

张文佑 从柏林 编著
李继亮 张雯华

铁矿的 形成与富集

冶金工业出版社

铁矿的形成与富集

张文佑 从柏林
李继亮 张雯华 编著

冶金工业出版社

毛主席语录

阶级斗争是纲，其余都是目

开发矿业

一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成。这就是马克思主义的认识论，就是辩证唯物论的认识论。

目 录

引 言

第一章 地球演化对于铁矿形成的控制	9
第一节 铁在地球内部的分布	9
第二节 铁在地球演化过程中的分异和富集	13
第二章 地质构造对于铁矿形成的控制	41
第一节 褶皱与断裂的形成机制	41
第二节 地球的行星式断裂网格	47
第三节 岩石圈块断结构的形成与演变	51
第三章 物理化学因素对于铁矿形成的控制	61
第一节 铁在岩石圈中的循环变化	61
第二节 内生铁矿形成的物理化学因素	64
第三节 外生铁矿形成的物理化学因素	70
第四节 变质铁矿形成的物理化学因素	81
第五节 成岩作用和低变质作用中铁矿建造的矿物组合	91
第六节 微生物在铁矿形成中的可能作用	94
第四章 铁矿的主要类型及其特征	96
第一节 奥哥马型铁矿建造	97
第二节 苏必利尔型铁矿建造	105
第三节 基鲁纳型铁矿建造	118
第四节 米奈特型铁矿建造	122
第五节 接触交代(矽卡岩)型铁矿	128
第六节 宁芜式铁矿	135
第七节 正岩浆型钒钛磁铁矿建造	138
第八节 前寒武纪含铁硅质岩建造中风化壳型富铁矿	143
第五章 对在我国寻找富铁矿的几点初步认识	149
结束语	161

引 言

铁是继铜之后最早被人类广泛利用的金属。在我国历史上，早在春秋时代，就用铁铸型鼎。战国时，铁制工具就广泛使用。这说明，在当时我国劳动人民已有了相当丰富的普查和开采铁矿及熔剂（石灰岩、萤石）的地质知识。但是，正如毛主席指出的那样：“中国自从脱离奴隶制度进到封建制度以后，其经济、政治、文化的发展，就长期地陷在发展迟缓的状态中。”（《中国革命和中国共产党》）尤其是，1840年鸦片战争后的近一百年中，在帝国主义、封建主义和官僚资本主义三座大山重压下，我国经济凋敝，民不聊生，哪里还谈得上什么发展工业和科学。在解放前，我国的地质勘探事业处于风雨飘摇、奄奄一息的境地。

中华人民共和国成立以来，特别是无产阶级文化大革命以来，在毛主席的无产阶级革命路线的指引下，我国的地质勘探事业有了很大的发展。就拿铁矿为例，现今查明的工业储量要比解放前所查明的储量大千万倍。但是，我们所取得的成绩距离满足我国社会主义建设的要求还差很大的一段。为了要在本世纪内，把我国建设成为农业、工业、国防和科学技术现代化的社会主义的强国，就需要我们地质工作者向国家提供必要的和充足的矿产资源，其中铁矿资源首当其冲。为了保证我国钢铁工业迅速的发展，当前，摆在我们面前的一个重要任务，就是向国家提供更多的富铁矿资源，这就要求我们对铁矿的富集规律深入了解。

32834

1

毛主席教导我们：“事物发展过程的根本矛盾及为此根本矛盾所规定的过程的本质，非到过程完结之日，是不会消灭的；但是事物发展的长过程中的各个发展的阶段，情形又往往互相区别。这是因为事物发展过程的根本矛盾的性质和过程的本质虽然没有变化，但是根本矛盾在长过程中的各个发展阶段上采取了逐渐激化的形式。并且，被根本矛盾所规定或影响的许多大小矛盾中，有些是激化了，有些是暂时地或局部地解决了，或者缓和了，又有些是发生了，因此，过程就显出阶段性来。”“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”“外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用。”

我们在本书中努力以毛主席关于事物发展的根本矛盾以及内因和外因的作用为指导思想，试图从地球演化过程中来探讨铁的运移和富集规律，并试尝从地质理论上对富铁矿的探寻作初步的探讨。

恩格斯在《自然辩证法》一书中，早就预示了地球演化的根本矛盾是热力作用（膨胀、拉伸、排斥）和重力作用（收缩、挤压、吸收）。在地球的地质时代早期和后期的演化过程中，吸引一般作为矛盾的主要方面，贯穿于全过程中，但排斥也不断地起重要作用，两个矛盾着的方面不断发展就引起了地球的自转运动的变化。它在地球中是比较重而丰富的元素，在地球核幔分异的过程中，它开始向地心集中而形成地核，后来原始地球物质（大致与地幔物质相当）又进行分异，而形成外部的岩石圈（包括地壳上部的硅铝质层和下部的硅镁质层）。在地球自转所产生的离心力^①、科里奥利力^②和转动角速度不均一效应^③作用下，产生全球性的断

裂网格，并由于断裂处的压力降低和解除，地球深处物质在热力作用下产生局部熔融，引起岩浆侵入，火山活动或（和）混合岩化作用，这就使地球中铁质向地表运移。

在氧化大气圈形成以后，地球演化发展到一个新的阶段。铁的运移和富集过程中，受地球演化过程中的根本矛盾——吸引与排斥——所控制的各种矛盾相继发生和发展，其中有氧化和还原的矛盾、酸性溶液与碱性溶液的矛盾，含铁岩浆和溶液与围岩的矛盾。这三对矛盾支配着各种类型铁矿

① 离极力 (Pole fleeing force, 语源为德文字 Polflucht)：是地球自转离心力的水平分力，使地壳和岩石从两极向赤道滑动。有些地质学家认为它足够使大陆板块自由移动。如东半球南大陆和北大陆之间的古地中海的闭合就是这样形成的。但有人认为这样产生的应力太弱，不能克服岩石强度，但从岩石蠕变作用推测，漫长时期的弱应力作用也可使岩石产生变动。当地球假想为理想圆球体时，它所产生的最大切应力将出现于 45° 纬度处，但地球是个椭球体，李四光同志曾根据 A. R. 克拉克所给出的地球偏率，计算出 $44^\circ 51' 40''$ 纬度处，切应力最大（参考李四光《地球表面形象变迁之主因》一文）。

② 科里奥利力 (Coriolis force)，由地球自转所引起的离心力的视偏差分力。因首先研究该力效应的法国数学家 G. G. 科里奥利 (1792~1843 年) 而命名。地面上运动的质点，受科里奥利力作用，在北半球，运动方向向右偏移，在南半球，则运动方向向左偏移。其偏移的大小与运动着的质点的速度及纬度成比例。即质点运动速度愈大，偏移愈大，在高纬度处，偏移比低纬度处大，在赤道上则没有偏移。北半球河流冲刷右岸，南半球河流冲刷左岸，就是由科里奥利力引起。科里奥利力对洋流与大气对流也有重要影响。

③ 转动角速度不均一效应：流体旋转时，赤道部分的角速度比两极附近的角速度大，称为转动角速度不均一效应，有人称为“赤道加速现象”。由于转动角速度不均一效应，在不同纬度地带之间产生了一种水平扭动。地球内部某些圈层的软滞系数较小，如地幔软流圈、外地核等，在这些圈层可能有转动角速度不均一效应，它们对其外的固体岩圈可产生摩擦，而使一些“断块”或“板块”，沿走向作平移运动，并在离极力与科里奥利力联合作用下，产生纬向与经向构造断裂。

的形成和富集。

例如，岩浆型铁矿床， Fe^{2+} 的铁矿物形成于氧不充分的岩浆分异早期，如钛铁矿；中期氧增多就形成钛铁矿与磁铁矿($\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$)；晚期氧充分时则出现 Fe^{3+} 的赤铁矿(Fe_2O_3)。看来，这也与深度有关，前者最深，多位于下部，后者最浅，多位于上部。但在深处高温条件下， Fe^{2+} 化合物，又可分解为 Fe^{3+} 化合物与金属铁，这可能由于 Fe^{2+} 离子半径($0.82\text{\AA}$)大于 Fe^{3+} 离子半径($0.67\text{\AA}$)的原因。总之， $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 的比值是常随岩浆分异程度的增高而增大的。这可认为是一个原则，同样它也适于火山岩型铁矿床，大型的富铁矿多与火山活动晚期的安山岩和碱性流纹岩有关，也是这个道理。如玄武岩中 Fe^{2+} 多，安山岩中 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 都有，流纹岩中 Fe^{3+} 多。

第二条原则是 Fe^{2+} 在还原环境下运移， Fe^{3+} 在氧化条件下沉积。风化壳富铁矿主要是氧化环境下富集形成的。

第三条原则是 Fe^{3+} 能在酸性溶液中运移，而在碱性溶液中沉积。 Fe^{3+} 形成溶液的条件常是 $\text{pH} < 3$ 。铁在富氧条件下，可以形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ，并运移入海水中。其到水深处，又因缺氧而沉积。在缺氧条件下， $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 可运移入海水中，在水浅富氧处而氧化沉积。

沉积铁矿盆地的边缘相为赤铁矿，中间相为菱铁矿，内部相为黄铁矿，就是受上述第二，第三条原则支配的。而瑞典基鲁纳型的海相火山岩富矿则与上述三条原则都有关系。

接触交代型铁矿的形成主要受围岩支配。如围岩富含钙质和碱质，则易形成富矿。这主要是由于它们起了与炼铁炉中熔剂相似的作用，可使铁从岩浆中分离而富集成矿。在变质火山岩中的富铁矿常在上部或边部，常出现钠长石化等现

象，而下部或内部形成富集铁矿。海相的基鲁纳型和陆相的宁芜型铁矿不仅形成于火山活动晚期，而且生成于钙碱性围岩中。因此，我们不仅应在研究接触交代型铁矿考虑到围岩，就是在探寻海相和陆相火山型铁矿时，也应该注意围岩性质。

世界上为什么大铁矿都出现于前寒武纪？看来，这主要是由于当时地壳还很薄，岩石圈还不稳定，地幔尚处于强烈分异阶段的缘故。铁在地球演化的吸引与排斥的根本矛盾支配下，一面由于重力作用向下进入地核，一面又在热力作用下，沿岩石圈断裂而达到地壳表部。当时的火山喷发强烈，岩浆侵入频繁，混合岩化盛行。当时水圈已逐步发展，大气圈也开始氧化。因此，在低凹部分形成了火山型和原始沉积型铁矿，但当时富铁矿并不多，绝大部分为条带状和层纹状磁铁石英岩型。大型富矿多是在这种贫铁矿基础上改造而成。改造的作用大致可分为三种：变质作用、热液交代作用和风化淋滤作用。特别是后者更为重要。

关于寻找前寒武纪风化淋滤型富铁矿的有利远景地区，那就要注意太古代和元古代古老断块的边缘隆起的浅凹陷区及其内部凹陷中的高隆起区。华北断块（包括鄂尔多斯盆地、山西高原、华北盆地）边缘的浅凹陷及其内部的高隆起如鄂尔多斯北部隆起（东胜隆起等），华北平原内的牛坨镇隆起、沧县隆起、隆尧隆起、程宁隆起、内黄隆起、太康隆起、西平隆起、太和隆起、长山隆起等都可能为有利的远景区。例如，河南、安徽都是在这些内部隆起之上，且都已探到一些前寒武纪风化淋滤型铁矿。另外，新疆塔里木断块和华南断块（江南古隆）的边缘和内部，只要有丰富的巨厚的贫铁矿源层，也有可能找到风化淋滤型富铁矿。

断块边缘多有岩石圈断裂、地壳断裂或(和)基底断裂,成为铁质由地球内部向上运移到地表的通道。国内外各种类型铁矿多受断裂带控制。优地槽边缘一般是岩石圈断裂和地壳断裂的所在处,不仅可以出现岩浆分异型铁矿床,而且有海相火山型矿床(基鲁纳型)。只要有碱性(特别是钠质较富)火山岩的存在,在火山多次喷发的晚期就有形成富铁矿的可能。这一规律不仅控制着海相火山型铁矿的形成,而且也支配着陆相火山型铁矿(宁芜型)。因此,在我国的各地质时代的优地槽区和东部中生代断陷区就应当注意这种富铁矿存在的可能性。特别是火山喷发旋回较多的地段,更有利于富铁矿的形成。

还应当提出的是,所谓的“地轴”,主要是古老断块边缘的翘起部分,是活动地区(或活化地区),而不是稳定地带。在它们上面前寒武纪贫铁矿,常易被后期构造——岩浆活动改造成为富铁矿。

铁质的运移和富集绝大多数是受构造断裂所控制的,因而我们探索富铁的分布规律时,就不能不考虑构造断裂的方向。我国燕山运动以后构造系统,东部地区主要是李四光同志指出的新华夏系(北北东向);西部地区主要是李四光同志提出的西域—西藏系(北西西向)。另外,还有一些近南北向和近东西向的构造。据我们最近研究结果,东部地区除北北东向断裂外,还有一些不显著的北北西向断裂,两者共同组成X型共轭断裂;西部地区除北北西向断裂外,也有一组不太显著的北西西向断裂,两者也组成X型共轭断裂。被这些断裂所切割成近似菱形的断块,在东部,长轴多近南北向,在西部,长轴多近东西向。而且我们又可看出近南北向和近东西向构造大多分别为牵就(追纵)北北东—北北西和北东东—

北西西断裂而成的构造。这些断块边缘和内部隆起及凹陷构造又多受这些断裂所控制。例如，华北平原下部的隆起和凹陷，南部多为北西西向，如太康隆起，北部多为北东向，如沧县隆起。但隆起上的高部位则多处于它们与其它断裂相交汇的地方。如太康隆起上有为北东断裂所控制的高点，沧县隆起上有为北西西控制的高点。华北平原边缘的隆起带上的高点和低点也常在上述几组断裂交汇处。它们既控制着风化淋滤富铁矿的位置，也支配着火山型、岩浆型和接触交代型富铁矿的形成。新疆塔里木断块边缘的隆起带，受北西西向和北东向两组断裂的控制尤为明显，这是不能忽略的构造现象。

还值得注意的是，我国东部地区前寒武纪条带状铁矿建造的构造线多呈经向分布。世界其他地区如苏联的克里沃罗格和库尔斯克、巴西的米纳斯吉拉斯和卡托贾斯、印度的比哈尔和奥里萨邦的辛格赫尔渤胡姆——克昂支哈尔——鲍纳伊区、非洲利比利亚和南美洲圭亚那地盾、加拿大的拉布拉多和巴芬岛等的前寒武纪条带状铁矿建造大多呈近南北的走向，且多半为与绿岩系有关的奥哥马型铁矿建造。这可能受太古代末至元古代初铁矿形成时期的地球自转运动所产生的离极力所支配，与全球性北东—北西向X型共轭断裂网格有关。另外，科里奥利力和转动角速度不均一效应对于元古代所形成的近东西向构造也起着支配作用，如委内瑞拉、塞拉利昂和利比亚以及澳大利亚哈默斯利富铁矿的形成就与近东西向构造有关，且其中大半为苏必利尔型铁矿建造。这样的构造控制因素，对我们寻找风化淋滤型富铁矿，是一重要的线索。

我国地大物博。我们相信，我国广大地质人员认真贯彻

落实毛主席关于“**开发矿业**”的伟大教导，以阶级斗争为纲，坚持党的基本路线，用毛主席哲学思想指导找矿勘探，坚持实践第一，坚持群众路线，加强富铁矿成矿规律的研究以及发展新的综合勘探富铁矿的技术和方法，一定会尽快地找到大型富铁矿，为我国社会主义革命和建设作出应有贡献。

在编写地质构造部分，叶洪同志曾给予协助，谨此致谢。

第一章 地球演化对于铁矿形成的控制

第一节 铁在地球内部的分布

铁是地球中最丰富的元素。地球基本上是由铁(35%)、氧(30%)、镁(13%)、硅(5%)、镍(2.4%)、硫(1.9%)、钙(1.1%)和铝(1.1%)等几种主要元素组成的。其它元素共约占地球的0.5% (注: 上述数字为重量百分比)。占地球总质量1/3还要强些的铁在地球内部是怎样分布的呢? 为了说明这个问题, 在这里有必要先简单地介绍一下地球内部的结构。

地球内部的结构和组成, 无论在垂向上, 还是在横向上, 都是不均一的。

从垂向上看, 地球具有分层结构的特点。图 1-1 是地球内部结构的化学键模型。此图表明, 从地表至地心, 物质的化学键形式, 由离子键通过共价键, 最后过渡为金属键。自然, 还有另一些关于地球内部结构的模式, 但无论那一种模式, 它们都显示了地球内部垂向上呈层结构的特点。显然, 这种呈层结构是因为物质成分、结构以及物化状态的差异而引起的。更应该指出的是, 现今的地球内部分层结构, 是地球自形成以来, 在约50~40亿年的时期中, 地球运动和演化的结果。伟大革命导师恩格斯早就指出: **“一切运动的基本形式都是接近和分离、收缩和膨胀,——一句话, 是吸引和排斥这一古老的两极对立。”**(《自然辩证法》, 加着重号者在原著中为黑体字, 下同。) 地球的运动和演化, 如同其他物

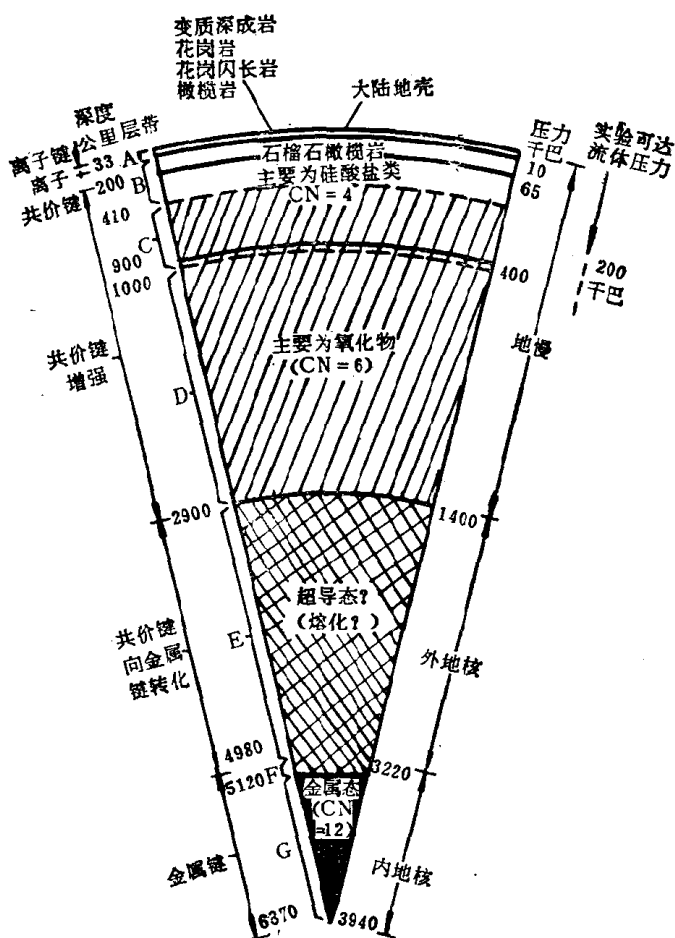


图 1-1 地球的化学键模型
(CN = Si 的配位数)

质的运动和演化一样，都是由“吸引”和“排斥”这一对矛盾的相互斗争、相互作用、相互依存和相互转化所引起的。关于这一点，我们将在谈下边问题时进一步论述。

从整体上看，我们可以将地球自地心向地表分为地核、地幔和地壳，进一步还可以将地幔分为下地幔和上地幔。在地球物理学中，一般将地球分为图1-1中所示的A、B、C、D、E、F和G七层。其实，上述各层还可以进一步细分为许多亚层。就上地幔（B层）来说，其中75至250公里深度上还有一层软流层（也叫低速层）。该层由二辉橄榄岩组成，以部分熔融和P波（地震波纵波）的低传播速度为特征，是玄武岩浆产生的源地。地壳又可分为大陆地壳和大洋地壳。大陆地壳自上而下可以分为沉积壳层，花岗岩质壳层和玄武岩质壳层，而在大洋壳中没有花岗岩质壳层。这里顺便提一下，现今国外流行的板块构造说将软流圈以上的地幔顶部和地壳合称为岩石圈，并提出了岩石圈板块在软流圈上发生大规模水平运动的模式；而早先的大陆漂移说（魏格纳，1912）主张花岗岩质的大陆在玄武岩质层上大规模地漂移。我们知道，无论花岗岩质壳层，还是玄武岩质壳层都是固体，因此，它们之间的摩擦力是很大的，很难设想在这样的界面上有发生大规模漂移的可能性。从这一点来看，板块构造说就把大陆漂移说往前推进了一步，使之更为合理些。

从横向上看，地球的岩石圈有以块断结构为主的特点。大陆、大洋以及它们之间的过渡带（大陆边缘或岛弧），是地壳中最大的断块。它们在结构和组成上以及分异过程的程度和运动方式等方面都有很大的差异。与地球垂向上的分层结构一样，地球的岩石圈在横向上的块断结构也是在吸引和排斥这一古老的两极对立中地球运动和演化的结果。因此，地球无论在垂向上的分层结构，还是地球岩石圈在横向上的块断结构，都是随地球运动和演化的过程而变化的。用哲学的语言来说，空间和时间本来就是相互关联，相互依存的。

这就是我们主张力学分析应与历史分析相结合的基本出发点。

在介绍了现今地球的内部结构之后，我们再来看一看铁在地球内部究竟怎样分布的。

应该指出，现今世界上最深的钻井也未打到地下10公里深处，因此，我们对地球内部组成的认识主要来自于地球内部的地球物理测量，高温高压下地球物质的模拟试验以及陨石和月岩的研究等方面资料。

以往，大多数人推测地核是由以铁为主的铁镍合金组成的。自从将冲击作用的原理使用于高温高压实验之后，人们已可以在实验室内模拟地核内的压力和温度条件，测试地球物质的密度。试验结果表明，在地核的压力条件下纯铁、纯镍、或它们的合金的密度均要比实际测得的地核密度大得多。只有当铁中加入一定比例的硫或硅（10~20%）以后，其密度才与实测的数值相当。即便如此，人们还是公认，地核主要是由铁组成的。有人计算过地核的总质量约占地球总质量的31.4%。如果我们假设地核的80%（重量百分比）由铁组成，那末地核中的铁量就约相当于地球全部质量的25%。换一句话说，占地球全部重量35%的铁将近6/10集中于地核中。

地壳基本上是由氧（46%）、硅（28%）、铝（8%）、铁（6%）、镁（4%）、钙（2.4%）、钾（2.3%）、钠（2.1%）等八种元素组成。其中铁占第四位。有人计算过，地壳的总质量约为地球的0.4%。只要简单地算一下即可知，地壳中铁量不及地球内部铁量的万分之一。换一句话说，地球中的铁约6/10集中于地核中，其余部分的铁基本上集中于地幔中。一般是将地壳以下至400公里深度的地球部分（B层）称为上

地幔，而将400公里深度以下至 2900 公里深度的部分称为下地幔。据 A. E. Ringwood 的资料，上地幔的可能成分是： SiO_2 45.16, MgO 37.49, FeO 8.04, Fe_2O_3 0.46, Al_2O_3 3.54, CaO 3.08, Na_2O 0.57, K_2O 0.13, Cr_2O_3 0.43, NiO 0.20, CoO 0.01, TiO_2 0.71, MnO 0.14 和 P_2O_5 0.06。若将 Fe_2O_3 换算为 FeO ，那末上地幔成分中铁 (FeO) 占 8.45%。下地幔的成分大体上可以用以下数学式来表示： $0.40 \text{ MgO} + 0.16 \text{ FeO} + 0.44 \text{ SiO}_2$ 。也就是说，下地幔成分中 FeO 约占 16%。由此可见，地幔中铁又主要集中于下地幔。

以下我们还会谈到，自地质时期以来，铁矿的形成主要与地壳和上地幔中所发生的使铁富集的过程有关。尽管地壳和上地幔中的铁量占地球全部铁量的比例极小，但是它们的铁的总含量仍是很惊人的。有人计算过，地壳的质量为 25×10^{24} 克。将此值乘以地壳中铁元素的相对丰度 (6%，重量百分比)，我们就可以得到地壳中含铁的总量为 1.5×10^{24} 克，即 1.5×10^{18} 吨。当然，如此巨大数量的铁，其绝大部分分散于组成地壳的各种岩石中，仅少部分形成了有工业价值的铁矿。

第二节 铁在地球演化过程中的分异和富集

地球的演化过程控制着铁元素的分异、富集和铁矿的形成作用，所以在探讨铁矿的成因和富矿形成的规律时，不能不考虑地球的演化历史。地球的演化大致可分为前期和后期两大阶段：前期大约在 40 亿年以前，可称为地球的天文时期或行星时期；后期大约在 40 亿年以后，可称为地球的地质时期。