

罗俊颀, 贺文彬, 李金辉, 等. 2003 年春季陕西省层状云降水的雨滴谱特征[J]. 气象, 2012, 38(9): 1129-1134.

2003 年春季陕西省层状云降水的雨滴谱特征^{* 1}

罗俊颀¹ 贺文彬¹ 李金辉¹ 严采薰² 陈万奎²

1 陕西省人工影响天气办公室, 西安 710015

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

提 要: 文章给出了陕西省春季(2003 年)层状云降水雨滴谱部分特征, 这些特征与降水天气系统密切相关。降水产生于混合云, 各层系统配置适当, 有较厚冷层云和相接的暖层云, 雨滴数浓度大可达 10^3 m^{-3} , 雨滴谱较宽可达 0.32 cm。反之数浓度较小(10^2 m^{-3}), 谱较窄(0.22 cm)。其中直径 0.1 cm 以下雨滴谱约占总浓度的 80% 以上, 而对雨强的贡献小于 20%。0.1~0.2 cm 雨滴是雨强的主要分量, 它平均占 48%~77%。雨滴谱多数呈非单调下降分布, 三参数分布 $n(D_i) = n_0 D^e e^{-\lambda D}$ 明显优于指数分布 $n(D_i) = n_0 e^{-\lambda D}$ 。

关键词: 春季, 层状云, 雨滴谱, 特征

Characteristics in Size Distribution of Raindrops of Stratiform Precipitation in Spring 2003 of Shaanxi Province

LUO Junjie¹ HE Wenbin¹ LI Jinhui¹ YAN Caifan² CHEN Wankui²

1 Weather Modification Office of Shaanxi Province, Xi'an 710015

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Some features of raindrop spectrum in stratiform clouds in spring 2003 of Shaanxi were observed and analyzed in this paper, which are closely associated with precipitating weather systems. The precipitating mixed clouds with deeper cold and warm cloud layers have an appropriate level configuration, and their raindrop number concentrations are bigger up to 10^3 m^{-3} and the spectra of raindrops are wider up to 0.32 cm. Conversely, the stable clouds have a smaller number concentration (10^2 m^{-3}) and a narrower spectrum width (0.22 cm). The raindrops under 0.1 cm in diameter accounted for more than 80% of the total concentration, while the contribution to rainfall intensity is less than 20%. Actually, the 0.1-0.2 cm across raindrop is a major component of rainfall intensity, which accounted for an average 48%-77%. The majority of raindrops had a non-monotonic decreased spectral distribution, and the three-parameter fitting formula $n(D_i) = n_0 D^e e^{-\lambda D}$ is better than the exponential distribution $n(D_i) = n_0 e^{-\lambda D}$.

Key words: spring, stratiform cloud, spectrum of raindrops, characteristics

引 言

地面降水(雨强、雨量)大小, 不仅包含有天气系统热力、动力、水汽场相互适宜配置信息; 还包含有云降水微物理过程配置信息。地面雨滴谱观测分

析, 意图是科学合理地解读出上述两方面信息, 长时期以来一直是云降水物理观测的重要项目之一^[1]。郑娇恒等^[2]利用 PMS GBPP-100 型雨滴谱仪 M-P 和 Gamma 分布对数浓度、雨强和雷达反射率因子这些特征量的拟合效果分析发现二者在降水较强时差异很小, 在降水较弱时差异较大。张志红等^[3]利

* 国家科技部“西部开发科技行动”重大攻关项目(2001BA901A41)课题资助

2011 年 5 月 13 日收稿; 2012 年 3 月 6 日收修定稿

第一作者: 罗俊颀, 主要从事人工影响天气相关技术开发及应用. Email: rybluo@gmail.com

用地基微波辐射计、多普勒雷达结合卫星及地面雨量计等多种遥感观测资料对北京地区的一次积层混合云降水过程的云液态水和降水的分布及演变特征进行了综合观测分析,发现了应用于人工增雨作业的物理探测方法和指标。石爱丽等^[4]采用滤纸色斑法对河南省层状云降水过程分析发现降水过程的 $Z-I$ 关系式为 $Z = 298.4I^{0.8}$, 雨滴谱分布基本符合 M-P 分布。李铁林等^[5]利用 PMS 粒子测量系统对河南层状云的探测资料,分析了云的微物理结构特征,得出一些人工增雨潜力分析的方法。王晓蕾等^[6]用风廓线雷达探测的降水资料,引入大气垂直运动速度,导出了降水质点下降末速度的功率谱密度分布,最后求出云体中雨滴谱分布。

陕西春季层状云是主要降水云系,特别是透雨过程对农作物生长发育具有十分重要的作用。陕西资源性和工程性缺水兼而有之。开展科学人工增雨,特别是在透雨过程同时进行增雨有十分重要的实用价值。为了深入探测分析春季层状云降水机制、成雨条件,配合飞机探测作业,了解不同降水天气系统的雨滴谱特征,本文通过对 2003 年陕西春季部分观测数据分析得出一些有意义的结果,对于提高人工增雨效益、改进催化方法,具有一定的价值。

1 观测设计

根据陕西省气象局和人工影响天气办公室多年天气分析和飞机探测,春季层状云降水云系多由高空槽东移,中低层适宜动力场、水汽场、温度场配合形成。系统配置适当、降水云系深厚、覆盖陕西全省范围,是人工增雨的主要对象云。因此雨滴谱地面观测点分别由西向东、向北布置在宝鸡、旬邑、西安、渭南、洛川、延安六县市(如图 1 所示)。因旬邑、洛川后期资料读取存在误差,本文不做分析。

取样观测方法采用吸水纸色斑法,读数面积 $28\text{ cm} \times 28\text{ cm}$ 测点设在相应市县气象观测场。这样可方便准确获取降水全过程资料。由于人力、财力限制,采取不等间隔取样;在降水开始时,每 10 分钟取样 1 份,持续 1 小时,第二个、第三个小时,每 30 分钟取样 1 份。3 小时后每 1 小时取样 1 份,直至降雨结束。若空中有飞机探测配合,每 10 分钟取样 1 份,持续 3 小时,每份资料的暴露时间 5~15 秒,视雨滴空间浓度疏密不同而改变,但要求每份吸水纸色斑不少于 200 为限。由于溅散和吸水纸分辨

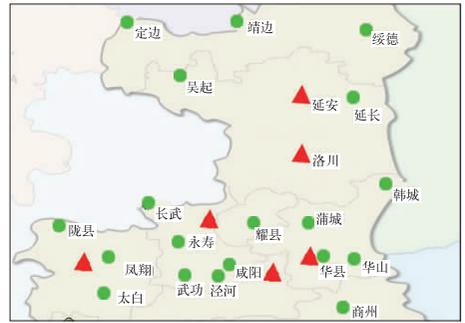


图 1 雨滴谱观测分布图

(▲所示为观测点)

Fig. 1 Station distribution map of raindrop size distribution observation (The triangles showed observation point)

率影响,雨滴直径从 0.05 cm 以上开始读数计算,直径间隔 $\Delta D = 0.02\text{ cm}$,这样就获取了平均直径为 0.06, 0.08, ..., $(0.06 + K_i \Delta D)$ 的雨滴尺度谱 $n(D_i)$ 。

2 观测分析结果

2.1 天气背景

2003 年 4 月 1 日天气过程是一次全省范围的较大降水过程。根据 3 月 31 日 08 时天气资料分析结果:在 500 hPa 河西走廊和高原有西风冷槽东移,槽前锋区明显加强,在 700 hPa 有低涡发展,形成了高中层系统热力、动力、水汽场适宜配置。从地面和卫星云图资料显示,系统云系为高层云和层积云组合,这样配置的云系组合,有利于在主体高层云中激发的冷雨机制形成固态降水粒子,它们下落到层积云中暖层,又可融化成雨滴碰并再增长,还缩短了云下蒸发损失的路径。地面降水自西向东向北扩展,过程雨量西安最大,次为宝鸡和渭南,延安最短。连续降水时间渭南最长,次为宝鸡和西安,延安最小。过程雨量分别占月均雨量的 53.18%、78.14%、37.96% 和 32.93%,属该月重要降水过程,对应的雨滴谱具有较大降水过程代表性(见表 1)。

4 月 5 日的天气过程也是一次覆盖全省的小雨降水过程。天气资料分析结果是:高层也是西风槽东移,但中低层没有低值系统配合,仅有主体高层云存在,云中经冷雨机制形成的固态降水粒子出云后,设有融化再增长的暖云环境,却要经历云下更长的蒸发损耗路径,地面雨量明显小于 4 月 1 日过程;最大降水量出现在渭南,仅 2.7 mm,次为宝鸡、西安,

延安最小,仅 0.9 mm。分别占月均雨量的 4.24%、3.02%、5.86% 和 3.66%。降雨持续时间也明显低

于 4 月 1 日过程(表 1)。

表 1 2003 年 4 月 1 日和 4 月 5 日两次降水过程的特征

Table 1 Two precipitation processes on 1 and 5 April 2003

站名	4 月 1 日过程							4 月 5 日过程						
	Δt_1 /BT	Q_1 /mm	$\frac{Q_1}{Q_4}$ /%	Δt_2 /BT	Q_2 /mm	$\frac{Q_2}{Q_4}$ /%	滴谱 份数	Δt_1 /BT	Q_1 /mm	$\frac{Q_1}{Q_5}$ /%	Δt_2 /BT	Q_2 /mm	$\frac{Q_1}{Q_4}$ /%	滴谱 份数
宝鸡县	22-24 0-10	25.1	53.18	22-24 0-10	25.1	53.18	19	9-11 8-12	2.0	4.24	9-1 8-12	2.0	4.24	18
西安	2-13	33.6	78.14	8-13	7.3	16.98	11	13-20	1.3	3.02	13-20	1.3	3.02	25
渭南	3-20	17.6	37.96	8-20	11.5	24.95	24	15-20	2.7	5.86	15-20	2.7	5.86	11
延安	5-13	8.1	32.93	8-13	7.0	28.46	22	14-16	0.9	3.66	14-16	0.9	3.66	8

Δt_1 :降水起止时间, Q_1 :过程雨量, Δt_2 :观测起止时间, Q_2 :观测过程雨量; Q_4 和 Q_5 分别为4和5月月均雨量。

Δt_1 precipitation duration, Q_1 process rainfall, Δt_2 observation starting and ending time, Q_2 observation of process rainfall, Q_4, Q_5 the average rainfall in April and May.

2.2 降水平均谱特征

雨滴浓度是每立方米降水空间中雨滴数目,它是云内和云下宏观物理过程相互制约的产物,具体说是云内冷层形成的雪花,下落在暖层云中融化形成液滴,再碰并云滴增长成雨滴下落至云下直到地面的单位空间中的雨滴数目。雨滴数目的多少、大小既反映了云中成雨条件,还反映了云下雨滴存在条件(是否蒸发),在深厚稳定的层状云降水云系下,各测点雨滴浓度大且均匀,而系统浅薄、云系持续时间短的各测点雨滴浓度较小,多不均匀,谱宽也窄些。4月1日降水过程的平均谱特征值 N 、 Q 、 I 、 Z 值均明显高于 4 月 5 日降水过程。其中数浓度比

值 $K(N)$ 相对较小;西安站最大,也仅 2.36,其次为延安和宝鸡,各为 1.56 和 1.47,渭南最小,仅为 1.10。雨强比值 $K(I)$ 宝鸡最大,为 5.96,其次为西安和延安,各为 3.08 和 2.46,渭南最小,为 1.52。雷达反射因子 $K(Z)$ 宝鸡最大,为 27.55,其次为西安和延安,各为 5.55 和 3.84,仍是渭南最小,仅为 2.47。不同天气过程雨滴谱特征值差异大小的趋势表明:影响特征值的除数浓度外,雨滴大小的影响具有重要作用。两次降水过程雨滴平均谱的特征见表 2。

由于 4 月 1 日系统动力、热力、水汽条件配置适当,雨区范围大,特别是层积云伴生,提示低层湿度较大,减小了雨滴蒸发变小的速度,各测站雨滴数浓度大且接近(10^3 m^{-3}),谱也宽,均在 $0.2 \sim$

表 2 2003 年 4 月 1 日、5 日降水过程雨滴平均谱的特征

Table 2 The average characteristics of the raindrop size distribution for 1 and 5 April 2003 precipitation processes

站名	日期 /日	平均谱 密度 $/\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$	D/mm										N $/\text{m}^{-3}$	N_1/N_5 /%	Q $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	Q_1/Q_5 /%	I $/\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	I_1/I_5 /%	Z $/\text{mm}^{-6} \cdot \text{m}^{-3}$	Z_1/Z_5 /%
			0.7	1.1	1.5	1.9	2.3	2.7	3.1	3.5										
宝鸡	1	$n_1(D)$	237.91	76.79	40.10	20.41	5.17	3.03	2.11			154.21		0.1350		2.811		2157.2		
	5	$n_5(D)$	203.86	52.56	5.74	0.28						104.98	1.47	0.0338	3.99	0.472	5.96	78.3	27.55	
		$\Delta n = n_1 - n_5$	34.05	24.23	34.36	20.13	5.17	3.03	2.11			49.23		0.1012		2.339		2078.9		
西安	1	$n_1(D)$	318.97	94.14	33.57	5.0	1.83	1.04	0.22			181.92		0.1904		1.5586		676.9		
	5	$n_5(D)$	131.71	50.03	8.36	2.24						76.94	2.36	0.0325	2.78	0.506	3.08	122.0	5.55	
		$\Delta n = n_1 - n_5$	187.26	44.11	25.21	2.78	1.83	1.04	0.22			104.98		0.0579		1.0526		544.9		
渭南	1	$n_1(D)$	215.58	77.31	19.52	7.39	1.31					128.44		0.0648		1.097		370.5		
	5	$n_5(D)$	186.02	95.95	7.01	2.03	0.05					116.42	1.10	0.0481	1.35	0.724	1.52	149.9	2.47	
		$\Delta n = n_1 - n_5$	29.56	-18.64	12.51	5.36	1.26					12.02		0.0167		0.373		220.6		
延安	1	$n_1(D)$	358.56	135.51	15.54	2.17						204.71		0.0777		1.146		224.5		
	5	$n_5(D)$	272.16	54.76	1.49							131.36	1.56	0.0360	2.16	0.466	2.46	58.4	3.84	
		$\Delta n = n_1 - n_5$	86.40	80.75	14.05	2.17						73.35		0.0417		0.680		166.1		

D :分档雨滴直径均值(mm), N :总数浓度(m^{-3}), Q 雨水含量($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), I :雨强($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), Z :雷达反射率因子($\text{mm}^{-6} \cdot \text{m}^{-3}$), n :平均谱密度($\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$),下标值分别代表 4 月 1 和 5 日两次不同过程。

D : the average raindrop diameter (mm), N : the total concentration of raindrop (m^{-3}), Q : rain water content ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), I : rainfall intensity ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), Z : radar reflectivity factor ($\text{mm}^{-6} \cdot \text{m}^{-3}$), n : mean spectral density ($\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$), subscript values representing each of the 1 and 5 April 2003 precipitations.

0.32 cm 间,众数直径为 0.06 cm。4 月 5 日降水系统的配置不如 4 月 1 日;主体云云底较高,云下又无层积云,提示湿度较低,云下蒸发将使雨滴变小,导

致浓度降低。各站雨滴浓度多在 10^2 m^{-3} ,谱宽也窄些,在 0.16~0.22 cm 间,众数直径在 0.06 和 0.1 cm,如图 2 所示。

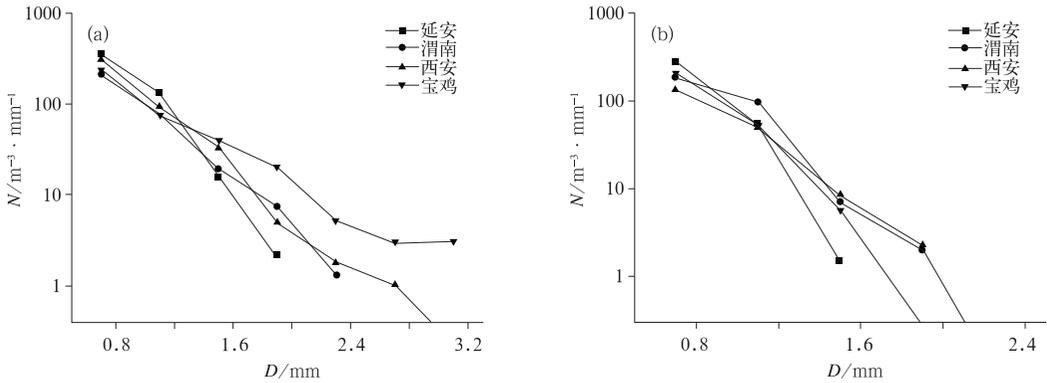


图 2 雨滴谱平均谱分布

(a) 4 月 1 日降水过程, (b) 4 月 5 日降水过程

Fig. 2 The average raindrop size distributions for (a) rainfall process on 1 April 2003, and (b) rainfall process on 5 April 2003

从表 2 和图 2 部分特征可作如下推论:

(1)降水系统动力、热力、水汽场配置适当形成的降水云,可产生透雨过程,它表明自然降水形成的条件好,在这样的云系中实施人工增雨,人工引入的冰相降水胚元将和自然降水胚元一样,将在较好成雨条件环境中增长,绝对增雨量明显。反之条件较差的(4 月 5 日)云环境中,人工引入的冰相降水胚元即使和自然雨一样增长成雨滴,下落中不可避免地将经受蒸发的影响,使本已较小的绝对增雨量减少,甚至到不了地面,增雨作用就小。这是一种初步的推测,起码它提示我们,作业云条件选择十分重要,云下温、湿条件也不可轻视。这对提高增雨作业效益、科学选择作业条件是有启发的,将在实际作业设计中落实验证。

(2)条件较差的 4 月 5 日,雨滴浓度、谱宽的地域差异明显,如西安、渭南, \bar{N}_6 和 D_M 明显高于延安,它起码提示我们,西安和渭南地区的云系自然降水条件优于延安,作业区应充分考虑这点。当然由于各地需水情况不同、作业基地位置不同、放飞条件等应综合权衡。但结合实际云系降水特征,科学选择作业区应引起足够的重视。

2.3 不同尺度雨滴对雨强的贡献

为便于比较,将雨滴直径分为 4 档; $\bar{D} \leq 0.1 \text{ cm}$ 、 $0.1 \sim 0.2 \text{ cm}$ 、 $0.2 \sim 0.3 \text{ cm}$ 和 $\bar{D} \geq 0.3 \text{ cm}$ 。

对应浓度为 N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 ,对应雨强为 I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 。

不难发现: N_1 占总浓度 $N(N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4)$ 的 80% 以上,而对应的 I_1 仅占总 $I(I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4)$ 的 20% 以下, I_2 却占 I 的 48% 以上(详见表 3),中、大雨滴群数浓度虽不及小雨滴群,但它们对与雨滴直径幂次增高的特征量的贡献率,将随幂次增高而增加,人工催化增雨应首选能增长中、大雨滴群的降水云系,如果把人工增雨比作“部分再现和复制自然雨过程”,显然,自然过程不能形成中、大雨滴群的降水云系,增雨效果不显著。

表 3 不同直径雨滴对雨强的贡献*

Table 3 The rainfall intensity contributions from raindrop of different diameter

日期 日/月	地区	$\frac{N_1}{N}/\%$	$\frac{I_1}{I}/\%$	$\frac{I_2}{I}/\%$	$\frac{I_3}{I}/\%$	$\frac{I_4}{I}/\%$
31/3-1/4	宝鸡	80.8	9.5	48.7	26.2	15.9
	西安	80.5	9.1	77.1	13.2	0.6
5/4-6/4	渭南	87.1	16.0	63.2	16.9	3.9
	延安	81.7	15.0	66.7	7.5	10.9

* 统计样本 159 份, N : 雨滴总浓度, I : 雨强, N_1 : 平均直径 $\leq 0.1 \text{ cm}$ 雨滴浓度, I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 : 分别为平均直径小于 0.1 cm、0.1~0.2 cm、0.2~0.3 cm 和大于 0.3 cm 雨滴对应雨强。

159 statistic sample numbers, N : the total concentration of raindrop, I : rainfall intensity, N_1 : the raindrop concentration with average diameter less than 0.1 cm, I_1 , I_2 , I_3 and I_4 : the rainfall intensities of raindrop in average diameter less than 0.1 cm, 0.1-0.2 cm, 0.2-0.3 cm and more than 0.3 cm, respectively.

表 3 结果还提示我们,应加强对直径 0.1 cm 以上雨滴成雨环境的观测研究。跟踪其形成高度、下降增长环境,为人工引入冰相胚元催化区提供依据。

2.4 雨滴谱计算雨强 I_c 与雨量自记雨强 I_R 的关系

雨滴谱有效读数面积为 $28\text{ cm} \times 28\text{ cm}$,它和台站雨量自记雨量筒面积相当,不同的是雨量自记连续不断收集由雨滴汇集的雨水,而雨滴谱只能间断收集(吸水纸法)。层状云降水总体是比较均匀的,10、30 和 60 分钟取样一次是否有代表性呢? 将 I_c 和 I_R 比对是有意义的。初步比对发现:若以 $I_c = a + bI_R$ 回归,之间存在相当强的正相关,相关系数 R 显著水平在 5% 以上,但不同测点、或同一测站不同降水云系,系数 a 、 b 有较大差异,如 4 月 1 日,宝鸡的 $I_c = 0.261 + 1.038I_R$, $R = 0.997$,延安: $I_c = 0.336 + 1.281I_R$, $R = 0.847$; 4 月 5 日宝鸡: $I_c = 0.173 + 1.146I_R$, $R = 0.991$ 。不同地域、不同降水云系系数 a 、 b 的不唯一性是微观量和宏观量转化的共同特性,在雷达观测的 $Z = AI^B$ 关系中, A 、 B 的不唯一性也证明了这点。

尽管 a 、 b (A 、 B) 取值不唯一,但它们之间存在较好相关表明:自记雨强和雨滴谱之间可以建立转换关系,这一事实为宏微观之间耦合提供了可能。

2.5 雨滴谱分布的数学拟合表达式

雨滴谱的数学表述就是将 $n(D) - D$ 间的数值或图形,用数学关系表示出来;这类数学表述要求数学形式简洁,(1)似真性好(和实际分布形状接近),(2)准确性高(实际值 $[n_r(D) - n_f(D)]$ 趋于 0),(3)便于数学演绎。常用的数学形式是^[7]:

$$n(D) = n_0 / \exp(\lambda D) \quad (1)$$

式(1)这种关系简单,便于运算,在不少观测中证实是可行的,特别是对较大尺度粒子数浓度有相当好的概括能力,以至国内外云降水数值模式,至今仍采用它作为参数化的基础^[1]。本文对 4 月 1 日、4 月 5 日各观测点平均雨滴谱也进行了指数拟合,然而详细分析发现:指数谱是一种相当粗略的近似,相关系数高并不能表明它们和实测值误差平方和 $S = \sum [n_R - n(D)]^2$ 小,特别是 n_R 呈非单调下降分布时(即使众数直径 D_p 等于最小可测直径 D_{\min})虽不歪曲谱分布形式,但往往使 S 很大,给用指数分布

进行数学演绎各特征量带来很大误差。为此,本文应用另一种雨滴谱数学表述形式进行谱分析^[8-9]。

$$n(D) = n_0 D^\alpha / \exp(\lambda D) \quad (2)$$

式(2)中参数 n_0 称作截距因子; α 称作谱型因子;在 $\ln n(D)$ 为纵轴、 D 为横轴的坐标图上, $\alpha > 0$ 曲线向上凸, $\alpha = 0$ 曲线呈直线, $\alpha < 0$ 曲线向下凹。 λ 称作分布斜率因子,它相当于线性关系 $[\ln n(D) - \alpha \ln D] = \ln n_0 - \lambda D$ 的斜率,表示 $n(D)$ 随 D 增大而变化(增大或减小)的快慢。

谱分布三参数可以有多种方法求取,核心假定是实测数密度 $n(D)$ 可用伽马(Γ)分布表述。严采繁等^[10-11]曾就机载 PMS 资料处理程序,加入了谱分布参数子程序;方法是用处理程序给出的均平方根直径 D_2 和均立方根直径 D_3 的比值 $K(D) = D_3 / D_2 = [(\alpha + 3)(\alpha + 2)(\alpha + 1)]^{(1/3)} / [(\alpha + 2) + (\alpha + 1)]^{(1/2)}$, 求取谱型因子 α ,再由线性回归程序 $\ln n(D) - \alpha \ln D = \ln n_0 - \lambda D$, 求出 n_0 和 λ ,该方法可回避非球形固态粒子质量、雷达反射因子求取的麻烦。对于球形液态水滴,可用数浓度 $N(\text{m}^{-3})$ 、含水量 $Q(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 、雷达反射率因子 $Z(\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3})$, 两两组合给定谱型因子 α 时,求出斜率因子 λ 与截距 n_0 , 本文对该参数计算不做讨论。

本文应用以上两种方法对宝鸡 4 月 1 日和 4 月 5 日两次降水过程进行了拟合(见图 3)。

从图 3 对比发现:

(1) 4 月 1 日宝鸡平均雨滴谱呈非单调下降形式,指数拟合 n_{c1} 相关系数虽达 -0.909 ,由它计算的数浓度:

$$N_{c1} = \sum n_{c1} \Delta D$$

含水量:

$$Q_{c1} = \frac{\pi}{6} \sum n_{c1} D^3 \Delta D$$

雨强:

$$I_{c1} = 3.6 \times 10^3 \pi \sum n_{c1} D^3 V(D) \Delta D$$

雷达反射因子:

$$Z_{c1} = \frac{\pi}{6} \sum n_{c1} D^6 \Delta D$$

及 S , 相对误差大于 $\alpha = -2$ 的三参数关系 $n(D) = 183.71 D^{-2} e^{-0.59D}$, 计算值 S_1 高达 $8.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-8}$, 而 S_2 仅 $4.9 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-8}$, 相差两个量级。

(2) 4 月 5 日宝鸡平均雨滴谱呈单调下降形式,各特征量的相对误差在 25% 以上,而 $\alpha = 6$ 的三参数关系 $n(D) = 2.35109 \times 10^6 D^6 e^{-10D}$, 计算值 N_{c2} 、

Q_{c2} 、 I_{c2} 、 Z_{c2} 和 n_2 相关值十分接近, 相对偏差小于 2.8%, N_{c2} 、 Q_{c2} 、 I_{c2} 和实测计算十分接近。 $S_1 = 8.1$

$\times 10^{-4} \text{ cm}^{-8}$, $S_2 = 1.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-8}$, 相差三个量级。

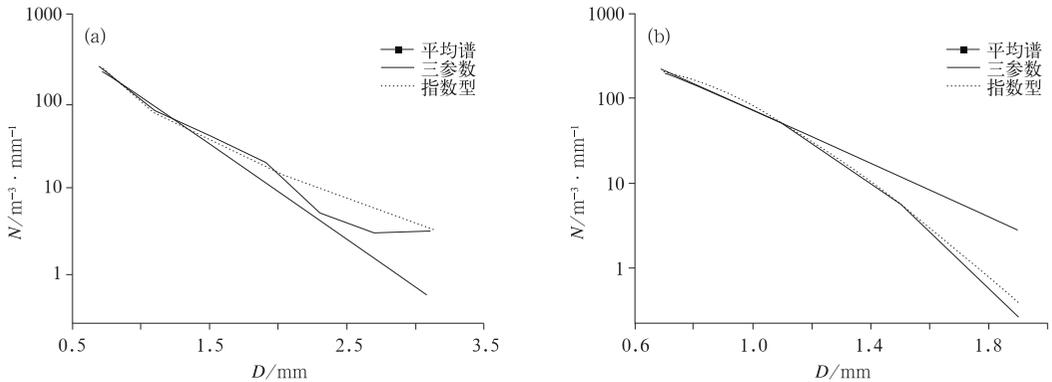


图 3 宝鸡地区雨滴谱拟合谱示意图

(a) 4月1日降水过程, (b) 4月5日降水过程

Fig. 3 The fitting raindrop size distributions in Baoji region for (a) rainfall process on 1 April 2003, and (b) rainfall process on 5 April 2003

3 结 论

(1) 陕西春季雨滴谱浓度范围为 $10^2 \sim 10^3 \text{ m}^{-3}$, 雨滴谱宽度范围在 0.22~0.32 cm。直径小于 0.1 cm 的小雨滴约占总浓度 80% 以上; 浓度大但对雨强的贡献小于 18%, 而直径 0.1~0.2 cm 的中等大小雨滴对雨强贡献在 48%~77%, 因而探测确定这些中等大小雨滴形成增长区域(之中), 是人工催化的最好部位。应提高使人工引入的核增大成中、大雨滴数浓度的比例, 而不是仅使小雨滴群数浓度增加。

(2) 雨滴谱多数呈非单调下降分布, 三参数分布 $n(D_i) = n_0 D^a e^{-\lambda D}$ 明显优于指数分布 $n(D_i) = n_0 e^{-\lambda D}$ 。

(3) 从雨滴谱部分特征推测, 降水系统各层动力、热力、水汽条件配合适当时, 形成的降水云系既有一定厚度冷层供激发形成冰雪晶降水元, 又要有一定厚度暖层供下降冰相胚元继续碰并增长成雨滴, 这是形成较大降水的重要条件, 依托这样的云系开展催化增雨, 会取得较好的效果和效益。

致谢: 西安市气象局观测站、延安市气象局观测站、宝鸡市气象局观测站、渭南市气象局观测站、洛川县气象局观测站、旬邑县气象局观测站全体人员以及张红军、李勘奇、梁忠平等同志在雨滴谱观测中大力支持和帮助, 借此机会表示

感谢。

参考文献

- [1] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1989: 169-171.
- [2] 郑娇恒, 陈宝君. 雨滴谱分布函数的选择: M-P 和 Gamma 分布的对比研究[J]. 气象科学, 2007, 27(1): 17-25.
- [3] 张志红, 周毓荃. 一次降水过程云液态水和降水演变特征的综合观测分析[J]. 气象, 2010, 36(3): 83-89.
- [4] 石爱丽, 郑国光, 黄庚, 等. 2002年秋季河南省层状云降水的雨滴谱特征[J]. 气象, 2004, 30(8): 12-17.
- [5] 李铁林, 雷恒池, 刘艳华, 等. 河南春季一次层状冷云的微物理结构特征分析[J]. 气象, 2010, 36(9): 74-80.
- [6] 王晓蕾, 阮征, 葛润生. 风廓线雷达探测降水云体中雨滴谱的试验研究[J]. 高原气象, 2010, 29(2): 498-505.
- [7] Marshall J S and Palmer W M. The distribution of raindrops with size[J]. J Meteor, 1948, (5): 165-166.
- [8] Takeuchi D M. Characterization of raindrop size distribution [C]. Preprints of Conference on Cloud Physics and Atmospheric Electricity, Issaquah, Amer Meteor Soc, 1978: 154-161.
- [9] Ulbrich C W. Effect of size distribution variations on precipitation parameters determined by dual-measurement techniques [C]. Preprint of 20th Conference on Radar Meteor, Boston, Amer Meteor Soc, 1981, 276-281.
- [10] 严采繁, 陈万奎. 国外雨滴谱分布函数的数值试验结果[J]. 气象, 1988, 19(92): 14-18.
- [11] 严采繁, 陈万奎. 对流层下雨滴谱分布[J]. 应用气象学报, 1990, 1(2): 191-198.