

积层混合云数值模拟研究(Ⅱ) ——云相互作用及暴雨产生机制*

洪延超

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘 要

用文(Ⅰ)积层混合云数值模式及暴雨云的平均大气层结模拟研究了暴雨积层混合云的演变过程、两种云的相互作用、云体结构及降水特征,并分析了暴雨产生的物理原因。结果表明,在积层混合云中,当对流发展时其周围层状云减弱甚至消散,层状云的降水强度随着离开对流云距离增大而增大。数值试验说明:层状云给积云提供良好的发展条件,饱和的环境及伴随层状云的辐合场使对流云具有长生命期、产生持续性的高强度降水和间歇性的特高强度降水;积层混合云是一非常有效的降水系统,这些及冰相微物理过程是暴雨产生的主要物理原因。

关键词: 云间相互作用, 降水特征, 暴雨机制。

1 引 言

中国大范围高强度的持续性暴雨和特大暴雨都是积云和层状云共存的积层混合云产生的。暴雨积层混合云中层状云深厚,有明显不均匀的雷达回波亮带,对流云生命期长、降水强度大,其强回波中心主要位于云体暖区,顶部没有明显的砧状回波^[1,2]。与强风暴相比,暴雨积层混合云中对流云形成的环境条件有显著差别。暴雨是在对流层中潜在不稳定较弱的条件下发生的,水汽条件好,湿层深厚,即对流层中低层都很潮湿,而且垂直风切变小,低空为辐合区,对流层为上升运动,其最大值在 500—600hPa^[1,3]。

为模拟研究暴雨积层混合云,文(Ⅰ)^[4]中建立了一个二维平面对称混合云数值模式及云中微物理过程参数化模式。利用丁一汇等^[3]对中国 26 次暴雨的大气平均温湿层结并结合上述暴雨环境条件特征,模拟研究从观测分析抽象出来的暴雨积层混合云主要特征及降水特征,分析暴雨形成的物理原因。

2 混合云中云相互作用及降水特征

据文献[3]给出的暴雨系统形成的平均环境条件,取地面温度 $T_0 = 300\text{K}$, 气压 $P_0 = 1000\text{hPa}$, 相对湿度 $F_0 = 0.85$ (对应的比湿为 16.4g/kg), 温度直减率 $\gamma_0 = 0.63^\circ\text{C}/100\text{m}$, F_0 和 γ_0 分别按 $0.00002/\text{m}$ 和 $0.000005/\text{m}$ 速率随高度减小。为了形成层状云,令

* 初稿时间:1995 年 4 月 5 日;最后修改稿时间:1995 年 11 月 16 日。

资助课题:国家“八五”攻关课题 85—906—08。

$$\text{conv} \left\{ \begin{array}{ll} = 10^{-4.3} & H \leq 2.5\text{km} \\ = -10^{-4.3} & 11.5 \geq H \geq 5.5\text{km} \\ = 0 & \text{其他高度} \end{array} \right.$$

这样可形成极大值为 0.22m/s、极值高度在约 5.5km(~530hPa)的水平均匀的垂直速度场。在层状云发展到 96 分时加对流扰动,取位温扰动参数 $\alpha = 1.0$ 。计算域为 $20 \times 210\text{km}^2$, $\Delta x = 1000\text{m}$, $\Delta z = 500\text{m}$, $\Delta t = 10\text{s}$ 。将 711 雷达置于地面离左边界 10km 处。

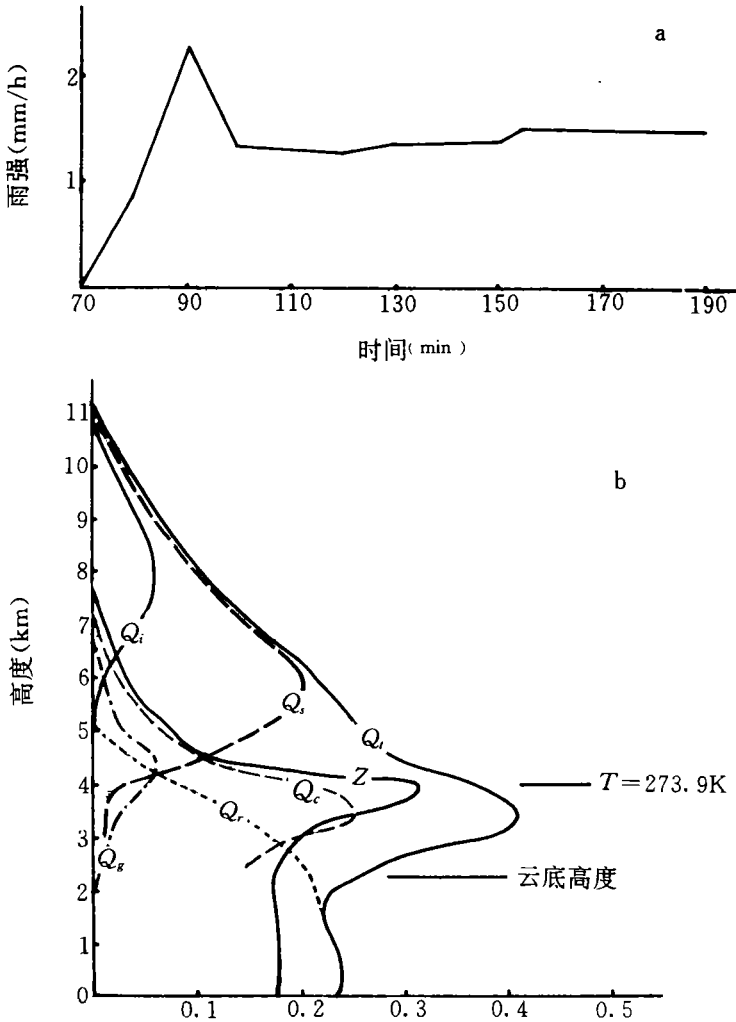


图 1 层状云雨强 P_A 的时间变化(a)和 96 分时各参量的高度分布(b)
(Q_i, Q_s, Q_c, Q_r 和 Q_g 的单位为 g/m^3 , Q_c 单位为 $0.1\text{g}/\text{m}^3$, Z 单位为 100dB)

先看作为暴雨对流云环境的层状云发展情况。图 1 给出层状云雨强的时间变化和加对流扰动时(96 分)各参量的高度分布(由于层状云水平均匀没有给出距离-高度剖面图)。在低层辐合场作用下,70 分地面开始出现降水,最大雨强出现于 90 分,约 2.3mm/h。

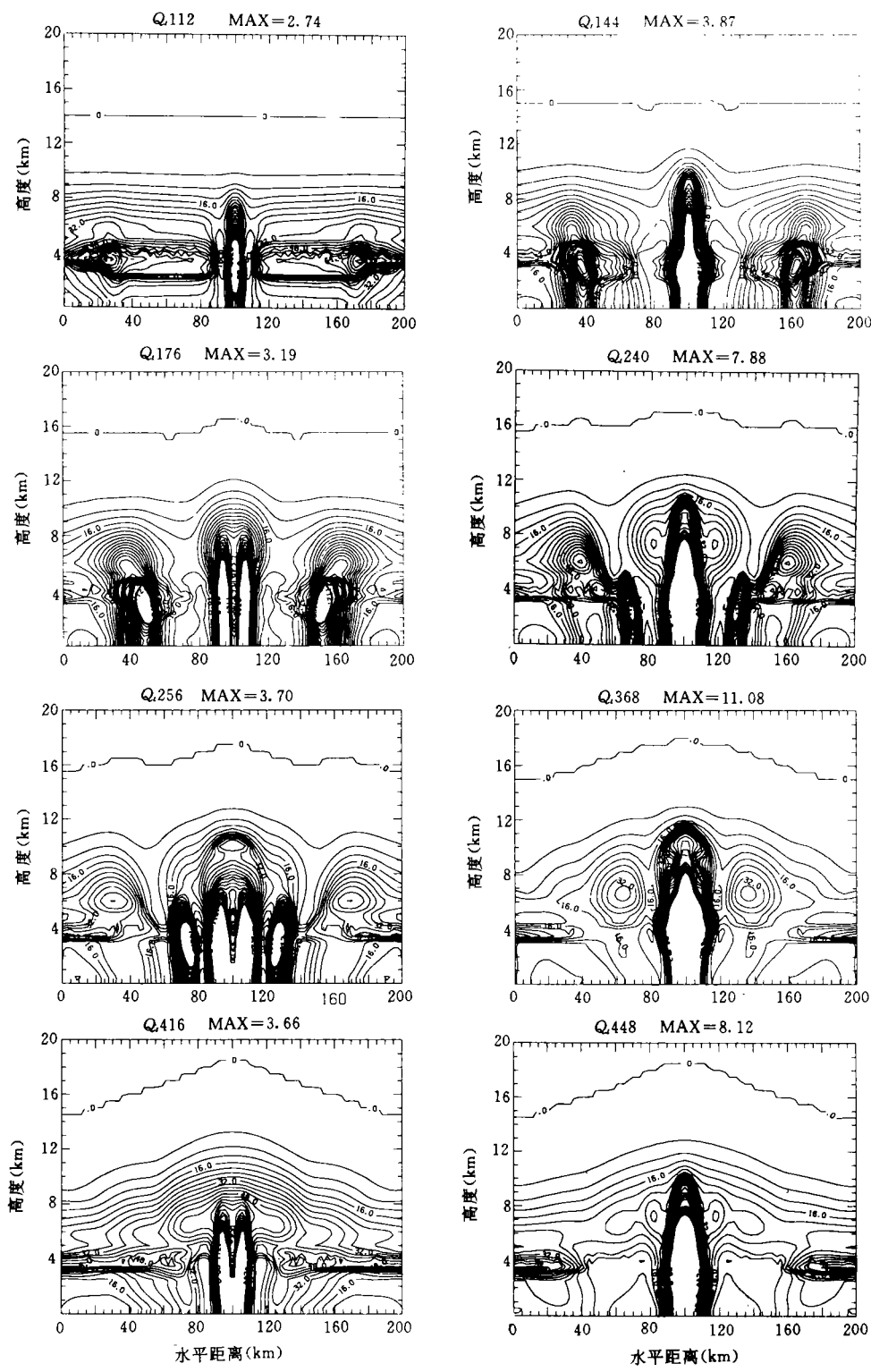


图2 混合云总含水量 Q_t (0.01 g/m^3)剖面图(Q_t 旁数字表示时间(min),MAX为实际最大值)

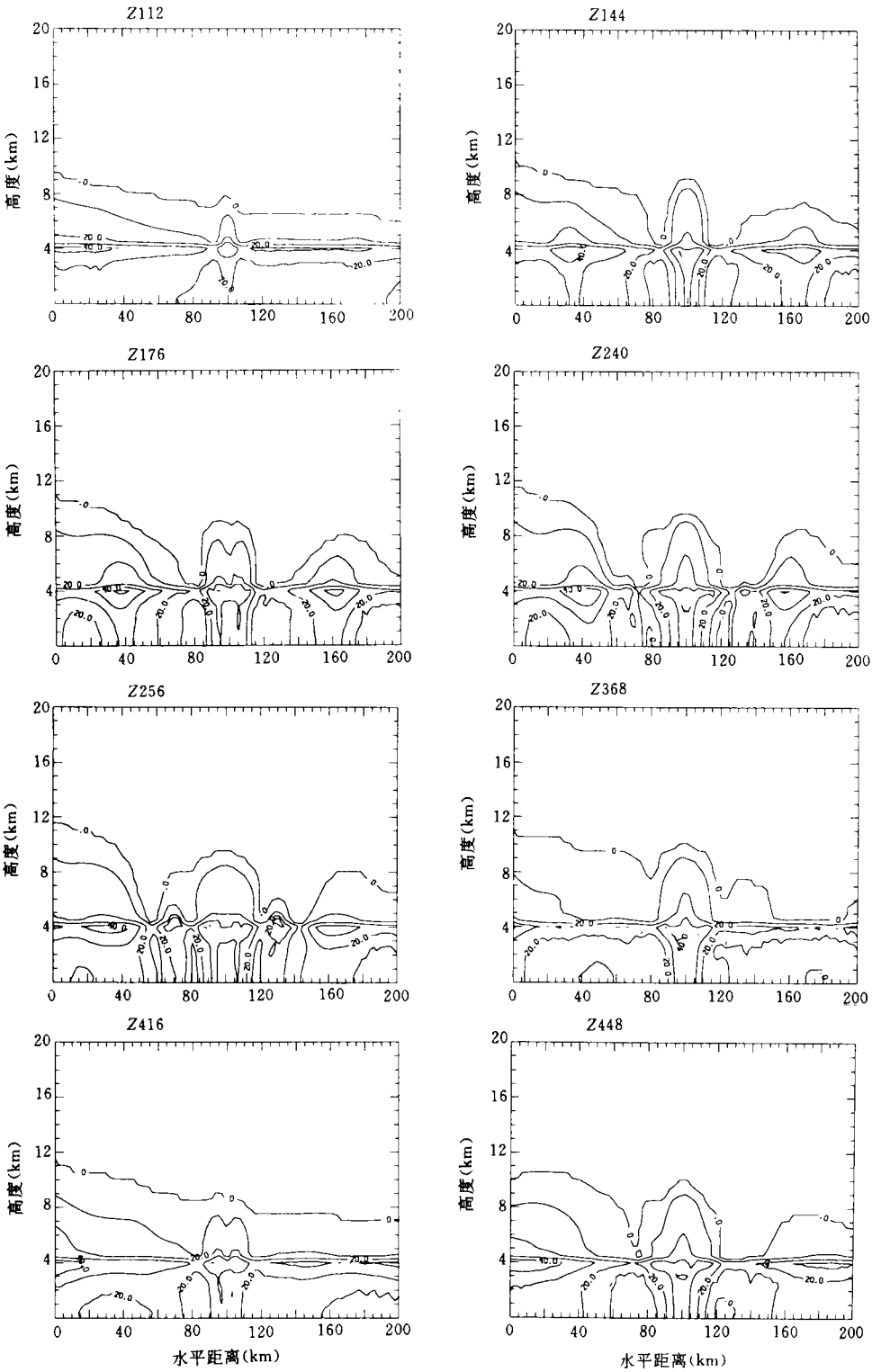


图 3 混合云雷达回波强度 Z (dB)剖面图(Z 旁数字表示时间(min))

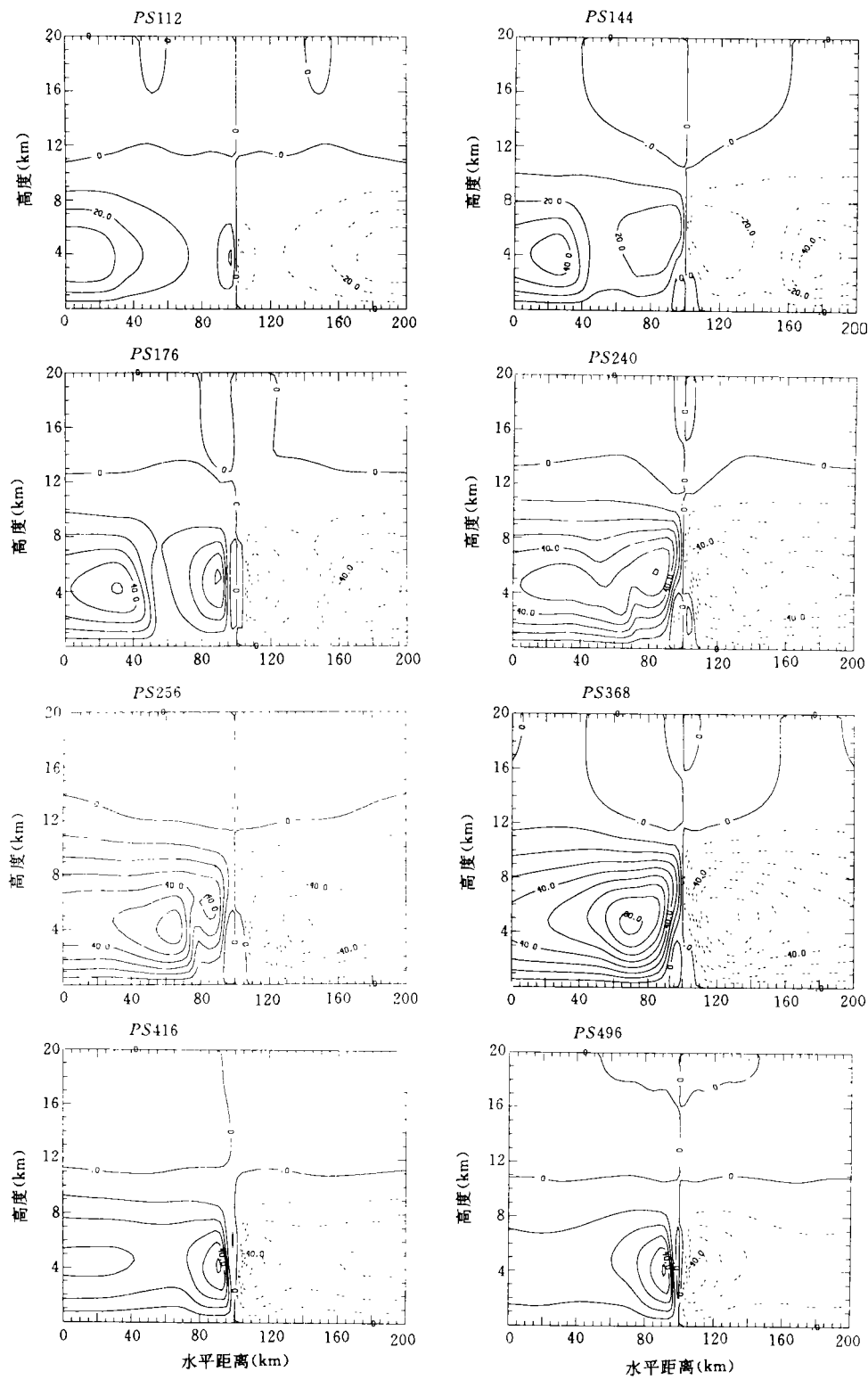


图4 流函数 PS ($10^8 \text{ g} \cdot \text{k} / (\text{s} \cdot \text{m})$) 的演变 (PS 旁数字表示时间 (min))

两侧边界增加,即离对流云远处的层状云中云水含量大。相应出现水平相对均匀的含水量区(图 2 Q₄₁₆) 和雷达回波区(图 3 Z₄₁₆)。448 分,分裂的对流云又合并加强,层状云首先从对流云近处减弱,因而此时水平范围减小到约 45km(图 5 Q₄₄₈)。以后反复出现上述过程,576 分层状云与对流云云水场连为一体(图 5 Q₅₇₆)。

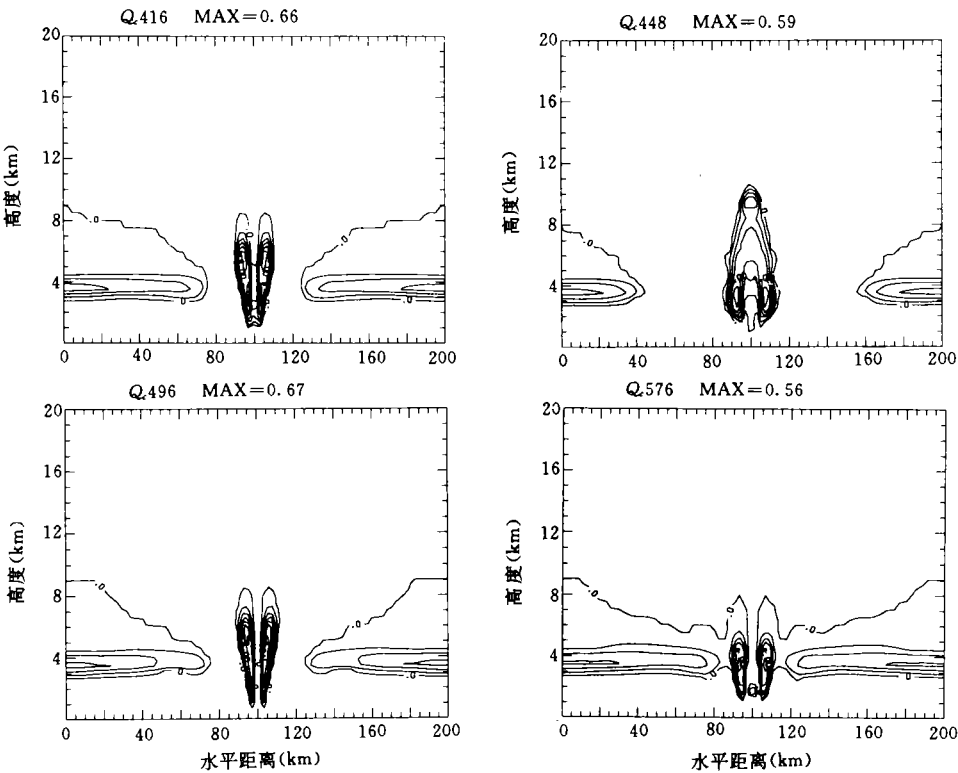


图 5 混合云云水量 Q_c (0.1g/m^3)剖面图(说明同图 1)

为了说明积层混合云的降水特征,图 6 给出 256 分时地面雨强 P_A 随水平距离的变化,对比图 2 Q₂₅₆ 和图 3 Z₂₅₆, 60—150km 的 4 个降水强度峰值,中间两个是分裂的对流云产生的,另两个是移近对流云的层状云强区产生的,而侧边界 60km 之内的弱降水(强度 1—3mm/h)是层状云降水。而且在距对流区较远处,层状云降水强度较大。在混合云整个发展过程中,层状云雨强一直不超过 3.0mm/h。而对流云一直产生高强度的降水。从上面混合云含水量场和回波的演变看出,对流云在强降水时云体逐步分裂,分裂开的对流云仍有强降水,然后又合并进而产生

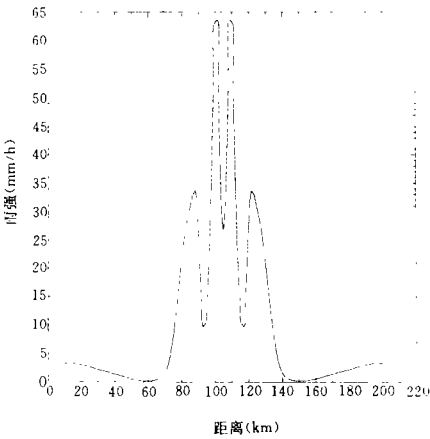


图 6 混合云降水分布特征(256 分)

更高强度降水。也就是说在对流区,由于对流一直有高强度降水。图 7 给出的是扰动区中轴下地面降水强度的时间变化,其波动情况反应了对流云分裂——合并——分裂的过程。这个过程从图 2 Q_r 演变看得很清楚,雷达回波虽然有反应,但不明显。如 144 分—176 分,368 分—416 分对流云都经过了分裂过程, Q_r 176 和 Q_r 416 上两个对流单体很明显,但 Z176 和 Z416 上只有从顶部的两个凸起才能区别出两个单体,回波主体一直没有产生分裂,回波强度也没有明显变化,基本为 30dB(~ 46 dBz),强回波中心位于云体中下

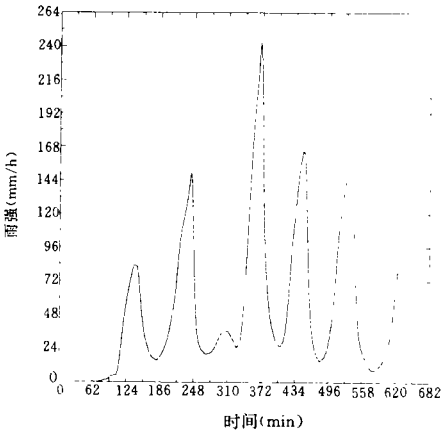


图 7 混合云中对流云中心轴下雨强时间变化

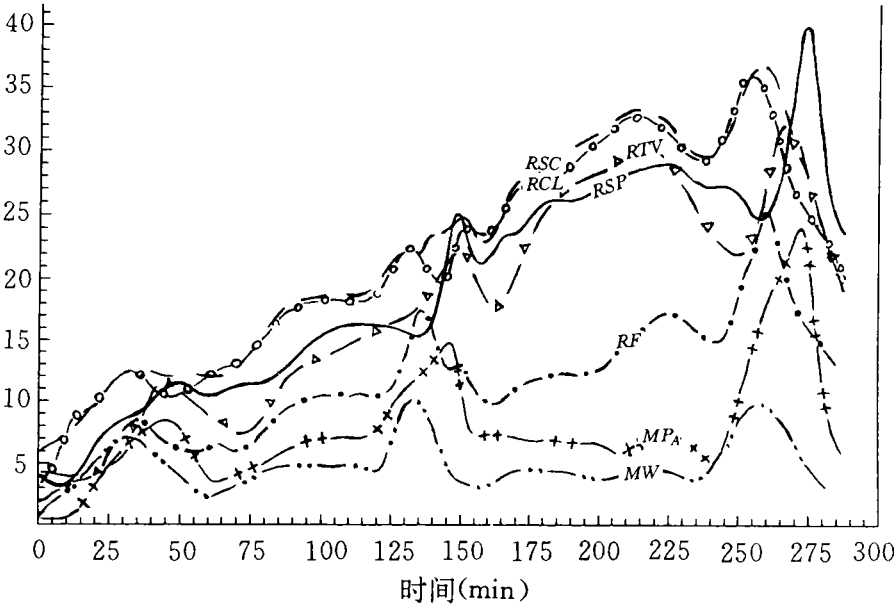


图 8 混合云(即表 1 中的 A 云)对流区各参数增加率(用代表表 1 中该参数符号前加 R 表示,单位为 $t/(\text{min} \cdot \text{m})$)及 MP_A (10mm/h)、 MW (m/s)的时间变化
(其中 $RSC = RSC_w + RSC_r$,横坐标为对流发展时间)

部。云体合并时,30dB 回波及地。这就是说,从回波形态看,混合云中对流云回波结构没有显著变化,即长时间处于相对稳定状态。图 8 中曲线 MP_A 就是对流区最大雨强的时间变化。对照图 2 和图 7,在对流云 176 分即对流发展 80 分裂后,中轴下降水强度不到 15mm/h,但分裂开的对流云降水强度仍有 50mm/h(图 8 曲线 MP_A)。在经过第一次强降水分裂后,对流云降水强度一直大于 50mm/h,第二降水峰值为 145mm/h,第二次分裂期间雨强一直在约 80mm/h,再次合并时达到最大峰值降水强度,约 250mm/h,即对流云雨强在分裂——合并过程中呈不断加大趋势。因此混合云存在期间,对流区一直有高强度降水。

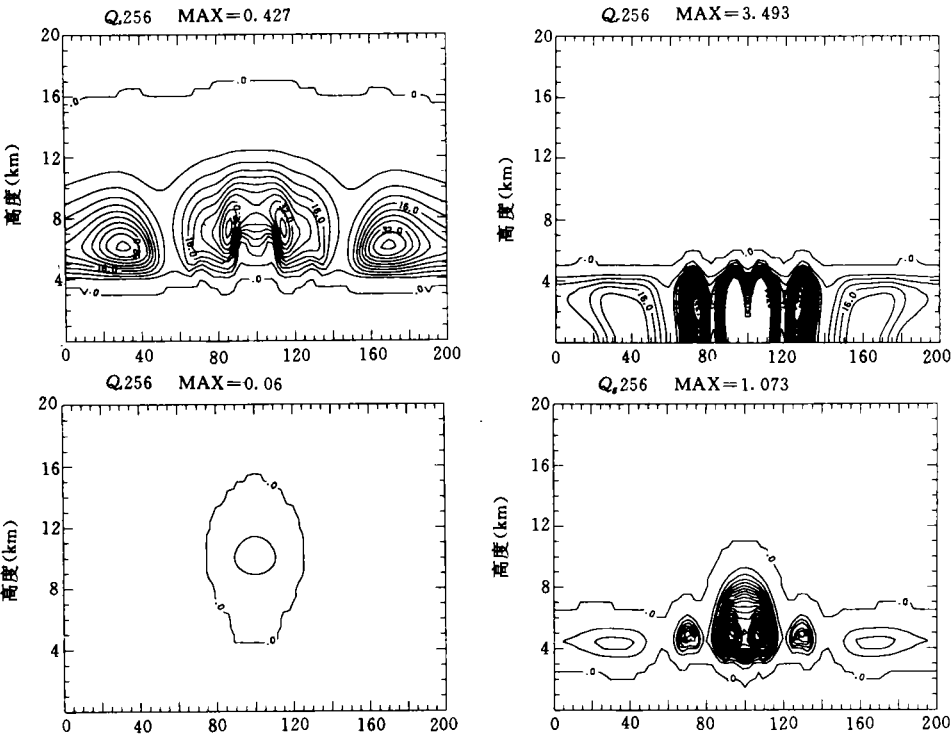


图9 256分时各种粒子含水量 Q (0.01g/m^3)剖面图(横坐标为水平距离(km))

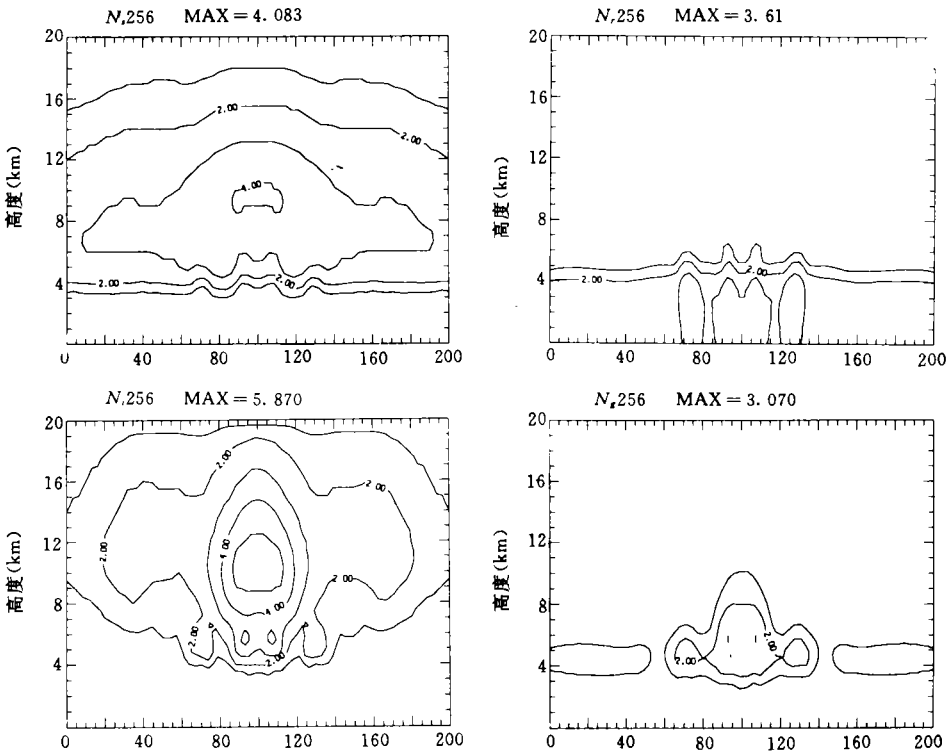


图10 256分时各种粒子浓度 N ($10^8/\text{m}^3$)剖面图(横坐标同图9)

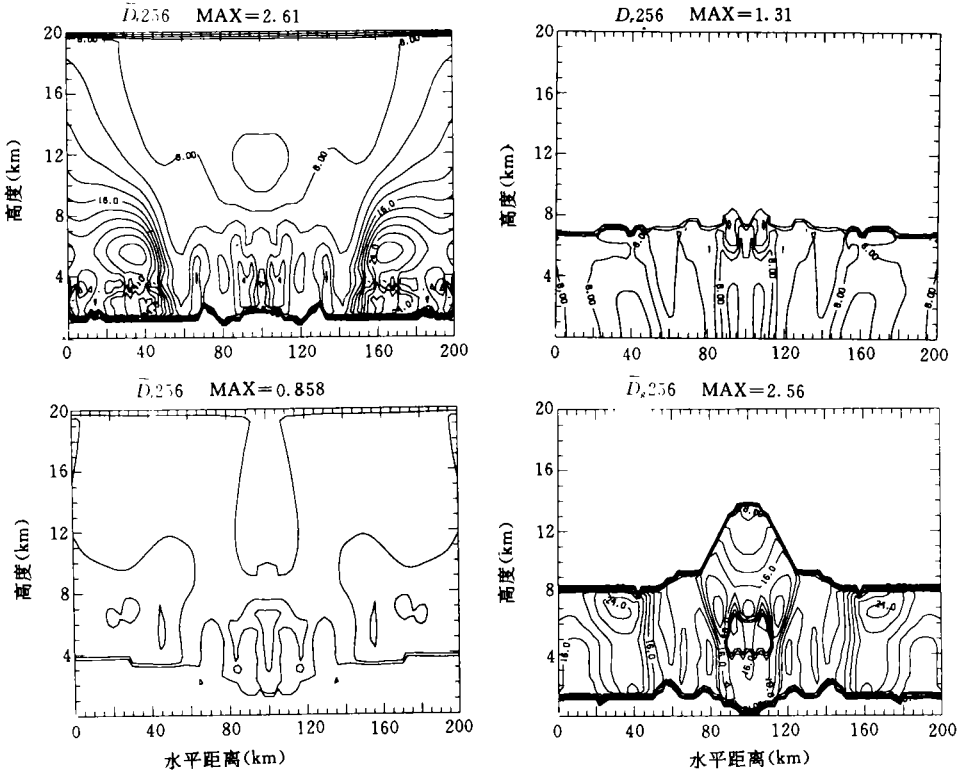


图 11 256 分时各种粒子平均尺度 D (0.1mm) 剖面图

图 9—11 分别给出了 256 分(即对流云发展 160 分)时各种粒子含水量、浓度和平均尺度剖面图,以了解混合云中微物理结构。可见雨水主要位于 4.0km(0℃层高度)之下。 Q 、 N 、和 $\bar{D}$ 最大值在积云中分别为 3.493g/m^3 、 $10^{3.61}\text{个/m}^3$ 和 1.31mm ,层状云中分别小于 0.24g/m^3 、 10^3个/m^3 和 1.2mm 。冰相粒子主要位于 0℃层之上。层状云雪含量最大值约 0.36g/m^3 ,位于约 6.0km 高度。在对流云区外侧约 7.5km 高空,也存在雪含量极值区,极值为 0.427g/m^3 。就浓度而言,对流区高空为 $10^{4.083}\text{个/m}^3$,层状云中小于 10^4个/m^3 ,但层状云中雪的平均尺度最大,最大值约 2.61mm,可见对流区雪的浓度高于层状云区,而平均尺度小于层状云区。冰晶含量极值区位于约 10km 高度,极值约 0.06g/m^3 ,对应的浓度约为 $10^{5.87}\text{个/m}^3$,层状云中浓度不到 10^3个/m^3 。从平均尺度来说,对流区小于层状云区。层状云中霰含量极值区位于 4—5km 高度之间,对流区位于 4.0—6.0km 高度,对流区霰含量比层状云中大得多,层状云中极值约 $0.08\text{—}0.10\text{g/m}^3$ 之间,对流云中为 1.703g/m^3 。

以上结果表明,纯层状云水平结构均匀,达到稳定阶段时雨强为 1.5mm/h。在积层混合云中,当对流加强时,对流云周围层状云减弱甚至消散,层状云区出现不均匀亮带、亮带强核及其下挂回波。层状云结构和降水产生不均匀性,其含水量中心在远离对流的侧边界附近,雨强可达 3mm/h。可见积云对流对层状云结构有明显影响。而混合云中对流云以层状云为发展环境,它生命史长,并交替出现强降水——分裂——合并——强降水——分裂过程,使对流区一直存在 50mm/h 以上的强降水,并间歇出现特强降水,但雷达回波长时间处于稳定状态,强回波中心一直位于云体中下部,与晴空对流云生命史和结构有明显不

同。可见层状云对积云及其降水发展影响显著。模拟结果反映了两种云相互影响的情况。

3 暴雨形成的物理原因

上节可见,积层混合云中对流云一直在产生持续性高强度降水,而层状云区雨强不超过 3.0mm/h,可见高强度暴雨是由对流云产生的。为了分析方便,规定混合云中离扰动中心 25km 范围的区域为对流区,称要分析的模式云为 A 云。还计算了 4 个对比云:

- B1 云:0 分加对流扰动的混合云;
- B2 云:无辐合混合云,即 96 分加扰动时令低层辐合值为零;
- B3 云:暖云混合云,即层状云和混合云都不考虑冰相过程;
- B4 云:以晴空为发展环境的孤立对流云。B4 云计算到完全消散为止,混合云中对流云都发展 288min。

表 1 各种云对流区参数值*

云	SP	$\overline{SP}$	SC_w	SC_i	CN	CL	F	EV	TV	η	MP_A	MW
A	5.59	112	6.44	0.55	0.13	6.21	3.38	1.05	5.16/4.34	0.80	245.8	10.4
B1	1.46	29	1.85	0.32	0.06	1.79	1.12	0.51	1.43/1.15	0.67	116.2	8.3
B2	1.48	29	1.69	0.20	0.06	1.67	0.99	0.41	1.44/1.22	0.78	69.9	5.7
B3	2.13	43	3.13	0.0	0.01	2.76	0.0	0.63	1.94/1.83	0.68	96.5	7.6
B4	0.21	4	0.28	0.04	0.02	0.27	0.16	0.08	0.36/0.24	0.65	58.5	6.7

*: $\overline{SP}$ (mm), MW (m/s)和 MP_A (mm/h)分别为面积平均降水量、最大上升气流速度和最大降水强度, η 为降水效率,其他参数单位都为 $10^3t/m$ 。 SP, SC_w, SC_i 为降水量,水汽凝结量和水汽凝华(核化)量; CN, CL, F 和 EV 为自动转换量,碰并云水量、冻结量及蒸发(升华)量; TV 为水平平流输入对流区的水汽量/净输入量。

在对流发展期间,混合云 A 在整个区域和对流区降水量 SP 分别为 $8.6\times10^3t/m$ 和 $5.59\times10^3t/m$ (表 1),而面积平均降水量 $\overline{SP}$ 为 41mm 和 112mm。若无对流存在,以加对流扰动时温湿层结计算纯层状云达到稳定阶段的雨强为 3.1mm/h(图略),在两个区域的 SP 为 $3.12\times10^3t/m$ 和 $0.74\times10^3t/m$ 。因此将混合云 A 降水量与纯层状云相比,由于对流净增加的降水量为 $5.48\times10^3t/m$ 。事实上对混合云 A 来说,考虑到纯层状云降水量,纯对流云降水量至少为 $4.85\times10^3t/m$,而层状云实际降水量在 $3.01\times10^3-3.75\times10^3t/m$ 之间,可见混合云中积云对流对层状云区域降水量影响不显著。将对流区纯对流云降水量与孤立积云(表 1, B4)比较,层状云的存在使对流云降水量增大几十倍。同时就整个区域而言,混合云 A 降水量比纯层状云和孤立积云降水量之和还要大 16 倍;而在对流区约大 6.88 倍。此外混合云 A 中对流云降水量至少占 56.4%。这些结果表明,积云和层状云共存的混合云是个十分有效的降水系统,两种云的混合及相互影响对降水形成非常有利。混合云中积云降水对系统贡献较大。为什么混合云中积云有这样大的降水量,现作些分析。

首先是混合云中饱和的环境有利于积云及其降水的发展。由于辐合场的存在,96 分已形成如图 1b 所示的深厚层状云,2.5—8.0km 为饱和层。环境是饱和的,进入积云的水汽是饱和的,饱和的水汽增大了凝结量。从表 1 看,混合云 A 对流区凝结(华)量约 $6.99\times10^3t/m$,凝结过程释放的潜热加强了上升气流,加大了入流水汽量,因此水平平流输入对

流区的水汽量(达 $5.16 \times 10^3 \text{t/m}$, 净输入量为 $4.34 \times 10^3 \text{t/m}$)增大。这必然又使凝结量增大,同时释放更多的潜热促进云体发展,从而增加自转量、碰并量、冻结量和其他水质量。这种在饱和环境中出现的正反馈过程促进云和降水的发展,增大积云降水量。图 8 说明,混合云 A 对流区各参数增加率及最大雨强和最大上升气流的时间变化趋势非常一致,有极好的关系。在对流发展的 288min 内有 3 次出现峰值,各量峰值都在接近的时间出现。如在对流 252—280 分之间,它们都达到最大值。当上升气流加强时,凝结率、碰并率和冻结率增大,随后水汽输入量增大,最后降水率和雨量增加率加大。此外,积云处于饱和环境中,云与环境空气的混合和夹卷过程不会损失水质和热量而耗散其发展能量。而对于晴空积云来说,此过程充当了阻止积云发展的制动装置。表 1 中,混合云 A 蒸发量 EV 约 $1.05 \times 10^3 \text{t/m}$,蒸发效率约 15%,而孤立积云约 $0.08 \times 10^3 \text{t/m}$ 和 25%。可见孤立积云相对蒸发量较大。再比较表 1 中 B2 云和 B4 云结果,说明饱和环境这个单一因素对积云发展影响。当低层辐合不存在时,不会有层状云生成,但环境是饱和的,因此降水量仍为孤立积云的 7.3 倍。B1 云是 0 分加对流扰动的云,除此而外其他条件同 A 云。扰动时,层状云处于初始时刻,辐合场还未形成层状云,因此积云不象 A 云那样在饱和环境中发展。相比

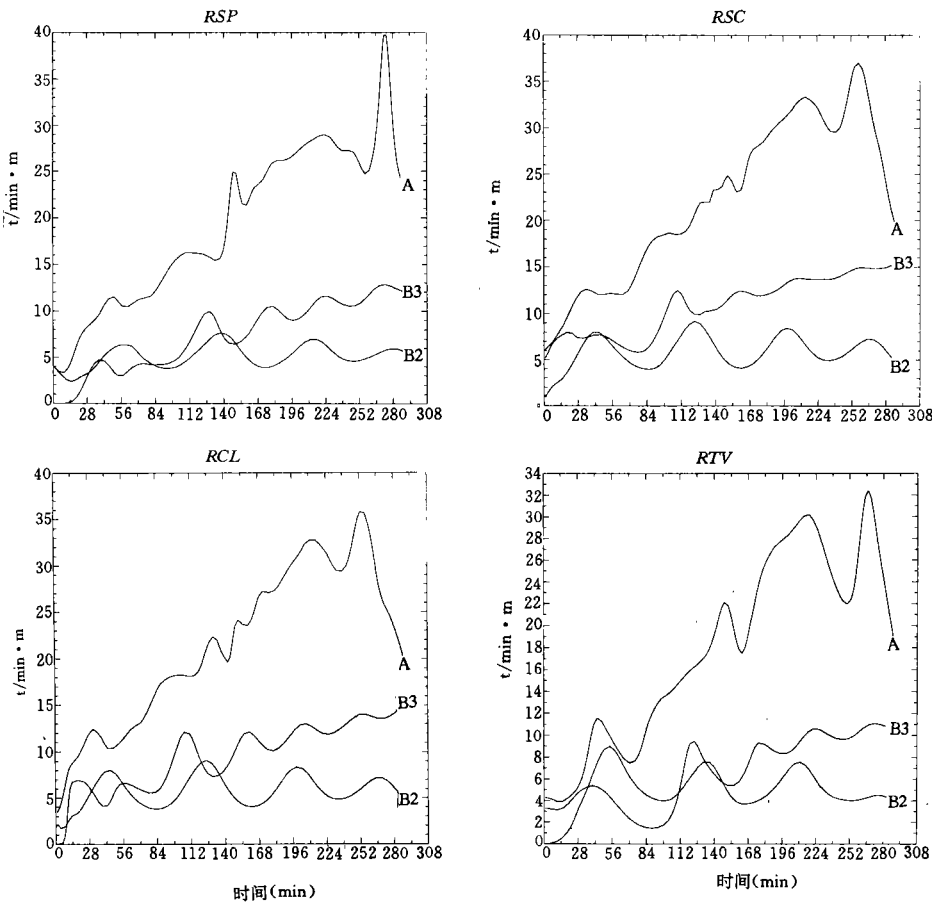


图 12 A, B2 和 B3 云中表 1 对流区各参量增加率时间变化(说明同图 8)

之下,其对流区降水量($1.46 \times 10^3 \text{t/m}$)比 A 云小得多。B2 和 B4, A 和 B1 两对云比较表明,饱和的环境对积云降水发展有极大影响,他显著地增大了积云降水量。

其次是低层辐合的存在有利于积云及其降水的发展。辐合场形成的层状云给积云提供的饱和发展环境所起的作用上节已分析。比较表 1 混合云 A 和无辐合云 B2 结果表明,在同样饱和环境中,如果不存在低层辐合,对流区降水量由 $5.59 \times 10^3 \text{t/m}$ 减少到 $1.48 \times 10^3 \text{t/m}$,说明辐合场存在对积云及其降水发展作用甚大。Tripoli 和 Cotton^[6]也发现,低空辐合使三维云模式预报的对流风暴和降水都比较强大。图 12 中各量增加率时间变化表明,在辐合场中,积云各参量增加率有波动但趋势是不断增大的。如 RSC,对 A 云来说,它从扰动开始就不断增大,在增大过程中只有小的起伏,直到约 252min 以后才明显减小。B3 云是在辐合场中发展的暖积云,其 RSC 也是不断增大的。无辐合时,在饱和环境中发展的积云各量增加率呈现有规律的波动,而且波动峰值趋于不断减小, RSC 平均值约 $6.5 \text{t}/(\text{min} \cdot \text{m})$,比辐合场中的 A 云小得多。表 1 中 B1 云与 B4 云结果比较也说明辐合场对积云降水之作用。这两云形成的温湿层结相同,只是 B1 云在辐合场中发展。B1 云在经过第一个峰值降水后象 B4 云那样很快减弱,相比之下 B4 云很快消散,没有重新发展,但 B1 云在辐合场作用下又重新发展,而且只要辐合场存在就不会消散。这说明低层辐合对积云发展的动力作用是重要的。

第三,在深厚的暴雨积层混合云中,冰相过程对暴雨形成有大的贡献。表 1 中 B3 暖云与 A 云结果相比,如不考虑冰相过程,对流区各参数值大大减小,如 SP 由 $5.59 \times 10^3 \text{t/m}$ 减小到 $2.13 \times 10^3 \text{t/m}$ 。积云发展除了由不稳定大气提供能量而外,云内相变潜热也是重要的发展能源,计算表明,如不考虑潜热作用,积云根本发展不起来。在冰相过程中,有大量液态水因受冰相粒子扰动和核化而冻结,水汽经核化形成冰晶及冰粒子凝华增长,这些过程都要释放潜热。混合云 A 对流区中,由于冰相过程引起水汽相变量 SC_i 为 $0.55 \times 10^3 \text{t/m}$,液水冻结量 F 为 $3.38 \times 10^3 \text{t/m}$,其总量占水汽凝结量 SC_w 的 61.0%,冰相过程相变潜热($26.84 \times 10^{11} \text{J}$)约占凝结潜热($16.12 \times 10^{12} \text{J}$)的 17.0%。当然分析云 A 中水汽凝结量也隐含着冰相过程之贡献,若不计冰相过程,其凝结量只有 $3.13 \cdot 10^3 \text{t/m}$ 。此外冰相粒子对云水的碰并也使云水转换成降水的效率提高,这也有利于增大积云降水量。上述因素使对流区降水量增大 $3.46 \times 10^3 \text{t/m}$ 。

根据上面分析,可以认为积层混合云是个非常有效的造雨系统,对流云与层状云的相互作用尤其使对流云降水量增大,因此系统降水量增大。混合云中对流云长时间产生强降水并间歇性地出现特高强度降水的主要影响因素有,辐合场形成的层状云提供的饱和的发展环境,辐合场对积云发展的动力作用及冰相微物理过程。在饱和环境中的对流云不象孤立积云那样生命史短出现单调的初生——成熟——消散过程,而存在无消散的起伏发展过程。而当辐合场存在时,其动力作用使积云在相当长时间里出现间歇性持续发展,积云最大降水强度有起伏但不断增大,从而产生暴雨或特大暴雨。长时间持续性高强度降水混合云中雨暴降水的显著特征。

4 讨 论

利用暴雨的平均层结模拟了暴雨积层混合云的主要结构特征、降水特征及积云和层

状云相互影响的过程,采用数值试验对比分析的方法研究了混合云产生暴雨的主要物理原因。更详细的暴雨形成的微物理机制今后要进一步模拟研究。

本文是首次对积层混合云模拟研究,初步模拟结果主要展示了暴雨混合云的显著特征,对暴雨形成机制的研究也是初步的。尤其模式是二维的,使用上有些局限性,微物理参数化模式未经实测的微观资料检验,这些都有待于今后改进。

参考文献

- [1] 张培昌等. 雷达气象学. 北京: 气象出版. 1988. 329pp.
- [2] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社. 1993. 255pp.
- [3] 斯公望. 暴雨和强对流环流系统. 北京: 气象出版社. 350pp.
- [4] 洪延超. 积层混合云数值模拟研究 (I)——模式及微物理过程参数化. 气象学报. 1996. 54 (5): 544—557.
- [5] 洪延超. 黄美元等. 梅雨锋云系中亮带不均匀性的理论探讨. 大气科学. 1984. 8 (2): 197—204.
- [6] Tripoli G J and Cotton W R. A numerical investigation of several factor. contributing to the observed variable intensity of deep convection over South Florida. J Appl Meteorol. 1980. 19: 1037—1063.

THE NUMERICAL SIMULATION STUDY OF CONVECTIVE- STRATIFORM MIXED CLOUD. PART (II)—— INTERACTION OF CLOUDS AND FORMATIVE MECHANISM OF THE HEAVY RAIN

Hong Yanchao

(Institute of Atmospheric physics. Academia Sinica. Beijing. 100029)

Abstract

Using numerical model of mixed convective—stratiform cloud (MCS) in part (I) in this paper and the averaged stratification of torrential rain processes. evolution processes. interaction of the two kinds of clouds. structure and the precipitation features in MCS to produce heavy rain are simulated and studied. and physical reasons of producing torrential rain are analysed. The results indicate that stratiform cloud surrounding convective cloud weakens and dissipates in developing and enhancing of the convective cloud. rainfall rate and water content of the stratiform cloud increase from near the convective cloud to lateral boundary. The numerical experiments find out that stratiform cloud provides a beneficial developing environment for convective cloud. and saturated environment and the convergence field in the stratiform cloud make the convective cloud has longer life cycle. produce lasting rainfall with high intensity and intermittent precipitation with ultra—high intensity. these and the ice phase microphysical processes are main factors for torrential rain formation and MCS is a very effective preipitation system.

Key words: Cloud interaction. Precipitation features. Formation mechanism of heavy rain.