



沉积铁矿矿物成分的演化

沉积铁矿的形成与铁从陆地带入沉积盆地有关。有足够的资料可以使人确信，陆地上的铁所以能够活动，地下径流起了巨大的作用。据Φ·А马卡连柯的资料，现代大多数平原河流的地下补给，主要是靠地下径流上层的土壤水。这个特点可能同样适用于地质年代更早的河流，这一点恐怕是不容置疑的。

在上升到地表的地下循环水中，铁呈亚铁状态，主要是重碳酸盐形式存在。铁的重碳酸盐在地表不稳定，氧化和水解后从中形成氢氧化物。显然，沉积物和部分矿石的矿物成分即与这种氢氧化物有关，并在沉积变质过程中产生典型特征。

铁氢石是沉积矿床与原生沉积矿床铁的氧化物的原生物质

对现代来源地的含铁沉积物的研究表明，它们大部分是由不久前发现的属于铁的氢氧化物组的矿物——Ферригидрит(本文暂译作铁氢石，下同。——译者)—— $\text{Fe}_2(\text{H}_3\text{O}_4)_3 = 2.5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$ 所组成。

铁氢石是一种不稳定的胶状矿物，随时间的推移会自然地变为赤铁矿。在自然界中，它一般是因 Fe^{2+} 在溶液中的氧化反应而在生物作用或无机物作用下急速析出铁的氢氧化物的过程中形成。

铁氢石的大规模生物合成过程是有嗜铁菌类加入的，其中主要是Gallionella ferruginea, Leptothrix ochracea, Toxothrix trichogenes。它们在可溶有机物含量不多并呈近于中性反应的溶液中是很活泼的。这种溶液在现代仍有广泛的分

布。如果溶液的pH值和温度已使嗜铁菌类的生命活动成为不可能，形成铁氢石所必需的 Fe^{2+} 无机化合物的迅速氧化则可以借助于已溶二氧化硅的催化作用而发生。

新鲜的铁氢石是一种胶状析出物，在伦琴射线下或呈现为衍射图形，或（在晶体较小的情况下）仅仅出现电子衍射图形。在电子显微镜下，冷水源沉积层的大多数铁氢石可以分辨出嗜铁菌类的残体，有些铁氢石是由形态不规则的颗粒组成。

铁氢石从出露于地表的含氧化亚铁的地下水中析出，是一种普通的现象。它的碎絮片进入溪流、河道，之后到达沉积盆地。很有可能，在氧化反应下形成的大部分铁的氢氧化物，在过去的地质年代内正是以铁氢石的形式进入沉积盆地。

沉积物中的转换，主要决定于其中所含的有机物；如果有机物含量低，在沉积变质过程中不发生铁的还原，铁氢石则变为赤铁矿；如果有机物含量高，铁氢石的铁被还原并形成氧化亚铁矿物，如菱铁矿、绿泥石等。

由于铁主要是以铁氢石的形式进入沉积盆地，因此可以把它看作是变质与非变质沉积铁矿基本部分的原生物质，铁矿为鲕粒集合体或含铁石英岩。

鲕铁矿属于浅水沉积物，其普遍的特点是碎屑物质的含量甚少，证明盆地中含矿物质的堆积是发生在构造活动的静止地带或距剥蚀区相当远的地方。含矿物质的沉积主要是发生在正常咸度的海水或淡化了的并不很大的水盆地内，其中有一部分是泻湖。在远离岸线的大型盆地中堆积形成的含铁石英岩物质，实际上并不含陆源碎屑颗粒的杂质。

沉积矿床铁的产生与强烈的地下化学活动过程有关。对大多数矿床来说,缺乏与火山作用有关的有力证据。

非变质与变质沉积铁矿的主要类型

鲕状赤铁矿矿石

年代最老的这类矿石见于晚前寒武纪地层中,例如,中国的震旦纪地层。鲕铁矿由赤铁矿、磁铁矿、鲕绿泥石与菱铁矿组成,在特兰斯瓦晚前寒武纪岩系中形成一个层位。鲕粒的核心主要是石英颗粒。在这种矿石形成过程中,氧化条件被还原条件所取代,致使鲕粒中的赤铁矿与鲕绿泥石同心互层出现。

最知名的Фанерозой期鲕状赤铁矿矿床是美国阿帕拉恰的克林顿矿床。矿层与透镜状矿体产于晚志留世浅水沉积层的不同层位中。在含矿地层的组成中,包括有铁质砂岩、粘土页岩和含有赤铁矿或方解石胶结物的砾岩层。具有赤铁矿层向铁质砂岩层过渡的现象。整个地层可以看成是含有多层鲕状赤铁矿的红层。J.H.卡斯坦诺和R.盖瑞尔思把比较纯的赤铁矿层的形成解释为岩屑(在已淡化的静水——泻湖中)与铁(在正常咸度的海水中)是分别沉积的。但更可能的是,在克林顿矿石的形成时期,碎屑物质的剥蚀是低的。因为这种矿石是典型沉积的而不是变质成因的,同时赤铁矿不可能从溶液中直接沉淀,所以应该认为原生沉积物铁的氢氧化物就是铁氢石。沉积变质过程基本上发生在氧化环境下,但局部铁又被还原并形成菱铁矿、鲕绿泥石与黄铁矿。

在加拿大纽芬兰岛的矿床中,铁矿赋存于奥陶系砂岩与粘土页岩层中,主要金属矿物是组成鲕粒的赤铁矿,胶结物为菱铁矿。赤铁矿鲕粒中的个别同心圆是由鲕绿泥石组成的。原因可能是在铁矿形成时强烈的氧化条件与还原条件相互交替,或是赤铁矿在个别的同心圆中被菱铁矿交代。菱铁矿的沉积说明矿质堆积的最后阶段是处于还原环境。鲕绿泥石与赤铁矿交互形成,看来是法国诺

曼底与布里塔尼志留纪矿石的形成特征。含赤铁矿或菱铁矿胶结物的鲕状赤铁矿矿石还见于捷克(巴兰多夫向斜)、英国(北威尔士)、西班牙(阿斯土里亚斯)、德意志民主共和国(提林根)及其它一些国家的奥陶系地层。

在乌拉尔的中泥盆统地层中发现许多鲕状赤铁矿沉积矿床,某些鲕粒中见有类似绿泥石矿物的析出物。中泥盆世鲕状赤铁矿见于法国,晚泥盆世鲕状赤铁矿见于比利时。

洛林(法国)的某些侏罗纪矿石在形成时也有氧化与还原条件交替的情形,因此在该处赤铁矿与鲕绿泥石的沉积是相互变换的。甚至环绕菱铁矿也可能产生某种数量的鲕状赤铁矿矿石。

鲕状赤铁矿形成于有机物迅速分解或根本不存生有机物的情况下。看来,铁是以铁氢石的形式被搬运到沉积盆地并自然地转变为赤铁矿。鲕状赤铁矿赋存于奥陶系、志留系与泥盆系地层中,说明它的形成是在地表植物出现之前,或只有少量发育的时期。这是值得注意的。

含绿泥石与针铁矿(褐铁矿)的鲕铁矿

此类矿石在各种时代的地层中都有赋存。其中年代最老的要属捷克的努契奇与德意志民主共和国提林根的施密特费尔德的志留纪矿石。里阿斯时期沉积层的大型矿床见于英国的克利夫兰,法国的洛林以及卢森堡多格岛所谓的“鲕褐铁矿”。在苏联,此类最大的矿床集中在刻赤盆地的第三系(基米里时期)地层中。还发现有许多中生代与第三纪的其他矿床。

这种铁矿的主要原生矿物是绿泥石,它的晚期蚀变产物为针铁矿(含水针铁矿)。绿泥石的蚀变强度与针铁矿的形成取决于局部的原因,而在某些鲕状矿石中,在针铁矿里边发现绿泥石残体是困难的。含铁最高的针铁矿鲕粒是依赖部分或全部被菱铁矿交代的绿泥石鲕粒而生成的。查瓦里茨基在研究克利夫兰的样品时首次确定了由绿泥石形成鲕铁矿矿石中的针铁矿(部分经过菱铁矿阶

段)的事实。后来的一些研究人员证实了这些矿石中不存在沉积的或沉积变质的针铁矿。在刻赤半岛,针铁矿矿石(“褐矿”)在以绿泥石为主的矿石(“烟草色矿”)之上构成类似铁帽的形状。此类矿石当中有些还是河床沉积物,如威海北部附近渐新统的铁矿石就是例证。

含绿泥石的鲕铁矿形成于沉积物中存在相当数量有机物的条件下。正象鲕状赤铁矿的形成情况一样,铁可能也是以铁氢石的形式进入沉积盆地;在有机物含量较高的情况下 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} 。

正如含赤铁矿的红色岩石向赤铁矿矿石过渡一样,也可见到含绿泥石的铁矿向富含绿泥石的岩石的过渡。它们的形成,斯特拉霍夫认为与“铁矿形成过程的过渡形式”有关,反映了进入盆地的岩屑与铁氢石之间量比关系的变化。

含铁石英岩

含铁石英岩或碧玉铁质岩,是最重要的—种铁矿。碧玉铁质岩是一种条带状的铁矿石,其中不同程度地富集有铁或二氧化硅的薄层互层产出。矿石的年龄约为20亿年(库尔斯克磁异常、克里沃罗格、上湖、拉布拉多、南非、西非、澳大利亚西北部),但其中有一部分可能形成于早古生代。

查明引起这样大量的铁进入盆地,以及分别以铁的氧化物与二氧化硅为主的析出时期交替发生的原因,对解决含铁石英岩的成因问题有重要意义。对上述两方面问题的第一点,有两种不同的答案:(1)铁进入盆地是由于强大的火山作用;(2)铁来源于风化壳。

按照赞成第一种答案的托契林的意见,铁是在水下火山作用时以绿泥石的形式进入海盆地。这种假说的基本依据之一,就是认为赤铁矿不可能从来自陆地的、溶液沉积的铁的氧化物中形成。但是,前边已经指出,由铁氢石产生赤铁矿是表生过程所特有的。最有可能的是,大多数元古代含铁石英岩的形成正如Фанерозой期的沉积铁矿一样,

乃是借助于从大陆岩石中携出的铁。由于在元古代的大气环境下缺乏植物,所以含氧量少,含碳酸多。因此,作用于表生带岩石的水比植被出现以后所含的氧要少得多,而碳酸含量大。结果使得大量的铁转变为重碳酸盐溶液。

大量的碳酸促使风化过程更快地进行。这个情况对于在下降水的作用下使铁强烈活动并被带入河流而后又进入前寒武纪沉积盆地的过程来说,具有头等重要的意义。大面积发育的富含铁的火山岩,有利于铁在碳酸含量高而缺氧的地下循环水中富集。

从地球大气层中很晚才出现氧的认识出发,克劳伍德得出一个结论,即铁是以 Fe^{2+} 化合物的形式进入元古代盆地,并在那里析出碧玉铁质岩物质。他还认为,在元古代大气层中几乎不存在游离氧,而盆地中铁的氧化所需要的氧是产生于水介质的光合作用过程中。但是,从硫的同位素分馏资料来看,在碧玉铁质岩堆积时期,地球大气层中氧的数量对于地表水中 Fe^{2+} 的氧化与铁氢石的形成是足够的。铁氢石的碎屑片进入河流并被带入沉积盆地。斯特拉霍夫曾经指出,元古代和元古代以后胶状凝结物(“铁锈”)对搬运铁起了很大作用。碧玉铁质岩所特有的硅质夹层的形成,是一个值得专门注意的问题。

二氧化硅胶液的特点是对电解质有很强的稳定性,它与pH值的大小成反比。铁的氢氧化物胶液则相当不稳定。在酸性或近于中性溶液(pH值达6.7)中,其粒子带有正电荷;这种溶液中所含诸如 $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})^{3+}$ 等三价铁的离子对 SiO_2 胶液起凝结作用。二氧化硅胶液与铁的氢氧化物胶液混合时,发生相互凝结。因此,它们的胶状粒子在缺少特殊的保护性胶质的情况下不可能同时存在于同一溶液中。此外,慕尔与梅纳德也指出,从海水中的二氧化硅与铁的氢氧化物胶状沉积物的混合物当中首先沉出的(要经过几天的时间)几乎是纯的二氧化硅。作者所作的实验也取得了相同的结果。

在前寒武纪时期,铁的氢氧化物与二氧化硅的凝结很可能是在电解质作用下发生于相应的溶液进入海水之前。由于强烈的风化作用,这种电解质在陆地水中的含量相当高。因此可以推测铁与二氧化硅不是以胶液的形式被搬运到前寒武纪盆地,而是呈胶状二氧化硅与铁氢石的悬浮物状态被搬运的。由二氧化硅真溶液形成二氧化硅薄层的可能性应该排除,因为它在电解质的作用下不能沉淀。

铁的沉积堆积的演化

在过去的地质时代由陆地进入沉积盆地的大部分铁氢石是在被地下水带到地表的 Fe^{2+} 氧化时形成的。沿着地壳上部的整个地层,即地下水的运动范围内,特别是在地下径流的上层,都有过铁的化学活动。促使二价铁以重碳酸盐形式过渡为溶液的已溶的碳酸气,对铁的活动起主要作用。 Fe^{2+} 的基本来源应该认为是岩石中含铁的硅酸盐。含氧的水同样可以引起岩石中硫化矿物的铁与各种成因的矿石转化为溶液。

在地球发育的所有时期,陆地上铁的活动主要是采取氧化亚铁的重碳酸盐的形式以及随后在沉积物中以铁氢石的形式富集。含铁硅酸盐类碎岩颗粒的剥蚀不能造成大规模的矿石富集。对于形成沉积铁矿而言,富含铁的古风化壳的机械剥蚀作用也不能认为是很大的,因为在剥蚀过程强烈进行的情况下铁的氧化物很少有可能离开陆源碎岩物质而单独存在。

在地球发育的历史中,铁以重碳酸盐形式活动的条件经历了很大的变化,其原因可归结为两个基本因素:(1)大气层以及大气水中碳酸气与氧气的含量;(2)陆地的气候特点。

地表植物出现以前铁的活动与铁矿的形成

地表冷却以后存在的漫长时期内,在已进入沉积盆地的陆地铁的化学活动中,起主要作用的是铁从含铁与碳酸气的硅酸盐类之中借助于地下径流而析出,同时形成 Fe^{2+} 重

碳酸盐。通过地表水使陆地岩石中的铁发生化学活动只有在太古代早期才起重要作用,而当时大气中游离氧的含量是微不足道的。在这个时期,铁主要呈溶解的低价氧化合物形式(主要是重碳酸盐)进入沉积盆地,因此它在盆地的水与沉积物中或多或少是均匀分布的。随着大气中游离氧含量的增加,借助于地表水的铁的化学活动减少。这是因为在硅酸盐的晶格中直接加强了 Fe^{2+} 的氧化,铁已经不可能以易溶化合物的形式过渡为溶液。地表溶液中的铁在部分氧化时,特别是在碱性环境中,以磁铁矿的形式沉淀。这个过程在实验室的常温下可以很容易再现。

到了元古代,大气中的氧含量更高,含氧的地表水直接引起硅酸盐中铁的氧化,因此地表水对于铁的化学活动的作用已经是微乎其微。大部分铁是随着地下径流水以重碳酸盐的形式进入河流。这种水中的铁迅速发生氧化并随之形成原生赤铁矿物质——铁氢石——的过程,是因为有嗜铁菌类参加,或是由于已溶二氧化硅的催化作用。

硅酸盐的强烈分解致使相当大量的二氧化硅转变为溶液(真溶液与胶体溶液)。由于较强的化学活动和不存在需要铁与硅的有机体,天然水中二者的含量(尤其是硅的含量)在前寒武纪比 ϕ анерозой期高得多。前寒武纪以后的时期,进入海盆地的游离二氧化硅与铁急剧减少,陆地与海洋的有机物对它们的吸收可能增加了。

根据希尼村的研究,在过去的地质时代,潮湿气候区域是相当广阔的,而且干燥气候区域的干燥程度也比现代为低。因此他认为,东西带上的气温变化差异是始于中石炭纪,在此之前地球的气候总的来说是等温的,它的基本变化主要表现为湿度的增减。但是,即使在干燥期,湿度也是相当大的,径流是强烈的。在陆地出现植物以前,由于大气中碳酸气含量高,热效应比较显著。沉积物中有机质含量低或根本不存在,促使铁氢石转变为赤铁矿,而铁则以这种形式被搬运。

地表植物出现以后铁的活动与铁矿的形成

地表植物出现以后（志留纪末到泥盆纪初），被带出而进入盆地的铁的胶体氢氧化物逐渐减少。其主要原因是大气层与大气水中的碳酸气含量降低，氧的数量增高。下降水中碳酸气含量减少，化学风化过程减弱，氧含量的增高，加强了直接在矿物中的 Fe^{2+} 氧化。结果使得以重碳酸盐形式转变为溶液的铁的数量显著减少。此外，陆地上的铁大量与有机物相互作用。在剥蚀作用较弱区域出现了形成湖沼矿床的前提，其中原生沉积变质矿物为菱铁矿。苏联土耳其铁矿区的碳酸盐矿床、中乌拉尔东坡的中生代矿床（阿拉帕耶夫矿床）以及科米自治共和国的一些矿床是这方面的例证。相当数量的铁集中在含煤地层中。在石炭系（正是地表植被繁茂时期）的地层中尚未发现有海成铁矿。

地表植被的发育，为大量有机物进入海盆地提供了条件。取代氧化赤铁矿矿石的是开始形成以低价-高价硅酸盐（含绿泥石）为主的矿石，其中含有一定数量的菱铁矿。

如果说，在植物出现以前由于大气中的氧含量低在降水的作用下铁的氧化过程进行缓慢，在植物出现后这个过程则是急剧加强，因此气候湿热地区铁的活动显著减弱。得出这个结论是根据现代气候潮湿的热带资料。这些地区的铁在风化壳形成过程中主要是在残积物中堆积。

地表植被出现以后，氧化反应较弱的区域开始对铁的活动起着最主要作用。这种情况似乎主要对气候温暖、湿度适当的平原高地（尤其是构造破坏地段）最为典型。这类地区铁的活动可以发生在相当大的垂直范围内。由于不同盆地沉积物中都含有大量的有机物，作为被河流搬运的铁主要形式是铁氢石，它在沉积变质过程中产生绿泥石与菱铁矿。

埃姆斯河（德意志联邦共和国境内——译者注）古河支流河床中的矿体，就是这种类型铁的现代含矿堆积。据鲁德斯的资料，铁是以氢氧化物的形式被河水搬运，菱铁矿

是在还原介质中通过富铁粘土沉积物的沉积变质作用形成的。

嗜铁菌类在铁矿形成中的作用

在形成工业沉积铁矿床的盆地中，从溶液中沉淀出铁的氧化物与微生物的生命活动无关。因为对此必须有 Fe^{2+} 的化合物。但是，在将近20亿年以前赋存于碧玉铁质岩层的大规模铁的堆积形成时期，即使是少量的 Fe^{2+} 化合物也不可能在溶液中长期存在。

大部分铁进入产生铁矿堆积的盆地，只能是采取实际上不含 Fe^{2+} 的铁氢石的形式。氧化亚铁的重碳酸盐只是进入受土壤水补给的 ϕ анерозой期的湖沼。但是大部分铁被搬运到海洋中（在现代仍被搬运）是靠含氧量高的河水。

Fe^{2+} 的化合物被带到地表是地下化学剥蚀的一种表现。嗜铁菌类对于铁的氧化以及地下水流出地表之后铁氢石的形成起着重要作用。根据不同的地质条件，铁氢石或是分散于沉积岩中，或堆积形成不同规模的含矿堆积。在缺少足够数量有机物的情况下，铁氢石转变为赤铁矿，若是沉积物中富含有机质，则转变成 Fe^{2+} 的化合物（绿泥石、菱铁矿等）。

现在还不可能提出嗜铁菌类在地球上出现的时间，但很可能在前寒武纪时期已经存在，即30亿年以前。在嗜铁菌类出现以前的时期，铁氢石的形成具有无机成因的性质，其原因是由共溶化合物、首先是二氧化硅引起的天然水中 Fe^{2+} 氧化反应的加快。

尽管水中含氧甚微，嗜铁菌类也可以参与陆地上铁的氧化过程。在地球发育的漫长历史时期中，这个过程不仅给铁的迅速无机氧化提供了条件，而且也促使了作为表生赤铁矿原生物质的铁氢石的合成。然而，铁在沉积地层中的堆积是决定于一系列地质因素的总合作用。

结 论

在早太古代，地表水的氧含量极少，以含铁重碳酸盐的形式进入其中的铁，实际上

并未氧化,而是分散在海水和海洋沉积物中。之后,到了太古代,铁的氧化有所加强,产生了在沉积物中形成表生磁铁矿的前提。在元古代,氧的数量已经足够产生作为赤铁矿原生物质的铁氢石。

沉积铁矿形成于地表的某些部位,这些地方的碎屑物质流蚀到沉积盆地的数量极少。由于地形的特点,化学风化的产物可以被搬运相当远,直到进入海盆地。既然大部分铁是来自地下径流强烈、具备有利于形成铁氢石条件的区域,因此在盆地边缘地带缺少足够数量有机物的条件下,形成了鲕状赤铁矿矿石;若是存在有机物,埋藏的沉积物中则可以形成含一定数量菱铁矿的鲕状硅酸盐(绿泥石成分的)矿石。如果在含矿地层形成过程中交替出现氧化与还原条件,形成的则是含菱铁矿的硅酸盐-赤铁矿鲕状矿石。离岸渐远沉积的是铁氢石与二氧化硅,由它们产生赤铁矿-石英成分的碧玉铁质岩。

由于地表植物的发育,赤铁矿沉积矿石的形成终止于фанерозой期。泥盆纪以后的铁矿石,其原生沉积变质矿物只是含 Fe^{2+} 的硅酸盐与菱铁矿。

鲕状针铁矿矿石在任何情况下都是含菱铁矿的原生绿泥石矿石蚀变的产物。虽然在沉积铁矿矿石形成的各个时期都有可能在沉积变质作用下生成针铁矿,但看来它不能大量地进入铁矿盆地。这是因为地表水有机物含量甚低时, Fe^{2+} 的氧化通常形成铁氢石。从地表水中富含溶解有机物的区域进入沉积盆地的铁,是呈有机综合物的形式。它们一

方面连同悬浮的有机物粒子一起落入海洋沉积物,同时在还原环境中发生沉积变质作用,是而成为铁、菱铁矿与铁质硅酸盐的来源。

在地球的发展史中,沉积铁矿最强烈的堆积是在前寒武纪。当时尚无地表植物,使岩石中的铁产生活动的下降水含有大量的大气中的碳酸气,各处几乎都是潮湿而温暖的气候。随着植物和气候差异变化分带的出现,大气中的碳酸气大量减少、氧含量增多,结果使得铁的地下活动及其以 Fe^{2+} 的重碳酸盐形式被带到地表的数量逐渐减少。因此古生代与其后时代更晚的沉积铁矿规模均较前寒武纪的为小。

在构造因素的作用下产生有利的地形并在岩石中形成必要的裂隙以后,继之而来的则是陆地上铁的活动强烈并被搬运到沉积盆地的时期。

铁从大陆岩石中被带出,是形成风化壳的过程之一。在保持原有地形和气候的条件下,风化面逐渐具备成年期的特征。因此在地壳的相应部位铁从表生带向外的活动停止。在地球的现代条件下,气候有利的区域没有具备足够深的水交换带的大型年青的平坦地面。结果使得进入沉积盆地的铁的数量很少,同时也不可能发生足以形成铁矿矿石的大量铁的氧化物的堆积。

译自《Советская геология》

1973, №7, стр. 3~12

作者: Ф. В. 楚赫洛夫

秦昶行译, 晋雄校

1973年第6期《卡球式提引器》一文勘误

页数	栏别	行数	误	正
44	右	4~5	上壳体(12)	下壳体(20)
45	右	3	接触	分离
46	左	4	接触	分离
46	左	16	接触	分离
46	左	17	…垂直状态,	…垂直状态(图2a)亦即图1。
46	左	27	接触	分离