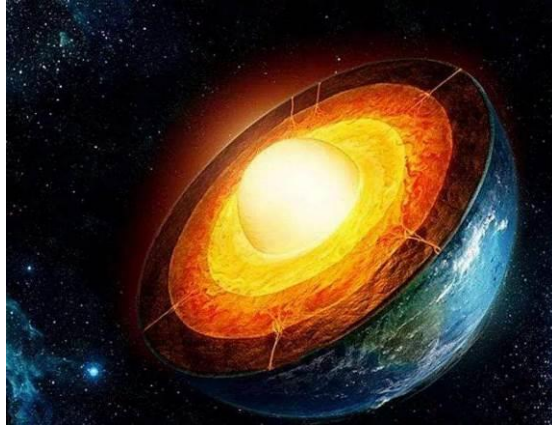


火山活动——地球圈层系统的纽带

封面图片



地球圈层想象图（图片源于网络）

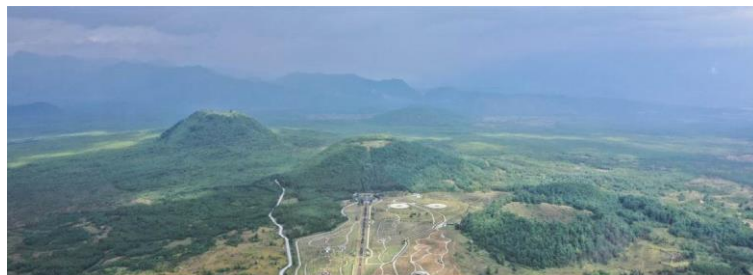
什么是火山？

在火山学工作者的**日常生活中**，提到火山，经常会遇到如下几个疑问：什么是火山？中国有火山吗？而往往直击灵魂的问题就是，你们研究火山有什么用？下面将尝试从地球圈层系统的角度，理解火山对地球的意义。

火山是地球上最普遍的山体地貌形态，它的形态有很多种。以我国的火山为例，长白山属于**复式火山**，也是我国最大的火山山体。我国还有很多的小型火山山体，它们以**岩渣锥**和**玛珥火山（maar）**为主。



长白山（图片源于网络）



岩渣锥. 由小到大依次为小空山、大空山、黑空山（腾冲，陈正全拍摄）



玛珥火山（龙岗东龙湾，陈正全拍摄）

火山作用形成的山体形态各异，体态优美，观赏性很高。在我国，很多火山区都被建设成为地质公园，供游客观光体验。

火山不仅仅具有观赏性，其神秘色彩也一直被人们津津乐道。为了理解火山作用过程，火山学一步步地发展起来。根据目前人们对火山作用的理解，火山学是研究岩浆起源、在行星地幔中上升、穿过行星地壳喷发到行星地表的学科。火山学涉及到岩浆的物理、化学演化，岩浆的运移和喷发，以及在地表的火山物质堆积。一些火山作用过程会形成重大的自然灾害，而其他的火山作用过程对社会极为有益。

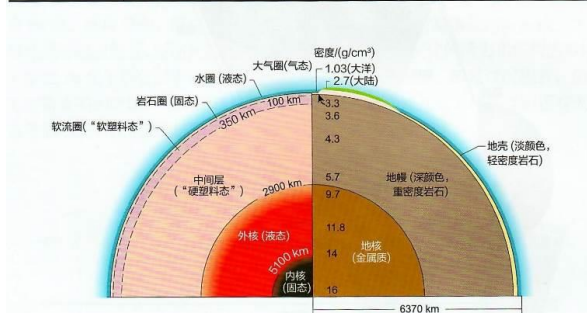


岩浆（实际上，熔融的硅酸盐，在地下称为岩浆，喷出地表以后被称为熔岩）

地球系统——圈层

为了便于研究，根据不同的物理性质和物质组成，人们将地球划分成了不同的圈层，由地球内部延展到宇宙空间。这些圈层中，我们将地核、地幔、地壳称为“内圈层”，将水圈、大气圈、生物圈称为“外圈层”。由于人类活动对地球系统施加的影响日益剧烈，一些学者也在探讨“人类圈”的含义和对地球系统的意义。

项目	内核	外核	地幔	地壳	水圈	大气圈
厚度 /km	1200	2300	2860	35	4	700
密度 / (g/cm ³)	12.6~16	9.7~12.2	3.3~5.7	2.7~2.9	1	≤ 10 ⁻³



地球圈层的厚度与密度 (汪品先, 2018)

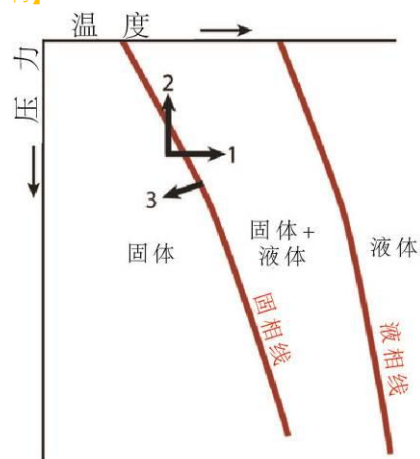
火山作用在地球圈层中的位置

目前已知的火山活动，主要作用在地幔、软流圈、岩石圈、水圈、大气圈。有一些理论将火山作用的起源向下延伸到了地核，认为是地核的一些作用触发了火山活动。我们从现在从内圈层到外圈层，看看火山喷发是如何穿过地球不同圈层结构的。

岩浆的产生

地幔是地球各圈层中体积和质量最大的圈层，其体积占地球系统的 83%，质量占 67% (顺便说一下，地壳占据地球系统的体积<1%，质量<0.5%)。地幔的温度可能是 1300-1600℃ (计算出来的)，并且绝大部分是固态的岩石。这些岩石熔融便形成岩浆。【思考预警：下段需要稍微想象一下】

(上) 地幔熔融的条件，目前认为有两种：1. 局部地幔的压力降低 (减压熔融)；2. 板块俯冲过程中，地球表面的水被加入地幔，降低了橄榄岩的融化温度。这里涉及到物态的转化，请有兴趣的童鞋搜索“固相线”的相关信息。在大洋中脊、俯冲带弧后盆地、洋岛、大陆内部的火山，很多都是减压熔融 (decompression melting) 形成的岩浆活动。【这些专业名词，可以直接忽略，对后文没影响】



部分熔融的三种方式. 1 升温, 2. 减压, 3. 固相线左移 (一般是流体加入)

(Sigurdsson et al., 2015)

第二种地幔熔融方式，就是上图中的 3 箭头 (固相线左移)。这种方式发生在俯冲带环境中，俯冲带堆积物中的挥发分进入到地幔二辉橄榄岩，改变了地幔的化学成分，使其固相

线的温度低于当前的温度。这个概念被称为“凝固点降低熔融”。

这两中岩浆产生的方式，是与板块构造运动相联系的，涉及到的地球圈层是上地幔和软流圈。还有一种**岩浆上涌**的方式，它们处在板块内部，与板块构造关系较小。这就是**地幔柱**。

地幔柱（热点火山）

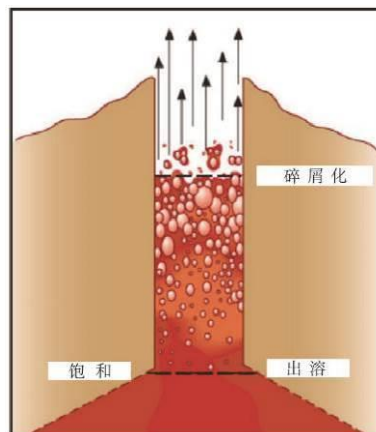
板块构造理论不能解释一些板块内部的大型火山，于是热点理论（或地幔柱理论）出现了，用来解释夏威夷火山和类似我国的峨眉山大火成岩省的成因。这种假说认为，驱动这些火山形成的岩浆作用来自更深的圈层，即热的地幔柱（mantle plumes）在核幔边界升起（地下~2900 km 深度）。地幔柱本身是固态但温度较高的岩石，形态为蘑菇状。【**请注意，地幔柱与热点是两个概念。地幔柱是“柱”，热点单指火山喷出的那个“点”**】

岩浆的上涌

岩浆产生之后，由于密度低于周围的岩石，或者受周到挤压，会沿着裂隙上涌。在地幔柱条件下，类似于直接上涌。岩浆在上涌的过程中，可以直接喷出地表，也可以在地壳中存留一段时间，形成岩浆房。如果不喷出地表，就成了侵入岩。岩浆房中的岩浆可以与围岩发生混合、交代等作用，并改变岩浆成分。在合适的条件下，就会继续上涌并喷出地表。

岩浆喷出

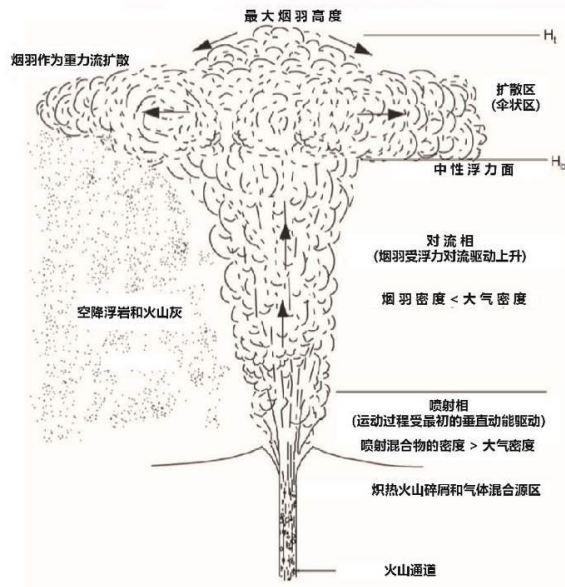
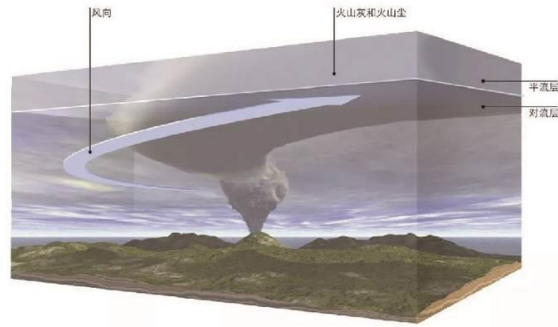
岩浆上涌到地壳表层时，由于压力急剧下降，挥发份出溶，产生气泡化和碎屑化。如果出溶较快，碎屑化较强，就会形成火山碎屑物质。这些碎屑在压强差的作用下猛烈地喷出地表，就形成了火山喷发。有时，挥发份出溶较慢，岩浆直接溢出地表。



岩浆内挥发份在近地表的出溶和岩浆的碎屑化（Cashman & Sparks, 2013）

岩浆或碎屑喷出地表后堆积在火山口附近，就行成了火山机构，也就是我们通常看到的火山景观。

在碎屑化强烈的火山喷发活动中，火山灰是主要的喷发物，也伴随大量的水汽和二氧化碳。在巨大的喷射动力驱动下，这些物质组成的喷发柱能够直达平流层。



火山灰在大气圈的动力过程

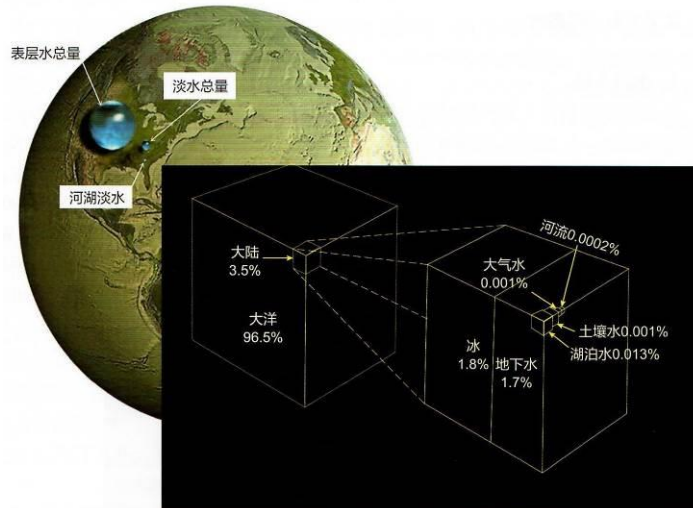
小结：火山活动在地球系统的各个圈层中，涉及到了地幔、地壳、大气圈等圈层。如果火山喷发出现在海洋中，即直接与水圈发生作用。那么，**具体有哪些物质交换呢？**

火山作用与地球圈层物质交换

火山作用在地球圈层中，从核幔边界开始，作用在地幔、地壳、大气圈（水圈）等圈层，一个重要的意义就是承担了地球各圈层之间的物质交换。水和碳元素在不同圈层的循环，是地球与其他星球的区别。即地球系统通过水循环和碳循环，生命提供了存活与繁衍的条件。

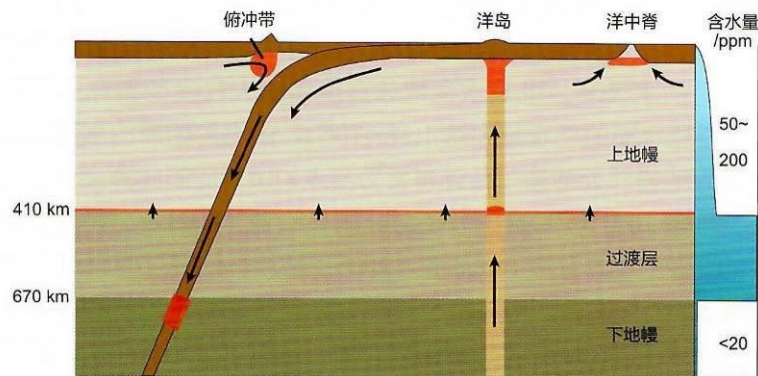
水循环

水圈主要指的是地球表层水，包括了海洋、河湖、地下水、冰和大气中的水份。如果将地球表层水聚集在一起，体积是 13.86 亿 km^3 （地球的总体积是~10000 亿 km^3 ）。



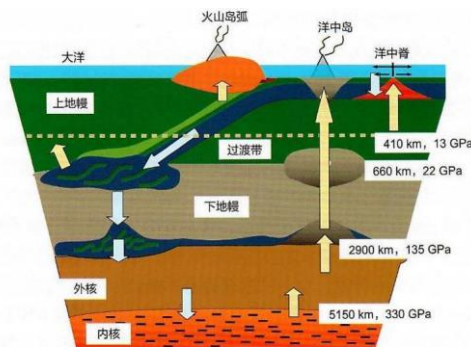
地球表层水的分布 (汪品先, 2018)

地球表层水同时呈现三相形态。其实，在地球内部也有水的存在。不过它们是结合在矿物的晶格中。晶格中的水不是水分子，而是水分子分裂出的羟基 (OH) 进入到了硅酸盐矿物中。上地幔的主要成分是橄榄石，是储水大户，其含水量随深度向下递增。到了下地幔 (670km 以下)，矿物成分发生变化，储水能力降低。



地幔含水量的推测数值 (ppm= 10^{-6}) (汪品先, 2018)

地球表层水和内部水是在火山作用过程中进行交换的。地球内部的水，在洋中脊和大洋岛屿的火山活动中，被岩浆活动带到地表。地球表层的水在板块俯冲过程中，随着板块被带入到地幔深入。这是地球系统中最大尺度的水循环。



地球内部的水循环 (猜想) (汪品先, 2018)

现今地球表层水圈的总水量为 1.4×10^{20} 吨，计算得到的海沟俯冲的水通量约为每百万

年 24×10^{16} 吨，进入地幔深处的通量为每百万年 9×10^{16} 吨。目前，对于地幔到底具有多少水，没有一致的看法。有一些估算暗示地球内部水量与与地表水量相当。人们主要通过研究地幔与大洋中氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 比例对此进行研究。

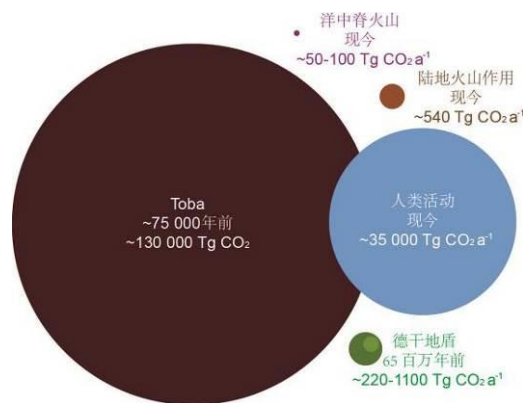
碳循环

岩浆的挥发份中，除了水份，还有大量的二氧化碳。地球圈层系统的碳循环，也是在板块俯冲的过程中，碳酸盐被带入地幔深处，再以火山喷发的形式排放出 CO_2 。

火山活动排放温室气体的方式有两种：间歇期气体排放和喷发期气体排放。火山 CO_2 释放到空气中的主要途径是间歇期排放，相对而言，喷发期的 CO_2 排放量甚至可以忽略不计。例如，过去两个世纪中四个最大火山喷发活动产生的 CO_2 释放量，相当于同期间歇期火山 CO_2 排放量的 1%。

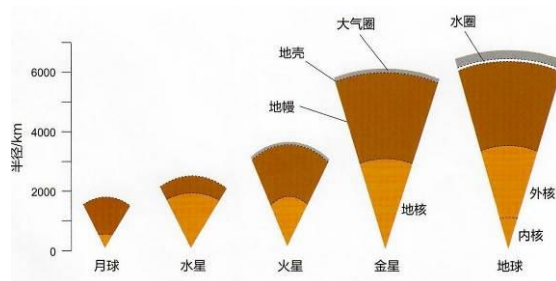
由于在洋底测量 CO_2 释放量具有很大难度，大洋中脊的海底火山喷发对地球碳排放的贡献目前还具有不确定性。少量的研究表明，全球大洋中脊的 CO_2 通量是 $50\text{-}100 \text{ Tg a}^{-1}$ ，但是也有研究估算为 $\sim 800 \text{ Tg a}^{-1}$ 。类似的情况也出现在对俯冲带海底火山的研究中。

现阶段人类活动产生的 CO_2 是 $\sim 35 \text{ Pg a}^{-1}$ ，大于目前已知的火山气体排放。但远小于地质历史时期火山喷发的排放量。



火山喷发活动和人类活动释放 CO_2 量的比较。(Tg= 10^{12} g; Pg= 10^{15} g) (Sigurdsson et al., 2015)

复杂的地球圈层



与类地行星和月球相比，地球圈层更为复杂。而火山活动是这些圈层之间物质交换的纽带。

火山学工作者是干什么的？

我们对地球深部的理解，源于两种主要手段：地球物理探测和地球化学测试。地球物理学研究就像用听诊器倾听地球内部的声音，通过各种波形解译了解地球内部结构和变化。我们无法到地球内部直接观察，所以，地球化学分析，就是将地下喷出的岩石（或构造运动抬升的岩石）进行分析测试，并使用高温高压实验进行类比研究。从研究对象的角度来讲，地下百公里乃至更深处喷出的岩石，是我们研究地球内部环境和成分的唯一依据。

火山学工作者是一群“地质匠”。前辈们多是用脚步丈量祖国的火山岩分布区，用地质锤捶打手标本，用放大镜观察组成岩石的矿物特征。他们将野外样品带回实验室，通过物理化学分析，探讨火山岩的形成过程及其相关的地球系统奥秘。

火山学科日益发展，目前，物理学、地球物理学、地球化学、空间对地科学、火山监测技术、火山灾害学等学科和手段都成了火山学研究中的重要组成部分。火山学工作者的研究工具和研究内容也在随之增多。现在，火山地质工作也可以很“高大上”，如用电钻取岩芯，用无人机和人造卫星获取地貌数据；野外定点观察，也有精准的“北斗”导航！

年轻的火山学工作者，正在科技发展日新月异的今天，沿着前辈的足迹，使用着更为先进的技术手段，探究火山的秘密，认识我们的家园！