

热带气旋形成的多尺度组合理论

——流体动力学实验模拟与合成分析的结合

魏鼎文

(中国科学院大气物理研究所)

W. M. Gray

(美国科罗拉多州立大学大气科学系)

提 要

结合流体动力学实验模拟(物理模型)与大量记录的合成分析,本文提出了热带气旋形成的多尺度组合理论。它强调了热带中尺度深厚对流云系的作用,同时它也着重说明了大尺度环境气流与小尺度积云对流的重要作用。

本理论可解释一些有关热带气旋以前所不能解释的观测事实,特别是它解释了热带气旋前期低压环流的形成。

一、引 言

成熟的热带气旋是一个暖心的气旋式涡旋,最大风速在32米/秒以上,它的巨大的破坏性威力,常常给沿海人民带来深重的灾难。近年来在对风暴的结构、动力学、能量学及其预告的研究方面均有了较大的进展。但是有一个根本性的问题,即热带气旋是怎样形成的,迄今仍然没有解决。

Riehl (1954)、Yanai (1961)、Sadlar (1967)、陈联寿与丁一汇 (1979) 等得出了热带气旋形成的不同天气学模式。Gray (1968) 曾指出:虽然天气形势不同,而热带气旋的形成必然有相似的一些基本条件。

Palmen (1948) 首先指出了热带气旋形成的三个基本条件: 1. 要有足够广阔的洋面和较高的温度(现在一般取高于 26.5°C); 2. 科里奥利参数必须大于一定值,所以热带气旋的形成应当在远离赤道 $5-8^{\circ}$ 以外的地区; 3. 基本气流的垂直切变一定要小。后来Riehl (1948) 又增加了另外两个条件,即:地面应当有一个前期扰动和一个与此扰动相应的高空辐散场。但对最后一个条件是否构成必要条件在历史上有争议。

Charney 与 Eliassen (1964) 提出的第二类条件不稳定(CISK)理论,或许是在热带气旋形成理论上前进了一步。这个理论的核心是把积云尺度运动和气旋尺度运动看作是协调的相互支持的,积云的潜热释放供给热能来推动低压环流,而低压环流在低层因摩擦作用而形成水汽辐合,把水汽输入到积云体内供作“燃料”。由于这种作用的持续反复,将引起天气尺度系统的增强。毫无疑问,经过20余年的考验,已证明CISK理论

抓住了热带气旋发生、发展过程的一个重要的物理过程,它正确地描述了天气尺度环流与积云对流运动之间的相互关系。但是,在这里我们也要指出: CISK 并不能完全解释热带气旋的形成,有一些重要的观测事实和 CISK 的结论并不相符。因此可以断言,热带气旋的形成必然还存在另外的重要物理过程。

CISK 理论虽能对发展的热带低压继续增长的问题作出较好的解释,但不能说明这种早期的具有一定强度的低压环流是通过什么物理过程发展而来的。同样,以 CISK 机制为基础的数值模拟,实际上它们大都也只是研究一个初始的气旋性环流的增长问题。

在热带大气里存在着行星尺度的波动系统、天气尺度的气旋系统、中尺度的强对流云系和小尺度的积云对流。1968 年对飓风 Gladys 进行的由飞机、人造卫星、载人飞船和雷达的联合观测中,发现了一个重要事实: 有一个弱的中尺度深厚的积雨云团在眼区附近,绕眼旋转。这就是众所周知的圆形抽气云 (CEC)。它的水平尺度在 50—120 公里左右 (Gentry, et al. 1970)。以后,在其他的飓风中 also 得到类似的引证 (陈联寿、丁一汇, 1979)。更普遍的观测结果是: 如果我们从卫星云图上向前追踪热带气旋,就会发现,一般在早期阶段,都是一些离散的发展很深的对流云系,它们往往具有明显的中尺度性质 (Arnold 1977)。CISK 理论只强调了小尺度积云与天气尺度的气旋性环流之间的相互作用,忽视了这种中尺度深厚对流云系的作用。上述这些观测事实向 CISK 理论提出挑战。

在 70 年代末,魏鼎文等 (1981) 设计了流体动力学模拟实验 (以后均称之为物理模型), 强调了中尺度强对流云系的作用。根据这个物理模型,提出了热带大气涡旋增幅效应 (AEVTA)。这一效应的基本物理内容是: 在热带大气里,当两个或两个以上的中尺度深厚对流云系接近到一个临界距离 $D \leq \sim 3d$ (D 为云系之间的距离, d 为云系本身的尺度) 时,就会发生一种突变,开始形成单一中心的低压环流。此后温度场向风场适应,形成单一的温暖中心。此暖中心反馈于低压,使此低环流增强。

本文目的在于: 应用物理模型通过 AEVTA 机制说明热带气旋的前期低压环流是由中尺度深厚对流云系组合演变而成。在这里,我们也强调了大尺度背景环流的重要性。同时结合 CISK 机制,并应用合成分析技术所得到的结果作为证据,提出了一个比较完整的、新的热带气旋形成理论——多尺度组合理论。我们冀希本理论能够解释更多的过去不能解释的观测事实。

至于热带大气中这种深厚的中尺度对流云系本身是如何形成的,本文不作讨论。虽然有这种可能,即通过 AEVTA 机制,联合 CISK 机制,由小尺度的积云对流系统在适当的条件下组合成这种强中尺度对流云系。但这是属于本文以外的另一个问题了。

二、流体动力学的实验模拟结果

关于物理模型的数学物理基础与相似条件的讨论,作者在文献 [13] 中已有详细描述,这里不再重复。张铭 (1986) 用热力学和流体动力学方程组,以数值模拟的方法,模拟了我们的物理模型,得出了两者间十分相似的结果。这也从另一个侧面证明了此物理模型的可靠性。

按照相似条件的要求,模型中中尺度强对流云系的热源水平尺寸为 ~ 1.5 厘米,这相当于自然大气中的 ~ 50 公里(1厘米相当于 ~ 35 公里),加热强度也按照相似条件要求为 6.5W 。实验的程序为:三个热源排成三角形,它们之间的距离是可变的,由11厘米变到3.7厘米,由此我们获得了流场形势的逐步演变情况。和以前实验相比较,我们改进了温度的测量,把测点增加到40个,精度为 0.2°C ,由此获得了温度场的演变情况。此外,我们作了和流场同步的风场的测量(用追踪烟云的特征点以测量速度),从而了解到相应的速度场的逐步演变,这对说明问题无疑是十分重要的。

照片1a—f(见图版1图1)是不同距离的三个热源所产生的中低层流场(这里的中层相当于实际大气中的700—500hPa层)。图1a表明了当三热源相距较远时,各自形成了分离的扰动;当距离缩小到8厘米时,由图1b表明,分离的扰动仍然可见。但当距离缩减到6.5厘米时(图1c),情况发生了本质的变化,分离的扰动已基本消失,而出现了具有单一中心的气旋性环流。环流的中心区略呈三角形,但范围较大。当距离缩减到5.5厘米时,

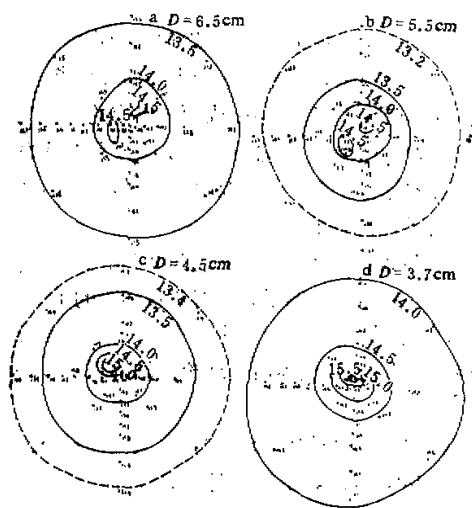


图2 物理模型的中低层温度场演变

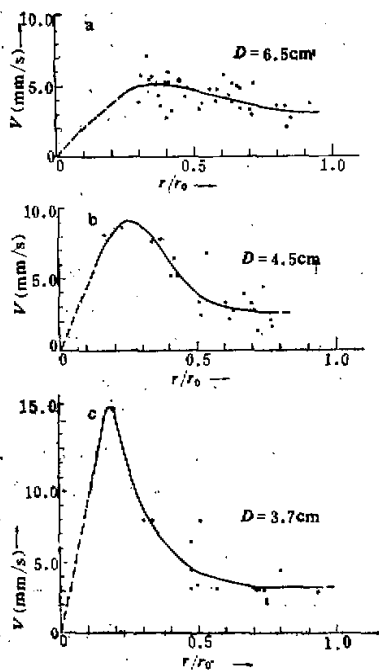


图3 物理模型的中低层风速剖面的演变

环流中心更加清晰,而范围缩小,这就是图1d。这种环流形态的突变性质是本文最重要的结果之一。随着热源距离的不断缩小,环流中心也更加缩小,到热源距离为3.7厘米时(如图1f),则形成了强大的气旋性环流,中心有一个清晰的眼,与实际的热带气旋甚为相似。应当说明的是,我们把热源的强度向上或向下变动25%,上述基本结果不变。

图2a是在热源距离为6.5厘米时的中低层(大约等于850—700hPa层)温度场的水平分布,它的流场照片就是1c,这时流场的单一中心基本形成,而温度场仍然是分离的。

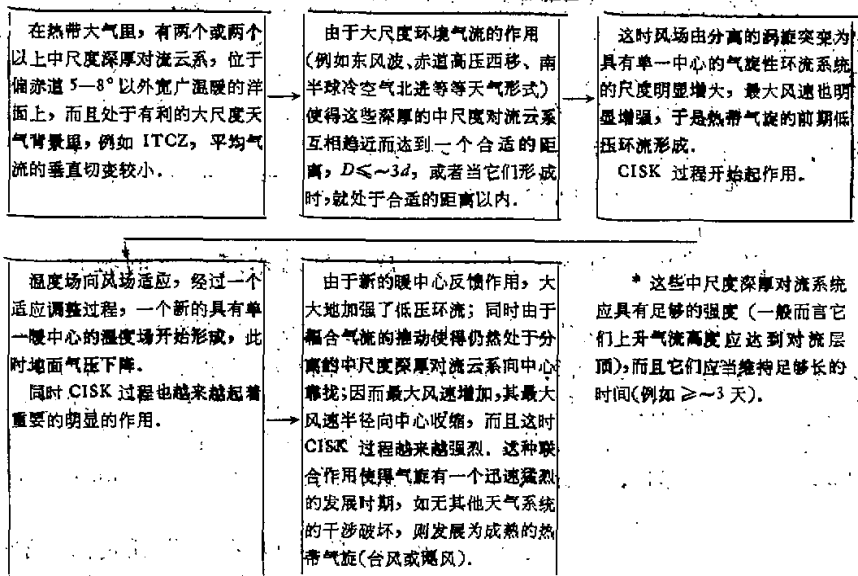
到了热源距离为 5.5 厘米时, 流场的单一中心更加完备, 而这时温度场暖中心的分离仍然十分明显(如图 2b 所示)。但到了热源距离为 4.5 厘米时, 暖中心已由分离的形成单一的, 如图 2c 所示。这时 $D \leq \sim 3d$, D 为热源中心之间的距离, d 为热源本身的直径。随着热源更加靠近, 单一的暖中心更加明显, 径向温度梯度增大, 如图 2d 所示。在这里, 我们看到了两个重要的事实。其一, 在热源靠近到一定的程度时, 首先出现的是单一中心的气旋性环流, 然后才出现单一的暖中心。即风场在前, 温度场在后。其二, 当温度演变为单一中心时, 热源本身却是分离的。这无疑表明单一暖中心的形成是空气运动的结果。

下面我们来考察中低层(相当于 700—500hPa 层)速度场的测量结果, 以考察其演变过程。图 3a—c 分别为 $D = 6.5$ 厘米、4.5 厘米、3.7 厘米的风速径向分布。由此, 我们可以清楚地看出两个重要事实, 即当热源逐渐靠近时, 最大风速显著增加和最大风速半径逐渐向中心收缩。

三、热带气旋形成的物理过程

由于以上热带气旋的物理模型是建立在相似理论基础之上的, 所以这些结果必然可以应用在实际热带气旋上。联合热带气旋形成的必要条件、大尺度背景气流的作用以及 CISK 过程, 这里, 提出了热带气旋形成的物理过程以框图形式列表如下:

表 1 热带气旋形成的物理过程框图



在表 1 的框图 1 (按顺序)中包含了热带气旋形成的三个必要条件, 即对洋面温度、科氏参数和基本气流垂直切变的要求。框图 2 内强调了大尺度的背景气流或环境气流的作用。这种有利的大尺度天气形式可以推进并迫使这些深厚的中尺度云系互相靠近, 以达

到 $D \leq -3d$ 的临界条件, 所以这种大尺度背景环流的早期推动、组织作用是十分重要的。这些大的天气形式在不同地区、不同时间它们可以很不相同, 但是它们的作用却是相似的。从这种意义上讲, 这或许可以解释为什么历史上会出现热带气旋形成的一些不同天气学模式(陈联寿, 丁一汇 1979)。当这些深厚尺度云系接近到一个临界值 $D \leq -3d$ 时, 环流形势发生突变, 分离的扰动中心消失, 而突变为具有单一中心的气旋性环流。于是热带气旋形成过程中的一个极其重要阶段——前期低压环流就形成了。同时 CISK 过程开始作用。要强调的是, 只要达到这一临界值后, 不管还有没有环境环流的持续帮助, 这种突变都要发生, 这就是框图 3 的内容。在框图 4 内, 强调了温度场向风场适应, 单一的温暖中心随之形成, 气压持续下降。很明显, 在此时 CISK 过程也起着越来越重要的作用。最后一个框图表示, 暖中心形成之后, 必然产生反馈作用, 而这又大大地加强了低压环流。应强调指出, 这些深厚的中尺度云系仍然存在, 它们受到 CISK 过程所论述的低层内向辐合气流的推动, 所以它们向中心靠拢。根据以上的实验结果(见图 3), 这时必然有最大风速的增加和最大风速半径向中心收缩。显然这又会使 CISK 过程更加强烈。由于这三种物理过程的联合作用和互相反馈, 使得热带气旋有一个迅速猛烈的发展阶段。

关于临界条件 $D \leq -3d$, 显然它包含了对深厚尺度对流云系水平尺度大小的考虑。同时也考虑了它们的强度。按照相似条件, 应用实际大气中平均强度它应大到足以使上升气流达到对流层顶。实验结果还表明, 强度上下大约变动 25% 仍不影响基本结果。但是, 如果强度太弱, 将形成不了早期低压环流, 太强则应适当地加大 D 值。

气象学家们对于热带气旋是由热带云团组织发展而来大都同意。但是为什么每年在有利于热带气旋生成的洋域, 有成百上千个热带云团, 其中却只有少数能发展成为热带气旋呢? 对于这个问题, 本理论可作定性解释。首先, 并非每个云团都有足够强度的深厚中尺度云系。其次, 中尺度云系的平均寿命为近似一天, 而能坚持三天或三天以上的则占少数^[19]。再者, 使得能够相互接近到 $D \leq 3d$ 的深厚中尺度云系只占一定比例, 把这些小于 1 的系数连乘起来作粗略估计, 大概只有云团总数的 $10^{-1} - 10^{-2}$ 可发展成为热带气旋。

四、按传统的科学方法及合成分析结果对理论的验证

现按照传统的科学方法对本理论加以验证。这个方法可以概括为: 根据对事物的观察提出假说, 由此假说可以得到若干推论, 如果这种推论被观测事实或实验所证实, 那么, 这个假说是基本正确的, 因而上升为理论。在下面表 2 中, 我们给出了按上节叙述的热带气旋形成的多尺度组合物理机制作出了推论。表内给出了观测事实, 还给出了仅仅由 CISK 过程所作的推论、以供比较。其中由大量记录的合成分析(Compositing analyses)结果, 在下面详加论述。

现在着重论述合成分析结果。作者(Weiland Gray 1986)曾用大量的探空记录, 分别合成分析了大云与小云覆盖的成熟台风的动力和热力学特征。前者覆盖云区的平均直径 $D \geq 10^\circ$, 后者云覆盖区的平均直径 $D \leq 7^\circ$ 。为方便起见, 以下称前者为大台风, 后者为小台风。我们有理由认为, 大台风早期是由水平尺度较大的深厚中尺度对流云系按表 1 的物理过程演变而成。而小台风则是由水平尺度较小的深厚中尺度对流云系按表 1

表 2 按传统的科学方法对理论的验证

多尺度组合机制的推论	仅仅有 CISK 过程的推论	观测事实
(1) 预见到热带气旋早期低压环流形成的物理过程	不能预见到早期低压环流形成的物理过程	热带气旋是由早期低压环流发展起来的
(2) 一般而言,热带气旋发展过程中,其发展速度是不均匀的,有一个迅速猛烈发展阶段	一般而言,应当具有比较均匀发展速度	常常可以看到在临近热带气旋成熟之际,有一个迅速猛烈发展阶段
(3) 平均情况下,在热带气旋的前期,在距中心较远的半径上可以看到一个相对的暖区。换言之,暖区是由外向内移动靠拢的,或相对而言,中心有一个由冷变暖的过程	由于潜热释放,中心逐渐增暖,不存在由外向内移动过程	yanai 的记录分析证实了气旋中心由冷变暖的过程 由记录合成分析证实了多尺度组合理论的推论
(4) 在平均情况下,热带气旋形成的早期在距中心较远的半径上可以看到一个相对的低压区,及此低压区由外向内靠拢的过程	不能预料低压区由外向内靠拢的过程	大量记录合成分析结果证实了多尺度组合理论的推论
(5) 在平均的情况下,可以预料在热带气旋的早期,其最大风速圈有一个由外向内收缩的过程	不能预料最大风速圈内移现象	由大量记录的合成分析,证明了多尺度组合理论的推论。
(6) 在平均的情况下,由于中尺度深厚对流云系在气旋发展的早期有内移现象,那么可以预期最大相对湿度区和最大垂直上升区必然有由外向中心集中的现象	不能预期到这种必然性	由于相对湿度 $\xi = \frac{V_T}{r} + \frac{\partial V_T}{\partial r}$, 且在热带气旋中最大风速区与最大气流上升区是一致的,所以由上面的最大风速记录合成分析结果可证实理论的推论。

演变而成。为了考察台风形成的演变,对于两者,在它们早期热带低压和风暴阶段也作了合成分析。因为有足够多的记录,所以结果是可以信赖的。由于计算的网格为 1° 纬距,可以预期:对于大台风我们将可以见到表 1 中由多尺度组合理论所预言的现象。对于小台风而言,网格距显得太大,推论现象将被平滑掉而不可见。

图 4 表示了 300hPa 层上温度场的剖面(合成结果),可以看出,对于成熟的台风无论大者或小者,随着半径的缩小,温度明显增加。而在低压风暴阶段,对于小台风,温度仍随半径的缩小而增大;但对大台风而言,在 $2-3^\circ$ 半径处出现了相对的高温区,在 350hPa、250hPa 层见到了同样的现象(图略),从而证实了多尺度组合理论的推论(3)。

700hPa 层的高度场剖面如图 5 所示。它与图 4 相类似,对于大台风,在其低压风暴阶段的曲线有着特殊的表现。可以清楚地看出:在 $2-3^\circ$ 之间出现了相对低压区,其他一些层,例如 800hPa、600hPa、500hPa 层均出现了类似现象(图略),从而证实了多尺度

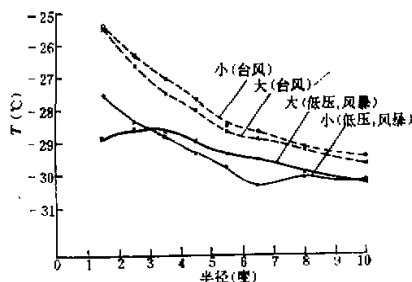


图 4 300hPa 层上的温度剖面

组合理论的推论(4)。

图6表示了500hPa层以上切向风的剖面,它清楚地显示了只有对低压风暴阶段的大台风,有着特殊的分布。在 $2-3^\circ$

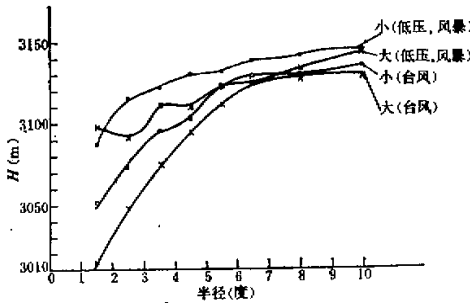


图5 700hPa层上高度场剖面

之间存在着明显的切向风的极值,其他层(如700hPa, 600hPa层)也有相似的现象(图略)。从而证实了多尺度组合理论的推论(5)。

按上述的验证,以及大量的记录合成分析结果,支持了热带气旋形成的多尺度组合理论。

另外,个例分析也提供了很好的证据。洋面测站极为稀少,想用海洋上的台风或飓风个例来为本理论提供

证据是十分困难的。但是近海台风则提供了可能的机会。陈瑞闪(1986)关于近海8411号台风(June)的分析结果,为本理论提供了一例良好的证明。图7(见图版II)为1984年8月30日08时8411号台风的红外云图,图8为同时的地面图。可见这已是具有单一中心的热带涡旋环流,但环流的中心并不在云内,而是在三块强的云团(图7中的A、B、C)之间。这是由于云团的尺度已满足 $D \leq -3d$ 的临界条件。在参考文献[5]中,也给出了前两天的云图和地面图,那时云团距离较远,因而地面图的涡旋中心也是分离的。这一台风的演变过程与理论模式基本是一致的。

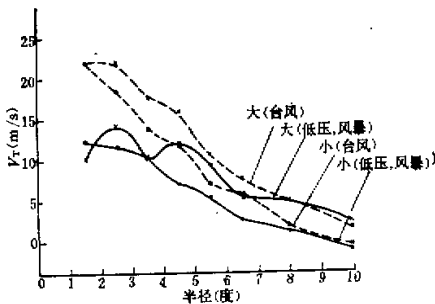


图6 500hPa层上切向风速剖面

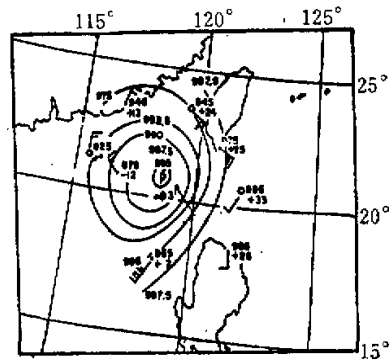


图8 1984年8月30日08时 No. 8411 台风的地面图

五、结 论

以物理模型的结果,结合记录的合成分析,本文提出了热带气旋形成的多尺度组合理论。在这一理论中,我们强调了中尺度强对流云系在形成热带气旋中的关键作用;而大尺度的背景环流和小尺度积云对流(包括在CISK过程中)也有不容忽视的重要性。它解

释了热带气旋早期的低压环流的形成,以及其他单独用 CISK 过程不能解释的现象。但由于问题的复杂性,多尺度组合理论不可能是尽善尽美的。有些现象,例如高空切断冷涡旋也可以演变成台风,其物理过程是否与本文相符还要进一步探讨。但无论如何,只要本文能对热带气旋形成的认识前进一步,作者也就十分满意了。

参 考 文 献

- [1] Arnold, C. P., 1977, Tropical cyclone cloud and intensity relationships. Dept. of Atmos. Sci., Paper No. 277, Colo. state Univ., Fort Collins, Co. P. 155.
- [2] 张铭, 1986, 台风实验室模拟的数值模拟, 热带气象, 第2卷, 第1期, P. 23—30.
- [3] Charney, J. and A. Eliassen, 1964, On the growth of the hurricane depression. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 21, P. 68—75.
- [4] 陈联寿、丁一汇, 1979, 西太平洋台风概论, 科学出版社.
- [5] 陈瑞凤, 1986, 关于 8411 号台风(June)几个特点的分析, 海洋通报, Vol. 5, No. 1, P. 72—76.
- [6] Gentry, R. C., Fujita, T., R. C. Sheets, 1970, Aircraft, Spacecraft, Satellite and radar observations of hurricane Gladys. *J. Appl. Meteor.* P. 837—849.
- [7] Gray, W. M., 1968, Global view of the origin of the tropical distributions and storms. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 96, P. 669—700.
- [8] Gray, W. M., 1979, Hurricane. Their formation, structure, and likely role in the tropical circulation. *Meteorology Over the tropical Oceans*, D. B. Shaw Ed. Roy. Meteor. Soc. P. 155—218.
- [9] Hayden, C. M., 1970, An objective analysis of Cloud cluster dimensions and spacing in the tropical north pacific, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 98, P. 534—540.
- [10] Palmén, E., 1948, On the formation and structure of tropical hurricane, *Geophysics*, P. 26—38.
- [11] Riehl, H., 1948, On the formation of typhoons, *J. Meteor.* Vol. 5, P. 247—264.
- [12] Sattler, J. C., 1967, On the origin of tropical vortices, Proc. of the Working panel on tropical dynamic meteorology, Aug. 1967. NWRP, 12—1167—132, P. 39—76.
- [13] Wei Ding-Wen, Wang Yun-kuan, 1982, Some basic problem in the formation of the tropical cyclone—A research with hydrodynamic model, *Collected Oceanic Works*, 5, 23—40, 或: 魏鼎文、王允宽, 1981, 热带气旋形成的若干基本问题, 1981 年全国台风会议文集, 南京.
- [14] Wei Ding-Wen, W. M. Gray, 1985, Structure differences of typhoons with large VS small area extent of cloudiness (to be published).
- [15] Williams, K., 1970, Characteristics of Wind, thermal, and moisture fields surrounding the satellite-observed mesoscale tradewind cloud clusters of the west north pacific, In: Proc. of the symposium on tropical meteor. 2—11 June 1970, Honolulu, Hawaii Institute of Geophysics, Aug. 1970, P. DIV 1—8.
- [16] Yanai, M., 1961, Dynamical aspects of typhoon formation, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 39, P. 282—309.

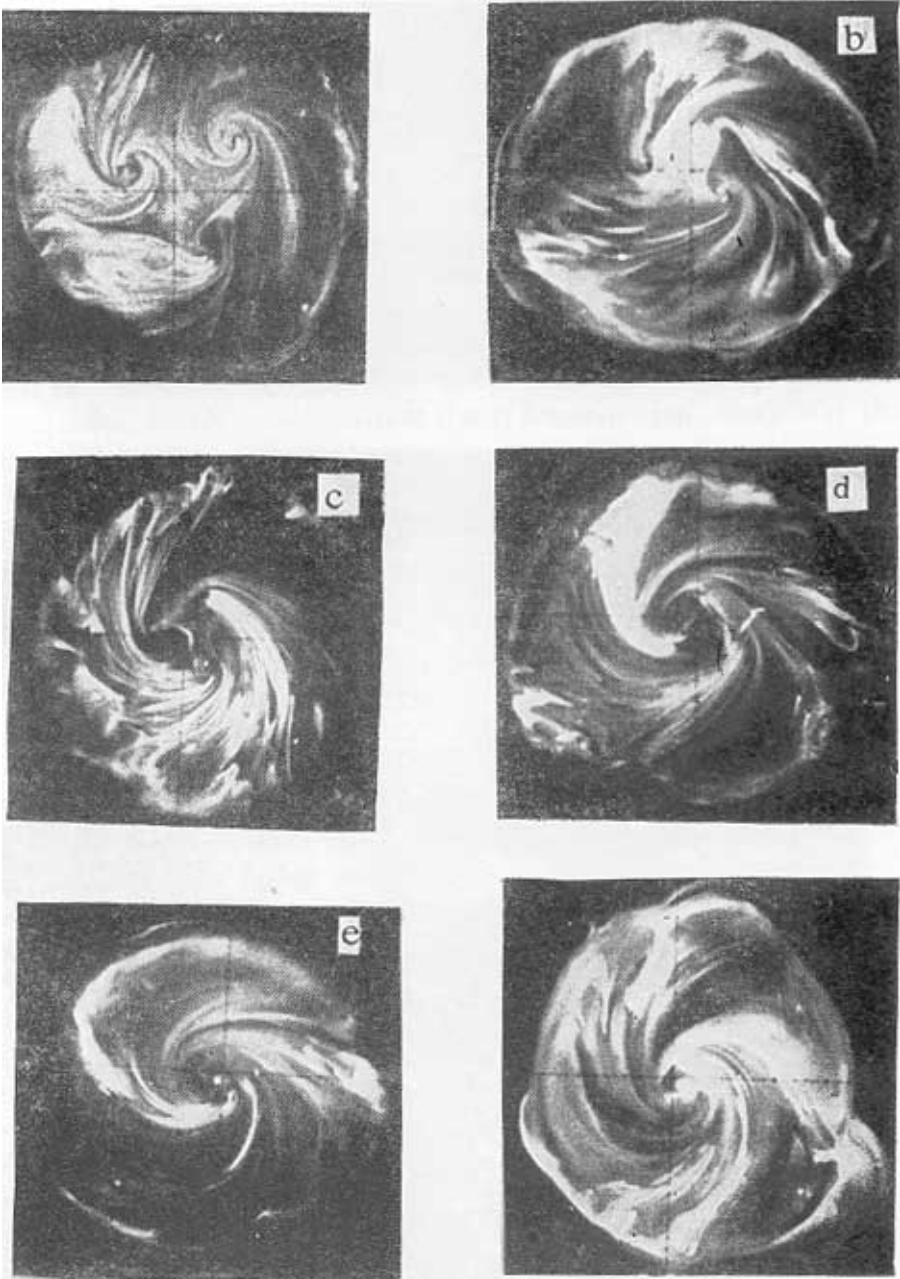


图1 物理模型的中低层流场演变

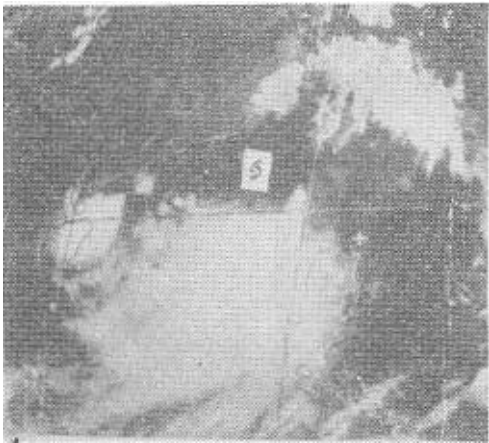


图7 1984年8月30日08时 No. 8411 台风的 IR 云图

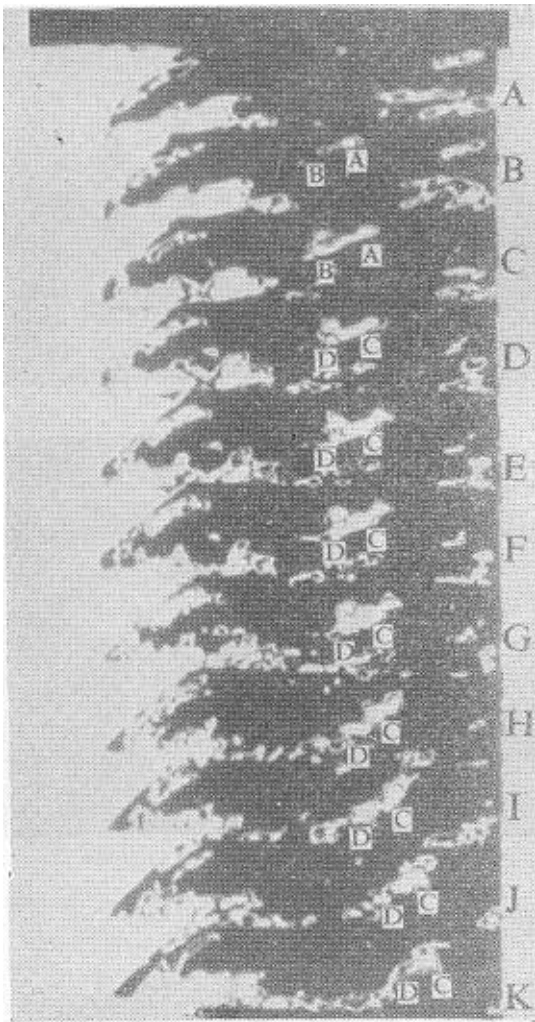


图8 1983年6月27—28日日本红
外卫星云图系列照片

本照片已作伪彩色显示处理
(A) 27日 11:00 (B) 14:00 (C) 17:00
(D) 18:30 (E) 19:00 (F) 19:30 (G)
20:00 (H) 28日 00:00 (I) 01:00 (J)
05:00 (K) 06:30