

吕建华. 2016. 关于《大气环流的若干基本问题》[J]. 大气科学, 40 (1): 78–85. Lu Jianhua. 2016. On “Some Fundamental Problems of the General Circulation of the Atmosphere” [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1): 78–85, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15140.

关于《大气环流的若干基本问题》

吕建华^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 佛罗里达州立大学海洋—大气预报研究中心, 美国, 塔拉哈西 32310

摘 要 本文简要回顾了《大气环流的若干基本问题》的主要内容。以书中部分内容为例, 通过和近期大气环流理论的进展相联系, 指出叶笃正和朱抱真在书中表达的主要观点, 如对大型涡旋在经圈环流中的第一性作用及其作为联系大气环流各主要成员和物理量输送中心环节的认识, 对大型涡旋涡度输送在急流形成和维持中作用的强调, 以及对大气环流成员和过程的内在统一性的认识等等, 能为后来的理论进展所证实, 或者和后来的理论互为补充。两位作者对大气环流物理本质和整体图像的深刻理解对大气环流理论的进一步发展以及理解气候变化的基本动力学依然具有现实的意义。

关键词 叶笃正 朱抱真 大气环流 大型涡旋 经圈环流

文章编号 1006-9895(2016)01-0078-08

中图分类号 P434

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15140

On “Some Fundamental Problems of the General Circulation of the Atmosphere”

LU Jianhua^{1,2}

1 *State Key Laboratory of Numerical Modelling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Center for Ocean–Atmospheric Prediction Studies, Florida State University, Tallahassee 32310, USA*

Abstract This paper revisits the seminal monograph “Some Fundamental Problems of the General Circulation of the Atmosphere” by Yeh and Chu (1958). Taking the theoretical analyses of the mean meridional circulation, the formation and maintenance of the westerly jet, and the internal consistency of the general circulation as examples, the paper analyzes the physical consistency between recent developments in these topics and the views of Yeh and Chu (1958). Some viewpoints of the book, such as the central role of large-scale eddies in mean meridional circulation, the role of eddy-induced vorticity transport in jets, and large-scale eddies as the nexus of the main components of general circulation and physical transport processes of angular momentum, heat, and kinetic energy, illustrate the far-reaching insight of Yeh and Chu on the nature and picture of the general circulation of the atmosphere as a whole. The deep insights of the monograph are still highly meaningful for furthering theoretical research on general circulation and its role in climate change.

Keywords Yeh Tu-cheng (Ye Du-zheng), Chu Pao-chen (Zhu Bao-zhen), General circulation, Large-scale eddy, Meridional circulation

收稿日期 2015-02-17; **网络预出版日期** 2015-07-07

作者简介 吕建华, 男, 1968 年出生, 博士, 主要从事大气、海洋及地球物理流体动力学研究。E-mail: jlu@coaps.fsu.edu

资助项目 国家自然科学基金项目 41275084、41576025

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41275084 and 41576025)

1 引言

二十世纪中叶，随着高空探测网络以及大气长波理论的发展，人们对大气环流的理解进一步深入。1956年 N. A. Phillips 发表了历史上第一个成功的大气环流数值试验 (Phillips, 1956)。次年叶笃正和朱抱真在北京的中国气象学会北京分会上报告了他们对大气环流基本问题认识的总结，并在1958年由科学出版社出版，也就是《大气环流的若干基本问题》(叶笃正和朱抱真, 1958)一书(简称《基本问题》)。西方同类性质的对大气环流理论的概览和总结的出现，要到近十年以后才由 E. N. Lorenz 应世界气象组织(WMO)的邀请撰写了《大气环流的性质和理论》一书(Lorenz, 1967)。

半个多世纪过去，《基本问题》一书的很多内容已经成为大气环流教材中的基本知识，而大气环流理论研究在近几十年中无论在研究内容的广度还是在理论的深度方面，都取得了长足的进展。这使得研究者们可能很少再重回头阅读这部现代大气环流理论的早期名著。但是，尽管《基本问题》一书的大多数内容已经广为人知，两位作者对大气环流理论的深刻洞见和对大气环流内在统一性的认识，并没有随着时间的流逝而失去光彩。相反地，随着观测、模式和理论的发展，有很多《基本问题》已经涉及的问题正在被国际上新一代的理论工作者重新得到重视，而新的研究也往往证实了叶笃正和朱抱真先生在书中表达观点的正确性。从这个意义上说《基本问题》一书里有很多内容是超越于作者所处的时代的。如果仅仅把书的内容当成常识和教材，那么这本书的重要意义还是被低估了的。除了《基本问题》里面的很多内容还是值得我们继续探究的前沿科学问题，两位作者在书中表达的观点，他们采用的科学方法，他们对问题物理本质的理解，他们的广阔视野，他们的理论风格，还有他们对大气环流内在统一性的探索和认识，用今天的眼光看来依然新鲜而充满活力，能够给新一代的研究者们提供理论的营养。

本文内容的安排如下：第2节简介《基本问题》的主要内容；第3~5节分别以 Hadley 环流及平均经圈环流(第3节)、急流的形成与维持(第4节)和大气环流的内在统一性(第5节)为例，分析两位作者在书中表达的观点及其和相关问题上后期、近期的理论进展之间的联系；最后第六节是总结和

讨论。

2 《基本问题》内容简介

单从《基本问题》全书目录就可以感觉到《基本问题》一书内容的丰富和全面，正如 Hoskins (Hoskins, 2014)所说的那样，“章节目录显示他当时思想的开创性和横扫六合的气概”(“the chapter headings give an idea of the broad sweep and ground-breaking nature of his ideas at this time”)。全书共分为十一章。第一章从北半球大气环流的主要观测现象出发，提出了大气环流的九个主要问题，作为全书的纲领。这九个问题是：

(1) 为什么大型的大气运动基本上维持地转风平衡？

(2) 为什么有观测到的平均东西风带及与之相联系的三个经圈环流？西风急流的成因和维持机理是什么？

(3) 西风带平均槽脊及其相联系的活动中心的形成原因是什么？

(4) 平均温度场的形成原因是什么？

(5) 大气环流的指数循环和季节突变的相关物理过程和动力、热力原因是什么？

(6) 大气环流的(角)动量平衡机制是什么？

(7) 大气环流的动能平衡是如何维持的？

(8) 大气环流的热量平衡是如何维持的？

(9) 大气水分循环和大气环流的内在联系是如何的？

两位作者指出以上问题又可以归结为两个方面：一是为什么大气环流具有人们所观测到的平均状态；另一方面是从已有的状态出发，讨论大气环流的内在统一，说明已有状态的维持。后面第二到第十章分别对各个问题介绍当时最新的研究，其中相当部分是当时由叶笃正和顾震潮等领导的中国科学家的工作。在此基础上，根据两位作者对大气环流的理解对这些研究作了深入的剖析和述评，并提出作者对以上各个问题的理论解释。最后的第十一章除了对各章的总结，作者更进一步地从大气环流的内在统一性将前面各章的内容有机地联系起来，给出了两位作者对大气环流的整体图像。

在对各单个问题作具体分析的各章中，都有很多现在读来依然富有新意的理论创见。比如在第三章对准地转平衡的分析中，已经提到了地转适应过程对尺度的依赖性并给出了物理解释，叶笃正对地

转适应的进一步研究后来出现在他和李麦村发表的专著《大气运动的适应问题》(叶笃正和李麦村, 1965)。在对西风带平均槽脊形成(第五章)的分析, 除了介绍 Bolin 的线性微扰动理论(Bolin, 1950), 更介绍了巢纪平的有限振幅扰动理论(巢纪平, 1957), 以及国外学者的旋转流体实验等等。更重要的是, 他们强调了两位作者——包括两位作者和顾震潮——首先提出的地形和热力的共同和相互作用。以朱抱真(1957)为例, 作者令人信服地指出单纯的地形或者热力强迫都不能解释冬季东亚和北美大槽的位置, 而必须将两者结合起来才能有效地说明。同样的结论, 但是基于完整的大气环流模式的模拟的结果, 我们还能在最近的由年轻一代理论家发表的文章中看到(如 Kaspi and Schneider, 2011)。在对角动量平衡的分析中, 两位作者在书中给出了北半球地形对角动量平衡影响(即山脉力矩)及其季节变化的计算结果。Lorenz(1967)后来在他的专著中讨论角动量平衡时采用了他们的结果。更有意思的是, 两位作者总结了叶笃正和杨大升(1955)的研究, 指出通过引入经圈 Hadley 的东西风界面, 可以清楚看到经圈环流对角动量的输送以及地球自转角动量和相对角动量之间的转换。

《基本问题》中类似的精彩之处很多, 但对全书逐章的总结和介绍在本文篇幅和范围所及之外, 事实上这样做也没有必要, 因为有兴趣的读者可以直接阅读原著。下面仅对书中关于 Hadley 环流和平均经圈环流、急流的形成和维持以及大气环流的内在统一性作分析。除了介绍原著的相关内容以外, 我还将书中表达的观点和近期理论上的进展联系起来。从这样的对比和联系中, 我们或能更深地体会到《基本问题》和两位作者在那个时代已经达到的理论高度和现实的意义。

3 关于 Hadley 环流和平均经圈环流

《基本问题》提到, Hadley 于 1735 年首次推测在低纬度的子午面上应该有一闭合的经圈环流存在, 也即我们现在所称的 Hadley 环流。由于空气运动基本上符合地转风关系, 经向风速(v)的纬圈平均必接近于零, 因而经圈环流即使存在, 强度也必定很弱。也因此 Hadley 环流的存在与作用, 即使在 1940 年代的芝加哥大学也依然是被争论的问题(Palmen 和 Starr 之间的争论, 可见 Lewis et al.,

2012)。真正意义上从观测中首次证实 Hadley 环流的存在是 1950 年由 Riehl 和叶笃正等通过对有限的海上观测记录的分析得到的(Riehl et al., 1950)。在叶笃正先生归国以后, 他和邓根云根据 1950 年高空风的统计, 给出了该年冬夏两季北半球经圈环流的情况(见《基本问题》图 1.17、1.18), 进一步证实了 Hadley 环流和三圈平均经圈环流的实际存在。

在第四章两位作者深入分析了平均经圈环流的生成机制。和单独讨论平均经圈环流不同, 作者认为东西风带(纬向环流)和经圈环流是同时形成的现象: 两者是在对大气不均匀加热作用下通过大型涡旋对动量和热量输送作用造成的结果(见书中第 32 页)。通过对 Kuo(1951)提出的平均经圈环流理论模式的分析, 两位作者指出 Kuo(1951)对来自热量源汇非均匀性的贡献的估计偏小, 实际上热量源汇和动量源汇的不均匀分布同时对平均经向环流的形成起了重要作用, 它们的贡献是同量级的。值得指出的是, 《基本问题》在讨论平均经圈环流生成机制时, 明确提出了大型涡旋的重要作用, 指出“将大型涡旋作为控制经圈环流的第一性的因子, 而将经圈环流作为其从属的第二性的现象”(见书中第 53 页)。同时作者又指出, 经圈环流的环数和大型涡旋的尺度之间有内在的统一。应该说, 《基本问题》的上述提法是非常有前瞻性的, 因为在书的作者看来, 大型涡旋的第一性作用并不只限于非热力直接的逆环流(Ferrel 环流), 而是对整个平均经圈环流而言的, 即也包括了对热带的 Hadley 环流的作用。虽然限于当时的条件, 两位作者的上述结论仅是定性的, 但近期的研究表明大型涡旋对热带 Hadley 环流的结构和强度确实起着重要作用(如 Schneider, 2006), 这和《基本问题》在六十年前提出的看法是相一致的。

4 关于急流的形成和维持

4.1 《基本问题》对急流形成机制的讨论

急流广泛地存在于地球流体(大气、海洋)和行星大气中, 其形成和维持机制迄今是理论界关注的热点问题(如 Rhines, 1994; Dritschel and McIntyre, 2008)。《基本问题》在第四章对急流的形成和维持机制作了深入分析。有意思的是, 书中所表达的观点不但和现在理论界对急流形成和维持的广被接受的理论是互补和完全兼容的, 更和最新的观测事实相一致。这些最新的观测事实被认为和现今的理

论是相矛盾的，却和《基本问题》书中所强调的机制一致。这也从一个侧面说明了两位作者对急流问题理解的深刻程度。

在讨论西风急流的形成机制时，《基本问题》作者首先介绍、评述了 Rossby 提出的水平大型涡旋混合理论 (Rossby, 1947)。两位作者写道：“考虑了大气水平尺度与垂直尺度的比值后，可以认为大气运动主要是水平运动，因此我们可以把大气环流看作大规模水平湍流的统计结果。然而湍流的最终结果是使得‘性质均匀化’，由此 Rossby 认为在大型涡旋的交换作用中具有反气旋涡度的暖空气北上，具有气旋涡度的冷空气北下”（见书中第 53 页）。混合使绝对涡度在南北方向成为定值，据此可计算平均流场的分布情况。在给出 Rossby (1947) 的理论计算结果后，作者指出虽然 Rossby (1947) 的结果和观测极为相似，但他是以实际观测到的极地东风带与西风带交界面作为一个参数给定，而该纬度本应该由混合前后总角动量不变的条件下给出。Rossby 理论面临的更基本问题是和环流加速定理不合，因为纯粹的混合作用不能使混合区域的总涡度有所增加，按照环流定理则平均西风风速也不能增加。作者进一步指出，任何一个区域内，涡度的增减必定通过某种边界作用，因此推论大型涡旋的交换作用不能只限于急流以北的区域。

《基本问题》紧接着用涡度的平衡来讨论西风急流的维持，指出可以用大型涡旋输送理论来解释急流的形成机制。两位作者引述了郭晓岚的理论模式 (Kuo, 1951)，“假定涡旋只是一块具有涡度为一定数量和一定分布的流体，基本气流是纯粹的纬向环流 $U(y)$ 与时间和经度无关。在基本气流上加以微扰动，将线性化的涡度方程加以全微分，沿两个纬度所夹的面积 (F) 积分，并假定在过程中总角动量不变，跨过任意纬圈上的质量输送净值为零”，最后得到

$$\rho_0 \Gamma \frac{\delta v'}{\delta t} F = \int_F \rho_0 \cos \varphi \zeta' \frac{\delta v'}{\delta t} dF = \int_F \rho_0 \cos \varphi v'^2 \frac{\partial Z_0}{a \partial \varphi} dF + \int_F \cos \varphi Z_0 v' \nabla \cdot (\rho_0 \vec{V}') dF, \quad (1)$$

其中， Γ 为涡旋面积 (A) 内的扰动环流， $\delta v' / \delta t$ 为扰动经向加速度， Z_0 为平均涡度， ρ_0 为空气密度， ζ' 为扰动相对涡度， a 为地球半径， φ 为纬度。由

于上式中右边第二项（辐散项）比第一项小一个量级，上式说明“绝对涡度分布的不均匀性使气旋性涡旋 ($\Gamma > 0$) 向绝对涡度高值区移动，使反气旋性涡旋 ($\Gamma < 0$) 向绝对涡度低值区移动，因此涡旋的输送是可以和 Z_0 的梯度相反”（也即是逆梯度输送）。两位作者进一步指出，大气中绝对涡度 Z_0 的分布是向北增加的，若有气旋性涡度向北输送和反气旋涡度的向南输送，则总的输送结果是在涡旋活动频繁的区域涡度梯度增加，在以外的区域涡度梯度减少。相对应地，涡度集中的区域西风加强，而在涡度减少的区域东风发展。这可见于 Kuo (1951) 得到的公式 (Kuo, 1951)：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho u d\lambda dz \approx \frac{1}{g} \int_0^{p_0} \int_0^{2\pi} v \zeta d\lambda dp - 2\pi F_x, \quad (2)$$

也即西风的加强与气旋性涡度向北输送及摩擦消耗有关。上式中， ρ 为空气密度， u 、 v 、 ζ 分别为纬向、经向风速及相对涡度， λ 、 z 、 p 分别为经度、高度和气压， p_0 为地面气压， F_x 为地面摩擦。《基本问题》进一步分析了扰动的稳定性对西风急流的影响，指出处于衰减阶段（或稳定的）扰动使绝对涡度梯度增加，从而使西风增强，而不稳定扰动则使西风减弱。

4.2 和后期关于急流形成维持机制的理论的比较和联系

最近的对大气和其他旋转流体中急流的形成和维持机制可以参照 Dritschel and McIntyre (2008) 和 Held (2000) ^①。这里简单分析《基本问题》和这些近期观点的相补性和物理上的一致性。

《基本问题》对 Rossby 大型涡旋混合机制的批评是完全正确的，因为西风急流的生成与其说是涡旋混合的结果，不如说是涡旋混合遇到障碍 (barrier)，从而形成涡度分布的阶梯 (staircase) 状结构的结果。在这样的涡度分布的阶梯结构附近，涡度梯度得到集中，从而西风得到加强而形成急流 (McIntyre, 1982; Dritschel and McIntyre, 2008)。从这一点看，《基本问题》所表达的观点和 Dritschel and McIntyre (2008) 在物理上有着一致性的。

另一方面，《基本问题》书中所强调的涡度逆梯度输送，即反气旋性涡度向南输送而气旋性涡度向北输送，似乎又和 Dritschel and McIntyre (2008)

^① Held I M. 2000. The general circulation of the atmosphere. [http://physics.ucsd.edu/students/courses/winter2013/physics218b/HeldReview\[1\].pdf](http://physics.ucsd.edu/students/courses/winter2013/physics218b/HeldReview[1].pdf) [2015-08-04].

及 Held (2000) 的观点不同, 因为后者主要着眼于涡度的顺梯度输送, 也就是气旋性涡度从高纬度向南输送, 在减弱高纬度西风的同时, 增强较低纬度上的西风。同时观测事实也确实显示在平流层和对流层中上部是以气旋性涡度的向南的顺梯度输送为主。这样看起来似乎《基本问题》是和观测或新的理论观点是相矛盾的。

但这一矛盾仅是表面的, 只是由于《基本问题》所采取的角度和现在的角度不同而引起, 在物理本质两者是完全一致的。至于和观测事实的矛盾, 有新的研究刚刚注意到存在和《基本问题》观点相一致的观测事实, 从而引起了理论界对涡度顺梯度输送机制的反思, 而这反过来说明《基本问题》两位作者和 Kuo (1951) 观点的合理性和超前性。这里试作进一步分析。

(1) 首先, 正如书中 54~55 页所指出的那样, 《基本问题》在讨论急流生成机制时主要着眼于西风急流南侧(为副热带反气旋涡度)及急流北侧(为气旋性涡度)与狭窄的急流轴之间的涡度输送。如果单纯地从观测到的对流层中高层和平流层中涡度的顺梯度输送出发, 那么按照 Held (2000) 的理论分析, 我们很容易得到, 气旋性涡度的向南输送必然导致极区西风的减速和极区以外较低纬度西风的加速。但这本身并不能保证西风在一个相对狭窄的纬度范围内加强, 因为涡度的顺梯度向南输送可以递推式向南扩展, 从而使涡度的集中发生在一个很宽的纬度范围内。这样的话, 尽管西风可能加强, 但其范围会很宽同时强度很弱。不妨依照 Held (2000) 的讨论, 假如沿纬圈 φ_0 由于涡旋的“搅动”作用, 原来沿纬圈平行的涡线发生扭曲变形, 在此过程中涡度向南输送, 这样极区 (φ_0 以北) 纬度上西风减速, 而较低纬度 (φ_0 以南) 上西风加强。如果沿一比 φ_0 更南的纬度 φ_1 上涡旋“搅动”作用引起的涡度输送和 φ_0 相同, 那么在 φ_0 和 φ_1 之间净的涡度输送为零, 因此西风加速并没有发生在 φ_0 和 φ_1 之间, 而必须在比 φ_1 更南的纬度。相反地如果在 φ_1 涡旋的“搅动”作用减弱(比如对应于涡旋的减弱阶段, 或者是等(位)涡线向该纬圈回归的过程), 这时穿越 φ_1 纬圈有向北(即逆梯度)的涡度输送, 这样 φ_0 和 φ_1 之间就会有涡度的集中, 从而有西风的加速和急流的生成。而这在纬圈 φ_0 和 φ_1 之间 (Kuo (1951) 理论, 见式 (1) 中的积分范围 F) 正是《基本问题》在讨论急流生成机制和涡度

平衡时所着眼的范围。从上面的分析可以看到, 单纯的涡度顺梯度输送对急流的生成和维持并不是比较完整的解释, 《基本问题》和郭晓岚的理论分析 (Kuo, 1951) 提供了一个与之相补充的角度。结合两者, 能够为急流的生成和维持提供更完整的解释。但两者的物理本质又是一致的, 即涡度的输送和相对集中, 这可以清楚地从他们几乎完全一致的语言表达看出来。《基本问题》指出“在涡旋活动频繁的区域涡度梯度增加, 使得西风加强”, 而 Held (2000) 则说: “角动量向搅动区域辐合 (Angular momentum converges into the stirred region)”及“西风出现在搅动区域的下面 (westerlies appear under the stirred region)”。注意 Held 所说的“搅动区域 (stirred region)”正是《基本问题》所说的“涡旋活动频繁的区域”。

(2) 前面已经提到观测中对流层中上部和平流层的涡度输送以顺梯度输送(即气旋性涡度向南输送)为主, 那么《基本问题》所表达的观点是不是就和观测相矛盾, 因而是错误的呢? 答案是否定的, 最新发现的事实说明《基本问题》的观点是在观测中得到证实的。首先应该注意到, 《基本问题》在讨论急流生成机制时主要是主要于正压的(或垂直积分的)涡度输送, 比实际的三维斜压大气要简单。但物理本质是一致的, 因为对斜压大气中的位涡输送沿整个(或者部分)气柱的垂直积分, 就得到《基本问题》里所分析的涡度输送。涡度(位涡)在对流层上部的逆梯度输送在 1998 年由 Bartels et al. (1998) 在模式中发现, 但到近期才进一步由 Birner et al. (2013) 在再分析资料和模式中证实在对流层顶副热带急流轴以北有向北的逆梯度涡度输送。同时 Birner et al. (2013) 也发现逆梯度的涡度输送是和波(涡旋)的衰减相联系的。而这两点, 即涡度的逆梯度输送和涡旋的衰减(稳定)正是《基本问题》和 Kuo (1951) 所强调的急流生成机制的要点所在。这不单证实了《基本问题》观点的正确性, 也从一个侧面说明了两位作者和 Kuo (1951) 对急流生成理论认识的时代超越性。

另外对平均急流的维持, 如果我们在 (2) 式中令左侧时间倾向项趋于零, 那么由于西风急流区地面也为西风, 所以和摩擦相平衡必定要求垂直积分的涡度输送是向北(逆梯度的)。如果像在大多数情况下那样, 对流层中上层和平流层的涡度输送垂直积分为负(即有向南顺梯度的涡度输送), 那

么从(2)式可以推论必定有对流层低层和近地层向北的涡度输送。而这正是我们所观测到的现象(如 Bartels et al., 1998; Held, 2000)。这进一步说明《基本问题》所阐述的理论是和观测相符合,而不是矛盾的。

综上所述,《基本问题》对急流生成和维持机制的观点从观测上看是站得住脚的,和最近提出的机制具有互补性。同时由于和《基本问题》相一致的观测事实直到最近 1~2 年才被注意到,也说明了《基本问题》在对急流问题认识的时代超越性。

5 关于大气环流的内在统一性

《基本问题》在对上文提到的九大问题从第二十章分别作了深入的分析 and 讨论之后,两位作者进一步在第十一章中试图将上述各个方面的问题联系起来,探讨大气环流的内在统一性。在《基本问题》作者看来,这种内在统一性一方面体现在大气环流中各主要成员的相互关系中,另一方面又体现在大气环流中主要物理量平衡过程的相互关系中。

正如《基本问题》前面几章所讨论的,大气环流主要成员主要包括气候风带(平均纬圈环流)、急流、平均的经圈环流、移动的(瞬变)大型涡旋以及西风带的平均槽脊等。在所有这些大气环流的主要成员中,两位作者突出强调了大型扰动(涡旋)的第一性作用,指出由于大型涡旋的活动对动量、热量、涡度等物理量起再分配的作用,因而把东西风带、经圈环流和急流等联系起来。

大型涡旋的作用首先体现在平均经圈环流的形成。作者指出正是由于大型涡旋引起的热量和角动量的水平和垂直输送,再加上不均匀的非绝热加热的共同作用下,才形成观测到的三环经圈环流,并在地球自转作用下必然产生东西风带(平均纬圈环流)。而后者又通过摩擦和大型涡旋对动量的输送反过来对经圈环流发生作用。同时大型涡旋通过对角动量和涡度的输送对西风急流的形成起到了关键的作用。

另一方面,作者又指出大型涡旋并不是孤立存在,反过来也受基本风系的影响。比如作者提到西风强度决定涡旋的尺度和移动速度,西风的水平和垂直切变决定基本气流的稳定性从而扰动的发展或者衰减。因此“大型涡旋和基本风系在大气环流中也是内在的统一,它们相互制约,相互影响”(见

《基本问题》第 128 页)。

大气环流的内在统一还表现在海陆不均匀性引起的热力和大地形的动力扰动对平均槽脊发生的作用,而后者又反过来影响大气热源汇的分布,并使地形产生不同的作用。另外的例子是通过大型涡旋对温度场的形成以及温度平流和对流作用对温度场的形成指出了温度场和气流场之间的相互作用关系。作者进一步提到了大气环流基本风系的尺度与大型扰动的尺度也是内在统一的。比如经圈环流的数目和大型涡旋的南北尺度,以及西风急流的尺度和涡旋尺度的关联。

总之,作者明确指出,“大气环流的基本成员——经圈环流、东西风带、西风急流、大型涡旋、平均槽脊和平均温度场都是相互制约的内在统一体。而在这种内在统一的过程中长波不稳定所生成的大型涡旋成为中心环节,联系着各个方面”(《基本问题》第 129 页)。

《基本问题》在书的第八到十章分别讨论了大气环流中主要物理量包括角动量、动能、热量和水分的平衡。在最后一章,作者更进一步揭示了这些主要物理量平衡过程的相互联系,认为这是大气环流内在统一性的另一方面。

作者在给出各个物理量的数学表达式时,指出无论对热量、角动量或能量来说,低纬度都是源,即有从低纬度向高纬度的输送。接着作者分析了不同物理量输送机制的联系。指出热量的向北和向上输送是通过不稳定波的结构和条件所决定的,也就是必须有 $\overline{wT} > 0$ 和 $\overline{vT} > 0$ (T 为温度, v 和 w 分别为经向和垂直速度)。作者更分析了为什么热量的输送主要地集中在对流层低层,指出总热量向北输送率的迅速向上递减也是大气环流内在统一的结果。

作者又指出通过 T 和 w 的正相关,随着热量的向上输送,位能也转成了动能。而不稳定扰动则把角动量的向北输送和热量输送过程联系起来,大型涡旋通过对热量的输送 ($\overline{\rho v'T'}$) 把基本气流的有效位能转成扰动动能,后者又通过大型涡旋对角动量的输送 ($\overline{\rho u'v'}$) 转成基本气流的动能,这样大气角动量和热量的平衡过程中也完成了大气环流动能的平衡过程。有意思的是,《基本问题》甚至注意到了角动量向北输送在高空最大和热量向北输送在低空最大可能存在着联系,指出这正是大气环流内在统一性的又一个表现。

和大气环流主要成员的内在统一一样,作者指出“大气斜压不稳定造成的大型扰动是它们(各种物理平衡过程)相互联系、相互制约的一个重要的中心环节,它将各种基本成员和各种主要物理量平衡过程有机地联系起来、贯串起来,成为大气环流的内在统一”(《基本问题》第 133 页)。

由于在《基本问题》所处的时代,对大气环流的定量计算刚刚才成为可能,所以两位作者对大气环流内在统一性的讨论很大程度上还是定性的。但是如果从最近几十年大气环流理论,尤其是波流相互作用理论的进展看,我们很容易看到两位作者当时提出的观点在物理上和后来的理论进展是非常一致的。比如《基本问题》对涡旋引起的角动量输送、热量输送和基本气流的维持联系起来。我们现在知道在上面提到的 $(\overline{\rho v' T'})$ 和 $(\overline{\rho u' v'})$ 合在一起即是现在已为大家所熟知的,但正式的定义要在《基本问题》出版三年后才出现的 Eliassen-Palm (E-P) 通量(Eliassen and Palm, 1961)。而 E-P 通量的散度就是涡旋对位涡的向北输送,对平均纬向气流,包括急流的维持起着重要的作用。这显然和两位作者在关于大气环流内在统一性所提到的相一致。又比如两位作者对涡旋尺度和基本气流尺度的讨论,在物理上也和后来提出的理论相一致,而定量的涡旋尺度和基本气流(急流)之间的关系至今还被继续研究着(Dritschel and McIntyre, 2008)。

6 总结和讨论

本文简介了叶笃正和朱抱真著于 1958 年的《大气环流的若干基本问题》一书。通过对书中部分章节,包括 Hadley 环流和平均经圈环流,急流的生成和维持,以及大气环流的内在统一性的介绍和分析,指出《基本问题》一书有很多观点超越当时所处的科学发展阶段。通过和最新的相关理论进展的比较,指出《基本问题》书中的很多观点不单从物理本质上和新的研究进展相一致,并能够从后来随着观测、理论和模拟的进一步发展而得到证实。更重要的是,本文以对急流生成和维持的分析为例,指出《基本问题》书中有的理论分析能和最近的观点互相补充,从而给我们对相关问题的理解提供一个更完整的物理图像。从这个意义上说,《基本问题》并不只是一部代表过去时代成就的著作,而更是一部依然富有理论活力和现实意义的对大气环

流理论的总结,从而年轻一代的理论工作者仍然可以从《基本问题》汲取理论营养。

《基本问题》一书具有鲜明的理论风格。简单地说,这些风格体现在数学的简约和物理图像的清晰之间的统一,体现在作者从局部特殊现象中寻找普遍性规律的高超能力,更体现在作者从大气环流的复杂多面性背后寻求内在统一性的理论穿透力。

《基本问题》的理论风格可以通过和 Lorenz (1967) 的《大气环流的性质和理论》一书对比而显得更为清晰,因为后者也是一部带有作者个人鲜明风格的名著。除了两书对基本现象理解的相通之处,Lorenz (1967) 在书中是从数学和理论本身出发,更偏向于演绎式地对各个具体问题作深入的分析,而尽量避免对大气环流整体图像的描述。从 Lorenz 书的第一章中,我们甚至能够感受到他对比较确定性地了解大气环流本质的深刻怀疑。这种怀疑可能来自 Lorenz 作为有一个具有很高物理修养的数学家的严谨,以及对他在写这本书之前不久发现的大气运动混沌本质的认识(Lorenz, 1963)。而《基本问题》一书是从观测到的现象出发,归纳出若干基本问题。除了对大气环流各个具体问题的分析,《基本问题》更致力于寻找现象背后的内在统一性。通读全书,无论从内容的广度或深度,我们不难感受到两位作者对比较彻底地理解大气环流整体性质的乐观态度。这种乐观或许更反映了两位作者作为具有深厚数学修养的动力学家对尚处于萌芽的大气环流理论研究的物理直觉。

从大气环流理论近几十年的发展来看,可以看到《基本问题》两位作者的乐观态度并不是没有根据的。他们在书中提出的问题和很多看法在以后的几十年中能得到验证或进一步的发展,这在很大程度上是通过观测手段和计算技术的突飞猛进式的发展。

在全书的最后,对未来的展望中,两位作者指出《基本问题》有很多问题没有涉及,比如南半球环流,热带环流及其与中高纬环流的关系,平流层环流及其与对流层环流的关系等等,这些我们在今天也已看到长足的进步。两位作者尤其提到了当时的理论认识还很初步,比如对不稳定扰动的理解仅是基于线性化的结果。而从今天的眼光来看,尽管模式分辨率和过程的描述以及观测的手段都越来越精细,但由于非线性引起的大气环流内在的随机性和不确定性依然是我们必须面临的挑战,从这意

义上说对大气环流内在统一性的进一步理解，结合 Lorenz 的审慎态度和叶笃正及朱抱真先生的乐观是有益的，尤其是当把大气环流理论放到气候在各个尺度上的变化和变率中的时候。因为从本质上包括大气和海洋环流在内的气候系统是既有确定性因素，又具随机性和混沌性的系统。

《基本问题》成书时大气环流的数值模拟刚刚开始，因此两位作者指出此书只是对当时研究的总结，在研究的深度和广度离问题的解决还很远，并寄希望于数值动力方法和新观测手段的发展为“大气环流的研究展开无比广阔深远的道路”（《基本问题》第 134 页）。这也正是过去半个多世纪大气环流研究所走过的道路，同时我们也看到两位作者所提出的问题到现在还不能说完全解决了。通过和气候变化问题相联系，《基本问题》一书所提出的问题以及他们提出的大气环流内在统一性增加了一个新的维度，也就是这些大气环流的基本成员、过程及其内在统一性会随气候变化而作什么样的变化，以及它们在气候变化又起什么作用等等。这些正是现在方兴未艾、广受关注的问题，比如说 Hadley 环流随着全球变暖是否变宽、变强，急流和西风强度随气候变化又会如何变化，水分循环和大气能量循环又会有什么样的变化，都和《基本问题》一书中提到的问题有着直接的联系。在这样的时刻，重读《基本问题》不只是为了记住两位作者的历史贡献，更重要的是学习他们的远见和方法，从中汲取理论营养，解决新的关于大气环流的科学问题。

参考文献 (References)

Bartels J, Peters D, Schmitz G. 1998. Climatological Ertel's potential-vorticity flux and mean meridional circulation in the extratropical troposphere-lower stratosphere [J]. *Ann. Geophys.*, 16 (2): 250-265.

Birner T, Thompson D W J, Shepherd T G. 2013. Up-gradient eddy fluxes of potential vorticity near the subtropical jet [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40 (22): 5988-5993.

Bolin B. 1950. On the influence of the earth's orography on the general character of the westerlies [J]. *Tellus*, 2 (3): 184-195.

巢纪平. 1957. 斜压西风带中大地形有限扰动的动力学 [J]. *气象学报*, 28 (4): 303-314. Chao Jiping. 1957. On the dynamics of orographically produced finite perturbations in a baroclinic westerlies [J].

Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 28 (4): 303-314.

Dritschel D G, McIntyre M E. 2008. Multiple jets as PV staircases: The Phillips effect and the resilience of eddy-transport barriers [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65 (3): 855-874.

Eliassen A, Palm E. 1961. On the transfer of energy in stationary mountain waves [J]. *Geophys. Publ.*, 22: 1-23.

Hoskins B. 2014. Obituary: Professor Duzheng Ye (1916-2013) [J]. *Weather*, 69 (3): 82-83, doi:10.1002/wea.2281.

Kaspi Y, Schneider T. 2011. Winter cold of eastern continental boundaries induced by warm ocean waters [J]. *Nature*, 471 (7340): 621-624.

Kuo H L. 1951. Vorticity transfer as related to the development of the general circulation [J]. *J. Meteor.*, 8 (5): 307-315.

Lewis J M, Fearon M G, Klieforth H E. 2012. Herbert Riehl: Intrepid and enigmatic scholar [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93 (7): 963-985.

Lorenz E N. 1963. Deterministic nonperiodic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 20 (2): 130-141.

Lorenz E N. 1967. *The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere* [M]. Geneva: World Meteorological Organization, 161pp.

McIntyre M E. 1982. How well do we understand the dynamics of stratospheric warmings? [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60: 37-65.

Phillips N A. 1956. The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 82 (352): 123-164.

Rhines P B. 1994. Jets [J]. *Chaos*, 4 (2): 313-339.

Riehl H, Yeh T C, Sutcliffe R C. 1950. The intensity of the net meridional circulation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 76 (328): 182-188.

Rossby C G. 1947. On the distribution of angular velocity in gaseous envelopes under the influence of large scale horizontal mixing processes [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 28: 53-68.

Schneider T. 2006. The general circulation of the atmosphere [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34: 655-688.

叶笃正, 杨大升. 1955. 北半球大气中角动量的年变化和它的输送机构 [J]. *气象学报*, 26 (4): 281-294. Yeh Tucheng, Yang Dasheng. 1955. The annual variation of the atmospheric angular momentum of Northern Hemisphere and the mechanism of its transfer [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 26 (4): 281-294.

叶笃正, 朱抱真. 1958. 大气环流的若干基本问题 [M]. 北京: 科学出版社, 159pp. Yeh Tu-cheng, Chu Pao-chen. 1958. *Some Fundamental Problems of the General Circulation of the Atmosphere* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 159pp.

叶笃正, 李麦村. 1965. 大气运动中的适应问题 [M]. 北京: 科学出版社, 126pp. Yeh Tu-cheng, Li Mai-tsun. 1965. *On the Adaptation of the Atmospheric Motion* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 126pp.

朱抱真. 1957. 大尺度热源、热汇和地形对西风带的常定扰动 (二) [J]. *气象学报*, 28 (3): 198-224. Chu Paochen. 1957. The steady state perturbations of the westerlies by the large-scale heat sources and sinks and earth's orography (II) [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 28 (3): 198-224.