

洪延超. 2012. 层状云结构和降水机制研究及人工增雨问题讨论 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 937–950, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.31. Hong Yanchao. 2012. Research progress of stratiform cloud structure and precipitation mechanism and discussion on artificial precipitation problems [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 937–950.

层状云结构和降水机制研究及人工增雨问题讨论

洪延超

中国科学院大气物理研究所云降水物理和强风暴实验室, 北京 100029

摘要 总结了层状云及其降水物理研究的部分成果。在此基础上, 讨论了层状云人工增雨的几个问题, 提出用常规观测资料判断人工增雨条件的方法。具体结果如下:

层状云结构是不均匀的。层状云系在垂直方向上具有分层结构。“催化—供给”云是降水性层状云的典型结构, “催化—供给”云相互作用是导致降水的主要过程。按微观结构可以将降水性层状云分成 3 层: 冰相层、冰水混合层和液水层。冰相层是催化云, 冰水混合层和液水层是供给云。

层状云降水过程研究表明, 对应于层状云或“催化—供给”云的 3 层宏观结构, 发生着不同的微物理过程, 粒子形成和增长过程也不同。冰相层的冰晶和雪, 凝华是其主要增长方式, 其次是雪与冰晶的聚合过程; 雪(或聚合物)落入冰水混合层后, 继续通过凝华增长或贝吉龙过程增长, 同时撞冻过冷水云水增长, 有部分冰雪晶通过撞冻增长而转化成霰。在液水层, 雪(或聚合物)霰开始融化, 同时收集云暖区云水增长。冰相粒子的撞冻增长过程和凝华增长过程相比同样重要。层状云各层对降水的贡献不同。一般而言, 对于“催化—供给”云, 催化云对降水的贡献低于 30%, 供给云在 70% 以上。

在以上研究的基础上, 讨论了层状云人工增雨的问题。(1) “催化—供给”云结构有利于云水转化成降水, 只有冰相层、冰水混合层和液水层相互“配合”, 才能形成有效降水。可以将“催化—供给”云作为层状云人工增雨催化的结构条件。(2) 要选择降水形成以冷云过程为主的层状云催化, 冰面饱和水汽量和过冷水含量要大些。

(3) 层状云人工增雨原理应该补充。降水形成不但经历贝吉龙—芬德森过程, 冰水混合层的聚合和撞冻增长也是十分重要的过程。过冷水对于降水的形成非常重要, 但冰面饱和水汽量对降水的形成也同样重要。

最后, 结合层状云的研究成果, 提出用常规探测资料判别层状云人工增雨催化条件的方法: 利用卫星云图和雷达回波判别“催化—供给”云的结构, 用雷达 RHI 回波(在距离高度显示器上的回波)判别降水机制和液水层。

关键词 分层结构 “催化—供给”云 降水机制 人工增雨 催化条件识别

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0937-14

中图分类号 P48

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.31

Research Progress of Stratiform Cloud Structure and Precipitation Mechanism and Discussion on Artificial Precipitation Problems

HONG Yanchao

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

Abstract Research achievements in cloud and precipitation physics of stratiform clouds are summarized in this paper. Several problems associated with artificial precipitation for stratiform clouds are discussed, and a method of evaluating artificial precipitation conditions by using conventional observation data is offered. Specific results are listed below:

The structure of a stratiform cloud is not uniform and includes layered structures in the vertical direction. The

收稿日期 2012-10-25 收到, 2012-11-05 收到修定稿

资助项目 中国科学院创新重要方向项目 KZCX2-YW-Q03-03, 知识创新工程领域前沿项目 ZAP08101, 国家自然科学基金项目 40875002

作者简介 洪延超, 1948 年出生, 研究员, 主要从事云降水学研究。E-mail: hyc@mail.iap.ac.cn

“seeding-feeding” cloud is typical structure of stratiform cloud precipitous, and interaction of the seeding cloud and feeding is the main process in precipitation. The stratiform cloud precipitous may be divided into the following three layers according to its microphysical structure: An ice phase layer, a mixed layer with ice and liquid water, and the liquid water layer. The ice phase layer is the seeding cloud, and the mixed and liquid water layers are feeding clouds.

A study of stratiform cloud precipitation processes corresponding to the three-layer structure of the cloud revealed differences in microphysical processes, particle formation, and growth processes. Sublimation is the main growth mode of ice and snow crystals in the ice phase layer, followed by the polymerization process of these crystals. Snow, or polymers, falling into the mixing layer continue to grow by sublimation or the Bergeron process, in addition to accretion, and some of the ice crystals and snow are converted into graupel. In liquid water, snow, or polymers, begins to melt and to collect cloud water. The accretion and sublimation growth processes are also important for ice particles. Each layer in the cloud provides a different contribution to precipitation. The contribution rate of the seeding cloud is generally less than 30%, and that of the feeding cloud is more than 70%.

On the basis of the above study results, the following conclusions are drawn: (1) The seeding-feeding cloud benefits from the transformation of cloud water to precipitation, and mutual cooperation among the ice phase, mixing, and liquid water layers results in the formation of effective precipitation. Therefore, the seeding-feeding cloud should act as a seeding condition for artificial precipitation. (2) For a stratiform cloud to be seeded, the cold cloud process is important. For effective precipitation, a super-saturated water vapor amount with respect to ice, in addition to the content of super-cooled water, should be high. (3) The artificial precipitation principle for stratiform clouds should be considered. Although the Bergeron-Findeisen process is critical to precipitation formation, aggregation and accretion in the mixing layer, super-cooled water and super-saturated water vapor are also important.

Finally, combined with achievements in stratiform cloud research, conventional detection data is used for the discriminant method on artificial precipitation conditions of stratiform clouds to determine that the seeding-feeding cloud structure is distinguished by satellite cloud pictures and radar and that the precipitation mechanism and the liquid water layer can be discriminated by using radar range height indicator (RHI) echo.

Keywords Layered structure, “Seeding-feeding” cloud, Precipitation mechanism, Artificial precipitation, Seeding condition identification

1 引言

由于水资源的短缺,我国大部分地区都实施人工增雨,大范围的层状云降水云系是主要作业目标。我国的西北、华北和东北在春秋季节都要对层状云开展人工增雨作业,冬季有时还要进行人工增雪。云降水物理学是人工影响天气的理论基础,人工影响天气是云降水物理学重要的应用领域。受需求推动,近几十年层状云成为我国大气科学领域的主要研究对象,对层状云进行大规模的综合探测,配合数值模拟,系统地研究了层状云的结构、降水形成过程。这些研究成果一方面促进了云降水物理学的发展深化,一方面提高了层状云人工增雨的技术水平和科学性。本文以层状云人工增雨的理论需求为主线,梳理我国近期层状云的云和降水物理方面的研究成果,讨论诸如层状云人工增雨潜力的预测和判别,催化条件和催化方法选择等人工增雨的核心技术问题。

2 层状云结构的不均匀性

对于层状云降水和结构有个认识过程。在早期,总认为层状云结构是均匀的。的确,和对流云相比,层状云在发展过程中,雷达回波强度、降水强度变化不大显著,说层状云结构是均匀的有一定道理。自20世纪70年代末、80年代初,雷达有了分层显示以后,大气科学工作者在对我国南方梅雨锋云系雷达观测时才首先发现层状云及其中亮带的不均匀性(黄美元和洪延超,1984),并建立了数学模式对不均匀性的成因做了深入研究(洪延超等,1984),结果修正了对层状云的传统认识。

层状云的不均匀性主要体现在雷达亮带上。在雷达的RHI回波上,亮带是一条基本水平伸展的强回波区,亮带内含有一个个回波核,强度可达到30~40 dBZ,有的回波核产生向下延伸的下挂回波,造成了层状云暖区的不均匀性(图1)。

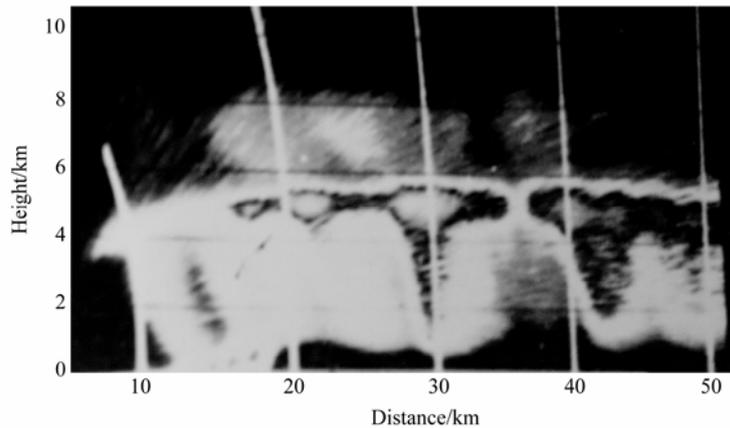


图1 1980年7月5日09:26(北京时间,下同)安徽屯溪711雷达观测的梅雨锋层状云系中的不均匀雷达亮带(RHI,方位角:340°)。回波分层显示的最外层为0 dB,层间5 dB

Fig. 1 Inhomogeneous radar bright band in stratiform cloud system for Meiyu front on 5 Jul 1980 observed by 711 radar at Tunxi. The most outer layer of echo stratified show stands for 0 dB, the interlayer 5 dB

不均匀亮带可以使层状云产生阵性降水,有时亮带中的强回波核降水强度可以达到 $5 \sim 10 \text{ mm h}^{-1}$ 。有人也观测到温带气旋云系的亮带下地面雨强达到 8 mm h^{-1} 的例子(Houze et al., 1981)。

亮带的不均匀性、亮带强核及其下挂回波形成的物理过程对层状云降水形成机制研究有重要价值。从质量守恒方程出发,导出了考虑融化粒子与云滴碰并增长量的亮带理论公式,建立了研究亮带不均匀性的理论模式,并研究提出了造成亮带不均匀的物理原因(洪延超等,1984)。初步理论计算表明,亮带上方回波的不均匀性可以直接导致亮带的不均匀性。如果亮带上方存在产生较大尺度和较高浓度冰相粒子的对流泡体(generating cell),下方与其相对应的亮带强度就高而形成亮带的回波核。除此而外,亮带的不均匀性还与融化粒子和云暖区云滴的碰并增长量、亮带上方冰相粒子的形状、质量、回波不均匀性、亮带中融化粒子的粘并数和含水量的不均匀分布的合理配置有关。其中粘并数和碰并增长量对很不均匀的亮带贡献较大。也就是说,是亮带上方云的微物理结构的不均匀性造成了亮带的不均匀性。根据雷达亮带形成的原理,在亮带上方存在回波的层状云中,如果亮带回波强度较高,冰相过程对云系的降水形成是有重要贡献的。这一研究结果可用于判断云系降水机制。

层状云系的不均匀性还体现在层状云降水云系中存在一个个降水云团,云团的尺度约为几十公里,云团中含水量比云团外越大一个数量级,云滴浓度则相差 $1 \sim 2$ 个数量级(牛生杰等,2003)还

有的降水性层状云中存在着许多尺度小于 10 km 的云团(樊曙先和安夏兰,2000)。

3 层状云的垂直结构

在目前的人工增雨的潜力区识别和催化条件选择上都没有考虑层状云的垂直结构。云的宏观垂直结构反映了云水资源的分布状况和云水资源向降水转化的条件,不但与流场结构有关,也和降水形成过程有关。了解层状云的宏观结构对云水资源分布和降水形成物理过程研究,进而研究人工增雨的原理和技术来说是十分必要的。随着探测云和降水技术水平的提高,通过多年来的探测分析和数值模拟研究,我们对层状云的垂直结构有了越来越清楚的了解。

3.1 层状云的宏观结构

总的来说,在垂直方向上,与低值天气系统相伴的大范围降水性层状云的宏观结构是分层的,有时分为两层,有时为3层。两层云之间是无云区。高层云产生冰晶等冰相粒子并向低层云降落,是催化云;进入低层云的冰相粒子继续增长,低层云提供增长所需的水分和环境,是供给云。

例如,河南省低槽冷锋降水云系就有明显分层结构(李淑日等,2001),上层是分布不均、处于不同发展阶段的锋上 As op(蔽光高层云)云系,下层为较薄的锋下 Sc(层积云)云系,两层之间有干层。有时存在高、中、低3层云。统计表明河南春季低槽冷锋云系中,两层以上的云同时存在占

77.1%。表 1 给出各层云平均高度和温度状况。

从表 1 可以看出, 平均而言河南低槽冷锋云系云分 3 层, 第一层完全在暖区, 云底高度在 600 m 附近, 云厚超过 1 km; 第二层一部分在暖区, 一部分在过冷区, 云厚超过 2 km; 第三层完全在过冷区, 云区较厚, 超过 3 km, 顶部高度超过 6 km, 温度较低, 达到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此判断, 第三层云的高层应为催化云, 第一、第二和第三层云的低层是供给云。

表 1 河南低槽冷锋云系各层云平均高度和温度状况
Table 1 Average height and temperature of different cloud levels in the cold frontal cloud system with low trough in Henna Province

分层	云底		云顶		云厚 (m)	云间夹层 厚 (m)
	高度 (m)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	高度 (m)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)		
第一层	653	8.2	929	2.7	1250	800~1000
第二层	2094	3.9	4095	-5.2	2065	
第三层	3480	-2.8	6796	-18.8	3111	

注: 表中数据引自“九五”国家攻关专题(2001BA610A-06-05)周毓荃结题报告所附论文: 河南省春秋季节天气、气候和微物理特征统计研究。

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场概念模型(游来光等, 2002), 概念模型也突出了层状云的分层形态, 强调了“催化—供给”云结构。新疆天山系统性层状云和地形云垂直方向存在“催化—供给”云结构, 播撒云常是冷锋上的中、高空冷云带, 供水云是地面冷锋锋后受地形抬升增强的锋下层积云。黑龙江大兴安岭东侧 5~6 月份的降水云系中, 催化云是锋上中、高层冷云带, 暖锋前地形增强的锋下层积云起供给云作用。吉林省多年的观测发现, 春、夏季降水性层状云主要为多层结构, 上层多为高层云, 下层为层积云, 中间常夹有干层; 吉林中部的春季降水, 常在气旋冷锋前的暖区形成, 催化云是与高空冷锋或冷涌对应的中、高空云带, 供水云为暖区中发展的积云性层积云。

从云粒子含水量的垂直分布也可以看出层状云系在垂直方向上的宏观结构一般是分层的。机载粒子探测系统对 2004 年 7 月 5 日吉林省层状云系的探测结果(胡朝霞等, 2007)表明, 3.5 km 高度以上是一层云; 3 km 高度附近云水含量极低, 这里存在稀薄的云层, 也可以说是无云区; 2 km 高度上下, 又是一层云。层间含水量很低。云的高层冰晶、

过冷水和降水粒子含水量较高、低层是暖层, 含水量较低。

以上探测分析表明, 层状云系统, 在垂直方向上具有分层结构, 其降水微物理过程基本符合“催化—供给”云相互作用产生降水的物理过程, 云的结构与降水存在密切的关系。“催化—供给”云结构是降水性层状云系的典型结构。当云层之间的无云区较薄, 被高层降水粒子充满, 宏观上分层的层状云在垂直方向上连成一体。

3.2 层状云的微观结构

3.2.1 粒子类型和相态

在宏观云场分析的基础上, 利用引进的机载粒子测量系统(PMS)对层状云系的微物理结构进行了大规模的观测, 结合观测还做了数值模拟研究。探测和数值模拟研究表明, 我国北方春秋季节系统降水性层状云在垂直方向上的微物理结构特征非常明显, 也是分层的。高层主要是冰相粒子, 以冰雪晶为主, 随高度降低冰雪晶的尺度增大; 在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度以上, 有过冷水存在, 同时存在从高层降落下来的冰相粒子; 而在云的暖区, 冰粒子要发生融化, 暖层主要是雨水和云水, 还有一些未融化完的冰粒子, 例如雪和霰。

对河南省 2007 年 3 月 3 日层状云系探测获得的云粒子的二维图像分析表明(李铁林等, 2010): $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度以上 1700 m 厚这一层(温度 $-7.5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), 过冷水与冰相粒子共存, 即既有过冷水, 也存在霰和冰雪晶聚合物。 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高度以下厚度 500 m 这一层(温度 $0\sim 2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$), 融化冰相子和液态水滴共存。在其以下的约 1900 m 厚的云层(温度 $0.4\sim 3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$), 完全是液态水, 有球形液态水滴。虽然探测没有达到云顶高度, 离云顶也只有 1000 多米距离, 云的顶层应该完全由冰粒子组成, 而且基本上是冰雪晶。探测资料说明, 按照云中不同相态和粒子的组成, 层状云垂直方向上的微物理结构也是分层的。探测分析获得的相态和粒子类型在层状云中垂直方向上的分布情况对降水形成机制和过程的研究具有重要的科学意义。

3.2.2 层状云 3 层垂直结构模型——“催化—供给”云

早期顾震潮(1980)将层状云的微物理结构大体上分为 3 个层次: 冰晶层、过冷水层和暖水层, 当层状云顶部较高、温度较低, 在层状云上部会生成冰晶, 如果云底温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 那么冰晶在下

降过程中要经过 3 个阶段。首先, 在冰晶层, 冰晶主要通过冰面饱和环境下凝华增长和在降落过程中相互聚并增长; 长大的冰晶落入过冷水滴层后, 凝华增长迅速, 并与过冷滴群碰冻增长。最后, 冰晶落入温度高于 0°C 暖水层, 很快融化成水滴, 融化的水滴主要靠与云滴碰并而增长。

随着对云探测技术和云降水的数值模拟技术的发展, 层状云“3 层模型”得到证实并进一步发展(洪延超和周非非, 2005; 周非非, 2005; 胡朝霞等, 2007; 赵震和雷恒池, 2008)。对层状云 3 层模型的发展主要体现在两个方面: 一是通过云中观测, 对 3 层中的粒子相态、类型和含水量、浓度等微观参数有了清楚的了解; 二是进一步研究了各层的粒子产生和增长过程以及降水形成的机制和具体环节。从含有详细微物理过程的数值模式模拟的 2002 年 4 月 5 日云层状云中微物理结构(图 2)看, 各种粒子含水量的极大值所在高度不同, 冰晶位于最高层, 其下面是雪, 云水、霰和雨水含水量的极大值高度更低。在 4.8 km 高度以上云层, 完全是冰晶和雪, 不存在过冷水; 在 0°C 层至 4.8 km 高度, 有过冷水和霰、雪共存; 在 0°C 层下面的暖区, 不存在冰晶和雪, 只有霰降落到 3.0 km 高度, 再往下, 完全由液态水组成。可见层状云中不同粒子存在区域的高度是不同的, 通过云中动力场的调整, 分层结构非常明显。高层完全由冰相粒子组成, 0°C 层附近区域是冰水混合层, 其下是液水层。这与前面介绍的观测所揭示的层状云的微物理结构一致, 是典型的“催化—供给”云结构。

结合机载 PMS 对层状云微物理结构的探测结构, 按图 2 中垂直方向上微物理结构特征的差异可以将“催化—供给”云分成 3 层(洪延超和周非非, 2005): 完全由冰相粒子组成的云层称作冰相层, 冰相层不含过冷水, 可以将云水含水量层的顶部作为冰相层的底部; 在冰相层之下是冰相粒子和过冷水组成的冰水混合层, 冰相粒子可以是冰晶、雪(聚合物)或霰。过冷水可以是云滴和雨滴。冰水混合层的顶部即冰相层的底部, 冰水混合层的下边界即在云中 0°C 层高度; 位于 0°C 层之下虽然存在没有完全融化的冰相粒子, 其作用与液态水滴相同, 因此将这一层称为的是液水层(也可称为暖层)。为了突出过冷水的作用, 虽然过冷水与冰相粒子共存, 有人也将冰水混合层称为过冷水层(胡朝霞等, 2007; 赵震和雷恒池, 2008)。

层状云的 3 层模型体现了“催化—供给”云的结构: 冰相层对冰水混合层起催化作用, 是催化云; 而冰水混合层和液水层为从高层落下的冰相粒子提供增长所需的水分和环境, 是供给云。

4 层状云降水机制

近 20 余年, 我国云物理研究人员利用 PMS 探测资料和数值模拟分析了“催化—供给”云的降水机制, 云中各种粒子的形成过程以及“催化—供给”云各层对降水的作用和贡献; 探讨了冰相粒子的凝华增长和撞冻增长对降水的贡献, 由此提出云中冰面过饱和和水汽量对降水形成的重要性。这些研究结果对深化层状云降水形成机制的认识起到重要的作用。

4.1 云中各种降水粒子的形成和增长过程

通过实测资料分析和数值模拟研究, 对云中各种降水粒子的产生和增长过程有了新的认识。从对 2002 年 4 月 5 日低槽冷锋云系数值模拟的结果(洪延超和周非非, 2005)看, 冰相层的冰晶几乎完全通过凝华增长。雪由冰晶转化过程产生, 通过粘并冰晶、撞冻云水和凝华 3 个过程增长。而且, 雪粘并冰晶增长主要发生在冰相层; 雪撞冻增长发生在冰水混合层, 在这一层撞冻云水增长率高于凝华增长率; 冰相层和冰水混合层都存在雪的凝华增长。

霰主要出现在冰水混合层, 是由雪撞冻过冷水增长后转化形成的。霰主要通过撞冻云水和收集雪过程增长, 凝华和收集冰晶的作用较小。

雨水存在于“催化—供给”云的液水层。形成雨水主要有 3 个物理过程: 碰并云水增长、降落到暖区冰粒子的融化和融化的冰相粒子收集暖区云水转化成雨水。在这一例中, 冰粒子的融化对雨水贡献较大, 占雨水产生总量的 57%; 融化的冰相粒子收集暖区云水继续增长对雨水的贡献也不可忽略, 达到 13.3%。融化和融化冰粒子在暖区收集云水对雨水的贡献率达 70.3%。

对延安地区降水性层状云系的 PMS 资料分析表明(王扬锋等, 2007), 贝吉龙过程是发生降水的关键, 供给云也起了重要的作用。云顶部主要为冰晶区域, 冰晶以凝华增长为主; 部分冰晶落入下面的过冷水层通过贝吉龙过程不断增大, 同时冰晶与冰晶的聚合形成聚合物, 雪晶收集冰晶进一步长

大，过冷云滴的淞附使部分雪又转化为霰粒；大的冰粒子落入 0 °C 层以下的暖区融化成为雨滴，碰并云滴较快增长；落入云的底层的大粒子继续碰并增大，并伴有小云滴的凝结增长。过冷水滴和冰晶共存使冰晶快速增长，可能是发生降水的关键。在 0 °C 层高度以下，存在比较深厚的云滴浓度小、含水量较小的小云滴层，是导致地面雨强较小的重要因素之一。

对河南降水性层状云的探测分结果指出（李铁林等，2010），在云的顶部，对应温度为 -17.4 °C，为云粒子凝华增长区；云的中上部（-7.5~0 °C），过冷水与冰相粒子共存，为云粒子的快速增长层，凝华增长和冰晶聚合增长是重要的物理过程；在 0 °C 层以下有一融化和碰并增长层；在云的下层（500~2375 m 高度层）又出现了碰并增长层并有弱的凝结增长。

对我国东北地区一次大范围的层状云降雨的观测和数值模拟研究表明（胡朝霞等，2007），在层状云的催化层（第一层）中，冰晶的凝华增长很重要，也存在冰晶的碰并过程。在过冷水层（第二层）中，冰晶和雪的增长主要是通过凝华过程，贝吉龙过程作用很大；暖水层（第三层）中主要有云滴、雨滴和从第二层降下来以后融化的雪和霰。雨滴的长大完全靠对云滴的重力碰并，所以暖层的厚度和含水量是决定因素。

上述研究结果表明，对应于层状云或“催化—供给”云的3层宏观结构，发生着不同的微物理过程，粒子形成和增长过程也不同。在冰相层，存在冰晶和雪，主要是冰晶。凝华是其主要增长方式，其次是雪与冰晶的聚合过程；冰晶和雪，主要是雪（或聚合体）落入冰水混合层后，继续通过凝华增长或贝吉龙过程增长，同时撞冻过冷云水增长，有部分冰雪晶通过撞冻增长而转化成霰。在下面的液水层，从冰水混合层落下的雪（或聚合体）霰开始融化，同时收集云暖区云水增长，在达到地面之前完全融化成雨滴。此外在这一层形成的雨滴碰并云水增长。

4.2 层状云各层对降水的贡献

层状云的宏观和微观结构在垂直方向上都是分层的，不同云层产生的粒子类型不同，粒子增长方式和发生的微物理过程也有显著差别，研究表明各层对降水的贡献也是不同的。对 2004 年 4 月 5 日的层状云系的数值模拟研究表明（洪延超和周非

非，2005），在云底以上高度累积降水量随着高度降低而增大（图 3），但增大速率不同，在冰水混合层和液水层增大较快；达到云底高度后降水量开始减小，这表明云体不同层次对降水量的贡献不同。据数值模式输出数据计算，作为催化云的冰相层对降水的贡献约 25.5%，冰水混合层为 31.3%、液水层为 43.1%，亦即供给云对降水的贡献约 74.4%。此外，降水的 70%是冰粒子的贡献，即冷云过程对降水起主要作用，冰粒子在冰水混合层的生长对降水

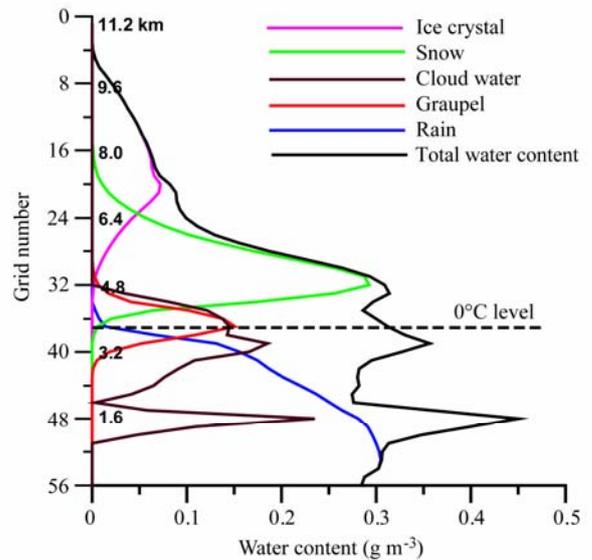


图2 模拟的2002年4月5日层状云中120 min时各种粒子含水量随高度分布

Fig. 2 Distribution with height of the water content of all kinds of particles in the simulation stratiform cloud after 120 min on 5 Apr 2002

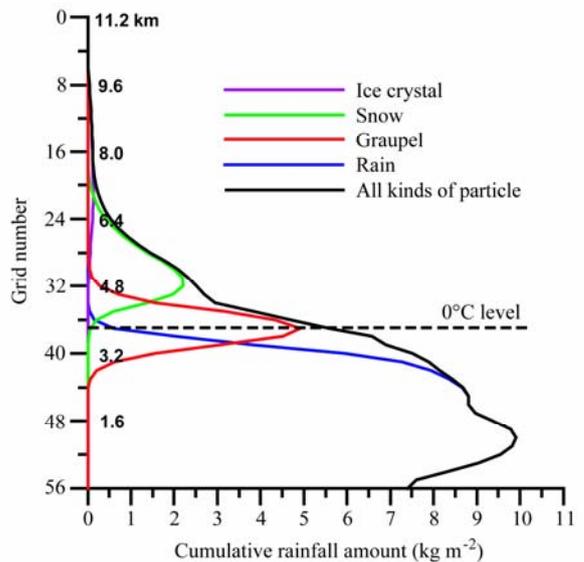


图3 2002年4月5日05:00郑州站模拟云300 min累积降水量的高度分布
Fig. 3 Distribution with height of cumulative rainfall amount in 300 min for simulation cloud on 5 Apr 2002

的形成是十分重要的。

在对东北地区一次降水性层状云系数值模拟研究结果指出(胡朝霞等, 2007), 冰相层对降水的贡献为7%, 冰水混合层对降水的贡献为54%, 液水层对降水的贡献为39%。可见不同层状云系中各层对降水的贡献不同。但有一点是共同的, 供给云和冰水混合层对降水的贡献很大。事实上, 不同云系中各层对降水的贡献不同, 就是同一云系各层对降水的贡献在云系的不同部位、不同的发展阶段或随云系的演变对降水的贡献也是有差异的。例如用MM5中尺度模式对产生大范围降水的低槽冷锋云系模拟研究(周非非, 2005)表明: 由云系覆盖的郑州和南阳云中不同云层对地面降水的贡献率是随时间的变化的。在郑州, 云中冰相层对地面降水的贡献的变化范围为2.4%~45.3%, 平均值为15.6%; 冰水混合层为32.9%~65.7%, 平均值为45.7%; 液水层为10.0%~55.3%, 平均值为37.7%。在南阳, 冰相层对地面降水贡献率的变化范围为3.5%~49.7%, 平均值为21.7%; 冰水混合层为31.0%~55.3%, 平均值为45.1%; 液水层对地面降水的贡献率为0.6%~65.5%, 平均值为33.1%。

一般而言, “催化—供给”云的高层云中, 可以产生了大量的冰晶, 冰晶通过凝华过程增大后转化为雪, 雪粒子通过凝华和收集冰晶过程得以增长。当冰相层中冰晶和雪粒子降落到下面的云层中, 对下面的云层起着自然播种的作用。当催化云中冰粒子降落到冰水混合层中, 如果这里含有较丰富的水汽和液态水, 冰粒子在这里通过凝华、撞冻以及碰并等过程继续长大, 占地面降水约20%的冰晶和雪降落通过冰水混合层后, 对降水的贡献率增加了大约45%~50%。可见冰水混合层是非常重要的供给云; 在混合层长大的冰粒子下降到液水云层中就要融化, 融化的冰粒子在这里对云水通过“冲刷”的作用将其转化为降水粒子, 如果液水云中云水含水量丰富, “冲刷”增加的地面降水量就较大。郑州和南阳两地区冰水混合层和液水层对地面降水量的贡献率达到70%以上。

我国北方层状云人工降水试验研究得出, 催化云中的降水质量增长常低于总降水量的30%, 供给云中的增长量常高于总降水量的70%(游来光等, 2002)。

国外在1973~1983年对温带气旋进行的系统探测也揭示出暖锋雨带的降水主要由“催化—供

给”云机制形成(Hobbs, 1978; Hobbs et al., 1980; Herzegh and Hobbs, 1980)。自然催化带对地面降水的贡献占25%, 播撒冰晶在较厚的供水带中以凝华增长为主, 占地面总降水量的75%; 对于宽冷锋雨带中的高空浅薄的对流泡是播撒云, 其内冰晶通过凝华增长, 落入供水云后由聚合和凝华进一步增长, 供水云对降水的贡献很大, 达80%。

因此可以认为, 降水性层状云在垂直方向上宏观结构和微观结构都是分层的, 不同云层微物理结构不同, 发生的微物理过程不同, 对降水的贡献也不同。此外不同云层对降水的贡献不但随不同云系而变化, 就是同一云系也随其演变过程变化。一般而言, 对于“催化—供给”云, 催化云对降水的贡献低于30%, 供给云在70%以上。

4.3 层状云中冰相粒子增长的主要物理过程

层状云人工增雨需要向云中引入人工冰核, 通过影响冷云物理过程增加降水。因此层状云中冰相粒子增长的物理过程倍受关注。从上一节层状云各层对降水的贡献研究可以看出, 在冰相层(催化层)冰相粒子通过凝华增长, 对地面降水的贡献通常低于30%, 冰粒子下降落入冰水混合层后继续凝华增长, 还会发生聚合和撞冻增长。但冰粒子是以消耗水汽的凝华增长为主还是消耗过冷水的撞冻增长占优势, 这个问题对人工增雨来说是个关键科学问题, 这关系到人工增雨的原理和增雨潜力的评估和催化条件的选择。

到底是凝华增长还是冰粒子的撞冻增长对雨水形成作用大, 从数值模拟结果看, 在冷云降水机制重要的云中, 对降水形成的作用来说, 冰相粒子的撞冻增长过程和凝华增长过程相比同样重要。例如对2002年4月5日产生大范围降水的层状云系(洪延超和周非非, 2005)来说, 05:00模拟云系霰融化形成的 5.68 kg m^{-2} 的雨水中, 约有 3.03 kg m^{-2} 是由水汽转化而来的, 贡献率为53%; 2.24 kg m^{-2} 是由过冷水转化形成的, 贡献率为39%。对于08:00模拟云系, 水汽转化贡献率为46%, 过冷水转化贡献率为49%。这说明, 在冰相物理过程对降水贡献较大的层状云中, 水汽和过冷水对形成降水粒子的贡献相差不大。当然冰粒子的凝华增长和撞冻增长对降水的贡献率随不同云系有差异。图4给出冰粒子融化、凝华和撞冻增长对降水的贡献率(周非非, 2005), 可见冰相粒子融化对降水的贡献率是随云系发展而变化的, 最高可达55%以上。凝华增长对

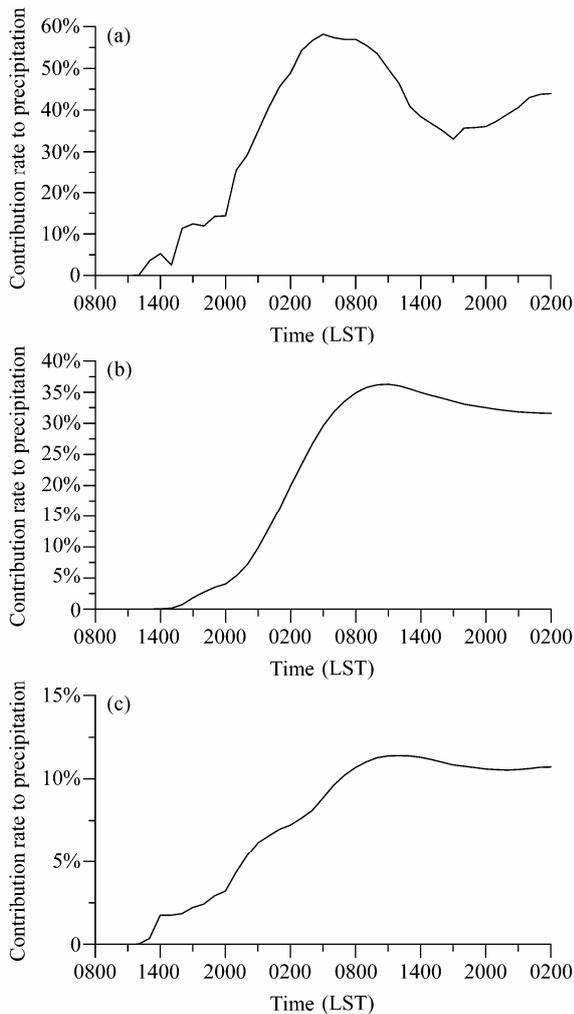


图4 2002年10月19~20日层状云系中河南省域不同物理过程对降水的贡献率的时间变化: (a) 雪和霰粒子融化; (b) 冰粒子凝华; (c) 冰粒子撞冻

Fig. 4 Change with time of the contribution rate to precipitation for different microphysical processes in simulation stratiform cloud from 19 to 20 October: (a) Melting of snow and graupel; (b) sublimation of ice particles; (c) accretion of ice particle

降水的贡献率最大可达35%以上, 相比之下, 冰相粒子撞冻增长只有将近12%。其余的雨水是通过暖云过程形成的。而在冰相粒子融化形成的雨水中, 大约有70%以上来自于水汽的凝华, 其余是过冷水的贡献。

从上面模拟的两例层状云系冰相粒子的增长情况可以看出: 在有些云系中, 冰粒子的凝华增长和撞冻增长对降水的贡献相差不大, 撞冻是冰相粒子重要的增长过程; 但在另一些云系中, 冰相粒子的凝华增长对降水的贡献率明显高于撞冻增长; 冰相粒子的增长方式在不同的云系中是不同的, 即使是同一云系中不同发展阶段也是不同的。冰相粒子

的这两种增长方式反映了云中冰面过饱和和水汽量和过冷水含量对于冰相粒子增长的重要性。

层状云人工增雨机制研究(胡志晋, 2001)说明, 人工冰晶除通过贝吉隆过程使过冷水转化为降水外, 还使一部分冰面过饱和和水汽转化为降水, 这部分水量可以用冰水饱和比湿差表示, 其垂直累积量远大于过冷水量, 肯定了冰面过饱和水汽和凝华增长在冰相粒子增长中的作用。实验研究(陈万奎和严采繁, 2001)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。

5 层状云人工增雨的几个基础性问题

前面介绍了层状云的不均匀结构、层状云的垂直结构, 尤其是“催化—供给”云的结构和降水形成机制以及云中冰相粒子的增长方式。受这些研究结果的启发, 讨论层状云的人工增雨的几个基础性问题。

在我国, 由于水资源的短缺, 人工影响天气, 尤其是人工增雨近些年得到长足的发展, 我国的人工影响天气的规模已位居世界第一。就人工增雨的对象而言, 大范围的层状云降水云系是主要作业目标。我国的西北、华北和东北在春秋季节都要对层状云开展人工增雨作业, 冬季有时还要进行人工增雪。然而层状云人工增雨的技术虽然已经过50余年的发展, 核心技术的研究也有不少进展, 但还没有得到很好的解决, 其中最为重要的是人工增雨潜力的预测和判别, 催化条件和催化方法的选择等。与这些技术方法密切相关的至少有几个基础性科学问题:

(1) 结构对云水资源的转化和降水的形成密切相关, 人工增雨潜力的评估、催化条件选择要考虑层状云的结构。

(2) 人工增雨是通过影响冷云微物理过程实现的, 对层状云降水形成的物理过程、环节和机制, 尤其是关键的冰相微物理过程应该深入了解。降水机制也应成为人工增雨潜力评估、催化条件选择的重要因素。

(3) 贝吉隆过程只是启动冷云降水的机制, 层状云冷云催化理论和原理需要补充。

现在就此3个问题结合以前的研究成果进行探讨, 并提出层状云人工增雨的思路。

5.1 层状云结构对降水的影响——云水资源的有利转化条件

前面我们用实测资料说明降水性层状云的垂直结构是分层的, 一般分为冰相层、冰水混合层和液水层 3 个层次, 称为“催化—供给”云。“催化—供给”云是降水性层状云的典型结构, 也是有利于降水形成的结构。因为对于这样结构的层状云来说, 有利于云水向降水的转化, 即有利于降水的形成。其原因可以从“催化—供给”云降水形成的机制和云中粒子形成过程得到解释。

就纯暖云而言, 云水完全通过雨水的碰并过程转化成降水, 云水转化成降水的效率主要依赖于雨滴的大小和浓度。如果暖云的上层有冰相粒子降入, 消耗云水的微物理过程除了雨水的碰并而外, 还有融化冰相粒子的碰并过程, 2002 年 4 月 5 日低槽冷锋云系数值模拟的结果(洪延超和周非非, 2005)说明, 融化的冰相粒子在液水层由于碰并云水使冰相粒子对降水的贡献率提高了 13.3%。这也说明, 冰相粒子降入液水层提高了云水向降水的转化效率, 纯暖云的云水转化效率比较低。观测表明, 新疆地区的层积云云顶温度高于 -5°C , 一般只能降毛毛雨。

就纯冰云而言, 由于云中不存在过冷水, 从上节对“催化—供给”云的降水形成机制的研究表明, 冰相层的冰雪晶主要通过凝华过程增长, 冰雪晶也会产生聚并。而凝华是增长的慢过程。假定这一层降入冰水混合层的冰雪晶能完全达到地面, 这一层对地面降水的贡献也只有不到 30%。如果低层有供给云, 当这些冰雪晶落入冰水混合层后, 通过在这一层的撞冻过冷水增长和凝华增长等过程, 对地面降水的贡献率会大幅度提高。仍以 2002 年 4 月 5 日低槽冷锋云系为例, 冰相层对降水的贡献率为 25.5%, 冰水混合层为 43.1%。如果假定冰水混合层的冰雪晶完全由高层降落进入的, 考虑到冰水混合层的过冷水为云水, 没有冰雪晶的撞冻增长, 云水不会转化成降水, 通过冰水混合层, 冰雪晶对降水的贡献率提高了 40% 以上。这说明云冰的转化效率有大幅度提高, 同时说明仅靠冰相层的凝华增长云冰向降水转化的效率不会很高, 即使转化成降水由于没有供给云也不可能降到地面形成降水。

因此云水转化成降水的有利结构是“催化—供给”云结构, 而且云中垂直方向上的 3 层云是连成一体的。连成一体的“催化—供给”云是有效的

降水形成机构, 只有冰相层、冰水混合层和液水层相互“配合”, 才能形成有效降水。冰相层形成的冰雪晶如果没有下面的混合层, 这些粒子不可能降落到地面形成降水, 同时没有继续增长的条件; 冰水混合层如果没有冰相层降落的冰雪晶, 这一层的过冷水就没有转化成降水的条件; 层状云的液水层也为从高层降落的粒子提供进一步增长的环境。混合层长大的冰相粒子进入液水层在融化的过程中同时收集云水继续增长成为降落到地面的雨滴, 同时液水层本身也通过暖云过程形成降水。3 层的有效配合是降水形成的有利条件。

图 5 给出使用中尺度数值模式模拟的一例河南低槽冷锋云系中郑州和南阳地区区域平均含水量和 1 h 降水量的时间剖面(周非非, 2005)。在郑州地区, 18 日 20:00 到 19 日 02:00, 纯粹是暖云, 小时降水量只有 0.5 mm。19 日 08:00, 是连成一体的催化—供给云, 含水量中心在过冷区, 其小时降水量达到 4 mm。南阳地区亦是。在 19 日 14:00 之前, 南阳地区存在深厚的“催化—供给”云, 小时降水量达到 5 mm。这说明, 这种结构的云体容易形成降水, 具备较好的云水转化条件。

鉴于“催化—供给”云结构有利于云水的转化和降水的形成, 这种结构也应该对人工增雨有利, 可以将“催化—供给”云作为层状云人工增雨潜力评估的要素和催化条件选择的结构指标。

5.2 存在冷云降水机制是层状云人工增雨的基本条件

层状云尤其是我国北方的层状云, 是向云中适当部位, 在适当时机播撒适当剂量的冰核通过影响云中冰相微物理过程来增加地面降水。合适的催化部位在层状云的冰水混合层。因此作为催化对象的层状云的降水应该主要通过冷云过程形成, 即冰相物理过程对降水的作用或贡献要大于暖雨过程。事实上, 层状云系的不同部位或同一部位不同发展阶段降水形成机制是变化的, 冷云过程对降水的贡献也是变化的, 有时高些, 有时又低些。图 6 是 1 例模拟云系中 1 个区域暖云和冷云过程对降水的贡献率的时间变化(洪延超和周非非, 2006), 结合图 5a, 即区域平均含水量的时间—高度剖面图, 可以看出, 在 19 日 02:00 附近只有暖云存在, 因此冷云过程对降水的贡献率为 0, 到 08:00, 区域被“催化—供给”云覆盖, 冷云过程对降水的贡献率达到 80%; 以后云顶高度降低, 降到了 400 hPa 以下高

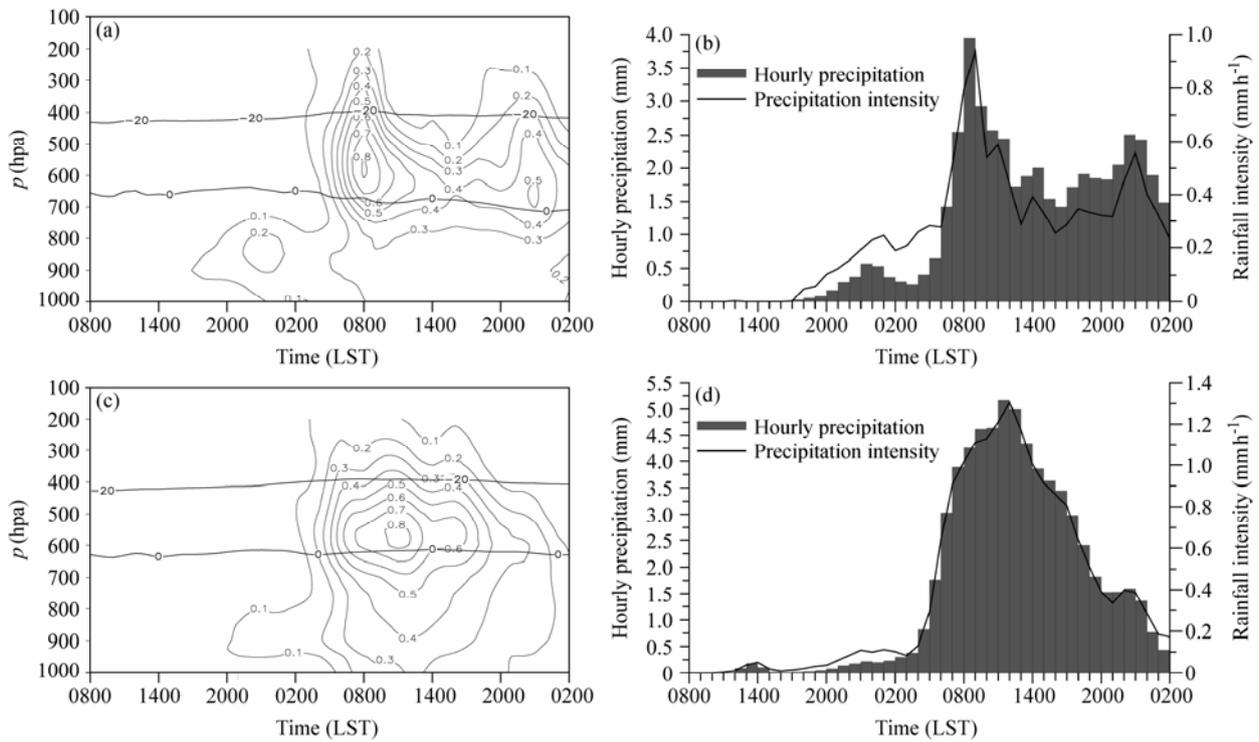


图5 模拟的2002年10月18~20日河南低槽冷锋云系中 (a、b) 郑州地区和 (c、d) 南阳地区 (a、c) 云中不同高度上区域平均含水量 (单位: g kg⁻¹) 及其 (b、d) 对应的1 h降水量和降水强度的时间剖面

Fig. 5 (a, c) The time-height section of regional averaged water content (g kg⁻¹) and (b, d) their corresponding hourly precipitation and precipitation intensity in (a, b) Zhengzhou and (c, d) Nanyang for simulated low trough and cold front cloud system from 18 to 20 Oct 2002

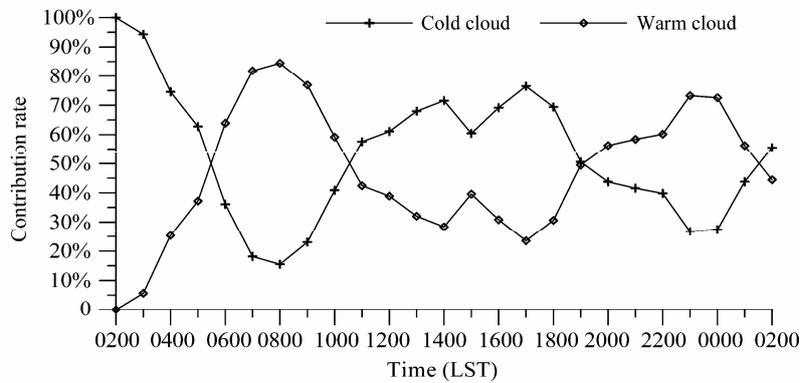


图6 模拟2002年10月19~20日云系中郑州地区暖、冷云过程产生的小时雨水量对雨水量的贡献率的时间变化

Fig. 6 Chang contribution rate of hourly rainwater amount caused by cold cloud and warm cloud processes to the rainwater amount in the simulation cloud system from 19 to 20 Oct 2002

度,冷云过程贡献率降低,主要是暖云的贡献。由于冷云过程对降水的贡献率是变化的,只有选择降水主要由冷云过程形成或冷云机制是重要的云体催化,人工冰核才能发挥作用。那么这样的层状云需要具备什么条件呢?

对层状云3层发生的微物理过程研究说明,从层状云的冰相层降落的冰雪晶通过在冰水混合层的生长降水强度大幅度提高。在冰相层,冰雪晶通过凝华过程增长。在冰水混合层,降落到这一层的

冰晶仍然以凝华增长为主,雪晶主要通过凝华和碰撞过冷水增长,雪的碰撞增长率一般高于凝华增长率;其次是冰雪晶的聚合。可见层状云的冷云过程对降水的贡献大小是由冰相层和冰水混合层的冰相粒子的增长条件决定的。从冰相层降落的冰雪晶尺度要大些,才能在冰水混合层较早启动碰撞过程,因此冰相层的环境就要有利于冰雪晶的凝华增长,就是说这里冰面的过饱和水汽量要大些;同样只有混合层的冰面过饱和水汽量和过冷水含量大

些, 冰粒子的凝华增长和撞冻增长量才能大些, 就是说冰水混合层的水汽量和过冷水含量要丰富。播撒在层状云冰水混合层的人工冰核化产生冰晶后, 与自然冰晶一样, 要经历凝华和撞冻增长过程。开始由于冰晶较小, 通过凝华过程增长, 长大一些成为雪后才出现撞冻增长。

由上分析说明, 作为催化对象的层状云, 降水的机制要以冷云过程为主, 冰面饱和水汽量和过冷水含量要大些, 这些应该成为层状云人工增雨的基本条件。因此在做层状云人工增雨作业时, 一定要考虑降水形成的物理机制, 冷云过程为主应该成为催化的条件; 在此基础上还要进一步考虑冰面饱和水汽量和过冷水含量, 它们是冰相粒子凝华增长和撞冻增长的条件。

5.3 关于层状云人工增雨原理问题的补充

早期通过观测人们发现在云中温度低于 0°C 的负温区存在过冷水滴, 水滴并不冻结成冰晶, 接着注意到只有上部已经明显冰晶化的云才能下大雨, 但还不清楚云中冰晶成核作用的微物理过程。Wegener (1911) 阐述了这样的现象: 水汽张力将自行调节到冰面和水面饱和值之间的某一个值。由此产生的效果必然是, 在冰上将连续不断发生凝结, 而同时液体水则在蒸发, 这一过程一直要进行到液相完全耗尽为止。22 年后, 贝吉龙 (1935) 在整理观测事实后提出了混合相云发生降水的著名理论, 因此人们将混合相云降水形成过程称为贝吉龙过程。此后, Findesen (1938) 对贝吉龙理论进行更为明确的阐述, 通过研究冰晶形成的方式, 认为直接从水汽结晶优于水滴冻结, 并预见通过引进适合的核可能会激发这种机制。1946 年美国科学家发现在过冷云中播撒碘化银等成冰微粒或干冰等致冷剂, 就可以在过冷云中迅速产生大量的冰晶。至此, 人们对冷云降水的机制和贝吉龙过程已有较为深刻的认识, 并提出利用这一机制在云的过冷区引入人工冰核可以产生大量冰晶以增加降水。

几十年来, 层状冷云的人工增雨的理论基础一直是贝吉龙过程: 在温度低于 0°C 和过冷水滴、冰晶、水汽共存的云区, 由于冰面饱和水汽压低, 而水面饱和水汽压高, 云中的水汽压处于两者饱和值之间时, 水汽在冰晶上凝华而使冰晶长大, 同时水滴不断蒸发。就是说, 通过贝吉龙过程云中过冷水向冰晶转移。因此在对层状云进行人工增雨条件判

别时, 一直把云中过冷水含量作为重要指标。

毫无疑问, 将贝吉龙理论作为层状云降水形成理论和人工增雨的理论基础是正确的, 但根据目前我们对层状云降水形成过程的认识, 这一理论需要做些补充。

首先, 严格说贝吉龙过程实际上启动冷云降水的机制。在过冷水、冰晶和水汽 3 相共存状态下, 通过贝吉龙过程, 过冷水向冰晶转移。冰晶靠凝华增长可以达到容易发生撞冻 (碰并) 增长的尺度但很难达到降水粒子尺度, 冰晶要增长到可以降到 0°C 层之下融化成达到地面的降水粒子一般要经历冰晶聚合和撞冻过冷水增长。所以说贝吉龙过程启动了层状云的降水, 它只是降水形成过程的一部分。事实上, 聚合和撞冻是降水粒子快速形成的过程。根据前面介绍的关于降水机制的研究结果, 对 2002 年 4 月 5 日层状云系, 霰融化形成的雨水中, 水汽转化贡献率为 $46\%\sim 53\%$; 过冷云水转化贡献率为 $39\%\sim 49\%$ 。不管从贝吉龙过程还是撞冻过程考虑, 过冷水是人工增雨的重要指标, 但降水的形成过程不仅仅是贝吉龙过程。

其次, 在降水形成过程中, 层状云冰相层冰晶的凝华增长是重要的。从层状云中 3 层对降水的贡献率可以看出, 冰相层 (催化层) 对降水的贡献低于 30% 。在冰相层冰晶几乎完全通过凝华过程增长。由于这里没有过冷水, 因此不会发生贝吉龙过程。只有在冰相层长得大一些的冰晶, 才能降落到冰水混合层进一步通过贝吉龙过程以及聚合和撞冻过程增长。因此冰相层能否起到催化的作用, 取决于冰相层的冰晶凝华增长大不大。这就与冰面过饱和水汽量有关系。

由上说明, 层状云降水形成是由贝吉龙过程启动的, 冰晶在冰相层的凝华增长和在冰水混合层的聚合撞冻增长也是重要的降水形成过程。因此贝吉龙过程、聚合撞冻过程都是层状云人工增雨的理论基础。

6 用常规探测资料判别层状云人工增雨催化条件

以上分析表明, 云的结构是云水向降水转化的重要条件, 因此在层状云人工增雨潜力评估和作业条件判别时一定要考虑云的垂直结构, 也就是说要选择具有“催化—供给”云结构的层状云催化作

业。在符合“催化—供给”云结构条件时，还要看降水形成机制，只有冷云物理过程在降水形成中起重要作用的“催化—供给”云才可以作为催化目标。如果上述两个条件满足，还要看看冰水混合层过冷水含量、冰晶浓度、水汽和冰面过饱和和水汽量等参数。

目前对云和降水观测的主要手段有卫星、雷达或多普勒雷达、地面雨量/雨强计、微波辐射计、机载 PMS 系统和探空等。在没有可靠的定量判断层状云催化条件指标的情况下，可以利用这些探测资料结合关于层状云的研究成果定性判断人工增雨潜力和催化作业条件。

6.1 “催化—供给”云的结构判别

根据已有的研究结果，“催化—供给”云的结构分为3层：冰相层、冰水混合层和液水层。

(1) 用红外卫星云图判别冰相层。冰相层位于云的上部，无过冷水存在，完全由冰晶雪等冰粒子组成，是自然催化层。由于云中的冰晶浓度主要取决于冰核浓度，根据冰核浓度与温度关系的研究（梅森，1978），在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，冰核浓度为 1 m^{-3} ；在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，冰核浓度为 100 m^{-3} 。此外，从冰核浓度随温度分布的情况看，温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，冰核浓度才显著增加。因此将冰相层的上界温度，即云顶温度设定为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，就是说低于这个温度才符合存在冰相层的条件，冷云过程才有可能成为降水形成的主要机制。这个温度对应的高度随季节和地区变化。至于冰相层的下界高度，即是云中冰水混合层的上界高度，它是不确定的。只要云顶温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，就认为有存在冰相层的可能。云顶温度可以用红外卫星云图判断。

(2) 用雷达 RHI 回波亮带判别冰水混合层。冰水混合层位于云中 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层之上，是由冰雪晶、或霰与过冷液水（云水或雨水）组成的云层。根据前面介绍的“催化—供给”云中冰相粒子增长过程研究，在冰水混合层中，降水粒子雪或霰主要通过撞冻过冷水和聚并增长。在它们降落到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层以下的暖区融化形成雨滴的过程中，表面先融化形成具有一定厚度的水膜，其介电性质与水相同，介电常数约增加20倍，使雷达散射能力约增加5倍。加上融化冰粒子的聚并作用和速度效应和冰粒子形状作用， $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层以下附近的雷达回波强度可以比冰水混合层要达20倍以上，因而形成了雷达亮带。如果层状云的 RHI 雷达回波出现亮带，说明有冰相粒

子降落进入云的暖区。若亮带回波强度较高，考虑到回波强度正比于 $\sum N_i D_i^6$ （ N_i 为云中粒子浓度， D_i 为粒子直径），说明正在融化的冰粒子尺度较大、浓度较高；而大的冰相粒子在云中 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层之上的冰水混合层经历了撞冻过冷水的增长过程，就是说云中存在回波强度高的亮带意味着存在冰水混合层。因而可以用雷达亮带及其强度判断冰水混合层的存在。也有人认为，亮带的存在，表明了亮带上面是雪花和冰晶而不是过冷水滴（张培昌等，2001），这可能是指强度较低的亮带，而回波强度高的亮带可能恰好是其上存在过冷水的指示。至于雷达亮带与冰水混合层和过冷水的关系，或者雷达亮带的强度达到多高时才存在冰水混合层，这需要通过层状云的雷达和负温区微物理探测研究确定。

此外，层状云中的雷达亮带常常具有不均匀性，较强的雷达亮带一般不均匀性更为明显，含有一个个水平分布的高强度的回波核。有的亮带中的强回波核就是从层状云高空对流泡体降落的冰相粒子造成的。据青海东部地区18次入云飞机探测发现（党积明，2000），有颠簸和无颠簸的云滴最大半径和含水量有明显差别：发生颠簸时，观测的含水量较高，可以达到 0.34 g m^{-3} ，而无颠簸时只有 0.067 g m^{-3} 。这表明，对流泡体中一般都有过冷水存在，有利于人工增雨作业。层状云系的不均匀性还体现在层状云降水云系中存在一个个降水云团，云团的含水量高、云滴浓度低也有可能有利于人工增雨作业。

(3) 用雷达低层 RHI 回波判别液水层。层状云中的液水层位于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层之下，是由云滴、雨滴和融化的冰相粒子组成。只要这一层雷达亮带回波强度随高度降度而增大的现象，说明粒子在下降过程中发生了碰并增长，说明云系存在暖层，即液水层。

6.2 “催化—供给”云的冷云降水机制判别

既然是“催化—供给”云，其降水的形成过程一般既有冷云过程也有暖云过程。但对层状云实施人工增雨作业应该选择冷云降水机制为主，至少是冷云降水机制重要的层状云。层状云中由冷云过程形成的降水粒子是固态，主要是雪、霰和聚集体，它们降落通过 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层到达云的暖区要融化，会形成雷达亮带。亮带的回波强度高意味着冰粒子的尺度大、浓度高，因此融化形成的地面降水强度也应该高。就是说，亮带的回波强度与冷云降水机制有关系，高强度的雷达亮带说明降水有冷云物理过程参

与。

7 结论

论文在总结我国层状云及其降水物理研究的基础上, 讨论了层状云人工增雨的几个问题, 提出用常规观测资料判断人工增雨条件的方法。

(1) 层状云结构。层状云系常常由尺度不等的云团组成, 其雷达亮带内含若干强回波核, 结构是不均匀性的。层状云系统的垂直结构是分层的, “催化—供给”云是降水性层状云的典型结构, “催化—供给”云相互作用是导致降水的主要过程。“催化—供给”云按微观结构可以分成 3 层: 完全由冰晶和雪粒子组成的云层称作冰相层; 在冰相层之下是冰相粒子和过冷水组成的冰水混合层, 冰相粒子可以是冰晶、雪(聚合物)或霰; 0℃层之下这一层称为的是液水层。层状云的 3 层模型体现了“催化—供给”云的结构: 冰相层对冰水混合层起催化作用, 是催化云; 而冰水混合层和液水层为从高层落下的冰相粒子提供增长所需的水分和环境, 是供给云。

(2) 层状云降水过程。研究表明, 对应于层状云或“催化—供给”云的 3 层宏观结构, 发生着不同的微物理过程, 粒子形成和增长过程也不同。在冰相层, 存在冰晶和雪, 主要是冰晶。凝华是其主要增长方式, 其次是雪与冰晶的聚合过程; 冰晶和雪, 主要是雪(或聚合物)落入冰水混合层后, 继续通过凝华增长或贝吉龙过程增长, 同时撞冻过冷云水增长, 有部分冰雪晶通过撞冻增长而转化成霰。在下面的液水层, 从冰水混合层落下的雪(或聚合物)霰开始融化, 同时收集云暖区云水增长, 在达到地面之前完全融化成雨滴。此外在这一层形成的雨滴碰并云水增长。层状云中冰相粒子增长研究指出, 在冷云降水机制重要的云中, 对降水形成的作用来说, 冰相粒子的撞冻增长过程和凝华增长过程相比同样重要。层状云各层对降水的贡献不同。不同云层对降水的贡献不但随不同云系而变化, 就是同一云系也随其演变过程变化。一般而言, 对于“催化—供给”云, 催化云对降水的贡献低于 30%, 供给云在 70% 以上。

(3) 在以上研究的基础上, 讨论了层状云人工增雨的问题。认为层状云结构对云水资源的有利转化有影响, 云水转化成降水的有利结构是“催化—

供给”云, 只有冰相层、冰水混合层和液水层相互“配合”, 才能形成有效降水。可以将“催化—供给”云作为层状云人工增雨潜力评估的要素和催化条件选择的结构指标。第二, 作为催化对象的层状云, 降水的机制要以冷云过程为主, 冰面饱和和水汽量和过冷水含量要大些, 它们是冰相粒子凝华增长和撞冻增长的条件。第三, 层状云人工增雨原理应该补充。层状云降水形成不但经历贝吉龙-芬德森过程过程, 冰晶在冰相层的凝华增长和在冰水混合层的聚合和撞冻增长也是十分重要的过程。过冷水对于降水的形成非常重要, 但冰面饱和和水汽量对降水的形成也同样重要。

(4) 结合关于层状云的研究成果用常规探测资料判别层状云人工增雨催化条件。提出利用卫星云图和雷达回波判别“催化—供给”云的结构、用红外卫星云图判别冰相层、用雷达 RHI 回波亮带判别冰水混合层、用雷达低层 RHI 回波判别液水层和降水机制的方法。

参考文献 (References)

- Bergeron T. 1935. On the physics of cloud and precipitation [C]// Proceedings -Verbaux Assoc. Meteorol. Intl. Union Geodesy Geophys. 5th General Assembly, Lisbon, 1933, 156-178.
- 陈万奎, 严采繁. 2001. 冰相雨胚转化水汽密度差的实验研究 [J]. 应用气象学报, 12 (S1): 23-29. Chen Wankui, Yan Caifan. 2001. The experimental study on the conversion of saturated vapor density deficit in forming ice-phase rain embryo[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (S1): 23-29.
- 党积明. 2000. 青海省自然降水与边界层湍流强度、云高的关系 [M]// 青藏高原云和降水人工影响天气研究. 北京: 气象出版社, 15-19.
- Dang Jiming. 2000. Relationship between natural precipitation, turbulence intensity in boundary layer and cloud high in Qinghai province [M]// Studies on Cloud, Precipitation and Weather Modification in Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 15-19.
- 樊曙先, 安夏兰. 2000. 层状云微物理结构演变特征的个例研究 [J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 21 (2): 179-182. Fan Shuxian, An Xialan. 2000. A case study on feather of evaluation of microphysical structure for stratiform cloud [J]. Ningxia University Journal (Natural Science Edition) (in Chinese), 21 (2): 179-182.
- Findeisen W. 1938. The nucleating meteorological processes in the formation of precipitation [J]. Meteorol. Z. (in German), 55: 121-133.
- 顾震潮. 1980. 云雾降水物理基础 [M]. 北京: 科学出版社, 219pp. Gu Zhenchao. 1980. Cloud and Fog Precipitation Physical Basis (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 219pp.
- Herzogh P H, Hobbs P V. 1980. The mesoscale and microscale structure and

- organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. II: Warm-frontal cloud [J]. *J. Atmos. Sci.*, 37: 597.
- Hobbs P V. 1978. Organization and structure of clouds and precipitation on the mesoscale and microscale in cloud storms [J]. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 16: 741-755.
- 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]. *J. Atmos. Sci.*, 37: 568-596.
- 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 [J]. *大气科学*, 29 (6): 885-896. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2005. A numerical simulation study of precipitation formation mechanism of “seeding-feeding” cloud system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 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 [J]. *大气科学*, 30 (5): 913-926. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2006. The study of evaluation of potential of artificial precipitation enhancement in stratiform cloud system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 913-926.
- 洪延超, 黄美元, 王首平. 1984. 梅雨云系中亮带不均匀性的理论探讨 [J]. *大气科学*, 8 (2): 197-204. Hong Yanchao, Huang Meiyuan, Wang Shouping. 1984. A theoretical study on inhomogeneity of bright band in Mei-yu frontal cloud system [J]. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 8 (2): 197-204.
- Houze R A, et al. 1981. Air motion and precipitation growth in a warmfrontal rainband [J]. *J. Atmos. Sci.*, 38 (3): 639-649.
- 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 2007. 降水性层状云结构和降水过程的观测个例与模拟研究 [J]. *大气科学*, 31 (3): 425-439. Hu Zhaoxia, Lei Hengchi, Guo Xueliang, et al. 2007. Studies of the structure of a stratiform cloud and the physical processes of precipitation formation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (3): 425-439.
- 胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨 [J]. *应用气象学报*, 12 (S1): 10-13. Hu Zhijin. 2001. Discussion on mechanisms, conditions, and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 12 (S1): 10-13.
- 黄美元, 洪延超. 1984. 在梅雨锋云系内层状云回波结构及其降水的不均匀性 [J]. *气象学报*, 42 (2): 80-87. Huang Meiyuan, Hong Yanchao. 1984. The inhomogeneous features of the precipitation and the echo structure of stratiform cloud system [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 42 (2): 80-87.
- 李淑日, 王广河, 刘卫国. 2001. 降水性层状云微物理结构个例分析 [J]. *气象*, 27 (11): 17-21. Li Shuri, Wan Guanghe, Liu Weiguo. 2001. An analysis on microphysical structure of precipitus stratiform cloud [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 27 (11): 17-21.
- 李铁林, 雷恒池, 刘艳华, 等. 2010. 河南春季一次层状冷云的微物理结构特征分析 [J]. *气象*, 36 (9): 74-80. Li Tielin, Lei Hengchi, Liu Yanhua, et al. 2010. Analysis on microphysical structure of a stratiform cloud in spring in Henan province [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (9): 74-80.
- 梅森 B J. 1978. 云物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 181-185. Meson B J. 1978. *Cloud Physics (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 181-185.
- 牛生杰, 孙照渤, 安夏兰. 2003. 层状云降水中小尺度系统的微物理结构观测研究 [M]// 陕甘宁人工增雨技术开发研究. 北京: 气象出版社, 8-15. Niu Shengjie, Sun Zhaobo, An Xianan. 2003. Observation and studies on microphysical structure of meso-microscale system in precipitous stratiform cloud [M]// *Studies on Technology Development of Artificial Precipitation in Shan-Gan-Nin Area (in Chinese)*. Beijing: China Meteorological Press, 8-15.
- 王扬锋, 雷恒池, 樊鹏, 等. 2007. 一次延安层状云微物理结构特征及降水机制研究 [J]. *高原气象*, 26 (2): 388-395. Wang Yangfeng, Lei Hengchi, Fan Peng, et al. 2007. Analyses on microphysical characteristic and precipitation mechanism on stratiform cloud in Yanan [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (2): 388-395.
- Wegener A. 1911. *Atmospheric Thermodynamics (in German)* [M]. Leipzig: J. A. Bath., 331pp.
- 游来光, 马培民, 胡志晋. 2002. 北方层状云人工降水试验研究 [J]. *气象科技*, 30 (增刊): 19-56. You Laiguang, Ma Peimin, Hu Zhijin. 2002. Experiment research on artificial enhancement precipitation for stratiform cloud in North China [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 30 (S1): 19-56.
- 赵震, 雷恒池. 2008. 西北地区一次层状云降水云物理结构和云微物理过程的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 32 (2): 323-334. Zhao Zhen, Lei Henchi. 2008. A numerical simulation of cloud physical structure and microphysical processes associated with strtriform precipitation in Northwest China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 323-334.
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 318pp. Chang Peichang, Du Binyu, Dai Tiepi. 2001. *Radar Meteorology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 318pp.
- 周非非. 2005. 层状云系人工增雨潜力的数值研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. Zhou Feifei. 2005. The numerical studies on potential of artificial rainfall for stratiform cloud [D]. Ph. D. Thesis (in Chinese), Graduate School of Chinese Academy of Sciences.