

# 秋季层状云中高值过冷水区的微物理特征<sup>①</sup>

王 俊 张连云 陈金敏 王 庆 龚佃利

(山东省气象科学研究所, 济南 250031)

## 提 要

利用 11 架次的机载“PMS”资料,分析了山东秋季层状云中高值(大于  $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ )过冷水区的微物理特征:最大过冷水含量为  $0.361 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 84.0%的过冷水含量在  $0.1 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  间,过冷水连续出现的宽度 86.1% 小于 3.0km。雪晶形状以霰粒和小雪粒为主。2 阶  $\Gamma$  函数可以很好地拟合云滴尺度谱,质量谱适合用对数正态函数拟合。

关键词: 过冷水 云滴尺度谱 微物理特征

## 引 言

山东省 1989 年开展飞机人工增雨以来,利用机载四探头粒子测量系统(ASASP、FSSP-100、2D-C、2D-P 探头),对降水性层状云系的微物理结构进行了探测。个例分析<sup>[1,2]</sup>和统计分析<sup>[3]</sup>加深了人们对自然降水过程的了解,促进了人工增雨技术的发展。本文利用 1989、1992 年秋季(9、10 月)共 11 个架次 16 小时的飞行资料,专门分析了大于  $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  的过冷水区的出现范围和频率,讨论了其中的微物理量的分布特征,这对了解过冷水含量在人工增雨中的作用是十分有益的。

## 1 云中微物理量的统计特征

### 1.1 不同云系微物理量的综合特征

根据探测资料分析得出了不同天气系统和部位云中微物理量的一些综合特征(表 1)。可以看出,不同天气系统的降雨云系中都存在大于  $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  的过冷水区,锋面附近的云系中过冷水  $Lwc$  的含量最大,为  $0.361$

$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,过冷水区连续分布的最大宽度  $L$ (飞行速度取  $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )为 7.8km。表中三次锋前暖区的探测结果表明,锋前暖区云系中的  $Lwc$  差别不大且量值较小,过冷水区的最大宽度小于 2km。不同过程的云系中出现的云滴最大浓度为  $433.0 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,与河北<sup>[4]</sup>、陕西<sup>[5]</sup>相比,山东省秋季的层状云系不具有典型的大陆性特征。表 1 中还给出了过冷水区中的雪晶最大浓度和相应的直径,浓度比较大,平均直径偏小。

### 1.2 不同温度下的最大过冷水含量

表 2 给出了不同温度区间内测到的最大过冷水量。 $-6.2^\circ\text{C}$  时  $Lwc$  最大,为  $0.361 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , $-4.5 \sim -11.5^\circ\text{C}$  间的  $Lwc$  比较丰富,基本都大于  $0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。如果以云中过冷水量作为人工增雨催化的技术指标,结合冷云催化剂的特性,则云中适宜催化作业的温度在  $-4.5 \sim -20^\circ\text{C}$ 。从山东现有的 FSSP 资料来看,温度低于  $-15^\circ\text{C}$ ,没有出现大于  $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  的过冷水区,但根据 2D-P 二维图像

<sup>①</sup> 本文得到“九五”国家科技攻关项目(96-020)05 专题和省局“九五”科技重点项目“山东飞机人工增雨条件和催化部位的实时决策系统”课题资助

判断,在  $-14.6^{\circ}\text{C}$  存在尺度比较大 度层内仍存在一定量的过冷水。  
(0.459mm)的霰粒子,表明低于  $-15^{\circ}\text{C}$  的温

表 1 不同云系的宏微观特征

| 日期         | 探测部位 | 最大过冷水量<br>/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | 最大云滴浓度<br>/ $\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 最大雪晶浓度<br>/ $\text{L}^{-1}$ | 雪晶平均直径<br>/ $\text{mm}$ | $L/\text{km}$ |
|------------|------|--|---|-----------------------------|-------------------------|---------------|
| 1989.9.10  | 锋前暖区 | 0.157                                      | 81.2  | 0.995                       | 0.351                   | 1.8           |
| 1989.9.21  | 槽后   | 0.271                                      | 187.5                                       | 1.510                       | 0.512                   | 6.6           |
| 1989.9.23  | 锋前暖区 | 0.130                                      | 33.0  | 2.010                       | 0.475                   |               |
| 1989.9.24  | 锋面附近 | 0.361                                      | 433.0                                       | 3.780                       | 0.689                   | 7.8           |
| 1989.9.25  | 高压边缘 | 0.152                                      | 40.2  | 1.94                        | 0.438                   | 2.0           |
| 1989.9.26  | 黄淮气旋 | 0.164                                      | 46.4  | 3.0                         | 0.598                   | 6.0           |
| 1989.10.10 | 冷涡   | 0.206                                      | 370.0                                       | 13.7                        | 0.793                   | 1.9           |
| 1989.10.14 | 锋前暖区 | 0.138                                      | 107.0                                       | 5.47                        | 0.656                   | 1.8           |
| 1992.9.28  | 锋前暖区 | 0.103                                      | 360.0                                       |                             |                         | 0.8           |

表 2 不同温度下的最大过冷水含量及  $\Gamma$  函数对云滴谱的拟合结果

| 温度/ $^{\circ}\text{C}$                      | -2.9  | -4.6  | -6.2  | -6.6  | -7.1  | -8.0  | -8.7  | -10.8 | -11.2 | -12.2 | -14.8 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Lwc/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$          | 0.170 | 0.286 | 0.361 | 0.309 | 0.271 | 0.237 | 0.224 | 0.165 | 0.206 | 0.126 | 0.135 |
| $N/\text{cm}^{-3}$                          | 75.6  | 90.5  | 108.0 | 101.0 | 118.7 | 88.5  | 99.8  | 235.4 | 215.1 | 95.1  | 165.1 |
| $\gamma$                                    | 0.966 | 0.973 | 0.972 | 0.970 | 0.991 | 0.982 | 0.984 | 0.985 | 0.907 | 0.990 | 0.973 |
| $\lambda/\mu\text{m}^{-1}$                  | 0.306 | 0.272 | 0.243 | 0.251 | 0.260 | 0.268 | 0.286 | 0.367 | 0.427 | 0.30  | 0.484 |
| $N_0/\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ | 10.9  | 10.2  | 6.9   | 7.8   | 12.0  | 9.1   | 14.2  | 47.8  | 104.4 | 10.5  | 119.0 |
| $N_1/\text{cm}^{-3}$                        | 75.1  | 99.5  | 95.2  | 97.6  | 123.9 | 93.6  | 119.6 | 188.8 | 257.5 | 76.3  | 197.8 |

### 1.3 丰水区内的雪晶形状及积分过冷水含量

雪粒子的形状反映了粒子的增长机制和增长过程中的环境条件,某一高度层的雪粒子形状除与这一层的微物理量有关外,主要受粒子所经历高度层中的微物理量的影响,因此根据某一高度层雪晶的特性可以反演其上高度层的环境特性。我们统计了过冷水高值区中不同雪晶形状出现的频率,结果为:霰粒出现的频率为 45.7%,小雪粒出现的频率为 44.3%,枝、针状出现的频率最小,仅为 10.0%。根据霰粒尺度可以估算探测高度以上的高度层内的积分过冷水含量。根据碰冻(淞附)增长方程,在粒子的下落速度远大于上升气流的层状云中( $V \gg W$ ),可得出以下

简化公式:  $\overline{Lwc} \cdot H = \frac{4M}{a \cdot \pi \cdot D_g^2 \cdot \bar{E}}$ 。式中  $\overline{Lwc}$  为观测层以上云中的平均过冷水含量,

$H$  为过冷水层厚度,  $M$  为观测到的霰粒质量(含直径小于 1mm 的米雪),  $D_g$  为霰粒直径,  $\bar{E}$  为平均碰冻系数,  $a$  为碰冻截面修正因子,对圆粒状霰粒  $a$  取 0.5。表 3 是几次典型个例的估算结果。可以看出,在作业高度以上,仍存在大量的积分过冷水量。表中后面 3 次作业层温度偏高,为了提高 AgI 的成核率,作业高度可以适当提高一些。

表 3 飞行高度以上层的积分过冷水含量

| 日期         | 霰粒直径<br>/ $\text{mm}$ | 飞行层温度<br>/ $^{\circ}\text{C}$ | 积分含水量<br>/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ |
|------------|-----------------------|-------------------------------|---|
| 1989.10.10 | 0.737                 | -10.8                         | 120                                       |
|            | 0.459                 | -14.6                         | 75  |
| 1989.10.14 | 0.590                 | -5.5                          | 96  |
| 1989.9.24  | 0.689                 | -6.5                          | 112                                       |
| 1989.9.26  | 0.525                 | -4.4                          | 86  |

### 1.4 过冷水的分级分布

统计各个架次的飞行资料,大于  $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  的过冷水总计出现的时间为 24.3 分

钟,占总平均飞行时间的3.1%。为了进一步分析过冷水的分布特征,我们统计了过冷水的分级分布频率和过冷水区宽度的分级分布频率,结果表明:65.7%的过冷水含量在 $0.1 \sim 0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $0.15 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 间占18.3%,大于 $0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的过冷水出现的频率很小,仅占1.5%。过冷水连续出现的宽度,70.7%小于1.5km(飞机航速取 $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $1.5 \sim 3.0 \text{ km}$ 的占15.4%,大于6km的宽度出现的频率为6.9%。与其它文献<sup>[6]</sup>相比,过冷水出现的宽度和含量偏小,主要原因可能是飞行高度受航管部位调配,每次飞行不一定都处于云中最大过冷水区。

## 2 水平分布

图1(a,b)是1989年9月24日和1989年10月10日两个个例的过冷水丰水区中微物理量的水平分布。9月24日的 $L_{wc}$ 最大为 $0.361 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,飞行高度4450m,温度 $-6.5^\circ\text{C}$ ;10月10日的 $L_{wc}$ 最大为 $0.21 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,飞行高度4000m,温度 $-11.2^\circ\text{C}$ 。

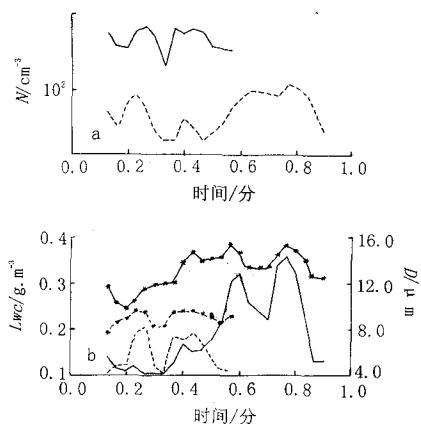


图1 1989年9月24日和10月10日云中高值过冷水的水平分布

飞行速度 $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , a图中虚线、实线分别是24日和10日云滴的浓度分布。b图中—、\*是24日的 $L_{wc}$ 和云滴平均直径的水平分布,---、\*是10日的 $L_{wc}$ 和云滴平均直径的水平分布

由图1可见,即使在丰水区,各种微物理

量仍有起伏性变化,但变化的范围要小得多。同时,不同的天气过程,云系中的微物理量也有差别,10月10日的 $L_{wc}$ 较小,但云滴浓度大( $>100 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),粒子平均直径较小( $<10 \mu\text{m}$ );9月24日的 $L_{wc}$ 大,但云滴浓度低( $<100 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),平均直径大( $>10 \mu\text{m}$ )。从碰并效率来看,9月24日更利于降水粒子的淞附增长。

另外,两次丰水区的形成机制也是不同的,9月24日的丰水区位于锋前的窄云带内,10月10日的丰水区是在锋后的强对流泡内测到的。

## 3 云滴谱的参数化

任取112份云滴尺度谱资料,用2阶 $\Gamma$ 函数 $N(D) = N_0 D^2 \exp(-\lambda D)$ 进行拟合,结果表明:相关系数 $\gamma$ 小于0.95的仅占2.68%, $\gamma$ 在0.95和0.97之间的占14.28%, $\gamma$ 大于0.97的占83.04%。参数 $N_0$ 的取值差别较大,相差两个量级,参数 $\lambda$ 在 $0.2 \sim 0.5$ 间,且98%在 $0.2 \sim 0.4$ 间。显然,大于 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的过冷水区中的云粒子尺度谱可用2阶 $\Gamma$ 函数很好地拟合。

表2中还给出了不同温度下对云滴尺度谱的拟合结果,除 $-11.2^\circ\text{C}$ 的相关系数较小外,其余的相关系数都大于0.95。利用拟合公式计算的云滴浓度( $N_1$ )接近实测浓度( $N$ )。

粒子质量谱基本为单峰谱,峰值直径在 $21.5 \mu\text{m}$ 左右,采用对数正态函数 $N(D) = N_m D^2 \exp[-a(D - D_m)]$ 拟合,相关系数大于0.8的占56.3%。 $a$ 在 $0.0066 \sim 0.0309$ 间, $0.010 \sim 0.016$ 间占62.5%。

## 4 结论

资料分析表明,降水性层状云中在温度大于 $-15^\circ\text{C}$ 的范围内存在高值(大于 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ )过冷水区,84.0%的过冷水含量在 $0.1 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 间,这比同温度下水面饱和与冰面饱和水汽压差产生的水汽密度高一个

量级,十分有利于贝吉隆过程。但高值过冷水含量出现的频率很低(3.1%),过冷水连续存在的宽度86.1%小于3km,这不利于冰晶的连续增长。过冷水的这一分布特点对人工增雨的航线设计和催化剂的定量播撒技术提出了更高的要求。

### 参考文献

- 1 王成恕,胡志晋,游来光.华北地区锋面云面和降水个例研究.气象学报,1995,53(增刊).
- 2 陈文选,王俊,刘文.一次冷涡过程降水的微物理机制研究.应用气象学报,1999,10(2).
- 3 张连云,冯桂利.降水性层状云的微物理特征及人工增雨催化条件的研究.气象,1997,23(5).
- 4 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.
- 5 陈君寒,刘芳.降水性层状云系的微物理结构特征及人工可播性研究.陕北地区人工影响天气研究论文集.北京:气象出版社,1996.
- 6 陈越,马培民,游来光.飞机积冰环境下的液态水含量及滴谱个例研究.气象,1989,15(4).

## The Microphysical Characteristics of High Supercooled Water Area in Stratiform Cloud of Autumn

Wang Jun Zhang Lianyun Chen Jinmin Wang Qing Gong Dianli

(Shandong Research Institute of Meteorology, Jinan 250031)

### Abstract

The microphysical characteristics in high supercooled water area (higher than  $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) in autumn's stratiform cloud over Shandong were analyzed by means of the data from measurements with the particle measuring system (PMS) during 11 flights. The maximum water content is  $0.36 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 84.0% of supercooled water contents is between 0.1 and  $0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 86.1% of continual distribution width of supercooled water is less than 3km. The shapes of snow crystals mainly is graupel and smaller snow crystals. The cloud droplet scale spectrum can be fitted best by two-order  $\Gamma$  function, and content spectrum can be fitted by log-normal function.

**Key Words:** supercooled water cloud droplet scale spectrum microphysical characteristics