

# 对人工影响天气若干问题的探讨\*

毛节泰<sup>1)</sup> 郑国光<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(北京大学物理学院大气科学系,北京 100871)

<sup>2)</sup>(中国气象局,北京 100081)

## 摘要

自然降水过程一般分为成云和降水形成两个阶段,人工影响虽然可能在降水形成阶段起某些作用,但最终决定降水的因子还是使云产生的抬升运动和被抬升气块中的水汽含量。人工增雨作业部位和时机的选择主要取决于是否有利于云产生抬升运动。因此,在加强云宏、微观条件观测的同时,要特别加强对抬升运动和被抬升气块中水汽含量的观测,而且相应的云降水数值模拟工作也要考虑能反映降水系统的动力场和水汽场模拟能力。

关键词:人工影响天气;云的微物理过程;降水过程

人工影响天气是指在适当的天气条件下,通过人工干预,使天气过程向符合人类愿望的方向发展。如果说科学研究的目的是认识自然和改造自然,那么人工影响天气就是在认识自然的基础上,去改造自然。目前,人工影响天气主要是指人工增雨和人工消雹,当然也可以扩展到人工消雨、消雾、防霜、人工引雷等方面。

瑞典科学家贝吉龙等1933年提出,在大部分形成降水的混合云中,降水的形成主要取决于云中是否有足够数量的冰晶,能否通过冰水转化过程形成大水滴。到1946年,美国科学家雪佛尔和冯纳格相继提出,可以在冷云中通过播撒干冰或碘化银的方法,适当增加云中的冰晶数量,促使降水的形成。这些研究指出了人工增雨的基本科学原理,开创了人工增雨作业的历史。有关人工消雹的研究工作也于20世纪50和60年代达到了高潮,其理论依据是前苏联科学家苏拉克维奇提出的所谓“过量播撒”理论。该理论认为,冰雹一般是在冰雹云中一个范围不很大的冰雹累积带中由初始冰雹胚胎碰并周围的水滴或冰晶而增长形成的。如果在这一冰雹累积带中增加大量的冰雹胚胎,造成这些冰雹胚胎争食该区域中有限的水滴或冰晶资源,就能有效抑制大冰雹的生长,从而达到减轻冰雹灾害的目的。

这些原理虽然被大多数人所接受,但具体在目前人工影响天气作业的许多环节中还不是很清楚,

因此在实际应用时有很大的不确定性。自然降水过程一般分为成云和降水形成两个阶段,由能量的角度对降水过程和人工催化过程进行一些分析,从而进一步探讨如何提高人工影响天气的科学水平和效率。

降水过程起始于云的出现,表明空气中的水汽已经达到饱和或过饱和,这就是成云阶段,这一过程是通过大气中气块被抬升冷却引起的。水汽从地面被抬升到高空是需要能量的。作一简单计算便可知,这一能量是相当大的。例如,一场雷阵雨通常可在 $10\text{ km}^2$ 范围1h内降水20mm,总降水量可达 $2 \times 10^5\text{ m}^3$ 。如果降水形成的高度是2km,这就意味着大气要将 $2 \times 10^5\text{ m}^3$ 的水抬升到2km的高空,然后再降落到地面。这些水从地面被抬升到高空就存贮了很大的能量(势能)。这部分能量的获取根据抬升过程的不同也不尽相同,但不外是由大尺度天气系统抬升和中小尺度不稳定能量释放做的功。在上面的例子中,这个功为 $3.92 \times 10^{12}\text{ J}$ 。当雨滴从云中降落到地面,一部分势能转变为动能传给下垫面,也有一部分能量通过克服空气阻力传给大气。讨论这些事实是为了说明两个问题:一是自然降水过程所涉及的能量很大,目前人类还不可能与之匹敌,因此人工影响天气要在这个环节上有所作为是不现实的;二是降水在下落过程中涉及到相当大的能量,如何更好地利用这些能量,是一个很值得探讨的问题。

\* 2006-07-28 收到,2006-09-14 收到再改稿。

例如这些降水落于海中,这部分能量人类无法利用,但如果它落在山区或高原,那么就有可能利用其中一部分能量,比如用来发电。由于能源问题是当今人类面临的最重大的环境问题之一,因此也需要从能源角度来考虑人工影响天气作业的效益,实际上已经开展的为水库蓄水增加发电的人工增雨作业就是在这方面的尝试。

云的出现虽然是降水过程的开始,但并不是所有的云都一定能产生降水。因为云滴都很小,即使在静止的空气中,下落速度也很小,更不要说空气中还存在着或大或小的上升运动,使得小云滴常悬浮在大气中。要形成降水,云滴必须增长到足够大,这就是成雨阶段。计算表明,仅仅靠凝结过程云滴是不能长大成雨滴的,云滴增长成降水粒子的主要过程是大小云滴碰并过程、冰水转化过程等。这些过程原则上是不消耗能量的,在某些条件下还可能释放出能量。这和前面提到的抬升过程是完全不同的。而目前人工增加降水或抑制冰雹的作业都是针对降水形成这一阶段,即只能在起始阶段进行干预,使云和降水朝着人们预期的方向发展,而对那些需要很大能量的过程,人们尚难以影响。

自然降水是发生在大气这样一个开放环境中。云本身就是一个开放的、动态变化的系统,即云体始终处于不断变化之中。观测表明,云中实际的水量是很少的,即使将所有的云水都降到地面,也产生不了多少降水量。因此,要形成有一定数量的降水,关键还在于源源不断的水汽补充,而这又取决于云系的动力学状况。这就是前面提及的,是一个需要消耗能量的过程。由于实际上人们难以提供这样大的能量,所以人们只有依靠自然,去选择自然条件能够提供合适产生降水的对象去进行人工影响。长期以来,在人工影响天气的研究工作中,比较多的观测和研究工作都集中在对云微物理结构的研究。在云降水数值模式方面的研究也把注意力放在怎样模拟出云降水微物理过程方面,而对于作为降水过程基础的云动力学问题研究比较薄弱。因此,降水过程涉及两方面需要研究的问题:云动力学和云微物理学,而且前者更为重要。

控制云和降水发生发展的动力学过程包括两个部分:一是造成气块抬升的动力学过程,二是被抬升气块的水汽维持状况或者说水汽的供应条件。这两个方面在某些场合是紧密相关的,例如在对流系统中,高的水汽含量能提供大量的水汽凝结,水汽

凝结释放潜热又增加了对流强度,有利于降水的发展。但在某些场合下,这种反馈并不重要,如天气尺度的因子控制着抬升过程,但被抬升的气块又不一定有足够的水汽形成降水。因此,上述两个问题需要分别研究。从目前的研究基础来看,前一个问题研究得比较成熟,后一个问题,即水汽的供应问题研究较少,主要是观测资料不够,同时对它们的分析也不多。例如,对大尺度的降水系统,人们习惯用锋面或低涡系统降水的概念模型来讨论水汽输送过程。对这样天气系统降水起主要作用的是气流场,而水汽场的分布被极大地简化了。在对流系统的研究中,因为是一个中尺度的问题,讨论的范围只有几十或上百公里,因此水汽的分布常常被均匀处理。当然,目前对天气尺度系统的探测还没有能力提供足够详细的水汽场时空分布信息,即使是已建立的比较稠密的地面观测站网的湿度观测资料也还没有被充分利用。

上述讨论表明:①自然降水过程包括成云过程和致雨过程,即由抬升造成水汽凝结的动力学过程和使云滴增大为降水粒子的微物理过程。从能量的角度来说,人们只能在不需大能量的微物理过程这一环节对云体施加影响,但实际上抬升造成水汽凝结的动力学过程对整个降水来说更重要。因此,人工影响天气应对此投入更大的研究力量。②抬升造成水汽凝结的动力学过程还包括造成抬升的动力学因子和水汽的分布与输送。目前,有关水汽分布与输送资料和研究都比较缺乏,需要投入更大的精力来对此问题进行研究,并重视对水汽场时空非均匀结构的探测和分析。③云的微物理结构影响到降水产生的效率,也决定降水实际成效,这是需要重点研究的课题,包括利用飞机的直接探测、从地面和空间的遥感监测以及对各种渠道获得资料的综合分析和数值模拟等。

在过去半个多世纪中,随着科学技术的快速发展,对云和降水系统的观测技术和装备有了很大发展,研制了各种从地面到空中及太空对云及降水进行直接测量和遥感监测的仪器和设备,并应用到相应的研究和人工影响天气的作业中去。虽然还有许多相关物理量仍缺乏必要的观测仪器,需要研究新的观测原理和仪器,但观测条件已有了很大的改善。研究和作业最需要观测云降水参量,以及应该怎样去观测这些参量,这是值得进一步分析讨论的。从上面的讨论可以看出,最需要观测的参量包括云当

前状况以及未来云将会有什么样的变化。前者需要观测云中微物理状况,主要利用飞机入云进行直接观测,也可利用气象卫星、天气雷达、地面微波辐射计等遥感手段来实现。近年来,这方面发展得比较迅速,但问题是怎样更好地组织利用这些资料,并发挥作用。目前这些资料已经直接用于我国的人工影响天气作业指挥,但多数还是依靠人的判断。20世纪80年代曾经掀起过研发和应用专家系统的热潮。专家系统是由计算机来做客观、定量的分析,然后再由人做最后的判断,这对目前广泛开展的我国人工影响天气作业水平的提高起到了很好的作用。

另外还需监测作业对象在作业前后的变化,是否存在作业增雨的潜力。这主要需考虑云中是否有持续的上升运动和水汽输送。正如前面已经提到的,人工影响天气是在云水的基础上让它尽快变为雨水。如果没有云水,那么人工催化作业就不会有什么好的效果。为了了解水汽输送和云水供应,需要弄清楚云中的抬升情况。因为各种不同的降水过程,其抬升的机制是不同的,如天气尺度的抬升,是地形所造成的抬升还是中尺度对流系统所引起的抬升?需要用不同的方法去观测和预测。由于云中气流垂直速度一般都比较小,即使是强对流系统,气流垂直速度也只有几米/秒,现有的探测手段还很难准确地探测云中气流垂直速度。多普勒天气雷达和风廓线雷达能够探测到强一点的气流垂直速度,但多普勒天气雷达也只能给出云中有回波区的气流场资料,而很需要的晴空区气流场资料却得不到;风廓线雷达虽然不限于云区,但它只能测量测站的风场时间剖面,而得不到大气中风场的三维空间分布。目前还几乎没有直接测量天气尺度抬升的方法。虽然广泛地利用超声风速计等设备观测边界层的气流垂直运动,但很少用到天气尺度系统的观测研究中。因此,需要加强这方面的研究。谈到天气尺度的问题,人们自然就想到,在水平方向几百公里范围上升气流都是均匀的。实际上情况并不是这样,上升气流是非均匀的,这就隐含着有利于人工影响天气作业潜力问题。观测发现,层状云降水中也有对流泡,而且强降水常常与这些对流泡的出现有密切关系。

另外一个需要测量的物理量是水汽场。过去对水汽场的重视不够,这是由于习惯认为只要有抬升运动就可以造成降水,但这是不全面的。假如被抬升的空气太干燥,没有多少云水能凝结出来,再施以人工影响也不会有多少增加降雨的潜力。大气中能

凝结出来多少水和云中有多少水还不是简单对应关系,因为云中瞬时含水量是云水产生和消耗二者之间的平衡结果,不一定代表云水产生量的大小。虽然云中水汽场的测量并不容易,但也不是完全没有办法,只是没有给予足够的重视而已。例如,地面气象站的湿度数据就可以提供一些水汽场的信息。随着自动气象站的广泛应用,观测的时间密度足够高,再增加空间密度就可以了。另外,地基GPS测量整层大气水汽的方法和其他遥感方法也可以应用,如气象卫星都有观测大气中水汽场的能力,静止气象卫星的红外通道可以测量晴空的总水汽量,虽然空间分辨率不高,但时间密度大。极轨气象卫星的红外通道测量大气中水汽场的分辨率可达到1 km,只是时间密度差一些。随着气象卫星数量的增加,极轨气象卫星观测的时间密度会得到改善,此外还可以用微波通道进行水汽测量,可以全天候观测。其他地基遥感,如微波辐射计可以测量大气中水汽,但只能得到测站一个点的观测资料,其优势难以发挥出来,布网观测的成本太高。当然,如果与天气雷达结合,会得到一些改进,但需要做的工作还很多。总之,在对云内微物理状况观测的同时,需要加强对造成气块垂直运动的大气动力结构的观测和对水汽场分布的观测,这样可为人工影响天气作业提供有价值的观测信息。

为了提高人工影响天气工作的科学性,还需要继续发展包含有动力过程和微物理过程的云和降水数值模式。数值模式是基于已知的物理规律,用反映这些规律的一组方程或参数化关系来组成模式,然后用数学方法来求解模式,得到反映所研究事物变化的规律和其中各种变量的相互联系。虽然所有的物理规律都是已知的,但由于事物的复杂性,有些现象一时看不清楚,或者无法得到各变量之间数量上的关系,那么数值模式可以给出这方面许多有用的结果。因此,数值模拟是非常有用的。但必须要考虑到它的局限性,主要是所有的模式都加入了一些简化和近似,不可能完整地反映实际大气中各种复杂的现象。模式计算结果是否可用,取决于它与观测资料比较的结果。随着模式应用的深入,这种比较的水平也在提高。例如早期的模拟结果经常是考虑云体的高度或降水量,现在可以用雷达观测资料来检验实际云的高度,用雨量计的资料来检验雨量计算的结果。如果要用模式中计算的各种水成物的数量,那么就需要有直接的水成物观测数据来进

行检验。因此,在发展数值模式时,最需要考虑的问题就是如何检验数值模式计算的结果。如果不考虑对模式计算结果进行检验,只注意发展模式或改进模式计算精度,是不能解决云降水物理问题的。但应当看到,如果能够证明模式计算结果是可信的,模式就可以提供许多有用的信息,那么对云降水物理过程的研究和对人工影响天气作业效果的检验都是非常有用的。为了使云数值模式能够尽可能真实地反映实际云和降水过程发生、发展的情况,模式要在尽量符合云外部条件的基础上进行运行计算。目前普遍使用的云降水模式都是建立在对云微物理过程了解的基础上,对云内各种微物理过程进行相当详细的描述;模式中有关云动力学结构是建立在流体力学关系的基础上,并得到普遍认同;现在比较困难的是处理那些有关的边界条件和初始条件。例如,对流云模式大都在一个相对简单的边界条件下进行计算,或假定某种固定的周围边界,或利用中尺度模式的输出作为边界条件,而且下垫面的边界条件多假定为是均匀的,初始条件则考虑其最初对流是如何启动的,即在热力或动力条件上加上某种扰动来启动对流。显然,在这种条件下,模式很难模拟

实际大气中发生的各种复杂情况。前面已经提到,造成气块上升的垂直运动和被抬升气块中水汽的含量是决定云体产生和发展的关键因子。自然条件下,下垫面的非均匀会使对流在什么时间、地点产生,不同的对流体是发展还是消散等问题对水成物的生消都有重要的控制作用。在数值模拟计算时,这些因素都将通过初始条件和边界条件来影响云模式的计算结果。因此,对流云模式需要嵌套在细网格的中尺度模式中,由中尺度模式来提供进入云模式边界的水汽场和速度场,还要考虑下垫面的非均匀性,因为它可能会造成非均匀的热力场和水汽场,进而影响到垂直速度场的分布。对于层状云模式,真正影响降水分布的是层状云中的对流泡,而对流泡也是由于云区动力和水汽场的非均匀造成的。

为了增加人工影响天气工作的科学性和效果,还有许多基础问题需要重视和研究,如有效的作业工具、科学的效果检验方法等。这些问题已经讨论很多。但有一点必须思考,即在人工影响天气原理方面需要有新的突破,当然这也需要建立在观测新事实的基础上。人们期待着新的理论、新的技术的出现。

## Discussions on Some Weather Modification Issues

Mao Jietai<sup>1)</sup> Zheng Guoguang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

<sup>2)</sup> (China Meteorological Administration, Beijing 100081)

### Abstract

Natural precipitation process can be divided into two stages, i.e., cloud formation stage and precipitation formation stage. Although weather modification can affect the precipitation formation stage, the key factors dominating rainfall are the lifting movement which induces cloud formation and the water vapor content in the lifting air mass. Choice on the cloud seeding location and time in weather modification depends on if the operation can benefit the lifting movement. Thus, as measurements of macro and micro physics conditions are strengthened, measurements on the lifting movement and the water vapor in the lifting air mass should be greatly strengthened as well. At the same time, numerical simulation research should consider dynamic fields and water vapor fields, which control the development of the rainfall system.

**Key words:** weather modification; cloud micro physics; precipitation process