第45卷 第1期　　气 象 学 报　　Vol. 45, No. 1
1987 年 2 月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　Feb., 1987

层状云对积云发展和降水的影响
——一种云与云之间影响的数值模拟*

黄美元　洪延超　徐华英　周　恒**

（中国科学院大气物理研究所）

提　　要

利用我们已建立的二维积云降水模式，在相同的大气层结条件下，模拟了孤立积云和层状云中积云的发展和降水情况。结果表明，层状云的存在对积云的发展有显著的促进作用，降水量可加大到几到几十倍，从而认为积层混合云系可能是产生大雨和暴雨的一种重要机构，这与梅雨锋里锋区混合云系常产生暴雨的观测事实比较符合。

一、引　　言

人们已注意到，云与云之间的影响对云的发展和降水量变化有重大作用。观测[1,2]和数值模拟[3,4]表明，积云之间的并合，可以强烈地促进云的发展，降水量可加大到几到几十倍。另外的研究[5]也指出，当上下有两层云存在时，就构成播种云——供应云体系，此时降水量也会加大。在文献[6]中我们提出了云之间影响的第三种类型，即积云和层状云并存时层状云对积云发展的影响问题。根据对梅雨锋云系和降水的研究[7-10]，大雨和暴雨主要发生在锋区范围内，产生这种降水的云型主要是积云和层状云的混合云。观测还表明，层状云中对流云回波生命期一般比孤立对流云长，降水强度和降水量也较大。本文将利用数值模式进一步计算和讨论层状云对积云发展的影响。

二、计 算 和 分 析

设想积云是在高度和厚度可以改变的层状云中产生和发展的，利用已建立的二维非定常平面对称积云降水模式[11,12]，把初始给定的层状云只作为含水量层，不考虑它内部的上升气流和微物理过程。计算时分别取在低层(1.5—3.5 km)中层(3.0—5.0 km)和高层(5.5—7.5 km)以及整层(1.5—5.0和1.5—7.5 km)加层状云四种情况，为了更接近实际，层状云顶部加一逆温层。分别讨论强弱两种积云在层状云中的发展情况。计算时取刚性边界，气流、云水等为零，下边界雨水取其上方相邻网格点之值，温度和湿度的边界值等于环境值，初始条件、扰动条件除同[11]文之外还要加上 $t=0$ 时，云水含量 $M=0.2$ g/m^3。大气温度直减率 $\gamma=0.60-0.001Z$，Z 为高度以 100 m 计之，γ 以℃/100 m 为单位。逆温层厚 0.5 km，其内 $\gamma=-0.6$℃/100 m。湿度分布是，在 2 km 高度及其以上，相对湿度 $f=0.70$，2 km 之下 $f=0.90$(对于强积云)和 $f=0.80$(对于弱积云)。

* 本文于 1985 年 4 月 11 日收到，1985 年 9 月 10 日收到修改稿。

** 南京气象学院 1984 年毕业生。

1. 层状云的并存对积云发展的影响

表1给出层状云影响下，原来较弱积云的主要参量值。为了便于比较，同时给出顶部有和无逆温层的层状云中积云的参量值。总的来说，不论层状云顶部有无逆温层，它对积云发展和降水都有明显的促进作用，其内积云各参量值明显比孤立积云大。下面就不同方面进行分析。

表1　有无层状云时弱积云的发展情况（数值模拟结果）

积云参量	孤立积云	层状云高度及厚度 (km)				
		1.5—3.5	3.0—5.0	5.5—7.5	1.5—5.0	1.5—7.5
最大上升速度 (m/S)	2.1	2.2/1.2*	2.6/2.2	2.1/2.1	3.8/2.2	4.3/4.0
最大云水含量 (g/m^3)	1.2	1.6/1.4	1.7/1.6	1.2/1.2	1.7/1.6	1.7/1.7
最大雨水含量 (g/m^3)	0.2	1.0/0.4	1.2/0.9	0.2/0.2	1.8/1.3	2.1/2.0
最大回波强度 (dBz)	29	42/35	43/42	29/29	47/44	48/48
最大雨强 (mm/h)	1.3	12.7/4.5	13.0/10.1	1.3/1.4	24.0/17.2	28.1/27.7
总凝结量 (t/m)	291	2115/2698	2069/2994	291/291	3744/4327	5235/5824
总降水量 (t/m)	70	1311/824	1436/1176	70/70	2841/2232	3982/3875
降水效率 (%)	24	64/31	69/39	24/24	76/52	76/67

* 有逆温层时的值.

云中心轴上的最大上升气流速度（W_{max}）是反映积云发展程度的重要参量。从表1看到，孤立积云中，W_{max}=2.1 m/s，中层和整层有层状云时，W_{max} 都加大，层状云愈厚，加大值愈大。虽然逆温层对上升气流发展有阻碍作用，但此时层状云中积云仍比孤立积云发展强大。层状云的积云处在一种饱和且有含水量的环境中，积云侧边界上的湍流和挟卷作用，不再使积云损失水汽和热量而耗散其发展的能量，积云云顶也不会进入非饱和空间造成云滴蒸发而使云中浮力减小；另外层状云存在也使流入积云内的空气比较潮湿。所有这些因素促使积云凝结量增加，因此释放出的潜热增多，上升气流加强，入流水汽量加大，从而进一步增大凝结量、云水和雨水量。由于存在这种正反馈作用，积云发展旺盛，降水量增加。在本例中，高层（5.5—7.5 km）加层状云对积云中上升气流影响不明显，这是由于积云较弱，流场基本没有到达层状云高度。

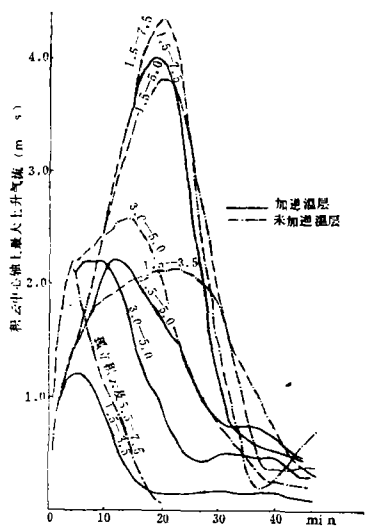


图1　各种情况下积云中心轴上最大上升气流速度的时间变化（曲线上数字是层状云所在高度）

图1是不同层状云情况下积云中心轴上最大上升气流速度 W_{max} 随时间演变情况。可见除低层有层状云并有逆温层情况而外，层状云中积云的 W_{max} 峰值比孤立积云大。另外上升气流随时间分布形式也有不同。孤立积云中，上升气流增大和减小很快，最大上升速度维持时间很短；而有层状云时，往往强上升气流能较稳定地维持一段时间，特别明显的是云生命期延长，一般延长2倍。有逆温层时，虽然 W_{max} 的峰值小于无逆温层时情况，但积云寿命都差不多。

逆温层高度不同对 W_{max} 影响也不同。在 1.5—7.5 km 为层状云时，逆温层在 7.0—7.5 km，W_{max} 值及其分布形式与无逆温层时差别不大，这是因为积云中 W_{max} 在 5 km处，逆温层对流场影响不大。当中层 3.0—5.0 km 为层状云时，W_{max} 在 4.0 km附近，此时逆温层对积云流场就有较大影响，使 W_{max} 分布中的峰值减小并提前下降。1.5—5.0 km 为层状云时也是如此。可见中层有逆温层时对嵌入层状云的积云发展有明显压制作用，但此时的积云仍比孤立积云强。在 1.5—3.5 km 有层状云时，由于逆温层高度低，严重地抑制了积云上升气流的发展，结果 W_{max} 减小，不仅小于无逆温层时的值，也小于孤立积云值。

另外，凡底高为 1.5 km的层状云中，积云的初始上升气流值都比较小，而对于底高在 3.0 km 以上的层状云中的积云，上升气流初始值都较大且和孤立积云相同。其主要原因是层状云中含水量的拖带作用：尽管含水量不大(只有 0.2g/m³)，但在积云发展的初始时刻，扰动产生的上升气流速度很小，相对而言云水拖带作用影响就大。总之，低层存在薄的(如厚度为 1 km)层状云，特别顶部有一逆温层时对积云发展是很不利的。

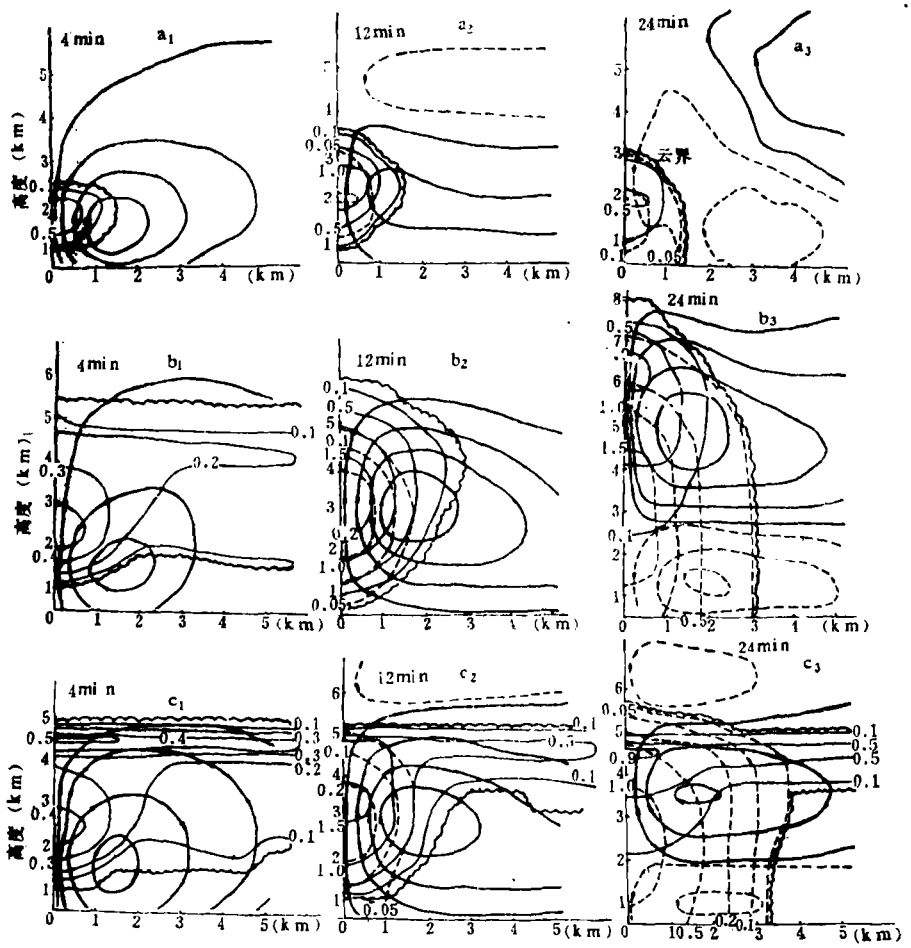


图 2 孤立积云 (a_1—a_3) 和 1.5—5.0 km 有层状云时积云 (无逆温层 b_1—b_3；有逆温层 c_1—c_3) 在 4 min、12 min 和 24 min 三个时刻云水 (细实线)、雨水 (虚线) 含量和流线 (带箭头粗实线和虚线) 的垂直剖面图

2．层状云和逆温层对积云结构和流场影响

我们通过一例来分析这个问题。图2给出三个时刻和三种情况下积云的结构和流场。在发展初期，流函数最大值所在高度都基本相同，但由于逆温层的抑制作用，上升-下沉环流区的上界高度不同，云中含水量分布的差别尤为明显。初始，孤立积云中含水量稍大，中心低范围也小；有层状云时（$2b_1$，$2c_1$），含水量中心升高，范围（0.3 g/m³的等值线）已扩大到4 km高度；有逆温层时（$2c_1$），由于向上输送的水汽和随之凝结的水量被压制在逆温层下，层状云顶部积聚并出现了以0.5 g/m³为中心的含水量闭合区。12 min时，比较$2a_2$和$2b_2$可以看出，和孤立积云大不相同，层状云中积云发展旺盛，云顶已达6 km，云水和雨水含量中心区在云中部，值比前者大得多，上升气流扩展到5—6km高度，云外中高层出现补偿性下沉气流，周围层状云已消散。另外有逆温层时（$2c_2$），云的结构明显不同。由于上升气流不能突破逆温层，只在逆温层底部辐散开，所以流场上界流线平直，这里的层状云也未消散，随着积云发展形成积云的云砧。24 min时，孤立积云（$2a_3$）已为下沉气流所控制，处于消散阶段；而层状云中积云（$2b_3$）的上升气流和含水量区上抬，云顶向上发展到8 km，产生强烈降水，成为一块成熟的积雨云，低层已出现反环流；有逆温层时（$2c_3$）情况有所不同，积云不向高处发展，云顶和含水量中心（0.9 g/m³）被限制在逆温层之下，云体变得粗壮。由于上升气流输送的水汽在逆温层受阻并凝结，云砧得到加强，其含水量达0.5 g/m³，但这里雨水含量却很小，说明云雨转换过程很弱。云下是一片较宽的降水区。其它计算例子也说明，与孤立积云相比，中层和整层有层状云时积云发展旺盛，云体高大，降水强而雨区宽广，层状云顶部逆温层虽然抑制了积云的发展，使积云形成明显的云砧，但积云仍比孤立积云强大。

3．层状云和逆温层对积云降水的影响

从表1可以看到，层状云，除了太高（在5.5—7.5 km）外，无论顶上有无逆温层对积云降水都有明显加大作用。与孤立积云相比，总降水量增加了19—57倍。层状云愈厚，积云降水量增加愈多，中层的层状云比低层层状云对降水促进作用更大。在有逆温层的层状云中，由于逆温层的抑制作用，积云降水有所减弱但仍比孤立积云总降水量大12—55倍。值得注意的是，1.5—3.5 km为层状云并有逆温层时，积云W_{max}（1.2 m/s）小于孤立积云之值（2.1 m/s），但云中的总凝结量却比孤立积云大9.3倍，相应的云水和雨水含量也大，云的生命期长，结果降水量显著加大。层状云中积云的总凝结量都显著大于孤立积云，增大范围在7.3—18.0倍（无逆温层时）和9.3—20.0倍（有逆温层时）。这进一步说明，层状云对积云发展的促进作用主要表现为它提供的饱和水汽环境减少了积云中水汽的损失，增加了凝结量。有逆温层时，积云中水汽损失更小，凝结量比无逆温时还大，但水量分散在云砧之中，积云最大含水量值并不大，加以上升气流有所减小，总降水量小于无逆温层时积云的值。

表1中的降水效率定义为云的总降水量与总凝结量之比。层状云的存在使积云降水效率明显提高，从24%提高到64—76%（无逆温时）和31—67%（有逆温时）。最大降雨强度也从1.3 mm/h增大到7.0—28.1 mm/h和4.5—27.7 mm/h。

对积云的降水情况也可以进行另一种比较，即看孤立积云与层状云中积云厚度相同时的降水量和降水效率。例如表1中孤立积云与1.5—3.5 km带逆温层的层状云中积

云顶高均在 3.5 km 附近，但总降水量明显不同，前者为 70 t/m，后者为 824 t/m，降水效率也有所提高。

这些模拟计算结果一定程度上能解释梅雨锋里的大雨和暴雨主要产生在积层混合云系的观测事实。

4. 层状云对强积云发展的影响

以上讨论的是较弱积云在层状云中发展的情况，有必要对较强的孤立积云作同样的分析，孤立积云发展的顶高为 7.0 km。

表 2 有无层状云时强积云的发展情况(数值模拟结果)

积云参量	孤立积云	层状云高度和厚度 (km，有逆温层)			
		1.5—3.5	3.0—5.0	5.5—7.5	1.5—7.5
最大上升速度 (m/S)	2.4	1.6	4.4	3.0	8.5
最大云水量 (g/m^3)	2.0	2.0	2.6	2.0	2.8
最大雨水量 (g/m^3)	0.7	0.8	2.0	0.9	3.8
最大回波强度 (dBZ)	40	41	48	42	53
最大雨强 (mm/h)	8.2	12.4	25.2	10.1	51.4
总凝结量 (t/m)	1921	5574	5319	3588	10006
总降水量 (t/m)	943	2252	2598	1568	6774
降水效率 (%)	49	40	49	44	68

从表 2 看，强积云的基本结果类同于弱积云的情况。由于这块积云强，云顶达 7.0 km 高度，不仅低层和中层层状云对它有明显影响，高层(5.5—7.5 km) 层状云也有显著促进作用，云中最大上升气流从 2.4 m/s 加大到 3.0 m/s，总降水量增加到 1.7 倍。但与表 1 结果对比表明，层状云存在对不同强度的积云降水的加大作用是不同的。对于较强的积云，层状云对降水加大作用减小，在表 2 中只加大到 1.7—7.2 倍，比对弱积云的加大作用小得多。另外对于相同厚度高度不同的层状云来说，中层层状云最有利于积云的发展，云中上升气流和总降水量都有较大的增加。高层层状云对强积云发展虽有较大促进，但对总降水量加大不多，低层层状云则与此相反。在中低层有逆温层时，层状云中积云降水效率都降低，主要原因是孤立强积云本身降水效率较高，而聚积在逆温层下云砧中的云水转换成雨水的效率较低。

通过以上数值模拟计算及其分析，可以认为，首先，在所讨论的积层混合云中，层状云对积云发展和降水的增大有显著的促进作用，降水量可加大几到几十倍，从而认为，积层混合云系可能是产生大雨和暴雨的重要机构，在作降水和暴雨预报时应予以注意。梅雨锋里的暴雨常发生在积层混合云系中的观测事实，一定程度上也可以用这一机制加以解释。其次，层状云存在对积云降水促进作用的大小，依赖于层状云的厚度和所在高度以及逆温层强度，也依赖于积云本身的强弱(亦即大气的温湿和层结条件等)。层状云愈厚，促进作用愈大。相对来说，中层层状云对积云降水影响大于高云和低云，层状云对弱积云影响更为显著。

参 考 文 献

[1] 黄美元、王昂生等，人工防雹导论，科学出版社，145—147，1980。
[2] Simpson, J, N. E. Westcott, R. J. Clerman and R. A. Pielke, On cumulus mergers, *Arch. Meteor Geophys. Bicklis*, 29,1—40,1980.
[3] Orville, H. D., Y-H Kuo, R. D. Ferley and C. S. Hwang, Numerical Simulation of cloud Interactions, *J. Rech. Atmos.* 14,499—516,1980.
[4] Turpeineu, O., Merging of moderate-sized convective cells on day 261 of GATE, Conference on Cloud Physics, 242—245.Chicago. 1982.
[5] Rutledge, S. A., and P. V. Hobbs, A model for the"Seeder-Feeder"process in warm-frontal rainbands, *J. Atmos. Sci.*, 40,1185—1206,1983.
[6] 黄美元、徐华英、洪延超，混合云系中层状云的存在对对流云发展的影响的数值模拟研究，南方云物理和人工降水会议文集(2)，广州，22 页，1983。
[7] 黄美元、洪延超，锋面云系和降水回波特征，《近代气象雷达及其应用》，四川省气象科学研究所，241—268 页，1981。
[8] 黄美元、洪延超、吴玉霞，梅雨云系若干雷达回波特征，南方云物理和积云降水会议，长沙，1982。
[9] 洪延超、黄美元等，梅雨云系的回波结构、降水特征及层结状况分析，同[6]，21 页，1983。
[10] 赵云清、李子华、周文贤，梅雨锋中尺度雨带的形成和演变，南方云物理和人工降水会议文集 (1)，6 页，1983。
[11] 徐华英、李桂忱、郝京甫，积云降水过程数值模拟研究，全国人工降水会议，黄山，1980。
[12] 徐华英、郝京甫，盐粉催化积云降水的数值模拟，大气科学，7，403—410，1983。

THE EFFECTS OF THE EXISTENCE OF STRATIFORM CLOUD ON THE DEVELOPMENT OF CUMULUS CLOUD AND ITS PRECIPITATION

Huang Meiyuan Hong Yanchao Xu Huaying Zhou Heng

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

Based on the two-dementional slab-symmetric model of cumulus cloud given by the authors, the development of cumulus cloud and its precipitation in environments with and without stratiform cloud has simulated numerically in the nearly same atmospheric stratification. The results show that the existence of stratiform cloud has significant effect on the development of cumulus cloud and the increase of its precipitation. The rainfall may increase for several to tens times. It is belived that the convective-stratiform mixed cloud system may be important for producing heavy rainfall which fact has been observed in Mei-yu frontal cloud system in recent investigation.