

# 风切变对积云发展影响的数值模拟研究

徐华英 吉武胜 黄美元

(中国科学院大气物理研究所)

## 提 要

本文采用二维暖积云模式研究了风切变对积云发展和降水大小的影响。计算结果表明: 一般有风切变情况下积云的发展和降水量都明显减弱。这是由于水平气流的作用促进了云内外水汽和热量交换, 减弱了积云发展的条件。计算还表明: 在多种不同风速廓线和大气层结下风切变对云和降水发展均不利。

我们发现当云移行前方有高温区时, 在中等的风切变下可能有利于积云发展和降水形成。这是由于在水汽场和风场的配置下, 云中得到充沛的水汽补充, 促进了云和降水的发展。总降水量可增加2—3倍。

## 一、引 言

观测中发现强大的积雨云如超级单体风暴等往往出现在有风切变环境中<sup>[1-4]</sup>。风速切变值以  $3(\text{m/s})/\text{km}$  左右最为有利, 过强或过弱的风速切变都不利于强风暴的发展。近年来不少人用数值模拟的方法研究了风切变对积云发展的影响问题。Schlesinger<sup>[5]</sup>于1973年采用二维积云模式在不同的风切变及下层取不同相对湿度条件下模拟积云的发展过程, 结果指出, 下层相对湿度大时, 云发展强烈, 而风切变大时, 云发展较弱。Schlesinger<sup>[6]</sup>于1977年用三维模式模拟了风切变对积云发展的影响, 指出有风切变时雨强和降水面积均比无风切变时小, 但最大雨水含量及云生命史比无风切变时大。Takeda<sup>[7]</sup>于1966年使用周期边界条件的二维模式表明强风切变并不能促进对流云的发展。Takeda<sup>[8]</sup>于1971年又用二维模式做了计算, 他指出在西风气流中若在一个适当高度上有东风急流, 则可能形成长生命史的积云, 但没有降水量等结果, 而且从这个结论也不能说明风切变对云发展强度有利。Pastushkov<sup>[9]</sup>于1975年采用三维模式指出存在一个“谐振”风切变值  $U_s$  (约为  $3(\text{m/s})/\text{km}$ ), 在此风切变下, 垂直动能转化为水平动能的量及势能转化为动能的量最大。但从这一点并不能表明此时云发展最强。

总之, 风切变影响积云发展和形成降水的观测现象还没有模拟出来, 风切变的作用还需要进一步讨论并给予合理的解释。实际上影响积云发展的因素很多, 除了风切变等流场条件之外, 还有温度和水汽的大小及其空间分布等, 而且气流、温度和湿度等条件对云的影响也不是各自孤立的。这里试用二维暖云模式讨论各种温湿条件下风切变对积云发

展的影响,特别要探讨在什么样的温湿分布条件下,风切变有可能有利于积云的发展。

## 二、模 式

本文基本上采用徐华英等<sup>[20]</sup>的二维暖积云降水模式。它是从湍流大气热力动力学方程组出发,考虑准不可压近似,对方程进行 Bossinesq 简化,不计柯氏力,不考虑各参量在  $y$  方向的变化,得到关于涡度、扰动温度、水汽、云水和雨水的控制方程以及涡度、流函数和气流速度之间的关系式:

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q}{\partial t} &= -\frac{\partial uQ}{\partial x} - \frac{\partial wQ}{\partial z} + uw\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + wQ\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z} - 2wu\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)^2 \\ &\quad - \rho g \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{T'}{\bar{T}} + 0.61Q' - R - M \right) + K\Delta Q \\ \frac{\partial T'}{\partial t} &= -\frac{\partial uT'}{\partial x} - \frac{\partial wT'}{\partial z} - T' \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + (\gamma - \gamma_d)w + \frac{L}{C_p}(P_1 - P_4) \\ &\quad + K\Delta T' \\ \frac{\partial Q}{\partial t} &= -\frac{\partial uQ}{\partial x} - \frac{\partial wQ}{\partial z} - Q \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + P_1 - P_4 + K\Delta Q \\ \frac{\partial M}{\partial t} &= -\frac{\partial uM}{\partial x} - \frac{\partial wM}{\partial z} - M \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + P_1 - P_2 - P_3 + K\Delta M \\ \frac{\partial R}{\partial t} &= -\frac{\partial uR}{\partial x} - \frac{\partial wR}{\partial z} - R \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_R R) + P_2 + P_3 - P_4 \\ Q &= \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \\ u &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ w &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial z}\end{aligned}$$

式中  $Q$  为涡度,  $\phi$  为流函数,  $u$  和  $w$  分别为水平和垂直运动速度,  $\bar{T}$  和  $T'$  分别为空气的平均温度和扰动温度,  $Q$  和  $Q'$  分别为平均水汽比湿和比湿的扰动量,  $M$  和  $R$  分别为云水和雨水的比含水量,  $\rho$  为空气密度,  $g$  为重力加速度,  $k$  为湍流交换系数,  $\gamma = \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$  为大气温度垂直递减率,  $\gamma_d$  为干绝热温度递减率 ( $\gamma_d = Ag/C_p$ ),  $L$  为水的汽化潜热,  $C_p$  为定压比热,  $V_R$  为雨水群滴下落末速度,  $P_1$  为云水凝结率,  $P_2$  为云水向雨水的自动转换率,  $P_3$  为云水通过与雨水碰并转化为雨水的转换率,  $P_4$  为雨水蒸发率。

差分格式采用“上游差”算法,时间步长 5s 至 40s,由稳定性判据确定。模拟区域取水平宽 30km,垂直高 12km,网格间距为 600m。上、下边界取刚性无摩擦边界条件,侧边界取 IAS<sup>[21]</sup>开边界条件。

大气温度垂直分布取 I、II、III 三种层结,在  $z=0$  高度上的温度递减率  $\gamma$  值分别为 0.68, 0.70 和 0.80°C/100m,并随高度减小,至 5km 附近三种层结之  $\gamma$  值均为 0.68°C/10<sup>3</sup>m, 5km 以上  $\gamma$  值还随高度减小,在 10km 附近  $\gamma$  值小于 0.3°C/100m,湿度分布为给定

上下两层的相对湿度值。

采用初始温度扰动触发对流发展, 扰动范围宽 4.8km, 高度从 1.2km 至 2.4km, 其中相对湿度为 100%, 初始扰动温度值为 1℃。

### 三、数值试验结果

#### 1. 不同强度的风切变对云发展的影响

风速随高度分布的廓线取 A, B, C 三种形式, 如图 1。这三种形式的风切变, 从地面到 12km 的风速差分别为 5m/s, 15m/s 和 30m/s。温度层结采用 III 型, 相对湿度在 1.2km 以下为 74%; 以上为 40%。

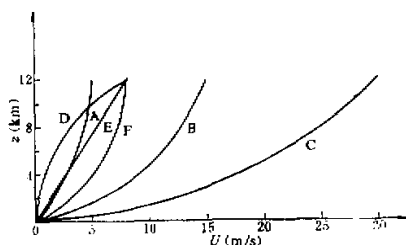


图 1 几种风速廓线

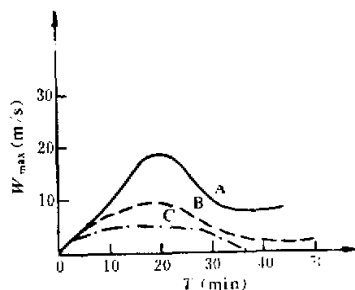


图 2 不同强度风切变下, 云中最大上升气流速度的演变

模式计算结果表明: 风切变较弱时(A型)云生命时间大于 48min, 总降水量大于 40 t/m; 风切变较强时(B型)云生命时间约为 48min, 总降水量为 35t/m; 对于风切变更强(C型)的云生命时间仅 36min, 总降水量为 4.5t/m。可见风切变大时云的生命时间短, 降水量也小。图 2 为这三种风切变条件下云内最大上升气流速度随时间的演变, 由图可见风切变最大的 C 云最弱。

为了了解风切变对云和降水的作用, 下面分析不同风切变条件下云及其周围的流场结构。图 3 和图 4 分别为 A 型和 C 型风切变条件下在云发展的各阶段中云的外形和流场。风切变较小的云在 12 分钟时(图 3a)云内为上升气流, 在云的中下部为辐合流场, 云处于发展阶段。而风切变较强的云此时(图 4a)云内为水平气流控制, 这种穿透积云的气流加强了云内外水汽和热量的交换, 不利于积云的发展。十几分钟后强风切变下的云已衰亡(图 4b), 而弱风切变下的云发展旺盛(图 3b), 生命期长, 云顶接近 10km, 云内有较强的上升气流, 云下有强降水。

#### 2. 不同分布形式的风切变对云发展的影响

风速随高度分布廓线取 D, E, F 三种形式(见图 1), 这三种形式的风切变, 从地面到 12km 的风速差均为 8m/s, 只是风切变随高度分布各异, D型下层风切变值最小, 而 F 型

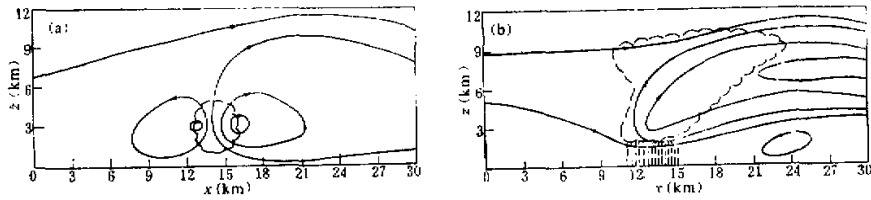


图3 A型弱风切变下云的外形和流场

(a) 12min; (b) 36min

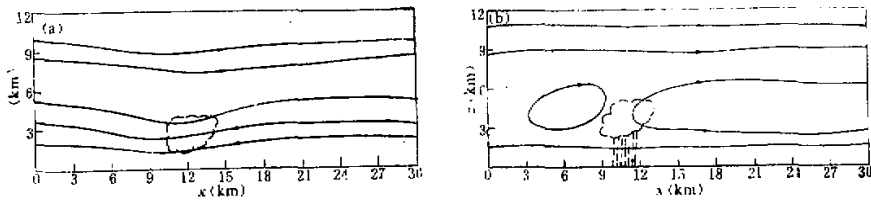
图中实线为等流函数线(间隔  $10^6 \text{g/m} \cdot \text{s}$ ) 虚曲线为云界, 虚直线为云下降水区

图4 C型强风切变下云的外形和流场

(a) 12min; (b) 24min

图例同图3

下层风切变值最大。温度层结采用 II 型, 相对湿度在 1.2km 以下为 78%, 以上为 30%。

计算结果表明 D, E, F 三种类型风切变下在 60 min 时总降水量分别为 52.1 t/m, 41.7 t/m 和 40.8 t/m, D 型风切变下的总降水量较大, 而且云发展也强大些, 在 20 分钟时其最大上升气流速度要比 F 型风切变下大 2 m/s。这是由于影响云发展的主要是位于下层的气流, 而 D 型风切变在下层的风切变值较 F 型的小, 降水量和云发展强度也是 D 型比 F 型强一些。

Takeda 在 1971 年采用中上层为东风气流在中下层有西风急流的风切变形式。作者认为某些风切变环境中 (如  $C_6$  型) 能形成 “Long-Lasting” 云体。我们引用了他的  $C_7$ — $C_{10}$  风切变分布进行了模拟计算, 所得结果列于表 1 中, 由表可见这几种风切变条件下云的生命期和降水量均小于无风切变的云, 而且  $C_6$  风切变下云的生命期也并不长。

表1 几种风切变分布下云和降水情况

| 风切变分布类型  | 云发展生命时间 min | 总降水量与 $C_6$ 总降水量之比 |
|----------|-------------|--------------------|
| $C_7$    | 40          | 0.6                |
| $C_8$    | 40          | 1.0                |
| $C_9$    | 40          | 1.1                |
| $C_{10}$ | 50          | 1.9                |
| 无风切变     | 60          | 3.3                |

以上模式计算表明,只要有风速切变,无论其随高度分布形式如何,均不利于云的发展,云的强度、生命期和降水量都减小。而且风切变愈强对云与降水的强度减弱愈明显。

### 3. 在不同层结条件下风切变对云和降水的影响

选用了不同强度的三种层结 I、II、III 分别模拟了无环境风切变和在 12km 范围里风切变为 8m/s 两种条件,相对湿度在 12km 以下为 78%,以上为 30%。

这三种层结在有风切变条件下共六种情况进行了云模式的计算。图 5 为模拟云的云中最大上升气流的演变。由图可见,无论有无风切变都是层结愈不稳定上升气流愈大。在相同层结条件下,有风切变时较无风切变时的云中上升气流小,峰值出现时间提前 2—3 min,而对云的生命期影响不大。

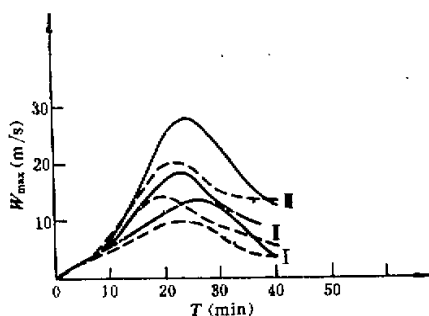


图 5 各种层结条件下云中最大上升气流的演变  
实线: 无风切变; 虚线: 有风切变

表 2 各层结下有无风切变时云和降水参数的比较

| 温度层结                     | I    |      |            | II   |      |            | III  |      |            |
|--------------------------|------|------|------------|------|------|------------|------|------|------------|
|                          | 无    | 有    | 增加率<br>(%) | 无    | 有    | 增加率<br>(%) | 无    | 有    | 增加率<br>(%) |
| 风切变                      | 0°   | 45°  | (-13)      | 0°   | 40°  | (-12)      | 0°   | 20°  | (-10)      |
| 云倾斜角(云高)                 | 13.6 | 9.9  | -27        | 18.2 | 14.3 | -21        | 27.5 | 20.6 | -25        |
| 最大上升气流速度 $W(\text{m/s})$ | 2.3  | 2.2  | -4         | 2.5  | 2.5  | 0          | 2.7  | 2.7  | 0          |
| 最大云水含量 $M(\text{g/m}^3)$ | 8.7  | 3.7  | -57        | 14.7 | 5.2  | -64        | 11.3 | 5.3  | -79        |
| 最大雨水含量 $R(\text{g/m}^3)$ | 197  | 45   | -77        | 364  | 75   | -79        | 216  | 80   | -62        |
| 最大雨强 $I(\text{mm/h})$    | 86.4 | 29.4 | -66        | 162  | 41   | -75        | 157  | 99   | -37        |
| 总降水 $E(\text{t/m})$      |      |      |            |      |      |            |      |      |            |

表 2 为这三种层结下有无风切变时云和降水的各参量,以及有风切变时相对于无风切变时参量的增加率(%).由表可见,在同一层结下有风切变时云和降水各参量均小于无风切变时的量(表中增加率均为负值)。风切变引起的降水参量改变比云参量改变要大一些。层结不稳定(表中层结 III)时风切变引起云外形及云中含水量改变小,对降水减弱的影响也小一些。但风切变对不同层结条件下云和降水影响的差异并不显著。

#### 4. 在云移行前方有高温区时,风切变对云和降水的影响

由于中尺度气象场不均匀,积云的消散或湖泊等水面的蒸发造成局地低层或地面附近有高温区,下面讨论在这种水汽空间分布不均匀条件下如有风切变时积云的发展。

取高温区厚 1.2km,宽 12km 在此区域内湿度均匀,高于环境湿度 5% 至 10%,位于云的下风方向。该高度周围环境之相对湿度为 80%。计算了不同风切变强度下云和降水情况,列于表 3,由表可见。

(1) 当云移行前方有高温区时,在适当的风切变下,可促进积云的发展。例 2, 3, 4, 5 均有相对湿度 85% 的高温区,它们的风切变大小不同,例 3 和 4 的风切变为 12km 高度内风速差 3m/s 和 8m/s,由表可见它们的总降水量分别为 64.4t/m 和 73.0t/m,比无风切变例 2 的总降水量 36.4t/m 大 1.8 和 2.0 倍,但当 12km 高度内风速差为 20m/s 的强风切变时(见例 5),降水量却很小,仅 6.2t/m。

表 3 风切变和高温区对云和降水的影响

| 编号 No. | 风速差 (12km 高度内) m/s | 高温区的相对湿度%     | 云生命期 min | 总降水量 t/m |
|--------|--------------------|---------------|----------|----------|
| 1      | 0                  | 无高温区(80)      | 48       | 30.8     |
| 2      | 0                  | 85            | 54       | 36.4     |
| 3      | 3                  | 85            | 72       | 64.4     |
| 4      | 8                  | 85            | 72       | 73.0     |
| 5      | 20                 | 85            | 30       | 6.2      |
| 6      | 8                  | 85(地面以上 600m) | 60       | 62.7     |
| 7      | 8                  | 90            | 84       | 125.0    |

(2) 当高温区的相对湿度增至 90% 时,如例 7 其降水量为相同风切变下相对湿度 85% 的例 4 的 1.7 倍。为无风切变下的 3.4 倍。

(3) 当高温区抬高 600m,相当于有一湿舌,如例 6,其降水量比相同条件地面高温区的例 4 小一些,但较无风切变的例 2 降水量大得多。

(4) 无环境风切变条件下有高温区也能在一定程度上促进云发展及增加降水,见例 1 和例 2,但比有风切变时增加的量要小得多。

由此可见,在云移行前方有高温区时,中等强度风切变有利于积云的发展。这是由于在气流推动下积云向高温区移动,并且在垂直剖面上产生顺时针方向的涡度,将云前方高

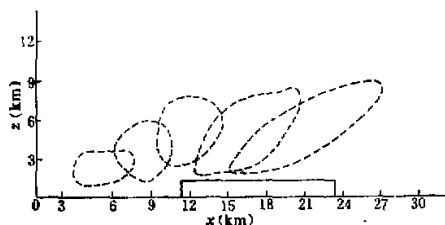


图 6 有高温区和风切变条件下(例 4)积云外形的移动及演变

虚线为云廓线,横坐标上矩形为高温区

湿区的水汽输入入云。这种增加水汽入流的有利因素,可以抵消由于风切变引起的从云侧面耗散水汽和热量的不利因素。但当风切变太大时,云体倾斜,通过云侧面能量的耗散大,有碍积云发展。图6为有高温区和风切变条件下积云的移动和演变。由图可见,积云在风切变流场中向高温区移动,并发展强盛。

对于在中等强度风切变下发展起来的某些强风暴,其前方是否有高温区的观测事实还不多。希望今后有针对性的观测和分析。

#### 四、小 结

根据以上用二维积云模式模拟风切变对积云发展影响的计算和分析可以得出以下几点看法:

(1) 由于环境水平风速的垂直切变增强了云内外水汽和热量的交换,因而风切变对积云发展和降水都不利,而且一般来说风切变愈强,云和降水愈弱。

(2) 风切变取各种风速随高度分布廓线都对云和降水不利,下层风切变对云影响的作用大。

(3) 各种层结条件下风切变都是减弱云和降水的发展,其中风切变对降水影响比对云参量的影响更大一些。而层结条件较稳定时风切变的影响较大。

(4) 在积云移行前方有高温区时,则中等强度的风切变有利于云和降水的发展,降水量可增大2—3倍。

#### 参 考 文 献

- [1] Browning K. A. et al., 1962, Air Flow in Convective Storms, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 88(376), 117—135.
- [2] Newton C. W., 1967, Severe Convective Storms, *Advances in Geophysics*, 12, Academic Press, 257—308.
- [3] Mason B. J., 1969, Some Outstanding Problem in Cloud Physics—The Interaction of Microphysical and Dynamical Processes, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 95(405), 449—485.
- [4] 黄美元、王昂生等, 1980, 人工防雹导论, 科学出版社, 59—81.
- [5] Schlesinger R. E., 1973, A Numerical Model of Deep Moist Convective: Part I Comparative Experiments for Variable Ambient Moisture and Wind Shear, *J. Atmos. Sci.*, 30(5), 835—856.
- [6] Schlesinger R. E., 1978, A Three-Dimensional Numerical Model of an Isolated Thunderstorm: Part I. Comparative Experiments for Variable Ambient Wind Shear, *J. Atmos. Sci.*, 35(4), 690—713.
- [7] Takeda T., 1966, Effects of the Prevailing wind with Vertical Shear on the Convective Cloud Accompanied with Heavy Rainfall, *J. Met. Soc. Japan*, 44(2), 129—143.
- [8] Takeda T., 1971, Numerical Simulation of a Precipitating Convective Cloud: The Formation of a "Long-Lasting" Cloud, *J. Atmos. Sci.*, 28(3), 350—376.
- [9] Pastushkov R. E., 1975, The Effects of Vertical Wind Shear on the Evolution of Convective Clouds, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 101(428), 281—291.
- [10] 徐华英、李桂忱、郝京甫, 1986, 积云降水过程的数值模拟研究, 中国南方云物理学和人工降水论文集, 气象出版社, 110—120.
- [11] Orville H. D. and F. J. Kopp, 1977, Numerical Simulation of the Life History of a Hailstorm, *J. Atmos. Sci.*, 34(10), 1596—1618.