

含铁建造沉积岩相

H·L·詹姆斯 著

鍾亦晓 洪友崇 译

刘成湛 校

中国工业出版社

本書根据 Harold L. James 所著 "Sedimentary Facies of Iron Formation" 一文譯出，原文載于 "Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists" vol. 49, № 3, pp. 235—293, 1954.

作者針對美国苏必利尔湖（上湖）鉄矿区的前寒武紀含鉄建造沉积岩相作了較詳細的研究。如對含鉄建造的物理、化学环境以及各种岩相（硫化物相、碳酸盐相、氧化物相、硅酸盐相）的各种矿物成分、岩石特征和产状均进行了詳細地描述。

我国也有与此鉄矿屬同一成因类型的鉄矿，因此，本書可供研究鉄矿成因类型的同志們参考。



含鉄建造沉积岩相

鍾亦曉 洪友崇 譯

刘成湛 校

地质部地质书刊編輯部編輯（北京西四羊市大街地质部院内）

中国工业出版社出版（北京东赫隆路西10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $2\frac{1}{4}$ · 字数 52,000

1962年3月北京第一版·1962年3月北京第一次印刷

印数 0001—2320 · 定价 (10—8) 0.39元

*

統一书号: 15165·1402(地质-145)

含铁建造沉积岩相

H·L·詹姆斯 著

鍾亦晓 洪友崇 譯

刘成湛 校

中国工业出版社

目 录

一、摘要.....	3
二、緒論.....	4
三、“含鉄建造”名詞的解释.....	6
四、化学沉积环境.....	7
1.鉄的沉淀	7
2.海洋与非海洋环境	10
3.大气問題	12
五、含鉄建造相.....	15
1.概述	15
2.硫化物相	18
3.碳酸盐相	21
4.氧化物相	27
5.硅酸盐相	36
六、相的特征及其与沉积环境相互关系的概述.....	46
七、关于燧石的問題.....	48
八、成岩变質作用.....	49
九、含鉄建造与火山作用和大地槽发展的关系.....	51
参考文献.....	61

一、摘 要

苏必利尔湖区前寒武纪含铁建造的沉积，根据其主要原生铁矿物可分为四个主要的相：硫化物相、碳酸盐相、氧化物相和硅酸盐相。作为化学沉积物，这些类型的岩石可以反映出他们沉积环境的某些化学特征。其主要的控制因素，至少对于硫化物、碳酸盐及氧化物类型来说可能是氧化电位。事实证明这种沉积活动是在封闭的盆地中进行的。这些盆地被谷坎把它们和宽阔的海洋隔开，以致于阻碍水的自由循环而使其氧化电位及水的组份得到不正常的发展。

由于变质作用以及后来的氧化作用分布并不普遍，因而对于原生的岩相可以根据未经氧化的、实质上未经变质的物质而加以描述。

(一) 硫化物相以黑板岩为代表，其中黄铁矿占岩石的成分可达40%。标准的岩层中游离碳的含量为5--15%不等，这说明了它是处于极度静止的环境下沉积的。在含黄铁矿的岩石中局部地含有数层富铁的碳酸盐层；

(二) 碳酸盐相，其较纯净的是富含铁的碳酸盐和磁石的互层。这是在氧的浓度足够破坏大部分有机物质，但尚不足以促使高价铁化合物形成的环境中生成的；(三) 氧化物相共有两种主要类型：一种是以磁铁矿为特征的，另一种则以赤铁矿为特征。这两种矿物皆属于原生成因。条带状磁铁矿岩石是本区的主要岩性之一；它的标准岩层是由磁铁矿和磁石、碳酸盐、含铁硅酸盐或后面三种矿物混合物的夹层所组成。根据矿物及其组合的情况看来，它们是在轻微氧化以至适度还原的环境下产生的，但是磁铁矿的沉淀方式还是不太明了。条带状赤铁矿岩石是由细粒结晶的赤铁矿与磁石或碧玉的互层所组成，其中鲕状构造普遍存在。这种岩相无疑地是在一种强烈氧化作用的，可能是近海的环境下沉积的，并且和较新赤铁矿铁质岩如克林顿 (Clinton) 鲕状岩的沉积环境相似；(四) 硅酸盐相的主要成分是一种或多种的含水平亚铁硅酸盐类 (土状硅铁矿、水硅铁石、黑硬绿泥石、绿泥石)，和海绿石相似的粒状构造是某些变种的典型构造，其他的变种则为非粒状和薄层纹状。和硅酸盐岩石最常共生的岩石含碳酸盐或磁铁矿，这就表明了最适宜的沉积条件是轻微氧化以至轻微还原的环境。

许多学者都强调了富铁岩石与火山作用有关，作者认为这是由于构造的原因而与化学作用无关；在苏必利尔湖区铁矿沉积和火山作用都被认为与休罗世大地槽的发展密切相关。在密执安州，下休罗世岩石是由贫铁石英岩和白云岩——两种典型的“稳定陆棚”沉积物所组成；上休罗统的大部分系

由貧鉄硬砂岩、板岩和火山岩所組成——這是一種典型的“大地槽”的雜岩體。因此，中侏羅統及上侏羅統下部的富鉄岩層是沉積在構造史的過渡期中。含鉄建造的主要沉積環境需要處在封閉的盆地中；這種需要在時間上是和大地槽發展的正常時期相適應的，這就是說：濱外彎曲或隆起的構造發育最後發展為具有火山作用特點的弧形島嶼（Island arcs）。

二、緒 論

“含鉄建造”這個名詞在蘇必利爾湖區已廣泛應用於許多富含原生（沉積）鉄礦的岩石。在文字論述和野外制圖方面，這個具有概括性的名詞趨於掩蔽了實際存在著的一些差異，而事實上含鉄建造這個名詞的涵義是包含著一大類各在原生特徵上與及在變質程度上均極不相同的岩石。由於分布地區廣闊和深受氧化的影響更增加了岩性不同的範圍。這些變質作用和氧化作用等次生過程使得鑑別原生岩性甚為困難，但是對原生物質的認識可有助於編制其合理的分布圖件，這對於富鉄礦床正確的勘探和開采也都是很必要的。

根據凡海斯（Van Hise）、李斯（Leith）及其他學者在參加美國地質調查所對本區首次綜合性調查工作中的意見，認為原生含鉄建造的主要成分是化學沉積的含鉄碳酸鹽和燧石，有些地方並含大量的土狀硅鉄礦（是類似海綠石的一種含鉄硅酸鹽）。這種論點在美國地質調查所地質專報第52號（凡海斯和李斯，95）^①中有詳盡的描述。他們認為火山作用對岩石的成因起了重大的作用，因為海底火山熔岩與海水的反應，和直接來自氣體及液體的射氣，均能使鉄質進入海水中。

作者在最近一篇報告（50）中曾指出原生富鉄岩石可以根據沉積物中最多的原生含鉄礦物而分為四個主要的沉積相——硫化物相、碳酸鹽相、硅酸鹽相和氧化物相。本文對這些含鉄建造的各种岩相將更進一步的加以描述，並對富鉄岩石與火山作用和大

①括弧內數字指本文末參考文獻目錄。

地槽发展的关系进行討論。但必須着重指出：含鉄建造相的定义指的是原生沉积特征，只要这些特征还能够加以鑑別的話。我們也力求把原生性質与后来受变質作用或氧化作用而产生出来的性質区别开来。正如泰勒（91）所描述的那样，現在許多主要含硅酸盐的富鉄岩石无疑地是由于变質作用形成的。当然，很大的一部分岩石含有氧化鉄，那是由于后来氧化作用的結果。承認这些作用和它們的产物，并不否認富鉄岩石中所含的硅酸盐和氧化物也可能屬於原生沉积类型的看法；后来的作用只是增加鑑定上的困难而已。幸而休罗世含鉄建造的变質作用虽然分布很广，但各处的变質程度是頗不相同的。变質的梯度也比较陡，例如在密执安

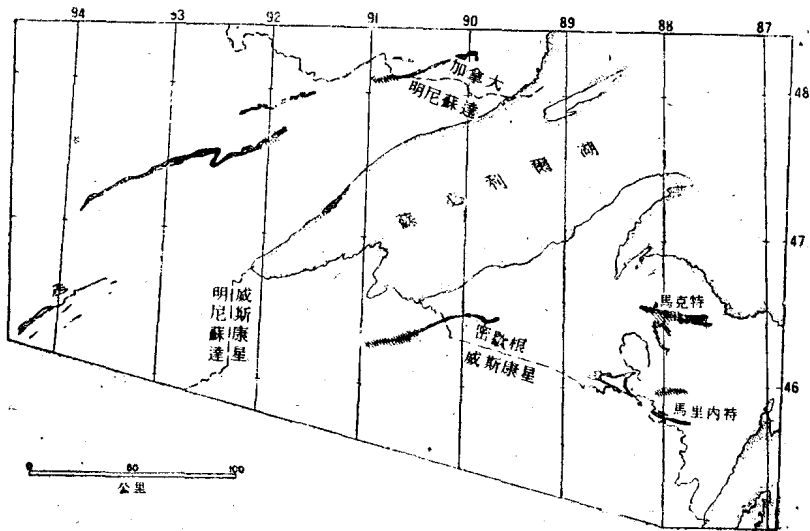


图 1. 苏必利尔湖区主要鉄矿分布图，斜影綫表示中級至高級的变質地区

州的馬克特 (Marquette) 和果杰比克 (Gogebic) 山脉与及在明尼苏达州的梅薩比 (Mesabi) 山脉中变質梯度与岩层的走向平行，因而在富鉄岩石的一定地层单位中就可以观察到变質作用的續漸过渡。关于中級到高級变質的一般地区含鉄建造的分布如图 1 所示。含鉄建造的变質等級可以根据下列的矿物如綠泥石、

云母、角閃石及石榴石等来确定。但最容易鑑別的方法就是看“燧石”顆粒之大小（“燧石”这个名詞在苏必利尔湖区是指含鉄建造中与富鉄层交錯形成薄层的二氧化硅而言。这些物质确屬化学成因——即非碎屑质——除少数例外，現已几乎全部变为結晶质的石英）。在低級变质带中燧石顆粒的平均直径約为0.01毫米，如鉄河（Iron River）区；及至高級变质带，顆粒的平均直径达1毫米以上，如馬克特山脉的西端。虽然这个标准在使用时必需謹慎——因燧石的共生物质往往对它的变质作用发生强烈的影响——但仍可以作为辨別变质等級的一种良好标志。根据变质作用的标准矿物和燧石顆粒的大小看来我們認為原生沉积的含鉄建造其特征是属于变质最少的一个等級。

三、“含鉄建造”名詞的解釋

“含鉄建造”（Iron-formation）这个岩石名詞已逐漸成为地质学家和工程师們常用的一个野外名詞。在文献中这个名詞曾被采用但并没有給以定义。在苏必利尔湖区，它指的是一种沉积成因的条带状岩石。这种岩石通常含薄层或层片状的燧石与一种富含鉄质的矿物为主的薄层交互成层，有些地质学者認為燧石的出現是这个名詞必不可少的特征。但是許多地区——事实上就是各个地区的一部分含鉄岩层——富鉄岩石中并不一定都有可以作为特征的燧石薄层。这种岩石通常称为“板岩状的含鉄建造”（Slaty iron-formation）、“碳酸盐质板岩”（Carbonate slate）或“含鉄板岩”（ferruginous slate），并包括在含鉄建造之內。在明尼苏达州（Minnesota）的庫宴納（Cuyuna）区很大的一部分含鉄建造的岩石中就没有燧石。在含鉄建造中的鉄可以形成磁鉄矿、假象赤鉄矿、鏡鉄矿、质軟而色紅的赤鉄矿、“褐鉄矿”、菱鉄矿、綠泥石、土状硅鉄矿、水硅鉄石、黑硬綠泥石、鉄閃石、鉄橄欖石或黃鉄矿等矿物。可見燧石的存在与否及含鉄矿物的种类都不能闡明含鉄建造的定义，但它們可以結合在一起用

来形容这个名詞。

剩下給含鐵建造这个定义的基本特征是原生（沉积）鐵質的含量高。其次作者認為它經常有薄层状或层片状的构造。因此，在本文中含鐵建造的定义：是一种化学沉积的鐵矿，呈典型的薄层状或紋层状，含鐵在15%以上，一般都含燧石薄层但这并不是必要的。这是一个公認的最普通的定义。但另一个比較狭义的定义将是不包括一些現在称为含鐵建造的岩石。它包括南美洲的“鉄英岩”，瑞典的“条带状石英矿石”，印度的“条带状赤鉄矿石英岩”，以及南非洲的“条带状鉄質岩”。这些矿石都很典型地含有燧石（結晶質石英）和氧化鉄的互层。定义中沒有指出与时代較新，不含燧石的富鉄地层的明显区别；实际上，仅以鉄矿的矿物及含鐵量而論，那是沒有真正差別的。本文还将一些通常不称为含鐵建造的岩石，象石墨黄鉄矿板岩也包括在这个名詞之內，这是由于它們跟一些典型的含鐵建造有相的关系。

四、化学沉积环境

1. 鉄的沉淀

能够沉淀而生成化学沉积物的一般金屬元素中，实际上只有鉄可以呈現几种不同的原子价。它可以以高价鉄的形式沉淀成为氧化鉄（褐鉄矿或赤鉄矿）或硅酸盐（海綠石），也可以以亚鉄的形式沉淀成为碳酸盐（菱鉄矿）、硅酸盐（鲕綠泥石）、或硫化物（黄鉄矿）。作为化学沉淀——或成岩作用的产物——这些矿物都是平衡的产物，并标志着某些元素的化学成因环境。在大部分的沉积物中，鉄的含量那么少，以致矿物的差別可以被其他沉积特征所掩蔽。但在含鐵建造中鉄曾經是一种指示生成环境的主要組份，根据原始矿物差异的相的分类法也可以相当广泛地作为环境的分类。

克伦宾 (Krumbein) 和加勒尔 (Garrels) (57) 在其最近

的一篇論文中，对化学沉积物堆积的主要因素曾加以詳細的論述。他們認為富鉄岩石的沉积环境显然是属于“閉塞” (Restricted) 类型的。其中“地文、构造或生物的特征，对于溶解盐的流通、氧化或浓度都能加以控制”。在这种环境中，氧化-还原电位Eh从表层的正号（氧化作用）一直变到深处的負号（还原作

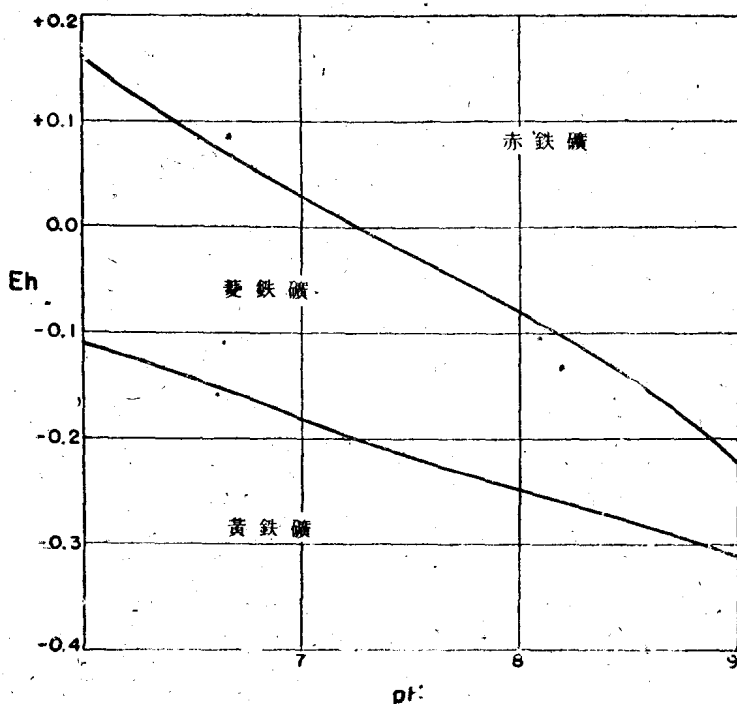


图 2. 赤鉄矿、菱鉄矿和黄鉄矿的稳定范围图
(按克伦宾和加勒尔, 57)

用)；氢离子浓度 pH 則从表层的弱硷性变到深处的中性，甚或微酸性。溶解盐的浓度也有很大的变化，特别是当水流入海洋受到阻塞时为甚。反之，在正常海洋环境中水流暢通，溶解盐的浓度、酸度和氧化-还原电位等的差异是比較輕微的。克伦宾和加勒尔 (57第 3 頁) 認為在正常的海洋环境中其 pH 值从表层的 8.4

变化到底层的7.5; Eh值从表层的+0.4变化到底层的+0.1。换言之,在一个海流暢通的典型海洋环境中,海水呈弱硷性并且全部具氧化作用。反之,在一个閉塞的环境中,則水面呈硷性并具氧化作用,而在底部却变成还原及呈酸性反应。

克伦宾和加勒尔(57,9—13頁)还根据 Fe^{+3} , Fe^{+2} , $(\text{CO}_3)^{-2}$, $(\text{OH})^{-}$ 和 S^{-2} 的活动性以及这些化合物的活度乘积,以Eh及pH的关系来闡明黄鉄矿-菱鉄矿-赤鉄矿的近似稳定范围,如图2所示。值得怀疑的地方就是在“黄鉄矿”的活度乘积中实际上是FeS的值而“赤鉄矿”的活度乘积又是 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的。其原因很可能由于 $(\text{CO}_2)^{-2}$ 及 $(\text{S})^{-2}$ 的数值是属于正常海水的。不过Eh—pH值范围的总的分布情况不会有多大变化,所以这个图解仍可以表明矿物相与化学环境的一般关系。在图解上清晰地說明了鉄沉淀出来的形式氧化-还原电位Eh具有很大的决定性作用。

物理环境与沉淀类型的相互关系可以用图解說明,如图3。虽然由于盆地的深度,堰洲的高度以及水流的具体情况之間的复杂关系,这里所表示的沉淀方式能否在自然界中确实找到尚屬疑問,但是各种矿物相的相互关系总是正确的。在浅水与及受波浪

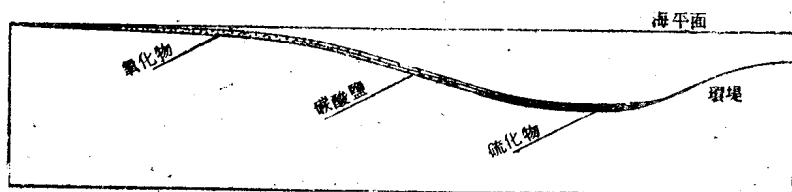


图 3. 理想的閉塞深海盆地中鉄化合物的沉积分带示意图

和洋流冲刷的陆棚上氧气是充足的,鉄質必然呈高价鉄状态沉淀。相反地,在停滯的海底上氧气尚且不足以清除有机物质,更因細菌的活动而产生 H_2S ,于是鉄質便沉淀成为硫化物。在有毒性的底层——即加利赫(Gallihier)所称的“硫化矿沉积带”(Sulphuretum)(27)——和业經充分氧化的浅海之間的中間带,其特征为具有还原条件,或氧化-还原互相交替的条件。在这里氧

气足以清除有机物,并能阻止 H_2S 大量形成,因此鉄質呈亚鉄状态沉淀而成为碳酸盐,或呈亚鉄-高价鉄状态沉淀而成为磁鉄矿。

必須着重指出,以Eh及pH表示硫化物、碳酸盐及氧化物之間的关系实际上与浓度无关。沉淀的数量决定于浓度,但与沉淀的性質无关。还須指出,这些关系乃是指离子溶液中的物質而言。有些作者如莫尔(Moore)和梅納德(Maynard) (67) 及格蘭訥(Gruner) (33) 曾提供証据,說明鉄呈三价鉄的水溶液时最容易搬运,而且大部分的鉄也可能是以这种状态流入海洋中的。然而,化学沉积环境对于沉积那一种类型的鉄矿仍然是一种决定性的因素。設有一条大的河流带有5 ppm ①的 Fe_2O_3 流入象图3所示的一个盆地中。假定流量为120,000立方米/秒,且其負荷物均匀散布在半径为100英里②的半圆形地区内,那么全区每年仅能加厚約0.1毫米的 Fe_2O_3 。(这相当于含鉄建造中很薄的一个紋层)如果这种胶状的氧化高鉄,是在碳酸盐稳定的还原环境中沉淀,那么它可以进入溶液再以碳酸盐的形式沉淀出来,或者在下沉时,或在海底上就直接为碳酸盐所交代。只有在氧化环境中,胶状氧化鉄的沉积才不受任何的干扰,也正因为在这里它在化学上才能与离子沉淀相調和。

2. 海洋与非海洋环境

前面討論的都默認了含鉄建造是在海洋环境中形成的。由于泰勒(Tyler)和特溫霍弗尔(Twenhofel) (93) 断定了苏必利尔湖区含鉄建造主要是在淡水环境中沉积,因此这种假說就值得深入研究了。作者認為它是海相成因的主要理由如下:

(1) 含鉄建造及其共生岩层中沒有向来認為属于大陆沉积的岩性,例如以粗粒碎屑物为主和分选性差的岩层。

(2) 較大的含鉄建造单元,如馬克特山脉的訥果尼(Negaunee)含鉄建造是属于中休罗世的,且夹于下休罗世石英岩和

①校者注: ppm 为一百万分之一。

②校者注: 每英里=1.60935公里。

白云岩及上侏罗世的硬砂岩、板岩和火山岩之間。下侏罗世的沉积层中含有厚层的海藻白云岩，这无疑地是属于海相的。又上侏罗世的硬砂岩和火山岩系是地槽区沉积物的一种典型組合，正如在太平洋沿岸的中生代岩层中所見的一样，这都是在海洋环境中生成的証据。总之，所有較大的含鉄建造其上复或下伏岩层都大概是海相成因的。

(3) 在若干地区含鉄建造与黄鉄矿板岩共生是很有意义的。在密执安州的鉄河澄清瀑布 (Iron River-Crystal Falls) 区其下盘为黄鉄矿板岩，厚約50英尺，含硫量約达20%。这种岩石保存在长約20英里，寬平均8英里的紧閉褶皱盆地中。該矿区硫的埋藏量据最低的估計約有250亿吨。因为矿床的原来面积至低限度比保存下来的大好几倍，所以原始沉积就可能在1000亿吨以上。在沉积50英尺厚的硫磺矿层（部分碎屑岩层說明盆地与海洋相連）所需的时間內能够获得这样大量的硫磺而且来源又是如此固定；此外，野外工作还証实了沒有火山的活动，因此，难以再推想还有其他的来源可以供給这样大量的物質。

(4) 較新的富鉄岩层，如克令頓建造，在若干重要的方面，至少在鉄的含量和矿物两方面是与前寒武紀含鉄建造相似的。因为有丰富化石足以証实这些矿床是海洋成因的。

主张非海洋成因——說得确切些，反对海洋成因——的主要論据就是岩层中实际上并无典型的碳酸鈣沉淀，而碳酸鉄却非常丰富（正如本文后面将要論述，在含鉄建造中实际上存在的碳酸盐是一种复杂的分子混合物，一般含 CaCO_3 約5%及 MgCO_3 約12%）。正常的海水主要为 Ca^{+2} 与 Fe^{+2} 所饱和，二者通常伴随着pH值的增加而沉淀为碳酸盐。但在边缘盆地的局部情况，甚至与海洋有連通的地方，其离子浓度及pH值也大不相同。例如我們可以有理由假定流入一个边缘盆地的河流是具有低的pH值、低的 Ca^{+2} 及高的 Fe^{+2} 的。在这样的一个盆地中即使 Ca^{+2} 的絕對含量不变，海水的pH值也可以逐漸降低以致于使 Ca^{+2} 呈不够饱和的現象。同时 Fe^{+2} 的絕對值增加，因而可能在饱和点进行

沉淀。或者我們可以假設鐵呈膠狀氫氧化鐵搬運到海中并為鹽水所沉淀。氧化還原電位(Eh)對於鐵沉淀的穩定性在這裡起着重大的作用。在盆地水面鐵的溶解度可以忽略不計。按照克倫賓和加勒爾(57)所獲得的數值，我們可以假設當pH值約等於8.0，Eh值約等於+0.2時， Fe^{+2} 離子加上 Fe^{+3} 離子的活度約等於 $10^{-10.5}$ ，而氫氧化高鐵可以穩定地沉淀下來。但是在一個“閉塞”的盆地中這些綿毛狀的物質①可以慢慢地沉淀並且一直降落到酸度較大，氧氣較少的环境里。在這樣的环境中，標準的pH值為7.5，Eh為-0.1， Fe^{+2} 加 Fe^{+3} 的活度約為 $10^{-4.7}$ ，這時穩定的鐵礦物應該是 FeCO_3 。溶解度的急劇增加，將會引起綿毛狀氫氧化物進入溶液，因而使得海水中 Fe^{+2} 的含量大量增加，或者，如果 FeCO_3 的溶解積已經超過則引起反應，形成亞鐵的沉淀。如果這些情況與略欠飽和的 Ca^{+2} 同時存在，則碳酸鹽含鐵建造的礦物，即可得到成因上的解釋。

不管理論怎樣解釋，世界上若干較年輕的富鐵岩層中主要由含鐵碳酸鹽組成的礦床往往與正常海相石灰岩呈互層（參見哈利蒙(Hallimond) 40），因此，不論其生成過程怎樣，含鐵碳酸鹽是可以在海相環境中沉積的。這些事實也表明了前寒武紀的海水與比較近代的海水對於成礦原因沒有什麼重大的差異。研究微量元素的分佈情況，例如在藍德格倫(Landergren) (60)和波姆維斯特(Palmqvist) (69)關於瑞典鐵礦的研究中，將可為環境變異論提供更有力的證據。

3. 大 氣 問 題

若干作者認為前寒武紀鐵礦沉積時大氣中缺氧而富含二氧化碳，因而使環境條件起了極大的變化。有些人把這種觀點做為地球大氣演化的理論根據，另外一些人認為這是解釋現在儲藏在石灰岩和白云岩中大量 CO_2 的最終來源所必需的理由。還有些人把某些植物能夠承受比現在大許多倍的 CO_2 壓力的事實來證明這一

①校者注：這些綿毛狀物質指的是氫氧化鐵。

假說。這個問題非常廣泛，實超乎作者學識之外。本文的討論範圍僅限于岩石本身所能提供的證據。讀者若想比較深入的研究，可參閱魯貝 (Rubey) 的最近一編著作 (77)，他認為這種證據并不能說明在有記載的地質時期中大氣有過根本的變化。魯貝提出，在石灰岩和白云岩中所儲藏着的巨量 CO_2 其中大部分是由火山噴出來的。

梅克格勒果 (Mac-Gregor) (63) 用前寒武紀的岩石特性來分析這個問題，特別論述到條帶狀含鐵構造，並得出結論認為有充分的證據說明當時的大氣是缺氧而富 CO_2 的。他的主要論據可分下列三點：

(1) 基性火山岩的碳酸鹽化作用普遍：毫無疑問，這種情況與前寒武紀很多地層是相符的，在較小的範圍內——也與時代較新的地層相符合。根據厄斯科拉 (Eskola)，維沃里斯托 (Vuoristo) 和蘭卡瑪 (Rankama) (26) 的見解，海底火山岩系的碳酸鹽建造一方面是由於在噴發的同時發生鈉長石化的反應作用造成；另一方面正如厄斯科拉 (25) 和特訥 (Turner) (88) 所指出的是由於在某種條件下產生綠色片岩相的變質作用而引起。根據現有的證據在統計學上是否足以斷定前寒武紀的碳酸鹽化作用比較劇烈還是值得討論的。

(2) 碎屑沉積岩中亚鐵礦物占優勢：梅克格勒果分析了在羅德西亞 (Rhodesia) 所採集的四個“鈣質雜砂岩”和“長石砂岩”（從這些分析中知道長石砂岩在成分上比較接近於真正的雜砂岩）。分析的結果（其中表明 Fe_2O_3 的平均含量為 0.5%， FeO 的平均含量為 6.1%）與板岩和石英岩的平均分析結果相比較，後兩者的高價鐵含量都超過亞鐵含量。但是這樣的對比是不很正確的，因為真正的雜砂岩不論其屬於那一個時代，它的成分主要為亞鐵。羅德西亞的岩石最好與加利福尼亞中生代佛蘭 (Franciscan) 組的雜砂岩對比。小約翰 (Pettijohn) (72) 列舉這些岩石的分析結果表明其 Fe_2O_3 的含量為 0.74%， FeO 的含量為 3.10%。關於這些詳細的對比，雖然還有值得懷疑之處，但前寒

武紀岩石與其他岩石之間確有一些稍微的差別。南茲 (Nanz)

(68) 認為根據現有的證據化學成分似乎是隨着時間而逐漸變化的；他搜集的資料證明較老的岩石確含較多的亞鐵，雖則其中一部分原因可能是由於變質較深所致。

(3) 條帶狀含鐵建造的存在及其性質：梅克格勒果對含鐵建造的成分曾斷言這些岩石的鐵質雖然不能說是全部，但主要的也是亞鐵。本文的部分目的就是要說明蘇必利爾湖區含鐵建造的一個重要岩相，它的原生鐵質是呈氧化鐵形式產出的。最近，在南非的調查者如杜普勒 (du Preez) (21) 曾對該區的一些主要含鐵建造做過許多同樣的考察。

無論如何，氧化鐵是可以在比現代較大的 CO_2 的壓力下沉澱的，雖然除了一個不穩定的相外，大概也不會在以 CO_2 為主的大氣下形成。當 CO_2 的分壓力增加到十倍（即 $P_{\text{CO}_2} = 0.0030$ 而現在 $= 0.0003$ ），雖然會引起 pH 值的強烈變化（根據魯貝的圖解，可從現在的 8.17 變為 7.4 左右），但不至於嚴重地改變氧氣的分壓力以及海水的 Eh 值。大氣的這種變化當然可以強烈地影響風化作用、鐵質的搬運以及碳酸鈣的沉澱作用，但是正如我們在圖 2 中所見的，鐵的沉澱作用依存於 Eh 值比依存於 pH 值顯著得多。氧化-還原電位的增加可以超過 pH 值降低所引起的效果，這在沉澱作用的意義上就是碳酸鹽和氧化物沉澱的分界綫可能移至較淺水的地方（或者至少是空氣較流通的地方）。含鐵建造的碳酸鹽相中沒有鮑狀菱鐵礦，而在氧化物相中這種結構却很普遍。因此，這可以說明分界綫始終沒有達到波浪活動帶。

我們斷定前寒武紀鐵礦堆積時，大氣的組份與現代並沒有多大的差別似乎是合理的。當時氧氣的含量足夠使氫氧化鐵在適宜的環境中沉澱下來。它的比例至低限度可以與時代較新的富鐵岩層相比較，也許在地史上最初始的某些時期內大氣的組份曾經大不相同，但這樣的一個時期如果確實存在的話，也應屬於前寒武紀晚期以前的事了。

五、含鉄建造相

1. 概 述

可以預料得到在野外遇見的岩性往往比一般由理論研究所知道的复杂得多。很大的一部分含鉄建造是由四个界限清楚的极端分子 (end members) ——即硫化物、碳酸盐、硅酸盐以及氧化物所組成。可是很多岩石是在海水升降頻繁的环境中沉积的, 因而形成各种不同矿物的互层; 另一些岩石在与沉积时大不相同的化学环境中受到成岩作用而发生强烈的变化; 还有一些岩石的部分性質决定于化学沉积时的碎屑附加物; 这些因素使我們对这里的岩石单位进行正确的分类发生困难, 但同时保留下来的記錄对矿物的相对稳定性与沉积和埋藏环境的性質却提供了很多有价值的証据。

硫化物、碳酸盐和氧化物 (赤鉄矿) 相不論在理論上或在野外它們的相互关系都是界綫清楚的。根据克伦宾和加勒尔 (57) 的分析, 証明矿物的稳定范围很少, 甚至于沒有超复現象。这一事实已为野外工作所証实; 除了成岩变化外——本文将在后面加以討論——黃鉄矿, 菱鉄矿及赤鉄矿在含鉄建造中都是单独成层的。此外, 由于沉积环境的化学作用在短期內不会起根本的变化, 因此, 即使有互层存在, 也仅限于相邻的类型, 例如硫化物和碳酸盐或碳酸盐和氧化物。至于硫化物和氧化物之間的互层, 有的話也是很罕見的。

就主要的环境控制而言, 如果用 Eh 来表示, 硅酸盐相是沒有固定位置的。原生的含鉄硅酸盐通常呈間隙物或单独成层夹于主要由硫化物、碳酸盐或氧化物組成的岩石中。不过最常見的还是产于含氧化物或碳酸盐的岩层中。这种共生情况說明了它最发育的沉积环境, 如以 Eh 表示, 是在接近氧化作用和还原作用邻界的地带上。但是其他因素, 如碎屑物質的掺杂, 也可能牵涉到硅酸