

# 一次层状云飞机播云试验的云微 物理特征及响应分析

于丽娟 姚展予

(中国气象局云雾物理重点开放实验室,中国气象科学研究院 北京 100081)

**提 要:** 根据2005年3月21日在河南进行的层状云飞机播云试验的探测资料,对人工增雨催化前后层状云的宏微观物理量进行对比分析。结果表明,播云前在4200m高度平飞中观测到的小云粒子数浓度最大值为 $1.36 \times 10^8$  个/ $m^3$ ,相应平均直径在 $5\mu m$ 左右;小云粒子数浓度和云液态水含量在催化后均减小,播撒层下方变化较之播撒层变化更加显著;5000m高度小云粒子平均直径由催化前的 $17.32\mu m$ 增加到催化后的 $18.07\mu m$ ,平均直径明显增大,这些作业前后微观物理量的变化表明了人工催化层状云的物理响应。不同高度飞行具有相似的粒子谱分布。

**关键词:** 层状云 微物理特征 催化作业 效果分析

## Studies on the Microphysical Characteristics of a Stratiform Cloud and Its Response to Aircraft Cloud Seeding

Yu Lijuan Yao Zhanyu

(Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of CMA,  
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** Based on the PMS data of an aircraft cloud seeding in stratiform cloud in Henan Province on March 21, 2005, the differences of macro and microphysical characteristics between seeded and unseeded clouds are analyzed. The results indicate that the maximum concentration of small cloud particles is  $1.36 \times 10^8 m^{-3}$  at the height of 4200m before seeding, and the corresponding mean diameter is about  $5\mu m$ . The concentration and liquid water content of small cloud particles decrease after seeding, and their change below the seeding layer is more obvious than that

资助项目:国家科技支撑计划课题“混合云人工增雨技术研究”(批准号:2006BAC12B02);科技部公益性行业(气象)科研专项项目“京津经济区及华北区域气溶胶对云的改变导致的降水变化及其在天气预报中的应用”(GYHY200706036)

收稿日期:2008年11月26日; 修定稿日期:2009年4月25日

at the seeding layer. The mean diameter of small cloud particles increases from  $17.32\mu\text{m}$  to  $18.07\mu\text{m}$  at 5000m height. The change of microphysical quantity after seeding is caused by cloud seeding. There are similar cloud particle spectra at different heights.

**Key Words:** stratiform cloud microphysical characteristics cloud seeding effective analysis

## 引 言

人工增雨的效果检验是人工增雨作业中必不可少、难以回避的重要环节之一,由于评估对象的不确定性及其周围时空条件的复杂多变,使得效果检验面临诸多困难<sup>[1]</sup>。为了消除一些不确定性的影响,统计检验在国内外的多个试验中得到广泛运用,不仅以降水量作为统计检验的对象<sup>[2]</sup>,William L. Woodley 等<sup>[3-6]</sup>还运用新一代雷达的数据进行统计分析。鉴于国内以抗旱为目的的人工增雨作业,在设计更难具备统计方法对作业效果进行评估的条件下,采用物理检验为评估人工增雨作业提供物理依据显得尤为重要。物理检验是为人工增雨作业提供直接或间接的物理学证据,针对向云施加影响后所可能产生的一系列物理过程变化有敏感响应的关键参数的测量,由相应的机载 PMS 粒子探测系统、雷达、卫星等加以探测获得。

云的宏微物理结构是云和降水研究的重要工作,随着探测技术的发展,人们对云的宏微观结构有了更深刻的了解,为人工增雨的物理检验打下坚实基础。牛生杰等<sup>[7]</sup>根据宁夏地区的作业资料分析了云滴浓度、平均直径、平均立方根直径随高度的变化,雪晶平均谱呈现单峰和双峰的特点,及液态水含量随水平分布的不均匀性。赵仕雄等<sup>[8]</sup>利用 1977—1979 年 5—6 月在青海东北部系统性降水高层云的云滴谱飞机观测资料,统计分析了该云系云滴群体特征量及微物理结构特点。苏正军等<sup>[9]</sup>对 2001 年 5 月 23 日的一个架次的飞行探测资料进行分析,得到云粒子

谱呈间断分布或呈浓度有多峰的特征,降水云系成熟后云粒子谱明显增宽。同时苏正军等<sup>[10]</sup>也对山东境内一次较强的降水过程的宏微观物理特征进行系统分析,发现云中液态水含量较小,最大值为  $0.035\text{g}/\text{m}^3$ ,其降水云系存在明显分层,云层之间有一干层。李照荣等<sup>[11-12]</sup>利用 PMS 云粒子测量仪器和机载温湿仪测得的 2001 年 9、10 月在兰州上空 5 次天气过程的层状云垂直探测资料,指出逆温层相对于温度  $0^\circ\text{C}$  层的位置和逆温层强弱对云滴的微物理特征的分布和降水形成的显著影响,同时分析了降水性层状云的冰雪晶特征。杨文霞等<sup>[13]</sup>选择河北省层状云降水个例进行分析,发现逆温层顶下方存在云水含量的峰值。彭亮等<sup>[14]</sup>、金华等<sup>[15]</sup>分别对河南地区不同的降水个例的宏微观物理特征进行分析,并得出相应的结论。张佃国等<sup>[16]</sup>针对 2003 年 8—9 月北京及周边地区 4 次飞机探测结果加以选择并进行了较为详细的分析,发现层状云与层积云的平均谱存在明显差异。党娟等<sup>[17]</sup>、李淑日等<sup>[18-19]</sup>也分别对甘肃、西北地区层状云微物理特征进行分析总结。

前人的工作充分体现了不同地区不同的云宏微观物理特征,为构建云降水多结构模型、加强人工增雨物理检验奠定基础。王以琳等<sup>[20]</sup>分析了 2000 年春季山东所开展的冷云人工引晶试验,结果显示引晶约 5 分钟后,在引晶扩散带中可观测到过冷液态水消耗、冰晶浓度增加、云粒子谱拓宽。周德平等<sup>[21]</sup>对 1995 年 6 月 29 日辽宁省一次层状云人工增雨的飞机探测进行分析,发现作业后作业层产生大量冰晶,小云滴数密度由  $34.38\text{cm}^{-3}$  减少

到  $8.97\text{cm}^{-3}$ , 过冷液态水含量减少, 而大云滴和冰雪晶的数密度及液态水含量值增加, 各高度层的云粒子谱也产生了相应的变化。金德镇等<sup>[22]</sup>根据飞机探测仪器观测到的云中粒子微观结构, 结合卫星、雷达和常规天气资料, 分析了液态  $\text{CO}_2$  人工引晶后的变化, 发现影响区云中的冰晶浓度、雨滴直径对比比区有明显增加, 云中过冷水减少, 影响区最大回波强度增大, 强回波区的面积扩大, 降水增强。本文主要利用飞机机载 PMS 云粒子探测仪器获得的河南地区 2005 年 3 月 21 日一次层状云飞机播云作业的飞行探测资料, 对催化前后云微物理特征变化进行分析。

## 1 天气背景

### 1.1 高空形势

2005 年 3 月 20 日 20 时(北京时, 下同) 500hPa 形势图上, 中高纬度呈两槽一脊型, 贝加尔湖地区受西北气流控制, 中低纬度地区高空槽位于青藏高原东部, 河套及华中地区处于槽前, 四川盆地至河南处于西南暖湿气流输送带。700hPa 形势图上, 河南大部处于西南气流控制之下。850hPa 形势图上, 贵州北部沿湖南、湖北至安徽南部存在一明显东北—西南向切变线, 河南位于切变线北侧。21 日 08 时, 500hPa 高空槽东移, 槽前西南气流加强, 700hPa 形成一窄带前倾槽, 并带动河套冷空气南下, 850hPa 切变线北抬由西南向进入河南南部地区(图 1a)。

### 1.2 地面形势

2005 年 3 月 20 日 02 时至 17 时, 位于河南北部地区的冷高压逐渐南移, 青藏高原东部低涡东移消失。20 日 17 时至 21 日 02 时, 冷高压东移入海发展, 低涡扩散影响到河南西南部。21 日 02 时至 21 日 14 时, 东海

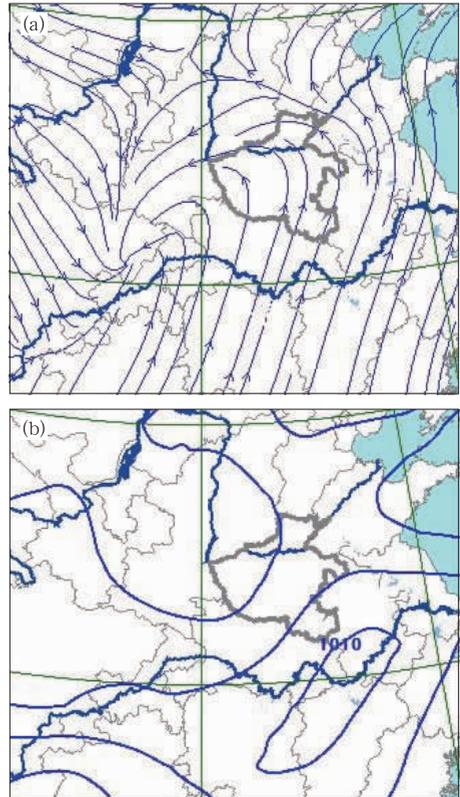


图 1 2005 年 3 月 21 日 08 时 850hPa 流场(a)和 14 时海平面气压场(b)

上空高压减弱, 西南倒槽东移, 产生小低涡沿长江东移产生大降水(图 1b)。21 日 14 时至 22 日 08 时, 西北路新冷空气南下, 倒槽东移入海发展成东海低涡。

此次过程高空西南气流带来丰富的水汽, 前期西南处的低涡随系统东移, 逐渐在江淮流域发展, 过程中低涡中的倒槽影响河南地区, 与高空槽配合带来降水。从 08 时至 20 时河南全省大面积降水, 且降水量较大区主要集中在河南省南部和偏东地区, 通过降水量大小的分布, 可知此次作业区域平顶山—临颍一线恰处在降水云系后方西北侧位置(图 2)。

### 1.3 探空和卫星云图

图 3 是根据郑州站 ( $34.75^{\circ}\text{N}$ ,  $113.65^{\circ}\text{E}$ ) 各时刻探空得到的时间剖面图, 地面冷锋于

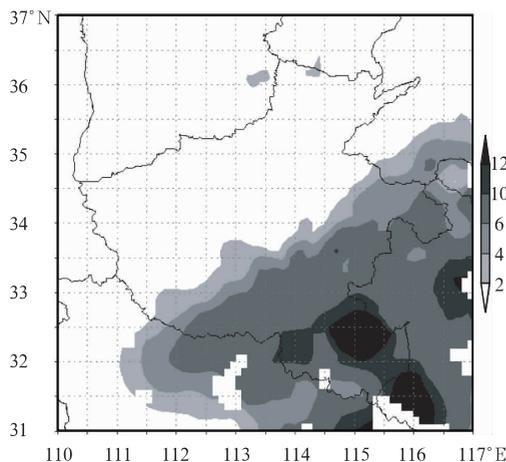


图 2 2005 年 3 月 21 日 14 时至 20 时河南省降水量图(单位:mm)

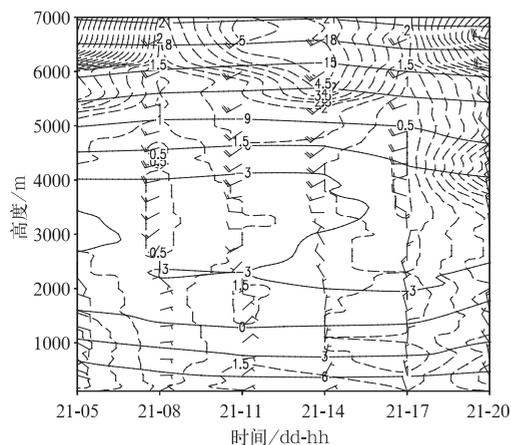


图 3 郑州站 2005 年 3 月 21 日时间剖面  
(温度:实线;温度露点差:虚线)

21 日 05 时距该站最近,而后地面冷锋过该站。零度层出现在 1500m 高度左右,17 时风向在 3000m 高度出现切变,低层随时间推移由东风转向北风至东北风,高层盛行西南风。虚线所表示的温度露点差在 5000m 高度以下均在 1.5℃ 以内,云区明显,飞机探测与作业飞行时间为 15:58—17:50,17 时以后云系减弱。

根据 2005 年 3 月 21 日 16:00 时的卫星云图,在该区域上空存在大片层状云系,云系

随时间向东北方向移动,与西南气流影响有关。

#### 1.4 雷达回波

图 4(见彩页)所示为长葛车载 C 波段多普勒雷达回波,图 4a 为 CAPPI(4.0km)雷达回波,作业区附近雷达回波强度在 20dBz 以上,图 4b 为 147° 方位角剖面,回波顶高近 9km,雷达回波强中心顶高在 4km 处。

## 2 飞机飞行探测作业情况简介

由中国气象科学研究院、中国科学院大气物理研究所、河南省气象局联合对此次降水过程进行飞机探测和开展飞机人工增雨作业。探测作业飞机采用运-12 飞机,装备 PMS 等机载仪器及 GPS 全球定位系统, PMS 三个探头分别为 FSSP-100(量程为 2~47 $\mu\text{m}$ )、2D-C(量程为 25~800 $\mu\text{m}$ )和 2D-P(量程为 200~6400 $\mu\text{m}$ ),为便于描述将三个探头测得的粒子分别称为小云粒子、大云粒子、降水粒子。作业中使用 AgI 丙酮溶剂 20L,飞机飞行最高达 5100m,取得三个探头的完整资料,并有较为详细的宏观记录。

此次外场综合试验飞机探测与作业并举,飞机飞行时间为 3 月 21 日 15:58—17:50。图 5 是飞机飞行携带的 GPS 定位系统获得的航迹数据。图 5a 实线所示即飞机起飞路径,虚线即飞机返回的路径,虚线部分与图 5b 中的细实线相对应。飞机 15:58 由新郑机场(图 5 中星号所示)起飞,飞机起飞 400m 高度即入云,且云层较厚,地面不可见。2100m 左右即出现冰晶,爬升至许昌(16:12)上空后,以 4200m 高度由北向南平飞至临颍(16:19),由临颍爬升至 4500m 高度后(16:20)再以此高度平飞至平顶山(16:34),在此高度平飞时遭遇颠簸,先遇下沉气流,后强烈上升。到达平顶山后由 4500m 高度爬

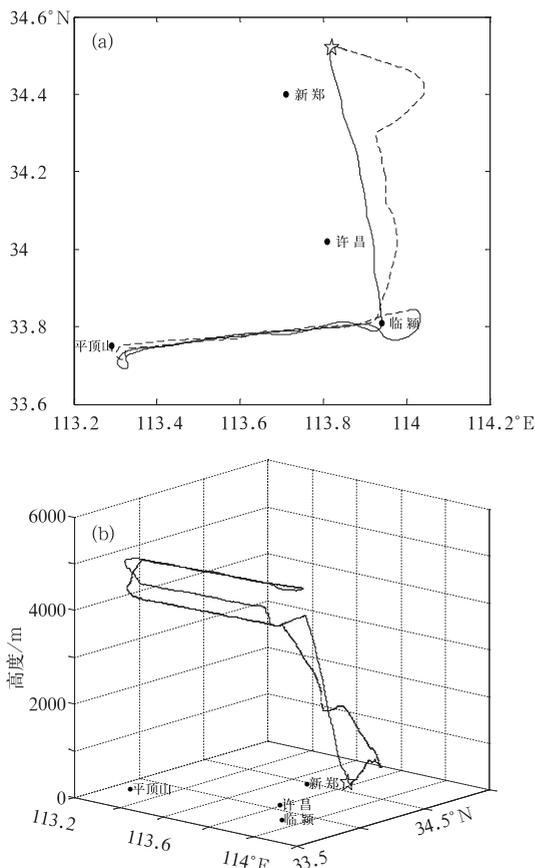


图 5 飞机飞行 GPS 航迹  
(a) 平面轨迹; (b) 三维轨迹

升 5000m 过程中,于 16:34 开始播撒作业,至 5000m 高度后(16:36)平飞向临颖。飞机到达临颖(16:51)后转弯再次折向平顶山方向飞行,转弯飞行 12min 后至 17:01 时播撒结束,此过程飞机仍在 5000m 高度上平飞。第二次到达平顶山(17:09)后飞机下降至 4200m(17:12),以此高度第二次由平顶山飞向临颖(17:21)。飞机下降飞至新郑机场,下降飞至 681m 时出云。对飞行进行分段,从地面起飞至许昌上空即 4200m 高度、4200m 由许昌平飞至临颖、临颖处由 4200m 至 4500m 高度爬升飞、4500m 由临颖平飞至平顶山、平顶山处 4500m 爬升至 5000m、5000m 由平顶山平飞至临颖、由临颖再次平飞至平顶山、平顶山处由 5000m 下降飞至 4500m、再由

4500m 下降至 4200m、4200m 高度由平顶山再次平飞至临颖、临颖处在 4200m 高度下降飞至地面共 11 部分,见表 1。

飞机主要在平顶山与临颖两地进行平飞和播撒作业,在平顶山至临颖之间的飞行区域存在大片云系,根据河南省郑州站雷达回波(图 6,见彩页),两地飞行区域内雷达回波顶高接近 8km,根据两地之间雷达回波剖面,平顶山、临颖及中部区域回波在 20dBz 以上,且临颖处雷达回波接近 30dBz。

### 3 自然云微物理特征分析

3 月 21 日至 5000m 高度第一次平飞结束时的飞行认为是飞机对自然云的垂直探测飞行,FSSP-100 探头探测到不同高度小云粒子数浓度值,其中在 569m 高度上测得小云粒子数浓度为  $4.43 \times 10^8$  个/ $m^3$ (据表 1),此时平均直径为  $3.67 \mu m$ ,飞机在返回地面时 785m 高度上探测到小云粒子数浓度也达到  $6.32 \times 10^8$  个/ $m^3$ ,平均直径为  $4.02 \mu m$ ,认为该段飞行不受播云影响。平均数浓度最大值出现在 4200m 平飞阶段为  $3.09 \times 10^7$  个/ $m^3$ ,随高度增加,小云粒子数浓度最大值和平均值呈现整体减小趋势。各个飞行阶段云液态水含量最大值在 4200m 以上基本相当,起飞至 4200m 阶段无论是最大值还是平均值均较小,在 4200m 向 4500m 上升飞过程中云液态水含量值均值较大,达到  $0.11 g/m^3$ ,将此段可看作丰水区。

由 2D-C 探头测得的粒子是大云粒子(大云滴和冰雪晶),随高度增加,各段粒子最大值增大,至 4500m 高度平飞阶段的 4545m 高度上达最大值  $4.02 \times 10^5$  个/ $m^3$ ,然后减小。粒子数浓度均值最大值出现在 4200m 爬升至 4500m 的阶段,为  $6.86 \times 10^4$  个/ $m^3$ ,云液态水含量最大值的峰值  $16.9 g/m^3$  以及均值的峰值  $4.91 g/m^3$  也出现在这个阶段。

表 1 2005 年 3 月 21 日 2D-C、2D-P、FSSP-100 所测的粒子特征

飞行高度/m	探头	$N_{\max}/\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$	$N/\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$	$LWC_{\max}/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$LWC/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
催化前探测飞行					
地面~4200m (15:58—16:12)	2D-C	$7.02\times 10^4$	$1.67\times 10^4$	4.35	0.78
	2D-P	$2.58\times 10^3$	$9.97\times 10^2$	2.98	0.78
	FSSP-100	$4.43\times 10^8$	$6.60\times 10^6$	0.05	0.01
4200m (16:12—16:19)	2D-C	$1.62\times 10^5$	$4.09\times 10^4$	8.95	1.76
	2D-P	$6.41\times 10^3$	$2.12\times 10^3$	4.41	2.04
	FSSP-100	$1.36\times 10^8$	$3.09\times 10^7$	0.14	0.07
4200~4500m (16:19—16:20)	2D-C	$1.71\times 10^5$	$6.86\times 10^4$	16.9	4.91
	2D-P	$4.14\times 10^3$	$3.13\times 10^3$	10.1	5.73
	FSSP-100	$2.95\times 10^7$	$2.14\times 10^7$	0.16	0.11
4500m (16:20—16:34)	2D-C	$4.02\times 10^5$	$5.16\times 10^4$	7.53	1.78
	2D-P	$1.01\times 10^4$	$3.90\times 10^3$	7.89	1.85
	FSSP-100	$3.59\times 10^7$	$1.30\times 10^7$	0.16	0.07
4500~5000m (16:34—16:36)	2D-C	$1.86\times 10^5$	$6.05\times 10^4$	7.41	2.14
	2D-P	$6.76\times 10^3$	$5.38\times 10^3$	4.30	2.31
	FSSP-100	$2.63\times 10^7$	$1.31\times 10^7$	0.12	0.07
5000m (16:36—16:51)	2D-C	$1.72\times 10^5$	$4.32\times 10^4$	8.78	1.25
	2D-P	$8.85\times 10^3$	$3.94\times 10^3$	3.89	1.42
	FSSP-100	$3.01\times 10^7$	$1.18\times 10^7$	0.15	0.06
催化后探测飞行					
5000m (16:51—17:09)	2D-C	$1.19\times 10^5$	$3.24\times 10^4$	6.57	0.96
	2D-P	$6.19\times 10^3$	$3.12\times 10^3$	2.77	0.94
	FSSP-100	$2.00\times 10^7$	$8.71\times 10^6$	0.11	0.05
5000~4500m (17:09—17:10)	2D-C	$2.48\times 10^4$	$1.21\times 10^4$	0.60	0.24
	2D-P	$3.01\times 10^3$	$1.72\times 10^3$	0.53	0.30
	FSSP-100	$5.48\times 10^6$	$3.44\times 10^6$	0.03	0.02
4500~4200m (17:10—17:12)	2D-C	$2.00\times 10^4$	$9.51\times 10^3$	0.42	0.16
	2D-P	$2.26\times 10^3$	$1.45\times 10^3$	0.35	0.18
	FSSP-100	$2.47\times 10^6$	$1.41\times 10^6$	0.02	0.01
4200m (17:12—17:21)	2D-C	$8.19\times 10^4$	$2.42\times 10^4$	2.63	0.67
	2D-P	$4.63\times 10^3$	$2.39\times 10^3$	2.50	0.73
	FSSP-100	$1.35\times 10^7$	$5.79\times 10^6$	0.08	0.04
4200m~地面 (17:21—17:50)	2D-C	$1.97\times 10^5$	$1.74\times 10^4$	8.77	0.63
	2D-P	$4.65\times 10^3$	$9.77\times 10^2$	3.75	0.48
	FSSP-100	$6.32\times 10^8$	$1.08\times 10^7$	0.10	0.01

注: $N_{\max}$ ,  $N$  分别为最大和平均的粒子浓度,  $LWC_{\max}$ ,  $LWC$  分别为最大和平均的云液态水含量。催化时间 16:34—17:01。

飞机 4200m 高度由北向南即由许昌向临颖平飞, 小云粒子数浓度(图 7a)于 16:14:26 时刻突增至  $1.36\times 10^8$  个/ $\text{m}^3$ , 即为平飞阶段的极大值, 与平飞初始阶段相比增加两个量级, 随后高低起伏变化, 仍具有较大的小云粒子数。当飞行至 16:15:51 时刻

云粒子数浓度发生突降, 随后至 16:17:52 时间序列内小范围起伏变化, 此后至平飞结束时出现剧烈的起伏, 说明该区域层状云系具有较为明显的不均匀性。图 7b 是数浓度时间序列相应的小云粒子平均直径变化, 平均直径随时间变化呈现先减后增趋势, 在 16:14:22

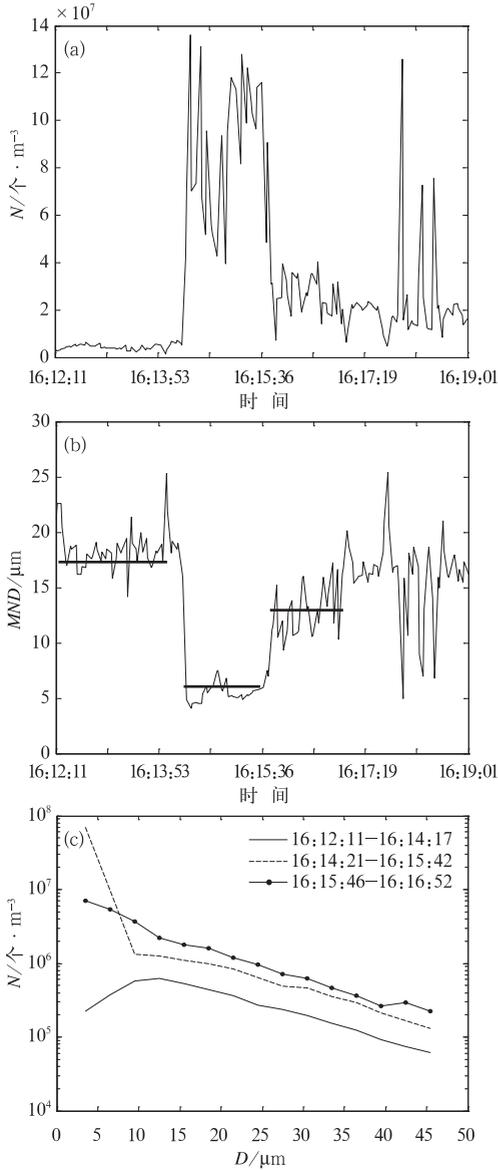


图7 4200m平飞时 FSSP-100 云物理量时间变化  
(a)数浓度( $N$ );(b)平均直径(MND);(c)谱分布

—16:15:46时段小云粒子尺度锐减,平均直径在  $5\mu\text{m}$  左右,相应时段粒子数浓度值较大,达到  $10^8$  个量级,分析表明此区域内云粒子以过冷水滴形式存在,且为该段较高的丰水区。16:17:56—16:18:27段内平均直径随时间变化出现的三个波谷与粒子数浓度该时间段内的三个波峰相对应,该区域也可看

作丰水区。依据图 7b 中三段水平实线所指具有代表性的平均直径变化,得到由许昌平飞至临颖相应时段内小云粒子谱分布(见图 7c),第一时段内小云粒子数浓度先增后减,在  $8\sim 14\mu\text{m}$  内出现该段波峰,小云粒子主要集中在该范围内,第二时段  $10\mu\text{m}$  以下小云粒子数浓度急剧减小, $10\mu\text{m}$  处小云粒子减小速度放缓,小云粒子数浓度主要集中在  $2\sim 11\mu\text{m}$  范围内,第三时段小云粒子曲线呈现不断下降趋势,变化态势介于前两个时段。

4200m 至 4500m 高度的上升飞处于临颖处,该段小云粒子数浓度最大值为  $2.95 \times 10^7$  个/ $\text{m}^3$ ,均值为  $2.14 \times 10^7$  个/ $\text{m}^3$ ,随高度增加起伏变化不大,总体呈缓慢减小趋势,粒子平均直径主要集中在  $12\sim 20\mu\text{m}$  范围内,随高度增加平均直径有微小增加的趋势,大云粒子数浓度主要集中在  $10^4$  量级范围内,随高度增加剧烈起伏,呈现微弱减小的趋势。4500m 至 5000m 之间的飞行是处于平顶山处的垂直飞行,小云粒子数浓度均值为  $1.31 \times 10^7$  个/ $\text{m}^3$ ,随高度增加缓慢减小,较之 4200m 至 4500m 的上升飞阶段数浓度均值有所减小,小云粒子平均直径增大,集中在  $14\sim 23\mu\text{m}$  内,随高度增加起伏变化较大,呈现先增后减的趋势,大云粒子数浓度均值为  $6.05 \times 10^4$  个/ $\text{m}^3$ ,比 4200m 至 4500m 高度上升飞有所减小,随高度增加依然呈现不断减小的趋势。在 4200m 至 5000m 高度飞行过程中,临颖至平顶山东西向还包括由临颖至平顶山 4500m 平飞和由平顶山至临颖 5000m 平飞,从空间角度对云系进行探测。

4500m 和 5000m 平飞数浓度均值分别为  $1.35 \times 10^7$  个/ $\text{m}^3$  和  $1.18 \times 10^7$  个/ $\text{m}^3$ ,5000m 高度上的粒子数浓度要小于 4500m 高度的粒子数浓度。4500m 高度靠近临颖处的云系出现较大的粒子数浓度(图略),并出现该段飞行的最大值,之后开始减小,在临颖距离平顶山的中部区域粒子数浓度增加达

到一个较大值,经历一段自然起伏变化后在接近平顶山处又一次增大。5000m 高度由平顶山至临颖在出现一个波峰后即进入缓慢增大的起伏状态(图略),即在 5000m 高度上平飞时,距离平顶山附近出现小粒子数浓度的极大值,表明该处的云与 4500m 高度上的云系具有相似变化,而中部及临颖处的云在 5000m 上未有类似的变化。

4500m 与 5000m 平飞粒子平均直径的最大值分别为  $27.81\mu\text{m}$  和  $26.7\mu\text{m}$ ,均值分别为  $17.31\mu\text{m}$  和  $17.32\mu\text{m}$ ,在两个高度上粒子平均直径随时间的变化比较平稳,呈现自然起伏的状态,表明 4500m 和 5000m 高度的粒子尺度随地理位置的不同和粒子数浓度的大小不存在相关关系。4500m 和 5000m 平飞云液态水含量的最大值分别为  $0.16\text{g}/\text{m}^3$  和  $0.15\text{g}/\text{m}^3$ ,均值分别为  $0.07\text{g}/\text{m}^3$  和  $0.06\text{g}/\text{m}^3$ ,两个高度云液态水含量的最大值和均值差别很小,二者均相当,且变化趋势与各高度数浓度变化类似。

4500m 平飞大云粒子数浓度最大值为  $4.02 \times 10^5$  个/ $\text{m}^3$ ,均值为  $5.16 \times 10^4$  个/ $\text{m}^3$ ,5000m 平飞最大值为  $1.72 \times 10^5$  个/ $\text{m}^3$ ,均值为  $4.32 \times 10^4$  个/ $\text{m}^3$ ,两个高度数浓度值相近。4500m 由临颖飞向平顶山时,临颖附近出现数浓度较大值,为该段飞行的峰值,接近平顶山时数浓度值缓慢增加,而此处附近 5000m 高度达到该飞行高度上大云粒子数峰值,在两地中部云区大云粒子于 4500m 出现小的波峰同时 5000m 高度出现突增。云液态水含量变化趋势跟各自高度平飞数浓度变化趋势一致,但 4500m 高度中部云系具有较大的液态水含量值,达到  $7.52\text{g}/\text{m}^3$ ,而 5000m 高度该区域附近,云液态水含量值在  $3\text{g}/\text{m}^3$  左右。

4500m 和 5000m 高度的平飞表明,在临颖、平顶山及二者中部区域的云粒子浓度较大,由于小云粒子平均直径的均值及变化趋

势差别不大,可以认为两次平飞所探测的云系为同一云系,云粒子浓度不一说明云系具有不均匀性的特征。由 4200m 至 5000m 高度之间的上升飞及平飞过程,可以推测在临颖与平顶山两地之间 4200m 高度上小粒子数浓度基本维持在  $10^7$  量级,大云粒子数浓度为  $10^4$  量级,且粒子数值略微大于 4500m 和 5000m 高度上的数浓度。

图 8 所示即 FSSP-100、2D-C、2D-P 探头对自然云探测到的小云粒子、大云粒子、降水粒子随高度的分布,4200m 以下小云粒子除在 500m 左右出现峰值外总体起伏不大,大云粒子和降水粒子随高度增大数浓度增大,4500 至 5000m 高度降水粒子随高度依然增大,而小云粒子和大云粒子随高度不断减小,且大云粒子变化幅度要小于小云粒子。

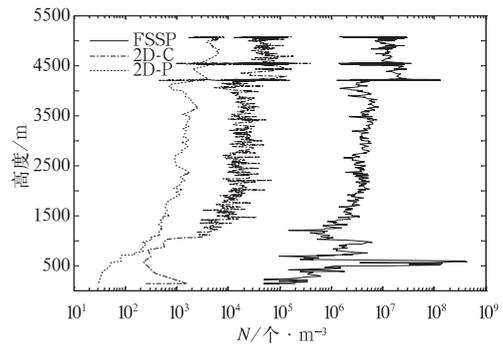


图 8 自然云中小云粒子、大云粒子和降水粒子数浓度随高度分布

#### 4 播云前后云微物理特征对比分析

5000m 高度由临颖转弯后的飞行可以认为是对播云后云的探测飞行,通过催化后不同飞行阶段与相应阶段的自然云微物理特征进行比较,分析催化后各微物理量的变化。

##### 4.1 5000m 高度催化前后平飞

5000m 由平顶山至临颖的飞行行为自然云探测,即催化前的飞行,转弯后临颖至平顶

山的飞行作为催化后的飞行。催化前在出现一波峰后随即进入自然起伏的变化阶段(图 9a),催化后小云粒子在临颖和平顶山两地中部区域出现最大值  $2.00 \times 10^7$  个/ $\text{m}^3$ ,初始阶段出现一个小的波峰,之后随时间呈现先增后减的趋势,小云粒子数浓度均值为  $8.71 \times 10^6$  个/ $\text{m}^3$ ,催化后小云粒子数浓度均值比催化前减小一个量级(图 9b)。图 9c 和图 9d 是 5000m 高度催化前后粒子平均直径随时间的变化,催化前后小云粒子平均直径的最大值分别为  $26.7 \mu\text{m}$  和  $30.9 \mu\text{m}$ ,催化前后均值分别为  $17.32 \mu\text{m}$  和  $18.07 \mu\text{m}$ ,催化后

最值增加  $4.2 \mu\text{m}$ ,均值变化较小,增加  $0.75 \mu\text{m}$ ,粒子尺度有所增加。催化前后云液态水含量的变化趋势与粒子数浓度随时间的变化趋势一致,催化前云液态水含量最大值为  $0.15 \text{g}/\text{m}^3$ ,均值为  $0.06 \text{g}/\text{m}^3$ ,催化后最大值为  $0.11 \text{g}/\text{m}^3$ ,均值为  $0.05 \text{g}/\text{m}^3$ ,催化前后的最值有较大的变化,均值变化不明显,减小了  $0.01 \text{g}/\text{m}^3$ 。5000m 高度小云粒子数浓度均值由催化前的  $1.18 \times 10^7$  个/ $\text{m}^3$  减小到催化后的  $8.71 \times 10^6$  个/ $\text{m}^3$ ,平均直径增大,小云粒子尺度增大,这些变化分析认为是该高度催化后的飞行受到飞机播撒作业的影响。

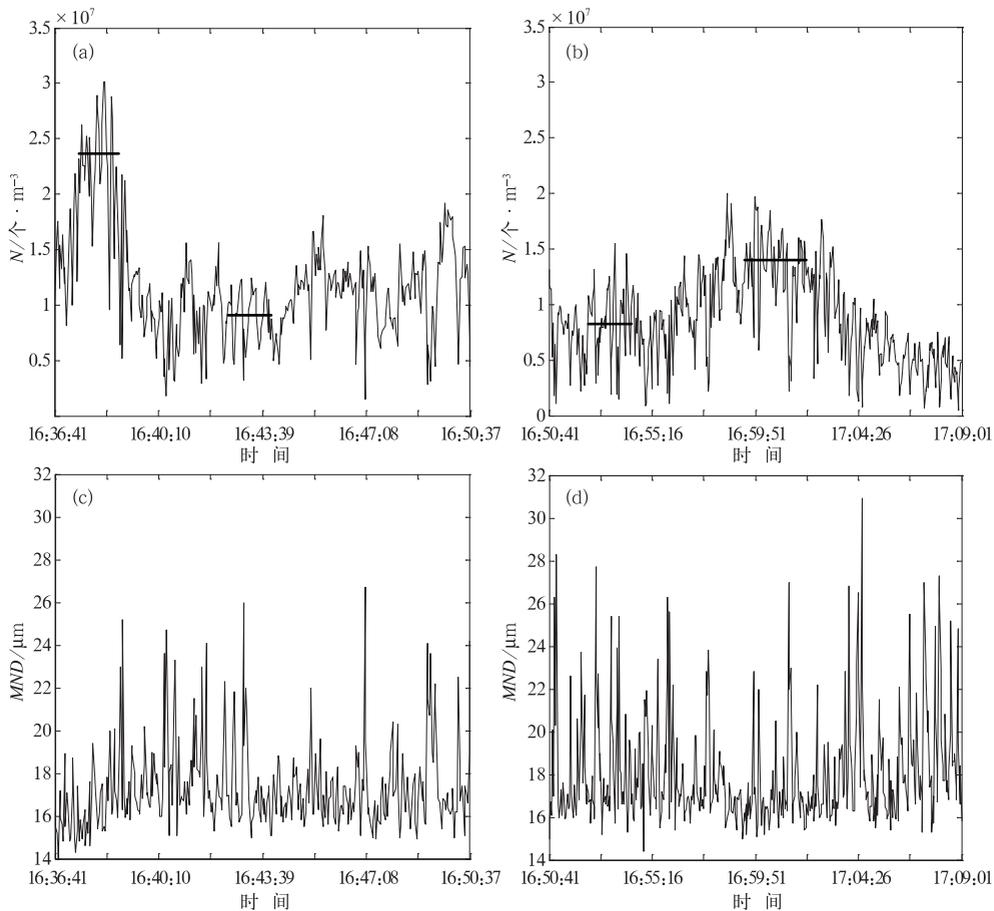


图 9 5000m 高度微物理量随时间序列图(FSSP-100)

(a) 催化前数浓度; (b) 催化后数浓度; (c) 催化前平均直径; (d) 催化后平均直径

大云粒子与降水粒子数浓度变化趋势与小云粒子一致(图 10),催化前初始阶段均出现较大值,随后进入相对平稳的起伏变化阶段,催化后在临颖和平顶山两地中部出现数浓度较大值,催化后数浓度均值较之催化前均有所减小,将 FSSP-100、2D-C、2D-P 探头的探测结果置于同一张图,得到粒子数浓度平均谱和时段内谱分布(见图 11),下同。催化前后粒子数浓度均值谱分布基本一致,同时在催化前后分别选择两个不同时间段的谱分

布,分析发现催化前 16:41:56—16:43:37 时段与催化后 16:52:26—16:54:52 时段谱分布基本吻合,同时催化后小云粒子数浓度随尺度增大逐渐增加并与催化前趋向相等,催化后大云粒子和降水粒子数浓度随尺度增大不断增加并超过催化前数浓度值,由于两个时段内谱分布极其吻合,可以认为催化后 16:52:26—16:54:52 时段探测的云即为催化前 16:41:56—16:43:37 时段内探测的云系。

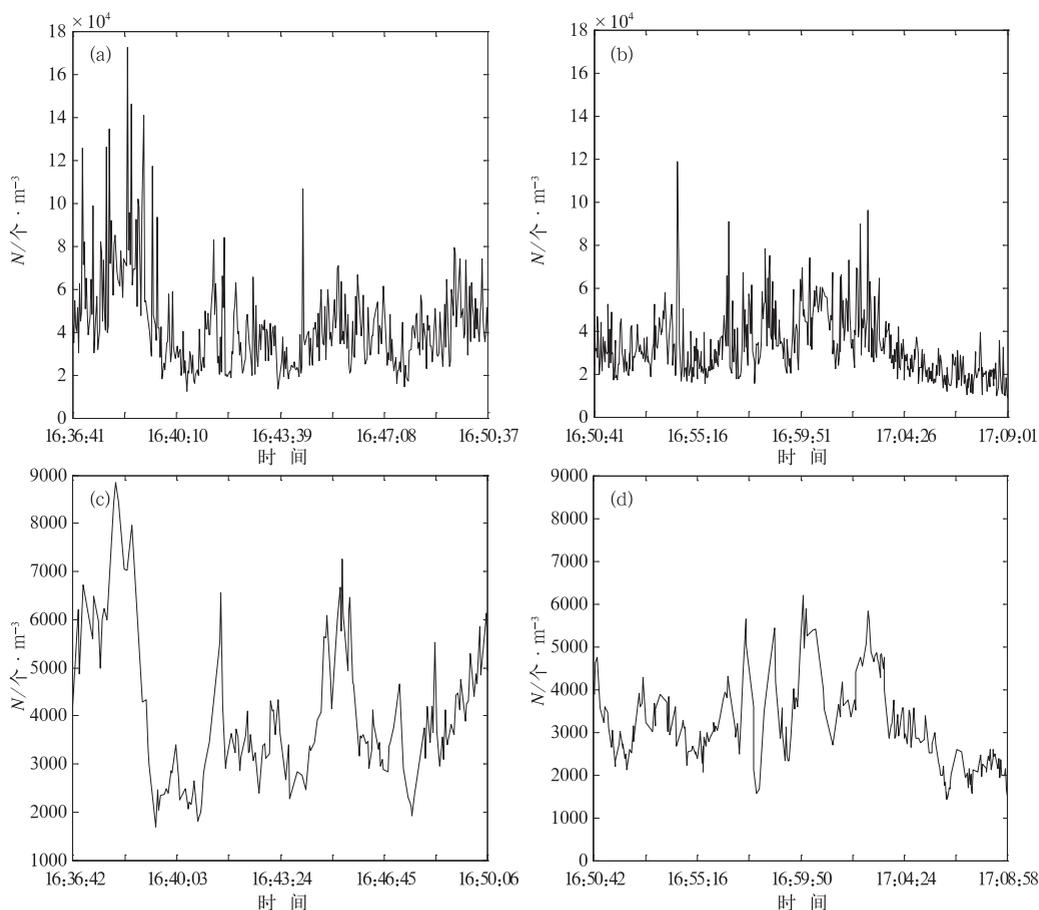


图 10 5000m 高度数浓度随时间序列图  
(a) 2D-C 催化前; (b) 2D-C 催化后; (c) 2D-P 催化前; (d) 2D-P 催化后

#### 4.2 4500m 至 5000m 催化前上升飞和催化后下降飞

4500m 至 5000m 催化前上升飞和

5000m 至 4500m 催化后下降飞均为平顶山处的垂直飞行。催化前在 4892m 高度上出现该段小云粒子的数浓度最大值  $2.63 \times 10^7$  个/ $m^3$ ,小云粒子数浓度均值为  $1.31 \times 10^7$  个/ $m^3$ ,

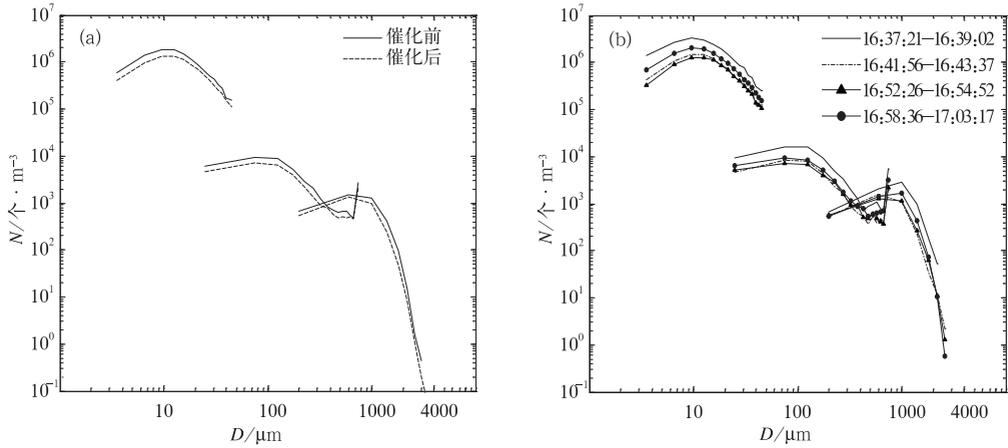


图 11 5000m 高度平飞  
(a) 平均谱分布; (b) 时段内谱分布

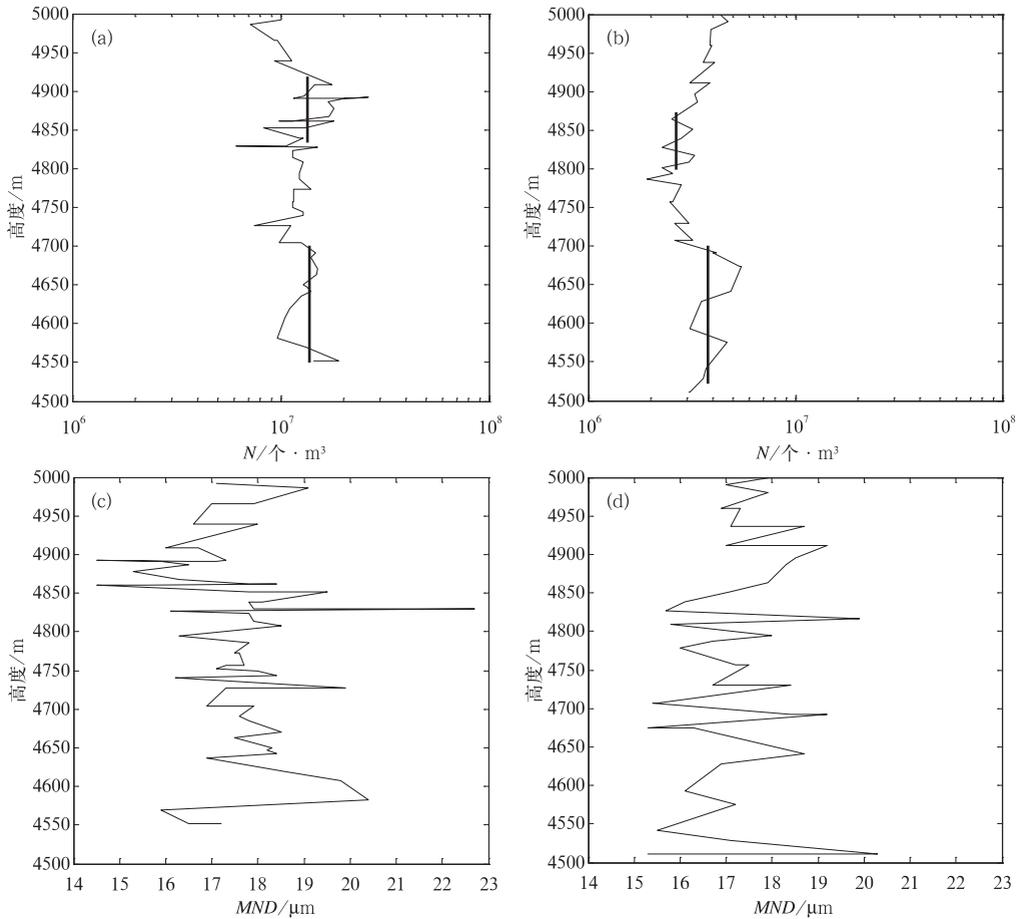


图 12 4500m 至 5000m 各微物理量随高度变化(FSSP-100)  
(a) 催化前数浓度; (b) 催化后数浓度; (c) 催化前平均直径; (d) 催化后平均直径

催化后最大值为 4674m 高度上的  $5.48 \times 10^6$  个/ $m^3$ ,小云粒子数浓度均维持在  $10^6$  量级,均值为  $3.44 \times 10^6$  个/ $m^3$ 。图 12c 和图 12d 是两个阶段中粒子平均直径随高度的变化,上升飞阶段 4800m 至 4900m 范围平均直径有较大起伏,该段最值  $22.67 \mu m$  出现在 4829m 高度上,均值为  $17.51 \mu m$ ,下降飞阶段平均直径随高度增加呈现自然起伏的状态, $20.26 \mu m$  的最大值出现在 4511m 高度上,均值为  $17.26 \mu m$ 。相同区域不同时间段的飞行,粒子的平均直径均值变化不明显,变化幅度不大。

催化前大云粒子数浓度随高度增加逐渐减小,而催化后变化不明显,随高度增加数浓度有先增后减的微弱趋势,且催化后大云粒子数浓度均值略小于催化前数浓度(见图 13)。云液态水含量催化前最大值为  $7.41 g/m^3$ ,均值为  $2.14 g/m^3$ ,催化后最大值为  $0.6 g/m^3$ ,均值为  $0.2 g/m^3$ ,要远远小于播云前的。降水粒子数浓度催化前后均维持在  $10^3$  量级,催化后较之催化前略有减小。

小云粒子数浓度明显减小,但其平均直径变化并不明显,大云粒子也并未相应增加,但小云粒子液态水含量在下降飞阶段明显减小,认为小云粒子逐渐呈现过饱和状态,以凝

华增长的方式向大云粒子转变。催化前后粒子数浓度谱分布证实了上述观点,同时给出了在 4500m 至 5000m 高度范围内选取的 4 个时间段及图 13a、b 垂直实线的谱分布(见图 14b)。

#### 4.3 4200m 至 4500m 催化前后垂直飞

4200m 至 4500m 高度位于临颖处的上升飞为催化前飞行,而位于平顶山处的下降飞则为催化后飞行。由 4200m 至 4500m 上升飞,小云粒子数浓度最大值为  $2.95 \times 10^7$  个/ $m^3$ ,均值为  $2.14 \times 10^7$  个/ $m^3$ ,催化后小云粒子数浓度最大值为  $2.47 \times 10^6$  个/ $m^3$ ,均值为  $1.41 \times 10^6$  个/ $m^3$ ,催化后小云粒子数浓度比催化前减小 2 个量级,同时小云粒子数浓度随高度起伏变化较之上升飞要强烈些(图略)。催化前小云粒子平均直径最大值为  $19.32 \mu m$ ,均值为  $16.45 \mu m$ ,催化后最大值为  $26.14 \mu m$ ,均值为  $19.64 \mu m$ ,催化前小云粒子尺度主要集中在  $12 \sim 20 \mu m$  范围内,而催化后主要在  $14 \sim 28 \mu m$  范围内,催化后小云粒子尺度明显大于催化前,尺度范围扩大。由于平顶山和临颖均处于播云催化影响区域,可认为物理量的变化是催化作业的效果。

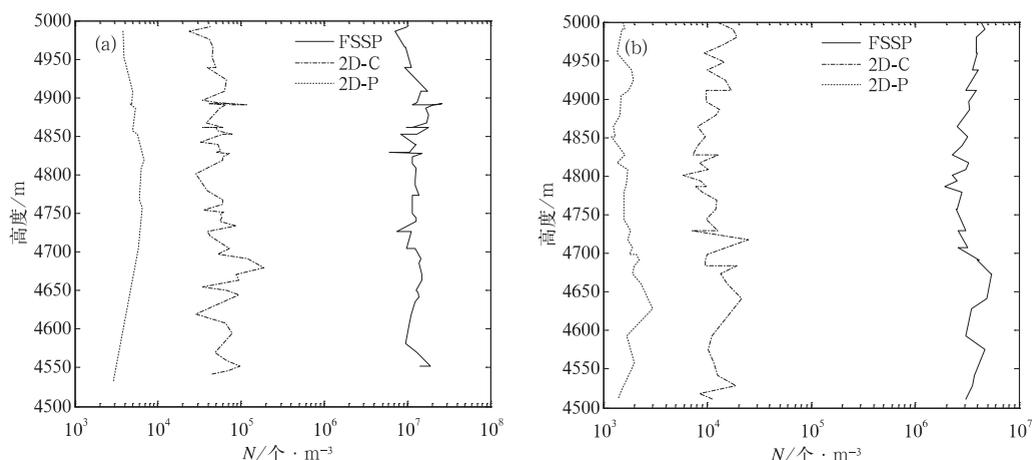


图 13 4500m 至 5000m 高度数浓度随时间序列图

(a) 上升飞-催化前; (b) 下降飞-催化后

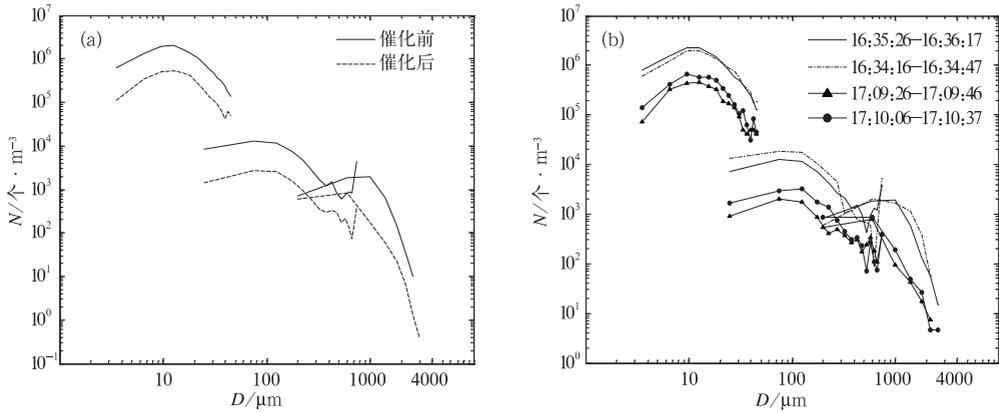


图 14 4500m 至 5000m 高度垂直飞  
(a) 平均谱分布; (b) 时段内谱分布

催化后大云粒子和降水粒子数浓度比催化前明显减小,催化前大云粒子随高度变化起伏较大,催化后随高度增加呈现逐渐增加的趋势,降水粒子在催化前后变化趋势不明显,均呈现自然起伏的状态,见图 15。与 4500m 至 5000m 垂直飞分析类似,根据三个探头资料得到粒子数浓度均值谱分布及中间

过程选取的两个时段内谱分布,小云粒子都显著减小,大云粒子未呈现增加的状态,降水粒子平均谱分布在  $1000\mu\text{m}$  处催化后数浓度接近催化前,催化后降水粒子数浓度在小于  $1000\mu\text{m}$  的范围内明显大于催化前的数浓度值(图略)。

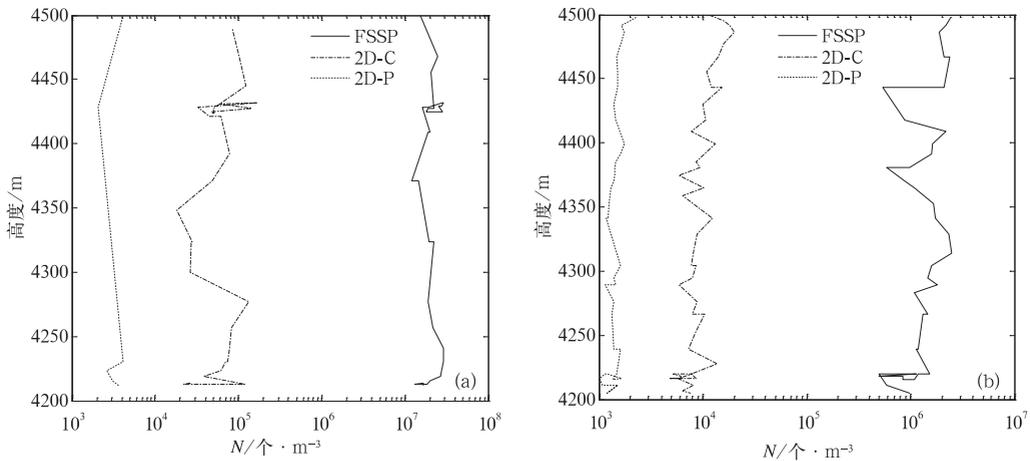


图 15 4200m 至 4500m 高度数浓度随时间序列图  
(a) 上升飞-催化前; (b) 下降飞-催化后

#### 4.4 催化前 4500m 平飞与催化后 4200m 平飞

催化前 4500m 高度平飞是由临颖飞至平顶山,催化后 4200m 高度平飞指由平顶山

飞向临颖,两次平飞的高度虽然不同,但都是对同一区域云不同发展阶段的探测飞行。图 16a和图 16b 是两个高度平飞时数浓度变化,最大值分别为  $3.59 \times 10^7$  个/ $\text{m}^3$  和  $1.35 \times 10^7$  个/ $\text{m}^3$ ,数浓度均值分别为  $1.30 \times 10^7$

个/ $\text{m}^3$ 和  $5.79 \times 10^6$  个/ $\text{m}^3$ , 4200m 高度平飞数浓度均值减少一个量级。在 4500m 由临

颖飞向平顶山的过程中, 数浓度由极大值逐渐减小, 到达波谷后在通过第二个波峰后进

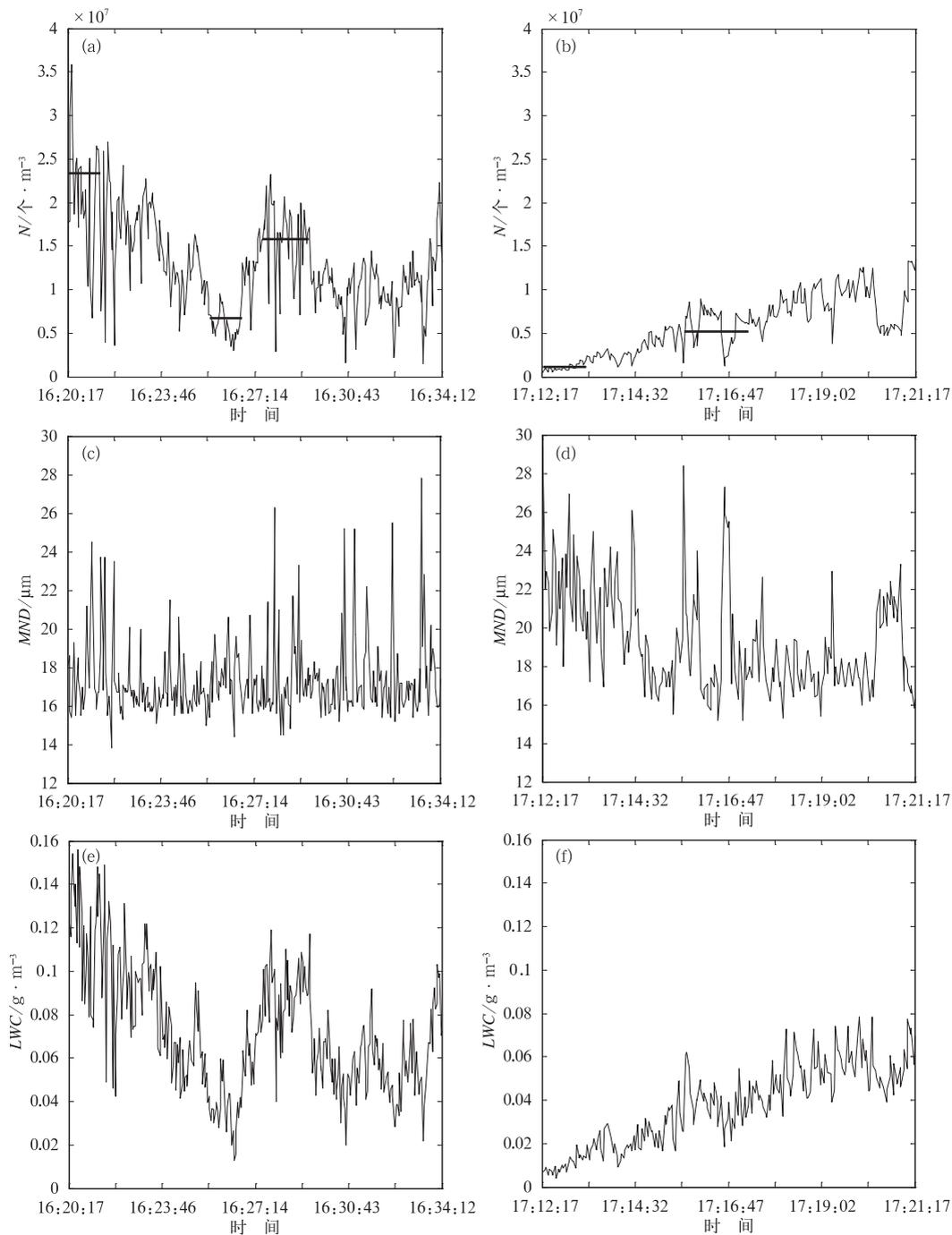


图 16 催化前 4500m 平飞和催化后 4200m 平飞时间序列图(FSSP-100)

(a) 4500m 数浓度; (b) 4200m 数浓度; (c) 4500m 平均直径; (d) 4200m 平均直径;  
(e) 4500m 液态水含量; (f) 4200m 液态水含量

入自然起伏的变化状态,并在该段飞行的最后数浓度值有所增加,整个平飞阶段看出由临颖至平顶山粒子数浓度是减小的趋势。4200m 高度平飞随时间变化是由平顶山飞向临颖,为使两次平飞对云的探测具有较好的一致性,对时间逆向分析,由临颖至平顶山,粒子数浓度以自然起伏的状态不断减小,并未出现明显的波峰波谷,在接近平顶山时数浓度不断减小,未出现 4500m 平飞稳定的起伏状态。图 16c 和图 16d 是平均直径随时间的变化图,4500m 平飞平均直径的最大值为  $27.81\mu\text{m}$ ,均值为  $17.31\mu\text{m}$ ,4200m 平飞的最值为  $29.38\mu\text{m}$ ,均值为  $19.23\mu\text{m}$ ,4500m

由临颖至平顶山时粒子平均直径呈自然起伏,随着向平顶山处飞行略微增加,4200m 平飞在平顶山处粒子平均直径出现该段的波峰,随时间变化高低起伏有减小趋势。图 16e 和图 16f 所示的两个高度平飞的云液态水含量图分布态势与数浓度一致,4500m 与 4200m 平飞的最大值分别为  $0.16\text{g}/\text{m}^3$  和  $0.08\text{g}/\text{m}^3$ ,均值分别为  $0.07\text{g}/\text{m}^3$  和  $0.04\text{g}/\text{m}^3$ ,两次飞行的云液态水含量差距较大,均值增大近 1 倍。

两个不同高度的平飞均说明临颖一侧的数浓度值大于平顶山处值,对两个不同高度不同时间同一区域的飞行说明探测的云具有

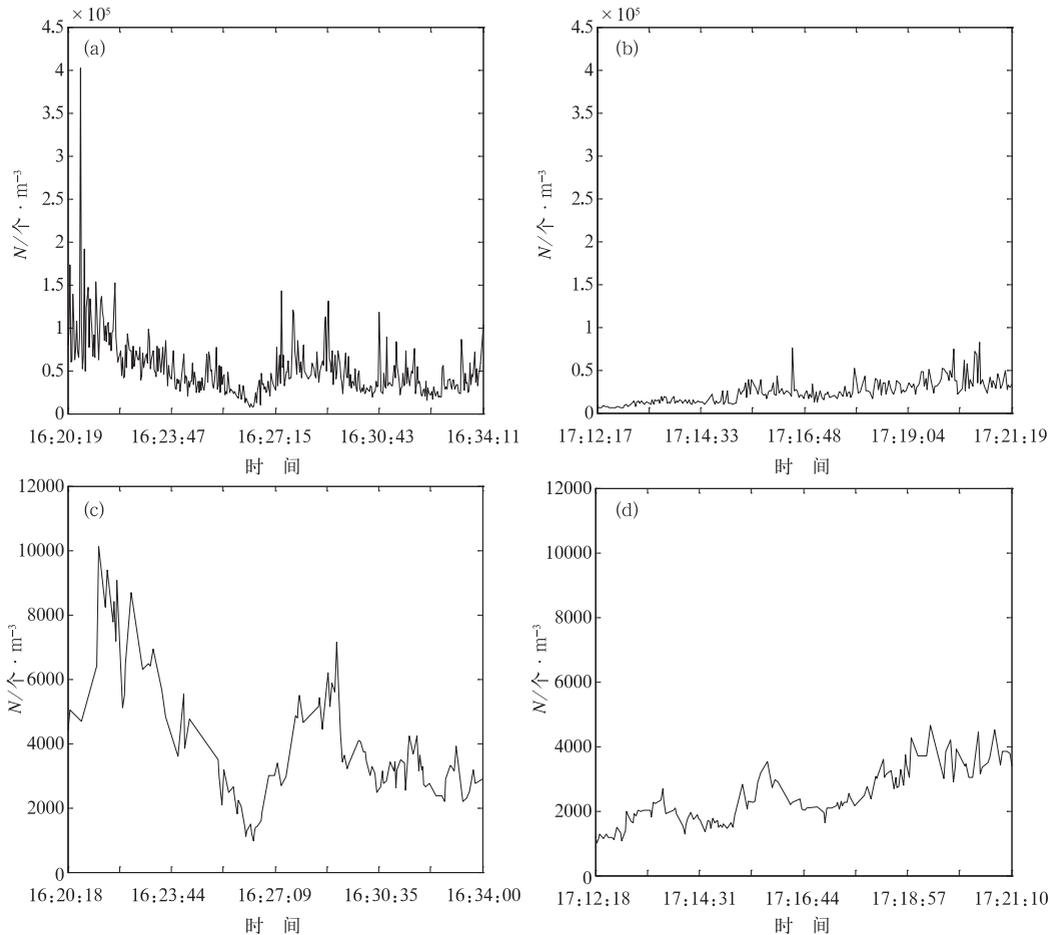


图 17 催化前 4500m 平飞和催化后 4200m 平飞数浓度随时间序列图

(a) 2D-C 催化前; (b) 2D-C 催化后; (c) 2D-P 催化前; (d) 2D-P 催化后

相似的变化特点,从临颖到平顶山粒子数浓度在不断减少的总体趋势下呈现高低起伏的状态,为同一块云系。但是在接近平顶山处,各微物理量的变化趋势均不同,此处 4500m 高度数浓度在自然起伏下有所增加,平均直径先增后减,云液态水含量变化趋势与数浓度一致,而 4200m 数浓度继续减小,平均直径有明显增大,云液态水含量值继续减小,二者截然不同的变化趋势认为是由于该区域处于飞机播撒区,此次作业对其产生影响。

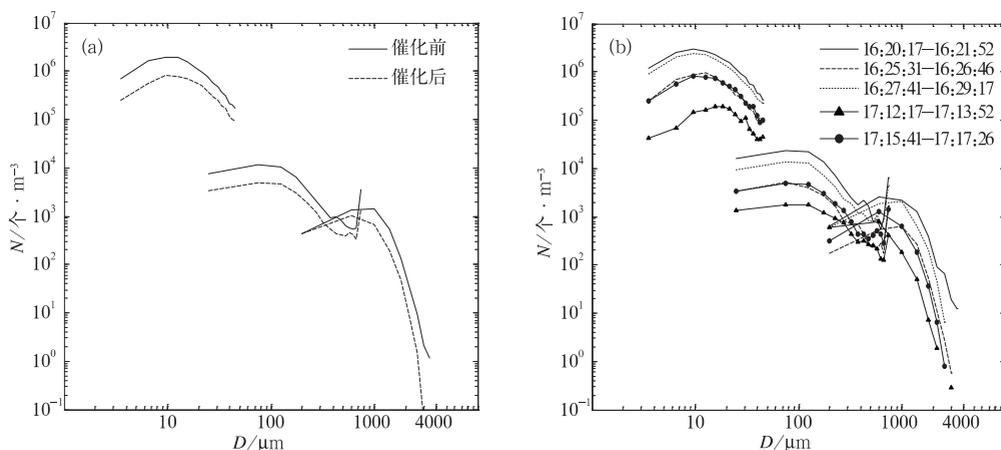


图 18 催化前 4500m 平飞和催化后 4200m 平飞

(a) 平均谱分布; (b) 时段内谱分布

## 5 小结

通过对 2005 年 3 月 21 日河南试验区飞机探测结果分析,得出以下结论:

(1) 综合观测资料表明在由许昌飞往临颖的 4200m 高度上,探测到的小云粒子的数浓度达到  $10^8$  量级,该量级相应的平均直径为  $5\mu\text{m}$  左右,表明此区域内小云粒子以过冷水滴形式存在。

(2) 5000m 高度平飞,催化后小云粒子数浓度比催化前减小一个量级,催化后小云粒子平均直径均值增加  $0.75\mu\text{m}$ ; 5000m 至

根据图 17 所示,在 4500m 和 4200m 高度平飞时大云粒子和降水粒子数浓度变化趋势与小云粒子基本一致,4500m 高度由临颖平飞至平顶山中部区域出现数浓度的波谷和波峰,4200m 高度由平顶山至临颖数浓度逐渐增大,得到催化前后即 4500m、4200m 平飞粒子谱分布及平飞过程中选择代表性时段(图 16a,图 16b 中水平实线指示)的谱分布(见图 18)。

4500m 催化后较之催化前小云粒子数浓度减小,平均直径变化幅度不大;4500m 至 4200m 催化后小粒子数浓度比催化前明显减小,且减小幅度远大于 5000m 至 4500m 高度,且平均直径均值增加  $3.19\mu\text{m}$ 。以上分析可以认为,AgI 催化剂在  $-9^\circ\text{C}$  (5000m) 的云层内播撒后很快产生冰晶,冰晶通过凝华增长和在下落过程中相互碰并增长,从而使小云粒子数浓度减小,平均直径增大。4500m 至 4200m 高度间小云粒子数浓度及其平均直径的变化幅度大于 5000m 至 4500m 高度,表明通过凝华、碰并增长的冰晶粒子下落过程中又不断与作业层下部云层

的云滴、冰晶发生碰并或粘连,致小云粒子数浓度进一步减小。由此破坏云内胶性稳定状态,以达到增加降水目的。

(3) 根据仪器测得各个高度飞行的粒子谱分布,发现谱分布接近且稳定,进一步说明探测云系为同一云系,仪器测得结果具有较高的可信度,认为本方案在对自然云探测和播云催化方面具有可行性。

(4) 结果表明,催化后云中雪晶和雨滴等大云粒子和降水粒子数浓度并未显著增长,综合分析认为催化后 5000m、4200m 平飞和 5000m~4200m 垂直飞方位需调整,对带状层状云播云探测方案需进一步改进。增强飞机飞行方向与探测带状云系移动方向一致性,根据风向、风速的变化对催化后播云层下方平飞、垂直飞方位在垂直高度上进行调整。

#### 参考文献

- [1] 李大山. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京:气象出版社. 2002:325-356.
- [2] 叶家东,范蓓芬. 人工影响天气的统计数学方法[M]. 北京:科学出版社. 1982:110-189.
- [3] William L. Woodley, Daniel Rosenfeld, Bernard A Silverman. Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part I: The demonstration experiment[J]. J Appl Meteor, 2003, 42:920-938.
- [4] William L. Woodley, Daniel Rosenfeld, Bernard A Silverman. Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part II: Exploratory analyses [J]. J Appl Meteor, 2003, 42:939-951.
- [5] Daniel Rosenfeld, William L. Woodley. The development and testing of a new method to evaluate the operational cloud-seeding Programs in Texas[J]. J Appl. Meteor, 2004, 249-263.
- [6] Daniel Rosenfeld, William L. Woodley. Effects of cloud seeding in West Texas: Additional results and new insights[J]. J Appl Meteor, 1993, 32:1848-1866.
- [7] 牛生杰,马铁汉,管乐娥,等. 宁夏夏季降水性层状云微结构观测分析[J]. 高原气象,1992,11(3):241-248.
- [8] 赵仕雄,陈文辉,杭洪宗. 青海东北部春季系统性降水高层云系微物理结构分析[J]. 高原气象,2002,21(3):281-287.
- [9] 苏正军,刘卫国,王广河. 青海一次春季降水过程的云物理结构分析[J]. 应用气象学报,2003,14(增刊):27-35.
- [10] 苏正军,黄世鸿,刘卫国. 一次华北冷涡降水的云物理飞机探测特征[J]. 气象,2000,26(6):16-20.
- [11] 李照荣,李荣庆,李宝梓. 兰州地区秋季层状云垂直微物理特征分析[J]. 高原气象,2003,22(6):583-589.
- [12] 李照荣,李宝梓,庞朝云,等. 甘肃省秋季层状云冰雪晶粒子特征个例分析[J]. 甘肃气象,2002,20(3):21-23.
- [13] 杨文霞,牛生杰,魏俊国,等. 河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究[J]. 高原气象,2005,24(1):84-90.
- [14] 彭亮,姚展予,戴进,等. 河南春季一次降水过程的宏微观物理特征分析[J]. 气象,2007,33(5):3-11.
- [15] 金华,王广河,游来光,等. 河南春季一次层状云降水云物理结构分析[J]. 气象,2006,32(10):3-10.
- [16] 张佃国,郭学良,付丹红,等. 2003年8—9月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究[J]. 大气科学,2007,31(4):596-610.
- [17] 党娟,王广河,刘卫国. 甘肃省夏季层状云微物理特征个例分析[J]. 气象,2009,35(1):24-36.
- [18] 李淑日. 西北地区云和降水微物理特征个例分析[J]. 气象,2006,32(8):59-63.
- [19] 李淑日,王广河,刘卫国. 降水性层状云微物理结构个例分析[J]. 气象,2001,27(11):17-21.
- [20] 王以琳,雷恒池. 冷云飞机人工引晶检验[J]. 大气科学,2003,27(5):929-938.
- [21] 周德平,宫福久,高建春,等. 一次飞机播云的微物理效应分析[J]. 气象科学,2004,24(4):405-412.
- [22] 金德镇,雷恒池,郑娇恒,等. 液态 CO<sub>2</sub> 人工引晶后云微物理和降水变化的观测分析[J]. 大气科学,2007,31(1):99-108.

# 于丽娟等：一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析

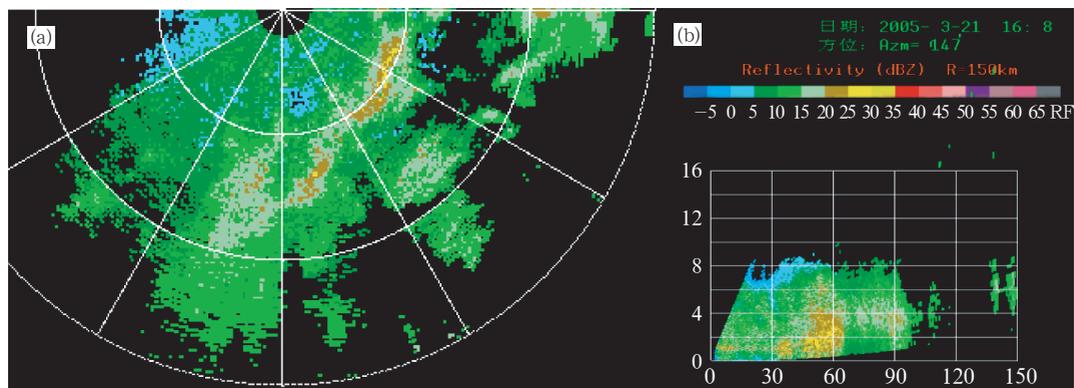


图 4 长葛车载C波段多普勒雷达回波  
(a) PPI, (b) RHI

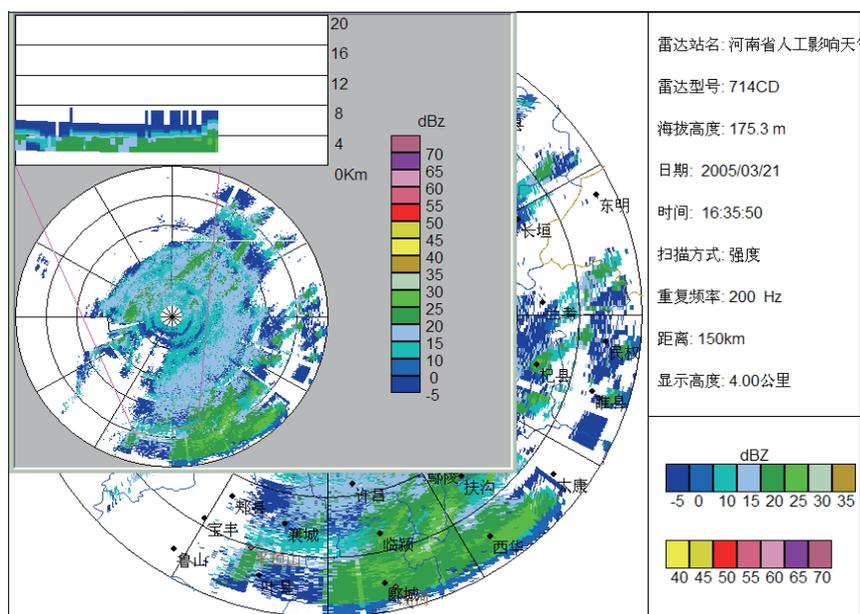


图 6 2005年3月21日16时河南省郑州站雷达回波