

以色列、德国的人工影响天气现状考察

曹学成 张光连

马培民

(北京市气象局, 100081)

(气科院, 100081)

北京市人工影响天气科学技术考察团由曹学成、张光连、马培民三人组成, 于 1996 年 3 月应邀前往以色列、德国, 进行了为期 20 天的考察和技术交流, 现分别将以色列、德国的人工影响天气现状作一简要介绍。

1 以色列

1.1 概况

以色列建国于 1948 年。国土面积约 15 万平方公里, 由于地处干旱地区, 除北部加利列湖(又名太巴列湖, 基涅列湖)流域的年雨量在 400 至 800mm 以外, 其他地区年雨量均较低。特拉维夫至耶路撒冷一线以南更迅速降至 100mm 以下。水资源问题成为工农业发展的严重障碍。1949 年即在政府投资支持下, 由 J. Neumann 和 A. Gagin 等教授组织进行了人工增雨试验。几年的试验结果显示降雨有所增加。

在五十年代盛行的严格的统计检验潮流影响下, 以色列组织了随机作业的人工增雨试验计划, 即所谓的 Israel-I。试验区选在北部地区, 时段选在冬季, 10 月至次年 4 月, 以期增加流入加利列湖的迳流。以色列属地中海气候, 5—10 月初几乎无云, 降雨集中在冬季。

Israel-I 开始于 1960/1961 年冬, 结束于 1966/1967 年冬。统计结果表明增雨在 15% 以上, 显著度水平优于 1%。在理论估计影响的最大区域, 增雨量在 23% 以上。同期进行的物理检验也支持统计检验得到的增雨结论。

在 Israel-I 成功的鼓舞下, 1969 至 1975 年又组织实施了扩大的试验计划——Israel-II。这时加利列湖的集水区已全纳入以色列的控制之下, 因而北部试验区东移, 以使所增降水全部

迳流进入加利列湖。同时在中部新增加一试验区, 叫做南区, 原北部试验区称为北区。与此同时, 一项庞大的从加利列湖引水到中部的工程也在加紧进行。

统计检验的结果表明增雨量为 -2.5%。虽然从统计学上讲这个减雨量不显著, 仍然引起巨大的震动。把南区和北区分别进行统计检验后发现, 北区仍然为增雨, 增加率为 13%, 显著水平为 0.9%, 南区则为减雨。原因何在? 从而引发了下一轮试验。

Israel-II 结束时, 从加利列湖引水工程已经完成, 而且北区的十几年试验一直是成功的, 于是从 1976 年开始, 北区的试验工作停止, 转为实用性的日常作业。而由南区开始了探索的试验计划——Israel-III。这个试验计划一直持续至今。

以色列的人工增雨试验由政府投资, 由设在水利部门下的人工增雨科学委员会领导。其作业实施由水利系统的国家供水公司(Mekoroth-Israel National Water Supply Company)下属的“电力机械服务公司”之人工增雨处负责。而相应的研究工作则由耶路撒冷希伯来大学及特拉维夫大学的两个研究组负责。

作业工具主要是飞机, 每年作业季节从航空公司租用。四架小型农业飞机专职作业, 使用碘化银—丙酮溶液燃烧器施放碘化银催化剂。其燃烧器挂在机翼之下, 而储液罐及控制系统则置于机舱之内。播撒速率为 300g(AgI)/h, 发生器燃烧温度为 1000℃, 一个装置可连续作业 4—5 个小时。另有一架飞机主要用来作观测研究工作, 目前使用的是加拿大生产的 Dash-7 (“冲”七)。研究用飞机上装有云物理测量仪器,

除宏观测量仪器(如:温度、湿度仪等)外,还装有美国 PMS 公司的云粒子测量系统。测量探头有两个,一个是 FSSP-100,用以测量云滴大小及浓度,另一个是 OAP-2D-C,用以测量冰晶的形态、大小及浓度。记录系统原为 DAS-2D-64,现已更新为输入计算机中进行处理、显示和记录。

作业指挥中心位于特拉维夫附近的 Ben Gurion 国际机场,配备有雷达(WSR-88,美国新近生产并全国布网的多普勒雷达),气象卫星接收系统,高频和甚高频通讯及数据传输系统,并有专线从气象部门接收气象数据及预报产品。

由于其试验及作业目标区是固定的,而且降雨系统的来向及云系的移向也基本固定(由西部地中海移向内陆),因而其作业航线也是固定的,基本上是沿西海岸线飞行。但北区自 1969 年起目标区东移,因而航线也东移 20—30 公里。

作业飞行时,作业及研究飞机仅和增雨指挥中心联络,飞机的位置由机载 GPS(全球定位系统)确定,其数据通过全国移动通讯网(由 Motorola 公司经营)传回指挥中心。送入计算机后,可与雷达资料、天气图资料、卫星资料等叠加显示在大屏幕监视器上。

每年增雨运行费为 200 万美元,可增加蓄水 1—2 亿立方米。

1.2 研究工作

1.2.1 效果检验

为消除云系结构的时空不均一性及多年的气候性变化的影响,采用了随机交叉作业方式,用双比法分析。从而在 Israel-1 中获得了令国际科学界认可的增雨系统效果。

但自北区改为日常生产性作业后,只留下很小一块对比区,且无交叉随机作业,统计检验的结果就不像以前那么强了。特别是近年来增雨率的下降更引起人们的忧虑。对此,他们从多方面进行了探索。

南北区分别统计的结果揭示了南北两区天气、气候条件存在着巨大差异,需分别对待。对

比区的略有下降,他们不但从降雨量上进行分析,还从水文资料——径流量、湖面水位、地下水等多方面进行了分析。初步显示出气候背景条件发生变化的迹象,这些都正在进一步探索中。

1.2.2 云物理研究

对南区的效果不佳,他们因而进行了多方面的研究工作。

希伯来大学的研究发现,冷空气南下时在地中海南面形成的切变线的位置影响很大,偏南时,北区的增雨率增大,南区的增雨率也高;切变线偏北时,北区的增雨率虽也是正的,但量值减小,而南区的增雨率变为负值或为“零”。

其物理解释是:切变线以南的西南气流从非洲北部及西奈一带吹来,携带了大量可起冰核作用的沙尘粒子,从而使碘化银播撒可能造成过度催化作用,导致不增雨甚至减雨。为此他们在一些站布置了冰粒观测,多年的地面观测表明,南风或西南风时冰核浓度剧增,这对其提出的解释是一个有力的支持。但他们用的是滤膜法,虽然采用了多种措施以保障其可靠性,如采用孔径为 0.05 微米的滤膜以保证粒子都积存于表面上而不致进入内部,研制了温度梯度扩散云室精确控制条件,但滤膜法固有的缺点——主要测凝华核化型冰核,使得其测量到的冰核浓度尚不足以解释播碘化银可以造成过量催化。而且也缺乏在空中的观测资料及冰核浓度与冰晶浓度可互相印证的资料。

特拉维夫大学用嵌有云模式的中尺度模式进行了研究。他们发现,在一定条件下,在南区云底播撒的碘化银绝大部分都滞留在低层平移而去,并未进入云中,更谈不上进入过冷区而形成冰晶了。

为克服南区人工增雨这个难题,他们正在探索使用吸湿性焰弹通过利用暖云过程而影响冷云过程的手段实施人工增雨的可能性。

南非所使用的焰弹是 L. Mathews 过去在美国海军研究所研制的烟幕弹的改型,颗粒比较小,峰值直径为 0.5 微米。特拉维夫大学的 Z. Levin 的核化研究表明,吸湿性颗粒的直径

至少应为几个微米或更大。颗粒直径增加十倍,质量将增大千倍。达到同等浓度的粒子数焰弹的用量也将增加千倍,这又成了新的难题。

为推动这方面的工作,两所大学都新研制了成云核(CCN)测量仪器。他们都使用了可精确控制过饱和度的温度梯度扩散云室,所形成的云滴浓度(亦即该饱和度下的成云核浓度)的测量方式有所创新。他们都采用了侧向光照明下的显微摄像机获取微小粒子的丁铎尔效应图象,通过计算机处理可以迅速获得不同过饱和度和下的成云核浓度。其测量准确度较之用一定角度内的总散射光强来估计浓度的方法大大提高了。特拉维夫大学的研究组还在试用把这种仪器设备装在飞机上,以测量成云核浓度随高度的分布。甚至试图用此法测云滴及小冰晶,为克服飞机高速运动带来的云粒子的位移之影响(图象模糊不清),他们使用了一种新型 CCD 摄像头,其采样时间可短至 40 纳秒,亦即,在飞机速度为 100 米/秒时,采样期间内粒子的位移约为 4 微米,用之测冰晶尚可容许这样的误差。问题在于取样面积太小,而且每秒采样次数也仅数十帧。为取得有代表性的样品则需时较长。

希伯来大学的研究还分析了不同地点的雨水中的 Na、Ca 离子的浓度。发现南部地区在受偏南风影响时 Ca 离子浓度升高,高低可相差三倍以上。而受偏西风影响时主要是 Na 离子。可以认为 Ca 离子主要来自北非沙漠,而 Na 离子主要来自海洋。

为了研究降雨的细结构,希伯来大学在雷达测量降水方面作了不少深入的研究工作。由于降水粒子大小的谱分布在把雷达测量的回波强度换算成降水强度时起着举足轻重的作用,他们作了大量的测量工作,计算了不同降水状况时回波强度与降水强度的关系,根据雷达回波强度的水平梯度与有否亮带等特征,由计算机自动识别不同类型的降水,然后用不同的关系式自动换算成降水强度及一定时间的累积降水量。用以色列及澳大利亚达尔文港的雷达资料及降水资料进行过对比分析,发现效果很好。

希伯来大学的研究组还与美国国家航空和

航天局(NASA)合作参与了利用卫星测量热带降水的 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 计划的研究工作,卫星为低轨道(高度 365km),低倾角(35°),星载雷达为工作在 13.8GHz 的相控阵雷达,星下点水平分辨率为 4.3km,高度分辨率为 250 米,扫描宽度为 220km。此外卫星上还装有:①多通道微波辐射计,中心频率为 10.65、19.35、22.235、37.0 及 85.5GHz,其中除 22.235GHz 为单偏振外,其余均为双偏振接收。所以共有九个通道的资料可用。扫描带宽度为 680km;②红外及可见光扫描仪,工作波段为 0.63、1.6、3.75、10.80 及 12.0 微米。扫描带宽度为 720km;③闪电定位系统,利用 0.7774 微米的光感测器测定闪电发生的地点、时间;④云及大地辐射能测量系统(可见光及红外光,0.3—50 微米全波段测量,重点在 0.3—5.0 及 8.0—12.0 微米两段)。利用多种手段判别云区、云的形态、降水的类型,藉以校正测雨雷达测得的回波强度推算降水强度。目前已有美国迈阿密、以色列、澳大利亚的达尔文港、泰国的清迈、台湾等地的雷达站及雨强站(翻斗式雨量计)配合,进行雷达回波强度与雨强的关系方面的研究工作,以便更精确地反演星载雷达获取的资料。

希伯来大学还进行了利用卫星资料反演云顶微结构的工作,利用美国极轨气象卫星上的 AVHRR 系统的多通道资料,根据水相及冰相粒子散射性能以及不同大小粒子散射特性在不同波长时的差异,反演云顶粒子的相态及分布谱及浓度等特征。

两所大学都进行了云模式及中尺度方面的研究工作,各有特色。

在希伯来大学,他们发展了几个方面的模式:其一是大尺度的模式,曾用以研究热带气旋。大气运动模式有三层网格嵌套,海洋有两层网格嵌套。发现当有两个以上热带气旋存在时,其间的互相作用对其运动方向影响很大。1995 年 8 月 24 日在大西洋上曾同时存在不同强度的五个热带气旋。

其云模式最具特色。他们把云粒子分成七

种类型,分别是云雨滴、冰晶、片状、枝星状、雪团、霰及雹和冻滴,每种粒子又按质量线性分成40档大小,这样当粒子由一种状态转变为另一种状态时,所属尺度档不变,对计算提供了某种方便。由于粒子谱按尺度分别计算,计算量大为增加。研究组用自己的DEC公司的Alpha-600工作站计算(主频150MHz),十分钟的云演化过程需计算数小时。

他们在实际观测时发现云滴谱展宽很快,认为滴的增长还有其它过程在起作用,其中重点研究了湍流的作用。云滴在云中上升时并不是直线式的,而是在不同尺度的湍流作用下作曲折运动。因而按平均速度上升到同一高度的水滴实际经历的路径长短及时间长短均差异很大,因而其增长量也会有很大差异。另外,过去在考虑水滴的碰并作用时只考虑其末速之差,因而认为必须有大于50微米直径的滴才能产生碰并过程。但若考虑到小尺度的湍流作用,两个滴可能受到不同方向的力而相向运动,从而在小滴尺度更小些的时候也会发生碰并过程。用模式对这些过程进行了计算,发现这种设想是合理的。

特拉维夫大学进行的云微物理观测发现,以色列的云并不总是大陆性的,云滴浓度虽有时达 600 个/ cm^3 ,但也经常低到只有 $70-80$ 个/ cm^3 。模式研究还揭示冰晶数量多少对降水量的影响远小于下部暖云部分云滴谱宽度的影响。此外还发现播云时间对增雨效果的作用十分巨大,在雷达初始回波出现十五分钟左右的时段内播云效果最好,过迟则可能导致减少降水。

2 德国部分

2.1 美因茨 Gutenberg 大学大气物理学院

该学院的云物理学研究工作由 Hans Pruppacher 教授主持,他们既注重理论研究工作,又重视室内实验及外场观测工作。

在物理实验大楼里有约数百平方米的云物理实验室,其核心是一座压、温、湿、风速可调的垂直风洞,工作段可悬浮不同尺度、形态的固

相、液相粒子,藉以研究不同环境条件下粒子的增长、蒸发等过程。由于粒子质量不停地随时间而变,要使粒子总保持在工作段中同一位置上,工作段的风速必须能迅速地调整到相应的下降末速的大小。为达到这个要求,他们采用两台大功率真空泵(每台供电功率近 100kW)抽气来形成工作段所需的气流,而在控制喉管处设计成声速工作状态,改变孔径大小即可直接改变流量,亦即工作段的流速,而且这个影响是以声速传播到工作段的。从而可以手动或自动方式非常迅速地调整工作段的风速,以使被实验的粒子可以稳定地自由悬浮在气流中,其增长或蒸发等过程和自然条件十分接近,所得结果更加科学、可靠。

为说明这一点,Pruppacher 教授讲了一个实验结果。为了研究自然界气溶胶的循环和水份的循环,云蒸发后新形成的气溶胶粒子的多寡就是一个重要的因子。法国科学家 Dessens 通过实验提出,一个水滴蒸发时可以形成若干个气溶胶粒子,因而多年来云被当作气溶胶粒子的增殖源对待,并用在全球气候模式中计算未来的云量以及引发的气候变化。但 Pruppacher 的自由悬浮滴蒸发过程实验则表明一个滴蒸发后只形成一个气溶胶粒子。原因在于在 Dessens 的实验中水滴是附着在一根细丝上的,水与丝的附着力使其在蒸发过程中分裂成若干个小滴最后形成多个气溶胶粒子,自由悬浮于大气中的滴在蒸发过程中是不会发生分裂过程,因而也就只形成一个气溶胶粒子。

Pruppacher 教授还谈到他们的外场观测,他们发现,大气中除无机物核、有机物核,还存在大量生物核,如细菌、花粉等,而且不少是具有吸湿活性和成冰活性的,其浓度也相当高。他还指出,不但在德国,在其他国家也有这样的观测结果。

美因茨大学的研究组除进行云物理的基础问题的实验研究外,还进行了大量云化学方面的实验研究,不同气体被云滴、冰晶吸收的过程、气溶胶粒子被云滴和冰晶的清除过程。他们的研究发现,不同化学物质趋于出现(转11页)

(接 46 页)

在滴的不同谱段。为了研究云化学过程,他们配备了专用的原子吸收分光光度计,两台最新型的离子色谱仪分别测量阳离子和阴离子。

德国是个工业国,按欧共体的协议,除种植一些蔬菜、土豆和葡萄外,不得种植粮食作物(如小麦等)。夏季的冰雹对所种植的经济作物影响很大。他们在东南部地区开展了人工防雹试验。由于是非作业季节,我们未去现场进行实地考察,只了解了一些研究工作情况。

大气物理研究所在慕尼黑东南部的 Rosenheim 和 Miesbach 两县有一试验基地,配备有多普勒兼双偏振检测功能的雷达,用以研究及检测冰雹云及防雹效果的监测。1986 年以来用该雷达观测研究冰雹云所形成的雹云概念模式,与 Federer 等在瑞士进行的 Grossversuch N 所得结果相近。由于未实施随机作业,防雹效果检验只能用区域对比法进行。以雷达反射率 40 和 45dBZ 和大于 45dBZ 的日数,求雹日所占的比例。如果防雹有效,则目标区的雹日比例应比对比区低。但是实际统计结果表明,目标区的雹日比例最高,南、北、西南、西北几个对比区的雹日比例

均比目标区低。这表明无法判明防雹作业是否有效。

Stuttgart 大学的 Müller 还组织了另一个防雹试验,用雷达监测雹云的位置及移动,用飞机在云底适当部位播撒碘化银,地面布有测雹板网测雹谱并计算其落地动能,东、南、西、北四个方向均设有面积相当的对比区,以便进行区域对比分析。

研究工作表明,冰雹落地动能以及雹云雷达回波的强度、覆盖面积、回波升高等物理量虽然直接反映雹云的变化,但在评估防雹的实际经济效益时并不能简单地直接使用。因为不同作物、不同生长季节,对同等强度的降雹所遭受的损失可有极大差异。

他们还分析了防雹作业对降水量可能造成的影响,初步分析表明,防雹作业可能减少了目标区的降水量。

防雹工作虽然进行多年,由于防雹日数少,所得结果尚不能作定论。为此,德国、法国、意大利、瑞士、斯洛文尼亚等国从事防雹研究的科学家们联合起来向欧洲议会申请组织一个国际合作性的防雹试验计划,利用各国的优势联合起来攻破防雹研究中的难题。