

大气环流的性质和理论

[美] E. N. 洛伦茨 著

科学出版社

大气环流的性质和理论

〔美〕E. N. 洛伦茨 著

北京大学地球物理系气象专业 译

科学出版社

1976

内 容 简 介

本书是大气环流方面的一本专著,阐述了关于大气环流研究工作的历史发展概况及其主要的研究成果,并指出了在研究工作中应探索的方向。在比较全面论述的基础上强调了作者的观点。

全书共分九章,对大气环流的实际情况、维持机制、能量收支、各种探索方法如实况的观测和分析、实验模拟、数值模拟和理论分析的成绩和限度作了初步的总结。

本书可供气象理论研究工作者、教育工作者和某些气象业务工作者以及其它有关专业人员参考。

Edward N. Lorenz

THE NATURE AND THEORY OF THE GENERAL CIRCULATION OF THE ATMOSPHERE

World Meteorological Organization 1967

大气环流的性质和理论

[美] E. N. 洛伦茨 著

北京大学地球物理系气象专业 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1976年10月第一版 开本: 787×1092 1/16

1976年10月第一次印刷 印张: 9 1/2

印数: 0001—5,300 字数: 206,000

统一书号: 13031·515

本社书号: 757·13—15

定价: 1.00 元

译 者 的 话

这本专门著作是世界气象组织特邀美国E. N.洛伦茨撰写的,由世界气象组织出版。内容是对气象科学的一个分支——大气环流即大气整体运动的某些方面工作的历史发展、现状和将来的展望作了评述。全书约十五万字,是比较概括的。

全书对大气环流的实际情况、维持机制、能量收支、各种探索方法如实况的观测和分析、实验模拟、数值模拟和理论分析的成绩和限度作了初步的总结。对于希望了解大气环流研究工作情况的气象工作者,这是一本可供参考的书籍。

十分明显,在本书的各部分内容的选取及其对所选择的工作的评述态度上都强烈地反映了作者的学术倾向,因此,这本专著只能当作某些有代表性的西方气象工作者对大气环流问题的看法和其将来的工作的设想,而不能认为是所涉及范围的全面总结或定论。

在翻译过程中,我们虽然对原书作了一些删节,但仍请读者在参阅时注意分析批判。

限于译者的水平,译文中肯定会有不少缺点和错误,希望读者批评指正。

1973年2月

摘 要

哈德莱的经典著作的开场白对当代这一课题的状况提供了一个适当的描述。虽然自从哈德莱时代以来,完成了许多优秀的研究工作,但还没有对大气环流作出完善的解释。

这样一个解释所必须根据的物理规律是非常复杂的,并且还没有完全被了解。因此,许多理论研究工作只是处理了理想化的大气——一般是成份均匀的,包围着具有均匀表面的地球,并且是由不随时间和经度变化的热源所推动的大气。理想化大气的严谨处理有时对于真正大气提供了虽非严谨但定性说来却是正确的说明。

由于平流——运动场本身产生的运动场和温度场的位移——的存在,甚至于使解释理想化的大气环流问题也变得困难了。因为运动是不均匀的,平流着的场的不同部分具有不同的位移,因而场发生了变形。所以,环流可能具有的类型种类远比没有平流时应有的种类要多。而且环流变化多端,很少出现重复。

从数学上说,平流过程表现为支配方程组的非线性特性。因为通解是非周期性的,它不能明确地用有限个符号来表示。所以,许多理论研究工作的目的只在于确定大气环流通解的特殊性质或统计特征。

因为原始方程组是非线性的,所以,建立以所要求的统计特征为未知量的封闭的辅助方程组是不可能的。建立包括方程式和规定的不等式的封闭系统的可能性还没有被充分考察。

现在唯一可行的估计统计特征的方法是用数值方法确定依赖于时间的特解,并且用由实际天气记录计算气候统计特征的办法来计算这些特解的统计特征。其结果看来常和实际情况相符。但是,这些特解不总是具有代表性的,同时,这种方法并不揭示出每个个别物理过程的相对重要性。

对经度取平均之后,平流过程表现为跨纬度的角动量和能量的输送。大气必须带着充分数量的这些物理量跨过中纬度到极地去,以平衡它在低纬度的过剩和在高纬度的不足。可以由经圈环流(在某些层有净的向赤道的流动,伴随着在另一些层有净的向极地的流动)或叠加的大尺度涡旋(气旋和反气旋、槽和脊)来携带这些所需要的数量。下层有向赤道的气流和上层有向极地的气流的直接经圈环流能够把角动量和能量带向极地。

哈德莱指出加热应在每一个半球引导出一个直接经圈环流圈,并由此解释了信风和盛行的西风。低层向赤道的气流由于地球的自转将偏向而变成信风。高层向极地的回流将偏向而变成高层西风。高层的西风因下沉将变成地面西风。在那时,哈德莱的论文似乎提供了一个满意的解释。

十九世纪早期,观测结果指出地面西风吹向极地而不是吹向赤道。汤姆森 (James Thomson)和佛瑞(William Ferrel)引进了一个图案,其中在中高纬度有一个浅的由摩擦作用引导出来的间接环流圈,它处在大的直接环流圈的下面。在他们那个时代,其解释也似乎是足够的。

十九世纪后期，由国际气象组织推动的国际云观测积累了云运动的观测资料。这些资料指出，那种假设的跨越中高纬度的高层向极地的气流是不存在的。与观测结果符合并输送所需要的角动量和能量的经圈环流圈是没有的。最后，必须抛弃纬圈对称的大气环流图案。

近代的观测事实揭示，大尺度涡旋由于把角动量和能量跨过大部分纬圈输向极地，对纬圈平均环流施加了支配性的影响。涡旋的角动量输送集中在对流层顶附近，并且在三十度纬度附近达到最大值。为了完成平衡，在低纬度必须有直接经圈环流圈，它比哈德莱理论所要求的要强一些，而在中纬度必须有间接环流圈。这些环流圈延伸到整个对流层。

因为仅仅靠经圈环流是不能输送适当数量的角动量和能量以满足平衡要求的，沿纬圈平均的环流本身不能满足动力方程组。所以，寻找这种方程组的恰当解的问题看来比过去认为求纬圈对称解就够了的时候显得困难得多。任何纬圈平均运动的完善解释必须包括涡旋形态的解释。

在把能量向温度较低的纬度输送的过程中，涡旋以有效位能的形式从纬圈平均环流得到能量。在把角动量向角速度较大的纬度输送过程中，涡旋向纬圈平均运动提供动能。为了导出后一结果而把涡旋作为一种湍流形式来处理时，人们必须假设一个负的湍流粘性系数。

在实验室的旋转流体容器中产生的环流，有时具有类似大气涡旋的结构。这意味着，促使涡旋出现并具有那种结构的物理因子是在大气和实验室模型中都共有的。用数值方法得到的动力方程组的特解也揭示出具有适当结构的涡旋。这意味着，当写出一般的方程组时，最主要的物理过程都已包括进去了。

对于理想化的大气，其环流的某些特征是容易解释的。第一，必须有环流，因为没有运动的状态与单独由辐射过程所决定的向极地的温度梯度是不相容的。第二，因为摩擦消耗着环流的动能，向极地的温度梯度必须小于单独由辐射过程所决定的温度梯度。这样，才能由加热制造出有效位能。因此，向极地的气压梯度必须随高度增加以便与静力方程相一致。为了平衡这种气压梯度，西风分量必须随高度增加以便与热成风关系近似一致，否则就必须有很大的向北动量通过中层向下输送，看来没有什么机制维持后一种过程。在低层必须在某些纬度有东风和在另一些纬度有西风，要不然就完全没有系统性的东风或西风；不那样，就有一个净摩擦力矩，它会逐渐地改变地球的旋转。

满足这些要求的环流是哈德莱环流，可能要加上汤姆森或佛瑞的修改。这个环流必须具有一个直接环流圈向极地输送必要数量的能量。这个环流圈也向极地输送角动量，因此在低纬度必须有地面东风，在高纬度有地面西风。

哈德莱环流和其他任何纬圈对称环流是没有观测到的，因为它们对于大尺度小振幅的波状扰动是不稳定的。因此，所观测到的环流必然具有涡旋。这些涡旋的角动量输送大体上确定了地面东风和西风的分布。这些涡旋的结构构成大气环流显著的，但还没有能加以理论解释的特征之一。

探索这个问题的一种方法是以经典湍流理论为根据的。假设这些涡旋把角动量和能量向低角速度和低温度的纬度区输送。把这种理论用于大尺度涡旋是没有什么物理根据的，不管怎样，它总给出不正确的结果。

探索这个问题的另一种方法是以斜压不稳定性理论为根据的。假设这些大振幅涡旋与小振幅涡旋具有类似的形状,当这些小振幅涡旋叠加在纬圈平均环流上时,将最快地增长。这些结果比由经典湍流理论得出的结论稍符合实际些,但和观测结果并不完全一致,而且其物理根据不太可靠的。

实际的涡旋比湍流研究方法所提出的情况稍为匀称些,比稳定性研究方法所提出的稍不匀称些。两种研究方法都假设涡旋具有由纬圈平均环流所决定的某种类型的平衡形态。可能涡旋不能以这种方式来描述,因为当涡旋要达到任一平衡形态时,它们会产生新的纬圈平均环流,这个纬圈平均环流反过来又要求涡旋具有新的平衡形态。

对于理想化的大气,看来可以找到一组以统计特征为未知量的包括方程式和规定的不等式的闭合系统;然后由这个系统严谨地求解跨过中纬度的涡旋角动量输送的上下限。从这个解可以提出广泛的定性论证,解释这些涡旋为什么必须向极地输送角动量,以及为什么出现了象实际情况那样的信风和盛行西风。

序 言*

大气是一种流体,其环流具有非常复杂的结构。这种环流受一组规律所支配,这些规律已经被了解到相当准确的程度,并且原则上应当能够由这些规律推导出这种环流。但是,推导大气活动的问题遇到了很多尚未克服的障碍,而且我们关于大气的知识大部分是直接观测的结果。因此,随着大气观测过程的重大改进,我们对于大气的认识也有许多重大的进展。

大气环流对于不同的人意味着不同的东西。对于某些人,它是指具有全部地理详情的大气时间平均状态。对于某些人,它是指世界范围里大气的瞬时状态,它的较长的周期性振动决定着天气变化。对于某些人,它是指大气运动的一些永久的或半永久的天气特征的整体,其中包括赤道辐合带、急流、主要的半永久气旋和反气旋中心以及夏季和冬季的季风。对于某些人,它是指环流的所有定量统计特征的整体。

在我们这样篇幅的专著里,可以对环流的每一方面以一种简要的但或许是不彻底的方式加以讨论,也可以对环流的几个方面以一种比较详尽的方式予以讨论。我选择了后一种办法。因此,大部分的讨论是集中在对经度和时间取平均的流场、温度场和湿度场的性质和原因上。

不应当由此得出结论说:这些场就是我自己的“大气环流”的观点,或者说这些场一定就是大气环流最重要的方面。可能,它们已经受到理论上最大量的注意。事实上,这种重点的选择,并不是象它表面上可能有的那样受局限。无论如何不能认为长期的纬圈平均风场、温度场和湿度场是一组与其它大气特征无关的封闭的特征。事实上,现在已经愈来愈明确了,要完善地解释这些场的特征需要考虑很多——即使不是全部的话——环流的主要特征。因此,在详细地讨论某些时间的和经度的平均场时,我必须涉及到许多其它的方面。

但是,我发现为了使这本专著限制在合适的范围内,对于理应属于完全的论著的内容的某些方面,必须仅仅提到而完全不加讨论。其中有三个方面比较重要,在这里值得说上这几句话。

第一个方面是高层大气。大气环流在垂直方向与在水平方向一样,是全球性的。但是,高层现象对低层现象的影响是非常难于估计的;并且即使在25公里以上的占大气质量的百分之三的环流能够被强制以另一种形式运动,对流层环流是否会有大的变化也是不肯定的。所以,我把注意力集中于对流层和低层平流层,并以此来限制这本专著的内容。

第二,我不去详细地讨论变动区间从一般熟悉的指数循环到冰期和间冰期的大气环流振动,了解这些变化是任何合理的中期和长期天气预报方案的先决条件。研究大气环流各种振动的不同状态,可以部分地代替我们所不能进行的控制实验,并提供不少关于环

* 本文略有删节。

流运行机制的知识。

最后，我不打算详细讨论辐射，归根结底，这种过程是环流存在的根源。我感到运动场和辐射场的相互影响是如此复杂，以致于我们仅仅开始领会到它的真正重要性。经常听到说，如果仅仅是辐射场的宏观特征保持原状，则环流也将几乎保持原状。这种说法得到实验室的模拟实验的一些支持。这些实验中的加热场仅仅是大气中加热场的最粗略的近似，但这种说法仍然只是一种假说，它还需要非常仔细的研究。可能，只有那些环流的最宏观的特征才几乎保持原状。

这本专著的绝大部分内容虽然也提出一些定量的统计结果，但强调的却是环流的定性特征和理论。除了以方程式为主题的第二章外，愿意跳过数学方程的人将发现一般也还可以读得下去。完全不用方程式而全部用定性的讨论也是可能的。但是我感到，这样做并不能使这本专著最好地完成它的任务。

虽然这个工作主要是对气象界演讲的，但是我希望在其它研究领域中也有听众。因此，我用了一些篇幅讨论如地转风定义这样的气象学中的基本概念，假如仅仅是对气象工作者演讲，这些内容可以全部略去。

E. N. 洛伦茨
麻省理工学院
1967年2月

目 录

| | |
|---------------|-----|
| 译者的话 | iii |
| 摘要 | iv |
| 序言 | vii |
| 第一章 问题 | 1 |
| 第二章 动力学方程 | 9 |
| 严谨的方程组 | 9 |
| 流体静力学方程和原始方程组 | 15 |
| 涡度和散度 | 17 |
| 地转方程和地转模式 | 18 |
| β 平面 | 20 |
| 第三章 观测到的大气环流 | 22 |
| 大气环流的测量 | 22 |
| 静力平衡和地转平衡 | 24 |
| 环流的分解 | 26 |
| 长期纬圈平均环流 | 27 |
| 涡旋和瞬变运动 | 40 |
| 第四章 维持大气环流的过程 | 43 |
| 平衡要求 | 43 |
| 早期的大气环流理论 | 52 |
| 平衡要求的实现 | 68 |
| 垂直输送 | 79 |
| 输送过程的后果 | 81 |
| 第五章 大气能量学 | 85 |
| 基本能量形式及其转换 | 85 |
| 有效位能 | 89 |
| 纬圈的和涡旋的能量 | 94 |
| 第六章 大气的实验模型 | 99 |
| 圆盘实验 | 100 |
| 圆环实验 | 102 |
| 实验的含义 | 106 |
| 第七章 大气的数值模拟 | 110 |
| 大小和时间的限制 | 110 |
| 数值天气预报和第一个实验 | 113 |
| 最近的数值实验 | 115 |

| | |
|------------------|-----|
| 第八章 理论研究 | 117 |
| 动力学方程组的分析解 | 117 |
| 扰动方程组 | 120 |
| 基本气流的方程组 | 123 |
| 第九章 遗留的问题 | 125 |
| 参考文献 | 131 |
| 符号表 | 137 |

第一章 问 题

我认为整个信风的原由从没有被写过关于这个课题的任一作者所完全地说明过。

哈德莱, 1735

我们选择哈德莱的著名文章的开场白作为这本专著的开场白, 因为看来它对该课题的现状提供了适当的描述。这并不意味着没有取得巨大进展, 因为从今天的知识看来, 哈德莱的见解似乎是相当地低估了现状。但是自从那时以来出现的成千上万的优秀工作中没有任何一个工作, 对我们发现的东、西风分布作了完善的解释。

显然, 这个论述的正确性在相当大的程度上决定于所谓完善解释的本质是指什么。不能希望所有的人对这个问题都意见一致。在这里, 我们只表达这样一种意见, 那就是对定性问题的完善解答的要求和对定量问题的完善解答的要求是不同的。在详细考虑这个问题之前, 我们先介绍一下哈德莱的文章, 他的文章可以用来说明所涉及的一些问题。

在哈德莱时代之前, 偶而也有一些说明信风起因的尝试, 而其中一个把信风说成是副热带海洋上马尾藻呼出的空气, 居然也刊载在一种学术刊物上。与一般工作显着不同的是天文学家哈利(Edmund Halley, 1686年)的名著, 他把三个不同的海洋上观测到的信风作了详细的具有方法论意义的描述, 并探讨了它们的共同起因。他拒绝了早些时候认为空气仅仅是因为轻所以不能和地球表面一起逐日转动的解释。他认为赤道北侧的东北信风和赤道南侧的东南信风是由于空气有向最强加热区辐合的趋势所造成的, 而这个最强的加热区是沿着赤道运行的。他假设下午向西边太阳方向移动趋势的积累效应超过上午向东边太阳方向移动趋势的积累效应, 但其理由是不清楚的。

与哈利一致, 哈德莱得出结论说, 太阳加热的分布导致低纬度一般的上升运动和高纬度一般的下沉运动, 加上低空的向赤道运行的气流和高空向极地的气流就构成了一个环流。但是他拒绝了向太阳方向的运动会导致任何平均向东或向西运动的观点。他还指出从绝对意义来说, 地球表面在最低纬度向东运动得最快, 而且认为如果空气开始流向赤道时没有向东或向西的相对运动, 那么, 由于要保持它的绝对速度, 在到达较低纬度时就会具有相对于地球的向西运动。事实上, 他发现, 当空气向南运动了很大一段距离后所应有的向西的风速要比实际观测到的大得多。他假设地球表面的摩擦拖曳作用, 在几天里就把这种大的速度减小到实际观测到的大小——即信风。

其次他指出, 除非在其它地方有一个相反的拖曳作用来相抵消, 否则所要求的空气对地球的反拖曳作用会不断地使地球的转动减慢, 他假设这种相反的拖曳作用出现在中纬度的盛行西风带。为了解释西风带, 他认为原先在高空向北运动的空气会很快地得到向东的相对运动, 到较高纬度后因降冷下沉而变成盛行西风。

虽然哈德莱的重要的文章不足一千字, 可是以后关于这篇文章的写作却有几十万字。其中也有一些是批驳他的文章, 这是不足为奇的。有一个错误需要立即加以纠正: 即在

没有东西向的力存在的情况下,向赤道或极地运动的空气不保持其绝对速度,而保持其绝对角动量。这种保持角动量的趋势与现在叫做偏向力的东西向分量是一样的。地转偏向力的适当的表达形式应归功于十九世纪数学家科里奥利 (Coriolis)。但是哈德莱比科氏早一个世纪,因而他也许应当得到这种荣誉,因为他的观点是近于正确的。哈德莱的错误在于他把科氏力低估了一半,但是由于他的其余的论述完全是定性的,因而这些论述并没有受到他的错误的影响。

他的积极的贡献是有深远意义的。哈德莱理解到现在已相当明确的东西,即由于质量的连续性,在某层总的向赤道的运动需要在另一层有总的向极地的运动;他还理解到现在还不是显而易见的东西,即由于总角动量守恒,在某一纬度总的向西运动对于地面的拖曳,必须在某些其它纬度有总的向东运动。他的观点包含了全球环流的概念,这种全球环流的一个主要分支不能独立于其它分支而得到解释。

哈德莱说,他认为不需要考虑太阳加热的季节变化,并拒绝接受在哈利假设中起支配作用的,认为加热的日变化有重要影响的想法。他没有考虑海洋和大陆的存在,海陆不同的热容量能够破坏加热的对称性;他也没有考虑山脉和其它障碍物,这些障碍物可以使流场变形。他没有考虑水气的存在,在他那个时代,还不知道水气的热力特征。假如问他作这些简化的理由,他可以回答说所有这些影响能够在一定程度上改变气流,但是不会大到使他的论述不成立。

现代许多理论工作者却会采取另一种态度。他们所主张研究的完全不是地球大气,而是包围着一个表面水平均匀的行星由均匀成分组成的理想大气,并且这个理想化大气是由不随时间和经度改变的外热源所推动的。他们会认为地球大气只是可以想象的许多行星大气中的一个。而这些行星大气同样又只不过是许多可以想象的由热力推动的旋转流体系统的一种类型。无疑,行星大气环流的普遍理论正象地球大气环流的特殊理论一样,是理论研究的适当课题。而且,尽管不能否认一些简化常只是为了理论处理的方便而作的,但是看来,在一批可能的行星大气中,匀称配置的大气将比具有任何不匀称配置的大气占有更主要和更基本的地位。

值得注意的是哈德莱所采取的这种探索方法的基本思路为后来许多关于大气环流探索工作所采用,且不说很多其它自然现象的探索工作。他企图描述他所想象的那个最后稳定的环流是怎样从一个先前的简单环流发展出来。这个简单环流所缺少的某些具体特征的发展则是他所希望研究的。那时,他假设这种简单环流是当地球没有自转时所盛行的环流。在后来的很多研究工作中,这种简单环流就是静止状态。

哈德莱因完全不考虑科氏力的南北向分力而受到了批评,他可能不知道这种分力的存在。在任何情况下,如果在讨论中不涉及到气压,考虑这种分力是没有用的。因此,他显然假设当纬向(东西向)运动发展时,垂直运动和经向(南北向)运动是不变化的,这样,他就能比较简单地描述这种发展。事实上,一旦初始的经向运动的偏向导致纬向运动时,纬向运动的偏向就会导致附加的经向运动。由此,附加的经向运动的偏向又会导致附加的纬向运动,而附加的经向运动的辐散辐合又会导致附加的南北向气压梯度。附加的气压梯度和附加的纬向环流的偏向都会进一步导致附加的经向运动等等。这样,有理由得出结论,哈德莱在完成他的论述的过程中是会遇到困难的。事实上,很难看出这种包括两个或更多个其作用可以交替地结合和抵消的过程,并需要两三个以上的步骤的论述,如何

能够得到成功的结论,除非能够使其定量化,使每一个量的积累的变化能够记录下来。那时,这种论述就成为一步一步的数值积分。最近,这种积分已被广泛采用,并取得很好的结果,但是它们往往需要几百个步骤才能完成。

事实上,一个近代的理论家在企图用严格的定量方法复制哈德莱关于信风发展的描述时会发现,假如他以分子粘性系数来表示摩擦效应,那么需要几年时间才能使环流变成近于定常状态。如果要在几天内达到定常环流,就必须采用大得多的湍流粘性系数。只有与进一步的理想化相结合,才能证明采用这种系数是正当的。

要描述发生在某一时刻的每一阵风,或甚至每一个积云是完全不现实的,即便现有最大的数字计算机的记忆系统也不能作这种描述。所以,通常把全球尺度的环流定义为消去了雷雨尺度及更小尺度运动系统的平滑环流。而这些系统的作用又是不能不考虑的。一般假定,平滑过的环流能够描绘小尺度运动的统计特征,虽然要做到这一点,还必须建立起适当的公式。表示这种特征的最简单的方法是采用湍流粘性系数和湍流传导系数,它们比相应的分子系数大 10^5 倍,或者更大些。定性地说,这样的理想化是把大气当作一个高粘性,高热传导性的流体来处理。

显然,哈德莱在他的论述中不自觉地用了这种理想化,因为他假设信风将在几天里减弱到观测到的速度。思考这样的问题是有意义的,在一个具有高的分子粘性和热传导性,而其它方面象地球大气的理想大气里,那些引起困难的小尺度运动是否真正可以不发展。假如是的话,则这种理想化,象前面所述的理想化一样,是用一个在物理上可以想象的系统来代替地球大气。

无论如何,关于全球大气环流的广泛研究,必须既认识实际大气又认识理想大气。理想化大气是绝大部分理论研究工作的课题。但为了验证这些研究工作的结果所需要的观测必须主要限于实际的大气。由于这两种大气并不相同,因而理论和观测的某些不一致是不可避免的。

然而值得注意的是,如果把哈德莱论述中少数措辞稍加改变,当然手段上也有相当的改变。可以消除已指出的哈德莱工作中所有的缺点。哈德莱曾去寻找不随经度改变的定常状态的环流。在这个环流里必须至少有一个纬度把低空的东风带和西风带分开,在这个纬度,气流是直接指向赤道的。假如哈德莱指的是在某一时刻越过这个纬度的特定空气块,而不是所有空气都直接流向赤道或极地的初始环流,那么他由此得出的论断可以作为对于他所想象的定常环流的特征及其维持机制的一个可以接受的定性解释。

哈德莱的唯一不能通过略为改变其论述的辞句而得到纠正的错误是他的关于垂直运动的原始假定,这一点并不是显而易见的。可以证明,在一个热力推动的系统中,温度和上升运动是正相关的,但并不需要完全的或甚至于是很高的正相关。哈德莱实质上假设所有低纬度空气是上升的,所有高纬度的空气是下沉的。受了推理上的限制,从这点出发就迫使他得到了他的大气环流的图案。18世纪时还没有可用的观测资料,但从那以后资料变得足够多,这些资料证明了他的图案是不对的。但是仍有可能在某处存在着一个行星,其大气环流大体上和哈德莱的图案一致。这种环流,不管是实际的还是想象的,现在都称之为哈德莱环流。

假如这样一个行星存在的话,那么,哈德莱的工作,加上上述措辞上的改变,就不仅描述了那个环流,而且实质上也正确地说明了为什么那个环流会出现的基本原因。但这并

不是说这个想象的环流一定比某些其他类型的环流优先出现。哈德莱的工作缺少定量的考虑,而在一个定性方面相似,但在定量方面不同的行星上是有另外的可能性的,一个比较明显可能的环流型是地球上实际存在的环流型。再说,哈德莱的工作缺少数学上的严谨性。由于这个原因,我们不能把他的工作看成是一个完善的解释。

要求数学上的严谨性,并不一定需要数学符号和公式。一个纯粹文字的论述完全可能具有数学严谨性。但是,尤其是当这种论证很复杂时,不严谨的定性方法会给推理上出现错误提供了许多的机会。避免这种错误的一个最好的方法是把这个问题用数学符号来表示,并按照规定程序运算这些符号。

那么,一个充分或完全的解释包含一些什么内容?这决定于这个问题是定性地还是定量地回答。

例如,考虑这样一个问题:为什么在 20°N 平均地面风向是东偏北 15° ,速度是每秒5米(或者可以是任何其它准确的风向和速度)?风受气压场的影响,而气压场又受到温度场的影响。于是肯定地说,精确的风速决定于从太阳收到的精确的能量,且决定于表示地球及其大气特征的一些物理常数的精确数值。水气和液体水通过改变大气的热力特征也许在更大程度上通过辐射的收支场最终地影响风速。大气中水份的分布又受海陆位置的影响,当然也受运动场本身的影响。假如能够把所有有关的物理因素适当地加到支配方程中去,而这些方程又能够严谨地求解的话,那么就可以求得适当的数值。这样,所观测到的风速似乎是完全得到了解释,但是却不能期望用一个较简单的程序能得到正确的结果。

风为什么以每秒5米的速度自东偏北 15° 的方向吹来这个定量问题的正确回答,对于风为什么一般地自东方吹来这个定性的问题的回答是必须的但可能不是非常满意的。它可能并没有指出为了出现东风,以及在所包含的许多物理因子中,那些因子是必须的,和那些因子只起修正的作用。简单地说,这个定量问题的解答也许不能回答更普遍性的问题,即为什么具有地球大气的某些特征的行星大气在低纬度具有地面东风。

如果已经找到以各种物理常数来表示风速的解析表达式,则不会出现这种困难,但是气象方程组的解析解是相当少的。假如用数值方法找到了解,那么为了用于普遍的情况,就必须以不同的常数值重复若干次。这最多不过是求所需要的完全不是定量的解答的一个非常迂迴的方法。

此外,即使无关的物理因素都被消去了,所得的简化方程的严谨解也求到了,一个从头到尾读过全部论证的人对于东风为什么必然存在的问题可能仍然得不到什么物理的解释,特别是,如果这些证明是复杂的或是很长的,或是这些证明决定于一些数学定理而他又不记得了或不了解这些定理的证明时更是如此。缺乏严谨性可能引出不正确的结果,而只有严谨性却不能保证理解。象哈德莱所提出的那类论证假如是正确的话,则肯定是比较令人满意的。所以,对一个定性问题提出可以接受的答案比对一个定量问题提出可以接受的答案可能要困难得多。

关于全球环流的定量和定性问题都是经常出现的。因此,对这个问题最完全的解答应当包括能给出观测到的环流的支配方程组的严谨的定量解,以及对主要定性特征出现的基本原因的定性的和可能是文字的解释。在这种情况下,这种定性的解释不需要是严谨的,但必须是正确的,并且一定必须在每一个方面都与其相伴随的定量解一致。

从上面已经谈到的可以看出,如果不充分地考虑相伴随的气压场、温度场和湿度场,大气运动就不能得到解释;而这些场也不能独立于流场而得到解释。当然不是所有的流体系统都是这样的。例如,一个均匀不可压缩的流体的未来运动完全由现在的流场和机械外力所决定,而且这样一个系统的环流可以看成与流场是同义的。在大气的环境下,把环流看成包括流场和伴随的其余的气象变量场是比较合乎逻辑的,当然也是比较方便的。

自然会出现这样的问题,即为什么还没有对全球环流提出完全解释。正如已指出的,支配实际大气的规律非常复杂而且还没有完全为人们所了解。现在我们将试图说明为什么甚至理想化大气的环流也还没有完全得到解释。

支配理想化大气的方程看来有一个定常状态的解,这个解也是与经度无关的;这个解描述了哈德莱环流。假如能够证明所有其它特解都向这个解收敛,则确定这个环流的问题就只是寻找这个解的问题。决定各种方程组的定常状态的解,是流体动力学中比较经常碰到的问题之一。

当通解并不向哈德莱的解无限接近时,方程组可能有周期解。此外,假如能证明,除了那些向哈德莱解收敛的例外特解之外,所有特解都向这些周期解收敛,则确定环流的问题就简化为寻找这些解的问题。

但是,观测事实揭示,实际大气的活动既不是定常的,也不是周期性的。理论研究指出理想化大气也同样不是周期性的,事实上,假如把大气理想化到这种程度,即迫使它作周期性变化,那么对于现在的目的来说,它可能是被过份地理想化了。除了特殊的情况外,不可能用有限个符号去表示,甚至于近似地表示一个完全非周期性的解,因而确定理想化大气的整个生命史的目标必须放弃。

这种情况是由方程组的非线性性质所引起的。在非线性项中的是那些表示平流的项——它是由流场本身引起的流场、温度、水气或某些其它物理量场的位移。在一个粗略地表示了加热和摩擦的足够理想化的大气里,平流是唯一的非线性方程。因为导致位移的运动一般是不均匀的,每个变量场的不同部分受到不同的位移,因而整个场在移动的同时也变形了。在连续变形的情况下,场的结构很快变得与原先的结构大不相同,并具有远为细致的结构。在这种形态的无穷变化中,一种形态的所有特征不一定会都同时重复地出现,因而环流并不一定作周期性变化。

但是,非线性并不保证非周期性。互相之间没有任何相似之处的可能环流型的数目是有限的,而最后必然会出现一个同先前的某一个型特别是在宏观特征方面相当相似的环流型。假如环流型的进一步演变是稳定的,这意味着方程组的各个解之间的微小差别不会增大,则环流型将有重复其过去演变历史的趋势,而且将继续在有规则的时间间隔里重复出现,至少在外界条件是定常的理想化大气中是如此。假如不是这样,即环流的演变是不稳定的,那么过去历史的近似重复,一般只是暂时的,且不一定会发生周期性。

由于在理论上确定大气环流的全部历史是不能实现的,因此我们必须把注意力集中到目标稍低一些的问题上。其中之一是说明在环流型的长期的但只有有限型数的连续变化中的每一个型式,这实质上是长期预报问题。另一个不同的问题,即本专著所讨论的问题,是说明曾经出现过的所有环流型总体的特殊性质或统计特征。

支配环流的方程组最容易写成用大气的每个变量——风速、温度、水气含量等等——

的现行值来表示同一组变量的时间导数的形式。除非用某种刚刚发生过的或就要出现的其它环流型表示外，这个方程组并不直接说明任何特殊的环流型。就好象这些规律是为了天气预报人员的方便而创造的一样。

虽然支配方程组可能是一样的，但是确定长时期统计特征的问题，并不是天气预报问题。后者完全是一个初值问题，而前者，虽然解初值问题的方法有时是唯一易于求解的方法，但它并不预先包含任何初值。后者完全是一个解微分方程组的问题，而前者是一个考虑方程组的解的长期统计特征的问题，即一个各态历经理论 (ergodic theory) 的问题。

各态历经理论的结果甚至不能使我们确信长期统计特征的存在，因为有这样的方程组，当取平均的时间无限延伸时，它的特解的长期平均值并不向某个极限收敛。假设大气方程组并不是这种特殊的并且可能是例外的类型，那么，它的每一个特解都具有自己的长期统计特征，但是这样还不能保证不同的解具有同样的统计特征。然而，对于方程组的一大部份类型说来，只有一组其随机选择的特解有大于零的概率的统计特征。这种方程组叫做确定转移的 (transitive)。一个确定转移方程组可能还具有任何数目的具有不同统计特征的特解，但是一个随机选择的解具有这些统计特征组中的一组统计特征的概率是零。这和在一组实数中，随机选择一个数，其为某一个有理分数的概率是零的意义是相同的。例如，在一个其通解是非定常的大气中，随机选择一个特解，这个特解无限接近哈德莱解的概率是零。如果两个或更多的统计特征都具有大于零的随机选择概率，这样的方程组叫做不定转移的 (intransitive)。

各态历经理论还不能提供判断给定方程组是确定转移的或是不定转移的一般规则。因此，我们并不知道大气是否能够具有多于一种的统计特征组。看来大气不大可能真的能以和我们所观测到的形式根本不同的形式运动。但我们注意到，在为模拟大气而设计的某种实验系统中，已经证明大气是不定转移的。我们不能使大气环流停止下来再看它是否将按另一种形式发展，这对于我们理解大气是不幸的，但是或许对人类的延续是幸运的。

假设大气是确定转移的，我们就必须决定什么样的统计特征应当加以确定。没有严格的规则，但是可以把长时期的平均环流，或更确切的说，当取平均的时段趋向无穷大时的时间平均环流的极限形式看作最低的要求。无疑地，近年来这种平均环流受到了理论上最大的注意。

但是时间平均本身不一定是最有意义的统计特征。也许平均环流作为任何给定时间会出现的特殊环流的第一近似更有意义一些。例如信风是这样的恒定，以致于可以认为时间平均信风的解释与随时间变化的信风的解释是等同的。中纬度高层西风虽然比较不恒定，但仍然远远不只是一个统计的余数。

气象变量的时间平均值不能很好地表示其它经常出现的一些特征。用气象要素的时间平均值不能表示移动性气旋和反气旋的频率，甚至于不能表示它们的存在。急流表现得很微弱，而且大家熟悉的急流的弯曲大部份不出现。

所有这些特征可以用适当选择的统计特征来表示，即用所有长期统计特征的总体来表示。这个总体包括联合概率分布这样的量。当然只是由于需要无限的工作量，所以实际上不可能解释所有这些量。可以想象任何特殊的统计特征都是可以解释的，但是直到现在为止，即使是长期平均的环流也没有完全得到解释。