

暴雨天气动力学一些问题的探讨 (I)

——分析工具

王两铭

(中央气象局研究所)

罗会邦*

(中山大学地理系)

摘 要

本文从探讨暴雨研究的基本工具入手,指出用温压场为基础的天气图,在反映暴雨的基本特征方面有一定困难;而从假相当位温场和实测风场来探讨,则在实践上和理论上都较有效。

分析表明:850MB,700MB,500MB三层假相当位温的平均 $\bar{\theta}_{se}$ 与500MB和850MB切变风 \vec{V}_q 有密切的关系, \vec{V}_q 的方向与 $\bar{\theta}_{se}$ 的等值线平行,大小与等值线的梯度有关,这和平均温度场与地转涡直切变风的热成风关系类似,而后者在低纬暴雨地区关系很差,从而说明工具改革的必要性。

前 言

研究暴雨应从形成暴雨的主要物理条件着手。我们认为:形成暴雨的内在因素是潮湿空气的潜在不稳定,而又以充足的水汽表现为其主要方面;外部因素是促使这种潜在不稳定得到充分释放的强迫抬升运动,而又以流场为其主要方面。因为,地形也要通过流场来起作用。我们将围绕暴雨的内、外部条件,通过华南前汛期暴雨成因和预报方法试验,探讨其内在联系,使之尽快地应用于预报,并在实践中给以检验,以便对暴雨形成的基本理论逐渐有所增益,对暴雨落区预报方法能不断改善。

一、问题的提出

现有的工具主要是高空和地面天气图。这种工具的理论基础是:大气运动基本上是地转的,绝热的。从能量的观点来说,主要是位能和动能的转换。反映这种过

*中山大学气象专业七四届学员章成光、李华山、叶惠明、薛惠嫻、刘毓、陈文迎参加了本文的计算工作。

程所选用的物理量是温度场和风场。由于中高纬度柯氏力和气压梯度力处于准平衡状态,大气的风场和气压场关系是准地转的,而且因为风场的测量误差较大,气压场的测量远比风场精确,故又用气压场代替风场。这就是为什么在中高纬度用气压场和温度场作为研究天气学和动力学的基本工具。现在我们的研究对象是暴雨,是有大量凝结现象参加的物理过程。在暴雨地区,大气的运动是非绝热的,饱和的空气块将沿着湿绝热上升,通过凝结释放潜在能量。这样,从能量的观点来说,在暴雨过程中,不仅有位能和动能的转换,而且有一个潜热能,另一方面,华南前汛期暴雨时期,气压场和风场并不平衡,实际风比地转风有时大一倍以上,即大气的运动是非地转的,气压场不能较好地反映风场特征。因此,我们认为,探讨暴雨的基本工具图以在湿绝热过程中具有保守性的假相当位温 θ_{se} 和实测风要比温压场更能反映暴雨问题的特征,这就是我们提出工具问题的出发点。

我们的考虑还来自预报员的实际经验。在他们的预报思路中是以850MB西南高空急流和切变线这种实测风场为依据的。同时,他们还提出了在暴雨条件下的“锋区”两侧温度对比并不明显,而湿度场和实测风场表现得比较明显。这种经验对于考虑反映暴雨特征的工具图是可贵的。

实践表明:在华南前汛期暴雨条件下,以上述考虑为依据、用实测风场和假相当位温场作暴雨的预报和研究比温压场具有较多的优越性。

二、工具及其特征

为了便于说明,我们以中高纬度的情况作比较。

1. 温湿场

在中高纬度的天气分析中,预报员常注意冷空气的活动,由此确定高空锋区和地面锋面,并作出影响系统的天气预报。这实际上反映出天气主要表现在冷和热这对矛盾上面,而以冷作为其矛盾的主要方面。在暴雨天气中情况又是怎样的呢?华南前汛期暴雨,在大多数情况下,暖总是伴随着湿,冷总是伴随着干,即是以暖湿和干冷之间的矛盾出现的,而又以暖湿作为矛盾的主要方面。每当一次暖湿空气活动,往往伴随着一次暴雨过程。采用等 θ_{se} 和等 q 线联合分析能较好地反映这种特征。

图1a是1977年6月19日08时的850MB高空图,图中的细实线是等位势线,细虚线是等温线,粗断线是切变线。图1b是同一时刻的假相当位温和等比湿图,即 $\theta_{se}-q$ 图,图中的细实线是等 θ_{se} 线(每隔 5° 画一根),细虚线是等 q 线(每隔2千克/4千克一根),带箭头的粗实线是西南风和东北风急流轴线,粗断线是切变线,“NS”表示暖湿中心,“GL”表示干冷中心。从以上二张同一时刻不同物理量图的比较可以看到:①以温压场分析的天气图,温度梯度不明显,没有“锋区”;而以 $\theta_{se}-q$ 场分析的图暖湿和干冷的梯度明显,槽脊分明,并有相当明显的“锋区”。②

以温压场分析的图，温度场和流场关系不明显；而以 $\theta_{se}-q$ 场分析的图，暖湿舌对应着低空西南急流轴，暖湿中心对应着急流中心，干冷槽伴随有低空东北风急流轴，“锋区”前是切变线所在，暴雨正是发生在切变线前，在低空西南急流中心的左前方，在暖湿中心的下风地区。用850MB, 700MB, 500MB, 三层 θ_{se} 平均图则暖湿中心和低空850MB和高空500MB西南风急流中心配置更好，850MB低空西南急流轴常在暖湿舌的右侧，急流中心在暖湿中心的右侧，500MB西南急流轴及其中心分别对应于三层平均暖湿舌及其中心的左侧，暴雨正是出现在低空西南急流左前方的暖湿区中。用这种物理量图作24小时暴雨的落区预报比天气图物理意义清楚，预示性能较好。

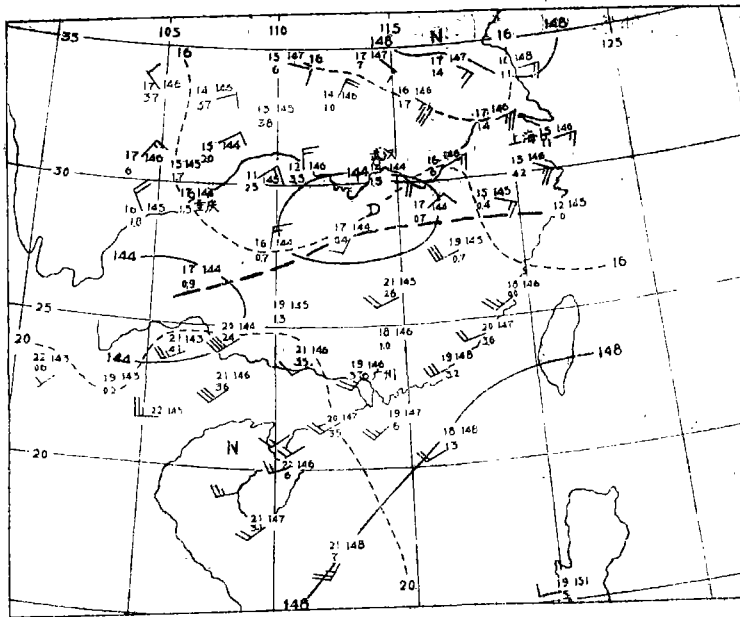


图10. 1977年6月19日06时850 mb图
 - - - 等温线; ——— 等高线; - - - 切变线

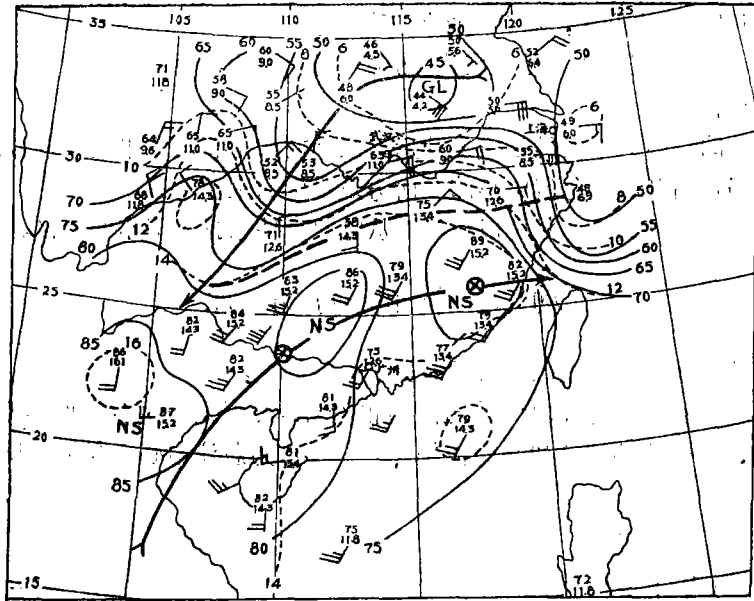


图1b. 1977年6月19日06时850mb θ_{se}/g 图

——等 θ_{se} 线; - - - -等压线; —●—急流轴及其中心切变线

2、风场

在中高纬度用气压场代替风场是较为理想的，但对华南前汛期暴雨来说，这种关系就相当差。从图1a中的位势场是无法算出急流附近的实测风场的。在风场的分析中，为了抓住风场的主要特征，采用基本气流加小扰动的概念，如图2所示，我们取 x 轴指东北， y 轴指西北，即将一般坐标轴反时针方向转动45度，急流中心取为坐标原点，图中等值线为等西南风速线。由于取自西南至东北的方向为 x 轴，流线偏离 x 轴所构成的曲率涡度在急流地区远比切变涡度小，流场所引起的涡度场主要表现为切变涡度。在实际预报中，这种等风速线图有助于从物理上判断暴雨的预报落区。从图2的等风速线分析中可以看到风场的如下特征：

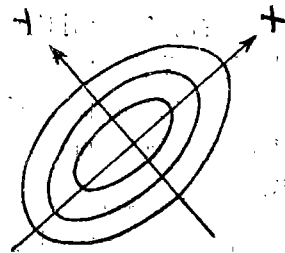


图 2

①背对 y 轴的来向，则 y 轴的右侧是风速辐合区，侧左是风速辐散区，辐散合辐的大小同等风速线沿 x 方向的密集程度成比例。

②背对 x 轴来向，则 x 轴的左侧是气旋性切变涡度区，右侧是反气旋性切变涡度区，切变涡度的大小是同等风速线沿 y 方向的密集程度成比例。

按照摩擦引起的垂直运动正比于摩擦层顶的涡度，若取850MB为摩擦层顶，则x轴的左侧是摩擦上升区，右侧是摩擦下沉区。

③x轴（应为急流轴），是无旋线，y轴是无辐散线，急流中心既是无旋又是无辐散的奇异点。

④急流轴的左前方不仅是摩擦上升运动区，而且是正涡度平流和辐合区，最有利于气块的强迫抬升，故急流中心的左前方是暴雨的主要落区。

借助于上述二种工具，将可以较好地物理条件来预报降水的落区。

二、动力学的初步探讨

一年来的实践在动力气象学方面提出了一些问题，

1、为什么象图3这种850MB的温湿场和流场的配置是暴雨的常见形势，图中实线是等 $\theta_{e,}$ 线，带箭头的粗实线是急流轴线，“x”号为急流中心，NS为暖湿中心。

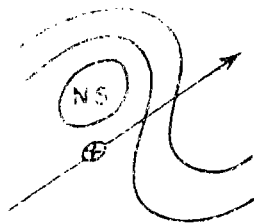


图 3

2、为什么暴雨带常在急流中心左前方和暖湿中心的下风方，而这两个条件又几乎是同时出现？

3、为什么暖湿舌及其中心在它的右侧经常分别对应着850MB低空西南急流轴及其中心，而在其左侧正好是500MB急流轴及其中心？

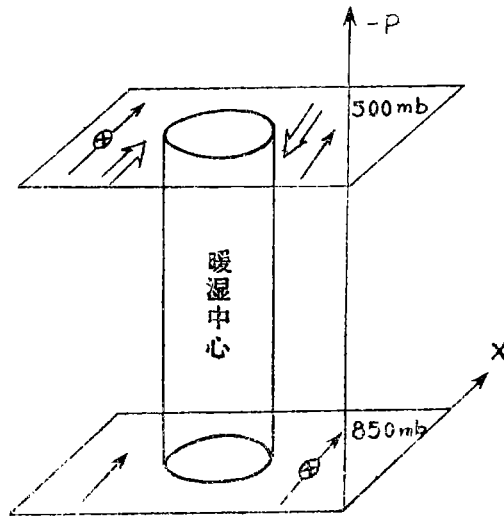


图4 暖湿中心和急流配置示意图

(\rightarrow) 风速矢 \vec{V} , \otimes 急流中心,
 \Rightarrow 风的铅直切变矢 \vec{V}_z .)

从动力气象学的角度来说，归结为这种温湿场和流场之间究竟存在着什么关系？

众所周知，在中高纬度，风场的铅直切变是由热成风原理把它同温度场联结起来的，所以热成风就成了以温压场为主要工具进行天气和动力学研究的一个主要的理论基础，因此，在这里我们将探讨下列三个问题：1. 中高纬度的热成风原理在暴雨地区是否适用；2. 如不适用，是否有一种类似热成风原理的相应关系存在；3. 如果这种关系存在，那么对应的基本分析物理量应该选什么。

图4是暴雨落区预报中常见的急流和暖湿中心配置图，x轴指向东北，850MB西南急流在暖湿中心的右方，而500MB西南急流在其左方，这种配置表明，850MB切变涡度是正的，500MB切变涡度是负的，切变涡度随高度而减小。由于流线偏离225°所构成的曲率涡度在急流地区远比切变涡度为小，在850MB西南急流轴与500MB西南急流轴之间的暴雨区总的涡度是随高度减小的，并且由正涡度变为负涡度。

$$\text{由 } \zeta_{800} = \vec{k} \cdot \nabla \times \vec{V}_{800} \quad (1)$$

$$\zeta_{850} = \vec{k} \cdot \nabla \times \vec{V}_{850} \quad (2)$$

则

$$\zeta_q = \vec{k} \cdot \nabla \times \vec{V}_q \quad (3)$$

式中的 ζ 为相对涡度， \vec{V} 为水平风速矢

$$\zeta_q = \zeta_{800} - \zeta_{850}, \vec{V}_q = \vec{V}_{800} - \vec{V}_{850}$$

由上可知 $\zeta_q < 0$ ，如图4中双线箭头(表示风的铅直切变矢的分布)所示，如果准地转的假定成立，则根据热成风原理， \vec{V}_q 就是这一层内的热成风 \vec{V}_T ， ζ_q 就是热成涡度 ζ_T 。在上述二支急流轴之间，850MB到500MB这一层内应该存在着一个平均温度的暖中心。我们做了1977年5月15日到21日，5月27日到6月1日和6月16日到22日每天08时三层500MB、700MB、850MB位温 θ 的平均，从平均 θ 场来看，并没有什么明显的暖中心，位温的水平梯度也相当地小，有时反而出现冷中心。图5_a是1977年5月

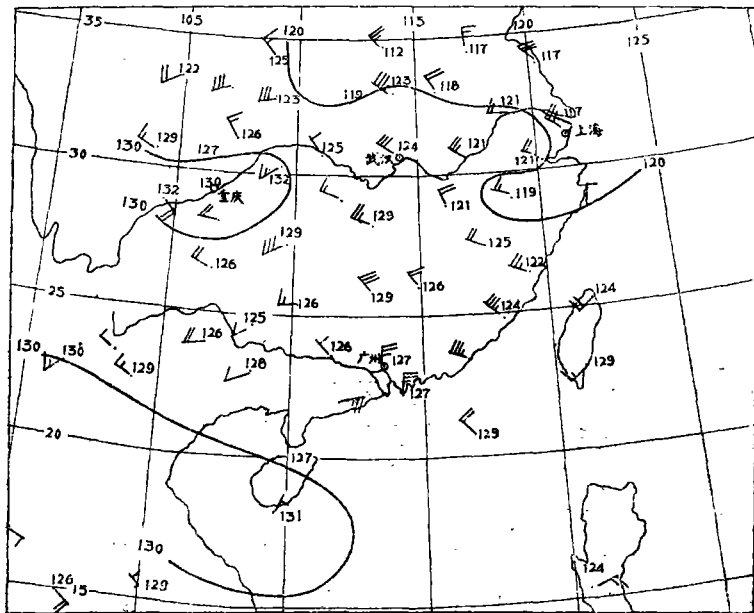


图5_a. 1977年5月27日08时 $\vec{V}_q = \vec{V}_{800} - \vec{V}_{850}$ 与 ζ_q

27日08点平均位温图，图中的风速矢是500MB和850BM的矢量差 \vec{V}_q ，由图可见长沙、郴州和芷江的平均位温高于南侧贵阳、桂林、百色、河池和梧州，按热成风关系，风的铅直切变应该从东指向西，然而实际相反，又如同一图中，南宁、郴州、广州和阳江之间的地区有一个明显的反气旋式的铅直切变风涡度，与之对应的中心平均位温应该比周围高，但实际反而偏低。这就说明，用平均温度梯度的热成风关系是不行的，采用虚温以后也不能改变这种特征(图5b)，这就证明了风场确实具有非地转的特征，用气压场来描述实测风场是有困难的。

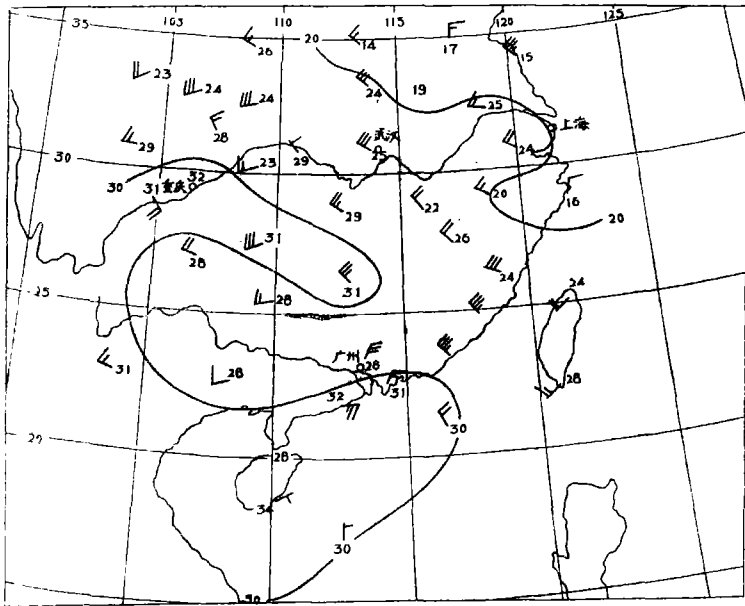


图 5b. 1977年5月27日08时 $\sum_{0.7.5} T_v$ 与 $\vec{V}_q = \vec{V}_{500} - \vec{V}_{850}$

现在我们将进一步探讨这种非地转的特征是由什么原因引起的。由于假相当位温 θ_{se} 综合反映了温度和湿度的特征，且在假绝热过程中具有保守性，因此我们分析了上述三段时间的三层平均 θ_{se} 场和实测风铅直切变的关系，发现实测风的铅直切变矢 \vec{V}_q ，其方向平行于三层平均 θ_{se} 的等值线，其大小与平均 θ_{se} 等值线的密度有关，图5c是与图5a同一时刻的图，只是将三层平均 θ_{se} 代替三层平均 θ ，其他说明完全相同。由图可见，上述的长沙、郴州、芷江三站的平均 θ_{se} 值已比南侧5站为低，切变风 \vec{V}_q 的方向和量值与平均 θ_{se} 线的走向和密度配合得很好，而在南宁，郴州、广州和阳江之间的明显反气旋式铅直切变风涡度地区，平均 θ_{se} 场出现了一个暖湿中心。这表明，平均 θ_{se} 场和实测风的铅直切变间有着极为密切的关系(有关这种关系的理论推导我们将另文讨论)。在低纬暴雨地区，引起实测风铅直切变的主要原因可能

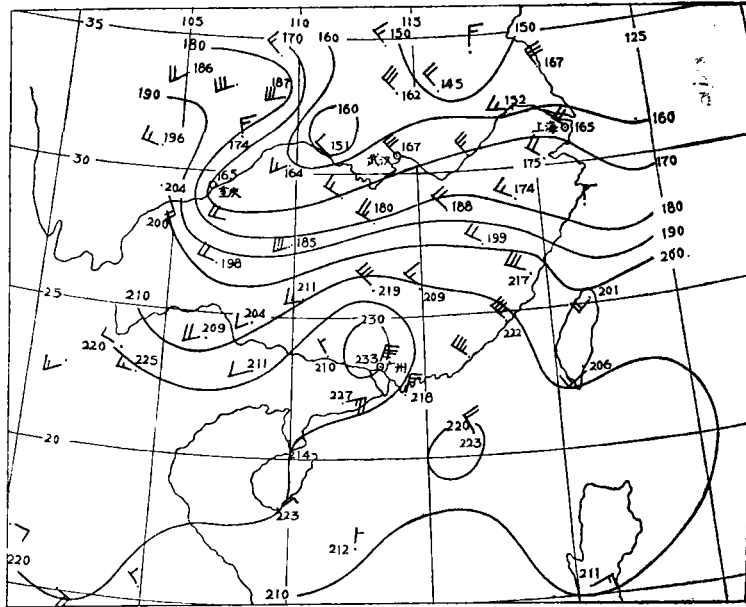


图 5C 1977年5月27日08时 $\vec{V}_g = \vec{V}_{500} - \vec{V}_{850}$ 与 $\Sigma \theta_{se}$
0.75

不是“热成”的，而是“湿成”的。

从上面的分析中可以看出，在低纬暴雨地区，风压场的非地转特性是与水汽凝结潜热释放的非绝热特性相关联的。在这种湿空气动力学中，虽然风压场的关系是非地转的，但实测风切变 \vec{V}_g 与平均假相当位温 θ_{se} 的上述关系，使我们可以将与热成风类似的原理定性地应用到低纬暴雨地区，只要将温度场 T 改为假相当位温场 θ_{se} ，将位势场确定的地转风改为实测风。

这个结果表明，用 θ_{se} 场和实测风场作为暴雨落区预报的分析工具不仅在实践上是比较成功的，而且在理论分析中也是有意义的。