

# 湿急流的结构及形成过程\*

陶祖钰\*\*

(北京大学地球物理系)

## 提 要

利用比较稠密的无线电探空和气球测风观测网,通过对华北夏季一次暴雨过程的三维流场和湿度场的分析,揭示了湿急流的结构和形成过程。湿急流是指低层空气在湿不稳定大气的上升过程中,不断加速形成一支斜穿整个对流层的自下而上的急流。在湿急流附近,凝结饱和区的分布和发展过程,似乎表明水汽在急流形成过程中起了一种主动作用。湿急流在对流层顶附近和副热带急流合併,并使副热带急流的动能增加。这似乎启示,湿斜压过程可能是大气环流中的基本过程之一。

## 一、引 言

大量的研究表明,我国夏季的暴雨虽然也有的是由锋面活动所引起,但这种锋面两侧的温度对比与经典的锋面模式相比是微不足道的,不足以造成产生暴雨所要求的强盛的垂直气流。我国夏季产生暴雨的原因应从大气的湿斜压过程中去寻找。1978年谢义炳在“湿斜压大气的天气动力学”<sup>[1]</sup>一文中指出:“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。”本文的目的只是从对实际资料进行天气学事实分析,以揭示湿急流的结构和形成过程。

## 二、湿急流的结构

1977年8月2日在华北地区发生一次大暴雨过程,50毫米以上的暴雨区包括了河北省的北部和辽宁省的南部,最大日降水量达200毫米以上。这次大暴雨是由对流层低层从西北高原有一低涡东移到华北引起的(图1)。与此低涡相配合的高空槽和地面气旋十分微弱,直到3日20时暴雨基本结束后,地面气旋才发展得比较完整。这次暴雨过程具有我国纬度较低的季风地区夏季暴雨的典型特点。利用105°E以东,32°N以北的我国70多个探空和测风站的记录,并参考部分国外记录,分析了从地面直到15公里高空共十三层不同高度的水平风场,发现高空急流和低空急流是互相联结的,而风场的这种结构又是和饱和凝结区相配合的。

图2(a-d)给出暴雨时(8月2日20时)3公里,5公里,8公里及12公里高度上的水平风场及其附近等压面(700,500,400,200毫巴)上的湿度场(温度露点差)。3公里高度的风场代表对流层低层的流场,它由三支气流组成:华北北部的偏东气流;西北地区的偏北气流和华北南部的西南气流,它们构成一个完整的低涡环流,中心在内蒙古自

\* 本文于1979年9月19日收到,于1979年12月6日收到修改稿。

\*\* 参加本工作的有陆光明、陈振华、张玖良。

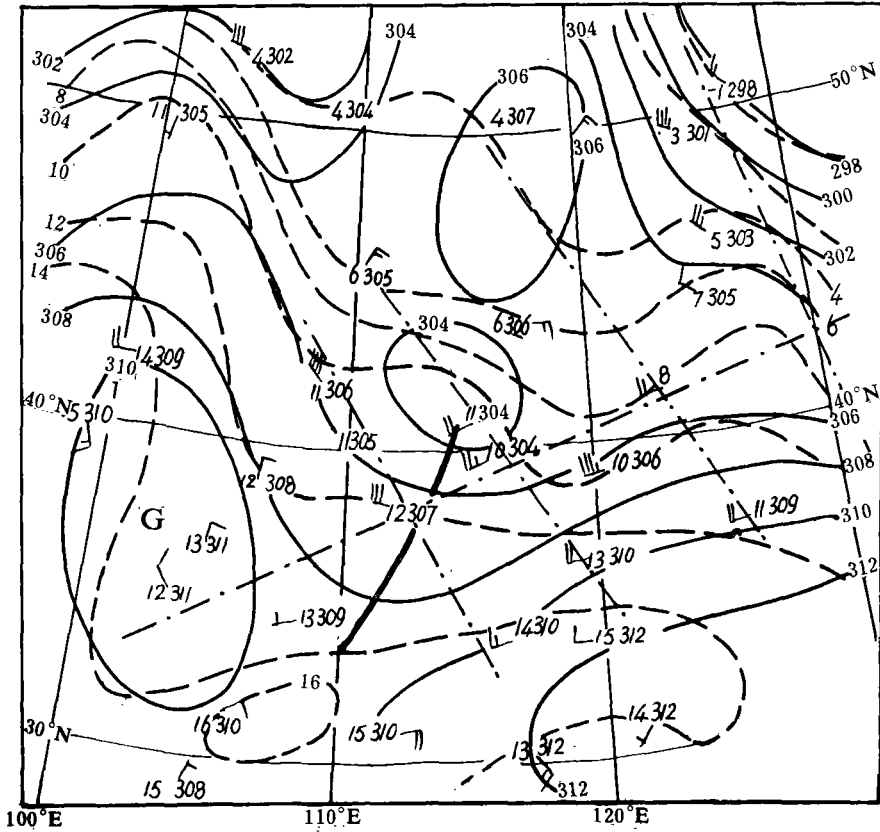


图 1 1977年 8月 2日 20时 700 毫巴图  
 (实线为等高线; 虚线为等温线; 点划线为剖面基线; 图中 306 闭  
 合线的中心为 G, 304 闭合线中心为 D, 16°C 闭合线中心为 N)

治区附近。我们感兴趣的是华北南部的西南气流随高度的变化。在对流层中部 5 公里的高度上, 低涡北侧的偏东气流已不复存在, 表现为由一支西北气流和一支西南气流构成的西风带的波动。值得注意的是, 位于 3 公里高度上的西南气流中心由河北、山西中部向东北方伸展到河北东北部及渤海; 在 8 公里高度上, 这支西南气流又进一步伸展到辽宁北部和吉林南部, 最大风速中心已由 17 米/秒急剧增大到 41 米/秒, 并和北面的副热带急流的强风带已相当接近; 在 12 公里高度上, 这两支气流已在 130° E 附近合并, 形成了对流层顶部的最大风速中心, 即副热带西风急流上的急流核, 风速达 60 米/秒以上。

还需指出, 流场的这种结构和饱和凝结区有明显的联系。一般空气中的温度露点差小于 4°C 时空气就被认为已经达到饱和并表示气球已进入云中。从图 2 可以清楚地看到, 西南气流基本上位于饱和凝结区(图中阴影区)中。西南气流随高度升高向东北方向伸展的同时, 饱和凝结区也同样随高度增高并向东北方伸展。我们把这支从山西中部 2—3 公里高度(离地表面的实际距离约为 1—2 公里, 也就是接近行星边界层的顶部)的低空向东北方向向上延伸到吉林省东部的对流层顶, 并且风速随高度不断增大的这支饱和的西南急流称为湿急流。

为了得到湿急流的三维结构, 作了沿湿急流轴及与之正交的若干风速剖面图(图 3

和图 4)。从图 3 中可以看到,在高空槽前,有一最大的西南风速中心。从太原附近 2—3 公里的低空沿气流方向不断向东北方向逐渐向上伸展和加强。在北京上空约位于 5—6 公里高度;在沈阳上空约在 8—9 公里;最后在延吉上空则到达 12—13 公里左右,并和位于  $40^{\circ}\text{N}$  以北的 12—14 公里高度上的副热带急流合并。整个西南风的轴线几乎都在饱和凝结区中。在 4—8 公里之间,湿急流轴的下方恰好就是降水区。雨区的存在可以作为在此区段内盛行上升运动的证明。而上升运动的存在,也可以说明湿急流在此区段内,风速随高度迅速增大的原因。湿急流从下向上斜穿过整个对流层,把低空急流和高空急流联结起来,这在图 4 (a-d) 上也有极为清楚的反映。

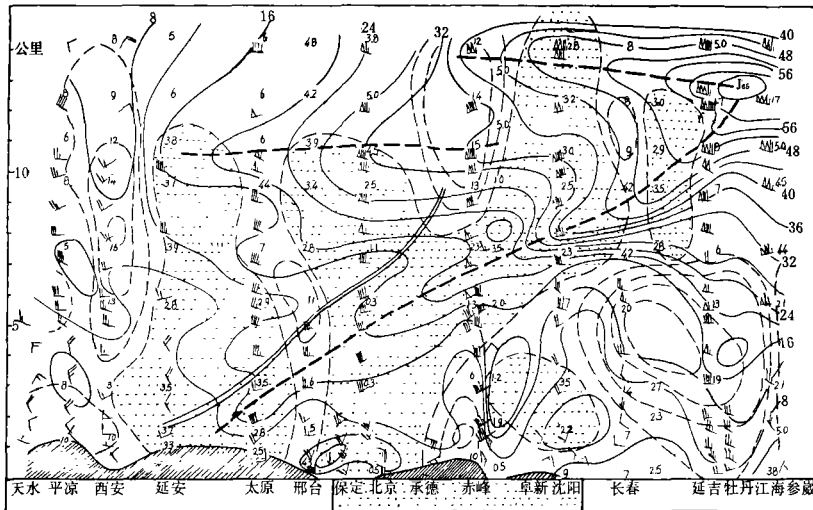
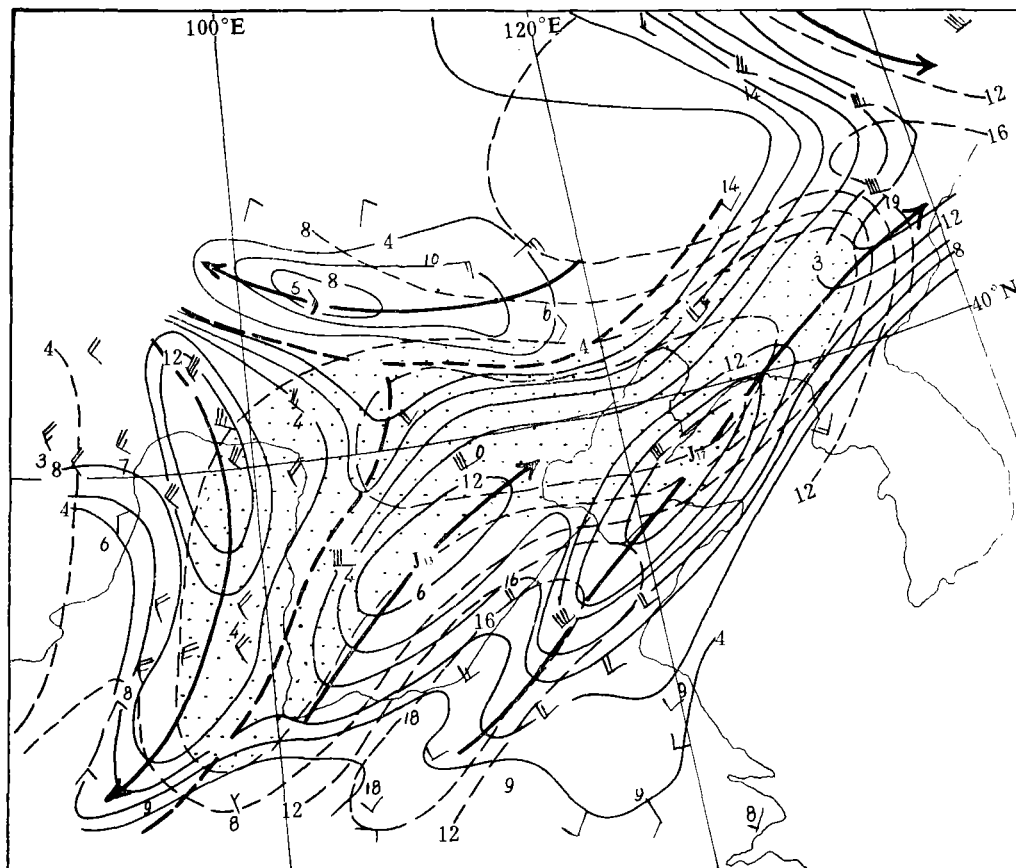


图 3 沿湿急流轴的风速垂直剖面

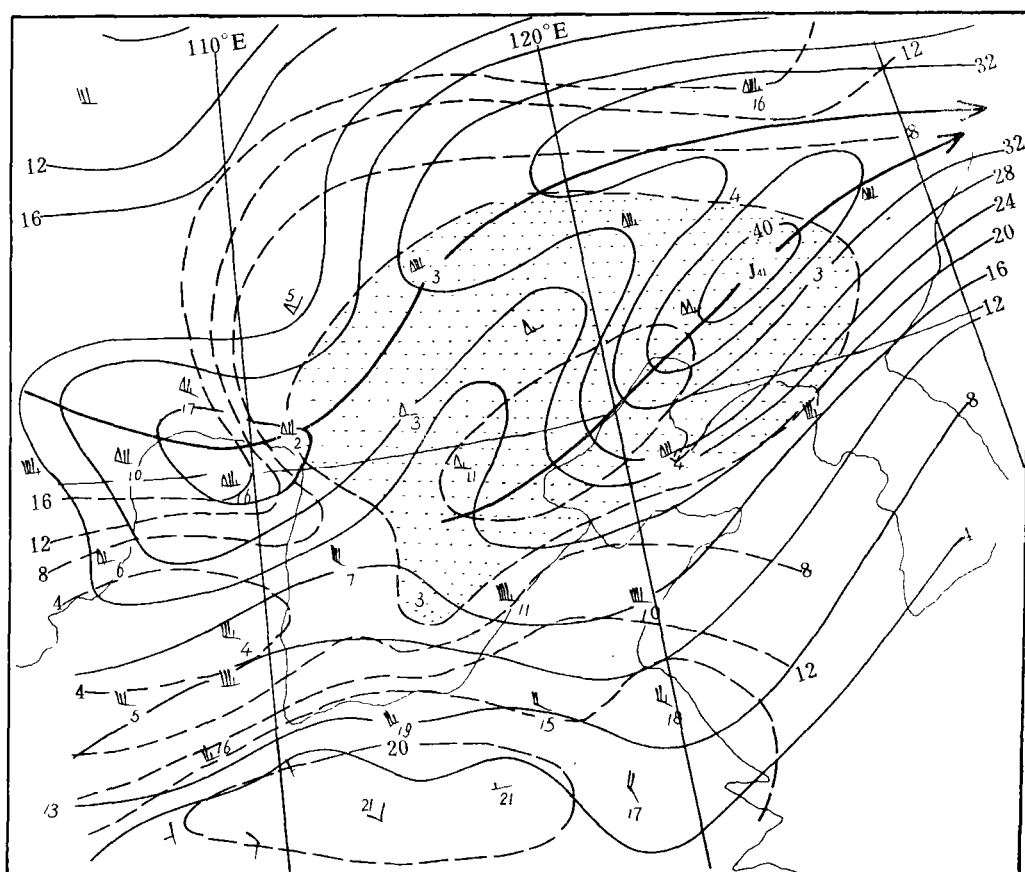
(粗虚线为急流轴; 双线为槽线; 阴影区为饱和凝结区; 剖面基线下方的阴影区为雨区范围; 其他同图 2)

根据前面的分析,可以把 8 月 2 日 20 时的全部资料综合成一张湿急流的三维空间图形(图 5)。湿急流从饱和凝结区南侧的低层斜穿入饱和凝结区并不断上升,在 10 公里左右高空从饱和凝结区的北侧穿出,最后和位于 12 公里左右高空的副热带急流合并。在此过程中,风速由 13 米/秒增大到 60 米/秒以上。和湿急流相伴随的饱和凝结区的空间形状有似一个上、下两头小,中间大的纺锤形。这一形状可以从云图上表现出来的高空槽前的盾状云系得到印证。饱和凝结区的纺锤形很可能和湿急流附近存在的垂直环流圈有关。由于湿急流的风速是超地转的,在湿急流主要上升区段的下方,应存在一个反环流圈,它将加强或诱生出低空的偏南急流。在图 3 和图 4 a 中沿安阳到邢台一线,有一支风速达 13 米/秒的行星边界层内的偏南急流,这在 0.5 公里和 1.0 公里高度的水平流场图上可以清楚地看到(图略),这支行星边界层内的偏南急流和高空的湿急流形成一个交角,暴雨区就位于这两支急流之间。行星边界层急流所输送的水汽补充到湿急流中,扩大了对流层中部饱和凝结区的范围。在更高的高度上,由于水汽扩散使饱和凝结区逐渐缩小。整个湿急流从 3 公里上升到 12 公里,水平行程达 1500 公里,湿急流轴的斜率约为 1:170,接近于暖锋的坡度。

图 5 中给出的纺锤状饱和凝结区在 3 公里高度上有一向东北方突出的部分,它可能

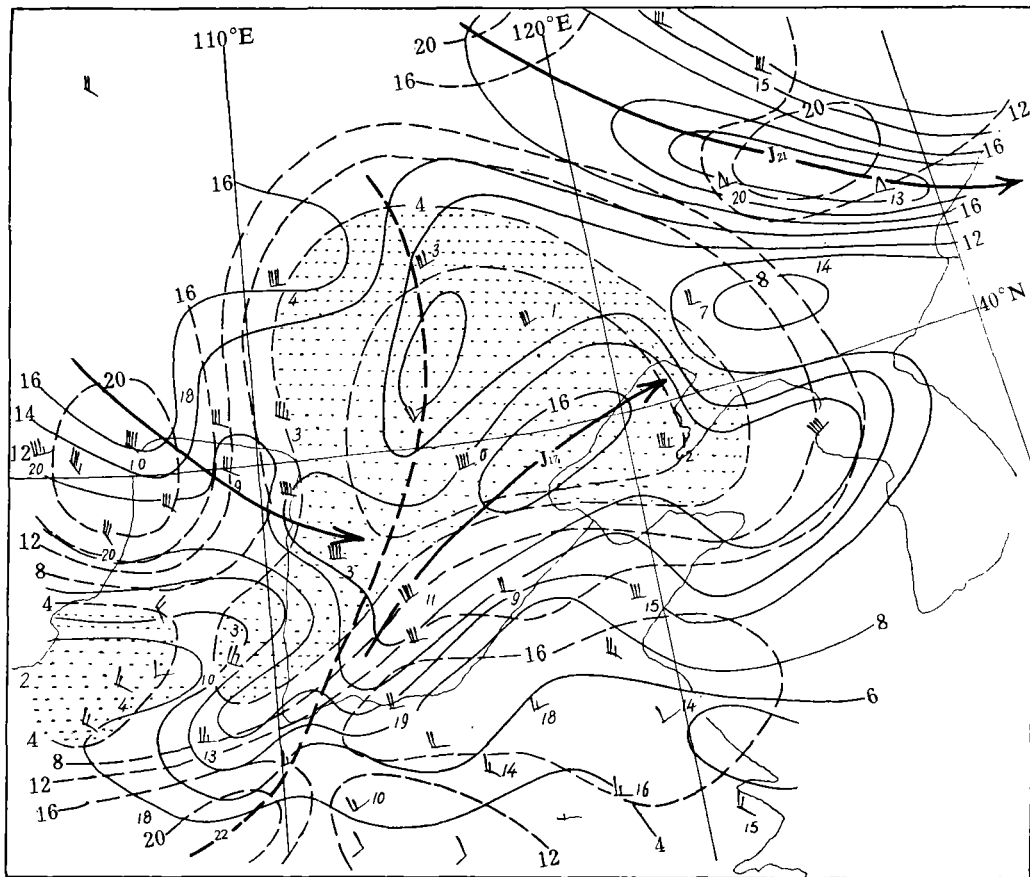


2 a 3公里

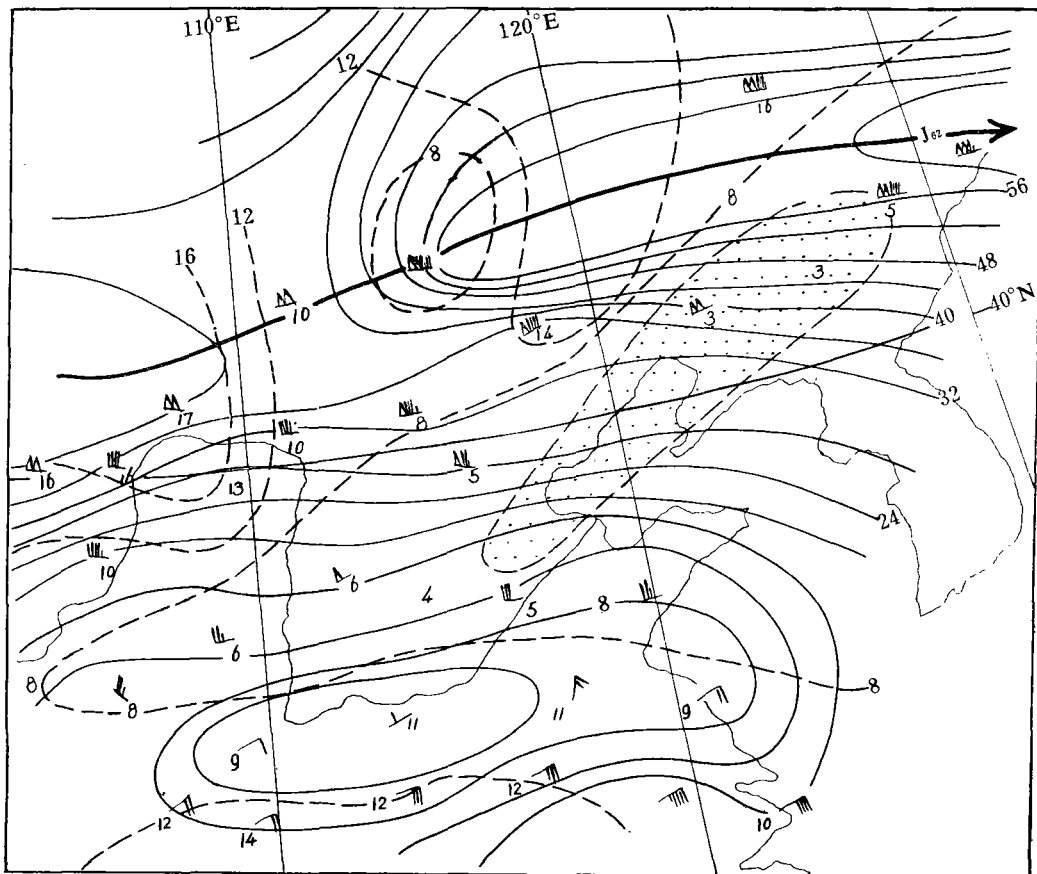


2 c 8公里

图 2 1977年8月2日 20时 3, 5,  
 (细实线为等风速线(单位:米/秒);细虚线为等温度露点差线(单位:°C);粗实线表示主

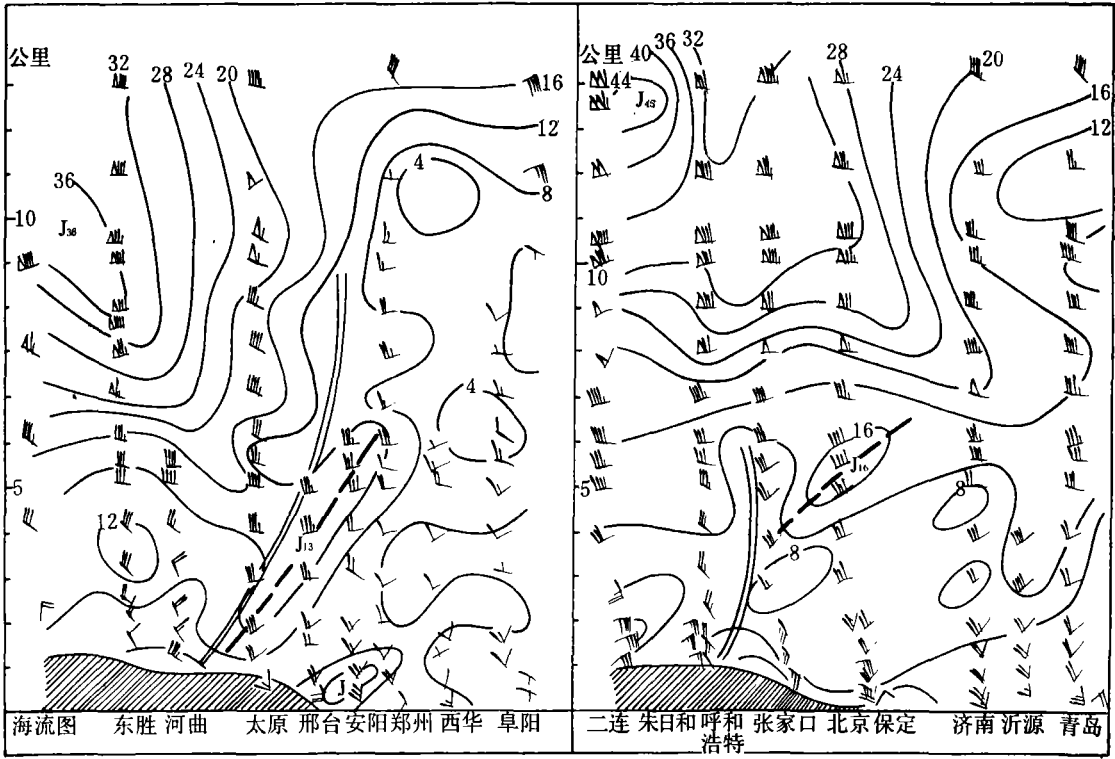


2b 5公里



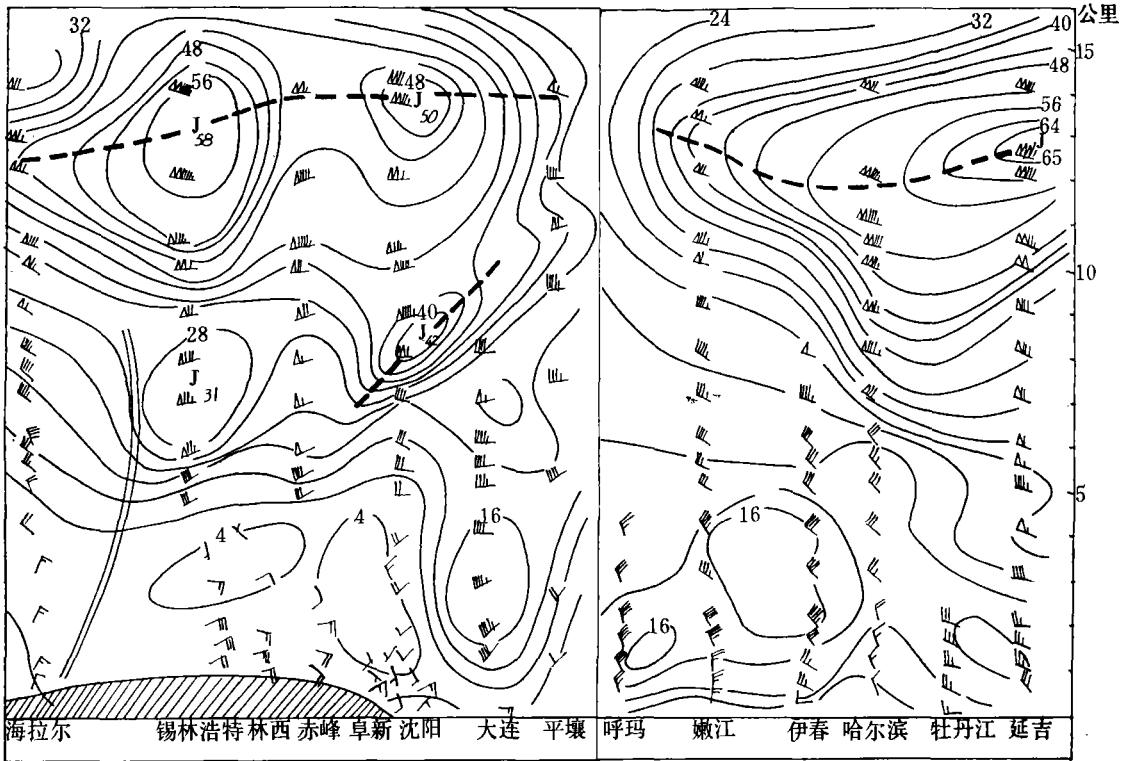
2d 12公里

8, 12公里高度的风场和湿度场  
 要气流的最大风速轴线;粗虚线为槽线或切变线;阴影区为温度露点差小于 $4^{\circ}\text{C}$ 的饱和区)



a

b



c

d

图 4 与湿急流轴正交的风速剖面图  
(说明同图 3)

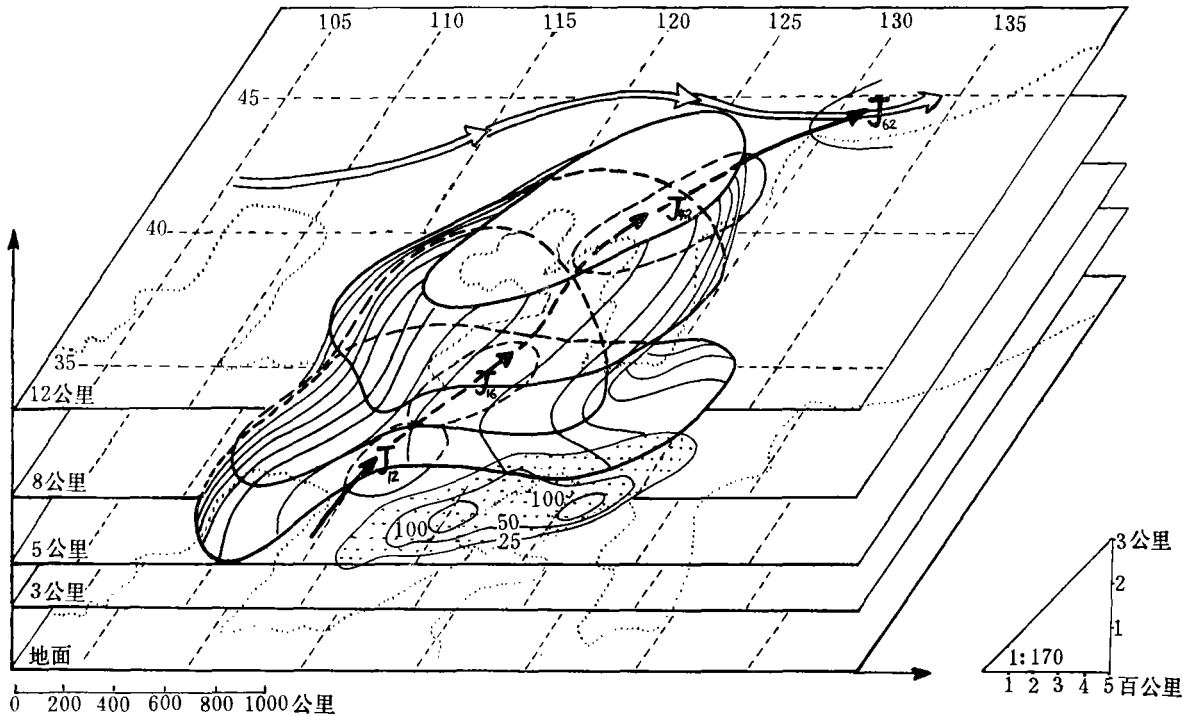


图 5 湿急流的三维空间结构

(粗实线为湿急流轴(虚线部分位于饱和凝结区内), 双矢线为副热带急流轴, 粗实线和虚线为各高度上饱和凝结区的边界, 饱和凝结区的形状用许多细曲线表示。图的最下一层给出 2 日 08 时到 3 日 08 时的 24 小时降水量分布(毫米), 整个降水区用阴影表示)

和位于主要湿急流东侧而存在的另一支西南急流有关。这是一支尚未发展成成熟的湿急流, 它在 5 公里以上就不再存在了(图 2)。而 12 小时后, 这支西南气流就发展成了 3 日 08 时的一支成熟的湿急流。

### 三、湿急流的形成过程

为了弄清楚湿急流的形成过程, 我们还分析了 1 日 20 时, 2 日 08 时和 3 日 08 时各高度的流场。这里仅给出各时次各高度上急流的综合动态图(图 6)和沿急流轴的风速垂直剖面图(图 7)。在图 6 中可以看到, 1 日 20 时 3 公里和 5 公里高度上的西南气流很弱(不超过 10 米/秒), 没有随高度增加而向东北方伸展的趋势。在 8 公里高度上, 已不存在西南气流。2 日 08 时, 3 公里高度上的西南气流已东移到延安、西安之间, 在 5 公里高度上已向东北伸展到太原、邢台一线, 但还没有伸展到对流层上部。如前所述, 2 日 20 时, 这支西南气流已发展成为一支直达 12 公里高空并与副热带急流相联结的湿急流。3 日 08 时的湿急流也十分完整, 只是位置向东移到青岛、大连、延吉一线。它可能是由 2 日 20 时 5 公里以下位于大连附近的那支西南气流发展而成的。比较图 6 中 12 公里高度上副热带急流的强度, 可以看出, 当没有湿急流注入副热带急流时, 它的强度只有 50 米/秒左右, 比有湿急流注入时大约小 10 米/秒。

湿急流的形成过程, 在图 7 所给的沿急流轴的风速垂直剖面图上也可以清楚地看

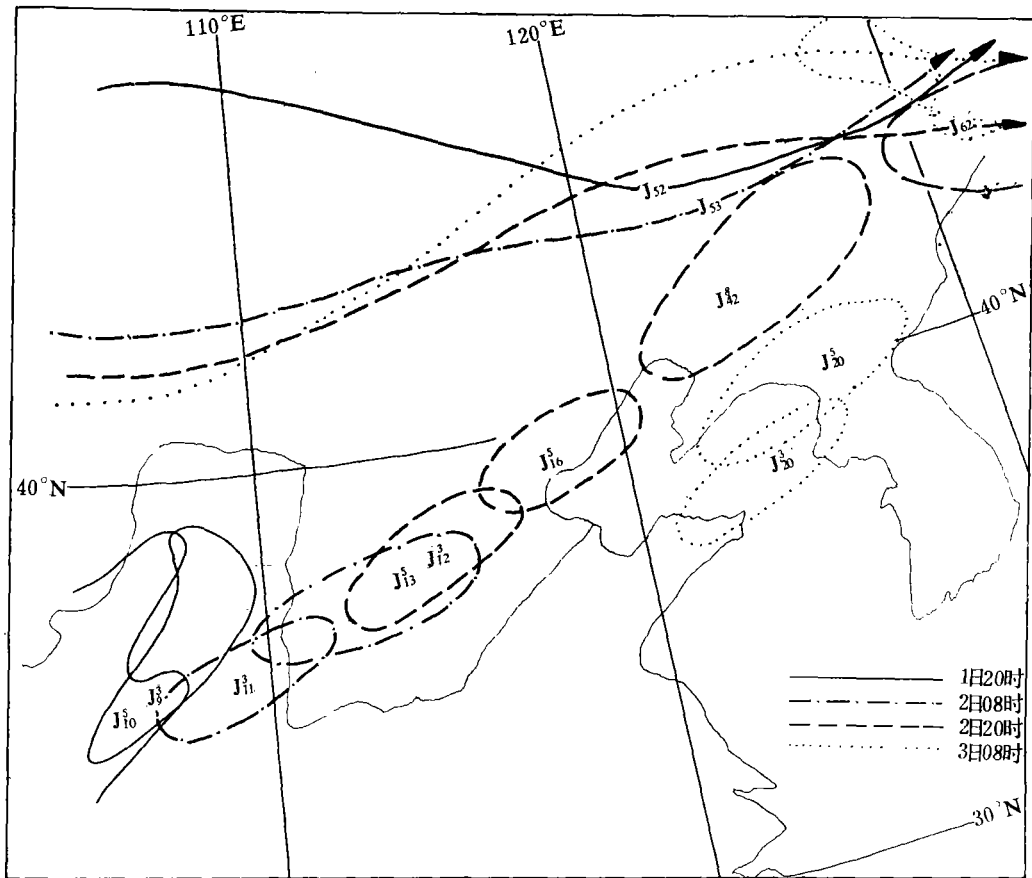


图 6 8月1日20时到3日08时各高度上西南气流的综合动态图  
(J为急流中心,下标为最大风速(米/秒),上标为所在高度(公里);矢线均为12公里高度上的急流轴)

到。在图7(a-b)中,西南急流仅存在于对流层的下部,没有和副热带急流相联,在图3和图7c中,已成为一支将对流层低层和高层联结在一起的湿急流。除此而外,在图7中还可以看到,湿急流的发展是和饱和凝结区的发展相联系的事实。在湿急流形成前,1日20时和2日08时没有连贯的从对流层低层直到对流层顶的凝结饱和区;在湿急流形成后,无论是2日20时还是3日08时,在湿急流周围都有占据整个对流层的饱和凝结区。

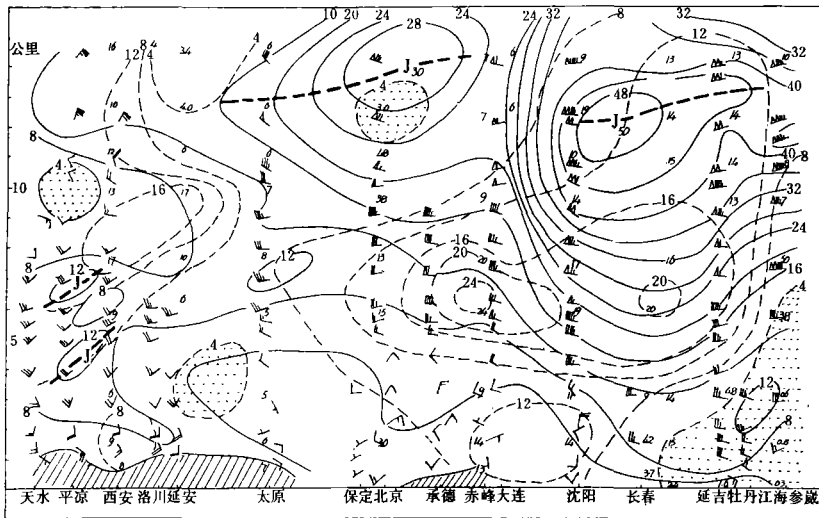
#### 四、几点讨论

通过上面分析可以得到:

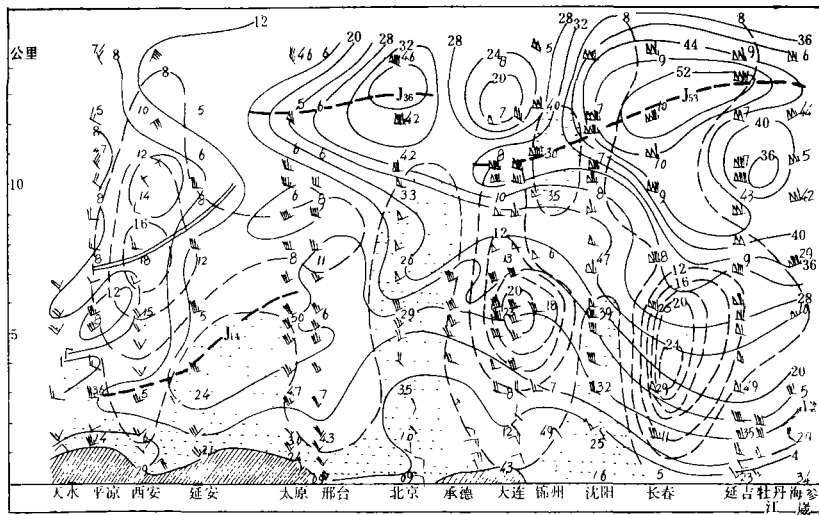
1. 在夏季的暴雨过程中,在雨区以南有一支从对流层下部向高空不断加速的气流,最后在雨区以北进入对流层顶附近的副热带急流,并形成一个最大风速核心。这支气流和饱和凝结区相联系。这一事实表明,湿斜压过程形成的湿急流,可能是行星大气环流的一个重要成员,它对高空副热带急流的形成和维持可能也起重要作用。

2. 湿急流的形成过程启示水汽在大气运动中的主动作用。谢义炳曾指出:“不是低

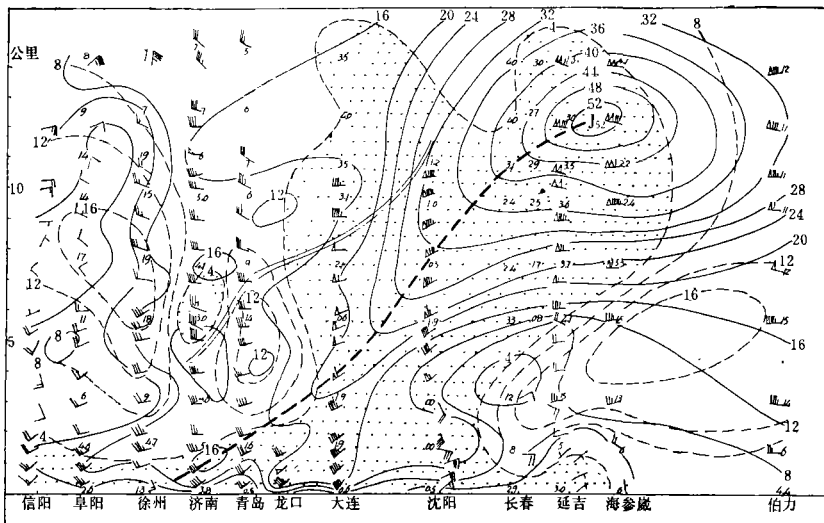




a 1日20时



b 2日08时



c 3日08时

图7 1977年8月1—3日沿急流轴的垂直剖面图  
(说明同图3)

空急流输送了水汽，而是湿空气在湿不稳定大气中绝热上升，加速转向，给所到之处，既带来了水汽，又带来了风。”本文所给的事实似证实了这个论点。

3. 湿斜压性是夏季较低纬度季风地区大气的基本性质。从湿斜压观点来研究夏季风地区大气中的动力学过程，不仅有助于弄清楚我国夏季暴雨的水汽来源，也有助于弄清楚形成暴雨流场的原因。

4. 本文仅从天气分析的事实揭示了湿急流的存在和发展过程。天气学方法无法在这个例子中去掉水汽来考察没有水汽时的情况，并与有水汽凝结时的情况作比较。所以究竟是不是水汽在形成急流的过程中起了主动作用，还需用动力学方法的研究来加以证实。最近，王晓林等应用五层原始方程模式对这个例子作了数值计算<sup>[2]</sup>，结果表明，不考虑水汽的干模式不能报出急流的上升和加强；考虑了大范围凝结和对流参数化的湿模式，则能得到在凝结区的南侧，低层风速显著增大，并与高空急流相联的结果，和这里所给的天气学事实是一致的。因此，似可认为水汽在其中起了主动的作用。

致谢

本文是在谢义炳教授的鼓励和直接指导下完成的，并得到陈受钧同志的热情帮助。中央气象局资料室为本文提供了详尽的测风资料。

### 参 考 文 献

- [1] 谢义炳，湿斜压大气的天气动力学，1977年11月，桂林会议的报告，〈气象科技资料〉2，5—9，1978。  
[2] 王晓林、阎秉耀，次天气尺度的数值预报问题（一）干模式和湿模式的结果（待发表）。

## THE STRUCTURE AND FORMATION OF THE MOIST JET STREAM

Tao Zu-yu

(Department of Geophysics Beijing University)

Abstract

By use of the fairly dense network of radio soundings and pilot balloons, the three dimensional structure and the formation process of the moist jet stream were shown by wind and humidity field in a case of heavy rain over north China in summer. The moist jet stream is a stream penetrating slantly through whole troposphere from low to high troposphere, which is formed as the air of the low level rises and accelerates in the moist unstable atmosphere. The distribution and the development process of the saturation and condensation area around the moist jet stream appears as if the water vapor plays a active role in the jet stream formation process. The fact, that the moist jet stream combines with the subtropical jet stream near the tropopause and strenghtens the kenitic energy of the subtropical jet stream, shows that the moist baroclinic process is probably one of the essential processes in the atmospheric circulation.