



碱交代成矿模式及其成矿机制的理论基础

胡受溪 周顺元 任启江 孙明志

我们认为：确定热液矿床的成矿机制和拟定成矿模式，必须建立在成矿作用过程及其产物在时间上的演化和空间上的分布，成矿物质来源、搬运形式和集中条件等基础之上，而这些问题都是热液成矿的基本问题。

热液成矿过程经常最完整地表现在热液的交代蚀变过程中，成矿溶液从产生到结束总是随着交代蚀变作用，而成矿物质的集中却经常是发生在其中某一或某些阶段。现在，由于勘探和开采方面大量资料的积累，对矿体根部及其较深部位的情况，有了较深入的了解，发现许多矿体的下部常广泛发育很厚的碱交代蚀变带，而这类交代蚀变带，常是成矿物质来源的重要“基地”，同时在矿体的上部或顶部常发育酸性交代蚀变带，如硅化、氢交代、硫酸盐化带等。因此，研究交代蚀变过程及不同蚀变相带在空间上的分布规律，是更好地掌握成矿的全过程和拟定矿床成因模式的最重要根据。

交代蚀变作用在时间上表现出阶段性，常相应地反映在空间上彼此有成因联系的不同交代蚀变相有规律地更替和叠加，客观地反映出成矿过程中成矿溶液物理化学性质及其演化。而不同的成矿元素，由其地球化学性质所决定，在一定的交代蚀变带集中成矿。

大量资料表明：成矿溶液常是含有不同盐度的热液或热卤水体系。而这些盐类中的阳离子 Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 以及阴离子 Cl^- 、 F^- 、 OH^- 、 S^{2-} 、 HS^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 BO_3^{3-} 等都是重要

的矿化剂，因为成矿元素常是络合物的形成体或中心离子，而上述阴离子是形成络阴离子的好配位体，同时碱金属和氢离子是形成稳定和易溶络合物所不可缺少的。上述离子的浓度或活度以及热液的温度和压力的变化，常控制着交代蚀变作用，成矿物质的转移和集中以及它们的分带性。这种分带性是与酸—碱分离、钾—钠分离以及成矿元素的活动性紧密联系的。

由于许多气化—热液矿床的形成与碱交代作用有成因联系，同时交代蚀变带和成矿元素的分带是与碱交代过程在空间上和时间上的演化发展有联系，因而我们称它们为碱交代成矿模式。

根据我们和国内外许多人及单位对与花岗岩有关的钨、锡、铍、铌、钽等矿床，斑岩铜矿，斑岩钼矿以及宁芜火山岩地区铁矿等研究确定的成矿模式，已被大量事实所证实，也为许多人所公认。现在进一步从理论上总结将有一定意义。

对比上述几个典型的成矿模式，可以发现成矿过程的一些共同的特征和相似的成矿机制。与钨、锡、铍、铌、钽有关的花岗岩的成矿模式（空间上自下而上，时间从早到晚）是：

钾化(带)→钠化(带)→云英岩化(带)

K Na H, Li, SiO_2 , F(K)

斑岩钼矿、斑岩铜矿成矿模式：

钾化(带)→〔钠化(带)〕→绢英岩化或黄铁

K Na Si, H, (K)

绢英岩化(带)→泥化、硅化、明矾石化(带)

H, Si, SO_4^{2-}

凹山式、梅山式和吉山式铁矿或“玢岩铁矿”成矿模式:

浅色蚀变(带)→深色蚀变(带)→浅色蚀变(带)

钠化(带)→钙铁镁交代(带)→泥化、硅化、
Na Ca, Fe, Mg H, Si,

明矾石化(帶)

 SO_4^{2-}

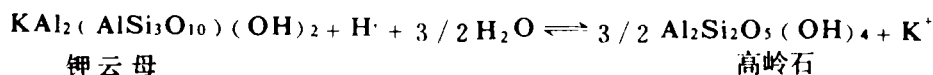
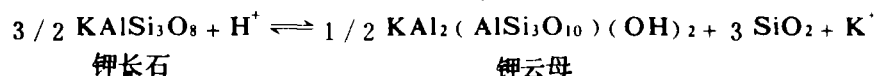
此外,一些稀土碳酸盐岩矿床,铀、金、铅、锌等矿体的下部也存在着碱交代带。由此可以发现这些碱交代成矿模式的共同特征和规律:

1. 矿化过程表现出成矿溶液在时间上从早到晚, 空间上自下而上的发展过程, 在矿化最强烈的地带成矿溶液表现出上升的特征。因而具有明显的垂直分带特征。成矿溶液的上升主要由温差和压差所引起。

2. 矿化过程是温度、碱度或 pH 值, K^+ 、 Na^+ 离子的活度或 K^+/H^+ 、 Na^+/H^+ 活度比的降低或酸、碱的分离过程, 或是金属离子, 特别碱金属离子有规律的更替过程。

3.矿体最下部(或其周围)的碱交代带常是成矿物质的活化转移带或贫化带。

4.不同蚀变带中成矿元素的分配或集中主要是由他们的活化转移能力所决定的;并且是在退



Hemley (1961) 对 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 体系所做的实验结果, 与上述相似:

钠长石 \rightleftharpoons 钠云母 \rightleftharpoons 高岭石(或叶腊石)

而两者结合起来的 $K_2O-Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 五组分体系的平衡可以说明, 从钾长石化→钠长石化→云英岩化或绢云母化, 黄铁绢英岩化→粘土化(或叶腊石化)的时间或空间上的发展过程, 以及温度、碱度、 K^+/H^+ 、 Na^+/H^+ 活度比降低的成矿过程。

深入分析可以使我們认识到: 控制上述几种有代表性的成矿模式和成因机制的因素, 除温度、压力、离子活度、pH值外, 具体来说, 是由

化的碱交代作用过程中发生的。

J. J. Hemley (1959, 1961, 1969) 的实验资料和结论, 对解释这些成矿模式中的成矿过程, 具有重要的意义。他们实验证实了 $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 体系中钾长石、云母和粘土矿物的平衡条件(图 1)。

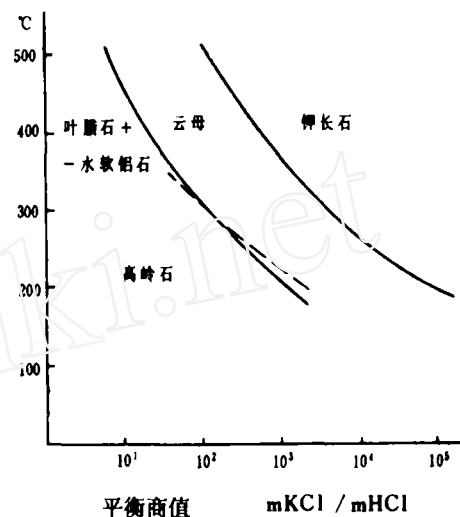


图1 在 $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 体系中 $mKCl/mHCl$ 活度比与温度对钾长石 \rightleftharpoons 云母 \rightleftharpoons 粘土矿物平衡的关系实验图解

钾长石 \rightleftharpoons 云母 \rightleftharpoons 粘土矿物

其交代反应如:

如下的酸—碱分离和钾—钠分离及热液运动的动力学体系所决定的。

过滤效应的差异所引起的酸—碱分离

Д. С. 柯尔任斯基(1965, 1976)和 Л. Н. Овчинников(1953, 1962)所强调的: 由于酸、碱(或基)的渗滤效应的差异, 即酸性组分在岩石间隙或紧闭的裂隙中的渗滤速度较碱(或基)为快, 因而产生“酸性超前波”。其主要原因是 F^- 、 Cl^- 等酸性离子的水化离子半径较碱金属 K^+ 、 Na^+ 的水化离子半径为小, 这是因为当盐分在水解过程中, 阴离子 F^- 、 Cl^- 等周围围绕的是 H^+ , 而阳离

子 Na^+ 等周围是 OH^- 。但是, 实验证明: 这种盐类溶液直接发生酸、碱分离的渗滤效应是有限的, 但是如果考虑酸—碱挥发性和水解效应的不同, 结合在热液的沸腾作用或挥发作用等的影响, 则这种“酸性超前波”的理论更有基础, 并更符合地质实际。

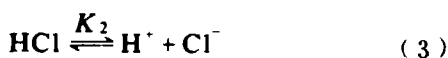
盐类在不同温度和压力条件下发生水解过程中引起的酸—碱分离及其活度的变化

含盐溶液在不同温度、压力或溶液密度条件下的水解常数, 以及它们进一步的酸、碱的解离常数的不同, 是引起酸—碱分离的重要原因。

Barnes、Ellis (1967) 和 Helgeson、Kirkham (1967) 的实验资料(图 2) 清楚表明: 在高温和超临界条件下, 如当 KCl 发生水解时,



以及 KOH 和 HCl 进一步水解时,



式中 K_1 , K_2 为平衡常数; $K_1 \gg K_2$, 故早期高温成矿溶液中碱金属和 OH^- 的活度明显大于 H^+ 和 Cl^- 等活度, 即 $a\text{K}^+/a\text{H}^+ > 1$, 使溶液具碱性, 这是促使早期碱交代的重要原因之一。但是随着温度降低(100~200℃), 则会产生相反的情况, 有利于氢交代作用的发生。

不同温度和压力条件下, 钾、钠盐类在水解过程中所引起的钾、钠分离

与花岗岩类有关的热液成矿过程中, 钾交代往往早于钠交代, 虽然钾交代岩石中钾含量常大于钠, 但在气液包裹体中 Na^+ 离子含量常大于 K^+ , 在这种交代蚀变过程中, 引起钾—钠的分离和固相、液相中分配上的差别, 其重要原因之一是: 在符合热液成矿深度(< 4 km) 的压力(< 1.5 千巴) 条件下, 在高温和超临界状态下, KCl 在溶液中解离常数常明显大于 NaCl 的缘故。此从 Barnes 等的实验资料(图 3) 可以清楚看出: 随着温度的降低、或压力或溶液密度的升高, 则出现

相反的情况, 据 P. M. Orville (1962) 的实验资料, 在高温、高压蒸气相中, Na/K 比是随着温度的降低而增高(在 2000 巴条件下, 2 克分子碱金属氯化物的溶液中 Na/K , 在 670℃ = 2.9, 600℃ = 3.3, 500℃ = 4.0)。

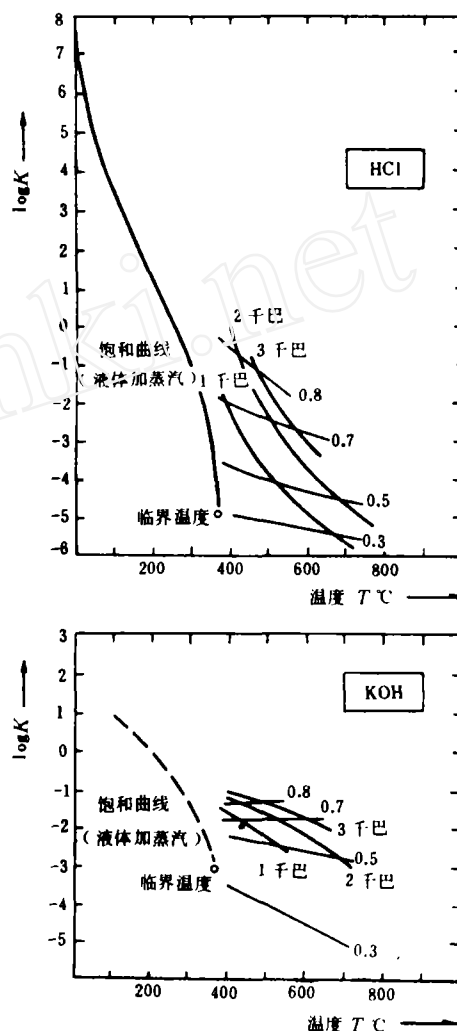


图 2 HCl , KOH 在不同温度、密度和压力条件下的标准克分子分离常数

沸腾作用或气化作用引起的酸—碱分离

众所周知, 气化—热液中酸性组分明显不同于碱性组分之处, 即它们具有强或较强的挥发性, 而碱性组分一般不具挥发性, 因此, 当高压条件下的成矿溶液进入裂隙带、破碎带或火山机构等减压带中, 由于发生沸腾作用, 产生低密度

的气体和密度较高的液体两个相,使 HF、HCl、CO₂、SO₂、SO₃ 等酸性组分在气相中集中,并“跑”在溶液的前锋,而 K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 等碱(基)离子在后部或下部液相中相对富集,使溶液中碱的活度明显升高,从而在下部广泛发育碱交代蚀变,而在上部则可广泛发育酸性淋滤或氢交代作用,或以 HF、HCl、CO₂、SO₂ 等射气形式喷出大气中。当由于温度的降低,引起酸性组分的凝结或凝聚,使上部溶液的酸度降低和 pH 值的增高,从而进一步促进酸性淋滤作用或氢交代作用的进行。

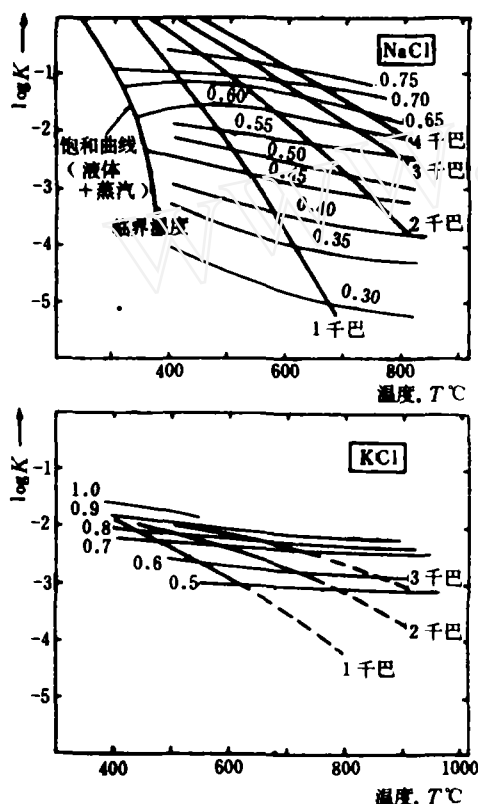


图3 NaCl和KCl,在不同温度、压力和密度条件下的标准的克分子解离常数(据 Barnes)

对围岩交代过程中发生的酸碱分离

高温的热卤水或含盐的热水溶液,在与围岩交代过程中发生一系列离子交换及其他复杂的反应引起酸—碱分离,特别是在早期碱交代过程

中,由于强碱(基)离子 K⁺、Na⁺ 等相继进入固相(形成钾长石、钠长石和钠柱石等),而较弱的基或弱基,如 Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺、Fe³⁺ 等转入溶液,同时由于强酸 F⁻,特别是 Cl⁻ 只是少量或相对较少地转入固相,形成萤石、黄玉、方柱石、云母和含氟角闪石等,因此,造成酸—碱分离,使成矿溶液向酸度增加的方向转化。王玉蓉等(1980)实验资料,充分证实这样的酸—碱分离和 pH 值变小的趋向。他们以闪长岩 + 钙长石 + SiO₂ + NaCl 等作初始物质,溶液的 pH 值为 7 的中性溶液作实验,在温度 400~550℃ 条件下,反应后溶液的 pH 值为 4.6~5。此外,Althaus 和 Jahanes (1969)用海绿石、伊利石、蒙脱石与 NaCl 的溶液在高温(350~550℃)、高压条件下作用,反应后溶液呈酸性。这是由于强碱 Na⁺ 进入固相,形成钠长石和钠云母等,而 Fe²⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 较弱或弱基进入溶液,同时强阴离子 Cl⁻ 等留在溶液中的缘故。

碱交代过程中阳离子更替的
规律及成矿专属性

概略地说,与花岗岩有关的碱交代成矿过程表现为: K⁺ → Na⁺ → Li⁺、H⁺ 阳离子的更替过程;与中性岩有关的铁矿碱交代成矿过程为: Na⁺ → Ca²⁺ → Fe²⁺、Mg²⁺ → Fe³⁺ → H⁺ 阳离子的更替过程,此符合于电负性(K=0.8, Na=0.9, Ca=1.0, Mg=1.2, Fe²⁺=1.65, Fe³⁺=1.8, H=2.1)和电离势等的增高过程,也即是强基逐渐过渡为弱基的交代过程。

碱交代作用还表现出明显的成矿专属性。由于花岗岩类岩石是改造富钾的沉积物或地壳物质大量参加的情况下发展而成的,因而经常以钾交代为先导和占优势。但由于随着交代作用的进行,钾离子转入固相,而钠离子转入液相,以及由于温度降低引起 NaCl 解离常数增大等,因而引起钠化;由于钠转入固相,较弱的碱—Li⁺ 的活度相对升高,使它有可能在云母化或云英岩化过程中参加到各种云母中;Rb⁺、Cs⁺、虽 是强碱,但由于其浓度小,因此也在晚期集中;对于 Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺ 较弱的基来说,它们在早

期碱交代过程中被交代转移,而在后期云英岩化及更晚的交代或成矿过程中形成萤石、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黑钨矿及各种碳酸盐等。在铌、钽等交代蚀变花岗岩中, Ta/Nb 、 Hf/Zr 、 $\Sigma Y/\Sigma Ce$ 、 U/Th 比值在成矿过程中随着时间(从早到晚)和空间(自下而上)而增高的规律,是由这些元素对地球化学的活动性所决定的。

与海水和膏盐沉积层有关的成矿作用(如“玢岩铁矿”,黄铁矿型铜矿等)往往以钠化为先导。在钠化过程中,强基(Na^+)替换了弱基 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 、促使它们活化转移,并在碱交代带的上部的退化碱质交代带中集中成矿,并形成深色蚀变带。

所有这些矿床最上部的酸性交代或氢交代带的发育,除了上述酸—碱分离原因外,还因为在上部靠近地表的环境下,由于氧逸度或 Eh 的升高,引起硫离子的强烈氧化,产生 SO_4^{2-} ; 这是在一些矿床上部造成强烈硫酸盐化(如明矾石化、黄钾铁矾、石膏化及重晶石化)以及有关的交代蚀变(如叶蜡石化、泥化和硅化等)的原因之一。

流体动力学问题

要进一步解决上述成矿模式的成矿机制问题,还需要研究造成空间上分带的流体动力学问题。

虽然现在还有一些人从岩浆—热液成矿观点出发,来拟订斑岩铜矿成矿模式(如 Rose, 1970; Phillips, 1973等),但现在更多的资料,使愈来愈多的人相信,热液成矿过程岩浆水、地下水(深部层状地下水等)、下渗雨水相互混合的重要意义。R. W. Henley (1978)等认为:如果成矿作用发生在 $350^{\circ}C$ 以下,则岩浆输入物可能受到后来进入的大量地下水成分的越来越大的影响。

现在有理理由认为,驱使层状地下水、岩浆水以及下渗雨水或海水构成混合溶液,发生环流,并在矿化带中成为上升溶液,其驱动力主要是由于岩体侵入、断裂、裂隙或破碎带发生,产生温度和压力梯度所造成的。M. M. 康斯坦丁诺夫

(1962)曾拟定地下水热液形成的动力学图解,他指出:由于岩体的侵入,使周围岩石加热,创造了使地下水在岩体上部沿着裂隙向上运动的动力,其结果破坏了早期地下水的动态,使它们从周围地区向着加热地方流动,并成为上升流。

随着斑岩铜矿形成作用中有地下水参与的证实, Norto (1972, 1976)等提出了另一种可供对比的模式,认为其中对流中的地下水径流一个正在冷却,但尚未完全固结的深成岩体导致矿石的形成作用。他认为,侵入体只是单纯地起着—个能源的作用,以驱动地下水系统而已。我们认为,在上述类型矿床的成矿过程中,只是单纯强调地下水的意义,而完全忽视岩浆水的作用,这是与过去只强调岩浆水的作用,而完全忽视地下水的作用一样,也是片面的。

现在有种理由使我们认识到:驱使层状地下水、岩浆水以及下渗雨水或海水等构成混合溶液发生环流,并在矿化带中汇合成上升溶液,其驱动力最主要是由温度和压力梯度(或温差、压差)所造成的。异常的温度梯度主要是由岩体或岩浆所造成的;而各种溶液的压力差是由于裂隙带、断裂、破碎带、接触带等的产生所造成的。由于温差和压差的存在,便驱使各种成矿溶液向着温度和压力降低的方向运动,特别在配合断裂带、裂隙带和破碎带的岩体钟状突起部分汇成上升气—热液柱,并使地下水、下降雨水或海水发生环流(图4)。同样,由于异常的温度和压力梯度的存在以及自下而上的交代蚀变发展过程、沸腾作用和酸碱分离作用等,因此,造成交代蚀变带在空间上和时间上有规律的更替,以及成矿元素的活化转移和有规律的集中和分带现象。

这里有必要指出以下几点:

1. 根据岩体向下增大的一般现象以及与此相适应的地热等温线的分布特征,理论上没有根据认为 I. D. Lowell 及 L. M. Guibert 等许多人,对斑岩铜矿所拟订的同心状的交代蚀变和矿化的模式是完全适合实际的。事实上,我国一些花岗岩有关矿床、“玢岩铁矿”以及斑岩铜矿普遍不存在这种垂直方向上同心状分布的特征。

(下转第46页)

(上接第4页)

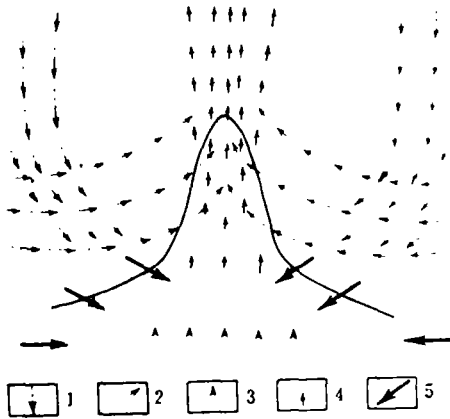


图4 由温度和压力梯度所驱动的下降雨水(或海水)、地下水和岩浆水的环流模式
1—下降雨水; 2—封闭的地下水; 3—岩浆水; 4—混合溶液; 5—被吸入岩浆体或侵入体中的各种地下水

2. 岩浆—热液不能全当作是来源于地幔的初生溶液。

事实上, 不论是地壳中产生的再生、重熔岩浆, 或者来自地幔的岩浆, 最初含水是不多的, 但一旦当它们进入富水的地壳环境中, 它们构成“负水区”, 吸收周围地层中的水, 使它们成为混合的岩浆溶液, 它们不一定是原地的地下水, 而相当一部分来源于地壳中、下部。

3. 矿体下部的广泛钾交代, 不可能由贫钾的地幔初生溶液所引起, 最可能是与沉积物或地壳有联系富钾的溶液有关。



海洋的挑战

据估计, 太平洋底有丰富的锰或多金属结核。若与陆地相比的话, 在陆地上开采这类金属每投资9美元其年产值只有1美元, 而大洋中采矿每投资1美元每年可收回3美元; 可以预计, 这些海洋产的金属将只及陆地金属价格的1/5或1/10。

据估计, 大陆上这些金属矿产的储量为: 镍0.54亿吨, 铜4.60亿吨, 钴0.015亿吨, 锰2亿吨。

海洋, 这个占地面积达3.62亿平方公里的地方, 在那蔚蓝色的海水下面, 据认为有15%的海底赋存着结核。这一粗略的估计与“挑战者号”考察所得的资料是一致的。“挑战者号”在362个点上进行取样时有62个点上发现了这类结核。因此, 海洋中锰结核的总重量约为5,500亿吨(湿), 这就是粗略估计所获的远景。

从世界范围的取样来看, 太平洋底锰结核的金属含量较高。从采选条件来看, 锰结核的平均品位应为2.25%(Cu+Ni), 边界品位为1.71%, 海底含锰结核的丰度每平方米平均应有10公斤。这类地区所估算的储量即可列为能供第一代开采的远景储量。已发现具备这一条件的地区多集中在北太平洋, 一个在北纬7~15°、西经120~155°之间, 即克拉

里昂—克利珀顿岛之间, 面积约350万平方公里。另一地域在夏威夷之西南, 面积约80万平方公里。此外在印度洋还有一面积为50万平方公里的具较高品位的锰结核区。据此估计, 北太平洋上克拉里昂—克利珀顿岛之间, 如只以1/3面积具备符合要求的结核丰度和品位去推算, 其远景储量约为150~250亿吨(湿), 再去掉30%水份, 应为105~175亿吨(干)。这些结核平均含镍1.24%, 铜约1.01%, 钴约0.23%, 锰为27.5%。因此各种金属在该地域的锰结核中的远景储量为镍1.3~2.15亿吨, 铜1.05~1.75亿吨, 钴0.25~0.4亿吨, 锰30~50亿吨。考虑到采矿回收率约为20%, 选矿冶炼回收率铜、镍90%, 钴60%, 锰85%, 折算后可得镍0.25~0.40亿吨, 铜0.2~0.3亿吨, 钴0.03~0.05亿吨, 锰5~8亿吨。

从上述最有远景地域的估算可以看出, 大洋底结核中的镍、钴、铜和锰的储量, 仅此一处已与陆地上的相等, 大洋中锰结核的开采将为将来的世界供应做出贡献。

李志锋摘自采矿和冶金学会汇刊(A部分)

《采矿工业》90卷1981年1月版)