

文章编号: 1000-2022(2003) 01-0111-05

关于位涡理论及其应用的几点看法

胡伯威

(中国气象局 武汉暴雨研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 位涡理论能非常有效地解释天气现象、预测天气系统的变化。合理应用该理论的关键是对其原本思路和原理有非常透彻的理解。本文试图对此谈几点看法。

关键词: 位涡理论; 可反演性; 暴雨; 诊断

中图分类号: P433 **文献标识码:** A

自从 20 世纪 80 年代初 Hoskins 等^[1]重新估价和阐明位涡应用的重要意义以来, 我国有关位涡的研究^[2-6]也大大增多, 其中有不少有意义的工作。但是作者从接触到的部分文章和接审的稿件中感到也存在一些问题。实际上, 位涡的理论并不艰深, 有关的公式推导也比较简单, 似乎也更容易和大家熟悉并常用来作天气诊断的物理量(如涡度、对流稳定度、水平温度梯度、风场铅直切变等)直接联系起来。但是若要正确地、有效地运用位涡理论, 真正吃透经典作者的科学思路, 了解它的关键、精华和优点所在, 了解它与其他动力学理论和方法(例如准地转发展理论等)之间的关系, 还需要多费一些脑筋。以下从作者发现的一些问题, 简略地谈几点关于位涡理论及其应用的看法, 希望有识者不吝指正。

(1) 位涡之所以受到气象学家的关心和重视, 首先是因为它和大气运动场的涡度有直接联系, 而涡度对于表征天气系统特征及其发展的重要性是不言而喻的。早先主要利用位涡在绝热无粘情况下的守恒性质, 把它当作一种示踪的物理量^[7-8], 就像在正压无辐散大气中利用绝对涡度的守恒性一样, 而位涡的守恒性更广适, 不限于正压无辐散情况。但是, 毕竟大家直接关心的是涡度, 利用位涡的守恒性把位涡场和流场配合起来可以概念地、直观地推断、预测位涡场的变化, 却不可能简单直截地决定涡度场的变化, 因为位涡还包含着其他因素, 位涡场与涡度场之间不是单一对应的关系。

(2) 位涡分析之所以能具有重大意义就在于“可反演性”(invertibility)概念的提出。该概念早在 20 世纪 50 年代由 Kleinschmidt^[9]和 Eliassen 等^[10]提出, 后来由 Hoskins 等^[1]加以系统发展, 并使用了“invertibility”一词。把位涡的守恒性和可反演性结合起来, 就成了分析、理解和预测复杂的天气系统演变问题的一个重要理论, 打开了天气动力学研究的一个新篇章。

这里简述一下“可反演性”的含义和要点。位涡的可反演性的含义是: 只要给定了大范围大气中三维的位涡分布, 在确定的边界条件下, 整个大气动力场都被唯一地确定了, 正如在正压

收稿日期: 2002-02-25; 改回日期: 2002-10-14

作者简介: 胡伯威(1935-), 男, 上海人, 研究员, 主要研究方向: 暴雨预报和暴雨的发生演变机理、中尺度动力学、区域业务数值预报。

大气中可以用涡度场确定整个大气动力场一样。特定质元上的位涡表现为单一的标量值,但是同一个位涡值可以对应不同的微分结构。Ertel 位涡的表达式^[2]是

$$P = -\frac{1}{\rho} \nabla_a \cdot \nabla_3 \theta$$

其中, ∇_a 为三维绝对涡度矢量, ∇_3 为位温三维梯度。可见位涡是由绝对涡度和位温梯度共同(即它们的乘积)决定的。在等压面上位涡的表达式是

$$P = g \left(\frac{v}{p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{u}{p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + f \frac{\partial \theta}{\partial p}$$

其中, $\frac{\partial \theta}{\partial p}$ 为涡度垂直分量, f 为科氏参数, 其他为常规符号。可见它还可以分成正压部分和斜压部分。即在形式上包含了更多的因素。那么, 纯粹的位涡数值场怎么能决定自己的分解形式而由此决定具体的大气动力场呢? 关键在于认定大气动力场有一个整体的协调, 即大气动力场必须满足某种平衡关系, 其中包括静力平衡和准地转平衡(或其他某种更接近实际地“修正”了的平衡关系)。在这个前提下, 只要给定了全场的 Ertel 位涡(位涡的三维微分表达形式)标量值, 在确定的边界条件下就可以唯一地确定整个大气动力场, 包括风场、温度场、位势高度场, 甚至(根据准地转或平衡条件下的 ω 方程)铅直运动场。反过来, 大气基本要素场确定后, 每个质元上的位涡也得到了具体化(即不仅笼统地知道它的标量值, 而且还确定了其中各个因子是如何构成的)。可见只有结合可反演性, 位涡的守恒性才能得到很精彩的应用。我们起先可以不究细节, 只要追踪和判断、预测一个标量场的平流变化, 最后则可以把一切结果解开。为了实际求解, 在 Boussinesq 近似的前提下引入参考系统, 以扰动位涡代替位涡, 把反演的方程线性化。当然, 实际大气中必定存在中小尺度结构, 但是由于在等熵面上一定区域内的位涡与其周线“环流”之间也存在一种积分关系, 而且反演方程的线性算子是一种“平滑算子”, 它对小尺度的结构不敏感, 所以用粗分辨率资料计算的位涡场并反演得到的大气动力场仍是有效的。

(3) 由此可见, 广泛应用的位涡理论的精髓及其物理实质是: 在个别质元位涡守恒的前提下, 整个大气在运动过程中时时刻刻进行着全场的适应调整, 这种适应调整决定了整个大气风场、温度场和位势高度场的分布, 因而也就确定了每个质元上的位涡的具体微分结构。设想一个简单情况来说明这一点: 某处有一个具有很大正值扰动位涡的气块, 如果它的大位涡值主要是由于大的层结稳定度引起, 而不是表现为特强的涡度。在这种情况下, 把这个质元移动到新的环境下的时候, 其温度场可能与周围不协调(即不适应)。于是, 气块必须在铅直方向拉长, 使其中的等位温面的密集度减小(即层结稳定度减小), 其温度场和位势高度场才能与周围协调; 同时它必定在水平方向收缩(辐合), 导致正涡度加强。也就是说, 大位涡带来大涡度是通过适应调整而实现的。在具体的情况下, 调整变化是定量的。可见, 位涡是在两个因子的适应调整过程中确定的。当然, 它附近的大气也同时发生着相应的调整变化。

位涡理论是与准地转、半地转或准平衡动力学紧密联系在一起。但是它有一些突出的优点, 特别是在直观定性的分析、预报和理解问题方面, 它有很大的优势。传统动力学中, 强迫因子以分解的形式出现, 而且其中包括着作用互相抵消的部分, 给直观判断带来一定的困难。而应用位涡理论分析问题, 只要在等熵面位涡图上加进水平风场, 一些明显的平流变化结果就可以被直观地推断出来, 必要时再加上非绝热和摩擦等如何影响位涡的推断, 再应用一些模型化的定性反演规律(它们来自一些典型个例的分析和理想情况下的解析解的结果), 就可以推断出一些天气系统变化的大概趋势。如果与实际的变化情况基本一致, 就得知这种变化是如何发生的, 也就是了解到了这种变化的机理。可以说这是一种别具特色的、能够更方便地推断和理解天气动力过程的思考方法, 所以 Hoskins 等称之为“potential vorticity thinking”, 也许可以

译为“位涡思考”或“位涡观点”(Hoskins 等^[1]曾提到:“……this viewpoint, which we have referred to as ‘IPV thinking’……”)。

近年来,国内部分关于位涡理论诊断应用的文章中,存在的问题主要是忽略或脱离了位涡的守恒性和可反演性这个精髓。最简单的一种应用是仅把它当作一种物理量,按照公式计算出位涡场来,分析它与暴雨等重大天气事件的关系。作为事实和经验的积累,这是有一定意义的。而有一些文章在企图解释现象的时候,简单地把位涡表达式拆开,还原到用常规物理量来解释问题:在等熵面上把位涡拆成等熵涡度和静力稳定度;在等压面上,“正压部分”拆成等压涡度和静力稳定度;“斜压部分”拆成风的铅直切变和水平位温梯度,然后分别讨论这些场的作用。这样做并没有引进新的知识和理解,主要是没有应用到这些物理量在位涡守恒和可反演意义上的内在联系。这种简单的“拆开”当然不能等同于反演。首先它无法决定(哪怕是定性地,大致地)被拆开的各个部分具体是如何联系的。例如一个强的正位涡扰动究竟主要表现为正涡度强还是静力稳定度强;“斜压部分”占多大比重,是正还是负?这都不能随意臆断。如果还是得靠实际资料来分别给出它们,那就没有必要把位涡引进来了。前面说过,“位涡思考”和位涡动力学的精髓(也是其优点)就在于:它在全场平衡适应的前提下,由一个位涡场可同时分别确定有关的几个基本的大气要素场。更重要的是,它把可反演性和守恒性紧密结合在一起,动态地而不是静态地分析问题。所以用它可以直观而简洁地从推断位涡场的动向来预测和解释天气系统的演变。

(4) 从一些经典文献中可以看到应用位涡思考的出色例子,其中很重要的一类应用的特点是抓住了突出的扰动位涡,分析它的来源,并从位涡反演的角度了解它在重大天气系统演变中的重要作用。高空气团的大振幅南—北输送是造成大的扰动位涡的一种重要方式。平流层的层结稳定度比起对流层来要好几倍,所以那里是一个“高位涡库”。平流层空气大规模侵入对流层,或者相反,对流层空气侵入平流层,都会形成大的局地位涡扰动。这种入侵主要不是通过铅直平流,而是通过水平平流来实现的。因为在高空急流附近,对流层顶出现经向断裂,其南—北的层结稳定度陡变,加之急流南—北侧的涡度也有巨大差别,所以这里有特别大的经向位涡梯度。只要出现大振幅的波动和经向气流,就可以把高纬度地区具有高位涡的平流层气团远远地输送到中低纬度地区对流层中。同样,也可以发生反向的输送。上述过程分别可以产生高纬和中低纬地区高空很强的(常表现为孤立的)负的或正的位涡扰动区。反演的结果分别显示出典型的阻塞高压和切断低压三维结构。铅直平流在这里应该说也起到附加的作用。例如,由高纬指向中低纬的北风气流在携带正位涡平流的同时也携带冷平流,导致下沉运动,这就意味着有附加的正的位涡铅直平流。可见,在这种情况下常看到的悬垂的高位涡柱虽然主要来源于水平平流,但是铅直平流也有部分贡献。至于正位涡平流导致的气块在铅直方向的拉长及其相应后果,已经把它算到平衡反演中去了。当然,如果要求在细节上更接近实际,还必须细致地考虑到伴随上述主要过程而发生的各层扰动流场携带的附加的位涡平流以及有关的非绝热过程带来的位涡变化等。此外,对爆发性气旋发展的位涡分析也是一个出色的例子。其中更多的是涉及由高层位涡扰动引发的低层锋面扰动过程和潜热作用等。

用位涡思考还成功地解释了多类天气尺度和大尺度不稳定的机理,而且可以研究有限振幅的非线性的情况。另一方面,位涡(以及所谓“湿位涡”)值也被用作像对称不稳定这样的中尺度非地转不稳定的判据,还可作为锋生环流的存在及其特点的判据。锋生环流同样可以由位涡场反演出来,但是对称不稳定的位涡判别法似乎与上述“位涡思考”无关。

(5) 我国处于东亚季风区,而且夏半年暴雨等强对流天气的研究特别受到重视。许多人应

用“湿位涡”来分析解决这类问题。但是,在近似饱和湿绝热运动的前提下引进的一些“湿动力学”概念有很大的局限性,所以应用起来要特别小心。曾经有人提出过的,用相当位温取代位温的“湿热成风”(或者被称为“广义热成风”)是站不住脚的。大气的密度场、位势高度场乃至某种平衡风场归根结底是与温度场相联系的。如果要考虑湿度,也只不过是进行了微不足道的虚温订正。相当位温只是一种潜在的位温,与当时的空气密度无关,从而也与当时的位势高度场、风场等无关。而相当位温与位温的关系又是很复杂的,即使在饱和情况下,并且在同一个等压面上,相当位温只是位温的单调上升函数,而不是简单地成正比。因此不难理解,同样以相当位温取代位温的“湿位涡”场并不具有像位涡场那样的可反演性。Hoskins^[11]以及 Bennets 和 Hoskins^[12]在讨论条件对称不稳定时提到湿位涡(湿球位涡); Emanuel^[13]在讨论产生中尺度雨带的饱和条件下的锋面环流时也提到相当位涡,但都仅仅是把它的值作为发生相关情况的一种判据,并没有用(也不可能用)相当位涡场来反演他们在那里所讨论的铅直环流。此外,以相当位温取代位温之后位势稳定度数量级变了,甚至在一些情况下变成负值了,这就影响到反演算子的性质,影响到扰动作用在铅直方向的穿透幅度。湿位涡扰动的水平尺度也相对小得多,这些因素都涉及对这个理论的适用性的制约。大家知道,上述 Bennets 和 Hoskins^[12]的工作是 1979 年完成的。而 1985 年 Hoskins 等^[11]发表的关于位涡的应用及其意义的全面而精彩的评论,对相当位涡和所谓“湿位涡”却只字未提。实际上,这篇文章还专门谈到潜热对气旋强烈发展的重大作用,但都是从潜热如何影响“干”位涡场这个角度来讨论的,根本没有去利用“相当位涡”这个概念。可见,虽然这个概念在少数特定场合被提出,但却没有被经典作者更多地去引申,更没有被纳入“potential vorticity thinking”的范畴。所以笔者认为,除非在理论上确实有了严谨的新的开拓,否则不要盲目地在这方面进行由“干”到“湿”的类推。

(6)但是近年吴国雄等^[3,6]关于湿位涡与“倾斜涡度发展”的工作颇有意义。它与上述经典的“位涡思考”思路有些不同,理论上也比较严谨。它说明铅直涡度个别变化与湿位温面倾斜度个别变化之间有密切关系,实际上也就是考虑了 Ertel 位涡在等压面坐标系中两个分量(所谓 MP_1 和 MP_2)之间的可转换性(MP_1 和 MP_2 之间的转换显然与等熵面倾斜度的变化有密切联系)。但在应用这个理论的时候还应该了解其中有一些限制。首先他们得出,铅直涡度的个别变化实际上是正比于一个 C 参数的个别变化,而在 C 参数中除了湿位温面倾斜度以外,还包括风的铅直切变。正如前文所说,风的铅直切变与湿位温水平梯度(与等湿位温面的倾斜度)并不存在简单关系。此外,由于湿位涡的不可反演性,湿位温面倾斜度将如何变化,也还得根据其他条件来预测。它不能像“位涡思考”诊断那样由一幅加上水平风场的等熵面位涡图就能直观地预测位涡场的变化,从而概念地或数值地反演出包括涡度场在内的基本大气场的变化。

(7)由前面提到的成功应用位涡思考的例子中可以看到,很重要的一点是抓强的扰动位涡源。这在中高纬度比较容易,在纬度偏低的地区,例如夏季的江淮流域,此时此地对流层顶很高,比较难以影响到低层。侯定臣^[2]研究了来自青藏高原附近的气旋性扰动。虽然它比较弱,但是因为它在对流层中,影响更直接(在铅直方向某一层的扰动对另一层的影响随距离的增大呈指数衰减^[14]),加上江淮地区有丰富的潜热来响应,也能引起明显的气旋发展(侯定臣等就强调了潜热的重要性,但并未滥用“相当位涡”的概念)。庞大的青藏高原的热力和动力影响会使其上空的位涡场与下游地区明显不同(即有较大的梯度),对后者可能成为一个扰动位涡源。加上早已熟知的,位涡守恒在地形下游效应中的体现,青藏高原对下游天气的影响可能是应用位涡动力学的一个很有意义的课题。此外,众所周知,西风带长波以至短波的活动都对西太平洋副热带高压的变化有重要影响,这是大家特别关注的一个问题。它显然涉及高中纬度和低纬度

之间的位涡输送,也值得从这个角度去探讨。东亚夏季风影响地区的强降水问题,除了以上所说的潜热参与的重要性以外,还有降水系统尺度小、非地转明显等特点。这对位涡动力学的应用是一个挑战,特别需要透彻严谨而有创造性的研究。

参考文献:

- [1] Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. *Quart J R Meteor Soc*, 1985, 111(470): 877-946.
- [2] 侯定臣. 夏季江淮气旋的 Ertel 位涡诊断分析[J]. *气象学报*, 1991, 49(2): 141-150.
- [3] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓箐. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. *气象学报*, 1995, 53(4): 387-405.
- [4] 王建中, 马淑芬, 丁一汇. 位涡在暴雨成因分析中的应用[J]. *应用气象学报*, 1996, 7(1): 19-27.
- [5] 吴国雄, 刘还珠. 全型垂直倾向方程和倾斜涡度发展[J]. *气象学报*, 1999, 57(1): 1-15.
- [6] 吴国雄. 全型涡度方程和经典涡度方程比较[J]. *气象学报*, 2001, 59(4): 385-392.
- [7] Rossby C G. Isentropic analysis[J]. *Bull Am Met Soc*, 1937, 18: 201-209.
- [8] Rossby C G. Planetary flow patterns in the atmosphere[J]. *Quart J R Met Soc*, 1940, 66(Suppl.): 68-87.
- [9] Kleinschmidt E. Die Entstehung einer Höhenzyklone über Nordamerika[J]. *Tellus*, 1955, 7: 96-110.
- [10] Eliassen A, Kleinschmidt E. *Dynamics Meteorology*[C]//Springer-Verlag. *Handbuch der Physik Flugge*. 1957: 48.
- [11] Hoskins B J. The role of potential vorticity in symmetric stability and instability[J]. *Quart J R Met Soc*, 1974, 100(425): 480-482.
- [12] Bennetts D A, Hoskins B J. Conditional symmetric instability—a possible explanation for frontal rainbands[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1979, 105(446): 945-962.
- [13] Emanuel K A. Frontal circulation in the presence of small moist symmetric stability[J]. *J Atmos Sci*, 1985, 42(10): 1062-1071.
- [14] 胡伯威. 副热带天气尺度系统短期演变的泛准地转机理[J]. *大气科学*, 1982, 6(6): 422-431.

Some Opinions about the “Potential Vorticity Thinking” and Its Applications

HU Bo-wei

(Wuhan Heavy Rain Institute, China Meteorological Administration, Wuhan 430074, China)

Abstract: The “potential vorticity thinking” is a very intelligent and useful way to explain and predict the synoptic variations. And understanding exactly and inherently the original scientific “thinking” of the classical authors is the key to apply this theorem properly and effectually. Some views on “thinking” are given in this paper.

Key words: potential vorticity thinking; invertibility; heavy rain; diagnose