

关于大气环流主要思想的发展*

E. N. Lorenz

在过去的三个世纪内，有关大气环流的主要思想是以阶段性的方式得以发展和逐步完善的。每一阶段的开始都是以系统地阐述一种新的理论概念为其标志的。而在每一阶段的后期，当着这种新的理论概念得到公认的同时，又由于新的观测事实的出现而说明该理论概念在一些方面是错误的。本文分四个阶段来叙述。

第一阶段：第一阶段的开始时间可以追溯到18世纪初叶。我们知道，已经被普遍接受的信风理论是由天文学家Halley(1686)系统阐述的。由于有一颗慧星用他的名字作了命名，所以至今人们都还记得他。Halley曾仔细地注意到在三个分隔开的大洋中存在着相似的风系，并对此给出了一个普遍的解释。他认为太阳的加热是大气运动的原始驱动力；他相信太阳加热作用在低纬会引起空气的上升而在高纬会引起空气的下沉。根据大气质量的连续性原理，将跟着会出现在低空信风区内空气向赤道漂流和在高空空气向两极漂流。他坚持认为，在信风区内空气向西漂流同样是由于空气具有随着太阳运动的倾向产生的。

这里他似乎犯了一个逻辑上的错误，就是他未能把一个物理量与它的时间导数完全区分开来。当

“追随太阳”一词用于南北运动时，它似乎指的是向着太阳的运动；但当该词用于东西运动时，它却指的是沿着太阳的移动方向运动。另外，Halley没有讨论关于中纬度西风带的问题，因而他的工作不能就视为大气环流理论。

在第一阶段中属于开创性工作的是Hadley(1735)的著名论文。该文曾被复述过许多次以至不必要再重复，但有几点还须予以提及。首先，他引用了一个新的物理概念——当空气移动在具有大小不一的角动量的地球表面部分时，有保持其现有绝对角动量不变的倾向。该倾向正是我们现在称为科氏力的东西分量。

Hadley业已接受了Halley的关于空气南北向运动的思想，因而导出了在低空向赤道运动的空气将向西偏转，而在高空指向极地的返回空气将向东偏转。他用摩擦来解释为什么偏东风和偏西风将不会比观测值更强，并注意到低纬度有偏东风及其在地面产生的向西摩擦曳力，这要求其它纬度上必有偏西风及相反方向的摩擦曳力。因此，Hadley的

* 编者注：本文是Lorenz在1976年美国气象学会第56届年会上所作的演说。虽事隔数年，但由于报告的权威性和重要性，美国气象学会最近(1983)又将它重新发表。

解释已含有全球环流的概念，全球环流的各部分都不能彼此分开来进行解释。

事实上，Hadley 的文章发表若干年后很多人并不知此事，以至这种概念又由 Kant(1756) 重新发现，但也没有引起注意。后来又由 Dalton(1793) 重新发现。也许正是由于 Dalton 后来知道了并且承认 Hadley 在他之前已经提出了这个理论，因此 Hadley 的文章才引起了人们的普遍关注。然而，在这段时间新的观测事实是愈加丰富了。就在 Hadley 的理论正在得到公认的同时，新的观测事实却揭示出其理论在以下问题上是错误的，即中纬度地面偏西风具有向极漂流的倾向而不是象理论所要求的那样向赤道漂流。

第二阶段：第二阶段是以设法使 Hadley 的物理推论与新的观测事实相符作为其开始的。在这方面具有最深远影响的有 Thomson (1857) 和 Ferrel (1859) 两人的很类似的工作。如 Hadley 的工作一样，他们的工作也是建立在一个新的物理概念上的：当地球周围的空气的旋转速度大于(或小于)它下面的地球的旋转速度时，就会受到一些较大(或较小)的离心力的作用。诚然，该倾向就是我们现在称之为科氏力的南北分量。

Thomson 和 Ferrel 接受了 Hadley 的对于低纬环流和其他纬度上的较高层空气运动的一些看法。他们同样提出了摩擦力作用并注意到在近地面浅气层中摩擦力会使得偏西风随着高度的减小而迅速减小，而从流体静力关系考虑，向北的气压梯度却仅是缓慢地减小。因此，在近地表层将出现一个较大的非平衡力，该非平衡力迫使空气向极地运动，这与观测事实是相符的。

Ferrel 与 Thomson 的不同点主要在于后者没有把他的低层热力逆环流圈延伸到极地地区。

由于 Ferrel 的不懈的工作，新的概念很快获得了人们的关注。在 19 世纪末叶，正当这种新的理论得到公认的时候，国际气象组织完成了根据高云移动而导出的高空风的研究。该研究揭示出，不存在从热带到中纬度的高层向极气流，而如果按照 Thomson, Ferrel 和 Hadley 的理论的话，它却是存在的。

第三阶段：在第三阶段的早期，各种学说纷然杂出，路别途殊。被普遍接受的一些理论的共同特点是环流形状相对于地轴来说是完全对称的。但这并不意味着这些理论的提出者不知道盛行的强烈风暴和其它一些不符合轴对称的现象。Ferrel 甚至在同

一篇文章的不同章节撰写了有关大气环流和风暴的问题。但他从未提到大气环流和风暴可能有某种相互影响的问题。

一些研究者出于同一思路，在 Thomson 的环流图案上增加了愈来愈多的单体环流以便建立在不破坏轴对称的情况下与新的观测事实相符合的理论。相继发现，所建立的这些物理上不是显然不可能的环流型仍与新的观测事实不符。

还有一些学者从另一种思路出发，认为大气环流(今天这个词指的是轴对称的环流部分)不能单独用叠置在这种环流上的风暴来加以解释。Bigelow (1902) 特别强调这种概念，他描述了高纬的一种不对称环流，它具有冷的向赤道和暖的向极地并排气流的流动，他认为风暴的发展就是这些气流相互作用的结果。当时已认识到，在低纬由太阳所得的多余热量在被放出之前必须在大气内部向高纬输送，而均匀的高空向极气流则被假定为实现这种输送的手段。以后发现不存在这种均匀的向极气流，就又不不得探索另一种输送机制。Bigelow 坚持认为，那种冷暖毗连的气流正好提供了这种输送机制。

在这一点上，我们必须追溯到 Dove(1837) 的思想。他接受了 Hadley 的关于低纬环流的思想，但却认为中纬度环流是北风和南风按经度交替排列所构成的。Dove 的“风”看来象是我们今天所说的极地和热带气团的概念。他认为移动性的风暴是由于这些风的冲突的结果。他的描述类似于 Bigelow 的看法。

读者也许要问，为什么直到这里才提出 Dove 的先进思想呢？不错，我们可以假装不知道有 Dove 的工作而把本文写得更简化些，但是不能这样作。事实上，出现在 19 世纪后期的许多历史总结报告一概忽视了 Dove 的工作。我们在查阅了 Hann(1901) 的优秀论文原版之后，就可以猜想到其中的原因了。原来 Hann 在大气环流的章节中并没有提到 Dove，而是在其后的风暴一章中描述了 Dove 的详尽工作。显然，直到 19 世纪气象学家们不承认 Dove 如此细致的工作是属于大气环流的范畴。因此，他的工作未能对后来的大气环流研究工作发生影响。当然，Dove 没有象后来的 Bigelow 那样提出北风和南风是热量输送的主要机制。这是可以理解的，因为当时没有理由去猜想高空不存在向极气流。

在 Defant(1921) 提出中纬度的运动只不过是湍流在较大尺度上的一种表现之前，大气环流在本

质上是不对称的概念仅得到为数很少人的支持。Defant比Bigelow前进了一大步，他应用湍流理论计算了直径为数千公里的湍流涡旋向极输送的热量。他发现计算结果与所要求的输送量很一致，从而得出结论说他的理论概念得到了证实。

环流的不对称性不管能否被看作湍流，都需要研究其发生的原因，于是V. Bjerknes(1937)提出了一种恰当的解释。他研究了假如强迫环流维持对称时它可能出现的型式，所得的结论是这时它看上去很象Thomson和Ferrel的环流型式。然而，他坚持认为这些环流型式对于小振幅不对称的扰动来说将是不稳定的。因此充分发展的不对称性可以作为实际环流的特征。

Defant因气旋和反气旋具有随机性而把它们描述成湍流似乎遭到了一些人的反对。不过，气旋能象随机涡动一样扩散热量，因而能消除温度场的对称性，这种看法确实具有相当的可取之处。

这种概念自然可以推广到运动场。追随这种理论最活跃的是Rossby(1941,1947)。他以动量扩散和后来的涡度扩散为前提，从而能够导出与实际情况相当吻合的环流型式。

Jeffreys(1926)首先对上述论点提出了反驳。当时已经认识到，角动量和热量在大气内部必须是向极输送的，而当时被认为是这种输送机制的高空向极气流实际上并不存在，因此出现了新的问题。为此，他提出，角动量和热量的输送是由不对称的涡动所完成的。然而，他的思想并没有被积极地接受下来，这是由于应用湍流理论导出的传输机制与实现全球平衡所需要的传输机制是完全不同的。

第二次世界大战以后，J. Bjerknes(1948)，Priestley(1949)和Starr(1948)各自提出了利用充分的高空观测资料逐日直接计算角动量输送的作法。计算结果证实了Jeffreys所提出的思想：在整个大气的很大一部分中，角动量是由角速度低的

纬度传向角速度高的纬度，这与湍流理论所得结论正好相反。这就是第三阶段的全部内容。

第四阶段：从历史的观点来纵观第四阶段是更为困难的。因为该阶段目前正在进行之中，还没有结束。在该阶段的初期，有一种流行的看法，即认为气旋和其它一些不对称现象应符合斜压稳定度的理论。Eady(1950)曾对这种看法作过明确的阐述。Charney(1959)假定非对称的扰动虽然具有有限的确定大小，但却与极小尺度的、能够迅速增长的扰动具有相同的形状从而推导出了一个相当逼真的环流。随后沿着这种思路继续进行研究。

假如我们的有关大气环流的最新观点(Lorenz, 1969)是正确的话，那可能就接近第四阶段的结束了。我们对环流进行了描述，其结果虽不是用三言两语就能说清的(除非称之为斜压不稳定现象)，但至少可以通过对动力方程求出接近实际情况的数值解而模拟出其主要特征。从这些数值解计算出的一些统计特征与根据实际大气资料计算出的结果非常一致。我们感到，问题似乎已接近解决了。

那末我们还要问一下，这第四阶段是否将以上述三人的理论作为结束呢，未来的几十年是否会出现一些新的观测事实推翻我们目前的理论呢？我们很难断言这种情况不可能出现。

我们目前对大气中各种相态水的作用了解得还不够全面，最终必须同时考虑热力和辐射两种作用。此外，我们还不能充分了解有着巨大水体的热带地区和其它纬度之间的相互联系。卫星观测业已展示了种种特征，如有一个频繁出现的从热带太平洋向东北伸到美国中部的连续云带，这种连续云带在以前是不了解的。或许到20世纪末，我们会突然发现我们正在开始第五个阶段。

辛宝恒译自《美国气象学会通报》，1983, 64,
No. 7, 730—733页

史国宁校