



化探资料选编



地质矿产部情报研究所编

化探资料选编 (七)

责任编辑: 吴传璧

出版: 地质矿产部情报研究所
译编: 地质矿产部情报研究所化探组
印刷: 中国地质科学院印刷厂
发行: 地质矿产部情报研究所发行组

封面设计: 吴贵鹏

目 录

专 著

成矿能与矿产普查

前言	(1)
第一章 基本地质-地球化学 前提	(3)
§ 1 地球的物理和化学构成 概 要	(3)
§ 2 成矿元素在岩石圈中的性状 特征	(7)
§ 3 成矿元素的普遍分散与其深部富集作用之间的成因 联系	(11)
§ 4 深成热液矿床及其 特征	(12)
第二章 热力学基本知识及成矿能的计算	(17)
§ 5 热力学和物理化学 常识	(17)
§ 6 成矿能, 成矿能表现的地质-能量图解, 成矿能计算 的一般性条件和原则	(24)
§ 7 形成一定品级单位体积热液矿石所需成矿能量的计算 原 理	(28)
§ 8 L. 波茨曼能量源结构	(35)
§ 9 根据矿石中金属的不同含量计算金属的微分 储 量	(37)
§ 10 在单独研究的矿体中应用金属分布规律的可 能 性	(60)
§ 11 由矿体系组成的矿床中矿石远景储量的计算 原 理	(71)
第三章 成矿能理论在地质工作实践中的应用成果	(78)
§ 12 地球化学填图中的成 矿 能	(79)
§ 13 通过计算成矿能来描述复杂成分矿石和综合 晕	(83)
§ 14 利用区域储量的分布评价区域的成矿 远 景	(99)
§ 15 裂隙形成规律在实践中的应用 实 例	(118)
结 论	(123)
附录 1: 岩石圈和最主要类型火成岩中的元素含量	(126)
附录 2: “少量”金属的储量在单独划分出的矿体和矿床中的 右斜不对称分布	(134)

化 探 综 述

发现隐伏矿床的地球化学方法 (第二部分)	(137)
----------------------	-------

金矿化探论文

1. 金矿床的内生晕.....	(162)
金矿床内生晕的研究现状.....	(162)
研究区主要岩石类型中金的背景含量.....	(165)
金的内生晕.....	(174)
根据内生晕普查金矿床.....	(212)
2. 澳大利亚南威尔士帕克斯地区金的岩石地球化学勘查.....	(215)
3. 加拿大安大略省提敏斯地区霍林格-麦克因蒂尔金矿床	
气液包裹体地球化学与围岩蚀变及岩石地球化学分带的关系.....	(227)
4. 金矿田表生作用带中金的行为.....	(244)
金在水云母风化壳中的分布.....	(246)
金在高岭土风化壳中的分布.....	(254)
金在矿田覆盖沉积层中的行为.....	(262)
土壤中的金.....	(265)
结论.....	(278)
5. 西澳大利亚诺斯曼风化带中金矿床地球化学的某些观测.....	(280)
6. 气候和地貌及原生地质条件对金和银表生迁移的影响.....	(293)
7. 阿尔平秃山地区的水地球化学勘查.....	(306)
8. 地球化学勘查中金和银的测定方法.....	(309)

前 言

人所共知，弗·恩格斯有许多著作研究了科学和技术的历史。据此他得出结论：人类科学技术的发展在时间上是自动加快的。例如，他在《自然辩证法》一书中对这一原理作过这样的表述：“…科学的发展从此（从文艺复兴时代起）便大踏步地前进，而且得到一种力量，这种力量可以说是与从其出发点的（时间的）距离的平方成正比的。”*

目前，弗·恩格斯的这一原理已经得到普遍的公认，并推广应用于整个人类进步。同时，在许多文章中不止一次地强调进步的指数法则，它可用下面的方程式表示

$$P_t = P_0 e^{\alpha t},$$

式中： P_t 、 P_0 —从选定的时刻算起到时间 t 时的进步状态和计时起点的进步状态； α —常量系数。

这一类型公式的代表性特征是自变量 t 线性增大时函数 P 持续增大。这一公式与其说是对现实的准确数学表达，不如说是一个象征。不过，这一公式还是非常清楚地反映了人类的全面进步随着时间越来越加快的实质，特别是在研究足够长的一段时间（例如一百年）时，情况更是如此。要指出的是，指数法则既适用于整个进步，也同样适用于个别发展方向。

我们简要地探讨一下冶金和矿业的发展特点。人所共知，人类约在五千年前就已经认识了有色金属，并对其进行开采；而在三千至三千五百年前便认识并开采了铁。如果把开采之初到1955年1月1日止提取出的全部金属定为100%，则其后十年（1955—1964年）内提取出的金属就为10—45%。同样可以推测，一切可能矿产的开采量将来也会加速增长。

地质部门的主要目的是保证采矿业（因而也就是冶金工业）有相应的矿石储量。每年的储量增长规模应当遵循冶金工业发展的规律，也就是说随时间推移是不断增长的。同时，解决地质勘探问题时必然会遇到的困难，也与所要求储量的规模成比例地增加。问题在于易发现的矿石储量一年年越来越明显地在消耗着，而储量的增长却只好依靠更难发现的矿床来满足。

因此，在最近20—30年内，必须把符合现代标准但产出深度在目前开采层位以下的矿床，看作是补充矿石储量的主要来源。目前的开采深度平均为400—500米，有时达3000—3500米（维特瓦特斯兰德，科拉尔，米纳斯·杰拉斯）。这一平均值可确定为上部水平，而下部水平则为900—1000米，这样，普查和勘探层的厚度为500米。

这个普查勘探层是地壳的这样一个层，根据许多世纪来对同样厚度的上层进行矿藏开采的经验，它应当能充分保证最近二、三十年内冶金工业对高质量原料的要求。在这些条件下，从地质勘探工作（用最少的工作量）中获取最大量的信息，一定可以起到决定性的作用。事实上，如果研究地质因素本身，可得出一些结论；而如果能成功地用数学手段把这些地质因素规律性地联系在一个方程式中，便会得出另一些结论。

* 译文引自人民出版社1972年版《马克思恩格斯选集》第三卷448页。——译注

涉及矿床学和地球化学之间边缘领域的问题应当是首先要解决的问题。在这里，确定将矿石储量与矿石中主要元素含量联结起来的数学规律，是最吸引人的一个问题。若成功地解决了这一问题，（根据有限的实际资料）预测或大或小地区的储量便有了自己的数学依据。

应当承认，已经有了一些以数理统计和概率论为基础解决这一问题的尝试，并或多或少得到了成功。在这里值得提到的是H.K. 拉祖莫夫斯基，在苏联东北边区砂矿上做过工作（1949—1952）的A.Д. 德罗兹德，H.H. 博罗夫科，M.B. 谢苗诺夫，P.M. 杜波夫等苏联学者的著作，以及D.G. 腊斯克，M. 阿利，F. 布朗德尔，R.C. 拜斯特和L.B. 斯利赫杰尔的著作。

但是不能不指出，在解决不同的普查勘探问题时，类似的统计方法还留有许多值得怀疑和内部不尽完善的地方。在利用数理统计方法时，一些在实践中因某些原因观察不充分或根据看不到的拟研究现象、客体、过程或其结果的特征，可能会被忽略掉和未加考虑。这种情况在研究非工业矿化和矿产地时可见到，因为与对工业聚集体相比，它们的统计研究度要差一些。

必须选择一条认识这些规律的途径，它的基础应是精确的物理-化学的规律。热力学作为一门研究能量依严格的定量规律进行相互转换、联系和转变的科学，可用来作为这种基础。选择热力学有如下理由。在地壳中（于一定的时间和地点，而且在元素普遍分散的背景上并由这种状况）形成任何矿床，若没有地球物质的分离和迁移，是不能想象的。若没有相应种类和数量的能的消耗，这些过程就是不可思议的，而能量正是热力学的研究对象。这也就是对一些成果看来很有希望的研究工作的依据。利用“成矿能”和热力学基本规律的概念，便能力求接近地认识“矿石储量—矿石金属品位”的相互关系，并得出描述这些关系的表达式。

C.C. 麦舍里亚科夫和H.П. 伊凡诺夫通过实际资料说明了这种研究适用于地质学，从1969年起在全苏勘探技术研究所对一些理论性结论作了检验。同时还指出，成矿能概念和热力学规律很容易推广应用到矿床原生分散晕研究中去，因为可以用一些统一的能量指数对这些十分复杂的多元素成分的产物作出描述，从而使它们成为可用计算机计算的对象。同时还查明，热力学的能量方法在其它地球化学工作中也有很好的远景，例如在地球化学填图中，可采用简单而直观的工作成果图示方法。

全部资料（以地质普查和评价为目的的理论及实际研究成果）都是针对现有的地质认识水平来阐述的；而对于这些认识的发展历史，只给予了最低限度的必要的注意。

В.И. 维尔纳茨基关于元素普遍分散思想的重要性这里就无需强调了，因为它就是笔者遵循的思想。

第一章

基本地质-地球化学前提

本书的最终目的是要确定地下矿产的金属储量与矿石中这些金属含量之间的数学关系，以便利用其结果来解决某些评价课题。要达到这一目的，首先应当做到这一总课题和个别课题的求解条件不与已积累的地质-地球化学资料及公认的成矿理论观点相矛盾，不与在自然界观测到的和在实验室模拟的各种地质作用实现条件的已知资料相矛盾，并且也要与物理化学和热力学定律相一致。为此，我们依次简介一些已知资料，分别说明地球的物理和化学构成的特征，成矿元素在地壳中的性状特征，以及金属矿床成因的现代观点。

§1 地球的物理和化学构成特征概要

地球作为一个自然天体，具有称为地球体的独特形状。地球体非常象一个椭球体，它的极轴是12713.7公里，赤道轴为12756.32公里，平均半径为6371.032公里，扁率为1/298.25。地球体积为 $1083 \cdot 10^{12}$ 立方公里，质量为 $5976 \cdot 10^{24}$ 克，平均密度为5.518克/立方厘米。地球面积为51020万平方公里，其中陆地面积为14910万平方公里，海洋面积为36110万平方公里。既然在可以观测到地球最上层没有发现相当于地球平均密度的岩石（分布最广的花岗岩型酸性岩平均密度为2.69克/立方厘米，分布较少的超基性橄榄岩平均密度为2.35克/立方厘米），就完全有理由推断，组成地球的地质产物的密度是随深度增加而增大的。根据这一推断和相应的地震观测，可以提出并且证明地球具壳层结构，随深度增加，组成壳层的物质密度增大。

目前认为，地球内部的结构分三层：地核、地幔和双层的地壳。地壳上覆盖着两个均质的壳：水圈和大气圈，此外还有一个多相的生物圈，它延及地壳的上层（深1800米以上）、整个水圈和部分对流层（5000米高空以下）。值得指出的是：根据K. 兰卡马（Rankama）、T. 萨哈马（Sahama）的资料，地壳（岩石圈）的花岗质圈层、水圈、大气圈和生物圈的质量比例为1000000:69100:30:1，这就清楚地说明，岩石圈在地球的四个上部圈层中占有突出的地位。

根据F. 克拉克和G. 华盛顿的资料，岩石圈的花岗质圈层（16公里厚）的成分可以与下列岩性成分相当：

花岗岩类	68.0%
辉长岩类	19.0%
正长岩、纯橄榄岩等	8.0%
火成岩合计	95.0%
页岩	4.0%
砂岩	0.75%
灰岩	0.25%
沉积岩合计	5.00%

表 1

地 球 的 物 理 构 成

名 称	相对于地球 的质量(%)	沿地球半径的线 性规模(公里)	密 度 (克/立方厘米)	压 力 (千克力/平方厘米)	温 度 (℃)	成 分
地 核	32.3	3500	13.5—17.0 至9.4—10.0	360—140万	5000—4700	或为铁-镍质的,或为 金属化的硅酸盐质的
地 幔	67.2	2830	1900	140—40万	4700以下	在物相上可能已发 生变化的硅酸盐 上部为超基性岩
			565	40—10万	1700以上	
			365	10—n万		
地 壳	0.48	42	21	1万至正常压力	1700至 正常温度	玄武岩和辉长岩类岩石 主要为花岗岩类岩石
			21			
水 圈	0.02	平均3.8	1.03	400至正常压力	0—25	76.4%为海洋的水
大 气 圈	10 ⁻⁶	不小于1000	下层为0.0012	0.n至正常压力	零下, 正常	氮、氧和其他气体 的混合物
生 物 圈		涉及整个水圈、部分岩石圈和大气圈的多相圈层, 质量微不足道				

注: 莫霍洛维奇面为地壳和地幔的分界, 康拉德面为地壳上层和下层的分界。

地球更详细的物理构成见根据П. С. 沃罗诺夫的资料编制出的表1。

关于地球化学成分的资料，目前只有岩石圈和组成它的各种岩石的资料以及水圈、大气圈和生物圈的资料是可靠的，也就是说，只有占地球质量微不足道的一小部分物质的数据是可靠的。关于整个地幔，特别是地核的成分，只能根据对陨石，即地球外物质的成分的了解作某种大概的推测。只是在最近才有了某些关于地幔最上层的化学成分的资料，但这些资料也是以未经验证的假设为依据的。然而可以认为，现有的地球化学资料对于认识地球化学成分的基本特征是足够的。表2列出了关于上部各地圈化学成分特征的综合资料。B. A. 加夫鲁谢维奇、A. П. 维诺格拉多夫、B. 梅森、A. A. 萨乌科夫、K. 兰卡马和 T. 萨哈马的资料是该表数据的原始资料。

各地圈的化学成分

表 2

名 称		相对于地球的质量 (%)	地 圈 的 元 素				
			主 要 元 素			次要元素	
			数目	名 称	克拉克 (原子%) 值总和	数目	克拉克值总和 (重量%)
上地幔	下层	~13.0	8	O, Fe, Si, Mg, Ca, Ni, Al	97.05	84	2.95
	上层	~8.0	6	O, Mg, Al, Fe, Al, Ca	98.23	86	1.83
地壳	玄武岩层	~0.48	7	O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na	97.98	85	2.54
	花岗岩层		8	O, Si, Al, Ca, Na, K, Mg, Fe	98.69	84	1.31
水 圈		~0.02	5	O, H, Cl, Na, Mg	99.80	87	0.22
大 气 圈		极微	3	N, O, Ar	99.80	89	0.20
生 物 圈		极微	11	C, O, N, H, Ca, S, P, Na, K, Cl, Mg	99.69	81	0.31

地球上部壳层化学成分方面的实际资料为一些有很大科学和实用意义的普遍结论提供了丰富的资料依据。F. 克拉克 (1908)、B. И. 维尔纳茨基等人对此奠定了初步基础。后来又有了新的实际资料充实，并由 K. E. 费尔斯曼、V. M. 戈尔德施密特、A. A. 萨乌科夫、A. П. 维诺格拉多夫、B. B. 谢尔宾纳等许多苏联和国外的地球化学家的著作所发展和加强，以致可以认为，目前这些结论已被公认。这样的结论有：

1. 如果采用适当的研究手段和方法，在任何一个地质产物样品中总可查明有门捷列夫周

期表中的92种自然元素，而且每种元素都以其特有的含量存在。我们认为，在对大量地球化学样品分析结果进行整理的基础上编出的元素平均含量表（各地圈的元素克拉克值表），事实上可靠地反映着各地圈的元素实际含量。因此，这些表同时也可作为一种无可争辩的实际证据，证明所有元素在自然界中是无处不在的——这是一个带有基本定律性质的地球化学特征。这一定律用其奠基者F.克拉克和B.И.维尔纳茨基的名字来命名是恰当的。

2. 各元素在诸地圈中的平均含量（克拉克值）是非常不均衡的。数日有限的一些元素实际上几乎构成了相应地圈的全部质量，而绝大多数元素，包括所有最主要的成矿元素，在同一一些地圈中以微不足道的含量存在，其重量比往往只有千分之几、万分之几甚至更低。

3. 表2所列资料也和已发表的关于诸地圈化学成分的更详细资料一样，并没有说明在地球内部的某个地方，在地壳内还是在上地幔中，更不用说在水圈或气圈中，存在着算得上“矿浆源”的富含金属的源地。而且许多成矿元素（Pb、Zn、Sn、W、Mo、U、Th等）在地幔中的含量都低于在地壳中的含量。可以推断的是，只有在地核中富含相当大量的铁和镍，陨石的研究资料也表明了这一点。

4. 元素的普遍分散作用是在地球发育的宇宙阶段发生的。

岩石圈上部的花岗质圈层是人类获取矿产资源的主要来源。所以人们着力研究的正是这一层。日积月累的地质-地球化学经验告诉我们，在地球中，化学元素或者以明显易见的自身矿物形式存在，即元素按化学计量比例化合且通常呈结晶态以一定的天然化合物形式存在，或者在其他成分的矿物中成某种混入物，以隐蔽形式存在。我们将元素的第一种存在形式称为矿物形式，第二种形式称为非矿物形式。表3列出了火成岩中上述两种元素存在形式的资料。前已指出，火成岩占岩石圈质量的95%。

元素在火成岩中的存在形式

表 3

主要以矿物形式存在的元素	以矿物形式和非矿物形式存在的元素	主要以非矿物形式存在的元素
O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, (占总克拉克值的99%), H, C (占总克拉克值的90%) 赋存于主要造岩矿物（硅酸盐、氧化物、岩浆成因的碳酸盐）中；Ti, P, S, Zr, (占总克拉克值的90%) 赋存于广泛分布的副矿物（钛铁矿、金红石、榍石、磷灰石、岩浆成因的硫化物、锆石）中。	Cr, Y, La, Ce, F, Cl, Cu, Ni, Os, Ir, Pt (占总克拉克值的50%) 赋存于相应的副矿物（铬铁矿、铬尖晶石、褐帘石、独居石、磷钇矿、硅铈钇矿、磷灰石、岩浆成因的硫化物、暗铈铁矿、亮铈铁矿、粗铂矿）中。这些元素的其余部分在其他成分的矿物中呈混入物存在	Mn, Li, Be, B, Nb, Ta, Th, TR (La, Ce, Pm除外), Rb, Cs, Zn, Pb, Sn, Mo, W, U, Co, Hg, Ag, Au, As, Sb, Bi, Se, Te, Sr, Ba, V, Ge, Sc, Ti, Cd, Ga, Hf, In, Re, Ru, Rh, Pd, Br, I, N, Ar, He, Ne, Kr, Xe, 短寿命的锕系元素 (占总克拉克值的100%)

元素在沉积岩中的性状与在火成岩中的性状没有本质的区别。沉积岩在岩石圈中所占质量不大(5.0重量%)。因此表3的资料可扩大使用于整个岩石圈。

计算表明, 占岩石圈质量1.3—1.4%的元素是以非矿物形式存在的。但是, 这一数字(按绝对值说不大)要比大多数单个元素(特别是种数不多的成矿元素)的克拉克值大好多倍。

§2 成矿元素在岩石圈中的性状特征

我们所说的成矿元素,是指必定会参与构成矿石的矿石矿物和脉石矿物成分的一类元素。具体来说,属于成矿元素的有: Cu、Pb、Zn、Sn、W、Mo、U、Th、Ni、Co、As、Sb、Ta、Nb、Ag、Au、Hg、S、Se、Te、B, 此外还包括也属于主要造岩元素的某些其他元素。属于这类成矿元素的总共有21至25种元素。这些元素的绝大多数(除Al和Fe外), 在岩石圈中的含量(克拉克值)就绝对值来说是微不足道的, 介于 $5.0 \cdot 10^{-7}\%$ (金)至 $5.2 \cdot 10^{-2}\%$ (硫)之间。10种有重要工业价值的元素(Cu、Zn、Pb、Sn、W、Mo、Ni、Co、U、Th), 在岩石圈中的总含量共占 $3.31 \cdot 10^{-2}$ 重量%。如表3所示, 成矿元素在岩石圈中主要以非矿物形式存在, 即以某种形式(类质同象、非类质同象、岩石液相中的溶液、在晶面和晶棱上呈吸附态、类气相)在造岩矿物中呈混入物存在。

对于岩石圈中的成矿元素来说, 其特征是呈普遍的分散状态存在, 含量低(克拉克值)而均一; 岩石圈中的大部分成矿元素是以这种状态存在的。强调下述情况是有意义的: 虽然主要成矿剂(O、Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mg)在较小程度上也会以非矿物状态分散, 但非矿物状态毕竟是包括所有成矿元素在内的84种“少量”元素的主要状态。如果注意到上述各类元素的原子克拉克值及其在自然界中常见的存在形式, 便可以说, 包括所有成矿元素在内的84种“少量”元素, 主要在岩石圈的8元素矿物的骨架中呈非矿物分散状态存在。成矿元素在岩石中的分散规模见表4, 该表给出了具重要工业意义的各元素的“储量”, 它是按集中在1立方公里的平均岩石圈*里的金属数量来计算的。地圈的元素平均含量引自A.П.维诺格拉多夫的著作。

但是, 分散金属的这种广义的储量并不能满足人类的要求, 因为要利用这种储量在经济上是极不合算的。金属在岩石圈中的天然富集(矿床)才符合经济上的需要。这些矿床是通过岩浆作用、沉积作用或者火山-沉积作用和变质作用等各种途径形成的, 而且形成于不同时间和地球上的不同地点。

矿床最有代表性的特征就是成矿元素的含量相对于克拉克值偏高。根据A.E. 费尔斯曼的建议, “浓集克拉克值”的概念已经在地质实践中生了根。浓集克拉克值可以理解为一定地质物质中某个元素的含量与同种地质物质中同一元素的区域克拉克值或地方性克拉克值之比。浓集克拉克值是通过其克拉克值表示出来的该元素的含量。我们将广泛地采用这一术语。

最有代表性的天然富集的例子是矿床, 因为对于大多数分布不广的金属元素来说, 在矿

* 平均岩石圈(усредненная литосфера)指将整个岩石圈的成分加以平均后用于进行理论计算的岩石圈, 系一抽象客体。——校注

分散于1平方公里平均岩石圈内的成矿元素的储量

表 4

金 属	岩石圈的克拉克值 (重量%)	1平方公里岩石圈内的 储量 (10^3 吨)	按储量分级的 矿床规模
铁	5	142.10 ³	中型
铜	$1 \cdot 10^{-2}$	279	中型
铅	$1.6 \cdot 10^{-3}$	45	小型
锌	$5 \cdot 10^{-3}$	140	小型
镍	$8 \cdot 10^{-3}$	224	中型
钴	$3 \cdot 10^{-3}$	83.5	特大型
锡	$4 \cdot 10^{-4}$	112	大型
钨	$1 \cdot 10^{-4}$	2.8	小型
铝	$3 \cdot 10^{-4}$	8.4	小型

注：1平方公里岩石圈的质量取为 $2.79 \cdot 10^9$ 吨。

床中浓集克拉克值可达到很高的值；对于锡、铋、金来说，浓集克拉克值可达数万至数十万；对于硅（石英脉中的硅）来说，浓集克拉克值为1.6；对于铝土矿中的铝来说为4；对于铁来说为14—15等等。

表5中列出了原生工业矿床中11种金属的品位，这些资料引自B.И. 克拉斯尼科夫的著作。

现代工业矿床的金属品位

表 5

金 属	岩石圈克拉克 值 (重量%)	工 业 矿 石 的 品 位 (重量%)			取整数的浓集 克拉克值
		富矿	普通矿	贫矿	
铁	5	62.0以内	36—50	选矿后可达25.0	5—12
铜	$1 \cdot 10^{-2}$	3.0	1—3	0.5—1.0	5—300
铅	$1.6 \cdot 10^{-3}$	5.0	2—5	1—2	625—3100
锌	$5 \cdot 10^{-3}$	—	4	—	800
镍	$8 \cdot 10^{-3}$	3.0	1—3	0.5—1.0	60—375
钴	$3 \cdot 10^{-3}$	n	$n \cdot 10^{-1}$	$n \cdot 10^{-2}$	$n (10^1 \sim 10^3)$
锡 矿脉		5.0	1—5	0.2—1.0	
网状脉	$4 \cdot 10^{-3}$	0.5	0.2—0.5	0.1—0.2	25—1250
钨 矿脉		n	0.4—0.8	0.15—0.4	
网状脉	$1 \cdot 10^{-4}$	0.4	0.15—0.4	0.008—0.15	800— $n \cdot 10^3$
钼 矿脉		n	0.5—1.0	0.1—0.5	170— $n \cdot 10^3$
网状脉	$3 \cdot 10^{-4}$	0.3	0.1—0.3	0.05—0.1	
汞	$7 \cdot 10^{-6}$		0.5		$7 \cdot 10^4$
金	$5 \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-4}$	$n (10^3 \sim 10^4)$

根据所列的资料, 可以把矿床看作是衬度非常大的地球化学异常, 它们星星点点地散布在相对平稳的总体分散场中。

矿床的另一个具代表性的特征是元素以独特的矿物形式存在。在矿床形成的条件下, 特别是有热水参加时 (热液矿床), 所有成矿元素都能形成自身矿物, 虽然它们的实际意义是有差别的, 根据H.A.斯莫利雅尼诺夫、A.Γ.别捷赫琴和Э.С.达纳的资料, 铜和铅的矿物最少有160种, 镍的矿物不少于40种, 锌矿物不少于60种, 而具工业意义的铜矿物只有3种, 铅、镍、锌矿物各为1种。所有这些矿物大多数属于自然元素、硫化物、硒化物、碲化物、铋化物、砷化物等类别, 它们的总量约占岩石圈上层总重量的1.3%。

储量规模是矿床的相当重要的特征。表6列出了金属矿床的分类, 它引自B.И.克拉斯尼科夫的著作。

对金属的要求不断增长和从矿石中提取金属的技术越来越完善, 综合起来造成了可采矿石的金属品位不断下降, 同时金属矿的开采量越来越增长。世界上铜的相应数字资料 (不包括苏联的资料) (表7), 就是对这种情况的很好说明。

工业矿床的储量分类

表 6

金 属	矿点, 储量 (吨)	工 业 矿 床, 储 量 (吨)			
		小 型	中 型	大 型	特大型
铁	n · 100万	n · 1000万	n亿	n · 10亿	n · 100亿
铜, 铅, 锌, 镍	n · 1000	n万	n · 10万	n · 100万	n · 1000万
锡, 钨, 钼, 铋,	n · 100	n · 1000	n万	n · 10万	n · 100万
钒, 锆, 铀, 铌等					
铀, 钍, 汞, 铍	n · 10	n · 100	n · 1000	n万	n · 10万
钽, 银, 铷, 铯和	n	n · 10	n · 100	n · 1000	n万
其他存在于自身矿					
物中的金属	n	n · 10	n · 100	n · 1000	n万
金, 铂	n · 10 ⁻³	n · 10 ⁻²	n	n · 10	n · 100

铜的开采量 (据P.阿兰加的数据) 及已开采矿石
的铜品位 (以一个数字居中的年份计)

表 7

指标	1881— 1890	1891— 1900	1901— 1910	1911— 1920	1921— 1930	1931— 1940	1941— 1950	1951— 1960
铜的年平均提 炼量 (千吨)	250.0	381.5	696.0	1127.2	1351.3	1634.9	2384.5	3104.3
平均品位 (%)	5.2	3.8	2.06	1.64	1.49	—	—	0.9*

* 大致数字

还可以用锡的资料作补充说明。例如, 根据“科技情报通讯”, 从1905年开始, 玻利维

亚的锡开采量是增加的,同时矿石的锡品位是降低的:1905年是12%,1924年为6.0—4.0%,1960年为1.8—0.7%。也可见到在矿石锡品位下降的同时储量是增加的:

矿石中锡的加权

平均品位(重量%) 5.3 2.11 1.62 0.86

锡的相对储量(%) 0.8 13.5 33.5 52.1

集中在矿床中的金属与分散在岩石中的金属的数量比例,是一个很有意义的问题。在1927年,В.И.维尔茨基注意到分散的规模非常宏大,并且指出,对某些元素(例如放射性元素)来说,地球上现存质量的100%实际上都处于分散状态。А.Е.费尔斯曼证实有更多的元素分散比富集占优势。А.А.萨乌科夫写道,“各种有价值元素(锡、铅、锌、金、汞等)在岩石中的总量要比矿石中的数量多许多倍”。“计算表明,只有0.02%的汞存于矿床中。约99.98%的汞原子处于极端分散状态,它主要分散在岩石中,其含量以0.00000n%计”。11种重要工业金属元素的较详细资料列于表8。

在计算岩石中以分散状态存在的储量时,采用的参数是:

1) 大陆的面积14900万平方公里;

2) 地壳上层的厚度为1公里;

3) 地壳的密度为2.79克/立方厘米。

集中在矿床中的金属储量引自H.И.萨弗朗诺夫的著作。

这样,有了关于这种储量的资料,就可以从全球规模出发确定这11种工业金属从岩石中的分散状态发生富集的程度(见表8),其变化范围为 $10^{-4}\%$ 至 $10^{-2}\%$ (所有金属的平均值为 $5.3 \cdot 10^{-2}\%$)。

集中于矿床中和分散于岩石中的金属储量比例

表 8

金 属	大陆地壳中的金属储量(吨)		矿床中的富集度(%)
	分散在岩石中的	集中在矿床中的	
铁	$2.1 \cdot 10^{16}$	$4.3 \cdot 10^{12}$	$2.1 \cdot 10^{-2}$
铜	$4.2 \cdot 10^{13}$	$18.2 \cdot 10^9$	$4.3 \cdot 10^{-2}$
铅	$6.7 \cdot 10^{12}$	$10.2 \cdot 10^9$	$1.5 \cdot 10^{-1}$
锌	$2.1 \cdot 10^{13}$	$11.6 \cdot 10^9$	$5.5 \cdot 10^{-2}$
镍	$3.3 \cdot 10^{13}$	$0.6 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^{-3}$
钴	$1.2 \cdot 10^{13}$	$52.5 \cdot 10^8$	$4.4 \cdot 10^{-4}$
锡	$1.7 \cdot 10^{12}$	$0.5 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{-3}$
钨	$4.2 \cdot 10^{11}$	$0.1 \cdot 10^9$	$2.4 \cdot 10^{-2}$
钼	$1.2 \cdot 10^{12}$	$0.1 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^{-3}$
汞	$2.9 \cdot 10^{10}$	$37 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^{-1}$
金	$2.1 \cdot 10^9$	$3.15 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^{-1}$
算 术 平 均 值			$5.3 \cdot 10^{-2}$

如果考虑到集中在表外矿石、次生晕和分散流中的储量（它们大致与计算的矿石储量相等），则平均富集度就应当提高一倍，估计为0.1%，而这仍是一个极小的数字。处于分散状态的储量是如此之大，可以把它作为将全球性工业矿石储量翻好几翻的后备。

§3 成矿元素的普遍分散与其深部富集作用之间的成因联系

在第2节中已经阐明，成矿元素在自然界中以两种状态存在：一是普遍的原生分散形式，一是局部富集（矿床）的形式。这里自然会产生一个问题：这两种形式（首先是分散和深部矿床）是否存在某种成因联系，如果有，是什么样的联系？应当承认，这是成矿作用的一个基本问题，这一问题将怎样解决，不论是进一步解决这一问题的特点，还是解决办法的普遍适用程度，都将取决于对此基本问题提出什么样的假设和前提。为此我们首先指出，不管矿床的成因如何，根据所观察到的产出地质条件，特别是根据与围岩的关系来判断，所有矿床都是在岩石圈整体固结后（这时，岩石圈内部就已存在有分散的成矿元素的原始积聚）才形成的。对所有后生矿床，包括岩浆期后矿床来说，这一点表现得尤其明显，正因为如此，它们才得到一个共同的名称。不过广义地说，这种情况无可争辩地适应于所有矿床，无一例外。结果，关于岩石圈与金属矿床的时间关系问题便有了完全肯定的解答：总的来说，矿床是在岩石圈生成之后，也就是在成矿元素于其中发生原始分散之后形成的。

在类似的情况下，可以提出矿床如何形成的两种推测：深部“矿浆”侵入到岩石圈中；起初分散在地壳岩石（和地幔）中的成矿物质后来发生富集。

第一种推测没有找到任何地球化学证据。如果这种推测是可信的，那么对地壳本身、上地幔和陨石所做的大量地球化学研究，就应当得到某些有利于说明在地下存在着准备好的“矿浆”的证据，那怕是与铁-镍陨石类似的“矿浆”的证据（铁-镍陨石一般被作为地球内部存在着已固结铁镍源的证据）。但对于大多数金属（铜、铅、锌、锡、钨、钼等）没能确定有任何类似的证据。此外，对于地壳来说，这种推测起码是与A.A.萨乌科夫关于重熔结果的意见是矛盾的。归根结蒂，现有的全部资料都证明，所有成矿元素起初都是分散的，这样一来，也就证明了第二个推测。目前，苏联及国外的地质学家都公认这样一种观点，分散与深部成矿富集（矿床）是有成因联系的。

根据科学院院士B.И.斯米尔诺夫的意见，原生和再生的岩浆以及围岩中的分散元素是矿质（成矿元素）的来源。原生岩浆是地壳下的原生似玄武岩浆的派生产物，可作为橄榄岩和辉长岩建造的岩浆矿床的成矿元素（铁、钛、钒、铬、镍、铜和铂族金属）来源。再生岩浆（通常为酸性成分）是在地球沉积壳下部重熔过程中产生的，它侵入到沉积壳的上层，并以花岗岩的侵入为开端。锡、钨、铍、锂、铌、钽是花岗岩类矿床的标型金属。到处分散着的成矿元素依靠岩浆的混染作用和岩浆期后产物的淋滤作用，通过岩石内的深部循环而进入矿床。

Я.Н.别列夫采夫等认为，地壳和壳下带的岩石是形成各种类型内生矿床的矿质源。对壳下带和地壳来说，成矿物质的提取和搬运方式是不一样的：壳下带是似玄武岩浆、含矿流体；地壳是动力变质作用、超变质作用、花岗岩化作用、具化学活性的热液穿过岩石的渗透作用。

Л.Н.奥弗钦尼科夫以及岩浆与成矿直接有关论点的拥护者(Л.德洛奈、К.Н.波格丹诺维奇、Л.林德格林、Л.埃孟斯、В.А.奥布鲁切夫、С.С.斯米尔诺夫等),都非常明确和肯定地发表过关于硅铝质系列的深成热液矿床与花岗岩岩浆有关的意见。

1、深成硅铝质热液矿床是由花岗岩岩浆作用产生的。这类矿床形成和分布的地质条件证明,这些矿床的形成过程可能只遵循下列顺序:花岗岩熔融体的侵入→成矿溶液的分离→成矿溶液向上运移→沉淀。

2、硅铝质热液矿床的形成是一个处于分散状态的金属发生富集的过程。岩浆源本身和产生成矿溶液的岩浆是这些矿床的金属供给源。

美国地质学家的观点只是在一些细节上与苏联研究者的这种观点有差别。例如К.克劳斯科普夫研究过这样一些问题:金属的原生源在什么地方,成矿动因是在何种含量很低的原始物质中产生的,这是一种什么样的动因,它是以什么方式把元素收集起来并以富集的形式沉积在矿床中的等。在研究中他指出下面几点:

1、金属以分散状态在其中广泛分布的某些岩石、土壤、沉积物或岩浆,通常被看作是这些金属的最终来源。常常把形成常见侵入岩(首先是酸性系列的侵入岩)的岩浆看成是金属的来源。地幔可能是金属的原始来源,但目前应当认为下述推断是最有道理的:金属矿床的主要金属来源存在于地壳中,如果个别金属可以从地幔中迁移出来,其规模也是非常小的。

2、对于与基性岩体有关的矿床来说,岩浆分结作用起着成矿动因的作用。对于与花岗岩类岩浆作用相伴的热液矿床来说,作为成矿动因的是岩浆期后流体和各种成因的热水(岩浆热水、变质热水、残余热水和陨石成因热水)。

3、К.克劳斯科普夫认为,形成热液矿床的成矿动因和使金属在矿床中有效地富集起来的可能机制,是与(酸性花岗岩类)岩浆的结晶同时发生的物质分异作用。火山作用在含矿溶液形成中的作用尚不清楚,但不可否认有成因上的联系。

作为总结,我们指出,根据地质人员在整个地球上的观测,可以确定:1)大多数金属矿床在区域上是与火成岩体接近的;2)一定金属的矿床有选择地产生在一定种类的岩浆岩中;3)许多热液矿床围绕着一一定的火成岩体呈有普遍规律的原生带状分布;4)矿床与岩墙系、岩墙系与侵入岩之间存在着经常而密切的联系;5)金属矿床与一定的火成岩系列存在着地球化学共性;等等。把这种总结看作是原始岩浆源和岩浆期后矿床有直接成因联系的自然证据,是完全正确的。这种总结可以作为成矿元素在岩浆中的分散(因为成矿元素在岩浆中不可能有其他状态)与岩浆期后-热液矿床之间同样有这种直接联系的证据。

这样,根据所有地质和地球化学实际资料,下面我们就可采取这样的论点:在成矿元素的分散和深部富集之间存在着直接的成因联系。深部富集在后,是依靠某些地质体(首先是在原始岩浆)中原先曾普遍分散的成矿元素富集而成的。

§4 深成热液矿床及其特征

本书的宗旨是要查明某种金属在其矿床中的储量与矿石中这一金属品位之间的定量关系。不了解成矿元素的来源,成矿物质的提取、搬运、沉淀条件、以及原始产物、中间产物和最终产物的特征等,就很难解决这类问题。同时,存在有许多不同系列、不同类别的深部矿

床，自然可以想见它们的形成条件也不会一样。因此，首先必须选出某一系列和类别的深部矿床来研究，其余类别的矿床则参照它来解决。而所选择的类别应当是最有普遍意义的。

毫无疑问，岩浆成因系列的矿床在其成分中所含的元素种数是最多的，对所有后来的矿床而言，它们是原始矿床。选择这种系列的矿床作为我们这项研究的基准矿床依据是充分的。但岩浆成因成矿的形成条件十分多样。下面讨论时，宜进一步缩小选择范围，办法是限制所选用的矿床类别：第一要选择科学和实践方面非常重要的矿床类别，第二要选择其某些特征对其他类别金属矿床也是有代表性的矿床类别。

根据上述限制，就有充分理由从深部岩浆成因系列的矿床中选出热液矿床。实际上，根据Л.Н.奥弗钦尼科夫的资料，在与花岗岩浆有关的硅铝质系列的热液矿床中，集中了世界钨、铜、铅、锌、金储量的40—55%，几乎全部的钼储量，3/4原生锡矿床储量，1/5铀储量等。这些数字既说明了这类热液矿床的工业意义，也说明它们在自然界出现的相对规模。主要起作用的成矿因素是热水，在所有岩浆期后活动的原始产物中，包括伟晶岩熔融体和火山成因溶液，热水是最主要的组分；热水参与溶液沉淀的成矿作用。最后，在热液矿床中极其清晰地确定了矿床与母岩浆中成矿元素的原始分散有直接关系，这一点实际上已为所有研究者无条件接受。归根结蒂，就已知情况看可以认为热液矿床起着中心的作用，故选它作为基准矿床。

下面根据В.И.斯米尔诺夫、В.Н.科特里亚尔、Г.К.赫耳格松等人的资料，将这类产物的特征作一简要描述。后文我们将用到这些特征。

1. 可以认为，元素的普遍分散与其矿床之间有着直接的关系：矿床是由原先发生过分散的元素通过集中而形成的。

2. 花岗岩类岩石及成因与其有关系的岩浆期后石英脉和锡、铜、铁、铅、锌等金属的矿床，当初处在统一的、彼此混合的原始物质综合体中。

3. 集中到矿床中的金属只占以分散状态存在于原始岩浆中的成矿元素的很小部分（按全球统计为0.05%，按局部地区计算不超过10%）。因此，完全可以认为上述原始物质在化学成分上与已知的花岗岩类岩石是近似的。

4. 岩浆水是对原始物质有强烈作用的物质，作用结果产生含矿热液，后者再形成岩浆期后矿床，而花岗岩类岩石则由残余的硅酸盐熔融体形成。还有一种更为广泛的看法，认为深部热液矿床是由在地表下循环着的炽热矿化气液水溶液形成的。

5. 上述溶液中的水可以有不同成因：岩浆的、变质作用的或者渗滤的。实际的热热水溶液很可能是混合成因的，不过近些年来认为变质成因的水有很大意义。本书作者则坚持热液水主要是岩浆成因的观点。

6. 岩浆水的平均温度为700℃，压力为每平方厘米为数千克力左右。这种状态下的水腐蚀性极强，可以溶解、保持和以溶液状态搬运物质，搬运的物质质量大大超过正常条件下所观测到的数量。

7. 热水溶液的物理化学具有自己的特殊性。

可以认为，主要的溶剂是其中含有矿物盐类和气体组分的热热水。纯水的临界温度为374℃，随着所溶解物质的数量增加，临界温度亦升高（例如，对26%的食盐溶液来说，临界温度升高至700℃）。因此可以认为，分离出的水热体呈液相存在。