第40卷 第3期　　气 象 学 报　　Vol. 40, No. 3
1982年8月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　Aug., 1982

一个登陆台风的等能管结构*

雷 雨 顺

（中央气象局气象科学研究院）

提　要

对产生"75.8"特大暴雨的登陆台风作了等熵面气流分析，发现存在一个铅直贯通整个对流层的等能管。这种连通等能管具有单叶双曲面性质，它在各种形成大暴雨的天气系统中都能出现，起着类似热带积雨云热塔的作用。这个问题在大气环流的能量铅直输送和能量转换中有重大意义，值得进一步研究。

一、引　　言

人们常注意到，在通过台风中心的铅直剖面图上相当位温 θe 等值线在台风中心附近呈"漏斗"状下凹[1-2]。实际上，产生大暴雨的热带或副热带天气系统几乎都在铅直方向存在这种连通或未连通的等熵管(即等能管)[3-4]。

但可能由于缺乏资料等原因，很少有人对这种现象进行过专门的天气学分析，我们也不了解其存在的重要性。因此，本文提出这个问题。

造成严重洪涝灾害的7503号台风在我国内陆停滞数日[5]，周围的探空和无线电测风资料比较多。根据这些资料，本文考察了等能管结构，并初步讨论了其天气学意义，以引起人们注意。

二、等能管的空间结构

7503台风在1975年8月7日08时达到其最北位置，中心位于豫南的唐河。图1是该时刻通过台风中心的两个互相垂直的铅直剖面图，它显示出台风中心附近上空存在一个由 $\theta e=78°C$ 等熵线围成的高值区，四周为低值区。也就是说，存在一个从行星边界层贯通到对流层高层的等熵(或说等能)面管，管两端粗大而主干部分较细，管颈约在600毫巴附近，其几何形状类似单叶双曲面。我们称之为连通等能管。

在连通等能管内，80°C和84°C θe 等值线从平流层下垂到对流层中层，这就是一般所说的漏斗状下凹；与此对应，还有从边界层上凸到中空的倒漏斗。这二者的几何形状类似双叶双曲面，我们称之为非连通等能管。

为了进一步认识等能管，我们又进行了各种等熵面分析。图2给出了连通等能管的代表性等熵($\theta e=78°C$)面的几何形状。它显示出等能管在低层的截面积很大，图2 b 只给出其各层的西界和北界，而南界和东界已超出图面范围。等能管自下向上逐渐缩小，如750

* 本文于1980年10月21日收到，1981年3月18日收到修改稿。

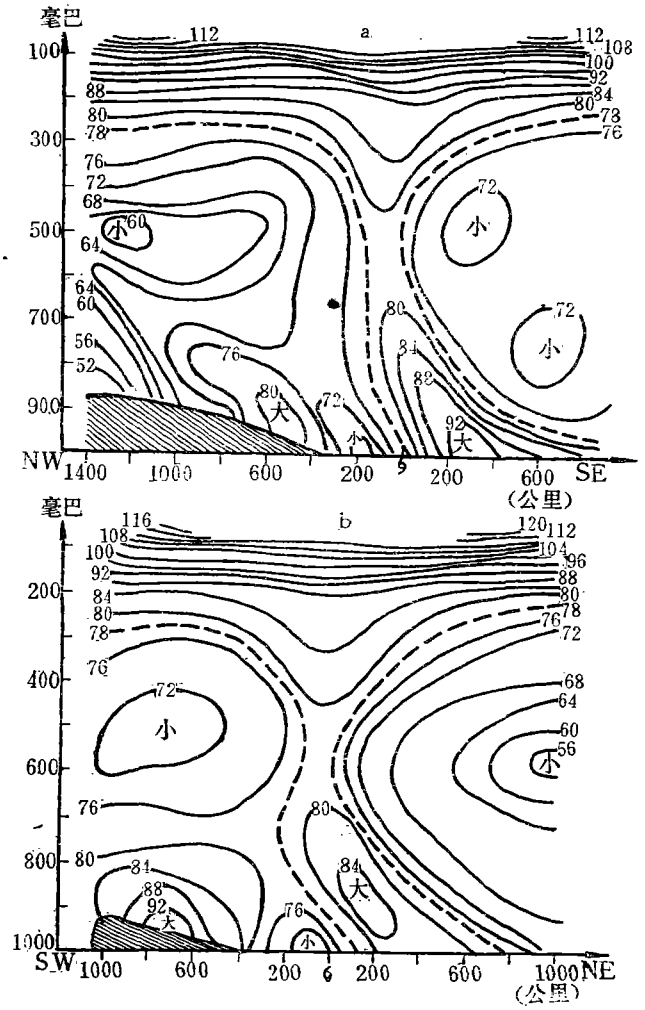


图 1　1975 年 8 月 7 日 08 时(北京时)通过台风中心的 NW-SE 向(a)和 SW-NE 向(b)铅直剖面图

(图中 θe 等值线以 4°C为间隔，例外的 78°C用虚线表示)

毫巴管径约 1200 公里，到 600 毫巴达最小，为 200 公里(图 2 b)；再往上管径又变粗，500 毫巴约 300 公里，300 毫巴达 1000 公里，200 毫巴以上等熵面近于水平(即管径极大)。

非连通等能管的代表性等熵面则截然地分成上下两叶。如 $\theta e=80$°C的等熵面(图略)，下叶双曲面从行星边界层向上，曲面逐渐收缩，顶点在 600 毫巴附近；在此以上约 2 公里的厚度内 θe 值各处都低于 80°C，直到 470 毫巴才出现其上叶双曲面的下端点，它愈往上曲面截面积愈大，到 250 毫巴已接近水平面。

这些等熵面并非严格的双曲面，水平和铅直方向都不对称，受周围天气系统影响很大。如台风西北侧，中低层等熵面较陡直并形成强能量锋，这是西北方来的深厚干冷空气和台风湿暖空气交绥的表现。干冷空气入侵的另一证据是：这里的等熵面在行星边界层内随高度向北倾斜，如图 2b 左上角小插图所示，冷干空气的低能舌楔入高能暖湿空气之下。小插图和正图比例尺一样，把它和正图拼合可以看出台风低层等熵管有一个向北凸

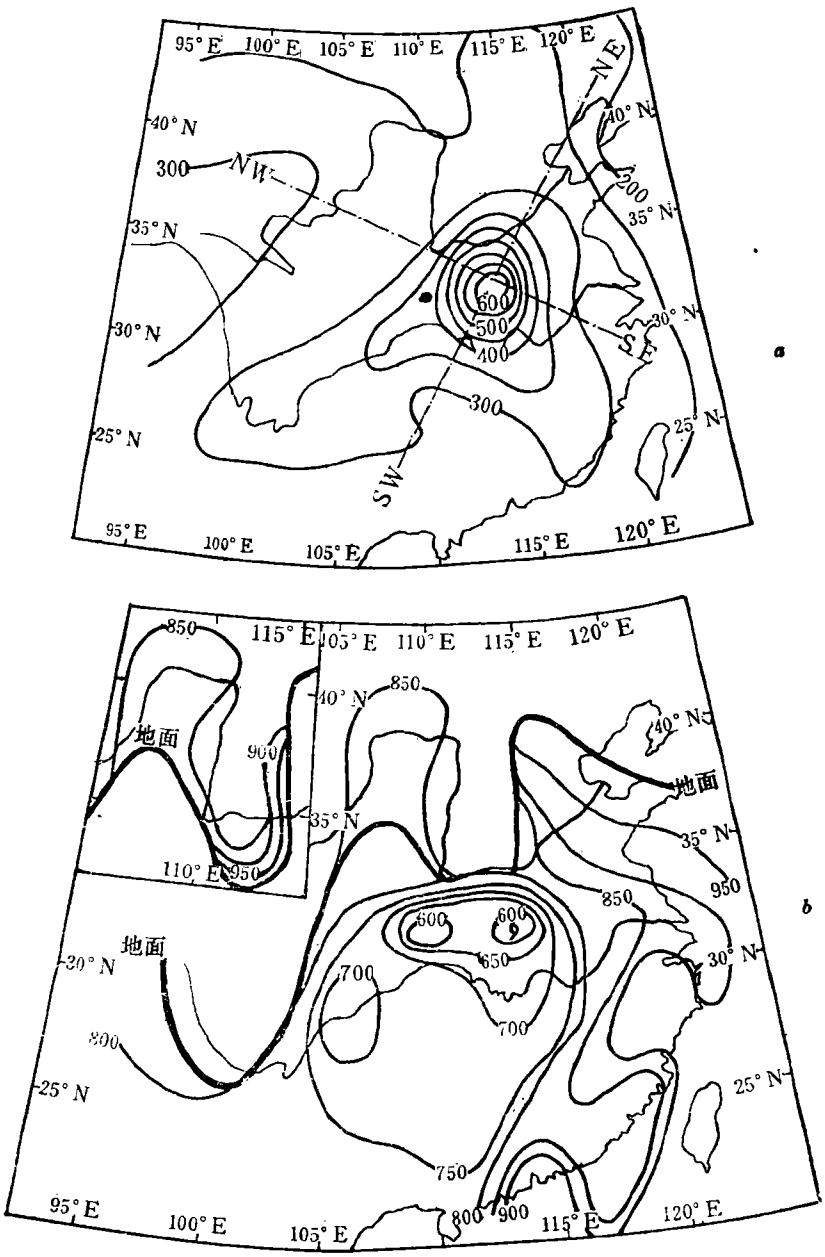


图 2 1975 年 8 月 7 日 08 时 78°C 等熵面的上(a)、下(b)部分形状图
(等熵面与地面交界为粗线，往上每 50 毫巴一条线；a 中正交直线为图 1 剖面位置，b 中小插图见文中说明；为避免图面混乱，图 2b 西侧 600 毫巴线未在图 2a 中给出)

出的高能舌。这高能舌是从西北和东北两个方向入侵台风的两股干冷空气形成的较浅薄的锢囚系统，它和台风以北几百公里远处的河北暴雨直接有关。

由图 1 和图 2 还可看到，连通等能管存在一个主干管壁，位于台风中心稍北方上空的 900 毫巴到 300 毫巴之间。其特点是管壁较陡、等熵面密集、管径较小，并具有特殊的大气热力特征。从接近主干管壁的信阳和南阳的位温 θ、相当位温 θe 及饱和相当位温 θe^* 的廓

线(图 3)可见，这里的深厚大气层内都是水汽充沛(即 θe-θ 面积大)且准饱和(即 θe^*-θe 面积小，平均约 3℃)的高能级(整层平均的 θe 约 80℃)空气。这里的 θe 和 θe^* 铅直变化小，表示发生着大规模的对流运动；但在均匀层结下，低层气块上升仍然会有不稳定能量产生。这些都是有利发生特大暴雨的条件。

在连通等能管四周的延安、青岛、成都、西沙和杭州，大气层的饱和差大(一般，θe^*-θe

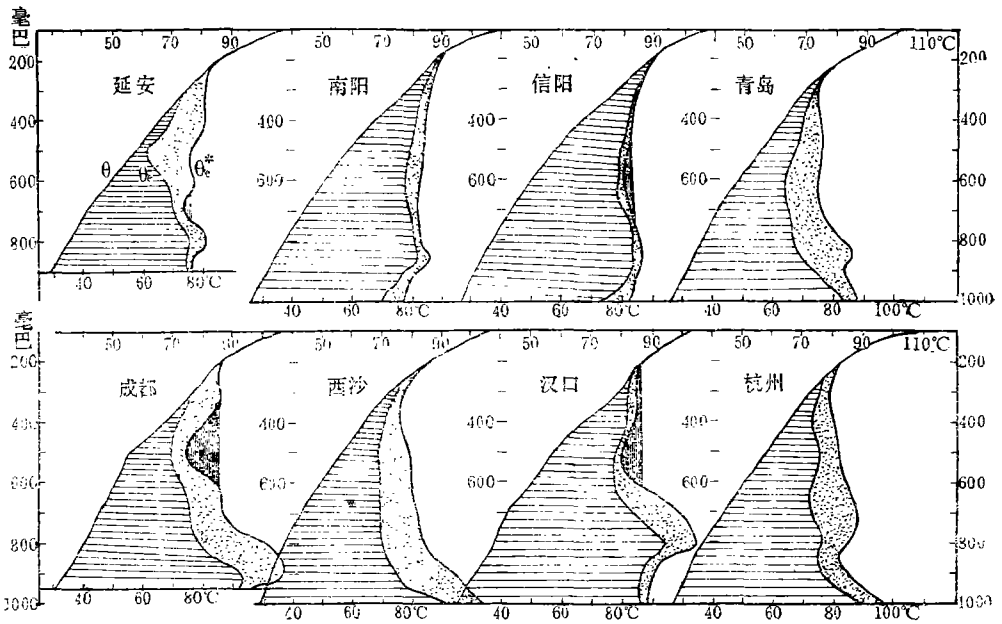


图 3　1975 年 8 月 7 日 08 时连通等能管内、外 8 个探空站的 θ、θe 和 θe^* 廓线
(横线影区为 θe-θ，点影区为 θe^*-θe，直线影区为气块以行星边界层，平均能级上升所得到的潜在不稳定能量面积)

>7℃)、能级低(θe 平均约 65—75℃)且水汽也没有主干管壁充沛。在连通等能管内，接近非连通等能管下部中心的汉口，大气柱虽然水汽充沛、能级高并存在一定的潜在不稳定能量；但由于其低层稳定层深厚而中层饱和差大，大气实际是假潜在不稳定的，故这里低层的水汽只是有待向别处供应而不会就地形成暴雨。

三、等能管上的三维气流运动

在假绝热条件下　$$\frac{d\theta e}{dt}=0 \tag{1}$$

因此，短期内等熵管上的气块必然在该等熵面上运动。又，在定常和假绝热条件下，沿等熵面流线总能量守恒，即

$$T_t=T\sigma+\frac{1}{2C_p}V_r^2=\text{常数} \tag{2}$$

其中 V_r 是相对风速、C_p 为定压比热。这样，就可以用相对风向量做为在等熵面上分析总温度 T_t 的约束条件。为了避免计算误差[6]，我们用(θe-$T\sigma$)代替湿静力温度 $T\sigma$。本例中台风少动，故用实际风代替相对风。

本文用这种方法做了各代表性等熵面的流场分析。图 4 给出了连通等能管代表性等

熵面(图 2)上的三维气流，其最突出的特征是：大致以管颈为界，下半管显示了台风流入层的三维流场(图 4*b*)，上半管则表征了台风流出层的三维运动(图 4*a*)；管颈附近，铅直上升运动最大，根据等熵面气压梯度和风速估计为 20厘米/秒。

图 4 *b* 上的流入气流特征和平常从低层各等压面图看到的形式上类似：气流螺旋式地向台风中心辐合，东部和北部流线辐合明显而南部和西部径向分量大。然而，由于等熵管几何形状是立体的，故此图进一步揭示出：高能空气一边从四周（主要是南方和东方）很大范围向台风中心流注，一边绝热爬升，到达台风中心附近时已上升到 600 毫巴附近。然后就进入流出层（图 4*a*），但 600—400 毫巴层在台风中心附近 200—300 公里内气流

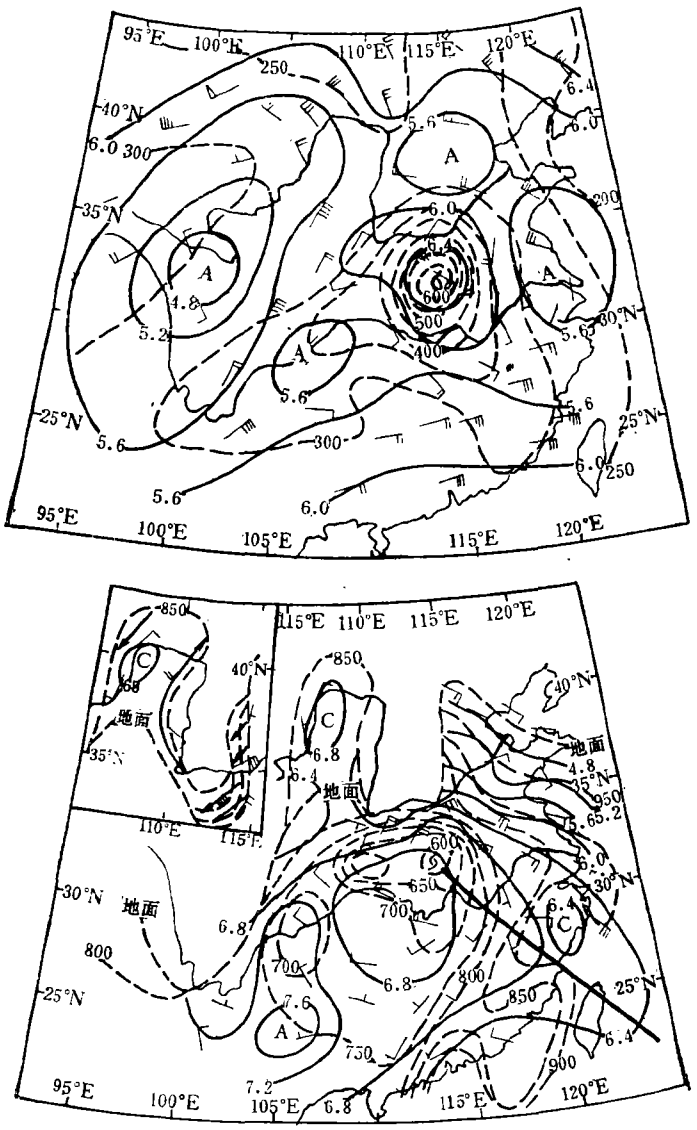


图 4 1975 年 8 月 7 日 08 时 $\theta e=78$℃曲面的上(*a*)、下(*b*)部分三维气流
(虚线为等压线；实线是流线，即考虑了风场的 θe-Te 等值线，每 0.4℃一条线；$\mathcal{S}$、C、A 分别为台风、气旋和反气旋中心；*b* 图的重粗线为低层热带辐合带)

仍为气旋性环流；向上（也是向外），才逐渐转变为气旋性流出；再向外，上升到 400 毫巴高度就变成反气旋式流出了，且在台风的西北方和东方出现了反气旋环流。所有这些都是在同一等熵面上看到的，而使用常规等压面图则要考察许多层才能得到这些结果的一部分。

在非连通等能管的代表性等熵面 $\theta e=80°C$ 图上(略)，其流入层气流与上述相似，不同的是低层螺旋式辐合上升的气块主要在台风中心以南到达 700 毫巴高度，然后在等熵面顶端(约在信阳南侧上空)迅速向北下沉到 800 毫巴，从信阳西北侧又回到低层的流入气流中去了。限于资料还不够稠密，只能推测上述下沉气流和台风眼相联系。在 $\theta e=80°C$ 的上半叶等熵面上，下端点附近等熵面陡、气流气旋式向外辐散；到 300 毫巴以上，等熵面远离台风中心，气流转变为反气旋流出气流。

四、物理意义讨论

本文所揭示的等能管，在大气环流上有何意义呢？以下从能量输送和转换角度进行讨论。

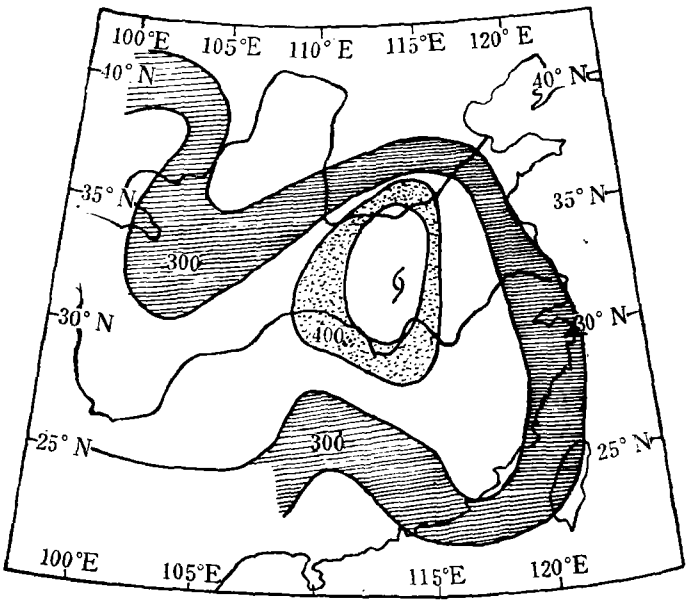
对通过这次特大暴雨中心所在经度，计算并制做了多年平均的七月静力能量分布铅直剖面图(图略)。由图看到夏季对流层中层为一低能区，以上以下皆为高能区，也并不存在等能管。这样就产生了能量平衡上的一个著名难题：由于大气的基本能源在地面和大气低层而能汇在高层，为了维持大气能量平衡，必然有一种机制逆能量梯度通过中层低能区由边界层向高层输送能量。Riehl 等提出[7-8]，赤道槽内假绝热地穿透对流层的积雨云塔是大气中在铅直方向进行这种能量输送的有效机制。

我们认为，连通等能管也是大气中进行能量铅直输送的有效机制。这样，在运动尺度上，在纬度和地区上，都扩充了 Riehl 等人的概念。

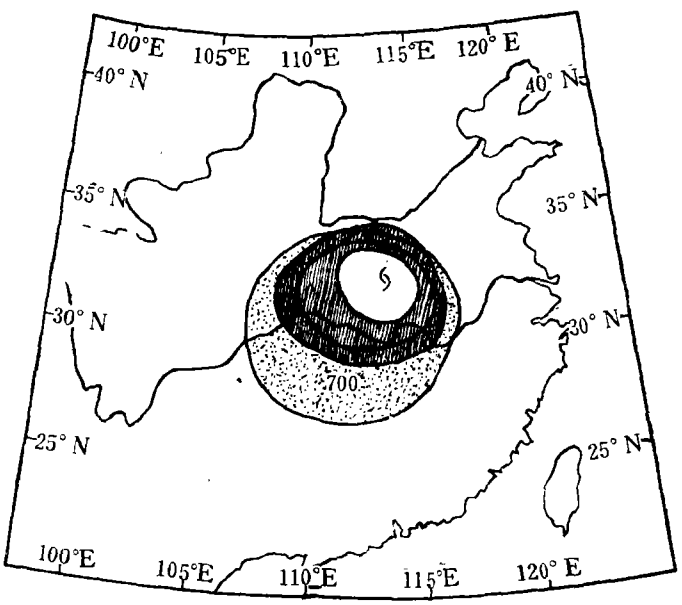
本文分析的是属于中间尺度—天气尺度的台风系统，它所具有的连通等能管起着类似热塔的作用，把高能空气从行星边界层假绝热地(θe不变)输送到高空，把大量潜热能转换为位能，既补偿了本地高空的长波辐射损失，又提供了向高纬输出的能量。夏季风来临时在我国发生的大暴雨，不论直接影响系统是台风、西南涡或暖切变，一般都有本文所分析的等能管出现[3-4]。因此，通过连通等能管铅直输送能量，可能是夏季风地区维持能量平衡的重要方式，也是大气环流中能量平衡的重要环节。

当然，由于运动尺度不同，等能管和热塔有很多不同。直径平均约 5 公里的热塔位于直径约 50 公里的积雨云内，塔中的空气是从云下以 2—3 米/秒的铅直速度假绝热上升的；它所能收集的云下空气的范围有限，其生命期仅一小时左右。等能管水平尺度几百公里以上，从大范围收集高能空气，其生命期为一日到几日；云下的空气并非从管心上升(这里高低层的等能面是断开的)，而是沿连通等能管的主干管壁上升，空气的上升速度最大只有每秒几十厘米。

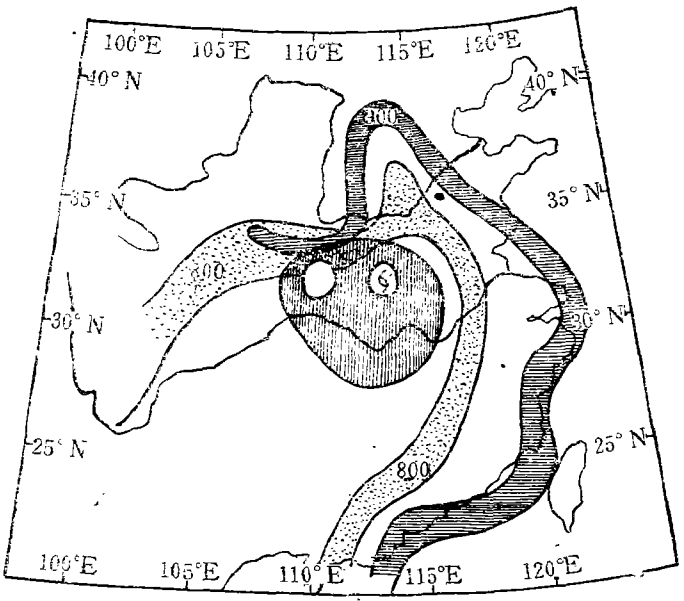
既然能量的铅直输送和转换只是在连通等能管的管壁内进行，有必要考察管壁结构。图 5 是本例 900—300 毫巴的管壁厚度图，“厚度”是指连通管最内(78°C)和最外(75°C)两等 θe 面之间的水平间隔。由图可见，低层和高层管壁较薄，大约只有 100—200 公里厚，有的地方只有几十公里厚，可是高、低层管径却很大。在中层，各处管壁厚薄不匀，北部几


100°E
105°E
110°E
115°E
120°E
40° N
35° N
30° N
25° N
300
400
300

a


100°E
105°E
110°E
115°E
120°E
40° N
35° N
30° N
25° N
700

b



c

图 5　1975 年 8 月 08 时连通等能管各层管壁厚度图
（注意 b 图中 700 和 500 毫巴重叠处很多）

十公里而南部达 200—300 公里以上，但管径却很小。这些情况表明，强对流天气并非在壁内到处发生，而只能在中层管壁所在地区、尤其是在北部管壁内发生，也就是在主干管壁附近发生。

事实上，正是在台风中心及其北部，连通等能管细而陡，气流铅直运动分量大（图 4），发生了特大暴雨。也就是说，台风连通等能管在低层从大范围（主要是从热带辐合带，见图 4*b* 重粗线）汇集高能空气，然后在主干管壁通过近于铅直的上升运动把高能空气中的潜热能释放转变为位能。从这次特大暴雨时雷暴强烈[5]可知，上述能量转换仍是通过一个个积雨云热塔来实现的。热塔和连通等能管之间存在着内在的联系：等能管从低层准水平地汇集能量和在高层分散能量，而热塔在主干管壁铅直输送并转换能量使高低空联系起来。

非连通等能管尺度小，本例的探空和测风资料不足以分析其天气学意义。但从相对湿度分布来看，它显然和管内存在一个相对干燥区联系（图 6）。在连通等能管管颈高度 600 毫巴的相对湿度图（图 7）上，也显示出台风中心稍偏西为一相对干区。这一干区可能和台风眼内的下沉气流有关，它的存在也使得连通管内部的等熵面在中层断开，形成双叶双曲面式的非连通等能管。

图 6 和图 7 在台风中心西侧呈现了一个高湿区，这在图 2*b*、图 4*b* 和图 5*c* 也都有表现，但有关“75.8”特大暴雨的许多分析并未注意它。为此，我们查找水利部门的降水资料发现，7 日除了驻马店附近的特大暴雨中心，在其西偏北约二、三百公里的嵩县瓦房沟也产生了 24 小时达 344 毫米的降水[9]。由于这个高湿区远离主干管壁，层次并不很厚，因而其降水强度、范围都相对小一些。

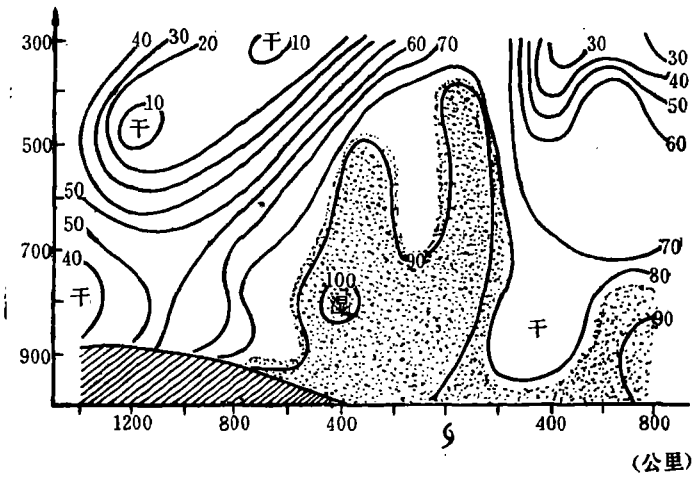


图 6 1975年8月7日08时与图1a相同剖面上的相对湿度 f 分布图
(阴影区 $f>85\%$)

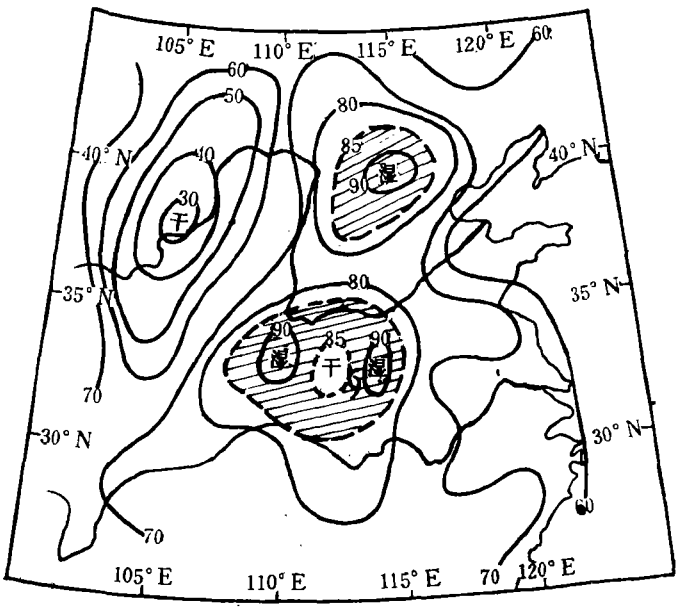


图 7 1975年8月7日08时600毫巴相对湿度 f 分布图
(阴影区 $f>85\%$)

五、结 语

7503号台风登陆后存在一个由低层连通到对流层顶的高能级等能管，其几何形状类似单叶双曲面；在这连通管内，还含有双叶双曲面式的非连通等能管。来自热带辐合带的湿空气从连通等能管的主干管壁螺旋式辐合上升，在假绝热上升中把潜热能转换为位能，再在高层辐散输送到环境大气中去。

因此，像热带的积雨云塔一样，连通等能管是大气环流中铅直输送和转换能量的有效机制。在其它天气系统产生大暴雨时，也常出现类似的连通等能管。因而值得从大气环流

能量平衡以及暴雨发生学各方面对此做进一步研究。

参 考 文 献

[1] 谢义炳等，中国夏半年几种降水天气系统的分析研究，气象学报，**27**，1—23，1956。
[2] 陈联寿、丁一汇，西太平洋台风概论，科学出版社，1979。
[3] 雷雨顺，经向型持续性特大暴雨的合成天气学分析，气象学报，**39**，168—181，1981。
[4] 雷雨顺，吴正华，张兰香，产生暴雨的三种能量锋，北方天气文集（Ⅰ）12—23，1981。
[5] "75.8"暴雨研究组，1975 年 8 月河南特大暴雨研究报告，"75.8"暴雨研究会战领导小组，1977。
[6] 雷雨顺、杨红梅，论总能量相当温度和相当位温，北方天气文集，1982。
[7] Riehl H.and J.S. Malkus, *Geophysica*, **6**, No. 2, 503—538, 1958.
[8] Riehl H.and Joanne Simpson, *Contributions to Atmospheric Physics*, **52**, 287—305, 1979.
[9] 编制全国可能最大暴雨等值线图组织协调小组办公室，中国最大 24 小时点雨量纪录，1978。

THE CONSTANT ENERGY TUBES OF A LANDING TYPHOON

Lei Yu-shun
(*Institute on Weather and Climate Research, Academy of Meteorological Science, Beijing*)

Abstract

In this paper, based on isentropic relative-flow analysis, it is found that there are constant energy tubes in typhoon. These constant energy tubes appear also in the severe rainstorms produced by other synoptic systems, such as the vortices in South-western China and warm shear line. It is pointed out that these constant energy tubes play important role in the summer energy balance of the atmospheric general circulation.