第 45卷 第 1 期　　地 质 学 报　　Vol. 45, No. 1
1965 年 2 月　　ACTA GEOLOGICA SINICA　　Feb., 1965

論化学元素在地壳及其基本构造单元中的丰度*

黎 彤　饒紀龙

化学元素在地壳物質中的分布，是地球化学的基本研究內容之一。地壳物質的分布，无論沿水平方向或垂直方向都极不均匀。組成地壳物質的化学元素，其分布同样具有极大的不均匀性。地壳的元素丰度，是指化学元素在地壳中的相对平均含量。又称地壳的克拉克值。它可用統計方法求得。

地球化学最早开始研究的一个重要課題，就是計算地壳的元素丰度和研究地壳元素丰度的規律性。自从十九世紀以来，国外許多学者，著名的如克拉克(F. W. Clark)、戈尔德施密特(V. M. Goldschmidt)、費尔斯曼 (A. E. Ферсман)、以及維諾格拉多夫 (A. П. Виноградов)等，都相継根据各自的观点和方法，利用当时已积累起来的大量实际資料，来从事这个問題的研究。他們求出过地壳元素丰度的各种計算值，揭露过地壳元素丰度的某些規律性，并进而探索了和地壳发展历史有关的若干地球化学問題。他們的研究成果，不但为地球化学沿定量的方向发展奠定了基础，而且，为其他自然科学，如宇宙化学、地球物理学、地質学、原子物理学和无机化学等有关理論問題的解决，在不同方面和不同程度上提供了科学依据。对寻找和利用自然界中的化学元素及其他化合物方面，也起了指导作用。

但是，由于問題本身的复杂性，加上科学技术发展水平的限制，尽管許多学者經过了近一百年的努力，付出了巨大的劳动，問題至今仍远未达到完善解决的地步。

这里，我們試图針对过去存在的問題，利用近十年来有关地壳模式和岩石化学成分的最新資料，采用一种新的計算方法，来重算地壳的元素丰度值。至于地壳元素丰度規律性方面的問題，由于篇幅所限，将結合地壳的同位素丰度資料另文討論。

本文初稿及修訂稿曾先后蒙侯德封、涂光熾、司幼东、郭承基等先生审閱，謹志謝忱。

一、存在的問題

綜观国外已有的地壳元素丰度計算值，明显地存在着下列几个主要問題：

1. 地壳的概念不統一　有的計算者(如克拉克、費尔斯曼等)所指的地壳，包含了岩石圈、水圈和大气圈[3,10]。有的計算者(如維諾格拉多夫)所指的地壳，则仅限于岩石圈[9]。但是，按照地壳的定义，地壳是地球的固态外壳，它的垂直空間范围只限于从地表深达莫氏分界面。它的面积为 510×10^6 平方公里，体积为 8×10^9 立方公里，質量为 24×10^{18}

* 本文的初稿曾在全国矿物、岩石、地球化学第一次学术会议上(1963 年)宣读过，并汇編在«中国科学技术大学建校五周年纪念科学论文集»(1963 年)內。本文对初稿作了较大的补充和修改，初稿中个别丰度数据也作了改正。

吨。并不包括水圈和大气圈[1]。

2. 岩石圈的計算深度是人为选择的　所有計算者对岩石圈的計算深度，都承認克拉克的創議，不分地区地一律取 10 哩，卽 16 公里。但是，由于地表高低不平，莫氏分界面的深度各处不一。地壳上不同地段的岩石厚度变化很大。大洋盆地的地壳厚度，最薄时只有 5—6 公里；而褶皺带的地壳厚度，最厚时可达 60—70 公里，而整个地壳的平均厚度是 17 公里。

3. 海洋地壳的物质成分被忽略不計　历来計算者都只依据陆地地壳的物質成分来計算整个地壳的元素丰度，而未将海洋地壳的物質成分計算在內。但是，海洋面积占地球面积的 70.8%，海洋地壳的質量占整个地壳質量的 37.1%。同时，海洋地壳具有显然不同于陆地地壳的物質成分，在大洋盆地往往缺失硅-鋁层。

4. 地壳物質成分随深度变化的因素未被考虑　历来計算者都根据地表物質成分的平均值，向深部推断 16 公里。但是，現代地球物理探測和岩石学研究資料都証实，从地表到莫氏分界面，地壳物質成分从酸性过渡到基性；而地球化学資料証明，不同酸度的岩石，其元素平均含量不同。

以上存在的問題，說明以往学者計算地壳元素丰度时，他們所計算的空間范围，并不符合地壳的眞实范围，他們所采用的岩石化学資料，也并不全面地代表整个地壳的化学成分。因此，他們計算出来的所謂地壳元素丰度或岩石圈元素丰度值，不足以全面反映眞实地壳的元素丰度。

問題的原因何在呢？

莫氏分界面是在 1909 年才发現的。因此，早期的計算者（如克拉克）不可能对地壳的天然下限具有現代的概念。克拉克在 1889—1924 年間多次发表的《地壳的平均化学成分》中，曾假設岩石圈的平均計算厚度为 10 哩（卽 16 公里），也假設过 20 哩（卽 32 公里）。他最后采用 10 哩的出发点，只是因为世界上最高山脉的海拔高度和最深海洋的深度之和，接近于 10 哩。克拉克算出，岩石圈中火成岩占 95%，沉积岩占 5%。而火成岩的平均化学成分，是綜合各大陆和島屿上采来的 5,159 个岩石化学資料，用算术平均法求得的。至于 5% 的沉积岩中，頁岩占 4%，砂岩占 0.75% 和灰岩占 0.25% 的数值，是在“所有沉积岩都来自火成岩”这样一个假定前提下求出来的，而这种假定又直接来自罗森布什（K. G. K. Rosenbusch）的观念。罗森布什曾提出：火成岩是原生的，它們来自地球的深处；而沉积岩和变質岩是次生的，它們归根結蒂来自火成岩。克拉克認为，岩石圈的平均化学成分，实質上就是火成岩的化学成分。由此可知，克拉克求得的岩石圈的平均化学成分，实际上只反映了陆地上火成岩的平均化学成分。

罗森布什的观念也为后来的戈尔德施密特和維諾格拉多夫所接受。他們采用同样的观念和更为簡单的方法，获得与克拉克相同的結果。

戈尔德施密特認为，岩石圈的平均化学成分，可以用一种天然的平均样品来求出。他曾用挪威南部古老变質岩（其平均化学成分与花崗閃长岩相当）区內，由冰层融解水沉积出来的 77 个壚坶样品的平均化学成分，求得同克拉克的計算值十分近似的結果[4,5]。

1）在地质学和地理学中，对地壳的涵义所作的规定，也往往随学者而异。

同样，維諾格拉多夫認为，沉积岩（指粘土和頁岩）的平均化学成分，就是地壳的平均化学成分；只要取两份花崗岩和一份玄武岩混合起来的平均化学成分，就可以求得地壳的平均化学成分。因为这种混合起来的平均化学成分，等于沉积岩的平均化学成分。于是他在求出主要岩石类型平均元素含量之后，就用两份酸性岩加一份基性岩的簡单方法，来求得地壳（相当于16公里深度范围內的岩石圈）的元素丰度[9]。

自克拉克以来，許多学者都試图寻找一条計算地壳元素丰度的捷径。但是，由于在观念上和方法上都过于簡单化，脫离了基本的地質事实和大量有关地壳的各种实际資料，特别是地球物理学和海洋学方面的資料。結果，未能全面地揭露地壳元素丰度的眞实面貌。

二、解决問題的途径

針对上面提出的問題，要改进地壳元素丰度的計算工作，首先必須肯定計算的空間范围，严格地限制在从地表深达莫氏分界面的固态层壳之內。其次，必須全面考慮地壳各构造单元在面积上和岩石厚度上的差异，以及地壳岩石沿水平方向和垂直方向上的变化。第三，必須对不同的岩石类型，采取具有足够代表性的平均化学成分資料。这种資料，应包括全部在自然界产出的化学元素。

要滿足上述三点要求，就必須广泛地运用現有的大地測量学、地球物理学、地質学、海洋学、岩石学，以及地球化学等理論知識和大量的实际資料。很显然，对地壳的构造单元分得越細，对海洋盆地和地壳深部物質分布了解得越淸楚，对化学元素在各种不同岩石內的含量測定得越全面越精确，求得的地壳元素丰度将会更接近于眞实。

但是，在目前的条件下，要完全滿足上述理想的要求还有很大的距离。現在，还缺乏地壳深部的鉆探資料[1)]，地壳深部的物質成分及其变化状況，还只能依据地震測量、重力測量、岩石試驗，以及地質学原理等来推断；深海取样还受到很大的限制；陆地上也还有不少地方調查研究得不够；各种岩石的元素平均含量，尤其是微量元素的平均含量，目前还在不断地进行补充修正，甚至还有个別的元素，至今还测不准，得不到可靠的資料。所有这些，都在不同程度上，給全面計算地壳元素丰度的工作带来了困难。

尽管如此，近十年来的科学研究成就，終究还是創造了一些条件，使进一步改善地壳元素丰度的計算工作有可能得以实現。其中最重要的条件之一，就是波德瓦尔特（A. Poldervaart）在1955年研究地壳的化学时，首次根据大量有关地壳的实际資料，綜合設計出一个經过簡化了的地壳模式。虽然这个地壳模式是簡化了的，甚至对陆地地壳深部的物質成分还带有某种程度的推断性質，但是，設計的原則和結果，却都和現有的地質学和地球物理学知識基本上相吻合[6]。

另一个重要条件，就是1961年杜力基安（K. K. Turekian）和維德普耳（K. H. Wedepohl）发表了“火成岩”、沉积岩和深海沉积物的各主要岩石类型的元素平均含量資料[8]。紧接着，維諾格拉多夫在1962年，重新发表了岩浆岩各主要岩石类型和沉积岩（以粘土和頁岩为代表）的元素平均含量資料[9]。

1）研究地壳深部的鉆探工作，目前国外有苏联、美国等正在进行。

正是由于具备了这些条件，才使我們有可能着手来拟定一个計算地壳元素丰度的新方案，試图解决上述存在的問題。在这个方案里，我們一方面綜合运用了上述最新資料，另方面，从区域地球化学的观点出发，拟定出一种綜合計算方法，这种計算方法可称它为“分区和分岩类綜合計算法”，或区域地球化学計算法。

所謂分区計算法，就是将整个地壳划分为陆地地壳和海洋地壳两个大单元。陆地地壳又分为地盾区、褶皺区和火山島屿。褶皺区是指古生代以来的造山带。海洋地壳又分为深洋区和浅洋区。浅洋区包括大陆斜坡和陆棚。計算地壳元素丰度时，首先綜合算出每一个区的元素丰度，然后采用質量加权平均法求出海洋地壳，陆地地壳以至整个地壳的元素丰度。用分区法計算地壳元素丰度的优点，是旣充分包括了广大海洋地壳的物質成分，又可以反映不同基本大地构造单元的元素分布特点，便于研究区域地球化学时，进行区域性的浓度克拉克値計算。

分岩类計算法，被采用来計算每一个区內的元素丰度。在各区內，地壳的厚度不同，各种岩类垂直分布的厚度也不同。按照不同岩类的体积比値或質量比値（以百分数表示），并取各种岩类的代表成分，就可采用加权平均法来求出全区的元素丰度。用分岩类計算法的优点，是旣充分反映出地壳物質成分随深度的变化，又可以綜合求出地壳內各种岩类——結晶岩类（以岩浆岩为代表）和沉积岩类（包括海洋沉积物）的元素平均含量，便于进一步研究地壳物質成分在迁移过程中的地球化学平衡問題。

由于采用的地壳模式本身对地壳的涵义严格限制在从地表深达莫氏分界面的空間范围內，这就无需人为地选择岩石圈的計算深度。也不必将水圈和大气圈的成分，加进地壳元素丰度內。

采用这种区域地球化学計算法来計算地壳的元素丰度，要求事先計算出地壳各构造单元的元素丰度。随着区域地球化学的发展，将进一步改进地壳元素丰度的計算工作。

三、計算的結果

我們一共計算了 74 种化学元素在地壳及其基本构造单元中的丰度。在自然界产出的元素中，只有 H、惰性气体、鉑族元素的 Ru、Rh、Os 和 Ir，以及放射性元素族的 Ra、Ac 和 Pa 等元素，由于化学資料所限，目前还不能算出它們的丰度。

計算程序是先求出各区和各大单元的元素丰度，再求整个地壳的元素丰度，最后用結晶岩和沉积岩的元素平均含量来驗証。

正如上面指出过的，由于目前各种条件的限制，本文提供的地壳及其基本构造单元的元素丰度計算値，只能看成是在現有的知識水平下，較为接近眞实的一种近似値。有些元素的丰度数据，还有待今后进一步补充和修訂。

（一）陆地地壳的元素丰度

陆地包括高出海面的地盾区、褶皺区和火山島屿。它們的面积和地壳厚度如下頁表。

陆地的全部面积为 149×10^6 平方公里，占地球总面积的 29.2%。陆地平均高出海面 0.875 公里，其莫氏分界面的平均深度位于海面下 35.6 公里。陆地地壳的平均厚度为 36.5 公里。

	面积（$\times 10^6$ 平方公里）	平均海拔高度（公里）	莫氏分界面的平均深度（海面下，公里）	地壳厚度（公里）
地盾区	105	0.75	35	35.75
褶皺区	42	1.25	37	38.25
火山岛屿	2	0.5	14	14.5

在陆地地壳內，各区岩石垂直分布的厚度如下：

	地盾区（公里）	褶皺区（公里）	火山岛屿（公里）	密度（克/立方厘米）
沉积岩（包括少量火山岩）	0.5	3	—	2.7
酸性岩	22	24.5	—	2.75
中性岩	2.75	2.75	4	2.85
基性岩	10.5	8	10.5	3.0
合计	35.75	38.25	14.5	

陆地地壳的平均密度取 2.8 克/立方厘米，其質量为 15.1×10^{18} 吨，占地壳总質量的 62.9%。其中地盾区占 43.8%，褶皺区占 18.8%。火山島屿占 0.3%。

地盾区和褶皺区的沉积盖层的質量百分数（%）如下：

	页岩	砂岩	灰岩	安山岩	流纹岩	合计
地盾区	41	43	16	—	—	100
褶皺区	52	18	22	6	2	100

取上述岩石的元素平均含量，通过各岩类的質量加权平均計算，求得陆地地壳及其各区的元素丰度如表 1 的 c、d 和 f 栏。为了計算方便，将火山島屿并入褶皺区內。

（二）海洋地壳的元素丰度

海洋地壳包括深洋区和浅洋区。它們的面积和地壳厚度如下：

	面积（$\times 10^6$ 平方公里）	平均深度（海面下，公里）	莫氏分界面的平均深度（海面下，公里）	地壳厚度（公里）
深洋区	268	4.5	10.85	6.35
浅洋区	93	1.75	17.75	16

海洋的全部面积为 361×10^6 平方公里，占地球总面积的 70.8%。海洋的平均深度为 3.8 公里。海洋地壳的莫氏分界面，其平均深度位于海面下 12.3 公里。海洋地壳的平均厚度为 8.5 公里。

在海洋地壳內，各区岩石垂直分布的厚度如下：

	深洋区（公里）	浅洋区（公里）	密度（克/立方厘米）
沉积岩（或沉积物）	0.6	5	2.7
中性岩	—	4	2.85
基性岩	5.75	7	3.0
合计	6.35	16	

海洋地壳的平均密度取 2.9 克/立方厘米，其質量为 8.9×10^{18} 吨，占地壳总質量的 37.1%。其中深洋区占 20.3%，浅洋区占 16.8%。

深洋沉积物包括鈣質軟泥、紅泥和硅質軟泥等。浅洋区的沉积物包括陆源泥、珊瑚泥和火山泥等。为了簡化計算起見，深洋区的沉积物取碳酸盐(72%)和粘土(28%)的成分为代表。浅洋区的沉积岩和沉积物則取頁岩(74%)、砂岩(4%)和灰岩(22%)的成分为代表。这样，通过各岩类的質量加权平均計算，求得海洋地壳及其各区的元素丰度如表 1 的 *a*、*b* 和 *e* 栏。

(三) 整个地壳的元素丰度

整个地壳內結晶岩石的总重量为 22.3×10^{18} 吨。 其中：酸性岩 9.1×10^{18} 吨（占 40.9%)，中性岩 2.3×10^{18} 吨(占 10.2%)，基性岩 10.9×10^{18} 吨(占 48.9%)。基性岩和酸性岩的質量比値为 1.2:1。这恰好和維諾格拉多夫所取的比値相反，即不是酸性岩比基性岩多一倍，而是基性岩比酸性岩多 20%[9]。

整个地壳內的沉积物和沉积岩的总質量为 1.7×10^{18} 吨（已扣除其中水分的重量)。其中：深海沉积物 0.22×10^{18} 吨(占 12.9%)，沉积岩 1.48×10^{18} 吨(占 87.1%)。地壳內結晶岩和沉积岩(包括深海沉积物)的質量比値为 13.1:1，即沉积岩占 7.1%。这比克拉克所取的百分数(5%)多 2.1%。

整个地壳的元素丰度可以根据陆地地壳和海洋地壳的元素丰度、或根据地壳內結晶岩和沉积岩的元素平均含量，用質量加权平均法求得。全部計算結果列于表 1 內。

表 1 內的丰度値以克/吨为单位，据此可求得任一元素在地壳及其各构造单元內的总質量或总重量。

最后，为了便于考察每种元素在地壳各构造单元內的变化特征，根据表 1 的数値，取 Si 元素的原子数等于 10^6，以此为基数求得各种元素的原子数列于表 2。将 Si 以外的任一元素以“克/吨”为单位的丰度(W_m)，換算成以“原子数/10^6Si 原子”为单位的丰度(An)时，采用如下的公式：

$$An = K\frac{W_m}{A} = \frac{28.086 \times 10^6}{W_{m(\mathrm{Si})}} \times \frac{W_m}{A}$$

式中 K 为換算系数，$W_{m(\mathrm{Si})}$ 是 Si 元素以“克/吨”为单位的丰度(例如，地壳內 Si = 270000 克/吨)，A 是換算元素的原子量(根据 1961 年国际原子量新标准)，28.086 是 Si 元素的原子量。

四、問題的討論

(一) 元素的分布特征問題

表 1 和表 2 內列出的各种丰度値，是根据現阶段地壳的岩石分布及其化学成分計算出来的。 这些数値只反映了化学元素在地壳及其基本构造单元中的現状分布。 这种分布，是地壳发展过程中元素經历过多次迁移、分布、再迁移、再分布的結果。

在地壳內，导至元素迁移的自然作用主要是地質作用和生物作用。随着地壳历史的发展，岩浆分异作用、沉积分异作用、生物分异作用一个連接一个地加大了元素分布的不均匀性。

地壳各构造单元遭受的自然作用不同，或者遭受自然作用的广度和深度不同，因而产生了各构造单元之間的元素丰度差异。如果原始地壳主要是由玄武岩質岩石組成的話，那么深洋区的元素丰度大体上代表了这种原始地壳的元素丰度。陆地地壳是在原始地壳的基础上发展起来的。在发展过程中，岩浆分异作用起了最重要的作用。因此，Si、K 和 Na 的相对增多，Mg、Ca 和 Fe 的相对減少，是陆地地壳元素分布的重要特征。同时，按絕对重量計算，有 81% 的鈾和 72% 的希土元素富集在陆地地壳內。

浅洋区和深浅区之間的元素丰度差异較大。这种差异，同陆地地壳和海洋地壳之間的元素丰度差异基本相仿，只是差异程度較小。这就从元素丰度上反映出这样一个地質事实，即陆棚和大陆斜坡只是大陆和大洋盆地之間的一个过渡地区。

地盾区和褶皺区之間的元素丰度差异較小，許多元素在这两区內的丰度都很接近。比較起来，地盾区的 Mg、Al 和 Fe 略为偏高，而 Li、K 和 U 等略为偏低，B 和 S 低得多些。在地盾区內丰度偏低的元素，多是富集在沉积岩中的元素。这些元素早在古生代以前就随沉积岩的风化、搬运而发生了迁移。古生代以来，沉积分异作用对地盾区內元素現状分布的影响是比較微弱的。

有許多元素的区域分布，表現了規律性的变化；从深洋区、浅洋区、地盾区到褶皺区这一方向上，許多元素如 Mg、P、Ca、Mn、Ti、V、Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Mo、Pd、Ag、Pt 等元素的丰度递減。而另外有許多元素如 Be、K、Rb、Cs、Ce、Hf、Pb、Th、U 和大部分希土元素等的丰度則递增。这种空間分布上的規律性变化，与从大洋盆地到陆地，基性岩成分依次減少和酸性岩成分依次增多有关。

地壳的元素丰度基本上取决于結晶岩的元素平均含量。对比表 2 中的 g′ 和 h′ 栏內的数据得知，两者具有完全相同或几乎相同的原子数。只有 B、C、S、Cl 等元素在地壳內的丰度，受沉积岩成分的影响較大。

沉积岩的元素平均含量和結晶岩有很大的差异。在沉积岩中，除了 Na、Mg、Al、鉄族元素以及少数几种元素外，其余大部分元素的平均含量都高于結晶岩。其中，按原子数計算时，C 高 250 倍，Cl 高 40 倍，B 高 14 倍。高一倍到十倍的元素有 Li、Be、S、Ca、Mo、Sn、I、Cs、La、W、Re、Hg、Pb、Th、U 等元素。这是地表經历过多次沉积分异作用、火山作用和生物作用的結果。沉积岩中 Na 的平均含量显著降低（約 50%），与 Na 富集在海水中有关。因此，沉积岩的平均化学成分并不与岩浆岩相当。

如何利用地壳內不同构造单元和不同岩类的元素分布特征，来再造地壳的化学演化历史，以及探索元素在地壳、水圈、大气圈和生物圈之間的地球化学旋迴和地球化学平衡，这是一个値得今后专門研究的問題。

（二）常量元素的修正問題

近十年来，許多国外学者都認为，地壳元素丰度的計算問題，主要是补充修訂微量元素丰度的問題，并在这方面进行了許多工作。对于常量元素的地壳丰度，則認为不会再有多大的改变。現在看来，这种看法未必与事实相符。

下面的对比数据証明，最常被人引用的維諾格拉多夫（1962）和戈尔德施密特（1954）的所謂地壳元素丰度，只相当于陆地地壳的元素丰度，而不是整个地壳的丰度。

表1　地壳的元素丰度（单位：克/吨）

原子序数	元素	深洋区 a	浅洋区 b	地盾区 c	褶皱区 d	海洋地壳 e	陆地地壳 f	地壳 g	结晶岩 h	沉积岩 i
3	Li	15	27	21	23	20	22	21	19	45
4	Be	0.43	1.3	1.5	1.6	0.83	1.5	1.3	1.2	2.1
5	B	9.5	27	8.9	13	17	10	13	7.6	81
6	C	2900	8600	600	2500	5500	1200	2800	190	37000
7	N	18	15	19	18	17	19	18	19	4.7
8	O	440000	460000	460000	470000	450000	460000	460000	460000	500000
9	F	390	470	470	480	420	470	450	440	630
11	Na	20000	19000	25000	25000	20000	25000	23000	25000	9400
12	Mg	43000	33000	22000	19000	39000	21000	28000	28000	20000
13	Al	85000	82000	84000	82000	84000	83000	83000	86000	56000
14	Si	230000	240000	290000	290000	230000	290000	270000	270000	210000
15	P	1400	1300	1200	1100	1400	1200	1200	1200	600
16	S	340	730	310	380	520	330	400	290	1900
17	Cl	990	94	100	110	580	100	280	88	2900
19	K	8300	15000	20000	21000	11000	20000	17000	16000	19000
20	Ca	75000	66000	41000	41000	71000	41000	52000	48000	100000
21	Sc	23	15	18	15	19	17	18	18	9.0
22	Ti	8700	7400	5500	5000	8100	5300	6400	6600	3200
23	V	190	150	120	110	170	120	140	140	90
24	Cr	190	130	81	68	160	77	110	110	63
25	Mn	2000	1500	1100	930	1800	1000	1300	1300	1100
26	Fe	83000	66000	49000	44000	75000	48000	58000	60000	33000
27	Co	44	28	19	16	37	18	25	26	15
28	Ni	160	110	64	53	140	61	89	90	56
29	Cu	100	67	52	46	85	50	63	65	40
30	Zn	130	100	83	77	120	81	94	95	72
31	Ga	18	18	18	17	18	18	18	18	15
32	Ge	1.4	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.2
33	As	2.1	4.2	1.4	2.3	3.0	1.7	2.2	1.6	8.6
34	Se	0.056	0.16	0.054	0.071	0.1	0.059	0.075	0.049	0.4
35	Br	6.0	3.7	4	4.1	5.0	4.0	4.4	3.8	12
37	Rb	44	76	89	93	58	90	78	77	95
38	Sr	490	520	470	460	500	470	480	480	410
39	Y	22	16	27	28	19	27	24	24	32
40	Zr	98	150	140	140	120	140	130	130	130
41	Nb	19	17	20	19	18	20	19	20	7.7
42	Mo	1.7	1.4	1.1	1.1	1.5	1.1	1.3	1.2	2.9
46	Pd	0.018	0.009	0.009	0.0073	0.014	0.0084	0.01	0.011	0.0035
47	Ag	0.098	0.082	0.067	0.062	0.091	0.065	0.075	0.077	0.065
48	Cd	0.19	0.12	0.15	0.14	0.16	0.15	0.15	0.16	0.21
49	In	0.21	0.17	0.11	0.097	0.19	0.11	0.14	0.14	0.082
50	Sn	1.5	2.3	1.5	1.7	1.9	1.6	1.7	1.5	3.9
51	Sb	0.97	0.84	0.46	0.43	0.91	0.45	0.62	0.59	1.0
52	Te	0.00095	0.0008	0.00038	0.00031	0.00088	0.00036	0.00055	0.00059	0.00005
53	I	0.48	0.82	0.48	0.58	0.63	0.51	0.56	0.47	1.7
55	Cs	1.0	1.5	1.5	1.7	1.2	1.6	1.4	1.3	3.4
56	Ba	320	430	400	390	370	400	390	390	460
57	La	28	39	38	40	33	39	39	35	64
58	Ce	9.8	31	55	61	19	57	43	42	60
59	Pr	4.3	4.8	6.4	6.6	4.5	6.5	5.7	5.7	5.8
60	Nd	21	22	28	29	21	28	26	26	24
62	Sm	5.4	5.6	7.5	7.7	5.5	7.6	6.7	6.7	6.6
63	Eu	1.0	1.0	1.2	1.3	1.0	1.2	1.2	1.2	1.0
64	Gd	5.4	5.6	7.5	7.7	5.5	7.6	6.7	6.7	6.6
65	Tb	0.85	1.0	1.2	1.2	0.92	1.2	1.1	1.1	1.0
66	Dy	2.3	3.3	4.9	5.1	2.8	5.0	4.1	4.1	4.7
67	Ho	1.1	0.78	1.5	1.6	1.1	1.5	1.4	1.4	1.3
68	Er	2.1	2.2	3.0	3.0	2.1	3.0	2.7	2.7	2.6
69	Tm	0.21	0.22	0.29	0.27	0.21	0.28	0.25	0.25	0.2
~~70~~	~~Yb~~	~~2.1~~	~~2.2~~	~~3.0~~	~~3.0~~	~~2.1~~	~~3.0~~	~~2.7~~	~~2.7~~	~~2.7~~
71	Lu	0.64	0.67	0.92	0.94	0.65	0.93	0.82	0.83	0.76
72	Hf	1.0	1.1	1.8	1.9	1.0	1.8	1.5	1.5	2.2
73	Ta	0.47	0.38	2.3	2.4	0.43	2.3	1.6	1.8	0.53
74	W	1.0	0.87	1.2	1.2	0.94	1.2	1.1	1.1	1.6
75	Re	0.00068	0.00035	0.00022	0.0009	0.00053	0.00042	0.00047	0.00035	0.0021
78	Pt	0.095	0.05	0.031	0.022	0.075	0.028	0.046	0.049	—
79	Au	0.004	0.0029	0.0034	0.0038	0.0035	0.0035	0.0035	0.0036	0.0051
80	Hg	0.094	0.12	0.078	0.086	0.11	0.08	0.089	0.077	0.27
81	Tl	0.2	0.51	0.54	0.6	0.34	0.56	0.48	0.44	1.0
82	Pb	8.9	12	13	13	10	13	12	12	15
83	Bi	0.0067	0.0064	0.003	0.0025	0.0066	0.0029	0.0043	0.0044	0.003
84	Po	—	0.003	0.0008	0.00086	0.0014	0.00082	0.001	0.001	0.00015
90	Th	3.1	5.6	6.6	7.1	4.2	6.8	5.8	5.7	8.5
92	U	0.51	1.6	2.1	2.3	1.0	2.2	1.7	1.7	2.8
质量%		20.3	16.8	43.8	19.1	37.1	62.9	100.0	92.9	7.1

表 2 地 壳 的 元 素 丰 度（单位：原子数/10^6 Si 原子）

原子序数	元素	深洋区 a′	浅洋区 b′	地盾区 c′	褶皱区 d′	海洋地壳 e′	陆地地壳 f′	地壳 g′	结晶岩 h′	沉积岩 i′
3	Li	260	460	290	320	350	310	320	290	870
4	Be	5.9	16	16	17	11	16	15	14	31
5	B	110	290	79	120	190	89	130	73	1000
6	C	29000	84000	4800	20000	56000	9700	25000	1600	410000
7	N	160	130	130	120	150	130	130	140	46
8	O	3400000	3400000	2800000	2800000	3400000	2800000	3000000	3000000	4200000
9	F	2500	2900	2400	2500	2700	2400	2500	2400	4400
11	Na	110000	97000	110000	110000	110000	110000	110000	110000	55000
12	Mg	220000	160000	88000	75000	200000	84000	120000	120000	110000
13	Al	380000	360000	300000	290000	380000	300000	320000	330000	280000
14	Si	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
15	P	5500	4900	3700	3400	5500	3700	4000	4000	2600
16	S	1300	2700	940	1200	2100	1000	1300	940	7900
17	Cl	3400	310	270	300	2000	270	820	260	11000
19	K	26000	45000	50000	52000	34000	50000	45000	43000	65000
20	Ca	230000	190000	99000	99000	220000	99000	130000	120000	330000
21	Sc	62	39	39	32	51	37	42	42	27
22	Ti	22000	18000	11000	10000	21000	11000	14000	14000	8900
23	V	450	340	230	210	410	230	280	280	240
24	Cr	450	290	150	130	380	140	220	220	160
25	Mn	4400	3200	1900	1600	4000	1700	2500	2500	2700
26	Fe	180000	140000	85000	76000	160000	83000	110000	110000	79000
27	Co	92	56	31	26	77	30	44	46	35
28	Ni	330	220	110	87	290	100	160	160	130
29	Cu	200	120	79	70	160	77	100	110	84
30	Zn	240	180	120	110	220	120	150	150	150
31	Ga	31	29	24	23	31	24	26	26	29
32	Ge	2.3	2.2	1.8	1.7	2.2	1.8	2.0	2.0	2.3
33	As	3.4	6.6	1.8	3.0	4.9	2.2	3.0	2.2	15
34	Se	0.087	0.23	0.066	0.086	0.16	0.073	0.099	0.064	0.068
35	Br	9.2	5.4	4.8	4.9	7.6	4.8	5.7	5.0	20
37	Rb	62	100	100	110	83	100	95	94	150
38	Sr	680	690	520	510	700	520	570	570	630
39	Y	31	21	29	30	26	29	28	28	48
40	Zr	130	190	150	150	160	150	150	150	190
41	Nb	24	21	21	19	23	21	21	23	11
42	Mo	2.2	1.8	1.1	1.1	2.0	1.1	1.4	1.4	4.0
46	Pd	0.021	0.0099	0.0082	0.0067	0.016	0.0077	0.0097	0.011	0.0044
47	Ag	0.11	0.089	0.062	0.055	0.10	0.058	0.073	0.074	0.08
48	Cd	0.21	0.13	0.13	0.12	0.17	0.13	0.14	0.15	0.25
49	In	0.22	0.18	0.093	0.082	0.21	0.093	0.12	0.12	0.095
50	Sn	1.6	2.2	1.3	1.4	2.0	1.4	1.5	1.4	4.4
51	Sb	0.98	0.81	0.37	0.34	0.92	0.36	0.53	0.5	1.1
52	Te	0.0009	0.00074	0.00029	0.00023	0.00084	0.00027	0.00045	0.00048	0.000054
53	I	0.46	0.51	0.36	0.45	0.61	0.39	0.46	0.38	1.7
55	Cs	0.92	1.3	1.1	1.4	1.1	1.2	1.1	1.0	3.5
56	Ba	280	360	280	270	330	280	290	290	450
57	La	24	33	26	28	29	27	29	26	63
58	Ce	8.5	26	38	42	17	40	32	31	58
59	Pr	3.8	4.0	4.4	4.6	3.9	4.5	4.3	4.3	5.5
60	Nd	18	18	19	19	18	19	19	19	23
62	Sm	4.4	4.3	4.8	4.9	4.5	4.9	4.7	4.7	5.9
63	Eu	0.81	0.77	0.77	0.83	0.81	0.77	0.82	0.82	0.88
64	Gd	4.2	4.2	4.6	4.7	4.3	4.6	4.5	4.5	5.6
65	Tb	0.65	0.73	0.74	0.74	0.71	0.74	0.72	0.72	0.84
66	Dy	1.7	2.3	2.9	3.0	2.1	2.0	2.6	2.6	3.9
67	Ho	0.82	0.85	0.88	0.94	0.82	0.88	0.88	0.88	1.1
68	Er	1.6	1.5	1.7	1.7	1.6	1.7	1.7	1.7	2.1
69	Tm	0.15	0.15	0.16	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16
70	Yb	1.5	1.5	1.6	1.6	1.5	1.6	1.6	1.7	2.1
71	Lu	0.45	0.44	0.51	0.52	0.45	0.51	0.5	0.49	0.58
72	Hf	0.68	0.73	0.97	1.1	0.68	0.97	0.87	0.87	1.6
73	Ta	0.32	0.25	1.3	1.3	0.29	1.3	0.92	1.0	0.39
74	W	0.66	0.55	0.63	0.63	0.62	0.63	0.62	0.62	1.2
75	Re	0.00045	0.00022	0.00012	0.00046	0.00034	0.00022	0.00026	0.00021	0.0015
78	Pt	0.06	0.03	0.015	0.012	0.046	0.014	0.025	0.026	—
79	Au	0.0024	0.0018	0.0016	0.0018	0.0022	0.0017	0.0019	0.0019	0.0035
80	Hg	0.057	0.07	0.038	0.042	0.067	0.039	0.046	0.04	0.17
81	Tl	0.12	0.29	0.25	0.28	0.21	0.26	0.24	0.23	0.66
82	Pb	5.3	6.8	6.1	6.1	5.9	6.1	6.0	6.0	9.6
83	Bi	0.0039	0.0036	0.0014	0.0012	0.0039	0.0014	0.0022	0.0022	0.002
84	Po	—	0.0016	0.00037	0.00040	0.00082	0.00038	0.0005	0.0005	0.000094
90	Th	1.6	2.8	2.7	2.9	2.2	2.8	2.6	2.6	4.9
92	U	0.26	0.78	0.85	0.94	0.51	0.89	0.76	0.76	1.6

元　素	所谓地壳的元素丰度		陆地地壳的元素丰度（表 2 之 f′ 栏）	地壳的元素丰度（表 2 之 g′ 栏）
	维诺格拉多夫（1962）	戈尔德施密特（1954）		
O	2.8×10^{6}	2.96×10^{6}	2.8×10^{6}	3.0×10^{6}
Na	0.99×10^{5}	1.24×10^{5}	1.1×10^{5}	1.1×10^{5}
Mg	8.5×10^{4}	8.76×10^{4}	8.4×10^{4}	12.0×10^{4}
Al	3×10^{5}	3.05×10^{5}	3.0×10^{5}	3.2×10^{5}
Si	1×10^{6}	1×10^{6}	1×10^{6}	1×10^{6}
P	3×10^{3}	3.91×10^{3}	3.7×10^{3}	4.0×10^{3}
K	5.8×10^{4}	6.7×10^{4}	5.0×10^{4}	4.5×10^{4}
Ca	8.8×10^{4}	9.17×10^{4}	9.9×10^{4}	13.0×10^{4}
Ti	3.5×10^{4}	0.92×10^{4}	1.1×10^{4}	1.4×10^{4}
Mn	2×10^{3}	1.8×10^{3}	1.7×10^{3}	2.5×10^{3}
Fe	8.8×10^{4}	9.13×10^{4}	8.3×10^{4}	11.0×10^{4}

只要将維諾格拉多夫和戈尔德施密特的所謂地壳（或岩石圈）的元素丰度同我們計算的地壳元素丰度比較一下，就可以看出他們的計算值都有这样一个共同特点，就是 Mg、Ca、Fe、Mn 等富集在基性岩中的元素，其丰度偏低；而 K 的丰度偏高。說明了他們在計算地壳元素丰度时，忽略了海洋地壳和深部地壳富含鉄-鎂硅酸盐物質的特征。

表 1 和表 2 的丰度值表明，海洋地壳和陆地地壳的元素丰度显然不同。海洋地壳內丰度較大的元素，主要是富集在基性岩中的元素；而陆地地壳內丰度較大的元素，主要是富集在酸性岩中的元素。尽管海洋地壳的質量只占地壳总質量的 37.1%，但是，海洋地壳內丰度較大的元素，其絕对重量超过或几乎等于它們在陆地地壳內的絕对重量。例如：

	海洋地壳（$\times10^{15}$ 吨）	陆地地壳（$\times10^{15}$ 吨）		海洋地壳（$\times10^{15}$ 吨）	陆地地壳（$\times10^{15}$ 吨）
Fe	680	720	V	1.5	1.8
Ca	630	620	Cr	1.4	1.2
Mg	350	320	Ni	1.2	0.92
Ti	72	80	Cu	0.76	0.76
Mn	16	15	Co	0.33	0.27

因此，对整个地壳的元素丰度来說，这些元素在海洋地壳內的分布，同它們在陆地地壳內的分布，占有同等重要的位置。忽略了这点，就不足以全面說明整个地壳的元素分布。

由此可知，不仅微量元素的地壳丰度需要补充修訂，而且，为了获得眞实地壳的元素丰度，对以往計算的常量元素丰度，也需要进行修正。如果采用維諾格拉多夫 1962 的計算值时，那么，在以重量表示的地壳丰度中，Ca 应增加 76%，Mg 应增加 50%，Fe 应增加 25%；而 K 应減少 32%，Si 和 Na 应各減少 8% 等等。

（三）浓度克拉克值的多級計算問題

为了反映各种元素在不同地段中分布的不均匀性，維尔納茨基（В. И. Вернадский）曾提出了“浓度克拉克”的概念。所謂浓度克拉克值（C），就是某一地段內，某种元素的平均含量（f）和該元素的地壳丰度（F）的比值，即 $C = f/F$. 在这个公式里，計算 f 值的地

段,其空間范围并沒有一定的限制,往往由計算者按計算目的来确定。在实际工作中,最常用的是計算矿体或矿化面积內的 f 值。F 值又称地壳背景值或地壳化学場。

上面已經論証过,以往計算的所謂地壳元素丰度,实际上只相当于陆地地壳的元素丰度。因而,过去慣用的 F 值,就不是眞正的地壳背景値,而是只相当于陆地地壳的背景值。旣然計算 f 值的空間范围沒有限制,而 F 值又不眞正代表地壳的背景值,那么只要把 f 和 F 代表的內容改变一下,即設 f_1 代表陆地地壳(或海洋地壳)內某种元素的丰度,F 仍代表該元素的地壳丰度,则得一級浓度克拉克值(C_1)的公式为:

$$C_1 = \frac{f_1}{F}$$

上面已經指出过,陆地地壳和海洋地壳的元素丰度是显然不同的,一級浓度克拉克值,正好反映了它們的区域分布特征。

現在,我們不仅知道了陆地地壳和海洋地壳的元素丰度,而且还知道了深洋区、浅洋区、地盾区和褶皺区的元素丰度,这四个区的元素丰度又都各具不同的区域分布特征。为了反映这些区內各种元素在陆地地壳或海洋地壳中的区域分布特点,可以进一步計算二級浓度克拉克值(C_2). 設 f_2 代表上述各区內某种元素的丰度,则

$$C_2 = \frac{f_2}{f_1} = \frac{f_2}{F \times C_1}$$

这样,根据表 1 內各种丰度值,就可以求出上述两級浓度克拉克值。同时,还得出三級背景值,即:

0 級: 地壳背景值

1 級: 陆地地壳(或海洋地壳)背景值

2 級: 各区背景值

如果已知我国某一褶皺带內某种元素的丰度 (f_3),并設 f_2' 代表褶皺区內該元素的丰度(即 2 級背景值),则可用同样的方法求出三級浓度克拉克值(C_3)。依此类推,可以求出多級的浓度克拉克值,使元素分布的区域特征得到更充分的反映。

在缺乏区域性元素丰度值的情况下,当我們研究矿床的地球化学时,不得不将矿床中某一元素的平均含量,直接同地壳的元素丰度对比,以便得出元素分布的集中($C > 1$)或分散($C < 1$)的相对定量概念。这种对比,完全脫离了矿床所属的大地构造区域或成矿区的地球化学背景。况且,对地壳背景值来說是呈集中(或分散)的元素,对区域背景值来說,却不一定集中(或分散),或者集中(或分散)的程度也不一定相同。在区域背景值比地壳背景值高(或低)的区域內,就可能出現这种情况。

随着区域性元素丰度計算工作的开展,将会改变至今依然存在的这种不能令人滿意的状况。目前,我国正在进行的大地物理測量和区域地球化学研究,将会推进我国各大地构造单元內元素丰度的計算工作,从而推进我国各級大地背景值体系的建立。

主 要 参 考 文 献

[1] 黎 彤 饶纪龙 1963 中国岩浆岩的平均化学成分。地质学报,第 43 卷 3 期。

[2] Clark, F. W. 1924 The data of geochemistry. 5thed. U. S. Geol. Survey Bull. 770.

[3] Clark, F. W. and H. S. Washington. 1924 The Composition of the earth's crust. U. S. Geol.

Survey, Profess. paper 127.
[4] Goldschmidt, V. M. 1954 Geochemistry.
[5] Mason, B. 1958 Principles of Geochemistry. New York.
[6] Poldervaart, A. 1955 Chemistry of the earth's crust. Amer. Geol. Soc. Special paper 62.
[7] Suess, H. E. and H. C. Urey 1956 Abundance of the elements. Rew. Mod. Phys. 28, 53—74.
[8] Turekian, K. K. and K. H. Wedepohl 1961 Distribution of the elements in major units of the earth's crust. Amer. Geol. Soc. Bull. Vol. 72, pp. 172—192.
[9] Виноградов, А. П. 1962 Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород Земной Коры. Геохимия № 7.
[10] Ферсман, А. Е. 1952—1957 Избранные труды. I—IV, АН СССР.
[11] Чердынцев, В. В. 1956 Распространенность химических элементов. Москва.

THE ABUNDANCE OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE EARTH'S CRUST AND ITS MAJOR TECTONIC UNITS

LI TUNG　YIO CHI-LUNG

Abstract

The earth's crust is defined as the solid outer shell of the earth, and delimited from the top, the earth rigid surface, down deep to the Mohorovicic discontinuity. By such a definition, the abundance of chemical elements in the crust is recalculated by a new method, named the regional geochemical method, on the basis of newest data presented in recent ten years by A. Poldervaart (1955), K. K. Turekian and K. H. Wedepohl (1961), and A. P. Vinogradov (1962).

The rocks and sediments distributed in the crust are quite different whether along the horizontal or the vertical direction. In order to obtain the elemental abundances of the crust as a whole, the crust may be divided into two parts, i.e. the continental crust and the oceanic crust. The continental crust may be subdivided into the continental shield region and the region of post-Cambrian folded belts (including volcanic islands); and the oceanic crust may be subdivided into the deep oceanic region and the region of continental shelf and slope (suboceanic region). Using the ratio of rock types which vary vertically in each region, and the chemical composition of each rock type, the amount of elements in such region may be obtained. Then the elemental abundances of the crust and its major tectonic units can be estimated respectively by their relative weight of mass. The final results are tabulated in table 1 (in gramsperton) and table 2 (in atoms per 10^6 atoms Si). In both tables, the average amount of elements in crystalline rocks and sedimentary rocks in the whole crust are also given.

According to the data calculated by the writers, several problems are discussed with a view of regional geochemistry. First, the writers pay attention to the distribution characteristics of elements in each major tectonic unit, and the regularities of elemental distribution between such units. Secondary, the writers point out that the data of elemental abundances in the so-called crust (or lithosphere) calculated by A. P. Vinogradov (1962), V. M. Goldschmidt (1954) and F. W. Clark (1924) are essentially corresponding to those in the continental crust, but not to those in the whole crust. Therefore, not

only the abundance of minor elements in the crust estimated by these authorities must be revised, but also the abundance of major elements. Thirdly, in order to reflect the uneven distribution of the elements in different regions of the crust, the writers offer for consideration the concentration clark, the term first used by V. E. Vernadsky, may be divided into several orders with different geochemical backgrounds.

Notes for table 1 and 2:

1. a and a'——Deep oceanic region.
2. b and b'——Suboceanic region.
3. c and c'——Continental Shield region.
4. d and d'——Folded belts region.
5. e and e'——Oceanic crust.
6. f and f'——Continental crust.
7. g and g'——Earth's crust.
8. h and h'——Crystalline rocks.
9. i and i'——Sedimentary rocks.