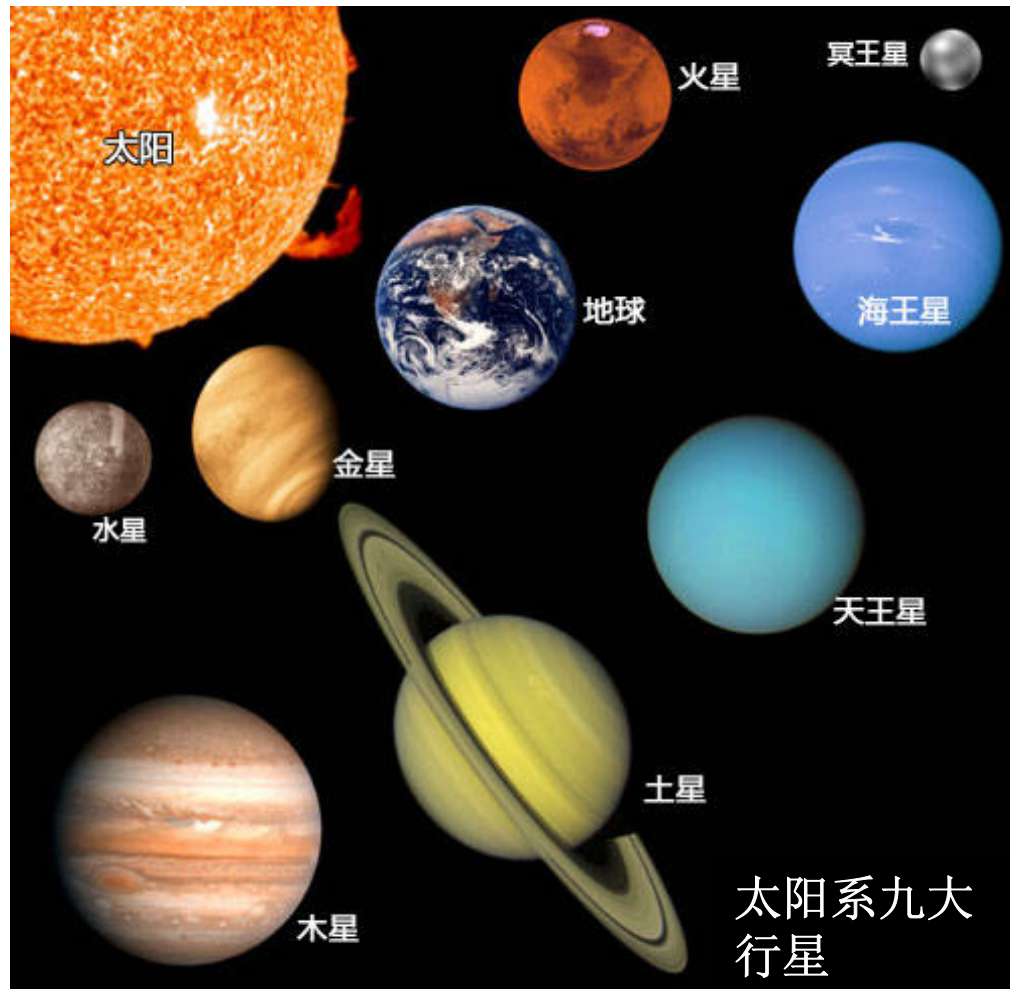


第二章 太阳系和地球系

统的元素丰度

引言：太阳系由太阳、行星、行星物体（宇宙尘、彗星、小行星）和卫星组成，太阳的质量占太阳系总质量的**99.8%**，因此太阳的成分是研究太阳系成分的关键

地球是太阳系的一个天体成员，它与整个太阳系具有统一的成因联系及物质组成，认识太阳系的物质组成对研究地球的成因和元素起源有重要意义，也为理解地球形成后的演化、地球各个圈层的发展及元素的迁移和分配规律提供了基础



本章主要内容

1. 基本概念
2. 元素在太阳系中的分布规律
3. 地球的结构和化学成分
4. 地壳的化学成分



第一节：基本概念

- 地球化学体系
- 元素分布和分配
- 元素的丰度
- 绝对含量和相对含量

1.1 地球化学体系

- 按地球化学的观点，把所要研究的对象看作是一个地球化学体系，每个地球化学体系都有一定的空间，都处于特定的物理化学状态（**T**、**P**等），并且有一定的时间连续
- 根据研究需要，这个体系可大可小，小至某个矿物包裹体，某矿物、某岩石都可以看做一个地球化学体系；某套地层、岩体、矿床（某个流域、某个城市）也是一个地球化学体系；从更大范围讲，某一个区域、地壳、地球直至太阳系、整个宇宙，都可以看做一个地球化学体系

1.2 元素分布

元素分布是指元素在各个宇宙或者地质体中（即一个地球化学体系，如太阳、陨石、地球、岩石、矿物）整体的含量

元素在地球化学体系中的原始分布量与下列因素有关：

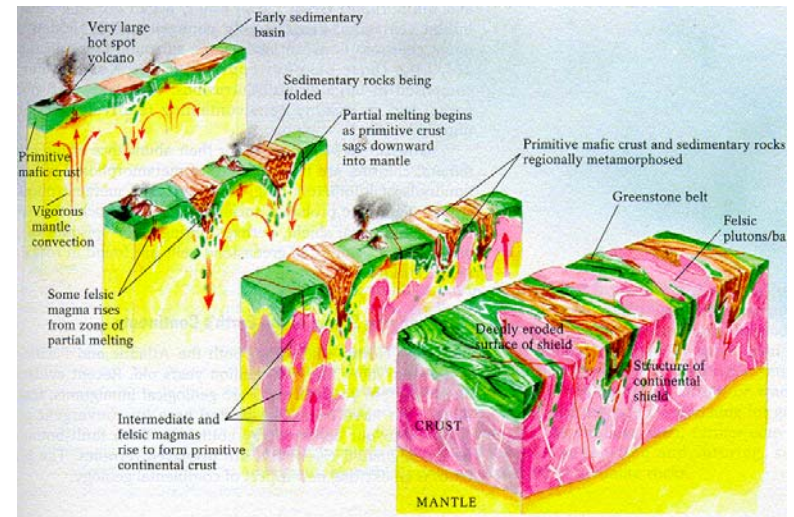
- 元素的起源
- 元素的质量
- 原子核的结构和性质
- 地球演化过程中的热-核效应

1.3 元素分配

元素分配指的是元素在各个地球化学体系内各个区域区段中的含量

地壳中元素的分配指的是地壳形成以后，随着它的演化、大量地质作用过程发生后，元素在地壳的各个不同部位和各种地质体中的平均含量。元素的分配取决于以下因素：

- 地质作用中元素的迁移
- 元素的化学反应
- 元素本身的地球化学性质



分布与分配的关系

元素的分布与分配是一个相对概念，它们之间既有联系又有区别。

分布是整体，分配是局部！

*例如：*元素在地壳中的分布就是元素在地球中分配的具体表现，而元素在地壳各类岩石中的分布则又是元素在地壳中分配的表现

1.4 元素的丰度

通常将元素在地球化学体系中的平均含量称之为丰度

元素丰度值实际上只能对这个体系里元素真实含量的一种估计，它只反映了元素分布特征的一个方面，即元素在一个体系中分布的一种集中（平均）倾向

元素的分布、分配，以及丰度都是来表征元素的含量特征的

元素丰度与含量

丰度： 相对于一个较大体系而言的，如宇宙、太阳、地球、月亮、地壳和区域地壳，称某某元素的丰度

含量： 相对一个较小的体系，如某块岩石、某个单矿物等

1.5 绝对含量与相对含量

绝对含量		相对含量		
T	吨	%	百分之	$\times 10^{-2}$
kg	千克	‰	千分之	$\times 10^{-3}$
g	克			
mg	毫克	ppm $\mu\text{g/g}$ g/T	百万分之 million	$\times 10^{-6}$
μg	微克	ppb $\mu\text{g/kg}$	十亿分之 billion	$\times 10^{-9}$
ng	纳克	ppt pg/g	万亿分之 trillion	$\times 10^{-12}$
pg	皮克			

地球化学中对常量元素（又称主量元素）的含量一般用其氧化物的重量百分比（%）表示，而微量元素一般用百万分之一（ppm）来表示

常量元素：含量 $>0.1\%$

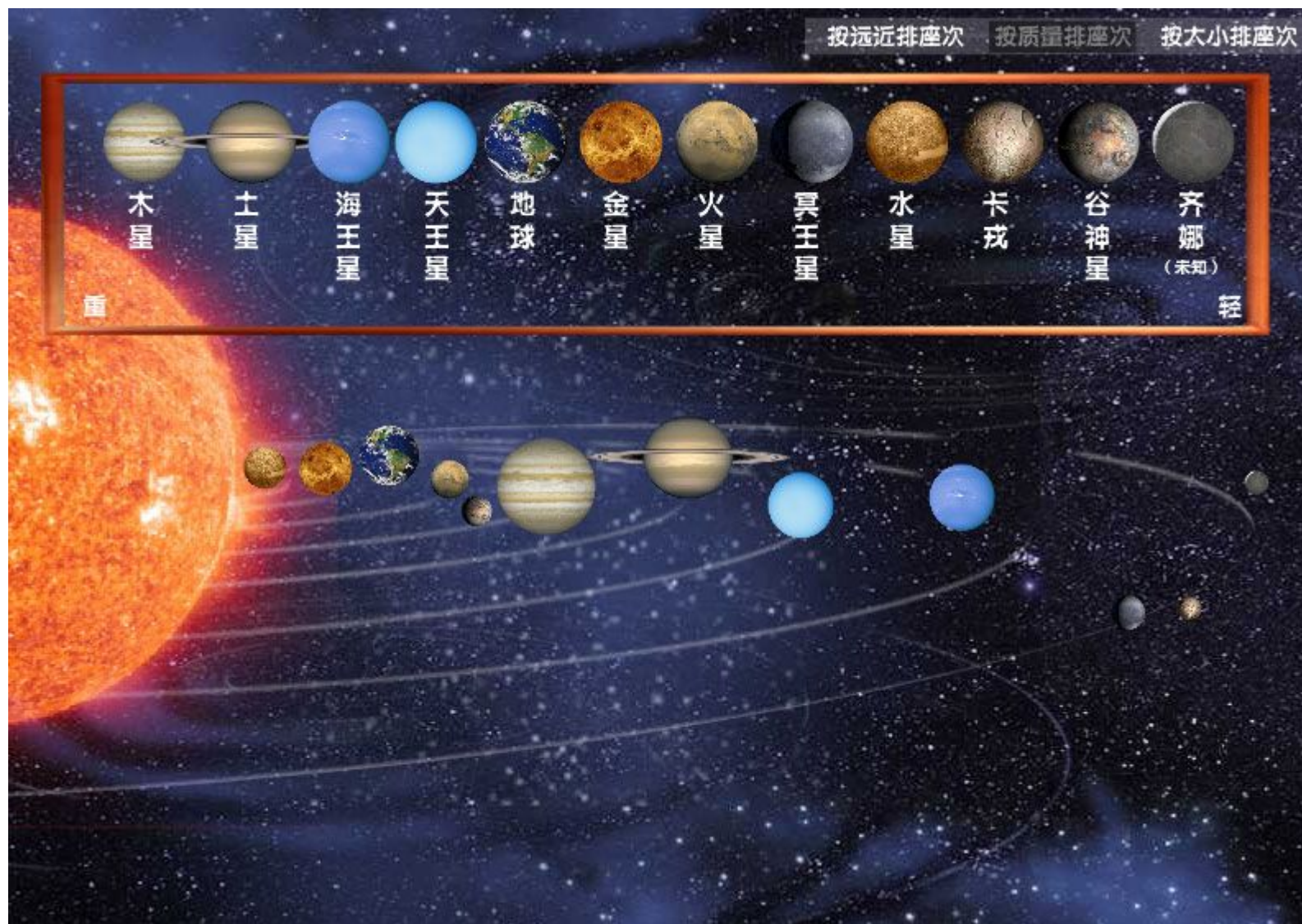
微量元素：含量 $<0.1\%$

相对概念！！

第二节：元素在太阳系中的分布规律

- 太阳系基本概况
- 获得太阳系元素丰度的途径
- 陨石及其化学成分
- 太阳系元素丰度的基本规律

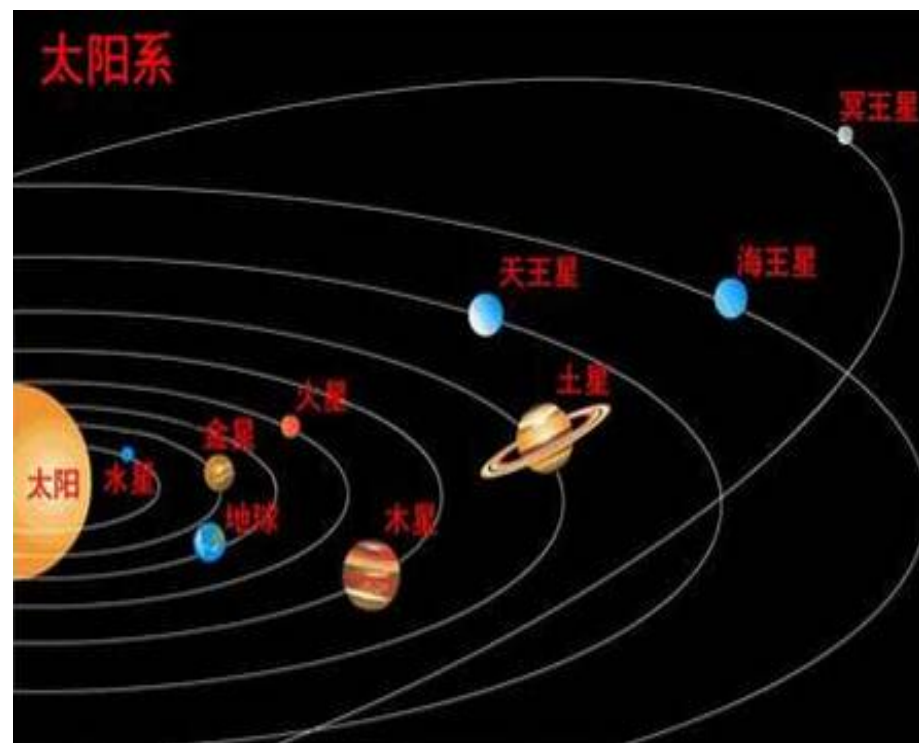
2.1 太阳系基本概况



太阳系：

是以太阳为中心，由九大行星（传统的）及其卫星小行星、慧星、流星体和行星际物质所构成的天体系统。太阳是太阳系的中心天体，占总质量的99.86%，其他天体都在太阳的引力作用下绕其公转

太阳系中只有太阳是靠热核反应发光发热的恒星，其他天体要靠反射太阳光而发亮。太阳的角动量只占整个太阳系的不足2%，而质量占0.2%以下的其他天体的角动量却占98%以上



太阳是太阳系的中心天体

太阳是银河系中的一颗普通恒星

太阳的体积是地球的130.25万倍，直径约1392000千米，质量 $1.989 \times 10^{30}\text{kg}$ ，表面温度 5770°C ，中心温度1500.84万 $^{\circ}\text{C}$

太阳由里向外分为太阳核反应区、太阳对流层、太阳大气层。其中心区不停地进行热核反应，产生的能量以辐射方式向宇宙空间发射。其中二十二亿分之一的能量辐射到地球，成为地球上光和热的主要来源

组成太阳的物质大多是些普通的气体，其中氢约占71.3%，氦约占27%，其它元素占2%

2.2 获得太阳系元素丰度的途径

太阳的成分是研究太阳系成分的关键，获得太阳成分的手段包括：

- 直接测定各种各种地球岩石和陨石
- 太阳光谱分析
- 利用宇宙飞行器对地球外星体直接或取样测定
- 分析测定气体星云和星际物质
- 研究宇宙射线
- 由物质的物理性质和成分的对应关系来进行推算

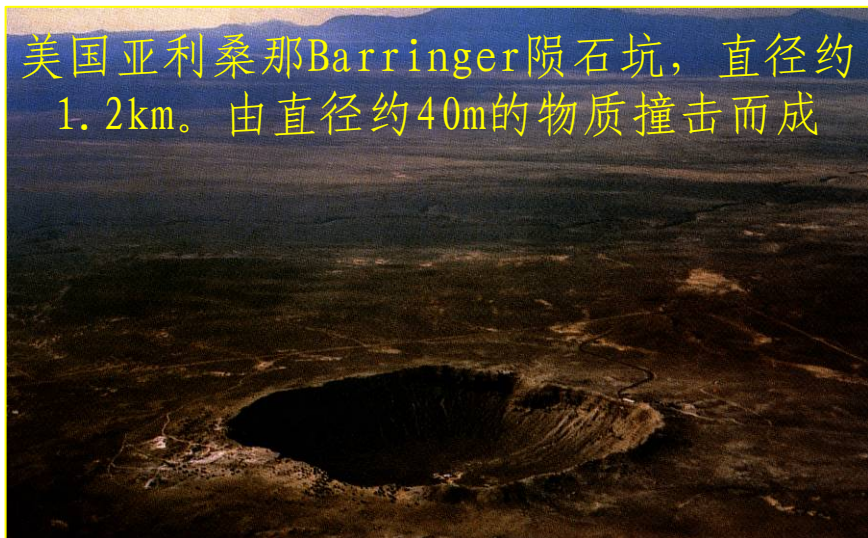
2.3 陨石及其化学成分

陨石是从星际空间降落到地球表面上来的行星物体的碎片。由于地球和太阳系具有共同的成因，因此，陨石的化学成分是获取太阳系元素丰度以及地球整体和地球内部化学成分的重要介质

1976年3月8日吉林石陨石，1770千克，目前世界上最大。



美国亚利桑那Barringer陨石坑，直径约1.2km。由直径约40m的物质撞击而成



陨石研究的意义

- ✓它是认识宇宙天体、行星的成分、性质及其演化的最易获取、数量最大的地外物质；
- ✓是认识地球组成、内部构造和起源的主要介质；
- ✓陨石中60多种有机化合物是非生物合成的“前生物物质”，对探索生命前期的化学演化开拓了新途径；
- ✓可作为某些元素和同位素的标准样品（稀土元素，铅、硫同位素等）

陨石的分类

陨石具有多种多样的类型，从几乎全部由金属组成的类型，到几乎全部由硅酸盐组成的类型。对陨石进行分类是困难的，并且存在许多争论。通常根据其中的金属含量，首先将陨石划分为四种主要类型：

石陨石	球粒陨石	约含 10% 金属
	无球粒陨石	约含 1% 金属
石铁陨石		约含 50% 金属
铁陨石		金属含量大于 90%

陨石主要是由镍-铁合金、结晶硅酸盐或两者的混合物所组成，按成份分为三类：

➤**铁陨石**：主要由金属Ni，Fe（占98%）和少量其他元素组成（Co，S，P，Cu，Cr，C等）

➤**石陨石**：主要由硅酸盐矿物组成（橄榄石、辉石）。这类陨石可分为两类，根据它们是否含有球粒硅酸盐结构，分为**球粒陨石**和**无球粒陨石**

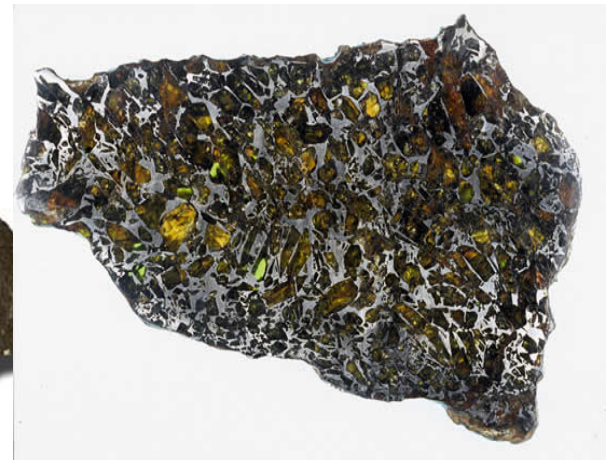
➤**铁石陨石**：由数量上大体相等的Fe-Ni和硅酸盐矿物组成，是上述两类陨石的过渡类型



铁陨石



石陨石

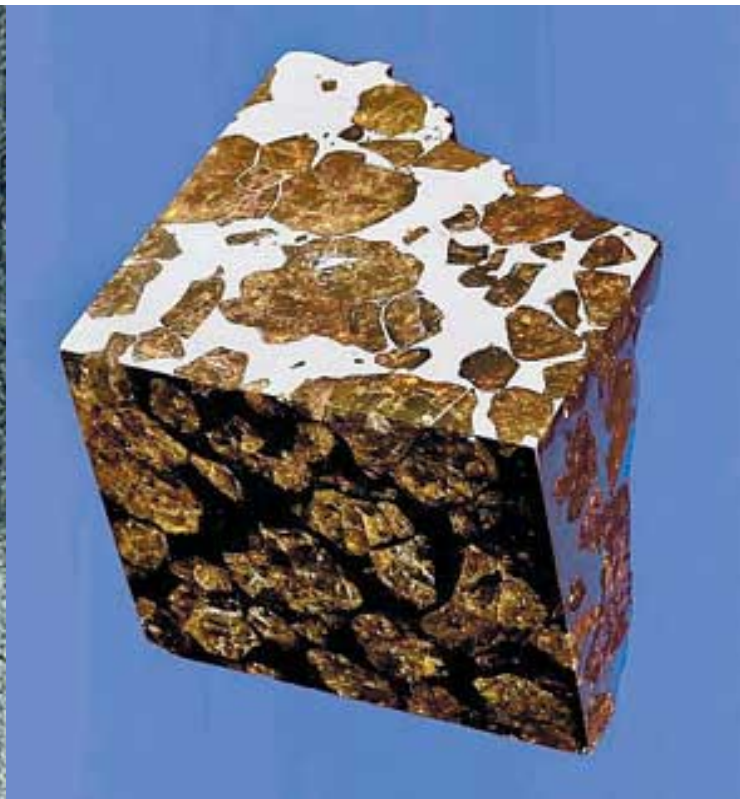


石铁陨石



The Holsinger Meteorite is the largest discovered fragment of the 150-foot (45-meter) meteor that created Meteor Crater.

铁陨石： 主要由铁纹石和镍纹石两种矿物组成，其次含少量的石墨、陨磷铁镍矿、陨硫铬矿、陨碳铁、铬铁矿和陨硫铁等。化学成分上除Ni和Fe外，还含Co、S、P、Cu、Cr、Ga、Ge和Ir等元素。少数铁陨石还含硅酸盐包体

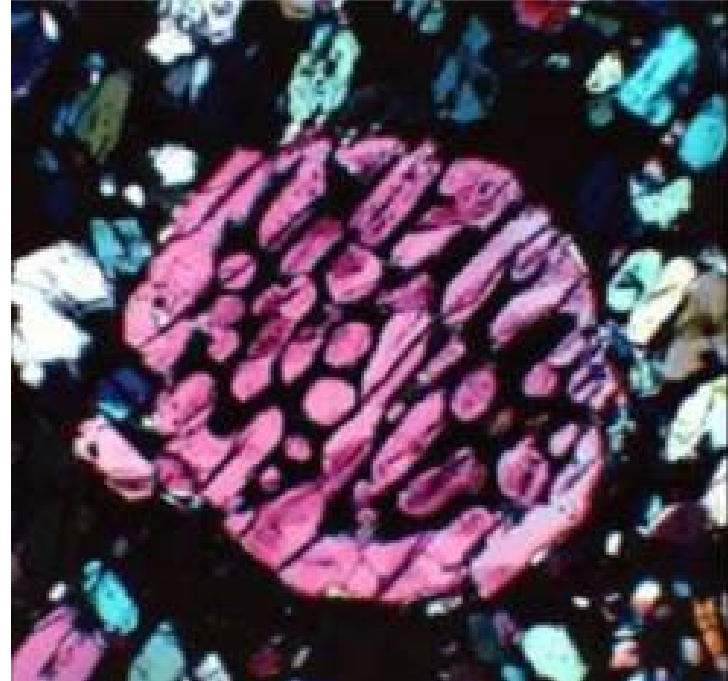


铁石陨石：由硅酸盐和铁镍金属组成。据硅酸盐矿物成分特征将铁石陨石分为4种

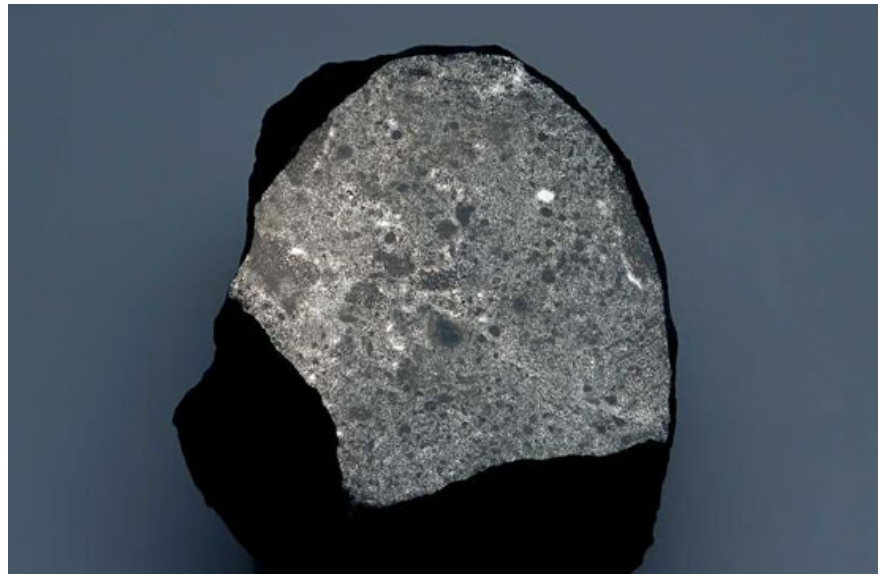
- 橄榄陨铁（P）：主要由橄榄石和组成基质的铁镍金属构成；
- 中铁陨石（M）：主要由斜长石、辉石和铁镍组成；
- 古铜-鳞英铁陨石（S）：主要由铁镍、古铜辉石和鳞石英组成；
- 橄榄-古铜铁陨石（Lo）：主要由铁镍、橄榄石和古铜辉石构成



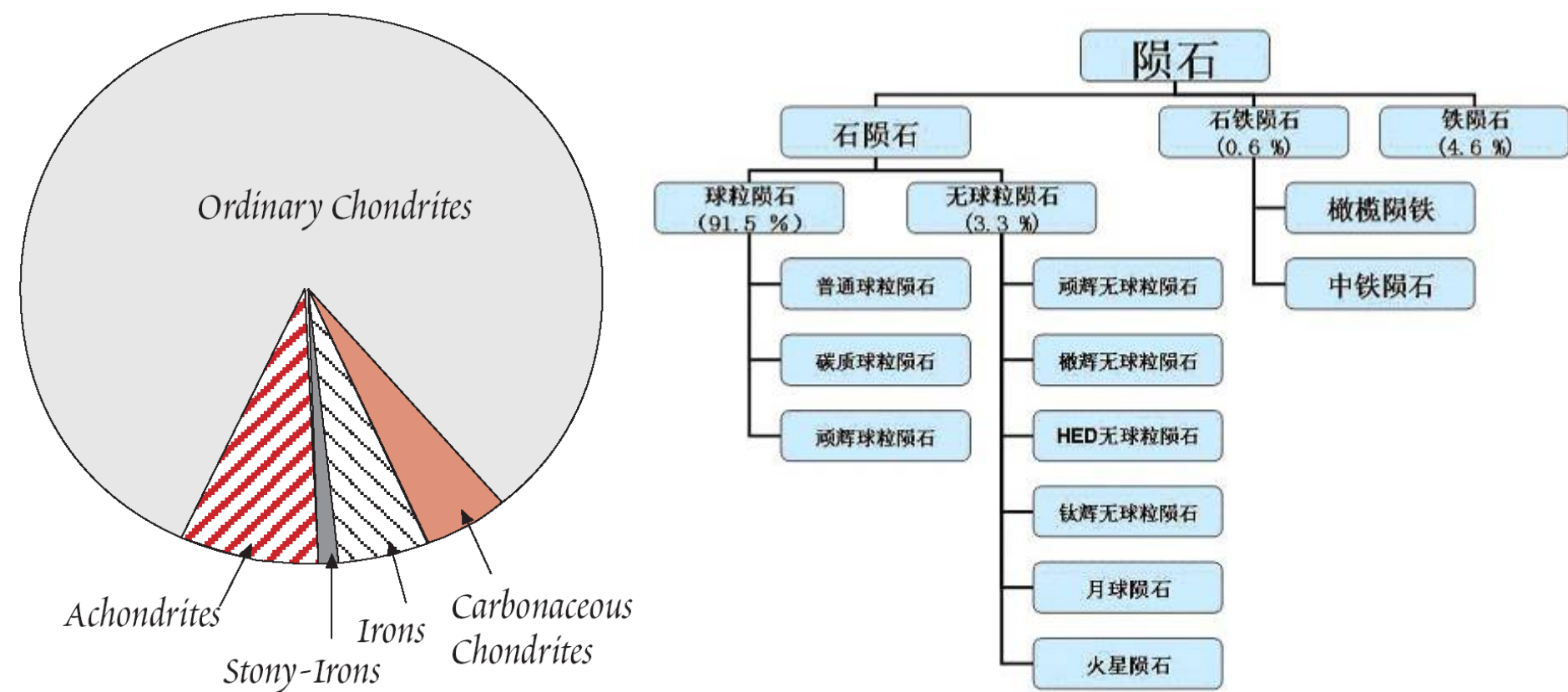
石陨石：主要由硅酸盐组成，铁镍金属含量随陨石类型不同而不同，可高达24%或更高，另有少量陨硫铁等矿物。按结构构造特征，石陨石可分为球粒陨石和无球粒陨石两大类



球粒陨石：是最丰富的一类陨石。它有球粒结构，球粒之间有比较细小的基质物质。球粒大小一般为0.1-20mm或更大，通常由橄榄石、辉石、玻璃、陨硫铁、铁镍金属及这些矿物的组合构成。球粒的矿物成分与基质类似。按矿物成分、化学组成和结构特征，球粒陨石又可划分为顽火辉石球粒陨石（E群）、普通球粒陨石（O群）和碳质球粒陨石（C群）3个化学群



无球粒陨石：它的金属铁镍含量很低或不存在，结晶程度比球粒陨石高，主要由不同矿物和角状碎屑组成的角砾岩组成。球粒陨石的斜长石主要是钙长石，而无球粒陨石主要为奥长石，橄榄石的含量也比球粒陨石低。无球粒陨石可分为**贫钙**（含CaO为0-3%）和**富钙**（含CaO为5-25%）两类。贫钙类包括顽火辉石无球粒陨石，紫苏辉石无球粒陨石，橄榄石无球粒陨石，橄辉无球粒陨石；富钙类包括钛辉无球粒陨石，透辉橄榄无球粒陨石，紫苏钙长无球粒陨石,钙长辉长无球粒陨石。无球粒陨石的矿物和化学成分与玄武岩相似，故又称为**玄武质无球粒陨石**



目前人类统计的陨石主要是石陨石，包括普通球粒陨石、炭质球粒陨石、无球粒陨石，铁陨石和铁石陨石不到10%

陨石的平均化学成分

要计算陨石的平均化学成分必须要解决两个问题：首先要了解各类陨石的平均化学成分；其次要统计各类陨石的比例。

（Goldschmidt 采用硅酸盐：镍-铁：陨硫铁=10:2:1）。陨石的平均化学成分计算结果如下：

元素	O	Fe	Si	Mg	S	Ni	Al
%	32.30	28.80	16.30	12.30	2.12	1.57	1.38
Ca	Na	Cr	Mn	K	Ti	Co	P
1.33	0.60	0.34	0.21	0.15	0.13	0.12	0.11

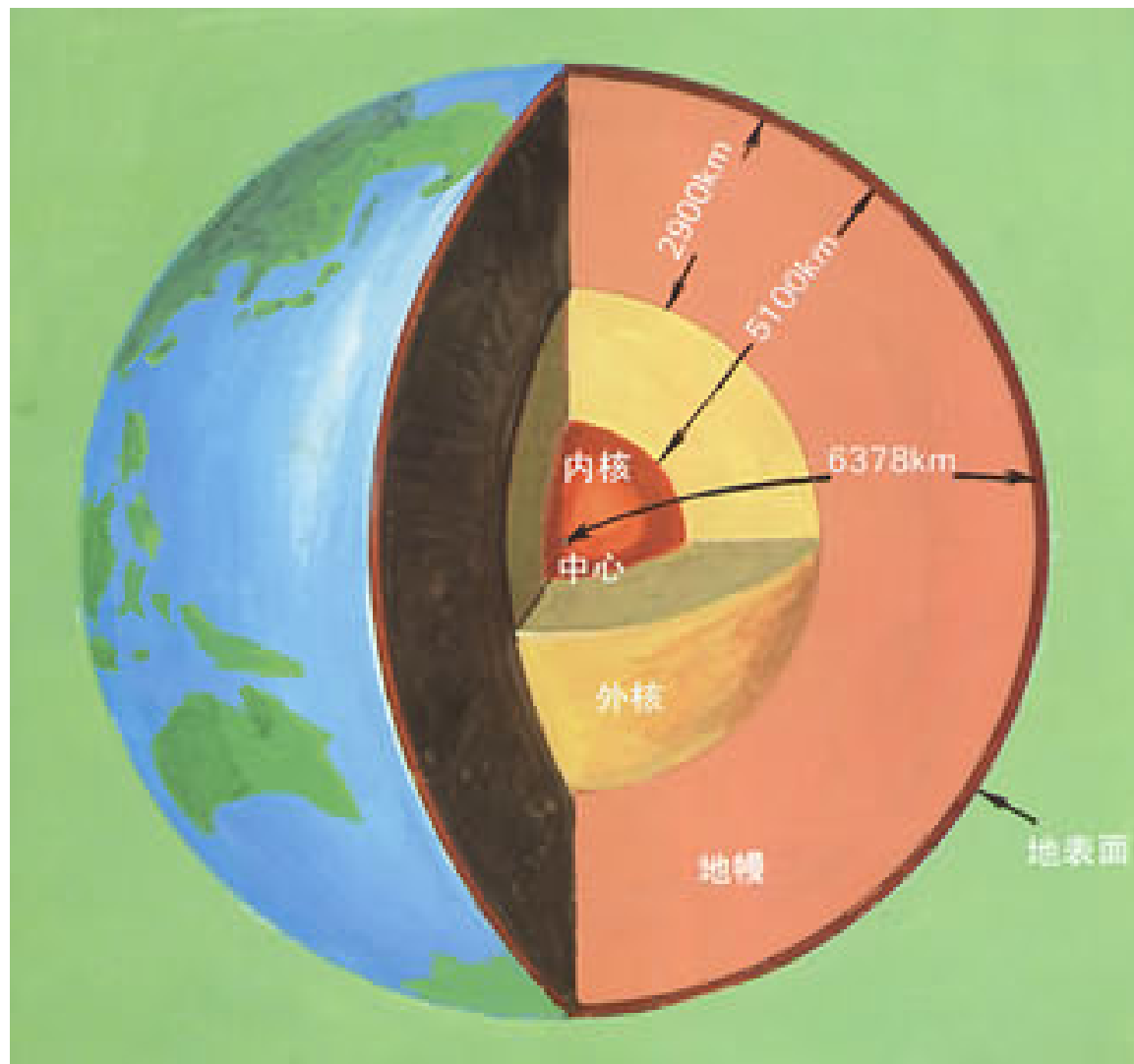
2.4 太阳系元素丰度的基本规律

- 1、H和He是丰度最高的两种元素，它们几乎占了太阳中全部原子数目的98%；
- 2、原子序数较低的元素，丰度随原子序数增大呈指数递减，而原子序数较大的（ $Z > 45$ ）各元素丰度值很相近；
- 3、原子序数为偶数的元素其丰度大大高于相邻原子序数为奇数的元素。具有偶数质子数（ A ）或偶数中子数（ N ）的核素丰度总是高于具有奇数 A 或 N 的核素。这一规律称为奥多-哈根斯法则，亦即奇偶规律；

2.4 太阳系元素丰度的基本规律

- 4、质量数为4的倍数的核素或同位素具有较高丰度。原子序数（ Z ）或中子数（ N ）为“幻数”（2、8、20、50、82和126等）的核素或同位素丰度最大。如， 4He （ $Z=2$ ， $N=2$ ）、 16O （ $Z=8$ ， $N=8$ ）、 40Ca （ $Z=20$ ， $N=20$ ）和 140Ce （ $Z=58$ ， $N=82$ ）等都具有较高的丰度；
- 5、**Li**、**Be**和**B**具有很低的丰度，属于强亏损的元素，而**O**和**Fe**呈现明显的峰，它们是过剩元素

第三节：地球的结构和化学成分



地壳

地壳为地表向下到莫霍面，厚度变化在5-80km，大陆地壳和大洋地壳之间存在显著差别

大陆地壳

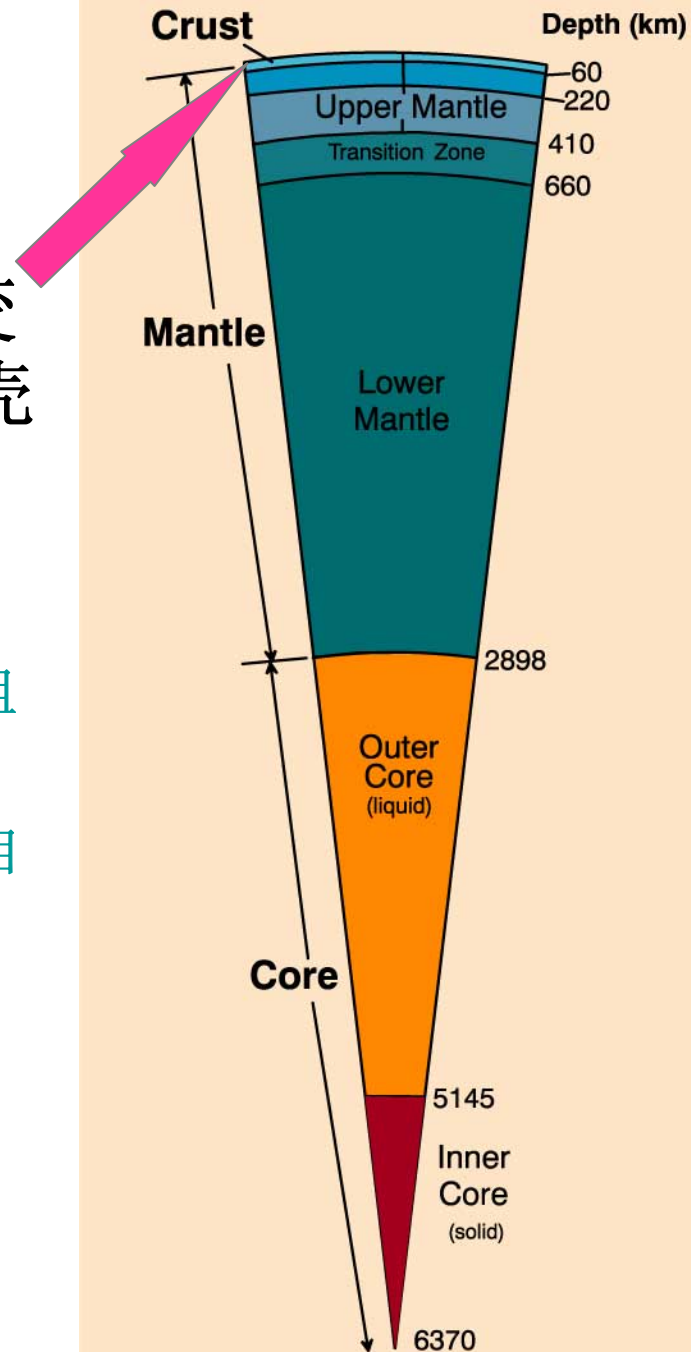
上部硅铝层，由沉积岩层和花岗岩、片麻岩等组成，富Si、K、Rb、Th、U等元素

下部硅镁层，相当于玄武岩、辉长岩或麻粒岩相岩石

大洋地壳

上部2km为未固结的海相沉积物

下部为硅镁层（玄武质岩层）



地幔

地幔为莫霍面以下到~2900km

上地幔：~410km，主要由致密、刚性的Fe-Mg硅酸盐岩组成，即斜长石相-石榴石相橄榄岩

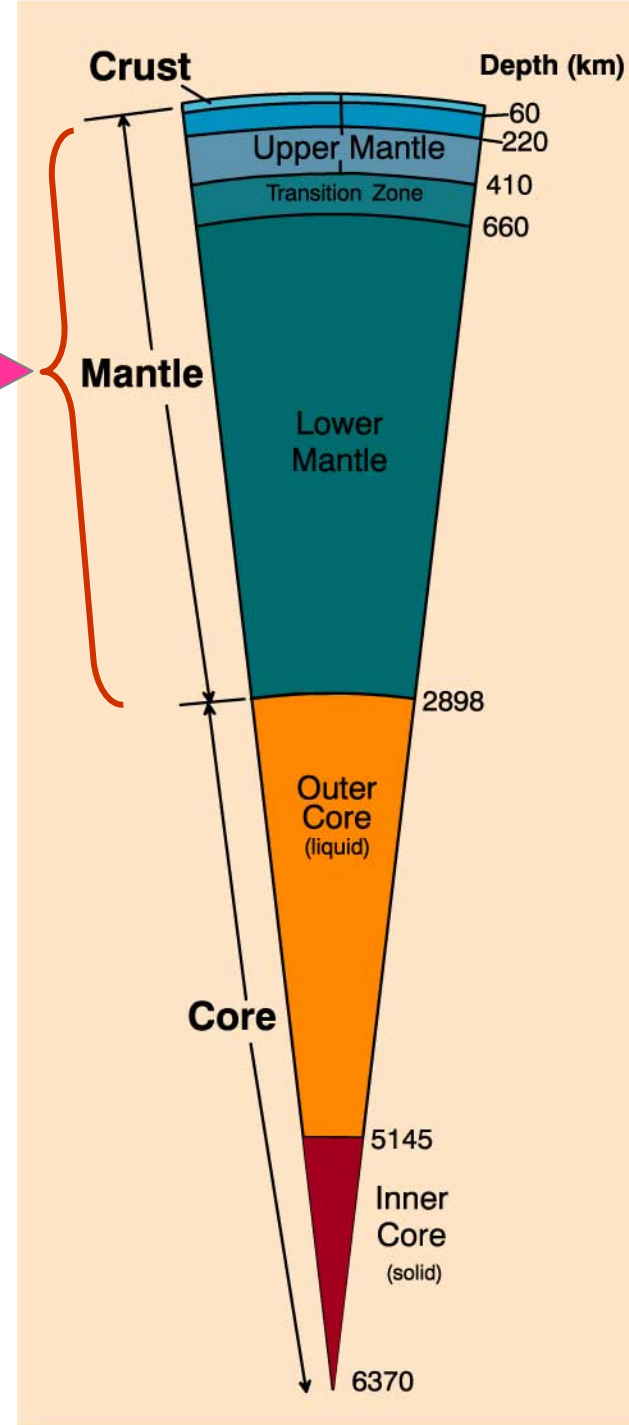
过渡带：介于上下地幔之间，是一个温度相当于岩石熔点的可流动塑性层，又称软流层。软流层内随深度变化岩石发生近等化学的同质多象转变，橄榄石和辉石发生相变：镁橄榄石 (Mg_2SiO_4 ，斜方) 转变为镁尖晶石 (Mg_2SiO_4 ，等轴)，其密度相应增加10%

下地幔：~2900km，物质组成较为均一，矿物成分变化也不大，密度更大。主要由：

橄榄石系列 $(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_4$ (55%)

钛铁矿型固溶体 $(\text{Mg}-\text{Fe}) \text{SiO}_3 - (\text{Al}, \text{Cr}, \text{Fe}) \text{AlO}_3$ (36%)

钙钛矿 CaSiO_3 (6.5%)

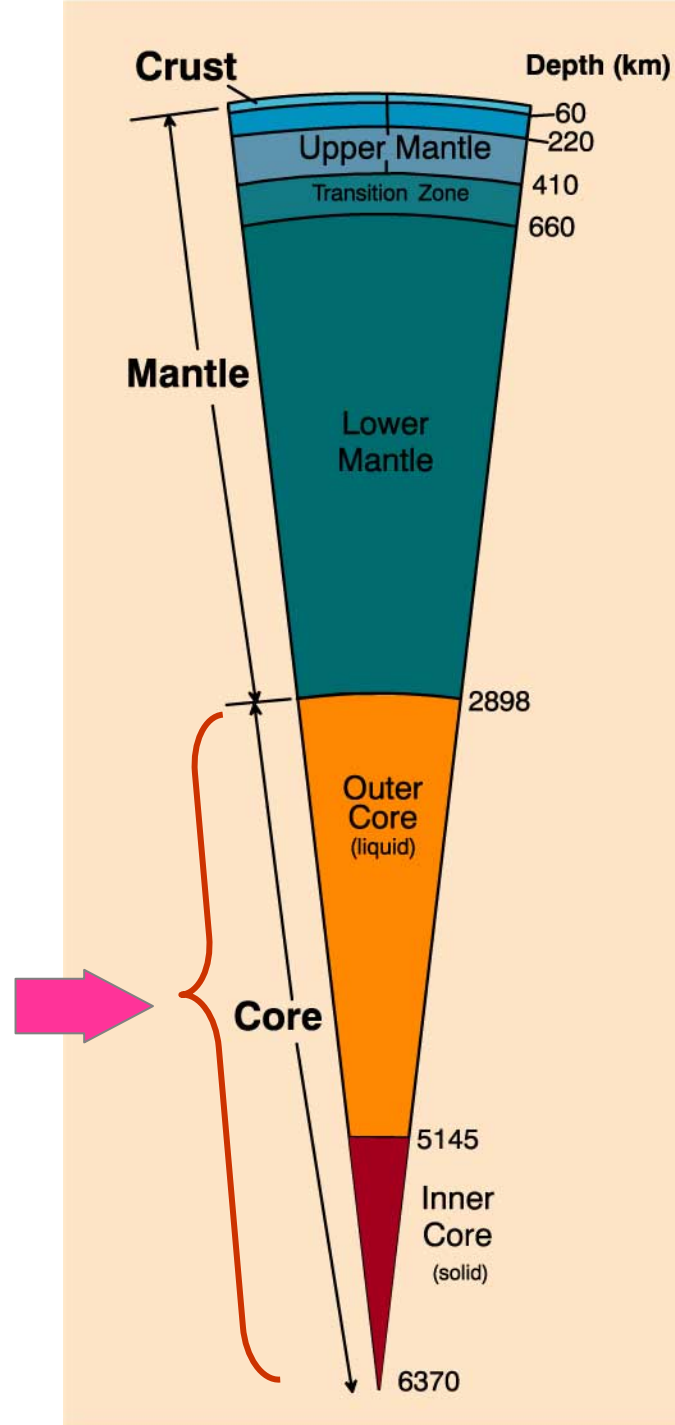


地核

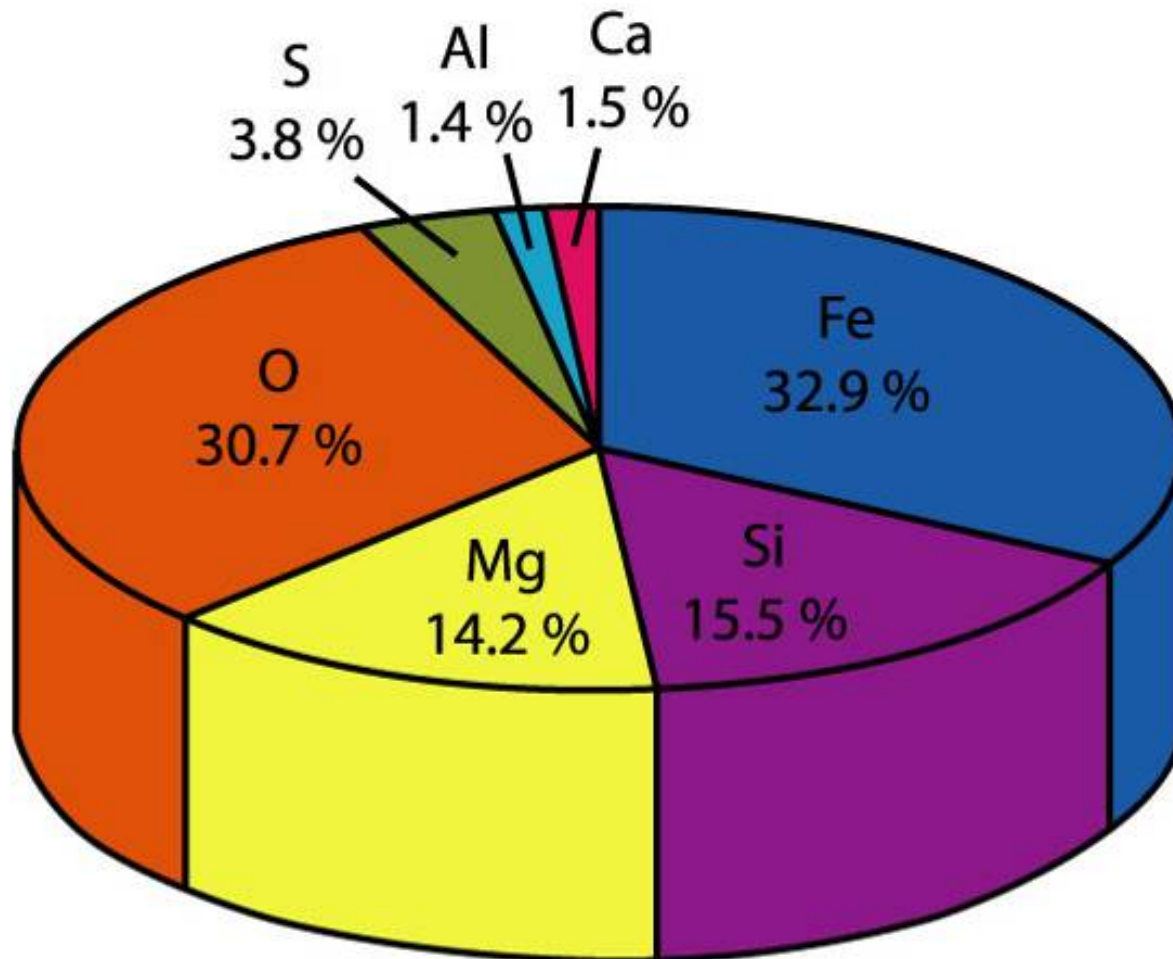
地核由**2900km-地心**，目前主要认为地核是由于重力或化学分异形成的铁镍合金，也有人认为地核由原始太阳系星云吸积形成的铁与硅、氧、碳、硫等轻元素合金组成，因而采取了Ni、Fe-FeS等地核模型。地核以富集亲铁元素为特征，主要成分为Fe + (5-10%)的其它低质量元素

外核：液态，无S波穿行

内核：固态



地球的平均化学成分

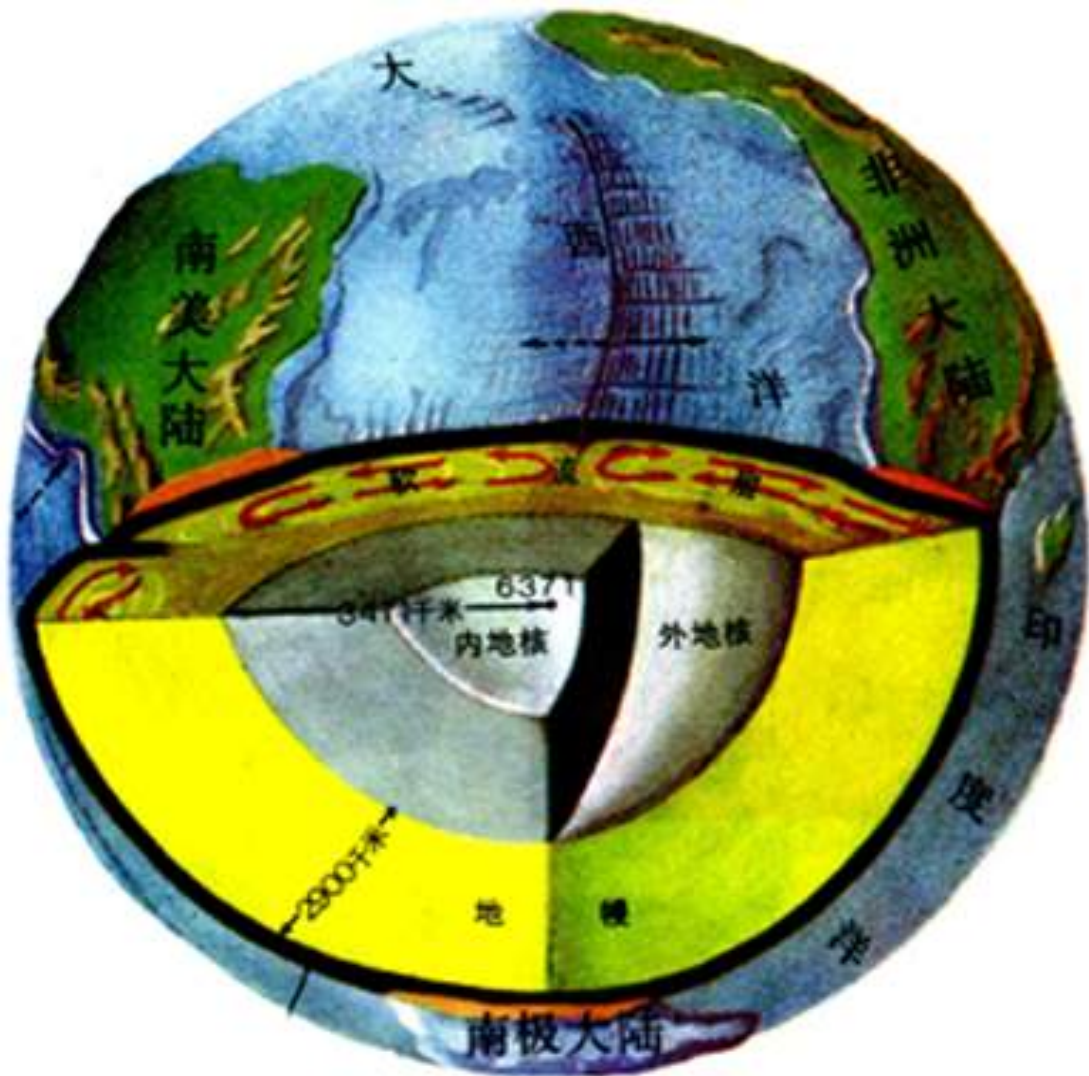


地球中元素丰度的顺序与太阳系元素丰度的顺序明显不同，说明组成地球的物质相对于太阳系已经发生了明显的化学分异

Figure Relative atomic abundances of the seven most common elements that comprise 97% of the Earth's mass. An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology, by John Winter , Prentice Hall.

第四节：地壳的化学组成

大陆地壳的化学组成是认识地球总体成分分异演化和地球动力学过程的基本地球化学前提，加之大陆地壳是人类生活和获取资源的场所，为此大陆地壳化学组成的研究自地球化学学科诞生以来一直是研究的中心问题之一



大陆地壳化学组成的研究方法

1. 岩石平均化学组成法
2. 细粒碎屑沉积物法
3. 大陆地壳生长历史法
4. 大陆地壳剖面法
5. 区域大规模取样和分析
6. 火山岩中的深部地壳包体研究法
7. 地球物理法

大陆地壳元素丰度特征

1. 地壳中元素的相对平均含量极不均一，丰度最大的元素是O: 47%，与丰度最小的元素Rn的 6×10^{-16} 相差达 10^{17} 倍
2. 对比地壳、整个地球和太阳系元素丰度数据发现，它们在元素丰度的排序上有很大的不同：

太阳系： $\text{H} > \text{He} > \text{O} > \text{Ne} > \text{N} > \text{C} > \text{Si} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{S}$

地球： $\text{Fe} > \text{O} > \text{Mg} > \text{Si} > \text{Ni} > \text{S} > \text{Ca} > \text{Al} > \text{Co} > \text{Na}$

地壳： $\text{O} > \text{Si} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ti} > \text{H}$

与太阳系或宇宙相比，地壳和地球都明显地贫H, He, Ne, N等气体元素；而地壳与整个地球相比，则明显贫Fe和Mg，同时富集Al, K和Na

大陆地壳元素丰度特征

3. 地壳中元素丰度不是固定不变的，它是不断变化的开放体系。
4. 不均一性。包括时间和空间上都是不均一的；空间上，如大陆地壳和大洋地壳的不均一性，大陆地壳不同圈层间的不均一性，乃至大陆内部不同块体、构造单元、地层、岩石之间的不均一性；地质历史时期元素处于动态的变化过程。

地壳元素丰度研究的意义

元素地壳丰度(克拉克值)是地球化学中一个很重要的基础数据。它确定了地壳中各种地球化学作用过程的总背景，它是衡量元素集中、分散及其程度的标尺，本身也是影响元素地球化学行为的重要因素。

1. 控制元素的地球化学行为

1) 地壳元素的丰度在某种程度上影响元素参加许多化学过程的浓度，从而支配元素的地球化学行为

如，地壳元素丰度高的K、Na，在天然水中高浓度，在特殊环境中发生过饱和作用而形成独立矿物（盐类矿床）；而地壳元素丰度低的Rb、Cs，在天然水中极低浓度，达不到饱和浓度，不能形成各种独立矿物而呈分散状态

2) 限定自然界的矿物种类和种属

在实验条件下可以合成数十万种化合物，自然界确只有3000多种矿物

3) 限制了自然体系的状态

实验室条件下可以对体系赋予不同物理化学状态，而自然界体系的状态受到限制，其中的一个重要的因素就是元素丰度的影响。例如，酸碱度pH值在自然界的变化范围比在实验室要窄很多

4) 对元素亲氧性和亲硫性的限定

在实验室条件下，化合物组成的剂量可以任意调配。在自然条件下，情况就不同了：在地壳O丰度高，S丰度低环境下，Ca元素显然是亲氧的；在地幔，缺O富S环境，能形成CaS(褐硫钙石)

2. 地壳克拉克值可以作为微量元素集中、分散的标志

1) 可以为阐明地球化学场（省）特征提供标准

如在东秦岭地区进行区域地球化学研究表明：东秦岭是一个富Mo贫Cu的地球化学省，Mo元素区域丰度比地壳克拉克值高2.3倍，而Cu元素则低于地壳克拉克值，这样的区域地球化学背景，有利于形成Mo成矿带

2) 指示特征的地球化学过程

某些元素克拉克比值是相对稳定的，当发现这些元素比值发生了变化，示踪着某种地球化学过程的发生

3) 浓度克拉克值和浓集系数

浓度克拉克值 = 某元素在某一地质体中平均含量/某元素的克拉克值

>1 意味该元素在地质体中集中了

<1 意味该元素在地质体中分散了

区域浓度克拉克值=某元素在区域某一地质体中平均含量/某区域元素的丰度值

浓集系数 = 某元素最低可采品位/某元素的克拉克值，反映了元素在地壳中倾向于集中的能力。Sb和Hg浓集系数分别为25000和14000，Fe的浓集系数为6，这说明Fe成矿时只要克拉克值富集6倍即可