

月平均气候的动力学*

G. J. Shutts

(英国气象局, Bracknell)

摘要 外行有充分理由问,“为什么中纬地带盛行西风?”或者问,“为什么主要干旱区出现在 30°N (或 30°S)附近?”面对这样的问题,气候学家们该如何回答呢?是不是说原因无法解释?本文就这个问题的主要物理过程及制约条件作了论证,并且采取一些合理的简化,探索了关于纬圈平均环流的“包络背(back-of-the-envelope)理论”,讨论了大尺度天气系统的向极动量输送对地面风场形成及潜热能释放所起的重要作用。

1. 引 论

一个月,被认为是用于局地气候(在空间上)具有意义的最小时段。毋庸置疑,这种选择是为了能把若干个斜压波的生命周期(生命周期尺度 ≈ 7 天)平均进去。人们想从理论上解释所有主要的、时间平均的天气特征,诸如,冬季的冰岛低压、西伯利亚高压、夏季的亚速尔高压、印度季风及主要风暴轴的位置。取得了确定这些现象的强度和位置的主要动力因子的物理学理解,就有可能预报其年际变化。用这种方法设计的理想化的理论模式,对于能被推导并释用的诊断量,如 Q -矢量,提供了动力学框架(Hoskins等人,1978),然而,这是个非常大胆的目标。还用传统方法试图解释纬圈平均气候特征(即三环经向平均环流)及其与热量和动量平衡条件的关系。由于纬圈平均的气候场能代表全球的大多数实际变化,所以对决定气候场的根本机制有一个动力学协调一致的图象是重要的。

本文第2节对全球热能平衡的一些显著特征进行了考察,并对涉及向极热量输送的各种假说及实测的经向温度梯度做了评述;第3节着重讨论了向极动量输送的作用,并涉及到地面气压、风和降水的纬向平均分布;第4节对涡度传输过程如何确定对流层

的纬圈平均态做了概括。

2. 热量传输

垂直气柱中净加热的经向不平衡(贯穿整个大气,延伸到地面/海洋)基本取决于受几何学控制的日射变化,及射出红外辐射随纬度有弱的改变。后者至少部分地被认为在红外辐射三原子分子中水汽占有优势,而水汽的最主要光学黑体部分出现在由冻结和降水所确定的温度($\approx -18^{\circ}\text{C}$)。在热带,过多的、大量的热能并不立即发生作用。因为广大地区的太阳辐射,首先被海洋上层数米深的海水吸收,然后,主要是由于蒸发借助信风输送给大气。最后,在深厚的热带对流上升运动中,通过凝结转换成感热和重力位势能。这种潜热释放的加热效应由于对流传到远离热带地区,这种对流由与惯性重力波特别是开尔文波和Rossby重力波波型(Gill, 1982)有关的强迫下沉运动所造成。

热能是通过大家熟知的天气图上发展成成熟的斜压天气系统和准静止行星波系统,从副热带传输出去的(Shutts, 1987)。这种大尺度斜对流形式(Green, 1979)向极和向上输送热量,以平衡高纬地带辐射的减弱。

* 这是英国气象局1986年9月15日—10月3日举办的题为“气象学的动力过程”高级讲座中一系列学术报告中的一个。

在秋冬季节,中纬地带的海洋能将夏季储存起来的大量热能,以“爆发性气旋”生成的形式组织和释放出来,为低压系统提供可观的潜热能。

气候学家们非常喜爱的简单的纬圈平均气候模式,需要给以固定的或参数化了的热源、热汇以决定对流层的厚度-平均温度。根据这种温度分布,假若提出了某些关于地面风的假设——如无风的情况下对引用热成风方程能够找到一个协调一致的风场。在这种模式中,向极的热输送,经常是用非线性扩散规律表示,这里的涡旋扩散或传输系数是向极方向温度梯度的函数。实际上,Green对以下形式的热量传输定律,给予了理论上和观测上的支持:

$$\overline{v\phi} = 5.5 \times 10^{-3} \left(\frac{g}{B} \right)^{1/2} \Delta\phi^2 \text{ms}^{-1}$$

这里,横杠表示纬向的、高度的和时间上的平均。 v 为经向风速, g 为重力加速度, B 为平均静力稳定度, ϕ 是位温的对数, $\Delta\phi$ 为 ϕ 的极地-赤道差。尽管它是以扰动形式出现,但Green的传输理论与混合概念无关。

Stone(1978)采取了截然不同的观点,认为,当温度梯度超过在 β 平面上按照两层准地转理论定义的某一临界梯度时,斜压不稳定传输热量是超效能的。他强调,实测的向极温度梯度将永不远离这个临界值,因为比较小的梯度,会导致非常弱的斜压不稳定,它不能满足全球热量平衡的需要,而稍大一些的温度梯度会造成过大的热量传输。这个临界温度梯度与纬度的余切和静力稳定度成正比。在Stone的文献中,对中纬地带的这种斜压调整的假说,给了观测证据。

对纬圈平均温度的另一个有趣的假设是,它能产生最大的有效位能(Lorenz 1960, Paltridge 1978, Shutt 1981)。所给定的热源与热汇本身是温度的函数,并假定时间的和纬圈的平均温度,使有效位能(APE)的产生率为最大。例如,如果将时间平均的非绝热加热率 $Q(y)$ 写成下式:

$$Q(y) = -\gamma(\delta T(y) - \delta T_*(y))$$

这里 y 是纬度, γ^{-1} 是时间常数, δT 是关于某一平均值的温度扰动, δT_* 是某些已知的平衡温度扰动,它使 Q 的均值为0。那么,APE的增长率正比于:

$$\int Q \delta T dy = -\gamma \int (\delta T - \delta T_*) \delta T dy$$

当 $\delta T = \delta T_*(y)/2$ 时,它为最大。自然,在实践中 Q 不仅是 δT 的函数,而有具体的物理过程,如云的反射率,是不能被忽略的。

3. 动量传输

预报温度经向分布的理论,在使用上有很大的局限性。因为它不能告诉我们任何关于地面风的概念。推而论之,它也不能说明摩擦导致的平均经向环流。我们需要的是一个能解释中纬地带时间平均的地面西风 and 副热带东风的动力模式。由于从纬向平均的意义上看,大气内部不存在动量的源和汇。地表的摩擦应力和波拖曳力只能被随高度积分的动量通量辐合所平衡。自然,由于动量的传输,这种地面风场分布是存在的,虽然只靠观测尚不能说明这个问题。维持中纬地带地面西风所需要的向极动量传输,几乎全部是由大尺度涡旋(准静止强迫行星波和斜压不稳定)造成的。平均经向环流只是在热带才是重要的。甚至象哈得来环流这样的事实,也依赖于大尺度涡旋的动量传输,如把输送的热量和动量作为独立因素来看也是错误的。经常把哈得来环流视作“大气环流飞轮”也会给人们一个错误的印象。简而言之,它是由以下原因造成的纬圈平均热成风平衡的破坏而形成的一种非地转响应。

(a) 赤道积雨云中的非绝热加热,

(b) 信风的摩擦减速,

(c) 由于大尺度涡旋造成的向极传输,使高层对流层有西风动量的净汇——引起信风,从而也出现(b),

(d) 整个热带无降水区的辐射冷却。

动量的涡动传输支配着总的随高度积分的向极动量传输的主要原因 是净科氏力矩

$\int_D \rho f v d x d z$ 在任何纬度上的消失, 因为这里没有长期向极质量通量(D 表示地面以上的经度-高度平面区)。由于除热带地区外, 平均经向环流很小, $\int_D \rho v \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} d z$ 表示了相对动量的向极通量(这里 ρ 为密度, U 为纬向风, 横杠表示纬圈平均)。图 1 是向极动量传输的纬度-高度剖面图, 用的是 FGGE(第一次 GARP 试验) 1979 年 1 月的资料。该图分为两张: (a) 瞬变波, (b) 静止波。请注意, 瞬变涡旋传输的动量是向极方向的(60°N 以北除外), 而静止波在 60°N 附近具有明显的赤道分量。一般说来, 涡旋动量传输, 从垂直方向看, 在对流层顶附近有一个高峰值。从这些图可以看到, 随高度积分的动量通量辐合意味着, 地面上 30—60°N 之间(在时间平均上)有一个西风动量汇, 而在赤道与 30°N 之间有一个东风动量汇, 该月观测到的纬向风

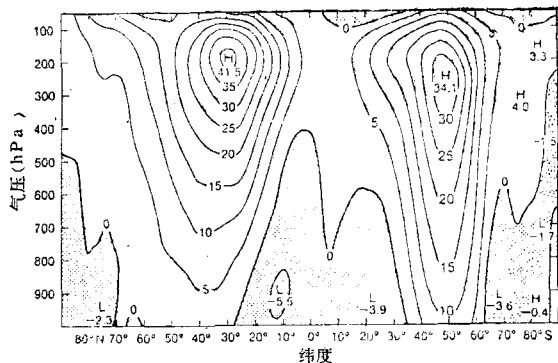


图 2 对应于图 1 的风矢量纬圈平均的纬向分量(ms^{-1}), 阴影部分为纬向平均东风

分布(图 2) 与所需要的这种地面动量交换是一致的——这表明正常的气候图象。

纬圈平均气压场与纬向风分布是一致的(通过地转)。这意味着在 60°N 有一个低压带, 在 30°N 有一个副热带高压带。地面摩擦引起的非地转运动, 则意味着前面那个地带将是阴、湿的, 而后者晴干。

因此, 大尺度涡旋造成的动量传输, 对大气平均态的确定是至关重要的, 至少是 40 年来动力气象学家们想回答的一个问题, 即“控制动量传输的动力学原则是什么?” 对斜压波向极输送动量的这种趋向, 曾提出过许多不同的解释方法, 但都是些似是而非的。其中多数是根据 β -效应的存在, 即科氏参数随纬度的变化。可以看出, 作用于中纬地带的扰动, 将会象 Rossby 波那样向赤道方向传播, 在这个过程中展现出明显的从东北到西南的方向——与向极动量传输反号(Hoskins 等, 1977)。在某种程度上, 斜压不稳定可被视作初始扰动的能量增长阶段, 此时具有纬向能向涡旋有效位能转换, 随后的成熟阶段则有向上的和向赤道的 Rossby 波放射(Edmon 等, 1980)。

60°N 以北的极地东风, 并不是大气环流的非常重要的方面, 因为它们只占据了地球表面很小的一块面积, 而且其月际变化很大, 即使如此, 它们与在高纬地带所观测到的动量向赤道方向的通量是一致的, 特别是静止

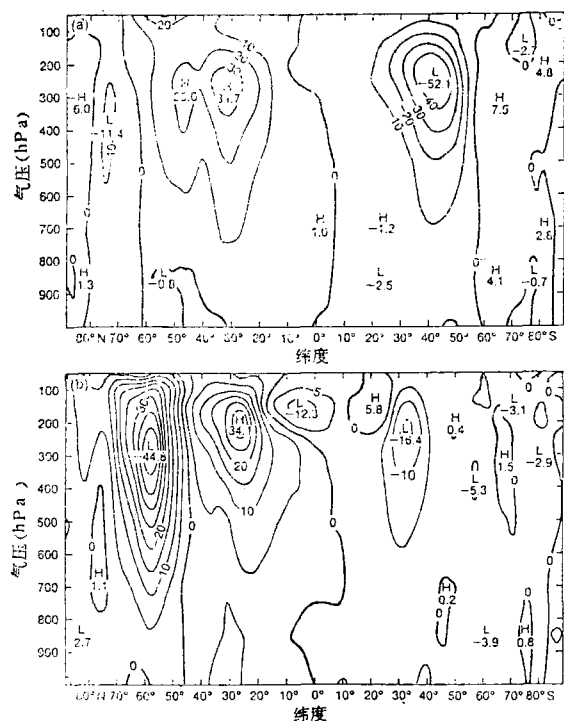


图 1 纬圈平均的纬度-高度剖面图。(a)瞬变涡旋, (d)静止涡旋的动量通量(ms^{-1})²用的是 FGGE, 1979 年 1 月的资料和欧洲中心的分析结果

波的情况。

4. 简短结论

对流层的纬圈平均的平均态, 可以被认为是受两种涡旋传输特征控制的:

(a) 随高度积分的向极动量通量, 它决定着地面风场,

(b) 随高度积分的向极热量通量通过热成风关系给出平均垂直风切变(虽然完整的

描述还需用地面应力与风, 及温度与热源之间参数化了的关系)。

涡旋的热量和动量传输的纬向变化, 一般认为是对平均环流的纬向不对称有很大的贡献。此外, 对 Shutts(1987) 所谓的地形强迫作用也有很大的贡献。

王世平译自 Met.Magazine(Vol.116)

1987 5月号

温新校