

文章编号: 1004-4965 (2005) 02-0217-08

机载温、湿度计在飞机人工增雨中的应用

王以琳¹, 刘诗军¹, 刘 文¹, 李茂伦²

(1. 山东省气象科学研究所, 山东 济南 250031; 2. 吉林省人工降雨防雹办公室, 吉林 长春 130062)

摘 要: 为了实时选择达到冰面饱和的区域实施飞机人工增雨作业, 在没有安装 PMS 粒子探测系统的飞机上安装温、湿度计, 把不同温度对应的相对湿度达到冰面饱和的阈值作为是否进行播云的指标。通过不同作业效果的两个例子, 探讨了机载温、湿度计作业指标与作业环境场的关系。给出飞机播云应具备的环境场, 弥补了播云时无定量判据的缺陷。

关 键 词: 人工增雨; 温湿度计; 作业条件

中图分类号: P481

文献标识码: B

1 引 言

为了缓解水资源短缺和抗旱的需要, 我国各省、市、自治区都开展了人工影响天气工作。虽然这项工作已有 50 多年的历史, 但它还是一个年轻的试验性科学。基于我们对云物理的认识和科学技术的发展, 在飞机实施人工增雨作业中, 面临很多不易解决的难题。如在飞机飞临事先预设的作业区后, 由于云层条件的差异有时较难确定哪段云区满足播云条件, 国内外进行了许多机载仪器探测试验。广东在伊尔-12 型飞机上安装机载液态含水量仪 (TPZ-2 型)、云滴取样器 (TPM-1 型) 等仪器对初夏暖云的微物理特征进行观测^[1]。俄罗斯在 AN-30 飞机上安装机载仪器观测大气温度、露点、风、液态水含量、积冰强度等特征量^[2]。美国在播云时使用机载 PMS 粒子测量系统^[3]。“九五”期间中国气象科学研究院研究了机载 PMS 的实时显示系统^[4], 并利用它提出了层状冷云的可播性指标^[5]。由于我国只有几部机载 PMS 粒子测量系统, 难以满足各省飞机播云的需要。在没有机载 PMS 粒子测量系统时, 目前只能凭宏观观测和经验定性判断播云时机。将地面观测的卫星和雷达等资料传输到作业飞机上受时间、分辨率、传输距离和技术手段的影响, 很难准确确定空中的可播区, 指挥飞机实时作业。山东的机载温、湿度计通过标定后在飞行中可以实时显示大气的饱和状况, 在一年多的飞行作业中通过多次试验和调试, 在不同的条件下观测稳定。我们确定的播云指标, 基本满足实时播云的要求。南方低纬度地区多进行季节性强的人工增雨作业, 机载温、湿度计价格较低、易安装, 在作业使用的飞机上安装机载温、湿度计, 对空中实时播云有一定指导意义。

收稿日期: 2003-12-30; 修订日期: 2004-03-03

资助课题: “十五”国家重点科技攻关项目 (2001BA610A-06-011); 科技部社会公益研究专项资金项目 (2001DIB20104);

山东省气象局“人工增雨作业时机选择与主要农作物最佳经济效益的研究”和“2004sdqxz24”资助

作者简介: 王以琳 (1956-), 男, 山东省济南市人, 正研级高级工程师, 主要从事人工影响天气研究。

2 相对湿度与冰面饱和

目前,我国大多数省份在冷云作业中,飞机上没有安装探测冷云过冷水含量、冰粒子浓度等物理量的仪器,对云中是否满足播云条件,是否有增雨潜力了解不多,作业盲目性较大。当温度高于 0℃ 时相对湿度 100 % 大气达到冰面饱和状态,当温度低于 0℃ 时相对湿度小于 100 % 大气可达到冰面饱和状态。我们通过用机载温、湿度计观测云中的饱和状态,把大气达到冰面饱和状态作为冷云播云的重要依据。由于温度与相对湿度一一对应,我们计算了冷云中不同温度达到冰面饱和时的相对湿度阈值,由于篇幅所限,表 1 给出其中几组数值。在飞机上,温度计和湿度计在同一腔体内同步观测,当飞机飞入预先给定的作业区中,相对湿度达到同温度的冰面饱和阈值时,我们认为云层满足冰晶增长条件,可以对云体进行催化。否则,云中难以发生贝吉龙过程。

表 1 温度与冰面饱和相对湿度阈值比较

温度 /	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
冰面饱和相对湿度阈值 / %	100	95.0	90.0	85.2	80.4	75.7	71.1

3 机载温、湿度计

机载温、湿度计采用法国 HS1101 数字化集成温、湿度传感器。具有测量精度高、线性度好及性能稳定等优点。山东使用安-26 飞机播云,温、湿度传感器安装在飞机外右侧挂弹架上。实时采集的信号通过电缆传到飞机内的温、湿度仪数据采集箱,信号处理后进入笔记本电脑。由于温、湿度传感器距飞机机体较近,根据飞机参数对实测温度进行了动力增温订正。该仪器经试用后发现在暖云区其测值与探空的测值相当,在冷云区温度比探空测值偏高,相对湿度比探空测值偏低。究其原因,温、湿度传感器没有经过低温标定。我们在中国气象科学研究院大气探测中心高空实验室用酒精标准温、湿度发生器对我们的温、湿度计进行了订正。订正时在发生器的工作腔中同时放入日本产标准温、湿计探头与 HS1101 数字化集成温、湿度传感器进行比较,以求订正结果更合理。订正后的资料作成查算表供微机查算,查算表按温度 0.1 度,相对湿度 1% 的精度设计(因表格太大,省略)。经过一年的试用,订正的温度和相对湿度较为合理。图 1 给出温、湿度计从资料采集到

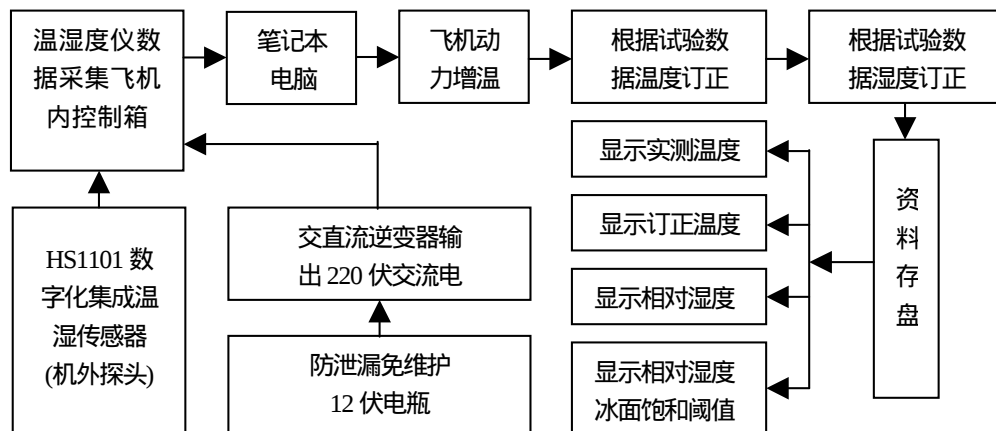


图 1 机载温、湿度观测和资料处理流程

数据订正的流程。机载计算机屏幕同时显示实测温度、订正温度，相对湿度和在订正温度后相对湿度达到冰面饱和时的阈值。当飞机进入作业区后，相对湿度达到冰面饱和阈值时，云层处于冰面饱和状态，满足冰晶增长条件，可实施播云作业。

4 观测实例

4.1 观测实例 1

2002 年 10 月 25 日受东北冷涡影响，西北冷锋移过山东后，700 hPa 以下冷暖空气仍有交汇，地面高压较稳定，位于高压前部的山东省出现一次降雨过程。根据天气系统的变化，2002 年 10 月 25 日 15:41~18:05 我们组织了一次飞机增雨作业。飞机飞行的同时，机载温、湿度计进行了观测。下面用 MM5 中尺度模式计算结果、探空观测和飞机观测资料进行对比分析。

图 2 是 MM5 中尺度模式用 2002 年 10 月 24 日 20 时资料，预报 21 小时得到的 25 日 17 时-15、-20 层相对湿度分布，从图中可以看出在-15 层，鲁西北和半岛有两个高值中心，为相对湿度大于 85 %的冰面饱和区，鲁西南是相对湿度的低值区。在-20 层，半岛东部有相对湿度大于 80 %的冰面饱和区，鲁西南也是相对湿度的低值区，不满足冰晶增长条件。因此，如果选择在-15~-20 层作业，半岛东部是预选的作业区。另外，在-15 和-20 层，鲁东南沿海地区也有的相对湿度分别达到 85 %和 80 %的冰面饱和区，但其区域狭小不宜实施飞行作业。相比之下半岛的作业条件更好些，我们把作业区选择在山东半岛。

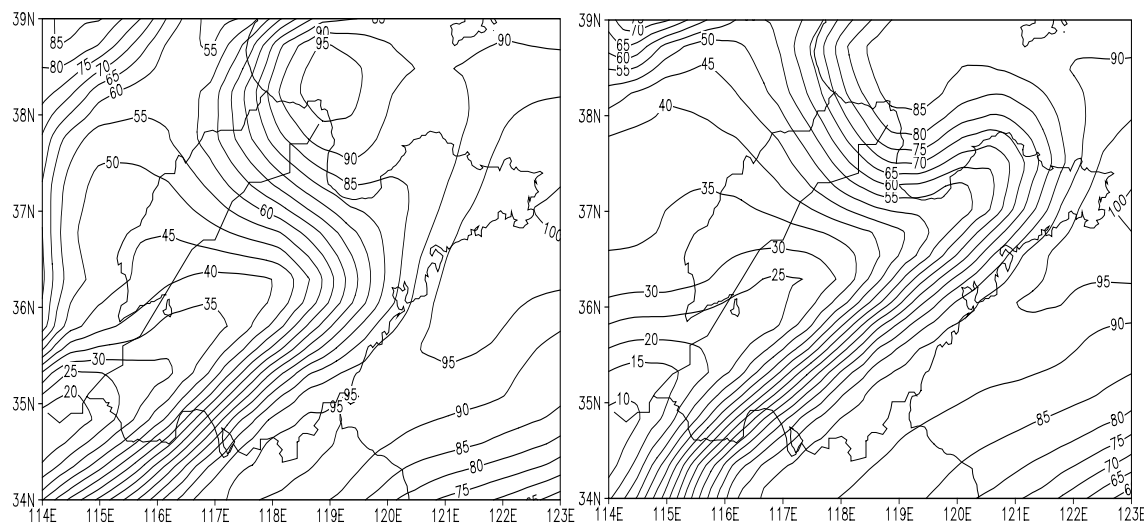


图 2 2002 年 10 月 25 日 17 时-15 (左)、-20 (右)相对湿度分布

图 3 是用青岛和成山头两个探空站 2002 年 10 月 25 日 08 时~26 日 20 时探空资料绘制的冰面饱和差 ($e-E_{\text{冰}}$) 和温度露点差时间剖面图。在冰面饱和差图中，阴影区是达到冰面饱和的层次。青岛 25 日 20 时-20 层以上出现了冰面饱和区，成山头 25 日 20 时-20 层以上也有 $e-E_{\text{冰}} > 0$ 的区域。由于探空时间间隔 12 小时，不能判断这一区域的生消。但用探空观测 (图 3) 可以印证用 MM5 诊断的 25 日 20 时 (图略) 山东半岛东部在-20 层青岛-成山头一带确实存在冰面过饱和区。

在播云时，我们希望空气整层处于准饱和状态，以满足粒子增长和减少其下落时的蒸发。图 3 还给出了青岛和成山头温度露点差时间剖面。在 25 日 08 时~26 日 08 时，青岛上空出现准饱和层 ($T-T_d$

≤ 2), 它向下达到 3 层, 向上延伸到 -10 层, 25 日 20 时在 -10~-30 层温度露点差为 2.5。成山头在 25 日 08 时~20 时也有深厚的准饱和层存在。因此, 综合图 2 和图 3 冰面饱和区和整层准饱和区的时、空分布, 这次作业时机、作业区和作业高度的选择是有依据的, 应有一定的增雨效果。

图 4 是 10 月 25 日 16:30 日本 GMS-5 卫星的水汽云图。由于前期冷锋的影响, 24 日山东已经有降水, 当冷锋东移后水汽带也已东移。云图上有一条明显的水汽输送带穿过山东的中东部地区, 山东处于冷锋尾部的水汽带中, 其中半岛东部图像灰度值较大, 说明高层水汽较多。在黄河中下游是灰度较低的干区不适合作业。由此也可看出作业区选在半岛东部较为合适。

图 5 是飞机在 2002 年 10 月 25 日的作业中用机载温、湿度计测到的温、湿曲线和相应温度的冰面饱和和阈值曲线。从温度曲线看, A 点 (15:55:09) 以前温度几乎维持在 -2.09, 从 A 点温度开始下降。在 B 点 (16:09:15) 温度下降到 -20.62, 飞机保持平飞。在这期间相对湿度曲线有两个谷值, 最低的谷值在 16:00:37, 相对湿度为 37%, 是飞机出云所至。随后相对湿度逐渐增加。

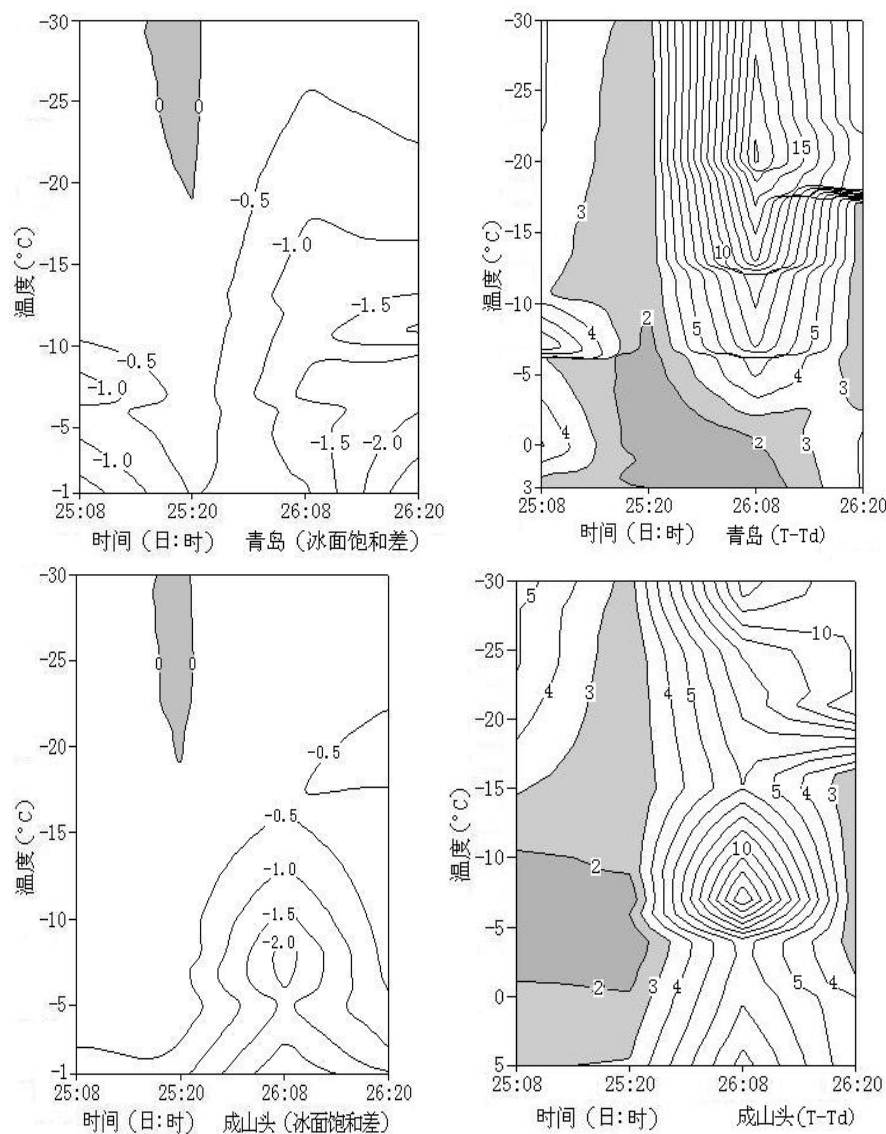


图 3 青岛和成山头冰面饱和和差和温度露点差时间剖面

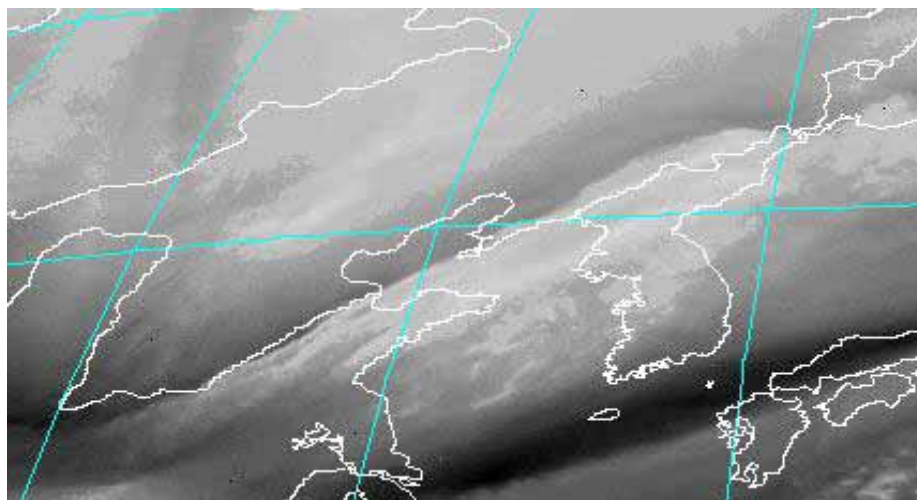


图 4 10 月 25 日 16 : 30 的水汽云图

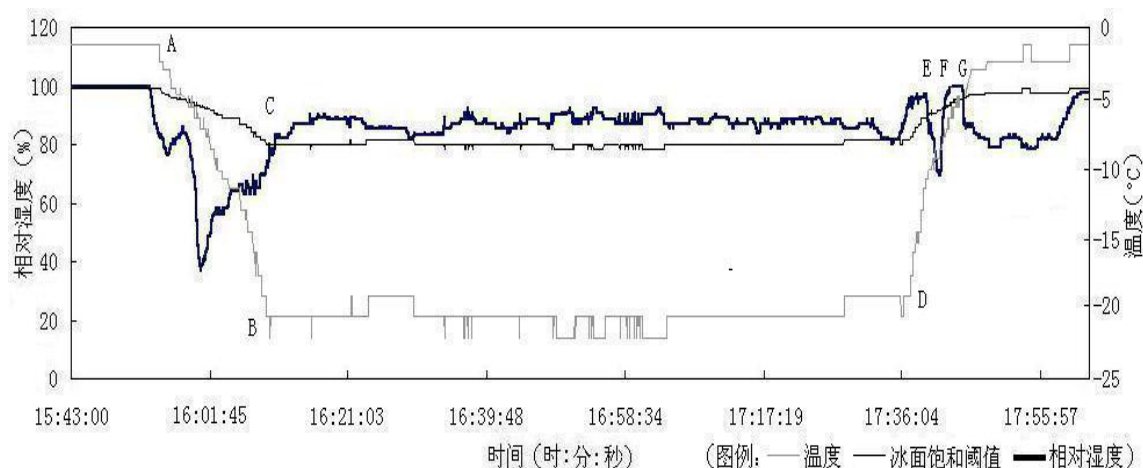


图 5 温度、相对湿度和相应温度的冰面饱和阈值的曲线

在 C 点 (16 : 11 : 20) 相对湿度曲线与冰面饱和阈值曲线相交,这时的温度为 -20.62°C , 相对湿度为 83%, 而冰面饱和阈值为 79.8%, 达到冰面过饱和状态, 飞机开始作业。在以后的飞行中飞机一直处于这种冰面过饱和状态中。当飞行到达 D 点 (17 : 37 : 02) 时, 飞机开始下降, 在 E~F (17 : 39 : 35~17 : 41 : 52) 之间相对湿度下降, 大气处于冰面不饱和状态。在 F~G (17 : 41 : 52~17 : 44 : 59) 之间, 飞机又穿过一片浓密的云区, 相对湿度曲线位于冰面饱和阈值曲线之上。在 G 点之后, 温度高于 -4.32°C , 飞机再也没有进入达到冰面饱和的区域中。图 5 三条曲线的配合较好反映了整个飞行过程中大气饱和程度的变化。对照图 3~5 可以看出 MM5 作出的相对湿度 21 小时预报场与飞机观测事实基本一致。

图 6 给出了 2002 年 10 月 25 日飞机飞行航迹和 25 日 17~22 时 6 小时的雨量。图中 C~G 之间是飞机用碘化银燃烧器播云的区间。图中的 C~G 与图 5 的 C~G 位置对应。作业区的风为 270° , 28 m/s 。由于在 C~G 之间整层大气处于准饱和状态且基本上都达到冰面过饱和状态, 云环境场适宜播云。从图 6 所示播云后 6 小时雨量分析, 在作业区及下风方如沿海地区雨量有不同程度的增加。文登距荣成约 34 km , 荣成的 6 小时降雨量达 10.0 mm 。文登距成山头约 53 km , 成山头 6 小时降雨量最大, 达 10.2 mm , 粗略分析雨量, 作业有一定的效果。



图6 2002年10月25日15:41~18:05飞机飞行航迹和25日17~22时的雨量实况

4.2 观测实例2

受西北冷锋的影响,2002年10月24日山东有一次降水过程。图7是MM5计算2002年10月24日20时-15和-20相对湿度诊断场。在-15图上,相对湿度大于85%的高湿中心位于河北省,山东境内的相对湿度在35%~75%左右。在-20图上只有山东北部较小的地区达到冰面饱和状态。因此从计算结果看,24日20时山东上空基本不具备播云条件。图8(上左)显示24日20时前济南上空没有冰面饱和区,25日02时-20~30层出现冰面饱和区,25日08时冰面饱和区自上向下降到-2,即从-2~30都处于冰面饱和状态,在25日08~20时之间没有探测资料,25日20时济南上空已不存在作业条件了。温度露点差时间剖面图表明(图8上右),24日20时济南上空温度露点差大于5,25日02时-2~9之间 $T-T_d \leq 2$,25日08时温度露点差整层小于1.4,其中2~15之间 $T-T_d \leq 1$,25日20时在4~3之间 $T-T_d \leq 2.1$,这说明25日08时前后济南上空有很好的湿度场。25日济南降雨发生在7~9时,为4.3mm。从图8(下)飞机航迹和24日22时~25日03时6小时雨量分析,这次作业基本没有效果,其主要原因是大气没有给播云提供适宜的环境场。

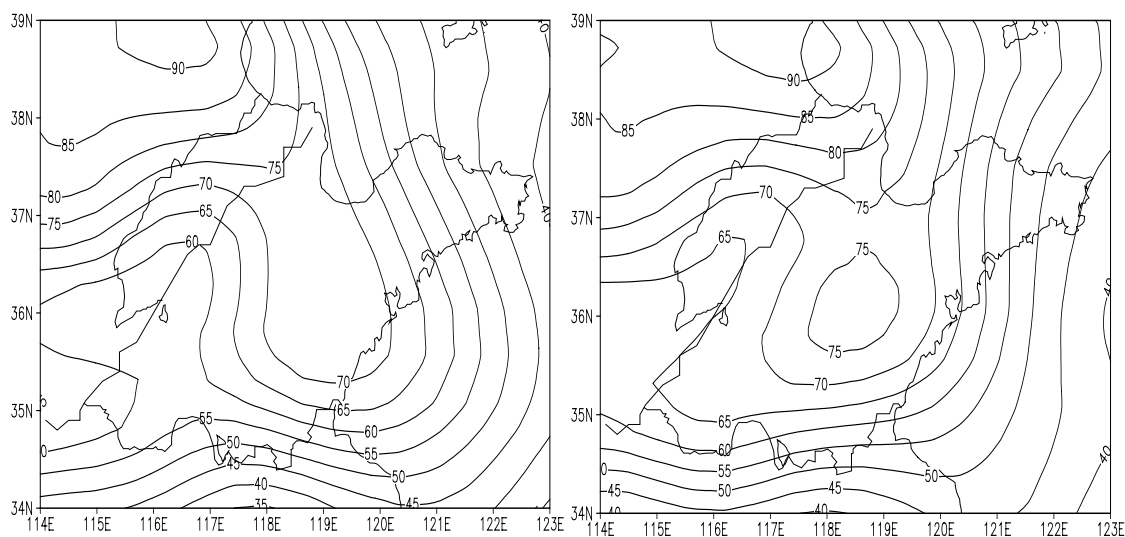


图7 2002年10月24日20时-15 (左)、-20 (右)相对湿度分布

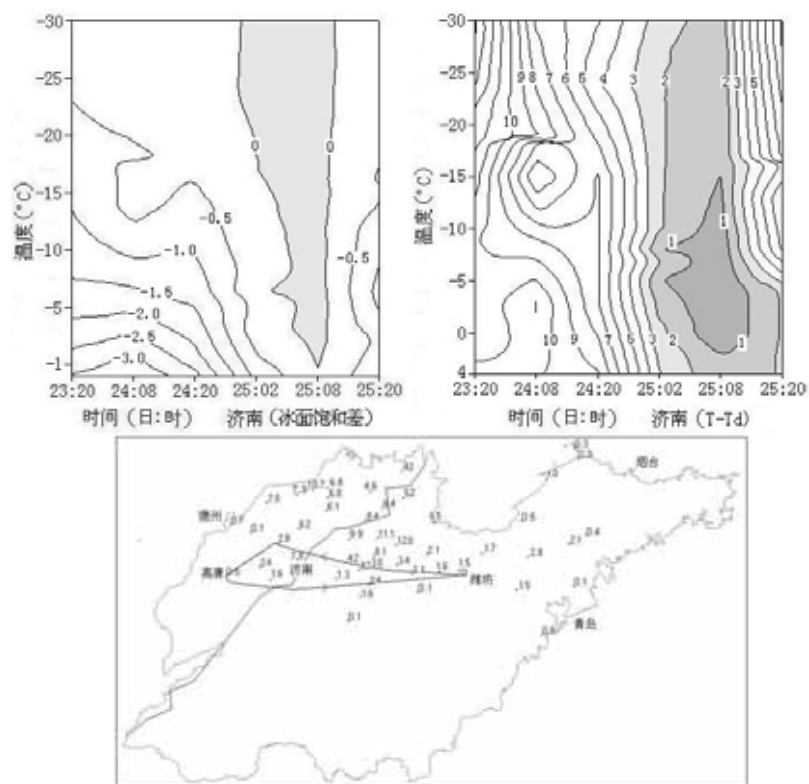


图 8 济南冰面饱和差(上左)、温度露点差(上右)时间剖面,航迹、雨量图(下)

图 9 给出了 24 日飞机飞行时机载温、湿度计观测数据曲线。图中 A 点附近 (21:17:47~21:18:01) 相对湿度为 81%, 冰面饱和阈值 81.3%, 即这 14 秒相对湿度与冰面饱和阈值只相差 0.3%。B 点附近 (21:25:00~21:25:31, 21:25:55~21:26:08) 的 44 秒中相对湿度约为 82%~84%, 冰面饱和阈值为 81.3%; C 点附近 (21:28:42~21:28:59) 相对湿度为 82%, 冰面饱和阈值为 81.3%; D 点附近 (21:44:53~22:04:57) 相对湿度为 77%~99%, 冰面饱和阈值为 76.9%~92.8%, 属冰面过饱和状态。由飞机航速计算, B 点附近达到冰面饱和区域约为 4.3 km, C 点附近达到冰面饱和区域约为 1.6 km, D 点以后达到冰面饱和区域约为 60~90 km。看来对于这种小范围的冰面饱和区, 探空站间距和模式的格距插值都有局限性。飞机人工增雨是在大范围区域作业, 在选择飞机人工增雨可播区时, 要有大范围满足作业条件的云场。这个例子也告诉我们的没有大范围适宜作业的云场, 作业效果不好。

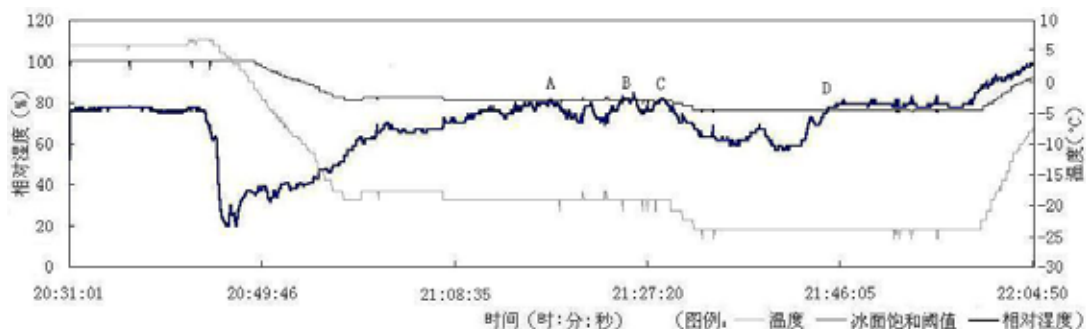


图 9 温度、相对湿度和相应温度的冰面饱和阈值的曲线

5 小 结

(1) 在飞机人工增雨作业中,应有相应的实时作业指标。如果飞机没有安装 PMS 粒子探测系统,可以用机载温度、湿度计确定云区冰面饱和状态的方法,在相对湿度达到冰面饱和阈值后,实施播云作业。

(2) 机载温度、湿度计在使用前一定要进行低温标定,不然在冷云中将引起较大的误差。

(3) 飞机人工增雨可播区要求大气宏观相对湿度场要基本达到冰面饱和状态,要有深厚的准饱和层提供云粒子增长和降水粒子不蒸发的环境场。否则,即使空中有小范围的冰面饱和区,飞机播云后,难以形成地面降水。

(4) 由于湿度计测量时会产生 3 %~5 % 的误差,在实时作业时冰面饱和阈值也可放宽 3 %~5 %,以免失去抗旱增雨的机会。

致 谢: 感谢中国气象科学研究院大气探测中心高空实验室的同志们在仪器订正中付出的辛勤劳动。

参 考 文 献:

- [1] 吴 兑, 何应昌, 陈桂樵, 等. 广东省新丰江流域 4-5 月暖云的微物理特征[J]. 热带气象, 1988, 4 (4) : 341-349.
- [2] KORNEEV V P, STASENKO V N, et al. Field studies the possibility of precipitation enhancement by cloud seeding over the Portugal territory[C]. WMP, Report, No.39. 2003. 51-53.
- [3] TARA L JENSEN, DANIEL W BREED, et al. Observed cloud characteristics during hygroscopic cloud seeding research in the united emirates[C]. WMP, Report, No.39. 2003. 107-110.
- [4] 刘卫国, 李淑日, 马培民. 机载 PMS 粒子测量系统实时处理显示技术系统的研制[J]. 应用气象学报, 2001, 12 (增) : 169-172.
- [5] 陶树旺, 刘卫国, 等. 层状冷云人工增雨可播性识别技术研究[J]. 应用气象学报, 2001, 12 (增) : 14-22.

APPLICATION OF AIRBORNE HYGROTHERMOGRAPH IN ARTIFICIAL PRECIPITATION ENHANCEMENT

WANG Yi-lin¹, LIU Shi-jun¹, LIU Wen¹, LI Mao-lun²

(1. Shandong Meteorological Institute, Ji'nan 250031, China;
2. Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062, China)

Abstract : To select real-time ice-saturation regions to implement aircraft precipitation enhancement operation, hygrometers were installed on board aircraft that were not equipped with the PMS particle measurement systems. The thresholds at which relative humidity reached ice-saturation levels with varying temperatures are used as indexes for determining it is right for cloud-seeding. Two cases of different operation results are used to discuss the relationship between aircraft operation indexes with hygrometers and environment in which the operation is conducted. Environmental conditions for aircraft cloud-seeding are given and drawbacks that seeding is performed without quantitative criteria are made up.

Key words: artificial precipitation; hygrometer; operation conditions