

层状云系人工增雨潜力评估研究

洪延超¹ 周非非²

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

2 国家气象中心, 北京 100081

摘 要 层状云系是中国人工增雨催化作业的主要对象。云系人工增雨潜力的大小是判断是否作业的最为重要的科学依据。但是, 目前中国还没有一套比较完整的综合判断云系人工增雨潜力的评估方法。自然降水形成过程是个复杂的科学问题, 因此判断人工增雨潜力也是一个非常复杂的科学问题。作者利用中尺度 MM5 数值模式模拟的层状云系研究与人工增雨潜力有关的要素, 从理论上研究了不同要素与降水的关系。在分析云体的垂直结构、降水机制、水汽厚度、冰面过饱和水汽量、云水厚度、过冷水含量、冰晶浓度、降水效率(凝结水降水效率和凝华水降水效率)等潜力要素基础上, 获得了新的潜力要素, 例如“催化-供给”云结构、降水机制、冰面过饱和水汽量, 并提出了定性综合判断云系人工增雨潜力思路。

关键词 增雨潜力 增雨潜力要素 潜力要素评估

文章编号 1006-9895(2006)05-0913-14

中图分类号 P426.5

文献标识码 A

The Study of Evaluation of Potential of Artificial Precipitation Enhancement in Stratiform Cloud System

HONG Yan-Chao¹ and ZHOU Fei-Fei²

1 *Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *National Meteorological Center, Beijing 100081*

Abstract Stratiform cloud system is major object for artificial precipitation enhancement in China. The question whether cloud systems have seeding potential attracts much attention of the investigators. It is very necessary to explore seeding potential of stratiform cloud systems, in order to strengthen positive seeding effects for precipitation enhancement. At present, there is no the integrated technique to assess seeding potential in China. The formation processes of nature precipitation is a complicated science problem, so that the evaluation of the artificial precipitation enhancement is also a complicated science problem. In this paper, a stratiform cloud system, which affected Henan province on 18-20 October 2002, is simulated by MM5 numerical model to study the relationship of the potential factors affecting rainfall. On the basis of analysis of the cloud vertical structure, the precipitation mechanism, amount of super-saturated water vapor with respect to ice, thickness of cloud water, supercooling water content, ice concentration and precipitation efficiency (precipitation efficiency of condensation water and sublimation water), some new potential factors are obtained and the way of qualitative integrated assessment for seeding potential is suggested.

(1) The vertical structure of cloud. The conditions of conversion of cloud water have a relationship with the distribution of cloud water resources and cloud structures. It is very difficult to produce the availability precipitation

by auto-conversion of cloud water and collision between the particles in warm stratiform cloud. But if ice particles or raindrops descend from upper cloud into the cloud, the precipitation efficiency may be increased. Therefore, “seeding-feeder” cloud is beneficial to precipitation formation and also one of the artificial precipitation enhancement factors.

(2) The supercooled water content. In the “seeding-feeder” cloud, there is high rainfall intensity in the area where supercooled water content is larger. Considering the important role of ice phase particles in precipitation formation, the supercooled water content can be taken as the potential factor.

(3) The precipitation mechanism. In generally, the rainfall in stratiform cloud system is increased by releasing cool cloud seeding agent, such as silver iodide, to effect the microphysical processes of ice phase, and it is shown that the cool cloud processes have different contributions on precipitation in the different position and the different developing stage of the cloud system. Therefore, if only in the nature cloud, which in the cool cloud processes have a larger influence on precipitation, the artificial seeding plays an important role in precipitation enhancement.

(4) The cloud water content in the warm zone of the cloud. After the ice phase particles are grown by the sublimation and the accretion in the cool region of the cloud, they descent into the warm region and grow continually by collecting liquid water. If thickness of the feeder cloud is large and water content in it is also high, increment of ice particles to be melting is large, so that it is of great advantage for precipitation enhancement.

(5) Supersaturated water vapor amount with respect to ice. In stratiform cloud system, if the cold cloud processes or ice phase microphysical processes play an important role in precipitation formation, the change of direction of supersaturated water vapor amount with respect to ice accord with rainfall intensity, while supersaturated water vapor amount with respect to ice is large, the rainfall intensity is large, too. It is shown that there is a good relationship between them. Under the condition of the cold cloud processes having a larger contribution for precipitation, supersaturated water vapor amount with respect to ice is an important potential factor.

(6) Precipitation efficiency. Precipitation efficiency of condensation water and sublimation water shows the ability of condensation water and sublimation water to be converted into precipitation particles and surface rainfall. They are indispensability important factors in study of the potential of artificial precipitation enhancement. The analysis indicates that distribution of the precipitation efficiency is inhomogeneous in the stratiform cloud.

(7) On the basis of study of the potential factors for artificial precipitation enhancement, the method used to assess qualitatively the seeding potential is presented: (i) There is “seeding-feeder” cloud structure in the cloud system; (ii) for “seeder-feeder” cloud system, the contribution of cold cloud process to precipitation needs to be investigated. The more contribution the cold cloud process makes to rainfall, the higher seeding potential the cloud system has; (iii) supercooled water content is high, and ice concentration in supercooled area is low, and cloud water content in warm cloud sector is high and the thickness of warm cloud sector is big, and feeder cloud layer is thick, then seeding potential would be large; (iv) vapor conditions, including vapor flux and supersaturated vapor content over ice, etc., need to be analyzed. If there are strong updraft, strong horizontal convergence of vapor, large upward vapor vertical flux, and sufficient supersaturated vapor content over ice in thick cloud levels, then seeding potential should be remarkable.

It is not necessary that all of these factors of seeding potential need to be analyzed, however, several factors should be chosen and comprehensively studied, when selecting the opportunity and the location for one seeding operation.

Key words potential of artificial precipitation enhancement, the potential factors, evaluation of potential factors

1 引言

层状云系是我国北方地区春秋季节的主要降水云系,是飞机人工增雨催化作业的主要目标。人工增雨潜力是指云系通过人工影响增加地面降水的能

力。研究层状云系的人工增雨潜力有重要的现实意义,它是判断和指挥人工增雨作业不可缺少的一环。了解影响增雨潜力的各种要素,对于提高云水资源的开发、利用效率和增强人工增雨效果都很有意义。

目前,气象工作者已从多方面研究了云系的人工增雨潜力,有把云系降水效率作为重要指标,降水效率高的云系潜力小,反之大^[1];也有认为人工增雨潜力与大气中水汽可凝结率与实际降雨率之差成正比^[2];还有认为风切变是影响对流系统降水效率的主要因子^[3],由此推断风切变也是影响增雨潜力的因子。

水汽含量、过冷水及自然冰晶浓度是反映人工增雨潜力的另外一些因子。法国的云物理飞机在西班牙进行云探测时将过冷水含量大于 0.05 g/m^3 和冰晶浓度小于 0.1 个/L 的航线占总探测航线的百分比作为过冷指标 (SI)。SI 值越大,表明人工催化增雨潜力越大。胡志晋等^[4]认为云中的过冷水含量是人工催化的有利条件,而过冷水含量少的云也具有一定的潜力,人工增雨的水分来源不仅出自于水-冰的转化,还可来自于汽-冰转化。陈万奎等^[5]指出,固相雨胚的形成过程不仅转化过冷云水,还可转化冰水面饱和水汽密度差 ($\Delta\rho$),试验为在过冷云水含量低的云中实施人工增雨提供了重要的实验依据。胡志晋^[6]通过对假定区域内水汽通量、降雨总量的估算,即对气柱云水量、云系降水效率及降水云系的过程云水总量的估算,探讨了人工增雨率和可能增雨量等问题。

自然降水形成过程是个复杂的过程,它不但与云的结构有关,也与云中微物理过程有关。黄美元等^[7~9]的研究指出,层状云的结构不均匀,降水也不均匀,层状云对其内的积云的降水影响较大,大大提高了积云的降水效率,增大了降水量。因此人工增雨潜力也是非常复杂的,但有一点是肯定的,人工增雨潜力与云系的结构有关,也与降水形成的物理过程有关,用任何单一的物理参数研究潜力问题都带有一定的局限性。本文利用 MM5 模式模拟的 2002 年 10 月 19 日在河南省产生大范围降水的低槽冷锋云系 (简称 Henan 云系),试图从云物理角度分析人工增雨潜力要素,将过冷水含量、冰晶浓度、冰面过饱和水汽量、降水效率、降水机制,云暖区云水含量和厚度等作为增雨潜力要素,分析这些因子与地面雨强及增雨潜力的关系。在此基础上,提出综合定性判断增雨潜力的思路和方法。

2 Henan 云系数值模拟

2.1 模拟设置

使用 PSU/NCAR 研制的第五代中尺度数值模式 (MM5) 和 Reisner 霰方案做模拟。模拟时间是 2002 年 10 月 18 日 08 时到 20 日 02 时 (北京时,下同)。模拟使用两重嵌套,图 1 给出了第一层模拟域 (D1) 和第二层模拟域 (D2) 的分布范围,模拟域的中心为 (34.5°N , 109.5°E),水平格距分别为 30 km 和 10 km ,垂直方向为 23 层,时间步长分别为 90 s 和 30 s 。D1 和 D2 分别为单向和双向嵌套,并分别采用时间依赖/嵌套和松弛/流入-流出侧边界条件。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,为了改进模拟质量,还加入了我国常规地面和探空资料。

为了研究的方便,对 MM5 模式输出作了改进,修改了 Reisner 霰方案源代码及其他相关程序,使模式能够输出云中各种微物理过程的转化率 (量)、过冷液态水的比含水量和瞬时雨强等。

2.2 Henan 云系实况

Henan 云系降水受以下高低空天气系统搭配的共同影响: 500 hPa 低槽东移,西南风加大; 700 hPa 河南处在低涡东部偏南气流的饱和区中; 850 hPa 西南涡加强、范围扩大;地面冷锋南下、地面倒槽和冷高压底部的偏东风影响到河南 (图略)。

云系红外卫星云图色调较白亮、纹理较均匀 (图 2); 雷达回波呈现明显的亮带; 目测的云状多为 Fn-As op 分布,有时出现雨层云。综合卫星、雷

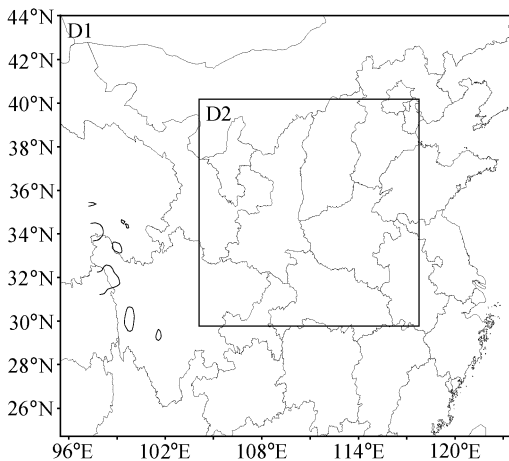


图 1 MM5 中尺度模式两层嵌套的模拟域区域

Fig. 1 Domain of simulation by MM5 mesoscale cloud numerical model

达和目测的宏观观测表明, Henan 降水云系结构相对均匀, 主要是蔽光高层云、雨层云产生的小~中雨, 云中有的部位存在“催化-供给”云结构。

2.3 模拟结果

2.3.1 天气形势

图 3 为模拟的 Henan 云系 700 hPa 等压面上位势高度场、温度场和风场分布图。模式较好地模拟出“北槽南涡”形势。同时模拟出河南大部受西

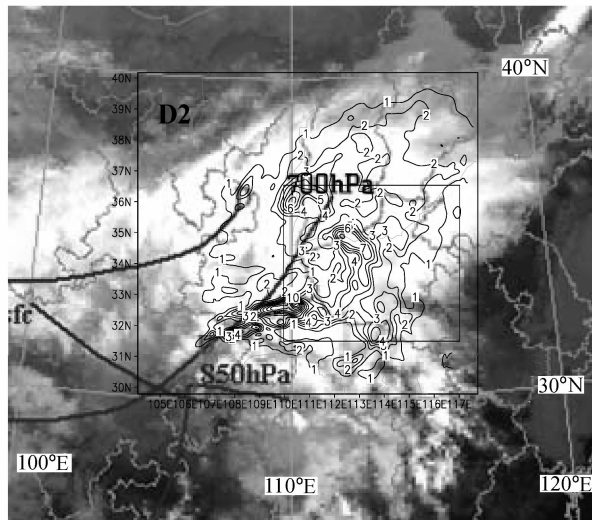


图 2 2002 年 10 月 19 日 08 时 GMS-5 红外卫星云图以及叠加在云图上的模拟云系的含水量厚度 (单位: mm)。大矩形区域是 D2 计算域, 小矩形区域代表河南省域

Fig. 2 GMS-5 infrared satellite cloud picture at 0800 LST 18-20 Oct 2002 and distribution of thickness (mm) of water content in the model cloud system superimposed the cloud picture. D2 domain is noted by the large rectangle and in which the small rectangle represents Henan Province area

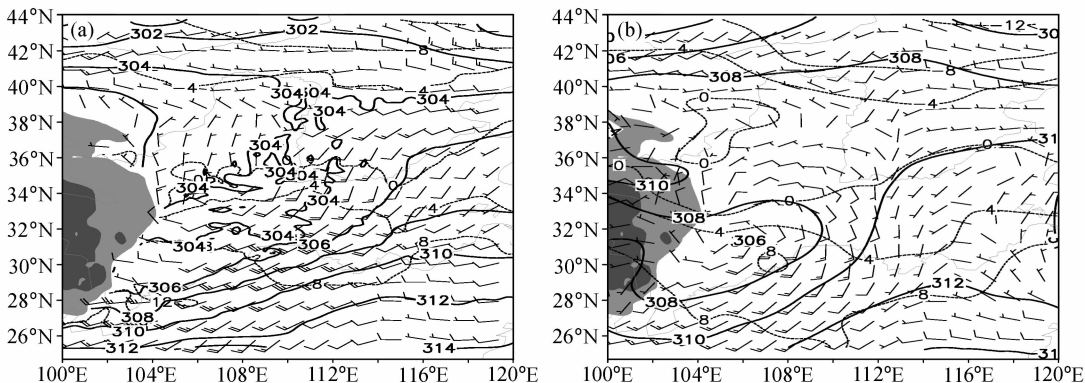


图 3 模拟 (a) 和客观分析 (b) 的 2002 年 10 月 19 日 08 时 700 hPa 等压面上位势高度场 (实线, 单位: dagpm)、温度场 (虚线, 单位: °C) 和风场

Fig. 3 Geopotential height field (solid line, dagpm), temperature field (dashed line, °C) and wind field at 700 hPa by simulation (a) and impersonality analysis (b) at 0800 LST 19 Oct 2002

南涡东部偏南风控制的形势。

2.3.2 累计降水量

图 4 给出模拟云系的两个时刻 6 小时累积降水量分布, 从中可见 18 日 14 时, 模拟的局部降水落区和大小与实际比较一致, 只是雨区范围偏小。19 日 02 时, 东北-西南向雨带在 102.0°E 以西依次出现三个降水量高值中心, 这一雨带的走向和三个强降水中心被成功地模拟, 特别是模拟出 (32.0°N, 106.5°E) 附近最强降水中心的落区。模拟的第二大强降水中心所处的纬度与实况基本一致。

2.3.3 云的范围和位置

将云中各种水成物含水量的垂直积分量之和定义为含水量厚度 (单位: mm)。模拟云的含水量厚度的水平分布可以显示云带的位置和范围, 从图 2 看, 19 日 08 时 D2 模拟域模拟云的含水量厚度水平范围和位置与卫星云图显示的范围和位置非常一致。

总的来说, 模式模拟出了天气系统和地面降水, 再现了中尺度客观分析场的结构和位置。模拟的云区、温度场、对流层中层槽区气旋性风场、低空切变线和低空急流与实况比较相似, 模拟的 6 小时累积降水量雨区的走向和落区与实际雨区基本一致。

3 人工增雨潜力要素的分析

3.1 云系结构与增雨潜力

云水转化的条件与云水资源的分布有关。纯冷云过程或纯暖云过程中, 云水很难充分转化成降水。暖性层状云很难通过云水的自动转化和随后的碰并过程形成有效降水, 但若有高层云带下降的冰粒子或雨滴进入云中, 云水转化成降水的效率会大

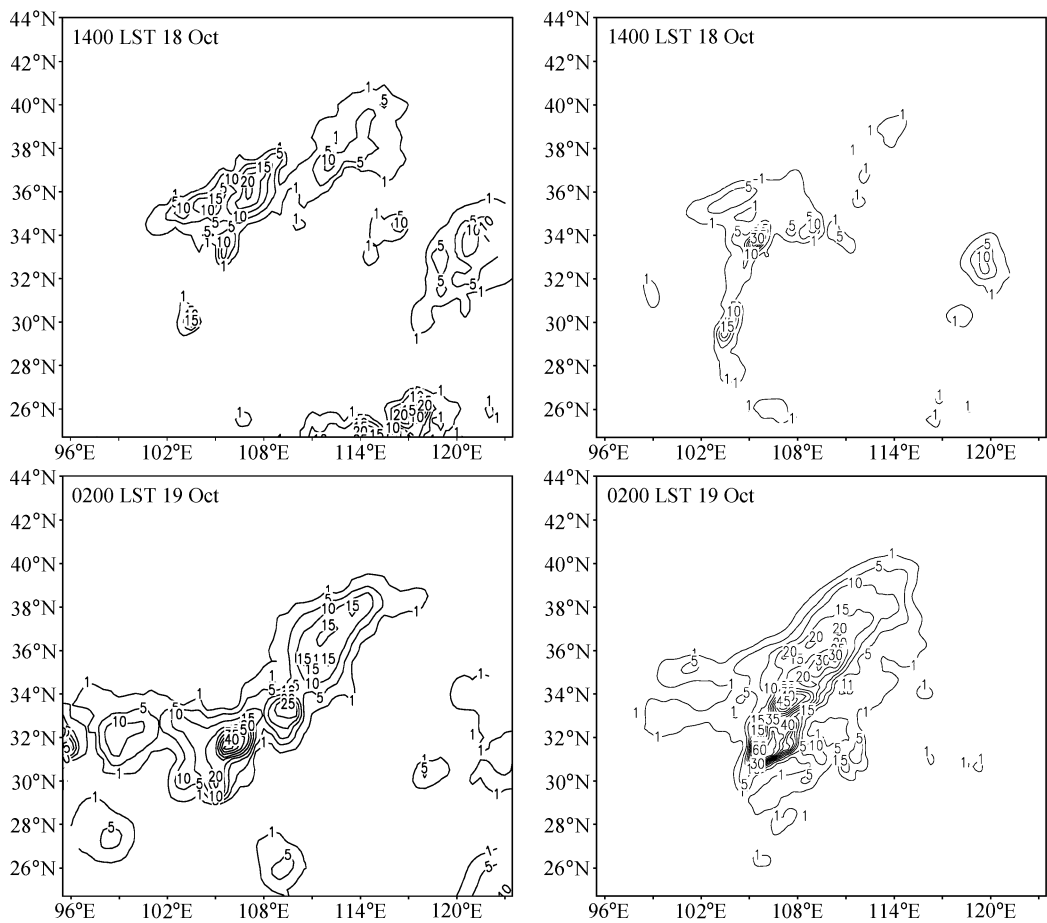


图 4 实测(左栏)的和模拟(右栏)的 6 小时累积降水量(单位: mm) 分布
Fig. 4 Distribution of 6-h cumulative rainfall (mm) from the model cloud (left) and observation (right)

为提高。云系云水资源的分布、云系结构与降水过程和降水形成的机制有密切关系,因而与云系的增雨潜力也有关系。对云系结构、尤其是垂直结构的研究对云系人工增雨潜力区的确定有重要意义。

自从 20 世纪 70 年代以来,国内外开展了一系列针对层状云系和锋面云系的结构探测研究。1976~1983 年, Matejka 等较系统地研究了中纬度气旋的中小尺度结构和降水物理过程,并结合动力学和云微物理学建立了雨带的垂直结构和降水机制概念模型^[10]。催化-供给云机制对降水的产生有重要作用。我国 20 世纪 80 年代开展的“我国北方层状云人工降水试验”,初步建立了几种主要降水系统的云物理概念模型,并提出了一些人工增加降水的催化条件、时机和方法^[11, 12]。概念模型中突出强调了“催化-供给”云结构及降水机制。乌鲁木齐冬季冷锋降水云系的结构分析表明,它具有“催化-供给”云结构^[13]。河南省冷锋降水云系有明显分层结构^[14],上层是分

布不均、处于不同发展阶段的锋上蔽光高层云云系,下层为较薄的锋下层积云云系,两层之间有干层,干层的存在导致云滴或雨滴蒸发。

我国北方降水性层状云系的降水微物理过程基本符合“催化-供给”云相互作用导致降水的总体概念,催化云与供水云在垂直方向上有时是分离的云体,中间夹着无云区(常与冷锋锋区对应)。在对流层的中、高层,与冷涌对应的位势不稳定区中的对流泡、对流云常为催化云,供水云多为锋下层积云或锋面上稳定抬升的高层云下部的云水区。同时还说明,云的结构与降水存在密切的关系。

3.2 云的结构与增雨潜力

以模拟的 Henan 云系中含水量和雨强的时间变化分析结构与降水的关系。我们可以看到,18 日 18 时到 19 日 02 时,南阳站(图 5)只有暖云,0.2 g/kg 的含水量中心对应的雨强很低;雨强的三个高峰值都对应含水量的三个极大值中心,都是连

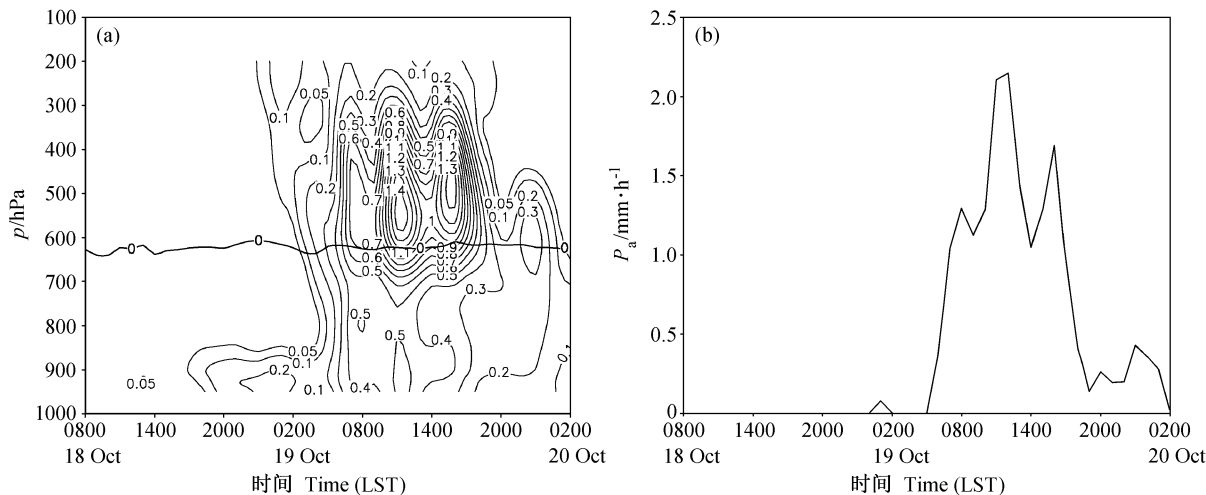


图 5 南阳站云中总含水量 q_t (单位: g/kg) 时间剖面 (a) 和降水强度 P_a 的时间变化 (b)

Fig. 5 Time cross-section of total water content q_t (g/kg) (a) and time variation of rainfall intensity P_a (b) in the cloud at Nanyang station

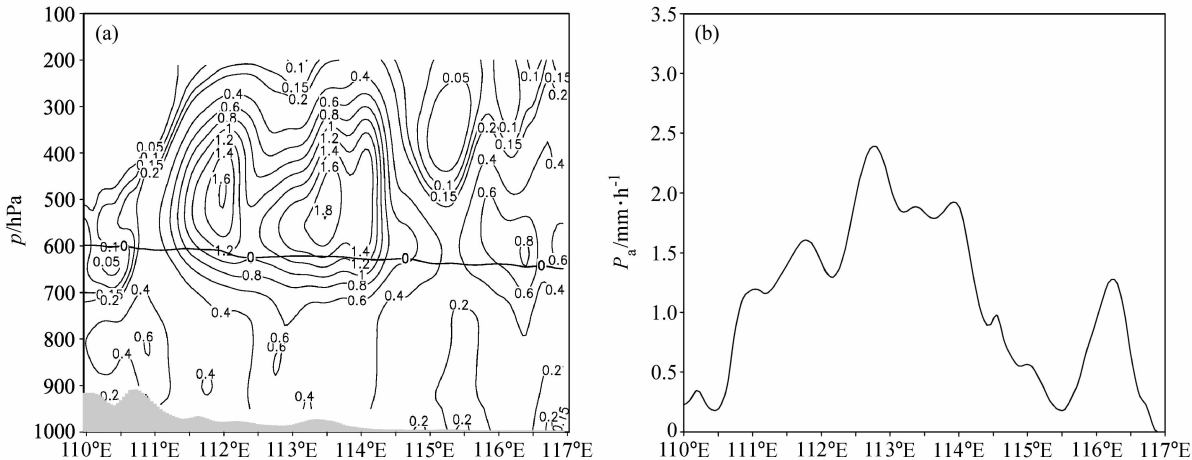


图 6 19 日 12 时通过南阳站的总含水量 q_t (单位: g/kg) 纬向剖面 (a) 和雨强 P_a 的纬向变化 (b)

Fig. 6 Longitudinal section of total water content q_t (g/kg) (a) and longitudinal variation of rainfall intensity P_a (b) passing Nanyang station at 1200 LST 19 Oct 2002

成一体的“催化-供给”云。图 6 给出云中含水量通过南阳站的经向剖面及其对应的降水强度。同样可以看出,图 6 最左侧云顶高度不超过 500 hPa,不符合“催化-供给”云条件,雨强较低;雨强最高之处对应的是含水量中心位于过冷区的“催化-供给”云。这表明,催化-供给云有利于降水的形成,当然也有利于人工增雨作业。

3.3 降水机制与增雨潜力

目前,普遍以碘化银作为催化剂对层状云系进行人工增雨作业,通过影响云的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过程中冷云过程起主要作用的云进行催化,

才有可能增加降水。为了研究人工增雨潜力,我们需要了解云系冷云过程对降水形成的贡献,冷云过程形成的降水粒子的增长是以消耗过冷水的撞冻过程为主还是以消耗水汽的凝华增长为主以及降水形成的环节等问题。

3.3.1 冷云过程对降水形成的贡献率

对于没有产生冰相降水的云而言,冷云物理过程产生的雨水量是指在云的暖区,雪和霰融化为雨水的量以及雪和霰碰并云水转为雨水的量之和。冷云过程和暖云过程产生的雨水量与云中总的雨水量的比值定义为冷云和暖云过程的贡献率。在云系发展的不同时期,冷云过程对降水的贡献率是不同的。

从图 7 看,冷云过程和暖云过程对雨水量的贡

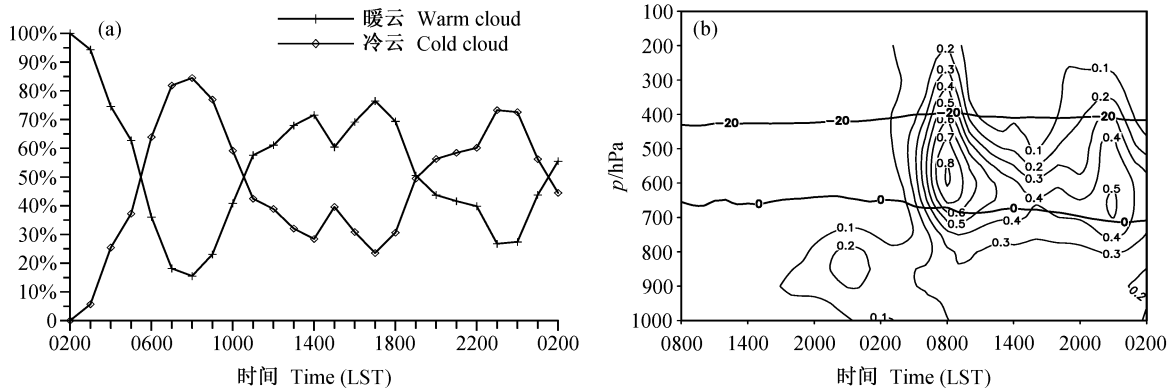


图 7 (a) 19 日 02 时~20 日 02 时郑州地区区域暖云过程和冷云过程产生的小时雨水量对雨水量的贡献率随时间的变化; (b) 18 日 08 时~20 日 02 时云中不同高度上区域平均含水量 q_1 (单位: g/kg) 的时间分布

Fig. 7 (a) Time variation of ratios of hourly rainfall produced by warm cloud processes and cold cloud processes to hourly total rainfall from 0200 LST 19 to 0200 LST 20 Oct in Zhengzhou area. (b) Distribution with time of area-mean water content q_1 (g/kg) at various heights in the cloud from 0800 LST 18 to 0200 LST 20 Oct

献率是变化的。有时降水完全由暖云过程形成,如郑州 19 日 02 时前后;有时又几乎完全由冷云过程形成,如 19 日 08 时前后;有时候以暖云为主,有时候又以冷云为主。平均而言,冷云过程的贡献率为 47%,暖云过程为 53%。冷云过程超过暖云过程的贡献率有两个时段,一个在 19 日 08 时前后;另一个在 20 日 00 时左右,也正是郑州地区云出现“催化-供给”云结构的时段。

3.3.2 冰相粒子增长

在融化成雨水的冰粒子中,到底是凝华增长(消耗水汽)还是撞冻增长(消耗过冷云水)对雨水形成所起的作用大?图 8 给出了 D2 计算域的结果,19 日 08 时后,冰粒子的凝华增长对降水的贡献明显大于撞冻增长,它们的大值维持在 35%和 10%以上。这说明,在融化的雨水量中,水汽凝华过程的贡献明显大于撞冻过程的贡献,显示出水汽对降水粒子增长的重要性。因此,对层状云进行引晶催化时,水汽也是一个重要的参数。

冰相粒子在过冷云区经过凝华和撞冻增长,降落到云暖区融化后还可以通过收集液态水而进一步增长。从图 8 看,在 D2 域融化雪和霰粒子收集云水对雨水量的贡献率为 5%~7%,贡献的大小取决于融化冰粒子谱分布和降水强度、供给云暖区云水含量和云厚度。虽然在这个云系中,融化冰粒子收集云水的贡献率不高,但考虑到如果暖云含水量较高时,贡献率还会提高,例如,对河南 2002 年 4 月 5 日降水云系的降水机制研究表明,融化冰粒子在供给云

暖区收集云水增长量有 10%的贡献,因此供给云暖区云水含量、云的厚度也可以作为增雨条件来考虑^[15]。

3.4 云水资源与增雨潜力

这里将云水厚度(单位: mm)作为云水资源研究,它被定义为云中云水含水量垂直积分量,等于过冷水厚度和云暖区中云水厚度之和。在以冷云过程降水为主或起重要作用的云中,考虑到冰相粒子的撞冻增长对降水形成的作用,过冷水与地面降水有一定关系。过冷水与地面降水的关系可以从图 9 看出,南阳地区 18 日 08 时~19 日 01 时,不存在过冷云水,云水厚度即为暖区云水厚度,两者的曲线重合。这个时段完全是暖云过程降水,降水强度随着云水厚度增加而增加。对于地面雨强,在过冷云水没有出现前的时段,即在 19 日 01 时之前,雨强很低,雨强与云水厚度关系很好;云中出現过冷云水后一段时间,雨强增加很快,达到最大值后就不断减少,与过冷云水厚度、云水厚度和暖区云水厚度的变化趋势一致,都在 19 日 12 时前后达到极大值,在 22 时又出现第二极大值。从变化一致的趋势中显示了雨强与过冷水厚度、云水厚度有关系。这说明,包括云暖区和冷区,云中云水含水量和云厚度都较大时,有利于降水形成,也有利于催化增雨。因而,这些因子都是研究增雨潜力问题时需要考虑的要素。

3.5 冰面过饱和和水汽量与增雨潜力

所谓冰面过饱和和水汽量,就是指水汽量中大于冰面饱和的部分。冰粒子是在冰面饱和的环境中凝

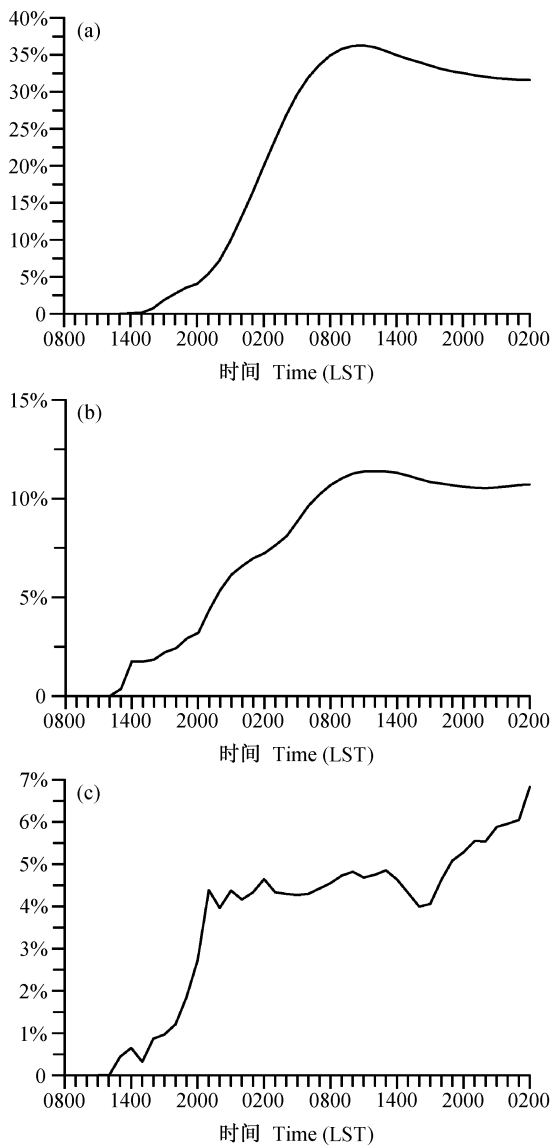


图 8 D2 域不同物理过程对降水贡献率的时间变化: (a) 冰相粒子凝华增长; (b) 冰相粒子撞冻云水增长; (c) 融化雪和霰粒子收集云水

Fig. 8 Time variation of contribution rate of different micro-physical processes to precipitation: (a) Sublimation growth of ice particles; (b) accretion growth of ice particles; (c) growth of melting snow and graupel by collecting cloud water

华增长的, 从前文分析知道, 在这个云系中有的部位, 冰粒子消耗水汽的凝华增长对冰粒子质量的贡献比消耗过冷水的撞冻增长贡献大得多。有些云系中, 两者的贡献差不多, 如 2002 年 4 月 5 日在河南省形成降水的层状云系^[15], 05 时云中凝华过程最终产生的雨水量对融化雨水的贡献率为 54%, 过冷云水贡献率为 39%; 08 时云中水汽转化贡献率为

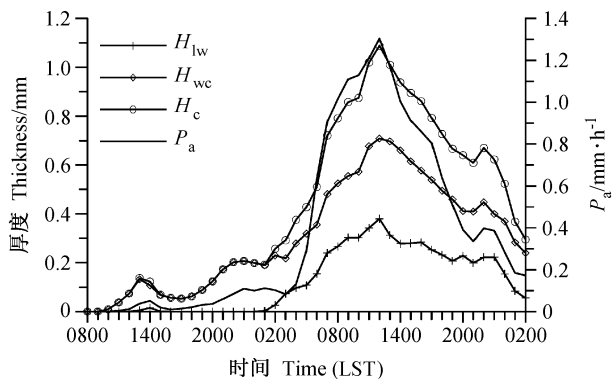


图 9 18 日 08 时~20 日 02 时南阳地区过冷云水厚度 (H_{lw})、暖区云水厚度 (H_{wc})、云水厚度 (H_c) 和地面瞬时雨强 (P_a) 区域平均值随时间的分布

Fig. 9 Time variation of area-mean values of super-cooling cloud water thickness (H_{lw}), cloud water thickness in the warm region (H_{wc}), cloud water thickness (H_c), and rainfall intensity (P_a) at surface from 0800 LST 18 to 0200 LST 20 Oct in Nanyang area

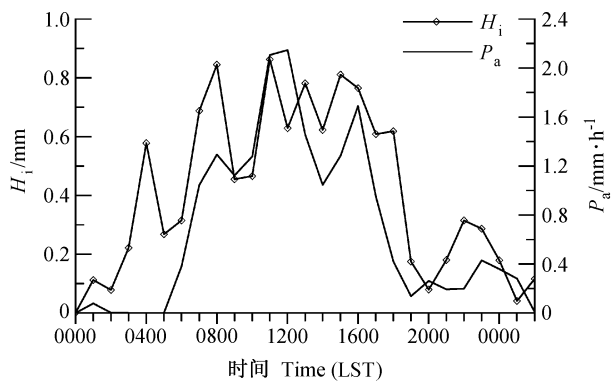


图 10 南阳站冰面过饱和水汽量 (H_i) 和地面瞬时雨强 (P_a) 随时间的变化

Fig. 10 Time variation of super-saturation water vapor amount with respect to ice (H_i) and rainfall intensity (P_a) at surface at Nanyang station

46%, 过冷云水转化贡献率为 49%。不管水汽转化对降水的贡献有多大, 有一点是肯定的, 只要冷云过程在降水过程中起重要作用, 冰粒子的凝华增长就不能不考虑, 因此冰面过饱和水汽量的大小对降水的形成有直接关系, 当然也与增雨潜力有关。

下面将从单站、小区域和大区域 (D2) 这三方面, 研究冰面过饱和水汽量与地面雨强, 进而与增雨潜力之间的关系。

(1) 单站 图 10 给出了 19 日 00 时~20 日 02 时南阳单站大气中冰面过饱和水汽量厚度 H_i 和雨强 P_a 随时间的变化。19 日 06~17 时, H_i 先后

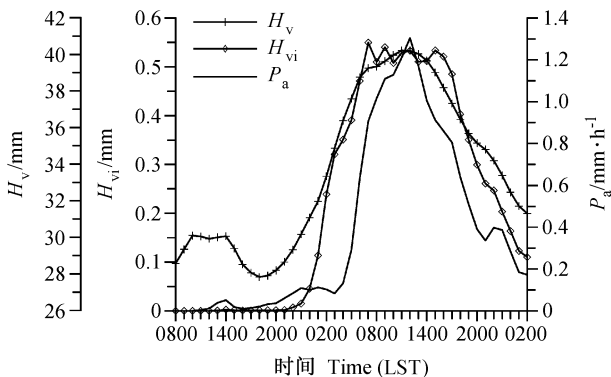


图 11 南阳地区区域平均水汽厚度 (H_v)、冰面过饱和水汽量厚度 (H_{vi}) 和地面雨强 (P_a) 随时间的分布

Fig. 11 Distribution with time of area-mean values of water vapor thickness (H_v), super-saturation water vapor thickness (H_{vi}) and rainfall intensity (P_a) in Nanyang area

出现三个大于 0.8 mm 的峰值，地面雨强也依次达到三个峰值。由于地面降水不完全由冷云过程形成，其中还有暖云过程起作用，即使是以冷云过程为主，还有冰粒子水汽凝华和撞冻增长贡献大小问题，这是其一。其二即使是大气中冰面过饱和水汽量很大，若没有云生成，也不可能产生地面降水。因此，冰面过饱和水汽量厚度与地面雨强的时间变化不可能完全一一对应，但在这冰相过程对降水形成起重要作用的云中，它们的变化趋势还是极为相似，说明两者有密切的关系。

(2) 小区域 区域平均冰面过饱和水汽量与地面雨强也有很好的关系。在南阳地区，冰面过饱和水汽量厚度、区域平均水汽量厚度以及地面雨强之间的对应关系非常好（图 11），极值时间相同，变化趋势也一致。但比较而言，冰面过饱和水汽量与雨强的关系更好些，不但变化趋势而且变化速率都与雨强一致。

(3) D2 域 由 D2 域冰面过饱和水汽量和地面雨强的变化（图 12）可以看出，两者分布趋势非常相似，又一次反映出两个量之间存在着较好的对应关系，即冰面过饱和水汽量越高，地面雨强越大。另外，我们还对比分析了冰面过饱和水汽量和地面雨强的水平分布图，结果表明，在冰面过饱和水汽量较高的地区，其地面雨强往往较大。

综上所述，不管是单站、区域或者 D2 域，冰面过饱和水汽量与地面雨强之间都有正相关的关系，即冰面过饱和水汽量越大，地面雨强也越大。分析

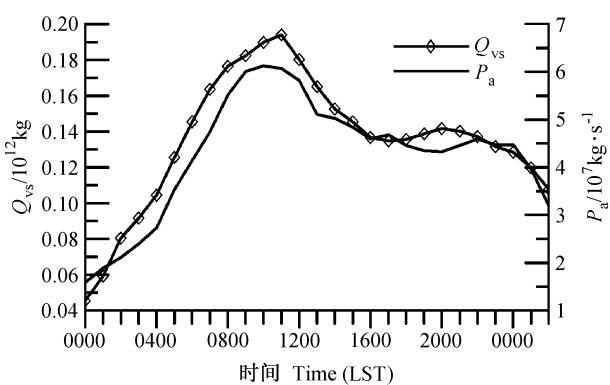


图 12 D2 域冰面过饱和水汽量 (Q_{vs}) 和地面雨强 (P_a) 随时间的分布

Fig. 12 Time variations of super-saturation water vapor amount with respect to ice (Q_{vs}) and rainfall intensity (P_a) in D2 region

可知，对于 Henan 云系，冷云过程在雨水形成过程中占优势，而凝华增长成为冰粒子最主要的增长方式（图 8a、b），反映了水汽在冷云降水机制中有重要作用。因而，冰面过饱和水汽量与降水的关系较好，是一个重要的增雨潜力要素。因此，在冷云过程对雨水贡献较大，且凝华增长是主要微物理过程的情况下，冰面过饱和水汽量（厚度）是重要的增雨潜力要素。

3.6 降水效率与增雨潜力

降水效率也是评估云系人工增雨潜力的重要要素。但是目前往往将凝结水量与地面降水量的比值作为降水效率，这不是真正意义上的降水效率。事实上，地面降水总量中还有凝华水的贡献。如果利用凝结和凝华水之和与地面降水量求降水效率，又不能区别它们各自对降水的贡献。人工增雨是将云中过冷水转化成地面降水，我们需要了解云中还有多少未转化成雨水的云水量。研究表明，在冷云降水为主的云中，冰粒子的凝华增长对降水的贡献与过冷水相当，甚至还要大，因此我们也应掌握云中还有多少凝华水未转化成降水。只有计算出云中凝结水的降水效率和凝华水的降水效率，对人工增雨潜力的研究才有意义。

要计算凝结水的降水效率和凝华水的降水效率，需要计算云中某一时段凝结水总量和凝华水总量，并将地面降水量分成凝结水和凝华水两个部分，这样就求出了凝结水和凝华水的降水效率（具体计算方法见附录）。

图 13 给出了 18 日 20 时~20 日 02 时郑州地

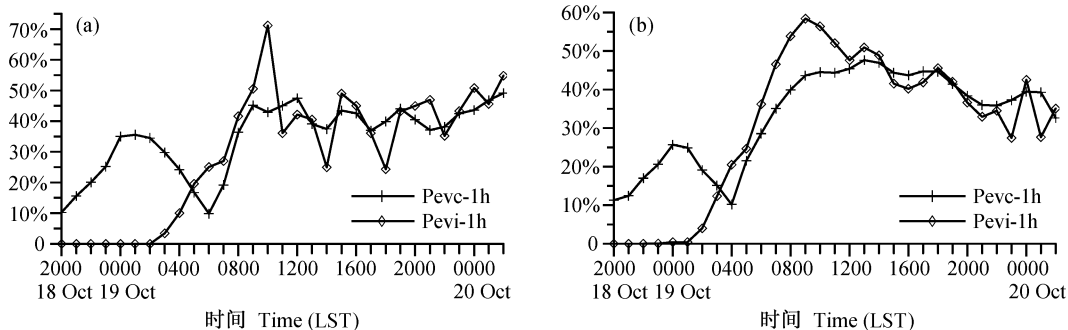


图 13 18~20 日郑州 (a) 和南阳 (b) 地区 1 小时凝结水降水效率 (pevc-1h) 和凝华水降水效率 (pevi-1h) 的时间分布

Fig. 13 Time variations of precipitation efficiency of hourly condensation water (pevc-1h) and hourly sublimation water (pevi-1h) in Zhengzhou area (a) and Nanyang area (b)

区和南阳地区 1 小时凝结水降水效率和凝华水降水效率随时间的分布。郑州地区, 19 日 05 时之前, 凝结水降水效率比凝华水大得多, 主要是暖云降水; 05~10 时, 凝华水降水效率增长很快, 超过了凝结水, 且在 10 时达到最大值 71.2%; 10 时以后, 凝华水降水效率开始明显地减小, 其变化幅度要比凝结水降水效率大, 这两个量的平均值很接近, 分别为 34.7% 和 29.4%。从累积降水效率看 (图略), 凝结水随着降水时间的延长, 其降水效率一直在增加, 但最终不到 40%; 凝华水降水效率在 08 时达到最大值后, 就一直稳定在最大值, 大于 35%。由此可见, 郑州地区, 云中也还有大量的凝结水和凝华水没有降落到地面, 因而具有较大的增雨潜力。

对于南阳地区, 19 日 03 时之前, 凝结水降水效率比凝华水大; 03~14 时, 凝华水降水效率比凝结水大, 且于 09 时达到最大值 58.4%; 14 时以后的大部分时间里凝结水降水效率高于凝华水降水效率; 18 日 20 时~20 日 02 时, 凝结水降水效率和凝华水降水效率的平均值分别为 33.3% 和 31.0%, 分别在 19 日 13 时和 06 时出现最大值, 其大小分别是 47.6% 和 58.4%。19 日 06~18 时是该地区降雨较大时段, 凝结水、凝华水降水效率平均值分别为 42.58% 和 47.69%。从累积降水效率看, 凝结水降水效率最终也达不到 40%; 凝华水降水效率达到 45%。显然还有一半以上的云中凝结水、凝华水尚未形成地面降水。

4 定性综合判断增雨潜力的思路

通过以上对云系各个增雨潜力要素的较详细分

析, 使我们认识到, 在对云系人工增雨潜力进行评估时需要综合考虑各个潜力要素。这里在云和降水处于发展或持续阶段基础上, 提出定性地综合判断增雨潜力的思路。

第一, 分析云系的宏观结构, 一般具有“催化-供给”结构的云系有增雨潜力, 催化层和供给层连成一体云系其增雨潜力较大。

第二, 对于“催化-供给”结构的云系, 需要分析冷云物理过程对降水的贡献, 冷云过程对降水贡献较大的云系其增雨潜力较大。

第三, 需要考虑凝结水降水效率、凝华水降水效率。一般地说, 水汽凝结 (华) 率较高、凝结 (华) 水降水效率低的云其增雨潜力较大。

第四, 分析过冷云水含量、过冷区冰晶浓度、云暖区云水含量、云暖区厚度和供给云厚度等因子。当过冷水含量较高、过冷区冰晶浓度较低、云暖区云水含量较高、云暖区和供给云的厚度较大时, 增雨潜力应较大。

第五, 需要分析水汽条件, 其中包括水汽垂直通量和冰面过饱和水汽量, 水汽垂直通量大、冰面过饱和水汽量大时增雨潜力大。当云中有比较深厚的上升气流, 水汽水平辐合较强, 垂直方向水汽通量较大, 且在较厚的层次里有较大的冰面过饱和水汽量时, 云系增雨潜力应较大。

上述这些增雨潜力要素并非一定要全部考虑, 但是在针对特定个例, 选择增雨作业的时机和部位时, 要选多个要素进行综合分析。

5 小结和讨论

自然降水形成过程是个复杂的科学问题, 因此

判断人工增雨潜力也是一个非常复杂的问题。本文利用模拟的河南云系研究了增雨潜力要素,从理论上研究了增雨潜力要素与降水的关系。分析表明,人工增雨潜力与云系的结构有关,也与降水形成的物理过程等要素有关,用任何单一的物理参数研究潜力问题都带有一定的局限性。本文在分析云体的垂直结构、降水机制、水汽厚度、冰面过饱和水汽量、云水厚度、过冷水含量、冰晶浓度、降水效率(凝结水降水效率和凝华水降水效率)等潜力要素基础上,提出了定性综合判断云系人工增雨潜力思路。

(1)“催化-供给”云的降水强度较高。云水转化的条件与云水资源的分布有关,与云的结构也有关系。暖性层状云很难通过云水的自动转化和随后的碰并过程形成有效降水,但若有从高层云带降落的冰粒子或雨滴进入云中,云水转化成降水的效率会大为提高。这充分说明,云水资源的分布特征和结构与降水形成机制有关,也与云水的转化效率有关,因此与云的人工增雨潜力也有关系。“催化-供给”云结构有利于降水的形成,是人工增雨潜力要素之一。

(2)在“催化-供给”云体系中,作为供给云一部分的冰水混合层对地面降水的贡献达到 40%~50%,这一云层对地面降水的贡献占到供给层的一半以上,因而是研究增雨潜力不能不考虑的重要云层。云系中过冷水含量大的区域降水强度也最大,考虑到冰相粒子的撞冻增长对降水形成有重要作用,过冷水含量可以作为增雨潜力要素。

(3)在对层状云人工增雨时,一般采用引晶催化,通过影响冷云物理过程达到增雨的目的,因而只有那些冷云过程对降水有较大贡献的自然云,催化才有效果。研究表明,冷云过程在云系发展的不同时期和云系不同部位对降水的贡献是不同的。在云体的主体部位,冷云降水机制对降水起到重要作用。其中冰相粒子的凝华增长量对融化雨水量明显高于撞冻增长量,显示出水汽对降水粒子增长的重要性;云系不同部位凝华增长量对融化雨水量贡献率不同,这是由于冰面过饱和水汽量分布不同所致,冰面过饱和水汽量高的部位凝华增长率较高。

在云系中,冰相物理过程和暖云过程对降水的贡献基本相当,且水汽的贡献比过冷云水的要大。因此,对层状云进行引晶催化时,除了过冷水水这

一增雨潜力要素以外,水汽也是一个重要的参数。

(4)冰相粒子在过冷云区经过凝华和撞冻增长,降落到云暖区还可以通过收集液态水而进一步增长。如果供给云暖区云水含量大、云的厚度大,融化粒子的增长量就大,有利于降水的增大。云暖区云水含量、云的厚度也可以作为增雨潜力要素。

(5)冰面过饱和水汽量是研究获得的新的增雨潜力要素。不管是单站,或是小区域,还是 D2 全域,在这冰相过程对降水形成起重要作用的云中,冰面过饱和水汽量厚度变化趋势与降水强度基本一致,冰面过饱和水汽量厚度较大,相应的地面雨强大,说明两者有密切的关系。与水汽相比,冰面过饱和水汽量不但量变化趋势而且量速率的变化都与雨强一致。河南省全域冰面过饱和水汽量和地面雨强水平分布说明,在冰面过饱和水汽量较高的地区,其地面雨强往往较大。这说明,冰面过饱和水汽量是一个重要的增雨潜力要素,尤其是在冷云过程对雨水贡献较大,且凝华增长是主要微物理过程的情况下。

(6)水汽是云的发展和降水的形成重要的条件,云水形成、冰粒子的增长都需要水汽。研究结果指出,水汽厚度较大时,地面雨强较高。水汽垂直通量大时地面雨强也高。

(7)水汽凝结(华)率代表输入到云系中水汽的凝结(华)能力,也反映暖云和冷云过程的强弱。降水效率则代表凝结、凝华的水转化成降水粒子形成地面降水的能力,它们都是研究云系人工增雨潜力不可缺少的主要要素。本文分别计算凝结水和凝华水的降水效率是对目前降水效率计算方法的重要改进。研究表明,云系中降水效率的分布是不均匀的,凝结水降水效率为 20%~80%,凝华水降水效率变化范围也较大,为 20%~90%。

(8)在人工增雨潜力要素研究的基础上,提出了定性综合判断云系人工增雨潜力的思路。

本文主要利用数值模拟的结果,研究人工增雨潜力要素,提出具有“催化-供给”云结构、冷云降水机制对降水贡献大、过冷水含量高、冰晶浓度低、水汽厚度和冰面过饱和水汽厚度大、降水效率低、水汽垂直通量为正的云体人工增雨的潜力大。此理论研究结果对层状云系的人工增雨作业前对云系的潜力评估具有重要意义。第一,采用多要素综合评估的方法,克服了一两个要素评估的局限性。

第二,研究提出了一些新的潜力要素,例如,云的结构,只有符合“催化-供给”结构的云才具有冷云催化潜力;降水机制为另一个潜力要素,因为目前是采用影响云中冷云微物理过程的方法达到增雨目的,显然,如果冷云过程在降水形成过程中不能发挥重要作用,催化的增雨效果不可能好的,这个潜力要素抓住了目前对层状云系实施增雨作业原理的本质,即只有冷云过程在降水形成中起重要作用的云系才有催化潜力;冰面过饱和水汽量也是新的潜力要素,这是在研究冷云过程对降水起重要作用的云中冰相粒子的增长过程后提出的。研究表明,有的云系中,冰相粒子消耗过冷水的碰并增长和消耗水汽的凝华增长过程对冰相粒子质量的贡献相差不大,水汽对冰相粒子的贡献是重要的,进而对降水形成也是重要的。在本文研究的云系中,冰晶和雪都主要通过凝华过程增长,而雪的融化对降水的贡献又大,因此,冰面过饱和水汽量是一重要的潜力要素。其实达到冰面饱和还不一定有潜力,还要看冰面过饱和部分的水汽量有多少。第三,将降水效率作为增雨潜力要素不是本文的创新,但是本文从人工增雨的原理出发,改进了降水效率的计算方法,使其更适合人工增雨潜力要素的评估,即分别计算了云系的凝结水降水效率和凝华水降水效率。从理论上,对凝结水降水效率低的云系,云水的过冷水就有充分的转化潜力;同样对凝华水降水效率低的云系,如果冰面过饱和水汽量大,冰相粒子也有转化成降水的潜力。过去,一般用降水量和凝结量或者用凝结凝华量之和计算降水效率,前者低估了降水效率,因为地面降水量中含有凝华水的贡献,后者则没有将凝结水和凝华水的贡献区别开来,评估的潜力没有针对性。

本文只是用数值模拟研究获得结果,而且只模拟了一个个例,这是其一;其二,这还是一个定性研究结果,提出的增雨潜力要素数值上达到多少时,才有增雨潜力,还没有一个定量的标准。事实上,这个定量的标准是很重要的。例如,云体符合“催化-供给”云的结构,在确定的过冷水、冰晶浓度、冰面过饱和水汽量条件下,增雨的潜力有多大?第三,获得的只是理论上的研究结果,要将这些结果和评估增雨潜力的思路应用于实际,还有不少研究工作要做。例如,如何确定云系是否符合“催化-供给”云的结构?目前常用的探测装备是雷

达,可以用雷达 RHI 回波结构判断“催化-供给”云;又如,用什么方法确定云系的降水机制,是暖云过程还是冷云过程对降水的形成起重要作用。在人工增雨现场,为了使用中尺度模式确定的降水机制,对降水机制的结果也要用实测的资料验证。总之,理论研究结果要应用到实际人工增雨的工作中,还有许多研究工作要做。

此外,用数值模拟的方法研究云的降水形成机制,结果的正确性依赖于模式微物理过程参数化的可靠性。本文对河南省的层状云系降水过程的降水机理研究表明,层状云中雨水除了由暖云过程产生外,冷云过程也起到重要的作用,而冷云过程是通过冰晶凝华增长转化成雪,雪以凝华增长为主,后融化形成雨水这样的环节产生作用的。由于没有云中探测资料,结果的正确与否还未进行验证。

综上所述,论文的研究结果还只是初步的,还需要进一步研究和观测验证。倘若应用到实际中去,还有不少工作要做。

附录 凝结水和凝华水降水效率的计算

(1) 物理量的计算公式

根据模式输出的各种微物理过程量计算云中雨水总量中的凝结水量和凝华水量。实际上,暖云过程产生的雨水量($\text{prc} + \text{pra}$)和冰相粒子的融化形成的雨水量($\text{psmlt} + \text{pgmlt}$)的总量即为雨水总量。其中暖雨过程产生的雨水量都是凝结水转化的,而融化形成的雨水量中一部分是凝结水,它被撞冻转化成冰: pssacw 、 pgacw ,另一部分是凝华水,水汽被凝华成冰: prd 、 prei 、 preg 。或略过冷云水蒸发的水汽向冰粒子的转移过程,有

(i) 雪:

融化水中的凝华水

$$\text{WSvr} = [\text{tprd} \times (\text{tpscni} + \text{tprai}) / \text{tqisc} + \text{tprei}] \times \text{tpsmlt} / \text{tqssc}$$

融化水中的凝结水

$$\text{WScr} = \text{tpssacw} \times \text{tpsmlt} / \text{tqssc}$$

(ii) 霰:

融化水中的凝华水

$$\text{WGvr} = [(\text{tprd} \times (\text{tpscni} + \text{tprai}) / \text{tqisc} + \text{tprei}) \times (\text{tpgemb} + \text{tpgsacw}) / \text{tqssc} + \text{tpreg}] \times \text{tpgmlt} / \text{tqgsc}$$

融化水中的凝结水

$$WGcr = [tpssacw \times (tpgemb + tpgsacw) / tqssc + tpgacw] \times tpgmlt / tqgsc.$$

因此, 雨水中的凝结水为

$$tprc + tpra + WScr + WGcr,$$

凝华水为

$$WSvr + WGvr.$$

假定地面降水中凝结水与凝华水的比例与云中雨水中的比例相同, 地面降水量 SP 中, 凝结水降水量

$$SPvc = SP \times (tprc + tpra + WScr + WGcr) / (tprc + tpra + WScr + WGcr + WSvr + WGvr);$$

凝华水降水量

$$SPvi = SP \times (WSvr + WGvr) / (tprc + tpra + WScr + WGcr + WSvr + WGvr).$$

凝结水降水效率

$$PEvc = SPvc / tpnd1;$$

凝华水降水效率

$$PEvi = SPvi / (tpnd + tpri + tpreg).$$

(2) 符号说明

符号代表微物理过程, 前加 t 代表云系中此微物理过程产生的时空积分总量, 如 tpnd1 为水汽凝结成云水的总量。符号中, pcnd1: 水汽凝结成云水; pgemb: 雪自动转化为霰; pgmlt: 霰融化为雨水; pgsacw: 雪撞冻云水转为霰; pra: 雨水碰并云水; prai: 雪收集冰晶增长; prc: 云雨自动转化; prd: 冰晶凝华增长; preg: 霰凝华增长; prei: 雪凝华增长; pscni: 冰晶自动转化为雪; psmlt: 雪融化为雨水; pssacw: 雪撞冻云水增长; qisc: 冰晶; qssc: 雪; qgsc: 霰。

参考文献 (References)

- [1] 冯杉, 郑世林, 赵培娟. 河南省春季冷锋云系的降水效率及增雨潜力. 人工影响天气优化技术研究. 北京: 气象出版社, 2000. 36~40
Feng Shan, Zheng Shilin, Zhao Peijuan. Precipitation efficiency and potential of artificial precipitation enhancement in cold frontal cloud system in spring in Henan Province. *Study on Optimal Technique for Artificial Weather Modification* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000. 36~40
- [2] 宫德吉. 内蒙古中西部自然降水效率及人工增雨潜力的研究. 内蒙古气象, 1996, **2**: 11~16
Gong Deji. Study of precipitation efficiency and potential of artificial precipitation in midwest part of Inner Mongolia. *Meteorology Journal of Inner Mongolia* (in Chinese), 1996, **2**:

- 11~16
- [3] Ferrier B S, Simpson J, Tao W K. Factors responsible for precipitation efficiencies in midlatitude and tropical squall simulations. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**: 2100~2125
- [4] 胡志晋, 秦瑜, 王玉彬. 层状冷云数值模式. 气象学报, 1983, **41** (2): 194~203
Hu Zhijin, Qinyu, Wang Yubin. An numerical model of the cold stratified clouds. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1983, **41** (2): 194~203
- [5] 陈万奎, 严采繁. 冰雨雨胚转化水汽密度差的实验研究. 应用气象学报, 2001, **12** (增刊): 23~29
Chen Wankui, Yan Caifan. The experimentatal study on the conversion of saturated vapor density deficit in forming icy-phase rain embryo. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2001, **12** (Suppl.): 23~29
- [6] 胡志晋. 关于空中水资源和人工增雨潜力的估算问题. 人工影响天气, 1999, **12**: 53~55
Hu Zhijin. Estimate about water resource and potential of artificial precipitation enhancement. *Weather Modification* (in Chinese), 1999, **12**: 53~55
- [7] 黄美元, 洪延超. 在梅雨锋云系内层状云回波结构及其降水的不均匀性. 气象学报, 1984, **42** (1): 80~87
Huang Meiyuan, Hong Yanchao. The inhomogeneous features of the precipitation and the echo structure of stratiform cloud in Mei-yu frontal cloud system. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1984, **42** (1): 80~87
- [8] 黄美元, 洪延超, 徐华英, 等. 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. 气象学报, 1987, **45** (1): 72~77
Huang Meiyuan, Hongyanchao, Xu Huaying, et al. The effects of the existence of stratiform cloud on the development of cumulus cloud and its precipitation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1987, **45** (1): 72~77
- [9] 黄美元, 洪延超, 吴玉霞, 等. 梅雨锋云系和降水的若干研究. 大气科学, 1987, **11** (1): 23~30
Huang Meiyuan, Hong yanchao, Wu Yuxia, et al.. Some studies on meiyu frontal cloud system and its precipitation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1987, **11** (1): 23~30
- [10] Matejka T J, Houze R A Jr, Hobbs P V. Microphysics and dynamics of the clouds associated with mesoscale rainbands in extratropical cyclones. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**: 29~56
- [11] 游来光, 马培民, 陈君寒, 等. 北方人工降水资源研究进展. 全国云物理和人工影响天气会议文集. 北京: 气象出版社, 1989. 1~17
You Laiguang, Ma Peimin, Chen Junhan, et al. Study on resource of artificial precipitation enhancement in North of China (in Chinese). *Proceedings for Conference on Cloud Physics and Weather Modification in China*. Beijing: China Me-

teorological Press, 1989. 1~17

- [12] 游来光, 马培民, 胡志晋. 北方层状云人工降水试验研究. 气象科技, 2002, **30** (增刊): 19~56

You Laiguang, Ma Peimin, Hu Zhijin. A study on experiment of artificial precipitation in north China. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2002, **30** (Suppl.): 19~56

- [13] 王广河, 游来光. 乌鲁木齐冬季冷锋云带和锋下层积云的微物理结构及其降雪特征. 气象, 1989, **15** (3): 15~19

Wang Guanghe, You Laiguang. The microphysical structures and precipitation characteristics of the cloud zone over a wintertime cold front and stratocumulus under it in Urumqi. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1989, **15** (3): 15~19

- [14] 李淑日, 王广河, 刘卫国. 降水性层状云微物理结构个例分析. 气象, 2001, **27** (11): 17~21

Li Shuri, Wang Guanghe, Liu Weiguo. A case study of micro-structure of precipitable stratiform clouds. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2001, **27** (11): 17~21

- [15] 洪延超, 周非非. “催化-供给”云降水形成机理的数值模拟研究. 大气科学, 2005, **29** (6): 885~896

Hong Yanchao, Zhou Feifei. A numerical simulation study of precipitation formation mechanism of “seeding – feeding” cloud system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (6): 885~896