

台风形成中冷空气作用的模拟实验

王允宽 刘俊清 黄中华

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文用流体动力学模拟实验方法,研究探讨了不同强度冷空气在台风生成中的作用及其影响机制问题。

我们的实验结果与天气实况基本一致。

一、引 言

自六十年代末,气象卫星提供了大量云图资料,开阔了人们的视野,进而发现绝大多数台风都是由赤道辐合带地区的扰动发展而来。从近些年的资料看,我国编号的西太平洋台风,平均每年有80%以上是由赤道辐合区中的扰动发展而成的^[1,2]。不少研究工作指出,在春季和秋冬季,北半球北方冷空气势力较强,当冷空气南下到达热带地区与热带扰动发生作用,有利于台风形成。这种情况尤以秋季和我国南海地区常见^[3-5]。

我们在这里主要以流体动力学模拟实验的方法,探讨热带辐合带地区的中尺度有组织的对流云系,在不同强度的冷空气影响下,能否形成台风的有关问题。而关于冷空气对台风发展的影响问题(即冷空气活动对台风的加强、减弱、消亡等问题),已有人用流体力学模拟实验方法进行了研究^[6],本文就不再讨论了。

二、实验的设置

实验用的转台同文献[6],实验容器盒呈扁圆形,高为3.5 cm,直径为1.2 m。以空气为实验介质,香烟的烟云为示踪物质。

在实验中,我们以三个相互间位置可以调整变动的加热源来模拟处在热带地区的中尺度有组织的对流云系。适当调整转台的转动周期,来模拟地球自转。在实验容器内设置了一个具有一定尺寸的塑料水袋,分别注入不同温度的冷水来模拟不同强度冷空气的影响。下面我们给出上述三个实验控制因子的有关参数,并对实验的方法及相似性问题作简要介绍。

1. 实验控制因子及其参数

模拟的中尺度对流云系,是由三个红外加热器来实现的。加热器均由涂有红外材料

1986年1月27日收到,1987年3月16日收到再改稿。

的电热丝绕制而成, 其加热电功率为 6.5 W (在 $4\text{--}8\text{ W}$ 范围内可调)。通过凹面镜聚焦后, 加热源可用来加热直径 $d = 1.5\text{ cm}$, 高为 3.5 cm 的空气柱。实验时适当调整三个加热器相互的间距 l , 使其满足 $l > 2d \sim 3d$ 。我们已有的工作表明^[7]当 $l \leq 2d \sim 3d$ 时 (l 为相邻的两个加热中心的间距, 当这个距离为加热源自身尺度 d 的 $2\text{--}3$ 倍或更小时), 会发展成具有一个暖心温度结构的典型台风。因此在这个实验中, 三个加热源的相互间距采用 $l > 4.5\text{ cm}$ 。

在实验中转台的旋转角速度为 $0.2\text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

不同强度冷空气的模拟, 是由薄膜塑料 (注入冷水后其厚度约 2 mm) 做的制冷水袋来实现的。水袋放在容器的底部, 它的形状与尺寸, 放置部位见图 1。图中圆形区域为模拟的中尺度对流云系的位置, 为了后面说明问题方便把圆形区分为 I、II、III、IV 四个区, I、II 区位在靠近冷水袋的一侧。

实验时我们以图 1 中的 P 点, 因水袋通入不同温度的冷水, 引起在那儿的空气降温 ΔT_p 作为区分不同强度冷空气影响的温度指标。我们通过大量的反复实验区分出三种不同强度冷空气影响, 即“弱冷空气”、“适度冷空气”及“较强冷空气”, 它们在 P 处的降温指标分别为: $\Delta T_p < 0.3^\circ\text{C}$ 、 $0.8^\circ\text{C} \geq \Delta T_p \geq 0.5^\circ\text{C}$ 及 $\Delta T_p > 1.0^\circ\text{C}$ 。

2. 实验资料的索取

水平流场及垂直环流结构的资料取得同文献 [8]。

温度分布的测量是采用头部直径约为 1.5 mm 的小型测温热敏电阻 (共 34 支), 将它们装置在距实验容器盒底部 1 cm 高度处, 这些测温探头顶部的高度相当于大气中 700 hPa 的高度。经过校订它们的测温精度达 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。

风速径向分布的测量是以 2 秒的时间间隔控制相机快门作连续拍照, 跟踪特征烟粒移动计算绘出风速径向廓线。

3. 实验的相似性

我们已经在文献 [7] 中, 对实验的相似性问题作了讨论。本文中由于考虑了冷空气

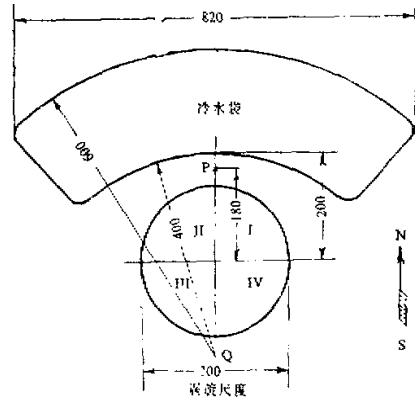


图 1 冷水袋装置示意图

单位: mm

表 1 动力相似判据 Rossby 数

特征量	V	$f(\sin 20^\circ)$	D	R_o
大气	15 m/s	$5 \times 10^{-4}/\text{s}$	1000 km	0.30
模拟	12 m/s	$0.4/\text{s}$	30 cm	0.10

影响因子, 这样在冷空气作用下模拟的中尺度对流云系的北部中空出现了风速较大的偏北气流, 在大气中平均风速 $V = 15\text{m/s}$, 模拟实验中 $v = 12\text{mm/s}$ 。下面我们给出与其有关的无量纲相似判据 Rossby 数(见表 1)。

三、冷空气影响下各要素场的分布特征

1. 不同强度冷空气作用下的环流特征

为了阐明冷空气的作用, 实验容器内先不放制冷水袋, 观察无冷空气作用时, 由三个加热源(间距为 5.5cm 时)模拟的中尺度对流云系的水平流场及垂直环流的状况(见图版 I 图 2)。图 $2A_0$ 为三个分离加热源的位置, 图 $2A-C$ 为相应的上、中、下水平流场。中、下层流场的共同特征是有三条云带向各自的加热源位置辐合, 上层对应三个加热源位置有三支向四周辐散的云系。这里没有共同辐合或辐散中心, 中心部位也无眼区特征。图 $2D$ 为无冷空气作用时, 模拟的中尺度对流云系的垂直环流结构(剖面是通过中心部位南北向取的), 可以看到南北两侧对流环比较对称, 中心部位又存在另外的对流结构。

1) 弱冷空气 ($\Delta T_p < 0.3^\circ\text{C}$) 影响时的环流状况

图 $3A_1-A_3$ (见图版 II) 为弱冷空气影响下模拟的中尺度对流云系的上、中、下水平流场。同无冷空气作用时的流场图 2 的状况对比, 可清楚地看到, 这时中、下层流场共同特征是四周气流向一个共同中心辐合, 形成了具有一个辐合中心的涡旋环流。它的北部在弱冷空气影响下, 呈现了大片东北气流区域, 相应上层呈现了从一个中心向四周辐散的气流。

弱冷空气影响下的垂直剖面结构如图 $3A_4$ 所示, 这时南北两侧对流环开始呈现了不对称性, 靠近冷空气一侧的对流环边缘部位在冷空气楔入侵影响下被抬升, 并向冷空气一侧伸长。而中心部位仍有对流运动(强度变弱), 不存在眼区的结构。

上述环流特征反映了在弱冷空气影响下, 发展为具有一个辐散、辐合中心的低压扰动, 但不能促成其发展为具有典型台风结构的环流。

2) 适度冷空气 ($0.8^\circ\text{C} \geq \Delta T_p \geq 0.5^\circ\text{C}$) 影响时的环流状况

图 $3B_1-B_3$ 为适度冷空气影响下模拟的中尺度对流云系的上、中、下水平流场, 突出特征是各层的中心部位均呈现出一个台风眼。中、下层四周气流均向中心眼区辐合, 气旋性环流比弱冷空气影响时有所加强, 在冷空气影响一侧的 I、II 区内偏北风有所增强。

图 $3B_4$ 为在适度冷空气影响下模拟的中尺度对流云系的垂直剖面结构, 这时在中心部位呈现出典型台风所具有的眼区结构。在实验中可观察到靠近冷空气一侧的对流环, 在冷空气楔的强迫抬升作用下, 环流进一步加强, 并向冷空气一侧延伸, 这时南北两支对流环呈现出明显的不对称性。

3) 较强冷空气 ($\Delta T_p > 1.0^\circ\text{C}$) 影响时的环流状况

当冷空气较强时, 可入侵到整个 I、II 区进入 III 区, 结果中、下层 I、II 区内东北风不断加强, 高空在 I 区出现很强的西南风, 3 个盘日后, 各层水平环流状况如图 $3C_1-C_3$ 所示。中、下层在 I、IV 区仅残留着一支螺旋云带, 上层相应为一个伸向东北方的云系, 实验表明在较强冷空气作用下的中尺度对流云系趋于衰亡。

从垂直环流看, 较强冷空气入侵时, 冷空气楔可一直伸入到垂直对流环的中心部位, 使一度出现的眼区迅速消亡、填塞, 并使南边一支对流环的对流运动受到抑制或破坏(见图 3C₄)。

2. 不同强度冷空气作用下的温度结构特征

1) 不同强度冷空气影响下模拟的中尺度对流云系的径向温度分布

图 4 中虚线所示为无冷空气影响时, 南北径向温度分布(温度剖面是通过中心部位南北向取的, 由于正经过了位在南边的一个加热源, 故此高温中心偏离中心, 位在南侧——中心线的右边, 如图 5 所示), 它反映了无冷空气作用时, 南北两边温度结构基本上是对称的。

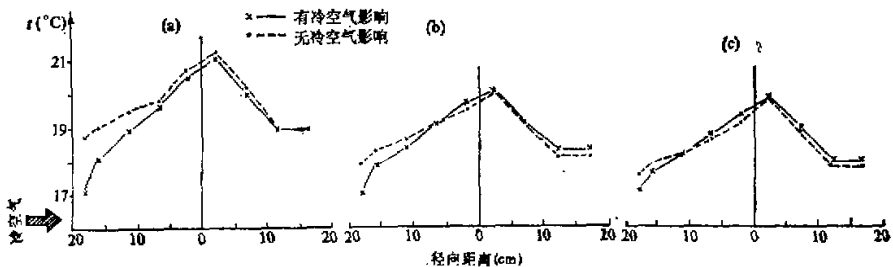


图 4 在不同强度冷空气影响下模拟的中尺度对流云系径向温度分布

a: 较强冷空气影响, b: 适度冷空气影响, c: 弱冷空气影响。

图 4a 中实线为较强冷空气作用下南北径向温度分布(图中左边为靠近冷空气的一侧), 可以看到冷空气入侵到中心部位, 这就揭示出中尺度对流云系的发展所以受到抑制及在 I、II 区内偏北风明显增大的原因。

图 4b 反映出在适度冷空气影响下, 降温作用没有波及到云系的中心部位, 仅从北侧入侵了半径的 2/3 区域。由于冷空气入侵深入程度“适中”, 对北侧距中心 1/3 的区域及另一侧均无降温影响, 这就利于中心部位潜热能量的持续累积, 有利于发展成台风。

图 4c 表示在弱冷空气影响下的南北径向温度与无冷空气影响时的差异, 仅表现在北部边缘附近存在较弱的降温作用。

2) 不同强度冷空气影响下模拟的中尺度对流云系的水平温度分布

在弱冷空气作用下, 影响前后水平温度分布特征没有明显变化, 中心区域仍呈现与三个加热源相对应的三个分离的温度中心(图略)。

在适度冷空气作用下, 由原来三个温度中心调整为呈现出单一的温度中心的温度分布(图略)。这一暖中心的出现标志着台风的形成。它还表明在适度冷空气作用下, 南北两边水平温度梯度的差异并不十分显著。大量的实验还表明, 当我们使红外加热源对中心区域持续提供加热, 则更有利于单一温度中心的形成, 此时生成的台风眼区结构更为清楚。

较强冷空气作用下的水平温度分布特征, 从较强冷空气影响下的水平温度场我们可

清楚地看到,靠冷空气一侧温度梯度明显加大,南北两边水平温度梯度极不均一(图略)。实验表明在较强冷空气作用下,水平温度均呈现出温度分布不均一性,这是使中尺度对流云系靠冷空气一侧的 I、II 区内各层风速迅速增长的直接原因。但这种温度结构对台风的生成并不有利。

3. 不同强度冷空气影响下模拟的中尺度对流云系南北两边风速径向分布

为了便于对比研究,我们先给出无冷空气影响时底层南、北两边风速径向廓线,它们基本呈对称分布(见图 5c)。

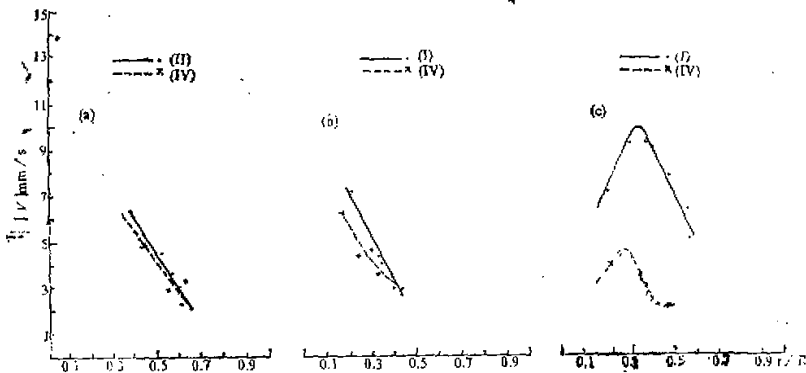


图 5 不同情况下水平流场南北两边风速径向分布

(a): 无冷空气影响(下层) (b): 弱冷空气影响(下层) (c): 适度冷空气影响(中层)

图 5b 为弱冷空气影响下的情况,我们可以看到底层南、北两边风速径向分布略有差异。北边 I 区内风速最大值比南边 IV 区的最大值高出 1 mm/s, 另外北边风速廓线略有外移。

图 5c 为适度冷空气影响下中层南、北两边风速径向分布,这组风速径向廓线的形式与典型台风廓线十分一致。但这时北边最大风速值几乎比南边高出一倍。我们从实验中得到的这组廓线,表明当适度冷空气入侵时,模拟的中尺度对流云系北部风速明显加大,这就加强了中低空的辐合,气旋性涡度也随之加大,以致使中尺度对流云系发展成台风。Fett^[9] 对西太平洋的一个强台风 Marie 作个例分析时,也强调了这一作用。

在较强冷空气作用下,靠冷空气一侧(北边),各层风速径向分布的特征,均是从扰动中心至边缘,风速几乎是呈线性增加(越接近边缘风速增加越快)。从上层南、北两边风速径向分布,可以看到南、北两边风速相差三倍以上(图略)。靠近冷空气一侧(即 I 区内),这种风速随着中心距离加大而呈线性递增的分布特征与北边因较强冷空气入侵造成水平温度梯度加大有关。它不利于中尺度对流云系中心区域潜热能的持续积累,从而抑制了发展。

四、冷空气作用与模拟的中尺度对流云系自身强度、 红外加热源相互间距变化的关系

1. 模拟的中尺度对流云系自身强度的改变

我们的大量实验表明,在弱冷空气或较强冷空气作用下,无论是增加红外加热源的加热电功率(为 8W),或减少加热电功率(为 4W),均不能形成台风涡旋。

在适度冷空气作用下,当增加或减少加热电功率时均可形成具有眼区特征的台风涡旋。加热电功率增加为 8W 时,可看到台风环流发展更加旺盛,各层眼区边缘轮廓更加清楚,特别是上层台风眼区呈三角形(图略)。加热电功率减弱到 4W 时,台风环流变弱,在冷空气影响下各层云系范围缩小,主要分布在 I、IV 区,云系尾部伸向 III 区,台风眼区变得较小(图略)。

图 6 为在适度冷空气作用下加热源电功率分别为 8W、6.5W、4W 时模拟的中尺度对流云系的中层风速径向分布。从图中可以看到,随着加热强度增加,最大风速亦加强,同时风速径向廓线向中心部位靠近。

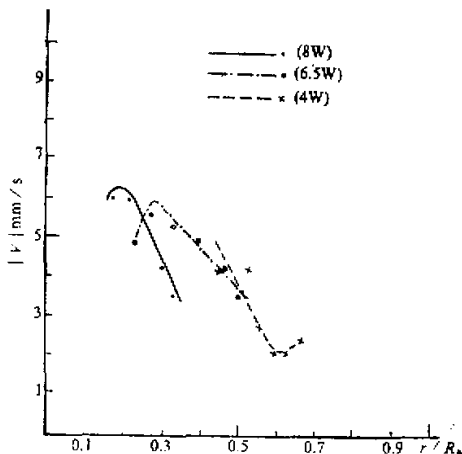


图 6 模拟的不同强度中尺度对流云系在适度冷空气影响下形成台风的中层风速径向分布

2. 适度冷空气影响与红外加热源相互间距改变的关系

通过大量实验我们发现,当红外加热源相互间距 l 为 5~7 cm 时,在适度冷空气影响下,可形成具有一个眼区的台风涡旋,眼区位在三个加热源的几何中心附近,环流状况类似于图 3 B_1-B_3 。此后再加大加热源的相互间距离,形成台风涡旋的眼区向北偏移出三个加热源的几何中心。

当间距 $l \geq 10$ cm 时,仅在 II 区的加热源位置附近形成一个有眼区的涡旋,但经 5 个盘日后,这个眼区就消失了(图略)。

从上述实验结果表明,在一定条件下适度冷空气的影响,能促使台风形成。中尺度对流云系自身强度的加强,加速了台风的生成。在热带辐合带地区中尺度对流云系相互密集的程度则是台风形成的决定性内因(当 $l > 6d$ 时,即使在适度冷空气影响下,也不易形成台风)。这个关键性的条件——决定性的内在因素,就是中尺度对流云系间的相互动量与质量的交换作用。适度冷空气的影响是导致保持着适当间距的中尺度对流云系互相关进行动量与质量交换的外在条件,因而在台风形成中适度冷空气的作用,仅是促成台风形

成的环境因子。

五、不同强度冷空气作用的探讨

1. 弱冷空气的作用

从图 3A, 表明弱冷空气仅有可能使赤道辐合带地区的中尺度有组织的对流云系发展成热带低压。原因何在呢? 从图 5b 看底层南北两边风速差异不太明显, 不会提供较大的气旋性涡度, 从垂直剖面环流看, 受冷空气影响一侧冷空气的楔形入侵角仅在 10° 左右 (图略), 表明弱冷空气从底层入侵得比较浅薄, 对受影响一侧的对流环抬升作用较小, 对低层的动量输送贡献也不大。由图 4c 及水平温度场的特征可知 (在弱冷空气影响下仍是呈现三个分离的温度中心), 不易形成潜热能的集聚。因此弱冷空气不易促使台风的形成。

2. 适度冷空气的作用

图 5c, 表明南北两边最大风速几乎相差一倍, 加大了中低空的辐合, 产生了有利于台风生成的气旋性涡度。从大量的垂直剖面资料可以看到, 受适度冷空气影响一侧对流环的冷空气楔形入侵角在 20° 左右 (图略)。冷空气自中低层入侵, 动量输送比弱冷空气大, 有利于对流运动发展。由于入侵冷空气没有影响到中心部位 (不仅从垂直剖面结构可以清楚地表明, 由图 5b 温度剖面也可以看到这一点), 易于潜热能在中心部位的积累, 因而促进了台风的形成。

3. 较强冷空气的作用

从垂直剖面可以看到较强冷空气影响时, 受冷空气作用一侧楔形入侵角达 35° 以上 (图略), 把这侧对流环抬升到上层一个窄小范围, 加强了上层的辐散气流, 冷空气楔深入到模拟的中尺度对流云系的中心区域, 使对流运动受到破坏, 抑制了对流运动的发展。由风速径向分布看到不仅南北两边风速差异十分显著, 受冷空气影响一侧风速自扰动中心区域至边缘, 几乎是呈线性增加。有如一个“抽气系统”迅速地把中心部位的潜热能辐散出去, 使潜热能无法在中心区累积。因此从图 3c 反映出在较强冷空气影响下, 中尺度对流云系趋于消亡。

六、结 语

我们的实验研究表明:

较强的冷空气影响, 不利于台风生成。只有适度的 (较弱) 冷空气的入侵, 对热带地区中尺度有组织的对流云系的发展起了促进作用, 有利于台风形成。弱冷空气作用则不足以促使中尺度对流云系发展成台风。

在热带辐合带地区聚集着的中尺度对流云系在相互间距不超过其自身尺度的六倍情况下, 一旦受来自北方中、高纬地区的强度不大 (较弱) 的冷空气作用常可形成台风。因

此,在热带辐合带地区,这些对流云系相互间密集的程度,是台风形成的决定性内因,冷空气的影响,仅可作为一个外部环境因子,不能作为台风生成的一个必要条件。

由于冷空气从中低层入侵形成对暖空气的强迫抬升,加速了受冷空气影响一侧对流环气流的流动。适度冷空气入侵有利于对流运动的发展及潜热能的积累。当较强冷空气作用时,从垂直剖面结构可以看到,冷空气入侵对流运动受到抑制,潜热能的累积遭受破坏,不能形成台风。适度冷空气入侵的另一个作用表现为受冷空气影响的一侧风速加大(中低空东北风加强),增加了中低空的辐合作用,加强了气旋性涡度,促使中尺度有组织的对流云系发展成台风。

参 考 文 献

- [1] 陈联寿, 1977, 台风研究和预报问题的评述, 大气科学, Vol. 1, No. 2, P. 138—148.
- [2] 陈联寿、丁一汇, 1979, 西太平洋台风概论, 科学出版社.
- [3] 韦有通、王荫桐等, 1965, 南海台风发生发展问题的初步探讨, 气象学报, 35 卷 2 期.
- [4] 范惠君、丁一汇, 1974, 南海台风的卫星云图特征和发生发展时的一些特点, 夏季西太平洋热带天气系统的研究, 中国科学院大气物理研究所集刊第 2 号, 科学出版社. P. 14—28.
- [5] 华南台风研究协作组, 1979, 冷空气影响下秋季南海低压发展成台风的分析, 台风及热带环流的研究, 中国科学院大气物理研究所集刊第 8 号, 科学出版社, P. 9—18.
- [6] 魏鼎文、姚增权, 1982, 冷空气对热带气旋影响的模拟实验研究. 海洋文集, Vol. 5, No. 1, P. 41—47.
- [7] 魏鼎文、王允宽, 1983, 热带气旋形成理论中的几个基本问题——流体动力学模拟实验研究. 1981 年台风会议文集, 上海科学技术出版社, P. 141—152.
- [8] 王允宽、刘俊清、黄中华, 1986, 青藏高原地形对孟加拉湾热带气旋动力影响的模拟实验研究, 大气科学, Vol. 10, No. 1, P. 27—34.
- [9] Fett, R. W., 1968, Typhoon formation within the zone of the intertropical convergence, Mon. Wea. Rev., Vol. 96, No. 2, P. 106—117.

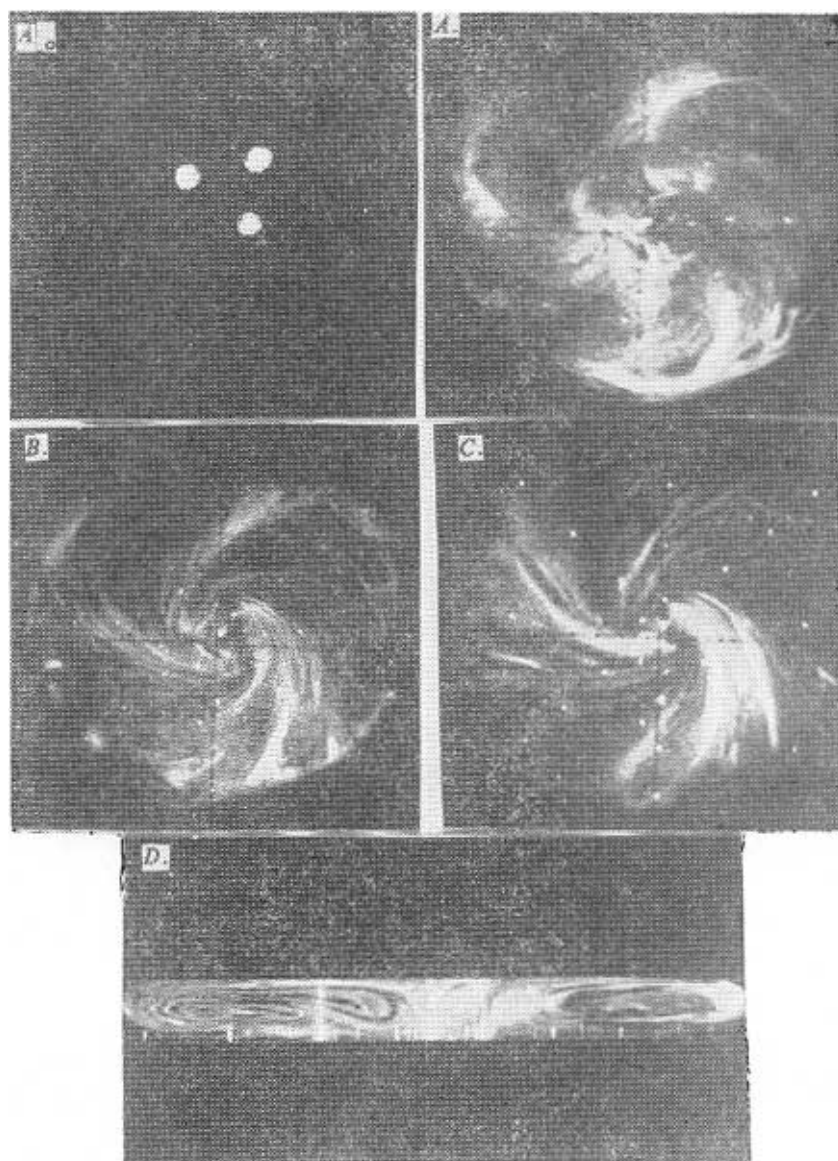


图 2 无冷空气影响时由三个加热源模拟的中尺度对流云系各层水平流场和垂直剖面结构
A. 三个分离的加热源位置 B. 上层流场 C. 中层流场 D. 下层流场 E. 垂直剖面结构

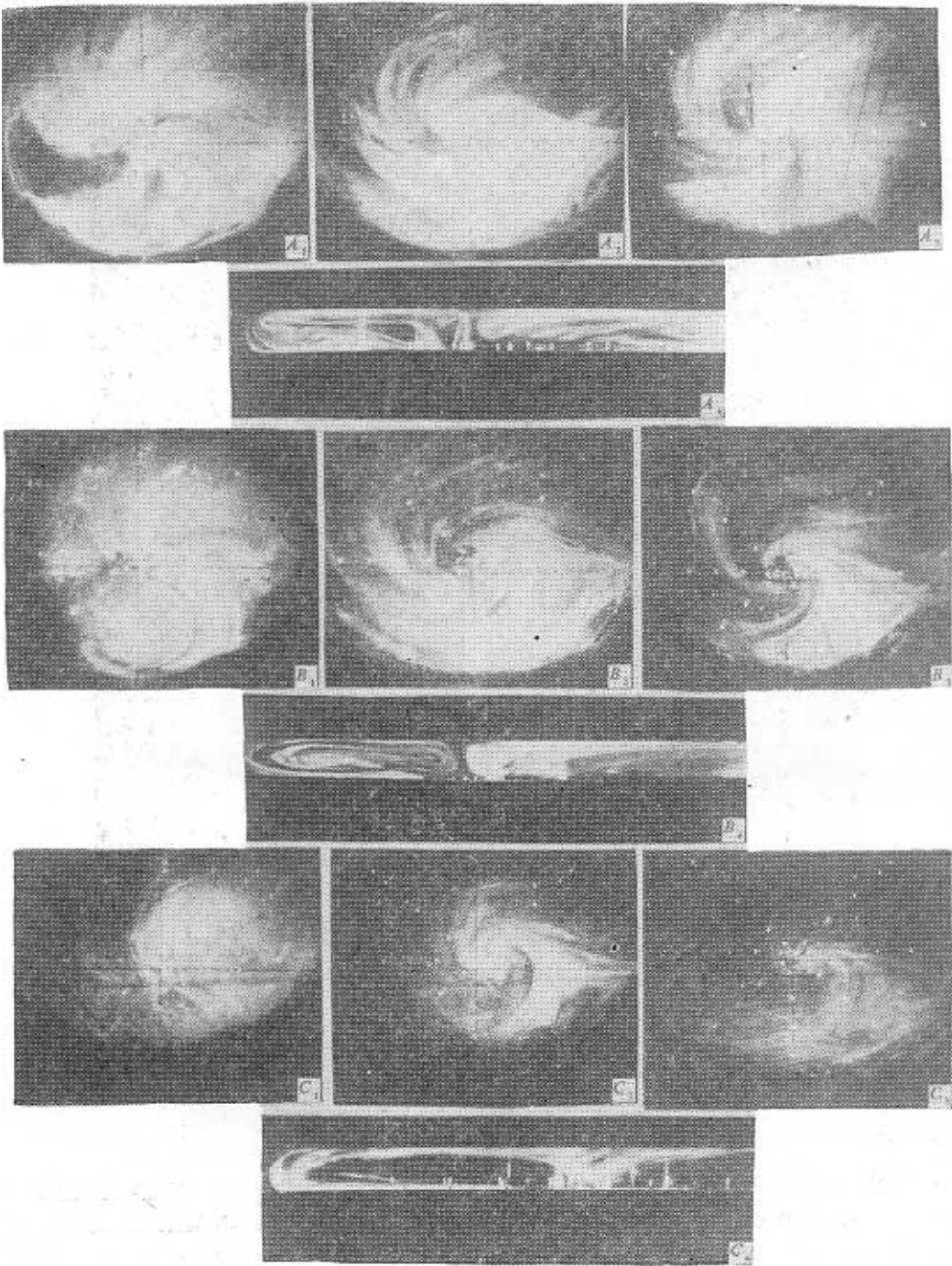


图3 不同强度冷空气影响下模拟的中尺度对流云系各层水平流场和垂直剖面结构
A：弱冷空气影响，B：适度冷空气影响，C：较强冷空气影响。
下标1、2、3分别表示上层、中层、下层，下标4为垂直剖面。