

自然环境中流体的分层和不稳定性

作者：雅克·帕德（PADET Jacques），热、机械和材料研究所（ITheMM），兰斯大学（URCA）卓越教授。



雾层、彩虹鸡尾酒与成堆的地质层之间存在什么联系呢？它们都呈现层的结构，就像薯草一样！大气中的空气、湖泊或海洋中的水以及五颜六色的鸡尾酒，它们都可视为受重力影响的流体。当它们处于平衡状态时，最重的部分位于底部，最轻的部分位于顶部，这种分离就会引起分层现象。但是这些流体流动出现不稳定性时，事情就变得更为复杂了。气象学、气候学和污染物扩散现象的理解和阐释在这里面就会面临更严峻的挑战。

1. 静止的液体... 几乎静止

处于平衡状态静止的流体符合**流体的静力学定律**。它遵从**压力**随着**高度**的增加而减少的规律，因此，在水平层的底部压力高于顶部。压力之间的差异导致了一个与流层的重力方向正好相反的向上的**垂直力**。《**压力、温度和热量**》一文向人们揭示了静止流体处于这种平衡状态时能够补偿这种流层因重力而产生压力的起因以及流体的静力学定律。

让我们假设流体介质中存在一个小区域，具有任意形状和体积 V 。它可以被

流体本身、另一种流体或一个固体物体所占据。其他区域的外部流体介质施加在该区域表面的压力的合力是一个垂直向上的力，即阿基米德浮力。其数值 F 由公式 $F=\rho gV$ 给出，其中 ρ 是流体的密度， g 是重力加速度。它恰好是“置换流体”的重力 P ，也就是占据体积 V 的这种流体所受的重力。

图 1 中区域 D 的介质也有它自己的重力 P_m ，方向向下。因此，该区域同时受到以下两个因素的影响：

- 向上的阿基米德浮力 F ，
- 向下的重力 P_m 。

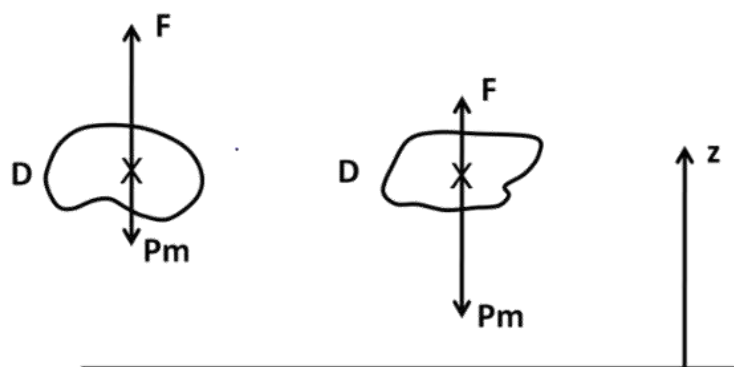


图 1：静止流体中区域 D 受到的阿基米德浮力和重力。左边 $P_a > 0$ ，区域 D 趋于上升，右边 $P_a < 0$ ，区域 D 趋于下降。 Z 方向为垂直向上的方向。[来源：作者绘制]

这两个力的合力就是区域 D 的**表观重力**： $P_a = F - P_m$ 。如果表观重力为负，表示方向向下，那么 P_m 占优，区域 D 趋于**下降**。如果阿基米德浮力较大，表观重力向上，则迫使区域 D **上升**。因此，任何不受其他约束的质量流都会朝着**稳定平衡**的状态发展，其中**最重的部分位于底部**，**最轻的部分位于顶部**。但是我们将在下一节看到，这种选择性对密度这个条件来说是有限制的。

可以有很多原因导致流体的密度发生变化。**温度会导致部分流体膨胀**。此外，像空气和水这样的流体是混合物，**成分很少是均匀的**。这些变化总是导致流体中的某些部分变轻或变重，并在周围环境中**移动**。我们

可以在供暖公寓的散热器上方观察到这种上升现象，当烟从烟囱冒出时，我们也可以在室外观察到这种上升现象。类似地，在某些地中海火山区，深层水域要比表层水域**更温暖**，在当地会产生**向上的水流**，经常受到沐浴者和一些游客的追捧。相反地，对于比周围流体更重部分的水，在这些机制的作用下它们可以下潜到更深的深度。

- 空气中存在的颗粒或液滴被称为**气溶胶**，它是**密度局部变化**的另一个例子。
- 在空气中，它通常表现为位于水体或田野之上的**薄雾或雾块**（图 2）。
- 在池塘和湖泊中，**悬浮的污泥**倾向于沉到底部，在那里形成**一层层的淤泥**。

全球性的海洋缓慢环流也可能是流体静力学造成的，例如，格陵兰岛附近**湾流**骤降等现象也可以解释为它们更冷更咸，因而这部分水域变得比周围环境的更重（延伸阅读：[《缓慢而强大的海洋环流》](#)）。

2. 重力影响下的分层



图 2：加拿大育空（Yukon）地区阿尔塞克（Alsek）山谷出现的大气分层现象。[来源：作者拍摄的照片]

因此，**重力**使静息流体处于稳定状态，其中密度随着高度升高而降低。严格来说，当两个流体层之间**出现真正的不连续性**时，我们才称之为**分层**，就像引图 [1] 中的鸡尾酒一样。密度是最直接相关的状态变量 [2]，因为在重力的作用下，它

的值可以实现真实的跃变。当一个特定种类的**浓度**经历这种不连续性变化时也会出现这种跃变，鸡尾酒**颜色的变化**就清楚地表明了这一点。这种变化与**密度的变化**有关。在大气中，高山徒步旅行者在山上观察到的**云海**则是另外的一个例子。但**压力和温度**等流体的其他状态变量是不能发生跃变的；只有它们沿垂直方向的导数才可能经历这种不连续性，这种不连续性也与流体密度的变化有关。

然而，应该注意的是，与温度的影响相比，压力对水的密度的影响实际上是可以忽略不计的，这证明了水通常是不可压缩的这一观点，但它可以受热膨胀。其压缩率和膨胀率的典型值分别为 $4 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ 和 $2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。更为具体地说，这值意味着，为了使水的密度发生 0.1% 的变化， 5°C 的温差就足够了，然而这却需要 20 倍大气压的压差，即 200m 的深度才能实现同样的 0.1% 变化。

3. 几个分层的实例



图 3：沉积作用产生的地质分层的实例。[来源：Pixabay]

除了上文提到的，还有许多其他**液体介质分层**的例子。在我们准备**调味品**时，如果将油以足够慢的速度倒到醋上，你就可以观察到它会浮在醋的上层，只有通过**对混合物的强烈搅拌**才能破坏这种分层结构，不过它们最终还是会恢复到原来的分层结构；再比如通常需要搅拌才能得到**均匀**的加奶咖啡；再比如啤酒或香槟的泡沫，即使不是纯液体，也可以说明只要它们持续地存在，这种分层就是这些饮品**唯一可能的稳定状态**。



图 4：萨森纳格（Sassenage）沉积灰岩所形成的断层褶皱。[图片摘自 GEOL-ALP (<http://www.geol-alp.com>)，作者：莫里斯·吉登 (Maurice GIDON)]

在海上，固体颗粒的沉降是**沉积物形成**的起源，在图 3 和图 4 中可以看到它们在石灰岩中的特征。利用**碳 14** 放射性可以很容易地确定它们形成的年代，这是地质学家重构**地壳历史**和了解在沉积层对应着的化石的物种演化的重要手段。**萨森纳格断层褶皱**的例子(图 4)揭示了一连串的沉积现象，它们转化为不同年代的坚硬的石灰岩层，期间由在不太陡峭处发育而来的较软的植被将石灰岩隔开。这些石灰岩地层的**弯曲**和断裂证明了它们在**阿尔卑斯山地块**形成过程中所承受的巨大压力。(阅读：《一位热爱天文学的地质学家眼中的生命起源》)。

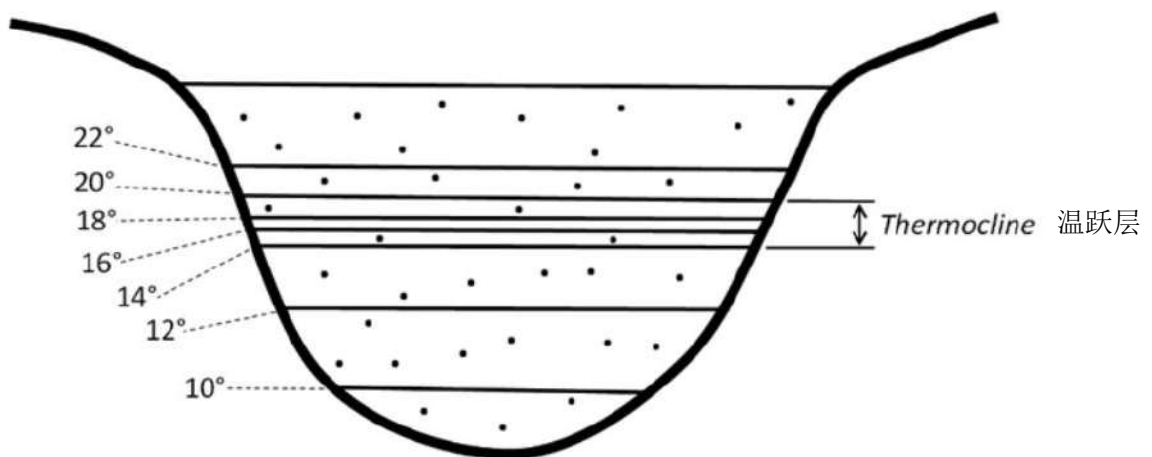


图 5：被夏季阳光晒热的相对较轻的表层水域与温度几乎不变的较低的深层水域之间分层的示意图。[来源：作者绘制]

湖泊海洋的表层受**阳光**照射，从春季到夏末这段时间**气温**会上升很多。温升减轻了表层水域的重量，因而这种加热效应是稳定的。然而，这个表层不断受到

波浪、湍流以及海洋潮汐的搅动。这种搅拌会在与海浪波的波长相同的数量级的深度上产生良好的**混合**，使**温度**更为**均匀**：这种搅动尺度在湖泊中为几米，在海洋中可达到几十米。相反地，在这个**深度**之下，属于准静止的环境，**热交换**非常之**低**，那里的温度几乎保持不变。在这两个区域之间，出现一个相当薄的区域，被称为**温跃层**，这里的温度变化量可达到 **10 度左右** (图 5 和图 6)。由于阳光照射角度的变化，温跃层上方的水温会经历显著的**季节性变化**，而深处的水温则变化不大。参见文章《海洋环境》中的图 2。

4. 沉降和分层的限制条件

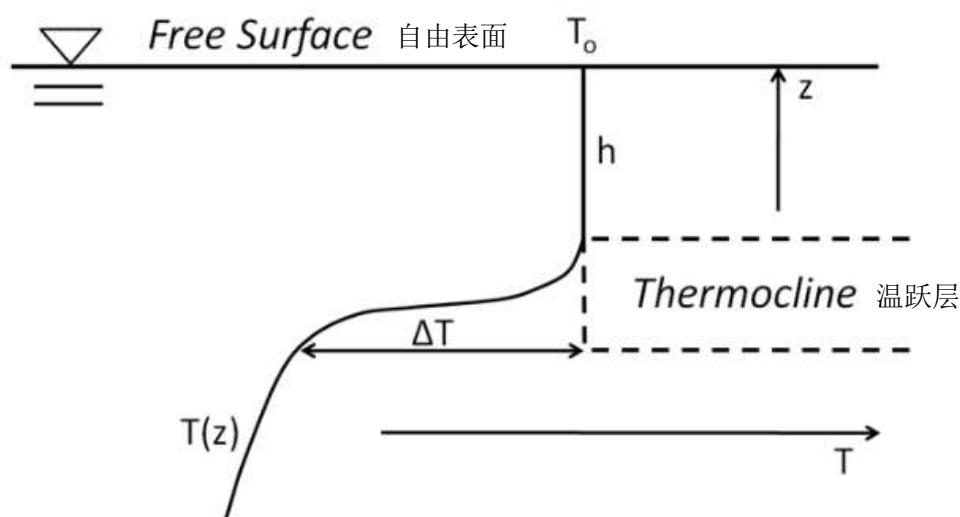


图 6：在已经形成的温跃层中温度分布是深度的函数。 [来源：作者绘制]

一些空气颗粒污染物，特别是**细 (PM2.5)**和**超细 (PM0.1)**颗粒，在悬浮状态下停留的时间会非常长，以至于**很难去除** (阅读：《空气污染颗粒：它们是什么？》)。在薄雾和浓雾中细小的**水滴**会一直悬浮着直至**蒸发**。相反，在比夏季的积云更暗的云层中，水文气象学意义上[3]的更大的**沉淀物**则会作为形成雨、雪或冰雹的种子 (延伸阅读：《云层中会发生什么？》)。所有这些颗粒物都**同样会受到重力的作用**。那么是什么机制阻碍了细小颗粒物的掉落呢？

首先，当水滴或灰尘落入到周围的空气中时，由于表观重力，它会**取代**下面的**空气**，并且被取代部分的空气会**上升到它的上面来**。

- 这时水滴或灰尘就会在它的整个表面上受到一个**向上的摩擦力**，这个摩擦力与其名义半径的平方 (r^2) 成正比。

- 相反，它的**表观重力**与体积成正比，即它的名义半径的立方(r^3)。

在**足够大的物体**上，这些方向相反的力之间的竞争取决于迫使它下落的重力的大小。当半径 r 很小时，这些力之间的竞争导致**摩擦力**占了上风，**阻止颗粒物的下落**。实际上，对于空气中的颗粒污染物以及雾中的液滴，不发生沉降的**临界半径**大约为 10 **微米的量级**。

在**污泥中**，**悬浮固体颗粒**受到同样的力的竞争，但这些颗粒物的密度与水的相当地接近。因此，临界半径要大得多，大约为 100 **微米的量级**。

还有其他一些机制也有助于阻碍细小颗粒物稳定地悬浮。**布朗运动便是其中之一**，它类似于**分子搅动**，尽管它的作用在微米级上要在比纳米级上弱得多(延伸阅读：《[扩散，充分混合过程中极为关键的一步](#)》)。布朗运动会导致每个物体与周围的**许多**粒子和分子间发生**碰撞**，它的有效截面比半径的效应要大得多，并且粒子的**轨迹**涉及到更大的通道截面。

5. 何时出现不稳定性

当从下方对流体区域进行加热的时候，当底部和表面之间的温差超过临界阈值时，流体会变得**不稳定**，这就是**瑞利-泰勒不稳定性**[4]。对于地球大气底层来说，这个临界阈值会非常低。正是由于这种不稳定性，在非常平静的大气高压区，经过一整夜的休整，即使是在无风的情况下，太阳一旦升起也会对**空气产生系统性地搅动**，摇动树叶，飘展旗帜。

对于**水**来说，只要将所盛放的容器放在火上，就可以很轻易地观察到这种不稳定性。这种不稳定性会受到容器形状的影响，液体将沿着温度相对更高的壁面上升，并在容器中央处回落。

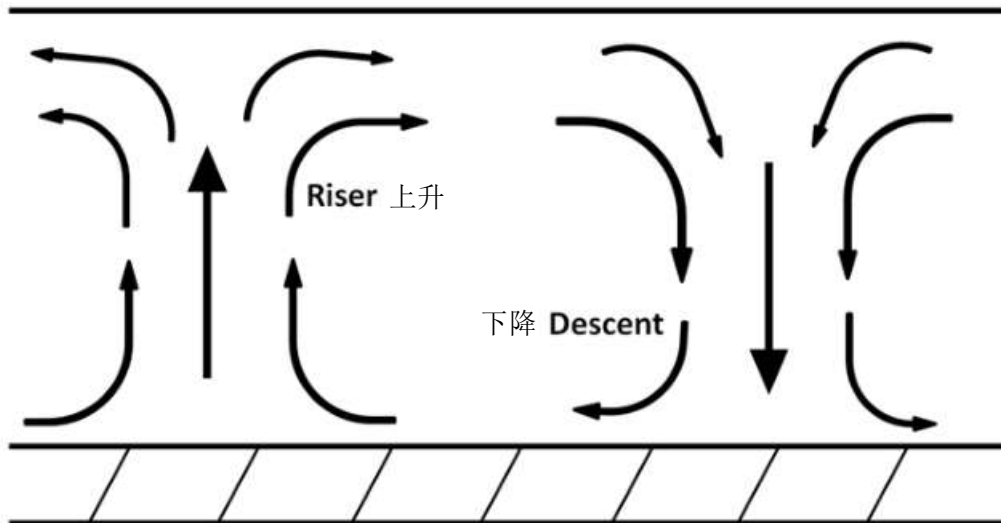


图 7：从下方加热的流层中所形成的对流胞。[来源：作者绘制]

在更可控的条件下，例如一些实验室实验，当液体层的深度尺寸远小于其水平尺寸时，则可观察到其水平尺寸接近于深度的对流胞的形成。这些胞的结构通常是相同的，由组织良好的**对流**所驱动。**液体在一边上升**，像烟囱一样，在**另一边下降**，则像陷阱一样(图 7)。在类似烟囱流中，液体是向上流动的，而在类似陷阱流中，液体则是向下流动的。这两个驱动力共同作用形成一个**扭矩**，驱动**整个胞的运动**。液体的粘性在这里起到了抑制液体流动的作用。

视频 1：以热水注入冷水为例，瑞利-泰勒不稳定性及其“蘑菇状”的特征。
[来源：杰尼斯·尼梅尔（Jens Niemeyer）]

对流胞阵列的流动组织结构强烈地依赖于实验的**几何参数**。尤其是当上平面是自由表面时更是如此。它可以组成非常规则的**六边形阵列**。在形成平行的六面体空腔的两个固体壁面之间可以观察到它们**水平地滚动**。在自然界中也可以观察到**各种各样类似**的情况。

视频 2：混有细小铝颗粒的热油中呈现的瑞利-伯纳德对流胞。

6. 一些地球物理方面对流的例子

6.1. 解冻的冻土带



图 8：2019 年夏，在泰米尔半岛北部的西伯利亚苔原上，由于永久冻土带的融化，形成了许多大约 30 米大小的对流胞(大致坐标：76 20 41 N 102 15 3 E)。[来源：弗拉基米尔·梅尔尼克 拍摄。 <http://www.photoline.ru/photo/1571816322?rzd=au>]

在北极地区，地面常年保持深度冰冻，形成了所谓的**永久冻土**。只有很薄的表层在夏天会在阳光的照射下融化。然而，随着**全球变暖**，我们开始观察到到处可见的**深度解冻现象**，这有可能伴随着**对流运动**。图 8 中的照片是 2019 年夏天在西伯利亚拍摄的一个典型的例子：大致呈矩形并以**土脊**为边界的对流胞。

这种现象似乎可以做如下解释：一种冻土状土壤解冻后会变成**泥浆**，虽然很厚，但却保有流动性，尤其是在 4°C 时，这是水的密度可达到最大值的温度。因此，与 0°C 或 1°C 下仍然冻结的地面接触的**底部**泥浆比表面处的泥浆更轻，至少在不超过约 7°C 时如此(7°C 的水与 1°C 的水具有相同的密度)。因而会在**较轻**的泥浆从**底部**上升的地方形成**烟囱状的网络**。但是在水井状区域的附近，它所含有的水往往会回落到底部，留下这些表面**干涸的凸起**。在每个胞上，几乎都有一层干净的水区域，覆盖着返回底部的泥浆。在这里，这种搅动使最初均匀的介质中的**液相和固相**实现了真正的分离。

6.2. 穿越火山



图 9：尼拉贡戈（Niragongo）火山口(刚果民主共和国)，底部为熔岩湖。[来源：作者拍摄]

地球上火山罕有**永久的熔岩湖**。其中最大的则是中非的**尼拉贡戈火山**，其直径可达近 250 米(图 9)。在这种尺度上可观测到大量的相对稳定的**对流胞**，它们形成了**蜘蛛网状的网络**。形状虽然不规则，但大多近似为**多边形**。图 10 中呈红色线状处显示的是**热熔岩从底部上升的区域**。与空气接触后表面颜色变暗。**深色区域**则是呈井状分布的返回底部的熔岩。



图 10: 尼拉贡戈 (Niragongo) (刚果民主共和国) 熔岩湖中的对流结构 [来源: 作者拍摄]

人们会对图 10 中**红色线状结构的精细程度**感到惊讶: 它们的表面比暗色的下降流区域小得多。其原因是**熔岩在其熔点附近的粘度有相当大的变化**: 熔岩在 1400°C 左右具有良好的流动性; 一旦它的温度降低了 50 到 100°C 就会变成浆糊状, 粘度可增加 100 倍。因此, 它的流动要比上升的熔岩**慢得多**。而上升的流量等于下降的流量 (质量守恒), 如果用 \mathbf{V} 表示流体的速度, \mathbf{S} 表示通道截面, 则流量为 \mathbf{SV} , 其守恒式为 $\mathbf{SV}_{\text{升}}=\mathbf{SV}_{\text{降}}$ 。截面面积与**速度成反比**: 流速越小则截面越大。

6.3. 埃尔塔阿勒（Erta Ale）的特例



图 11：埃尔塔阿勒湖(埃塞俄比亚，2018 年)上在图片左端出现的由火山口周围悬崖滑坡而形成的天然大坝附近的对流胞。[来源：作者拍摄]

在埃塞俄比亚有一个处于活火山口附近得小型熔岩湖。继 2017 年火山喷发后，在距离主火山口几公里的地方形成了另一个暂时的火山口，然而它的呈现形式却非常不同，因为有熔岩流过，熔岩流通过图 11 左端的溢洪道溢出。湖周围的部分悬崖突然崩塌，形成了一个天然大坝，封住了这个出口。导致了大坝和火山口之间的一系列驻波串和对流胞的形成。在这里，明亮的区域也是由底部返上来的热熔岩所组成的。对流胞大致呈矩形。



图 12：天然大坝坍塌后，火山口(右上)的熔岩流得以恢复。被流动所拉长的对流结构仍然清晰可见。[来源：作者拍摄]

当大坝坍塌时，驻波消失，奔向出口的岩流恢复了。这种流动导致**对流胞**被向左**拉长**，如图 12 的照片所示。被拉长的清晰的线条对应着上涌的**熔岩**。**对流结构**依然被保存在流动中。

7. 要记住的信息

- 在所有的**地球物理流体**中，**重力作用**会使**密度**发生变化，并随**高度**而降低。
- **分层**是**密度跃变**的表现，分化成具有不同密度的物质层，如空气中的雾，湖底或海底的泥浆。
- 在大型水体中，**阳光照射**导致了季节性变化的**温跃层**，温跃层将温暖而明亮的表层水域与温度几乎保持不变的深层水域隔开。
- 空气中地细小**颗粒物**，如液滴或微粒，由于存在与周围流体的摩擦而不会**沉降**，这将超过它们的表观重力的作用。

- **流体动力学的不稳定性**，尤其是在从下方进行加热的流体中，会破坏某些平衡并阻碍可能的分层。一些火山口里的熔岩也是一种天然流体。温度的变化会引起粘度的强烈变化，从而产生显著的对流结构。

参考资料及说明

- [1] Pedlosky J., Geophysical fluid Dynamics, Springer-Verlag, 2nd edition, 1987
- [2] A state variable is any quantity, such as density, pressure, temperature and concentration of each species in a mixture, that characterize the equilibrium in which the fluid is in equilibrium. These quantities are related by the equation of state of the fluid.
- [3] Hydrometeors are airborne objects made up of sets of water drops or ice particles suspended in the air: rain, drizzle, snow, hail, fog.
- [4] Drazin P. G. and Reid W. H., Hydrodynamic stability, Cambridge University Press, 1981

译者：张敏

编审：王晓东教授

责任编辑：胡玉娇