

一次层状云系水分收支和降水机制的数值研究^{* 1}

周非非¹ 洪延超² 赵震²

ZHOU Feifei¹ HONG Yanchao² ZHAO Zhen²

1. 国家气象中心,北京,100081

2. 中国科学院大气物理研究所云和强风暴物理实验室,北京,100029

1. *National Meteorological Centre, Beijing 100081, China*

2. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2007-09-14 收稿,2009-04-08 改回.

Zhou Feifei, Hong Yanchao, Zhao Zhen. 2010. A numerical study of the moisture budget and the mechanism for precipitation for a stratiform cloud system. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(2):182-194

Abstract The moisture budget and precipitation mechanism for a stratiform cloud system are investigated based on simulated results of the MM5 model. The light-medium rainfall caused by the stratiform cloud system occurred in the Henan province during 18–20 October 2002. Both water vapor and hydrometeors are transported through the western and southern boundaries into the Henan region. There is a net inflow at the horizontal direction during the main precipitation period. Every term in the balance equations of the water vapor, hydrometeors or all water substances throughout the Henan region was calculated. The results show that the budgets of water vapor, hydrometeors and all water substances are approximately balanced. The precipitation efficiency of all water substance, condensation efficiency, deposition efficiency, precipitation efficiency of hydrometeors, and precipitation efficiency of water vapor for the Henan region are generally about 33.1%, 27.7%, 13.1%, 69.7% and 31.1%, respectively. The rainfall efficiency of all water substance is similar to that of water vapor because water vapor is predominant in all water substances. The conversion efficiencies among different precipitable particles are evaluated, with the result that more than 58.2% of cloud ice is converted into snow, above 82.1% of snow particles melt, less than 11.1% of snow is converted into graupel, and almost all of graupel melts. Ice water increase is mainly caused by deposition. Most of snow particles are produced by the conversion from ice crystals. Snow increase is due to both deposition and accretion of cloud water with the growth rate of deposition is greater than that of accretion. Rain are formed and increased through the warm-cloud and cold-cloud processes. The amounts of accretion of cloud water by rain are nearly equal to those of melting of ice-phase particles. The amounts of cloud water auto-converting into rain are relatively small. Therefore, during the main precipitation period, the precipitation is jointly produced by the warm cloud and the cold cloud processes. The proportion of rain amounts finally produced by deposition to the amounts of all of source terms of rain is more than 35%. The ratio of rain amounts ultimately produced by accretion of cloud water by ice-phase particles to the amounts of all of source terms of rain is less than 12%. Water vapor plays an important part in production processes of precipitation particles. The proportions of precipitation from the seeded-cloud-layer, mixed-phase cloud-layer, and liquid-phase cloud-layer to the surface rainfall are about 15%–27%, 45%–50%, and 23%–38%, respectively. The precipitation contribution ratio of the mixed-phase cloud-layer to the surface rainfall is the largest because of the increment of ice-phase particles in the cloud-layer.

Key words Stratiform cloud system, Moisture budget, Precipitation mechanism, Numerical study.

* 资助课题:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC12B07)和国家自然科学基金项目(40875002)。
作者简介:周非非,主要从事云降水物理学研究。E-mail: zhouff770215@163.com
通讯作者:洪延超,主要从事云降水物理学研究。E-mail: hyc@mail.iap.ac.cn

摘要 对2002年10月18—20日河南省层状云系的水分收支和降水机制用MM5模式模拟的结果表明,河南省域以外的水物质主要通过西和南边界输送到区域内,19日降水主要时段总水物质通量在水平方向上为净流入。对河南省域水汽、水凝物和总水物质的水分平衡等式中各项的估算表明该区域水物质基本达到收支平衡。估算的河南省域总水物质降水效率、凝结率、凝华率和水凝物降水效率及水汽降水效率分别约33.1%、27.7%、13.1%、69.7%和31.1%,总水物质降水效率与水汽降水效率接近是由于参与的水物质总量中水汽占绝大部分。约58.2%以上的冰晶转化为雪,超过82.1%的雪融化,不到11.1%的雪转化为霰,霰粒子几乎完全融化。冰晶通过凝华过程增长。雪主要由冰晶转化产生,凝华增长率比撞冻增长率高得多。雨水由暖云和冷云过程产生和增长,雨水碰并云水量和冰粒子融化量对雨水的贡献相近,云雨自动转化量小。可见,在主要降水时段,降水是由冷云和暖云过程共同产生的。冰粒子凝华增长对雨水的贡献最大超过35%,撞冻增长的贡献最高不足12%,可见水汽对降水粒子增长重要。催化层、冰水混合层和液水层对降水的贡献分别约为15%—27%、45%—50%和23%—38%,表明此“催化-供给”云中冰粒子在冰水混合层的生长对降水的贡献相当大。

关键词 层状云系,水分收支,降水机制,数值研究

中图法分类号 P435⁺0.1 P426

1 引言

层状云系是中国北方主要降水云系,也是实施人工增雨作业的主要目标云系。云系在发展过程中,输入云中水汽如何转化为地面降水,在降水形成过程中水汽的分配和转化如何实现,这是云系降水机制、人工增雨理论和技术研究的基础,对于深入认识云和降水形成物理过程的本质也很关键。目前普遍以碘化银为催化剂对层状云系实施人工增雨作业,通过影响冷云过程达到增加降水的目的。因此在研究层状云系的人工增雨潜力时,需要研究云系的降水机制,只有对那些在降水形成中冷云过程起主要作用的云进行催化,才有可能增加降水。

迄今为止,国内外对于许多天气系统水分收支的研究已经取得了显著进展。例如,Chong等(1989)和Tao等(1993)深入讨论了飑线系统的水分收支情况,指出对流区和层状区对于地面降水都有重要作用,对流区在产生层状云区降水方面起主要作用,赤道与中纬度的飑线系统的水分收支间存在差别。Caniaux等(1994)着重探讨了飑线系统对流区中水凝物微物理转化过程的主要特征。Sui等(1994)利用一个CEM模式详细研究了赤道地区的水分循环,取得不少有意义的结果。近年来尤其值得指出的是Colle等(2005)的工作,针对IMPROVE项目的一个个例深入分析了迎风坡微物理收支状况及各个微物理过程的重要性。主要结论包括,迎风坡损失水汽最多,这与水汽凝结和雪凝华过

程有关。迎风坡地面降水主要来自雨水碰并云水过程、霰的沉降和融化以及雪的融化。在高层产生的雪有2/3流入到背风坡,导致迎风方降水效率只有50%。中国的相关研究主要侧重于区域和流域水分输送和收支的气候学特征,如任宏利等(2004)通过对中国西北东部40年日降水和NCEP、NCAR再分析资料的研究,阐述了这一地区春季降水及其水汽输送的气候特征和异常变化,又如赵瑞霞等(2007)用实测资料定量计算了长江流域水分收支的各分量,分析了季节循环、年际变化以及线性趋势变化,并与ECMWF及NCEP/NCAR再分析资料作了进一步对比。

在研究水分收支时经常用到降水效率这个量。目前对降水效率有多种定义,有人将地面降水量与进入云中的水汽量之比、降水量与云中凝结、凝华量之比作为降水效率,也有人把降水效率定义为降水量与由假绝热上升凝结的水量之比(Braham, et al, 1952)。Hobbs等(1980)把降水效率定义为垂直于雨带1 m宽距离的总雨强与总凝结率之比,得到各雨区降水效率差异很大。暖区雨带的降水效率为40%—50%;冷锋雨区中第一条宽雨带的降水效率最高,为80%—100%;位于地面锋线上窄冷锋雨带的降水效率较低,为30%—50%。冷锋高、低空云带的降水效率分别约为30%和70%。汪学林等(1987)也采用Hobbs等计算降水效率的方法,计算了影响吉林的蒙古气旋降水效率,气旋中心附近的降水效率最高,冷锋和暖锋锋面附近次之,冷锋后最

低。曾光平等(1990)计算华南前汛期锋面云系降水效率平均约为 55%, 锋后降水效率最高, 锋区次之, 高压下降水效率最低。李宏宇等(2006)提出一个“拟降水效率”的定义, 拟降水效率被定义为累积降水量与总水汽量的比值, 认为总水汽量由悬滞水汽总量和总湿物质量以及地面累积降水量这三者组成, 得到锋前和锋后拟降水效率为 10%—30%, 锋区附近达 40%—60%。

云系降水机制也得到了广泛的研究。Hobbs 等(1980)结合动力学和云微物理学研究了中纬度气旋的中小尺度结构和降水物理过程及雨带降水机制, 锋面上位势不稳定产生的一些高空对流泡, 向下播种冰晶, 之后在锋面上下的层状云中通过凝华、淞附和聚合长大并形成降水。通过分析 1997 年 5 月两次影响吉林省的江淮气旋降水系统, 汪学林等(2001)指出降水粒子的形成在冷层以凝华和淞附增长为主, 核化和繁生相对较小; 进入暖层则以碰并过程为主。通过分析层状云中对流泡体特征及其对降水的影响, 汪学林等(2001)指出层状云中的对流泡体对于整个云系的降水的启动和发展作用很大, 对寻找最佳增雨潜力区有意义。陈万奎等(2001)通过分析飞机外场催化试验结果指出, 固相雨胚的形成过程不仅转化过冷云水, 而且转化冰水面饱和和水汽密度差, 为在低过冷云水含量的云中实施人工增雨提供了重要的实验依据。胡志晋(2001)通过研究层状云降水机制提出新的人工增雨机制, 人工冰晶除了通过贝吉隆过程使过冷云水转化为降水外, 还使一部分冰面过饱和水汽转化为降水。洪延超(1996)利用积层混合云模式研究了对流云与层状云的相互作用, 并分析了积层混合云产生暴雨的物理机制。洪延超等(2005)采用层状云模式深入探讨了“催化-供给”云降水形成机理, 指出“催化-供给”云具有显著的分层结构, 其中撞冻增长和凝华增长是冰相粒子增长和雨水产生的主要过程, 水汽和过冷云水对雨水形成的贡献基本相当。

2002 年 10 月 18—20 日在低槽切变云系的影响下河南省出现了全省范围的小—中雨的天气过程, 通过利用多种观测资料对此过程的分析表明, 降水云系为较典型的层状云系(周非非等, 2008)。本

文利用 MM5 模式对这次河南省层状云系降水过程的模拟结果, 首先研究云系的水分收支, 在此基础上再分析降水机制, 将水分收支与降水机制相结合进而重点研究降水过程中水汽的分配、转化和云中粒子转化实现的途径。

2 模式模拟简介

采用 MM5 模式 3.6.3 版本模拟了 2002 年 10 月 18—20 日河南省层状云系降水过程, 模拟起止时间是 18 日 08 时(北京时, 下同)到 20 日 02 时。在模拟过程中使用两重嵌套。粗、细网格模拟域的水平格距分别为 30 和 10 km。粗网格模拟域采用混合相显式方案, 细网格模拟域使用 Reisner 霰方案; 前者采用 Grell 积云参数化方案, 后者不采用积云参数化方案; 两个模拟域都采用高分辨率的 Blackadar 边界层方案和云辐射方案。需要说明的是, 由于粗网格模拟域中积云参数化方案产生的总降水量约仅为显式方案的 1/10, 而且积云参数化方案在河南省域产生的降水很少, 因而在细网格模拟域中只采用了显式降水方案。模拟的初始场不但使用了 NCEP/NCAR 每 6 小时 1 次的再分析资料, 而且加入了中国常规地面和探空资料。模拟的高度场和温度场与客观分析结果相当一致, 模拟的 6 h 累积降水量与实况较吻合, 尤其在河南省域范围内(洪延超等, 2006)。有关这一层状云的实况和更多的模拟结果在前文(周非非等, 2008; 洪延超等, 2006)中作了详细的阐述。本文分析主要针对河南省域(图 1 中矩形区: 31.49°—36.53°N, 109.96°—117.03°E; 其中包括郑州地区: 34.27°—34.97°N, 112.70°—114.23°E; 南阳地区: 32.28°—33.80°N, 110.97°—113.82°E)的模拟结果。

从云系总水凝物含水量厚度分布随时间的演变能够直观地描绘出云系自西北向东南和逐渐向河南省推进的过程(图 1)。19 日 00 时, 云带前沿推进到河南省域西北部, 表明云系开始进入河南省; 08 时, 云系覆盖河南省的大部分地区; 到 12 时, 云系后边缘进入河南省, 云系整体范围比 08 时有所减小, 云系出现减弱的趋势; 12 时以后, 云系北边界明显向南收缩, 河南西北部云系消散。

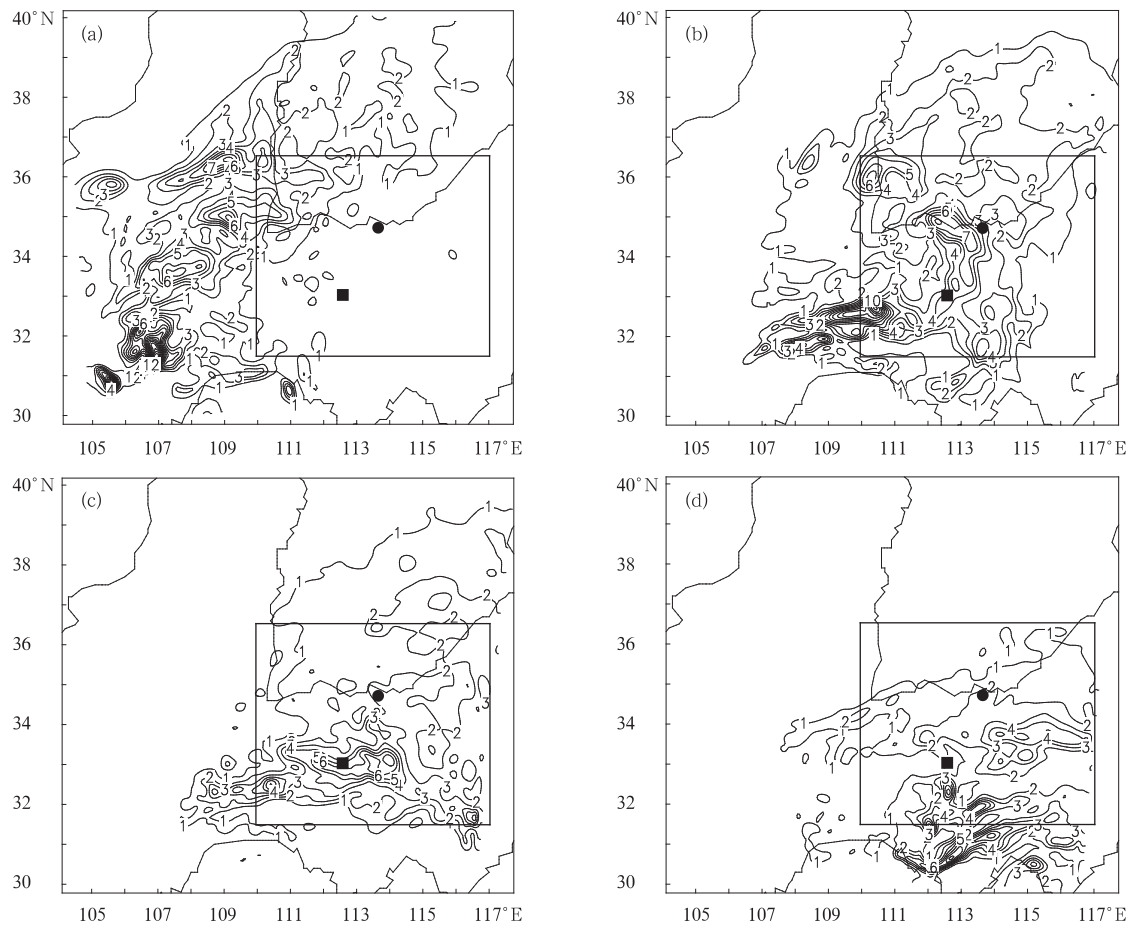


图1 2002年10月19日4个时刻模拟的云系总水凝物含量垂直累积厚度(mm)

(a. 00时, b. 08时, c. 12时, d. 20时; 图中矩形区为河南省范围, ●为郑州站, ■为南阳站)

Fig. 1 The vertically integrated thickness(mm) of the total hydrometeors for the simulated cloud system on 00:00 (a), 08:00 (b), 12:00 (c) and 20:00 BST (d) on 19 October, 2002 (The rectangle area represents the Henan region, the black circle stands for the position of the Zhengzhou station and the black square is for the Nanyang station)

3 层状云系水分收支和转化特征分析

3.1 水汽和水质粒的边界输送特征

通过分析19日不同时刻流经高为单位气压层厚度、长为河南省域各边界边长的截面积的水物质通量和辐合量随高度分布的演变(图2),能够了解各边界不同高度上水物质输送和辐合的特点。与图2中带标记的实线相对应的横轴表示每秒流经厚度为50 hPa气压层、长为西(东、南和北)边界长度的单位截面积的水汽(云水、雨水和雪)的质量。水物质通量的算式为 $\frac{1}{g} |\mathbf{V}| q_x \Delta l \cdot \Delta p$, 其中 \mathbf{V} 为水平速度(单位: m/s); q_x 为各水物质混合比(单位: g/kg); Δl 为各边界边长(单位: cm); Δp 取 50 hPa; 因

而算得的水物质通量单位为 g/s。若水物质辐合量大于0,则水物质通量是辐散(净流出);若小于0,则辐合(净流入)。

04时(图略),由于边界上水汽的输送,河南省域的水汽辐合主要发生在750 hPa以上,最大水汽辐合量位于约600 hPa高度。最大水汽辐散量位于约800 hPa高度,且辐散层较薄;从该辐散层向下到地面因有从东、南边界流入的水汽又成为辐合层。对于云水而言,其边界输送特征和辐合情况与水汽相似,即云水主要从西边界输入,750 hPa高度以上进入区域的云水主要来自西边界的流入,在该高度以下主要为云水的辐散层,但辐散量比其上方的辐合量小得多,因而平流输送使得区域云水量增加。雨水的输送特征与云水有所不同,边界输送的雨水对区域雨水量的影响不大。由于冰晶的输送强度

小,因而对区域内冰晶量的影响有限。雪的输送强度比冰晶大得多,雪通量仅次于水汽通量。边界输送造成 600 hPa 高度以上雪辐合,以下为辐散,且辐合强度远大于辐散强度,因而通过平流输送从区域外净流入的雪量对于区域降水应有一定影响。

与 04 时的相比,12 时的边界输送特征有显著差别(图 2)。从南边界流入的水汽量明显增大,其极大值增大了约 1 倍;从北边界流出的水汽量大为减少,其最大值减少约一半。因而南北向上水汽净流入量

显著增大,使得区域整层水汽几乎都为辐合,水汽辐合量的极大值位于约 750 hPa 高度,比 04 时的降低了约 150 hPa,辐合量比 04 时的大(图 2a)。这表明区域内高层水汽主要从西边界流入,而低层水汽主要从南边界流入,且低层水汽输送强度明显高于高层,因而进入区域的水汽主要来自于低层南边界。12 时河南省域云水为整层辐合,雨水的输送情况与云水相似(图 2b、2c)。因而从区域外流入的云水和雨水对于区域内降水的形成可能产生重要影响。

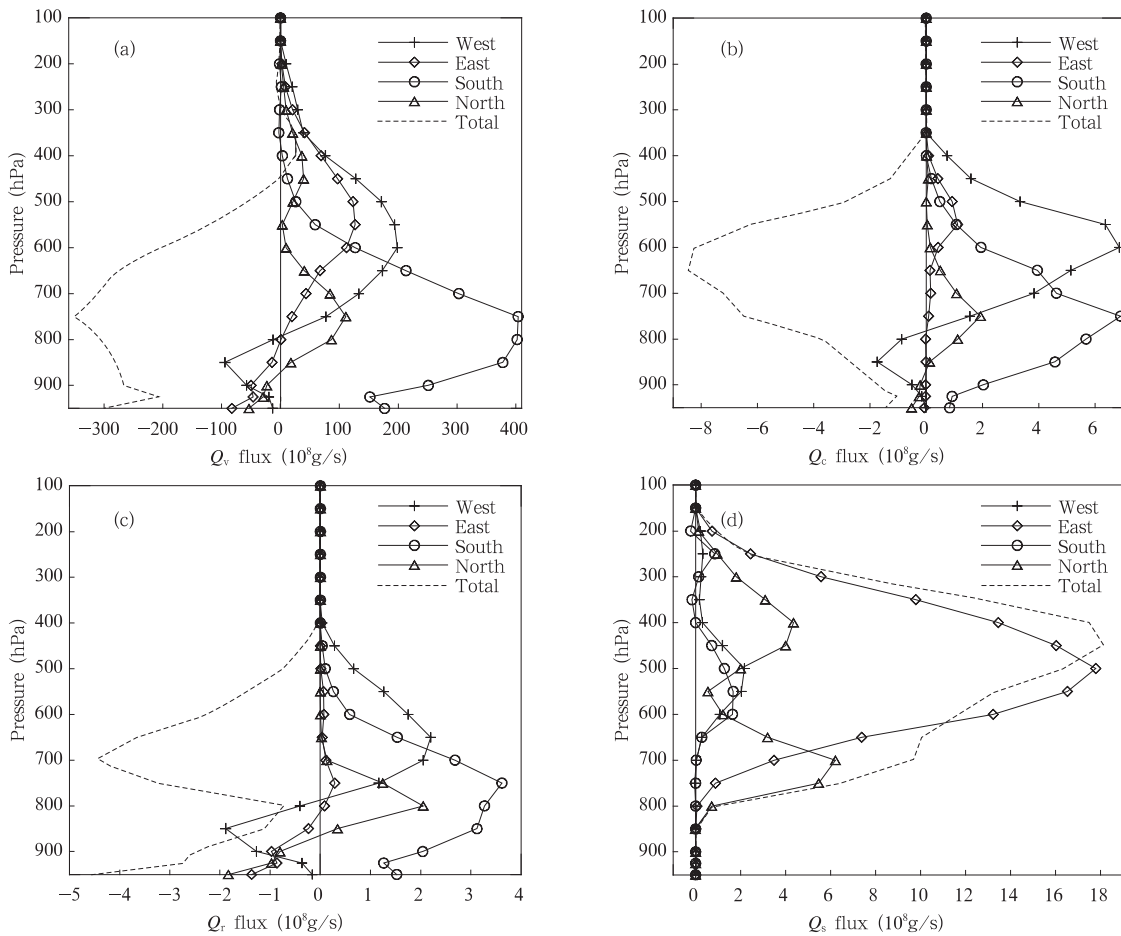


图 2 2002 年 10 月 19 日 12 时穿过河南省域各边界单位面积的水汽(a)、云水(b)、雨水(c)和雪(d)的通量(带标记线)及其总的辐合量(虚线)随高度的分布

Fig.2 Vertical distribution of the fluxes of water vapor (a), cloud water (b), rain (c), snow (d) and of their (total) convergences across each of the boundaries of the Henan region on 12:00 BST, 19 October, 2002

对于分布在对流层高层的冰晶而言,由于受到高空西风带的影响较大,从东边界流出的冰晶量比从西边界流入的大得多,造成东西向为净的输出,且南北向也为净的输出,因而区域内冰晶为辐散(图略)。雪和冰晶的边界输送特征有相似之处,在 4 个

边界上、不同高度上雪的通量都为正值,在东西、南北向上雪都为净的输出,造成区域内雪的减少,雪辐散量的极大值在 450 hPa 高度上(图 2d),这与 04 时雪以辐合为主相反。可见 12 时区域水汽、云水和雨水几乎都为整层辐合,而冰相粒子为整层辐散。

将图2中各气压层的水物质通量对高度作积分,可得穿过高为从地表到模式顶的、长为各边界长度的截面积的通量(图3)。在云系发展过程中,主要从南、西边界向区域内输入水汽,且从南边界流入的水汽量更多;北、东边界以输出水汽为主;约18日20时至20日02时区域整层水汽通量辐合,其极大值出现在19日08—11时(图3a)。就水凝物各边界通量的垂直积分量的时间演变看(图3b),总水凝

物在西边界上为流入,到19日04时通量达最大。南边界上总水凝物从18日21时起转为明显的流入。由于从西、南边界输送进入的水凝物较多,因而18日20时以后总水凝物以水平辐合为主。从以上区域边界输送特征看,西边界和南边界是把域外水汽和水凝物输送到域内,西、南边界上水汽的主要输入途径分别位于高层和低层,因而具有西向风和南向风分量的暖湿气流是云系的水分输送带。19日

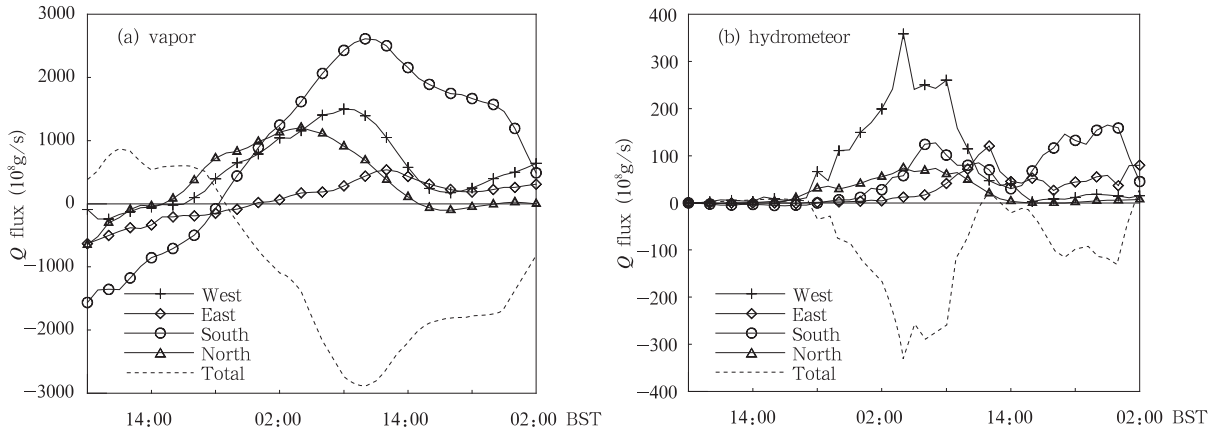


图3 18—20日穿过河南省域各边界截面的水汽(a)和水凝物(b)通量(带标记实线)及其辐合量(虚线)的垂直积分量(Q flux)的时间变化

Fig. 3 Time series of the vertical integration of the fluxes (Q flux, the solid lines with symbols on it) and flux convergences (the dashed line) of water vapor (a) and all hydrometeors (b) across each of the boundaries of the Henan region from 18 to 20 October, 2002

12时以后随着降水云中心移到研究区域,东边界成为水凝物的主要输出边界。19日河南省域所有水物质在水平方向上总体表现为净的流入。

3.2 水分平衡和转化效率分析

由显式预报水汽、云水、雨水、冰晶和雪及霰的方程可以得到水汽、总水凝物和总水物质的平衡等式(1)–(3)

$$Q_{sv} + Q_{ip} + Q_{ev} - Q_{vd} - Q_{su} - Q_{op} - Q_{in} = 0 \quad (1)$$

$$Q_{vd} + Q_{su} + M_{ip} - Q_{ec} - Q_{desu} - M_{op} - R - M_{in} = 0 \quad (2)$$

$$W_{ip} + Q_{ev} - W_{op} - R - W_{in} = 0 \quad (3)$$

式中 Q_{sv} 是水汽源项产生量, Q_{ip} 水汽输入量, Q_{ev} 地表蒸发量, Q_{vd} 水汽凝结量, Q_{su} 水汽凝华量, Q_{op} 水汽输出量, Q_{in} 水汽内留量变化量(最终水汽内留量减初始水汽内留量), M_{ip} 总水凝物输入量, Q_{ec} 蒸发量, Q_{desu} 升华量, M_{op} 总水凝物输出量, R 降水量,

M_{in} 总水凝物内留量变化量(最终总水凝物内留量减初始总水凝物内留量), W_{ip} 总水物质输入量, W_{op} 总水物质输出量, W_{in} 是总水物质内留量变化量(最终总水物质内留量减初始总水物质内留量)。

通过对式(1)–(3)中各项作对18日08时—20日02时、河南省域的时间和空间的积分,计算的值列在表1中。最后算出式(1)等号左边所有项的代数和为 -9.7×10^{10} kg, 尽管并不等于0,但是只占式(1)等号左边所有正值项之和的约0.17%。式(2)等号左边约等于 9.7×10^{10} kg, 仅为等号左边所有正值项之和的约0.39%。对于式(3),等号左边代数和约为0,即总水物质基本达到平衡。由于这是对河南省域在整个模拟时段的时空积分的计算结果,算得的水汽和水凝物收支出现以上相对很小的偏差在可以接受的范围内,因而本文研究的水汽、水凝物和总水物质的收支均基本达到了平衡。

表 1 水分平衡等式中各项计算值(单位:kg)

Table 1 The computational values of each term in the equilibrium equations of water substances (units: kg)

水汽源项 产生量	水汽 输入量	地表 蒸发量	凝结量	凝华量	水汽 输出量	最终水汽 内留量	初始水汽 内留量
0.56×10^{13}	3.75×10^{13}	2.373×10^{12}	1.54×10^{13}	7.32×10^{12}	2.21×10^{13}	1.097×10^{13}	1.022×10^{13}
凝结量	凝华量	总水凝物 输入量	蒸发量和 升华量之和	总水凝物 输出量	降水量	最终总水 凝物内留量	初始总水 凝物内留量
1.54×10^{13}	7.32×10^{12}	2.06×10^{12}	0.56×10^{13}	1.33×10^{12}	1.73×10^{13}	4.53×10^{11}	0.0
总水物质 输入量	地表 蒸发量	总水物质 输出量	降水量	最终总水 物质内留量	初始总水 物质内留量		
3.956×10^{13}	2.373×10^{12}	2.343×10^{13}	1.73×10^{13}	1.142×10^{13}	1.022×10^{13}		

在计算出水物质基本达到平衡的前提下,根据式(1)–(3)能够得出计算总水物质降水效率、水汽凝结(华)率和总水凝物降水效率的算式(4)–(6)

$$W_{pe} = R / (W_{ip} + Q_{ev} + W_{fin}) \quad (4)$$

$$Q_{ce} (Q_{se}) = Q_{vd} (Q_{su}) / (Q_{ip} + Q_{ev} + Q_{sv} + Q_{fin}) \quad (5)$$

$$M_{pe} = R / (Q_{vd} + Q_{su} + M_{fin} + M_{ip}) \quad (6)$$

式中 W_{pe} 为总水物质降水效率, W_{fin} 初始总水物质内留量, Q_{ce} 水汽凝结率, Q_{se} 水汽凝华率, Q_{fin} 初始水汽内留量, M_{pe} 为总水凝物降水效率, M_{fin} 初始总水凝物内留量。

通过分别计算式(4)–(6)中各项对河南省域每小时的累积量,求得的转化效率即为每小时的转化效率,其中初始水汽(总水物质、总水凝物)内留量指的是每小时初始时刻对应的内留量。图4给出了每小时的 W_{pe} 、 Q_{ce} 和 Q_{se} 以及 M_{pe} 随时间的演变。可以看出, M_{pe} 明显高于 W_{pe} 、 Q_{ce} 和 Q_{se} , 前者在19日09时之后一直大于40%, 而后者最大也不足10%。它们的极大值集中出现在19日09–13时时段内, 其最大值分别为6.1%、4.9%和3.2%及46.7%。平均小时降水量的时间分布曲线与 W_{pe} 、 Q_{ce} 和 Q_{se} 的曲线较相似, 平均雨强的最大值出现在19日11时。若分别计算式(4)–(6)中各项对18日08时–20日02时河南省域的时空累积量, 则算得的 W_{pe} 、 Q_{ce} 、 Q_{se} 和 M_{pe} 分别为33.1%、27.7%、13.1%及69.7%。由表1可知, 总水凝物输入量不到凝结量和凝华量之和的10%, 若忽略式(6)分母中的总水凝物输入量和初始总水凝物内留量两项, 结合式(5), 可计算出水汽的降水效率(降水量与水汽输入量、地表蒸发量、水汽源项产生量和初始水汽内留量四者之和的比值)约为31.1%, 接近于总水物质降水效率33.1%。水汽的降水效率与总水物质降水效率之所以近似是由于参与计算总水物质降水效率的水物质

总量中水汽占了绝大部分。

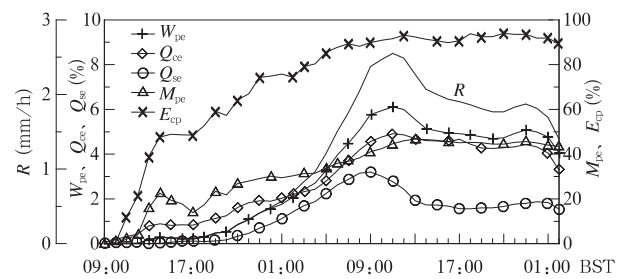


图4 河南省域18–20日每小时的总水物质降水效率

W_{pe} 、凝结率 Q_{ce} 、凝华率 Q_{se} 、

总水凝物降水效率 M_{pe} 、云水向降水粒子的转化率

E_{cp} (%) 和平均降水量 R (mm) 的时间变化

Fig. 4 Time series of the hourly precipitation efficiency W_{pe} of all water substances, hourly condensation efficiency Q_{ce} , deposition efficiency Q_{se} , hourly precipitation efficiency M_{pe} of hydrometeors, conversion ratio E_{cp} from cloud water to precipitable particles and average hourly surface precipitation R (mm) in the Henan region

另外, 还可以求出云水向降水粒子的转化效率 E_{cp} , 它是指云水通过自动转化及被其他粒子碰并收集等过程转化成降水粒子的总量与云水总产生量的比值。一般而言冰晶不作为降水粒子, 而MM5模式的Reisner霰方案将冰晶作为降水粒子, 所以算式(7)中加入了云水向冰晶的转化项。

$$E_{cp} = \frac{T_A}{T_{(pend1+pmci)}} \quad (7)$$

$T_A = T_{(prc + pra + psacw2 + pgacw2 + pilcw + piacw + phmfci + pssacw + pgsacw + pgsacw + pgtacw)}$

式中 T 代表微物理过程产生的总量, 下标表示的微物理过程(见符号表)。从图4看, 河南省域云水向降水粒子的小时转化率随时间表现出增加的趋势, 反映出云系的不同部位云水转化成降水粒子的效率不同。当云系前缘刚侵入河南省时, 云水转化率较小; 之后随着云系不断向域内延伸, 占据的范围逐渐

扩大,转化效率显著提高。当19日08时前后云系覆盖河南省域时(图1),转化率超过70%,接近极大值,增幅明显变缓,之后转化率达80%以上,说明在云系主体部位云水转化为降水粒子的效率较高。大部分云水通过自动转化及被其他粒子收集等过程,转化为雪、霰和雨滴这些降水粒子。就河南省域从18日08时至20日02时而言,云水向降水粒子的转化率约86.7%,前面的分析已知水汽凝结率和凝华率分别约27.7%和13.1%,在认为冰晶也属于降水粒子的前提下,可推得约37.1%的总水汽量最终转化成降水粒子。

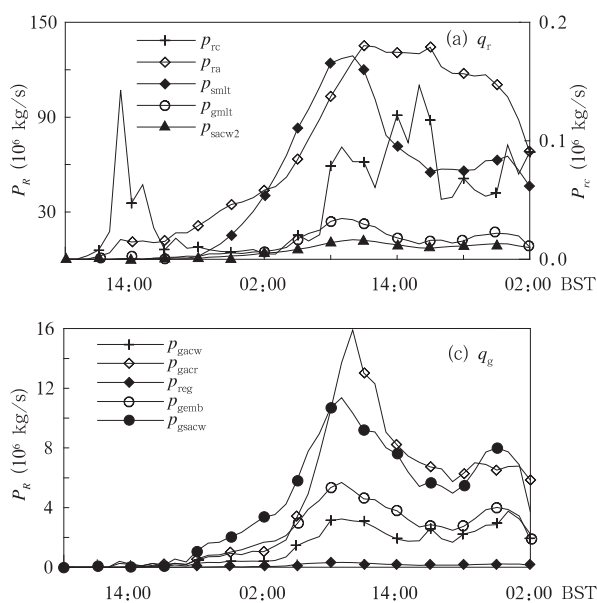
4 层状云系降水机制

云中水分转化包括3种方式:(1)水汽通过凝结和凝华过程向液态水和固态水的转化,这在前面已作过分析;(2)云水向降水粒子的转化,之前已给出云水转化为降水粒子的效率,这里将分析具体的转化过程;(3)降水粒子转化成地面的降水。其中降水粒子的形成和增长、不同种类粒子间的互相转化以及主要转化过程对雨水的贡献都是云系降水机制研究中的主要问题。

4.1 降水粒子形成、转化及其对降水的贡献

用从18日08时至20日02时河南省域云系中水质粒的源项产生率的空间积分量来分析降水粒子的形成和转化过程以及对降水的贡献。

4.1.1 河南省域云系降水粒子形成及转化过程



从图5a看,雨水由暖云和冷云过程形成和增长。18日20时以前主要是暖雨过程,雨水通过云雨自动转化和雨水碰并云水转化成降水,冰相过程几乎没有贡献。20时以后冰相过程明显加强。冰相粒子融化产生雨水的速率明显加大,雪和霰粒子的融化对雨水产生率的贡献较高,其中以雪的融化率最大;此外雨水碰并云水增长对雨水产生率也有较大贡献。另外冰粒子还在云暖区碰并云水,但这部分对雨水的贡献小。总之,在主要降水时段降水量由冷云和暖云过程共同产生的。雨水的产生靠云雨自动转化和冰相粒子融化,雨滴的增长依赖于碰并云水。雪主要由冰晶的转化产生,通过凝华和撞冻云水过程得以长大,凝华增长率明显高于撞冻增长率(图5b)。霰主要由云水和雪转化而来,其中云水受到雪撞冻转化为霰的量比雪自动转化为霰的量要大。霰增长过程中,对霰质量贡献最大的是霰撞冻雨水增长项,其次为霰撞冻云水过程,凝华过程产生率小,可见霰主要通过撞冻过冷水增长(图5c)。

在粒子形成和增长过程中实际隐含着不同粒子之间的转化。水汽凝结成云水后,主要有雨滴、冰晶、雪和霰粒子在增长过程中消耗云水,使得云水向这4种粒子转化。从图5看,云水向降水粒子的转化过程中,雨水收集项的产生率最高,接着是雪撞冻增长项,然后为云暖区中融化雪霰收集云水转化项,霰撞冻云水增长率最低。可见云水转化为降水粒子主要靠雨水收集和雪撞冻增长过程,其中前者最主要。在雪、霰和雨水这些降水粒子之间,雪主要通过

图5 18日20时到20日02时河南省域雨水(a)、雪(b)和霰(c)各源项区域产生率 P_R (10^6 kg/s) 的时间变化 (图中符号表示微物理过程,见符号表)

Fig. 5 Time series of the area-producing rate P_R of the source term for the rain (a), snow (b) and graupel (c) in the Henan region (The symbols stand for the microphysical processes as seen in the symbol table)

融化过程向雨水转化,而且对雨水的贡献较大;雪通过撞冻增长向霰的转化过程在霰的形成中发挥重要作用;霰通过融化过程转化成雨水。

4.1.2 冰粒子转化过程对降水的贡献

对中国北方层状云系实施人工增雨,其基本原理是通过引晶影响云中冰相微物理过程达到增加降水的目的,因此深入研究云中冰相粒子转化过程及其对降水的贡献是研究人工增雨作业条件的基础。

此次降水过程中河南省地面为液态降水,说明如果冰相过程对降水有贡献,那么冰相粒子一定是先融化成雨水后到达地面。先看冰粒子融化过程对雨水的贡献(图6)。随着云系向河南省域推进,冰粒子融化对雨水的贡献逐渐增大,到约11时云系完全覆盖河南省时,贡献率达到约50%。冰相粒子融化前经历了消耗水气的凝华增长和消耗云水的撞冻增长过程,冰粒子凝华增长对雨水的贡献率最大超过35%,撞冻增长对雨水的贡献率接近12%,可见冰相物理过程对降水的形成有较主要作用。在冰相粒子融化形成的雨水中,至少有70%来自水气的凝华,剩余才是过冷水对融化雨水的贡献,也表明水汽凝华过程对冰相粒子增长重要。

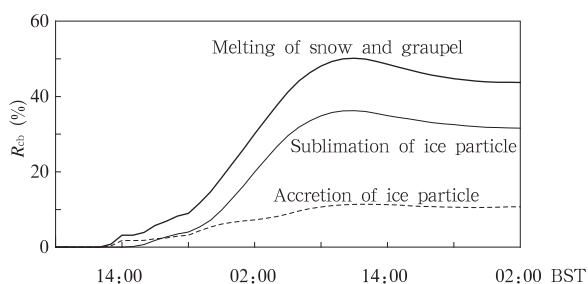


图6 河南省域18—20日雪和霰粒子融化、冰相粒子凝华增长和撞冻增长对雨水的贡献率 R_{cb} 随时间变化

Fig. 6 Time series of the contribution ratio of snowmelt and graupel melt, sublimation and accretion growth of ice-phase particles to the rain amounts in the Henan region

凝华过程对雨水的贡献大与云系降水特征有关。这次降水过程中冰粒子融化对雨水的贡献较大,在某些时段例如19日03—10时(图5a),冰粒子融化产生的雨水量甚至超过雨水收集云水的增长量,相对而言云雨自动转化量小得多,其中以雪融化成雨水为主,霰融化量很小。雪的增长方式主要是凝华增长,撞冻增长小得多(图5b),造成凝华过程对雨水的贡献明显高于撞冻过程。而在另外一些云

中,例如2002年4月5日河南低槽冷锋降水云系的“催化-供给”云中(洪延超等,2005),霰的融化对雨水的贡献较大,霰主要靠撞冻增长,雪撞冻增长过程也比凝华增长重要,结果导致凝华过程与撞冻过程对雨水的贡献相差不大。

4.2 云系降水机制

为了更全面地了解云系的降水机制,这里分别选取河南省郑州地区和南阳地区,用以研究云系中不同部位的降水机制。

4.2.1 郑州地区

表2列出了郑州地区18日08时到20日02时云中冰晶、雪、霰和雨粒子的总量(分别为 t_{q_i} 、 t_{q_s} 、 t_{q_g} 和 t_{q_r})及其源项微物理过程产生率的时空积分量(用符号表中代表各种微物理过程的符号表示)。表3给出了该地区云微物理过程产生量所占百分比。下面结合表2和表3,分析郑州地区降水形成环节。

通过向雪的自动转化和被雪收集过程,67.5%(P_{is})的冰晶转化成雪。雪粒子主要通过冰晶向雪的自动转化过程形成,然后靠凝华和收集冰晶过程增长,这部分雪增长量对雪总量(t_{q_s})的贡献率(P_{ds1})为84.2%,其中雪凝华增长量占79.0%。雪撞冻云水过程对雪总量的贡献率(P_{ds2})为15.8%。产生的雪中有7.0%(P_{sg})通过撞冻云水等过程转化为霰。在霰总产生量(t_{q_g})中,通过雪撞冻云水等过程转化为霰的占56.2%(P_{dg1}),霰撞冻过冷水增长量占42.3%(P_{dg2}),凝华过程的贡献率(P_{dg3})仅为1.4%。

通过分析表2和表3中雨水各源项产生量及所占比重可知,地面降水的形成主要通过3个途径:(1)云水自动转化为雨水以后,雨水碰并云水增长,暖雨过程对雨水总量的贡献率(P_{dr1})达到49.2%;(2)雪和霰粒子降落到云暖区中融化成雨水,对雨水的贡献率(P_{dr2})为48.5%,其中主要为雪融化的贡献,达到41.9%;(3)云暖区中,还发生着融化冰粒子碰并云水转化为雨水的过程,增长量对雨水的贡献率只有2.3%。

从以上降水形成的环节可知,冰晶是发动冷云降水的基本粒子,有67.5%的冰晶转化成雪粒子,有82.1%的雪融化成雨水,有7.0%的雪转化为霰,霰粒子几乎全融化成雨水。

4.2.2 南阳地区

表3列出了南阳地区18日08时到20日02时

云微物理过程产生量的百分比。南阳地区降水形成环节的特点与郑州地区类似,有 58.2% 的冰晶转化

为雪,有 83.5% 的雪融化成雨水,有 11.1% 的雪转化成霰,霰粒子几乎全部融化为雨水。

表 2 郑州地区云中各种粒子及其源项产生率的时空积分量(单位:kg)
Table 2 The spatial-and temporal-integrations (unit: kg) of the production rate of the four kinds of hydrometeors in the Zhengzhou area

t_{q_1}	P_{ri}	P_{rd}	P_{ifcw}	P_{icw}	P_{ispl}	P_{hmfc}
2.245×10^{10}	2.50×10^8	2.22×10^{10}	0.67×10^5	1.535×10^4	0.96×10^5	1.125×10^{-6}
t_{q_s}	P_{rei}	P_{scni}	P_{rai}	P_{racis}	P_{iacrs}	P_{ssacw}
2.91×10^{11}	2.30×10^{11}	1.305×10^{10}	2.085×10^9	0.53×10^6	0.515×10^8	4.595×10^{10}
t_{q_g}	P_{gacw}	P_{gacr}	P_{reg}	P_{racig}	P_{iacrg}	P_{gemb}
3.615×10^{10}	3.375×10^9	1.19×10^{10}	0.515×10^9	2.66×10^4	2.715×10^6	0.675×10^{10}
	P_{gsacw}	P_{sfr}	P_{icng}	P_{giacw}		
	1.355×10^{10}	1.91×10^6	0.00	2.615×10^1		
t_{q_r}	P_{rc}	P_{ra}	P_{smlt}	P_{gmlt}	P_{gacwm}	P_{gacrm}
0.57×10^{12}	1.115×10^7	2.795×10^{11}	2.39×10^{11}	3.705×10^{10}	3.475×10^6	3.565×10^8
	P_{sacw2}	P_{gacw2}				
	1.205×10^{10}	0.825×10^9				

表 3 郑州地区(南阳地区)云微物理过程产生量的百分比(%)
Table 3 Proportion (%) of the production amounts by the main microphysical processes in the Zhengzhou (Nanyang) area

P_{ds1}	P_{ds2}	P_{ds3}	P_{dg1}	P_{dg2}	P_{dg3}
84.2(79.4)	15.8(20.1)	0.01(5.4)	56.2(57.9)	42.3(40.5)	1.4(1.4)
P_{dr1}	P_{dr2}	P_{dr3}	P_{is}	P_{MLsr}	P_{MLgr}
49.2(57.1)	48.5(40.0)	2.3(2.9)	67.5(58.2)	82.1(83.5)	100.0(99.0)
P_{sg}					
7.0(11.1)					

注: $P_{ds1} = (P_{rei} + P_{scni} + P_{rai})/t_{q_s}$, $P_{ds2} = P_{ssacw}/t_{q_s}$, $P_{ds3} = (P_{racis} + P_{iacrs})/t_{q_s}$
 $P_{dg1} = (P_{gemb} + P_{gsacw})/t_{q_g}$, $P_{dg2} = (P_{gacw} + P_{gacr})/t_{q_g}$, $P_{dg3} = P_{reg}/t_{q_g}$
 $P_{dr1} = (P_{rc} + P_{ra})/t_{q_r}$, $P_{dr2} = (P_{smlt} + P_{gmlt})/t_{q_r}$, $P_{dr3} = (P_{gacwm} + P_{gacrm} + P_{sacw2} + P_{gacw2})/t_{q_r}$
 $P_{is} = (P_{scni} + P_{rai})/t_{q_1}$, $P_{MLsr} = P_{smlt}/t_{q_s}$, $P_{MLgr} = P_{gmlt}/t_{q_g}$, $P_{sg} = (P_{gemb} + P_{gsacw})/t_{q_s}$

南阳和郑州地区层状云系的降水机制也存在着差异,主要表现在两方面:第一,与南阳相比,郑州冰晶转化为雪的量分别占冰晶、雪的总源项产生量的比重都较大;郑州冰晶(雪、霰)凝华增长量对冰晶(雪、霰)产生量的贡献率要大;郑州冰粒子融化对雨水的贡献率(P_{dr2})高出 8.5%。这些都说明郑州地区冷云物理过程对降水的贡献比南阳地区要大。第二,和郑州相比,南阳雪撞冻过冷水增长的贡献率较大,多出 4.3%;暖云过程的贡献率较高,高出 8.0%。这些与南阳地区过冷水含量较大是有关系的。由于这两个地区降水机制有差异,地面雨强的演变特征也有不同。

4.3 不同云层对降水的贡献

为了分析河南云系不同云层对降水的贡献,按云系垂直方向上微物理结构特征的差异可分成 3 层:完全由冰相粒子组成的云层称为冰相层(催化层),在其下面依次为由冰粒子和过冷水组成的冰水

混合层以及位于 0 °C 层以下的液水层。选择郑州和南阳两个地区,分别计算 3 个云层下界的降水量。冰相层下界降水量就是该层落入冰水混合层的降水量。冰相层的降水粒子降入混合层后,通过多种微物理过程的生长,使其下界的降水强度高于冰相层的降水强度,冰水混合层下界降水量与冰相层下界降水量的差值构成混合层对地面降水的贡献。同样,液水层下界降水量与混合层下界降水量的差值形成液水层的贡献。分析层状云 3 层对降水的贡献主要选取有降水的时段。对郑州区域选取的时段为 19 日 09 时到 20 日 02 时,降水强度 1.5—4.0 mm/h;南阳区域为 19 日 04 时到 20 日 02 时,降水强度 0.5—5.0 mm/h。

郑州地区不同云层对地面降水的小时贡献率随时间的分布见图 7a。19 日 09 时—20 日 02 时,3 个云层对地面降水的贡献经历了起伏变化,09 时雨强达到最大(4.0 mm/h)时冰相层、冰水混合层和液水

层对地面降水的贡献率分别达45.3%、44.7%和10.0%；在这一时段，冰相层对地面降水贡献的变化范围为2.4%—45.3%，平均值15.6%，这三者中冰相层贡献率的变化幅度最大。冰水混合层对地面降水贡献的变化范围为32.9%—65.7%，平均值

45.7%。液水层对地面降水贡献的变化范围为10.0%—55.3%，平均值为37.7%。可见冰水混合层和液水层作为“催化-供给”体系中的供给云，其中的微物理过程对地面降水量的平均贡献率达83.4%。

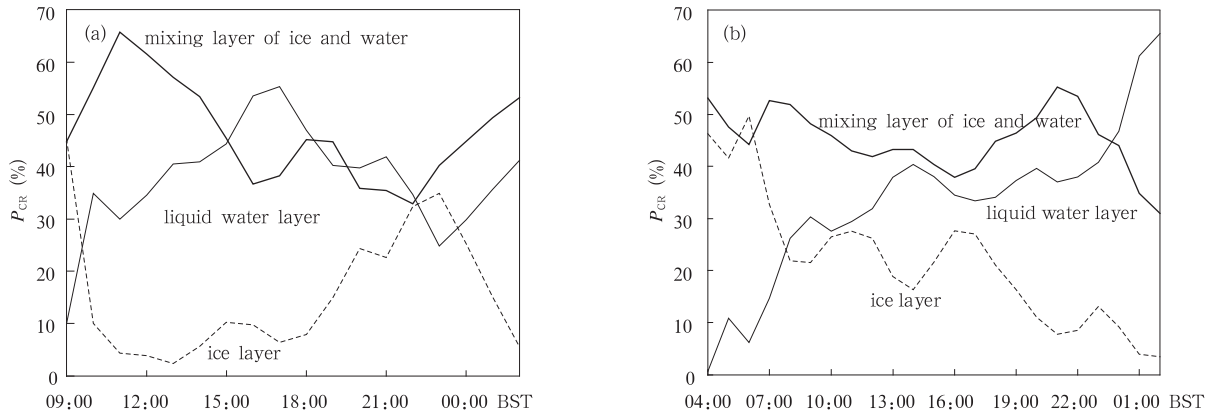


图7 19—20日郑州地区(a)和南阳地区(b)冰相层、冰水混合层和液水层小时降水量分别对地面小时降水量的贡献率 P_{CR} (%)随时间的变化

Fig.7 Time series of the contributing ratios (%) of the hourly precipitation of the ice-phase cloud-layer, mixed-phased cloud layer and liquid-phase cloud-layer to the hourly surface rainfall in the Zhengzhou area (a) and the Nanyang area (b)

南阳地区不同云层对地面降水的贡献率随时间的分布见图7b。到19日06时地面雨强开始大于1 mm/h,12时雨强达到最大(5.0 mm/h)时自上而下3个云层对地面降水的贡献率依次为26.2%、41.9%和31.9%。19日04时到20日02时,冰相层降水对地面贡献的变化范围为3.5%—49.7%,平均值21.7%。冰水混合层对地面降水贡献率的变化范围为31.0%—55.3%,平均值45.1%,三者中冰水混合层贡献率随时间的起伏程度最小。液水层对地面降水贡献的变化范围为0.6%—65.5%,平均值33.1%,且表现出随时间增大的总体趋势。可见南阳供给云对降水的贡献率平均达78.2%。

分析18日08时到20日02时这一时段不同云层累积降水对云底降水的贡献,郑州地区的冰相层降落到冰水混合层中的雪和冰晶的总量为 1.12×10^{11} kg,因而冰相层对云底降水量的贡献率达到24.1%。当冰晶和雪粒子降落到冰水混合层中,主要通过冰粒子的凝华和撞冻增长等过程,使得冰水混合层下边界的降水量达到 3.36×10^{11} kg,该

层使降水量增加了 2.23×10^{11} kg,对云底降水量的贡献率达到48.0%。当降水粒子穿过零度层下落到液水层中,雪和霰粒子融化成雨水以及融化后的雪和霰粒子收集云水转化成雨水,再加上液水层中暖云过程,使得降水量又增加了 1.29×10^{11} kg,即云底降水量达到 4.65×10^{11} kg,导致云暖区对云底降水的贡献率达到27.9%。供给云的贡献率占到75.9%。相比之下,南阳地区云底降水量比郑州大得多,达到 2.52×10^{17} kg。尽管郑州地区和南阳地区累积降水量差异大,但是南阳各云层对降水的贡献与郑州差别不大。最终3个云层对云底降水的贡献率分别达26.5%、50.0%和23.5%,可见供给云的贡献率占到73.5%。

上述分析表明,无论是考虑各云层小时降水量还是累积降水量对降水的贡献,总体平均上作为催化云的冰相层对降水的贡献约15%—27%,冰水混合层约45%—50%,液水层约23%—38%。在2002年4月5日河南层状云个例中3个云层对降水的贡献依次约为25.5%、31.3%和43.1%(洪延

超等,2005)。对比这两个例可见,作为催化云层的冰相层对降水的贡献基本相当,因而供给云层对降水的贡献差别也不大。具体到供给云内不同云层而言,本文研究个例中冰水混合层对降水的贡献较2002年4月5日个例要高,相应地前者液水层对降水的贡献低于后者。

5 结论和讨论

本文用数值模拟研究的方法分析了2002年10月18—20日河南省层状降水云系的水分收支和降水微物理机制,得到如下结果:

(1) 河南省域以外的水汽和水凝物主要通过西边界和南边界输送到域内,具有西向风分量和南向风分量的暖湿气流是云系的水分输送带,在19日降水的主要时段水汽和总水凝物在水平方向上整体表现为净的流入。对河南省域水汽、总水凝物和总水物质的水分收支各项的计算表明,水物质基本达到平衡。在此基础上,计算了总水物质降水效率、凝结(华)率和总水凝物降水效率以及水汽降水效率等。总水物质降水效率、凝结率和凝华率以及总水凝物降水效率分别达33.1%、27.7%和13.1%以及69.7%,计算的水汽降水效率约31.1%,水汽降水效率与总水物质降水效率接近是由于在总水物质中水汽占绝大部分。另外考虑到云水转化成降水粒子的效率约86.7%,总共约37.1%的总水汽量最终转化成降水粒子。云中水分转化主要有3种渠道,包括水汽通过凝结和凝华过程向液态水和固态水的转化、云水向降水粒子的转化以及降水粒子转化成地面降水。对河南省两地区不同降水粒子间转化的分析表明,约58.2%以上的冰晶转化为雪,约超过82.1%的雪粒子融化为雨水,约不足11.1%的雪转化为霰,霰粒子几乎全部融化成雨水。

(2) 对该例降水微物理机制的分析表明,18日20时以前为暖雨过程,以后的主要降水阶段冷云和暖云降水机制并存。云系中冰晶主要通过凝华过程增长。雪主要由冰晶转化产生,通过凝华和撞冻云水增长,且凝华增长率比撞冻增长率高得多。霰主要由雪转化产生,霰撞冻增长是主要增长过程。雨水由暖云和冷云过程产生,雨水碰并云水的增长量

和冰相粒子融化产生的雨水量对雨水的贡献相近,云雨自动转化量相对很小。冰相粒子凝华增长对雨水的贡献最大超过35%,撞冻增长的贡献最高接近12%,可见在冰相粒子融化形成的雨水中,约70%来自于水汽的贡献,剩余为过冷水的贡献,也反映出水汽对降水粒子增长的重要性。按云中微物理结构特征在垂直方向上将云层分成3层:冰相层、冰水混合层和液水层。在19日主要降水时段冰相层对降水的贡献约15%—27%,冰水混合层约占45%—50%,液水层约为23%—38%,可见在以冷云降水机制为主的“催化-供给”云中冰相粒子在冰水混合层的生长对降水的贡献相当大。

为了加强和进一步验证本文的研究结果,还需要将云微物理探测资料与数值模拟结果相结合,针对多个不同降水云系个例,作更加深入细致的研究。

参考文献

- 陈万奎,严采繁. 2001. 冰相雨胚转化水汽密度差的实验研究. 应用气象学报,12(增刊):23-29
- 胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨. 应用气象学报,12(增刊):10-13
- 洪延超. 1996. 积层混合云数值模拟研究(I)——模式及其微物理过程参数化. 气象学报,54(5):544-557
- 洪延超. 1996. 积层混合云数值模拟研究(II)——云互相作用及暴雨产生机制. 气象学报,54(6):661-674
- 洪延超,周非非. 2005. “催化-供给”云降水形成机理的数值模拟研究. 大气科学,29(6):885-896
- 洪延超,周非非. 2006. 层状云系人工增雨潜力评估研究. 大气科学,30(5):913-926
- 李宏宇,王华,洪延超. 2006. 锋面云系降水中的增雨潜力数值研究. 大气科学,30(2):341-350
- 任宏利,张培群,李维京等. 2004. 中国西北部地区春季降水及其水汽输送特征. 气象学报,62(3):365-374
- 汪学林,金德镇,李永振. 1987. 蒙古气旋的降水效率及其人工影响潜力//云雨论文集. 北京:中国科学技术出版社,309-314
- 汪学林,谷淑芳,于勇等. 2001. 两次江淮气旋的云雨特征及其人工播云效果的综合分析. 应用气象学报,12(增刊):48-57
- 汪学林,秦元明,吴宪君等. 2001. 层状云中对流泡特征及其在降水场中的作用. 应用气象学报,12(增刊):146-150
- 赵瑞霞,吴国雄. 2007. 长江流域水分收支以及再分析资料可用性分析. 气象学报,65(3):416-427
- 曾光平,刘峻,郑淑宾等. 1990. 华南前汛期锋面云系降水效率及其人工影响的可能性. 热带气象,6(4):365-371
- 周非非,廖菲,苏爱芳等. 2008. 河南省2002年秋季一次层状云降水过程的观测研究. 南京气象学院学报,31(4):483-493

- Braham R R Jr. 1952. The water and energy budgets of the thunderstorm and their relation to thunderstorm development. *J Meteor*, 9:227-242
- Chong M, Hauser D. 1989. A tropical squall line observed during the COPT 81 experiment in West Africa. Part II: Water budget. *Mon Wea Rev*, 117:728-744
- Colle B A, Garvert M F, Wolfe J B, et al. 2005. The 13 - 14 December 2001 IMPROVE - 2 Event. Part III : Simulated Microphysical Budgets and Sensitivity Studies. *J Atmos Sci*, 62: 3535-3558
- Caniaux, G, Redelsperger J L, Lafore J P. 1994. A numerical study of the stratiform region of a fast - moving squall line. part I; general description and water and heat budgets. *J Atmos Sci*, 51: 2046-2074
- Hobbs P V, Matejka T J, Herzegh P H, et al. 1980. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones I: a case study of a cold front. *J Atmos Sci*, 37:568-596
- Sui C H, Lau K M, Tao W K, et al. 1994. The tropical water and energy cycles in a cumulus ensemble model. part I: equilibrium climate. *J Atmos Sci*, 51: 711-728
- Tao W K, Simpson J, et al. 1993. Heating, moisture, and water budgets of tropical and midlatitude squall lines; Comparisons and sensitivity to longwave radiation. *J Atmos Sci*, 50:673-690

附:MM5 中尺度模式中微物理过程符号表

p_{gacr} : 霰撞冻雨水增长	p_{gacrm} : 雨水碰并融化霰	p_{gacw} : 霰撞冻云水增长
p_{gacw2} : 云暖区霰收集云水转为雨水	p_{gacwm} : 云水碰并融化霰	p_{gemb} : 雪自动转化为霰
p_{gfr} : 雨水冻结为霰	p_{giacw} : 冰晶淞附转成霰	p_{gmilt} : 霰融化
p_{gsacw} : 雪撞冻云水转为霰	p_{hmfc} : 云水均质冻结成冰晶	p_{iacrg} : 碰撞云冰, 雨水冻结为霰
p_{iacrs} : 碰撞云冰, 雨水冻结为雪	p_{iacw} : 冰晶淞附	p_{icng} : 冰晶自动转化为霰
p_{ifcw} : 云水冻结为冰晶	p_{ispl} : 冰晶繁生	p_{mci} : 冰晶融化
p_{ra} : 雨水碰并云水	p_{racig} : 雨水碰并冰晶, 转化为霰	p_{racis} : 雨水碰并冰晶转化为雪
p_{rai} : 雪收集冰晶增长	p_{re} : 云雨自动转化	p_{rd} : 冰晶凝华增长
p_{reg} : 霰凝华增长	p_{rei} : 雪凝华增长	p_{ri} : 冰晶初生
p_{sacw2} : 云暖区雪收集云水转为雨水	p_{scni} : 冰晶自动转化为雪	p_{smilt} : 雪融化为雨水
p_{ssacw} : 雪撞冻云水增长	p_{end1} : 水汽凝结	