

影响云和降水的动力、热力与 微物理因素的研究概述

廖 菲^{1,2} 洪延超¹ 郑国光³

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
2. 中国科学院研究生院; 3. 中国气象局)

提 要: 由于云和降水的发生、发展是大气动力、热力过程与云中微物理过程相结合的产物, 因而受到这些过程的共同制约和影响。为了更加详细地了解影响云和降水的动力、热力与微物理因素, 分别从3个方面概要性地进行了阐述。(1) 动力作用对云和降水发展的影响: 主要讨论了风切变、天气系统抬升、地形动力作用和湍流的作用等因素的作用。(2) 影响云和降水发展的热力因素: 分别对热力扰动、潜热的作用、辐射作用等做了分析。(3) 微物理过程对云和降水发展的影响: 主要从微物理过程对动力热力过程的影响、带电过程对云降水粒子的影响、以及微物理过程对云降水影响的相对重要性等方面进行讨论。并在最后扼要地指出了在研究云和降水问题时, 将动力、热力过程和微物理过程结合起来研究的必要性。

关键词: 云和降水 动力作用 热力作用 微物理过程

Research Reviews of Dynamic, Thermodynamic and Microphysical Factors Affecting Cloud and Precipitation

Liao Fei^{1,2} Hong Yanchao¹ Zheng Guoguang³

(1. Institute of Atmospheric Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences; 3. China Meteorological Administration)

Abstract: Cloud and precipitation are the results of the interactions between atmospheric dynamic, thermodynamic and cloud microphysical processes, thus these processes also restrict

and affect their generation and development. For an in-depth understanding the influences of these processes on cloud and precipitation, which can be discussed briefly from the following three aspects: (1) Influences of dynamic factors on cloud and precipitation. Wind shear, synoptic elevation effects, topographical dynamics and turbulence effects are generally analyzed. (2) Influences of thermodynamic factors on cloud and precipitation. Thermodynamic disturbance, latent heat release and radiation processes are analyzed respectively. (3) Influences of microphysical processes on cloud and precipitation. They are, effects of microphysical processes on dynamic and thermodynamic processes, effects of electrification processes on cloud particles, and relative importance of different microphysical processes on cloud and precipitation, which are discussed respectively. Finally, the necessity of considering these three aspects together in study problems of cloud and precipitation is put forward.

Key Words: cloud and precipitation dynamic effects thermodynamic effects microphysical process

引 言

大气动力、热力过程对云和降水发展的制约和影响一直备受许多学者的关注。随着研究工具和研究方法的改进,对云和降水发展过程的认识有了提高和深入。事实上,形成各种云的天气条件和天气系统差异很大,导致云的类型及空间、时间尺度相差甚远。以往对云和降水有关的科学问题已开展了许多研究。如以强对流性降水为例,雷雨顺^[1]对不同的强对流天气系统的特征、形成条件和相应云系的结构都作了详细的论述,章淹^[2]详细分析了我国暴雨的气候特征及有利于暴雨形成的环流形势,并指出低空急流、水汽辐合等是暴雨形成的有利条件。对于冰雹这种强降水天气而言,王昂生等^[3]分析了超级单体、多单体风暴的流场结构,认为垂直气流的分布决定了云中含水量累积区的形成,这对于冰雹的生长十分重要。由于层状云是我国人工增雨的主要催化作业对象,对层状云也有相当多的研究。研究也主要集中在层状云的结构特征,降水形成的物理机制

等方面。

由于云和降水的发展过程实际上是动力过程、热力过程和微物理过程相互作用的产物。研究这些过程的相互作用才能从本质上理解云和降水发展和形成问题。但是以往对云和降水的研究往往不大注重它们的相互作用,如研究动力过程的作用,不考虑微物理过程;而研究微物理过程又极少涉及动力过程。然而,为了研究动力、热力和微观过程的相互作用的问题,需要了解和全面认识动力、热力过程与微物理过程对降水的不同影响。因而,本文分别阐述了动力、热力及微物理过程对云和降水的影响的研究进展概况。

1 动力作用对云降水发展的影响

对云和降水发展有明显影响的动力过程有很多表现形式,但由于探测与观测手段的限制,模式研究成了研究动力作用的主要途径。在过去的一段时间里,人们对影响降水的动力过程开展了广泛的研究,主要体现在以下几个方面:

1.1 风切变对云和降水影响

风切变对于对流的维持和发展起着重要的作用。对于对流风暴而言,浮力和低层切变与风暴的形成及其类型关系密切^[4],虽然在积云初始阶段,对流云发展的强度往往被风切变所抑制^[5],但随着切变的加强,垂直气流会进一步得到激发和加强^[6,7]。在强风切变环境下,上升气流发生倾斜与下沉气流对峙,同时其顶部有风穿过风暴,使得上升气流不会继续向上渗透和加强。这种环境下,上升和下沉气流不会相互作用,使得风暴得以维持^[8]。风切变的这种使上升气流倾斜的作用,有利于对流的发展和维持,使得即使在槽后西北冷平流控制下,近海暖而湿的气层也可以形成具有对流性质的低云^[9]。

1.1.1 不同高度和强度的风切变的影响

表 1 各层结下有无风切变时云和降水参量的比较 (引自文献 [12])

温度层结 风切变	I			II			III		
	无	有	增加率	无	有	增加率	无	有	增加率
云倾斜角(云高)	0°	45°	(-13)	0°	40°	(-12)	0°	20°	(-10)
最大上升气流速度 $W/(m \cdot s^{-1})$	13.6	9.9	-27	18.2	14.3	-21	27.5	20.6	-25
最大云水含量 $M/(g \cdot m^{-3})$	2.3	2.2	-4	2.5	2.5	0	2.7	2.7	0
最大雨水含量 $R/(g \cdot m^{-3})$	8.7	3.7	-57	14.7	5.2	-64	11.3	5.3	-79
最大雨强 $I/(mm \cdot h^{-1})$	197	45	-77	364	75	-79	216	80	-62
总降水量/ $(t \cdot m^{-1})$	86.4	29.4	-66	162	41	-75	157	99	-37

1.1.2 风切变与斜压对云和降水的影响

斜压常出现于各种强风暴系统,斜压的存在往往又与风切变相伴。对流层中、低层的垂直风切变和大气的斜压性能使垂直涡度显著发展,导致暴雨发生^[10]。对于冬季冷锋系统,在中尺度雨带和对流单体中都存在不同尺度的超斜压区,即使在稳定的层结中,大范围的雨带也能够在大斜压区中产生,云的降水能力主要取决于它的这种动力特性^[13]。而在冷锋系统中,主要是通过冰相过程的冷却作用使冷气团冷却并导致穿越冷锋的斜压区产生^[14]。对于风暴而言,根

在风暴发展过程中,当低层出现弱的风切变时,风暴发展很快,达到旺盛后迅速减弱;当低层存在强的切变时,初期发展缓慢,但旺盛期持续时间长,形成以分裂风暴为主要特征的超级单体,风暴的移向依赖于盛行风;而在相同的风切变条件下,急流的高低空分布在相同的风切变条件下对风暴发展影响不大^[10]。周文贤等^[11]也认为低层风切变对于维持强对流云的发展、增加地面累积降水量有利。然而,徐华英等^[12]认为,风切变对积云和降水发展都不利,风切变越强,云和降水越弱;各种层结条件下,风切变都是减弱云和降水的发展,层结稳定时的低层切变的影响最大(见表 1);但是,如果积云移动前方有高湿区时,中等强度的风切变有利于云和降水发展。

据有组织的风暴中包含一个贯穿整个对流层的斜压区的特点,依据热力环境的不同,可以将风暴的发展分为稳定、中性、不稳定和消散 4 个过程^[15]。

1.1.3 天气系统发展与风切变

不同的天气系统中,风切变的发展特点各不一样。对于冷锋中的中尺度对流系统,随着对流的加强,大范围层状云中的高层切变会减小,而对流系统中的高层切变会增加,在冷锋中的中尺度对流系统中层,气压的扰动明显受上升气流垂直切变的影响^[16]。

Parker^[17]指出,在中尺度对流系统

中,在其前部的对流层中部高度上,常存在一从后向前传输的入流急流。对流层中上层强烈的风切变,以及成熟的对流线系统中,其前部的降水导致的持续性或间歇性的气压场异常,都使得顺切变分量增加,而顺切变增加控制着整个系统的结构,使得具有这种结构的对流线具有稳定的结构和长生命史。Lucas^[18]也指出,模式中气压场扰动能引起对流系统中层的风切变改变,这种改变能够导致上升气流下部广而深的中尺度低压加强,从而增加了层状云降水量;此外,改变模式中自由对流高度层的湿度廓线,例如增加系统的湿度,也能够产生明显的向上切变和系统倾斜结构。

1.2 天气系统抬升作用

锋面气旋、槽线、切变线等天气系统可以造成低空气流的大范围水平辐合,形成持续性的抬升运动,这对于云和降水的形成具有重要的作用。对于冷锋而言,暖空气被抬升后凝结释放的潜热能显著增大锋两侧的温度差异,导致锋生^[13]。而槽线携带的冷空气也经常触发低层不稳定能量的释放,导致对流的发展,这为强降水的发生提供了动力抬升条件^[19,20]。切变线系统所引起的强降水天气往往与急流有关,低空急流和高空急流的合理配置对激发深厚的上升运动有重要作用,低空急流与高空急流的叠合处往往是暴雨发生的区域^[21]。

由于小尺度的云是在大尺度的天气背景下发展起来的,因而,上述大尺度背景场引起的垂直运动必然对小尺度的云的发展有明显的影 响。Mapes^[22]将大尺度垂直运动作为背景场强迫以平流项加入到二维模式当中,验证了大尺度冷却、水汽输入及自由对流区的湿度都对降水强度的作用十分明显。

1.3 地形动力作用

对于中小尺度天气系统而言,地形对它

们的影响十分明显,这是由于地形的强迫抬升作用会影响云中垂直气流的分布,从而影响降水的发展。中尺度地形对降水区的分布和强度有重要影响,强降水中心常位于山地附近,地形的动力抬升和屏障作用对气流有着明显的影响^[23]。另外,在迎风坡和背风坡都有可能形成气旋式辐合从而引起抬升运动,这主要取决于过山气流的垂直分布^[24]。但降水的分布随着障碍物的宽度不同而不同^[25],在相对宽的障碍物中,降水极值经常发生在峰顶上游的10~20km处,而对相对较窄的障碍物,降水极值出现在峰顶或背风坡。大的地形导致水质粒增长时间更长,并降落在迎风坡,小地形使得水质粒上升时间缩短,并直接落在背风坡。当地形宽度减小时,沿坡的垂直运动将增强,有利于形成过冷水和霰,凝结和自动转化的雨水增多,地面降水总量增加,但水平分布范围变窄。

1.4 湍流的作用

垂直气流的湍流起伏运动对于云中云滴而言,有利于其增长到更大的尺度,有时甚至长大为雨滴成为降水元,这就容易解释薄云条件下的暖云降水机制^[26]。云滴在湍流起伏的作用下,增加了粒子间碰并增长的几率,宏观过程与湍流及微物理过程紧密结合,共同促进了暖云降水的发展^[27]。

数值试验表明,对于冰雹的生长而言,气象因子的起伏对于冰雹谱的拓宽有着显著的影响,对冰雹生长起主要作用的湍流加速度和含水量这两个因素的共同起伏比单因素起伏,更能促使冰雹的有利生长,使雹谱变宽,大冰雹形成的概率大大增加^[28]。

另外,在层积云中,凝结和湍流水汽输送包含着复杂的湍流动力学和云微物理过程相互作用,对云的结构也会产生本质的影响。湍流对平均凝结率的贡献主要是由于云滴半径和过饱和度的变化,它导致了湍流上

升运动中凝结的增强和下沉气流中蒸发的减弱^[29]。

2 热力作用对云降水发展的影响

热力不稳定和动力不稳定是相互作用、相互影响的,它们共同对天气系统的发展起着重要的作用。关于热力对云和降水发展作用研究的角度和方法很多,本文只简单介绍数值模式研究工作。

2.1 热力扰动

对流云模式常常需要热力扰动来启动对流,扰动效果受地形、温度、湿度的影响很大。对理想对称型山地的冰雹云模拟分析后发现,初始位温扰动区的位置对模拟结果影响很大,当初始位温扰动区位于迎风坡和山顶时冰雹云发展较弱,而在背风坡和平原时冰雹云发展较强。当初始位温扰动在背风坡时冰雹云的降雪量约为在迎风坡时的 6 倍^[30]。不同的热力扰动方式对冰雹云发展的作用截然不同,模式中湿热泡扰动触发的对流最强,其次是湿泡扰动,而纯热泡扰动最弱;只要模拟的云顶高度相当,其宏观特征差异并不大,而扰动强度对冰雹云启动的作用最关键^[31]。

2.2 潜热的作用

潜热释放对云的影响是热力作用最简单、直接的体现,伴随潜热效应出现的冷却作用和不稳定结构是强对流系统发展维持的必要条件。而 Neumann^[32]认为,在低纬度地区,当深厚的不稳定层出现时,强风速的向上传播、中层正涡度平流的输送才是低纬地区超级单体发生的条件。可见,热力与动力的合理配置才能触发强对流天气。

潜热在强对流系统中作用很大,潜热释放能促进云和降水的发展。强风暴能够引起

风暴前低压、风暴后低压、雷暴冷高压中的一系列气压扰动,而对流引起的潜热加热和补偿性下沉加热及其输送是形成雷暴中低压系统的主要原因^[33]。下击暴流产生的直接原因是冰雹的重力拖曳作用引起,但是冰雹的融化和雨水蒸发的冷却作用也不可忽视^[34]。在湖泊地区,由于云和雪的发展过程中释放潜热导致的“湖泊效应”能促使对流增加,增强中- β 尺度的降雪率^[35]。

2.3 辐射作用

辐射传输过程对地面、大气有着显著的加热作用,从而影响着云的动力、热力及微物理过程,但受各种因素的影响,这种加热作用十分复杂,在此,主要讨论辐射过程与云降水的相互作用。

一般说来,辐射过程导致的云底增温将触发不稳定产生并激发湍流,形成的大范围云砧会使得大气层顶向外的红外辐射减少 20%,此时容易产生碎云或碎雨云^[36]。数值试验结果进一步指出^[37],对暖云和冷云降水过程,长波辐射都会使云顶冷却、云底增温,从而促进对流运动,而短波辐射对云顶的加热作用抑制了对流的发展;长波辐射有利于暖云降水过程中云水含量的增加,从而导致降水增幅;同样,长波辐射在冷云降水过程中可增加霰和云水的含量,这对降水的增强也十分重要。

虽然云的加热作用主要归功于云中的水汽对来自地面的大气长波辐射的强烈吸收,但在云-辐射相互作用时,冰相微物理过程对辐射的影响也很重要。白天的短波辐射使得云发展几公里厚,但云顶上部 1km 处由于红外辐射冷却同样也容易引起不稳定,加速对流发展,促进地面降水产生;然而,由于辐射作用并没有引起水物质场很大的改变,因此辐射对降水性云区的水的总量没有太大改变,这说明辐射不能直接改变层状云

区的水分收支,而必须引入动力相互作用来影响水分收支^[38]。

3 微物理过程对云降水发展的影响

宏观上,云和降水的发展受动力、热力过程的影响,但动力、热力过程的效果最终要依靠云内的微物理过程来实现。降水是直接通过微物理过程形成的,通过动力过程输送和集中的水汽,通过微观过程形成地面的降水。因而,微物理过程在云和降水发展过程中起到重要的作用。

3.1 微物理过程对动力热力过程的影响

许多研究成果表明,伴随模式中冰相微物理过程的引入,冰相微物理过程中产生的潜热会对云的动力过程产生明显的影响^[39]。对于热带飚线系统,它对动力过程的影响大小与大气环境有关。冰相粒子的凝华、融化等过程释放的潜热会影响上升气流和下沉气流的空间分布;当热带飚线系统处在强对流不稳定时,冰相过程对对流尺度结构影响很大,但对对流尺度的动力过程不太重要;而当系统低层处于饱和状态且环境存在弱对流不稳定时,冰相对飚线对流系统影响就很大^[40]。冰相微物理过程中融化产生的潜热不仅能加速对流发展,在地形云中,也会导致 0°C 等温层厚度的增加,使得降水向更远的距离传播^[41]。

不仅微物理过程释放的潜热对天气系统的动力过程有影响,其他物理参量也会间接的影响云和降水发展,当中纬度地区飚线系统中部的湿度减小时,将有利于尾流入流小但中尺度下沉气流大的风暴呈直立形态,从而导致云体结构发生改变^[42]。

3.2 带电微物理过程对云降水粒子的影响

大量的研究工作指出,雷电活动对降水

的影响十分显著^[43],其影响是通过带电微物理过程来实现的。雷电对云微物理的影响主要表现在水成物粒子的带电过程对降水的影响。Sun^[44]在模式中将带电过程加入到微物理过程后,由于潜热释放导致强的上升气流,上升气流也将延长固态粒子在云中的时间,导致地面固态降水增加;同时,带电过程也会在主上升气流区中加强涡度的垂直分量。

对冰雹云人工引发雷电后,一方面闪电产生的离子附在水质粒上后,可加速液态水滴冻结,由于过冷液态水的消耗不利于冰雹继续增长,因而能抑制大冰雹的形成^[45]。另一方面,闪电放电过程可促进重力电碰并过程,使得滴谱拓宽和降水增强,产生降水倾泻,尤其对于雷暴云而言,闪电放电过程对小水滴的增长有着很大作用,这取决于小水滴的荷电状况^[46]。但是,重力电碰并过程很大程度上依赖于从闪道逸出的离子浓度,对于降雨倾泻现象的产生,要求离子浓度大于 10^{14}m^{-3} ^[47]。

3.3 微物理过程对云降水影响的相对重要性

由于云和降水的发展是受微观和宏观过程共同影响,因而,在不同的大气环境中,微物理过程对降水的影响大不相同。(1)对过冷云水含量较少的云来说,中等密度的冰晶对动力影响并不明显,在这种云里,当每升只有几千个冰晶时,大量的淞附和水汽凝结才会对云的动力结构产生明显作用^[48]。(2)在强烈不稳定环境中,虽然冰相微物理过程会增加上升气流速度和地面降水,但冰相微物理过程相对并不重要,只有在弱不稳定环境中冰相微物理过程才十分重要^[49]。(3)对于不同的天气系统,冰相微物理过程对降水的影响也不一样。就多单体风暴而言,冰相对辐射的影响作用都很小,

它们不能明显地改变云中的温湿廓线,但能明显对中尺度结构有影响^[50]。

4 小结与讨论

综上所述,影响云和降水发展的动力、热力、微物理 3 要素的作用是:

动力因素:(1)云和降水的形成依赖于水汽的抬升凝结,抬升作用可以通过冷锋、槽线、切变线等天气系统来实现,也可以受地形强迫,但地形抬升作用往往取决于过山气流的垂直分布。(2)与层状性降水相比,对流性降水受环境风切变影响更加明显,由风切变引起的云体倾斜也有利于上升运动的维持和加强。(3)低层的暖湿切变,云内中层气压场的扰动以及上升气流本身的湍流出现,往往更加有利于对流的发展。

热力因素:(1)水汽抬升时会出现凝结和凝华过程,这些过程所引起的潜热释放促进了不稳定结构的出现,加强了上升气流和下沉气流。(2)云发展导致了云中水物质的增加,这也直接引起了云底吸收的来自地面的长波辐射能量的增加;云顶冰相物质的对外辐射降温 and 融化制冷,也导致了云顶的温度减小;这些热力过程加速了对流不稳定的形成,有利于云和降水的发展。

微物理因素:(1)不同环境下冰相微物理过程对动力、热力过程起着不同的作用,一般而言,只有在弱不稳定环境中冰相微物理过程的作用才十分重要。(2)冰相微物理过程通过潜热释放导致热力过程变化,从而影响云的结构,但这种热力过程不能引起水物质场收支的明显变化。(3)云中粒子的带电现象发生,使降水粒子间增加了碰并的几率,为降水的增幅和雨滴谱的拓宽提供了很好的条件。

需要指出的是,目前对云和降水的研究常常只侧重某一个方面,如本文给出的研究

主要集中在动力、热力和微物理过程分别对云和降水发展的影响,但相对而言,这些要素的相互作用的研究较少。事实上,云和降水的发展是动力、热力和微物理过程相互作用的结果,只有深入研究,才能获得云和降水发展过程的完整图像。Orville 也认为^[51],将动力过程和微物理过程结合起来研究问题显得更加必要。

在不同条件下,动力、热力与微物理因素在云和降水发展过程中作用也会不同。通过大量的观测分析,并结合数值模拟研究,探索不同天气系统在不同地区的发展演变特征,研究这 3 种因素在云和降水发展时的作用,建立云和降水的概念模型,这对于理解云和降水发展的本质、提高降水预报准确性、研究人工影响天气的方法等方面都有重要作用。

另外,在利用数值模拟方法研究动力、热力、微物理过程对云和降水的影响时,模式中加入尽可能合理的各种非绝热物理过程极为重要。如积云参数化需包括湿下沉气流、中上层的云卷出和非降水性浅对流,显式云物理方案需同时加入含有水相和冰相的预报方程,以计入水负荷、凝结蒸发、冻结融化和凝华升华的影响,从而使模式能更加真实地反映出大气的动力、热力和微物理过程^[52]。虽然模式能够提供最广泛的研究途径,但由于云内微物理过程存在各种时空尺度,因而必须改进微物理过程参数化来缩小模拟和观测的差距^[53]。同时,模式中也需要处理好垂直速度的参数化问题,因为它影响着模式降水的产生和分布,以及微物理过程对降水的作用^[54]。

参考文献

- [1] 雷雨顺. 强对流天气的几个问题 [J]. 大气科学, 1980, 4 (1): 94-102.
- [2] 章淹. 我国暴雨研究和预报的进展 [J]. 气象,

- 1979, 5 (11): 1-4.
- [3] 王昂生, 黄美元. 冰雹和防雹研究述评 [J]. 大气科学, 1978, 2 (1): 76-84.
- [4] Weisman M L, Klemp J B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy [J]. Mon. Wea. Rev., 1982, 110: 504-520.
- [5] Browning K A, Donaldson R J. Airflow and structure of a tornadic storm [J]. J. Atmos. Sci., 1963, 20: 533-545.
- [6] Fovell R G, Ogura Y. Effect of vertical wind shear on numerically simulated multicell storm structure [J]. J. Atmos. Sci., 1989, 46: 3144-3176.
- [7] 潘晓滨, 陈家华, 魏绍远. 垂直风切变对风暴影响的数值模拟 [J]. 气象科学, 1996, 16 (2): 135-143.
- [8] Yau M K. The effects of evaporation, water load and wind shear on cloud development in a three-dimensional numerical model [J]. J. Atmos. Sci., 1980, 37: 488-494.
- [9] 李洪业, 徐旭然. 冷流低云降雪成因的分析 [J]. 气象, 1995, 21 (12): 21-24.
- [10] 张滨, 周林, 关皓. 1998年夏季江淮地区强暴雨过程的湿位涡诊断分析 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2005, 6 (4): 399-403.
- [11] 周文贤, 齐彦彬, 张永强. 风切变对强对流云降水影响的模拟研究 [J]. 气象科学, 1996, 16 (1): 75-80.
- [12] 徐华英, 吉武胜, 黄美元. 风切变对积云发展影响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 1988, 12 (4): 405-411.
- [13] Xu Yinlong, Qian Fenlan, Chen Zhi, et al. Observational analyses of baroclinic boundary layer characteristics during one frontal winter snowstorm [J]. Advanced in Atmospheric Sciences, 2002, 19 (1): 153-168.
- [14] Barth N C, Parsons D B. Microphysical processes associated with intense frontal rainbands and the effect of evaporation and melting on frontal dynamics [J]. J. Atmos. Sci., 1996, 53 (11): 1569-1585.
- [15] Marwitz J D. Winter storm over the San Juan Mountains Part I Dynamical processes [J]. J. Atmos. Sci., 1980, 19 (8): 913-926.
- [16] Hane C E, Jorgensen D P. Dynamic aspects of a distinctly three-dimensional mesoscale convective system [J]. Mon. Wea. Rev., 1995, 123: 3194-3214.
- [17] Parker M D, Johnson R H. Simulated convective lines with leading precipitation. Part I: Governing dynamics [J]. J. Atmos. Sci., 2004, 61 (14): 1637-1655.
- [18] Lucas C, Zipser E J, Ferrier B S. Sensitivity of tropical west pacific oceanic squall lines to tropospheric wind and moisture profiles [J]. J. Atmos. Sci., 2000, 57: 2351-2373.
- [19] 项素清. 热带低压环流引发的中尺度特大暴雨过程分析 [J]. 气象科技, 2003, 31 (1): 38-49.
- [20] 项素清, 徐燕峰. 浙北地区一次强对流天气过程分析 [J]. 气象, 2003, 29 (5): 46-50.
- [21] 温市耕. 切变线类暴雨发生的天气背景和触发机制 [J]. 气象, 1999, 25 (2): 44-48.
- [22] Mapes B E. Sensitivities of cumulus-ensemble rainfall in a cloud-resolving model with parameterized large-scale dynamics [J]. J. Atmos. Sci., 2004, 61: 2308-2317.
- [23] 翟国庆, 高坤, 俞樟孝等. 暴雨过程中中尺度地形作用的数值试验 [J]. 大气科学, 1995, 19 (4): 475-480.
- [24] 孙继松. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响 [J]. 高原气象, 2005, 24 (1): 62-69.
- [25] Colle B A, Zeng Y G. Bulk microphysical sensitivities within the MM5 for orographic precipitation. Part II: Impact of Barrier Width and Freezing Level [J]. Mon. Wea. Rev., 2004, 132: 2802-2815.
- [26] 徐华英, 顾震潮. 起伏条件下重力碰并造成的暖性薄云降水 [J]. 气象学报, 1963, 33 (1): 108-114.
- [27] 周秀骥. 暖云降水微观物理机制的统计理论 [J]. 气象学报, 1963, 33 (1): 97-107.
- [28] 徐家骝. 起伏条件对冰雹增长的影响 [J]. 大气科学, 1978, 2 (3): 230-237.
- [29] Wang S P, Wang Q, Feingold G. Turbulence, condensation, and liquid water transport in numerically simulated nonprecipitating stratocumulus clouds [J]. J. Atmos. Sci., 2003, 60: 262-278.
- [30] 林文实, 范绍佳, 王雪梅等. 山地上冰雹云的数值试验研究 [J]. 高原气象, 2000, 19 (1): 59-

- 65.
- [31] 孙学金, 官福久, 李子华. 初始扰动对冰雹云发展影响的数值模拟 [J]. 气象科学, 1998, 18 (2): 113-120.
- [32] Neumann C J. Mesoanalysis of a severe south florida hailstorm [J]. J. Appl. Meteor., 1965, 4 (2): 161-171.
- [33] 刘玉宝, 周秀骥, 胡志晋. 强对流风暴数值模拟及其未来预报的若干问题 [J]. 应用气象学报, 1994, 5 (4): 418-427.
- [34] 孙凌峰, 郭学良, 孙立潭等. 武汉“6.22”空难下击暴流的三维数值模拟研究 [J]. 大气科学, 2003, 27 (6): 1077-1092.
- [35] Kristovich D A R, Young G S, Verlinde J, et al. The lake-induced convection experiment and the snowband dynamics project [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2000, 81 (3): 519-542.
- [36] Fu Q, Krueger S K, Liou K N. Interactions of radiation and convection in simulated tropical cloud clusters [J]. J. Atmos. Sci., 1995, 52 (9): 1310-1328.
- [37] 赵春生, 丁守国, 秦瑜. 云内辐射传输过程对对流降水过程的影响 [J]. 自然科学进展, 2003, 13 (10): 1060-1066
- [38] Churchill D D, Houze R A. Effects of radiation and turbulence on the diabatic heating and water budget of the stratiform region of a tropical cloud cluster [J]. J. Atmos. Sci., 1991, 48 (7): 903-922.
- [39] Grabowski W W. Toward cloud resolving modeling of large-scale tropical circulations: A simple cloud microphysics parameterization [J]. J. Atmos. Sci., 1998, 55: 3283-3298.
- [40] Liu C H, Moncrieff M W, Zipser E J. Dynamical influence of microphysics in tropical squall lines: A numerical study [J]. Mon. Wea. Rev., 1997, 125: 2193-2210.
- [41] Marwitz J D. The kinematics of orographic airflow during sierra storms [J]. J. Atmos. Sci., 1983, 40: 1218-1227.
- [42] Yang M H, Houze R A. Sensitivity of squall-line rear inflow to ice microphysics and environmental humidity [J]. Mon. Wea. Rev., 1995, 123: 3175-3193.
- [43] 刘欣生. 雷电物理及人工引发雷电研究十年进展与展望 [J]. 高原气象, 1999, 18 (3): 266-272.
- [44] Sun A P, Chun H Y, Baik J J, et al. Influence of electrification on microphysical and dynamical processes in a numerically simulated thunderstorm [J]. J. Appl. Meteor., 2002, 41: 1112-1127.
- [45] 张义军, 言穆弘, 郗秀书等. 人工引发雷电对雷暴特性可能影响的观测与分析 [J]. 高原气象, 1998, 17 (4): 412-419.
- [46] 葛正漠, 董万胜. 雷暴云中闪电放电条件下的雨滴增长 [J]. 高原气象, 1996, 15 (2): 212-220.
- [47] 张义军, 言穆弘, 董万胜. 人工触发闪电与降雨倾泻 [J]. 高原气象, 1995, 14 (4): 406-414.
- [48] Cotton W R. Numerical simulation of precipitation development in supercooled cumuli-Part II [J]. Mon. Wea. Rev., 1972, 100 (11): 764-784.
- [49] Liu C, Zipser E J. The dynamic influence of microphysics in tropical squall lines: A numerical study [J]. Mon. Wea. Rev., 1997, 125: 2193-2210.
- [50] Chin H N S. The impact of the ice phase and radiation on a midlatitude squall line system [J]. J. Atmos. Sci., 1994, 51 (22): 3320-3343.
- [51] Orville H D. A review of cloud modeling in weather modification [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, 77 (7): 1535-1555.
- [52] 张大林. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用 [J]. 大气科学, 1998, 22 (4): 548-561.
- [53] Heinemann G, Reudenbach C. Precipitation dynamics of convective clouds [J]. Lecture Notes in Earth Sciences, 2003, 97: 186-198.
- [54] Ooyama K V. A dynamic and thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere with parameterized microphysics [J]. J. Atmos. Sci., 2001, 58: 2073-2102.