

降水性层状云的微物理特征 及人工增雨催化条件的研究

张连云 冯桂利

(山东省气象科学研究所, 济南 250031)

提 要

根据 27 架次粒子测量系统(PMS)的探测资料, 综合分析了影响山东春、秋季降水云系的微物理特征, 计算了探测层以上云中积分含水量, 并依据综合分析结果对山东春、秋季降水性层状云的人工引晶剂量进行了探讨。

关键词: PMS 资料 综合分析 催化条件 播撒剂量

前 言

1989、1990、1992 年山东省在实施飞机人工增雨作业的同时, 利用了气象科学研究所引进的 PMS 粒子探测仪器结合抗旱增雨作业共获取 27 架次的层状云微物理资料, 飞行探测作业高度在 5500m 左右。该仪器安装在 AN-26 飞机机翼下部, 共有 4 个探头, 其探头名称及量程分别为: ASASP-100 (0.12—3.12 μm); FSSP-100 (0.5—47 μm); OAP 2D-C (25—800 μm); OAP 2D-P (200—6400 μm), 其中 2D-C 和 2D-P 探头能提供二维粒子图象。本文对这些资料进行了系统的综合分析。

1 云水含量

1.1 降水性天气系统及云层含水量特征

山东省在春秋季节, 既受江淮气旋、黄淮气旋等东移时的影响, 又受到频繁出现的冷锋、蒙古气旋、黄河气旋等降水过程的影响。对不同天气系统云中液态含水量(LWC)的分布特征进行分析表明: 冷锋、蒙古气旋、黄河气旋等天气系统云中 LWC 一般为 0.03—0.36 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 江淮气旋、黄淮气旋天气系统

中一般为 0.03—0.25 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 江淮气旋、黄淮气旋天气系统中心相对山东省比较偏南, 穿云探测位于系统云系的北部边缘所致。对冷锋云带的连续探测表明, 锋后云中基本没有过冷却水, 在地面冷锋锋线附近处的窄雨带中过冷却水最为丰富, 具有较好的人工催化条件。

不仅不同天气系统云中的微物理量差异很大, 即使在同一云团中由于对流泡的存在, 其微物理量也表现出较大的起伏特征。由云中的观测资料可证实, 穿云航线上有一段一段的云水含量高值区, 含水量大于 0.05 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的水平连续尺度一般为 10—204km 之间, 平均为 39km; 含水量大于 0.1 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的航线长度在 5—47km。飞行层的温度在 -5 $^{\circ}\text{C}$ —15 $^{\circ}\text{C}$ 范围内。

对所取资料的统计分析得出, 液态含水量最大值为 0.36 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值为 0.057 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。与国内外一些地区观测情况进行比较(见表 1)可看出, 山东省层状云 LWC 略高于河北省, 云滴分布特征为大陆性和海洋性共同影响, 但主要表现为大陆性层云特征。

统计分析还表明,观测到最大云水含量大于 $0.1\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的架次为 95%,大于 $0.2\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的架次为 40%,大于 $0.3\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 架次占

10%。这说明大部分作业云系中含有较丰富的过冷水。

表1 国内外云物理特征参量一览表^[1-3]

	$LWC_{\max}/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$LWC/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$T/^\circ\text{C}$	H/km	$N_c/\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D/\mu\text{m}$
河北	0.49	0.04	-5—-20	4.5—7.0	62	6
新疆	0.11		<-16	2.0	182	7
吉林	0.17		-5—-9	3—6	207	4—9
陕西	0.24		>-12		65	
山东	0.36	0.057	-3—-15	4.0—5.5	58	9.8
英国	0.40		-2—2	1.2	300	6—7
加拿大	0.15		-5	2.5	200	17
纽约	0.21		2.9	1.5	350	9.9

注: LWC_{\max} 液态含水量最大值; T 温度; H 海拔高度; N_c 云滴浓度; D 云滴直径

1.2 过冷指标 SI

法国的云物理飞机在西班牙进行云探测时规定在云中的探测飞行中,观测到 LWC 大于 $0.05\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和冰晶浓度 ($ICECON$) 小于 $0.1 \text{个} \cdot \text{l}^{-1}$ 的航线占总探测航线的百分比作为 SI 值即过冷指标^[4]。这是一个很重要的微物理可播指标, SI 值越大,说明云层人工催化增雨潜力越大。对山东省探测资料的统计得出: $SI=39\%$,与法国的云物理飞机在西班牙观测结果相近。表明在每次作业飞行过程中,只有部分航程上较适宜催化作业。

1.3 探测层以上云层含水量的估算

由于抗旱需要、飞机性能和航行管制等条件所限,飞机很难探测到整个云层的过冷水情况。我们依据 PMS 所提供的降水粒子图象资料来估算飞行层以上过冷水量,即根据霰粒子主要是碰冻过冷却云滴增长的机制,由霰粒的尺度来估算探测层以上垂直云柱中的过冷水积分含量 W_c 。假定 $V \gg W$,则有 $W_c = 4M/(\alpha\pi D_g E)$ 。 M 是霰粒的质量,由霰粒的 $M-D$ 关系求取, α 为碰撞截面修正因子, D_g 为霰粒直径, E 为平均碰冻系数。

根据不同天气系统的飞行探测资料估算了作业层以上云中过冷水积分含量(见表2)。从表2可以看出,作业层以上冷锋前部暖区云带和黄淮气旋系统 W_c 值较大,其作业

高度还应适当提高。

表2 不同天气系统飞行层以上积分含水量表

天气系统	D/mm	$W_c/\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	作业层 $T/^\circ\text{C}$
冷锋前部	0.86	142	-6.7
冷锋附近	0.67	110	-8
黄淮气旋	0.85	140	-5
江淮气旋	0.81	133	-5
蒙古气旋	0.53	88	-10
黄河气旋	0.54	90	-12

2 云中冰晶浓度

对 2D-C 探头取得的冰晶资料统计表明,山东省层状云中冰晶浓度较低,平均值为 $13.9 \text{个} \cdot \text{l}^{-1}$,最大值仅为 $52.6 \text{个} \cdot \text{l}^{-1}$,冰晶平均直径为 $59.3\mu\text{m}$,最大为 $305.1\mu\text{m}$,与国内部分地区的观测结果比较(见表3),明显看出山东省冰晶浓度偏低,云水的自然转化效率较低,应适量播撒冷云催化剂,增加冷云中的冰晶浓度,使更多的云水转化为雨水。

表3 国内部分地区冰晶简况^[1,5]

	吉林	河北	山东
平均浓度/ $\text{个} \cdot \text{l}^{-1}$	26.2	15.6	13.9
最大浓度/ $\text{个} \cdot \text{l}^{-1}$	222	562	52.6
平均直径/ μm	130		59.3

3 云滴谱分析

对云滴资料的统计结果表明,云滴浓度

最大值 $140 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 平均值为 $58 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 直径平均值为 $9.8 \mu\text{m}$ 。

对不同区间 LWC 的云滴平均谱形进行分析, 当 LWC 为 $0.05-0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, $0.1-0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $>0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 3 个区间时, 每个区间各随机抽出 100 个样本经过平均后给出粒子平均谱形, 发现均为单峰谱形, 峰值为 $9.5-12.5 \mu\text{m}$ 之间, 可用二阶 Γ 函数 $N(D) = N_0 D^2 \exp(-\lambda D)$ 来拟合, 且相关系数均达 0.98 以上, 拟合结果见表 4。

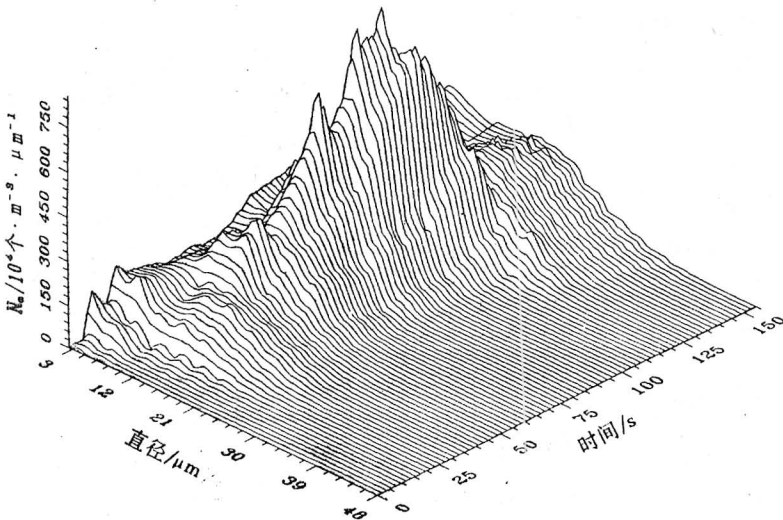
表 4 云滴谱拟合参量

液水含量区间 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$N_0/\text{个} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}^{-1}$	相关系数 r
0.05-0.10	0.534	0.294	0.995
0.10-0.20	0.624	0.278	0.987
>0.20	1.103	0.277	0.989

在 0°C 层高度以上 FSSP-100 探头观测的粒子并非全是液态云滴, 美国 Vali、Hobbs 等人认为: 当该探头观测到大于 $2 \mu\text{m}$ 的粒子总浓度超过 $10 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 看作是云水^[4]。利用云滴粒子谱形能判断粒子的不同模态,

当冰晶和云滴共存时, 粒子谱相对比较离散, 呈现不连续的变化并出现第二峰值甚至更多峰值, 且第二峰值位于 $D \geq 24 \mu\text{m}$ 。当云滴谱基本上呈正态分布时, 说明过冷水比较丰富。

根据云内外粒子谱的不同属性, 可以更准确地判断飞机入云出云的时间和确定云底云顶的高度。利用云滴谱随时间的演变还可以判断云的微物理变化。以 1989 年 9 月 26 日上午穿云探测为例, 飞行高度为 4800 m , 10 时 53-58 分云滴谱随时间的分布见附图, 间隔 2 秒取一个谱(相当水平距离 200 m)。由附图容易看出在 15 秒时飞机正式入云, FSSP-100 探头所测粒子浓度迅速增加, 谱明显拓宽。15-125 秒云滴浓度特别高, 但直径大于 $24 \mu\text{m}$ 的粒子浓度很低, 相应云滴碰并过程较弱, 说明凝结条件较好, 估计存在较好的上升气流, 并且云处于发展初期。125 秒以后, 云滴谱拓宽, 直径大于 $24 \mu\text{m}$ 粒子浓度相应偏高, 这时云中可能存在一定的冰晶繁生条件^[6], 此时应适当减少催化剂的播撒剂量。



附图 云滴谱随时间的演变图

4 人工引晶剂量的探讨

4.1 理论推算

通过以上分析表明,在低于 0°C 的云中存在大量未冻结的过冷却水滴,这时播入人工冰核可以产生大量的冰晶。下面将讨论如何确定催化剂的剂量。

假定云是封闭系统,水滴是球形,其半径为 r_1 ,浓度为 n_1 ,冰晶为六角片状,其圆盘半径为 r_2 ,厚度为 h ,浓度为 n_2 。起始时刻云中水汽密度为水面饱和水汽密度 ρ_{v_1} ,当冰晶出现后,冰晶处于过饱和状态,不断吸收水汽直到耗尽云中所有过冷却水滴为止,达到冰面饱和水汽密度 ρ_{v_i} 。

在过程进行中,云中水汽密度 ρ_v 处于冰晶和水滴饱和水汽密度之间,水汽变化应为:

$$\frac{d\rho_v}{dt} = 4\pi D r_1 (\rho_{v_1} - \rho_v) n_1 + 8r_2 D (\rho_{v_i} - \rho_v) n_2 \quad (\rho_{v_i} \leq \rho_v \leq \rho_{v_1}) \quad (1)$$

式(1)中,右边第一项为过冷却水滴蒸发出来的水份(值大于0),第二项为冰晶从周围空气中吸取的水份(值小于0), D 为水汽分子扩散系数。

对于单个过冷水滴有:

$$\rho_1 r_1 \frac{dr_1}{dt} = D(\rho_v - \rho_{v_1}) \quad (2)$$

对于冰晶而言:

$$\frac{\pi}{4} \rho_i h \frac{dr_2}{dt} = D(\rho_v - \rho_{v_i}) \quad (3)$$

式中 ρ_1 和 ρ_i 分别是云滴和冰晶的密度。由式(1)、(2)、(3)得

$$\frac{d}{dt} [\rho_v + \frac{4\pi}{3} n_1 \rho_1 r_1^3 + \pi h n_2 \rho_i r_2^2] = 0 \quad (4)$$

对式(4)积分,初始条件为:

$$t = 0, r_1 = R_1, r_2 = 0 (r_2 \text{ 实际很小}),$$

$$\rho_v = \rho_{v_1}$$

$$t = t_2, r_1 = 0, r_2 = r_{2\max}$$

$$\rho_v = \rho_{v_i}$$

可得冰晶耗尽可吸取的水分时达到的最大半径:

$$r_{2\max} = \left[\frac{\frac{4}{3} \pi n_1 \rho_1 R_1^3 - (\rho_{v_1} - \rho_{v_i})}{\pi h n_2 \rho_i} \right]^{1/2} \quad (5)$$

对式(2)、(3)变换得

$$\frac{\pi}{2} h \rho_i dr_2 - \rho_1 r_1 dr_1^2 = 2D(\rho_{v_1} - \rho_{v_i}) dt \quad (6)$$

对式(6)积分,边界条件为:

$$t = t_2, r_1 = 0, r_2 = r_{2\max} \quad \rho_v = \rho_{v_i}$$

得 r_2 达到 $r_{2\max}$ 所需的时间为:

$$t_2 = \frac{\frac{1}{2} \pi h \rho_i r_{2\max} + \rho_1 R_1^2}{2D(\rho_{v_1} - \rho_{v_i})} \quad (7)$$

根据山东省层状云的观测结果取温度为 -8°C, $R_1 = 5.0 \mu\text{m}$, 云滴浓度 $n_1 = 58 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 利用式(5)、(7)计算结果见表5。

表5 对不同引晶浓度冰水转化的最大半径和所需时间

引晶浓度/个 · l ⁻¹	最大半径/μm	所需时间/s
5	691.33	2151.76
10	488.84	1521.97
20	345.66	1076.65
30	282.22	879.34
40	244.42	761.76
50	218.62	681.50

在计算过程中假定水滴恰好完全蒸发完毕,且在过程进行中温度不变,通过计算,在这种假设前提下可引起 $r_{2\max}$ 和 t_2 产生 10%—20% 的误差。当每升增加 30 个冰晶时,大约需经 15 分钟即可把过冷却水全部“吃掉”,此时冰粒子直径超过 500 μm。此值基本和山东省观测的雪晶尺度相一致,雪晶在下落过程中通过冰粒子的相互粘连成簇形成更大的雪晶沉降。

4.2 山东降水性层状云的引晶剂量

对山东省 1989—1995 年飞行作业情况统计表明,平均每架次的影响面积为 $0.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 假设影响区内都存在丰富的过冷却水,按增加冰晶 $30 \text{ 个} \cdot \text{l}^{-1}$, 则很容易估算整个影响区内所需催化剂剂量 Q :

$$Q = SHN_i/n$$

影响面积 $S=0.5 \times 10^4 \text{km}^2$, H 为 0°C 层到作业高度, 取 $H=800\text{m}$, $N_i=30$ 个 $\cdot \text{l}^{-1}$, n 为每克 AgI 成冰核率, 取 $n=4-8 \times 10^{13}$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ ^[7], 根据上式可求得整个影响区域内需播撒碘化银 1500—3000g。这对山东省实施飞机人工增雨催化剂的定量撒播问题具有一定的指导和参考意义。

5 小结

5.1 对山东省 27 个架次探测资料统计分析表明: 山东省层状云中过冷却水含量平均为 $0.057\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 有 95% 的架次观测到过冷水含量大于 $0.1\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。云中过冷指标 SI 值为 39%, 过冷水含量大于 $0.05\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的航线距离在 10—204km 之间, 说明山东省春秋降水性层状云具有较好的人工增雨催化潜力。

5.2 通过对不同天气系统云中过冷水的分布特征分析表明, 冷锋前部云带和黄淮气旋云系具有较丰富的过冷却水。利用霰粒反演云中过冷水情况得出, 飞行层以上云中仍存在一定量的过冷水, 过冷却水积分含量在 $88-142\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间。冷锋前部暖区云带和黄淮气旋云系中 W_c 值较大, 对其催化高度还应适当提高。

5.3 山东省层状云中冰晶平均浓度为 13.9 个 $\cdot \text{l}^{-1}$, 冰晶浓度低于北方其他省份。云滴

平均浓度为 58 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$, 直径平均为 $9.8\mu\text{m}$, 云滴谱可较好地用二阶 Γ 函数来拟合, 相关系数优于 0.98, 云滴受大陆性和海洋性共同影响, 但主要表现为大陆性层状云特征。

5.4 根据山东省云物理探测结果, 利用冰晶的扩散凝华增长过程计算了引晶的适宜浓度为 30 个 $\cdot \text{l}^{-1}$, 并估算了山东省每架次的适宜播撒量。

参考文献

- 1 吴志会. 河北省春夏季层状云微物理结构及人工增雨潜力的初步分析. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京: 气象出版社, 1994.
- 2 王成恕. 山东省春秋降水系统的云物理概念特征. 山东气象, 1994, 14(4).
- 3 WMO/TD-No. 537, Proceedings on WMO Workshop on Cloud Microphysics and Application to Global Change, Toronto, Canada, 10-14 August 1992.
- 4 游来光. 利用粒子测量系统研究云物理过程和人工增雨条件. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京: 气象出版社, 1994: 236-249.
- 5 游来光, 陆煜灼, 汪学林. 吉林春季层状冷云的微物理结构. 云雨物理论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1987.
- 6 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京: 气象出版社, 1989: 414.
- 7 鄢大雄. 燃烧 AgI 丙酮溶液产生冰核气溶胶. 气象, 1992, 17(3): 3-8.

Study of the Microphysical Structure and Seedable Conditions of Stratiform Clouds in Spring and Fall

Zhang Lianyun Feng Guili

(Shandong Institute of Meteorology, Jinan 250031)

Abstract

By means of the data from measurements with the particle measuring system (PMS) during 27 flights, a synthetical study of the microphysical structure of stratiform clouds is presented. On a certain assumption, the accumulated water content in the clouds above the observational level is estimated according to the particles image data. Based on synthetical results, the appropriate dose of catalyst to the stratiform clouds in spring and fall is discussed.

Key Words: PMS data synthetical analysis seedable condition catalyst quantity