

文章编号: 1000-2022(2005)06-0787-07

## 延安层状云暖层中水凝物粒子的谱分布

王扬锋<sup>1,2</sup>, 雷恒池<sup>2</sup>,  
吴玉霞<sup>2</sup>, 肖稳安<sup>1</sup>, 张晓庆<sup>2</sup>

(1 南京信息工程大学 电子工程系, 江苏 南京 210044

2 中国科学院 大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:**分析了 2003 年 9 月延安上空机载 PMS 探测的层状云资料, 发现延安层状云暖层中水凝物粒子的谱分布可以用一种形式的分布密度函数来表示。用这种函数拟合小云滴、大云滴和雨滴的谱分布, 拟合结果与观测的谱分布较为一致, 其特征值相关系数大于 0.945, 拟合出的平均直径、均方直径、均立方直径以及浓度与观测值也较接近, 其相对误差小, 拟合谱能表现出谱型特征。

**关键词:**层状云; 暖层粒子谱; 误差分析

**中图分类号:** P426.52 **文献标识码:** A

层状云是北方地区春秋季节的重要降水云系, 是目前人工影响天气作业和研究的主要对象。滴谱是云的微观主要特征, 滴谱的观测研究是云和降水微物理学研究的重要方面, 对进一步了解自然降水的微物理过程、人工降水资源条件和人工催化的效果检验等方面的研究有重要的意义。

文献 [1] 把层状性降水云模式和平面分层的矢量微波辐射传输模式相结合, 考察了层状云降水过程和降水粒子不同滴谱分布对微波辐射传输的影响。汪宏七等<sup>[2]</sup>研究了水云滴谱变化对云光学和辐射性质的影响, 说明了不同谱分布对微波辐射传输的重要意义, 郭学良<sup>[3]</sup>用层状云雨滴分档模式较好地模拟了降水过程中空中粒子的周期变化。云中水滴的大小分布, 从凝结核开始到雨滴, 在大量资料的平均特征上是连续分布的<sup>[4]</sup>。而它的变化范围极广, 在尺度上从  $10^{-1}$  到  $10^3$  m, 相差 4 个量级; 在浓度上从  $10^{-1}$  个 /  $m^3$  到  $10^9 \sim 10^{10}$  个 /  $m^3$ , 相差 10 ~ 11 个量级。20 世纪 40 年代以来, 云物理研究有了较大的发展, 对云和降水进行了大量系统的观测研究。我国于 20 世纪 60 年代通过大量的高山、地面和空中云观测取得了许多第一手观测资料, 但观测仪器多用惯性捕获原理, 所取得的资料需用高倍数显微镜读数, 有一定局限性。目前使用先进的机载粒子测量系统 (PMS) 能连续地测量云中水凝物粒子谱 (这里指小云滴、大云滴和雨滴) 分布。本文以 PMS 实测的滴谱资料为输入量, 用公式  $N(r) = m r^j \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  拟合了暖云中水凝物粒子谱。试验表明, 用此函数拟合的谱特征量相对误差小, 与

收稿日期: 2004-03-09 改回日期: 2004-09-16

基金项目: 国家科技部 西部开发科技行动 重大攻关项目 (40333033)

作者简介: 王扬锋 (1977-), 男, 山东聊城人, 硕士, 研究方向: 云降水物理. E-mail: wyf\_7818@163.com.

观测谱较为接近,具有一定的代表性。

## 1 资料来源及计算方法

### 1.1 资料来源

2003年9月中国科学院大气物理研究所在延安地区的飞行试验观测中,用机载粒子测量系统(PMS)对冷云和暖云进行分层观测,共获得小云滴4542份、大云滴1467份和雨滴650份资料(本文分析暖云的观测结果)。在0层以下层状云暖区观测的云粒子为水凝物(图1)。表1列出了观测时天气状况和取样时间,观测期间天气以蔽光高层云为主,地面在降雨。云粒子探测系统PMS探测云粒子分三个量程测量,分别为2~47 μm(FSSP-100)、25~800 μm(2D-C)、200~6400 μm(2D-P),对应小云滴、大云滴和雨滴。

每次飞行的各个探头取得的样本达几百到几千份,资料具有一定的代表性。本文根据仪器的量程,将直径大于800 μm的粒子称为雨滴,表2给出水凝物粒子谱的平均特征量。

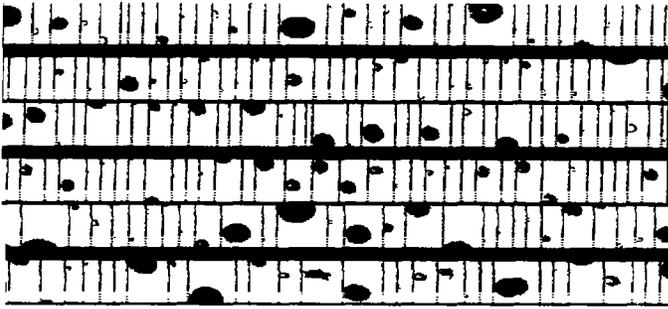


图1 2003年9月17日2100~4600m高度(层状云暖区)云滴部分取样图

Fig. 1 Cloud drops in ages at the height

of 2100~4600m (the warm layer in a stratiform cloud) on September 17, 2003

表1 取样时天气状况

Table 1 Weather condition when sampling

| 观测日期       | 采样时间                    | 云状        | 0层高度/m |
|------------|-------------------------|-----------|--------|
| 2003-09-17 | 13:13 14:14 16:03 16:29 | Fn, A sop | 4700   |
| 2003-09-19 | 09:35 09:45 11:11 11:29 | Fn, A sop | 4545   |
| 2003-09-26 | 13:05 13:23             | Sc, Actra | 5688   |

表2 层状云水凝物粒子谱的特征量和参数值

Table 2 Characteristic values and various parameters of water drops size distribution in stratiform cloud

| 滴的类别           | 算术平均直径/μm | 均方根直径/μm | 均立方根直径/μm | 浓度/(个/m <sup>3</sup> ) | 含水量/(g/m <sup>3</sup> ) |
|----------------|-----------|----------|-----------|------------------------|-------------------------|
| 小云滴(2~47 μm)   | 5.52      | 6.22     | 7.013     | 1.29 × 10 <sup>8</sup> | 0.023                   |
| 大云滴(47~800 μm) | 230.0     | 265.0    | 299.0     | 24800                  | 0.06                    |
| 雨滴(>800 μm)    | 1041.2    | 1186.0   | 1388.9    | 401                    | 0.0951                  |

### 1.2 水凝物粒子谱拟合方法

目前,国内外常用的是  $N(r) = cr^2 \exp(-br)$ , 即赫尔吉安-马逊分布(以下简称 K-M 分

布) 拟合小云滴谱分布, 但是拟合结果与实测资料有较大的偏差; 用  $N(r) = N_0 \exp(-br)$ , 即 M-P 分布拟合雨滴谱<sup>[5]</sup>, 对于稳定降水拟合效果较好, 而对于云中波动性大的降水而言, 偏差较大<sup>[6-9]</sup>。Takeuchi<sup>[10]</sup>和 Ulbrich<sup>[11]</sup>分别用  $N(r) = AN_0 \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  分布拟合观测到的雨滴谱, 与 M-P 谱对比分析发现,  $N(r) = AN_0 \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  分布大大提高了拟合精度。陈宝君等<sup>[12]</sup>对沈阳不同性质降水的雨滴谱分析指出,  $N(r) = AN_0 \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  分布具有普适性, 适合于层状云、积雨云和积层混合云。由于水凝物粒子在浓度分布和尺度分布上量级差别很大, 因而很难找到一个方程可以很好地统一表示连续的水凝物粒子谱。文献[13]曾对层状云的云滴谱和雨滴谱进行了分析, 对小云滴、大云滴和雨滴谱的谱分布用同一种形式的分布函数  $N(r) = AN_0 \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  来拟合, 其中  $N_0$  为总浓度,  $r$  为粒子直径;  $A$  是与总浓度有关的参数, 由经验确定;  $a$ 、 $b$  和  $c$  是与谱有关的参数, 由拟合得到。对于雨滴部分来说,  $b=0$   $c=0$   $A=10^0=1$ , 可以简化为  $N(r) = N_0 \exp(-ar)$ , 即 M-P 分布; 对于大云滴部分, 函数形式为  $N(r) = N_0 \exp(-ar + br^2 - cr^3)$ ; 对于小云滴谱部分  $c=0$  谱函数可以简化成  $N(r) = AN_0 \exp(-ar + br^2)$ 。结果发现, 观测和计算的谱分布吻合得较好, 谱型也相像。但是此研究所用的云滴谱和雨滴谱资料不在同一时间、同一地点, 也就是说, 研究的不是同一云系。

通过试验分析发现, 还可以用函数  $N(r) = m r^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  来表示云中水凝物粒子谱, 此函数有 5 个参数, 其中  $m$  为与谱浓度有较好相关性的参数, 可由拟合确定;  $f$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  是与谱有关的参数, 也由回归拟合得到;  $r$  为粒子直径。对延安本场上空观测的平均谱用  $N(r) = m r^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$ 、 $N(r) = AN_0 \exp(-ar + br^2)$ 、 $N(r) = cr^2 \exp(-br)$  或  $N(r) = N_0 \exp(-br)$  各种不同的谱分布形式来拟合, 以实测的滴谱资料为输入量, 运用非线性最小平方拟合计算程序, 即可得到 3 段粒子谱分布的最佳参数。

## 2 拟合分析

### 2.1 小云滴谱拟合及误差分析

图 2 给出了 3 种函数拟合的小云滴谱分布和实测谱分布。从图中可以看出, 用  $N(r) = m r^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  拟合小云滴谱明显优于  $N(r) = AN_0 \exp(-ar + br^2)$  谱分布和 K-M 谱分布。用 K-M 谱函数拟合值与实测值偏离较大, 在  $r > 13$   $\mu\text{m}$  段, 谱偏离实测值并向下弯曲, 拟合值明显低于实测值, 仅在  $r$  为 2~13  $\mu\text{m}$  段拟合相对好些; 用  $N(r) = AN_0 \exp(-ar + br^2)$

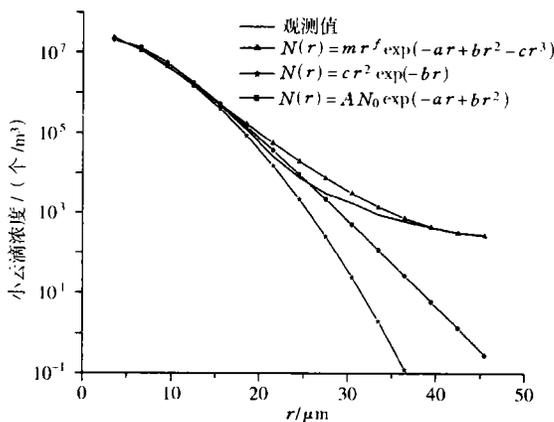


图 2 不同函数拟合的小云滴谱与实测谱的差异

Fig 2 Differences between the spectrum fitted by different functions and the observed spectrum for little cloud drops

拟合比用 K-M 分布函数拟合的谱型有明显的改善, 在 2~26 m 段拟合较好, 但在  $r > 26$  m 段拟合值也低于真实值, 误差较大; 用  $N(r) = m r^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  拟合的谱分布明显地优于上述两种函数拟合的谱分布, 与真实谱型最为接近, 拟合值和观测值的相关系数达 0.99, 相对误差最小。用  $E$  来表示拟合的相对误差,  $E = \frac{\text{实测值} - \text{拟合值}}{\text{实测值}}$ , 3 种不同函数拟合的谱分布的相对误差见表 3。  $E_1, E_2, E_3, E_N$  分别代表平均直径、平均平方直径、平均立方直径和云滴浓度的相对误差。从表 3 看出, 用  $N(r) = m r^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  拟合的谱分布的特征值相对误差比其他两种显著减小, 最小的平均直径误差仅为 0.54%。

表 3 3 种函数拟合小云滴谱的相对误差

| 拟合分布                                   | $E_1$ | $E_2$ | $E_3$ | $E_N$ |
|--|-------|-------|-------|-------|
| $N(r) = cr^2 \exp(-br)$                | 3.9   | 5.1   | 6.1   | 14.6  |
| $N(r) = AN_0 \exp(-ar + br^2)$         | 0.9   | 1.6   | 2.75  | 5.7   |
| $N(r) = m r^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$ | 0.54  | 0.96  | 1.8   | 0.7   |

## 2.2 大云滴谱、雨滴谱拟合及误差分析

图 3 给出了不同函数拟合的大云滴谱和雨滴谱与实测谱的差异。表 4 和表 5 分别给出了大云滴和雨滴不同函数拟合谱的相对误差。由图表可以看出, 函数  $N(r) = cr^2 \exp(-br)$  拟合的大云滴平均直径相对误差为 3.5%, 滴浓度相对误差为 4.0%, 从图 3 可以看出, 拟合值比实测值偏大。函数  $N(r) = AN_0 \exp(-ar + br^2)$  拟合的大云滴谱参数相对误差更大, 平均直径和滴浓度相对误差分别为 11.3%、13.0%, 拟合值比实测值偏小。用  $N(r) = m r^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  来拟合就有明显的改善, 相对误差显著减小, 平均直径和浓度的相对误差分别为 1.1% 和 2.3%, 谱型也较为接近实测谱。

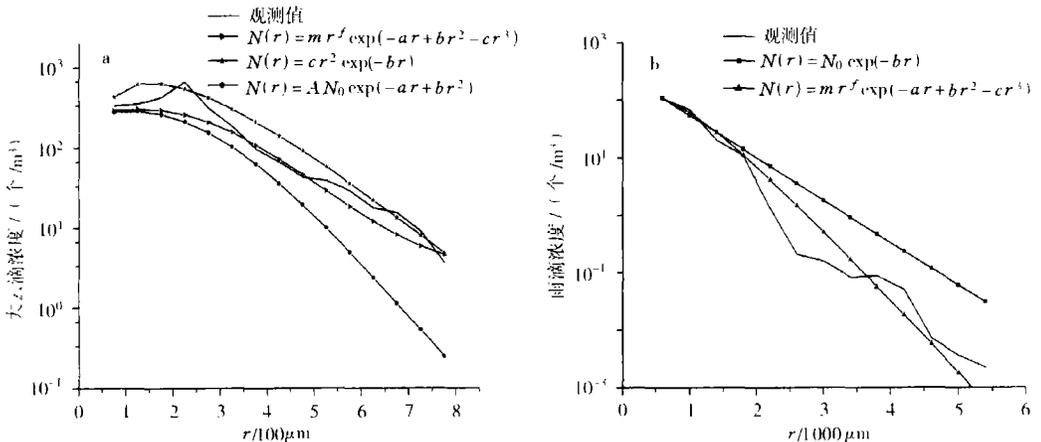


图 3 不同函数拟合的大云滴谱 (a)、雨滴谱 (b) 与实测谱的差异

Fig. 3 Differences between spectra fitted by different functions and the observed spectrum for big cloud drops (a) and raindrops (b)

雨滴谱用  $N(r) = m r^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  来拟合的平均直径相对误差为 4.83%, 滴浓度相对误差为 9.3%, 最大误差不超过 10.0%, 而函数  $N(r) = N_0 \exp(-br)$  拟合的雨滴谱平均直径相对误差为 12.6%, 滴浓度相对误差达 20.2%, 拟合值比实测值大很多。

用公式  $N(r) = cr^2 \exp(-br)$  (或  $N(r) = AN_0 \exp(-ar + br^2)$ ) 和  $N(r) = N_0 \exp(-br)$  分别拟合大云滴和雨滴, 拟合值与实测值偏离较大, 谱型与实测值也有明显的差异。

表 4 3 种函数拟合大云滴谱的相对误差

Table 4 Relative errors of the big cloud drops spectrum simulated by three functions %

| 拟合分布                                 | $E_1$ | $E_2$ | $E_3$ | $E_N$ |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $N(r) = cr^2 \exp(-br)$              | 3.5   | 4.2   | 6.5   | 4.0   |
| $N(r) = N_0 \exp(-ar + br^2)$        | 11.3  | 12.5  | 15.0  | 13.0  |
| $N(r) = m^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$ | 1.1   | 1.4   | 2.8   | 2.3   |

表 5 2 种函数拟合雨滴谱的相对误差

Table 5 Relative errors of the raindrops spectrum simulated by two functions %

| 拟合分布                                 | $E_1$ | $E_2$ | $E_3$ | $E_N$ |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $N(r) = N_0 \exp(-br)$               | 12.6  | 19.3  | 26.0  | 20.2  |
| $N(r) = m^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$ | 4.83  | 6.10  | 8.20  | 9.33  |

### 3 层状云暖区水凝物粒子总谱

根据以上分析, 对延安本场上空的降水粒子用函数  $N(r) = m^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  来拟合云中小云滴、大云滴和雨滴的谱分布比其他函数拟合要好。表 6 和表 7 分别给出了用函数  $N(r) = m^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  拟合的层状云暖层水凝物粒子谱的有关参数值和误差, 无论是直径还是滴浓度, 其相对误差都小于 10.0%。从层状云暖层中小云滴、大云滴和雨滴的观测总谱和拟合总谱 (图 4) 看出, 加入  $f$  参数后拟合的谱分布和观测谱谱型的整体变化趋势较为一致, 而且还能表现出某些局部的起伏变化, 尤其对小云滴和大云滴的谱形起伏变化拟合的效果更好一些, 这说明  $N(r) = m^f \exp(-ar + br^2 - cr^3)$  这一函数形式可以用来拟合层状云暖区中水凝物粒子谱, 即用同一个表达式能表示小云滴、大云滴和雨滴的谱分布。

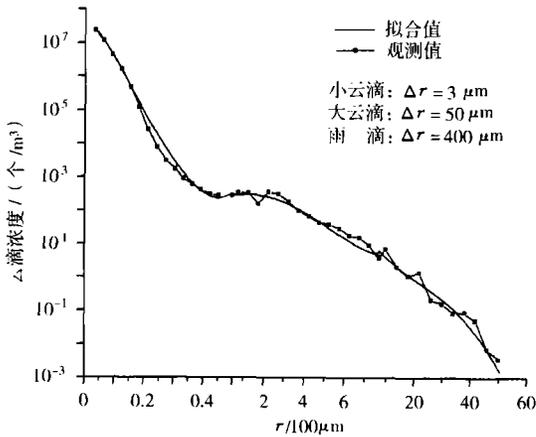


图 4 云中水凝物粒子谱分布

Fig 4 Water drops size distribution in warm stratiform cloud

从图 4 中还可以看到, 降水层状云中小云滴、大云滴和雨滴是共存的, 降水的粒子谱是由

小云滴谱、大云滴谱和雨滴谱组成的, 尽管它们之间的浓度差别较大, 但谱分布是连续的。试验观测资料虽在延安地区取得, 延安秋季层状云降水云系主要为  $A_S$  和北方大部分地区降水云系是一致的, 因此图 4 基本代表北方春秋层状云暖层降水粒子平均状况。

表 6 拟合确定的 3 段滴谱的有关参数

Table 6 Fitting parameters for three kinds of drop size distributions

| 参数  | 小云滴 (2~ 47 m)     | 大云滴 (47~ 800 m)    | 雨滴 (> 800 m)      |
|-----|-------------------|--------------------|-------------------|
| $m$ | 3 102 $10^7$      | 1. 004 $10^3$      | 6 0 $10^1$        |
| $f$ | 9 259 $10^{-1}$   | - 4 579 $10^{-1}$  | - 6 397 $10^{-2}$ |
| $a$ | 3 994 $10^{-1}$   | - 1. 274 $10^{-2}$ | 2 84 $10^{-3}$    |
| $b$ | - 3. 63 $10^{-3}$ | - 4 0 $10^{-5}$    | 6 827 $10^{-7}$   |
| $c$ | - 1. 1 $10^{-4}$  | - 2 537 $10^{-8}$  | 1. 018 $10^{-10}$ |

表 7 3 段滴谱的拟合相对误差和总相对误差

Table 7 Relative errors and gross relative errors of fitting results for three kinds of drop size distributions %

| 特征谱量  | 小云滴  | 大云滴  | 雨滴    | 总相对误差 |
|-------|------|------|-------|-------|
| $E_1$ | 0 54 | 1. 1 | 4. 83 | 0 62  |
| $E_2$ | 0 96 | 1. 4 | 6. 10 | 1 03  |
| $E_3$ | 1 8  | 2 8  | 8. 20 | 5 9   |
| $E_N$ | 0 7  | 2 3  | 9. 3  | 0 7   |

## 4 结 论

(1) 用同一地方降水层状云的暖层滴谱资料, 计算其平均谱, 反映了大气平均状况下的水凝物粒子浓度和直径的相关关系。

(2) 函数  $N(r) = m f \exp(- ar + br^2 - cr^3)$  能同时拟合小云滴谱、大云滴谱和雨滴谱谱分布形式, 用此函数拟合计算出的平均谱与观测的平均谱更为接近, 用此函数拟合的谱特征量比用 K-M、M-P 或  $N(r) = AN_0 \exp(- ar + br^2 - cr^3)$  拟合的谱特征量误差显著降低, 对小云滴和大云滴的拟合谱特征量相对误差均小于 3%, 对雨滴来说, 误差稍大一点, 但也小于 10%。

(3) 在层状云降水中, 小云滴、大云滴和雨滴是共存的, 降水粒子谱是小云滴谱、大云滴谱和雨滴谱组成的, 它们的谱分布是连续的。公式中的参数是在延安地区观测的资料拟合得到的, 延安春秋层状云降水云系主要为  $A_S$  和北方大部分地区降水云系是一致的, 拟合得到的平均谱基本代表北方春秋层状云暖层降水粒子平均状况。

致谢: 陕西省人影中心、延安市人影办为观测试验提供条件, 在此表示感谢。

## 参考文献:

- [ 1 ] 崔哲虎. 层状性降水云的空基微波遥感研究 [ D ]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1999: 49-57.
- [ 2 ] 汪宏七, 赵高祥. 云物理特性对云光学和辐射性质的影响 [ J ]. 应用气象学报, 1996 7( 1 ): 36-44.
- [ 3 ] 郭学良. 层状云降水过程的寸滴分档数值模拟 [ J ]. 大气科学, 1999, 23( 6 ): 745-752.

- [ 4 ] 顾震潮. 云雾降水物理基础 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1980 165-167.
- [ 5 ] Marshall J S, Palmer W M. The distribution of raindrops with size [ J ]. J Meteor 1948, 5( 1): 165-166.
- [ 6 ] Joss J, Gori E G. Shapes of raindrops size distribution [ J ]. J Appl Meteor 1978, 17(7): 1 054-1 061
- [ 7 ] Srivastava R C. Size distribution of raindrops generated by their breakup and coalescence [ J ]. J Atmos Sci 1971, 28( 3): 410-415
- [ 8 ] Carbone R E, Nelson L D. The evolution of raindrop spectra in warm-based convective storms as observed and numerically modeled [ J ]. J Atmos Sci 1978, 35( 12): 2 302-2 314
- [ 9 ] Willis P T. Functional fits to observed drop size distributions and parameterization of rain [ J ]. J Atmos Sci 1984 41(9): 1 648-1 661
- [ 10 ] Takeuchi D M. Characterization of raindrop of size distributions [ R ]. Preprints of Conference Cloud Physics and Atmospheric Electricity, Issaquah Meteor Soc, 1978 154-161
- [ 11 ] Ulbrich C W. Effect of size distribution variations on precipitation parameters determined by dual measurement techniques [ R ]. Preprints of 20th Conf., Radar Meteor Boston, Amer Meteor Soc, 1981 276-281
- [ 12 ] 陈宝君, 李子华, 刘吉成. 三类降水云雨滴谱分布模式 [ J ]. 气象学报, 1998 56(4): 506-512
- [ 13 ] 牛生杰, 何珍珠. 降水性层状云中水凝物粒子的谱分布 [ J ]. 高原气象, 1995 14(1): 114-120

## Size Distributions of the Water Drops in the Warm Layer of Stratiform Clouds in Yan'an

WANG Yang-feng<sup>1, 2</sup>, LEI Heng-chi<sup>2</sup>,  
WU Yuxia<sup>2</sup>, XIAO Wen-an<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoping<sup>2</sup>

( 1 Department of Electronic Engineering NUIST, Nanjing 210044 China

2 Institute of Atmospheric Physics CAS, Beijing 100029 China)

**Abstract** The airborne PMS-detecting data of stratiform clouds in Yan'an in Sep, 2003 are analyzed. It is found that one density distribution function can represent the water drops size distribution in the warm layer of stratiform clouds in Yan'an. The function is used to fit the size distributions of small cloud drops, big cloud drops and raindrops. The fitted spectrum distribution is well matched with the observed one, and the correlation coefficients of their characteristic values are greater than 0.945. The calculated mean diameter, square-root diameter, cubic root diameter and concentration are also close to the observational results and the fitted size distribution is able to reproduce the feature of observed size distribution well.

**Key words** stratiform cloud; particle size distribution; error analysis