

金华, 黄梦宇, 于潇洵, 等. 2012. 一次飞机播撒吸湿性焰剂试验的微物理探测浅析 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 704–710. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.07. Jin Hua, Huang Mengyu, Yu Xiaowei, et al. 2012. Preliminary analysis of in-situ measurements in warm cloud after seeding with hygroscopic flares [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 704–710.

一次飞机播撒吸湿性焰剂试验的微物理探测浅析

金华^{1,2} 黄梦宇¹ 于潇洵³ 刘建忠¹ 何晖^{1,2} 马新成^{1,2}
张磊¹ 毕凯¹ 李黑平⁴

1 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

2 北京市气象局云降水物理研究与云水资源开发北京市重点实验室, 北京 100089

3 95959 部队气象科, 北京 100195

4 95820 部队气象台, 北京 102207

摘 要 2011 年夏季, 北京市人工影响天气办公室组织了吸湿性焰剂的飞机播撒试验, 选取八达岭长城西北的淡积云作为催化对象。试验期间, 使用装备了云探测设备的运 12 飞机进行播撒及云微物理探测。在 6 月 1 日的试验中, 运用差异化策略分别对不同的淡积云实施了催化, 探测发现云中出现了符合暖云增雨概念模型的微物理反应。随后在晴空区实施了烟羽探测试验, 通过在吸湿性焰剂烟羽区的穿刺飞行, 获得了正在扩散的吸湿性焰剂的粒子谱, 了解了播撒后扩散区的微物理特征。

关键词 暖云催化 吸湿性焰剂 烟羽 云滴谱

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0704-07

中图分类号 P481

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.07

Preliminary Analysis of In-situ Measurements in Warm Cloud after Seeding with Hygroscopic Flares

JIN Hua^{1,2}, HUANG Mengyu¹, YU Xiaowei³, LIU Jianzhong¹, HE Hui^{1,2}, MA Xincheng^{1,2},
ZHANG Lei¹, BI Kai¹, and LI Heiping⁴

1 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

2 Beijing Key Laboratory of Cloud, Precipitation and Water Resources, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

3 Meteorological Office, Unit 95959, Beijing 100195

4 Meteorological Observatory, Unit 95820, Beijing 102207

Abstract In summer 2011, a warm cloud modification experiment was performed by the Beijing Weather Modification Office. Cumulus humilis over the Great Wall at Beijing Badaling was selected as the seeding target cloud, and hygroscopic flares were ignited at the cloud base level. Seeding and in-situ observations were conducted by a Y-12 aircraft equipped with a seeding device and cloud physics probes. Different strategies were used in an experiment on 1 June. A microphysical response consistent with the warm cloud seeding conceptual model was observed after seeding. The plume of the flare was subsequently measured in a clear zone, and the particle size distribution of the hygroscopic flare was illustrated.

收稿日期 2012-08-29 收到, 2012-09-29 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41175007, 国家重点基础研究发展计划项目 2011CB403401, 国家自然科学基金项目 41205100, 公益性行业科研专项 GYHY200906025, 公益性行业科研专项 GYHY200806001-4

作者简介 金华, 男, 1976 年出生, 工程师, 主要从事人工影响天气方面的研究。E-mail: jinhuaawm@gmail.com, jinhuaawm@foxmail.com

Keywords Warm cloud modification, Hygroscopic flare, Plume of hygroscopic flare, Cloud droplet size distribution (DSD)

1 引言

对应于不同的自然云降水机制,存在冷云和暖云两种人工增雨技术。二者分别采用不同催化原理,使用不同性质的催化剂。人们主要利用冷云降水过程中的贝吉隆过程,通过播撒致冷剂、人工冰核等实现冷云增雨。在暖云形成降水的过程中,云滴主要通过重力碰并、随机碰并形成雨滴。因此暖云催化原理为设法加速云雨转化过程,尽快启动云中碰并机制。主要有 3 种暖云增雨概念模型 (Rosenfeld et al., 2010):

(1) “播撒雨胚”: 直接向云中播撒雨滴胚胎,迅速启动碰并过程。可成为雨滴胚胎的是特别巨大的云凝结核 (以下简称超巨核,尺度 $>10 \mu\text{m}$), 如研磨过的盐粉 (Biswas and Dennis, 1971; Silverman and Sukarnjanaset, 2000)。

(2) “竞争效应”: 在云底以下播撒大云凝结核 (大核,尺度接近 $1 \mu\text{m}$), 播撒的大核同自然云凝结核竞争,因前者吸收水汽能力更强,可有效降低云底过饱和度,进而减少云滴数浓度;加宽云滴谱,最终导致较大滴更快并合成为雨滴 (Cooper et al., 1997)。

(3) “尾端效应”: 通过在云中播撒巨大的云凝结核 (巨核,尺度介于 $1\sim10 \mu\text{m}$ 间), 直接增加云滴谱大尾端的云滴数,来加速云滴谱的加宽过程,导致雨的出现 (Segal et al., 2004)。

最早出现的概念模型是“播撒雨胚”, 20 世纪 60 年代我国用盐粉催化对流云就是基于该概念模型。但由于催化剂用量太大、腐蚀性强等原因,我国对这种暖云催化技术的研究未能继续 (苏正军等, 2009)。在分析“竞争效应”和“尾端效应”两种概念模型后, Rosenfeld et al. (2010) 指出: 竞争效应主要出现于云底以下,难以发生在云底以上;而尾端效应则只能发生于云中。根据“尾端效应”这一概念模型,设计了在暖云中播撒特制盐粉及示踪迹 (SF_6) 的试验,盐粉经过精细研磨,多数颗粒 (质量的 58%) 大小介于 $2\sim5 \mu\text{m}$ 间;播撒后发现云滴谱加宽,云中发生了“尾端效应”。

在对南非一家造纸厂上空的云进行探测时,意外发现在强上升气流中, -10°C 层竟存在直径为

$4\sim6 \text{ mm}$ 的大滴,随后的研究认为造纸厂排放的吸湿性粒子加速了云中的碰并。人们据此设计了基于“竞争效应”的吸湿性焰剂 (焰条) 播撒技术 (Mather et al., 1997)。这种技术已应用于南非、墨西哥等国的试验中 (苏正军等, 2009)。最近,在加利福尼亚外海利用吸湿性焰剂播撒技术实施了一次双机播撒试验,催化对象为一个厚实的海洋性层积云;试验中用飞机探测了微物理响应,对催化剂扩散烟羽作了穿刺观测,发现云中发生了“尾端效应” (Ghate et al., 2007)。

我国的人工增雨试验及作业多采用冷云增雨技术。这和我国北方的缺水现状有关,也反映了冷云增雨技术发展较完备。我国南方实施的人工影响天气活动逐年增多,加上我国北方夏季云底温度较高,难以使用以贝吉隆过程为基础的冷云催化技术,故很有必要开展暖云催化技术的研究 (苏正军等, 2009)。我国已研发出同国外类似的吸湿性焰剂 (焰条) 播撒技术。2011 年夏季,北京市人工影响天气办公室利用该技术组织了多次暖云播撒试验,为了突出播撒后的云微物理响应,便于探测检验,将播撒试验对象选定为淡积云。试验期间,使用同一架运 12 飞机进行播撒及云微物理探测,该飞机同时装备有焰条燃烧设备及云微物理探测设备。

2 试验设计

选择位于北京西北的八达岭长城上空作为播撒试验区域,探测飞机起降机场为沙河机场。试验中,除了温度、气压等常规气象探头外,还使用了美国 DMT 公司 (DROPLET MEASUREMENT TECHNOLOGIES, INC.) 生产的多种云降水及气溶胶探测设备,包括: 探测气溶胶的 SPP-200 型 PCASP (Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe, 探测范围: $0.1\sim3 \mu\text{m}$); 探测云及气溶胶的 CAS (Cloud and Aerosol Spectrometer, 探测范围: $0.61\sim50 \mu\text{m}$); 云凝结核计数器 (Cloud Condensation Nuclei Counter); 探测云粒子图像的 CIP (Cloud Imaging Probe, 探测范围: $25\sim1550 \mu\text{m}$) 等。由于 CAS 探测范围既包含云粒子,又包括部分气溶胶粒子,其探测值同以前较多使用的 FSSP 等云粒

子探头探测值难以直接比较,因此除烟羽探测分析外,均不分析CAS资料中小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的部分。

6月1日,八达岭长城西北出现淡积云;沙河本场上空也有淡积云,本场西北观测到有积雨云,故决定由一架运12飞机执行单机播撒、探测试验。试验中选取相互独立的初生淡积云作为试验对象,在云底以下播撒吸湿性焰剂,播撒之后入云观测。飞机播云试验后,还在无云区实施了吸湿性焰条的烟羽探测试验。试验在约2200 m高度进行,飞机边播撒边探测。试验时,同时点燃4根吸湿性焰剂焰条,燃烧产生的吸湿性焰剂小颗粒扩散后形成烟羽区。飞机先水平盘旋于烟羽区,以了解催化剂的水平扩散。随后缓慢上升以了解催化剂在上升气流作用下的垂直扩散。

3 探测结果

播撒试验中使用了陕西中天火箭技术有限责任公司生产的ZY-INY型吸湿性焰条,每根焰条重

500 g,燃烧后产生的吸湿性粒子主要成分为KCl和 CaCl_2 。前期的飞行焰条燃烧试验表明,飞机空速为60 m/s时,一根重500 g的焰条在1500~2500 m高度的燃烧时间约为6 min。探测中发现,本次试验时零度层的高度约为3500 m。

3.1 第一块云

从13:40至13:58,先在第一块淡积云云底以下播撒吸湿性焰剂,随后升高入云进行云微物理探测。4根焰条分两组点燃,时间分别为13:40(北京时间,下同)和13:48,播撒持续时间最长。前一组焰条燃烧时飞机在约3100 m盘旋(温度 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$);后一组焰条燃烧时飞机缓慢上升并接近云底(3700 m,温度 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$),准备入云探测。播撒过程中,飞机曾几次经过云底部位。

由图1可见,13:52云内主要为小云滴(直径 $<5\text{ }\mu\text{m}$,下同);13:57云中有一定数量的较大云滴(直径 $>31\text{ }\mu\text{m}$,下同)甚至大云滴(直径 $>50\text{ }\mu\text{m}$,下同);13:58的云同13:52类似,但云滴少,云区范围小,可能探测的是移动至此的积云边

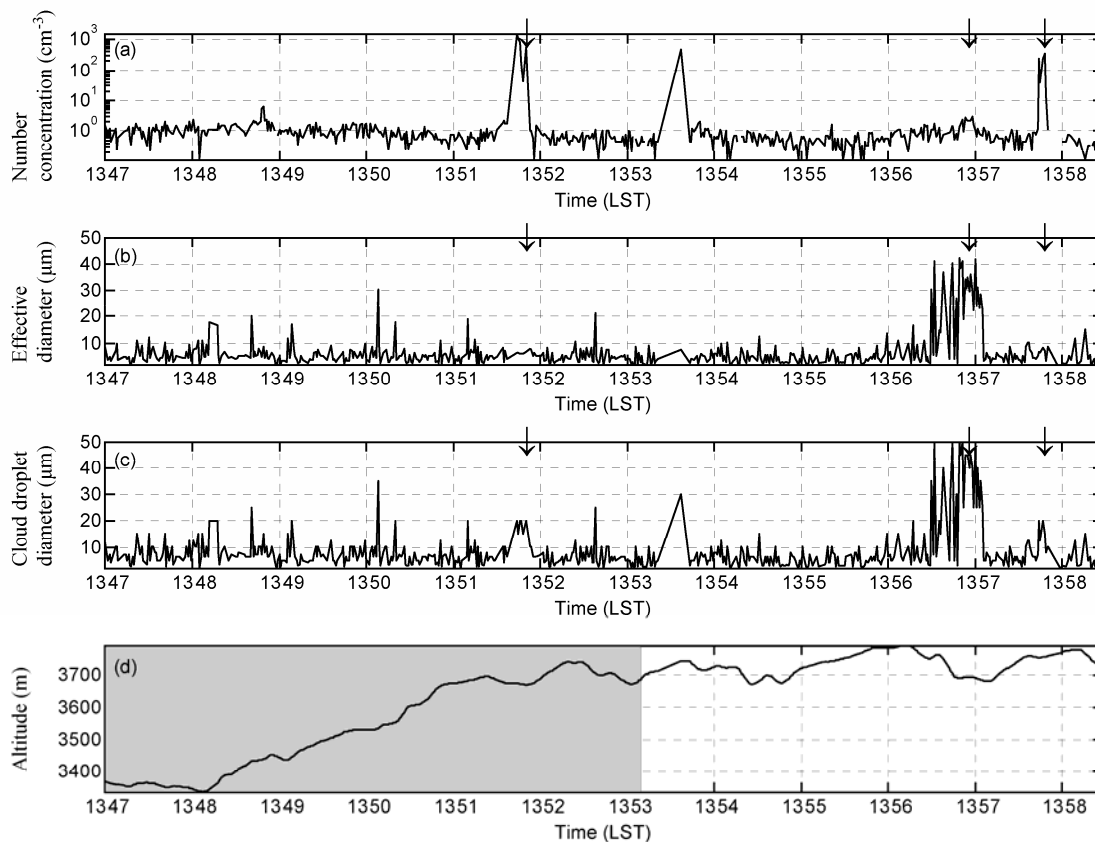


图1 播撒第一块云时的(a)云滴数浓度、(b)云滴有效直径、(c)最大云滴直径、(d)海拔高度变化(阴影表示播撒时间段;箭头为图6a中云滴谱出现的时间)

Fig. 1 Variations of the (a) cloud droplet number concentration, (b) cloud droplet effective diameter, (c) the maximum cloud droplet diameter, and (d) altitude after seeding in the first cumulus humilis (seeding time is marked by shading; the arrow denotes the time of the cloud droplet size distributions in Fig. 6a)

缘，或因蒸发等因素造成云滴偏少。

播撒高度水平风速为 14.5 m/s (如图 2 所示)，13:57 其位置可能处于催化影响区内；13:52 其位置可能处于催化影响区外围。

3.2 第二块云

第二块云的播撒位置在云底以下 (约 3500 m，

-1 °C)，14:01 开始，一次点燃 4 根吸湿性焰剂焰条，播撒强度最大。播撒完成后飞机爬高到约 4000 m (-3.5 °C) 入云探测。图 3 是本次探测中各变量的时间变化曲线。14:07 云内有大量小云滴及个别较大云滴；14:09 与 14:13 类似，云中有大量直径 > 10 μm 的云滴；14:18 前后云中既有大云滴、

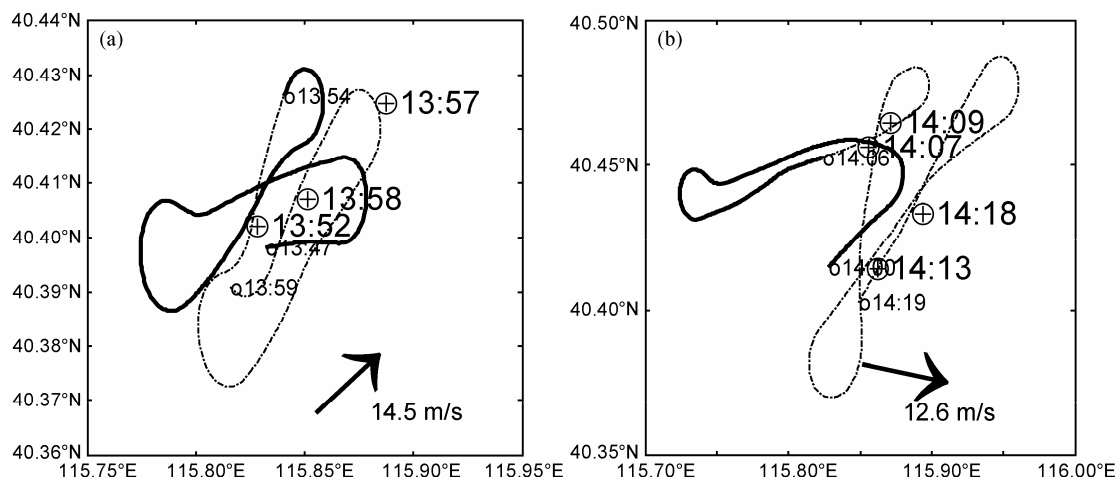


图2 播撒轨迹(粗实线)及探测 (a) 第一块淡积云和 (b) 第二块淡积云时的飞行轨迹(细点断线)(箭头为风向; ⊗ 为云区位置)

Fig. 2 Flight tracks of seeding (thick solid line) and observation (thin dotted line) in (a) the first cumulus humilis and (b) the second cumulus humilis (direction of the wind was indicated by an arrow and ⊗ denotes location of cloud field)

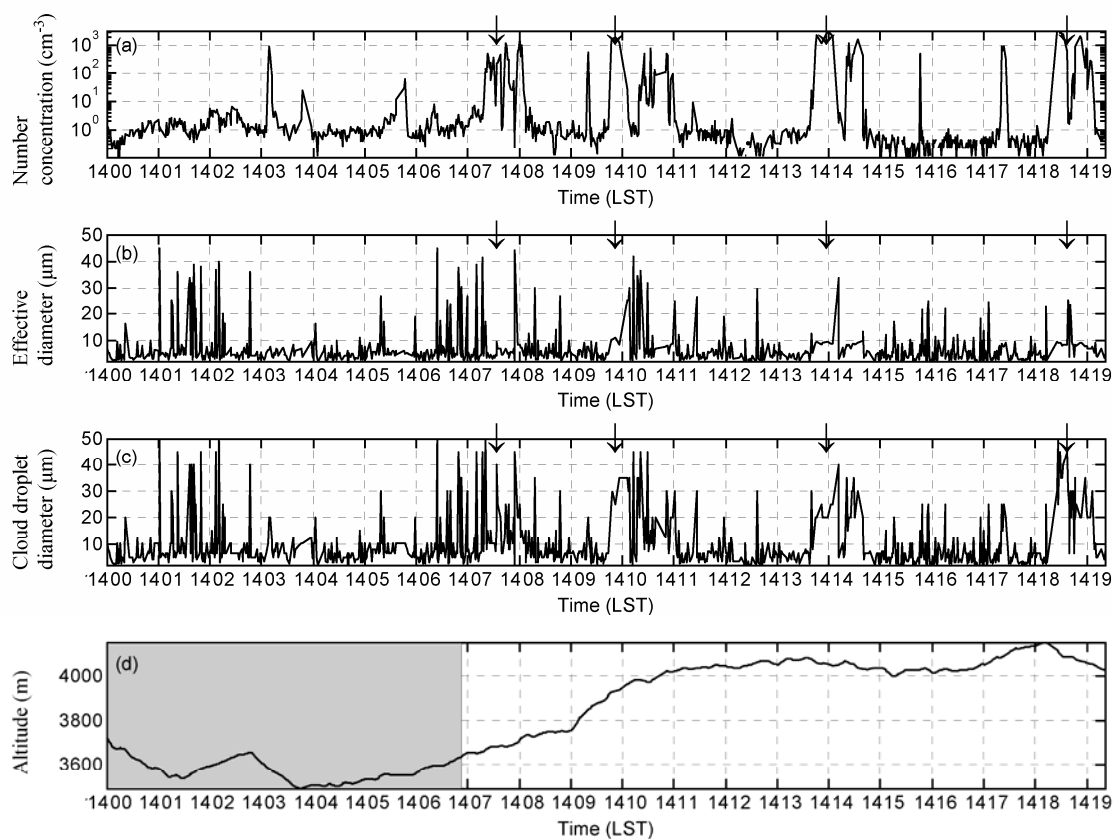


图3 同图1，但为第二块云(箭头是图6b中云滴谱出现的时间)

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for the second cumulus humilis (the arrow denotes the time of the cloud droplet size distributions in Fig. 6b)

也有数量众多直径 $<10\ \mu\text{m}$ 的云滴。从本次播撒探测轨迹的水平分布(图 2b)及风向可见, 14:07、14:09 及 14:13 时的位置可能处于催化影响区外围; 14:18 时的位置则位于较远的下风方, 处于催化影响区内。

3.3 吸湿性焰剂的烟羽

15:03 至 15:23 间, 在相对湿度小于 35% 的无云区实施了烟羽探测试验。播撒于 15:05 至 15:11 间进行, 同时用 PCASP、CAS 及云凝结核计数器进行探测。PCASP 测得的气溶胶粒子浓度在 15:08 至 15:14 间出现了 5 次峰值(图 4), 其后对应应有云凝结核浓度(过饱和度为 0.3%)峰值。因需将云凝结核吸入云凝结核计数器的云室, 待其吸湿长大为云滴后才能计数, 故其峰值晚于气溶胶粒子浓度的峰值。图 5a 有播撒高度的风向、风速及这些峰值出现的时间、位置等信息。

催化剂水平扩散分析: 15:11 至 15:12 间飞行的半圈长 3.6 km (空速约 60 m/s), 则其直径约为 2.3 km; 另计算得知图中最大圆周的直径约 2.7 km。以平均直径 2.5 km 作为催化剂扩散距离, 在水平风速为 16 m/s 时, 催化剂由播撒源到达飞行轨迹圆周的另一边约需 150 s, 因此, 15:05 播撒的催化剂通过水平扩散最早可于 15:07 到达下风方, 故确定 15:08

出现的第一个气溶胶粒子浓度峰值是扩散至此的催化剂烟羽。

合成催化剂粒子谱时, 因 CAS 及 PCASP 探测范围部分重叠, 仅使用了部分 PCASP ($0.12\sim0.6\ \mu\text{m}$) 及部分 CAS ($>0.68\ \mu\text{m}$) 谱资料。因几次峰值时刻催化剂扩散谱(以下简称八达岭谱)类似, 故仅以 15:10 的谱为例加以讨论。

图 5b 中另一个谱于 2009 年天津武清消暖雾试验时测得(以下简称武清谱)(金华等, 2012)。消暖雾及本次播撒试验的催化剂由同一厂家生产, 成分类似。测消暖雾催化剂谱时, 探头距播撒源仅约 10 m; 本次探测中催化剂扩散距离则超过 2 km, 故武清谱中小粒子浓度较八达岭谱高约一个量级; 且八达岭谱的谱宽较大。

同 Ghate et al. (2007) 晴空测得的催化剂谱相比, 八达岭谱中小粒子部分较前者小约一个量级, 谱宽也较大。同南非试验中的催化剂干粒子谱相比, 八达岭谱小粒子部分较前者也小一个量级, 但谱宽接近。

4 分析讨论

4.1 探测云区是否位于催化剂输送范围内

以第一块淡积云为例, 讨论所探测的云区是否

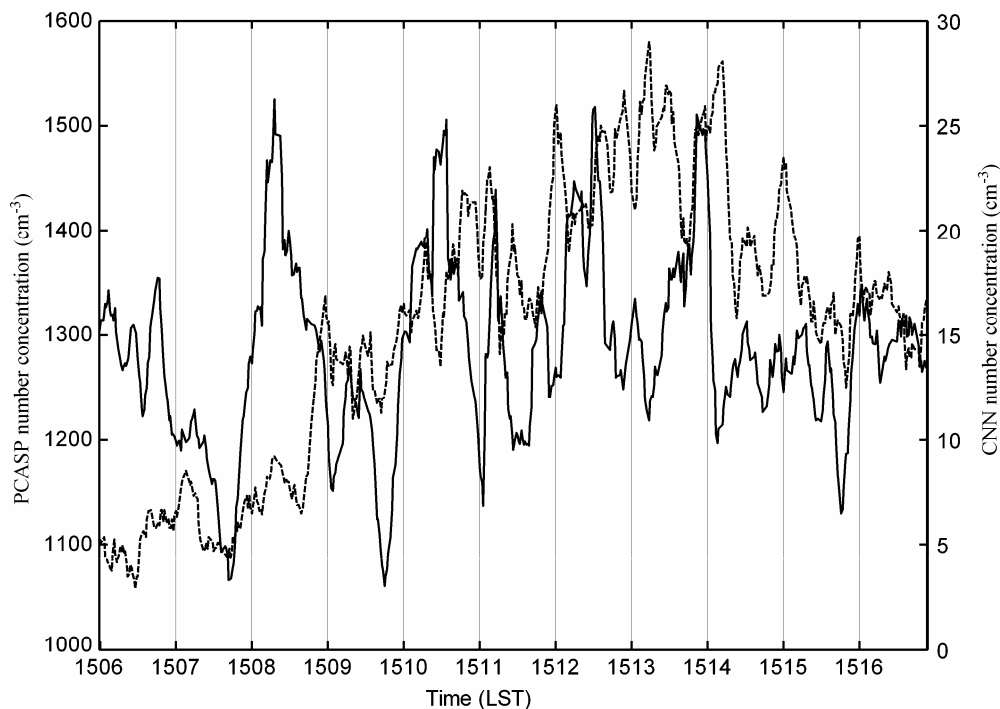


图4 烟羽探测期间气溶胶数浓度(实线)、过饱和度为0.3%条件下的云凝结核数浓度(虚线)的变化

Fig. 4 Variations of the aerosol number concentration (solid line) and the cloud condensation nuclei (CCN) number concentration (dashed line) during the plume detection experiment. The CCN number concentration was measured at a supersaturation of 0.3%

位于催化剂输送范围内。在第一块云中探测到 3 个云区。13:59 (以探测时间表示所测云区的位置,下同)位于播撒源区中心,13:57 至 13:59 一线同风向一致(图 2a)。如果以 13:57 至 13:59 的距离(7.2 km, 空速 60 m/s)作为催化剂扩散距离,催化剂由 13:59 扩散到 13:57 需要的时间约为 500 s(风速 14.5 m/s);则要求催化剂播撒不能晚于 13:48。实际播撒时,13:48 开始实施第二组播撒,故催化剂通过水平扩散可于 13:57 到达图中位置。另外,播撒高度同探测高度相差约 300 m,若催化剂经 500 s 扩散至探测高度,要求上升气流的垂直速度不能小于 0.6 m/s,夏季淡积云下上升气流完全满足该要求。从上面简单计算知,探测时 13:57 的云区确实位于催化剂的输送范围内。

4.2 催化剂播撒后可能发生的变化有何特征

由催化剂粒子谱知,燃烧生成的吸湿性焰剂粒

子中 $10\ \mu\text{m}$ 以上的超巨核极少,主要是 $1\ \mu\text{m}$ 以下的大核及少量的巨核。因此播撒吸湿性焰剂后,可能于云下发生“竞争效应”,也可能于云中发生“尾端效应”;但云中不可能出现类似“播撒雨胚”的效应。

“竞争效应”发生后,因人工核争食自然核水气,小云滴明显减少,云滴总数减少;出现少量较大云滴,云滴谱谱宽加宽,出现第二峰值;即云滴谱出现“低头翘尾”,13:57 的云滴谱就出现了该现象。而“尾端效应”发生时,仅大云滴数发生变化,云滴谱只会加宽谱宽,出现第二峰值,即云滴谱出现“抬头翘尾”现象。

4.3 催化后云中是否出现催化响应

淡积云试验的催化对象是初生淡积云,由探测获得的云滴谱发现,催化影响区外围的初生淡积云(13:52、13:58、14:07、14:09、14:13,图 6)中未

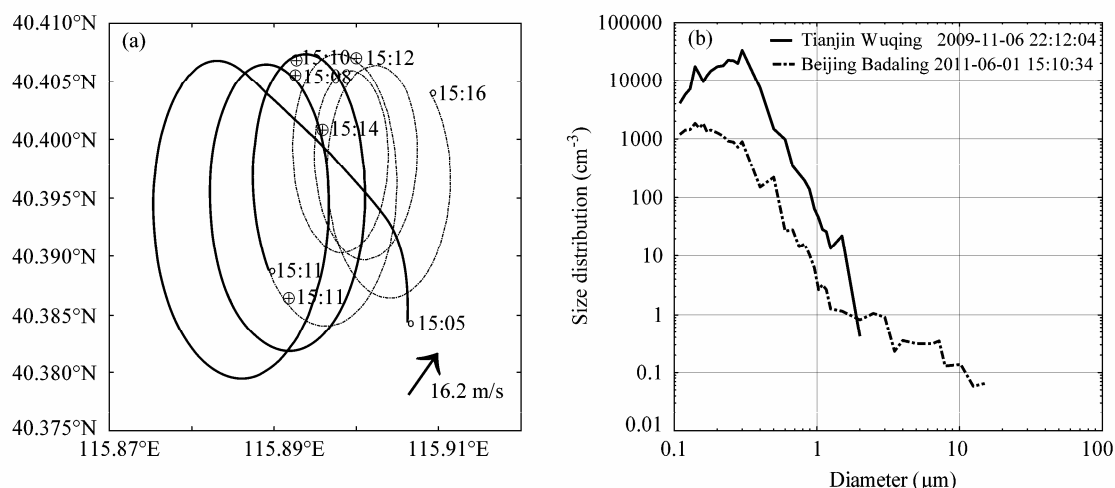


图5 (a) 烟羽探测位置 (●) 及 (b) 扩散中的吸湿性焰剂粒子谱

Fig. 5 (a) Location of the plume detection experiment (●) and (b) the particle size distribution of hygroscopic flare

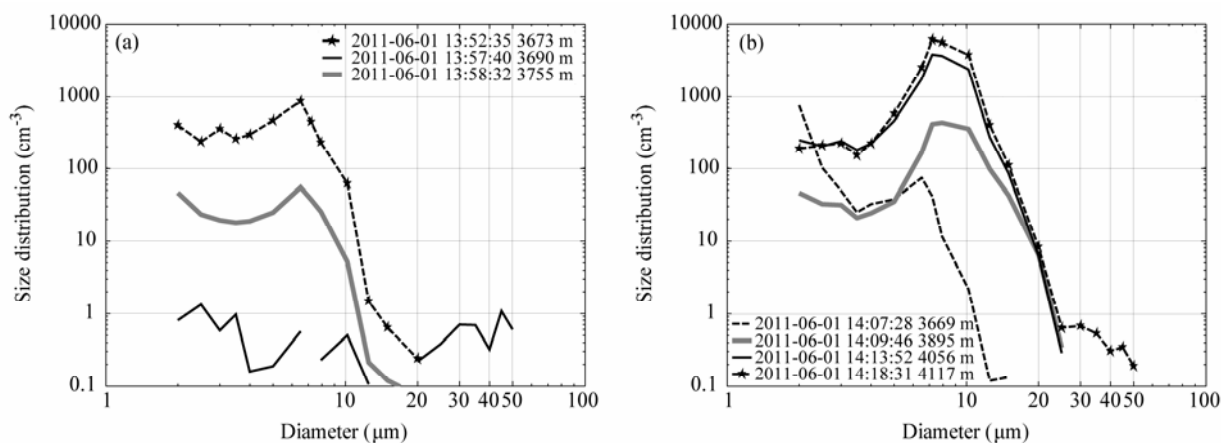


图6 不同时间在 (a) 第一块淡积云和 (b) 第二块淡积云测得的云滴谱

Fig. 6 Cloud droplet size distributions measured in (a) the first cumulus and (b) the second cumulus at different time

观测到较大云滴,同期的 CIP 资料中未发现毛毛雨滴(直径 $>100\ \mu\text{m}$)及雨滴(直径 $>1000\ \mu\text{m}$)。催化开始后约 20 min,催化影响区内云滴谱谱宽加宽,且探测到较大云滴(13:57、14:18,图 6),同期的 CIP 资料中发现了毛毛雨滴及雨滴。因两次云试验中,催化影响区外围(边缘)及非催化影响区云滴谱谱宽较窄,均未发现直径大于 $31\ \mu\text{m}$ 的大滴;而催化影响区云滴谱谱宽较宽、均发现了直径大于 $31\ \mu\text{m}$ 的大滴,故可确定淡积云试验中出现了催化响应。

13:57 第一块淡积云的云滴谱(如图 6a 所示)出现了“低头翘尾”现象(小云滴减少,大云滴增加,谱宽加宽)。该变化特征同“竞争效应”后应当出现的变化特征一致,可认为云中的催化响应是通过“竞争效应”产生的。

模式模拟表明:同时播撒大核和巨核时,“尾端效应”为主要原因,“竞争效应”作用很小 (Segal et al., 2007)。加利福尼亚外海的播撒试验(以下简称加州试验)验证了前述模拟结果 (Ghate et al., 2007)。加州试验时催化剂播撒强度极大,两次播撒共在云中燃烧了 12 根吸湿性焰剂焰条。本次播撒试验催化第二块云时,催化剂播撒强度也很大,1 次燃烧 4 根焰条;且边播撒边上升,播撒结束时已进入云中。因此第二块云的催化同加州试验相似,具备了“尾端效应”发生的宏观条件。在第二块云的云滴谱中,14:18 处于催化影响区内,其云滴谱特征同 13:57 不同(小云滴没有减少,大云滴增加,谱宽加宽)。因此不能确定第二块云的催化响应是通过“竞争效应”产生的。

5 结论

(1) 通过该次飞机播撒试验,探测到了扩散后的吸湿性焰剂粒子谱;其谱宽比消雾中得到的催化剂粒子谱谱宽大,小粒子浓度小约一个量级;同 Ghate et al. (2007) 测得的催化剂粒子谱相比,本次飞行探测谱小粒子部分比前者小一个量级,谱宽也较大。同南非试验中的催化剂干粒子谱相比,本次飞行测得的谱小粒子部分较前者也小一个量级,但谱宽接近。

(2) 淡积云催化后,催化影响区出现了微物理

响应,其表现如下:云滴谱加宽,出现直径大于 $31\ \mu\text{m}$ 的大云滴、毛毛雨滴甚至小雨滴等;催化影响区外围则未观测到前述现象。

(3) 第一块云催化时,催化影响区边缘以小云滴为主,大云滴少,谱宽较窄;催化影响区的云中小云滴很少,大云滴较多,谱宽加宽。这一特征同“竞争效应”后应当出现的云微物理特征一致。第一块云的催化响应可能通过“竞争效应”产生。

(4) 经不同方案催化后,两块淡积云中的催化响应或是通过不同物理机制形成的。

致谢 感谢陈跃提供飞机焰条资料。

参考文献 (References)

- Biswas K R, Dennis A S. 1971. Formation of a rain shower by salt seeding [J]. *J. Appl. Meteor.*, 10 (4): 780–784.
- Cooper W A, Bruintjes R T, Mather G K. 1997. Calculations pertaining to hygroscopic seeding with flares [J]. *J. Appl. Meteor.*, 36 (11): 1449–1469.
- Ghate V P, Albrecht B A, Kollias P, et al. 2007. Cloud seeding as a technique for studying aerosol–cloud interactions in marine stratocumulus [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: 5.
- 金华, 何晖, 张蕾, 等. 2012. 人工消雾试验中的雾微物理响应 [J]. *热带气象学报*, 28 (2): 228–236. Jin Hua, He Hui, Zhang Qiang, et al. Analyses of a microphysical response to the seeding in two artificial dissipation cases of fog [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 28 (2): 228–236.
- Mather G K, Terblanche D E, Steffens F E, et al. 1997. Results of the South African cloud-seeding experiments using hygroscopic flares [J]. *J. Appl. Meteor.*, 36 (11): 1433–1447.
- Rosenfeld D, Axisa D, Woodley W, et al. 2010. A quest for effective hygroscopic cloud seeding [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49 (7): 1548–1562.
- Segal Y, Khain A, Pinsky M, et al. 2004. Effects of hygroscopic seeding on raindrop formation as seen from simulations using a 2000-bin spectral cloud parcel model [J]. *Atmospheric Research*, 71 (1–2): 3–34.
- Segal Y, Pinsky M, Khain A. 2007. The role of competition effect in the raindrop formation [J]. *Atmospheric Research*, 83 (1): 106–118.
- Silverman B A, Sukarnjanaset W. 2000. Results of the Thailand warm-cloud hygroscopic particle seeding experiment [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (7): 1160–1175.
- 苏正军, 郑国光, 鄯大雄. 2009. 吸湿性物质催化云雨的研究进展 [J]. *高原气象*, 28 (1): 227–232. Su Zhengjun, Zheng Guoguang, Feng Daxiong. 2009. The review of hygroscopic seeding [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (1): 227–232.