个化学元素的平均含量。由这些岩石样品得出了地壳厚度为 16 公里的概念。当然，那时也和现在一样，都不可能直接从那么深的地方得到岩石标本。然而据推断，岩石大概是在造山过程中，从那么深的地方到达地表的。克拉克认为这个厚度就是固态地壳。他决心要把地壳的平均成分确定下来。因此，克拉克根据假设推断，越是常被分析的岩石，在自然界中的分布也越广。这一原理正如深入研究所表明的，与实际情况并不相符，但相差不大，不致于影响到基本结论。

克拉克认为“地壳”这个概念，应包括全部水圈（世界大洋）和大气圈。水圈的质量只是固体地壳质量的百分之几，而大气圈只有地壳质量万分之几。与此相联系，克拉克值恰好反映了地壳的成分。

氧 O——46.28	镁 Mg——2.77
矽 Si——28.02	钾 K——2.47
铝 Al——8.14	钠 Na——2.43
铁 Fe——5.58	钛 Ti——0.33
钙 Ca——3.27	磷 P——0.10

在最初的若干年里，克拉克的著作没有得到人们的理解和支持。

很多年以后，从地球的另一边——俄国，对克拉克的工作给予了应有的评价。二十世纪头十年，在俄国产生了新的科学——地球化学。

当时，原子科学家的巨大成就是发现了电子和放射性。研究有关原子的复杂结构概念使这一“宇宙砖”不仅把物

理、化学做为研究的对象，而且也把有关地球的科学当成研究对象。自然科学方面的革命触及到地质学。莫斯科大学矿物教研室主任维尔纳茨基教授是最先理解这一点的人们之中的一个。

在维尔纳茨基之前，科学家大多赞成化学元素呈矿物形式存在于岩石圈里的概念。认为铜包含在黄铜矿 ( $\text{CuFeS}_2$ ) 和其它铜的矿物组成里。锌包含在闪锌矿 ( $\text{ZnS}$ ) 里等。有多少铜或锌存在于花岗岩或玄武岩里，即存在于不含有这些元素的矿物岩石里，是不知道的。而且问题提法的本身也不现实。分析方法有时也不能解释这种问题。当维尔纳茨基在二十世纪初，用光谱分析研究铯、铷、铜、铈、铋这些稀有元素在岩石中的含量时，他的工作是一种创新。

这位科学家智慧的卓越贡献，在于从同一的事实中卓有创见地看出自然界的普遍规律，从而使他能得出化学元素赋存的形式是“非矿物”的和“分散的”概念。维尔纳茨基得出了关于化学元素普遍分散的结论，即“到处都是元素，应有尽有”。1909年，维尔纳茨基在俄国自然科学家和医生的十二次代表大会上就这个问题作了报告。他说：“在地球表面上的每一滴水，每一小粒尘屑里，随着研究精度的提高，我们将会发现新的和更新的元素。得到它们分散的微观性质的印象。在一粒砂子或一滴水中，在宏观的总成分中，所反映出来的，在微观中也是如此。凡是人们在地球上能观察到的元素，在微观里也都能找到。问题只与实验方法的改进和准确度有关。由于实验方法的改善，我们找到了钠、锂、铯这些从前未曾发现的元素；由于实验方法准确度的提高，我们用比以前还少的样品就能发现这些元素。镍、钒、金、铀、钍-镭族等发现的历史使我们得出同样的结论。它们无所不

在，也到处可以查出。它们是在高度分散的状态中聚集起来的……”。我们可以看出，维尔纳茨基克服了“矿物观念”，化学元素成了他研究的对象。这样，维尔纳茨基便奠定了关于地球原子史——地球化学——的科学基础。

从地球化学的角度看待自然界，那么，地壳中化学元素的平均含量问题就颇为重要了。维尔纳茨基了解到克拉克的著作对地球化学的重大理论意义；1927年，维尔纳茨基这样写道：“克拉克值长期以来没有对科学界的思维发生影响，而且还遭到了反对，只是在最近十年，它们的重大意义才得到肯定”。他继续写道：“克拉克没有鲜明地和确切地提出地球化学的任务，即做为行星原子史的研究任务”。地球化学这个学派出现得比较晚，其重要性也超出了地球化学概念之外（见维尔纳茨基的著作）；然而，由于克拉克值在原子这门新的科学里产生的现实意义，及其对二十世纪物理和化学观念的影响，克拉克的著作完全超出了他的见解所形成的概念之外。

确定地壳平均成分的问题成了地球化学主要问题之一。这个问题吸引了俄国和其它国家很多杰出的地球化学家——维尔纳茨基、费尔斯曼、戈尔德史密斯、赫维塞、帕涅特等。

1889年克拉克的第一个报告只包括10种元素，而后，在1924年（与Γ. 华盛顿一起）所公布的，已是50种元素的数据。克拉克用了40多年的时间献身于地壳成分的测定，作出了应有的科学贡献。费尔斯曼在1923年建议用“克拉克值”这个术语来表示地壳中化学元素的平均含量，可用于整个地球的任何一部分，也可用于行星或其它宇宙客体。我们可以说：世界大洋的克拉克值，生物的克拉克值，月球的克拉克值，等



等。例如，地壳里铁的克拉克值是4.65%，而在世界的大洋中则为 $1 \cdot 10^{-6}\%$ ，即该金属在岩石中和海水中的平均含量。



图 1 甚至在不太大的一块陆地上，也可以有各种各样的地质结构上的区别，我们在这幅画上看到的是西伯利亚北部阿拿巴尔斯克岩块结构的一个变质岩段

1—变质岩；2—石灰岩和其它沉积岩；3—花岗岩；4—斜长岩；5—石英岩脉

克拉克在自己的初期工作中，只注意到地壳里大量分布的主要元素。在同一时期（自1898年），挪威科学家佛格特试图测定铜、锌、锡、铝、锡、锰和其它重金属的克拉克值。已知锰、镍、钴与铁在不同岩石矿物中的比值，就是利用了克拉克计算出来的铁的克拉克值。佛格特用换算法确定了重金属的克拉克值。对于有色金属，佛格特采用了更巧妙的办法。利用国际市场上各种不同金属价格的资料，统计了工业上对这些金属的消费，佛格特计算出铜、锌和其它有色金属的克拉克值。当然，类似的方法是不准确的，但在多数情况下，能得到接近于满意的结果。1933年，费尔斯曼写道：

“无疑，佛格特主要是以一个矿物学家的身分支持了克拉克初创的事业，他的工作在很长时间里都很少得到重视，有些人甚至认为这是‘完全多余的游戏’。当时，在西方有一个

佛格特，在苏联有一个维尔纳茨基，不仅把这一概念引用到自己的科研工作中，而且也引用到矿物学的教学中”<sup>①</sup>。

本世纪初，为了计算稀有元素的克拉克值，要积累成千上万个数据，但由于分析方法不完备，困难很大。因此，要准备300—400个单样的混合物并测定它们的稀有元素数量。显然，可以对一个试样作充分的详细的化学分析，以查明小量的元素。在计算放射性元素的克拉克值时，考虑到在岩石圈里相对地分布较广的，由于铀的衰变而形成的钍、镭和其它一些非常稀少的元素（克拉克值  $2.5 \cdot 10^{-4}\%$ ）。已知铀在自然界中的含量，便可以计算出与其相平衡的镭的数量。用这种方法所确定的岩石圈中镭的克拉克值，近于  $2 \cdot 10^{-10}\%$ 。

放射性测量、放射性激化法、伦琴射线法、原子—吸收光谱和其它现代分析方法，对确定岩石和矿物中化学元素含量，有较大的精密度和灵敏度。与十九世纪末相比，资料数据增加了很多倍。使某些元素克拉克值的概念有了改变。例如，佛格特于1898年认为锶的克拉克值非常低—— $n \cdot 10^{-10}\%$ <sup>②</sup>，那时对锶还很少研究，含锶矿物也不清楚。这种元素给人的印象是极其分散的。当时锶也没有什么实用价值。过了四分之一世纪之后，1924年，克拉克和华盛顿依然鉴定锶的克拉克值为  $n \cdot 10^{-9}\%$ ，但是不久，戈尔德斯密特和他的助手在煤里找到了锶（到  $0 \cdot n\%$ ）。由于分析方法业已完善，最主要的是在二十世纪中叶，锶开始用于工业，才发现锶是最好的半导体，1948年，出现了第一个锶晶体管。这种稀有金属在无线电工程和其它部门有重大作用。于是，寻找锶的原料问题就被

---

① 费尔斯曼著，《地球化学》，列宁格勒，国家化学书籍出版社，1933年版第1卷，第139页。

②  $n$ ——数目从1到9。

提出来了，开始详细研究锆的地球化学。分析了各种不同的岩石和矿石，获得了大量新的实际材料，才发现锆在地壳中并不那么稀少。在岩石圈中，锆的克拉克值为  $1.4 \cdot 10^{-4}\%$ ，也就是说，几乎与那些早就为人类熟知的砷、锡一样。锆在地壳中比黄金、银、铂多得多。与佛格特的计算相比，锆的克拉克值增大了上百万倍。

确定元素的克拉克值——是一种非常大量的劳动，这项工作的复杂性，可以用苏联科学家沙乌科夫对于比锆还更稀有的汞元素的地球化学研究为例。

汞在很古的时候就已经为人类所知。公元前三千多年，埃及人就知道汞。汞的化合物被用作染料、药物，较后，在很多工程技术部门都应用了“液体银”。

汞矿床已经为地质工作者所熟知，但汞在岩石中的含量实际上还没有研究过。因此，这就需要有非常精确的分析方法。1938年，沙乌科夫研究制定了这种新的方法。结果是有可能在任何岩石中测定汞。分析了数百块岩石标本，最后更准确地测定了汞的克拉克值，发现旧的数据 ( $1 \cdot 10^{-4}\%$ ) 明显偏高，汞的克拉克值几乎降了两个数量级，并确定大小为  $7.7 \cdot 10^{-6}\%$ 。

以后，沙乌科夫继续研究了汞的地球化学，并在1942年卫国战争的紧张时刻，他以《汞的地球化学》为题对博士论文进行了答辩。1946年，苏联科学院以同一名称出版了他的书，1947年，授予他国家奖金。沙乌科夫使自己的学生也循着这个方向继续进行研究，直到他生命的最后几年为止（他死于1964年）。1972年，科学出版社发表了《汞的地球化学论文集》一书，作者是沙乌科夫和他的学生阿依季年和奥捷罗娃。大量新的实际资料使汞的克拉克值更进一步精确。其数值变得

更低—— $4.5 \cdot 10^{-6}\%$ 。

确定其它化学元素的克拉克值的历史也是很复杂很有趣的。除了我们已熟悉的地球化学家外，在克拉克值爱好者中间，值得提出的还有诺达柯夫，他在1925年，发现了新的化学元素铯；匈牙利地球化学家赫维斯和高斯洁勒于1923年，共同发现了极分散的元素铈（还不知道有任何固定的矿物）。

自从克拉克的第一份表公布之日起，差不多已经过去一百年了，科学家们又做了大量工作，我们拥有了大多数元素克拉克值的较精确的数据。然而，铂和铂族，惰性气体及其它分散元素的克拉克值至今还没有确定，甚至很多常见元素的克拉克值也需要核实。从这个目的出发，最近几年在计算克拉克值时，开始考虑某一类型岩石的体积和质量，考虑有关地壳不同块段结构的地质和物探资料，譬如陆地和海洋。这样比较准确的方法1956年曾为美国地球化学家波尔捷勒瓦尔特所采用。早些时候，罗诺维和亚罗塞夫斯基（1967年），别乌什（1972年）和其他地球化学家发展了这个方法。克拉克值的计算仍然是地球化学主要任务之一。（参见书尾附表）。

# 元素的分散性与原子结构

地壳的化学成分与其原子  
的一定结构有关

В. И. 维尔纳茨基

克拉克值的测定工作是艰巨而繁重的，几代科学家致力于这项工作，花费了差不多一个世纪的时间，总的结果如何呢？首先证明了维尔纳茨基关于化学元素在自然界呈一种分散状态存在的独创论点。对于碘、钼、铀、铷、铯、镭和其它一些稀有元素来说，分散状态是基本的。因为它们不形成或者几乎不形成单独的矿物；而对于绝大多数元素只有氧、硅、铝、铁、钠、钾和镁主要以矿物形式存在。

这样，到处都是元素，应有尽有，它们存在于每一克岩石和每一滴天然水中。只能说由于现代分析方法的不够灵敏，暂时对自然界一定对象的某些元素含量还不能测定。关于化学元素呈普遍分散的这一论点，地球化学家萨伏朗诺夫提出，应称之为克拉克—维尔纳茨基定律。

克拉克开始研究时，地质学中康德—拉普拉兹的宇宙论占统治地位。这种理论认为地球是由热液物质产生的。随着灼热球体逐渐冷却，地球表面形成了硬壳，对深部熔融物质的了解只有在火山喷发时才能获得。克拉克的思想与这个假想概念相去甚远，他对地壳这一术语的理解是指地球研究容

易达到的那一部分，其厚度接近16公里。从那时起，我们在地球构造方面的知识扩大了许多，对地球上部外壳（传统上称“地壳”）产生了严格的科学概念。地壳是由两个基本层构成的。上部接近于酸性喷出岩，因此，取得了花岗岩层之称。这种岩层在大陆上发现过，各洋洋底上则没有找到。下部岩层致密地包围着地球，由接近玄武岩的岩石组成。因此，被称为玄武岩层，在这一层的下面是地幔，它的特点是地震波通过的速度不相同。

有山脉的地方，地壳的厚度最大（可达60—70公里），洋底下地壳的厚度最小，在花岗岩层之上几乎到处都覆盖着厚层的沉积岩层。洋底上的沉积岩层是直接覆盖在玄武岩层上的。这三个岩层在一起构成了硬地壳。世界的大洋（水圈）和大气圈也都属于地壳，它们的质量显然小于硬地壳，水圈约占7%，大气圈只占0.03%。

由花岗岩层构成的广为分布的酸性喷发岩（花岗岩等），克拉克值测定得相当准确，基性岩（玄武岩等）、沉积岩（粘土、页岩、石灰岩等）克拉克值有很多数据。比较复杂的问题是地壳的平均成分，因为到目前为止，并不确切了解各种岩组之间的关系到底是怎么样的，尤其是洋底上。维诺格拉多夫院士假定地壳是由2/3酸性岩和1/3的基性岩组成的。这才使他有可能算出地壳的平均成分（图2和书末附表）。

经过研究得到的这些数据，首先使人感到惊讶的是元素分布极不均匀，地壳几乎有一半是由一种氧元素组成的。所以，地壳又称“氧圈”，氧的物质圈。占第二位的是硅（克拉克值29.5），占第三位的是铝（8.05）。这些元素总共占84.55%。如果再加上铁（4.65）、钙（2.96）、钾（2.50）、钠（2.50）、镁（1.87）、钛（0.45），则得到99.48%，即实际上

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VI	O
1 H															2
3 Li	4 Be	5 B													He
11 Na	12 Mg	13 Al													10
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No
															103 Lr

地壳中已知的化学元素

人造元素

元素序号

地壳中的克拉克值

图 2 门捷列夫元素周期表

差不多等于整个地壳。其余80种元素占不到地壳质量的1%。地壳里大部分元素含量不超过0.01—0.001%。这些元素在地球化学里称为稀有元素(有时称为微量元素)。到目前为止,我们还不知道哪种元素是最稀有的。例如,镭的含量一般不超过 $2 \cdot 10^{-10}\%$ ,而氡就更少了( $n \cdot 10^{-16}\%$ )。因此,地壳中元素含量的变动是上百亿倍的( $n \cdot 10^2$ — $n \cdot 10^{-16}$ )。

有趣的是,我们从通常经验中汲取的一般概念却往往与地球化学数据不相符。譬如,锌和铜广泛应用于生活和技术上,而锆和钛对于我们来说却是“稀有元素”。实际上,地壳中锆几乎比铜多四倍,而钛甚至比铜多95倍。锆和钛的“稀少”只因为它们很难从矿石中提取,只是在二十世纪中叶,自从科学家研制出来有效地从矿石中提取锆和钛的工艺流程以后,才完全克服了选冶上的困难。这些金属也才开始广泛应用于工业。我们对这两种金属也是刚刚熟悉,但是,对于铜,人类早在数千年前青铜器时代(青铜—铜与其它金属的合金)就熟悉了。如果不采用重量法,而是用原子的百分比亦可得出元素分散性的一些同样数据。1911年,费尔斯曼第一个提出了这样的克拉克值算法。非常清楚,化学元素的相互作用与其重量不成比例,而与它们原子重量相当。因此,克拉克值应计算成原子数的百分比,即用原子量来计算,在这种情况下,重元素(如铀、金)的克拉克值便缩小了,而轻元素的克拉克值则增大了(下面括号里是重量克拉克值)。

以轻元素为例,原子克拉克值大于重量克拉克值:

氧O——58.0(47.0)

锂Li—— $1.9 \cdot 10^{-2}$ ( $3.2 \cdot 10^{-3}$ )

铍Be—— $1.2 \cdot 10^{-3}$ ( $3.8 \cdot 10^{-4}$ )



重元素相反，原子克拉克值小于重量克拉克值：

铀 U—— $2 \cdot 10^{-5}$  ( $2.5 \cdot 10^{-4}$ )

金 Au—— $5 \cdot 10^{-8}$  ( $4.3 \cdot 10^{-7}$ )

镭 Ra—— $9 \cdot 10^{-12}$  ( $2 \cdot 10^{-10}$ )

可见，计算原子的数目会使地壳里化学元素的分布情况更加分明；显然氧原子占更大优势，而重元素很稀少。但最明显的资料是在被称为“体积克拉克值”（即对各元素所占空间的测定）的计算中得到的。这种计算是近似的，因为其出发点是认为岩石中元素处于近似球状离子形式，其大小可借助于X光结构分析来测定。结果，最常见的元素以氧为例，离子半径为  $1.35 \cdot 10^{-8}$  厘米，而象硅、铝和大多数其它元素的离子半径要小很多（硅  $3.9 \cdot 10^{-9}$  厘米、铝  $5.7 \cdot 10^{-9}$ ）。体积克拉克值计算的结果显示了氧的绝对优势。戈尔德斯密特计算出：

氧——91.77

铝——0.76

钾——2.14

铁——0.68

钠——1.60

镁——0.56

钙——1.48

钛——0.22

硅——0.80

虽然这些计算是近似值，但是正确表达了基本规律：地壳由大的氧离子组成。其余的元素几乎占据了与氧离子相接触的氧离子之间的孔隙。硅、铝的稀有性是有它的特征性的，按体积来看，居第二位的是大的钾离子。

当地壳的平均成分一经确定，很自然就会产生一个问题，是什么原因使得元素分布极不均匀，为什么一些元素多，而另一些元素少？于是开始在原子结构特点上找原因。大家都知道，原子由原子核和外壳的电子组成。距离原子核

最远的电子决定着元素的化学性质，其中包括原子价、金属或非金属的性质、化合物的溶解度，等等。很自然地会产生一种设想，即元素的克拉克值与其化学性质有关，即克拉克值取决于外层电子轨道的结构（价电子数等）。然而实际并非如此，以碱金属——锂、钠、钾、铷、铯、钫为例，在化学关系上，它们彼此很相近，都是一价的（在外圈轨道上有一个电子），构成苛性碱，易溶盐，等等。它们的克拉克值明显不同：钠和钾在地壳中很多（2.50），铷少（ $1.5 \cdot 10^{-2}$ ），锂更少（ $3.2 \cdot 10^{-3}$ ），铯很稀少（ $3.7 \cdot 10^{-4}$ ），而钫实际上不存在，它最初是由人工合成的。类似的这种化学上相近元素的克拉克值，象卤族元素（氟、氯、溴、碘、砷）、硅（29.5）和锗（ $1.4 \cdot 10^{-4}$ ）、钡（ $6.5 \cdot 10^{-2}$ ）和镭（ $2 \cdot 10^{-10}$ ）都明显的不同。另一方面，化学关系上差别很大的元素却有相近的克拉克值。例如，锰金属（0.1）和典型的非金属磷（0.093），碱金属铷（ $1.5 \cdot 10^{-2}$ ）和氯（ $1.7 \cdot 10^{-2}$ ）。

因此，克拉克值不取决于（严格地说，基本上不取决于）元素的化学性质。

所以，科学研究工作者注意到原子的另一部分——由中子和质子组成的原子核。

费尔斯曼制定了从属子门捷列夫周期表中元素序数的原子克拉克值。这样就可以确定，随着原子核的加重，即随着原子核中质子和中子数的增加，克拉克值是怎样改变的。我们注意到1号元素氢，原子核由一个质子组成，92号元素铀，由92个质子和146个中子组成<sup>①</sup>。为此，费尔斯曼作了两

---

① 这些元素为最常见的同位素，我们知道氢的原子核由2（质子+中子）和3（质子+2中子）核子组成，铀除了主要的同位素 $U^{238}$ 以外，还有 $U^{235}$ ， $U^{234}$ 等。

条曲线，一条是偶数顺序号元素曲线（粗线），另一条是奇数顺序号元素曲线（细线）。当然，考虑到克拉克值差别很大，在一个图表上只能使用对数比例尺画出这个函数。即纵轴表示的不是克拉克值本身，而是它的对数。该图表清晰地反映出，随着原子核结构变得复杂，原子核加重，元素的克拉克值有减少的趋势。曲线呈现出不是单调的变化，而是曲折的变化，一些元素处于波峰，而另一些元素则为波谷。费尔斯曼画了一个设想的均值线，随着顺序号的增高，这条线平稳地降低。

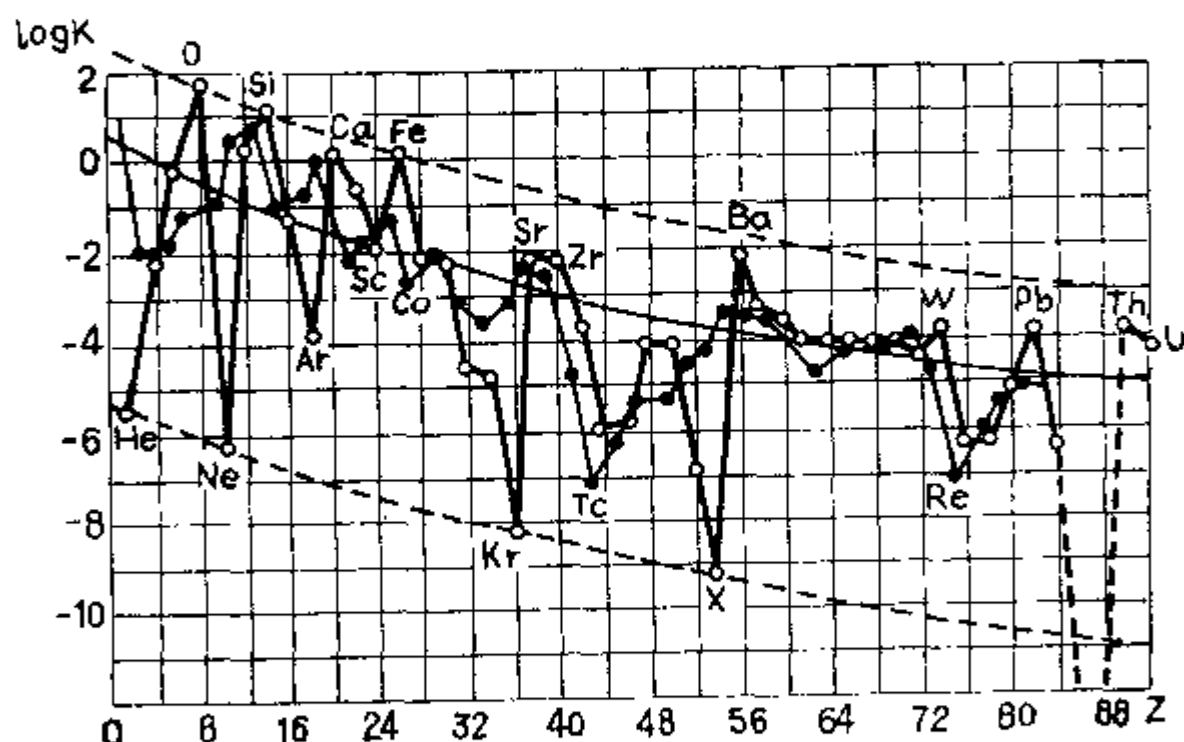


图 3 费尔斯曼原子克拉克值对数曲线

位于均值线以上并形成“波峰”的元素克拉克值，费尔斯曼称为过剩元素（氧、矽、铁等），而低于均值线，位于曲线“波谷”上的元素则称为稀有元素（如锂、铍、硼、碳、惰性气体等）。

因此，在地壳中，元素周期表开始的一些方格中的轻原子占优势。这些轻原子的核子数（质子和中子）不大。的确，在铁（26号）以后，没有一个常见的元素。这个规律性在现代地球化学形成以前早已为门捷列夫所提出。他在1869年写道：“自然界中最常见的简单物质都有很小的原子量”<sup>①</sup>。

常见元素的另一特点曾为意大利地球化学家奥多于1914年所确立，美国教授戈勒根斯在1915—1928年间对此作了更加详尽地描述。他们注意到地壳中具有偶数顺序号和偶数原子量的元素占优势，即那些原子核中含有偶数质子和中子的元素占优势。在相邻的元素中，偶数元素的克拉克值差不多常高于奇数元素的克拉克值。从周期表头9个元素的分布量来说，偶数元素的重量克拉克值总和为86.43，而奇数克拉克值只有13.03%。

原子量能被4整除的元素其克拉克值特别大，如氧、镁、硅、钙等。某些元素的原子中占优势的同位素，其质量数字为4的倍数。原子核的这种结构费尔斯曼用 $4q$ 符号表示， $q$ 表示整数，以氧和硫同位素之间的关系为例：

$O^{16}$ ——99.76	$S^{32}$ ——95.01
$O^{17}$ ——0.04	$S^{33}$ ——0.75
$O^{18}$ ——0.20	$S^{34}$ ——4.22
	$S^{36}$ ——0.02

根据费尔斯曼的数据， $4q$ 型的核构成地壳的86.3%，分布较少些的原子核， $4q+3$ 型组成地壳的12.7%，少数原子核为 $4q+1$ 和 $4q+2$ 型，仅占1%。同样也表明，在偶数元素之中，从氮开始算起每第六个：（氧（8号）、硅（14号）、钙

---

① 俄罗斯物理-化学学会杂志，第1期，1869年，第77页。

(20号)、铁(26号)),克拉克值都最大。对于奇数元素(从氢(1号)开始,氮(7号)、铝(13号)、钾(19号)、锰(25号))有类似的规律。

总之,元素在地壳中的分布量(克拉克值),主要与原子核的结构有关,在地壳中质子和中子数不大的偶数原子核占优势。

为了弄清楚这种现象的起因,必须着手研究地球物质存在的星球阶段,那时地球物质热到几百万度。地质学家和天体物理学家认为这已经是45亿多年以前的事了(为了对比,我们不妨追溯到2—3百万年以前人类在地球上出现的时候,卡累利亚的最后一次冰川,融化于大约12000年前)。

在几百万度的高温条件下,无论是原子,还是分子都不可能存在,物质呈灼热熔浆,带有自由电子、质子、中子。这里有核反应发生——质子和中子组成化学元素的原子核。物理定律表明应尽可能的由数目不太大,同时又是偶数的质子、中子组成原子核。这种原子核是比较稳定的。“挤得过满的”质子和中子组成的原子核不稳定,易分裂为较简单的核子。铀、钍、镭和其它放射性元素都是这样的,这些元素裂变而成氦和铅。铀和钍尚存在于地壳中,而其它的放射性元素,如锝(Tc)很早就衰变完了。

现在我们才明白,为什么地壳中轻的和“偶数的”氧(8个质子和8个中子)多,而重的和“奇数的”金(79个质子和118个中子)少。

但是,即使是在轻元素中间也不全都具有很高的克拉克值。例如,铍的原子顺序号是4,而它的克拉克值只有 $3.8 \cdot 10^{-4}\%$ ,氦,尽管在宇宙里按分布占第二位(在氢后面)其克拉克值却更小。同样,锂( $3.2 \cdot 10^{-3}\%$ )、硼( $1.2 \cdot 10^{-3}\%$ )、

碳 ( $2.3 \cdot 10^{-2}$ ) 也很少。锂、铍、硼、碳的原子核在星球中心部分是核子燃料。它们易于互相作用并在核反应过程中消失。

总之，在地壳里，元素分布的基本特征早在地球物质存在于星球阶段，即在作为行星的地球发展初期阶段，就固定下来了。那时由轻元素构成的地壳已经形成，然而并不能因此而认为元素的克拉克值是一个不随地质历史时期而改变的地质常数。当然，地壳成分的主要特点没有变。35亿年以前，在岩石圈中氧和硅占优势，而金和汞那时就很少 ( $n \cdot 10^{-6} - n \cdot 10^{-7} \%$ )，但是，某些元素的克拉克值却有了变化。

放射性衰变的结果，铀和钍变少了，而衰变的最终产物铅变多了（地壳中有一部分的铅原子是由放射性成因铅构成的）。众所周知，由于放射性衰变，每年都形成几百万吨新元素。尽管其数量很大，若同地壳总的质量 ( $2.4 \cdot 10^{18}$  吨) 相比，它们还是微不足道的，但也应考虑到地质过程的长期性。假设在整个地质历史时间里核反应是等强度的，那么24亿年（从太古代中期）放射性衰变结果共形成  $2.4 \cdot 10^{15}$  吨新元素，即占地壳质量的0.01%。真实的数量可能还大一些，因为地壳发展初期阶段，其含有的放射性元素比现代还要多。

大气圈中也产生新元素。主要是在宇宙线的影响下，这就是说，大气圈的高层宇宙线的中子 ( $n$ ) 同氮进行相互作用。结果，形成碳的原子核及放射性同位素氢-氚 ( $H^3$  或  $T$ )：



在地球的条件下，氚不稳定，它经受  $\beta$ -衰变而变成质量为3 ( $He^3$ ) 的氦同位素。在12265年的时间里，氚原子衰

变成一半，假如大气圈里核反应不能连续进行，那么它便会消失。这些反应的强度总的来说是很小的，地球上的氡的含量也很少，氡的原子克拉克值在大气圈里近于  $4 \cdot 10^{-15} \%$ ，在大气降水量里约为  $3 \cdot 10^{-18} \%$ ，在海洋深部减少一百倍。

氡的克拉克值如此之小，似乎对人类没有什么意义，然而事实并非如此，氡可作为极好的自然过程速度的测定者。研究天然水中氡的含量就可以确定大气降水量是以何种速度渗入地下。例如，曾用氡测出美国一个山洞里的热水的年龄大约是九个月，也测出海洋洋面水能够很快潜入到深部。这种天然水“示踪”的氡，能使水文学、地球物理学、水文地质学的问题得到解决。地球上氡的总含量，到1954年只有12公斤。但到了1958年，由于核爆炸，氡成倍地增加了。

在宇宙线的影响下，大气圈的氮不仅能转变成氡，而且也能转变成放射性同位素碳  $C^{14}$ ，在此情况下，质子、中子都参与了核反应：



放射性碳在大气中比氡多，但也是微乎其微的，约  $2 \cdot 10^{-10} \%$ （而非放射性碳，仅参与  $CO_2$  成分的就有  $8 \cdot 10^{-3} \%$ ，即超过前者四千万倍！）。放射性碳衰变得比较快，经5600年便消耗其原子将近一半。在大气中，全部时间都在进行衰变，所以，形成原子核  $C^{14}$ ，亦因此保持着动力平衡，使  $C^{14}$  的量不变。但如果  $C^{14}$  在光合作用下进入植物，而后在植物死亡之后进入土壤的腐植土，泥炭进入用于建筑的木质，那么，在这种情况下不会发生  $C^{14}$  的核合成，其含量就会逐渐减少，在70000年之内，实际上它也不会完全消失。因此，很据发掘出的木质中  $C^{14}$  的含量可以测定古代文物或历史文物的年代（当然，如果它们的年代不超过70000年）。正是借

助于放射性碳，才确定了古埃及历史上的重要日期，也曾借此证明在 11200 年前，冰川覆盖了爱沙尼亚的地表等。在地球上  $C^{14}$  的总量达 80 吨，由于在大气中核爆炸的结果， $C^{14}$  增加了。在宇宙射线影响下，在大气圈里另一些核反应也一直在进行，并形成放射性同位素。它们的半衰期都很短（日、分）。

宇宙射线并不是地球上新元素的唯一宇宙来源。陨石也起一定的作用，其中主要是由氧、硅、镁、铁和硫组成的各种岩石，而这些元素的含量同地壳中的不一样（铁、镁、硫多些，氧和硅少些）。显然，由于石陨石的陨落，应产生地壳的“铁化”，“硫化”，“磁化”。

主要由铁和镍组成的较稀少的“铁陨石”，明显地不同于地壳的成分。

这种现象的规模如何？陨石来源对地壳的成分，对元素的克拉克值实质上影响到什么程度？科学上对此问题暂时还不能有满意的回答，因为每年陨落到地球上的陨石的总重量不清楚。地球和行星起源的理论创始者斯密特认为每年落到地球上的陨石大约有 400 吨，另一些作者把这个数字扩大了十倍。再和地壳的质量 ( $2.4 \cdot 10^{19}$  吨) 相比，数量又是微乎其微了—— $1.6 \cdot 10^{-15}\%$ 。但是，如果我们将此数字乘以 35 亿年（地球年龄），那就是  $1.4 \cdot 10^{13}$  吨，是岩石圈质量的 0.0001%。推测在过去的地质时期，特别是在太古代时期，陨石落得较多，因此，在地壳的生命中它们的作用是巨大的。

但是宇宙不仅对地球提供了化学元素，同时它也不断地取走部分元素，尤其是那些重量轻的气体如氢，氦、氖，这些气体容易克服地球引力而逸散到星际空间。有人认为氦和氖的主要质量在地球存在的初期就丢失了。地壳中氦的克拉



克值为  $3 \cdot 10^{-7}\%$ ，在大气圈中为  $7 \cdot 10^{-5}\%$ （重量百分比）。地球上，现代氦的储量几乎完全依靠铀和钍的放射性衰变。放射性成因的氦，同样也扩散到宇宙空间。按某些地球化学家的观点，当前在地球上只有  $0.001\%$  左右的氦。它是经过地质历史时期，在放射性衰变过程中形成的。

总而言之，地壳元素成分的基本特点在地质历史（35亿年）时间里没有改变，因为最古老的太古代岩石（正象最年轻的岩石一样）都是由氧、硅、铝、铁和其它常见元素组成的。然而放射性衰变，宇宙线、陨石以及轻的气体向宇宙空间的逸散，改变了很多元素的克拉克值。维尔纳茨基说：20亿年前的地壳和现代相比，在化学上是两个不同的球体。

如果我们谈的不是地壳的全体，而是谈它的一部分的话，那么在化学成分上也还可以找出比较明显的区别，而它的个别部分，如不太活动的地台同在近几亿年中多次发生造山运动，强烈的岩浆作用（喷出地表的熔岩，深部火成岩的结晶）的褶皱带就有很大不同。最近几十年曾特别详细地研究了几乎占据苏联整个欧洲部分的俄罗斯地台，研究了沉积岩石的化学成分（卡累利亚、科拉半岛、喀尔巴阡、克里米亚、乌拉尔除外）。在几亿年的时间里，俄罗斯地台上的湖泊中，河谷和浅海里进行了沉积物堆积，产生了最初的石灰岩、粘土、砂和其它沉积岩石。

著名的苏联地球化学家罗诺夫研究了这些沉积岩的成分。确立了石灰岩、粘土、和砂的平均化学组分，并证明了它在地质历史过程中是有规律地变化着。如在碳酸盐中镁的含量逐渐减少，而在粘土里则是镁和钾逐渐减少。

整个地质历史时期，岩石间的比例关系也在改变，根据罗诺夫的概念，35亿年以前，陆地上以基性成分为主的喷发

岩占优势，即为火山作用的产物，相对地富集着钙和铁。风化作用、河流的侵蚀、冲刷、海浪和其它表生作用，导致喷发岩<sup>①</sup>的破坏，并以不同的沉积物沉积于海、湖泊、河谷里，成为最初的沉积岩。可能，这些原始沉积岩曾沉陷到很深的地下，经过熔融并由之构成岩浆，慢慢地结晶成花岗岩和与其相近的岩石。因此，正如罗诺夫所推测的，大约还在20亿<sup>②</sup>年以前，在陆地上大半是沉积岩和花岗岩类，而基性喷发岩具从属意义。在此以后，多次产生了新的基性熔岩流，在深部随着岩浆的冷凝形成了花岗岩类，但现在，沉积岩在大陆的地表上占统治地位（花岗岩起的作用不大，基性喷发岩就更小了）。

---

① 喷发岩——火山岩。

② 据近年来的数据，35亿年应改为46亿年，20亿年应改为25亿年。

# 矿石和矿物的形成

元素的绝对重量取决于  
原子核，元素的分布取决于  
外层电子。

B. M. 戈尔德斯密特

在前一章里，我们已经接触到地球化学的基础总论部分，地壳中元素的分散性揭示了元素和原子核结构之间明显的联系（轻的和偶数元素占优势）。然而，地壳是行星物质高度分异的产物。在地壳中并不像在宇宙中那样，占优势的并不是氢和氦，而是氧和硅，尽管这些元素位于周期表的开头，也就是说，它们是轻元素，它们的原子核由较大数目的质子和中子组成。正如地质学家所认为的那样，地壳是在整个地质历史时间里由地幔物质中熔炼出来的。当时元素的化学性质起了作用，即它们的最外圈电子轨道的结构起了作用。可见在地壳中，元素的克拉克值既和它们的原子核结构有关，又和决定原子化学性质的电子外层的结构有关。元素的核子的性质毕竟还是起主导作用的——核的稳定性，在核中含有小数量的偶数质子和中子含量，特别是具4的倍数者起主导作用。

元素的迁移和分散性与它们原子结构的联系，在二十年代初，为卓越的挪威地球化学家戈尔德斯密特，即费尔斯曼所说的“二十世纪青年议会权威者”第一个建立起来，我们

在该章题词中所提出的原则，戈尔德斯密特称之为基本的地球化学定律。现在应该说，这个著名的定律需要做一些补充。

在冷和热的溶液中（河流、海、大洋、地下水）元素迁移属于地壳的最主要的地球化学作用。显然，易溶化合物组成的元素好象最容易迁移，而组成难溶化合物的元素则不容易迁移。然而，问题并不象初看起来那么简单，类似的“化学思维”极易导出。实际上在这些简单的规律中要引进克拉克值的极其重要的修正。

化学元素从水中沉积时，经常形成独立的天然化合物——矿物，例如，地壳中很多钙的矿物——方解石( $\text{CaCO}_3$ )和石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )，锶和钡在化学上是钙的类似物，自然界中已知有菱锶矿( $\text{SrCO}_3$ )，毒重石( $\text{BaCO}_3$ )，天青石( $\text{SrSO}_4$ )和重晶石( $\text{BaSO}_4$ )。但是，锶和钡的碳酸盐，硫酸盐的分布比方解石和石膏要少很多。

我们知道有的山脉全部都是由石灰岩组成的（如克里米亚），但没有由菱锶矿或者毒重石构成的。唯一的理由是锶和钡的克拉克值太低。在天然水中，这些元素要比钙少，很少达到水的饱和并从溶液中析出盐。有趣的是，不只是矿物的质量，对该元素而言，其矿物的数目也取决于其克拉克值。这样，广泛分布的钙（克拉克值2.96）组成397种钙类的矿物，而分布非常少的锶只有27种。与此类似，已知硅有444种矿物（克拉克值29.5），与其化学性质相似的锗只有9种矿物（克拉克值Ge—— $1.4 \cdot 10^{-4}\%$ ），铝有328种矿物，而与之相似的镓只有两种矿物等。

克拉克值非常低的元素不能形成矿物。如镭的硫化物比钙的硫化物还难溶，但石膏的镭的类似物在自然界根本不存在：镭的克拉克值非常小（约 $2 \cdot 10^{-10}\%$ ），它在水中从不饱和，

所以，不能组成自己的矿物，也不知道有铷、铯的矿物。溴、钨、铍、钼等元素只知有一种矿物。

总之，要了解自然过程必须着重考虑克拉克值的“地球化学思维”。的确，如果化学家立志在实验室获得某些物质，他拿着原来的试剂按必需的（根据化学计算得出的）比例搅拌它们。为了使反应“进行到底”，通常添加一种药品到过剩。但此种条件，在自然界常不能实现，因为克拉克值不同，某些试剂明显地稀缺，所以很多在实验室里容易实现的反应，在自然界中尚不得而知。由于这种原因，无机化合物的数目要比矿物数目大很多。例如，在实验室中可以得到 $\text{Li}_2\text{CrO}_4$ ， $\text{Rb}_2\text{CrO}_4$ ， $\text{Cs}_2\text{CrO}_4$ ，自然界中，就没有这些稀有碱金属的铬酸盐，（但 $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ——铬钾石矿的存在是因为钾的克拉克值大）。

地壳中化学元素的作用在很大程度决定于克拉克值。它影响到“迁移环境”的造成，即影响到其它元素的迁移。如果元素的克拉克值高，又能有效地迁移，即组成可溶的或者气态化合物，那么，这种元素在地壳中的作用就很大。氧就是一个很好的例子。维尔纳茨基称氧为地球表面上最强大的活动家。在地壳中游离氧的巨大作用在一定地球化学环境的名称中得到反映：地球化学家所说的氧化环境指的是有游离氧的环境。确实，在这种有游离氧的地方，很多元素可以不断地被氧化。对于某些元素来说，也就表示它们的迁移加强了，而另外一些元素的迁移就被减弱了。例如，在沼泽的地下水和深层的地下水中，常常缺乏游离氧。铁和锰处在两价键的状态，组成能溶解的化合物并容易迁移。这种水很容易涌出地球表面，与空气中的氧接触使两种金属的化合物被氧化，组成不溶解的三价铁和四价锰的矿物。在湖泊、沼泽和

土壤中，在类似的氧的地球化学栅栏中，形成了铁锰的结核体。在已往的地质时代，类似的反应导致了铁和锰矿石的形成。相反地很多两价硫的化合物，实际上是不溶解的。这样一来，金属硫化物，其中特别是硫化铁-黄铁矿 ( $\text{FeS}_2$ ) 分布最广。它的金黄色的小方晶粒，在许多煤、粘土和其它岩石中常见。辉铜矿 ( $\text{Cu}_2\text{S}$ )，黄铜矿 ( $\text{CuFeS}_2$ )，闪锌矿 ( $\text{ZnS}$ )，方铅矿 ( $\text{PbS}$ ) 和其它硫化物是众所周知的。所有这些矿物都是在没有游离氧的地壳里形成的。地表上，硫被氧化，而硫化物又转变成硫酸盐。其中有很多是易溶解的，因此，在“硫化物的氧化带”中出现可溶的铜、锌和其它金属的硫化物。于是氧化加强了金属和硫的迁移，有时破坏着整个矿床。

可见氧是真正的地球化学的独裁者，他成为某些元素在迁移途中不可逾越的障碍，也强化了另一些元素的迁移，决定着介质的地球化学特点。这些元素在地球化学中称为标型元素。属于这类的元素只有那些具高克拉克值的活泼的化学元素——氧、矽、铝、铁、钙、镁、钠、钾、硫、氯等。例如，地壳里的钠很多（克拉克值 2.50%），组成易溶盐 ( $\text{NaCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  等)，这些盐类在沙漠里由于蒸发而富集于土壤和盐湖中。在这样一些地方生长着特殊的草——冈羊栖菜，含有很多钠盐，空气中饱和盐尘。景观的所有部分都富钠。钠和氯及硫是标型元素。也就是说，它们决定着地球化学景观的特性，而钠的化学类似物（铯和铷）不是标型元素，因为他们的克拉克值很低，在土壤、水和植物中很少，假如铯的克拉克值和钠一样（2.50%），那么，我们就会发现地球内部的氯化铯矿层 ( $\text{NaCl}$  的类似物)，以及沙漠中的铯和铷湖。

知道了克拉克值，可以预先说出化学上哪些邻近的元素

是标型元素，哪些元素则不是。例如，钙是标型元素（克拉克值 2.96），镭( $2 \cdot 10^{-10}$ ) 就不是，硅是标型（29.5）元素，而锗( $1.4 \cdot 10^{-4}$ ) 就不是等。

本书作者提出了一个活动组分的原则，根据这个原则，标型元素就是决定着天然系统中的地球化学特性的化学元素，这些化学元素的克拉克值很高，在已知的天然系统中，迁移和堆积作用都很活跃。其余的元素屈从于“地球化学的”独裁者（即标型元素）所造成的条件。

由于地壳中元素的迁移而发生化学元素大幅度重新分配，它们在某些地方富集起来，而在另一些地方分散开来。浓集克拉克值（ $KK$ ）很好地表示了这种过程的概念。维尔纳茨基提出要计算它。 $KK$  就是化学元素在一个已知的天然系统中的含量与其在地壳中的克拉克值的比值。 $KK$  在矿石和矿物中特别大。

当有用元素（主要是金属）的聚集达到了从经济上值得由地下开采的价值时，即称为矿。很清楚，人类最感兴趣的是富矿和有巨大储量的矿床。汞和铋的浓集克拉克值最大，同地壳中汞和铋的克拉克值（ $4.5 \cdot 10^{-6}\%$  和  $5 \cdot 10^{-5}\%$ ）比较，矿石中汞和铋富集了千百多万倍。金、铂、钨、钼、锡、铀和其它金属的  $KK$  也是很大的。而常见元素的  $KK$  却很低。这也很容易理解，因为矿石中元素的含量不能超过 100%，这也是  $KK$  规定的极限。因此，例如铁的  $KK$  就很低，因为它的克拉克值（4.65）很大，甚至当矿石中含铁达 70% 时（非常富的矿石！） $KK$  只有 15，同理，钙、镁、钾的  $KK$  也都很小。

著名的苏联地球化学家萨伏朗诺夫计算了“造矿能量”。同时，他假定从克拉克值数量上看，由于元素的富集而形成

的矿石浓集克拉克值愈大，造矿能量也愈大。这个结论一般地说来，是与合理的思维吻合的，很明显，例如要把汞富集到 500000 倍，比把铁富集到 15 倍所耗费的能量要大的（当然，要换算成同样的原子量）。很自然，也可以推断为多数元素富集到 15 倍，少数富集到 500000 倍，自然界中的很多过程就都可以实现。事实上，大家都知道，各种不同成因的铁矿石形成于湖泊、河谷、海底及高温条件的地下深处等。经常见到的铁矿，如卡累列里的很多湖泊和沼泽以及其它西伯利亚广大的低温的森林地区的铁矿，都是以其数量不大而知名的（它们被称为“湖泊”和“沼泽”矿）。在洋底则呈铁锰结核。湖泊铁矿甚至在 18 世纪就已经开采，当时对铁的需求量是不大的。从洋底开采铁锰结核，大概是最近几十年的事情。

汞就是另一回事了！把它的原子富集到 500000 倍可不是那么容易的，在自然界里只有很少的途径来达到这种浓集。几乎所有的汞矿床都是在地球深部由热水溶液形成的。这种矿床极少见到，因此，对于人类来说，是很珍贵的。

以铁和汞为例，我们认为矿床形成方式的样数（在地质学上称为“矿床的成因类型”）取决于浓集克拉克值， $KK$  愈大“愈难”于形成矿床，一般来说，造矿的成因类型也就愈少。通过书末表中我们可以预先指出金、铂、锡在自然界里富集的方式是极有限的（矿床成因类型少），而钙、镁、钾、铁的矿床却常可遇到。

矿石里不仅是元素的含量，而且还有矿床的储量也都决定于克拉克值。再重新看看铁和汞的例子，在地质学上极据储量把矿床分为小、中、大和巨型。铁储量为几十亿吨的（ $n \cdot 10^8$ ），算是大型铁矿。对于汞来说，只要有几百吨（ $n \cdot$



10<sup>4</sup>) 就算是足够大型矿床了,即小了100000倍。在地球上还没有像铁矿那样具有几十亿吨储量的汞矿床。主要原因是因为汞的克拉克值很低,这一点是不容怀疑的(当然还有其它因素在起作用。如铁和汞的不同的化学性质,影响了他们的富集量)。现在我们才明白,为什么金矿几百吨储量就算做巨型的矿床,而这对于锡和钨却“不具有独立的工业意义”。对于铜、铅、锌来说,更谈不上铁和铝了,这样的储量根本就认为“不是工业”储量,所以地质工作者也就对之根本不感兴趣了。

许多特大型矿床的储量和一切著名矿床的总储量从许多化学元素来说,也都是众所周知的。某些隐伏矿床的储量可以近似地计算出来(这种定向算法有好几种)。知道元素在岩石矿物中的平均含量,就不难确定“岩石”和“金属矿”来源的相对作用。萨伏朗诺夫计算出了最重要的金属的定向计算和岩石圈厚度一公里的定向计算。原来,在铅矿床中金和汞这样一些金属只占它们在岩石层中的千分之几;而在铁矿中的铜、锌、钨只占岩石中的万分之几;在镍矿床中的钼和锡只占十万分之几。因此,金属在岩石中主要分散成克拉克值的数量,只有微乎其微的数量在矿床(无论是知名的,还是将要找到的矿床)中富集起来。换句话说,矿床实际上不影响克拉克值的大小。相反地在岩石中的化学元素含量高,显然影响岩石矿床的形成,因为在富集了一定的金属元素的岩石发育地区,时常可露出该种元素的矿床。这促使我们认为岩石是矿床形成的金属来源。

正如苏联地球化学家B. B谢尔滨纳所指出的,世界上大多数铅锌矿床中锌比铅占优势,但北吉尔吉斯矿床中铅却占优势。以谢尔滨纳的意见为根据,可以解释为北吉尔吉斯

以花岗岩为主,这些花岗岩中与锌通常有关的镁和铁很贫乏,而铅在这些岩石里置换长石中的钾并提高了含量。在阿尔泰矿山的岩石中的铅、锌和银以高含量为特征。那里的矿床给阿尔泰博得了声誉。

总之,我们得出一般结论——在矿床中聚集的元素的数量(它们的储量)不仅取决于该元素的化学性质,而且取决于该元素的克拉克值,也就是说既与原子核的结构有关,又和原子核的电子层有关。另一方面,我们确信,地壳本身的克拉克值不仅取决于原子核的结构,而且还决定于核的外圈电子。因为在大多数情况下,在地球分异成地壳、地幔和地核的过程中就在很大程度上决定了化学元素的迁移。

因此,地壳中元素的普遍性及其迁移,既与原子核结构有关又和原子的电子层有关,然而在元素的普遍性中,原子核的作用显得更清楚,它常具有主导意义。在这方面,包含着现代地球化学对戈尔德特斯密特定律的修正。这个定律在其最初的定义只对于整个宇宙来说是正确的。

# 天 然 系 统

在克拉克定律中还蕴藏着认识世界的巨大领域，为了使克拉克值更加准确，也为了说明在宇宙各个领域里克拉克值的情况，还有大量的研究工作要做。

A. E. 费尔斯曼

地球化学研究的不仅是地壳的平均成分，而且也研究水圈（世界大洋）、生物体、大气圈和地球的其它系统。

我们的研究是从地球表面开始的，首先是生物体，维尔纳茨基将其总和称为“生命物质”。

**生命物质** 在地球上已经知道的植物就有几十万种，动物几百万种。每一种都各有其特殊的化学成分。看来好象测定生命物质平均成分的任务实际上无法解决或者是无论如何也测不出来，比地壳元素克拉克值的测定还要复杂。不过在计算生命物质的克拉克值时，可以把动物界除外，因为和“植物质量”相比“动物质量”是微不足道的。陆地上的植物中树是主要的，所以，任务主要在于测定木质的平均成分，这样就不算是多么复杂了！

陆地上第一批生命物质的克拉克值是维尔纳茨基测定的。比较准确的数据是他的学生维诺戈拉多夫院士作出的。

“生命物质”基本上由四个元素组成：氧（70%），碳（18%），氢（10.5%）和氮（0.3%），总计构成98.8%。有

机体，其中也包括我们和你们——读者，这是第一位亲氧的生物。

所有这四个元素都能构成气态化合物。难怪维尔纳茨基谈到关于生命物质历史的主要特点时说，生命物质由气体组成，死亡后又重新变成气体（ $\text{CO}_2$ ， $\text{NH}_3$ ， $\text{N}_2$ ， $\text{H}_2\text{O}$ ——水蒸气等）。

图4 生命物质的克拉克值，水圈的克拉克值，地壳的克拉克值，上地幔的克拉克值，石陨石（下地幔？）、铁陨石（地核？）、地球整体、宇宙的克拉克值。

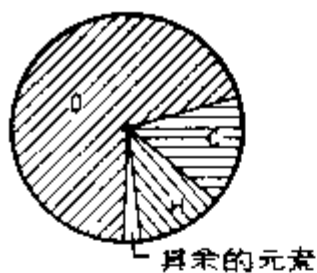
生命物质富含水，某些生物，如水母含99.7%的水，哺乳动物富含水分较少些，但在它们的机体里，水也超过60%。

其余元素（除O、H、C、N外）在生命物质中一般地讲，不超过0.5%，很多元素含量很少（微量元素）。但毕竟在生物体中几乎找到了周期表里的全部元素！如生命物质中碘的克拉克值近于 $1 \cdot 10^{-5}\%$ 、镍—— $5 \cdot 10^{-5}\%$ 、铜—— $2 \cdot 10^{-4}\%$ 等（书后附表）。

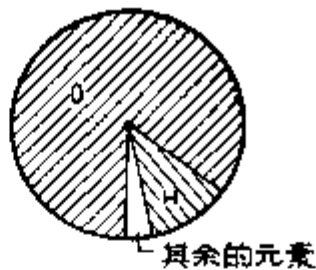
很多微量元素在生物体中完成着重要的生理功能。例如，碘是甲状腺的激素成分，铁是参与甲状腺胺酸的成分，调节着动物和人的氧化还原过程。碘少了，氧化过程就减弱，人便软弱无力、浮肿、患粘液水肿，叫粘液浮肿。碘过剩时，同样可以得重病——凸眼性甲状腺肿，得了这种病，氧化过程就过强。

经证实，钼、锌、锰、铜、硼、钒和其它微量元素对于动植物的有机体所进行的物质代谢作用有很大影响。至于象钙和磷这样一些元素能组成动物骨骼的基础，血液里含有钠和氯就不必说了。

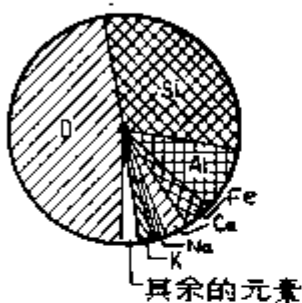
1. 生命物质



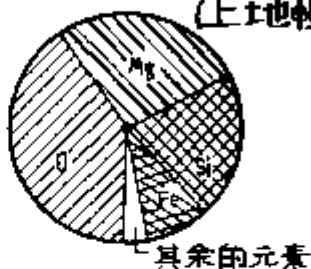
2. 水圈



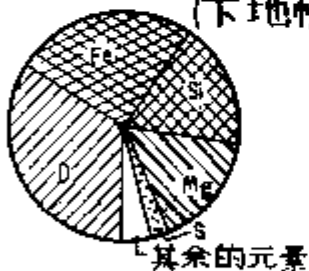
3. 岩石圈



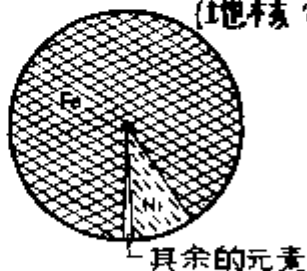
4. 超基性岩  
(上地幔)



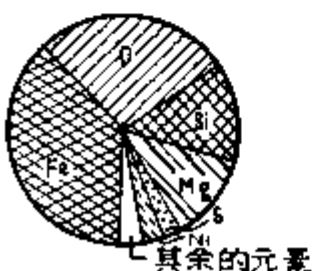
5. 石陨石  
(下地幔)



6. 铁陨石  
(地核?)



7. 地球整体



8. 宇宙

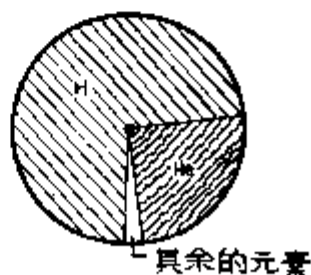


图 4 生命物质的克拉克值

不难相信，生命物质主要由地表上元素所形成的或体气易溶的化合物组成。有机体对惰性元素吸收得很差。如铝在岩石圈中的克拉克值为8.05%，根据它的普遍性来说，在氧和矽之后，是居第三位的元素，而在生命物质中却是微量元素，其克拉克值只有  $5 \cdot 10^{-3}\%$ 。

地球化学感兴趣的，不只是生命物质中元素的绝对含量，同时也对于同地壳相比的浓集克拉克值更感兴趣。生命物质里化学元素的含量与硬地壳的克拉克值之比，作者建议叫做元素的“生物亲和性”。在生物亲和性图解上，横轴表示地壳的克拉克值，而纵轴则表示生命物质的克拉克值（对数比例尺）。呈45°角的直线是等生物亲和性线。相当于生物亲和性为1的线（地壳中和生命物质中的元素含量相等），经过坐标原点。处于该线以上的元素为生命物质所富集的元素，该线以下的元素则是生物体中分散的元素。是哪些元素呢？在生命物质里富集效力最大的碳元素比它在地壳中大780倍，富集得差一点的是氮（150倍）和氢（70倍）。动植物死亡后的残骸分解，经历着复杂的变化，其中有机质部分保存下来，形成了煤层、可燃性页岩，正如大多数地质学家所认定的石油。在这些可燃性矿产中，碳、氢和氮比整个地壳里所含的都多。

大量的生物群体富集了钙，用钙盐组成了有机体的骨骼（珊瑚类，海绵动物等）。它们的残骸在地壳中组成了规模很大的各种石灰岩层（写字用的白垩、介壳石灰岩等）。

生物的残骸有些地方完全氧化成  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、硝酸盐等。铁、铜、磷和很多其它化学元素，不形成气态化合物，留在土壤、泥土中或是进入蓄水盆地。因此，不仅懂得生命物质总的成分是很重要的，而且懂得生命物质成分里的矿物组

# 生命物质

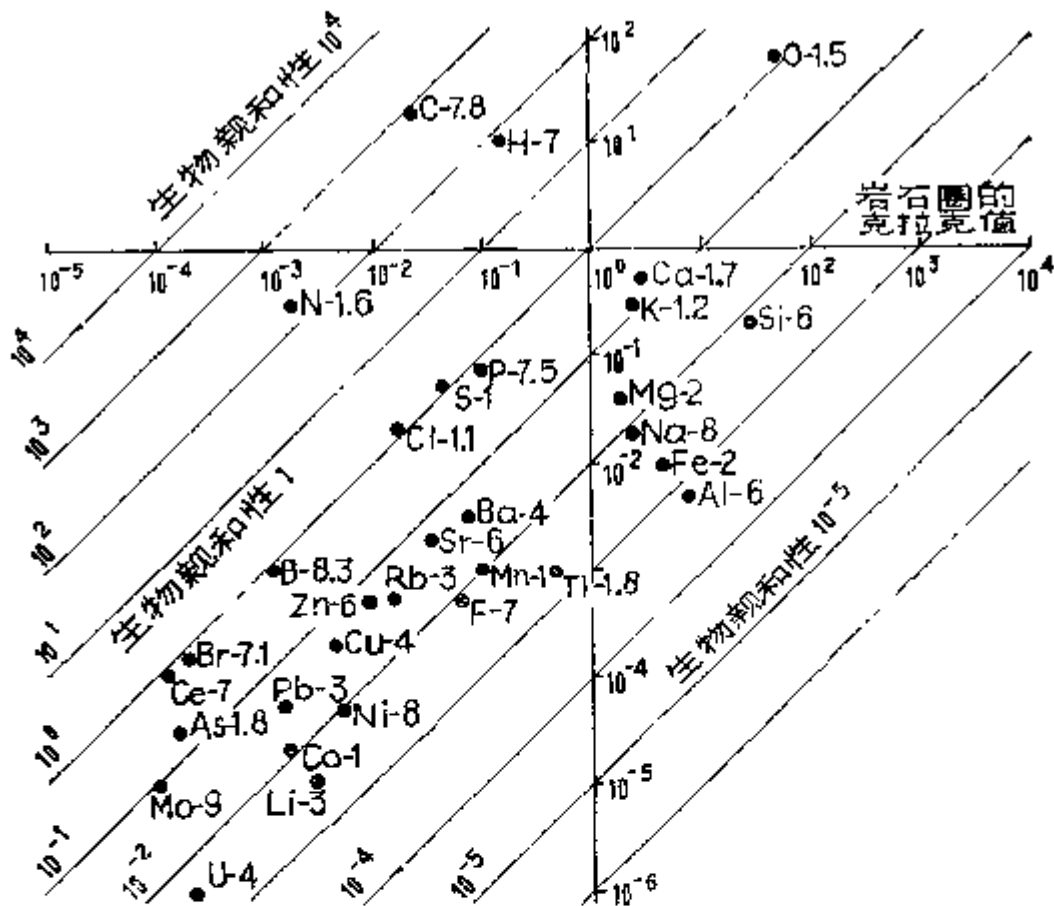


图 5 元素的生物亲和性

成部分“灰烬”也是主要的。如果在生物体的矿物质中已知元素的含量大于岩石圈中的含量，具体地说，大于在土壤、岩石中的含量，那么，在生物残骸分解后，这种元素将在周围的介质中聚集起来。例如，在植物的灰烬中，磷和硫总比土壤中的多，这些元素随着植物的死亡逐渐地富集在土壤的上层里。在某些土壤中，铜、锌、锰和其它元素以同样的机械作用有所聚集。

可见，生命物质促进了地壳中碳、氮、氢、钙、磷以及很多稀有元素的聚集。

生命物质间接作用就更大了，正像元素的精选机一样。维尔纳茨基证明，总的来说，生物是地表上最强大的作用力。然而，这一重要问题的描述超出了本书论题的界限，所以，我们也只能介绍一些有趣的文献<sup>①</sup>。

**水圈** 自然水大多都集中在世界的大洋里，其平均化学成分测得相当准确，其中氧占绝对优势，它的克拉克值是85.82，第二位是氢（10.72），第三位是氯（1.93），第四位是钠（1.03），通俗一点可以说，海水是煮过的盐（NaCl）水。但是在海水中几乎可以找到门捷列夫周期表中的一切元素，直到铀（ $3 \cdot 10^{-7}\%$ ）、金（ $4 \cdot 10^{-10}\%$ ）、镭（ $1 \cdot 10^{-14}\%$ ）等。甚至从海水里采金的设计也可以制作出来，因为地球上平均每一个居民有1.5公斤黄金都溶于海水中。然而，从海水中开采黄金是不合算的。但获得其它元素是可能的，甚至是必须的。首先是氧和氢，即水的本身，因为使用去盐器完全可以从海水里得到适于饮用的水。在我们国家里，在里海东岸已经有强大的海水淡化站在工作，供应着位于曼盖斯拉克的舍夫钦柯市极好的淡水。国外也在使用去盐器，特别是滨海的沙漠地区（如波斯湾滨海地区）。

从海水中同样也可以采到镁、钠、氯，有关提炼铀和其他元素的问题也提出来了。这些元素的储量实际上是无止境的，而提炼的技术往往比一般开采要简单（不需要建设矿井，破碎矿石以及把矿石溶解到酸、碱里等）。

地球化学家阐明了溶解在海水中的化学元素的总特点和来源，显然，大部分的金属都是由于大陆上的岩石风化后被河水带入海洋的。火山是氯、硫、砷、溴、碘、硼及其它非

---

① 维尔纳茨基，〈生物圈〉，莫斯科1967年，别列雷曼，〈生物圈的地球化学〉，莫斯科1973年。



金属元素的重要来源，火山周期性地向大气圈和水圈中喷出（水下火山）大量的氯化氢、碳酸气、氟化氢和其它气体。

**大气圈** 地球的大气圈是氮和氧的大气圈，其中含氮78%，含氧20.9%。其它气体就少得多了——惰性气体氩占第三位(0.93%)。二氧化碳气在大气圈中只有0.03%，其它惰性气体——氮、氦、氪及氙就更少了。在大气圈中只有痕迹量的氢(0.00005%)、沼气和它的气体。有趣的是，“地球组”的全部行星(水星、金星、地球、火星等)只有地球具有氮-氧的大气圈。苏联和美国星际站完成的分析（金星、火星等）业已确定金星和火星的大气圈是二氧化碳统治着。在那里几乎没有游离氧。几十亿年前地球的大气圈也没有氧，基本上由二氧化碳气组成。地球上某些最古老的岩石成分表明了这一点。

大约25亿年前，地球上出现了绿色植物，在光合作用下，从大气圈中吸收 $\text{CO}_2$ ，并向周围环境放出游离氧（就是在当前，植物也还是这样做的，这是尽人皆知的，室内植物在光照下，“清洁着空气”——从空气里吸收 $\text{CO}_2$ ，使空气里充满了氧），很多藻类和动物也从大气圈中摄取二氧化碳，用来制造它们的骨架。由介壳、珊瑚的残骸及其它含有碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )动物的骨骼等形成的整个山脉证实了这一点。因此，廿亿年来，植物和动物实际上已净化了大气圈中的二氧化碳（现在二氧化碳只有0.03%）并放出氧。维尔纳茨基写道：地球的气体外壳，我们呼吸的空气是生命的创造者。二氧化碳不能完全被吸收，因为在自然界中有相反的过程存在。由于有这个过程，二氧化碳才能再进入大气圈。这就是生物的呼吸，火山的喷发（有些学者认为，地球上没有火山作用，生命就不可能延续）。

虽然氦在宇宙里按其存在量占第二位，但是地球大气圈里的氦是非常少的（0.00052%），在地球上，氦克拉克值很低的原因是地球太小，而氦的惰性又不善于进入化学的化合物。地球引力太小，不能束缚住氦，它在几十亿年前就从原始的大气圈中消失了。“次生的氦”替代了原生的氦，由于“行星的氦呼吸”而进入大气圈。在铀和钍的放射性衰变过程中形成了氦，部分地从岩石中渗透到大气圈中（沿地壳的断裂和裂隙）。该放射性成因的氦同样也逐渐地扩散到宇宙空间。假如没有连续进行的放射性衰变补充它的储量，地球上的氦将全部消失殆尽。

太阳的体积比地球大得无法比。太阳的引力也大得多，所以，太阳保存着氦。还记得，该元素是在1868年用光谱分析太阳时首次被发现的。而后来到了1895年才在地球上发现。因此，把氦称为“太阳神”，即希腊文太阳。

氩和氦一样，属于惰性气体族，它在地球的大气圈中非常多，几乎为1%。氩的克拉克值这样高是和钾的特点有关。钾是由三个同位素组成的，其中 $K^{40}$ 具有放射性，大部分转变为 $Ca^{40}$ ，而少部分变成 $Ar^{40}$ 的核。这种氩，由岩石进入大气圈，因为氩重于氦和氖，不能很快地跑到宇宙空间去，而积聚在大气圈里。

人类的生产活动也改变着大气圈的克拉克值。每年发电站的生火，各种发动机以及火炉的燃烧，包括煤、石油、可燃性气体含有几十亿吨的碳，从大气圈里吸收大量的氧。与此体戚相关的人类不会受到缺氧的威胁吗？经过几个几十年，大气圈中氧的含量不会明显地降低吗？人们不就窒息了吗？这种担心是没有什么根据的，因为即便是把地球上全部工业用煤、石油和可燃性气体的储量都烧光，大气圈里氧的实

际含量也不会有变化。除此之外，我们的绿色朋友——植物每日每时都在工作，向大气圈放出氧。人们灌溉草原和沙漠也增强了这一过程。

对于大气圈中二氧化碳含量的增长的担心，其理由倒是更充分一些。人类对可燃性的矿物的燃烧，就使大气圈里的二氧化碳大量地增多了。某些科学家推测，这就导致所谓“蒸溜效应”，即气候变暖，在前景中威胁着极区冰的融化，以致提高世界大洋的海平面。淹没居民稠密的滨海低地。然而在这方面也还有许多事情不清楚，因为生产活动的其它方面，如大气圈里尘埃量的增加导致气候向冷的方向发展。因此，某些科学家认为威胁着我们的不是气候变热，而是新冰期的到来。他们现在仍在努力研究这些复杂而又重要的问题。可以不必担心，人类有足够的手段可以避免全球性大灾难的发生。这是科学幻想作品的作者有时喜欢描写的。

**地幔** 比地壳更深的是地幔，这是一个神秘层，人类暂时对它还认识不清楚。根据地球物理方面的资料，地幔厚度有2870公里，平均密度为4.5克/厘米<sup>3</sup>，假定，有关地幔成分是所谓超基性岩。在地表上一些地方可以找到这种岩石（如在乌拉尔）。超基性的岩浆沿着深的断裂侵入到地壳中，冷凝后，产出原生的橄榄岩，辉石岩和其它火成岩。这是一种很重的暗色岩石，明显区别于地壳上那些典型的火成岩——花岗岩和玄武岩。作为地壳的上地幔，由氧和硅的含量都很低的硅酸盐物质组成，富含铁、镁、镍、铬、钴、铂含量高。地壳中象铝、钙、钠、钾这样一些有代表性的元素，在超基性岩中含量比较少。把它们的克拉克值整理如下<sup>①</sup>：

---

① 克拉克值制定得显然不准确，因为元素的克拉克值超过了100%。<sup>41</sup>是超基性岩含有其余的79种元素。

氧——42.5	铝——1.45
镁——25.9	钠——0.57
硅——19.0	铬——0.20
铁——9.85	镍——0.20
钙——0.7	锰——0.15

---

100.52

多数地质学家认为，地壳是地幔中较轻的元素经过复杂的熔融过程构成的。

根据元素成分，常把下地幔与石陨石相比，在落到地球上的所有类型的陨石中间，石陨石占很大优势。在这些陨石中分布最广的是下列元素：

氧——35	铝——1.30
铁——25	钙——1.40
硅——18	镍——1.35
镁——14	钠——0.7
硫——2.0	铬——0.25
	锰——0.20

---

99.2%

正如我们看到的，下地幔和地壳根本不相同，虽然地幔物质也是以氧占优势为特征，但是铁在这里居第二位，只有硅居第三位。镁、镍和硫的高克拉克值很引人注意。钙和铝比较少（书后附表）。

**地核** 关于半径等于3471公里的地核成分只能根据间接资料来判断。已知地球的平均密度为5.52克/厘米<sup>3</sup>，而岩石圈的岩石密度比它低将近两倍（2.8克/厘米<sup>3</sup>）。因此，地球中心部分有很大的密度（估计为10.7克/厘米<sup>3</sup>）。

以铁、镍成分密度很大为其特色的所谓铁陨石与之相类

似，曾提出地球铁、镍核心的概念。铁陨石很可能是某种小行星的碎块。

戈尔德斯密特于1922年深入研究了“地球的灼热模式”假说，根据这种假说，认为地球最初处于熔融状态。（反映了康德-拉普拉斯宇宙论的影响）。戈尔德斯密特把地球的物质分异和矿石在冶炼炉里炼铜时的物质分布进行了比较。如所周知，在炼铜的时候，炉底上沉淀下来比重大约为7的重的熔融金属，其表面上浮现着轻的硅酸盐熔渣（类似于硅质地壳）。其间分布着“冰铜”层，一种具有其它金属硫化物杂质的铁的硫化物（类似于地幔）。这种美好的理论现在仍未丧失其意义，虽然下地幔硫化物占统治地位的推测与硫化成分的陨石的稀有性是很矛盾的。

**地球整体** 关于地球构造（地壳、地幔、地核）的地球物理资料，关于地球平均密度的报导，关于地震波通过的速度，以及有关陨石成分的资料使我们有可能计算整个地球的克拉克值。根据美国地球化学家梅松最近的计算，地球主要由六种元素组成，其中铁占优势（35.39%），氧占第二位（27.79），镁占第三位（17.0），前三位元素之和达80%。其次是硅（12.64）、硫（2.74）和镍（2.70）。其余元素克拉克值之和不超过2%。钙、铝、钠、钴相当于0.4%。铬、磷、钾、钛和锰只有0.04%。总之，我们生活在铁的星球上！

**月球** 对于月球的研究工作已经进入到这样的阶段，我们已经能够谈论月球——地球的卫星的原子历史了。借助于各种仪器在月球表面上完成的软着陆（月球16、20，“阿波罗11、12”等），把月球上的岩石采回到地球上来，获得了非常有价值的报导。大部分采样都和地球上的玄武岩相类似。在月球上，不存在花岗岩外壳，当然也没有沉积岩，因为月球上没

有大气圈和水圈。很多采样都有高含量的钛（达10%TiO<sub>2</sub>）。月球表面有一层细粒的土——被称为表皮岩屑，是物理风化和其它作用的结果。宇宙线到达月球表面，并在表皮岩屑中实现核反应。这样，在表皮岩屑里可找到同位素氦（He<sup>3</sup>），氖（Ne<sup>20</sup>）、钠（Na<sup>22</sup>）、铝（Al<sup>26</sup>）。

月球没有磁场，可以推断也没有金属的月核。总之，同地球相比较，月球是分异作用极小的天体，月亮不同于地壳，其区别是不存在生物圈以及派生的花岗岩外壳。

**金星** 这个行星有致密的大气圈，远在1761年，罗蒙诺索夫就发现了这个大气圈。苏联和美国的自动星际站确定，靠近金星表面的温度达425℃，几十个大气压。金星的“空气”主要由二氧化碳组成（超过90%），其中含有水蒸气、氮（不大于2%）和氧的痕迹（不大于0.1%）。

**宇宙** 德国学者本杰恩和吉勒赫沃福100多年以前（1859年）发明的光谱分析法，使确定星（也包括离我们最近的星——太阳）的化学成分成为可能。业以阐明原子在太阳表面温度为6000℃左右时，可以存在，甚至连某些分子及O<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>、OH、CH、MgF、CN、SrF根等也都能存在。

最近几年在太阳大气圈的光谱中确定的元素达69个。其中氢和氦占绝对优势。太阳大气圈的克拉克值采用原子数的对数来表示。令氢的对数等于12。根据元素分布，前11种元素已经获得以下数值（根据杜卡里诺夫《普通地球化学》）：

lgN

氢——12.0	氧——8.96
氦——11.3	二氧化碳——8.72
氮——7.98	铁——6.57
氖——7.8	钠——6.3

镁——7.4

钙——6.15

铝——6.2

有趣的是，太阳的大气圈里有很少的锂，铍、硼原子，锂的  $\lg N = 0.96$ ，铍的  $\lg N = 2.36$ ，这些元素的不足与他们的核燃烧作用有关。

现代物理学关于高温、高压<sup>①</sup>条件下物质状态的概念对于了解宇宙化学有很大意义。这里的温度是用绝对温度零度或称“凯里耶维度”(K)零度来测量，摄氏温度表为 $-273^{\circ}$ 。

如果观察密度不大的物质状态的变化，温度在几千度时，分子的热分解就开始了，并形成由单个原子所组成的气体。在 $10^4^{\circ}\text{K}$ 时，便发生离子化，在 $10^6^{\circ}\text{K}$ 时，物质处于等离子状态，即只能由离子和电子组成。

把等离子区温度提高到 $10^7^{\circ}\text{K}$ ，产生完全离子化，即系统由“赤裸裸的”原子核和电子组成。在 $10^8^{\circ}\text{K}$ 时，开始了核的转变，温度高于 $10^8^{\circ}\text{K}$ 时，原子核开始膨大，而在 $10^{11^{\circ}}\text{K}$ 时，物质由质子和电子组成。在更高的温度下，在高于 $10^{13^{\circ}}\text{K}$ 时，元素粒子彼此间可能会普遍地互相转化。

理论物理学有可能预言物质在高压而温度相对不太高的条件下的性质。这样，在把物质压缩到 $10^8$ 大气压时，就会发生原子的电子外层形变，电子愈来愈少地依附于单个原子，使物质“金属化”的性质消失，使性质的多样化减少。气压达 $10^{12}$ 时，电子与原子的相互作用实际上停止，并产生“退化的”电子气体，气体密度很大。当密度再大时，核反应就开始了，电子被核子捕获。当密度为 $10^{11}$ 克/厘米<sup>3</sup>左右，而大气压为 $10^{24}$ 时，中子开始比电子占优势，把密度再增高一个

---

① 伊万诺夫，现代物理学原理，莫斯科《科学》杂志，1973年。

级序，便导致混有质子和电子杂质的中子弹气体。该种气体可能具有 $10^{14}$ 克/厘米<sup>3</sup>的密度，即相当于核物质的密度。

在星球的中心部分，高温与高压相结合，决定着物质状态的特别形式，这样，在太阳的中心区域温度波动于 $10^7$ °K左右，压力达到 $10^{11}$ 大气压。在这种条件下，物质由赤裸裸的原子核和自由电子组成，也就是组成完全离子化了的等离子区。在巨星的中心，温度达到 $10^8$ °K。总之，星球以物质的电子-核子状态为特征。具有核子物质密度的中子状态在理论上是可能的。推断不久前发现的脉动（强大的脉动辐射线源）就属于这种中子星球。

在星球的中心部分在高温、高压条件下，发生原子核的合成，即进行核反应。认为靠“烧毁”氢核而产生氦核，并且在此反应中有碳核和氮核加入。在类似的“白杰循环”（白杰——提出该循环的美国物理学家的名字）合成4克氦放出6.9亿千卡能量。这个反应可能是太阳能源之一。

假定重元素的核子是由俘获中子而产生，苏联学者杜卡里诺夫指出宇宙中导致原子核形成的某些过程。

1. 由氢合成氦核（白杰循环）。
2. 由氦（ $\alpha$ -粒子）合成碳核（ $C^{12}$ ）、氧（ $O^{16}$ ），氖（ $Ne^{20}$ ）。
3. 当氦核（ $\alpha$ -粒子）被氧核（ $O^{16}$ ）和氖（ $Ne^{20}$ ）俘获时，硅核（ $Si^{28}$ ）、硫（ $S^{32}$ ）、氩（ $Ar^{40}$ ）、钙（ $Ca^{40}$ ）的合成。
4. 慢中子的原子核俘获，这种“S—过程”导致重原子核到包括铋核（ $Bi^{209}$ ）的形成。
5. 导致镅核（ $Cf^{254}$ ）形成的快中子俘获（称为 $\gamma$ —过程）。后一过程大概是在“超新星”闪光时发生，因为从发生闪光到熄灭要经过60天，这又恰是镅（ $Cf^{254}$ ）的半衰期。

因此，在化学方面，星球是一种相当简单的系统：对于



所能研究的宇宙部分，主要由氢-氦组成。宇宙化学显示出单调，而且可能比地球化学还要简单。英国气象物理学家艾金格顿的预言应验了，他在二十世纪初曾经写道：弄清星球的成分比弄清围绕在我们周围的地球上所发生的各种作用要更容易些。

**各种不同的自然系统** 星球内部的高温决定其物质能动地混合（对流）成为比较单一的成分。地球的深部壳、地幔、地核的成分也都可能非常单一。苏联物理化学家卡布斯金斯基推测，地核里由于巨大的压力破坏了原子的电子结构，失去它们的化学特性——所有的元素都具有同一的性能（物质由所有的原子核都处于电子等离子区的原子核组成）。显然，类似物质的状态决定着地核的单一性，使化学元素之间的差别消失。这是“零化学亲和力”地带。

根据卡布斯金斯基的概念，在强大的压力影响下，地幔里改变着原子的化学性质，因为电子转入未填满的内部轨道，这是“产生化学亲和力”的地带（虽然有硅的成分，物质已近于金属状态）。由此看来，元素所相应的周期位置的化学性质，只能在地壳中出现，即在“正常的化学亲和力地带”出现。但是，在地壳较深处，一部分也可能比地表更单一一些。深部火成岩类型的数目比较小。当元素从中深部位（一般距离地表不超过5公里）热水中沉淀时，构成了各式各样成分的硫化物、硅化物及其它矿脉。在这个深处生成铜矿、铅矿、汞矿、金-银矿和其它金属热液矿床。

但是，在地表上见到的形式是最多的。在生物圈里发生着非常明显的物质分异作用，原子能动地迁移。这种外生表面迁移的结果形成大量岩石，其成分和它们的祖先——花岗岩有明显的不同（例如，以氧、钙和镁为主的碳酸盐岩；由

钠和氯构成的盐岩；以及石油和煤等)。生命物质千奇百怪，动物和植物有数百万种，每一种都是一个特殊的化学体。

因此，地球表面的自然界是形形色色的，又是很复杂的。地表上，由于太阳能源源不绝以及生命物质的变换，造成化学元素的迁移和分解。几千年来，在地球表面还可以见到人类各种各样的活动，从地球化学观点上看这些活动是原子迁移的一种独特类型——工艺成因类型。

# 人类与克拉克值

自然界使我们想到，农作物和工业必须以地壳中最常见的元素为基础。

A. E. 费尔斯曼

现代文明是以大量利用矿物元素、海水和空气中的部分元素（氮、氢）为基础的。开采量增长很快。如果二十世纪二十年代末，每年从矿石中炼出的铁是八千万吨左右的话，那么，到了60年代末炼出的铁已经是三亿吨了；

增长的不仅是开采量，有用元素的种类也增加了；古代利用的元素只有十八种，到十八世纪以前能利用的元素已增加到28种，十九世纪增加到62种，1915年以前增到71种。在现代，人类利用着自然界中一切已知的化学元素，在核反应堆里却得到了地球上不存在的金属（钷等）。这些元素的数量大不相同。如果开采的碳（煤、石油、天然气）超过了三十亿吨，而铁是三亿吨，那么，铜就只有五百万吨，汞只有九千吨，铂总共只有三十吨。相差一亿倍！应该指出其原因在于需求的不同——煤是燃料，需要量大，铂是贵金属，使用也有限，是否人类需要多少化学元素就可以开采多少呢？是否一种需要多些，而另一种需要得少呢？以黄金为例最容易证明这种概念是错误的。各国都力图拥有尽量多的贵金属，而实际的开采量反映出来的恰恰是可能性问题，绝

不是需求问题，需要是无止境的。对于许多其他元素也可以这么说。那么，元素的开采量是否取决于一个国家的地质研究水平和投入矿产普查勘探上的手段呢？地质工作发展水平也同样不能解释很多问题。显然，并非技术发展上有多少手段还没有用在地质工作上去。黄金和铂的开采什么时候也不可能达到煤和铁的水平。有点什么其它的问题吧！读者已经猜到了，这都是咱们的一些老熟人克拉克值们的罪过哩。

的确，如果一种元素在地壳里是稀少的，那么，这种元素的矿床储量也不会大，矿床的数量也必然有限。显然，人类不可能不重视自然界的这条规律。

为了把这个问题研究清楚，我们建议用化学元素单位克拉克值来表示，即用已知元素在地壳里的克拉克值来除它在世界上每年的开采量，所得的数叫数化学元素的工业亲和性（ $T$ ）。现在让我们来研究两个同源的金属——锰和铁吧。在周期表里，铁和锰是两个相邻的元素（第25号和第26号），在技术上都属于“黑色金属”，开采的铁是 $3.1 \cdot 10^8$ 吨，而开采的锰是 $6 \cdot 10^6$ 吨。但是要知道，铁的克拉克值（4.65）比锰的克拉克值（0.1）大得多。如果我们计算一下这两种金属的工业亲和性就会得到两个很有趣的数：

$$\text{铁的工业亲和性} = \frac{3.1 \cdot 10^8}{4.65} = 6.6 \cdot 10^7$$

$$\text{锰的工业亲和性} = \frac{6 \cdot 10^6}{0.1} = 6 \cdot 10^7$$

可见，人类以克拉克值为单位，从地下提取等强度的铁和锰，即同这两种金属在地壳里的分布量成比例。它们的工业亲和性是一样的！当然，这里说的不应该是有意意识的这么处理的，关于这一点，经济学家大体是这样看的：“开采铁和

锰吧，但是要与它们的克拉克值成比例。”无疑，天然形成的黑色金属的开采量，其大小依赖于经济条件和技术条件的进步，以及矿床的发现。我们可以看出，因素是很多的，归根到底，人类开采铁和锰，要同它们的克拉克值成比例。

让我们以周期表中的铜和银这两个相邻的元素为例，铜的克拉克值是 $4.7 \cdot 10^{-3}\%$ ，银的克拉克值只有 $7 \cdot 10^{-6}\%$ 。每年世界采铜量是 $5.4 \cdot 10^6$ 吨，银是8000吨，但它们的工业亲和性也是一样的：

$$\text{铜} = \frac{5.4 \cdot 10^6}{4.7 \cdot 10^{-3}} = 1.1 \cdot 10^9$$

$$\text{银} = \frac{8 \cdot 10^3}{7 \cdot 10^{-6}} = 1.1 \cdot 10^9$$

图6所标的是大多数元素的工业亲和性。制作这幅图的基本原则对于生物亲和性也是同样适用的。正如我们所看到的，许多化学元素-类似物都有不同的克拉克值和不同的开采规模。它们的工业亲和性相同或者相近。例如，镉和汞、钽和铌、铀和钼、钛和锆等。但也有的是不同的：氯和氟、钙、钾和钠等。

决定工业亲和性的原因各不相同，我们也不完全清楚。在这一点上，经常不得不局限于假说。但是，工业亲和性数量的本身是毋庸置疑的，因为这些数值是从实验和互相独立的资料基础上得来的，是根据地球化学家关于地壳克拉克值的报导以及经济学家关于每年世界元素开采量的计算得来的。

从图6可以看出，碳是最能工业亲和的元素，其工业亲和是 $8 \cdot 10^{10}$ （煤）和 $3 \cdot 10^{10}$ （石油），总和为 $1.1 \cdot 10^{11}$ 。煤和石油主要用作能源，化学工业应用的数量不大。因而，碳的量大大

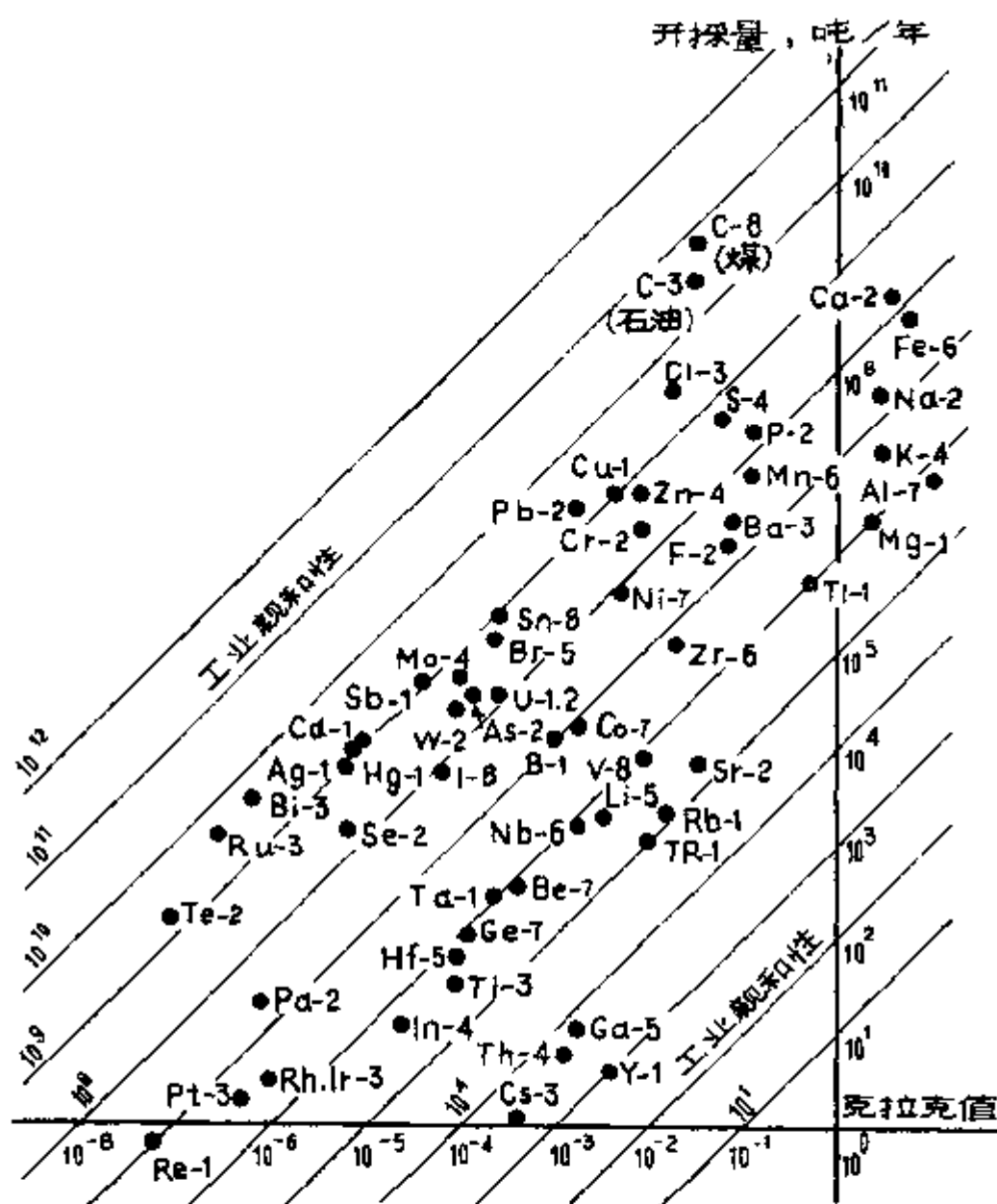


图 6 元素的工业亲和性

的工业亲和，反映出能源对文明是极其重要的。不言而喻，人们为了利用物质和加工制造，首先就需要得到能源，需要保证优先发展动力技术。

铼、铱、铯、钽工业亲和性最小。这些元素工业亲和性很低，大概是一种暂时的现象，人类不需要多少年就会利用

它们象利用其它有相似克拉克值的元素一样了。

因此，人们在其日常生产活动中不得不重视克拉克值。

可以推断，在将来，开采量对克拉克值的依赖关系会越来越密切。现代化学元素的主要来源是这些元素有用组分高度富集的矿床。但是，富矿很快就会采完，将来大概会像沙乌科夫所推测的那样，人类转而开采花岗岩，玄武岩和其它岩石，这些岩石里元素的含量与克拉克值相近。

但是，人类社会不仅仅是消极被动地屈从于克拉克定律，人类的活动不断地改变着周围环境的化学成分，因而，也影响着地壳各个系统的克拉克值。最近几十年来，在新的科学技术革命（HTP）时期，这种情况特别明显。

原子能的掌握同核反应堆中核燃料铀同位素 $U^{235}$ 的消失有关。在这方面，人好象是加速了自然过程，用较快的人造铀核裂变替代了缓慢的放射性衰变。在这一过程中，同位素比值产生了变化，因为一直要进行到 $U^{238}$ 数量不改变为止。但是，这种同位素很快就会被应用到原子发电站上，而它的含量将会进一步降低。可见，人类的活动正象自发的自然过程一样，都朝着缩小铀克拉克值的方向进行，而且在人类社会里，这个过程比自然界进行得更快。

当然，铀的克拉克值变化不很大，因为铀的主要储量也象其它金属一样并非都集中在矿床里，而是在岩石里。

今后不只是利用铀作为核燃料，也还要用钍。那时钍的克拉克值也将开始减少。最后，掌握热核能使氘的储量削减。非放射性同位素氢的质量数为2，而且氢的同位素之比（ $H^1:H^2$ ）也在发生变化。

在人造的核反应过程中，核爆炸时，构成了以前在自然界中没有过的非放射性元素的放射性同位素。其中最著称的

是放射性同位素锶— $\text{Sr}^{90}$ 。它迁移的效力很大，并且污染土壤、水、植物和动物。在人的机体里 $\text{Sr}^{90}$ 集中在骨骼中，造成放射性病灶，引起癌症。 $\text{Sr}^{90}$ 的半衰期为27.7年，并且对周围环境的污染达数十年之久（如果原子试验在大气圈中或者在地面上进行的话）。

放射性 $\text{Sr}^{90}$ 在国民经济中是有用的，如作为原子电池的能源，在医学中应用于治疗肿瘤等。

除了锶之外，在核反应中还能形成放射性同位素铯、碘和其它化学元素（总共约有200多个）。当然，它们的数量很少，实际上并不影响克拉克值的大小。但由于它们都是高放射性的，所以这些同位素在人类生活中的作用非常大。对于我们来说，问题的基本方面是人类已开始生产出地球上以前还没有过的同位素。

以上我们已经了解了元素的工业亲和性，显然，越是工业亲和的元素，在地表系统的土壤、河流、湖、大洋就越有效地进行它的堆积。汞属于这种元素，其工业亲和性等于 $1 \cdot 10^9$ ，象铜、铋、镉、银同样也都很高，但汞的较高的工业亲和性有特殊意义。

问题在于汞是很重的金属，它位于周期表末尾（80号）。而一切类似汞的元素对于有机体，包括对人都是有剧毒的。汞的克拉克值，正象我们所知道的一样，是很低的，总共只有 $4.5 \cdot 10^{-6}\%$ ，在地球表面，汞在自然过程中是不富集的。因此，生物有机体在周围环境中低浓度汞的条件下，存在了几十亿年，没有使这种元素的数量增高。与此同时，在自然界中，含汞浓度很高的系统还是存在的，这就是汞矿床，位于地下深部。这里的汞绝大部分都是美丽的红色矿物，即呈硫化物——辰砂（ $\text{HgS}$ ）形式而存在。



几千年以前，人类便开始开采汞矿床，从那时起，被提取到地面上的汞一年比一年多。当然，汞的这种技术开发对其在土壤或有机体内克拉克值的影响总的来说并不大。但在个别地段观察到汞的浓度相当高。例如，在工厂和工厂附近，在这些工厂里的工艺流程中由于使用汞制品并向污水里排出部分汞，其结果使周围环境被汞污染。汞聚集在土壤、植物和水中，再从这些地方进入人的机体。在这种地区，人们的严重汞中毒，动植物死亡的情况是大家都知道的。例如，靠近加里福尼亚海滨，由于向海里丢弃含汞的废渣，引起榕属海藻的大量死亡。同时，在有海藻死亡的每一公升海水里仅仅含汞0.00005克，含铜0.0001克。汞对海藻的影响总共只有四天。人们知道，“工业成因”的汞严重中毒的人，患一种病叫做“制帽匠癲狂症”，因为，中世纪制作细毡帽时，在制作过程中使用汞制剂的工匠患的就是这种病。现在，这些早已被人们遗忘了的病症又在欧洲的一些国家以及日本重新发现了。在日本的三绳市甚至有19个婴儿成了先天性汞中毒的牺牲者。

周期表中与汞相邻的镉也是有巨毒的，它的克拉克值 $1.3 \cdot 10^{-5}\%$ ，只比汞高一点，工业上使用的镉和含这些元素的废流，能污染周围的环境。类似的“镉中毒”见于日本的富山地区，这里有上千名居民患重病，有119人死亡。这种病从前没有见过。这是一种新的“工艺中毒病”。

总之，人们从地下提取的这些元素中间，有一些有巨毒，由于这个原因，出现了我们周围环境被污染的大问题。含有有毒元素的土壤、水和食物可能达到危险的极限，并引起中毒。然而，类似的情况并不是文明发展不可避免的后果。这都是由于资本主义国家无止境地追求利润而忽视人民

大众利益的缘故。

勿庸争辩，现代科学技术革命对人与自然环境互相作用提出了大量的复杂的问题。污染是二十世纪最严重的生态学的大问题。过分地无监督地利用放射性物质和化学毒剂、城市的激增等引起大气的污染，引起大地和水利资源的污染。为了拯救自然、拯救与自然界有密切关系的人类，放慢文明的发展，为某些外国研究者和哲学家所确认。但这个观点是没有基础的。必须把生态学的问题看作是和社会因素以及社会发展的最主要过程有密切关系。在社会主义制度的条件下，科学技术的进步能成功地解决我们周围自然环境保护的任务。

总之，人类从地下提取元素的活动导致地表土壤、水、大气、有机体化学成分的改变。具备高的工业亲和性的元素的积累，虽然暂时没有从实质上影响克拉克值，但在个别地段元素的富集可以达到很大规模。对健康有害的元素的聚集尤应引起注意。

人类在缓慢而不停顿地改变着自己居住环境的化学成分，人类应该知道这些现象的范围，准备克服和预防不良后果。要尽一切可能去了解各种有害现象的原因，还要善于预先防止这些有害现象的发生并与之作斗争。

#### 参考文献（从略）

化学元素在各种自然系统中的平均含量

化学元素	酸性岩 (花岗岩圈)	基性岩 (玄武岩圈)	沉积岩 (粘土和页岩)	水圈	生命物质	地壳(23 酸性的和 1.3基性的)	超基性岩 (上地幔)	石陨石	整个地球	太阳宇宙 ( $Q = 1 \cdot 10^{-6}$ )
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H					10.5					$2.6 \cdot 10^{10}$
He										$2.1 \cdot 10^3$
Li	$4 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$		45
Be	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-11}$		$3.8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$		0.69
B	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$4.6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$		6.2
C	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	1.0	—	18.0	$2.3 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$		1.35-10
N	$2 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-2}$	—	$3 \cdot 10^{-1}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$		$2.44 \cdot 10^6$
O	48.7	43.5	52.8	—	70.0	47.0	42.5	35.0	27.79	$2.36 \cdot 10^7$
F	$8 \cdot 10^{-2}$	$3.7 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$6.6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$		3610
Ne										$2.36 \cdot 10^5$
Na	2.77	1.97	0.66	1.03534	$2 \cdot 10^{-2}$	2.50	$5.7 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-1}$	0.14	$6.32 \cdot 10^4$
Mg	0.56	4.5	1.34	0.1297	$4 \cdot 10^{-2}$	1.87	25.9	1.10	17.00	$1.05 \cdot 10^8$
Al	7.7	8.76	10.45	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	8.05	0.45	1.30	0.44	$8.51 \cdot 10^4$
Si	32.3	24.0	23.8	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-1}$	29.5	19.0	18.0	12.64	$10^6$
P	$7 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-1}$	$7.7 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$9.3 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	0.03	$1.27 \cdot 10^4$
S	$4 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-1}$	0.089	$5 \cdot 10^{-2}$	$4.7 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	2.0	2.74	$5.06 \cdot 10^5$
Cl	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	1.93534	$2 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$		1970

续表

化学元素	酸性岩 (花岗岩圈)	基性岩 (玄武岩圈)	沉积岩(粘 土和页岩)	水圈	生命物质	地壳(23 酸性的和 1.3基性的)	超基性岩 (上地幔)	石墨片	整个地球	太阳宇宙 ( $\Omega = 1 \cdot 10^{-6}$ )
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ar										$2.28 \cdot 10^5$
K	3.34	$8.3 \cdot 10^{-1}$	2.28	0.03875	$3 \cdot 10^{-1}$	2.50	$3 \cdot 10^{-2}$	$8.5 \cdot 10^{-2}$	0.07	3240
Ca	1.58	6.72	2.53	0.0408	$5 \cdot 10^{-1}$	2.98	0.7	1.40	0.61	$7.36 \cdot 10^4$
Sc	$3 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$		$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$		33
Ti	0.23	0.9	0.45	$1 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-4}$	0.45	$3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	0.04	2300
V	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$11 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$		900
Cr	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$11 \cdot 10^{-4}$	$8.3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$2.5 \cdot 10^{-1}$	0.01	$1.24 \cdot 10^4$
Mn	$6 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$6.7 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	0.09	8800
Fe	2.7	8.56	3.33	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-2}$	4.65	9.85	25.0	35.39	$8.9 \cdot 10^3$
Co	$5 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	0.20	2300
Ni	$8 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$9.5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5.8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-1}$	1.35	2.70	$4.57 \cdot 10^4$
Cu	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$5.7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4.7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$		919
Zn	$6 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$8.3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$		1500
Ga	$2 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	—	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$		
Ge	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$		
As	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$6.6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$		
Se	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$		

续表

化学元素	酸性岩 (花岗岩圈)	基性岩 (玄武岩圈)	沉积岩 (粘土和页岩)	水 圈	生命物质	地壳 (23 酸性的和 1.3基性的)	超基性岩 (上地幔)	太阳系 地球	整个 地球	太阳系 ( $\Omega = 1 \cdot 10^{-8}$ )
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Br	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$6.6 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$		
Rb	$2 \cdot 10^{-2}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$		
Sr	$3 \cdot 10^{-2}$	$4.4 \cdot 10^{-2}$	$4.5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$		
Y	$3.4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$	—	$8 \cdot 10^{-5}$		
Zr	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	—	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$		
Nb	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	—	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$		
Mo	$1 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$		
Ru				未知				$1 \cdot 10^{-4}$		
Rh				未知				$1.5 \cdot 10^{-6}$		
Pd	$1 \cdot 10^{-6}$	$1.9 \cdot 10^{-6}$	—	未知		$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$		
Ag	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$		$7 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$9.4 \cdot 10^{-6}$		
Cd	$1 \cdot 10^{-5}$	$1.9 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	—	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$		
In	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$2.2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$(1 \cdot 10^{-6})$		$2.5 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$		
Sn	$3 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$(5 \cdot 10^{-6})$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$		
Sb	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$		$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$		
Te	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$			$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$		
I	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$		$4 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$		

续表

化学元素	酸性岩 (花岗岩圈)	基性岩 (玄武岩圈)	沉积岩(粘土和页岩)	水圈	生命物质	地壳(23 酸性的和 1,3基性的)	超基性岩 (上地幔)	陨石	整个地球	太阳宇宙 ( $Q = 1 \cdot 10^{-6}$ )
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cs	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$		
Ba	$8.3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6.5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	—	—
La	$6 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2.9 \cdot 10^{-10}$	—	$2.9 \cdot 10^{-3}$	—	$3 \cdot 10^{-4}$	—	—
Ce	$1 \cdot 10^{-2}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-10}$	—	$7 \cdot 10^{-3}$	—	$5 \cdot 10^{-5}$	—	—
Pr	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-11}$	—	$9 \cdot 10^{-4}$	—	$1 \cdot 10^{-5}$	—	—
Nd	$4.6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-11}$	—	$3.7 \cdot 10^{-3}$	—	$6 \cdot 10^{-5}$	—	—
Sm	$9 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$6.5 \cdot 10^{-4}$	$4.2 \cdot 10^{-12}$	—	$8 \cdot 10^{-4}$	—	$2 \cdot 10^{-5}$	—	—
Eu	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-10}$	—	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-6}$		
Gd	$9 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$6.5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-11}$	—	$8 \cdot 10^{-4}$	—	$4 \cdot 10^{-5}$		
Tb	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$	未知	—	$4.3 \cdot 10^{-4}$	—	$5 \cdot 10^{-6}$		
Dy	$6.7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$7.3 \cdot 10^{-11}$	—	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$		
Ho	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-11}$	—	$1.7 \cdot 10^{-4}$	—	$7 \cdot 10^{-6}$		
Er	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-11}$	—	$3.3 \cdot 10^{-4}$	—	$2 \cdot 10^{-5}$		
Tm	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-11}$	—	$2.7 \cdot 10^{-5}$	—	$4 \cdot 10^{-6}$		
Yb	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-11}$	—	$3.3 \cdot 10^{-5}$	—	$2 \cdot 10^{-5}$		
Lu	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-11}$	—	$8 \cdot 10^{-5}$	—	$3.5 \cdot 10^{-6}$		
Hf	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	未知	—	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$		

续表

化学元素	酸性岩 (花岗岩圈)	基性岩 (玄武岩圈)	沉积岩(粘土和页岩)	水圈	生命物质	地壳(23 酸性的和 1.3基性的)	超基性岩 (上地幔)	石陨石	整个地球	太阳宇宙 ( $\Omega = 1 \cdot 10^{-9}$ )
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ta	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-6}$	未知	—	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$		
W	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	—	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$		
Re	$6.7 \cdot 10^{-8}$	$7.1 \cdot 10^{-8}$	—	未知	—	$7 \cdot 10^{-8}$	—	$8 \cdot 10^{-8}$		
Os				未知				$5 \cdot 10^{-6}$		
Ir	$6.3 \cdot 10^{-7}$			未知		—		$4.8 \cdot 10^{-5}$		
Pt	—	$1 \cdot 10^{-6}$	—	未知		—	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$		
Au	$4.5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-10}$	—	$4.3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1.7 \cdot 10^{-5}$		
Hg	$8 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$10 \cdot 10^{-7}$	$8.3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$		
Tl	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-8}$		$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$		
Pb	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$		
Bi	$1 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-8}$	—	$9 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$		
Rn				$6 \cdot 10^{-20}$						
Th	$1.8 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-9}$		$1.3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-6}$		
Ra				$1 \cdot 10^{-14}$	$10 \cdot 10^{-12}$					
U	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$< 10^{-9}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$		
Pa				$5 \cdot 10^{-15}$						
Ac				$2 \cdot 10^{-20}$						