

地球外核在生锈吗？

地球外核在生锈吗？



美国亚利桑那州纪念碑谷的猫头鹰岩。该岩石的红色来自于氧化铁矿物。最近的实验表明，铁氧化物也可能在地球表面之下形成，甚至深达地核与下地幔的交界处。

当俯冲带携带着含水矿物深入到地幔深处时，可能就会“锈蚀”地球的铁质外核，形成巨大的氧气汇。之后，这些氧气就会回到大气层中。

地球表面的铁，无论是简单的钉子还是坚固的大梁，当暴露在潮湿空气或含氧的水中时，就会逐渐发生氧化反应。这种反应的红褐色产物就是铁锈，可以由各种形式的含水氧化铁和氧化铁氢氧化物组成。在美国西南部的干旱气候区，以及其他许多地方发现的红色岩石都属于同一种氧化铁矿物——赤铁矿；而在潮湿的环境中，像赤铁矿这样的铁矿石会风化成铁的碱式氧化物——针铁矿（ FeOOH ）。

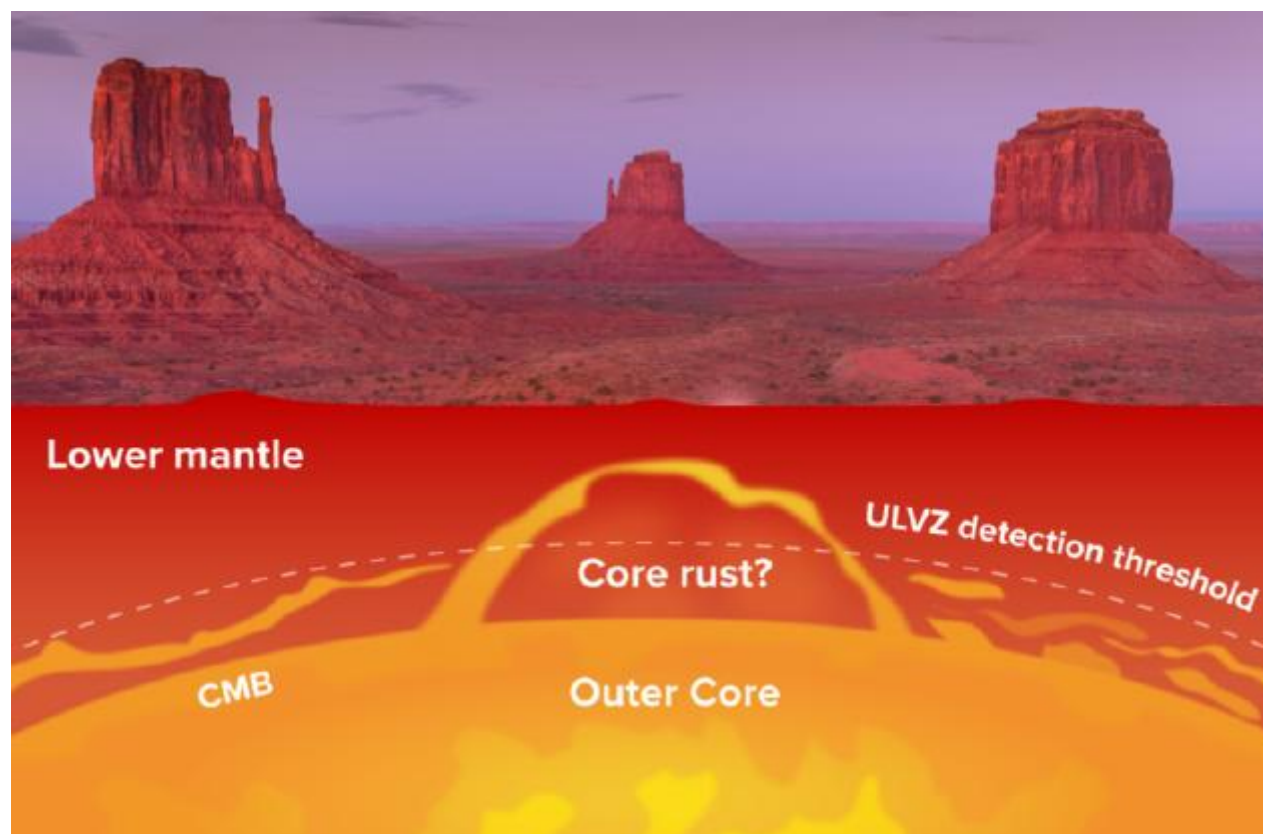
在地球深处，确切地说，在地球表面以下 2900 千米深处，大量的熔融铁组成了地球的外核。那么，外核也会生锈吗？

最近，科学家在实验中发现，当铁在接近 100 万大气压（类似地幔深处）的压力下与水分——以水或含氢氧基矿物的形式——相遇时，会形成过氧化铁或高压形式的氧化铁-氢氧化铁，结构与黄铁矿相同（称为黄铁矿型 FeOOH ）。换句话说，这些实验中的氧化反应确实会形成高压铁锈。

如果铁锈确实存在于外核与地幔的交界处（地核-地幔边界，简称 **CMB**，又称古登堡界面），那科学家们或许有必要更新他们对地球内部及其历史的看法。这些铁锈可以揭示下地幔的深水循环和超低速区（**ULVZs**）的神秘起源。超低速区是位于地球流体核心上方一层小而薄（不超过 50 千米）的区域，地震波速在此显著降低。这些铁锈或许还可以解释大氧化事件（**GOE**）和新元古

代氧化事件（**NOE**），前者标志着地球富氧大气层的开始，大约发生在 25 亿到 23 亿年前；后者发生在 10 亿到 5.4 亿年前，使大气中的自由氧达到现在的水平。

但是，我们如何知道古登堡界面是否已经生锈了呢？



地球表面的红色岩石主要来自于氧化的赤铁矿和针铁矿。在地球表面 2900 千米以下的地核-地幔边界（古登堡界面）可能存在的铁锈沉积物，可能由具有黄铁矿样结构的氧化铁-氢氧化铁矿物组成。这种铁锈物质可以解释地震数据中发现的超低速区（ULVZ）。超低速区的检测阈值反映了当前地震断面扫描的分辨率。

地核-地幔交界的地震特征

尽管目前还无法在古登堡界面下开采矿物，但我们可以用其他方法进行检测。如果地核会随着时间的推移而生锈，那么在古登堡界面上可能已经积累了一层铁锈，能够显示出某些地震特征。

实验室研究表明，地核的氧化铁-氢氧化铁锈（即 FeOOH_x ，其中 x 是 0 到 1 的数值）可能导致穿过它的地震横波（ V_s ）和纵波（ V_p ）速度显著降低，就像超低速区的岩石（或部分熔融）。事实上，与初步参考地球模型中作为深度函数的平均地震波速度相比，地核铁锈可以使横波和纵波速度分别降低 44% 和 23%。如果地核铁锈堆积的厚度超过 3 到 5 千米，巨大的地震波降速将使其在地震层析成像中被识别出来。

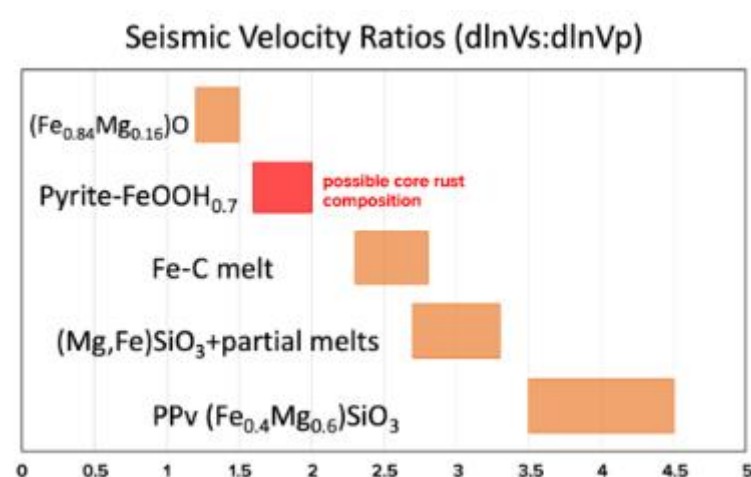
难点在于区分超低速区的地震异常是由地核铁锈引起的，还是由其他原因引起的。例如，通常认为发生在下地幔底部的部分熔融是造成超低速区的原因，而这也可能导致类似于地核铁锈造成的地震波速度降低。

理论上，科学家应该可以用地震断层扫描来区分古登堡界面的地核铁锈与部分熔融。地震断层扫描通常是通过数学反演过程生成的，该过程将计算得到的地震波形与观测到的波形相匹配。

反演过程需要确定拟合数据的可能数学解，然后根据其他考虑因素，从这些解中选择一个“最佳”解。

每一个可能的数学解都对应一组与所涉及材料的物理性质相关，但又有明显区别的模型参数，例如铁锈材料的横波、纵波和密度的相对差异，以及该材料周围地幔的平均值。

这些差异可能随地幔中材料含量不同而变化，但每种材料通常都表现出横波与纵波的微分对数比的特征值范围（ $\delta \ln V_s$: $\delta \ln V_p$ ），可以用来在地震断层扫描中区分不同材料。根据矿物物理实验可知，对于所有可能的解释超低速区来源的材料，该比值的下限为 1.2: 1，上限为 4.5: 1。在这个范围内，地核铁锈（黄铁矿型 FeOOH_x ）的比值介于 1.6: 1 和 2: 1 之间，与其他材料不同。



不同材料的地震波速度比值范围

铁锈起源的证据

到目前为止，地震学家已经在 60%的古登堡界面中进行了取样，以寻找超低速区，并已经确定了近 50 个地震波异常位置，占古登堡界面区域的 20%，这可能代表着超低速区。这些区域大多与地幔最下方的大低剪切速度省（LLSVPs）耦合， $\delta \ln V_s$: $\delta \ln V_p$ 约为 3: 1，表明存在部分熔融。

然而，其中一些位于太平洋下方 LLSVP 边缘或外部的区域，其最佳拟合比约为 2: 1。例如，位于太平洋 LLSVP 北部边界（约北纬 9 度，西经 151 度）的一个超低速区，以及墨西哥北部（约北纬 24 度，西经 104 度）下面的一组超低速区都探测到了表明黄铁矿型 FeOOH_x 存在的 $\delta \ln V_s$: $\delta \ln V_p$ 比值。

这些超低速区的一个共同特点是，它们位于古登堡界面上一个温度相对较低的区域，比 LLSVP 内的平均温度低几百开尔文。低温表明这些区域不是由熔融机制产生的。值得注意的是，科学家已经确定，墨西哥北部下方的区域是由大约 2 亿年前沉积到北美洲和中美洲西部的深俯冲遗迹组成的，这表明从俯冲板块释放的水可能已经锈蚀了古登堡界面处的外核。

地核生锈的后果

科学家认为，地球下地幔的主要矿物布氏岩（**bridgmanite**）几乎不具备储水的能力。然而，地核的锈蚀可能会在古登堡界面形成一个容量的蓄水池——**FeOOH_x** 铁锈可能含有重量分数约 7% 的水。因为地核铁锈平均比地幔重，这个蓄水池会倾向于停留在古登堡界面。因此，在理论上，水可以被运输并储存在地核外侧，至少在地幔对流将这些水从俯冲板块遗迹附近的较冷区域带走，并使其热不稳定之前是这样。

这些地核附近的水是否会循环回地表，以及在什么时候回到地表，很大程度上取决于地核铁锈的热稳定性。一些科学家在实验工作的基础上，声称 **FeOOH_x** 在古登堡界面下的压力下，所能承受的最高温度约为 2400K。然而，其他科学家在类似压力下，观察到 **FeOOH_x** 可以存在于 3100 至 3300K。但无论 **FeOOH_x** 能承受多大的最高温度，当地核铁锈随着地幔对流迁移到古登堡界面更热的区域时，很可能会分解为赤铁矿、水和氧气。这一过程为地球大气的氧化历史提供了可能的解释。

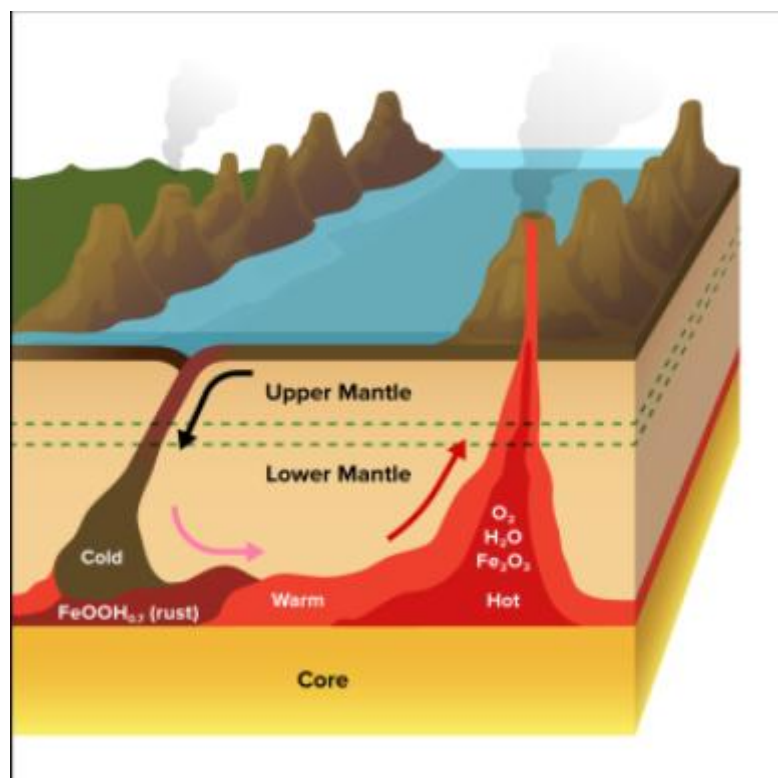
地质、同位素和化学证据表明，在太古宙期间，地球大气的大部分或全部都处于缺氧状态。在太古宙之后，大约 24 亿年前的大氧化事件时期，分子氧首次进入大气。大气中氧含量的第二次主要上升期是新元古代氧化事件，大约发生在 7.5 亿年前，使其浓度接近今天的水平。

科学家仍然不确定这些氧化事件背后的原因。对于大氧化事件的一个可能解释是蓝藻的出现，蓝藻是植物光合作用的早期先驱。近 20 亿年之后发生的新元古代氧化事件，被归因于海洋光合作用的快速增加和光周期的增长（即更长的日照时间）。

然而，这些解释远非无懈可击。例如，除了大氧化事件与蓝藻在地球上的出现时间不匹配之外，若干研究都表明大气中的氧气在大氧化事件开始时大量增加之后，可能紧接着就急剧下降至较低水平，并持续了数百万年。到目前为止，基于蓝藻光合作用的解释还没有令人信服的证据。

此外，尽管科学家普遍认为大氧化事件与新元古代氧化事件期间相比，大气中的氧浓度只略微提高，但在实验室研究中，通过分析光周期对微生物席——其光合作用群落和化学合成群落具有竞争关系——净氧输出的影响，他们得出了一个矛盾的结果。在新元古代氧化事件期间，更长的日照并没有导致这些微生物席产生更多的氧气；实验表明，在新元古代氧化事件期间，昼长增加（从 21 小时到 24 小时）所导致的氧气增加可能只有大氧化事件期间（昼长增加至 21 小时）的一半。

因此，归因于蓝藻和光周期长度的变化并不能对大氧化事件或新元古代氧化事件期间大气氧含量的增加提供完整或一致的解释，我们还不能排除这些事件起源的其他机制。



地核铁锈 ($\text{FeOOH}_{0.7}$) 可能在携带含水矿物的相对低温的俯冲板块与外核相遇时形成。从低温区域流出的铁锈在地幔对流的作用下，会沿着地核-地幔边界迁移到地幔柱根部的较热区域，并在那里变得不稳定，分解为赤铁矿、水和氧气

俯冲、迁移、对流、喷发

几十年来，研究者一直未能找到确凿的证据，来证明地球板块构造是何时开始的。然而，最近的一些研究表明，俯冲作用在 33 亿年前就开始将含水矿物带到地幔深处。实验研究显示，俯冲板块中的含水矿物能够将水一直输送到古登堡界面。如果是这样的话，第一块古代岩石板块在与地核接触时可能就发生了锈蚀。地核铁锈可能在古登堡界面中逐渐堆积，从而形成了超低速区。在地幔对流的驱动下，这堆铁锈从熔融的外核顶部较冷的俯冲区域迁移，开始逐渐升温，当它到达地幔柱扎根的较热区域时，可能就会变得很不稳定。

就像典型的火山爆发会间歇性地发生一样，温度驱动的地核铁锈分解可能会导致地表氧气的间歇性爆发。与蓝藻光合作用逐渐增加的氧气相比，这样的爆发释放氧气的速度可能远快于地表环境的反应和消耗，导致大气氧气水平最初迅速上升，随后下降。

与地表岩浆喷发的持续时间相比，大型铁锈堆的堆积和向热分解地点的迁移可能需要更长的时间。事实上，一些形成的铁锈堆可能还没有达到足以引起分解的温度，而它们周围的深层地幔的负浮力会使其保持在古登堡界面下。地质记录表明，地球表面直到 32 亿年前还都被海洋完全覆盖。水从地球表面的净去除，以及在深层地幔中以地核铁锈的形式储存，都可能推动了太古宙大陆的出现，尽管由板块构造驱动的地表、地形变化，以及浮力大陆的增长对此也有贡献。

潜在的范式转变

我们每个人都能看到地球表面的铁会生锈，但遗憾的是，没有人能直接证明地球表面 2900 千米以下的液态铁核心也会发生类似的锈蚀现象。然而，持续的研究将有助于消除种种不确定性，并回答一些关键的问题，比如地核铁锈是否与大氧化事件和新元古代氧化事件有关。

我们尤其需要更多的实验室实验，来精确确定地核铁锈在古登堡界面条件下与熔融铁达到平衡时的热稳定性和成分稳定性极限。例如，我们需要研究地核铁锈与液态铁在高压、高温下的平衡。其他的研究可以检验铁锈在高压下的热稳定性。这些实验很有挑战性，但就目前激光加热的金刚石对顶砧的实验能力而言，是可行的。

此外，我们还需要进行额外的工作，以确定俯冲何时开始，特别是何时开始“湿俯冲”，即将含水矿物带到地球内部深处。地球化学证据表明，湿俯冲直到 22.5 亿年前才开始，而不是 33 亿年前。这么晚才开始的湿俯冲可能会挑战地核铁锈是大氧化事件起源的假说。

此外，地幔对流是否涉及层状环流（上、下地幔中单独的对流单元）、全地幔环流或二者的某种混合形式，这些问题仍需澄清。如果地幔盛行层状环流，俯冲板块将无法进入下地幔。因此，无论是全地幔还是混合对流，俯冲板块及其携带的含水矿物都必须存在，才能到达古登堡界面，并导致潜在的外核生锈。

如果我们能拼凑出完整的拼图，那么外核的铁锈很可能确实是地球上一个巨大的内部氧气发生器——或许下一场大型的大气氧化事件即将发生。这种事件可能会引发各种各样的问题，包括对未来环境、气候和可居住性产生的影响。在短期内，确认地球的外核铁锈将使我们转变对地球深层内部的理解，并预测地球深层内部将如何从根本上影响地球表面的环境和生命活动。（任天）

关键词：地球