河南省春季层状云系降水的空中水资源特征分析

邵　洋　郑国光

(中国气象科学研究院中国气象局云雾物理重点开放实验室,北京 100081)

提　要: 利用ARPS中尺度数值模式对河南省2005年3月20—21日层状云系降水过程中的云水资源特征进行了模拟分析,模式主要计算了水汽收支状况、云中水分的微物理转化和降水效率等。结果表明,充沛的水汽输送为云系的形成和发展提供了有利条件,河南省域的水汽收入主要是水平流入,地表蒸发的贡献相对较小。河南南边界和西边界是此次降水过程水汽的主要水平流入边界,东边界和北边界是水汽的主要水平流出边界,较强的流入高度在2 km附近。云系呈明显的垂直分层结构,平均0℃层在2.5km高度附近。6km高度以上的高云为冰云,2.5～6km高度之间的中云为冰水混合云,2.5km以下的低云为水云,符合"播撒—供给"云结构。雪和霰主要在4km高度左右生长,雨水主要在2.5km高度左右的0℃层附近生长。全省小时降水效率和地面小时降水量的时间变化趋势较为一致,但明显滞后于水汽流入率的时间变化。在降水较强时段,河南省域的小时降水效率为20%～30%。降水效率的分布形势与累计降水较为一致,河南南部较高、北部较低。

关键词: 层状云系　水汽收支　微物理转化　降水效率　ARPS

A Study of the Feature of Water Resources in Spring Precipitating Stratiform Clouds in Henan Province

Shao Yang　Zheng Guoguang

(Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of CMA,
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The feature of water resources in precipitating stratiform clouds during March 20-21, 2005 in Henan Province was studied using ARPS model. Vapor inflow and outflow, microphysical

资助项目:"十五"国家科技攻关计划《人工增雨技术研究及示范》(2001BA610A-06/2004BA610-04)
收稿日期:2007年2月7日;　修定稿日期:2007年5月17日

conversion of water substance in clouds, and precipitation efficiency were simulated. The model simulation declared that plentiful vapor inflow provided a favorable condition for the formation and development of clouds. The inflow of vapor in the Henan region was mostly horizontal with weak contribution from surface evaporation. The main vapor inflow exists in the southern and western sides of Henan with the strongest inflow at about the height of 2 km, whereas the eastern and northern sides are main vapor outflow. The average height of 0℃ layer is about 2.5km. The clouds have a distinct vertically-layered structure with ice cloud above 6 km, water-ice mixed cloud between 2.5～6km, and liquid cloud below 2.5km, which accords with the "seeder-feeder" cloud structure. The horizontal flow of hydrometeor was weaker compared with the vapor flow. The growth of precipitating ice particles mainly occurs at about the height of 4km, and that of rain droplets at about the height of 2.5km, where is near the zero temperature level. The temporal change of regional hourly precipitation efficiency is consistent with surface hourly precipitation with a distinct lag behind the vapor inflow. During strong precipitation, regional hourly precipitation efficiency is 20%～30%. The distribution of regional precipitation efficiency is consistent with total precipitation with higher value in the southern Henan and lower value in the north.

Key Words: stratiform clouds　vapor inflow and outflow　microphysical conversion　precipitation efficiency　ARPS

引　言

层状云系是在气旋低压和锋面附近形成的大范围降水系统,由深厚的空气层缓慢而持续地上升所形成,每秒几厘米至几十厘米的上升运动至少维持几个小时,是我国北方春季干旱开展人工增雨的主要作业对象。

降水云系的水资源分布特征及微物理转化机制对最终形成地面降水非常重要。Wegener[1]提出水汽张力值能自身调整到对冰面和水面饱和值之间;Bergeron[2]认为只有在低于－10℃的云中,大量过冷水与冰晶共存,接近水面饱和状态相当于冰面过饱和,水分由液滴蒸发继而凝华到冰晶上,冰晶快速增长;Findeisen[3]在高空观测的基础上发现,所有大水滴组成的雨都起始于霰或雹。Hobbs 等人[4]对冷锋云系的研究得出,暖区和窄冷锋雨带的降水效率分别在 40%～50%和 30%～50%,高层浅对流泡里的冰粒子对宽冷锋雨带和一些暖区雨带降水的发生产生了重要的作用。Rutledge 等人[5]用二维动力定常微物理过程诊断模式模拟了对暖锋雨带的"播撒－供水"过程中上层的自然播撒作用,模拟结果认为位于地面暖锋之前的暖锋雨带自然播撒冰晶的凝华增长,有效地转化了由供水带上升气流所产生的凝结水分,约占地面降水总量的 75%;而与地面暖锋相重合的暖锋雨带中,自然播入的雪晶主要通过碰冻结凇增长。胡志晋等人[6]以群体比水量和比浓度为双参数对层状云中 18 种常见的微物理过程中云水、雨水、冰晶、雪团和霰的的转化率进行了数值模拟,得到了同实测较为一致的层状云"播撒－供水"机制,高空发生泡的自然播撒作用和暖区降水过程等。

大气水资源决定了地表和地下水资源的数量和质量[7]。云中水物质根据相态、大小可分水汽(q_v)、云水(q_c)、雨水(q_r)、冰晶(q_i)、雪团(q_s)和霰(q_g)或雹(q_h)等 6 种。胡

志晋[8]提出了层状云中人工冰晶除通过Bergeron过程转化过冷水外，还使部分冰面过饱和水汽转化为降水，拓展了人工增雨的水分来源。李大山等[9]从人工增雨潜力的角度将云水定义为云系中已经凝结(华)但未形成降水的水凝物，通过自然过程所不能转化为降水而通过人工增雨作业能够人为地降到地面的云水才是云水资源。李宏宇等[10]通过对河南省春季低槽冷锋降水过程的分析，认为云系内同时存在较强的暖云和冷云过程，“播撒一供给”云机制明显，降水主要集中在冷锋面附近，锋前锋后拟降水效率通常介于10%～30%，锋区附近达40%～60%，在积层混合区域拟降水效率可高达70%以上。这里将云水资源泛指空中的水资源，分为水汽(q_v)、液态水(q_c，q_r)和固态水(q_i，q_s，q_g或q_h)3类分别讨论，重点分析水物质的微物理转化过程。

1 模式介绍

ARPS(Advanced Regional Prediction System)是由美国Oklahoma大学的风暴分析和预报中心(CAPS)开发和发展的三维非静力中尺度数值模式，用于从天气尺度到小尺度(主要是对流风暴或中尺度)天气系统的预报[11]。模式采用完全弹性、可压缩和非静力大气动力学等控制方程，包括动量、热量、质量、水物质和能量等预报方程和状态方程，采用Arakawa C水平交错网格、时步分离计算方案、广义地形追随和伸展坐标系。本次模拟计算用的是2005年11月发布的ARPS 5.2.4版本。

1.1 模式设置

分别以27 km和9 km粗细两层水平网格分辨率对2005年3月20日12时至21日12时(本文中时间皆为世界时)的河南层状云系降水进行了模拟。粗网格以合肥(31.867°N、117.233°E)为模拟区域中心，读入的初边界资料为NCEP 1°×1°全球6小时实时分析资料和常规及地面探空资料。粗网格模拟生成的逐时预报结果插值到细网格上，为细网格模拟提供初始条件和边界条件。细网格模拟以位于河南省许昌(34.017°N、113.85°E)为区域模拟中心。

粗网格模拟区域的地形比较复杂，呈西高东低的分布形势(图1)。河南郑州以东部分地形较为平坦，海拔在250m以下；郑州以西部分地形高度开始升高，从250m上升到1000m，西北部达到了1000m以上；南部山区地形高度在250～500m之间。细网格内的地形相对较为平坦，郑州以东部分是平原，西部是逐渐上升到1000m左右的倾斜地势。

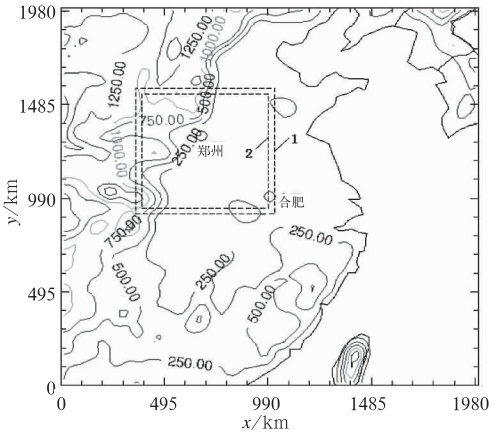

图1 模拟区域地形高度分布

1.为细网格模拟区域，2.为细网格计算域，单位：m

1.2 微物理方案

模式采用Lin-Tao冰相微物理方案[12-13]和WRF Kain-Fritsch积云参数化新方案。Lin-Tao冰相微物理方案包括两种液相水(q_c，q_r)和三种冰相水(q_i，q_s，q_g或q_h)，假定雨水、雪、霰或雹粒子满足指数分布形式，所有冰相粒子为球形。微物理转化过程具体

包括水汽向云水的凝结过程、水汽向冰晶和雪的凝华过程、云水向雨水的转化过程、云水向冰晶、雪和霰的凇附和 Bergeron 过程、雨水向雪和霰的凇附过程、冰晶向云水的融化过程、冰晶向雪和霰的转化过程、雪和霰向雨水的融化过程、云水和雨水的蒸发过程以及冰晶、雪和霰的升华过程等。冰相微物理方案还调整了相变对热力场的扰动影响,整个微物理过程还包括雨、雪和霰的落出等过程。

2　天气背景分析

天气尺度降水的发生一般是由相应尺度的天气系统支配下形成的。天气学理论认为,当地面低压气旋处于高空槽前下方时,由于地面低压中心附近涡度平流很小,而在其上空的高空槽前为正涡度平流,于是涡度平流随高度增加,将有上升运动发生,从而成云致雨。

20 日 12 时:500hPa 高空,甘肃上空有北支槽,四川上空有南支槽,受南支槽的影响,河南处于槽前西南气流中,暖平流十分明显。700～850hPa,四川北部上空低涡闭合,河南处于低涡前方的偏南气流中,暖平流明显。海平面气压场,黄海海面为高压中心,四川—陕西有一倒槽,河南处于高压后侧、倒槽前方的偏南气流中。

21 日 00 时:500hPa 高空,北支槽东移至河套上空,并与移至重庆上空的南支槽连成一个大槽,河南继续处于槽前的西南暖湿气流中(见图 2)。700hPa,低涡减弱为低槽,并移至重庆;850hPa,低涡也移至重庆上空。海平面气压场,东海高压东移远离海岸,倒槽东移并沿顺时针有所旋转,移至贵州—安徽一线,河南处于倒槽北侧的东南气流中。

可以看到,高空西南配合低空东南暖湿气流源源不断的输入,为这次河南省春季层状云系降水的发生发展提供了必要的有利水汽条件。

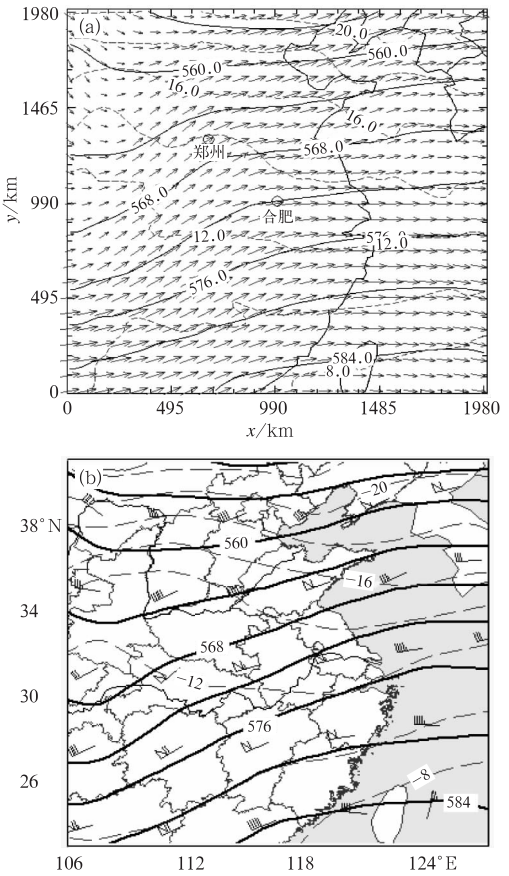

图 2　2005 年 3 月 21 日 00 时 500hPa 天气形势
a. 为模拟,b. 为实况,实线表示位势高度,
单位:10m,虚线表示温度,单位:℃

3　地面降水

20 日 12 时至 21 日 12 时河南省域的 24 小时累计地面降水主要分布呈东南多西北少的形势,南部边缘地区降水最多,在 30mm 以上,中南部地区在 15～30mm,北部地区降水在 15mm 以下(图 3)。与外场试验观测的实况降水相比,模拟的降水分布形势吻合的较好,降水量略有偏大,出现在河南南部边缘的累计雨量中心偏大的较多。

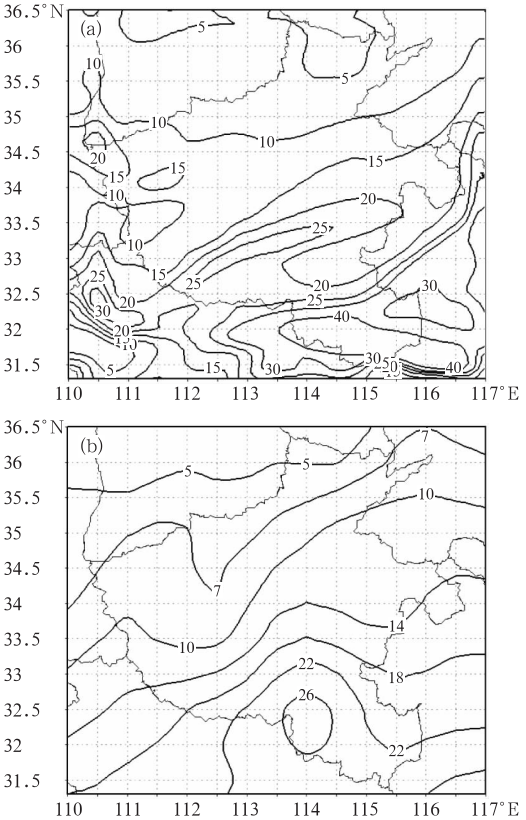

图3 河南省域24小时累计地面降水
(a为模拟,b为实况,单位:mm)

4 云系水资源的总体特征

4.1 水汽收支

水汽输送条件对云系的发生发展和降水的产生非常重要,对层状云系来说,尤其需要大尺度的水汽持续的辐合输送,才能发生、发展和维持,并最终形成地面降水。

河南省域的水汽收入主要是水平流入,地表蒸发的贡献相对较小,如图4所示。在降水过程前期,水汽水平流入强劲,每小时流入量从20日13时的8.0×10^{11} kg·h^{-1}增加到20日21时的1.2×10^{12} kg·h^{-1},随后开始减少。水汽流出量与流入量同步增加,从20日13时的4.0×10^{11} kg·h^{-1}增加到20日21时的8.0×10^{11} kg·h^{-1},随后也开始减少。降水过程后期,水汽水平流入量的减少快于流出量的减少,并且水汽流出量在21日06时以后呈现一定的增加,并在21日09时超过了水汽的流入量,区域水汽为净流出。地表蒸发产生量相对较小,在21日00时以前为0.5×10^{11} kg·h^{-1}左右,之后随着地面降水增加而增加到1.0×10^{11} kg·h^{-1}。计算域24小时的水汽流水平流入量为2.36×10^{13} kg,流出量为1.80×10^{13} kg,地表蒸发量为1.49×10^{12} kg,水汽净收入为7.09×10^{12} kg。

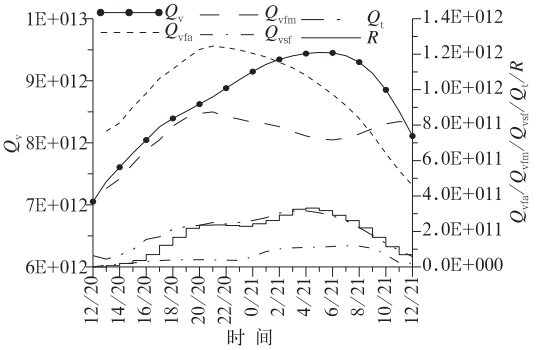

图4 计算域水汽总含量(Q_v)、小时水汽流入量(Q_{vfa})、小时水汽流出量(Q_{vfm})、小时地表蒸发量(Q_{vsf})、水凝物总含量(Q_t)和小时地面降水(R)的时间变化
水汽和水凝物总含量单位:kg,其余量单位:kg·h^{-1})

水汽总含量的时间变化与水平流入量的变化趋势一致,时间上大约存在6个小时的滞后。水凝物总含量与小时地面降水量一直非常接近,它们与水汽总含量的时间变化呈现了很好的对应关系。从20日13时至20日19时增长较快,随后增长较缓,并在21日05时左右都达到最大,之后开始减少。

24小时计算域累计降水4.50×10^{12} kg,其中格点总降水为4.43×10^{12} kg,积云参数化降水对总降水的贡献率只有1.6%,格点降水的代表性较为充分。

4.2　云系结构演变

从液态水和固态水不同高度上平均的时间分布(图 5)上可以看到,此次层状云系降水过程的云系呈明显的垂直分层结构,平均 0℃层在 2.5km 高度附近。6km 高度以上的高云为冰云,2.5～6km 高度之间的中云为冰水混合云,冰相粒子含量大值区出现在 20 日 00—08 时的 4～6km 高度之间,极大比含水量达到 0.13g・kg^{-1} 以上。2.5km 以下的低云为水云,液态水含量大值区出现在 2.5～3km 高度之间,20 日 22 时附近的极大比含水量达到 0.15g・kg^{-1} 以上。0℃层以上还有相当含量的过冷水,一直存在高达 7km 高度。

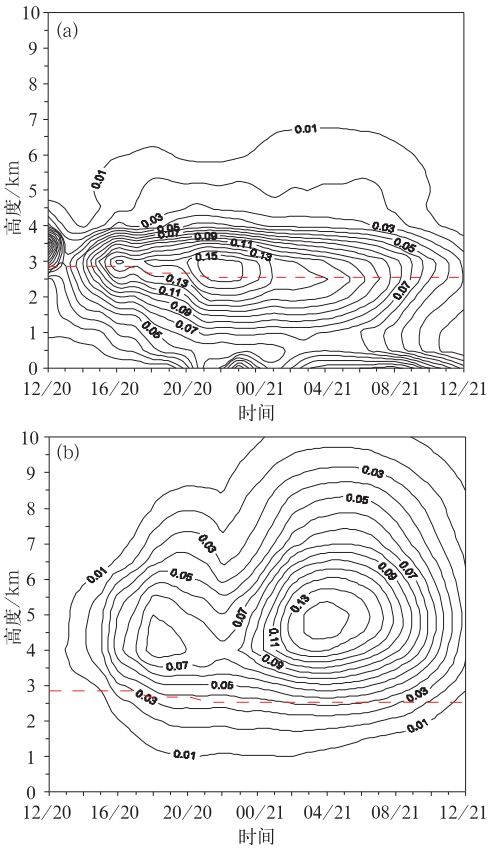

图 5　液相水(a)和冰相水(b)平均的高度时间分布

单位:g・kg^{-1},虚线为平均 0℃层高度

高层冰云、中层冰水混合云和低层水云的这样高低配置,符合经典层状云降水的有利发展结构,即“播撒—供给”云结构。当高层冰云中丰富的冰相粒子落在低层富含液态水的水云时,混合云将提供冰相粒子撞冻生长需要的充足过冷水,从而形成和增加地面降水。另一方面,富含液态水的混合云中,比湿往往较高,接近水面饱和,在这样的情况下,冰相粒子一旦落入,将会部分通过 Bergeron 过程的方式生长。

5　代表时刻的空中水资源分析

在对云系水资源总体特征分析的基础上,进一步讨论 20 日 20 时的水汽最强流入特征和 21 日 04 时降水最强的云系微物理转化特征。

5.1　水汽输送

此次河南省域降水过程前期,河南受低槽前方的西南气流主导,水汽由南往北的经向输送强烈,由下往上的垂直输送也较为明显。水汽主要由南部边界输入,其次是东部边界,西部边界和北部边界为水汽流出边界。20 日 20 时 2km 高度水汽场显示(图 6a),水汽的南北经向输送明显,南部边界水汽含量在 7.5g・kg^{-1} 以上,南风分量最大达到 16m・s^{-1} 以上;经河南省域中心许昌的水汽场经向垂直剖面图上(图 6b),水汽的南北经向输送和垂直输送明显,5km 高度以下的低层水汽含量较为丰富,在 4.0g・kg^{-1} 以上,最大含量出现在 1.5～4km 高度之间,最大达到 7.0 g・kg^{-1} 以上,主上升气流区主要在 3～8km 高度之间,上升气流区较为深厚,最大升速超过 0.7m・s^{-1}。

图 7 为 20 日 20 时计算域各边界和总体平均的小时水汽净收支的高度分布情况。西边界和东边界的水汽收支呈反相关,南边界

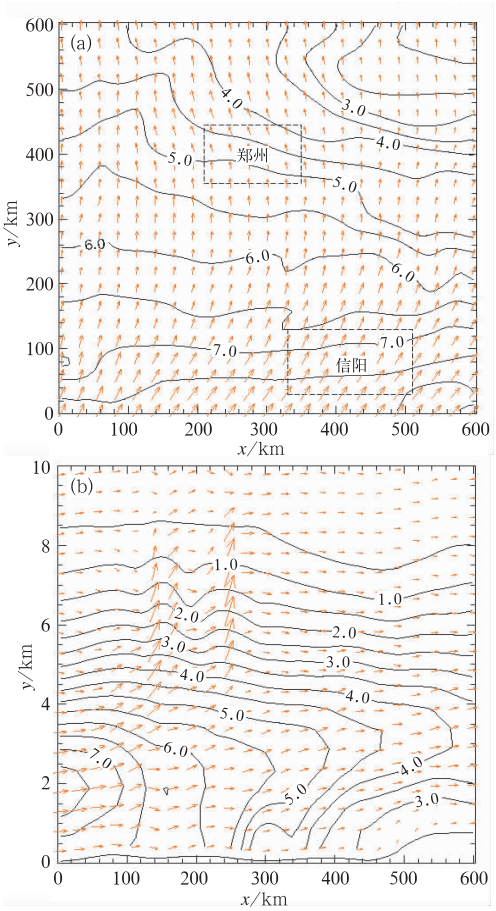

图 6 20 日 20 时水汽场的 2km 高度分布(a)和经许昌的经向垂直剖面(b)(单位:g/kg)

和北边界也呈反相关。低层 2km 以下西边界为水汽流出边界,并随高度减弱,东边界为水汽流入边界,并随高度减弱,二者在 2km 高度附近都减少为零;2km 高度以上西边界为水汽流入边界,并随高度增强,东边界为水汽流出边界,并随高度增强,二者在 4km 高度附近都达到最大,约 160kg·m^{-2}·h^{-1},之后随高度增加而减弱,在 10km 高度附近减弱为零。整个南边界为水汽流入边界,最大出现在 2km 高度上,达到 400kg·m^{-2}·h^{-1},整个北边界为水汽流出边界,最大也在 2km 高度附近,约 120kg·m^{-2}·h^{-1}。整个计算域的水汽收支在低层随高度增加而增强,在 2km 高度附近达到最强,约 280kg·m^{-2}·h^{-1},之后开始减弱,在 4km 高度左右减弱为零,其上为净流出,强度在 50kg·m^{-2}·h^{-1}以内。所有边界和总的水汽收支在 10km 以上都非常微弱。

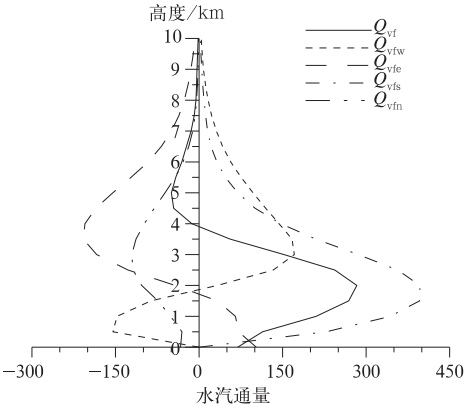

图 7 20 日 20 时计算域西边界(Q_{vfw})、南边界(Q_{vfs})、东边界(Q_{vfe})、北边界(Q_{vfn})和总体(Q_{vf})平均的水汽流入率的高度分布(单位:kg·m^{-2}·h^{-1})

5.2 云系水平分布

通过对水凝物的分析,来研究云系的分布状态和结构特征。水凝物的发生是水汽向降水转化的必经阶段。水汽含量达到饱和后将开始凝结成云水,温度低于 0℃时,过饱和水汽还将开始凝华成冰晶。云水和冰晶通过进一步的凝结、凝华和碰并长大成雨水、雪和霰,雨水、雪霰或融化成雨水降落至地面最终形成降水。

此次河南省层状云系降水过程中,液态水主要分布在郑州以南地区上空,而固态水布满了除西南部以外的河南省域上空(图 8)。21 日 04 时郑州以南的云系垂直积分液态水含量在 0.2kg·m^2 以上,信阳地区为 1.0kg·m^2以上,中心液态水含量超过 1.2kg·m^2。同时刻的云系垂直积分固态水含量基本在 0.2kg·m^2 以上,丰水区出现在信

阳地区,固态水含量超过 0.8kg·m^2。液态水和固态水重叠的区域,即东南部地区,是降水发生较大的地区。低层的供水云为高层落下的冰相粒子提供了极为有利的增长环境。

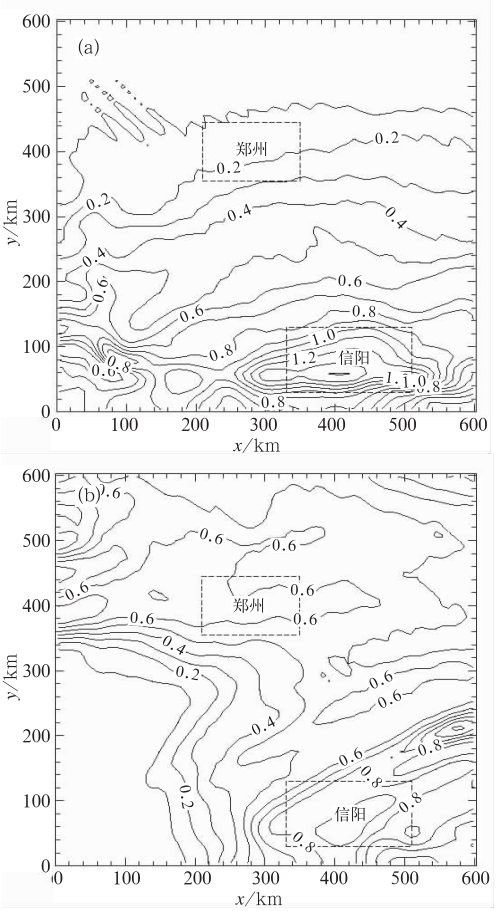

图 8　21 日 04 时垂直积分的液态水(a)和固态水(b)分布(单位:kg·m^2)

5.3　过冷水特征

过冷水是指低于 0℃环境下的液态水,具体指冷云中的云水和雨水,过冷水含量通常是云水资源评价的一个重要指标。

通过对 21 日 04 时的过冷水作垂直积分可以看到(图 9),河南省域上空分布着一定量的过冷水,郑州以北地区含量在 0.05mm 左右,郑州以南地区过冷水含量为 0.07mm 左右,南部的信阳地区过冷水含量超过了 0.1mm,最大含量达到 0.17mm 以上。较为丰富的过冷水为冰相粒子的撞冻生长和冰水共存时 Bergeron 机制的发生提供了液态水来源,同时冻结相变过程释放的潜热为云系发展和维持提供了必须的动力条件。另外过冷水含量作为人工增雨的参考指标,丰富的过冷水含量为人工增雨提供了作业潜力。

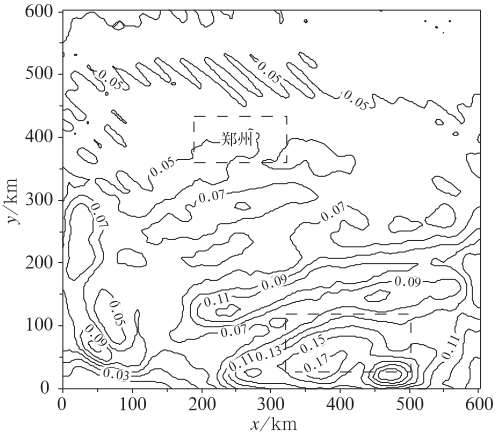

图 9　2005 年 3 月 21 日 04 时的垂直积分过冷水分布(单位:mm)

5.4　云微物理转化

模式采用的 Lin-Tao 微物理方案中水凝物包括 2 类液态水和 3 类冰相水,考虑了较为详细的微物理过程:雪收集云水和冰晶增长及凝华增长,霰收集云水、冰晶和雪增长,雨水通过碰并云水、雪和霰以及雪、霰的融化增长,冰晶的初始化,饱和度调整[14]使水汽向云水凝结(或蒸发)和向冰晶凝华(或升华),以及雪、霰的升华、雨水的蒸发过程。

细网格模拟仍然采用了 WRF Kain-Fritsch 积云参数化新方案。通过对河南省域 24 小时的积分计算,水汽在格点上的微物理消耗量为 3.57×10^{13} kg,积云参数化消耗量为1.09×10^{11} kg;云水的格点微物理生成量为 2.20×10^{13} kg,积云参数化生成量为 1.09×10^{10} kg;雨水的格点微物理生成量为

4.97×10^{12} kg，积云参数化生成量为 1.89×10^{10} kg；冰晶的格点微物理生成量为 1.25×10^{13} kg，积云参数化生成量为 2.71×10^{9} kg；雪的格点微物理生成量为 4.29×10^{12} kg，积云参数化生成量为 1.13×10^{9} kg。通过对比发现，细网格模拟计算中，积云参数化产生的云水资源转化作用微弱，都在1%以内。下面主要考虑云水资源的格点微物理转化过程。

从表1可以看到，21日04时，水汽的凝结凝华过程（P_{wcnd}，P_{depi}，P_{sdep}）转化率为 2.545×10^{12} kg·h^{-1}，云水的蒸发、碰并和凇附过程（P_{wevp}，P_{racw}，Q_{gacw}，P_{sacw}，P_{sfw}）转化率为 1.471×10^{12} kg·h^{-1}，雨水的蒸发和落出过程（P_{revp}，Q_{rfall}）转化率为 0.377×10^{12} kg·h^{-1}，冰晶的升华和丛集过程（P_{subi}，P_{saci}，P_{sfi}）发生率为 0.966×10^{12} kg·h^{-1}，雪的升华、碰并和融化过程（P_{ssub}，P_{gacs}，P_{racs}，P_{smlt}）的发生率为 0.281×10^{12} kg·h^{-1}，霰的融化过程（P_{gmlt}）发生率为 0.158×10^{12} kg·h^{-1}。

表1 2005年3月21日04时计算域各水物质的主要微物理过程和含量变化（10^{12} kg·h^{-1}）

水物质	主要微物理过程及发生率	变化率
q_v	P_{wcnd}1.515，P_{depi}0.950，P_{sdep}0.080	−0.269
q_c	P_{wevp}1.366，P_{racw}0.080，Q_{gacw}0.010，P_{sacw}0.082，P_{sfw}0.014	−0.038
q_r	P_{revp}0.045，Q_{rfall}0.332	−0.039
q_i	P_{subi}0.855，P_{saci}0.019，P_{sfi}0.092	−0.017
q_s	P_{ssub}0.010，P_{gacs}0.154，P_{racs}0.027，P_{smlt}0.090	0.006
q_g	P_{gmlt}0.158	0.024

经过这一小时的微物理转化，云系中水汽含量减少了 0.269×10^{12} kg，云水含量减少了 0.038×10^{12} kg，雨水含量减少了 0.039×10^{11} kg，冰晶含量减少了 0.017×10^{12} kg，雪含量增加了 0.006×10^{12} kg，霰含量增加了 0.024×10^{12} kg。

21日04时降水粒子生长的主要微物理过程发生率的高度与粒子相态的关系密切，此时的平均0℃高度为2.5km（见图5）。由图10可知，雪和霰的主要增长过程基本发生在2.5～10km高度之间，峰值过程发生在4km高度左右。雨水的生成高度相对较低，基本在4km高度以下，峰值过程发生在2.5km高度左右，恰好是0℃层高度，雪和霰在0℃层的融化作用强烈。

6 降水效率

通常的降水效率是地面降水占云系水汽流入量的比重作为降水效率，则此次河南省域24小时累计地面降水为 4.50×10^{12} kg，水汽流入量为 25.09×10^{12} kg，平均降水效率为18%。如以地面降水占水汽总量（初始水汽含量 7.05×10^{12} kg与水汽流入量之和）的比重作为降水效率，则域内平均降水效率约为14%。如以地面降水占水汽凝结凝华总量（35.66×10^{12} kg）的比重作为降水效率，则域内平均降水效率为12.6%，这种定义的降水效率最低，反映了水汽的凝结和凝华过程非常强烈，但云中水凝物有效地形成地面降水的效率较低。

通过对全省小时降水量与水汽流入率之比定义的小时降水效率计算，小时降水效率和地面小时降水量的时间变化趋势较为一致，但明显滞后于水汽流入率的时间变化（图11）。在降水较强的20日19时至21日10时段，河南省域的小时降水效率为20%以上。在降水最强的21日04时，全省的小时降水效率也达到最大，达到30%。

将格点24小时的总降水量与水汽凝结

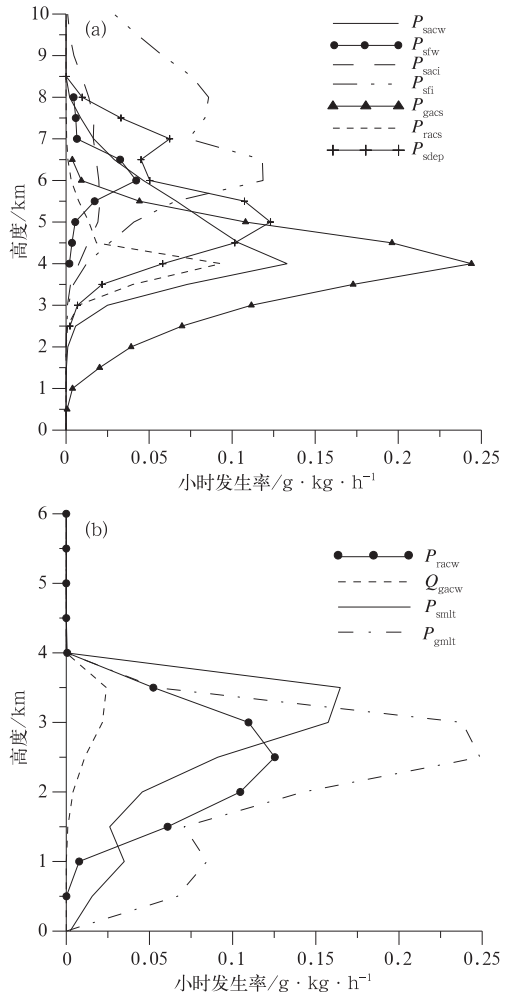

图 10　21 日 04 时降水粒子增长的主要微物理过程小时发生率的高度分布
(a 图为雪和霰主要增长过程,
b 图为雨水主要增长过程,单位:g · kg · h^{-1})

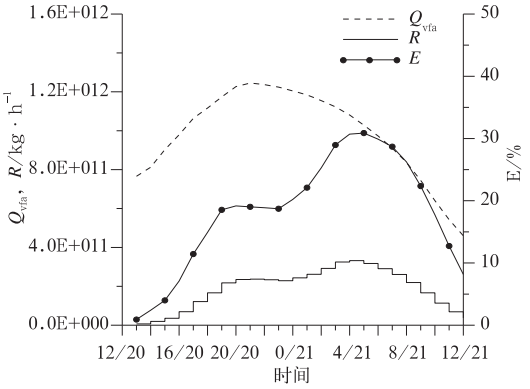

图 11　河南省域水汽流入率(Q_{vfa})、小时降水量(R)和小时降水效率(E)的时间变化

和凝华总量之比定义为降水效率,不考虑水分平流,计算了河南省域 24 小时累计的降水效率分布(图 12)。降水效率的分布形势与累计降水较为一致,河南南部较高、北部较低。郑州及其北方地区的降水效率低于 10%,中部地区在 20%～30%之间,信阳地区高于 50%。

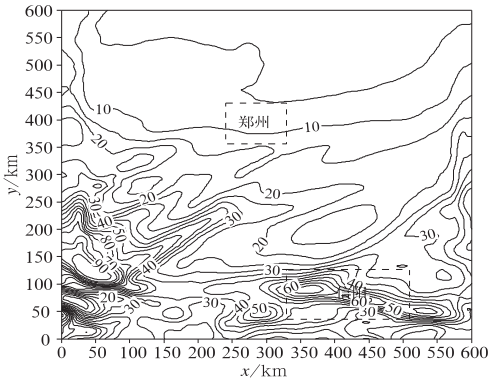

图 12　河南省域的 24 小时累计降水效率分布
单位:%

7　结　语

通过对河南省这次春季层状云系降水过程的中尺度天气背景和空中水资源转化的分析,可以看出以下几个特征:

(1) 高空槽前的西南暖湿气流为降水云系的形成和发展提供了充沛的水汽来源,河南省域的水汽收入主要是水平流入,地表蒸发的贡献相对较小。河南南边和西边是此次降水过程水汽的主要水平流入边界,东边和北边是水汽的主要水平流出边界,较强的流入高度在 2km 附近。

(2) 水汽总含量的时间变化与水平流入量的变化趋势一致,时间上大约存在 6 个小时的滞后。水凝物总含量与小时地面降水量一直非常接近,它们与水汽总含量的时间变化呈现了很好的对应关系。

(3) 此次层状云系降水过程的云系呈明显的垂直分层结构,平均 0℃层在 2.5km 高

度附近。6km 高度以上的高云为冰云，2.5～6km 高度之间的中云为冰水混合云，冰相粒子含量大值区出现在 4～6km 高度之间，2.5km 以下的低云为水云。0℃层以上还有相当含量的过冷水，一直存在高达 7km 高度。高层冰云、中层冰水混合云和低层水云的这样高低配置，符合经典层状云降水的有利发展结构，即“播撒－供给”云结构。

（4）云系云水凝结增长和冰晶凝华增长旺盛，雪主要是通过碰冻云水、碰并冰晶和凝华增长，霰主要是通过碰并雪和雨雪碰冻生长，雪和霰主要在 4km 高度左右生长，雨水主要有碰并云水以及雪和霰的融化，主要生长高度在 2.5km 高度左右的 0℃层附近。

（5）降水域小时降水效率和地面小时降水量的时间变化趋势较为一致，但明显滞后于水汽流入率的时间变化。在降水较强时段，河南省域的小时降水效率为 20％以上；在降水最强时刻，降水域的小时降水效率也达到最大，达到 30％。降水效率的分布形势与累计降水较为一致，河南南部较高、北部较低。郑州及其北方地区的降水效率低于 10％，中部地区在 20％～30％之间，信阳地区高于 50％。

参考文献

[1] Wegener, A., Thermodynamik der atmosphüre. 1911: 81,289, Barth, Leipzig.

[2] Bergeron T. On the physics of cloud and precipitation [C]. Proc. 5th Assembly U. G. G. I. Lisbon, 1935,2, 156.

[3] Findeisen, W., Zur frage der regentropfenbildung in reinen Wasserwolken (On the question of rain drop formation in pure water clouds)[J]. Met. Z. 1939,56:365.

[4] Hobbs, P. V., T. J. Matejka, and P. H. Herzegh, et al., The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. Ⅰ: A case study of a cold front[J]. J. Atmos. Sci., 1979, 37,568-596.

[5] Rutledge, S. A., and P. V. Hobbs, The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. Ⅷ: A model for the “Seeder-Feeder" process in warm frontal rainbands[J], J. Atmos. Sci., 1983, 40, 1185-1206.

[6] 胡志晋，严采蘩. 层状云微物理过程的数值模拟(一)－微物理模式[J]. 气象科学研究院院刊，1986，1(1)：37-52.

[7] 任国玉，高歌. 大气水资源与可持续发展[J]. 气象，2005，31(3)：3-6.

[8] 胡志晋. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨[J]. 应用气象学报，2001，12(增)：10-13.

[9] 李大山主编. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京：气象出版社，2002.

[10] 李宏宇，王华，洪延超. 锋面云系降水中的增雨潜力数值研究[J]. 大气科学，2006，30(2)：341-350.

[11] Xue, M., K. K. Droegemeier, and V. Wong, et al. ARPS Version 4.0 User's Guide[M]. Center for Analysis and Prediction of Storms, Univ. of Oklahoma, 1995: 380pp.

[12] Lin, Y. L., R. D. Farley, and H. D. Orville, Bulk parameterization of snow field in a cloud model[J]. J. Clim. Appl. Meteor., 1983,22:1065-1092.

[13] Tao, W. K., and J. Simpson, Goddard cumulus ensemble model. Part I: Model description[J]. Terr. Atmos. Oceanic Sci., 1993,4(1):35-72.

[14] Tao, W. K., J. Simpson, and M. McCumber, An ice-water saturation adjustment [J]. Mon. Wea. Rev., 1989,117:231-235.