

# 大气：转动的热机

钱维宏 林祥

地球是一个旋转的球体，它具有巨大的质量和强大的惯性。地球的旋转包括每日一圈的自转和每年一圈的公转，自转带来了大气运动的日变化，而公转则导致了大气运动的四季变化。普通人或许并不清楚，但对于地球科学领域的学者来说，由于地球自转而产生的地转偏向力具有无处不在的影响，这种力施加在运动物体之上，在北半球指向运动方向的右侧，而在南半球则指向运动方向的左侧。这种偏向力也是大气运动中很多特殊现象背后的关键原因。

地球也是一个热机，并且大概是这个星球上最复杂的热机系统。太阳辐射是这个系统热能的根本来源，如果没有太阳的持续加热，具有耗散特性的海洋和大气最终会停止下来。由于热带地区得到较多的太阳净辐射，而极地和高纬度地区得到较少的太阳净辐射，这种辐射差异导致的赤道与极地间的温差催生了南北方向上的大气环流，对不同纬度上的大气质量交换具有至关重要的作用。地球的表面海陆不均匀分布，以及火山爆发、海冰融化和人类活动，在地球的表面形成了复杂的下垫面太阳辐射热力转换。除了与太阳直接辐射有关的大气热力交换过程外，大气成分含量变化导致的大气热力性质变化也催生了热力过程，比如气溶胶增加后的大气反射率变化导致的太阳净辐射减少等。

总的来说，在转动的地球上，太阳辐射的热力驱动着大气运动，海陆和地形差异、火山爆发等自然现象及人类活动等种种热力过程叠加，这就像大大小小的热机嵌套在一起，组成了我们地球大气无比复杂而又气象万千的运动。

## 一、大气结构和辐射平衡

### 1. 垂直结构

大气是地球上很薄的圈层。根据温度、成分和电离的物理性质由下向上可分成对流层、平流层、中间层、热层和散逸层。

大气在垂直方向上的环流主要集中在大气质量集中的对流层和平流层内。对流层的气温平均每上升 100 米降低  $0.65^{\circ}\text{C}$ 。对流层顶 10 千米高度上的气温会比地面气温低  $60^{\circ}\text{C}$  左右。人造蒸汽机做功需要

冷源和热源之间的温差和运动于冷暖源之间的蒸汽（气体）。地球表面与对流层顶之间的温差就使大气满足了蒸汽机的必要条件。因此，对流层中会自发地形成对流，表现为垂直运动。对流层水汽含量多，上升运动可成云致雨。很多的天气现象和灾害都与对流层的水平运动和垂直运动有关。对流层在极地地区有 8~9 千米，在低纬度地区可达 10 多千米。对流层不但温度，而且水汽含量和大气质量都随高度降低。

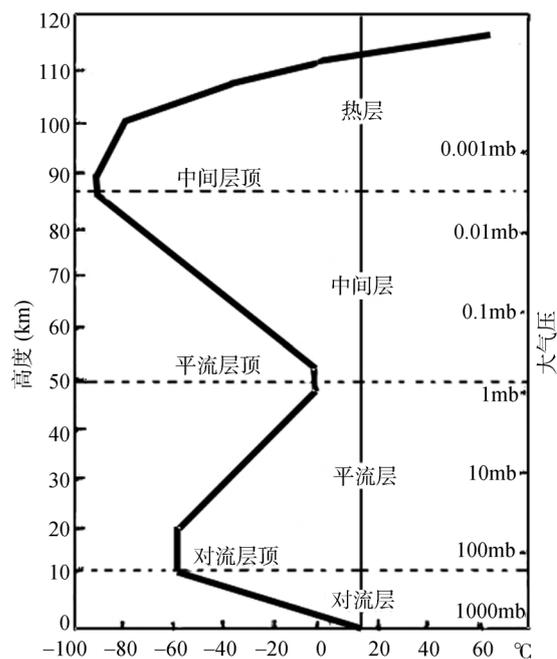


图 1 大气的垂直分层

对流层上部是平流层，距离地面 10~50 千米，该层内温度随高度上升。大气所固有的这一垂直厚度，决定了水平尺度以数千千米计的大范围大气运动一定是准水平的，垂直速度远小于水平速度。重力场抑制了垂直运动的发展，使得在垂直方向上气压梯度力与重力近似地相平衡，这就是所谓静力平衡。静力平衡是大气运动的重要性质之一。实际上，平流层因空气以水平运动为主而得名。这里适宜喷气式飞机航行，环绕中高纬度有强的西风。平流层中下部，有一臭氧浓度比较集中的气层，叫臭氧层。臭氧是大气中唯一能大量吸收太阳紫外线辐射的气

体。如果没有臭氧层，过量的太阳紫外线辐射到达地面，对人体（暴晒皮肤起泡）和生物就有损害。所以，臭氧层也是生命的保护层。

## 2. 辐射平衡

地表（地面和大气）辐射平衡是认识大气热机的重要起点之一。任何一个物体都能不断地以辐射方式进行着热量交换。地面和大气与其他物体一样，都在不断地进行着这种热量交换。以青藏高原的地表辐射平衡为例，入射太阳辐射和地表反射的短波辐射，地表和大气的长波辐射在大气层上界达到平衡，源源不断的太阳辐射是地球大气系统维持运动的根源。对大气来说，它所吸收的辐射包括被水蒸气、灰尘或臭氧等吸收的太阳直接辐射（16%），地表净辐射（15%），感热（7%）和潜热（23%）（百分比均是相对于入射太阳辐射的100%），可见对大气来说，地表加热的作用（45%）还要大于太阳直接对大气的辐射（16%）。因此近地面的大气总是先被加热，垂直对流的起点在于地表的加热，山谷风等大气现象的根源也在于此（详见后文）。

如上所述，大气主要受地表加热。而地表加热强弱主要要看地面辐射差额。地面辐射差额为地面所吸收的太阳总辐射及地面放出的长波辐射之差，以公式表示为

$$R_g = (Q+q)(1-a) - F_0$$

式中， $R_g$  为地面辐射差额； $(Q+q)$  是到达地面的总辐射，即直接辐射  $Q$  和散射辐射  $q$  之和； $a$  为地面总辐射的反射率， $(1-a)$  为地面的吸收率； $F_0$  为地面的有效辐射。

当地面收入的热量多于支出的热量，则地面温度不断升高；反之，则地面温度不断下降。一般最高温度出现在从升温转为降温的转折点上，最低温度出现在从降温转为升温的转折点。因此，晴朗无云的天气里，地面温度最高值并不出现在太阳高度角最高的正午，而是在午后一点钟左右；最低温度出现稍迟于日出时刻。由于地面热量传输给大气，需要有一定时间，所以气温日变化的最高、最低稍落后于地面温度日变化的最高最低，这就是地面辐射差额的日变化情况。

地面辐射差额年变化因纬度而异，纬度愈低辐射差额正值的月份愈多；纬度愈高，辐射差额保持正值的月份就愈少。如果把地面和对流层大气看成是一整体，来研究此系统的辐射差额，能更清楚地

看出辐射差额随纬度分布的情况。在这个系统中，收入部分是由地面和大气所吸收的太阳辐射所组成，而支出部分则是辐射到宇宙空间去的地面和大气长波辐射。地气系统辐射差额是随纬度增高而由正值转变为负值的，在  $35^\circ\text{S}$  到  $35^\circ\text{N}$  之间的地气系统辐射差额为正值，在此范围以外的中、高纬度地区为负值。辐射差额的这种分布，也正是引起高低纬度之间大气环流产生的基本原因。

虽然地气辐射具有全球性分布，但对于具体区域来说，不同下界面的热力性质差异，比如海陆之间的比容差异，森林和沙漠地区之间的反射率差异等，都极大的改变了区域地表的辐射平衡，使得不同地区大气加热的速度存在差异，这也是大气热机存在万千变化的根源之一。

## 二、太阳辐射热机

在地球大气的热量平衡中，净辐射收入主要在赤道和中纬度地区，而净辐射支出在高纬度和极地地区。这种辐射收支差异使得低纬度下垫面有更多的热来加热大气，也导致同一高度上低纬度大气比高纬度大气热。热带的地面气温可以达到  $20\sim 30^\circ\text{C}$ ，而极地的地面气温可以在零下  $20\sim 30^\circ\text{C}$ 。这种高低纬度间的热力差异，自然地催生出地球上的大气运动。

### 1. 哈得来环流

地球围绕太阳公转的轨道是以太阳为焦点的椭圆，地球的自转轴与公转的椭圆平面有一个  $66.5^\circ$  的倾角。在冬至，太阳光可直射南半球  $23.5^\circ$ 。在夏至，太阳光可直射北半球  $23.5^\circ$ 。太阳光一年中在南北回归线之间发生两次直射。在地球表面的任一点上，太阳辐射量有季节变化，温度也有季节变化。这两个量都有春夏秋冬季节变化的规律。

如前所述，极地与赤道之间的温差可自发地形成大气环流。赤道地区地面温度比对流层顶高，空气上升运动。在对流层，赤道空气比极地热，空气由赤道向极地运动。在近地面，极地的冷空气向赤道运动，补充赤道空气的上升运动。于是，极地空气又出现下沉运动，补充那里空气的向赤道运动。由此形成的环流称为著名的哈得来（1735）单圈环流。这是一个在不考虑地球自转的情况下的热力环流。18世纪早期，哈得来提出单圈大气环流模型的时候并没有考虑地球的自传效应。当然，这样的单圈环流也没有考虑辐射在不同地区的季节变化和环

流的季节变化。

## 2. 雪球地球

雪球地球是地质学上的一个学说。该学说认为在迄今大约 7.5 亿到 5.8 亿年以前,地球表面从两极到赤道全部被结成冰,只有海底残留了少量液态水。该学说的证据是冰川沉积物研究显示历史上全球曾广泛被冰雪覆盖,即使是在现今的热带地区。科学家们推测在这段时期内,温室效应被破坏,地球进入冰川蔓延→地表对太阳辐射的反射加剧→净辐射减少,地表降温→降温加剧冰川发展的循环机制,直到最终地球表面全部为冰川覆盖,太阳辐射被雪白的地球反射回太空,地球一片冰冷。冰雪地球学说生动地说明了太阳辐射(包括对太阳辐射的吸收机制)是地球大气的热力之源。

## 三、地球自转和大气环流

### 1. 转盘实验

英国剑桥大学教授 Hide 在 1975 年开展了模仿实际地球大气的转盘实验。他采用较深的环形圆筒装置,实验流体用水、甘油混合液。实验得到的流型可划分为三种基本类型:轴对称流型;规则和周期性的波状流型;不规则非周期流型。研究发现在较低的转动速度 $\Omega=0.41\text{rad/s}$ 下,得到稳定时的流型是轴对称环流,类似大气中的纯纬向(东西向)环流;逐步增加旋转速率,轴对称环流不能够维持,出现波动,当 $\Omega=1.07\text{rad/s}$ 时,为典型的 2 波环流,类似大气中的二槽二脊流型; $\Omega=1.21\text{rad/s}$ 时呈现规则的 3 波环流,即三槽三脊流型; $\Omega=3.22\text{rad/s}$ 时则出现类似于 5 波环流,为五槽五脊流型; $\Omega=3.91\text{rad/s}$ 时,五波流型开始破坏;当 $\Omega=6.4\text{rad/s}$ 时,波状的不规则特征就十分明显了。

在这个实验中有动量(角动量)的输送,也有热量的输送,而以动量的输送为主。当旋转加快出现 5 个波的时候,人们观测到了转子,即闭合的环流。这些闭合的转子在大气中被称为孤立波,或者叫孤立子。可见,转盘实验模拟出了现实大气中的一些现象,说明地球自转和太阳辐射一样是大气运动的根本驱动。

### 2. 三圈环流

在 20 世纪 20 年代,人们通过风的观测发现,大气运动并不按照哈得来单圈环流模型运行,这一模型没有考虑地球自转对大气运动的作用。于是科学家们提出了旋转地球上三圈环流理论模型,该模

型增加了地转偏向力的作用,该力在北(南)半球指向运动方向的右(左)侧。在该模型中,赤道空气上升运动到达高层后,其向极运动受到地转偏向力的作用,使北(南)半球运动的空气向右(左)偏转。这样,由赤道上升向北(南)流动的空气,随着纬度的增加,地转偏向力也将增大,到某一个特定纬度(在 30 度附近)即转变为西风气流,并形成稳定的西风带,从而阻碍了由赤道上空源源而来的空气继续向北(南)流动,并在那里堆积起来,空气密度加大,空气辐合产生下沉运动也使地面气压升高和温度升高,即形成了所谓的副热带高压带。这个高压带是空气动力下沉造成的,因此是干暖高压。由此可见,地球大气的运动,不仅仅受极地与赤道热力差异的驱动,还受到地球自转的作用。由此,热力驱动的哈得来环流到不了极地,而只能到达副热带地区,这种情况与现代观测资料的分析结果一致。

在 30 度附近下沉的空气,在北半球低层分别向南流(向赤道)和向北流(向极地)。向南流的空气受地转偏向力的作用向右偏转,成为东北气流。因为这支风系很稳定,称为东北信风。相应的在南半球低层流向赤道的气流,称为东南信风。两支信风在赤道地区辐合上升。这样,在赤道和南、北纬 30 度之间各形成一个热力环流圈,即范围缩小的热带哈得来环流圈(信风环流圈)。两支信风的辐合地带,称为热带辐合带或赤道辐合带。

北半球低层另一支向北流向极地的空气受地转偏向力作用向右偏转,成为中纬度的西南气流,当流动到副极地时,与极地冷却下沉向南流动的东北气流相遇。由于这两支气流性质不同,一支是暖湿的西南气流,一支是干冷的东北气流,两者之间形成锋面,即极锋。沿极锋滑升的暖空气,到高空后又向南北分流。向北的一支流向极地,冷却下沉以补充极地低层向南流失的空气。这样在高纬地区也构成一个正的环流圈,通常称为极地环流(极地哈得来环流圈)。在极锋上空向南流动的一支,在副热带地区也形成一个环流圈,其方向与前两个哈得来环流圈相反,故称前两个为直接环流,后者称为间接环流,也称为中纬度环流或费雷尔环流圈。在南半球有对应的相同情况出现。由此可见,在地球自转影响下,南北半球各形成了三个环流圈,以哈得来环流圈最强,费雷尔环流圈最弱。

随着三圈环流的建立，地面和高空流场也有相应的三条风带，在地面流场上，高纬度有东风带、低纬度有东北信风带和中纬度西风带；在高空流场上，低纬度和高纬度地区都是西风带，其间中纬度地区应为一个弱的由东北气流构成的东风带。但是观测结果表明，中纬度高空为西风带，说明三圈环流中的中纬度高空东风带的建立是与实际观测相矛盾的，因此三圈环流模型是有缺陷的。不同纬带之间的大气环流反映的是角动量在这些纬带的交换。

事实上在整个高空流场上都是西风占主导风向，特别是在高纬度西风带中，可以发现位于极锋上空的 $\text{最大风速}$ 大于每秒 30 米的中心，称为极锋西风急流。副热带地区对流层的中下层由于下沉气流很强而没有锋面存在，但对流层上部锋区特别明显，称为副热带锋区，与之对应的为副热带西风急流。因此，高低空基本上是呈环球带状的气流。在自转的地球上，这种环球带状气流是不稳定的，常常产生扰动，故带状气流常呈波状，西南气流与西北气流交替出现，南北之间不同温度的空气进行热量和动量的交换。于是，交换角动量的方式除了行星尺度的三圈环流外，还有这些波动或瞬变涡旋，也称气旋和反气旋。

如果地球上没有海陆交叉的地形分布，那么将会出现一系列纬带环状气候带分布。在赤道上是热带辐合带，赤道外分别为东南和东北信风带。大约在 30 度附近为副热带高压带，60 度附近为副极地低压带。在副热带高压带和副极地低压带之间为西风带。此外，极地附近为东风带。

### 3. 行星尺度季风

季风概念最早来自于印度地区的夏季来临前后风场方向和降水量的季节性规律变化。无论印度季风本身的季节变化还是季风概念后来推广延伸后的含义，实际上都反映了前述地球三圈环流模型的季节变化规律。由于地球自转轴与公转轨道有  $66.5^\circ$  的倾角，夏季阳光可以直射到北回归线，赤道辐合带移到赤道以北，冬季阳光可以直射南回归线，赤道辐合带移到赤道以南。随辐合带位置变化而变的还包括哈得来环流圈的南北位置，表现在气象要素上就是风场的季节转变和赤道雨带的季节迁移，这种风和干湿的季节转变称为行星尺度季风。

## 四、海陆热机

### 1. 海陆热力差异

水的比热容比陆地的大，因此海洋温度变化总

是慢于大陆温度变化，在加热过程中海洋升温慢于大陆，海洋温度低于大陆；反之在放热过程中海洋降温慢于大陆，海洋温度高于大陆。这种海陆间的热力差异是大气运动最重要的驱动之一。

### 2. 海陆风

海陆风是上述海陆热力差异在日变化尺度上的反映。白天海陆都受太阳辐射加热，陆地升温快于海洋，大气在较暖的陆地上升，在较冷的海洋下沉，对应的在高空有自陆地吹向海洋的风，在近地面有自海洋吹向陆地的风。与此相反的，夜间海陆均为向外辐射的降温过程，大气在海洋升起，在陆地下沉，对应的海陆风向与白天的相反。

因为周期只是一昼夜，海陆风的水平范围一般是几十千米，垂直高度一般在 1~2 千米。

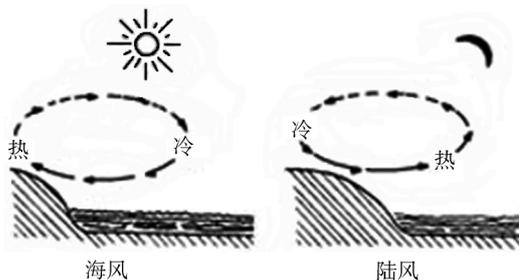


图 2 海陆风示意图

### 3. 海陆季风

海陆季风类似于海陆风，但将空间范围扩大，时间尺度延长，比如视夏季为加热过程，冬季反之，则海陆之间也会出现类似的风向季节变化现象。夏季时较暖空气在大陆升起，较冷空气在海洋下沉，海陆季风在高空自大陆向海洋，在低空自海洋向大陆。

需要注意的是，现实中的季风现象往往是海陆季风和前述行星尺度季风的综合，其作用的因素包括不同纬度带之间大气交换的行星尺度热机和海陆热机。

### 4. 大气活动中心

正如转盘实验中出现的多波流型和闭合转子一样，现实中大气在转动的地球上也经常表现为大范围的几波流型和闭合环流，我们常把其中支配大气运动的一些大型闭合高、低压环流系统，称为大气活动中心。大气活动中心是大气环流的重要组成部分。其位置和强弱反映广大地区大气环流的特点，其变化决定着冷、暖气流和天气、气候的特点。一

年四季都存在的大气活动中心称为永久性活动中心，只在一定季节存在的大气活动中心称为半永久性活动中心或季节性活动中心。北半球主要的永久性活动中心有 5 个，副北冰洋冷高压、冰岛低压、阿留申低压、北大西洋高压和北太平洋高压。季节性活动中心有 4 个，即冬季的西伯利亚高压和加拿大高压、夏季的南亚低压和北美低压。在南半球的永久性活动中心有南太平洋、南大西洋和印度洋 3 个副热带高压，南极洲冷高压和副极地低压。澳大利亚附近因受大陆影响，冬季为高压，夏季为低压，为季节性活动中心。

虽然地球自转决定了大气活动中心出现的必然性，但其出现的具体位置和长期维持，可以说主要是下垫面影响，也就是海陆热力差异的作用结果。例如，北冰洋冷高压与该地冰雪覆盖的下垫面的冷源作用有关，冰岛低压和阿留申低压的产生则与寒冷的冰雪和温暖的海洋两种下垫面的差异有关。季节性活动中心是海陆温度对比的季节性变化的结果。例如，亚洲大陆在冬季比同纬度海洋寒冷得多，形成强大的西伯利亚冷高压，而在夏季则比同纬度海洋显著炎热，形成巨大的南亚热低压。冬季加拿大冷高压和夏季北美热低压亦由类似原因形成，仅因北美面积远小于亚欧，活动中心较为弱小而已。活动中心随海拔高度的增加，逐渐由闭合的高、低压转变成巨大的脊、槽系统，一般在 3000 米以上，高、低压中心已不显著。

中国位于亚洲东部，冬季主要受西伯利亚冷高压的控制，使得冬季比同纬度地区为冷，夏季受南亚低压与副热带高压的影响，特别是副热带高压的进退和强度影响着中国各地雨季的早迟和强弱。这些活动中心的形成、进退、发展和消失每年都有所不同，是形成中国每年天气、气候有不同特点的主要原因。一年中，由于不同活动中心的交替，使中国冬夏气流方向差别显著，形成季风。

## 五、地形热机

地形作用通常指由于地形高低不同造成的对于大气运动的阻隔、抬升和摩擦作用等，实际上，其间接作用可能还包括由于地表物理条件不同导致的地面反射率差异等。

### 1. 焚风效应

当湿空气越过高山时，常在山的背风坡的山麓地带形成一种干燥高温的气流，称作焚风。空气在

沿山坡运动时，可以把它看成是在做垂直运动，空气的这种运动过程常常是绝热进行的，即每上升 100 米温度降低约  $1^{\circ}\text{C}$ ，每下降 100 米温度升高约  $1^{\circ}\text{C}$ ，当它上升到凝结高度以后，水汽凝结时会释放出部分潜热，使得空气每上升 100 米降低  $1^{\circ}\text{C}$  改变为降低  $0.6^{\circ}\text{C}$ ，这样就为焚风的形成构成了有利条件。例如：有一气流，要翻越一座高度为 4000 米的山脉，假定其越山前温度为  $15^{\circ}\text{C}$ ，凝结高度为 1000 米，由于在凝结高度以下空气每上升 100 米降低  $1^{\circ}\text{C}$ ，凝结高度以上，每上升 100 米降低  $0.6^{\circ}\text{C}$ ，那么这块空气到达山顶时将会变成  $-13^{\circ}\text{C}$ 。如果凝结出的水汽完全降落到了山前，在空气翻山后，就成为了干燥的气团。在无水汽的影响下，气流到达山底时，将会因每下降 100 米升高  $1^{\circ}\text{C}$  而变成  $27^{\circ}\text{C}$  的干热风。我国境内高山峻岭很多，常可见焚风现象。焚风强烈时，能使农作物枯萎，甚至引起森林火灾。

### 2. 山谷风

如前所述，由于地表辐射平衡，近地面大气被加热的速度快于高空大气，造成山谷中大气的热力差异。白天山坡上空气受热快增温多，山谷中同高度大气因离地面远，受热慢增温少，从而形成热力环流，风由谷底吹向山坡。夜间则反之。

### 3. 青藏高原地形作用

青藏高原的高度可达到对流层中部 500 百帕（ $\sim 5000$  米），它以近似椭圆形的下边界位于大气的底部，又位于中纬度西风带气流中。它的存在使西风气流发生变化，并出现绕流和爬流两种运动。

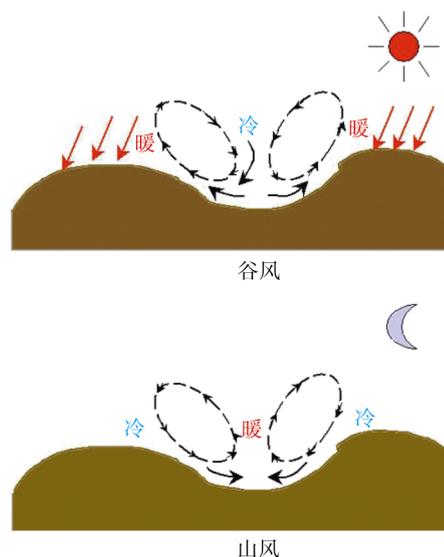


图 3 山谷风示意图

青藏高原东部常见的环流型包括东北侧的低压槽，东南侧的高压脊和紧靠东南侧的低涡。这三者，尤其是高原东南侧的低涡与高原地形有重要关系。这个低涡对于高原周边的天气过程具有重要影响。

此外，高原还有热岛效应。近代地理学的开创者之一，德国科学家洪堡1799~1804年间在南美洲安第斯山脉考察时发现，赤道附近的高山雪线，比中纬度的青藏高原许多高山的雪线低200米左右。例如：贡嘎山西坡雪线高5100米左右，而靠近赤道的厄瓜多尔基多附近的高山雪线仅约4800米多一些。这不符合常理：由于赤道地区热量较高，高山雪线通常应该从赤道向两极递降，到极地附近降至海平面。据此，洪堡提出了青藏高原的“热岛效应”理论：对流层大气的主要直接热源是地面，或称“下垫面”，青藏高原由于下垫面大面积抬升，（相当于把“火炉”升高），故其热量较同纬度、同海拔高度的其他地区高得多，甚至比赤道附近的同海拔地区也要高得多。洪堡的观点实际上代表的是气象学领域关于青藏高原在某些时候是热汇（相对于周边的热源中心）的认识，然而也有部分观点认为高原可能是冷汇，不可否认的是高原的热力过程存在季节变化，同时目前对于高原的大气观测还很不充分，因此目前学术上的证据还不够多，争论依然存在。根据现实需要，我国大气学界已经筹划在未来的若干年内再次开展对于青藏高原的科学观测计划，将对相关的科学问题展开深入的探索和研究。

## 六、其他热机

### 1. 火山爆发等自然热机

火山爆发除了直接向大气释放大量热量，同时释放了大量微尘颗粒和气溶胶，随着它们的扩散，区域和全球的大气反射率和太阳辐射收支情况都会受到影响。1991年菲律宾皮纳图博火山(pinatubo)喷发后包含大量二氧化硫在内的火山灰逐渐扩散。在一段时间内地球大气层内漂浮着许多火山灰，这些火山灰不仅本身对太阳光线有很强的阻挡能力，同时反射率很高。皮纳图博火山爆发后，作为地球最直接能量来源的太阳辐射不仅难以穿透大气，同时还被大量反射回太空，这使得全球气温有明显下降，并且这种效应持续了几年。这就是所谓的“阳伞效应”，大意是火山灰给地球打上了一把遮阳伞。

除了火山爆发之外，冰川的消融、大陆上雪盖

的增减，都存在可以影响大气运动的热机过程，在此不再一一赘述。

### 2. 人类活动

人类活动对大气的影响比较复杂，通常分为几类：（1）直接向大气排放热量，如能源燃烧和城市热岛效应。（2）影响大气成分和气溶胶变化，进而改变大气热力性质，如温室气体的排放。（3）改变地球表面热力性质的行动，如森林砍伐。实际上，多数活动通常同时具备上述特征，目前最受关注的是温室气体的排放。

### 3. 温室效应

现在地球上的空气，除了水汽外，主要由氮气（78.1%）、氧气（20.9%）和氩气（0.93%）组成。太阳入射对这些主要气体有作用，而地球放射的长波辐射对它们没有作用，即可以穿透它们。然而，有些微量气体，像水汽、臭氧、二氧化碳、氧化亚氮、甲烷等，它们能够吸收和放射长波辐射。这些气体通常被称为温室气体。它们占大气的体积混合比还不到0.1%。大气中包含水汽，它也是自然的温室气体。水汽的总量不超过所有气体的1%，但它比其他的温室气体总量大十倍。这些温室气体吸收从地球辐射出的长波辐射并向外（空）和向下（地球）放射长波辐射，结果导致气温升高，给地球起到了温暖效应，也称“温室效应”。如果没有温室效应，地球的平均气温将会下降到零下23℃，而不是现在的平均温度14℃。

目前主流的学术观点认为人类活动造成全球气温的不断增暖。根据IPCC（政府间气候变化联合委员会）的评估报告，全球温度在20世纪的100年间已经上升大约1℃，并且在21世纪还将继续上升趋势，伴随全球升温的还有极端天气和气候事件的增多，这意味着更多气象灾害的出现。理论上的推测是全球增暖会加速全球的水循环速度，从而造成干湿在不同区域的失调，有些地区会变得更加干旱，有些地区变得更加潮湿。

### 4. 《后天》：气候危机和海流热机

2004年一部美国科幻电影《后天》在全球引起了巨大的反响，影片中描述了人类活动导致的气候危机来临时的末日景象，无比巨大的风暴席卷北美，将美国的大部分地区化作一片冰原，人们不得不逃往温暖的墨西哥。

事实上，这部电影所描述的故事来源于气候研

究中的假说。全球气候的稳定依赖于全球海洋输送带的平衡，这是一个依靠海水温度和含盐密度驱动的全球洋流循环系统。这个系统的运作现况是，以风力驱动的海面水流如墨西哥湾暖流等将赤道的暖流带往北大西洋，暖流在高纬度处被冷却后下沉到海底，这些高密度的水接着流入洋盆南下前往其他的暖洋盆加热循环，一次温盐循环耗时大约 1600 年，在这个过程中洋流运输的不单是能量（温度/热能），还包括地球固态及气体资源等，不过温盐环流最受人类关注的是其全球恒温的功能。根据气候学假说，如果全球持续增暖，冰川融化不断注入海洋后，一旦达到某个极限时，会破坏上述稳定全球温度的海流热机，从而使全球气候面临崩溃的风险。气候模式模拟的结果证实了这种事件发生的可能性，而《后天》不过是用电影的艺术化手法向人们形象的展现了一切。

## 七、季风

前文描述了大气中的种种热机，现实中的大气现象往往是多个热机过程的组合，而非单一的热机。全球季风正是这样一个融合了太阳热机、地球自转影响、海陆热机、地形热机和人类活动影响等多方面过程的复杂系统的典型。

### 1. 全球季风分布

受太阳辐射随季节变化的作用，2 月初是南半球降水最多的季节，是北半球最干的季节。相反，8 月初是北半球降水最多的季节，是南半球最干的季节。分别以 2 月初和 8 月初全球每天平均 4 毫米以上的降水区为湿区，小于 4 毫米以下的降水区为干区，这样可得到全球的干湿变化区。每日 4~8 毫米干湿季节变化区与 4 毫米干湿变化基本一致。沿赤道，全年都有比较大的降水，为湿润区，没有发生随季节的干湿变化。如果用干湿季节变化定义为季风区，则沿赤道附近不是季风区。在高纬度地区、内陆地区和海温低的区域没有干湿的季节转变，也不是季风区。在东西方向上，干湿季节转变区域主要分布在赤道外的热带和副热带地区。在南北方向上，存在着赤道南北非洲两个干湿转变季风区、亚洲-澳大利亚两个干湿季风转变区和赤道两侧南北美洲干湿季风转变区。如此计算，全球有 6 大季风区。其中以亚洲-西北太平洋季风区最大，澳大利亚-

西南太平洋季风区次之，北非季风区最小。亚洲季风区降水可以向北伸展到东北亚。

### 2. 亚洲季风

以亚洲季风为例，冬季亚洲大陆低层大气中有一个干冷高压系统，干冷空气向四周辐散，向南辐散的气流分别影响到印度半岛、阿拉伯海、孟加拉湾、中印半岛和中国东部，这就是亚洲冬季风。夏季热低压位于印度半岛和亚洲大陆东部，导致来自阿拉伯海、孟加拉湾和南海的暖湿气流向大陆辐合。夏季风的显著特点是每年会在一段时间内集中出现强降水或暴雨天气。亚洲的暴雨发生地主要集中在青藏以南的南亚次大陆和东亚、东南亚地区。从中国西南地区到泰国的南北方向上，少暴雨带分隔了西部的南亚季风区和东部的东亚、东南亚季风区。中国的季风暴雨集中在长江上游到华北和东北一线的以南地区。

### 3. 东亚季风

对于东亚季风，它包含的过程大致如下：太阳辐射季节变化导致的中低纬度带间大气交换过程，欧亚大陆和太平洋的海陆热力过程，地球自转产生的西风带维持，高原地形的动力阻隔和热力过程，人类活动影响导致的地表和大气热力交换的过程。这些过程中大气热机不断吸收和交换能量，也使得东亚地区的天气和气候变化具有罕见的复杂性和丰富性。

## 八、结束语

热机，吸收热能并能将其中一部分转换为机械功向外输出的原动机。大气，恐怕是这个地球上最复杂的热机。它随着地球转动，它受着复杂地形的影响，太阳辐射是它的热力之源，海陆差异、地形作用、火山爆发、人类活动，等等，在这些过程中大气不断吸收热能并向外输出和交换，现实中的大气运动往往就是这些热机的合成，其复杂性可想而知。

地球像一只巨大的发动机飞轮，它的质量和惯性为大气中无数大大小小的热机起到了平稳作用。由于地球表面加热的差异，大气中出现了大到行星尺度、海陆尺度的温差，小到城市热岛和山谷风尺度的温差，由此驱动产生无数复杂多变的热机，它们共同组成了地球上气象万千的大气运动。

（北京大学物理学院 100871）