

# 关于暴雨和湿急流的讨论<sup>\* 1</sup>

陶祖钰

(北京大学物理学院大气科学系, 北京, 100871)

刘 伟

(民航东北空管局气象中心, 沈阳, 110169)

## 摘 要

湿急流是 20 世纪 70 年代末谢义炳在长期研究降水问题的基础上、在雷雨顺能量学方法对暴雨和强对流天气研究成果的启发下提出的一个科学猜想。近年来在多个暴雨实例的中尺度数值模拟结果都与湿急流猜想相符, 即暴雨区中是存在将低空急流和高空急流在垂直方向上连接起来的湿急流, 利用可视化技术还可将湿空气块在暴雨云团中的上升、加速和转向的轨迹清楚地展示出来。但是, 湿空气块的加速并不仅仅是湿绝热上升过程中浮力的作用, 动量收支的计算表明, 中尺度水平气压梯度力对气块动量的增加也有贡献。

文中还讨论了与暴雨和湿急流相关联的湿斜压平衡方程(湿热成风方程)等问题, 指出从总能量收支平衡出发是不能解决暴雨过程中不同形式能量之间的转换过程是如何实现的。由于暴雨过程是高度非地转平衡的, 也是非静力平衡的, 同时还存在复杂的多尺度之间的相互作用, 因此具有完善物理过程的高分辨率的数值模式是暴雨机理研究最有效的方法。

**关键词:** 暴雨, 急流, 数值模拟, 湿空气动力学。

## 1 湿急流的观测事实

“湿急流”是 1978 年谢义炳<sup>[1]</sup>在“湿斜压大气的天气动力学问题”一文中提出来的。它是对 1975 年 8 月河南特大暴雨灾害研究引发的一波对暴雨机理研究高潮后提出的一个大胆的科学设想, “即湿空气在湿不稳定大气中按湿绝热过程上升, 将得到加速”而形成的。文中认为“在我国探空网密集的地区, 也许可能用事实揭示湿空气上升、转向和加速的过程, 即湿急流的形成过程”。图 1 为 1977 年根据发生在河北、北京和辽宁的一次大暴雨过程的探空和高空风观测资料的分析所发现的湿急流<sup>[2]</sup>。它是一条在三维空间的大风速轴线, 并将低层的偏南风急流和高空的偏西风急流连接起来。

此结果 1980 年 12 月在《气象学报》上刊登后, 1981 年的 4 月就收到英国国家气象图书馆的来函, 索取英文稿或允许全文翻译。图 2 即为英国来函和

翻译稿的局部。

谢义炳先生关于湿急流的科学猜想有两个基本点: (1) 湿急流是和富含水汽的湿绝热上升过程相关联的; (2) 湿空气的上升运动是对流性的而不是大尺度动力强迫的。因此, 湿急流只有在夏季不稳定的强降水过程中才可能存在, 并总是位于雨区上空的饱和湿空气中。

## 2 湿急流的数值模拟

湿急流猜想来源于富含水汽的湿空气块在不稳定大气层结中的上升运动, 从流体力学的观点来看, 它是以拉格朗日的观点来看待空气的运动。因此要真正确认湿急流的存在和揭示湿急流的形成过程必须要追踪湿空气块轨迹。但是前面所给出的湿急流三维结构是从某一瞬时的三维风场(水平剖面 and 垂直剖面)得到的。因此严格地讲, 还不足以证明湿急流的存在。

\* 初稿时间: 2005 年 5 月 20 日; 修改稿时间: 2005 年 8 月 4 日。

资助课题: 自然科学基金重点项目(40233036), 科技部 973 项目(2004CB418306), 北京市科委奥运项目(H020620190091)。

作者简介: 陶祖钰, 1939 年生, 上海人, 教授。主要从事天气分析和诊断及强对流天气研究。

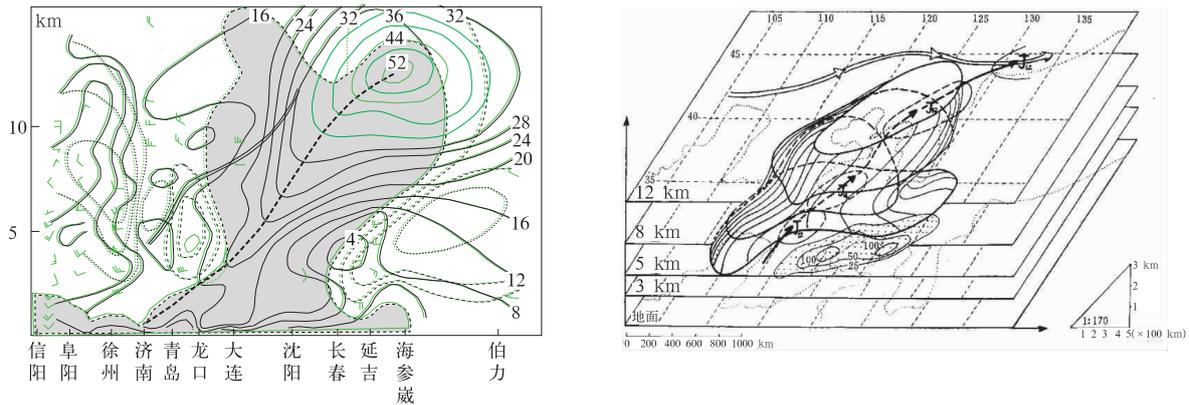


图1 根据1977年8月3日08时探空和测风资料在穿过暴雨区的垂直剖面上分析出来的湿急流轴线(a)和根据各水平剖面 and 垂直剖面的风场的湿度场绘制的3维空间中的湿急流(b)  
 (a. 细实线为等风速线, 间隔4 m/s; 细虚线为等温度-露点差线, 间隔4 °C; 阴影区为温度-露点差小于4 °C的饱和区; 粗断线为大风速的轴线; 双线为空中的槽线。b. 双矢线、粗实矢线和粗虚矢线分别为高空急流、低空急流和湿急流的轴线; 阴影区为日雨量大于25 mm的区域; 由许多曲线网络构成的空间体为饱和凝结区)

Fig. 1 (a) The axis of moist jet stream on the vertical cross section across the heavy rainfall region based on sounding data of 08 BST August 3, 1977 (The thin and solid lines are isotaches in unit m/s; the thick broken line is the jet-stream axis; the double line is the trough line; the shaded areas are the saturation condensation regions; the shaded area beneath the profile base-line shows the extent of the region of rainfall), (b) the three-dimensional spatial structure of the axis of moist jet stream according to the winds and moisture analyses on the horizontal and vertical cross sections (The thick line with arrows represents the axis of the moist jet stream-that portion of the line which is broken up into dashes represents that part which is located within the saturation condensation region; the double line with arrows represents the axis of the upper level subtropical zonal jet stream; the thick solid lines and broken lines show the boundaries of the saturation condensation regions being shown by an number of fine, curved lines. The bottom layer of the figure plots the 24-hour rainfall distribution (unit:mm) from 08:00 BST August 2nd to 08:00 BST August 3, and the rainfall region is shown by shading)

**THE NATIONAL METEOROLOGICAL LIBRARY**  
 London Road Bracknell Berkshire RG12 2SZ  
 ENGLAND

Telex 848160 847010  
 Telephone 0344 (Bracknell) 20242 ext 2254

---

Dr. Tao Zu-yu,  
 Department of Geophysics,  
 Beijing University,  
 Beijing,  
 China.

Please reply to the Director-General  
 Your reference  
 Our reference **D/Met.O.18a/17/3**  
 Date 28 April 1981

---

Translation No. 1519

THE STRUCTURE AND FORMATION PROCESS OF THE MOIST JET STREAM \*

by Tao Zuyu of the Geophysics Department of Peking University. \*\*

Source: Acta Meteorologica Sinica, Vol.38, No.4, December 1980, pp.331-340.

SUMMARY.

Availing ourselves of a comparatively closely-meshed observation network of radio soundings and balloon wind-measurements, we undertook an analysis of the three-dimensional flow-field and humidity-field of a rainstorm process in North China in the summer season, which showed the structure and formation process of the moist jet

图2 英国国家气象图书馆的来函及湿急流译稿的局部

Fig. 2 The copies of the letter from N. S. Harrison, translations office, The National Meteorological Library, UK and the manuscript of the English translation

在天气学和动力气象学中,基本上都是从流体力学的欧拉观点来描述和分析大气运动的,因为在

实际大气中追踪和测量空气块的轨迹几乎是不可能的。但是,近年来中尺度数值模式的发展使得借助

可视化软件来观察模式大气(也可称为虚拟大气)中空气块运动的轨迹成为可能。

1996 年台风贺伯登陆后减弱成的涡旋北上,8 月 5 日给河北带来了特大暴雨。利用 PC-Vis5D 可视化软件<sup>[3]</sup>,可以清楚地展示出中尺度数值模式 MM5 的模拟大气中与暴雨相联系的湿急流<sup>[4]</sup>。如图 3c 所示,在瞬时的三维风场中,位于低层的大风

速区和高空的大风速区在暴雨云团中是上下贯通的,和图 1 非常类似。利用模式输出计算出的湿空气块轨迹(图 3d 和 e 中的彩色飘带)展示出,来自河南的低层湿空气自南向北进入暴雨云团(图中黄色的空间区域),在云团中迅速上升到云团上部(图中红色和绿色的空间区域),然后向东流出。从轨迹飘带在暴雨云团中接近垂直和在高空水平伸展很远,

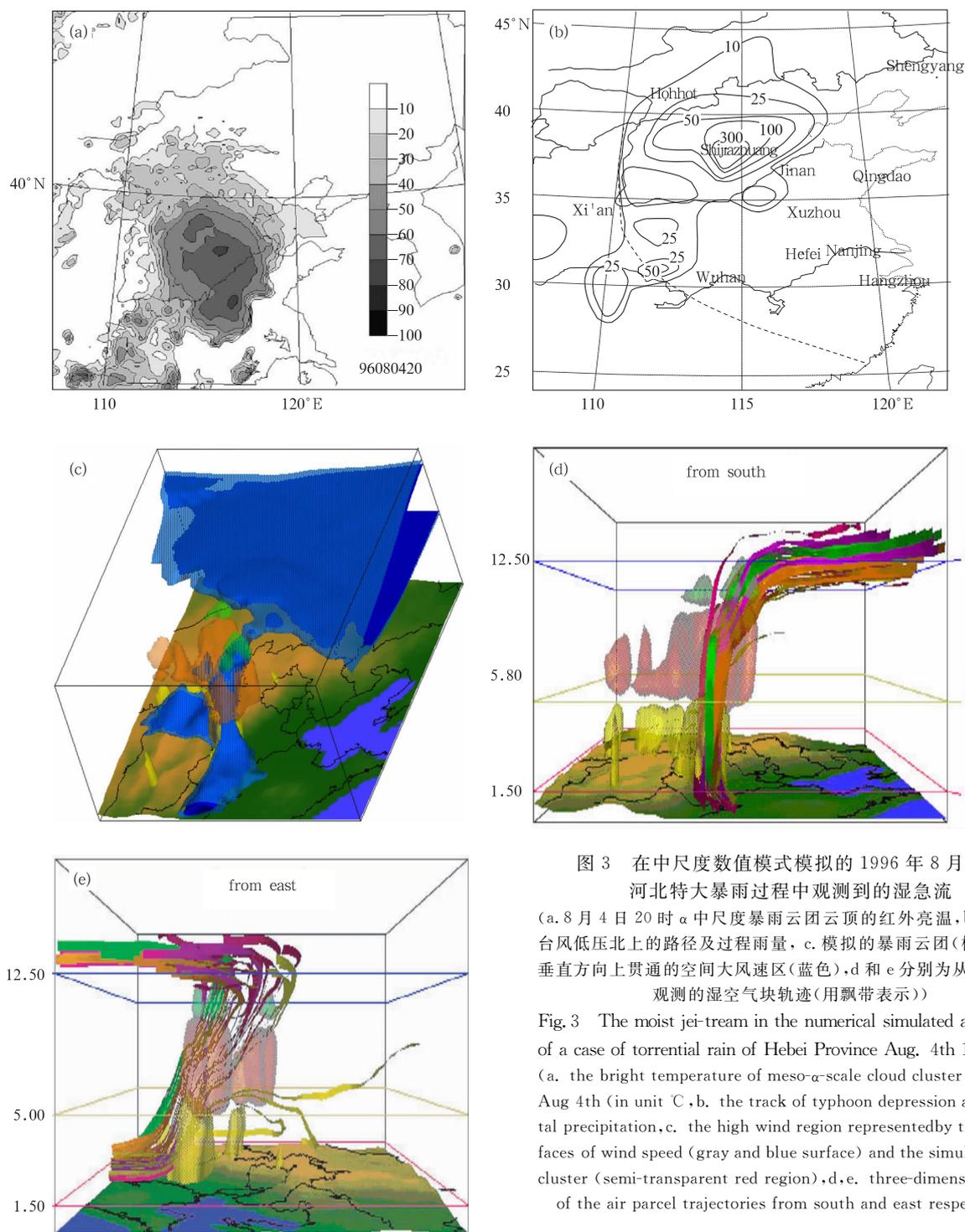


图 3 在中尺度数值模式模拟的 1996 年 8 月 4 日河北特大暴雨过程中观测到的湿急流

(a. 8 月 4 日 20 时  $\alpha$  中尺度暴雨云团云顶的红外亮温, b. 850 hPa 台风低压北上的路径及过程雨量, c. 模拟的暴雨云团(棕色区)和垂直方向上贯通的空间大风速区(蓝色), d 和 e 分别为从南和从东观测的湿空气块轨迹(用飘带表示))

Fig. 3 The moist jet stream in the numerical simulated atmosphere of a case of torrential rain of Hebei Province Aug. 4th 1996 (a. the bright temperature of meso- $\alpha$  scale cloud cluster of 20 BST Aug 4th (in unit  $^{\circ}\text{C}$ , b. the track of typhoon depression and the total precipitation, c. the high wind region represented by the iso-surfaces of wind speed (gray and blue surface) and the simulated cloud cluster (semi-transparent red region), d, e. three-dimensional view of the air parcel trajectories from south and east respectively)

显示出与暴雨相关联的湿空气块的运动速度很快。

图中模式大气中与暴雨相关联的湿空气块的轨迹展示出与湿急流猜想中描述的“湿空气上升、转向和加速”有令人惊讶的相似性。

### 3 湿热成风

与湿急流有关联的另一个概念是所谓的“湿热成风”概念。这个概念的提出是因为在中国夏季暴雨预报的实践中发现,在大范围暴雨区,水平风速的垂直切变远大于热成风关系计算的结果,同时由于温度场非常弱必须用相当位温场来分析锋区。为了

使计算结果更接近观测事实,将热成风方程中的温度  $T$  用假相当位温  $\theta_{se}$  代替,成为湿热成风方程<sup>[5]</sup>:

$$f \frac{\partial v}{\partial p} = -R \frac{p^{k-1}}{p_{00}^k} \left( \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} \right)_p$$

$$f \frac{\partial u}{\partial p} = R \frac{p^{k-1}}{p_{00}^k} \left( \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right)_p$$

它也可以称为湿斜压平衡方程。

在 1977 年湿急流的个例中,暴雨区中温度的南北差异约为  $10^\circ\text{C}$ ,而假相当位温的差异高达  $47^\circ\text{C}$  (图 4)。同时,暴雨区上空的风矢量垂直切变非常大,6000 和 1500 m 高度的风矢量差达到  $40\text{ m/s}$ 。

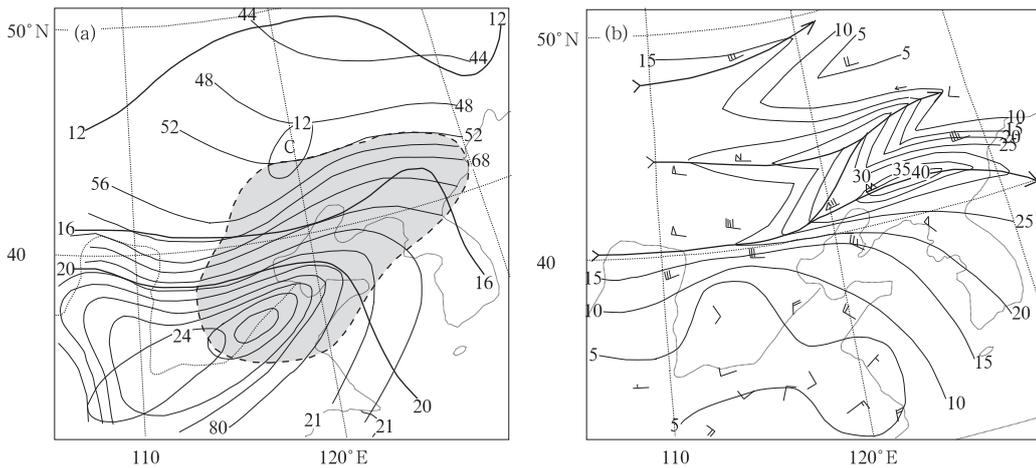


图 4 1977 年 8 月 3 日 08 时 (a) 850 hPa 温度场(粗实线),相当位温场(细实线)和饱和区(阴影区)(b) 高度为 1500 和 6000 m 的风矢量差<sup>[5]</sup>

Fig. 4 The temperature and equivalent potential temperature fields of 850 hPa (a) and the vertical wind shear from 1500 m to 6000 m above sea level (b) of 08 BST Aug 3rd 1977

(The unit of temperature is  $^\circ\text{C}$ , the unit of wind speed is  $\text{m/s}$ )

如果按照热成风公式计算,这两个高度之间的风速差只有  $14\text{ m/s}$ ,远远小于实际观测到的垂直切变。而按照湿热成风公式计算,风速垂直切变可达到  $51\text{ m/s}$ ,比较接近观测数值。

暴雨季节中高空风速远远大于按热成风公式计算出的数值是很常见的。例如在中国最显著的暴雨频繁发生的长江流域梅雨期中,梅雨雨带上方的对流层顶附近通常存在很强的副热带西风急流。虽然梅雨锋和高空急流的垂直配置和锋面结构的概念模型非常相似,但由于梅雨锋两侧的温度对比很小,不能像经典锋面理论那样用热成风关系来解释。图 5 为 2002 年 6 月 27 日 12 时的一个典型的梅雨锋经向垂直剖面<sup>[6]</sup>。图中梅雨锋上方的高空急流非常显著,但梅雨锋两侧的水平温度对比很弱,只有  $5^\circ\text{C}$  左右,很难用热成风关系来解释。但是,梅雨锋两侧相

当位温的水平对比非常显著,达到  $15^\circ\text{C}$  以上,因此如果用湿热成风关系就可以比较好地解释梅雨锋和高空急流的配置关系。

### 4 讨论

地转风公式和热成风公式,都是对处于力(气压梯度力和地转偏向力)的平衡状态下空气运动的描述,即所谓地转平衡运动,只不过后者还结合考虑了垂直方向上的静力平衡。对于数千千米大小的大尺度运动系统,地转平衡只是它的近似,因为在理论上完全的地转平衡运动只能是纯纬向的定常运动,既不随时间改变,也没有空间的不均匀性。在冬季中纬度的大尺度运动系统中,大气运动的非地转部分也可能达到地转平衡部分的  $30\% \sim 50\%$ ,甚至达到同等的量级,例如当存在强烈的斜压发展时(如在爆

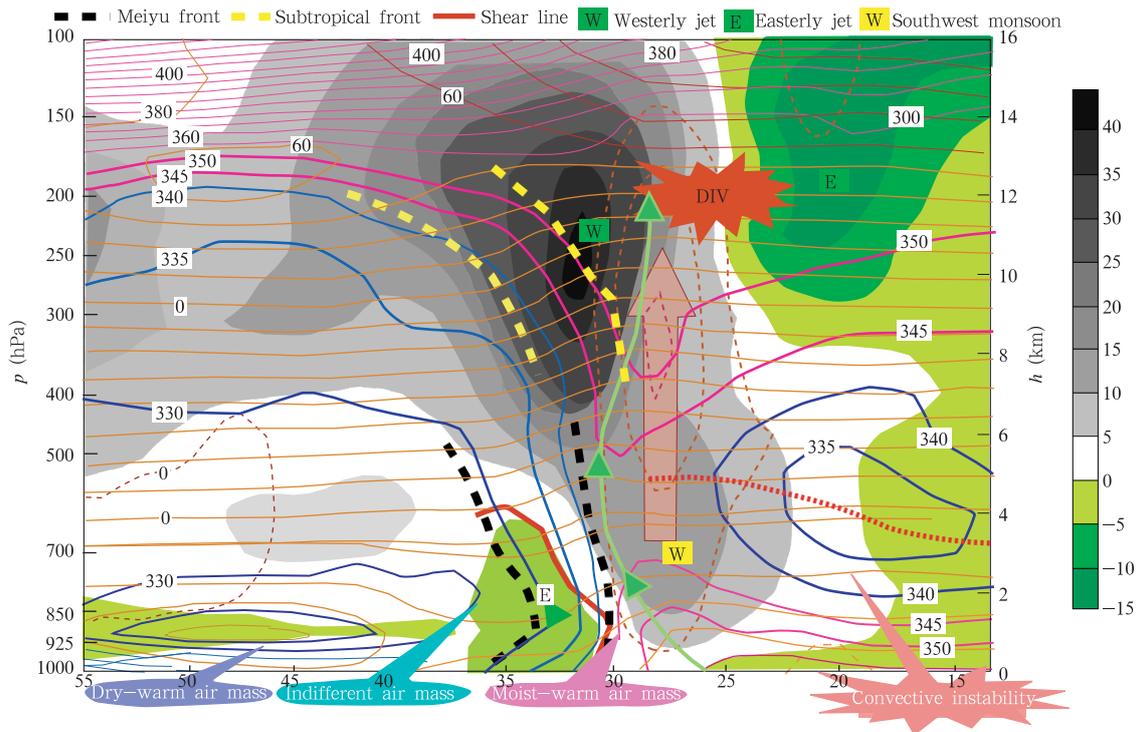


图5 梅雨锋垂直结构模型

(根据 973 梅雨锋暴雨科学试验 2002 年 6 月 27 日 12 时梅雨锋垂直剖面(115°E), 细的红色线为等温线, 间隔为 5 °C; 蓝色和粉色线为等相当位温线, 间隔 5 K; 粗断线为梅雨锋和高空副热带锋; 纬向风速用填色表示; 细虚线为垂直速度, 间隔 2 m/s; 详细说明请参阅文献[6])

Fig. 5 The vertical structure of meiuyu front according to the vertical cross section along 115°E of 12 UTC June 27th 2002 during the field experiment of meiuyu heavy rainfall

(red thin line: temperature in interval 5 °C, blue and pink line: equivalent potential temperature in interval 5 K; double broken lines denote the meiuyu front and the upper level subtropical front; red thick line: boundary between easterlies and westerlies; colure scale: zonal wind speed in unit m/s; broken line: vertical velocity)

发性气旋和强寒潮过程中)。

湿热成风公式虽然也可称为湿斜压平衡方程<sup>[7]</sup>, 但此平衡非彼平衡, 即湿热成风公式并不是对力的平衡状态下的运动的描述, 因为相当位温的水平梯度并不能与气压梯度力随高度的变化联系起来。湿热成风公式所描述的风随高度的变化和相当位温的水平梯度的关系实际上反映了湿斜压大气是高度非地转平衡的, 在发生暴雨的情况下显然这是毫无异议的。

从最初的湿急流的猜想<sup>[1]</sup>中可以发现, 湿热成风方程的所谓“平衡”来自于总能量守恒的观点, 因此湿斜压平衡指的是能量收支的平衡(包括各种不同能量形式之间的转换)。类似的情况早在 1966 年英国就曾有人用总能量守恒的观点来解释行星尺度的高空急流。之所以从能量学的观点提出湿急流的猜想, 一方面是因为在夏季风控制的地区, 尤其是在

大范围强降水区域, 大气是高度非地转的, 在对流性暴雨区内甚至是非静力平衡的, 反映中纬度大尺度运动动力学机理的准地转理论已不再适合; 另一方面是因为对于直接产生暴雨的环流系统是生命史短、变化快的中尺度对流系统, 20 世纪 80 年代初国外已经大量采用数值模拟方法进行研究, 但由于历史的原因, 中国在这方面的工作还处于萌芽状态刚刚起步, 对中尺度的了解甚少, 甚至连“中尺度”的名词也还未得到普遍使用(如有时被称为“中间尺度”, 有时被称为“次天气尺度”), 因此不得不借用大尺度动力学的一些概念或名词。

随着中尺度数值模式的引进和在暴雨研究中的大量使用(如 MM4 和 MM5), 使得揭示暴雨过程中湿空气的上升、加速和转向成为可能。从图 6 所给出的陈受钧等<sup>[8]</sup>对 1991 年 6 月 12~13 日梅雨锋上的一次暴雨过程数值模拟得到的空气质点轨迹图可

以清楚地看到,暖湿的空气块  $W_1$  和  $W_2$  是如何在进入对流云团后加速上升的。文中同时还指出了气压梯度力对湿空气块也有加速作用,低层指向中尺度低压的向心的气压梯度力使流入的湿空气块加速并形成低空急流,高层向外的气压梯度力使降水后的湿空气块在高空转向和流出。图 6 中所附的一张中尺度对流云团的高分辨率的 MODIS 可见光云图(图 6d)和陈受钧提出的概念模型非常相似,它也可以说明,在暴雨过程中,气压梯度力对低空流入气流

和高层流出气流的加速是中尺度对流系统的基本动力学特征,而这一点是谢义炳在当初湿急流猜想中所没有考虑到的。

张庆红对 1998 年海峡两岸暴雨科学试验中 6 月 7~8 日发生在台湾海峡的一个暴雨云团利用数值模拟的结果对动量收支进行了具体的计算<sup>[9]</sup>,结果表明,在低空和高空,气压梯度力都有使水平动量增加的作用,并且存在水平动量从低空向高空的传输(图 7)。

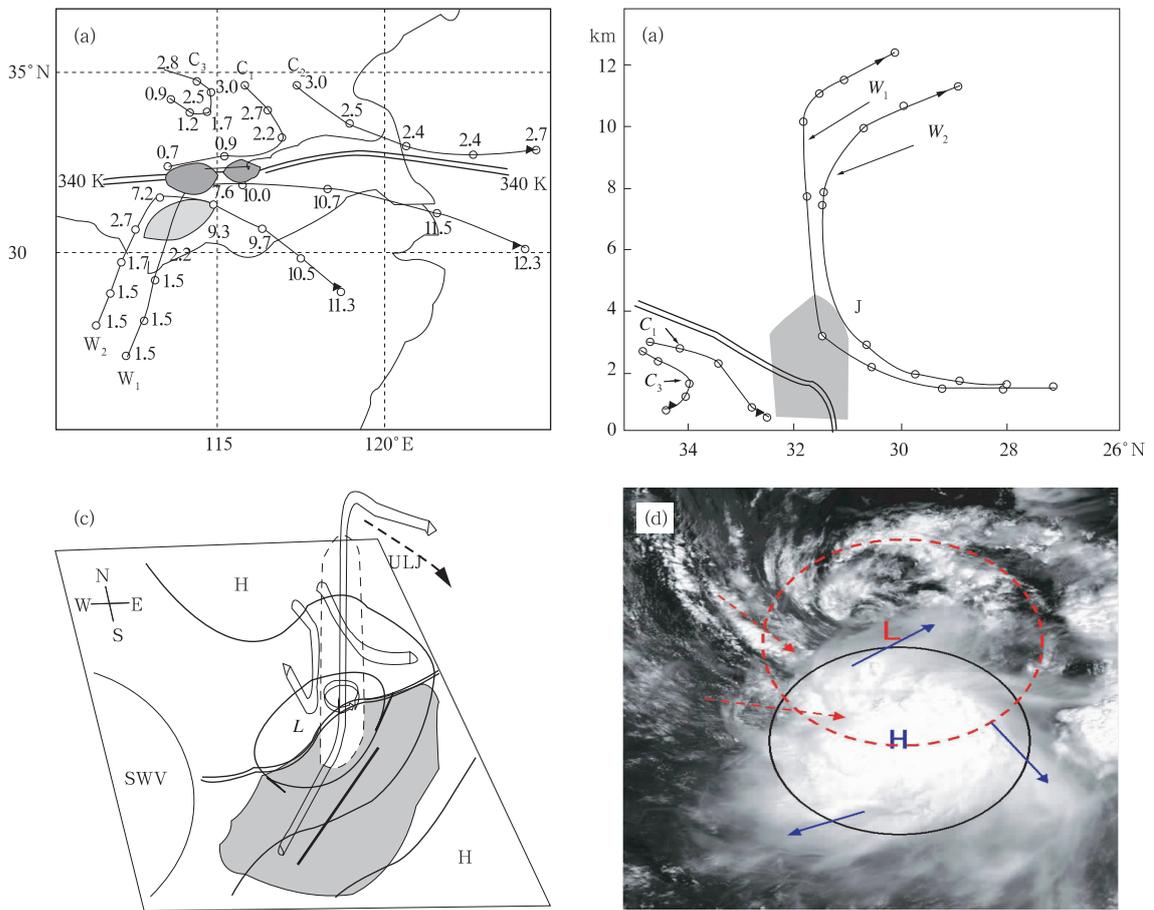


图 6 数值模拟大气中 1991 年 6 月 13 日梅雨中尺度对流云团(或 MCS)中的暖湿空气块( $W_1$  和  $W_2$ )和冷空气块( $C_1, C_2$  和  $C_3$ )运动的 24 h 三维轨迹及高(低)空流出(入)暴雨云团的气流的概念模型(图中每隔 3 h 给出一次气块的位置,标注的数字为气块的高度(km)。右下角的云图为 MODIS 可见光图像,分辨率为 250 m,云图上标注的箭头和圆为云图特征所反映的中尺度对流云团的高低空气流和中尺度高压和低压)

Fig. 6 (a) Two groups of forward trajectories from  $t=0$  h to 24 h; one from the warm and moist air mass— $W_1$  and  $W_2$ ; other from the cold and dry air mass— $C_1, C_2$  and  $C_3$ . Vertical position of parcels (bold, in km) are indicated every 3 h (6 h) along the warm (cold) trajectories. Rainstorms are stippled. (b) Trajectories on  $y-z$  plane. Double line depicts  $\theta_e=340$  K surface (representing the southern boundary of Mei-Yu front), shaded area indicates the rainwater greater than 0.4 g/kg. (c) Schematic diagram of meso- $\alpha$ -scale low and associated rainstorm (see [8] for details). (d) Visible image of MODIS produced by the National Center of Meteorological Satellite (Circles and arrows represent meso-low, meso-high, inflow and outflow in low level and upper level, respectively)

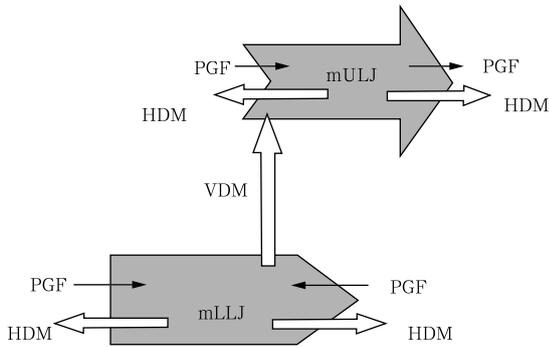


图 7 中尺度对流系统(MCS)中中尺度低空急流(mLLJ)和中尺度高空急流(mULJ)的动量收支示意图<sup>[9]</sup>  
(HDM 为动量的水平散度项, VDM 为动量的垂直散度项, PGF 为气压梯度力强迫项)

Fig. 7 Comprehensive schematic diagram of momentum budgets of mLLJ and mULJ in MCS<sup>[9]</sup>

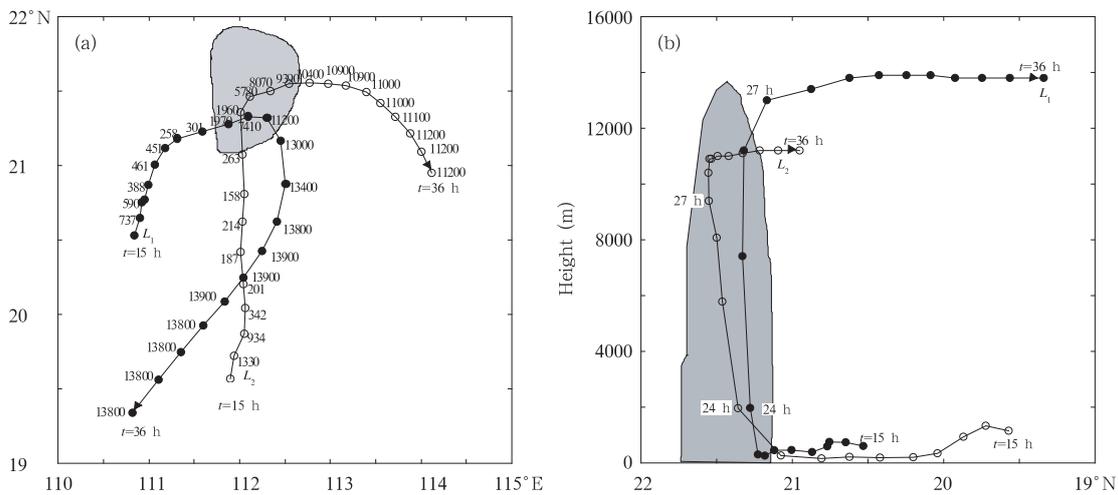


图 8 1998 年 5 月 23 日广东沿海暴雨云团数值模拟中的两个暖湿空气块(L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub>)运动的三维轨迹  
(每一小时给出一个气块位置, 数字为气块的高度, 单位为 m.)

Fig. 8 Trajectories from moist and warm air mass of rainstorm on coaster region of southern China May 23 1998  
(vertical position of parcels (in m) are indicated every 1 h)

## 5 总 结

上面对湿急流研究的回顾和讨论可概括为以下几点:

(1) 湿急流最初是谢义炳在长达 10 a 的文革动乱结束后不久提出的一个科学猜想, 虽然它是建立在 20 世纪 60 年代常规天气分析和暴雨预报经验的基础上, 但近年来的最新研究成果, 特别是中尺度数值模拟, 显示出当年提出湿急流猜想时所具有的科学洞察力。

(2) 近年的暴雨数值模拟研究表明, 暴雨区中不仅在三维风场上存在将低空急流和高空急流

在 1998 年 5 月 23 日的数值模拟中, 陈敏<sup>[10]</sup>所获得的湿空气块轨迹(图 8)和陈受钧的结果非常相似。从图中所给出的气块每小时的高度可见, 从西南方进入雨团的湿空气块(L<sub>1</sub>)在雨团内从 1020 m 上升到 11200 m, 历经 2 h, 平均垂直速度达到 1.28 m/s。这样大的垂直速度虽然已经足以产生暴雨, 但是就动量而言, 它比水平风速要小 1 个量级。后来张庆红在对 1998 年 7 月湖北特大暴雨的数值模拟中使用了高达 1 km 的水平分辨率, 暴雨区中的垂直速度达到 8 m/s<sup>[11]</sup>。它表明在对流性强降水中, 垂直方向的动量有可能达到与水平动量的量级相接近。

在垂直方向上连接起来的湿急流, 而且进一步揭示了湿空气块在暴雨云团中的上升、加速和转向的轨迹。但是, 动量收支计算表明, 湿空气块的加速并不仅仅是由于湿绝热上升过程中浮力的作用使气块的动量增加, 水平气压梯度力对气块动量的增加也有贡献。

(3) 与湿急流相关联的湿斜压平衡方程(即湿热成风方程), 其物理含义不是指运动和力的平衡, 而是指包括潜热在内的总能量的平衡, 或称总能量守恒。谢义炳先生生前常说, 能量学方法只能计算收支帐, 它不能揭示过程是如何进行的, 例如一个钢球(重物)以自由落体方式降落 1 m 和沿滑道降落

1 m, 在没有摩擦的条件下, 这两种情况的能量平衡是相同的。

(4) 最初的湿急流和湿热成风都是根据常规天气图提出的, 因此在空间尺度概念上应该适用于天气尺度。但本文介绍的数值模拟结果都是从中尺度暴雨两个例中得到的(刘伟的个例是  $\alpha$  中尺度, 陈受钧、陈敏、张庆红的个例是  $\beta$  中尺度), 相关联的高、低空急流也是中尺度的(mHLJ 和 mLLJ)。近年来的暴雨研究已充分表明, 暴雨系统具有多尺度结构, 其空间尺度跨越 3~4 个数量级, 因此暴雨过程中存在复杂的多尺度之间的相互作用。湿热成风这一天气分析的事实应该是多尺度相互作用的产物。湿斜压平衡方程虽然能够近似地反映暴雨区中风的垂直切变, 但完全不能反映复杂的多尺度相互作用的动力学。近年来虽然也时有看到关于包含水汽相变的湿空气动力学(或湿斜压动力学)方面的理论研究, 但恐怕具有完善物理过程的高分辨率的数值模式才是揭示暴雨中动力学和热力学过程最有效的方法。

## 参考文献

- [1] 谢义炳. 湿斜压大气的天气动力学问题. 见: 暴雨文集编委会. 暴雨文集. 长春: 吉林人民出版社, 1978. 1~15  
(注: 此文的内容于 1984 年发表在 *Advances in Atmospheric Sciences*, 1984, 1(2): 141~149, 题目为 *Observational and theoretical studies of the moist baroclinic atmosphere*)  
Xie Yibing. On the synoptic and dynamic meteorology of moist atmosphere. In: *Collections of Heavy Rainfall*. Changchun: People's Press of Jilin, 1978. 1-15
- [2] 陶祖钰. 湿急流的结构和形成过程. *气象学报*, 1980, 38(4): 331~340  
Tao Zuyu. The structure and formation of the moist jet stream. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 1980, 38(4): 331-340
- [3] 王洪庆, 张炎, 郑永光等. 气象信息科学视算环境及其若干问题. *气象学报*, 2004, 62(5): 708~713  
Wang Hongqing, Zhang Yan, Zheng Yongguang, et al. Meteorological data visualization system. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2004, 62(5): 708-713
- [4] 刘伟, 张庆红. 登陆台风中的中尺度对流系统的数值研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(1): 73~79  
Liu Wei, Zhang Qinghong. Numerical study of the mesoscale convective systems in landing typhoon Herb. *Acta Sci Natura Uni Pek (in Chinese)*, 2004, 40(1): 73-79
- [5] 陶祖钰. 关于湿平衡方程(湿热成风方程)的计算. 见北方天气文集(5). 北京: 北京大学出版社, 1984, 133~137  
Tao Zuyu. A calculation about the moist balanced equation (the moist thermal wind equation). *Weather in North China (5)*. Beijing: Press of Peking University, 1984. 133-137
- [6] 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究. 见: 倪允琪, 周秀骥主编. 我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究(一). 北京: 气象出版社, 2004. 31~43  
Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. Study on mechanism of formation and development of heavy rainfalls on meiyu front in Yangtze River. In: Ni Yuqi, Zhou Xiuji. eds. *Study of Formation Mechanism and Prediction Theory of Main Disastrous Weather in China (1)*. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 31-43
- [7] 谢义炳. 读者来信. *气象学报*, 1983, 41(3): 382~384  
Xie Yibing. Letters from reader. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 1983, 41(3): 382-384
- [8] Chen ShouJun, Kuo YingHwa, Wang Wei, et al. A modeling case study of heavy rainstorms along the meiyu front. *Mon Wea Rev*, 1998, 126: 2330-2351
- [9] Zheng Q H, Lau K H, Kuo Y H, et al. A numerical study of a mesoscale convective system over the Taiwan Strait. *Mon Wea Rev*, 2003, 131: 1150-1170
- [10] 陈敏, 郑永光, 王洪庆等. 一次强降水过程的中尺度对流系统模拟研究. *气象学报*, 2005, 63(3): 313~324  
Chen Min, Zheng Yongguang, Wang Hongqing, et al. Numerical simulation study on MCS of a heavy rainfall process in south China. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2005, 63(3): 313-324
- [11] 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究. 见: 倪允琪, 周秀骥主编. 我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究(一). 北京: 气象出版社, 2004, 247~266  
Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. Study on mechanism of formation and development of heavy rainfalls on meiyu front in Yangtze River. In: Ni Yuqi, Zhou Xiuji. eds. *Study of Formation Mechanism and Prediction Theory of Main Disastrous Weather in China (1)*. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 247-266

## DISCUSSION ON HEAVY RAINFALL AND MOIST JET STREAM

Tao Zuyu

*(Department of Atmospheric Science, Peking University, Beijing 100871)*

Liu Wei

*(Weather Center, Northeast Air Traffic Administration Bureau, Shenyang 110169)*

### Abstract

The moist jet stream is a scientific imagination supposed by Y. B. Xie (i. e. Y. P. Hsieh) based on his long time research work of precipitation of China and animated by the static energetic method of heavy rainfall prediction supposed by Y. S. Lei. In recent year, a couple of meso-scale numerical simulations of heavy rainfall support the presence of the moist jet stream, which links the low level jet and the upper level jet in the heavy rainfall region. Using the modern visualization technology, trajectories of moist air parcels rising, acceleration and turning could be displayed on the computer screen. But, the calculation of momentum budget shows that the increasing of momentum caused not only by the buoyancy force, but also by the horizontal pressure gradient force on meso-scale.

The moist baroclinic balance equation (i. e. moist thermal wind equation) was discussed, which indicated that the total energy conservation can not reveal the conversions between different energy forms. Since the process of heavy rainfall is highly non-geostrophic balance, also non-hydrostatic balance, and being multi-scale interactions, the numerical model with with fine resolution and complete physic processes is the most powerful tool for heavy rainfall research.

**Key words:** Heavy rainfall, Jet stream, Numerical simulation, Dynamics of moist atmosphere.